

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 11(184) ✧ 2015

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Журнал выпускается при научно-методическом руководстве Отделения нанотехнологий
и информационных технологий Российской академии наук

Журнал включен в перечень научных и научно-технических изданий ВАК России,
в систему Российского индекса научного цитирования и реферируется в базе данных INSPEC

Главный редактор

Мальцев П. П., д.т.н., проф.

Зам. гл. редактора

Лучинин В. В., д.т.н., проф.

Шур М., д.ф.-м.н., проф. (США)

Редакционный совет:

Аристов В. В., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН
Асеев А. Л., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН
Гапонов С. В., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН
Каляев И. А., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН
Квардаков В. В., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН
Климов Д. М., д.т.н., проф., акад. РАН
Ковальчук М. В., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН
Нарайкин О. С., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН
Никитов С. А., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН
Рыжий В. И., д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. РАН (Япония)

Сауров А. Н., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН
Сигов А. С., д.ф.-м.н., проф., акад. РАН
Чаплыгин Ю. А., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН
Шевченко В. Я., д.х.н., проф., акад. РАН

Редакционная коллегия:

Абрамов И. И., д.ф.-м.н., проф. (Беларусь)
Агеев О. А., д.т.н., проф.
Андреев А., к.ф.-м.н., (Великобритания)
Андриевский Р. А., д.х.н., проф.
Антонов Б. И.
Астахов М. В., д.х.н., проф.
Быков В. А., д.т.н., проф.
Горнев Е. С., д.т.н., проф.
Градецкий В. Г., д.т.н., проф.
Кальнов В. А., к.т.н.
Карякин А. А., д.х.н., проф.
Колобов Ю. Р., д.т.н., проф.
Кузин А. Ю., д.т.н., проф.
Панич А. Е., д.т.н., проф.
Петросянц К. О., д.т.н., проф.
Петрунин В. Ф., д.ф.-м.н., проф.
Пожела К., д.ф.-м.н. (Литва)
Путилов А. В., д.т.н., проф.
Телец В. А., д.т.н., проф.
Тимошенков С. П., д.т.н., проф.
Тодуа П. А., д.т.н., проф.
Шубарев В. А., д.т.н., проф.

Отв. секретарь

Лысенко А. В.

Редакция:

Григорин-Рябова Е. В.
Чугунова А. В.

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

Издается с 1999 г.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Лабунов В. А., Романова И. А.
Моделирование резонансно-туннельных диодов на основе графена на
подложках различного типа 3

Раткин Л. С. Методы компьютерной стеганографии для обеспечения
информационной безопасности смарт-микросистем 11

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Милованов Р. А., Ерофеева Е. В. Современные и перспективные ионные
источники для систем с фокусированным ионным пучком 20

Лукичев В. Ф., Шиколенко Ю. Л. Современная элементная база запо-
минающих устройств 40

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

Осипович В. С., Яшин К. Д., Шонтя В. П., Серяков А. П. МЭМС для
диагностики возбудителей заболеваний 54

Аннотации на русском и английском языках с 1999 г. по настоящее время находятся
в свободном доступе на сайте журнала (<http://microsystems.ru>; <http://novtex.ru/nmst/>)
и научной электронной библиотеки (<http://elibrary.ru>). Электронные версии
полнотекстовых статей расположены на сайте журнала: с 1999 по 2013 г. в разделе
"АРХИВ".

ПОДПИСКА:

по каталогу Роспечати (индекс 79493);
по каталогу "Пресса России" (индекс 27849)
в редакции журнала (тел./факс: (499) 269-55-10)

Адрес для переписки:

107076 Москва,
Стромынский пер., д. 4
e-mail: nmst@novtex.ru

Journal of NANO- and MICROSYSTEM TECHNIQUE

NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEHNIKA

ISSN 1813-8586

№ 11

(184)

2015

Maltsev P. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof. — **CHIEF EDITOR**
Luchinin V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

DEPUTY CHIEF EDITOR

Shur M. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. (USA) —
DEPUTY CHIEF EDITOR

Editorial council:

Aristov V. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Aseev A. L., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS
Chaplygin Ju. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Gaponov S. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Kaljaev I. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Klimov D. M., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. RAS
Kovalchuk M. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Kvardakov V. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Narajkin O. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Nikitov S. A., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Ryzhii V. I. (Japan), Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.,
Cor.-Mem. RAS
Surov A. N., Dr. Sci. (Tech.), Prof., Cor.-Mem. RAS
Shevchenko V. Ya., Dr. Sci. (Chem.), Prof., Acad. RAS
Sigov A. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Acad. RAS

Editorial board:

Abramov I. I. (Belorussia), Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Ageev O. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Andreev A. (UK), Cand. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Andrievskii R. A., Dr. Sci. (Chem.), Prof.
Antonov B. I.
Astahov M. V., Dr. Sci. (Chem.), Prof.
Bykov V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Gornev E. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Gradetskiy V. G., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Kalnov V. A., Cand. Sci. (Tech.)
Karjakin A. A., Dr. Sci. (Chem.), Prof.
Kolobov Ju. R., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Kuzin A. U., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Panich A. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Petrosjants C. O., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Petrinin V. F., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Pozhela K. (Lithuania), Dr. Sci. (Phys.-Math.)
Putilov A. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Shubarev V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Telets V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Timoshenkov S. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Todua P. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Executive secretary:

Lysenko A. V.

Editorial staff:

Chugunova A. V.
Grigorin-Ryabova E. V.

Our:

Web: www.microsystems.ru/eng;
e-mail: nmst@novtex.ru

To subscribe, please contact with:

JSC "MK-Periodica":
Tel: +7 (495) 672-7012
Fax: +7 (495) 306-3757
E-mail: import@periodicals.ru

The Journal is included in the list
of the Higher Attestation Commission
of the Russian Federation,
in the Russian system of science citation index
and INSPEC data base

Published since November 1999

CONTENT

SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

Abramov I. I., Kolomejtseva N. V., Labunov V. A., Romanova I. A. Simulation of Graphene Resonant Tunneling Diodes on the Substrates of Various Types 8

Rathkeen L. S. Methods of Computer Steganography for Provision of Information Security for Smart-Microsystems 16

MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

Milovanov R. A., Erofeyeva E. V. Next-Generation and Present-Day Ion Sources for the Focused Ion Beam Equipment 31

Lukichev V. F., Shikolenko Yu. L. Modern Element Base of the Storage Devices 49

APPLICATION OF MNST

Osipovich V. S., Yashin K. D., Sontea V. P., Sereakov A. P. MEMS for Pathogens Diagnostic 60

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

УДК 621.382

И. И. Абрамов, д-р физ.-мат. наук, проф., **Н. В. Коломейцева**, науч. сотр.,
В. А. Лабунов, д-р техн. наук, академик НАНБ, проф., главн. науч. сотр., **И. А. Романова**, науч. сотр.,
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск,
Республика Беларусь
E-mail: nanodev@bsuir.edu.by

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДОВ НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА НА ПОДЛОЖКАХ РАЗЛИЧНОГО ТИПА

Поступила в редакцию 16.07.2015 г.

С использованием разработанных численных моделей проведено моделирование резонансно-туннельных диодов (РТД) на основе графена на подложках карбида кремния и гексагонального нитрида бора. Исследовано влияние различных факторов на вольт-амперные характеристики. Показана важность использования самосогласованного расчета при моделировании РТД на основе графена с протяженными приконтактными областями.

Ключевые слова: резонансно-туннельный диод, графен, карбид кремния, гексагональный нитрид бора, уравнение Шредингера, численная модель, моделирование

Введение

Графен вследствие своих уникальных электрических, магнитных, оптических, тепловых и механических свойств является одним из наиболее перспективных наноматериалов для самых различных применений [1–3], в частности для разработки приборных структур наноэлектроники. Так, в настоящее время проводятся интенсивные исследования приборов на эффекте резонансного туннелирования [3].

К сожалению, основной недостаток графена, затрудняющий его использование в электронике, — отсутствие запрещенной зоны. Существует несколько методов зонной инженерии для получения запрещенной зоны в структурах, включающих графен. Перспективным считается применение многослойного графена, а также подложек различного типа [3].

Для описания электронного транспорта в графене, строго говоря, необходимо использовать уравнение квантовой электродинамики [4], однако в ряде случаев (в том числе отмеченных) допустимо применение более простых уравнений нерелятивистской квантовой механики (см., например, [5]).

Целью работы является моделирование вольт-амперных характеристик (ВАХ) резонансно-туннельных диодов (РТД) на основе графена на подложках карбида кремния (SiC) и гексагонального нитрида бора (h-BN) с использованием предложенных численных моделей.

Численные модели

Среди основных квантово-механических формализмов волновых функций, матриц плотности, функций Вигнера и функций Грина, используемых при моделировании РТД, наибольшей экономичностью характеризуются модели формализма волновых функций [6]. Именно этот формализм и применяли в работе.

Предложенная численная модель 1 основана на использовании уравнения Шредингера, а именно

$$-\frac{\hbar^2}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{m^*} \frac{\partial}{\partial x} \psi \right) + U\psi = E\psi, \quad (1)$$

где потенциальная энергия U задавалась с помощью соотношения

$$U = -q\Phi + E_C, \quad (2)$$

а E_C характеризует изгиб зоны проводимости, который равен 0 для потенциальной ямы; $\hbar$ — постоянная Планка, деленная на 2π ; x — пространственная координата; m^* — эффективная масса электрона; ψ — волновая (огibaющая) функция; E — энергия электрона; Φ — электростатический потенциал, который определяется прикладываемым к структуре смещением; q — заряд электрона.

Конечно-разностную аппроксимацию уравнения Шредингера для внутренних узлов сетки пространственной дискретизации и для точек границ раздела осуществляли с применением интегро-интерполяционного подхода Тихонова—Самарского [7]. Полученные в результате аппроксимации соотношения приведены в работах [8, 9].

Важным при моделировании нанoeлектронных приборов является учет их взаимодействия с внешней средой. В разработанной модели возможен учет внешних граничных условий общего вида:

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} + a\psi = b, \quad (3)$$

где a и b — коэффициенты. Аппроксимация граничных условий может быть осуществлена различными методами [10]. В разработанной модели возможно использование двух методов аппроксимации внешних граничных условий: метода внутренних граничных условий; метода фиктивной точки. Целесообразность этого связана с тем, что они характеризуются различным порядком аппроксимации.

В численной модели аппроксимация уравнения Шредингера возможна как на равномерной, так и неравномерной сетках пространственной дискретизации. При построении сетки необходимо учитывать такую особенность резонансно-туннельной структуры, как наличие границ раздела двух сред. Поэтому сетку пространственной дискретизации необходимо строить таким образом, чтобы узлы сетки приходились именно на границы раздела. Это условие является необходимым при построении как равномерной, так и неравномерной сеток.

Исходными данными для расчета шага равномерной сетки являются геометрические размеры областей структуры и начальное число шагов сетки, которое затем корректируется в процессе вычисления шага. Основным критерием для выбора шага равномерной сетки является разбиение каждой области на целое число шагов при максимально возможной близости общего числа шагов сетки к начальному. Особенность равномерной сетки заключается в том, что для структур, размеры областей которых отличаются значительно, необходимо, как правило, переход к более густой сетке, а

это приводит к существенному увеличению времени счета.

В численной модели предусмотрена также дискретизация уравнения Шредингера для случая неравномерной сетки, что в итоге может приводить к повышению экономичности модели, причем существенному. Исходными параметрами для построения неравномерной сетки являются минимальный шаг сетки, геометрические размеры областей структуры и коэффициент неоднородности сетки, который может варьироваться в диапазоне значений от 1 (переход к равномерной сетке) до 1,7.

Для описания формы барьера, кроме линейной, применяли также гиперболическую аппроксимацию [11, 12]. Аппроксимацию проводили не только для барьеров, но и для квантовой ямы между ними. В результате модифицированный исходный потенциальный профиль описывался соотношением

$$E_C = H_{b0} \mp \beta \frac{w_b^2}{x(w_b - x)}, \quad (4)$$

где H_{b0} — высота эквивалентного прямоугольного барьера, знак минус соответствует области барьера, а знак плюс — области ямы; β — коэффициент; w_b — ширина барьера; x — координата для барьера, причем здесь $x \in (0, w_b)$. В граничных точках возможно деление на 0, поэтому для описания потенциального профиля непосредственно вблизи граничных точек применяли линейную аппроксимацию.

В результате конечно-разностной аппроксимации уравнения Шредингера задача сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений вида:

$$A\psi = F, \quad (5)$$

где A — трехдиагональная матрица; ψ — вектор-столбец, включающий значения ψ_i в узлах сетки пространственной дискретизации; F — вектор-столбец правых частей. Для решения (5) используется метод Гаусса (возможно применение трех различных алгоритмов его реализации). Результатом решения являются значения волновой функции в узлах сетки пространственной дискретизации для заданной энергии падающей частицы и приложенного напряжения. Разработанная модель также позволяет рассчитать коэффициент прохождения и на его основе плотность тока для резонансно-туннельных структур с произвольным числом барьеров.

В качестве численной модели 2 использовали комбинированную однозонную модель работы [12], адаптированную для случая резонансно-туннельных приборных структур на основе графена. По-

этому опишем ее кратко. В модели также учитывается только зона проводимости. Первоначально задание потенциала в модели возможно с помощью нескольких аппроксимаций [12]. В данной работе для зонной структуры двухслойного графена применяли аппроксимацию потенциального профиля с усредненным значением потенциала на гетерограницах вида

$$U_i = \frac{U_{i-1} + U_{i+1}}{2}, \quad (6)$$

где U_i — значение потенциала непосредственно на гетерогранице (точка с индексом i); U_{i-1} , U_{i+1} — значения потенциала по разные стороны барьера.

Активная область определяется выбором границ раздела "сшивки" областей, в которых используются полуклассический и квантово-механический подходы. Для рассматриваемых структур на основе графена в активную область входят потенциальные барьеры и расположенная между ними квантовая яма.

Для учета эффектов сильного легирования при контактных областях применяют больцмановскую аппроксимацию статистики Ферми—Дирака [7]. В этом случае концентрация электронов задается соотношением

$$n = n_{ie} \exp(q(\Phi - F_n)/k_B T), \quad (7)$$

где n_{ie} — эффективная собственная концентрация; F_n — квазипотенциал Ферми электронов; k_B — постоянная Больцмана; T — температура.

Для нахождения потенциала на первом этапе в модели необходимо решить систему уравнений Шредингера (1) и Пуассона вида

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_S \epsilon_0 \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) = -q(N_D - n), \quad (8)$$

где ϵ_S — относительная диэлектрическая проницаемость среды; ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума; N_D — концентрация ионизированных доноров; n — концентрация электронов.

Линеаризацию уравнения Пуассона осуществляли по методу Ньютона.

На втором этапе необходимо решить только уравнение Шредингера для зоны проводимости. На основе полученных волновых функций рассчитываем коэффициент прохождения. Уровень Ферми задается перед началом расчета тока, проходящего через исследуемую структуру. Ток рассчитывается на основе формулы Тсу—Есаки.

Разработанные модели включены в систему моделирования нанoeлектронных устройств NANODEV [9, 13], предназначенную для ПЭВМ.

Результаты моделирования

Моделирование электрических характеристик (зависимость плотности тока от напряжения, в дальнейшем просто ВАХ) РТД на основе графена на подложках SiC и h-BN осуществляли с применением описанных численных моделей. Структура РТД и соответствующая зонная диаграмма при нулевом приложенном смещении V показана на рис. 1.

На рис. 2 приведены результаты расчетов по модели 1 ВАХ РТД 1 на графене и подложке SiC.

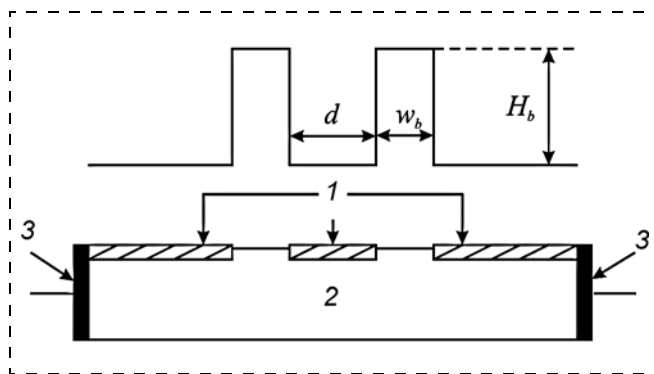


Рис. 1. Структура РТД на основе графена и энергетическая диаграмма зоны проводимости: 1 — графен; 2 — подложка; 3 — контакты; d — ширина квантовой ямы; w_b — ширина потенциального барьера; H_b — высота потенциальных барьеров

Fig. 1. RTD structure based on graphene and conduction band energy diagram: 1 — graphene; 2 — substrate; 3 — contacts; d — well width; w_b — barrier width; H_b — barrier height

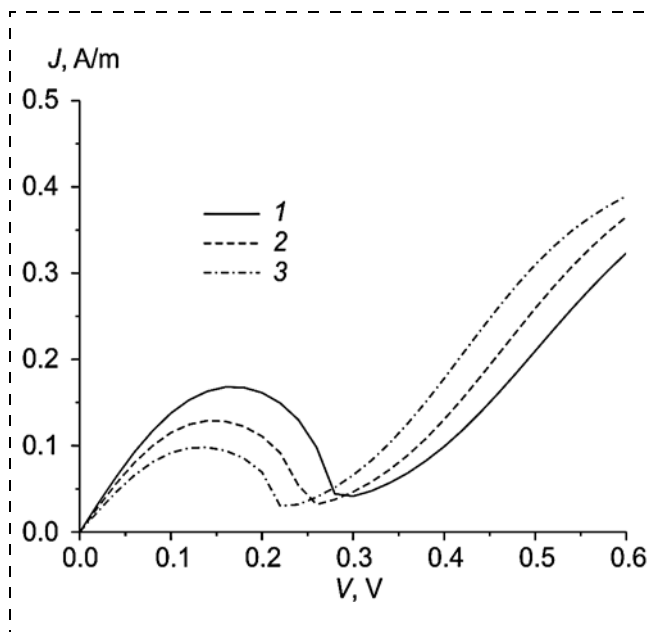


Рис. 2. ВАХ РТД 1 на подложке SiC при различных значениях ширины квантовой ямы: $d = 8$ нм (1); $d = 9$ нм (2); $d = 10$ нм (3)

Fig. 2. IV-characteristics of graphene on SiC substrate RTD 1 for different well widths: $d = 8$ nm (1); $d = 9$ nm (2); $d = 10$ nm (3)

РТД 1 описан в работе [14]. Видно, что с увеличением ширины ямы d происходит уменьшение как пиковых плотностей токов, так и пиковых напряжений.

На рис. 3 даны результаты расчетов по моделям 1 и 2 ВАХ РТД 2 на графене на подложке

h-BN. РТД 2 описан в работе [5]. Основные параметры структуры: ширина квантовой ямы — 3,4 нм; ширина барьеров — 1,3 нм; ширина сильно легированных приконтактных областей — 17 нм. При расчете эффективную массу для двухслойного графена задавали равной $0,041m_0$ [15], а высоту барьеров

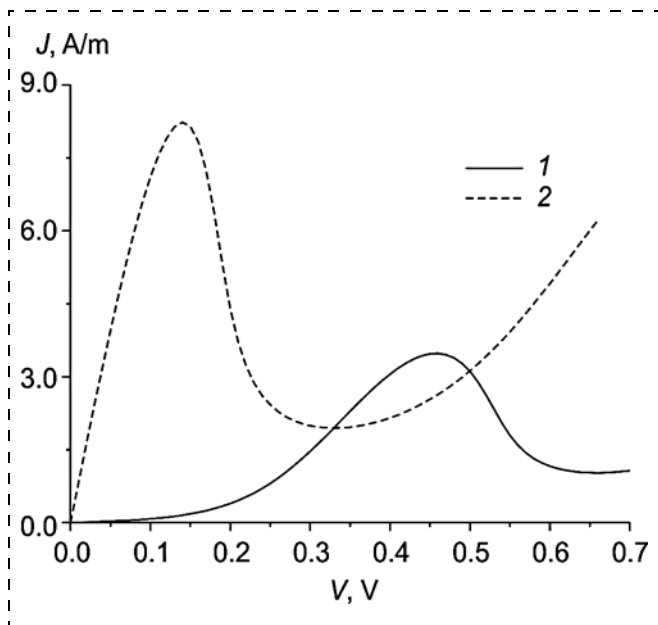


Рис. 3. ВАХ РТД 2 на подложке h-BN, рассчитанные по модели 1 (1) и модели 2 (2)

Fig. 3. IV-characteristics of graphene on h-BN substrate RTD 2 calculated with the use of model 1 (1) and model 2 (2)

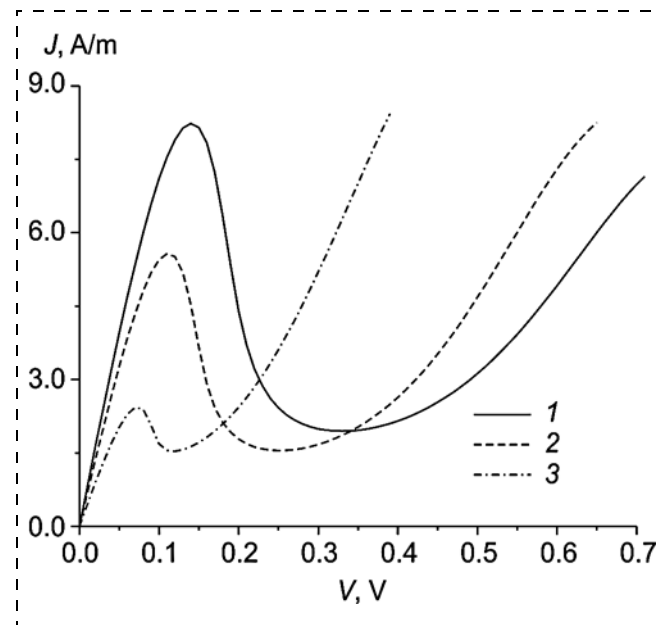


Рис. 4. ВАХ РТД 2 на подложке h-BN при различных значениях ширины квантовой ямы: $d = 3,4$ нм (1), $d = 4,3$ нм (2), $d = 6,4$ нм (3)

Fig. 4. IV-characteristics of graphene on h-BN substrate RTD 2 for different well widths: $d = 3,4$ nm (1), $d = 4,3$ nm (2), $d = 6,4$ nm (3)

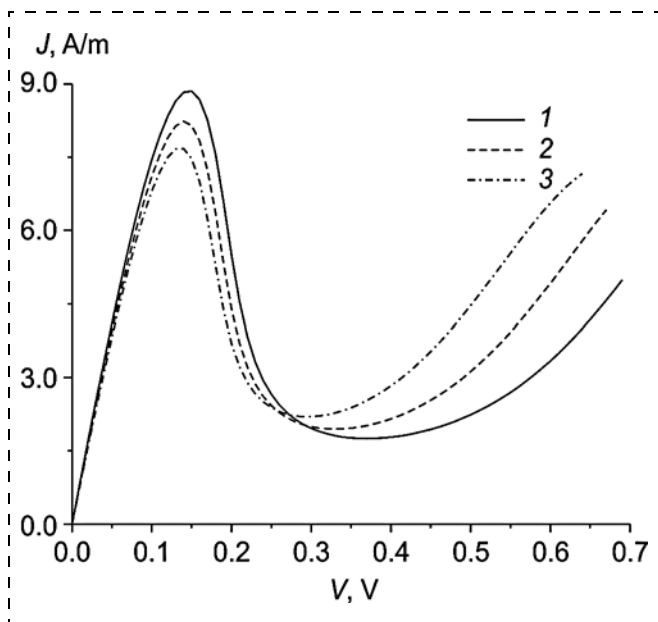


Рис. 5. ВАХ РТД 2 на подложке h-BN при различных значениях ширины потенциальных барьеров: $w_b = 1,2$ нм (1); $w_b = 1,3$ нм (2); $w_b = 1,4$ нм (3)

Fig. 5. IV-characteristics of graphene on h-BN substrate RTD 2 for different barrier widths: $w_b = 1,2$ nm (1); $w_b = 1,3$ nm (2); $w_b = 1,4$ nm (3)

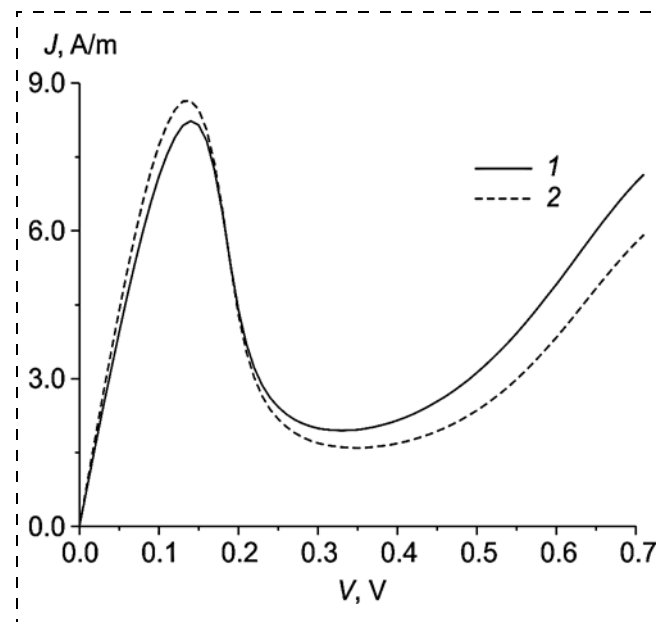


Рис. 6. ВАХ РТД 2 на подложке h-BN при различных значениях температуры окружающей среды: $T = 300$ К (1); $T = 77$ К (2)

Fig. 6. IV-characteristics of graphene on h-BN substrate RTD 2 for different temperature: $T = 300$ K (1); $T = 77$ K (2)

еров — 3,137 эВ [16]. Кривая 1 соответствует расчетам по модели 1, а кривая 2 — расчетам по модели 2. Заметим, что результаты расчетов по модели 1 неплохо согласуются с данными работы [5], полученными, однако, с применением функций Грина в баллистическом приближении. В то же время результаты, полученные с помощью моделей 1 и 2 (кривые 1 и 2 на рис. 3), существенно различаются, что свидетельствует о принципиальной необходимости использования при расчете ВАХ РТД на основе графена с протяженными приконтактными областями самосогласованных моделей.

По изложенным причинам приводимые далее результаты получены только с помощью самосогласованной модели 2.

На рис. 4 приведены результаты расчетов по модели 2 ВАХ РТД 2 в зависимости от ширины ямы d , которые качественно согласуются с результатами, приведенными на рис. 2 для РТД 1. На рис. 5 приведены результаты расчетов ВАХ в зависимости от ширины барьеров, а на рис. 6 — от температуры окружающей среды. Заметим, что результаты качественно согласуются с результатами, полученными ранее для подобных случаев для РТД, но на других материалах [12, 17–19].

Заключение

В рамках формализма волновых функций разработаны две численные модели РТД на основе графена на подложках различного типа. С их применением проведены расчеты ВАХ РТД на подложках карбида кремния и гексагонального нитрида бора в зависимости от различных факторов. Показано, что для РТД с протяженными приконтактными областями принципиально необходимо использовать самосогласованные модели.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований № Ф14-025 и Государственной программы научных исследований Республики Беларусь "Функциональные и композиционные материалы, наноматериалы" ("Нанотех").

Список литературы

1. Novoselov K. S. Nobel lecture. Graphene: Materials in the Flatland // Rev. Mod. Phys. 2011. Vol. 83. P. 837–849.
2. Novoselov K. S., Fal'ko V. I., Colombo L., Gellert P. R., Schwab M. G., Kim K. A roadmap for graphene // Nature. 2012. Vol. 490. P. 192–200.
3. Ferrari A. C., Bonaccorso F., Fal'ko V., Novoselov K. S., et al. Science and technology roadmap for graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems // Nanoscale. 2015. V. 7. P. 4598–4810.
4. Алексенко А. Г. Графен. М.: БИНОМ. Лаборатория базовых знаний, 2014. 168 с.
5. Nguyen V. H., Mazzamuto F., Bournel A., Dollfus P. Resonant tunneling diode based on graphene/h-BN heterostructure // J. Phys. D: Appl. Phys. 2012. V. 45. P. 325104.
6. Абрамов И. И. Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и нанoeлектроники V. Резонансно-туннельные структуры // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 3. С. 57–70.
7. Абрамов И. И. Моделирование физических процессов в элементах кремниевых интегральных микросхем. Минск, БГУ. 1999. 189 с.
8. Абрамов И. И., Гончаренко И. А. Численная комбинированная модель резонансно-туннельного диода // Электромагнитные волны и электронные системы. 2002. Т. 7, № 3. С. 54–60.
9. Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Игнатенко С. А., Королев А. В., Новик Е. Г., Рогачев А. И. Система моделирования нанoeлектронных приборов — NANODEV // Микроэлектроника. 2003. Т. 32, № 2. С. 124–133.
10. Абрамов И. И., Гончаренко И. А. Исследование методов аппроксимации внешних граничных условий при моделировании резонансно-туннельных структур // Известия Белорусской инженерной академии. 2000. № 1 (9)/2. С. 88–90.
11. Абрамов И. И., Новик Е. Г. Численное моделирование металлических одноэлектронных транзисторов. Минск, Бестпринт, 2000. 164 с.
12. Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Коломейцева Н. В. Комбинированная модель резонансно-туннельного диода // Физика и техника полупроводников. 2005. Т. 39, вып. 9. С. 1138–1145.
13. Abramov I. I., Baranoff A. L., Goncharenko I. A., Kolomeitseva N. V., Bely Y. L., Shcherbakova I. Y. A nanoelectronic device simulation software system NANODEV: New opportunities // Proc. of SPIE. 2010. V. 7521. P. 75211E1–1–11.
14. Nguyen V. H., Bournel A., Dollfus P. Resonant tunneling structures based on epitaxial graphene on SiC // Semicond. Sci. Technol. 2011. V. 26. P. 125012–1–7.
15. Zou K., Hong X., Zhu J. Effective mass of electrons and holes in bilayer graphene: Electron-hole asymmetry and electron-electron interaction // Phys. Rev. B. 2011. Vol. 84. P. 085408–1–6.
16. Fiori G., Betti A., Bruzzone S., D'Amico P., Iannaccone G. Nanodevices in Flatland: Two-dimensional graphene-based transistors with high Ion/Ioff ratio // 2011 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 5–7 Dec. 2011. P. 11.4.1–11.4.4.
17. Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Коломейцева Н. В. Комбинированная двухзонная модель резонансно-туннельного диода // Физика и техника полупроводников. 2007. Т. 41, вып. 11. С. 1395–1400.
18. Абрамов И. И., Коломейцева Н. В., Романова И. А. Комбинированные двухзонные модели резонансно-туннельных диодов // Микроэлектроника. 2012. Т. 41, № 5. С. 373–382.
19. Абрамов И. И. Физика и моделирование приборных структур и устройств микро- и нанoeлектроники // Доклады БГУИР. 2014. № 2. С. 32–42.

Simulation of Graphene Resonant Tunneling Diodes on the Substrates of Various Types

The article describes the models developed on the numerical solution of Schrödinger equation (model 1) and Schrödinger and Poisson equations (model 2). Simulation of the two graphene resonant tunneling diodes on SiC (RTD 1) and h-BN (RTD 2) substrates was performed using the proposed numerical models. The influence of various factors (well width d , barrier width w_b , temperature T) on IV-characteristics was investigated. The importance of a self-consistent calculation with the use of model 2 for simulation of graphene RTD with extended (passive) regions was illustrated.

Keywords: resonant tunneling diode, graphene, silicon carbide, hexagonal boron nitride, Schrödinger equation, numerical model, simulation

Introduction

Graphene due to the unique electrical, magnetic, optical, thermal and mechanical properties is one of the most promising nanomaterials for various applications [1–3], in particular, for development of the nanoelectronic device structures. So, the intensive research are conducted on instruments on resonant tunneling effect [3].

The main drawback of graphene, which makes it difficult to use it in electronics, is an absence of forbidden energy gap. There are several methods of band engineering for obtaining of the band gap in such structures, including graphene. The perspective is the use of multilayered graphene and substrates of different types [3].

For description of an electronic transportation in graphene, you need to use the equation of quantum electrodynamics [4], but in some cases is allowed the use of a simple equations of nonrelativistic quantum mechanics [5].

The aim of the work is to model the current-voltage characteristics (CVC) of the resonant tunneling diode (RTD) on the basis of graphene on wafers of silicon carbide (SiC) and hexagonal boron nitride (h-BN) using the proposed models.

Numerical models

Among the basic quantum-mechanical formalisms of wave functions, density matrices, Wigner and Green functions for modeling of RTD, the largest economical efficiency has the models characterized by formalism of wave functions [6]. It is this formalism is used in the work.

The proposed model 1 is based on the use of the Schrödinger equation, namely:

$$-\frac{\hbar^2}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{m^*} \frac{\partial}{\partial x} \psi \right) + U\psi = E\psi, \quad (1)$$

where the potential energy U was set with the ratio

$$U = -q\Phi + E_C, \quad (2)$$

E_C characterizes the curve of the conduction band, which is equal to 0 for the potential well; $\hbar$ — Planck's constant, divided by 2π ; x — the spatial coordinate; m^* — effective mass of the electron; ψ — wave (envelope) function; E — energy of electron; Φ — electrostatic potential is determined by the offset applied to the structure; q — the electron charge.

The finite-difference approximation of the Schrödinger equation for the internal nodes of the grid of the spatial sampling and the points of the interfaces was implemented using the Tikhonov—Samarsky integral-interpolation approach [7]. The obtained ratios are given in [8, 9].

In modeling of the nanoelectronic devices it is important to take in the account their interaction with the environment. The developed model can account external boundary conditions of the general view:

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} + a\psi = b, \quad (3)$$

where a and b — the coefficients. The approximation of the boundary conditions can be carried out by various methods [10]. The developed model can use the approximation of external boundary conditions, namely: the method of internal boundary conditions; the method of fictitious point. The feasibility of this is caused by the fact that they are characterized by different degree of approximation.

The approximation in the model of the Schrödinger equation can be an on a uniform and non-uniform spatial sampling grids. In constructing of the grid, it should be considered such feature of the resonance-tunnel structures such as the presence of boundaries between media. Therefore, the grid of the spatial sampling should be structured in such a way that the nodes suit

on the interfaces. This condition is necessary in construction of the uniform and the nonuniform grids.

The initial data for calculations of the step of the uniform grid are the geometric dimensions of the structure and the initial number of grid steps, which then is adjusted in the process of calculating of the step. The main criterion for selecting of the step of the uniform grid is to break each region on a whole number of steps at the highest possible total number of steps close to the initial. The feature of the uniform grid in that, what for structures, which dimensions of areas differ significantly, the transition is needed to more dense grid, which leads to a significant increase in computation time.

The model also provides the discretization of the Schrodinger equation for a non-uniform grid, which can lead to a significant increase in model efficiency. The initial parameters for the construction of a non-uniform grid are the minimum step, the geometric dimensions of the structure areas and factor of grid heterogeneity, which can range from 1 (transition to a uniform grid) to 1,7.

To describe the shape of the barrier, in addition to the linear, a hyperbolic approximation was used [11, 12]. It was carried out for the barriers and quantum well between them. As a result, the modified source profile is described by the relationship:

$$E_C = H_{b0} \mp \beta \frac{w_b^2}{x(w_b - x)}, \quad (4)$$

where H_{b0} — the height of the equivalent rectangular barrier, the sign "—" corresponds to the area of the barrier, and the "+" — to the area of the pit; β — coefficient; w_b — the barrier width; x — the coordinate for the barrier, along with this $x \in (0, w_b)$. In the boundary points there are possible division by 0. Therefore, to describe the profile of the potential in the vicinity of the boundary points used linear approximation.

As a result of the finite-difference approximation of the Schrodinger equation, the problem reduces to solving a system of linear algebraic equations:

$$A\Psi = F, \quad (5)$$

where A — tridiagonal matrix; Ψ — column vector comprising ψ_i in the grid points of the spatial sampling; F — column vector of the right parts. To solve (5), the method of Gauss (use of three different algorithms is possible) is used. The results of the decision are the values of the wave function at the grid points of the spatial sampling for a given energy of the incident particle and the applied voltage. The developed model also allows to calculate the transmission coefficient and on its basis to calculate the current density for the resonant tunneling structures with an arbitrary number of barriers.

A combined one-band model of work was used as a model 2 [12], adapted to the case of the resonant tunneling device structures based on graphene. Let's describe it briefly. The model takes into account only the conduction band. Initially, the setting of potential is possible with the help of several approximations [12]. In this paper, the approximation of the potential profile with the average potential at heterointerfaces was used for the band structure of the bilayer graphene:

$$U_i = \frac{U_{i-1} + U_{i+1}}{2}, \quad (6)$$

where U_i — the potential of directly at the heterojunction (the point with index i); U_{i-1} , U_{i+1} — the potential on both sides of the barrier.

The active region is determined by the choice of interfaces of the "linking" areas, which use semi-classical and quantum mechanical approaches. For structures based on graphene, the potential barriers and the quantum well located between come into the active region.

To account the strong-doping of the contact regions, the Boltzmann approximation of Fermi-Dirac statistics [7] is applied. The electron density is given by:

$$n = n_{ie} \exp(q(\Phi - F_n)/k_B T), \quad (7)$$

where n_{ie} — effective own concentration; F_n — Fermi quasipotential of electrons; k_B — Boltzmann constant; T — temperature.

To find the potential on the first phase, the Schrodinger (1) and Poisson system of equations in a model is solved:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_S \epsilon_0 \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) = -q(N_D - n), \quad (8)$$

where ϵ_S — the relative dielectric permittivity of the medium; ϵ_0 — dielectric permittivity of vacuum; N_D — concentration of ionized donors; n — the concentration of electrons. The linearization of the Poisson equation was carried out by the method of Newton.

The second stage solves the Schrodinger equation for the conduction band. The transmission coefficient is calculated on the basis of the obtained wave functions. The Fermi level is set before the calculation of the current, flowing through the structure. The current is calculated on the base of the Esaki-Tsu formula. The models are included in the modeling system of nano-electronic devices NANODEV [9, 13] for PC.

Simulation results

Simulation of electrical characteristics (current density dependence on the voltage, further CVC) of RTD based on graphene on SiC and h-BN substrates is carried out using the described models. The RTD structure

and the corresponding band diagram at applied zero bias is shown in fig. 1.

Fig. 2 shows the results of calculations for model 1 CVC RTD 1 on graphene and SiC substrate. RTD 1 is described in [14]. It is seen that with increasing of the well width d , the peak current densities and voltage peaks decrease.

Fig. 3 shows the results of calculations on models 1 and 2 of the CVC 2 RTD on graphene on the h-BN substrate. RTD 2 is described in [5]. The main parameters of the structure are the widths: quantum well — 3,4 nm; barriers — 1,3 nm; heavily doped contact regions — 17 nm. When calculating, the effective mass for the two-layer graphene is equal to $0,041m_0$ [15], and the height of the barriers — 3,137 eV [16]. Curve 1 corresponds to the calculations by the model 1, curve 2 — to the calculations by the model 2. The results of calculations by the model 1 agree well with the data [5], however, obtained with the use of Green's functions in the ballistic approximation. At the same time, the results obtained with the help of models 1 and 2 (curves 1 and 2, fig. 3) are significantly different, indicating the fundamental need to use the self-consistent models in the calculation of CVC RTD based on graphene with extended near-contact areas.

For the above cited reasons, the given results obtained only by using the self-consistent model 2.

Fig. 4 shows the results of calculations for the model 2 of CVC RTD 2, depending on the width of the pit, which are qualitatively consistent with the results shown in Fig. 2 for RTD 1. Fig. 5 shows the results of calculations of the VAC, depending on the width of the barrier, and Fig. 6 — on the ambient temperature. The results are qualitatively consistent with the results previously obtained for the similar cases for RTD, but on the other materials [12, 17–19].

Conclusion

Within the scope of the wave functions, two numerical models of RTD on the basis of graphene on various types of substrates were developed. The calculations of the CVC RTD on the substrates of silicon carbide and hexagonal boron nitride depending on the various factors. It is shown that for the RTD with extended contact regions it is fundamentally necessary to use self-consistent models.

This work was supported by the grant of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research # F14-025 and the State Programme of Scientific Research of the Republic of Belarus "Functional and composite materials, nanomaterials" ("Nanotech").

References

1. **Novoselov K. S.** Nobel lecture. Graphene: Materials in the Flatland, *Rev. Mod. Phys.*, 2011, vol. 83, pp. 837–849.
2. **Novoselov K. S., Fal'ko V. I., Colombo L., Gellert P. R., Schwab M. G., Kim K.** A roadmap for graphene, *Nature*, 2012, vol. 490, pp. 192–200.
3. **Ferrari A. C., Bonaccorso F., Fal'ko V., Novoselov K. S., et al.** Science and technology roadmap for graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems, *Nanoscale*, 2015, vol. 7, pp. 4598–4810.
4. **Aleksenko A. G.** *Grafen*, Moscow, BINOM. Laboratorija bazovyh znaniy, 2014, 168 p.
5. **Nguyen V. H., Mazzamuto F., Bournel A., Dollfus P.** Resonant tunneling diode based on graphene/h-BN heterostructure. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2012, vol. 45, pp. 325104.
6. **Abramov I. I.** Problems and principles of physics and simulation of micro- and nanoelectronics devices. V. Resonant-tunneling structures. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2007, no. 3, pp. 57–70.
7. **Abramov I. I.** *Simulation of physical processes in elements of silicon integrated circuits*. Minsk, BSU. 1999. 189 p.
8. **Abramov I. I., Goncharenko I. A.** Numerical combined model of resonant tunneling diode, *Jeletromagnitnye volny i jeletronnye sistemy*, 2002, vol. 7, no. 3, pp. 54–60.
9. **Abramov I. I., Goncharenko I. A., Ignatenko S. A., Korablev A. V., Novik E. G., Rogachey A. I.** NANODEV: A nanoelectronic device simulation software system, *Russian Microelectronics*, 2003, vol. 32, no. 2, pp. 97–104.
10. **Abramov I. I., Goncharenko I. A.** Issledovanie metodov approksimacii vneshnih granichnyh uslovij pri modelirovanii rezonansno-tunnel'nyh struktur, *Izvestija Belorusskoj inzhenernoj akademii*, 2000, no. 1 (9)/2, pp. 88–90.
11. **Abramov I. I., Novik E. G.** *Numerical simulation of metal single-electron transistors*, Minsk, Bestprint, 2000, 164 p.
12. **Abramov I. I., Goncharenko I. A., Kolomeitseva N. V.** Combined model of the resonant tunneling diode. *Semiconductors*, 2005, vol. 39, no. 9, pp. 1102–1109.
13. **Abramov I. I., Baranoff A. L., Goncharenko I. A., Kolomeitseva N. V., Bely Y. L., Shcherbakova I. Y.** A nanoelectronic device simulation software system NANODEV: New opportunities, *Proc. of SPIE*, 2010, vol. 7521, pp. 75211E1–1–11.
14. **Nguyen V. H., Bournel A., Dollfus P.** Resonant tunneling structures based on epitaxial graphene on SiC, *Semicond. Sci. Technol.*, 2011, vol. 26, pp. 125012–1–7.
15. **Zou K., Hong X., Zhu J.** Effective mass of electrons and holes in bilayer graphene: Electron-hole asymmetry and electron-electron interaction, *Phys. Rev. B*, 2011, vol. 84, pp. 085408–1–6.
16. **Fiori G., Betti A., Bruzzone S., D'Amico P., Iannaccone G.** Nanodevices in Flatland: Two-dimensional graphene-based transistors with high Ion/Ioff ratio. *2011 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*, 5–7 Dec. 2011, pp. 11.4.1–11.4.4.
17. **Abramov I. I., Goncharenko I. A., Kolomeitseva N. V.** Two-band combined model of a resonant tunneling diode, *Semiconductors*, 2007, vol. 41, no. 11, pp. 1375–1380.
18. **Abramov I. I., Kolomeitseva N. V., Romanova I. A.** Combined two-band models of resonant tunneling diodes, *Russian Microelectronics*, 2012, vol. 41, no. 5, pp. 314–323.
19. **Abramov I. I.** Physics and simulation of various micro- and nanoelectronic devices, *Doklady BGUIR*, 2014, no. 2, pp. 32–42.

Л. С. Раткин, канд. техн. наук, e-mail: rathkeen@bk.ru,
зам. генерального директора ООО "АРГМ", г. Москва

МЕТОДЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ СТЕГАНОГРАФИИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СМАРТ-МИКРОСИСТЕМ

Поступила в редакцию 10.07.2015

Представлены методы компьютерной стеганографии для обеспечения информационной безопасности смарт-микросистем. Рассматриваются особенности, связанные с применением в смарт-микросистемах технологий непрерывной информационной поддержки жизненного цикла (Continuous Acquisition and Life-cycle Support, CALS), компьютерного реинжиниринга программных систем (Computer-Aided Software Engineering, CASE), оперативной аналитической обработки данных (On-Line Analytical Processing, OLAP) и оперативной обработки транзакций (On-Line Transaction Processing, OLTP). Представлены методы рассредоточения скрываемых данных по общим контейнерам и многократного вложения частных контейнеров со скрываемой информацией, защищенные патентом на изобретение.

Ключевые слова: компьютерная стеганография КС, информационная безопасность, смарт-микросистемы, MITM-атака, радиочастотная идентификация (RFID), непрерывная информационная поддержка жизненного цикла (Continuous Acquisition and Life-cycle Support, CALS-технологии), компьютерный реинжиниринг программных систем (Computer-Aided Software Engineering, CASE-технологии), оперативная аналитическая обработка данных (On-Line Analytical Processing, OLAP-технологии), оперативная обработка транзакций (On-Line Transaction Processing, OLTP-технологии)

Уязвимости современных смарт-микросистем и технологии защиты данных

Современные смарт-микросистемы, как высокоинтегрированные специализированные многофункциональные устройства для обработки, хранения и передачи информации (в защищенном исполнении) [1], применяются для широкого класса задач, предполагающих интеграцию в множество цепочек производителей, поставщиков и потребителей продукции. Соответственно, возникает необходимость ведения учета движения информационных потоков и обеспечения их безопасности (например, защиты от несанкционированного проникновения в канал связи и перехвата управления устройствами), предполагающая анализ функционирования соответствующих подсистем еще на стадии их проектирования. Среди причин уязвимости смарт-микросистем можно особо отметить:

- отсутствие единой скоординированной и согласованной политики информационной безопасности (для разработчиков подсистем);
- применение различных форматов хранения информации и типов используемых данных;
- интеграция разнородного программного обеспечения, приобретенного у различных групп разработчиков и посредников в разное время.

В современных смарт-микросистемах необходимый уровень информационной безопасности может быть достигнут не только использованием криптографических методов шифрования данных (например, с открытым ключом), но и с помощью

стеганографических методов скрытого хранения необходимых сведений. Почему обычной криптографической защиты для смарт-микросистем недостаточно? Например, при MITM-атаке атакующий смарт-микросистему встраивается в телекоммуникационный канал, перехватывает, открывает и изменяет сообщения, которые передаются считывателем или смарт-картой (отсюда и термин "MITM-атака": "Man-In-The-Middle attack" — атакующий посередине канала связи, — между приемником и передатчиком). Такие атаки применяются для смарт-микросистем банковского оборудования, в системах контроля и управления доступом (СКУД), в охранно-досмотровых комплексах, а также для радиочастотной идентификации (Radio-Frequency Identification, RFID) объектов, когда хранящиеся в смарт-картах и RFID-метках данные считываются или записываются посредством радиосигналов, перехватываемых сторонним наблюдателем. Экономический ущерб от взлома банковских систем, СКУД и охранно-досмотрового оборудования, а также RFID-комплексов может исчисляться в миллионах рублей, но и он, согласно экспертным оценкам, оказывается значительно ниже, чем в случае атаки на смарт-микросистему через управляемые MEMS- и NEMS-устройства, когда удастся, например, получить управление над беспилотным аппаратом самолетного, вертолетного, сухопутного, надводного или подводного типа. При MITM-атаке атакующий, встраиваясь посередине канала связи, переключает систему управле-

ния на себя, блокирует "внешние приказы" системе (снаружи) и превращает "беспилотник" в оружие, например, для совершения террористического акта. Поскольку технологии взлома криптографических систем и оборудование для них непрерывно совершенствуются (вспомним, например, о разработке в 2012 г. квантового компьютера канадской компанией "D-Wave Systems" со скоростью вычислений, согласно данным оценочных тестов, в 3600 быстрее современных ЭВМ) и стоимость их разработки на порядки ниже оценки того ущерба, который они могут принести, существующих систем шифрования уже недостаточно для защиты каналов связи и систем управления в финансово-экономической, охранно-розыскной и транспортно-логистической отраслях. Необходимо использование криптосистем в сочетании с системами компьютерной стеганографии (КС), позволяющими повысить уровень информационной безопасности для MEMS- и NEMS-устройств.

Применение КС оправдано для смарт-микросистем, поскольку, в отличие от криптографии, обеспечивает факт сокрытия передачи данных, транспортируя в стегоконтейнере (специальном файле-контейнере) защищаемую информацию. Но если при стадии разработки для конкретного пользователя применение "настраиваемых индивидуально" методов КС для сокрытия данных не предполагает негативных последствий для разработчиков, то уже при окончательной интеграции разнородных систем возникают проблемы, связанные с особенностями их функционирования. Для их решения требуется дополнительная настройка шифровального оборудования.

Особенности применения технологий CALS, CASE, OLAP и OLTP

Среди проблем использования смарт-микросистем для защиты данных необходимо отметить активно применяемый в РФ и за рубежом инструмент CALS-технологий, обеспечивающий непрерывную информационную поддержку жизненного цикла (ЖЦ) изделий (Continuous Acquisition and Life-cycle Support, CALS). Каждый этап ЖЦ характеризуется накоплением данных о параметрах продукции и анализом степени их соответствия запросам рынка — это необходимо для того, чтобы новый ЖЦ начался корректировкой и уточнением характеристик изделий, востребованных на рынке. Данные о закрытых характеристиках должны скрытно передаваться из одного этапа ЖЦ в другой. Необходимо учитывать, что часто разным этапам ЖЦ соответствуют различные предприятия (производители, поставщики и потребители MEMS- и NEMS-устройств), системы информа-

ционного сопровождения которых нередко разнородны. По этой причине практически необходимо скрыто передавать по цепочке ЖЦ сообщения *переменной* величины в файле-контейнере, имеющем различный формат и переменную структуру.

Например, пусть имеется N этапов ЖЦ, тогда для скрываемого сообщения размером a_i и стеганографического файла-контейнера объемом b_i справедливо следующее неравенство:

$$a_i < b_i, \quad i = 1, \dots, N. \quad (1)$$

Для обеспечения условия стегоустойчивости неравенство можно "ужесточить":

$$a_i \ll b_i, \quad i = 1, \dots, N. \quad (2)$$

При применении КС в разнородных информационных средах возможным выходом из ситуации является инжиниринг (перепроектирование) CASE-средствами (компьютерное проектирование программных систем — Computer-Aided Software Engineering, CASE) информационных систем для приведения к единому виду форматов файлов-контейнеров или же итеративная процедура "сокрытия данных": каждый заполненный стеганографический файл-контейнер становится сообщением, помещаемым в стеганографический пустой файл-контейнер на следующем этапе (итерации) до тех пор, пока уровень "сокрытия данных" не сравняется (т. е. не будет ниже) с задаваемым в начале процедуры.

Реализации методов КС также нередко препятствует использование OLAP-технологий оперативной аналитической обработки данных (On-Line Analytical Processing, OLAP), позволяющих строить многомерные информационные кубы (МИК). Сечения МИК обеспечивают получение выборки данных по запросу в задаваемом разрезе (рис. 1).

На рис. 1 представлен МИК на трех координатных осях, каждая из которых — одно поле базы данных информационной смарт-микросистемы (текстовая информация кодируется с помощью чисел, поэтому любой текст можно представить в виде результирующего числа, откладываемого по соответствующей координатной оси, и точка на ребре куба соответствует каждому текстовому значению поля базы данных). В примерах на рис. 1 и рис. 2 база данных из трех полей в информационной смарт-микросистеме содержит значения для каждой записи. Максимальные и минимальные значения по каждому полю образуют границы куба, в пределах которого содержится набор точек, каждая из которых — запись базы данных смарт-микросистемы. Масштабируя размеры по каждой оси и выполняя параллельный перенос, для наглядности представления можно получить форму

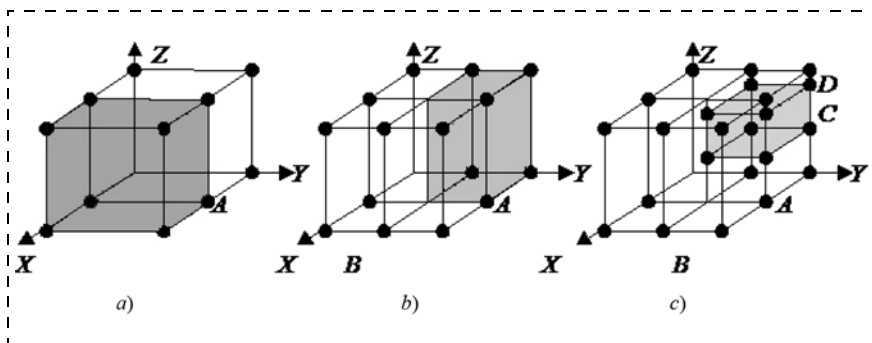


Рис. 1. Построение трехмерного OLAP-куба и его сечений: а — Запрос 1: найти $x > A$; б — Запрос 2: найти $x < A? y > B$; в — Запрос 3: найти $x < A? y > B? C < z < D$

Fig. 1. Construction of a three-dimensional OLAP-cube and its sections: а — Query 1: Find $x > A$; б — Query 2: Find $x < A? y > B$; в — Request 3: Find $x < A? y > B? C < z < D$

куба, в одной из вершин которого — начало координат. Запросы формулируются в виде системы уравнений, описывающих секущие куб плоскости. Например, на рис. 1 представлены три запроса, каждому из которых соответствует заштрихованная область куба. Для получения ответа на запрос к базе данных информационной смарт-микросистемы о нахождении записей со значениями полей больше или меньше заданных строятся сечения OLAP-куба и ищутся записи (точки), отвечающие заданным условиям. На рис. 2 проиллюстрирован случай линейной зависимости в уравнениях

$$A_1x + B_1y + C_1z \leq D_1; \quad (3)$$

$$A_2x + B_2y + C_2z \geq D_2, \quad (4)$$

поэтому ответом на запрос 4 будет область OLAP-куба, находящаяся между задаваемыми уравнениями (3) и (4) секущими куб плоскостями (N -мерный куб для базы данных из N полей строится аналогично).

Использование КС-механизма сокрытия данных предполагает построение двух OLAP-кубов (открытого и скрытого), различающихся по структуре и числу измерений. Так как теоретически в стеганографическом файле-контейнере для любого объекта может быть скрыто любое измерение, получаем задачу построения гиперкуба путем объединения его открытой и закрытой частей. Возможным вариантом построения гиперкуба из двух частей является привлечение аппарата теории функции комплексного переменного (ТФКП), нередко используемого в КС.

Еще одним свойством информационных смарт-микросистем, проблемным при реализации КС-методов, является использование OLTP-технологий оперативной обработки транзакций (On-Line Transaction Processing, OLTP), используемых для обработки ситуаций совместного доступа к общему массиву большого объема данных. Это позво-

ляет выполнять оперативную обработку обращений к таблицам баз данных информационных смарт-микросистем, содержащим миллионы записей и работающим круглосуточно семь дней в неделю (например, системы бронирования билетов на поезда и самолеты, снятия или зачисления наличных на карточку в банкомате, вычисления координат через спутниковые системы ГЛОНАСС/GPS, мониторинг беспилотными системами аэрокосмического пространства). В таких системах число строк со скрытыми данными

сопоставимо с открытой частью таблицы (например, может составлять до половины от общего объема данных). В этом случае необходима разработка механизма для быстрого доступа к сокрытым в стеганографических файлах-контейнерах большим информационным массивам. Учитывая, что время доступа к данным пропорционально их объему, для обеспечения информационной безопасности смарт-микросистем необходимо выделение дополнительных контейнеров — в них будут располагаться служебные сведения о возможности быстрого доступа к сокрытым данным, хранимые в репозитории. Для сокрытия данных в служебных контейнерах формируется стегорепозитарий. Файлы разных типов, выполняющие роль вспомогательных контейнеров (например, драйверов информационных систем), конструируются соответ-

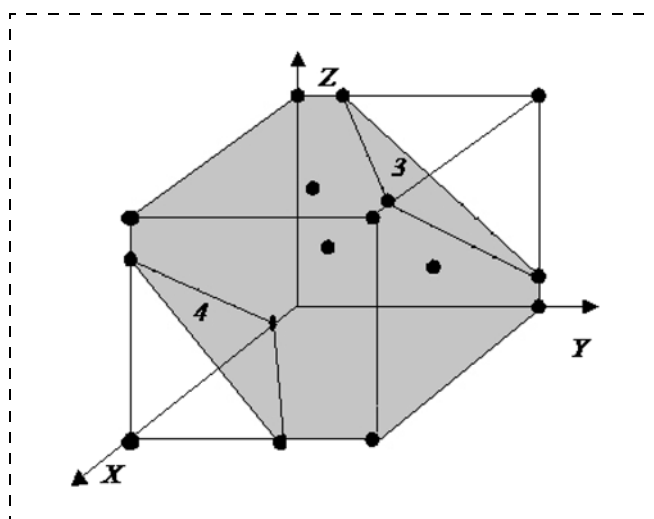


Рис. 2. Случай линейной зависимости: Ответ на запрос 4 — множество точек, ограниченных секущими плоскостями 3 и 4 внутри OLAP-куба, задаваемых уравнениями (3) и (4)

Fig. 2. The case of a linear relationship: The answer to the request 4 — a number of points limited by intersecting planes 3 and 4 within the OLAP-cube, defined by equations (3) and (4)

ствующим образом. Также возможно применение файлов с речевыми сообщениями и видеофайлов или аналогичных им, стойких к стеганографическому анализу.

Перечисленные свойства затрудняют применение КС для сокрытия данных в смарт-микросистемах. В обычных системах таких проблем не возникает по причине *общности* форматов и типов данных, *однородности* стиля программирования и *единой* политики информационной безопасности руководства предприятия, эксплуатирующего одну смарт-микросистему.

Для обеспечения информационной безопасности смарт-микросистем методами КС целесообразно усовершенствование механизмов скрытого хранения и конвертирования информации для обеспечения стегоустойчивости скрываемых данных к перехвату в сетях корпоративного уровня в процессе передачи [2]. Поскольку криптографических систем для защиты смарт-микросистем недостаточно, в условиях разноформатности файлов-контейнеров необходимо комбинирование криптографических и стеганографических методов для смарт-микросистем. Предлагается использовать методы рассредотачивания скрываемых данных по общим контейнерам и многократного вложения частных контейнеров. Рассмотрим их подробнее.

Рассредотачивание скрываемых данных по общим контейнерам

Пусть имеются L сообщений — скрываемых данных объемом u_i ($i = 1, \dots, L$), которые необходимо распределить по M стеганографическим контейнерам объемом v_j ($j = 1, \dots, M$). Очевидно неравенство

$$u_1 + u_2 + u_3 + \dots + u_L < v_1 + v_2 + v_3 + \dots + v_M. \quad (5)$$

В неравенстве (5) отражен тот факт, что сумма объемов скрываемых сообщений должна быть меньше суммы объемов контейнеров. Заметим, что неравенство (5) справедливо при применении современных стеганографических систем с высокой

степенью сжатия сообщений, применяемой в криптографических методах. Например, использование *двукратного* сжатия (практически допускаемого в механизмах некоторых архиваторов для файлов *ряда* форматов) позволяет в отдельных случаях выполнить следующее неравенство:

$$u_1 + u_2 + u_3 + \dots + u_L > v_1 + v_2 + v_3 + \dots + v_M, \quad (6)$$

при этом неравенство (5) следует переписать в виде

$$x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_L < v_1 + v_2 + v_3 + \dots + v_M, \quad (7)$$

где x_i — результат *двукратного* сжатия сообщения u_i , $i = 1, \dots, L$. При использовании стеганографических систем без высокой степени сжатия сообщений неравенство (5), по аналогии с (2), можно записать в виде

$$u_1 + u_2 + u_3 + \dots + u_L \ll v_1 + v_2 + v_3 + \dots + v_M, \quad (8)$$

так как суммарный размер сообщений должен быть *много* меньше суммарного размера контейнеров.

Отметим, что *двукратное* сжатие, предполагаемое при записи формул (6) и (7), например архиватором RAR, выполняется следующим образом. При максимальном сжатии большого числа файлов разных форматов, располагающихся в системе поддиректорий (например, с персональными данными о владельцах смарт-микросистем), формируется архивный файл с "рыхлой" структурой, который также можно сжать на 20...50 %. При использовании стеганографических систем с *невысокой* степенью сжатия справедлива формула (8). Пример использования метода рассредотачивания скрываемых данных по общим контейнерам приведен на рис. 3. Для хранения данных о порядке заполнения контейнеров емкостью v_j ($j = 1, \dots, M$) блоками скрываемой информации u_i ($i = 1, \dots, L$) дополнительно формируется стегорепозитарий, имеющий контейнеры объемом w_k , $k = 1, \dots, N$ (на рис. 3 они не приведены). Допустимо избирательное криптографирование любых блоков данных для стеганографических файлов-контейнеров разных форматов.

Метод обеспечения информационной безопасности смарт-микросистем основан на комбинировании стеганографических и криптографических программ, в том числе предназначенных для хранения данных. В числе криптографических программ — "File-Assurity Open PGP", "BestCrypt" и "PGP Personal". Среди стеганографических программ отметим

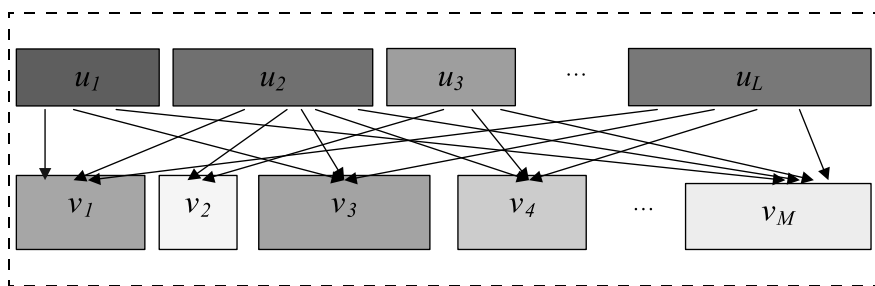


Рис. 3. Рассредотачивание скрываемых данных по общим контейнерам

Fig. 3. Detachment of the hidden data by the common containers

"Steganos Security Suite" и "Stegozaurus" (списки криптографических и стеганографических программ не являются исчерпывающими). Комбинирование криптографических и стеганографических программ выполняется на основании данных об их применимости к файлам различных форматов. Другой метод комбинирования криптографических и стеганографических систем для обеспечения информационной безопасности смарт-микросистем в условиях разноформатности файлов-контейнеров состоит в многократном вложении частных стеганографических контейнеров друг в друга.

Многократное вложение частных контейнеров

Основными отличиями данного метода (обозначим его "метод 2") от метода рассредотачивания закрытых данных по общим контейнерам ("метод 1") являются *обособленность* (индивидуальность) контейнеров, в которые скрываемые данные от других сообщений не записываются (в методе 1 контейнеры являются *общими* для разных сообщений), и *многократность* процедуры вложения (в методе 1 изложена *однократная* процедура). Кратко изложим метод обеспечения информационной безопасности смарт-микросистем посредством многократного вложения скрываемого сообщения в стеганографические частные контейнеры.

Для каждого сообщения из числа свободных подбираются стеганографические файлы-контейнеры, по которым частями распределяется сообщение. Заполненные частями сообщения файлы-контейнеры *объединяются* в новое сообщение, которое также распределяется по свободным (так называемым пустым) файлам-контейнерам. При каждом распределении сообщения по пустым стеганографическим файлам-контейнерам повышается его стегоустойчивость. Повторяется процедура многократно, пока параметр стегоустойчивости сообщения не достигнет значения, установленного пользователем. Методы расчета стегоустойчивости, получаемые при сокрытии данных в файлах различных форматов с помощью разных стеганографических программ, как и значения параметров, хранятся в отдельной базе данных одной из информационных подсистем.

Пример реализации метода многократного вложения частных стеганографических файлов-контейнеров для обеспечения информационной безопасности смарт-микросистем приведен на

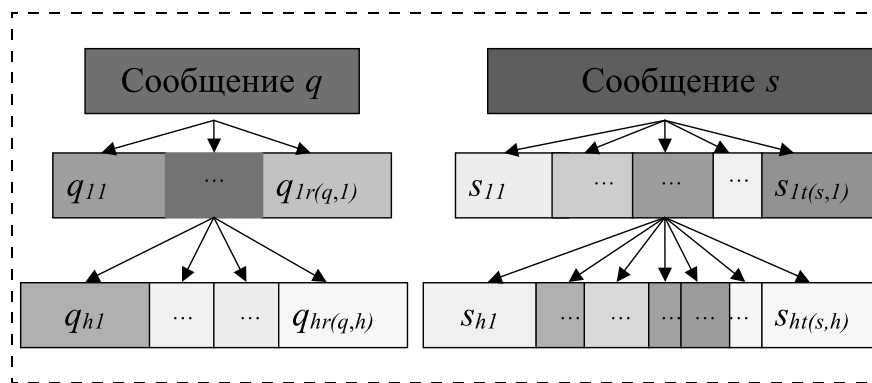


Рис. 4. Многократное вложение частных контейнеров

Fig. 4. Multiple embedding of the private containers

рис. 4, где представлены два сообщения q и s . На первом уровне они распределяются по стеганографическим файлам-контейнерам $q_{11}, \dots, q_{1r(q,1)}$ и $s_{11}, \dots, s_{1t(s,1)}$ соответственно. Стеганографические файлы-контейнеры двух групп (q и s) объединяются, как показано на рис. 4, для их дальнейшего распределения в качестве новых сообщений по контейнерам нового уровня. Например, для уровня h контейнеры группы q обозначаются $q_{h1}, \dots, q_{hr(q,h)}$, для группы s — $s_{h1}, \dots, s_{ht(s,h)}$. В роли стеганографических файлов-контейнеров могут, в частности, выступать открытые (не скрываемые) сообщения. На каждом уровне возможно выборочное криптографирование выбранных блоков данных для разноформатных стеганографических файлов-контейнеров.

Заключение

Криптография и средства КС не являются единственно возможными для обеспечения информационной безопасности смарт-микросистем. Существует множество иных программно-аппаратных решений (например, программные ключи защиты, средства биометрии), применяемые параллельно и независимо от других комплексов защиты. Но в связи с ростом угроз для информационной безопасности MEMS и NEMS, встраиваемых в беспилотные аппараты, для предотвращения перехвата управления ими и превращения в инструмент террористической атаки необходима разработка соответствующих систем на основе стеганографических методов. Другой из возможных опасностей, представляющих угрозу утечки конфиденциальных данных, является применение смарт-микросистем для дистанционного управления смарт-ТВ с несанкционированной передачей аудио- и видеoinформации без ведома пользователей бытовой техники через встроенные в современные смарт-телевизоры микрофоны и видеокамеры. Методы компью-

терной стеганографии позволяют повысить уровень информационной безопасности смарт-микросистем для соответствующих приложений [3].

В завершение отметим, что регулярное пополнение (увеличение) числа стеганографических файлов-контейнеров (превосходящих закрытые данные по объему) несложно обеспечить за счет поступлений новых разноформатных файлов. В этом случае разноформатность стеганографических файлов-контейнеров способствует реализации рассмотренных в публикации методов комбинирования криптографических и стеганографических методов

обеспечения информационной безопасности смарт-микросистем.

Список литературы

1. Лучинин В. В., Садовая И. М. Информационная безопасность смарт-микросистем и технологий. СПб.: СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2015.
2. Горелик А. Л., Раткин Л. С. Об устойчивости корпоративных информационных сетей // Вопросы оборонной техники. 2003. № 2 (315). С. 43—45.
3. Раткин Л. С. Патент на изобретение РФ № 2322693, приоритет от 20.10.2005.

L. S. Rathkeen, Ph. D., Deputy Director General, Rathkeen@bk.ru,
ARGM Co., Moscow

Methods of Computer Steganography for Provision of Information Security for Smart-Microsystems

The article is devoted to the methods of computer steganography (CS) for provision of information security for smart-microsystems. Also discussed are the features of application in smart-microsystems of the technologies of Continuous Acquisition and Life-cycle Support (CALS), Computer-Aided Software Engineering (CASE), On-Line Analytical Processing (OLAP) and On-Line Transaction Processing (OLTP). The article presents the patent-protected methods of data distribution by common containers and multiple use private containers with secured information. The presented technologies may be used for different file formats and integrated software, for system protection against Man-In-The-Middle attack, for Radio-Frequency Identification (RFID), distant control of TV, video or audio systems, for data protection during controlled movement of the unmanned space, air, land, water or submarine systems, for reengineering of MEMS or NEMS, and other applications. The presented technology also may be used for enhancing of information security of the Russian and foreign financial enterprises and organizations: banks, holdings, industrial groups, etc.

Keywords: computer steganography (CS), information security, smart-microsystems, Man-In-The-Middle attack (MITM-attack), Radio-Frequency Identification (RFID), Continuous Acquisition and Life-cycle Support (CALS), Computer-Aided Software Engineering (CASE), On-Line Transaction Processing (OLTP)

Vulnerability of the smart-microsystems and data protection technologies

Smart-microsystems as highly integrated multi-function devices for processing, storage and transmission of information (ruggedized) [1] are used for tasks that involve the integration into the set of chains of producers, suppliers and consumers. There is a need for record-keeping of the information flows and safety and security arrangements (e.g., protection against unauthorized access into the communication channels and intercept of devices control), involves analysis of the relevant subsystems at the stage of their design. Among the causes of vulnerability of such microsystems can be noted:

- lack of a united, coordinated and coherent policy of information security (for developers of subsystems);
- use of the different formats of information storage and data types;
- integration of the different software purchased from different vendors and resellers at different times.

The necessary level of information security in smart-microsystems can be achieved not only using the cryptographic encryption of data (e.g., with a public key), but also via hidden steganographic storing of the necessary data. Why the normal cryptographic protection of smart-microsystems is not enough? For example, in the case of MITM-attack, the attacker becomes embedded into the microsystem's telecommunication channel, hooks, opens and modifies the messages that are passed by the readout device or the smart card (hence the "MITM-attack" means: "Man-In-The-Middle attack" — the attacker is in the middle of the link — between the transmitter and receiver). Such attacks are used against the smart-microsystems of banking equipment, in the access control systems (ACS), in the security-inspection systems, for radio-frequency identification (RFID) of objects, when the data stored in the smart cards and RFID-tags are read or written by the means of radio signals, intercepted by a bystander. The

economic damage from breaking of the banking systems, access control systems and security-screening equipment, RFID-systems can run into millions of rubles. According to the expert estimates, it is significantly lower than in the case of attack on the smart-microsystem through the controlled MEMS and NEMS-devices when it is possible to gain a control over the unmanned machine of aircraft-, helicopter-, land-, underwater- or above-water type. In the case of MITM-attack, the attacker, embedding in the middle of the communication channel, switches the control system on itself, blocks the "external orders" to the system and makes a "drone" into a weapon, for example for a terrorist attack. As the technology of breaking of the cryptographic systems and equipment are being improved (recall, for example, the development in 2012 of a quantum computer by the Canadian company "D-Wave Systems" with the speed of computation, according to assessment tests, in 3600 times faster than modern personal computers), and the cost of their development by the orders lower than the damage, which they can cause, the existing encryption is no longer enough to protect the communication channels and control systems in the financial-economic, security-investigative and transport-logistics industries. It is necessary to use the cryptosystems in conjunction with the computer steganography (CS), which allow to increase the level of information security for MEMS- and NEMS-devices.

Application of CS is justified for the smart-microsystems because, unlike to the cryptography, it possesses hiding of data transfer, transmitting protected information in a special stego-package (file-container). But if in the development for a specific user, the application of the "individually configurable" CS methods for data encapsulation does not imply negative consequences for developers, then at the final integration of the different systems the problems arise related to their functioning. They require additional hardware configuration.

Features of the application of CALS, CASE, OLAP and OLTP technologies

Among the issues of the smart-microsystems use for data protection, it should be noted the actively used instruments of CALS-technologies, providing continuous acquisition and life-cycle support (CALS). Each stage of the life cycle is characterized by the accumulation of data on the production and analysis of the degree of their compliance with the demands of the market — it is necessary that a new life cycle began from the correction and refinement of performance of the demanded products. The data on the closed characteristics should be secretly passed from one life cycle stage to another. It should be noted, that the different stages of a life cycle often correspond to the different companies

(manufacturers, suppliers and consumers of MEMS and NEMS-devices), information support systems of that are often dissimilar. For this reason, it is almost necessary to pass the hidden messages in the chain of the life cycle with a variable size in a file-container, which has a different format and a variable structure.

For example, suppose there are N stages of the life cycle, whereas for a concealing message with a_i size and steganographic file-container of a volume b_i , the following inequality holds true:

$$a_i < b_i, \quad i = 1, \dots, N. \quad (1)$$

For conditions of stego-resistance, the inequality can be hardened

$$a_i \ll b_i, \quad i = 1, \dots, N. \quad (2)$$

In application of the CS in the heterogeneous information environments, the possible solution is to redesign by the CASE-tools (Computer-Aided Software Engineering, CASE) for reduction of the file-containers to a single format or iterative procedure of "data encapsulation": each filled steganographic file-container becomes a message being placed into the empty steganographic file-container at the next stage (iteration) as long as the level of "data encapsulation" becomes equal (or become not lower) to the specified in the beginning of the procedure.

Implementation of the CS methods also often prevents the use of OLAP-technologies of Online analytical processing of data (OLAP), allowing to build the multidimensional information cubes (MIC). The cross sections of the MIC provides a samples of data by request specified by a section (fig. 1).

The MIC is based on the three coordinate axes, each of which is a single database field of smart-microsystem (the text information is coded using numbers, so any text can be represented as a number, plotted on the corresponding coordinate axis and a point on the edge of the cube corresponds to the text value of the database). Fig. 1 and fig. show the 2 database of the three fields in the information smart-microsystem, which contains values for each entry. The maximum and minimum values for each field form cube boundaries within which a set of points is contained, each of which is a database record for smart-microsystem. By scaling the size of the axes and performing parallel translation, you can get a cube, the origin of the coordinates is in one of the vertices. The queries are formulated in the form of a system of equations describing the planes, intersecting the cube. For example, fig. 1 shows the three requests, each of one corresponds a cube's area. To receive the answer on a query to the database of an information smart-microsystem about records with field values greater or less than the specified, the sections of OLAP-cube become built and the entries

(terms) become searched, corresponding to the given conditions. Fig. 2 illustrates the case of linear dependence in the equations

$$A_1x + B_1y + C_1z \leq D_1; \quad (3)$$

$$A_2x + B_2y + C_2z \geq D_2, \quad (4)$$

so the answer to the inquiry 4 will be area of OLAP-cube, located between the equations (3) and (4) of planes intersecting a cube (N -dimensional cube to the database of the N fields is constructed similarly).

Using of the mechanism of CS data encapsulation involves the construction of two OLAP-cubes (opened and hidden), differing in the structure and number of measurements. Since any measurement can be theoretically hidden for an object in the steganographic file container, we get the task of building of a hypercube by combining its opened and closed parts. A possible way of the construction of a hypercube of two parts is the use of the theory of function of a complex variable (complex analysis), often used in the CS.

Another feature of a smart-microsystem, which is difficult to implement by CS-methods, is the use of on-line transaction processing (OLTP), used in the situations of the shared access to the large arrays of data. This enables rapid processing of requests to the database tables of information smart-microsystem containing millions of records and working around the clock seven days a week (for example, the system of tickets booking for trains and planes, withdrawal or transfer of cash on the cards in ATM, calculation of the coordinates via GLONASS/GPS satellite systems, monitoring of aerospace area by unmanned systems). In such systems, the number of rows with hidden data comparable with the open part of the table (for example, may be up to half of the volume of data). In this case it is needed to develop a mechanism for quick access to the large arrays of data hidden in the steganographic file container. Considering that the access time is proportional to the amount of data, the allocation of additional containers is needed for the information security of smart-microsystems — they will store the technical information about the possibility of quick access to the hidden data stored in the repository. The stegorepository is formed to hide data in the service container. The files performing the role of additional containers (e.g., drivers of information systems) are designed accordingly. It is also possible to use files with voice messages and video or equivalent, resistant to the steganographic analysis.

These properties make it difficult to use the CS to hide data in the smart-microsystems. In conventional systems, such problems do not arise because of the commonality of formats and types of data, homogene-

ity of programming style, and unified policy of company management, who runs one smart-microsystem.

To ensure the information security of a smart-microsystems by the CS technique, it is advisable to improve mechanisms of hidden storage and conversion information to provide the data steganographic resistance to the interception in the networks of enterprise-level in transmission [2]. As the cryptographic systems are not enough to protect the smart-microsystems, it is necessary to combine cryptographic and steganographic methods for smart-microsystems in the case of in a multi-format files containers. It is proposed to use the deallocation of the hidden data by the common containers and multiple embedding of private containers. Let us examine them in detail.

Deallocation of the hidden data by the common containers

Suppose, than there are L -messages of hidden data with the volume u_i ($i = 1, \dots, L$), which need to be spread by M steganographic containers with the volume v_j ($j = 1, \dots, M$). The inequality is obviously

$$u_1 + u_2 + u_3 + \dots + u_L < v_1 + v_2 + v_3 + \dots + v_M. \quad (5)$$

In it (5), the fact is reflected that the sum of the volumes of hidden messages should be less than the sum of volumes of containers. It should be noted, that the inequality (5) is valid for the application of steganographic systems with a high degree of compression of messages used in cryptographic methods. For example, use of a double compression (practically permitted by the mechanisms of some archivers for files of a number of formats), allowing in some cases, the inequality:

$$u_1 + u_2 + u_3 + \dots + u_L > v_1 + v_2 + v_3 + \dots + v_M, \quad (6)$$

while the inequality (5) should be rewritten as

$$x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_L < v_1 + v_2 + v_3 + \dots + v_M, \quad (7)$$

where x_i — the result of a double compression of a message u_i , $i = 1, \dots, L$. When using the steganographic systems without a high degree of compression of the the posts, the inequality (5), by analogy with (2), can be written as:

$$u_1 + u_2 + u_3 + \dots + u_L \ll v_1 + v_2 + v_3 + \dots + v_M, \quad (8)$$

as the total message size should be much smaller than the size of the containers.

It should be noted, that the two-fold compression in the formulas (6) and (7), such as the archiver RAR, works as follows. At the maximum compression of a large number of files of different formats, which are located in the subdirectories (for example, personal data about the owners of smart-microsystems), the archive

file with a "loose" structure is formed, which can be compressed by 20... 50 %. When using the steganographic systems with low compression ratio, the formula (8) is valid. The example of use of the reallocation of hidden data on common containers is shown in fig. 3. To store data on filling of the containers with a capacity v_j ($j = 1, \dots, M$) by the blocks of hidden information u_i ($i = 1, \dots, L$), the stegorepository becomes formed having a container volume w_k , $k = 1, \dots, N$ (not shown in fig. 3). The selective cryptography of data blocks for the steganographic container files of different formats is allowed.

Guarantee of the information security of smart-microsystems is based on combination of the cryptographic and steganographic programs, including data storage. Among cryptographic programs we can note "FileAssurity Open PGP", "BestCrypt" and "PGP Personal". Among steganography program we can note "Steganos Security Suite" and "StegoZaurus" (the lists of such programs are not full). The combination of cryptographic and steganographic programs is carried out on the basis of their applicability to various file formats. Another method of combining of the cryptographic and steganographic systems to ensure the security of smart-microsystems in a case of multi-format files containers consists in repeated embedding of the steganographic private containers into each other.

Multiple embedding of the private containers

The main differences between the method (2) and the method of deallocation of the private data on the common containers (method 1), is a apartness (individuality) of the containers, which do not record the hidden data from other messages (in method 1, the containers are common for different messages) and the multiplicity of the embedding procedure (method 1 includes a one-time procedure). Let's briefly describe the method of information security of smart-microsystems through multiple embedding of the hidden message into the steganographic common containers.

The steganographic files container become selected among available for each message, which store a message by its parts. The files containers filled by message parts become combined into a new message, which becomes distributed on a free (blank) files containers. Each allocation of a message in empty file container increases its steganographic resistivity. This procedure repeats several times until the parameter of steganographic resistivity of a message reaches the value set by the user. The methods of calculating of steganographic resistivity in data concealing in various file formats with the help of various steganographic programs, as well as at different settings, are stored in a separate database of one of the information subsystems.

An example of multiple embedding of the private steganographic files containers for information security of the smart-microsystems is shown in fig. 4, which shows the message q and s . On the first level, they are distributed by steganographic files containers $q_{11}, \dots, q_{1r(q,1)}$ and $s_{11}, \dots, s_{1r(s,1)}$, respectively. The steganographic files containers of two groups (q and s) become combined for further distribution as new messages by containers of a new level. For example, for the level h , the containers of q group are denoted $q_{h1}, \dots, q_{hr(q,h)}$, for a group $s - s_{h1}, \dots, s_{hr(s,h)}$. In particular, the open messages can serve in the role of steganographic files containers. At each level, the selectively cryptography of the selected blocks of data for various formats of steganographic files containers is possible.

Conclusion

The cryptography and CS means are not only possible to provide information security of the smart-microsystems. There are other software and hardware solutions (for example, software protection keys, biometric means) used in parallel and independently from other complexes. In response to growing security threats to MEMS and NEMS, embedded in unmanned vehicles, to prevent interception of management and transformation into an instrument of a terrorist attack, it is necessary to develop systems based on steganography techniques. Another danger that threaten the leakage of confidential data is the use of smart-microsystems for remote control of smart TV with unauthorized transfer of audio and video data without permission of the users of household appliances through a built-in smart TVs microphones and video cameras. The methods of the computer steganography improve the safety of smart-microsystems of the corresponded applications [3].

In conclusion we note that the regular replenishment of steganographic files containers (superior private data on the volume) can be easily achieved due to the obtaining of new multi-format files. It promotes the implementation of methods considered combination of cryptographic and steganographic methods of the information security of the smart-microsystems.

References

1. Luchinin V. V., Sadovaya I. M. *Informatsionnaya bezopasnost smart-microsystem i tehnologii*. SPb.: SPbGETU "LETI", 2015.
2. Gorelik A. L., Ratkin L. S. Ob ustoychivosti korporativnykh informatsionnykh setey, *Voprosy oboronnoy tekhniki*, 2003, pp. 43—45.
3. Ratkin L. S. *Patent na izobretenie RF* no. 2322693, priority ot 21.10.2005, data publikatsii zayavki 27.04.2007, opublikovano 20.04.2008, Bulletin no. 11.

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ Micro- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

УДК 53.06

Р. А. Милованов, зам. нач. отдела, Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, г. Москва, e-mail: Milovanov_r@inbox.ru,

Е. В. Ерофеева, мл. науч. сотр., Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, г. Москва, лаборант-исследователь, МГТУ МИРЭА, e-mail: gaechkarus@gmail.ru

СОВРЕМЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ ДЛЯ СИСТЕМ С ФОКУСИРОВАННЫМ ИОННЫМ ПУЧКОМ

Поступила в редакцию 02.07.2015

В настоящее время существует большое число различных типов ионных источников, разрабатываемых или применяемых в системах с фокусированным ионным пучком (ФИП). Длительное время большинство систем с ФИП комплектовались только жидкометаллическими источниками ионов галлия (Ga^+). Однако удобство эксплуатации ФИП-систем, постоянно расширяющийся спектр их применения, недостатки ионов галлия (акцепторная примесь и др.) и желание расширить спектр применяемых ионов (включая реактивные, положительные и др.) привели к тому, что в настоящее время активно исследуются, разрабатываются и внедряются в коммерческие ФИП-системы источники ионов нового типа. В статье осуществлена попытка классифицировать современные и перспективные ионные источники для ФИП-систем по их конструктивным особенностям. Рассмотрены жидкометаллические источники (включая источники на основе сплавов), плазменные (включая источники с индуктивно связанной плазмой, на основе электронно-циклотронного резонанса, многоострийные, с разрядом Пеннинга и на основе дуоплазматрона), газовые автоионные, электролитические (включая на основе ионных жидкостей и с твердым электролитом), а также с магнитооптической ловушкой.

Ключевые слова: фокусированный ионный пучок, источник ионов, LMIS, LMAIS, GFIS, ICPI, ECRIS, MCIS, PTIS, DPIS, ILIS, SEIS, MOTIS, UCIS, CAIS

Введение

В настоящее время перспективными и интенсивно развивающимися методами исследований в микро- и наноэлектронике являются методы на основе применения фокусированных ионных пучков (ФИП). Системы с ФИП (ФИП-системы) используют для высокоразрешающей сканирующей ионной микроскопии, локального ионно-лучевого травления (включая селективное) и осаждения материалов, ионной имплантации, прототипирования и изготовления микро- и наноэлектромеханических систем (МЭМС и НЭМС) и др.

Система с ФИП состоит из следующих основных составных частей: ионного источника, ионной колонны, рабочей камеры, вакуумной системы, детектора вторичных электронов и/или вторичных ионов, систем газовой инжекции и управляющего

компьютера. Также системы с ФИП могут быть дополнительно укомплектованы электронной колонной и/или дополнительной ионной колонной.

Цель данной работы — исследование принципов построения ионных источников, так как именно тип источника ионов определяет основные характеристики систем с ФИП (разрешение, спектр доступных ионов и др.).

В настоящее время источники ионов в системах с ФИП можно разделить на следующие основные группы (рис. 1):

- жидкометаллические источники (англ. liquid metal ion source — LMIS);
- плазменные источники (англ. plasma ion source — PIS);
- газовые автоионные источники (англ. gas field ion source — GFIS);

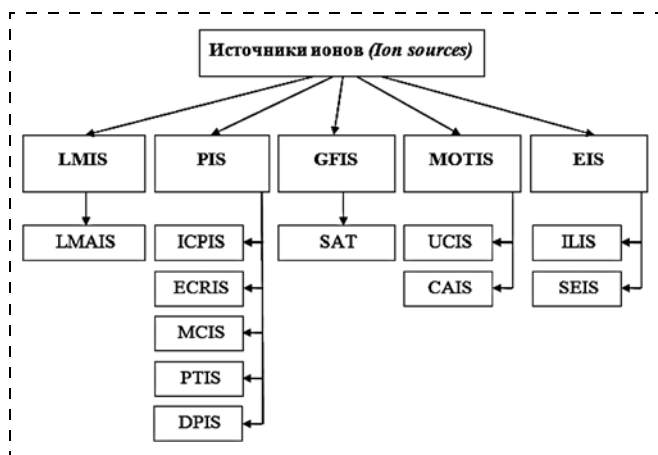


Рис. 1. Основные типы ионных источников в системах с ФИП

Fig. 1. The main types of ion sources in systems with FIB

- источники с магнитооптической ловушкой (англ. magneto-optical trap ion source — MOTIS);
- электролитические источники (англ. electrolyte ion source — EIS).

Жидкометаллические источники ионов — LMIS

В настоящее время LMIS является наиболее распространенным типом источников ионов для коммерческих ФИП-систем. В источниках типа LMIS формирование ионного пучка основано на стабилизации полем конуса жидкого металла, из которого происходит испарение ионов (испарение полем). К вершине конуса металл поступает из резервуара по тонкому стержню (эмиттеру). При подаче напряжения на вытягивающий электрод на заостренном кончике эмиттера формируется жидкометаллический конус Тейлора, диаметр острия которого составляет 5 нм [1–5]. Область конуса Тейлора, из которой эмитируется большинство ионов, называют виртуальным источником (рис. 2). Постоянный ток ионного пучка поддерживается благодаря балансу между силами поверхностного натяжения и электростатической [4].

Длительное время единственно доступными LMIS были источники ионов галлия (Ga^+), в которых слой жидкого галлия находится на поверхности вольфрамового стержня [2]. Широкое использование галлия обусловлено рядом причин:

- низкой температурой плавления ($\sim 30^\circ\text{C}$), которая минимизирует возможность возникновения химических реакций между жидким металлом и вольфрамовым стержнем — эмиттером;
- высокой стабильностью эмиссии при температуре плавления;
- высокой угловой интенсивностью тока эмиссии при малом разбросе ионов по энергии [6].

Основными достоинствами LMIS (Ga^+) являются: высокая яркость ($\sim 10^6 \text{ A}/\text{cm}^2$), большие токи ионного пучка (до 100 нА), максимальное

разрешение (до 2,5 нм), малый размер виртуального источника (50 нм), относительно малый разброс по энергии (4...6 эВ), угловая интенсивность (0,02 мА/ср), время жизни источника ($> 1000 \text{ ч}$). Основным недостатком является "загрязняющий" характер пучка (ионы галлия являются акцепторной примесью для кремниевых изделий).

Желание расширить спектр применяемых ионных пучков (включая заряд ионов, состав, возможность использования кластеров и т. д.), а также возможность выбора необходимого ионного пучка (без использования дополнительных колонн) привело к появлению жидкометаллических источников на основе различных сплавов (англ. liquid metal alloy ion source — LMAIS), выбор необходимого пучка в которых осуществляется Е×В-фильтром. Конструктивно источники LMIS и LMAIS немного различаются в зависимости от используемого металла или сплава, однако имеют общую структуру.

К сплавам, применяемым в LMAIS, предъявляется ряд требований:

- содержание необходимых ионов и/или кластеров (обусловлено естественной необходимостью использования конкретных ионов для решения выбранных задач);
- пониженная температура плавления (обусловлено необходимостью исключить или минимизировать химическое взаимодействие сплава с эмиттером; сплавы с пониженной относительно его компонентов температурой плавления получают при концентрациях, образующих эвтектический сплав);
- низкое давление насыщенных паров при температуре плавления (обусловлено необходимостью минимизации естественного испарения источника ионов, т. е. увеличением его "времени жизни");
- отсутствие химического взаимодействия между компонентами сплава и материалом источника (обусловлено исключением влияния элементов сплава на форму эмиттера и на состав ионного пучка).

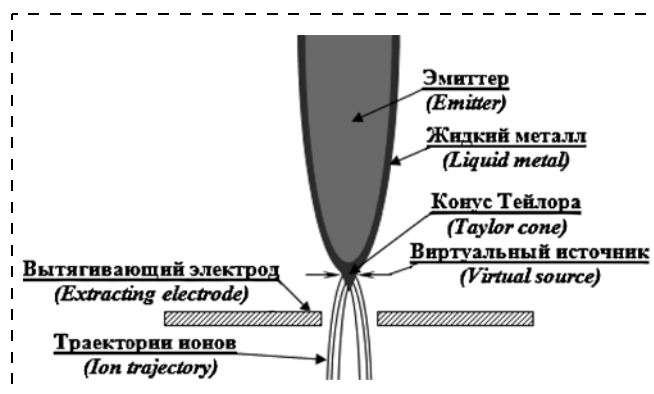


Рис. 2. Схема жидкометаллического источника ионов — LMIS

Fig. 2. The circuit of a liquid-metal ion source — LMIS

В настоящее время исследования LMAIS-источников проведены со следующими сплавами: AgGe, AgAuGe, AlGe, AuBeSi, AuBGeNi, AuBi, AuCeSi, AuCoGe, AuCrGe, AuDyGe, AuDySi, AuErSi, AuEuSi, AuFeGe, AuGe, AuGdSi, AuGeMn, AuGeNi, AuGeV, AuHoSi, AuLaSi, AuNdSi, AuSbSi, AuSiSm, AuSiTb, AuSiTm, BPt, BiGaln, CCo, CoDy, CuP, CuPPt, DyNi, GaIn, GaZn, GeNiTi, HoNi, AuGeSi, AuSi, CoNd, CoGe, ErNi, ErFeNiCr, SnPb, InGa, MnGeSi, GaBi, GaBiLi, AlCeC. Таким образом, использование LMIS- и LMAIS-источников потенциально позволяет формировать большое число разнообразных пучков положительных ионов и/или ионных кластеров типа Ge^+ , Ge^{++} , Ag^+ , Ag^{++} , Ge_2^+ , $\text{Ag}_{2,3,4,5}^+$, Al^+ , Be^+ , Si^+ , $\text{Bi}_{3,5,7,9,11}^{++}$, $\text{Bi}_{2,3,4,5,6,7}^+$, Mn^+ , Ni^+ , Sn^+ , Al^+ и др. [7–12].

Коммерчески доступные ФИП-системы с LMIS в настоящее время производятся следующими компаниями: FEI Company (США), Zeiss (Германия), Tescan (Чехия), DCG (США), Hitachi (Япония) и Jeol (Япония). В качестве рабочего металла указанные компании используют галлий. Коммерчески доступные ФИП-системы с LMAIS в настоящее время производит только компания Raith (Германия).

Газовые автоионные источники ионов — GFIS

Газовые автоионные источники ионов представляют собой заостренный стержень (эмиттер), к которому приложено высокое напряжение. Атомы рабочего газа ионизируются в сильном электрическом поле вблизи острия (автоионизация или ионизация полем). Первая ФИП-система с GFIS-источником была представлена фирмой ALIS corporation в 2006 г. [13]. В качестве рабочего газа использовался гелий, а материалом заостренного стержня являлся вольфрам. Нейтральные атомы гелия, попадая в область максимального электрического поля (острие эмиттера), ионизируются и ускоряются в сторону экстрактора (рис. 3).

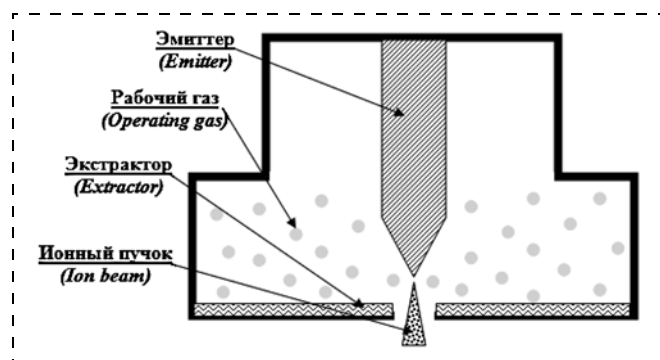


Рис. 3. Схема газовой автоионной системы — GFIS
Fig. 3. The circuit of a gas field ion source — GFIS

Для уменьшения числа виртуальных источников (областей, в которых происходит ионизация) осуществляется процедура "затачивания" (англ. sharpeness) эмиттера. При "затачивании" на предварительно ограниченную (три грани) вольфрамовую иглу подается высокое (5...30 кВ) напряжение. При таких условиях на "острых" краях источника (отдельные атомы) возникает электрическое поле до 50 В/нм, что приводит к их испарению полем. Таким образом, острие вольфрамовой иглы "затачивается" до трех атомов на конце. При понижении напряжения на игле до значений, которым соответствует электрическое поле 30 В/нм, вольфрам не испаряется, а атомы рабочего газа ионизируются непосредственно в области острия — трех атомов в плоскости [14].

Следует отметить, что в ФИП-системах с GFIS-источником результирующий (взаимодействующий с образцом) ионный пучок формируется не из всех трех точек, а выбирается специальной апертурой [15] только из одной.

Серьезными достоинствами рассматриваемых источников ионов являются: высокая яркость: $> 3,4 \cdot 10^9$ А/см² [16]; малые размеры виртуального источника: 0,5 нм [17]; минимальный размер пучка: 0,25 нм [15, 18]; малый разброс по энергии: 0,25...0,5 эВ [16, 19, 20].

К недостаткам можно отнести необходимость охлаждения эмиттера жидким азотом и регулярное выполнение процедуры "затачивания".

Необходимо отметить, что исследования по возможности создания "неохлаждаемых" GFIS проводились, однако упоминания об их применении в коммерческих ФИП-системах отсутствуют. Тем не менее, в работе [21] показано, что использование иридиевого эмиттера позволяет не использовать охлаждение жидким азотом.

Склонность вольфрама к окислению и связанное с этим ограничение на потенциальные рабочие газы (типы ионов) обусловили одно из направлений по развитию GFIS, связанное с нанесением тонкого слоя благородного металла на вольфрамовый эмиттер. В модернизированных указанным способом GFIS достигают острия эмиттера в один атом. Такие GFIS получили название "одноатомное острие" (англ. single-atom tip — SAT) [22]. В работе [23] показаны примеры получения пучков ионов водорода, гелия, аргона и кислорода с использованием GFIS типа SAT — Ir/W (вольфрамовый эмиттер, покрытый иридием).

Также стоит отметить, что в ФИП-системах с GFIS может применяться источник нескольких ионов, например He^+ и Ne^+ [24].

Коммерчески доступные ФИП-системы с GFIS в настоящее время производятся только компанией Zeiss (Германия) — система Orion NanoFab [25].

Плазменные источники ионов — PIS

Плазменный источник ионов — PIS представляет собой малогабаритный плазменный источник с экстрактором. В настоящее время есть данные о применении в системах с ФИП PIS с индуктивно связанной плазмой (англ. inductively coupled plasma ion source — ICPIS) [26] и плазмой на основе электронно-циклотронного резонанса (англ. electron cyclotron resonance ion source — ECRIS) [27, 28]. Также существуют данные об исследованиях многоострижных (мультикасповых) источников ионов (англ. multicusp ion source — MCIS) [29–35], источников ионов с разрядом Пеннинга (англ. penning type ion source — PTIS) [29, 36, 37] и источников на основе дуоплазматрона (англ. duoplasmatron ion source — DPIS) [38–45].

Наиболее изученными и распространенными в настоящее время являются ICPIS, оптимизированные для генерации высокоплотных ионных пучков с низким разбросом по энергии [46]. Ионизация рабочего газа в ICPIS основана на использовании явления электромагнитной индукции, где возбуждение и поддержание разряда обеспечиваются ВЧ вихревым электрическим полем с замкнутыми силовыми линиями, которые индуцируются ВЧ током антенны.

На рис. 4 приведены схема и изображение ICPIS, разработанного для применений ФИП. Источник состоит из кварцевой трубки диаметром 30 мм с внешней 4-витковой антенной и оптической системы ионной колонны. Ионный пучок вытягивается двухэлектродной системой с апертурой (напряжение экстрактора составляет единицы киловольт [47]). Для минимизации емкостного влияния на плазму используется клетка Фарадея. При отсутствии клетки Фарадея ионный ток источника увеличивается за счет емкостной связи, однако разброс энергии ионов в пучке тоже увеличивается, что приводит к увеличению хроматической абберации. Более того, время жизни ICPIS уменьшается из-за напыления тонкой металлической пленки на внутреннюю поверхность кварцевой трубки (из-за распыления электродов) [48].

Размеры области генерации ионов в ICPIS многократно превышают размеры виртуальных источников LMIS (включая LMAIS) и GFIS и составляют 10...100 мкм в коммерческих ФИП-системах [49, 50].

Основными характеристиками ICPIS являются: потенциальная возможность использовать любые ионы; высокая яркость: $10^3...10^4$ А/см² [49]; большие токи ионного пучка — до единиц миллиампера [51]; большая угловая интенсивность (параллельный пучок): 5...10 мА/ср [50]; минимальный размер пучка 25 нм [49]; размер виртуального ис-

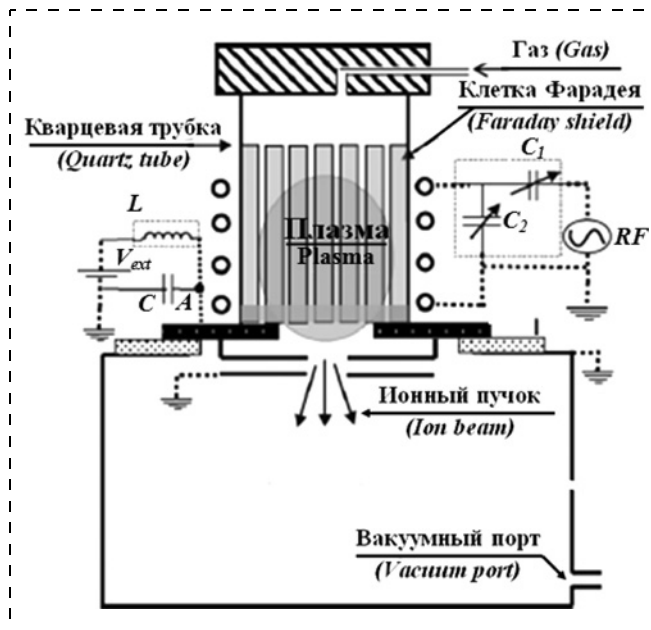


Рис. 4. Схема ICPIS, разработанного для применений ФИП-системах [48]

Fig. 4. The circuit of ICPIS developed for application in FIB-systems [48]

точника 10...100 мкм [49, 50]; относительно большой разброс по энергии: 2,6...10 эВ [46, 48, 49, 51]; малое время жизни ICPIS: 200 ч [48].

В настоящее время известны ICPIS следующих ионов [27, 50–52]: ксенона (Xe^+); криптона (Kr^+); азота (N_2^+); кислорода (O_2^+); гелия (He^+); водорода (H^+ , H_2^+); неона (Ne^+); аргона (Ar^+). Большинство указанных ICPIS исследуются при создании прототипов ФИП-систем. В настоящее время в коммерчески доступных ФИП-системах используют в основном ICPIS-источники ионов ксенона: FEI Company — Vion PFIB и Tescan — FERA3.

В многоострижных (мультикасповых) источниках ионов (MCIS) генерация ионов осуществляется в миниатюрном реакторе с магнитным удержанием плазмы. В первых MCIS плазма формировалась термоэлектронным катодом прямого накала (нитевидный разряд) и удерживалась полем постоянных магнитов (рис. 5, см. вторую сторону обложки) [29]. В дальнейшем в качестве генераторов плазмы стали исследоваться высокочастотные ICP-источники [31].

Название "многоострижные", или "мультикасповые" (англ. multicusp), источники получили от конфигурации магнитного поля [30, 32, 33]. Постоянные магниты, которые устанавливаются по периметру плазменного реактора с чередующейся полярностью, создают мультикасповую (мультипольную остроугольную) конфигурацию магнитного поля. Магнитное поле достигает максималь-

ного значения возле стенки разрядной камеры и экспоненциально спадает к центру [53] до нуля.

Перед областью экстракции ионного пучка расположен магнитный фильтр с поперечным магнитным полем. Электроны, обладающие малой энергией (медленные электроны), под влиянием микронеустойчивостей и столкновений в плазме легко диффундируют через магнитную завесу поперек силовых линий поля, заполняя область между фильтром и областью экстракции. В этой области образуется плазма, не содержащая электронов с большой энергией.

Как известно из теории дальних взаимодействий, в силу закона падающего трения эффективное сечение взаимодействия медленных электронов с ионами будет значительно больше, чем электронов, обладающих большой энергией. Это способствует более быстрому выравниванию температур электронной и ионной компонент в плазме, у которой нет быстрых электронов, делая ее более спокойной и однородной, снижая уровень самосогласованных полей в плазме, являющийся одним из основных факторов, который определяет температуру ее ионной компоненты.

При взаимодействии медленных электронов с атомами и молекулами рабочего газа образуются преимущественно ионы одного типа. Плазма характеризуется однородным распределением плотности частиц, меньшим уровнем шумов, в ней подавляются различного рода плазменные неустойчивости, что также способствует снижению температуры ионов в плазме. Таким образом, между фильтром и областью экстракции создается плазма с малой температурой, однородная по составу и плотности. При этом низкоэнергетичные аксиальные ионы вытягиваются через открытую часть реактора. Таким образом, магнитный фильтр отражает высокоэнергетичные электроны, увеличивая плотность плазмы [30] и уменьшая разброс энергии ионов в пучке [33].

Основными характеристиками MCIS являются: возможность формирования ионных пучков различных материалов; формирование "незагрязняющих" (англ. noncontaminate) ионных пучков [35]; малый разброс ионов по энергии: 0,7...3 эВ [33, 54]; низкая ионная температура: 0,1 эВ [35]; большие токи ионного пучка; малая яркость: $< 1,5 \cdot 10^3 \text{ A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ [34]; малое время жизни MPIS с нитевидным разрядом: 100...500 ч [33]; малое разрешение: 50 нм [30]; размер виртуального источника: 16,9 (Kr^+)...40 (He^+) нм [29].

В настоящее время известны MPIS следующих ионов [29, 30, 35, 55, 56]: водорода (H^+ , H_2^+ , H_3^+); гелия (He^+); неона (Ne^+); аргона (Ar^+); кислорода

(O^+); бора (B^+); ксенона (Xe^+); фосфора (P^+); меди (Cu^+); никеля (Ni^+); хрома (Cr^+); палладия (Pd^+); криптона (Kr^+); молекулярные ионы (C_{60}^+). Большинство указанных MPIS исследуются при создании прототипов ФИП-систем. В настоящее время коммерчески доступные ФИП-системы с MPIS отсутствуют.

В источниках ионов с разрядом Пеннинга — PTIS — зажигание газового разряда осуществляется за счет пробоя газового промежутка катод — анод, между которыми прикладывается напряжение от нескольких сотен вольт до киловольт (рис. 6). Напряжение на разрядном промежутке должно быть минимальным для зажигания и поддержания стабильного газового разряда. Газовый разряд горит в продольном магнитном поле, создаваемом, как правило, постоянным магнитом между двумя катодами и кольцевым анодом. Катоды источника обычно изготавливают из алюминия, а корпус — из мягкого железа для замыкания магнитных линий. Эмиссия электронов из катодов происходит за счет их бомбардировки ионами разряда. Из-за приложенного магнитного поля электроны движутся по спирали, что увеличивает их путь и число ионизирующих соударений на пути катод — анод, т. е. плотность плазмы.

Возможность эксплуатации PTIS только в импульсном режиме привела к тому, что в настоящее время источники данных типов не развиваются в направлении их применения для ФИП-приложений, однако показатели яркости ($5 \cdot 10^4 \text{ A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$), плотности тока (более $1 \text{ A}/\text{cm}^2$ [37]) и возможность формирования пучков отрицательных ионов делают привлекательным их использование при исследовании непроводящих образцов [29].

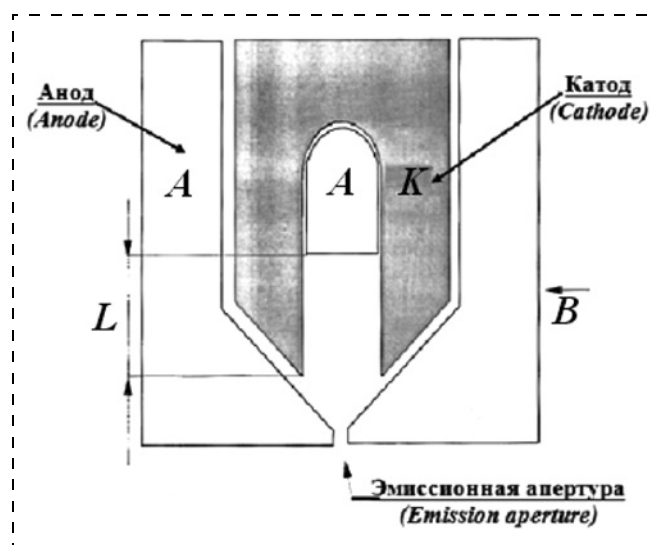


Рис. 6. Схема ионного источника с разрядом Пеннинга [36]
Fig. 6. The circuit of a penning type ion source [36]

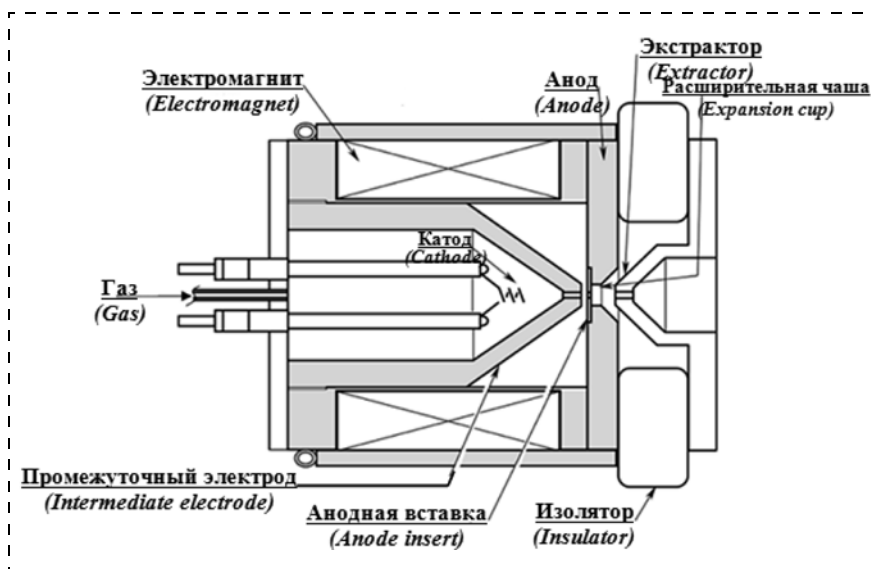


Рис. 7. Схема источника ионов на основе дуоплазматрона [38]
Fig. 7. The circuit of ion source on the basis of duoplasmatron [38]

В источниках ионов на основе дуоплазматрона — DPIS — плазма формируется в области промежуточного электрода с катодом (рис. 7). Промежуточный электрод, изготовленный из магнитного материала, сужается к апертуре (для сжатия плазмы), через которую плазма достигает анода. Расположенный вокруг промежуточного электрода магнит создает максимальное поле на выходе промежуточного электрода. Таким образом, плотность плазмы на выходе промежуточного электрода повышается за счет его геометрических параметров и магнитного поля, что приводит к формированию ее двойного слоя [38].

Электроны, испускаемые катодом внутри промежуточного электрода, ускоряются в сторону анода полем двойного слоя и ионизируют нейтральные атомы сжатой плазмы. В результате степень ионизации плазмы в канале приближается к 100 %. В то же время плотность электронов около выходной апертуры часто становится слишком большой для эффективной экстракции. В таком случае граница плазмы рассеивается на выходе апертуры и приобретает выпуклую форму, из-за чего формируется сильно расходящийся ионный пучок.

По этой причине для увеличения яркости ионного пучка контроль плотности электронов в области экстракции осуществляется с помощью "расширительной чаши" (англ. plasma expansion cup) [39].

Также DPIS может быть источником отрицательных ионов при следующих конструктивных изменениях:

- замене электрода внутри промежуточного электрода на трубку с добавлением цезия в состав рабочего газа [40];

- смещении осей апертуры промежуточного электрода и вытягивающей ионный пучок апертуры [41];
- приложении магнитного поля в области вытягивающей апертуры, которое выполняет роль магнитного фильтра [39].

Основными характеристиками DPIS-источников являются: возможность формирования различных ионных пучков, включая пучки отрицательных и положительных ионов; высокая яркость ионного пучка: $1100 \text{ A}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{B})$ (для Ar^+) [42, 43]; максимальное разрешение: 85 нм [42]; большой разброс по энергии ионов: 5...15 эВ [42, 45]; угловая интенсивность: 10 мА/ср [45]; размер виртуального источника: 36...300 мкм [44]; малое время жизни источника: 50... 500 ч [42].

Известны исследования со следующими ионными пучками: аргона (Ar^+), кислорода (O^+), фтора (F^+), хлора (Cl^+), брома (Br^+), йода (I^+), водорода (H^+), гелия (He^+), азота (N^+) [42—44, 57]. В основном DPIS используются для масс-спектрометрии вторичных ионов, однако существуют работы, в которых указанный тип источников используется для ФИП-приложений. Вместе с тем, коммерческие ФИП-системы с источником ионов на основе дуоплазматрона отсутствуют.

Электролитические источники ионов — EIS

В настоящее время есть данные о применении в системах с ФИП электролитических источников двух основных типов: на основе ионных жидкостей (англ. ionic liquid ion source — ILIS) [29, 58] и с твердым электролитом (англ. solid electrolyte ion source — SEIS) [59, 60]. По конструкции и механизму эмиссии ILIS-источники аналогичны LMIS-источникам, за исключением материала — источника ионов (рис. 8). В ILIS-источниках используют расплавы органических солей, находящиеся в жидкой фазе при комнатной температуре и обладающие относительно низким сопротивлением (ионные жидкости) [61].

Ионная жидкость представляет собой смесь комплексных органических и неорганических ионов, обладающую минимальным давлением насыщенных паров и слабым поверхностным натяжением, позволяющим образовывать конус Тейлора (аналогично LMIS) [29]. Несмотря на схожесть с LMIS, ILIS имеют следующие особенности:

- возможность формирования пучков не только отрицательных, но и положительных ионов за

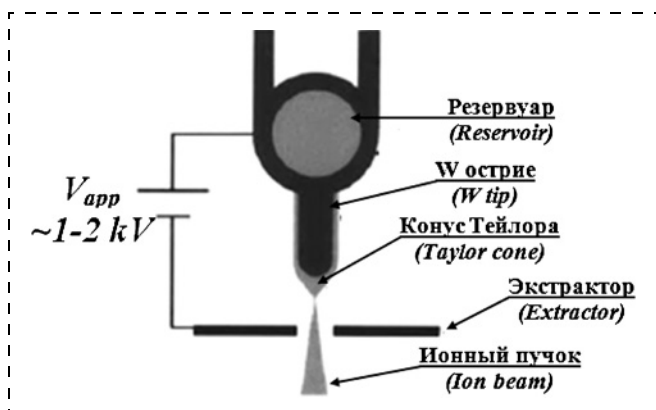


Рис. 8. Схема источника ионов на основе ионной жидкости [29]
Fig. 8. The circuit of a source of ions on the basis of ionic liquids [29]

счет смены полярности напряжения экстрактора (применение отрицательных ионов позволяет минимизировать зарядку непроводящих образцов за счет уравнивания выхода вторичных электронов падающими отрицательными ионами);

- потенциальная возможность использования тяжелых молекулярных ионов и реактивных ионов;
- обслуживание ILIS-источника проще, чем LMIS, так как не требует высокого вакуума и поддержания температуры плавления (ILIS-источники работают при комнатной температуре) [29].

Основными характеристиками ILIS являются: потенциальная возможность использования положительных и отрицательных молекулярных и реактивных ионов; высокая яркость — $6 \cdot 10^5 \dots 10^6$ А/см² [29]; большие токи ионного пучка — до 600 нА [62]; минимальный размер пучка 36 нм [29]; размер виртуального источника 20 нм [29]; относительно большой разброс по энергии — 6...8 эВ [63, 64]; малое время жизни ILIS: менее 100 ч [29].

Известны исследования со следующими ионными жидкостями: EMI-BF₄, EMI-IM, EMI-Beti, C₅MI-(C₂F₅)₃ PF₃, C₄mim-I, EMI-GaCl₄, EMI-N(CN)₂, EMI-C(CN)₃, BMI-FeBr₄, C₆MI-FeBr₄, C₆MI-FeCl₄, BMI-FeCl₄, EMIF2.3HF, HMI-PF₆ [58, 65—75].

Необходимо отметить, что в настоящее время коммерческие ФИП-системы с ILIS отсутствуют. Исследования проводятся с применением прототипов. Однако широкий спектр ионных жидкостей, которые могут быть использованы в ILIS, позволяет предположить, что в ближайшее время могут появиться коммерческие образцы. Вместе с тем необходимо отметить, что специфические особенности ионов (размеры, реактивность и др.) затрудняют использование ILIS в универсальных приборах, что, скорее всего, приведет к появлению узкоспециализированных промышленных систем.

Источники ионов на основе твердого электролита — SEIS — в настоящее время исследованы

слабо. Известны работы Escher'a и др. [59], в которых предложен и исследован источник ионов Ag⁺ для ФИП-приложений на основе твердого электролита (AgI)_{0,5}(AgPO₃)_{0,5}.

Известно, что в твердых электролитах ионы могут перемещаться свободно, как и в жидких [76]. Если твердому электролиту придать форму острия и соединить его с металлом — источником "рабочих" ионов, то при приложении поля ионы будут эмитироваться с острия, а образовавшиеся в электролите вакансии замещаться ионами из металла — источника "рабочих" ионов (рис. 9, см. вторую сторону обложки) [59].

В приведенных в [59] исследованиях с SEIS из твердого электролита (AgI)_{0,5}(AgPO₃)_{0,5} показано, что экстракция ионного пучка начинается при напряжении 15 кВ. Максимальный ток пучка 1 мкА получен при напряжении 20 кВ. Источник стабилен в течение 20 мин.

В работе [60] приведены результаты исследования источника на основе твердого электролита RbAg₄I₅, изготовленного нанесением (термическим испарением в вакууме) электролита на заостренный серебряный стержень с радиусом закругления 5 мкм. При комнатной температуре и значении вытягивающего напряжения 20 кВ получены токи ионного (Ag⁺) пучка ~15 пА. Повышение температуры SEIS до 92 °С привело к увеличению ионного тока до ~23 пА.

В настоящее время SEIS в коммерческих ФИП-системах не используются. Более того, отсутствуют данные о прототипах подобных систем. Несмотря на то что в работах [59, 60] исследовались только ионные пучки Ag⁺, авторы работы [60] считают возможным создание пучков Cu⁺, F⁻, O₂⁻ и H⁺ для селективного локального травления в перспективных ФИП-системах.

Источники ионов с магнитооптической ловушкой

Источники ионов с магнитооптической ловушкой (англ. magneto-optical trap ion sources — MOTIS), называемые также "ультрахолодные источники ионов" (англ. ultracold ion sources — UCIS), основаны на фотоионизации охлажденных (до температуры ~ мК) лазерами атомов, удерживаемых в магнитооптической ловушке (МОЛ) [77, 78].

Охлаждение происходит в вакуумной камере между двумя электродами (один прозрачный для лазеров, другой с зеркальной поверхностью) в области, в которой пересекаются шесть лазерных охлаждающих лучей. Из-за эффекта Доплера движущийся атом поглощает фотоны лазерного луча, энергия которых меньше энергии излучаемых атомом фотонов на величину доплеровского сдвига. Для компенсации притяжения с помощью двух соленоидов создается квадрупольное магнитное

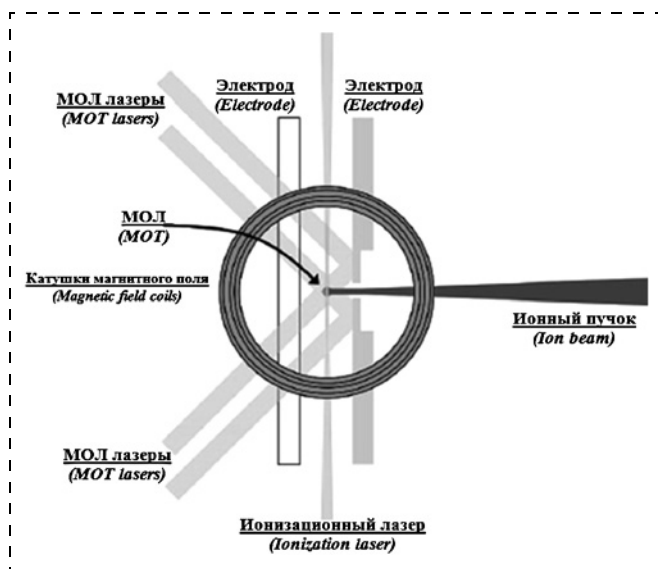


Рис. 10. Схема источника ионов с магнитооптической ловушкой — MOTIS [79]

Fig. 10. The circuit of a magneto-optical trap ion source — MOTIS [79]

поле. Соленоиды размещаются соосно перед и после области пересечения лазерных лучей. Ток в катушках течет в противоположных направлениях. Таким образом, атом полностью теряет свою скорость и удерживается в магнитооптической ловушке, которую пересекает ионизирующий лазерный луч. Полученные ионы вытягиваются через апертуру в зеркальном электроде (рис. 10).

Основными характеристиками MOTIS являются: возможность формирования ионных пучков — более 20 различных типов (включая источники ионов нескольких типов) [77, 78]; формирование "незагрязняющих" ионных пучков [79]; малый разброс по энергии: < 100 мэВ [77]; разрешение: потенциально менее 1 нм ($26,7 \pm 1$ нм, для Li^+ , ускоряющее напряжение (УН) — 2 кВ, ток пучка — 0,7 пА) [77—79]; угловое расхождение — менее 10 мкрад [79]; совместимость с существующими ионными колоннами; малая яркость — до 10^3 А/(см²ср · эВ) [79]; малые значения максимального тока пучка — десятки пА [79].

Теоретически доступны ионы (ограничены возможностью лазерного охлаждения): Li, Na, K, Rb, Cs, Fr, Mg, Ca, Sr, Cr, Ag, Cd, Hg, Al, He, Ne, Ar, Kr, Xe, Er, Yb, Dy [78]. В настоящее время коммерчески доступные системы ФИП с MOTIS отсутствуют. Вместе с тем существуют данные о прототипах источников следующих ионов: Cr^+ [79], Li^+ [77].

Источники ионов холодных атомов (англ. cold atom ion source — CAIS) являются модификацией MOTIS и основаны на фотоионизации охлажденных (до температуры ~ мК) лазерами атомов, удерживаемых в магнитооптической ловушке [80].

Основными недостатками MOTIS являются ограничения максимальных значений тока ионного

пучка (десятки пА) и его яркости, что связано с ограниченной скоростью "перезаполнения" области ионизации охлажденными атомами из-за малой скорости их диффузии [81].

Конструкция CAIS (рис. 11, см. вторую сторону обложки) позволяет устранить указанные недостатки. Пучок медленных атомов генерируется комбинацией двумерной магнитооптической ловушки (2D-МОЛ) и световозвращающего лазерного луча, направленного вдоль третьей оси ("толкающий" луч). "Толкающий" луч придает импульс охлажденным атомам вдоль оси 2D-МОЛ, создавая пучок атомов с четко определенной скоростью, проходящий через отверстие в ретроотражающем зеркале. Для цезия поток атомов в данном случае составляет $5 \cdot 10^{10}$ с⁻¹, поперечная температура ~ 5 мК, а аксиальная скорость 6...14 м/с (в зависимости от мощности "толкающего" лазера) [80].

Для увеличения интенсивности атомного пучка используется магнито-оптический компрессор (МОК), уменьшающий радиальные размеры пучка. МОК представляет собой 2D-МОЛ с градиентом магнитного поля вдоль атомного пучка. Поперечная температура атомного пучка на выходе из МОК составляет 100...150 мК.

Для дальнейшего уменьшения поперечной температуры атомного пучка используется двумерная оптическая патока [82]. В связи с тем что паразитное магнитное поле уменьшает эффективность охлаждения, дополнительно, на выходе МОК, расположен магнитный экран (материал с высокой магнитной проницаемостью), отклоняющий линии магнитного поля от МОК. Температура атомного пучка после оптической патоки составляет 30 ± 10 мК.

В дальнейшем сжатый охлажденный пучок атомов попадает в область ионизации, расположенную между двумя электродами, создающими однородное электрическое поле, ускоряющее ионизированные атомы в направлении чаши Фарадея. Область ионизации представляет собой пересечение двух (852 и 508 нм для атомов цезия) лазерных лучей.

Основными достоинствами CAIS являются [80]: максимальный ток ионного пучка — до 5 нА; высокая яркость ионного пучка — 10^7 А/(м²ср · эВ); малый разброс по энергии — 0,34 эВ; максимальное разрешение — 0,7 нм (Cr^+ , УН — 30 кВ, ток 1 пА). В настоящее время коммерчески доступные системы ФИП с CAIS отсутствуют. Однако есть данные о прототипе источника Cr^+ [80].

Заключение

Результат анализа различных типов ионных источников для современных и перспективных ФИП систем сведен в таблицу.

Основные характеристики существующих и перспективных ионных источников для ФИП-систем

Источ-ник	Размер источника, мкм	Угловая интенсивность	Яркость	ΔE , эВ	Разрешение, нм	Ток пучка	Задачи	Ионы	Примечания
L(A)MIS	0,05	0,02 мА/ср	10^6 А/(см ² ·ср)	5...10	2,5	0,1 пА...100 нА	Распыление, осаждение, изображение, подготовка к ПЭМ, прототипирование НЭМС, МЭМС и др., литография, имплантация	Ga ⁺ , Bi ⁺ , In ⁺ , Au ⁺ , Si ⁺ , V ⁺ , C ⁺ , Be ⁺ , As ⁺ и др.	Простота изготовления и эксплуатации (Са). Возможность создания источников нескольких типов ионов, включая "незагрязняющие"
GFIS	0,0002	2 мА/ср	10^9 А/(см ² ·ср)	<1	0,5	0,1 пА...100 пА	Распыление, осаждение, изображение	Ne ⁺ , Ne ⁺	Возможность микроскопии с субнанометровым разрешением
ICPIS	6...100	5...10 мА/ср	10^4 А/(см ² ·ср)	2,6...10	25	10 пА...ед. мА	Распыление, осаждение	Xe ⁺ , O ⁺ , Ar ⁺ , Kr ⁺ , N ₂ ⁺ , Ne ⁺ , H ⁺ , Ne ⁺	Большие скорости распыления, время жизни источника, беспримесный пучок
MCIS	16,9...40	8...12 мА/ср	$1,5 \cdot 10^3$ А/(см ² ·ср)	0,7...3	50	Ед. пА...500 пА	Проекционная литография, имплантация, прототипирование МЭМС и НЭМС	H ⁺ , He ⁺ , Ar ⁺ , O ⁺ , V ⁺ , Cu ⁺ , Ni ⁺ , Cr ⁺ , Pd ⁺ , C ₆₀ ⁺ и др.	Большие скорости распыления, беспримесный пучок, отсутствие загрязнений, низкие яркость и время жизни
DPIS	36...300	10 мА/ср	10^3 А/(см ² ·ср)	5...15	85	Дес. мА	Имплантация, SIMS, прототипирование МЭМС	Ar ⁺ , O ⁺ , F ⁻ , Cl ⁻ , Br ⁻ , I ⁻ , H ⁻ , He ⁺ , N ⁺	Возможность формирования пучков отрицательных и положительных ионов
PTIS	10	>40 мА/ср	$5 \cdot 10^4$ А/см ²	2,5...3	<200	Н/д	Исследование диэлектрических образцов	H ⁻	Отрицательные ионы. Импульсный режим. В настоящее время не развиваются для ФИП-приложений
MOTIS (UCIS)	10...100	Н/д	10^3 А/(см ² ·ср)	<0,02	26,7 (<1)	0,25-дес. пА	Распыление, прямое осаждение, изображение, SIMS, подготовка к ПЭМ	Cr ⁺	Малые токи пучка и яркости затрудняют коммерческое использование
CAIS	0,02	Н/д	10^7 А/(см ² ·ср)	<0,5	~0,7	<пА-5нА	Микроскопия с субнанометровым разрешением, распыление, прямое осаждение	Li ⁺ , Rb ⁺ , Cs ⁺	Потенциально более 20 различных типов пучков. Перспективы для коммерческих систем
ILIS	0,02	Дес. мкА/ср	$10^5...10^6$ А/см ²	6...8	>36	До 600 нА	Локальное реактивное ионное травление	I ⁻ , F ⁻ , BF ₄ ⁻ и др.	Сложности с использованием в универсальных приборах
SEIS	<1	Ед. мкА	Н/д	Н/д	Н/д	Дес. пА-мкА	Локальное реактивное ионное травление, прямое осаждение	Ag ⁺ , Cu ⁺ , F ⁻ , O ₂ ⁻ и H ⁺	Потенциально большое число различных пучков

Список литературы

1. Лучинин В. В. Нанотехнологии: физика, процессы, диагностика, приборы. М.: Физматлит, 2006. 552 р.
2. Purcell S. T., Binh V. T., Thevenard P. Atomic-size metal ion sources: principles and use // *Nanotechnology*. 2001. N. 12.
3. Сихарулидзе Г. Г. Механизм ионизации в жидкометаллическом ионном источнике. Источник для тугоплавких металлов // *Журнал технической физики*. 1997. Т. 67, № 11.
4. Volkert C. A., Minor A. M. Focused Ion Beam Microscopy and Micromachining // *MRS BULLETIN*. 2007. Vol. 32.
5. Yao N. Focused ion beam systems. Basics and applications. New York: Cambridge University Press, 2007.
6. Yao M., Ohmura Y. Study of liquid metals as a basis for nanoscience // *Journal of physics: condensed matter*. 2008. N. 20.
7. Bischoff L. Focused Ion Beams, Institute of Ion Beam Physics and Materials Research, Germany. URL: http://www.spirit-ion.eu/tl_files/spirit_ion/files/FZD_tutorial/Bischoff_FIB.pdf
8. Mazarov P. Lithography meets FIB: Gallium free Focused Ion Beam Nanofabrication, FIB Workshop Zurich, 23.06.2014.
9. Appleton Bill R., Tongay S., Lemaitre M., Gila B., Fridmann J., Mazarov P., Sanabia Jason E., Bauerdick S., Bruchhaus L., Mimura R., Jede R. Materials modifications using a multi-ion beam processing and lithography system // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2011.
10. Mazarov P., Melnikov A., Wernhardt R., Wieck A. D. Long-life bismuth liquid metal ion source for focussed ion beam micromachining application // *Applied Surface Science*. 2008. Vol. 254.
11. Mazarov P., Wieck A. D., Bischoff L., Pilz W. Alloy liquid metal ion source for carbon focused ion beams // *Journal of vacuum science & technology*, Nov/Dec. 2009, B 27 (6).
12. Pearton S. J., Gila B. P., Appleton B., Hays D., Ren F., Fridmann J., Mazarov P. Nanoengineering of Semiconductor Nanowires-Synthesis, Processing and Sensing Applications // *Journal of Nanoengineering and Nanomanufacturing*. 2011. Vol. 1.
13. Bo Cui Recent Advances in Nanofabrication Techniques and Applications, 2011. URL: <http://www.intechopen.com/books/recent-advances-in-nanofabrication-techniques-andapplications/focused-ion-beam-lithography>
14. Morgan J., Notte J., Hill R., Ward B. An Introduction to the Helium Ion Microscope // *Microscopy today*. July 2006. Vol. 14. N. 4.
15. Hill R., Notte J., Ward B. The ALIS He ion source and its application to high resolution microscopy // *Proceedings of the Seventh International Conference on Charged Particle Optics*, 2008.
16. Notte J., Hill R., McVey S., Farkas L., Percival R., Economou N., Ward B. An Introduction to Helium Ion Microscopy, 2006.
17. Аналитический обзор по проблеме использования электронно-ионного сканирующего микроскопа и рентгеновского фотоэлектронного микроскопа для проведения исследований атомного строения и структуры поверхности наноматериалов: Часть 1. Проблемы использования электронно-ионного сканирующего микроскопа для проведения исследований структуры поверхности наноматериалов, Таганрог, 2011. URL: http://www.nanoscience-edu.sfedu.ru/content/pdf/EPM_Review_Scured.pdf
18. Kalbitzer S., Zhukov V. Resolution of the Scanning Helium Microscope // *The Open Applied Physics Journal*. 2008. N. 1. P. 4–10.
19. Hill R., Notte J., Ward B. The ALIS He ion source and its application to high resolution microscopy // *Proceedings of the Seventh International Conference on Charged Particle Optics*, 2008.
20. Ernst N., Bozdech G., Schmidt H., Schmidt W. A., Larkins G. L. On the full-width-at half-maximum of field ion energy distributions // *Applied Surface Science*. 1993. N. 67.
21. Allan G. L., Legge G. J. F., Zhu J. Characteristics of a hydrogen gas field ion source for muprobe application // *Nuclear instruments and methods in physics research*. 1988. B 34. P. 122–126.
22. Hwang I.-S., Kuo H.-S., Fu T.-Y., Hwang Y.-S., Lu Y.-H., Lin C.-Y., Hou J.-L., Tsong T. T. Single-atom tip as an emitter of gas field ion sources. URL: <http://www.phys.sinica.edu.tw>
23. Kuo H.-S., Hwang I.-S., Fu T.-Y., Lu Y.-H., Lin C.-Y., Tsong T. T. Gas field ion source from an Ir/W <111> single-atom tip // *Applied physics letters*. 2008. N. 92.
24. Bipin Singh, White paper. ORION NanoFab: An Overview of Applications, Carl Zeiss NTS, LLC, USA, September 2012. URL: <http://www.zeiss.com>
25. URL: http://www.zeiss.com/microscopy/en_de/products/multi-ple-ion-beam.html.
26. Smith N. S., Skoczylas W. P., Kellogg S. M., Kinion D. E., Tesch P. P., Sutherland O., Aanesland A., Boswell R. W. High brightness inductively coupled plasma source for high current focused ion beam applications // *Journal of vacuum science & technology*, Nov/Dec. 2006. B 24 (6).
27. Lesik M., Spinicelli P., Pezzagna S., Happel P., Jacques V., Salord O., Rasser B., Delobbe A., Sudraud P., Tallaire A., Meijer J., Roch J.-F. Maskless and targeted creation of arrays of colour centres in diamond using focused ion beam technology // *Physica status solidi*. 2013. N. 10. P. 2055–2059.
28. Sortais P., Lamy T., Médard J., Angot J., Sudraud P., Salord O., Homri S. Technical use of compact micro-onde devices // *Review of Scientific Instruments*. 2012. N. 83.
29. Perez Martinez C. S. Characterization of ionic liquid ion sources for focused ion beam applications, Massachusetts institute of technology, 2013. URL: <http://www.ssl.mit.edu/files/website/theses/>
30. Tseng A. A. Recent Developments in Nanofabrication Using Ion Projection Lithography // *Nanolithography*. 2005. N. 6. P. 594–608.
31. Voznyi V., Miroshnichenko V., Mordyk S., Shulha D., Storizhko V., Tokman V. Development of the RF Ion Sources for Focused Ion Beam Accelerators // *Journal of nano- and electronic physics*. 2013. Vol. 5, N. 4. P. 04060 (1–6).
32. Internal Review Meeting, PBCEC, IIT Kanpur, Indian Institute of technology Kanpur, Centre for Nanotechnology Initiative, May 10, 2008. URL: http://www.iitk.ac.in/olddord/pptfiles/NanoTech_Review_10MAY08/NanoTech_Rev_10May08_1.pdf
33. Tondare V. N. Towards a High Brightness, Monochromatic Electron Impact Gas Ion Source, University of Pune, Pune City, Maharashtra, India, 2006. URL: <http://www.repository.tudelft.nl/view/ir/uuid:7c61a58a-c0c3-4d7d-afa5-a2ba73alebd8>.
34. Ji Q., Jiang X., King T. J., Leung K. N., Standiford K., Wilde S. B. Improvement in brightness of multicusp-plasma ion source // *Journal of vacuum science & technology*. 2002. B 20 (6). P. 2717–2720.
35. Scipioni L., Stewart D., Ferranti D., Saxonis A. Performance of multicusp plasma ion source for focused ion beam applications // *Journal of Vacuum Science & Technology*. 2000. B 18. P. 3194.
36. Guharay S. K., Sokolovsky E., Orloff J. Characteristics of ioni beams from a Penning source for focused ion beam applications // *Journal of Vacuum Science & Technology*. 1999. B 17. P. 2779.

37. **Guharay S. K.** High-Brightness Negative Ion Beams from a Plasma Source and Merits for New Applications in Materials Science and Microelectronics // IEEE Conference record — abstracts, Pulsed power plasma science. 2001.
38. **Guharay S. K., Orloff J.** Ion Beams and Their Applications in High-Resolution Probe Formation // Proceedings IEEE transactions on plasma science, December 2005. Vol. 33, N. 6. P. 1911—1930.
39. **Bacon F. M.** Gas discharge ion source. I. duoplasmatron // Review of Scientific Instruments. 1978. Vol. 49. P. 427—434.
40. **Kobayashi M., Prelec K., Sluyters Th.** Studies of the hollow discharge duoplasmatron as a source of H^- ions // Review of Scientific Instruments. 1976. Vol. 47. P. 1425—1434.
41. **Lawrence G. P., Beauchamp R. K., McKibben J. L.** Direct extraction of negative ion beams of good intensity from a duoplasmatron // Nuclear instruments and methods. 1965. N. 32. P. 357—359.
42. **Smith N. S., Tesch P. P., Martin N. P., Kinion D. E.** A High Brightness Source for Nano-Probe Secondary Ion Mass Spectrometry // Applied surface science. 2008. N. 4.
43. **Pillatsch L., Wirtz T., Migeon H.-N., Scherrer H.** Use of a duoplasmatron ion source for negative ion generation // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 2011. N. 269. P. 1036—1040.
44. **Coath C. D., Long J. V. P.** A high-brightness duoplasmatron ion source for microprobe secondary-ion mass spectrometry // Review of Scientific Instruments. 1995. N. 66. P. 1018—1023.
45. **Tesch P., Smith N., Martin N., Kinion D.** High current focused ion beam instrument for destructive physical analysis applications // Proceedings of the thirty-fourth international symposium for testing and failure analysis. 2008.
46. **Nabhiraj P. Y., Menon R., Mohan Rao G., Mohan S., Bhandari R. K.** Optimization of ion energy spread in inductively coupled plasma source designed for focused ion beam applications // Vacuum. 2010. N. 85. P. 344—348.
47. **Menon R., Nabhiraj P. Y.** Development of a compact high current low emittance RF ion source // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 2013.
48. **Nabhiraj P. Y., Menon R., Mohan Rao G., Mohan S., Bhandari R. K.** Characterization of compact ICP ion source for focused ion beam applications // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2010. N. 621. P. 57—61.
49. **Smith N. S., Skoczylas W. P., Kellogg S. M., Kinion D. E., Tesch P. P., Sutherland O., Aanesland A., Boswell R. W.** High brightness inductively coupled plasma source for high current focused ion beam applications // Journal of Vacuum Science & Technology. Nov/Dec. 2006. B 24 (6). P. 2902—2906.
50. **Smith N. S., Tesch P. P., Martin N. P., Boswell R. W.** Metrology for 3D devices: Plasma-FIB for high throughput sectioning of large dimensions. URL: <http://www.oregon-physics.com>.
51. **Nabhiraj P. Y., Menon R., Mallik C., Bhandari R. K., Mohan R. G., Mohan S.** Design of high current RF ion source for micromachining applications // Proceedings of the APAC 2007, Raja Ramanna Centre for Advanced Technology (RRCAT), Indore, India. 2007. P. 262—264.
52. **Menon R., Nabhiraj P. Y., Bhandari R. K.** Improvements in the angular current density of inductive coupled plasma ion source for focused heavy ion beams // Vacuum, 2013.
53. **Возный В. И., Мирошниченко В. И., Мордик С. Н., Нагорный А. Г., Нагорный Д. А., Сторишко В. Е., Шульга Д. П.** Высокочастотные ВЧ-источники ионов для ускорительных приложений // Наука та інновації, 2010. Т. 6, № 5. P. 38—44.
54. **Lee Y., Gough R. A., Leung K. N., Vujic J., Williams M. D., Zahir N., Fallman W., Tockler M., Bruenger W.** Plasma source for ion and electron beam lithography // Journal of Vacuum Science & Technology. 1998. B 16 (6). P. 3367.
55. **Ji Q., King T. J., Leung K. N., Wilde S.** Production of various species of focused ion beam // Review of scientific instruments. 2002. Vol. 73. P. 822.
56. **Ji Q., Jiang X., Ji L., Chen Y., Akker B.v.d., Leung K. N.** Novel ion beam tools for nanofabrication // NSTI-Nanotech 2005. 2005. Vol. 2. P. 703—706.
57. **Glazkov A. A., Lobanov N. R., Barchenko V. T., Baliko-ev I. S., Zagranichny S. I.** Duoplasmatron-type ion source with improved technical and operational performance for linear accelerator // Proceedings of the 3rd European particle accelerator conference (EPAC). 1992.
58. **Lozano P.** Ionic Liquid Ion Sources in the Processing of Materials and Other Applications // Proceedings of the Materials and Processes Far From Equilibrium Workshop, Massachusetts Institute of Technology, November 3. 2010.
59. **Escher C., Thomann S., Andreoli C., Fink H.-W., Toquant J., Pohl D. W.** Vacuum ion emission from solid electrolytes: An alternative source for focused ion beams // Applied Physics Letters. 2006. N. 89. P. 053513 (1—2).
60. **Dália Teresa, Al-Alavi Martins.** Compact Ion-source Based on Superionic Rubidium Silver Iodide ($RbAg_4I_5$) Solid Electrolyte. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Física, 2013.
61. **Orloff J.** Flandbook of charged particle optics / 2nd ed., Boca Raton: CRC Press, 2009.
62. **Lozano P., Martinez-Sanchez M.** Ionic liquid ion source: characterization of externally wetted emitters // Journal of colloid and interface science. 2005. N. 282 (2).
63. **Lozano P., Martinez-Sanchez M.** Efficiency estimation of EMI-BF₄ ionic liquid electrospray thrusters // Proceedings of the 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint propulsion conference. 2005.
64. **Lozano P.** Energy properties of an EMI-Im ionic liquid ion source // Journal of physics D: applied physics, January 2006. N. 39 (1).
65. **Zorzosa A. N.** The use of ionic liquid ion sources (ILIS) in FIB applications, Massachusetts institute of technology, 2009. URL: <http://www.ssl.mit.edu/files/website/theses/>.
66. **Zorzosa A. N., Lozano P. C.** The use of ionic liquid ion sources in focused ion beam applications // Journal of Vacuum Science & Technology. Nov/Dec 2008. B 26 (6). P. 2097—2102.
67. **Larriba C., Castro S., de la Mora J. F., Lozano P.** Monoenergetic source of kilodalton ions from Taylor cones of ionic liquids // Journal of applied physics. 2007. N. 101. P. 084303 (1—6).
68. **Huddleston J. G., Visser A. E., Reichert M., Willauer H. D., Broker G. A., Rogers R. D.** Characterization and comparison of hydrophilic and hydrophobic room temperature ionic liquids incorporating the imidazolium cation // Green Chemistry. 2001. N. 3. P. 156—164.
69. **Fuller J., Carlin R. T., Osteryoung R. A.** The Room Temperature Ionic Liquid 1-Ethyl-3-methylimidazolium Tetrafluoroborate: Electrochemical Couples and Physical Properties // Journal of The Electrochemical Society. November 1997. Vol. 144, N. 11. P. 3881—3886.
70. **McEwen A. B., Ngo H. L., LeCompte K., Goldman J. L.** Electrochemical Properties of Imidazolium Salt Electrolytes for Electrochemical Capacitor Applications // Journal of The Electrochemical Society. 1999. N. 146 (5). P. 1687—1695.
71. **Hagiwara R., Hirashige T., Tsuda T., Ito Y.** A Highly Conductive Room Temperature Molten Fluoride: EMIF · 2.3HF // Journal of The Electrochemical Society. 2002. N. 149 (1). P. D1—D6.

72. Yoshida Y., Otsuka A., Saito G., Natsume S., Nishibori E., Takata M., Sakata M., Takahashi M., Yoko T. Conducting and Magnetic Properties of 1-Ethyl-3-methylimidazolium (EMI) Salts Containing Paramagnetic Ions: Liquids [EMI][M^{III}Cl₄] (M = Fe and Fe_{0.5}Ga_{0.5}) and Solid [EMI]₂[Fe^{II}Cl₄] // Bulletin of the chemical society of Japan. 2005. Vol. 78, N. 11. P. 1921–1928.

73. Yoshida Y., Muroi K., Otsuka A., Saito G., Takahashi M., Yoko T. 1-Ethyl-3-methylimidazolium Based Ionic Liquids Containing Cyano Groups: Synthesis, Characterization, and Crystal Structure // Inorganic Chemistry. 2004. N. 43. P. 1458–1462.

74. Yoshida Y., Baba O., Saito G. Ionic Liquids Based on Dicyanamide Anion: Influence of Structural Variations in Cationic Structures on Ionic Conductivity // Journal of Physical Chemistry B. 2007. N. 111. P. 4742–4749.

75. Yoshida Y., Saito G. Influence of structural variations in 1-alkyl-3-methylimidazolium cation and tetrahalogenoferrate(III) anion on the physical properties of the paramagnetic ionic liquids // Journal of Materials Chemistry. 2006. N. 16. P. 1254–1262.

76. Angell C. A. Mobile ions in amorphous solids // Annual Review of Physical Chemistry. 1992. N. 43. P. 693.

77. Knuffman B., Steele A. V., Orloff J., McClelland J. J. Nanoscale focused ion beam from laser-cooled lithium atoms // New Journal of Physics. 2011. N. 13. P. 103035 (1–9).

78. Knuffman B., Steele A. V., McClelland J. J., Maazouz M., Schwind G., Orloff J. Focused Ion Beams from Magneto-Optical Trap Ion Sources. National Institute of Standards and Technology. URL: http://www.fibsem.net/web_documents/2011Presentations/knuffman.pdf.

79. Hanssen J. L., Hill Sh. B., Orloff J., McClelland J. J. Magneto-Optical-Trap-Based, High Brightness Ion Source for Use as a Nanoscale Probe // Nano letters. 2008. Vol. 8, N. 9. P. 2844–2850.

80. Knuffman B., Steele A. V., McClelland J. J. Cold atomic beam ion source for focused ion beam applications // Journal of Applied Physics. 2013. N. 114. P. 044303 (1–7).

81. van der Geer S. B., Reijnders M. P., de Loos M. J., Vredendregt E. J. D., Mutsaers P. H. A., Luiten O. J. Simulated performance of an ultracold ion source // Journal of Applied Physics. 2007, N. 102. P. 094312.

82. Metcalf H. J., van der Straten P. Laser Cooling and Trapping, New York: Springer, 1999.

R. A. Milovanov, Deputy Head of Department, Institute of Nanotechnologies for Microelectronics, RAS Moscow, Milovanov_r@inbox.ru,

E. V. Erofeyeva, Junior Researcher, Institute of Nanotechnologies for Microelectronics, RAS, Moscow, Laboratory Researcher, MGTU MIREA, gaechkarus@gmail.ru

Next-Generation and Present-Day Ion Sources for the Focused Ion Beam Equipment

Currently there are a lot of different types of ion sources designed for the focused ion beam (FIB) equipment. For a long time most of the modern FIB systems were equipped with liquid metal ion sources (LMIS) of gallium ions (Ga⁺). However, ease of use and maintainability of FIB systems, numerous new applications, disadvantages of the gallium ions (gallium is an acceptor dopant for silicon) and intention to expand the range of the applied ions (including reactive and positive ones, etc.) resulted in an active R & D in the field of new types of the ion sources. This article presents an attempt to classify the existing and next-generation ion sources of the FIB system by their design philosophy. Our classification embraces liquid metal ion sources (including liquid metal alloy ion sources), plasma ion sources (including inductively coupled plasma ion sources, electron cyclotron resonance ion sources, multicusp ion sources, penning type ion sources and duoplasmatron ion sources), gas field ion sources, electrolyte ion sources (including ionic liquid and solid electrolyte ion sources) and magneto-optical trap ion sources (including ultracold and cold atom ion sources).

Keywords: focused ion beam, ion source, LMIS, LMAIS, GFIS, ICPIS, ECRIS, MCIS, PTIS, DPIS, ILIS, SEIS, MOTIS, UCIS, CAIS

Introduction

Perspective and intensively developing researches in micro- and nanoelectronics involve the methods based on the focused ion beams (FIB). FIB systems are used for high-resolution scanning ion microscopy, local ion-beam etching (including selective) and deposition of materials, ion implantation, prototyping and manufacture of micro- and nanoelectromechanical systems (MEMS and NEMS).

FIB system consists from an ion source, an ion column, a working chamber, a vacuum system, a detector of the secondary electrons and/or secondary ions, gas injection systems and a control computer. Also FIB systems can be additionally complemented by an electronic column and/or ion column.

The aim of the given work is research of the principles for construction of the ion sources, because their

type determines the basic characteristics of FIB systems (resolution, spectrum of the accessible ions).

Sources of ions in FIB systems can be divided into the following basic groups (fig. 1):

- Liquid metal ion sources — LMIS;
- Plasma ion sources — PIS;
- Gas field ion sources — GFIS;
- Magneto-optical trap ion sources — MOTIS;
- Electrolyte ion sources — EIS.

Liquid metal ion source — LMIS

LMIS is the most widespread type of the ion sources for commercial FIB systems. In LMIS sources formation of an ion beam is based on stabilization by the field of a cone of liquid metal, from which an evaporation is done by the field of ions. Metal arrives to the top of the cone from the tank via a thin core (emitter). When the

voltage is supplied to the extending electrode on the pointed tip of the emitter, a liquid metal Taylor cone is formed with the diameter of the edge of 5 nm [1–5]. The cone area, from which most ions are emitted, is dubbed a virtual source (fig. 2). The direct current of the ion beam is maintained due to the balance between the surface tension and the electrostatic forces [4].

For a long time LMIS were the only available sources of ions of gallium (Ga^+), in which the layer of the liquid gallium was on the surface of a tungsten core [2]. A wide use of gallium is caused by a number of reasons:

- Low temperature of fusion ($\sim 30^\circ\text{C}$), which minimizes a possibility of the chemical reactions between the liquid metal and the core-emitter;
- High stability of the emission at the temperature of fusion;
- High angular intensity of the emission current at a small energy spread of ions [6].

The main advantages of LMIS (Ga^+) are: high brightness ($\sim 10^6 \text{ A/cm}^2$), big currents of the ion beam (up to 100 nA), maximal resolution (up to 2,5 nm), small size of a virtual source (50 nm), rather small energy spread (4...6 eV), angular intensity (0,02 mA), lifetime of the source ($> 1000 \text{ h}$). The main disadvantage is a "polluting" character of the beam (Ga^+ is an acceptor dopant for the silicon products).

The desire to expand the spectrum of the ion beams (including a charge of ions, composition, opportunity to use clusters, etc.), possibility of selection of the necessary ion beam (without additional columns) resulted in appearance of various liquid metal alloy ion sources — LMAIS, the selection of a beam in which is carried out by an ExB filter. LMIS and LMAIS differ depending on a metal or an alloy, however, they have a common structure.

There are certain requirements to the alloys in LMAIS:

- *The content of the necessary ions and/or clusters* (determined by the natural necessity to use concrete ions for solving of the selected tasks);
- *Lower temperature of fusion* (determined by the necessity to exclude or minimize the chemical interaction of an alloy with the emitter; alloys with lower, compared with that of the components' fusion temperature are obtained at the concentrations, forming a eutectic alloy);
- *Low pressure of the saturated vapors at the fusion temperature* (determined by the necessity to minimize the natural evaporation of a source of ions i.e. an increase of its lifetime);
- *Absence of a chemical interaction between the components of an alloy and a source material* (determined by elimination of the influence of the alloy elements on the form of the emitter and composition of an ion beam).

Researches of LMAIS sources were done with the following alloys: AgGe, AgAuGe, AlGe, AuBeSi, AuBGeNi, AuBi, AuCeSi, AuCoGe, AuCrGe, AuDyGe, AuDySi, AuErSi, AuEuSi, AuFeGe, AuGe, AuGdSi, AuGeMn, AuGeNi, AuGeV, AuHoSi, AuLaSi, AuNdSi, AuSbSi, AuSiSm, AuSiTb, AuSiTm, BPt, BiGaIn, CCo, CoDy, CuP, CuPPt, DyNi, GaIn, GaZn, GeNiTi, HoNi, AuGeSi, AuSi, CoNd, CoGe, ErNi, ErFeNiCr, SnPb, InGa, MnGeSi, GaBi, GaBiLi, AlCeC. Thus, the use of LMIS and LMAIS sources potentially allows us to form a big number of beams of positive ions and/or ion clusters of the following types: Ge^+ , Ge^{++} , Ag^+ , Ag^{++} , Ge_2^+ , $\text{Ag}_{2,3,4,5}^+$, Al^+ , Be^+ , Si^+ , $\text{Bi}_{3,5,7,9,11}^{++}$, $\text{Bi}_{2,3,4,5,6,7}^+$, Mn^+ , Ni^+ , Sn^+ , Al^+ and other types [7–12].

The commercially available FIB systems with LMIS are produced by FEI Co., DCG (USA), Zeiss (Germany), Tescan (Czech Republic), Hitachi and Jeol (Japan). The above companies use gallium as the working metal. The commercially available FIB systems with LMAIS are produced only by Raith (Germany).

Gas field ion sources — GFIS

Such a source of ions is a pointed core (emitter), to which high voltage is applied. The atoms of the working gas are ionized in a strong electric field near the edge (autoionization or ionization by a field). The first FIB system with a GFIS source was presented by ALIS Corp. in 2006 [13]. As the working gas helium was used, and the material of the core was tungsten. The neutral atoms of helium, getting into the area of the maximal electric field (emitter edge), are ionized and accelerated towards the extractor (fig. 3).

For reduction of the number of the virtual sources (areas, in which an ionization takes place) a sharpeness of the emitter is carried out. High voltage (5...30 kV) is supplied to a preliminary faceted (three facets) tungsten needle. Under such circumstances at the "sharp" edges of the source (separate atoms) an electric field of up to 50 V/nm appears, which leads to their evaporation by the field. The needle "is sharpened" up to three atoms on the edge. When the voltage on the needle goes down to the values corresponding to the electric field of 30 V/nm, the tungsten does not evaporate, while the atoms of the gas are ionized directly in the area of the edge — three atoms in a plane [14].

It is necessary to point out that in FIB systems with a GFIS source the ion beam interacting with a sample is formed not out of all the three points, but is selected by a special aperture from only of one of them [15].

The advantages of the considered sources of ions are the following: high brightness: $> 3,4 \cdot 10^9 \text{ A/cm}^2$ [16]; small dimensions of a virtual source: 0,5 nm [17]; min-

imal size of a beam: 0,25 nm [15, 18]; small energy spread: 0,25...0,5 eV [16, 19, 20].

Among its disadvantages are the necessity of cooling of the emitter by a liquid nitrogen and regular performance of the procedure of "sharpening".

It is necessary to point out that the research for development of the "uncooled" GFIS were undertaken, however, there is no mentioning of their application in the commercial FIB systems. Nevertheless, an iridium emitter allows us not to use a liquid nitrogen cooling [21].

Disposition of the tungsten to oxidation and the related restriction on the working gases (types of ions) determined one of the directions for development of GFIS, connected with deposition of a thin layer of a precious metal on a tungsten emitter. In the modernized GFIS an emitter edge reaches one atom. Such GFIS were dubbed a single-atom tip — SAT [22]. Examples of obtaining of the beams of ions of hydrogen, helium, argon and oxygen with the use of GFIS of SAT — Ir/W type (a tungsten emitter covered with iridium) [23].

It should also be pointed out that a source of several ions, for example, He^+ и Ne^+ can be applied in FIB systems with GFIS [24]. Commercially available FIB systems with GFIS are produced only by Zeiss Co. (Germany) — Orion NanoFab system [25].

Plasma ion sources — PIS

PIS is a small-sized plasma source with an extractor. There is data about its application in FIB systems of PIS with an inductively coupled plasma ion source — ICPIS [26] and plasma on the basis of electron cyclotron resonance ion source-ECRIS) [27, 28]. Also known are researches of multicusp ion source — MCIS [29–35], penning type ion source — PTIS [29, 36, 37], and duoplasmatron ion source — DPIS [38–45].

The most studied and widespread are ICPIS, optimized for generation of high density ion beams with a low energy spread [46]. The gas ionization in ICPIS is based on the use of an electromagnetic induction, where excitation and charge maintenance is ensured by a high frequency vortical electric field with closed power lines, which are induced by a high frequency aerial current.

The circuit and image of ICPIS for FIB (fig. 4). The source consists of a quartz tube with diameter of 30 mm, with an external 4-coil antenna and optical system of the ion column. An ion beam is extended by a two-electrode system with an aperture (voltage of the extractor equals to units of kilovolts [47]). For minimization of the capacitor influence on plasma a Faraday cage is used. In case of its absence the ion current of a source is increased due to the capacitive coupling, however the energy spread of ions in a beam is also increased, which

leads to an increase of the chromatic aberration. Moreover, the lifetime of ICPIS decreases because of a deposition of a thin metal film on the internal surface of the quartz tube (because of scattering of the electrodes) [48].

The dimensions of the area of generation of ions in ICPIS exceed the dimensions of the virtual sources of LMIS (including LMAIS) and GFIS many times and are equal to 10...100 micrometers in the commercial FIB systems [49, 50].

The main characteristics of ICPIS are: possibility to use any ions; high brightness: $10^3...10^4 \text{ A/cm}^2$ [49]; big currents of an ion beam — up to units of milliamperes [51]; big angular intensity (parallel beam): 5...10 mA [50]; minimal size of a beam: 25 nm [49]; dimensions of a virtual source: 10...100 micrometers [49, 50]; rather wide energy spread: 2,6...10 eV [46, 48, 49, 51]; little lifetime of ICPIS: 200 h [48].

The following ICPIS ions are known [27, 50–52]: of xenon (Xe^+); krypton (Kr^+); nitrogen (N_2^+); oxygen (O_2^+); helium (He^+); hydrogen (H^+ , H_2^+); neon (Ne^+); argon (Ar^+). Most of the above ICPIS are investigated during development of the prototypes of FIB systems. The commercially available FIB systems use mainly ICPIS sources of ions of xenon: FEI Co. — Vion PFIB and Tescan — FERA3.

In the multicusp ion sources (MCIS) their generation is carried out in a tiny reactor with a magnetic confinement of plasma. In the first MCIS the plasma was formed by a thermionic cathode of direct heat (thread-like charge) and contained by a field of the constant magnets [29] (fig. 5, see the 2-nd side of cover). Subsequently high-frequency ICP sources were investigated as plasma generators [31].

The sources got their name of "multicusp" from a magnetic field configuration [30, 32, 33]. The constant magnets, which are established on the perimeter of a plasma reactor with an alternating polarity, create a multicusp (multipole acute-angled) field configuration. The magnetic field is maximal near a wall of the discharge chamber and exponentially goes down to 0 in the centre [53].

A magnetic filter with a cross magnetic field is located in front of the area of the extraction of an ion beam. The electrons with small energy (slow) under the influence of the microinstabilities and collisions in plasma diffuse through a magnetic veil across the power lines of the field, filling the area between the filter and the area of extraction. In this area the plasma is formed, which does not contain electrons with big energy.

As is known, owing to the law of the falling friction, the effective section of interaction of the slow electrons with ions will be considerably bigger, than that of the electrons possessing big energy. This promotes faster

alignment of the temperatures of the electronic and ionic components in plasma, which has no fast electrons, making it quieter and homogeneous, reducing the level of the self-coordinated fields, which is one of the major factors, which determine the temperature of its ionic component.

During interaction of the slow electrons with the gas atoms and molecules, the ions of one type are formed. Plasma is characterized by a homogeneous distribution of the density of the particles, lower level of noise, and the plasma instabilities are suppressed in it, which also promotes a decrease in temperature of the ions in plasma. Between the filter and the area of extraction a plasma with a small temperature and homogeneous by its composition and density is formed. At that the low-energy axial ions are extended through the open part of the reactor. Thus, the magnetic filter reflects the high-energy electrons, increasing the density of the plasma [30] and reducing the energy spread of the electrons in a beam [33].

The main characteristics of MCIS are the following: possibility of formation of ion beams of various materials; formation of noncontaminate ion beams [35]; small energy spread of ions: 0,7...3 eV [33, 54]; low ion temperature: 0,1 eV [35]; big currents of an ion beam; small brightness: $< 1,5 \cdot 10^3$ A/(cm² · sr) [34]; little lifetime of MPIS with a threadlike discharge: 100...500 h [33]; small resolution: 50 nm [30]; dimensions of a virtual source: 16,9 (Kr⁺)...40 (He⁺) nm [29].

The following MPIS of ions are known [29, 30, 35, 55, 56]: hydrogen (H⁺, H₂⁺, H₃⁺); helium (He⁺); neon (Ne⁺); argon (Ar⁺); oxygen (O⁺); boron (B⁺); xenon (Xe⁺); phosphorus (P⁺); copper (Cu⁺); nickel (Ni⁺); chrome (Cr⁺); palladium (Pd⁺); krypton (Kr⁺); molecular ions (C₆₀⁺). Most of the above MPIS are investigated during development of the prototypes of the FIB systems. There are no commercially available FIP systems with MPIS.

In the sources of ions with Penning discharge — PTIS-ignition of the gas discharge is carried out due to a puncture of the gas interval of cathode-anode, between which the voltage from several hundreds of volts up to kilovolts is applied (fig. 6). The voltage on the discharge interval should be minimal for ignition and support of a stable gas discharge, which burns in the longitudinal magnetic field created, as a rule, by a constant magnet between two cathodes and ring anode. The source cathodes are usually made of aluminum, and the case — from a soft iron for bridging of the magnetic lines. Emission of electrons from the cathodes occurs due to their bombardment by the discharge ions. Because of the magnetic field the electrons move along a spiral, which increases their way and the number of the

ionizing impacts on the cathode-anode way, i.e. plasma density.

Possibility of operation of PTIS only in a pulse mode has led to the fact that the sources of the given types do not develop in the direction of FIB applications, however, the indicators of brightness ($5 \cdot 10^4$ A/(cm² · sr), current density (more than 1 A/cm² [37]) and possibility of formation of beams of negative ions makes their use attractive for the research of nonconducting samples [29].

In the duoplasmatron ion sources — DPIS — the plasma is formed in the area of an intermediate electrode with cathode (fig. 7) from a magnetic material, which is narrowed towards the aperture (for plasma compression), through which plasma reaches the anode. The magnet located around the intermediate electrode creates the maximal field at the outlet of the intermediate electrode. Thus, the plasma density at the outlet of the intermediate electrode raises due to its geometrical parameters and magnetic field, which leads to formation of its double layer [38].

The electrons emitted by the cathode inside the intermediate electrode are accelerated towards the anode by the double layer field and ionize the neutral atoms of the compressed plasma. As a result the degree of its ionization in the channel approaches 100 %. At the same time the density of the electrons near the outlet aperture is often too high for an effective extraction. In that case the plasma border is scattered at the outlet of the aperture and acquires a convex form, due to which a strongly diverging ion beam is formed. In order to increase the brightness of the ion beam, the control of the density of electrons in the extraction area is carried out by means of a plasma expansion cup [39].

Also DPIS can be a source of the negative ions during the constructive changes:

- Replacement of an electrode inside the intermediate electrode for a tube with caesium added in the composition of the working gas [40];
- Displacement of the aperture axes of the intermediate electrode and the aperture extending the ion beam [41];
- Application of a magnetic field in the area of the extending aperture, which plays the role of a magnetic filter [39].

The main characteristics of the DPIS sources are: possibility of formation of various ion beams, including beams of the negative and positive ions; high brightness of a beam: 1100 A/m² · sr · V (for Ar⁺) [42, 43]; maximal resolution: 85 nm [42]; a wide energy spread of ions: 5...15 eV [42, 45]; angular intensity: 10 mA/sr [45]; dimensions of a virtual source: 36...300 μm [44]; little lifetime of a source: 50...500 h [42].

Researches are known with the ion beams: argon (Ar⁺), oxygen (O⁺), fluorine (F⁺), chlorine (Cl⁺), bromine (Br⁺), iodine (I⁺), hydrogen (H⁺), helium (He⁺),

nitrogen (N^+) [42—44, 57]. DPIS are mainly used for a mass spectrometry of the secondary ions, however, there are works, in which the specified type of sources is also used for FIB applications. At the same time, commercial FIB systems with a source of ions on the basis of duoplasmatron are absent.

Electrolytic ion sources — EIS

There are data about application in FIB systems of electrolytic sources of two main types: on the basis of ionic liquids (ionic liquid ion source — ILIS) [29, 58] and with a solid electrolyte (solid electrolyte ion source — SEIS) [59, 60]. By the design and the mechanism of emission the ILIS sources are similar to the LMIS sources, except for the source of ions (fig. 8). In ILIS sources the melts of the organic salts are used, which are in the liquid phase at a room temperature and possessing a rather low resistance (ionic liquids) [61].

An ionic liquid is a mix of complex organic and inorganic ions with a minimal pressure of the saturated vapors and weak surface tension, allowing to form a Taylor cone (similar to LMIS) [29]. Despite similarity with LMIS, ILIS has the following specific features:

- Possibility of formation of beams of not only negative, but also positive ions due to a change of polarity of the extractor voltage (application of the negative ions allows to minimize charging of the nonconducting samples due to balancing of the output of the secondary electrons with the falling negative ions);
- Potential possibility of the use of heavy molecular ions and jet ions;
- Servicing of an ILIS source is easier, than that of LMIS, since it does not demand a high vacuum and maintenance of the fusion temperature (they work at a room temperature) [29].

The main characteristics of ILIS are: possibility of the use of the positive and negative molecular and jet ions; high brightness — $6 \cdot 10^5 \dots 10^6$ A/cm² [29]; bigger currents of an ion beam: up to 600 nA [62]; minimal dimensions of a beam: 36 nm [29]; dimensions of a virtual source: 20 nm [29]; a rather wide energy spread — 6...8 eV [63, 64]; little lifetime of ILIS: less than 100 h [29].

Researches with ionic liquids are known: EMI-BF₄, EMI-IM, EMI-Beti, C₅MI-(C₂F₅)₃ PF₃, C4mim-I, EMI-GaCl₄, EMI-N(CN)₂, EMI-C(CN)₃, BMI-FeBr₄, C₆MI-FeBr₄, C₆MI-FeCl₄, BMI-FeCl₄, EMIF2.3HF, HMI-PF₆ [58, 65—75].

It should be pointed out that commercial FIB systems with ILIS are absent. The researches are done with application of their prototypes. However, a wide spectrum of the ionic liquids, which can be used in ILIS, allows to assume, that commercial samples can also appear. At the same time, the specific features of ions (di-

mensions, reactivity, etc.) complicate the use of ILIS in universal devices, which will lead to appearance of highly specialized industrial systems.

Sources of ions on the basis of a solid electrolyte — SEIS have been investigated poorly. The works are known [59], in which Ag⁺ source was proposed and investigated for FIB applications on the basis of a solid electrolyte (AgI)_{0,5}(AgPO₃)_{0,5}.

It is known, that ions can move freely in the solid electrolytes, just like in the liquid ones [76]. If we give a pointed form to a solid electrolyte and connect it to a source of "the working" ions, then as a result of application of a field, the ions will emit from the edge, while the vacancies left in the electrolyte will be replaced by the ions from the metal-source of "the working" ions (fig. 9, see the 2-nd side of cover) [59].

In [59] researches with SEIS from a solid electrolyte (AgI)_{0,5}(AgPO₃)_{0,5} it is shown, that the extraction of an ion beam begins at the voltage of 15 kV. The maximal current of a beam of 1 mcA is received at the voltage of 20 kV. The source is stable during 20 min.

In [60] the results are presented of the research of a source on the basis of a solid electrolyte RbAg₄I₅ made by deposition (by a thermal evaporation in vacuum) of the electrolyte on the pointed silver core with a curving radius of 5 micrometers. At the room temperature and extraction voltage of 20 kV the currents of ion (Ag⁺) beam ~15 pA were obtained. Rise in temperature of SEIS up to 92 °C led to an increase in the ion current up to ~23 pA.

SEIS in commercial FIB systems are not used. There are no data about the prototypes of such systems. Notwithstanding the fact that in [59, 60] only Ag⁺ ion beams were investigated, the authors [60] believe that it is possible to create beams of Cu⁺, F⁻, O₂⁻, and H⁺ for a selective local etching in the perspective FIB systems.

Sources of ions with a magneto-optical trap

Such sources of ions (magneto-optical trap ion sources — MOTIS), dubbed also ultracold ion sources — UCIS, are based on photoionization of the atoms cooled by lasers (down to temperature of ~ μK) and kept in a magneto-optical trap [77, 78].

Cooling occurs in a vacuum chamber, between the two electrodes (one transparent for the lasers, another with a mirror surface) in the area, where six laser cooling beams are crossed. Because of the Doppler effect a moving atom absorbs the photons of a laser beam, the energy of which is less than the energy of the photons radiated by the atom by the value of the Doppler shift. For compensation of attraction with the help of two solenoids, situated in alignment in front and behind the area of crossing of the laser beams, a quadrupole magnetic field is created. Solenoids. The current in the coils flows in the opposite directions. Thus, an atom com-

Sources	Source dimensions, μm	Angle intensity	Brightness	ΔE , eV	Resolution, nm	Beam current	Tasks	Ions	Comments
L(A)MIS	0.05	0.02 mA/sr	$10^6 \text{ A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$	5...10	2.5	0.1 pA... 100 pA	Scattering, sedimentation, images, preparation for TEM, Prototyping of NEMS, MEMS, etc., lithograph, implantation	Ga^+ , Bi^+ , In^+ , Au^+ , Si^+ , B^+ , C^+ , Be^+ , As^+ , etc.	Simplicity of manufacturing and operation (Ga). Possibility of creation of sources of several types of ions, including "noncontaminate" ones
GFIS	0.0002	2 mA/sr	$10^9 \text{ A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$	<1	0.5	0.1 pA ... 100 pA	Scattering, sedimentation, images	He^+ , Ne^+	Possibility of microscopy with a subnanometer resolution
ICPIS	6...100	5...10 mA/sr	$10^4 \text{ A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$	2.6...10	25	10 pA ... units of mA	Scattering, sedimentation	Xe^+ , O^+ , Ar^+ , Kr^+ , N_2^+ , He^+ , H^+ , Ne^+	High speeds of scattering, lifetime of a source, pure beam
MCIS	16.9...40	8...12 mA/sr	$1.5 \cdot 10^3 \text{ A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$	0.7...3	50	Units of pA ... 500 pA	Projective lithograph, implantation, prototyping of MEMS and NEMS	H^+ , He^+ , Ar^+ , O^+ , B^+ , Cu^+ , Ni^+ , Cr^+ , Pd^+ , C_{60}^+ , etc.	High speeds of scattering, lifetime of a source, pure beam, absence of pollution, low brightness and lifetime
DPIS	36...300	10 mA/sr	$10^3 \text{ A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$	5...15	85	Tens of mA	Implantation, SIMS, prototyping of MEMS	Ar^+ , O^- , F^- , Cl^- , Br^- , I^- , H^- , He^+ , N^+	Possibility of formation of beams of negative and positive ions
PTIS	10	>40 mA/sr	$5 \cdot 10^4 \text{ A}/\text{cm}^2$	2.5...3	<200	No data	Research of the dielectric samples	H^-	Negative ions. Pulse mode. Presently are not developed for FIB applications
MOTIS (UCIS)	10...100	No data	$10^3 \text{ A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$	<0.02	26.7 (<1)	0.25-Tens of pA	Scattering, direct sedimentation, images, SIMS, preparation for TEM	Cr^+	Small currents of a beam and brightness complicate the commercial use
CAIS	0.02	No data	$10^7 \text{ A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$	<0.5	~0.7	<pA-5nA	Microscopy with a subnanometer resolution, scattering, direct sedimentation	Li^+ , Rb^+ , Cs^+	Potentially over 20 various types of beams. Promising for commercial systems
ILIS	0.02	Tens of $\mu\text{A}/\text{sr}$	$10^5 \dots 10^6 \text{ A}/\text{cm}^2$	6...8	>36	Up to 600nA	Local jet ionic etching	I^- , F^- , BF_4^- , etc.	Complexities with the use in universal devices
SEIS	<1	Units of μA	No data	No data	No data	Tens of pA-mA	Local jet ionic etching, direct sedimentation	Ag^+ , Cu^+ , F^- , O_2^- and H^+	Potentially big number of various beams

pletely loses its speed and is kept in a magneto-optical trap, crossed by an ionizing laser beam. The obtained ions are extended through the aperture in a mirror electrode (fig. 10).

The main characteristics of MOTIS are: possibility of formation of ion beams — more than 20 types (including sources of ions) [77, 78]; formation of "non-contaminate" ion beams [79]; small energy spread: <100 meV [77]; resolution: potentially less than 1 nm ($26,7 \pm 1$ nm, for Li^+ , accelerating voltage — 2 kV, beam current — 0,7 pA) [77–79]; angular divergence: less than 10 microrads [79]; compatibility with the existing ion columns; small brightness: up to 10^3 A/cm²·sr·eV [79]; small values of the maximal beam current: tens of pA [79].

Theoretically available are the following ions (limited by the potential of the laser cooling: Li, Na, K, Rb, Cs, Fr, Mg, Ca, Sr, Cr, Ag, Cd, Hg, Al, He, Ne, Ar, Kr, Xe, Er, Yb, Dy [78]. Commercially available FIB systems with MOTIS are absent. At the same time there are data about the prototypes of the sources of ions: Cr^+ [79], Li^+ [77].

Cold atom ion sources — CAIS are a modification of MOTIS, which are based on the photoionization of the atoms cooled (up to temperature of $\sim \mu\text{K}$) by lasers and kept in a magneto-optical trap (MOT) [80].

The main drawbacks of MOTIS are restrictions on the maximal values of an ion beam current (tens of pA) and its brightness, which is connected with the limited speed of "refilling" of the area of ionization by the cooled atoms because of the small speed of their diffusion [81].

Design of CAIS (fig. 11, see the 2-nd side of cover) allows us to eliminate these drawbacks. A beam of slow atoms is generated by a combination of a two-dimensional magneto-optical trap (2D-MOT) and retroreflecting laser beam directed along the third axis ("pushing" beam), which gives impetus to the cooled atoms along the axis of 2D-MOT, creating a beam of atoms with accurately determined speed, passing through the aperture in the retroreflecting mirror. For caesium the flow of atoms is $5 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}$, the transverse temperature ~ 5 mK, and the axial speed 6–14 m/s (depending on the power of the "pushing" laser) [80].

In order to increase the intensity of the atomic beam a magneto-optical compressor (MOC) is used reducing the radial dimensions of the beam. MOC is a 2D-MOT with a gradient of the magnetic field along the nuclear beam. The transverse temperature of the atomic beam at the MOC outlet is 100...150 μK .

For the further reduction of the transverse temperature of the atomic beam a two-dimensional optical molasses [82] is used. Since the parasitic magnetic field reduces the efficiency of cooling, at the MOC outlet there is a magnetic screen with high magnetic permeability, deviating the lines of the magnetic field from

MOC. The temperature of the atomic beam after the optical molasses is $30 \pm 10 \mu\text{K}$.

Further, the compressed cooled beam of atoms comes to the area of ionization located between the two electrodes, creating a homogeneous electric field accelerating the ionized atoms in the direction of the Faraday bowl. The ionization area is a crossing of two laser beams (852 nm and 508 nm for the atoms of caesium).

The main advantages of CAIS are the following [80]: maximal ion beam current: up to 5 nA; its high brightness — 10^7 (A/m²·sr·eV); little energy spread — 0,34 eV; maximal resolution — 0,7 nm (Cr^+ , UN — 30 kV, current 1 pA). Commercially available FIB systems with CAIS are absent. However, there are data about a prototype of the source of Cr^+ [80].

Conclusion

The results of the analysis of various types of ion sources for modern and perspective FIB systems are presented in the table below.

References

1. **Luchinin V. V.** *Nanotechnologii: fizika, protsessi, diagnostika, pribori*, Moscow, Fismatlit, 2006. 552 p.
2. **Purcell S. T., Binh V. T., Thevenard P.** Atomic-size metal ion sources: principles and use. *Nanotechnology*, 2001, no. 12.
3. **Sikharulidze G. G.** Mekhanizm ionizatsii v gidkometallicheskom ionnom istochnike. Istochnik dlya tugoplavkikh metall-ov, *Gurnal tekhnicheskoi fiziki*, 1997, vol. 67, no. 11.
4. **Volkert C. A., Minor A. M.** Focused Ion Beam Microscopy and Micromachining. *MRS BULLETIN*, 2007, vol. 32.
5. **Yao N.** *Focused ion beam systems*. Basics and applications, New York: Cambridge University Press, 2007.
6. **Yao M., Ohmura Y.** Study of liquid metals as a basis for nanoscience. *Journal of physics: condensed matter*, 2008, no. 20.
7. **Bischoff L.** *Focused Ion Beams*, Institute of Ion Beam Physics and Materials Research, Germany. URL: http://www.spirit-ion.eu/tl_files/spirit_ion/files/FZD_tutorial/Bischoff_FIB.pdf
8. **Mazarov P.** *Lithography meets FIB: Gallium free Focused Ion Beam Nanofabrication*, FIB Workshop Zürich, 23.06.2014.
9. **Appleton Bill R., Tongay S., Lemaitre M., Gila B., Fridmann J., Mazarov P., Sanabia Jason E., Bauerdick S., Bruchhaus L., Mimura R., Jede R.** Materials modifications using a multi-ion beam processing and lithography system, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2011.
10. **Mazarov P., Melnikov A., Wernhardt R., Wieck A. D.** Long-life bismuth liquid metal ion source for focussed ion beam micromachining application, *Applied Surface Science*, 2008, vol. 254.
11. **Mazarov P., Wieck A. D., Bischoff L., Pilz W.** Alloy liquid metal ion source for carbon focused ion beams, *Journal of vacuum science & technology*, Nov/Dec. 2009, B 27 (6).
12. **Pearton S. J., Gila B. P., Appleton B., Hays D., Ren F., Fridmann J., Mazarov P.** Nanoengineering of Semiconductor Nanowires-Synthesis, Processing and Sensing Applications, *Journal of Nanoengineering and Nanomanufacturing*, 2011, vol. 1.
13. **Bo Cui.** *Recent Advances in Nanofabrication Techniques and Applications*. 2011. URL: <http://www.intechopen.com/books/recent-advances-in-nanofabrication-techniques-andapplications/focused-ion-beam-lithography>.

14. **Morgan J., Notte J., Hill R., Ward B.** An Introduction to the Helium Ion Microscope, *Microscopy today*, July 2006, vol. 14, no. 4.
15. **Hill R., Notte J., Ward B.** The ALIS He ion source and its application to high resolution microscopy, *Proceedings of the Seventh International Conference on Charged Particle Optics*, 2008.
16. **Notte J., Hill R., McVey S., Farkas L., Percival R., Economou N., Ward B.** *An Introduction to Helium Ion Microscopy*, 2006.
17. **Analiticheskii obzor po probleme ispolzovania elektronno-ionnogo skaniruyushogo mikroskopa i rentgenovskogo fotoelektron-nogo mikrozonada dlya provedeniya issledovaniy atomnogo stroeniya i strukturi poverkhnosti nanomaterialov: Chast 1, Problemi ispolzovaniya elektronno-ionnogo skaniruyushogo mikroskopa dlya provedeniya issledovaniy strukturi poverkhnosti nanomaterialov**, Taganrog, 2011. URL: http://www.nanoscience-edu.sfedu.ru/content/pdf/EPM_Review_Scured.pdf.
18. **Kalbitzer S., Zhukov V.** Resolution of the Scanning Helium Microscope, *The Open Applied Physics Journal*, 2008, no. 1, pp. 4–10.
19. **Hill R., Notte J., Ward B.** The ALIS He ion source and its application to high resolution microscopy, *Proceedings of the Seventh International Conference on Charged Particle Optics*, 2008.
20. **Ernst N., Bozdech G., Schmidt H., Schmidt W. A., Lar-kins G. L.** On the full-width-at half-maximum of field ion energy distributions, *Applied Surface Science*, 1993, no. 67.
21. **Allan G. L., Legge G. J. F., Zhu J.** Characteristics of a hydrogen gas field ion source for muprobe application, *Nuclear instruments and methods in physics research*, 1988, B 34, pp. 122–126.
22. **Hwang I.-S., Kuo H.-S., Fu T.-Y., Hwang Y.-S., Lu Y.-H., Lin C.-Y., Hou J.-L., Tsong T. T.** Single-atom tip as an emitter of gas field ion sources. URL: <http://www.phys.sinica.edu.tw>.
23. **Kuo H.-S., Hwang I.-S., Fu T.-Y., Lu Y.-H., Lin C. Y., Tsong T. T.** Gas field ion source from an Ir/W <111> single-atom tip, *Applied physics letters*, 2008, no. 92.
24. **Bipin Singh**, *White paper*. ORION NanoFab: An Overview of Applications, Carl Zeiss NTS, LLC, USA, September 2012. URL: <http://www.zeiss.com>.
25. URL: http://www.zeiss.com/microscopy/en_de/products/multiple-ion-beam.html.
26. **Smith N. S., Skoczylas W. P., Kellogg S. M., Kinion D. E., Tesch P. P., Sutherland O., Aanesland A., Boswell R. W.** High brightness inductively coupled plasma source for high current focused ion beam applications, *Journal of vacuum science & technology*, Nov/Dec. 2006, B 24 (6).
27. **Lesik M., Spinicelli P., Pezzagna S., Happel P., Jacques V., Salord O., Rasser B., Delobbe A., Sudraud P., Tallaire A., Meijer J., Roch J.-F.** Maskless and targeted creation of arrays of colour centres in diamond using focused ion beam technology, *Physica status solidi*, 2013, no. 10, pp. 2055–2059.
28. **Sortais P., Lamy T., Médard J., Angot J., Sudraud P., Salord O., Homri S.** Technical use of compact micro-onde devices, *Review of Scientific Instruments*, 2012, no. 83.
29. **Perez Martinez C. S.** *Characterization of ionic liquid ion sources for focused ion beam applications*, Massachusetts institute of technology, 2013. URL: <http://www.ssl.mit.edu/files/web-site/theses/>.
30. **Tseng A. A.** Recent Developments in Nanofabrication Using Ion Projection Lithography, *Nanolithography*, 2005, no. 6, pp. 594–608.
31. **Voznyi V., Miroshnichenko V., Mordyk S., Shulha D., Storizhko V., Tokman V.** Development of the RF Ion Sources for Focused Ion Beam Accelerators, *Journal of nano- and electronic physics*, 2013, vol. 5, no. 4, pp. 04060 (1–6).
32. **Internal Review Meeting, PBCEC, IIT Kanpur**, Indian Institute of technology Kanpur, Centre for Nanotechnology Initiative, May 10, 2008. URL: http://www.iitk.ac.in/olddord/pptfiles/NanoTech_Review_10MAY08/NanoTech_Rev_10May08_1.pdf.
33. **Tondare V. N.** *Towards a High Brightness, Monochromatic Electron Impact Gas Ion Source*, University of Pune, Pune City, Maharashtra, India, 2006. URL: <http://www.repository.tudelft.nl/view/ir/uuid:7c61a58a-c0c3-4d7d-afa5-a2ba73alebd8>.
34. **Ji Q., Jiang X., King T. J., Leung K. N., Standiford K., Wilde S. B.** Improvement in brightness of multicusp-plasma ion source, *Journal of vacuum science & technology*, 2002, B 20 (6), pp. 2717–2720.
35. **Scipioni L., Stewart D., Ferranti D., Saxonis A.** Performance of multicusp plasma ion source for focused ion beam applications, *Journal of Vacuum Science & Technology*, 2000, B 18, pp. 3194.
36. **Guharay S. K., Sokolovsky E., Orloff J.** Characteristics of ion beams from a Penning source for focused ion beam applications, *Journal of Vacuum Science & Technology*, 1999, B 17, pp. 2779.
37. **Guharay S. K.** High-Brightness Negative Ion Beams from a Plasma Source and Merits for New Applications in Materials Science and Microelectronics, *IEEE Conference record — abstracts, Pulsed power plasma science*, 2001.
38. **Guharay S. K., Orloff J.** Ion Beams and Their Applications in High-Resolution Probe Formation, *Proceedings IEEE transactions on plasma science*, December 2005, vol. 33, no. 6, pp. 1911–1930.
39. **Bacon F. M.** Gas discharge ion source. I. duoplasmatron // *Review of Scientific Instruments*, 1978, vol. 49, pp. 427–434.
40. **Kobayashi M., Prelec K., Sluyters Th.** Studies of the hollow discharge duoplasmatron as a source of H⁻ ions, *Review of Scientific Instruments*, 1976, vol. 47, pp. 1425–1434.
41. **Lawrence G. P., Beauchamp R. K., McKibben J. L.** Direct extraction of negative ion beams of good intensity from a duoplasmatron, *Nuclear instruments and methods*, 1965, no. 32, pp. 357–359.
42. **Smith N. S., Tesch P. P., Martin N. P., Kinion D. E.** A High Brightness Source for Nano-Probe Secondary Ion Mass Spectrometry, *Applied surface science*, 2008, no. 4.
43. **Pillatsch L., Wirtz T., Migeon H.-N., Scherrer H.** Use of a duoplasmatron ion source for negative ion generation, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2011, no. 269, pp. 1036–1040.
44. **Coath C. D., Long J. V. P.** A high-brightness duoplasmatron ion source for microprobe secondary-ion mass spectrometry, *Review of Scientific Instruments*, 1995, no. 66, pp. 1018–1023.
45. **Tesch P., Smith N., Martin N., Kinion D.** High current focused ion beam instrument for destructive physical analysis applications, *Proceedings of the thirty-fourth international symposium for testing and failure analysis*, 2008.
46. **Nabhiraj P. Y., Menon R., Mohan Rao G., Mohan S., Bhandari R. K.** Optimization of ion energy spread in inductively coupled plasma source designed for focused ion beam applications, *Vacuum*, 2010, no. 85, pp. 344–348.
47. **Menon R., Nabhiraj P. Y.** Development of a compact high current low emittance RF ion source, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2013.
48. **Nabhiraj P. Y., Menon R., Mohan Rao G., Mohan S., Bhandari R. K.** Characterization of compact ICP ion source for focused ion beam applications, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2010, no. 621, pp. 57–61.

49. Smith N. S., Skoczylas W. P., Kellogg S. M., Kinion D. E., Tesch P. P., Sutherland O., Aanesland A., Boswell R. W. High brightness inductively coupled plasma source for high current focused ion beam applications, *Journal of Vacuum Science & Technology*, Nov/Dec. 2006, B 24 (6), pp. 2902–2906.
50. Smith N. S., Tesch P. P., Martin N. P., Boswell R. W. *Metrology for 3D devices: Plasma-FIB for high throughput sectioning of large dimensions*. URL: <http://www.oregon-physics.com>
51. Nabhiraj P. Y., Menon R., Mallik C., Bhandari R. K., Mohan R. G., Mohan S. Design of high current RF ion source for micromachining applications, *Proceedings of the APAC 2007, Raja Ramanna Centre for Advanced Technology (RRCAT)*, Indore, India, 2007, pp. 262–264.
52. Menon R., Nabhiraj P. Y., Bhandari R. K. Improvements in the angular current density of inductive coupled plasma ion source for focused heavy ion beams, *Vacuum*, 2013.
53. Voznii V. I., Miroshnichenko V. I., Mordik S. N., Nagornii A. G., Nagornii D. A., Storigko V. E., Shulga D. P. Visokochastotnie VCh-istochniki ionov dlya uskoritelnykh prilozhenii, *Nauka ta innovazii*, 2010, vol. 6, no. 5, pp. 38–44.
54. Lee Y., Gough R. A., Leung K. N., Vujic J., Williams M. D., Zahir N., Fallman W., Tockler M., Bruenger W. Plasma source for ion and electron beam lithography, *Journal of Vacuum Science & Technology*, 1998, B 16 (6), pp. 3367.
55. Ji Q., King T. J., Leung K. N., Wilde S., Production of various species of focused ion beam, *Review of scientific instruments*, 2002, vol. 73, pp. 822.
56. Ji Q., Jiang X., Ji L., Chen Y., Akker B.v.d., Leung K. N. Novel ion beam tools for nanofabrication, *NSTI-Nanotech 2005*, 2005, vol. 2, pp. 703–706.
57. Glazkov A. A., Lobanov N. R., Barchenko V. T., Baliko-ev I. S., Zagranichny S. I. Duoplasmatron-type ion source with improved technical and operational performance for linear accelerator, *Proceedings of the 3rd European particle accelerator conference (EPAC)*, 1992.
58. Lozano P. Ionic Liquid Ion Sources in the Processing of Materials and Other Applications, *Proceedings of the Materials and Processes Far From Equilibrium Workshop*, Massachusetts Institute of Technology, November 3, 2010.
59. Escher C., Thomann S., Andreoli C., Fink H.-W., Toquant J., Pohl D. W. Vacuum ion emission from solid electrolytes: An alternative source for focused ion beams, *Applied Physics Letters*, 2006, no. 89, pp. 053513 (1–2).
60. Dália Teresa, Al-Alavi Martins. *Compact Ion-source Based on Superionic Rubidium Silver Iodide (RbAg₄I₃) Solid Electrolyte*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Física, 2013.
61. Orloff J. *Handbook of charged particle optics*. 2nd ed., Boca Raton: CRC Press, 2009.
62. Lozano P., Martinez-Sanchez M. Ionic liquid ion source: characterization of externally wetted emitters, *Journal of colloid and interface science*, 2005, no. 282 (2).
63. Lozano P., Martinez-Sanchez M. Efficiency estimation of EMI-BF₄ ionic liquid electrospray thrusters, *Proceedings of the 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint propulsion conference*, 2005.
64. Lozano P. Energy properties of an EMI-Im ionic liquid ion source, *Journal of physics D: applied physics*, January 2006, no. 39 (1).
65. Zorzosa A. N. *The use of ionic liquid ion sources (ILIS) in FIB applications*. Massachusetts institute of technology, 2009. URL: <http://www.ssl.mit.edu/files/website/theses/>.
66. Zorzosa A. N., Lozano P. C. The use of ionic liquid ion sources in focused ion beam applications, *Journal of Vacuum Science & Technology*, Nov/Dec 2008, B 26 (6), pp. 2097–2102.
67. Larriba C., Castro S., de la Mora J. F., Lozano P. Monoenergetic source of kilodalton ions from Taylor cones of ionic liquids, *Journal of applied physics*, 2007, no. 101, pp. 084303 (1–6).
68. Huddleston J. G., Visser A. E., Reichert M., Willauer H. D., Broker G. A., Rogers R. D. Characterization and comparison of hydrophilic and hydrophobic room temperature ionic liquids incorporating the imidazolium cation, *Green Chemistry*, 2001, no. 3, pp. 156–164.
69. Fuller J., Carlin R. T., Osteryoung R. A. The Room Temperature Ionic Liquid 1-Ethyl-3-methylimidazolium Tetrafluoroborate: Electrochemical Couples and Physical Properties, *Journal of The Electrochemical Society*, November 1997, vol. 144, no. 11, pp. 3881–3886.
70. McEwen A. B., Ngo H. L., LeCompte K., Goldman J. L. Electrochemical Properties of Imidazolium Salt Electrolytes for Electrochemical Capacitor Applications, *Journal of The Electrochemical Society*, 1999, no. 146 (5), pp. 1687–1695.
71. Hagiwara R., Hirashige T., Tsuda T., Ito Y. A Highly Conductive Room Temperature Molten Fluoride: EMIF · 2.3HF, *Journal of The Electrochemical Society*, 2002, no. 149 (1), pp. D1–D6.
72. Yoshida Y., Otsuka A., Saito G., Natsume S., Nishibori E., Takata M., Sakata M., Takahashi M., Yoko T. Conducting and Magnetic Properties of 1-Ethyl-3-methylimidazolium (EMI) Salts Containing Paramagnetic Ions: Liquids [EMI][M^{III}Cl₄] (M = Fe and Fe_{0.5}Ga_{0.5}) and Solid [EMI]₂[Fe^{II}Cl₄], *Bulletin of the chemical society of Japan*, 2005, vol. 78, no. 11, pp. 1921–1928.
73. Yoshida Y., Muroi K., Otsuka A., Saito G., Takahashi M., Yoko T. 1-Ethyl-3-methylimidazolium Based Ionic Liquids Containing Cyano Groups: Synthesis, Characterization, and Crystal Structure, *Inorganic Chemistry*, 2004, no. 43, pp. 1458–1462.
74. Yoshida Y., Baba O., Saito G. Ionic Liquids Based on Dicyanamide Anion: Influence of Structural Variations in Cationic Structures on Ionic Conductivity, *Journal of Physical Chemistry B*, 2007, no. 111, pp. 4742–4749.
75. Yoshida Y., Saito G. Influence of structural variations in 1-alkyl-3-methylimidazolium cation and tetrahalogenoferrate(III) anion on the physical properties of the paramagnetic ionic liquids, *Journal of Materials Chemistry*, 2006, no. 16, pp. 1254–1262.
76. Angell C. A. Mobile ions in amorphous solids, *Annual Review of Physical Chemistry*, 1992, no. 43, pp. 693.
77. Knuffman B., Steele A. V., Orloff J., McClelland J. J. Nanoscale focused ion beam from laser-cooled lithium atoms, *New Journal of Physics*, 2011, no. 13, pp. 103035 (1–9).
78. Knuffman B., Steele A. V., McClelland J. J., Maazouz M., Schwind G., Orloff J. *Focused Ion Beams from Magneto-Optical Trap Ion Sources*, National Institute of Standards and Technology. URL: http://www.fibsem.net/web_documents/2011Presentations/knuffman.pdf.
79. Hanssen J. L., Hill Sh. B., Orloff J., McClelland J. J. Magneto-Optical-Trap-Based, High Brightness Ion Source for Use as a Nanoscale Probe, *Nano letters*, 2008, vol. 8, no. 9, pp. 2844–2850.
80. Knuffman B., Steele A. V., McClelland J. J. Cold atomic beam ion source for focused ion beam applications, *Journal of Applied Physics*, 2013, no. 114, pp. 044303 (1–7).
81. van der Geer S. B., Reijnders M. P., de Loos M. J., Vredendregt E. J. D., Mutsaers P. H. A., Luiten O. J. Simulated performance of an ultracold ion source, *Journal of Applied Physics*, 2007, no. 102, pp. 094312.
82. Metcalf H. J., van der Straten P. *Laser Cooling and Trapping*, New York: Springer, 1999.

В. Ф. Лукичев^{1, 2}, член-кор. РАН, д-р физ.-мат. наук, **Ю. Л. Шиколенко**¹, аспирант

¹ Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики

² Физико-технологический институт РАН, г. Москва

СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ЗАПОМИНАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Поступила в редакцию 02.06.2015 г.

Представлен обзор рынка микроэлектроники и тенденции его развития. Рассмотрены передовые технологические решения в полупроводниковой отрасли. Проведен анализ существующих и перспективных видов запоминающих устройств. Исследованы особенности и предложена классификация 3D NAND-памяти.

Ключевые слова: High-k Metal Gate, SOI, Tri-Gate, FeRAM, MRAM, 3D NAND

Введение

Потребности рынка полупроводниковых устройств неуклонно растут и требуют все больших объемов хранилищ данных и улучшения их эксплуатационных характеристик. Индустрия полупроводниковых изделий всего мира — крупные предприятия, государственные учреждения, небольшие *fabless*-фабрики ведут исследования по разработке новых и оптимизации параметров уже существующих типов запоминающих устройств (ЗУ).

На сегодняшний день произведены десятки миллиардов микросхем памяти. Выпускаемые виды полупроводниковой памяти успешно интегрируются в микропроцессорные системы, выполненные по самым современным топологическим нормам. Число различных типов ЗУ уже давно не поддается подсчету. Минимизация элементов ЗУ и возможности их масштабирования приобретают все большую актуальность. В данной работе представлены обзор современного состояния индустрии микроэлектроники, тенденции ее развития и результаты анализа современной элементной базы ЗУ.

Тенденции развития рынка микроэлектроники

На протяжении последних 20 лет производство изделий микроэлектроники развивается впечатляющими темпами. На сегодняшний день около 90 % всех инновационных технологий основано на микроэлектронных решениях. Полупроводниковые устройства все больше интегрируются в повседневную деятельность человека. По данным аналитического агентства Gartner, объем рынка микроэлектроники за 2011 г. составил 285,8 млрд долл. (рис. 1, см. третью сторону обложки).

За период с 2001 по 2015 г. наблюдается неуклонный рост основных параметров ИМС (рис. 2, см. третью сторону обложки). Сегодня очевидным становится, что функциональные возможности классической микроэлектроники достигают своего предела. Только с внедрением совершенно новых технологий возможен дальнейший прогресс в вычислительных мощностях. В табл. 1 представлена сравнительная характеристика основных технологических параметров ИМС за период с 2001 по 2015 г.

Технологические особенности производства современных ИМС

В последней опубликованной к настоящему времени маршрутной карте ITRS-2013 уровни ежегодно достигаемых минимальных размеров элементов и критерии масштабирования прогнозируются до 2028 г. Согласно ITRS-2013 пределом масштабирования станут минимальные размеры элементов классических МОП-структур, составляющие 11...22 нм (рис. 3, 4).

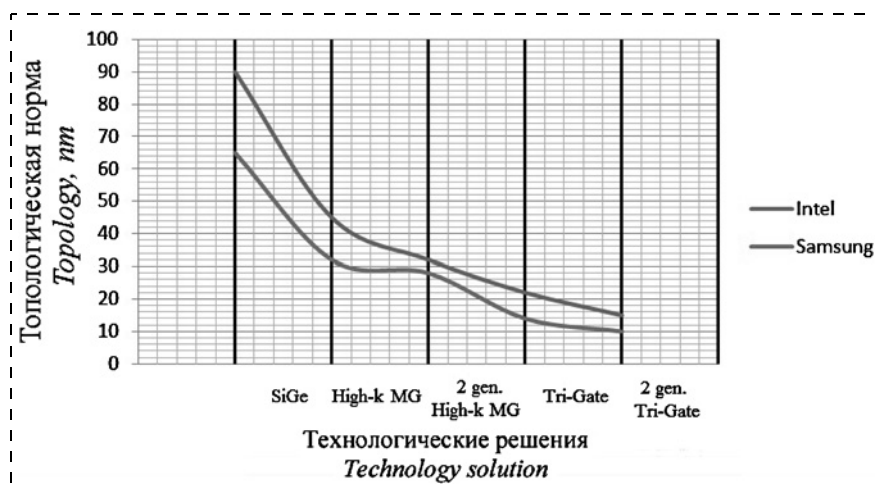


Рис. 3. Процесс развития полупроводниковой элементной базы компаний *Intel* и *Samsung*
 Fig. 3. Development of the semiconductor element base of Intel and Samsung

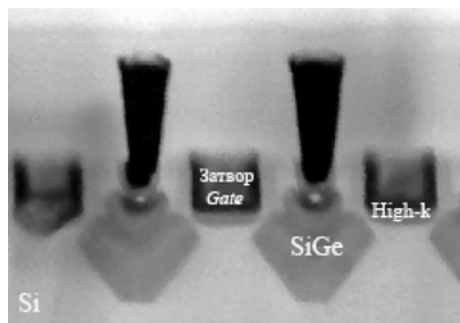


Рис. 4. Транзистор компании Intel, выполненный по технологии 45 нм

Fig. 4. Transistor from Intel made by technology of 45 nm

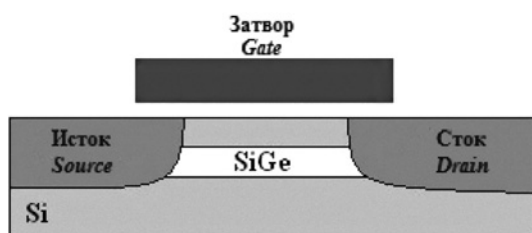


Рис. 5. МОП-транзистор с SiGe каналом

Fig. 5. MOS transistor with SiGe channel

Основными технологическими решениями в настоящее время являются следующие транзисторы:

SiGe-транзистор (транзистор с внедрением SiGe). Применение SiGe канала увеличивает скоростные характеристики транзистора за счет более высокой подвижности дырок (рис. 5).

В чипах с топологической нормой 65 нм толщина слоя, изолирующего затвор транзистора от канала, сократилась до 1,2 нм, т. е. до пяти атомов. Масштабировать подзатворный изолятор дальше становится невозможным.

High-k Metal Gate-транзистор (транзистор с применением изолятора с высокой диэлектрической проницаемостью и металлическим затвором). Чтобы перейти на топологическую норму в 45 нм, потребовалось заменить в подзатворном изоляторе диоксид кремния на материал с высокой диэлектрической проницаемостью (High-K), что позволило уменьшить ток утечки. Материалы High-K плохо сочетаются с поликристаллическим кремнием, из которого изготовляли затвор. Для решения проблемы сочетания материалов затвор стали изготавливать из металлического сплава Al и Ti. За счет использования слоя оксинитрида кремния-гафния (HfSiON) толщиной 3 нм в технологическом процессе 45 нм удалось уменьшить утечку тока в 200 раз. Сопротивление металлического затвора ниже сопротивления поликристаллического кремния, что ускоряет переключение транзистора. Для борьбы с токами утечки и улучшения подпороговой вольт-амперной характеристики транзистора существуют и другие технологические решения.

1. Транзистор, построенный с использованием технологии "кремний на изоляторе" с частично обедненным каналом (*Partially Depleted SOI, PDSOI*).

Исток и сток вместе с разделяющим их каналом перенесены с кремниевой подложки на слой оксида. В таких транзисторах наблюдается эффект плавающего напряжения (*Floating Body*), ока-

Основные параметры ИМС по годам

Таблица 1

Table 1

Comparative characteristics of the basic technological parameters of IC

Параметры Parameters	2001	2004	2007	2010	2013	2015
Топологическая норма, нм Topology, nm	130	90	65	45	32	22
Напряжение, В Voltage, V	1,1...1,2	1...1,2	0,7...1,1	0,6...1	0,5...0,9	0,4...0,9
Число транзисторов на кристалле, млн шт. Number of chip transistor, mln	193	385	773	1564	3092	6184
Число слоев Layer volume	8...10	9...13	10...14	10...14	10...15	11...15
Усредненный размер проводника, нм Average conductor size, nm	450	275	195	135	95	65
I/O сигналы I/O signal	1024	1024	1024	1280	1408	1472
Частота, ГГц Frequency, GHz	1684	3990	6739	11511	19348	28751
Максимальная мощность, Вт Full power, W	130	160	190	218	251	288
Объем DRAM, Гбайт Size DRAM, GB	0.5	1	4	8	32	64

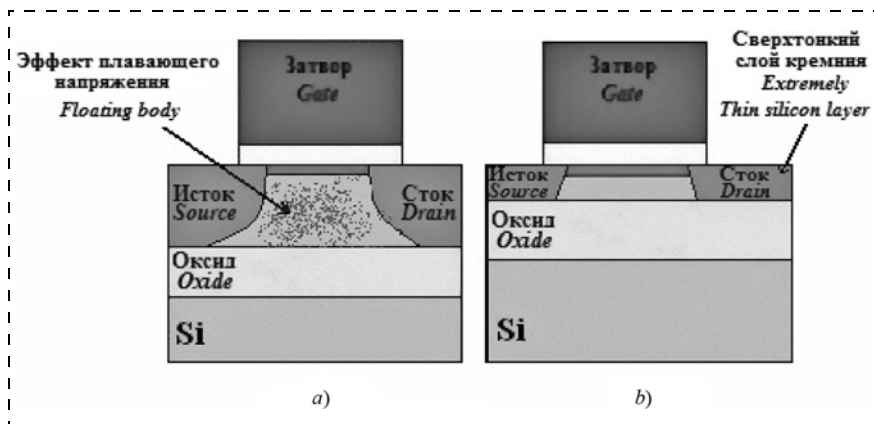


Рис. 6. Транзисторы, построенные с использованием технологии "кремний на изоляторе"
Fig. 6. Transistor constructed with the use of the silicon on insulator technology

зывающий электрическое влияние на инверсионный слой (рис. 6, а).

2. Транзистор с полностью обедненным каналом (Fully Depleted SOI, FDSOI). Токи утечки между истоком и стоком транзистора при этом устранить удастся полностью (рис. 6, б). Отсутствует эффект плавающего напряжения. Но для данной технологии необходимы пластины с чрезвычайно тонким слоем изолятора, что влечет удорожание производства на 10 %. Существует также второе поколение High-k Metal Gate с улучшенными характеристиками по току утечки и масштабируемости за счет новых сплавов металлов и внедрения новых диэлектрических материалов.

Tri-Gate (Тройной затвор). На схеме транзистора Tri-gate (рис. 7, см. третью сторону обложки) видно, что на кремниевой подложке (Silicon Substrate), отделенной от металлического затвора (Gate) слоем изолятора (Oxide), появилось высокое вертикальное ребро (Silicon Fin — кремниевый плавник). Затвор окружает это ребро с трех сторон. В местах соприкосновения затвора с кремниевым плавником присутствует подзатворный диэлектрик High-K. По обе стороны от затвора в ребре путем легирования создаются исток и сток (Source и Drain). Область между ними вследствие малой толщины ребра становится полностью обедненной. Фактически такой транзистор можно считать имеющим не один, а три затвора — по бокам и сверху ребра, отсюда и происходит его название Tri-gate [1].

Преимуществом Tri-gate является устраненный ток утечки за счет полностью обедненного канала, что приблизило подпороговую характеристику к идеальной и позволило повысить скорость переключения транзистора. Также

возросло, по сравнению с планарным транзистором, поперечное сечение инверсионного слоя (на схеме — красный). Как следствие, транзистор способен пропускать больший ток, или при том же токе уменьшается его плотность вместе с соответствующим током утечки в затвор.

На рис. 8 (см. четвертую сторону обложки) показано распределение ГИС с различными топологическими нормами в общем объеме микроэлектронной продукции по состоянию на 2013 г.

По данным ITRS-2013, через 5—10 лет стоит ожидать появления приборов, работающих на совершенно новых физических принципах.

Перспективные технологические решения в микроэлектронике

К концу периода, заявленного ITRS-2013, 2D-масштабирование достигнет фундаментальных ограничений. В отношении логики и запоминающих устройств изучают возможность использования вертикального масштабирования (3D), которое реализуется посредством межкремниевых соединений (TSV — *Through silicon via*). На рис. 9 представлены основные виды 3D-масштабирования различных изделий микроэлектроники.

Значительная часть исследований в настоящее время сосредоточена на элементах III, V групп и Ge. В табл. 2 представлены перспективные полупроводники и их особенности.

Микроэлектроника уже столкнулась с проблемами дальнейшего масштабирования. Это поставило перед учеными задачу по разработке совершенно новых видов транзисторов, которые будут способны дать стимул для дальнейшей миниатюризации электроники и повышения вычисли-

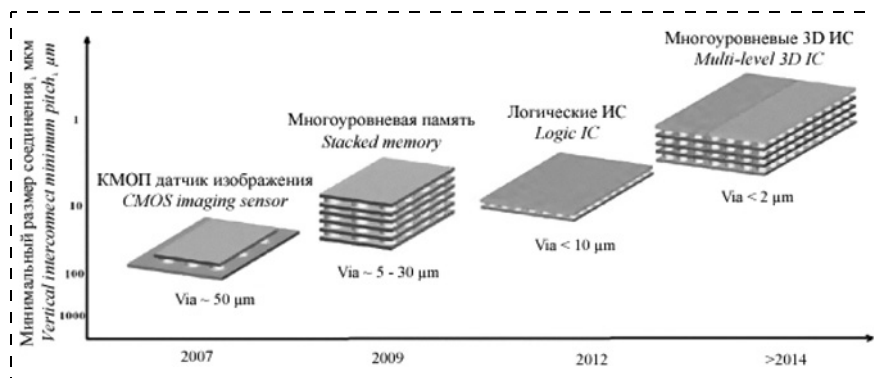


Рис. 9. Основные виды 3D-масштабирования
Fig. 9. Principal kinds of 3D scaling

тельных мощностей. Ниже представлены перспективные типы транзисторов и их характеристики (табл. 3) [2, 3]:

- транзистор на углеродных нанотрубках (CNFET — Carbon Nanotube FETs);
- транзистор на графене (GFET — Graphene FETs);
- транзистор на нанопроволоке (NWFET — Nanowire Field-Effect);
- германиевые полупроводниковые соединения N-типа (Ge-nMOSFET);
- атомный коммутатор (Atomic Switch).

Разработка новых материалов и перспективных транзисторов становится все более актуальной. ITRS-2013 предлагает два направления развития,

которые будут способствовать реализации новых возможностей будущей микроэлектроники. Первое состоит в расширении функциональных возможностей с помощью интеграции новых технологий, а второе — в стимулировании изобретений новых устройств. На сегодняшний день уже созданы прототипы принципиально новых транзисторов и материалов, способных произвести настоящую революцию в микроэлектронике и перевести ее на качественно новый уровень. В то же время ведущие предприятия находят новые возможности и оригинальные решения, чтобы отодвинуть наступающий предел классической физики. Создаются многослойные ИС, системы на кристалле, много-

Перспективные полупроводники

Таблица 2

Table 2

Perspective semiconductors

Материал <i>Material</i>	Ширина запрещенной зоны, эВ <i>Band gap, eV</i>	Свойства <i>Characteristics</i>	Область применения <i>Areas of use</i>
GaAs	1,424	Рабочая частота > 600 ГГц <i>Operating frequency > 600 GHz</i>	Транзисторы, туннельные диоды, светодиоды, лазерные диоды, фотоприемники <i>Transistors, tunneling diode, photo diode, laser diode, light-detecting device</i>
InP	1,34	Диэлектрическая проницаемость: статическая — 12,5 эВ, высокочастотная — 9,61 эВ <i>Dielectric capacitivy: Static — 12,5 eV, High frequency — 9,61 eV</i>	Сверхвысокочастотные транзисторы и диоды <i>Microwave transistors and diodes</i>
MoS ₂	1,8	Подвижность носителей заряда в 2,5 раза выше, чем в Si. В 100 000 раз меньшее энергопотребление <i>Charge carrier mobility in 2,5 times more than in Si. Power consumption is 100 000 times less</i>	Детекторы, транзисторы <i>Sensors and transistors</i>

Таблица 3

Параметры перспективных транзисторов

Table 3

Parameters of the perspective transistors

Характеристики <i>Characteristics</i>	Транзисторы <i>Transistors</i>				
	CNFET	GFET	NWFET	Ge-nMOSFET	Атомный коммутатор <i>Atomic switch</i>
Подвижность носителей <i>Charge carrier mobility</i>	10 ⁵ см ² /В·с	> 10 ⁵ см ² /В·с	10 ⁵ см ² /В·с	3500 см ² /В·с	> 10 ⁶ см ² /В·с
Рабочие частоты <i>Operating frequency</i>	1 THz	1,5 THz	2,3 THz	24,5 GHz	3 THz
Энергопотребление <i>Power consumption</i>	< 20μV	< 15 μV	< 23,4 μV	< 3,3 V	1x μV
Размеры элемента <i>Feature size</i>	< 1 nm	< 5 nm	< 0,5 nm	< 10 nm	< 0,5 nm
Интегрируемость <i>Intergrability</i>	КМОП <i>CMOS</i>	КМОП <i>CMOS</i>	КМОП <i>CMOS</i>	КМОП <i>CMOS</i>	КМОП <i>CMOS</i>
Особенности <i>Specialty</i>	Синтез Y-образных трубок <i>It can be synthesized Y-tube</i>	Самый перспективный вид транзисторов <i>The most promising form of transistors</i>	GaN, AlN, InP, GaAs, InAs, CdSe, ZnSe, CdS, ZnS, In ₂ O ₃ , ZnO, TiO ₂	Подвижность электронов в Ge и инверсионном слое в 2,5 раза выше, чем в Si <i>Electron mobility in Ge and an inversion layer is 2,5 times higher than silicon</i>	Построение энергонезависимой памяти <i>Construction non-volatile memory</i>



Рис. 11. Классификация запоминающих устройств

Fig. 11. Classification of the storage devices

ядерные процессоры и сверхбыстрые многослойные ЗУ.

Особенности развития рынка запоминающих устройств

Одним из самых быстро растущих сегментов рынка микроэлектроники является полупроводниковая память. В 2014 г. было произведено рекордное число изделий полупроводниковой памяти (34,6 млрд шт.).

Производство и внедрение *flash*-памяти росло огромными темпами. В 1998 г. ее объем составлял 11 %, в 2010 г. уже 33 % и к 2014 г. достиг 40 % мирового рынка (рис. 10, см. четвертую сторону обложки).

Особенности функционирования полупроводниковых ЗУ

На данный момент созданы десятки видов ЗУ различного назначения, принципа работы: от CD, DVD-дисков до прототипов мемристорной памяти. На рис. 11 предложена классификация ЗУ по ряду основных принципов.

Совершенствование технологических процессов и растущие масштабы производства полупроводниковой памяти привели к ее удешевлению и доступности на мировом рынке. Компактность, высокая интегрируемость и низкое энергопотребление делают ее незаменимой практически во всех современных высокотехнологичных изделиях. На рис. 12 предложена классификация полупроводниковой памяти.

Энергозависимая память занимает огромную долю на рынке полупроводниковой памяти и яв-

ляется ключевым компонентом любых ИС. На сегодняшний день наиболее распространенными видами энергозависимой памяти являются статическая память с произвольным доступом — SRAM (*static random access memory*) и динамическая память с произвольным доступом — DRAM (*dynamic random access memory*).

Статическая память с произвольным доступом SRAM — полупроводниковая оперативная память, в которой каждый разряд хранится в схеме с положительной обратной связью, позволяющей поддерживать состояние без регенерации, необходимой в динамической памяти (DRAM). Тем не менее сохранять данные без перезаписи SRAM может, только пока есть питание.

Память DRAM представляет собой набор запоминающих ячеек, которые состоят из конденсаторов и транзисторов. При отсутствии подачи электроэнергии к памяти этого типа происходит разряд конденсаторов и память обнуляется. Динамическое поддержание заряда конденсатора является основополагающим принципом работы памяти типа DRAM. Существует несколько вариантов регенерации: расширенный, пакетный, распределенный. Наиболее экономичной является скрытая (теневая) регенерация. На фоне общих инноваций в микроэлектронике также ведутся разработки перспективных ЗУ ИС.

Внедряемые типы энергозависимой памяти

Тиристорная память с произвольным доступом T-RAM (Thyristor RAM) — вид оперативной памяти, сочетающий в себе сильные стороны DRAM и SRAM (высокая скорость работы и большой объ-

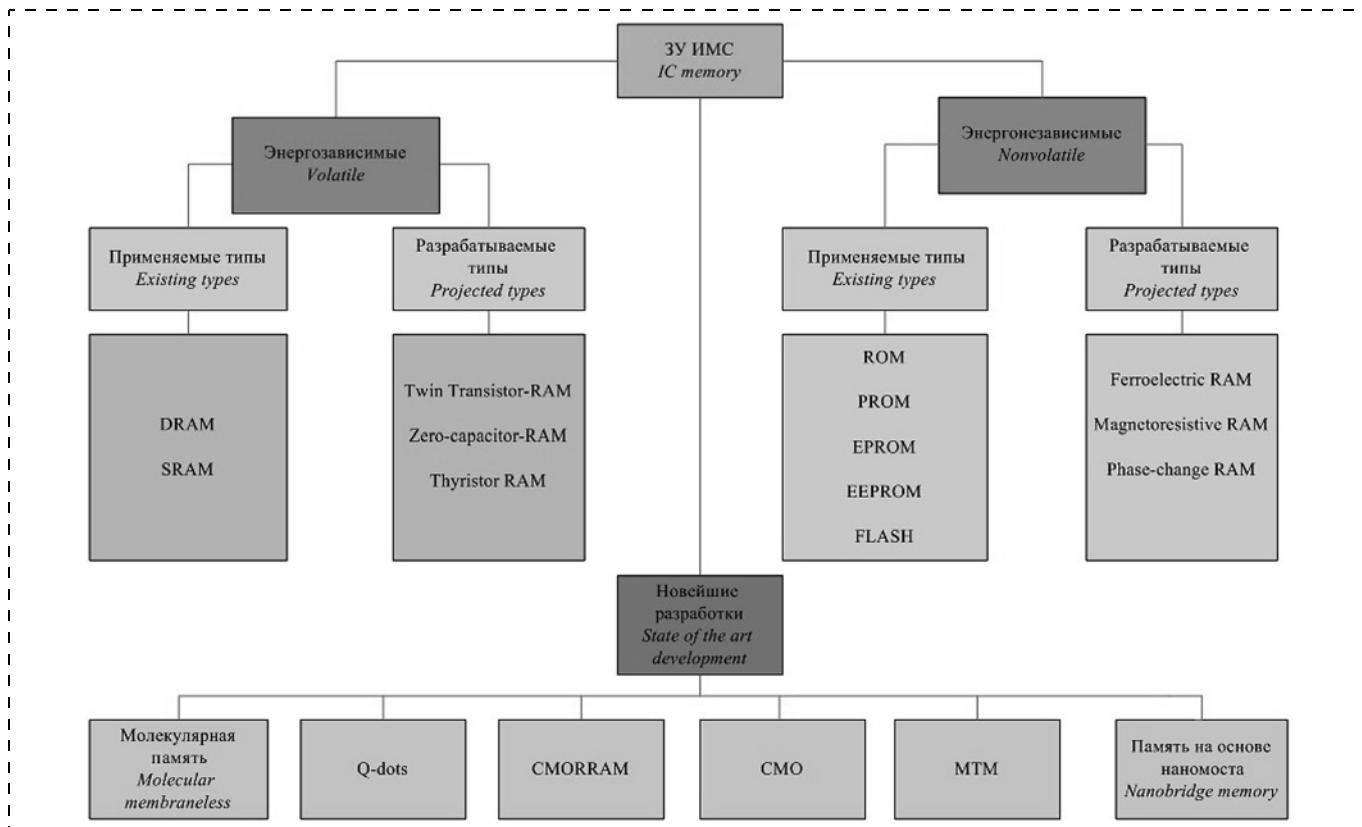


Рис. 12. Классификация полупроводниковой памяти

Fig. 12. Classification of the semi-conductor memories

ем). Данная технология использует ячейки памяти, принцип которых основан на технологии отрицательного дифференциального сопротивления (Thin-capacitively-coupled-thyristor (TCCT)). Например, компания AMD предполагала использовать данную технологию в процессорах, производимых по нормам 32 и 22 нм.

Тиристорная память с произвольным доступом состоит из ячеек памяти вида T-SRAM и T-DRAM. Первая включает в себя одну ячейку TCCT и один полевой транзистор доступа (Access FET). Ее функционал включает способность поддерживать состояние ячеек памяти без регенерации, так же как и у памяти SRAM. Память T-DRAM содержит лишь блок TCCT и включает процесс, схожий с регенерацией памяти, присутствующий в памяти DRAM [4].

Память нулевой емкости с произвольным доступом Z-RAM (Zero-capacitor), или память нулевой емкости с произвольным доступом, является перспективной технологией в области запоминающих устройств (рис. 13). Созданием данной памяти занимается компания *Innovative Silicon*. Принцип функционирования устройства основан на эффекте "плавающей" основной части (*floating body effect*). Память данного типа не уступает по скорости доступа к данным стандартной 6-транзисторной памяти SRAM. В то же время ячейка памяти Z-RAM

включает в себя лишь один транзистор, тем самым позволяя значительно увеличить плотность упаковки памяти. Расположение активного конденсатора в ячейке Z-RAM непосредственно ниже структуры транзистора определяет другую этимологию названия "Z-RAM", которая происходит от отрицательного направления оси Z.

Преимуществами Z-RAM являются низкие показатели паразитных емкостей вблизи областей

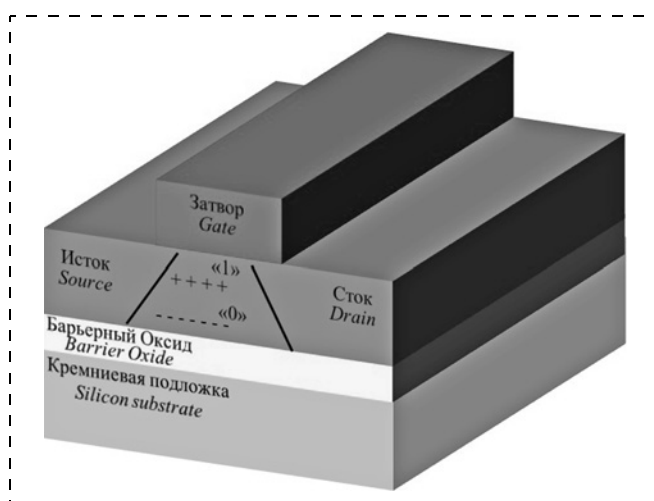


Рис. 13. Кросс-секция ячейки памяти Z-RAM

Fig. 13. Cross-section of Z-RAM memory cell

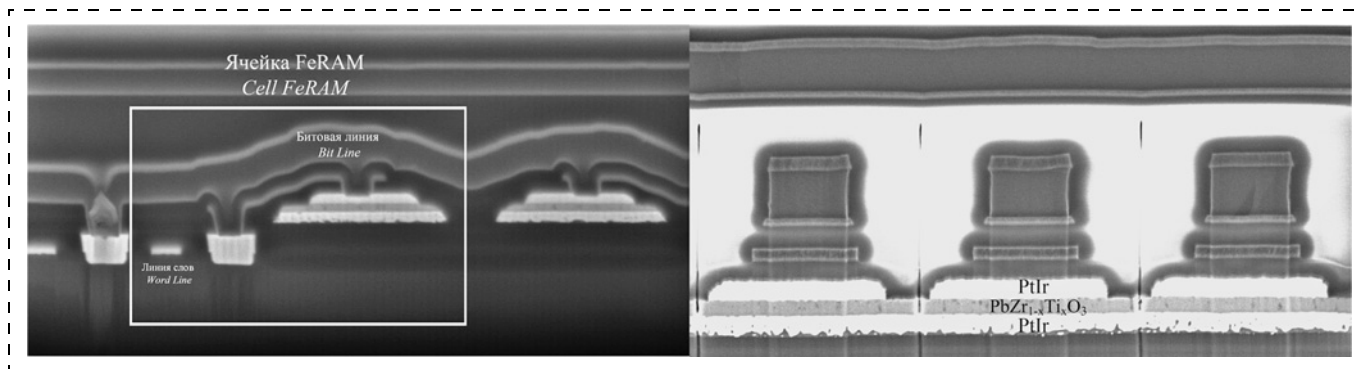


Рис. 14. Структура FeRAM-ячейки

Fig. 14. Structure of FeRAM cell

стока/истока, близкий к идеальному график зависимости подпороговых характеристик и трехкратное уменьшение рабочей мощности ячейки [5].

Память с произвольным доступом TT-RAM — вид запоминающего устройства, способного достигать высокопроизводительных операций с массивом.

Логический "ноль" хранится за счет экстракции накопленных дырок из региона "плавающей" основной части транзистора хранения данных. Уменьшение напряжения влияет на утечку тока стоковой области и способствует накоплению дырок в области основной части транзистора. Появляющиеся токи утечки повышают потенциал области хранения в момент передачи логической "1" по линии битов. Операции работы с ячейкой памяти TT-RAM включают четыре режима работы: запись, чтение, хранение и регенерация.

В ведущих мировых институтах и компаниях наряду с исследованиями энергозависимой памяти ведутся разработки совершенно новых типов энергонезависимой памяти [6].

Внедряемые типы энергонезависимой памяти

Память с произвольным доступом FeRAM. Сегнетоэлектрическая память (FeRAM) по своему устройству схожа с DRAM, но вместо диэлектрического слоя в ней используется слой сегнетоэлектрика, что и приводит к энергонезависимости.

Об исследовательских проектах в области FeRAM заявили *Samsung, Matsushita, Oki, Toshiba, Infineon, Hynix, Symetrix*, Кембриджский университет, Торонтский университет и *Interuniversity Microelectronics Centre*.

Ячейка типа 1T-1C, разработанная специально для FeRAM, схожа по своему устройству с типами ячеек, используемыми в памяти DRAM, и включает в свою структуру элемент хранения

и один транзистор выбора (рис. 14). В качестве элемента хранения в FeRAM-ячейках применяется структура, включающая в себя сегнетоэлектрик. Обычно его роль играют такие соединения, как $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ и $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_3$.

Запись происходит путем проникновения поля через сегнетоэлектрический слой, ориентируя атомы вверх или вниз, за счет чего обеспечивается хранение "1" или "0" [7].

Магниторезистивная оперативная память MRAM (magnetoresistive random-access memory) — запоминающее устройство с произвольным доступом, которое хранит информацию с помощью магнитных моментов, а не электрических зарядов [7, 8].

Информация в магниторезистивной памяти хранится не в виде электрических зарядов, а в магнитных элементах памяти. Магнитные элементы сформированы из двух ферромагнитных слоев, разделенных тонким слоем MTJ (*magnetic tunnel junction*). Один из слоев представляет собой постоянный магнит, намагниченный в определенном направлении, а намагниченность другого слоя изменяется под действием внешнего поля.

Устройство памяти организовано по принципу сетки, состоящей из отдельных ячеек, содержащих элемент памяти и транзистор (рис. 15).

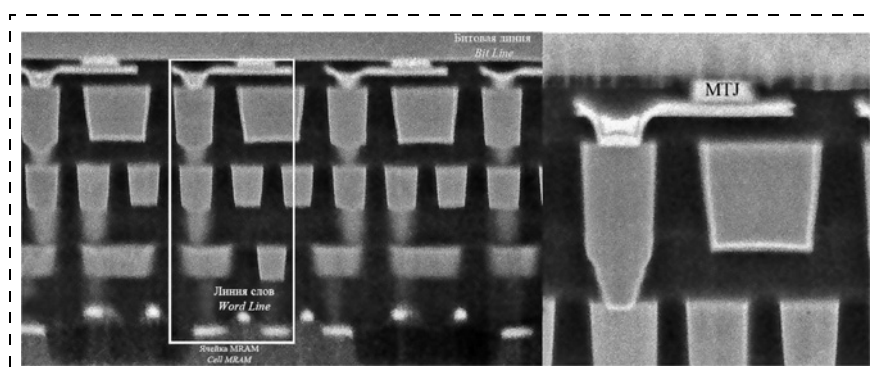


Рис. 15. Структура ячейки памяти MRAM

Fig. 15. Structure of MRAM memory cell

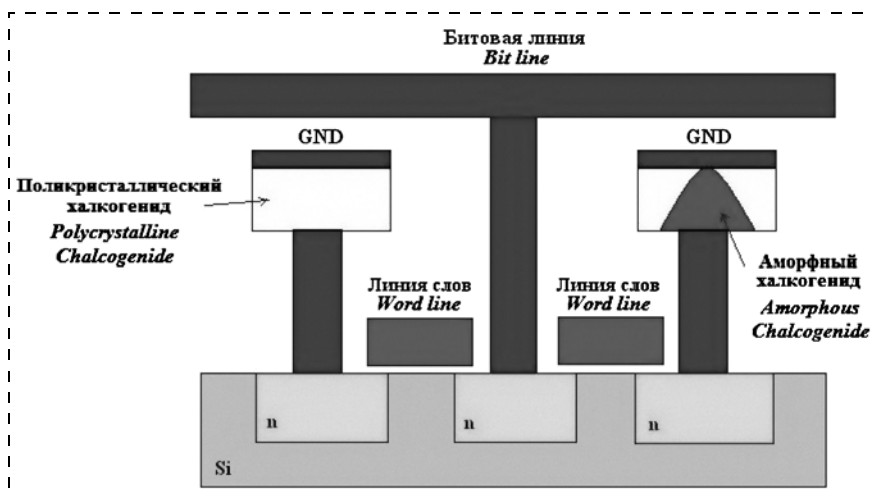


Рис. 16. Кросс-секция двух ячеек памяти PRAM: с высоким и низким сопротивлениями
Fig. 16. Cross-section of two PRAM memory cells: with high and low resistance

Считывание информации осуществляется измерением электрического сопротивления ячейки. Вследствие эффекта туннельного магнетосопротивления электрическое сопротивление ячейки изменяется в зависимости от взаимной ориентации намагниченностей в слоях.

Существуют и другие технологии MRAM: STT (*spin-torque-transfe*) — технология переноса спинового момента; TAS (*thermal assisted switching*) — технология термического переключения и VMRAM (*vertical transport MRAM*) — технология изменения магнитной ориентации за счет тока, проходящего через вертикальные столбцы.

Память на основе фазового перехода PRAM (*phase-change memory*) основывается на уникальном поведении халькогенида, который при нагреве может изменять свое состояние (с кристаллического на аморфное). В последних версиях разработчики смогли добавить еще два дополнительных состояния, удвоив информационную емкость чипов (рис. 16).

Кристаллическое и аморфное состояния халькогенида различаются электрическим сопротивлением, что и легло в основу хранения информации. Аморфное состояние, имеющее высокое сопротивление, используется для представления двоичного нуля, а кристаллическое состояние, обладающее низким уровнем сопротивления, представляет единицу [9].

Несмотря на фундаментальные различия в физических принципах, внедряемые типы энергонезависимой памяти характеризуются параметрами, свойственными всем видам памяти (табл. 4).

3D NAND flash-память

В современном производстве полупроводниковой памяти нашло отражение и 3D-масштабирование, только на субмикронном уровне. Современным устройствам с каждым годом требуется все

большие объемы памяти, при этом требования к размерам и характеристикам ИС возрастают. Это привело к появлению 3D NAND-памяти, способной хранить огромные объемы информации. Успешной интеграции 3D-технологий удалось достичь за счет критических размеров масштабирования и внедрения новых производственных циклов. Успешному построению 3D NAND-памяти поспособствовало и создание технологии затвора, окружающего со всех сторон канальную область (*gate-all-around* (GAA)). GAA-транзисторы похожи по своей концепции на FinFET, за исключением того,

что материал затвора окружает канальную область со всех сторон. В зависимости от конструкции GAA-транзисторы могут иметь два или четыре функционирующих затвора. На рис. 17 представлены разновидности 3D NAND-памяти.

p-BiCS (*Bit-cost scalable*) 3D NAND Flash. Toshiba и Samsung разрабатывают средства создания вертикальной битовой строки для увеличения числа ячеек в сопряженных областях кремния. Такая структура имеет преимущество в том, что слой с

Таблица 4
Внедряемые типы энергонезависимой памяти
Table 4
Introduced types of nonvolatile memory

Параметры Parameters	Типы памяти Memory types		
	FRAM	MRAM	PRAM
Диапазон температур, °C Temperature band, °C	-40...+85	-40...+125	0...+70
Технологический процесс, нм Technical process, nm	90	32	20
Время чтения, нс Read time, ns	60	35	10
Время записи, нс Write time, ns	90	35	50
Срок хранения информации, лет Data shelf life, years	10	20	20
Число циклов перезаписи Number of cycles rewriting	1e + 15	1e + 15	1e + 9
Напряжение при чтении/записи, В Voltage of read/write, V	1,5/1,5	1/1	1/1
Размер ячейки Cell size	15F ²	6F ²	4F ²

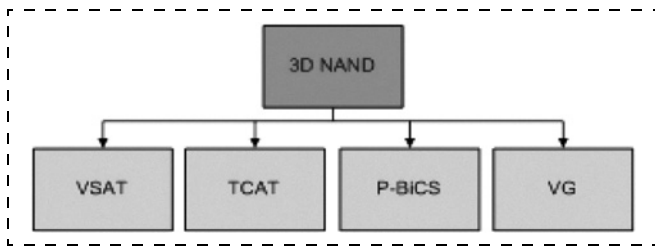


Рис. 17. Основные технологические решения при производстве 3D NAND

Fig. 17. Basic technological solutions for manufacture of 3D NAND

нитридом не изолирован от каждого управляющего затвора. Соответственно, нет необходимости в ряде дополнительных этапов производства.

Технология p-BiCS позволяет достичь высокой надежности процессов записи/стирания посредством туннелирования Фаулера—Нордгейма (FN). Туннелирование достигает более сильного эффекта вследствие кривизны и малого радиуса трубки, низкого сопротивления металлических токопроводящих дорожек и жесткого контроля затворов выбора (SG) ввиду низкой тепловой проводимости. Данная архитектура имеет U-образную строку для уменьшения паразитного сопротивления в нижней ее части. Выбирающий затвор имеет асимметричную структуру для уменьшения токов утечки [10].

TCAT (Terabit Cell Array Transistor). Как и в технологии p-BiCS, процесс начинается с нанесения нескольких слоев на поверхность подложки, но отличается чередованием слоев нитрида кремния и диоксида кремния. Нитрид кремния служит в качестве заполнителя и удаляется, а место, которое он занимает, заполняется материалом для затвора.

Особенностью TCAT является то, что данная технология меньше стеснена в горизонтальной плоскости, чем технология BiCS. Ожидается, что

это позволит TCAT добиться лучшей масштабируемости на предельных возможностях литографии [10].

VSAT (Vertical stacked array transistors). Исследователи Калифорнийского университета изобрели надежную и простую 3D-структуру — VSAT, с топологией 100 нм для ультравысокой плотности устройств *flash*-памяти NAND при одновременном повышении производительности и мобильности канала. Технология VSAT образует уникальный вертикальный способ интеграции, имеет низкую стоимость производства, упрощенный процесс изготовления, ультравысокую плотность и простую интеграцию с периферийными схемами. Предполагается, что емкость VSAT-памяти может составлять 128 Гбайт, с 16 слоями с топологией 50 нм [11].

VG-NAND (Vertical Gate NAND). Память VG-NAND разрабатывается компанией *Samsung* и на данный момент превосходит другие виды 3D NAND-памяти. Эта технология позволяет преодолеть рубеж масштабирования ячейки памяти в 20 нм. Компания *Samsung* уже выпускает чипы, имеющие до 16 слоев ячеек памяти. Данная технология позволяет располагать линии слов с шагом литографии в 37,5 нм, а битовые линии с шагом в 75 нм. Ключевой особенностью VG-NAND является возможность менять направление выбора битовых линий и страниц, повышая таким образом эффективность работы памяти. Способ формирования контактов битовых линий позволяет не только свести к минимуму число технологических этапов при производстве, но и уменьшить стоимость производства. На рис. 18 (см. четвертую сторону обложки) представлены существующие технологии 3D NAND-памяти [12], а в табл. 5 — основные их параметры.

Таблица 5

Основные параметры существующих видов 3D NAND-памяти

Table 5

Key parameters of the existing kinds of 3D-NAND memories

Параметры <i>Parameters</i>	Технологические решения <i>Technological solutions</i>			
	p-BiCS	TCAT	VSAT	VG
Размер ячейки по осям X, Y <i>Cell size in X, Y</i>	$6F^2(3F \times 2F)$	$6F^2(3F \times 2F)$	$6F^2(3F \times 2F)$	$4F^2(2F \times 2F)$
Процесс размещения затвора <i>Gate process</i>	Затвор в первую очередь <i>Gate first</i>	Затвор в последнюю очередь <i>Gate last</i>	Затвор в первую очередь <i>Gate first</i>	Затвор в последнюю очередь <i>Gate last</i>
Протекание тока <i>Current flow</i>	U-образное направление <i>U-turn</i>	Вертикальное <i>Vertical</i>	Синусоидальное <i>Multi-U-turn</i>	Горизонтальное <i>Horizontal</i>
Структура затвора <i>Gate shape</i>	Затвор, окружающий область канала <i>Gate-all-around (GAA)</i>	Затвор, окружающий область канала <i>Gate-all-around (GAA)</i>	Планарная <i>Planar</i>	Двойной затвор <i>Double Gate</i>
Масштабирование <i>Possible minimal F</i>	$> 50 \text{ nm}$	$> 50 \text{ nm}$	$> 50 \text{ nm}$	$> 2x \text{ nm}$

Заключение

Пределом масштабирования классических МОП-структур считают минимальные размеры элементов порядка 11 нм. Дальнейшие миниатюризация электроники и повышение вычислительных мощностей представляются возможными в случае расширения функционала существующей элементной базы с помощью интеграции новых технологий. В настоящее время уже созданы прототипы принципиально новых транзисторов (CNFET, GFET, Ge-nMOSFET), а также исследуются возможности применения перспективных полупроводников (GaAs, InP, MoS₂). Ведущие мировые производители уже вплотную приблизились к заявленным в ITRS пределам. Такие компании, как *TSMC*, *Intel*, *Samsung*, анонсировали выпуск ИМС с минимальными размерами 10 нм. Появление технологии GAA и внедрение новых технологических циклов в производство логики и запоминающих устройств поспособствовали созданию и успешной интеграции 3D-технологии в область полупроводниковой памяти. Масштабирование flash- и DRAM-памяти практически достигло своих пределов. Компания *Micron* инициировала начало тестирования DRAM-памяти, выполненной по технологии 10 нм, а компания *Samsung* уже в ближайшие годы планирует выпускать чипы flash-памяти с топологической нормой 5 нм. Альтернативой существующим видам памяти являются T-RAM, Z-RAM, MRAM, FRAM, PRAM и др.

Несмотря на обилие перспективных видов ЗУ, их совокупная доля на рынке не превышает 0,5 %. Это связано с тем, что разработка и производство новых видов ЗУ требуют колоссальных средств.

В связи с этим в ближайшей перспективе не стоит ожидать существенных изменений в секторе инноваций рынка ЗУ. Доминирующую роль на рынке ЗУ в десятилетней перспективе по-прежнему будут играть flash- и DRAM-памяти.

Список литературы

1. Bohr M., Mistry K. Intel Revolutionary 22 nm transistors Technology // Intel Technology Journal Q4. May 2011. P. 2—27.
2. Lee S. H., Kim D. S. A Bottom-gate depletion-mode Nanowire field effect transistors (NWFET) model including a Schottky diode model // Journal of Korean Physical Society. September 2009. Vol. 55. N. 3. P. 1162—1166.
3. Silin H. O., Demis E. C., Aguilera R. Atomic switch networks-nanoarchitectonic design of a complex system for natural computing // Nanotechnology. Apr. 2015. N. 25. P. 11.
4. Nemati F. A novel thyristor-based SRAM cell (T-RAM) for high-speed, low-voltage, giga-scale memories // Proc. of IEEE IEDM Tech. Dig. Dec. 1999. P. 283—286.
5. Okhonin S., Fazan P., Jones M. E. Zero capacitor embedded memory technology for system on chip // Proc of IEEE MTDT. Aug. 2005. P. 21—26.
6. Arimoto K., Morishito F., Hayashi I. High-density scalable twin transistors RAM (TTRAM) with verify control for SOI platform memory // Solid-State Circuits, IEEE Journal. Nov. 2012 Vol. 42. Is. 11. P. 2611—2619.
7. Bohac C. Comparing technologies: MRAM vs. FRAM // Everspin Technologies. March 2013. P. 1—6.
8. Zhang K. Embedded memories for Nano-Scale VLSIs. Springer & Business Media, 2009. P. 279—328.
9. Burr G. W., Breitwisch M. J., Franceschini M. Phase change memory technology // Journal of Science and Technology B. Apr. 2010. Vol. 28. Is. 2. P. 223—262.
10. Prince B. Vertical 3D Memory Technologies., UK Chichester: John Wiley & Sons Ltd. 2014. Vol. 1. P. 4—31.
11. Kim J., Hong A. J., Kim S. M. A stacked memory device on logic 3D technology for ultra-density data storage // Nanotechnology. May 2011. Vol. 22. P. 1—7.
12. Lue H. T., Hsu T. H., Hsiao Y. H. A highly scalable 8-layer 3D Vertical-Gate (VG) TFT NAND flash using junction-free buried Channel BE-SONOS device // Proc. of VLSI Symposia on Technology. 2010. P. 131—132.

V. F. Lukichev^{1, 2}, Corresponding Member of RAS, Acting Director, Yu. L. Shikolenko¹, Post Graduate

¹ Moscow State Technical University of Radio Engineering, Electronics and Automatics

² Physical-Technical Institute of RAS

Modern Element Base of the Storage Devices

The article contains a review of the market of microelectronics, the trends in its development and advanced technological solutions in the semiconductor branch, as well as an analysis of the existing and perspective kinds of the storage devices. It also discusses specific features and offers classification of 3D NAND memory.

Keywords: High-k Metal Gate, SOI, Tri-Gate, FeRAM, MRAM, 3D NAND

Introduction

The market of the semiconductor devices grows steadily and demands ever increasing volumes of the data warehouses and improvement of their operational characteristics. The industry of the semiconductor products of the world — big enterprises, official bodies, small fabless factories are involved in research and development of new products and optimization of the parameters of the already existing types of the storage devices (SD).

Tens of billions of memory microcircuits have been manufactured. The produced kinds of the semiconductor memories are successfully integrated into the microprocessor systems made in accordance with the most advanced topological standards. The number of various types of the storage devices has been countless for a long time. Minimization of the elements of the storage devices and possibility of their scaling acquire an increasing urgency. The given work presents a review of the modern state of the industry of microelectronics,

trends in its development and the results of the analysis of the modern element base of the SD.

Trends in development of the market of microelectronics

Throughout recent 20 years the manufacture of the microelectronic products has been developing with impressing rates. About 90 % of all the innovative technologies are based on microelectronic solutions (fig. 1, see the 3-rd side of cover). The semiconductor devices are being increasingly integrated into the daily activities of people. According to Gartner agency, in 2011 the volume of the market of microelectronics amounted to 285,8 billion dollars.

Fig. 2 (see the 3-rd side of cover) presents the dynamics of growth of the world market of the semiconductor products from 2010 up to 2014.

It is obvious, that the functionality of the classical microelectronics reaches its limit. Only with introduction of absolutely new technologies the further progress in the computing capacities is possible. Table 1 presents characteristics of the basic technological parameters of IC in the period of 2001—2015.

Technological features of manufacture of modern IC

In the recently published ITRS-2013 route chart the levels of the annually reached minimum sizes of the elements and criteria of scaling are predicted up to 2028. According to ITRS-2013, the minimum sizes of the elements of the classical MOS structures will be 11...22 nm (fig. 3, 4).

The basic technologies are.

SiGe transistor with introduction of SiGe. Application of SiGe channel increases the high-speed characteristics of the transistor due to a higher mobility of the holes (fig. 5).

In the chips with the topological standard of 65 nm the thickness of the layer isolating a gate of the transistor from the channel was reduced to 1,2 nm, i.e. down to 5 atoms. The further scaling of the subgate insulator is hardly possible.

High-k Metal (the transistor with application of an insulator with high dielectric permeability and a metal gate). In order to transfer to the standard of 45 nm it was necessary to replace the silicon dioxide in the subgate insulator with a material with high dielectric permeability (High-K), which allowed us to reduce the leakage current. High-K materials are badly combined with the polycrystalline silicon, of which the gate is made. In order to solve the problem the combination of the gate materials was made of Al and Ti metal alloy. Due to the layer of silicon-hafnium oxynitride (HfSiON) with thickness of 3 nm in the technological process of 45 nm the current leakage was reduced in 200 times. Resistance of the metal gate is lower than the resistance of the polycrystalline silicon, which accelerates the transistor's switching. There are also other solutions, which

can counter the leakage current and improve the sub-threshold volt-ampere characteristic of a transistor.

1. The transistor constructed with the use of silicon on insulator technology with a partially depleted channel (Partially Depleted SOI, PDSOI).

The source and the drain together with the channel separating them are transferred from a silicon substrate on the oxide layer. In such transistors the effect of a floating body is observed, exerting an electric impact on the inversion layer (fig. 6, a).

2. The transistor with a completely depleted channel (Fully Depleted SOI, FDSOI). In this case the leakage currents between the transistor's source and drain are completely eliminated (fig. 6, b). There is no effect of a floating body. But the given technology requires plates with an extremely thin layer of the insulator, which increases the manufacture costs by 10 %. There is also the second generation of High-kMetal Gate with improved characteristics of the leakage current and scalability due to new alloys of metals and introduction of new dielectric materials.

Tri-Gate. In the circuit of Tri-gate transistor (fig. 7, see the 3-rd side of cover) it is visible, that on the silicon substrate, separated from a metal gate by an insulator layer (oxide), a high vertical edge (silicon fin) appeared. The gate surrounds this edge from three sides. In the places of contact of the gate with the silicon fin High-K subgate dielectric is present. On either side of the gate in the edge the source and drain are created by doping. Due to a small thickness of the edge the area between them becomes completely depleted. Actually, such a transistor may be considered to have not one, but three gates — on each side and over the edge, hence its name — Tri-gate [1]. An advantage of Tri-gate is that the leakage current is eliminated due to a completely depleted channel, which makes the subthreshold characteristic close to an ideal and allows us to raise the speed of switching of the transistor. In comparison with the planar transistor, the cross-section of the inversion layer (marked red in the circuit) also increased. As a consequence, the transistor is capable to pass a bigger current, or, in case of the same current, its density decreases together with the corresponding leakage current in the gate.

Fig. 8 (see the 4-th side of cover) demonstrates distribution of IC with various topological standards in the total amount of the microelectronic products in 2013.

According to ITRS-2013, in 5—10 years we should expect appearance of the devices working on absolutely new physical principles.

Perspective technological solutions in microelectronics

By the end of the period declared by ITRS-2013, the 2D scaling will reach its fundamental limits. In relation to the logic and storage devices a feasibility is studied of the use of a vertical scaling (3D), which is realized by means of the intersilicon connections (TSV — Through

silicon via). Fig. 9 presents the principal kinds of 3D scaling of various products of microelectronics.

A considerable part of the research is concentrated on III–V materials and Ge. Table 2 presents the perspective semiconductors and their features.

The microelectronics already faces problems of the further scaling. This has set the task of development of absolutely new kinds of transistors, which will be capable to give impetus to the further miniaturization of electronics and to increase to the computer capacities. Perspective types of the transistors and their characteristics (table 3) are presented below [2, 3].

Perspective transistors:

- on carbon nanotubes (CarbonNanotube FETs);
- on graphenes (Graphene FETs);
- on nanowires (Nanowire Field-Effect (NWFETs));
- germanium semiconductor compounds of N type;
- atomic Switch.

Development of new materials and perspective transistors becomes more and more topical. ITRS-2013 offers two directions for the development, which will contribute to realization of opportunities for the future of microelectronics. The first one is expansion of the functionalities by means of integration of new technologies, and the second is encouragement of inventions of new devices. Prototypes have already been created of essentially new transistors and materials, which can revolutionize the microelectronics and transfer it to a qualitatively new level. At the same time the leading enterprises find new opportunities and original solutions in order to remove the approaching limits of the classical physics. They develop multilayered IC, systems-on-crystal, multinuclear processors and superfast multilayered storage devices.

Features of development of the market of storage devices

Semiconductor memory is one of the most quickly growing segments of the market of microelectronics. In 2014 a record number of products of the semiconductor memory were produced (34,6 billion pieces). Fig. 10 (see the 4-th side of cover) presents versions of the semiconductor memories and their share in the world market in 2014. The flash memory is divided into NAND and NOR, accordingly, in relation of 37 to 3 %.

Manufacture and introduction of the flash memory grew with huge rates. In 1998 its volume was 11 %, in 2010 it was already 33 % and by 2014 it reached 40 % of the world market.

Features of functioning of the semiconductor storage devices

Tens of kinds of the storage devices with different operating principles have been developed, varying from CD and DVD discs up to the prototypes of the memristor memory. Fig. 11 offers a classification of the storage devices by a number of the main principles.

Improvement of the technological processes and the growing scales of manufacture of the semiconductor memory resulted in reduction of its price and wider availability in the world market. Its compactness, high integrability and low energy consumption makes it irreplaceable practically in all hi-tech products. Fig. 12 presents a classification of the semiconductor memory products.

Volatile memory has a huge share of the market of the semiconductor memory and is a key component of any IC. Its most widespread Versions are SRAM, static memory with a random access, and DRAM, dynamic memory with a random access.

SRAM, static random access memory, is a semiconductor memory, in which every category is stored in the circuit with a positive feedback, allowing to support the state without a regeneration, necessary for the dynamic memory (DRAM). Nevertheless, SRAM can keep data without rewriting, while there is a power supply.

DRAM memory is a set of remembering cells, which consist of condensers and transistors. In absence of a power supply a discharge of condensers occurs to the memory and the memory is zeroed. A dynamic support for a condenser charge is the basic principle of operation of DRAM. There are several versions of regeneration: expanded, package and distributed. The most economic one is the latent (shadow) regeneration. Against the background of the general innovations in the microelectronics the development of perspective IC storage devices is also going on.

Introduced types of volatile memory

T-RAM (Thyristor RAM), thyristor memory with a random access. This kind of memory combines advantages of DRAM and SRAM (high speed of operation and big volume). The given technology uses the memory cells, the principle of which is based on the technology of negative differential resistance — Thin-Capacitively-Coupled-Thyristor (TCCT). For example, AMD Co. proposed to use the given technology in the processors made by 32 and 22 nm standards.

Thyristor memory with a random access consists of the memory cells of T-SRAM and T-DRAM kinds. The first one includes one TCCT cell and one field transistor of access (Access FET). Its functional includes ability to support the state of the memory cells without a regeneration, just like SRAM. T-DRAM memory contains only a TCCT unit and includes a process similar to the memory regeneration, present in DRAM [4].

Z-RAM (Zero-capacitor) memory of zero capacity with a random access is a promising technology in the sphere of the storage memories fig. 13). It is a product of Innovative Silicon Co. The principle of operation of the device is based on the floating body effect. By the speed of the data access the memory of this type does not concede to SRAM standard 6-transistor memory. At the same time the memory cell of Z-RAM includes only one transistor, thereby allowing us to increase con-

siderably the density of memory packing. The arrangement of the active condenser in Z-RAM cell directly below the transistor structure determines another etymology of Z-RAM name, which is derived from the negative direction of axis Z.

The advantages of Z-RAM are low parasitic capacities near the drain/source areas, close to ideal schedule of dependence of the subthreshold characteristics and triple reduction of the working capacity of a cell [5].

TT-RAM memory with a random access. TT-RAM is a kind of a memory capable to reach high-efficiency operations with an array.

The logical "zero" is stored due to extraction of the saved holes from the region of the "floating" basic part of the transistor of the data storage. Tension reduction influences the current leak of the stock area and promotes accumulation of holes in the area of the basic part of the transistor. Leakage current raises the potential of the area of storage at the moment of transfer of logic "1" in the area of bits. Operations with a memory cell of TT-RAM include four operating modes: recording, reading, storage and regeneration.

Along with research of the volatile memory, the world's leading institutes and companies continue development of new types of nonvolatile memory [6].

Introduced types of nonvolatile memory

FeRAM memory with a random access. By its design the ferroelectric memory (FeRAM) is similar to DRAM, but using a layer of a ferroelectric material instead of a dielectric layer for nonvolatility.

FeRAM projects were announced by *Samsung, Matsushita, Oki, Toshiba, Infineon, Hynix, Straetrix, Cambridge* and *Toronto Universities*, and *Interuniversity Microelectronics Centre*.

A cell of IT-IC type, developed for FeRAM, is similar by its design to both types of the cells widely used in DRAM memory, including the structure from one element of storage and one transistor. As a storage element it applies the structure including a ferroelectric. Usually its role is played by such compounds as $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ and $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_3$.

Recording occurs by a field penetration through a ferroelectric layer during charging of the electrodes, focusing atoms upwards or downwards (depending on the polarity of a charge), due to which storage "1" or "0" [7] is ensured.

MRAM (magnetoresistive memory). MRAM is magnetoresistive random-access memory, which stores information by means of magnetic moments, instead of electric charges [7, 8].

In the magnetoresistive memories information is stored not in the form of electric charges, but in the form of magnetic memory elements. They are formed from two ferromagnetic layers separated by a thin layer of MTJ (*magnetic tunnel junction*). One of the layers is a constant magnet, magnetized in a certain direction, while magnetization of another magnet changes under

the influence of the external field. The memory device is organized by the principle of a grid from the separate "cells" containing a memory element and a transistor (fig. 15).

Reading of information is carried out by measurement of the electric resistance of a cell. Owing to a tunnel magnetoresistance the electric resistance of a cell changes, depending on the mutual orientation of the magnetizations in the layers.

There are also other MRAM technologies: spin-torque-transfer-STT — carrying over of the spin moment, TAS-Thermal Assisted Switching — thermal switching, and VMRAM-vertical transport MRAM — change of the magnetic orientation due to the current passing through the vertical columns (table. 4).

PRAM memory on the basis of phase transition. Phase-change memory (memory on the basis of phase transition) is based on the behavior of chalcogenide, which due to heating can "be switched" between the two states: crystal and amorphous. In the latest versions two more additional states were added, doubling the information capacity of the chips. Fig. 16 presents a cross-section of two cells of PRAM memory.

The crystal and amorphous states of chalcogenide cardinally differ by the electric resistance, and this underlies the information storage. The amorphous state with high resistance is used for presentation of the binary zero, while the crystal state, with its low resistance, represents a unit [9].

3D NAND flash

3D-scaling also found its reflexion in modern manufacture of the semiconductor memory, but only at a submicronic level. Each year the devices require ever increasing memory sizes, at that, the demands to the sizes and characteristics of IC also increase. This resulted in appearance of 3D NAND memory, capable to store huge amounts of information. Integration of 3D technologies was achieved due to the dimensions of scaling and new production cycles. Successful construction of 3D NAND memory was promoted also by creation of the Gate-all-around (GAA) technology. GAA transistors are similar in their concept to FinFET, except that the gate material surrounds the channel area from all sides. Depending on the design, GAA transistors can have two or four functioning gates. In fig. 17 are presented varieties of 3D NAND flash.

p-BiCS (Bit-cost scalable) 3D NAND Flash. *Toshiba* and *Samsung* develop a vertical bit line of NAND flash in order to increase the number of bits in the interfaced area of the silicon. This structure has an advantage — the layer with nitride should not be isolated from each control gate. Accordingly, there is no necessity for etching in the vertical direction.

The technology of flash-P-BiCS reaches a high level of reliability of recording and deleting by the method of Fowler — Nordheim tunneling (FN). Tunneling reaches a stronger effect due to the curvature and small radius

of a tube, low resistance of the metal current-conducting paths and rigid control of the select gate (SG) owing to a low thermal conductivity. The architecture has a U-line to reduce the parasitic resistance in its bottom part. The select gate has an asymmetric structure in order to ensure reduction of the leakage currents [10].

TCAT (TerabitCell Array Transistor). Just like in BICS designs, here the process begins with deposition of several layers on the surface of CMOS substrate, but in TCAT the process begins with the alternating layers of the nitride and silicon dioxide. Silicon nitride serves as a filler and is removed, and the place, which it occupied, can be filled with a material for the gate.

A specific feature of TCAT is that the technology is less constrained, than BiCS, in the horizontal plane. It is expected, that this will allow TCAT to achieve better, than BiCS, scalability on the limiting possibilities of a lithograph [10].

VSAT (Vertical stacked array transistors). In Californian University they invented a reliable and simple 3D-structure of VSAT made by 100 nm topology for ultrahigh density devices of NAND flash memory with an increase of productivity and mobility of the channel. VSAT technology provides a unique vertical way of integration. It is characterized by low production costs, simplified process of manufacturing, ultrahigh density and simple integration with the peripherals. It is expected that VSAT capacity may reach 128 GB with 16 layers by 50 nm topology [11].

VG-NAND (Vertical Gate NAND). VG-NAND-memory is being developed by *Samsung* and it surpasses other kinds of 3D-NAND memories. The technology allows us to overcome the boundary of scaling of a memory cell of 20 nm. The company already produces chips having up to 16 layers of the memory cells. The given technology allows us to have word lines with a lithograph step of 37,5 nm, and bit lines with a step of 75 nm. The key feature of VG-NAND is the ability to change the directions of the bit lines and pages for the opposite ones, thus increasing the efficiency of the memory operation. The new way of formation of contacts of the bit lines allows us not only to reduce to a minimum the number of the production stages, but also to simplify the manufacture process. Fig. 18 (see the 4-th side of cover) presents kinds of 3D-NAND memory [12]. Table 5 offers a classification of the reviewed kinds of 3D-NAND memory.

Conclusion

It is considered that the limit of scaling of the classical MOS structures is the minimal size of the elements of about 11 nm. The further miniaturization and increase of the computing capacities is possible with expansion of the functional of the existing element base by means of integration of new technologies. Prototypes of the essentially new transistors (CNFET, GFET, Ge-nMoSfEt) have already been created, and possibilities of application of the perspective semiconductors

(GaAs, InP, MoS₂) are also being investigated. Already now the world's leading manufacturers are close to the limits declared in ITRS. Such companies as *TSMC*, *Intel* and *Samsung* announced a release of IC with the minimal sizes of 10 nm. Appearance of GAA technology and introduction of new technological cycles in production of the logic and storage devices promotes development and successful integration of 3D technologies in the field of the semiconductor memory. Scaling of Flash and DRAM memories has practically reached its limits. *Micron* initiated the beginning of testing of DRAM memory by 10 nm technology, while in the next coming years *Samsung* plans to produce chips with a topological standard of 5 nm. An alternative to the existing kinds of memory are T-RAM, Z-RAM, MRAM, FRAM, PRAM, etc.

Notwithstanding the abundance of the perspective kinds of the storage devices, their share in the market does not exceed 0,5 %. This is explained by the fact that development and manufacture of the new kinds of the storage devices demands enormous money. In this connection in the immediate future we can hardly expect essential changes in the sector of innovations of the market of the storage devices. The dominating role in the market of the storage devices will still be played by Flash and DRAM memories.

References

1. Bohr M., Mistry K. Intel Revolutionary 22 nm transistors Technology, *Intel Technology Journal Q4*, May 2011, pp. 2—27.
2. Lee S. H., Kim D. S. A Bottom-gate depletion-mode Nanowire field effect transistors (NWFET) model including a Schottky diode model, *Journal of Korean Physical Society*, september 2009, vol. 55, no. 3, pp. 1162—1166.
3. Silin H. O., Demis E. C., Aguilera R. Atomic switch networks-nanoarchitectonic design of a complex system for natural computing, *Nanotechnology*, apr. 2015, no. 25, pp. 11.
4. Nemati F. A novel thyristor-based SRAM cell (T-RAM) for high-speed, low-voltage, giga-scale memories, *Proc of IEEE IEDM Tech. Dig.*, 1999, pp. 283—286.
5. Okhonin S., Fazan P., Jones M. E. Zero capacitor embedded memory technology for system on chip, *Proc of IEEE MTDT*, aug. 2005, pp. 21—26.
6. Arimoto K., Morishito F., Hayashi I. High-density scalable twin transistors RAM (TTRAM) with verify control for SOI platform memory, *Solid-State Circuits, IEEE Journal*, nov. 2012 Vol. 42, Issue 11, pp. 2611—2619.
7. Bohac C. Comparing technologies: MRAM vs. FRAM, *Everspin Technologies*, march 2013, pp. 1—6.
8. Zhang K. *Embedded memories for Nano-Scale VLSIs*, Springer & Business Media, 21 Apr. 2009, pp. 279—328.
9. Burr G. W., Breitwisch M. J., Francesschini M. Phase change memory technology, *Journal of Science and Technology B*, apr. 2010, vol. 28, Is. 2, pp. 223—262.
10. Prince B. *Vertical 3D Memory Technologies.*, UK Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2014, vol. 1, pp. 4—31.
11. Kim J., Hong A. J., Kim S. M. A stacked memory device on logic 3D technology for ultra-density data storage, *Nanotechnology*, may 2011, vol. 22, pp. 1—7.
12. Lue H. T., Hsu T. H., Hsiao Y. H. A highly scalable 8-layer 3D Vertical-Gate (VG) TFT NAND flash using junction-free buried Channel BE-SONOS device, *Proc. of VLSI Symposia on Technology*, 2010, pp. 131—132.

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

APPLICATION OF MNST

УДК 616-072

В. С. Осипович¹, канд. техн. наук, доцент, seth22@yandex.ru;

К. Д. Яшин¹, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой, yashin@bsuir.by;

В. П. Шонтя², профессор, зав. кафедрой, **А. П. Серяков**², магистр технических наук

¹ Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь

² Технический университет Молдовы, Кишинев, Республика Молдова

МЭМС ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ВОЗБУДИТЕЛЕЙ ЗАБОЛЕВАНИЙ

Поступила в редакцию 20.04.2015 г.

Разработана структурная схема прибора для экспресс-диагностики в домашних условиях заболеваний человека. Прибор включает: лазер для возбуждения флуоресценции маркеров (наночастиц); фотодетектор для регистрации уровня интенсивности флуоресценции наночастиц; микроконтроллер; пористую мембрану для закрепления анализируемых агентов; микронасос для прокачки анализируемой жидкости через мембрану; микроклапаны для управления подачей анализируемой жидкости на пористую мембрану; светофильтр 560 нм для вырезания из общего спектра света, возникающего в результате флуоресценции биологических компонентов.

Ключевые слова: консольный биодатчик, микробалка, индикация возбудителей заболеваний, метаболиты, биомаркеры, аптамеры, экспресс-диагностика

Введение

Микродатчики применяют в газовом и биохимическом анализах, медицинских измерениях, при определении подлинности продукта. Основным здесь является ультрачувствительный микромеханический способ с использованием консольных матриц. Одной из актуальных задач в биомедицинской диагностике является обеспечение высокой чувствительности и избирательности анализов. В качестве веществ для метки антигенов используют органические флуорохромы. Параллельно с развитием флуоресцентных меток и методик иммунологического анализа происходит переход на лазерные источники возбуждения и оптоволоконные системы передачи сигнала. Внедрение этих элементов в сочетании с компьютерной обработкой информации открывает широкие перспективы для создания компактных регистрирующих устройств. Разработка физико-технологических основ создания прибора экспресс-индикации возбудителей заболеваний, безусловно, актуальна для биотехнических и особенно диагностических целей.

Цель настоящей работы — анализ патентной и научно-технической информации о работе и применении МЭМС-биодатчиков, а также разработка

структурной схемы и конструкции прибора экспресс-индикации микроорганизмов и возбудителей заболеваний человека в исследуемом объеме анализируемой жидкости для предварительной медицинской диагностики в домашних условиях. Основные результаты работы связаны с разработкой структурной, функциональной и электрической принципиальной схем прибора. Микробиодатчики применимы для диагностирования и измерения развития болезни или эффектов лечения.

Индикация возбудителей заболеваний человека с использованием микроэлектромеханических устройств и систем

Консоли представляют собой прямоугольные микрополоски кремния толщиной менее 1 мкм (рис. 1). Адсорбция молекул различных веществ (за счет взаимодействия этих молекул с молекулами рецептора) приводит к изгибу микроконсоли (МК) вследствие поверхностного напряжения. Изгиб регистрируется отклонением лазерного луча. Консольные биодатчики (КБД) используют в различных средах: вакууме, газах или жидкостях. Главные преимущества таких КБД — их небольшой размер, быстрое время отклика, высокая чувствительность, преобразование сигналов без индикаторных меток [1].

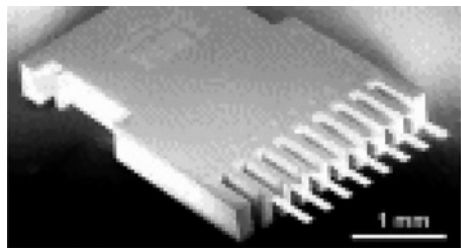


Рис. 1. Консольная матрица [1]

Fig. 1. Console matrix [1]

Авторы работы [1] используют матрицу из восьми МК. Каждая МК покрыта чувствительным слоем для обеспечения высокоспецифического молекулярного взаимодействия. Система может фиксировать одновременно несколько картин для различных анализов. Для этого каждую из МК покрывают разными чувствительными слоями. В газообразной среде конструкция используется как искусственный нос для анализа быстроиспаряющихся паров и запахов.

Датчиками управляют в статическом, динамическом и тепловом режимах. В статическом режиме происходит механический отклик МК после адсорбции молекул из анализируемой среды. Поверхностное напряжение приводит к изгибу МК с отклонением ~ 10 нм [1]. В динамическом режиме МК колеблется в частоте резонанса с использованием пьезоэлектрического привода. Для определения молекул аналита МК покрыта специальным чувствительным молекулярным слоем. После адсорбции определяемого вещества частота резонанса МК уменьшается [1]. Изменение частоты резонанса в 1 Гц соответствует изменению массы адсорбированного на МК аналита примерно в 1 пг. В тепловом режиме различие в коэффициентах линейного расширения консольного материала (например, монокристаллический кремний и металл толщиной 100 нм) вызывает изгиб консольного датчика (биметаллической структуры). Температурные изменения 5...10 К вызывают отклонение МК в несколько нанометров, которые могут быть измерены [1].

Имеется необходимость обнаружения и идентификации химических и биологических веществ, таких как нуклеиновые кислоты, белки, наркотики, взрывчатые вещества, токсины, фармацевтические препараты, канцерогенные вещества, яды, аллергены и инфицированные клетки [2]. Проведение клинических исследований требует специальной подготовки лаборантов и использования специального оборудования. Существующие лабораторные методы анализа используют газовую жидкостную хроматографию и/или масс-спектроскопию;

они требуют много времени и являются дорогостоящими. Поэтому КБД, способные точно и эффективно обнаружить/показать химические и биологические вещества, обеспечат существенную выгоду в стоимости и времени анализа.

Разработан метод преобразования биомолекулярных реакций в наномеханическое действие с использованием взаимной связи между двумя явлениями [2]. С одной стороны, это изменение поверхностного напряжения, возникающего вследствие соединения ДНК и закрепления рецепторо-лиганд на МК, с другой стороны, это наноразмерное отклонение МК. Молекулярная сила, являющаяся результатом адсорбции молекул, вызывает поверхностное напряжение. МК сгибается в результате неспецифической адсорбции белков [2]. Метод не требует применения флуоресцентных меток, оптического возбуждения и относится к методам связывания лигандов в жидкой среде. В этих случаях используется прочная МК. Это означает, что либо МК имеет большой размер, либо материал, из которого она изготовлена, имеет относительно большой модуль упругости Юнга. Большие МК могут ухудшать чувствительность при обнаружении малых количеств целевых веществ. Кроме того, такая МК зачастую требует длительного воздействия аналита для накопления поддающегося обнаружению количества этого вещества.

Применение биодатчиков для диагноза и лечения болезни описано в работе [3]. Способ позволяет определить состав вещества в жидкостях, включая кровь, и продукты дыхания. Описаны биодатчики, которые подражают естественно происходящим реакциям в клетках (например, в РНК-цепи нуклеотидов). Биодатчики используют в комбинации с сигнальными агентами, чтобы обеспечить показ на экране биомаркеров, присутствующих в выдохнутом воздухе. В качестве биодатчиков используют аптамеры, как наиболее эффективные определители единичных молекул [3]. Они обладают более высокой специфичностью и надежностью, чем основанные на антителах диагностические технологии. Аптамеры способны измерить такие концентрации липида, которые на несколько порядков ниже, чем при использовании диагностических тестов с антителами. Для аптамеров это одна детектируемая молекула на триллион или даже секстиллион других молекул [3]. В отличие от антител, производство которых основано на животных и/или культуральных технологиях, производство аптамеров происходит в пробирке. Синтез аптамеров дешев [3], их получают реакцией с участием полимеразы. Далее, как только последовательность цепочки известна, они могут быть синтезированы из отдельных естественных и/или синтетических

нуклеотидов. Аптамеры устойчивы к длительному хранению при комнатной температуре.

Биомаркер представляет собой биохимическое вещество, у которого есть определенная специфическая молекулярная особенность. Это делает биомаркер применимым для диагностирования и измерения развития болезни или эффектов лечения. Метаболиты и биомаркеры, найденные в дыхании человека, включают определенные вещества (табл. 1). В работе [3] описан биологический метод анализа образцов (дыхание и кровь). Анализ заключается в обнаружении аналитов (биомаркеров) в физических жидкостях человека, имеющих отношение к различным жизненным условиям или болезням, таким как опьянение, рак, болезнь печени, почек или диабет.

Способ обнаружения молекулярной связи и/или идентификации целевых веществ путем мониторинга отклонений МК (рис. 2) с контролем обратной связи описан в работе [4]. В табл. 2 представлены методы обнаружения молекулярных связей. Группа 1 обеспечивает наиболее высокую селективность и чувствительность при идентификации биомолекулярных веществ [4].

Устройство и технология определения массы вещества, основанная на регистрации частот резонирующей МК, описаны в работе [5]. МК покрыта

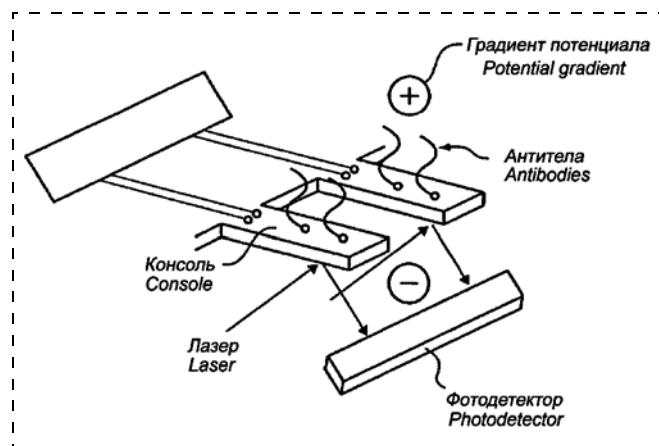


Рис. 2. Схема обнаружения молекулярной связи путем мониторинга отклонений консоли [4]

Fig. 2. Circuitry for detection of a molecular bond by monitoring of the console deviations [4]

фиксированным контрагентом, способным взаимодействовать с определяемой клеткой или молекулой. Определяется исходная частота резонанса МК, покрытой фиксированным контрагентом. В результате обработки раствором, который взаимодействует с контрагентом, масса МК возрастает. Регистрируется вторая частота резонанса. Разница в частотах дает основание заявить, что обнаружена целевая клетка или молекула. Частотные характеристики МК определяются оптическим методом с помощью отраженного света и двух фотодетекторов либо интерференционным методом с помощью одного фотодетектора.

В работе [5] описаны высокочувствительные КБД для определения химического или биологического вещества. Если ранее было достаточно измерять количество вещества порядка микрограмма, то сегодня наука и промышленность имеют потребность в обнаружении отдельной клетки, внутриклеточного элемента или вещества массой порядка 10^{-15} г. Например, в пищевой промышленности даже ничтожно малые количества некоторых токсинов быть могут вредными и опасными для людей. Пример — бактерия *Escherichia Coli* (*E. Coli*). Повышенное внимание СМИ усилило волнение потребителей к присутствию *E. Coli* в мясных продуктах, яблочном соке и побегах люцерны (корм для коров).

Система [5] включает источник света, МК и фотодиод. Один конец МК неподвижно закреплен, другой конец резонирует под действием внешней среды. Частота резонанса зависит от массы МК. Фотодиод генерирует сигнал. Отраженный от вершины МК свет является функцией частоты вибрации МК. Поверхность МК покрыта контрагентом для связывания с определенным анализируемым веществом. Осадившееся вещество увеличивает

Таблица 1

Метаболиты и биомаркеры, найденные в дыхании человека

Метаболиты и биомаркеры	Индикатор	Диагноз
Альдегид	Этанол	Опьянение
Ацетон	Соль аминокислоты	Диабет
Аммиак	Аминокислоты	Уремия и болезнь печени
Оксись углерода	Повышенный процент СО	Внутреннее загрязнение воздуха
Хлороформ	Галогенизированные вещества	Внутреннее загрязнение воздуха
Дихлорбензол	Галогенизированные вещества	Внутреннее загрязнение воздуха
Диэтиламин	Холин	Кишечный бактериальный рост
Водород	Газы кишечника	Нетерпимость к лактозе
Изопрен	Жирная кислота	Метаболическое напряжение
Метанэтиол	Метионит	Кишечный бактериальный рост
Метилэтилкетон	Жирная кислота	Внутреннее загрязнение воздуха
О-толуидин	Метаболит кациномы	Бронхогенная карцинома
Сульфиды пентана	Перокисленный липид	Инфаркт миокарда
Сероводород	Метаболизм	Периодонтальная болезнь

массу МК. Процессор соединен с фотодиодом, выполняет программу определения массы анализируемого вещества, удерживаемого связующим контрагентом. Длина МК 0,5...1000 мкм. МК разработана для обнаружения вещества, включающего патоген, микроорганизм, бактерию, вирус или некоторую группу из этого. Связывающий контрагент может включать в себя антитело, которое соединяется с такими объектами, как клетка, фрагмент клетки или ее элемент.

КБД для обнаружения газов и паров описаны в работе [6]. Покрытые специальными веществами, МК подвергаются химическому воздействию не-

сколько часов. Измерения проводят до момента появления потенциала Леннарда—Джонса (соседние молекулы отталкиваются, а на больших расстояниях притягиваются). Во многих случаях абсорбция молекул на поверхности МК может быть направлена в обратную сторону путем простого нагревания системы или помещения ее в вакуум.

Разработка прибора для определения концентрации наночастиц по интенсивности флуоресценции

Проведенные исследования [7, 8] позволили разработать и изготовить макетный образец прибора для экспресс-диагностики в домашних усло-

Таблица 2

Методы обнаружения молекулярных связей

№ п/п	Группа методов	Принцип работы	Модификации
1	Обнаружение химических связей (молекул) путем контроля за значениями отклонений МК. Фиксированное отклонение консоли соответствует определенному химическому взаимодействию (веществу)	Для обнаружения конкретных молекулярных связей определенные вещества прикрепляют к одной или нескольким МК. Наличие искомого вещества приводит к образованию химических связей (новых химических соединений) и к отклонениям МК; отклонения фиксирует блок регистрации	В микросистеме может быть использован источник уравновешивающей силы для приведения консоли в изначальное положение. Сила может быть магнитной, электрической или радиационной. Блок обнаружения и механизм, который генерирует уравновешивающую силу, соединены с блоком обработки и контроля информации. Компьютер регулирует обратные связи, поддерживающие консоль в фиксированном положении путем балансировки силы отклонения и уравновешивающей силы. Концентрация искоемых веществ в образце рассчитывается на основании значения уравновешивающей силы
2	Анализ на основе антител. Любое соединение, молекула или их группа, для которых создано антитело, могут быть обнаружены различными приемами иммунологического анализа (ELISA, вестерн-блоттинг и т.д.)	Искомое вещество (антиген) или антитело к искомому веществу присоединено к неподвижной опоре (предметному стеклу, стенке пробирки). Антитело к искомому веществу предварительно помечается флуоресцентной, ферментной или другой меткой. Таким способом может быть обнаружено присоединение антитела к искомому веществу (прямой иммуноферментный или иммунофлуоресцентный анализ)	Если антитело присоединено к опоре, то присоединение искомого вещества к нему может быть обнаружено с использованием еще одного меченного антитела (трехслойный анализ или непрямой иммунофлуоресцентный анализ). Анализ на основе антител может иногда показывать неприемлемо высокие уровни неверных позитивных и негативных результатов вследствие перекрестной реактивности антигенов с различными антителами, низкой антигенности искомого вещества (ведущей к низкой чувствительности анализа), неспецифической адсорбции антител к различным поверхностям и т.д. Метод эффективен при высоких концентрациях искомого вещества
3	Анализ на основе скрещивания олигонуклеотидов для обнаружения целевых олигонуклеотидов, информационных РНК, геномной ДНК и т.д.	Проба олигонуклеотида, которой помечено целевое вещество, скрещивается с образцом, который подозревается на содержание целевой нуклеиновой кислоты	Были разработаны ДНК-чипы, которые содержат сотни или даже тысячи индивидуальных олигонуклеотидных проб. Скрещивание целевой нуклеиновой кислоты и пробы олигонуклеотида может быть обнаружено при использовании флуоресцентных меток, радиоактивных меток и т.д. Существуют ограничения, связанные с чувствительностью и/или специфичностью анализа. Это связано с тем, что скрещивание нуклеиновой кислоты может произойти между последовательностями, которые в точности дополняют друг друга через неудачное скрещивание, ведущее к неверным позитивным результатам
4	Анализ активности энзимов (ферментов)	Определяют скорость, с которой энзимы катализируют ту или иную биохимическую реакцию. Она, в свою очередь, измеряется скоростью превращения субстрата или скоростью накопления продуктов реакции	Для определения ферментативной активности используют следующие методы. Химический — количественное определение субстрата или продуктов с помощью химических реагентов. Спектрофотометрический — измерение скорости ферментативной реакции по изменению поглощения субстрата при характеристической длине волны. Манометрический — определение количества газа, выделяющегося в процессе реакции. Поляриметрический — фиксируется изменение оптического вращения. Хроматографический — количественное определение субстрата или продуктов с помощью различных видов хроматографии

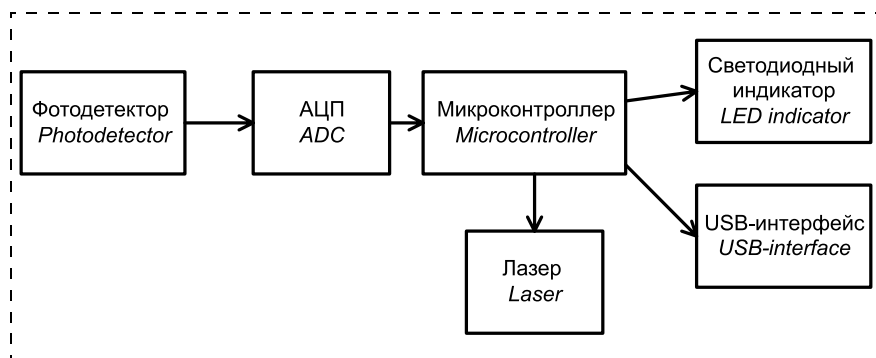


Рис. 3. Структурная схема прибора для определения концентрации наночастиц по интенсивности флуоресценции

Fig. 3. Circuitry of the device for determination of the concentration of nanoparticles by the intensity of the fluorescence

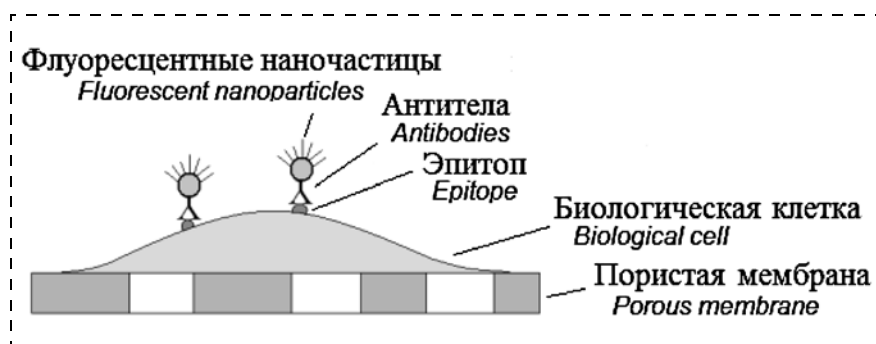


Рис. 4. Схема детектирования клеток, маркированных наночастицами

Fig. 4. Circuitry for detection of the cells marked by nanoparticles

виях заболеваний человека. Прибор включает: лазер для возбуждения флуоресценции маркеров (наночастиц); фотодетектор для регистрации уровня интенсивности флуоресценции наночастиц; микроконтроллер.

Микроконтроллер используется для расчета концентрации анализируемого вещества по интенсивности флуоресценции, для калибровки прибора, для расчета концентрации наночастиц и/или биологического материала и для обеспечения связи с персональным компьютером (рис. 3).

Пористая мембрана (рис. 4) пропускает через пор раствор с биологическими компонентами и задерживает искомый детектируемый агент (например, клетку). На этом биологическом агенте (на его эпитопах) адсорбируются наночастицы, связанные с антителами к детектируемому биологическому агенту. Возбуждение флуоресценции наночастиц осуществляется полупроводниковым лазером. Длина волны лазера и длина волны флуоресценции наночастиц различаются. Между фотодетектором и пористой мембраной (рис. 5) размещается светофильтр, пропускающий свет с длиной волны, излучаемой наночастицами. Это позволяет вырезать из общего спектра свет, возникающий в результате

флуоресценции биологических компонентов. Интенсивность света, регистрируемого фотодетектором, зависит от количества наночастиц на поверхности пористой мембраны. Последнее, в свою очередь, будет зависеть от количества детектируемых биологических компонентов.

На основании структурной схемы разработана схема электрическая принципиальная прибора. Она включает USB-мост CP2102, микроконтроллер Pic16f887 и фотоприемник TSL257. Фотоприемник обеспечивает регистрацию изменения интенсивности света $2,93 \text{ мкВт/см}^2$ на каждые 2 В при длине волны 560 нм.

Разработаны алгоритм работы программного обеспечения микроконтроллера и алгоритм обработки прерываний (рис. 6 и 7). На основании блок-схем алгоритмов разработано программное обеспечение с использованием языка программирования C, среда разработки MP LAB.

Апробация макетного образца прибора для определения концентрации наночастиц по интенсивности флуоресценции осуществлена в Институте химии новых материалов (г. Минск).

Для апробации макетного образца прибора была собрана экспериментальная установка с флуоресцентным микроскопом *Planar MVI* (Беларусь). В слот для цифрового фотоаппарата был помещен фотодетектор. Флуоресцентное излучение наночастиц CdSe/ZnS проходило через светофильтр 560 нм. На предметном столе микроскопа размещали стекла с каплями коллоидного раствора наночастиц. Для апроба-

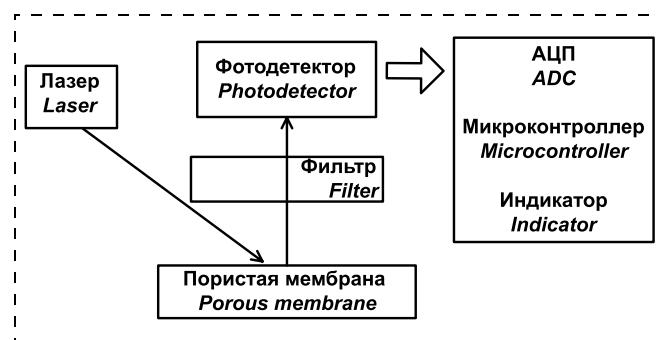


Рис. 5. Схема прибора для определения концентрации наночастиц

Fig. 5. Circuitry of the device for determination of the concentration of nanoparticles

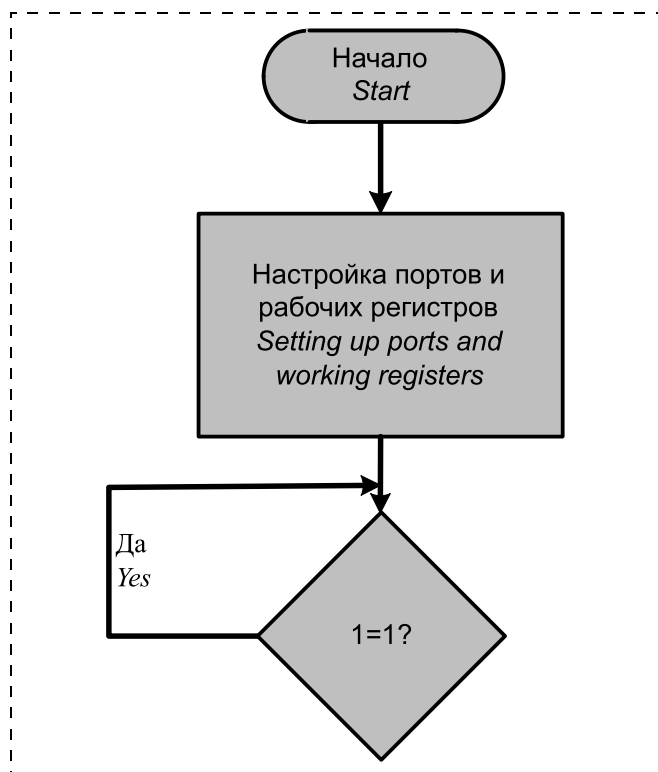


Рис. 6. Блок-схема алгоритма работы программного обеспечения микроконтроллера

Fig. 6. Unit circuitry of the algorithm for operation of the software of the microcontroller

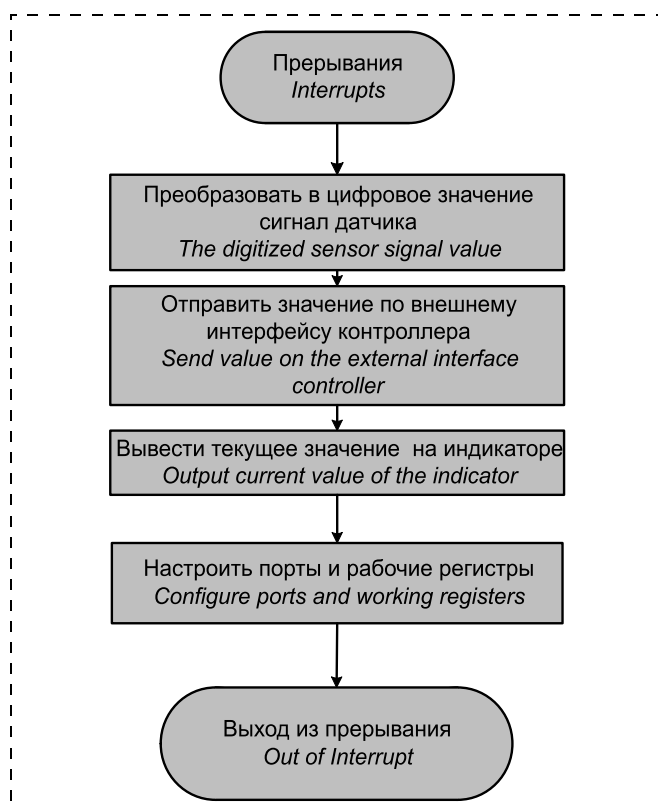


Рис. 7. Блок-схема алгоритма обработки прерывания программного обеспечения микроконтроллера

Fig. 7. Unit circuitry of the algorithm for processing of an interruption of the software for the microcontroller

Таблица 3

Результаты апробации макетного образца прибора

Table 3

Results of approbation of the model sample of the device

№ образца <i>Numbers of the samples</i>	Концентрация наночастиц, мг/мл <i>Concentration of the nanoparticles, mg/ml</i>	Показания прибора, усл. ед. <i>Indicators of the device, standard units</i>
1	0,5	854
2	0,125	218
3	0,03	52
4	0,008	15
5	0,002	4

ции использовали пять образцов. Результаты измерений интенсивности флуоресцентного излучения наночастиц CdSe/ZnS с использованием изготовленного макетного образца прибора приведены в табл. 3.

Результаты апробации макетного образца прибора для определения концентрации наночастиц по интенсивности флуоресценции показали его работоспособность, а также необходимость и возможность дальнейшей научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы по разработке конструкции, калибровке и изготовлению МЭМС-версии прибора для экспресс-индикации заболеваний человека.

Перспективы развития технологии

Разработанный технический подход может быть применен для изготовления МЭМС-устройства экспресс-диагностики заболеваний человека. В этом случае в структурную схему микроустройства необходимо добавить микронасос для прокачивания жидкости через пористую мембрану и микроклапаны для управления подачей жидкости (анализируемая жидкость или жидкость с антителами) на пористую мембрану. Проведение предварительных анализов в домашних условиях позволяет ускорить процесс борьбы с заболеванием и уменьшить количество анализов, проводимых в клинических лабораториях. Примером анализа в домашних условиях является устройство для определения инсулина в крови для людей с сахарным диабетом. Российские ученые разработали экспресс-тест для диагностики инсульта [9]. Однако таких примеров очень мало. Проведение клинической диагностики требует дорогостоящего оборудования и специалистов высокой квалификации. Постоянно возникает потребность в создании новых методик и устройств для проведения быстрой экспресс-диагностики в домашних условиях, поскольку многие современные методики иммуноанализа достаточно хорошо отработаны [10].

Заключение

Разработана структурная схема прибора экспресс-индикации возбудителей заболеваний человека. Разработаны функциональная и электрическая принципиальная схемы прибора экспресс-индикации возбудителей заболеваний. Проведено моделирование работы прибора с применением систем автоматического проектирования. Изготовлен экспериментальный образец прибора экспресс-индикации возбудителей заболеваний человека в домашних условиях.

Список литературы

1. Lang H. P., Hegner M., Gerber Ch. Cantilever array sensors // Materialstoday. 2005. Vol. 4. P. 30–36.
2. Fritz J., Baller M. K., Lang H. P., et al. Translating biomolecular recognition into nanomechanics // Science. 2000. Vol. 288. P. 316–318.
3. Pat. 20060160134 USA G01N 33/53. Novel application of biosensors for diagnosis and treatment of disease. / Melker R. J., Dennis J. M., Martin Ch. N., Stewart J. D.; Saliwanchik Lloid and Saliwanchik a Professional Association. Appl. № 296757; 7.12.2005; pub. 20.06.2006.

4. Pat. 20050244820 USA C12Q 1/70; C12Q 1/68; C12Q 1/04. Detecting molecular binding by monitoring feedback controlled cantilever deflections / Su X., Chan S., Koo T.-W., Yamakawa M. Berlin A. A.; Intel Corporation. Appl. N 11/111, 308; 20.04.2005; pub. 3.11.2006.
5. Pat. 0223171 USA C12M 1/34. High Sensitivity mechanical resonant sensor / Craighead H. G., Ilic B., Czaplewski D. A., Hall R. H.; Cornell Research Foundation, Inc. Appl. N 11/343,488; 31.01.2006; pub. 5.10.2006.
6. Lang H. P., Berger R., Battiston F., Ramseyer J.-P. et al. A chemical sensor based on a micromechanical cantilever array for the identification of gases and vapors // Applied Physics. 1998. Vol. 66. P. 61–64.
7. Osipovich V. S., Yashin K. D., Terpinskaya T. I. et al. Photostability of CdS-based nanocrystalline structures used to visualize biological tissues // Journal of Applied Spectroscopy. 2012. Vol. 80. N. 1. P. 93–98.
8. Яшин К. Д., Терпинская Т. И., Осипович В. С. и др. Технология создания медицинской нанобиоинформационной диагностической системы на полупроводниковых нанокристаллах // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 4 (141). С. 11–14.
9. Есенбаева Г. Т., Баширова Т. П., Кадырова И. А. Экспресс-методика прогнозирования вероятности возникновения инсульта у пациентов // Фундаментальные исследования. 2013. № 5–1. С. 72–74.
10. Наноструктуры в биомедицине / под ред. К. Гонсалвес, К. Хальберштадт, К. Лоренсин, Л. Наир; пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 519 с.

V. S. Osipovich¹, Associate Professor,, seth22@yandex.ru,

K. D. Yashin¹, Associate Professor, Head of the Department, yashin@bsuir.by,

V. P. Sontea², Professor, Head of the Department, A. P. Sereakov², Master of Technical Sciences

¹ Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

² Technical University of Moldova, Chisinau, Republic of Moldova

MEMS for Pathogens Diagnostic

A concept was developed of a device for express diagnostics of human diseases in home conditions. The device consists of a laser for excitation of the fluorescence of markers (nanoparticles); a photodetector for recording of the level of the intensity of the nanoparticles' fluorescence; a porous membrane for fixing of the analyzed agents; a micropump for pumping of the analyzed liquid through the membrane; microvalves for control of the supply of the analyzed liquid on the porous membrane; a 560 nm light filter for separation of the light resulting from the fluorescence of the biological components from the total spectrum. It would be expedient to use the proposed concept for development and production of the microelectromechanical devices for the express diagnostics of human diseases.

Keywords: cantilever biosensor, micro-beam, indication of pathogens, metabolites, biomarktrs. aptamers, express diagnostics

Introduction

Microsensors are applied in the gas and biochemical analysis, medical measurements, and for determination of the authenticity of products. The ultrasensitive micromechanical method with the use of the console matrixes is the basic method. One of the topical problems of the biomedical diagnostics is to ensure high sensitivity and selectivity of the analyses. At that, the organic fluorochromes are used as antigene markers. In parallel with the development of the fluorescent markers and techniques of immunological analysis there is a transition to the laser sources of excitation and fibre-optical

systems of signal transmission. Their introduction in combination with computer data processing opens prospects for development of compact recording devices. Development of the physicotechnological bases for a device for express indication of the pathogens is topical for the biotechnical and diagnostic purposes.

The aim of the work is analysis of information concerning application of MEMS biosensors, development of the operating principle and design of the device for express indication of microorganisms and pathogens of human diseases in the investigated volume of the analyzed HquidTor preliminary diagnostics in home con-

ditions. The basic results of the work are connected with development of the structural, functional and electric circuitry of the instrument. The microsensors are applicable for diagnostics and development of illnesses or effects of treatment.

Indication of the pathogens of human diseases with the use of microelectromechanics devices and systems

Microconsoles (MC) are rectangular microstrips of silicon with thickness less than 1 micrometer (fig. 1). Adsorption of the molecules of various substances (due to their interaction with the receptor molecules) results in a bend of MC owing to the surface stress. The bend is recorded by a deviation of a laser beam. The console biosensors (CBS) are used in vacuum, gases or liquids. Their main advantages are their small size, quick response time, high sensitivity, and transformation of signals without display markers [1].

The authors [1] use a matrix of eight MC. Every MC is covered with a sensitive layer for a highly specific molecular interaction. The system can record simultaneously several pictures for various analyses. Each of MC is covered with different sensitive layers. In a gaseous environment the design is used as an artificial nose for analysis of the quickly evaporating vapors and smells.

The sensors are controlled in the static, dynamic and thermal modes. In a static mode there is mechanical response of MC after adsorption of the molecules from the analyzed environment. Surface stress leads to a bend of MC with a deviation of ≈ 10 nm. In a dynamic mode MC fluctuates in the resonance frequency with the use of a piezoelectric drive. For determination of an analit MC is covered with a sensitive molecular layer. After adsorption of the determined substance the resonance frequency of MC decreases. Its change of 1 Hz corresponds to a change of about 1 pg of the mass of the analit adsorbed on MC. In the thermal mode the difference in the factors of linear expansion of the console material (for example, monocrystal silicon and metal with thickness of 100 nm) causes a bend of a sensor (of the bimetallic structure). Temperature changes of 5...10 K cause deviation in MC of several nanometers, which can be measured [1].

There is a necessity of detection and identification of the chemical and biological substances, such as nucleic acids, proteins, drugs, explosives and cancerogenic substances, toxins, pharmaceutical preparations, poisons, allergens and the infected cells [2]. Clinical researches demand special preparation of the laboratorians and use of special equipment. The existing methods of analysis use gas and liquid chromatography and/or mass spectroscopy; they demand a lot of time and money. Therefore CBS, which can effectively detect/demonstrate chemical and biological substances, will ensure essential benefit in costs and analysis time.

A method was developed for transformation of the biomolecular reactions into a nanomechanical action with the use of the interconnection between the two phenomena [2]. This change of the surface stress is due to connection of DNA and fastening of the ligand receptors on MC and a nanosize deviation of MC. The molecular force, resulting from adsorption of the molecules, causes a surface stress. MC is bent due to a non-specific adsorption of the proteins. The method does not demand fluorescent markers and optical excitation, and belongs to the methods of ligand linkage in a liquid environment. A strong MC is used. That means, that MC has a big size or the material, of which it is made, has higher Young modulus. Bigger MC can worsen sensitivity to detection of small quantities. Besides, such MC demands long influence of an analit for accumulation of the quantity of the substance allowing its detection.

Application of biosensors for diagnostics and treatment of diseases is described in [3]. The method allows us to determine composition of substances in liquids, including blood, and breathing products. The biosensors are described, which imitate naturally the reactions in cells (in the RNA chain of nucleotides). Biosensors are used in combination with signal agents in order to ensure display on the screen of the biomarkers, which are present in the exhaled air. As biosensors aptamers are used as effective determinants of individual molecules. They have higher specificity, than the diagnostic technologies based on antibodies. Aptamers can meas-

Table 1
Metabolites and biomarkers found in human breath

Metabolites and biomarkers	Indicator	Diagnosis
Aldehyde	Ethanol	Intoxication
Acetone	Amino acid salt	Diabetes
Ammonia	Amino acids	Uraemia and illness of liver
Carbon oxide	Raised percent of CO	Internal air pollution
Chloroform	Halogenated substances	Internal air pollution
Dichlorobenzene	Halogenated substances	Internal air pollution
Diethylamine	Choline	Intestinal bacterial growth
Hydrogen	Gases of intestines	Intolerance to lactose
Isoprene	Fat acid	Metabolic tension
Methane etiol	Metionit	Intestinal bacterial growth
Methyl ethyl ketone	Fat acid	Internal air pollution
O-toludin	Metabolite of carcinoma	Bronchogenic carcinoma
Sulphides of pentane	Peroxidated lipid	Myocardium heart attack
Hydrogen sulphide	Metabolism	Periodontal illness

ure such concentrations of lipid, which are lower by several orders than in diagnostic tests with antibodies. For aptamers it is one detected molecule per billion or even sextillion of other molecules. Unlike the antibodies, the production of which is based on animal and/or cultural technologies, the production of aptamers takes place in a test tube. Synthesis of aptamers is inexpensive, they are obtained due to reaction with participation of polymerase. When the sequence of a chain is known, they can be synthesised from separate natural and/or synthetic nucleotides. Aptamers can be stored at a room temperature.

A biomarker is a biochemical substance, which has a specific molecular feature. It makes it applicable for diagnosing and measurement of development of an ill-

ness or the effects of treatment. Metabolites and biomarkers found in human breath include certain substances (table 1). In [3] a biological method of analysis of the samples (breath and blood) is described. The analysis consists in detection of analytes (biomarkers) in the physical liquids of persons, related to various vital conditions or illnesses: intoxication, cancer, liver and kidneys illnesses or diabetes.

The method for detection of the molecular bonds and/or identification of the target substances by monitoring of MC deviations with a feedback control is described in [4]. Table 2 presents the methods for detection of the molecular bonds. Group 1 ensures the highest selectivity and sensitivity in identification of the biomolecular substances [4].

Methods for detection of the molecular bonds

Table 2

№	Group of methods	Principle of operation	Modifications
1	Detection of chemical bonds (molecules) by the method of control over the values of MC deviations. The fixed deviation of the console corresponds to a certain chemical interaction (substance)	For detection of the molecular bonds certain substances are attached to one or several MC. Presence of the required substance leads to formation of the chemical bonds (new chemical compounds) and to MC deviations; the deviations are recorded by the recording unit	A microsystem may employ a source of a counterbalancing force for returning of the console in the initial position. The force can be magnetic, electric or radiative. The unit for detection and the mechanism, which generates the counterbalancing force, are connected with the unit for information processing and control. A computer regulates the feedback supporting the console in a fixed position by balancing of the force of deviation and the counterbalancing force. The concentrations of the substances in a sample is calculated on the basis of the counterbalancing force
2	Analysis on the basis of antibodies. The compound, molecule or their group for which the antibody was created, can be detected by the methods of immunological analysis (ELISA, western-blotting, etc.)	The required substance (antigene) or antibody to the required substance is attached to the fixed support (subject glass, test tube wall). The antibody is preliminary marked with a fluorescent, fermental or other label. In such a way one can detect connection of an antibody to the required substance (direct immune-enzyme analysis or fluoroimmunoassay)	If the antibody is attached to the support, then connection of the required substance to it can be revealed with the use of one more marked antibody (a three-layer analysis or indirect fluoroimmunoassay). An analysis on the basis of antibodies can sometimes show unacceptably high levels of incorrect positive and negative results owing to a cross reactance of the antigenes with various antibodies, low antigenicity of the required substance (leading to low sensitivity of the analysis), nonspecific adsorption of the antibodies to various surfaces, etc. The method is effective with high concentrations of the required substance
3	Analysis on the basis of crossing of the oligonucleotides for detection of the target oligonucleotides, information RNA, genomic DNA, etc.	A sample of oligonucleotide, by which the target substance had been marked, is crossed with the sample, suspected for the content of the target nucleic acid	DNA chips were developed, which contain hundreds or thousands of individual oligonucleotide samples. Crossing of the target nucleic acid and a sample of oligonucleotide can be detected with the use of the fluorescent and radioactive marks, etc. There are restrictions connected with the sensitivity and/or specificity of the analysis. This is connected with the fact that crossing of the nucleic acid can be possible between the sequences, which exactly supplement each other through an unsuccessful crossing conducting to incorrect positive results
4	Analysis of the activity of the enzymes	The speed is determined, with which the enzymes catalyze this or that biochemical reaction. It, in turn, is measured by the speed of transformation of a substratum or the speed of accumulation of the products of reaction	For determination of the enzymatic activity the following methods are used. Chemical method — a quantitative determination of a substratum or products by means of chemical reagents. Spectrophotometric method — measurement of the speed of the enzymatic reactions by the change of absorption of a substratum at a characteristic wavelength. Manometrical method — determination of the quantity of the gas escaping in the course of a reaction. Polarimetric method — the change in the optical rotation is recorded. Chromatographic method — determination of a substratum or products by means of various kinds of chromatography

The device and technology for determination of the weight of a substance based on recording of the frequencies of the resonating MC are described in [5]. MC is covered with a fixed counteragent, capable to interact with a cell or a molecule.

The initial frequency of the resonance is determined of the MC, covered with the fixed counteragent. As a result of processing by a solution, which interacts with the counteragent, the weight of MC increases. The second frequency of the resonance is recorded. The difference gives the reason to declare that the target cell or a molecule has been found. The frequency characteristics of MC are determined optically by means of the reflected light and two photodetectors, or by means of the interference method with the help of one photodetector.

In [5] there are descriptions of high-sensitivity CBS for determination of a chemical or biological substance. If earlier it was enough to measure the quantity of a substance of about a microgram, today science and industry need detection of a separate cell, an endocellular element or a substance with weight of about 10^{-5} g. For example, in the food processing industry even insignificantly small quantities of toxins can be dangerous for people. For example — *Escherichia Coli* (*E. Coli*) bacterium. Special attention of the mass-media alarmed the consumers about the presence of *E. Coli* in meat products, apple juice and lucerne (forage for cows).

The system [5] includes a light source, MC and a photo diode. One end of MC is motionlessly fixed, the other end resounds under the influence of the environment. The resonance frequency depends on the weight of MC. The photo diode generates a signal. The light reflected from the top of MC is the function of the frequency of MC vibration. The surface of MC is covered with a counteragent for its binding with a certain analyzed substance. The deposited substance increases the weight of MC. The processor is connected to the photo diode and carries out the program of determination of the weight of the analyzed substance kept by the binding counterpart. The length of MC is 0,5...1000 μm . MC was developed for detection of substances including pathogens, microorganisms, bacteria, viruses or their certain groups. The binding counteragent may include an antibody, which is connected with such objects as cells, their fragments or elements.

CBS for detection of gases and vapors are described in [6]. Covered with special substances MC is exposed to a chemical influence during several hours. Measurements were done before occurrence of Lennard-Jones potential (the neighbouring molecules are pushed off from each other, and at big distances they are drawn to each other). In many cases the absorption of the molecules on the surface of MC may be oriented in the opposite direction by simple heating of the system or its placing in vacuum.

Development of a device for determination of the concentration of nanoparticles by the intensity of the fluorescence

Researches [7, 8] allowed us to develop and manufacture a model sample of the device for the express diagnostics of human diseases in home conditions. The device includes: a laser for excitation of the fluorescence of the markers (nanoparticles); a photodetector for recording of the level of the intensity of their fluorescence; and a microcontroller.

The microcontroller is used for calculation of the concentration of the analyzed substance by the intensity of the fluorescence; for device calibration; for calculation of the concentration of the nanoparticles and/or biological material and keeping of connection with a personal computer (fig. 3).

The porous membrane (fig. 4) lets through a solution with biological components and detains the detected agent (for example, a cell). On this agent (on the epitopes) the nanoparticles are adsorbed: connected by the antibodies to the detected biological agent. Excitation of the fluorescence of the nanoparticles is carried out by a semi-conductor laser. The wavelength of the laser and the wavelength of the fluorescence of the nanoparticles differ. Between the photodetector and the porous membrane (fig. 5) there is an optical filter, which lets the light with the same wavelength as radiated by the nanoparticles pass through. This allows us to separate the light resulting from the fluorescence of the biological components from the total spectrum. The intensity of the light recorded by the photodetector depends on the quantity of the nanoparticles on the surface of the porous membrane. The latter, in turn will depend on the quantity of the detected biological components.

The basic electric circuitry of the device was developed. It includes CP2102 USB bridge, Pico6f887 microcontroller and TSL257 photodetector, which ensures recording of the change of the intensity of light of 2,93 mcW/cm^2 per each 2 V at the wavelength of 560 nm.

Algorithms were developed for operation of the software for the microcontroller and processing of interruptions (fig. 6 and 7). On the basis of the unit circuitry of the algorithms a software was developed with the use of C language and in MP LAB environment.

Approbation of the model sample of the device for determination of the concentrations of nanoparticles by the fluorescence was carried out at the Institute of Chemistry of New Materials (Minsk). For this purpose an experimental installation was assembled with Planar MV1 fluorescent microscope (Belarus). A photodetector was placed in the slot for a digital camera. The fluorescent radiation of CdSe/ZnS nanoparticles passed through an optical filter of 560 nm. On a subject table for a microscope the glasses were placed with drops of

a colloidal solution of nanoparticles. Five samples were used for approbation. The results of the measurements of the intensity of the fluorescent radiation of CdSe/ZnS nanoparticles with the use of the manufactured model sample of the device are presented in table 3.

The results of determination of the concentration of nanoparticles by the intensity of the fluorescence demonstrated the operability of the device, and also necessity and possibility of the further research and development of the device, its calibration and manufacture of a MEMS version of the device for an express indication of human diseases.

Prospects for development of the technology

The developed approach can be applied for manufacture of the MEMS device of express diagnostics of human diseases. The microdevice unit circuitry should be complemented with a micropump for pumping of liquids through the porous membrane, and microvalves for control of the supply of the analyzed liquid or a liquid with antibodies to the porous membrane. Preliminary analyses in home conditions will allow us to accelerate the struggle against the diseases and reduce the quantity of analyses in the clinical laboratories. An example of the analysis in home conditions is the device for determination of insulin in the blood of people suffering from diabetes. The Russian scientists have developed an express test for diagnostics of a stroke [9]. However, such examples are very few. Clinical diagnostics demands expensive equipment and qualified professionals. There is a constant need for new techniques and devices for the express diagnostics in home conditions, because many modern methods of immunoassay are developed well enough [10].

Conclusion

Circuitry of a device for an express indication of the pathogens was developed, the functional and electric circuitry of a device for the express indication of the

pathogens. Modelling was done of operation of the device with application of the systems of computer-aided designing. An experimental sample of the device for the express indication of the pathogens in home conditions was manufactured.

References

1. Lang H., Hegner M., Gerber Ch. Cantilever array sensors, *Materialstoday*, 2005, vol. 4, pp. 30–36.
2. Fritz J., Baller M., Lang H., et al. Translating biomolecular recognition into nanomechanics, *Science*, 2000, vol. 288, pp. 316–318.
3. Pat. 20060160134 USA G01N 33/53. *Novel application of biosensors for diagnosis and treatment of disease*, Richard J. Melker, Dennis J. M., Martin Ch. N., Stewart J. D.; Saliwanchik Lloid and Saliwanchik a Professional Association — Appl. № 296757, 7.12.2005; pub. 20.06.2006.
4. Pat. 20050244820 USA C12Q 1/70; C12Q 1/68; C12Q 1/04. Detecting molecular binding by monitoring feedback controlled cantilever deflections, Su X., Chan S., Koo T.-W., Yamakawa M. Berlin A. A.; Intel Corporation — Appl. № 11/111,308, 20.04.2005; pub. 3.11.2006.
5. Pat. 0223171 USA C12M 1/34. High Sensitivity mechanical resonant sensor, Craighead H. G., Ilic B., Czaplowski D. A., Hall R. H.; Cornell Research Foundation, Inc. — Appl. № 11/343, 488, 31.01.2006; pub. 5.10.2006.
6. Lang H. P., Berger R., Battiston F., Ramseyer J.-P. et al. A chemical sensor based on a micromechanical cantilever array for the identification of gases and vapors, *Applied Physics*, 1998, vol. 66, pp. 61–64.
7. Osipovich V. S., Yashin K. D., Terpinskaya T. I., et al. Photostability of CdSe-based nanocrystalline structures used to visualize biological tissues, *Journal of Applied Spectroscopy*, 2012, vol. 80, no. 1, pp. 93–98.
8. Osipovich V. S., Yashin K. D., Terpinckaja T. I., et al. Tehnologija sozdaniya medicinskoj nanobioinformacionnoj diagnosticheskoy sistemy na poluprovodnikovyh nanokristallah, *Nano- i mikrosistemnaja tehnika*, 2012, no. 4 (141), pp. 11–14.
9. Esenbaeva G. T., Bashirova T. P., Kadyrova I. A. Jekspress-metodika prognozirovaniya verojatnosti vozniknoveniya insul'ta u pacientov, *Fundamental'nye issledovaniya*, 2013, vol. 5, no. 1, pp. 72–74.
10. *Nanostruktury v biomedicine* / pod red. K. Gonsalves, K. Hal'bershtadt, K. Lorensin, L. Nair; per. s angl., Moskow: BINOM. Laboratorija znaniy, 2013. 519 p.