TAIO- & MIKPOCICIEMIAA

№ 10(183) 💠 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. Релакция: Григорин-Рябова Е. В. Чугунова А. В. Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ _____Издается с 1999 г.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Смолин В. К. Нетермическая активация процессов на поверхности подложки в методах физического осаждения из газовой фазы 10

элементы мнст

Драгунов В. П., Доржиев В. Ю. Начальные условия и динамический pull-in-эффект в МЭМС с изменяющимся межэлектродным зазором . 31

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

© Издательство "Новые технологии", "Нано- и микросистемная техника", 2015

INTERDISCIPLINARY, SCIENTIFIC, TECHNIQUE AND PRODUCTION JOURNAL

Journal of NANOand MICROSYSTEM TECHNIQUE NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEHNIKA

ISSN 1813-8586

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 Saurov 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. Petrunin 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.microsistems.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

Nº 10

(183)

2015

SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

Abanin I. E. Selection of Active Layers for a Power Supply Device with p-n Junction Excited by β -Radiation 7

MICRO- AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

Dorofeyev R. Yu., Smirnov I. P., Zhukov A. A., Korpukhin A. S. Computational and Experimental Evaluation of Characteristics of the Microbeam Vibrating Electrostatic Field Transducer . . . 27

Материаловедческие и технологические основы MHCT Science of materials and technological basics of MNST

УДК 621.315

И. Е. Абанин, зам. директора, e-mail: aie@tcen.ru, НПК "Технологический центр", Россия, Москва

ВЫБОР АКТИВНЫХ СЛОЕВ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ С *p*—*n*-ПЕРЕХОΔОМ, ВОЗБУЖДАЕМЫМ β-ИЗЛУЧЕНИЕМ

Поступила в редакцию 08.06.2015

Разработана методика выбора рабочих слоев источников питания, стимулированных β -излучением, с учетом экспериментальных распределений β -электронов по энергиям. Выполненные расчеты показывают, что недостаточно использовать для вычислений только средние энергии β -электронов. Более точные результаты получаются при использовании спектрального распределения энергий электронов, вылетающих из β -источника. Токи, генерированные в p—n-nереходах электронами высоких энергий, ожидаются более высокими с использованием оптимальных слоев изотопа C^{14} по сравнению со слоями Ni⁶³.

Ключевые слова: β -вольтаический эффект, β -излучение, самопоглощение β -источника, изотоп C^{14} , изотоп Ni^{63} , источник питания

Введение

Источники в-излучения обладают высокой удельной плотностью энергии [1]. В связи с этим их выгодно применять для изготовления источников питания с длительным сроком эксплуатации. Так, например, на основе изотопа Ni⁶³ можно создать источники питания со сроком службы более 30 лет [2]. Более высоким коэффициентом полезного действия обладают источники питания, основанные на принципе прямого преобразования энергии. В этом случае β-электроны генерируют в полупроводнике электронно-дырочные пары, которые разделяются электрическим полем *p*-*n*-перехода или контактом металл — полупроводник [4-6]. В настоящее время в мире, и прежде всего в США, ведутся разработки подобных устройств на основе трития, Ni^{63} и Pm^{147} . Однако данные источники энергии имеют определенные недостатки, связанные с длительным сроком изготовления и высокой стоимостью изотопов. Высокое самопоглощение β-излучения Ni⁶³ приводит к необходимости создания данных источников в тонкопленочном виде непосредственно на структурах, превращающих энергию β-частиц в энергию электрического тока. Изотопы не всегда могут быть очищены, в них остаются примеси или загрязнения, вызывающие сопутствующее гамма-излучение. Такое излучение ограничивает применение Pm¹⁴⁷ в батареях.

На современном уровне в качестве потенциальных первичных источников энергии для миниатюрных атомных батарей рассматриваются чистые β -излучатели, в которых нет других видов излучения. Из их числа наиболее перспективными являются тритий и изотоп Ni⁶³, имеющий период полураспада 100 лет [2]. Однако большой период полураспада снижает активность источников. Поэтому одним из путей повышения удельной электрической мощности преобразователя является увеличение площади поверхности диодной структуры, покрытой источником β -излучения. Для этого используют квазитрехмерные пористые структуры, что усложняет технологию и увеличивает стоимость их производства.

В связи с этим остается актуальным поиск перспективных изотопов для β -источников питания. Одним из таких изотопов является C¹⁴. Частицы изотопа C¹⁴ обладают достаточно высокой энергией, а малая плотность снижает самопоглощение β -излучения. В настоящей работе сопоставляются источники питания, которые могут быть получены с использованием Ni⁶³ и C¹⁴. Анализируется возможность оптимизации активных слоев источников питания с *n*-*p*-переходами, возбуждаемыми β -излучением. Для расчета параметров активных слоев, как правило, используются средние значения энергии β-электронов. Такой подход недостаточно точен. В настоящей работе проводятся численные расчеты испускаемых при распаде электронов с использованием экспериментальных распределений.

1. Нормировка вспомогательных функций распределения

β-распад — самопроизвольное превращение ядер, сопровождающееся испусканием или поглощением электрона, а также антинейтрино или позитрона и нейтрино. Для работы источников питания с β-возбуждением используют распад с испусканием электрона и антинейтрино. Оба изучаемых изотопа — C^{14} и Ni⁶³ — распадаются по этой схеме. Например, C^{14} распадается по схеме:

$${}^{14}_{6}\mathrm{C} \rightarrow {}^{14}_{7}\mathrm{N} + \beta^{-} + \tilde{\nu} \,.$$

При каждом акте β-распада энергия случайным образом распределяется между β-частицей и антинейтрино, поэтому β-излучение имеет непрерывный энергетический спектр, данные которого приведены в табличной форме в справочнике [7]. Для дальнейших расчетов необходимо преобразование их в функцию вероятности появления β-электрона в единичном интервале энергии. Для этого используется метод моментов.

Момент M_n порядка n функции распределения f(v), вычисленный относительно начала координат, определяется интегралом:

$$M_n = \int v^n f(v) dv. \tag{1}$$

Интегрирование происходит по всей области изменения v. Моменты, вычисленные по этой формуле, называются начальными, т. е. взятыми относительно начала координат. Момент нулевого порядка — площадь фигуры, ограниченной функцией f(v) и осью абсцисс. Момент первого порядка определяет координату центра тяжести распределения:

$$v_s = \frac{M_1}{M_0}.$$
 (2)

Моменты, вычисленные относительно координаты v_s , называются центральными. Через начальные моменты их можно вычислить по формуле

$$\langle M_{s} \rangle = \sum_{i=0}^{n} (-1)^{i} {\binom{n}{i}} {\left(\frac{M_{1}}{M_{0}}\right)^{i}}.$$
 (3)

Для первых центральных моментов имеем:

$$\langle M_0 \rangle = M_0, \quad \langle M_1 \rangle = 0; \quad \langle M_2 \rangle = M_2 - M_1^2 / M_0;$$

 $\langle M_3 \rangle = M_3 - 3M_1 M_2 / M_0 + 2M_1^3 / M_0^2.$ (4)

Второй центральный момент характеризует дисперсию функции f(v), а третий — асимметрию. Зная моменты, функцию распределения можно восстановить с помощью ряда Эджворта:

$$f(v) = M_0 \sigma^{-1} \Big[\varphi(\xi) - \frac{\gamma_1}{3} \varphi^{(3)}(\xi) + \frac{\gamma_2}{4} \varphi^{(4)}(\xi) + \frac{10\gamma_1}{6} \varphi^{(6)}(\xi) + \dots \Big],$$
(5)

где $\xi = (v - v_s)/\sigma; \gamma_1 = \langle M_3 \rangle \sqrt{M_0} / \langle M_2 \rangle^{3/2};$ $\gamma_2 = \langle M_4 \rangle M_0 / \langle M_2 \rangle^2 - 3; \sigma^2 = \langle M_2 \rangle / M_0;$ $\varphi(\xi) = (2\pi)^{-1/2} \exp(-\xi/2).$

Восстановленная функция подвергалась нормировке:

$$A \int_{0}^{E_{\text{max}}} f(E)dE = 1; \quad W(E) = Af(E), \quad (6)$$

где E_{max} — максимальная энергия испускания частиц; A — коэффициент нормировки; W(E) имеет смысл вероятности обнаружить β -электрон в интервале энергий от E до E + dE.

Значения первых моментов нормированной функции распределения электронов по энергиям приведены в табл. 1.

Электроны, выделяющиеся при β-распаде, имеют энергию в десятки килоэлектронвольт. Попадая в твердое тело, они теряют свою энергию на торможение, многократно рассеиваясь. Существует несколько механизмов торможения, из которых нас интересует, в первую очередь, рассеяние с испусканием вторичных электронов, которые в дальнейшем вносят вклад в электрический ток источника питания. Многократно рассеиваясь, электроны совершают хаотическое движение, двигаясь с равной вероятностью по разным направлениям. Более точно такое движение можно проанализировать методом Монте-Карло. Однако для практи-

Таблица 1

Table 1

The central moments of the normalized experimental distributions

Изотоп Isotope	M1	M2	M3
Ni ⁶³	23	715	26 000
C ¹⁴	49	3467	292 000

ческих целей более удобно воспользоваться формулой, которая аппроксимирует упомянутые расчеты [9]:

$$h(x) = 0,60 + 6,21x - 12,04x^2 + 5,23x^3;$$
(7)

$$x = \frac{z}{R(E)},\tag{8}$$

где z — средняя глубина проникновения электрона в вещество; R(E) — максимальная длина пробега электрона по траектории с энергией E в материале со средним атомным номером Z, средним атомным весом A и плотностью р. Для оценки этой величины используют формулу [10]

$$R(E) = \frac{0,0398}{\rho} E^{1,75}.$$
 (9)

Функция (7) имеет смысл вероятности обнаружения частицы с энергией E на определенной глубине.

2. Вычисление поверхностной активности слоя изотопа

В изотопах достаточно сильно выражено явление самопоглощения, в результате которого на поверхность активного слоя попадают далеко не все электроны. Поэтому увеличение слоя изотопа не означает увеличение активности на его поверхности. Вычислить эту активность возможно с использованием полученных выше нормированных функций распределения. Процедура вычисления поясняется на рис. 1. Пусть активность 1 см³ вещества равна A_{vo} (значения этой величины для исследуемых веществ приведены в табл. 2). Тогда в активность слоя вещества толщиной dz, находящегося на глубине z от поверхности, равна $A = A_{vo}Sdz$,



Рис. 1. Схема для расчета поверхностной активности Fig. 1. Calculating scheme of the amount of surface activity

где S — площадь поверхности, излучающей электроны. Эта величина пропорциональна числу электронов любой энергии, которые генерируются в этом слое. Величина $W_c(E)$ — вероятность того, что электрон, излученный определенным изотопом, имеет энергию *E*. Вероятность того, что электрон с энергией *E*, генерированный на глубине *z*, достигнет поверхности, равна

$$W_{S}(E) = W_{c}(E)h(z/R(E)).$$
(10)

Вероятность того, что электрон любой энергии, генерированный на глубине *z*, достигнет поверхности, равна:

$$W_S = \int_0^{E_{\text{max}}} W_c(E)h(z/R(E))dE.$$
(11)

Тогда выражение для поверхностей активности принимает вид

$$A_{s} = A_{vo} S \int_{0}^{d} dz \int_{0}^{E_{\text{max}}} W_{c}(E) h(z/R(E)) dE.$$
(12)

Таблица 2

Данные для расчета

Data for calculation

Table 2

Обозначение Symbol Definition	Определение	Единицы измерения	Изотоп Isotope	
	Definition	Units	Ni ⁶³	C ¹⁴
ρ	Плотность Density	г/см ³ g/cm ³	8,9	1,8
<i>T</i> _{0,5}	Период полураспада Half-life time	c s	$3,2 \cdot 10^{9}$	$1,8 \cdot 10^{11}$
Ν	Концентрация атомов Concentration of atoms	cm^{-3} cm ⁻³	$1,9 \cdot 10^{23}$	$9 \cdot 10^{22}$
A_{v0} Начальная активность 1 см ³ Initial activity of 1 сm ³		Распад/с Decay/sec	$4,1 \cdot 10^{13}$	$3,5 \cdot 10^{11}$
R(E)	E) Глубина проникновения частицы с энергией $E = 1$ кэВ The penetration depth of a particle with the energy of $E = 1$ keV		0,00941	0,0374



Рис. 2. Зависимости поверхности активности от толщины слоя изотопа. Расчет по формуле (12): a — результат для изотопа Ni⁶³; b — результат для изотопа C¹⁴

Fig. 2. Dependence of the surface activity on the isotope layer thickness. Calculation by formula (12): a - result for isotope Ni⁶³; b - result for isotope C^{14}

На рис. 2 приведены результаты расчета поверхностной активности изотопов Ni^{63} и C¹⁴ в зависимости от толщины слоя изотопа.

Как и следовало ожидать, поверхностная активность зависит от этой толщины. Достижение насыщения означает, что толщина данного слоя выше толщины, при которой излучение из более глубоко лежащих слоев поглощается полностью. Дальнейшее увеличение толщины слоя изотопа бессмысленно и ведет только к увеличению затрат на изготовление прибора, так как стоимость β-источников очень высока. Различие оптимальных толщин Ni⁶³ и C¹⁴ связано с плотностью вещества и распределением излучаемых частиц по энергиям. Чем меньше плотность вещества, тем с большей глубины способны выходить электроны. Отметим также, что если использовать для оценки толщины слоя изотопа средние энергии β-электронов, то толщина слоя изотопа для никеля составляет 1,5 мкм, а для углерода 45 мкм. При использовании таких величин для изготовления источников питания поверхностная активность будет на 20 % ниже, что соответственно ухудшает параметры изделия. Следовательно, для вычислений надо использовать не средние энергии β-электронов, а распределения по энергиям, чего не рассматривалось в предыдущих работах.

3. Вычисление скорости и тока генерации вторичных электронов в области пространственного заряда *p*-*n*-перехода

Электроны высоких энергий, вылетев из слоя изотопа, проникают в полупроводник и генери-

руют в нем вторичные электроны, которые обусловливают ток. Скорость генерации вторичных электронов на глубине *z* определяется электронами всех энергий, которые вылетают из источника, поэтому

$$G(z) = A_s \int_0^{E_{\text{max}}} W_c(E) \frac{E}{E_i} h\left(\frac{z}{R_{ef}(E)}\right) dE, \qquad (13)$$



Рис. 3. Зависимость плотности генерированного β -электронами тока в области пространственного заряда *p*—*n*-перехода. Расчет по формуле (14). Верхняя кривая — результат для изотопа C¹⁴, нижняя — для Ni⁶³

Fig. 3. Dependence of the density of current generated by β -electrons in the space charge region of p—n-junction. Calculation using the formula (14). The upper curve for the isotope C^{14} , the lower curve for Ni⁶³

где $E_i = 2,596E_g + 0,714 = 3/62$ эВ = 0,00362 кэВ. Данное выражение определяет число электронов, которые генерируются в одну секунду на глубине *z*. Параметры для расчета приведены в табл. 2.

Используя формулу (13), можно рассчитать ток генерации:

$$j = eS \int_{0}^{w} G(Z) dz.$$
(14)

На рис. З построены зависимости плотности тока генерации в зависимости от ширины области пространственного заряда. Несмотря на то что поверхностная активность изотопа Ni^{63} выше, ток выше у источника питания, построенного на изотопе C^{14} . Это связано с более высокой энергией вылетающих из данного изотопа электронов. Соответственно каждый β -электрон, вылетающий из изотопа углерода, генерирует больше вторичных электронов.

Заключение

В работе разработана методика оптимизации рабочих слоев источников питания, стимулированных β-излучением с учетом экспериментальных распределений β-электронов по энергиям. Расчеты, выполненные в работе, показывают, что недостаточно использовать для вычислений только средние энергии β-электронов. Для вычисления более точного результата необходимо использовать спектральное распределение энергий электронов, вылетающих из β-источника. Также важно, чтобы энергии электронов были выше, тогда несмотря на более низкую активность можно достигнуть более высоких значений токов источника питания.

Список литературы

1. **Polymers**, phosphors, and voltaics for radioisotope microbatteries. Ed. by Kenneth E. Bower. London, New York, Washington: CRC Press LLC, 2002, 472 p.

2. Резнев А. А., Пустовалов А. А., Максимов Е. М., Передерий Н., Петренко Н. С. Перспективы создания миниатюрного источника тока на бета-вольтаическом эффекте с использованием в качестве активного элемента изотопа никель-63 // Нано-микросистемная техника. 2009. № 3. С. 14—16.

3. Chandrashekhar M. V. S., Christopher I. Thomas, Hui Li, Spencer M. G. and Amit Lai. Demonstration of a 4H SiC betavoltaic cell // Applied Physics Letters. 2006. Vol. 88. P. 033506.

4. Eiting C. J., Krishnamoorthy V., Romero E., and Jones S. Betavoltaic Power Cells // Proceeding of the 42 Power Source Conference. 2006. P. 601.

5. Andreev V. M., Kavetsky A. G. Tritium-Powered Betacells Based on $Al_xGa_{1-x}A_s$ // Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference. 2000. P. 1253.

6. **Rybicki G. C.** Silicon Carbide Radioisotope Batteries. NASA/CP-2001-210747/REV1. 2001. P. 200.

7. Колобашкин В. М., Рубцов П. М., Алексакин В. Г., Ружанский А. Бета-излучение продуктов деления: Справочник. М.: Атомиздат, 1978. 427 с.

8. Martinez J. D., Mayo R. F. Savat Monte Carlo simulation of kilovolt electron transport in solids // J. Appl. Phys. 1990. Vol. 67. P. 2955–2964.

9. Everhart T. E., Hoff P. H. Determination of kilovolt electron energy dissipation versus penetration distance in solid materials // J. Appl. Phys. 1971. Vol. 42. P. 5837–5846.

10. **Ong Vincent K. S. and Phua Poh Chin.** Junction depth determination by reconstruction of the charge collection probability in a semiconductor device // Semicond. Sci. Technol. 2001. Vol. 16. P. 691–698.

I. E. Abanin, Deputy Director, aie@tcan.ru SPC Technological Center, Russia, Moscow

Selection of Active Layers for a Power Supply Device with p-n Junction Excited by β -Radiation

This article presents a method for selection of the working layers for a power supply stimulated by β -radiation with account of the experimental distribution of β -electrons by their energies. Calculations demonstrate that for calculations it is not enough to use only the average energies of β -electrons. More accurate results are obtained due to the use of a spectral distribution of the energies of electrons escaping from a β -source. The currents generated in p-n junctions by the electrons of high energies are expected to be higher with the use of the optimal layers of C^{14} isotope, compared with the layers of Ni^{63} isotope.

Keywords: β -voltaic effect, β -radiation, self-absorption of β -source, isotope of C^{14} , isotope of Ni⁶³, power supply

Introduction

β-radiation sources have a high specific energy density [1]. They are advantageous [to use for manufacture of the power supplies with long-term use. So, power sources with a lifetime of more than 30 years can be created on the basis of Ni⁶³ isotope [2]. The direct energy conversion power supplies have more high-efficiency ration, β-electrons generate electron-hole pairs in the semiconductor, which are separated by the field of p—n-junction or metal-semiconductor contact [4—6]. In the world, especially in the USA, these devices are designed on the basis of tritium, Ni⁶³ and Pm¹⁴⁷. However, they have certain disadvantages associatejd with long term manufacture and high cost of isotopes. High self-absorption of β -radiation by Ni⁶³ results in the need for sources in the form of a thin film directly on structures that convert energy of β -particles into energy of the electric current. The isotopes can not always be cleaned, they have impurities, causing a concomitant gamma radiation. This radiation limits the application of Pm¹⁴⁷ in power cells.

The pure β -emitters in which there are no other types of radiation are considered as potential primary sources of energy for miniature atomic cells. The most promising are tritium and Ni⁶³ isotope having a halflife of 100 years [2]. However, the long half-life reduces the activity of the sources. Therefore, one of the ways to increase specific electric power of a converter is to increase the surface area of the diode structure, covered with a source of β -radiation. The quasi-3D porous structures are used for this purpose that complicates the technology and increases the cost of production.

The search for promising isotopes for β -power sources remains urgent. One of these isotopes is C¹⁴. The C¹⁴ particles have sufficiently high energy as well as the low density reduces β -radiation self-absorption.

The present work compares the power sources, which can be prepared using Ni⁶³ and C¹⁴. It analyzes the optimization of active layers of power supplies with *n*-*p* junctions excited by β -radiation. The average values of energy of β -electrons are used to calculate the parameters of the active layers. Such an approach is not accurate enough. The work shows the numerical calculations of the electrons emitted in the decay using the experimental distributions.

1. The normalization of the support functions of distribution

 β -decay is a spontaneous transformation of nuclei accompanied by emiss on or absorption of an electron, an antineutrino or a positron and a neutrino. The decay by emitting an electron and an antineutrino is used for functioning of a power supply with β -excitation. Both studied isotopes — C^{14} and Ni^{63} decay under this scheme. For example, C^{14} decays as follows:

$${}^{14}_6\mathrm{C}\,\rightarrow\,{}^{14}_7\mathrm{N}\,+\beta^-+\,\tilde\nu\,.$$

At each act of β -decay, the energy is randomly distributed between the β -particle and an antineutrino, so β -radiation has a continuous energy spectrum, which data are presented in tabular form in [7]. The further calculations need to transform them into the probability function of β -electron occurrence per unit energy interval. It uses the method of moments.

Moment M_n of order *n* of the distribution function f(v), calculated relatively to the origin is determined by the integral:

$$M_n = \int v^n f(v) dv. \tag{1}$$

The integration is performed along the change area v. The moments, calculated by this formula, called the initial, taken with respect to the origin. The moment of zero order — area of the figure bounded by function f(v) and the x-axis. The moment of the first order determines the coordinates of the center of gravity of the distribution:

$$v_s = \frac{M_1}{M_0}.$$
 (2)

Moments calculated relative to coordinate v_s , calle central. They can be calculated according to the formula through the initial moments:

$$\langle M_{s} \rangle = \sum_{i=0}^{n} (-1)^{i} {\binom{n}{i}} {\left(\frac{M_{1}}{M_{0}}\right)^{i}}.$$
 (3)

In the first central moments there are:

$$\langle M_0 \rangle = M_0, \quad \langle M_1 \rangle = 0; \quad \langle M_2 \rangle = M_2 - M_1^2 / M_0;$$

 $\langle M_3 \rangle = M_3 - 3M_1 M_2 / M_0 + 2M_1^3 / M_0^2.$ (4)

The second central moment characterizes the dispersion of function f(v), the third — the asymmetry. Knowing the moments, the distribution function can be restored through a series of Edgeworth:

$$f(v) = M_0 \sigma^{-1} \Big[\varphi(\xi) - \frac{\gamma_1}{3} \varphi^{(3)}(\xi) + \frac{\gamma_2}{4} \varphi^{(4)}(\xi) + \frac{10\gamma_1}{6} \varphi^{(6)}(\xi) + \dots \Big],$$
(5)

where $\xi = (v - v_s)/\sigma$; $\gamma_1 = \langle M_3 \rangle \sqrt{M_0} / \langle M_2 \rangle^{3/2}$; $\gamma_2 = \langle M_4 \rangle M_0 / \langle M_2 \rangle^2 - 3$; $\sigma^2 = \langle M_2 \rangle / M_0$; $\varphi(\xi) = (2\pi)^{-1/2} \exp(-\xi/2)$.

The restored function exposed normalization:

$$A \int_{0}^{E_{\max}} f(E)dE = 1; \quad W(E) = Af(E),$$
(6)

where E_{max} — the maximum energy of particles emitting, A — normalization factor. W(E) — is the probability to detect β -electrons in the energy range from Eto E + dE.

The values of the first moments of the normalized function of the electrons distribution by energy are given in Table. 1.

The electrons released during β -decay, have an energy of tens of keV. Getting into a solid, they lose it on inhibition, scattering repeatedly. There are several mechanisms of inhibition, of which we are primarily concerned scattering with the emission of sebondjary electrons, which contribute to the electric current of supply device. Scattering repeatedly, the electrons make chaotic motion with equal probability in different directions. More precisely it can be analyzed by the

Monte-Carlo method. However, for practical purposes it is more convenient to use a formula that approximates the mentioned calculations [9].

$$h(x) = 0,60 + 6,21x - 12,04x^2 + 5,23x^3;$$
(7)

$$x = \frac{z}{R(E)},\tag{8}$$

where z — the average depth of electron penetration into a substance; R(E) — the maximum length of the path of an electron trajectory with energy E, in the material having an average atomic number Z, an average atomic weight A and the density ρ . To assess the value the following formula is used [10].

$$R(E) = \frac{0,0398}{\rho} E^{1,75}.$$
 (9)

Function (7) has the probability of finding of a particle with energy E at a certain depth.

2. Calculation of the surface of the activity of an isotope layer

The isotopes quite strongly express self-absorption, which results in the fact that not all the electrons fall on the surface of the active layer. Therefore, increasing of the isotope laiver does not mean an increase in activity on its surface. It can be obtained using the above normalized distribution functions. The calculation procedure is illustrated in fig. 1. We suppose that the activity of one cm³ of a substance is A_{vo} (these values for tested substances are shown in table 2). Then the activity of the material's layer with a thickness dz, located at a depth z from the surface, is $A = A_{vo}Sdz$, where S – the area of the surface, emitting electrons. This quantity is proportional to the amount of electrons of any energy which are generated in this layer. The value $W_c(E)$ – the probability that an electron emitted by a certain isotope has an energy E. The probability that an electron with an energy E generated at a depth z, reaches the surface is equal to:

$$W_{\mathcal{S}}(E) = W_{\mathcal{C}}(E)h(z/R(E)). \tag{10}$$

The probability that an electron of any energy generated at a depth z, reaches the surface is equal to:

$$W_S = \int_0^{E_{\text{max}}} W_c(E)h(z/R(E))dE.$$
(11)

The expression for surface activity takes the form:

$$A_{s} = A_{vo} S \int_{0}^{d} dz \int_{0}^{E_{max}} W_{c}(E) h(z/R(E)) dE.$$
(12)

Fig. 2, *a* and 2, *b* show the results of calculation of surface activity of Ni^{63} and C^{14} isotopes depending on the thickness of the isotope layer.

As was expected, the surface activity is dependent on that thickness. Reaching the saturation means that the thickness of the layer is over the thickness at which the radiation from deeper layers absorbed completely. A further increase in the thickness of the isotope is pointless and leads to an increase in manufacturing costs of a device, as the cost of β -sources is very high. The difference between the optimum thickness of Ni⁶³ and C^{14} is connected with the density of a substance and the distribution of the emitted particles by energies. Then lower the density of the substance, the greater the depths of the electrons are able to go out. If the medium energies of β -electrons are used to estimate the thickness of an isotope layer, the thickness of the isotope of nickel will be 1,5 and 45 µm for carbon. When using these values for producing of power sources, the surface activity is by 20 % lower in comparison with the estimated, given in this article. It means that the parameters of the product decrease respectively. Consequently, the computation needs to use not the average energies of β -electrons, but the energy distribution that has not been considered in previous cited works.

3. Computation of velocity and generation current of secondary electrons in the space charge region of p-n-junction

High energy electrons once field out of an isotope layer penetrate into the semiconductor and generate therein the secondary electrons, which cause current. The rate of generation at a depth z is determined by the electrons of all energies that are emitted from the source, so:

$$G(z) = A_s \int_{0}^{E_{\text{max}}} W_c(E) \frac{E}{E_i} h\left(\frac{z}{R_{ef}(E)}\right) dE, \qquad (13)$$

where $E_i = 2,596E_g + 0,714 = 3/62 \text{ eV} = 0,00362$, for silicon should be in keV. This expression determines the number of electrons that are generated in one second at a depth *z*. The parameter for calculation are shown in table 2.

Using the formula (13) can calculate the generation current:

$$j = eS \int_{0}^{w} G(Z) dz.$$
 (14)

Fig. 3 shows the constructed dependencies of the generation current density according to the width of the space charge region. Despite the fact that the surface activity of the isotope Ni⁶³ is higher, the current of power supply is higher on the isotope C¹⁴. This is caused by the higher energy of electrons, emitted from the given isotope. Accordingly, each β -electron emitted from the isotope of carbon generates more secondary electrons.

Conclucion

The optimization of the working layers of power supply source was made in the work, stimulated by β radiation taking into account the experimental energy distributions of β -electrons. The calculations show that the use only of the average energies of β -electrons is inadequate. For more accurate results you must use the spectral distribution of electrons' energies emitted from the β -source. It is important that the electrons' energies are higher, then, despite lower activity, it is possible to achieve high currents of power supply sources.

References

1. **Polymers,** *phosphors, and voltaics for radioisotope microbatteries.* Edited by Kenneth E. Bower. London, New York, Washington: CRC Press LLC, 2002. 472 p.

2. Reznev A. A., Pustovalov A. A., Maksimov E. M., Perederii N., Petrenko N. S. Perspektivi sozdaniya miniatyurnogo istochnika toka na beta_voltaicheskom effekte s ispolzovaniem v kachestve aktivnogo elementa izotopa nikel_63. *Nano i mikrosistemnaya tehnika*, 2009, no. 3, pp. 14–16. 3. Chandrashekhar M. V. S., Christopher I. Thomas, Hui Li, Spencer M. G. and Amit Lai. Demonstration of a 4H SiC betavoltaic cell. *Applied Physics Letters*, 2006, vol. 88, pp. 033506.

4. Eiting C. J., Krishnamoorthy V., Romero E., and Jones S. Betavoltaic Power Cells. *Proceeding of the 42 Power Source Conference*, 2006, pp. 601.

5. Andreev V. M., Kavetsky A. G. Tritium-Powered Betacells Based on $Al_xGa_{1-x}A_5$. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2000, pp. 1253.

6. Rybicki G. C. Silicon Carbide Radioisotope Batteries, NASA/CP-2001-210747/REV1, 2001, P. 200.

7. Kolobashkin V. M., Rubcov P. M., Aleksakin V. G., Rujanskii A. *Beta-izluchenie produktov deleniya*. Spravochnik. M.: Atomizdat, 1978. 472 p.

8. Martinez J. D., Mayo R. F. Savat Monte Carlo simulation of kilovolt electron transport in solids. *J. Appl. Phys*, 1990, vol. 67, pp. 2955–2964.

9. Everhart T. E., Hoff P. H. Determination of kilovolt electron energy dissipation versus penetration distance in solid materials. *J. Appl. Phys*, 1971, vol. 42, pp. 5837–5846.

10. **Ong Vincent K. S. and Phua Poh Chin.** Junction depth determination by reconstruction of the charge collection probability in a semiconductor device. *Semicond. Sci. Technol*, 2001, vol. 16, pp. 691–698.

УДК 539.2; 621.382

В. К. Смолин, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: niiis@niiis.nnov.ru, ФГУП "ФНПЦ НИИ измерительных систем им. Ю. Е. Седакова"

НЕТЕРМИЧЕСКАЯ АКТИВАЦИЯ ПРОЦЕССОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖКИ В МЕТОДАХ ФИЗИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

Поступила в редакцию 21.04.2015

Управление морфологическими и структурными свойствами растущих пленок, получаемых осаждением из газовой фазы или молекулярных пучков, традицинно состоит в изменении температуры подложки, энергии осаждаемых частиц и скорости осаждения материала. Однако при создании приборных структур для микро- и наноэлектроники применение высоких температур часто является нежелательным. Повысить детерминированность процесса осаждения возможно за счет введения дополнительных воздействий с нетермической природой активации, позволяющих управлять физикохимическими процессами как в пролетном пространстве, так и на поверхности подложки. Дан анализ процессов нетермической активации процессов осаждения и роста пленок, показаны условия применения и эффективность указанных процессов.

Ключевые слова: нетермическая активация, физическое осаждение из газовой фазы, тонкопленочная технология, изготовление СБИС

Введение

Получение высококачественных тонкопленочных слоев и покрытий из металлов, сплавов, диэлектриков и полупроводников является актуальной задачей технологии изготовления различных элементов и устройств современной электроники, оптики и точной механики. Например, в технологических процессах производства интегральных микросхем с субстонанометровыми топологическими нормами порядка 30...60 % приходятся на операции, связанные с получением тонкопленочных слоев систем изоляции и металлизации [1].

Нанесение слоев материала в тонкопленочной технологии представляет собой последовательность следующих событий [2, 3]:

 генерация атомно-молекулярного состояния вещества;

- транспортирование (массоперенос) частиц;
- взаимодействие частиц с подложкой.

Последний этап часто разделяют на два, выделяя собственно взаимодействие частиц с подложкой и рост пленки, т. е. процесс взаимодействия осаждаемых частиц уже со сплошным слоем пленочного материала. Такое выделение этапов нанесения покрытий носит принципиальный характер как при синтезе конкретных процессов, так и при их моделировании. Способ генерирования атомномолекулярного состояния вещества характеризует два класса процессов физического осаждения из газовой фазы (ФОГФ): термическое испарение и ионно-плазменное распыление. При термическом испарении электрическая энергия источника преобразуется в тепловую и далее переходит в механическую энергию частиц за счет таких воздействий на исходный материал, как джоулева теплота, индукционный нагрев, горение электрической дуги, электронно-лучевой нагрев, нагрев лазерным излучением в видимом свете и ближнем ИК спектре; при ионном распылении электрическая энергия источника непосредственно преобразуется в механическую энергию частиц.

Некоторые исследователи рассматривают отдельно класс смешанных процессов ФОГФ, в котором осаждение пленок осуществляется с помощью одновременно испаренных и/или распыленных в вакууме или плазме низкого давления материалов в виде атомарного и ионного пучков на поверхность подложки без изменения их химического состава.

В данной работе рассмотрены особенности нетермических методов активации процессов формирования тонкопленочных покрытий.

Традиционный способ управления морфологическими и структурными свойствами растущих пленок, получаемых осаждением из газовой фазы или молекулярных пучков, состоит в изменении температуры подложки, энергии осаждаемых частиц и скорости осаждения материала [4-6]. При создании приборных структур для микро- и наноэлектроники применение высоких температур является нежелательным, например, это вызывает диффузионное размытие концентрационных профилей легирования, может приводить к усилению действия неконтролируемых факторов, обусловливающих невоспроизводимость параметров пленок [7]. Повысить детерминированность процесса осаждения возможно за счет введения дополнительных воздействий с нетермической природой активации, позволяющих управлять физико-химическими процессами как в пролетном пространстве, так и на поверхности подложки. Такими действиями могут быть:

- статическая деформация подложки изгибом или возбуждение изгибных колебаний подложки;
- воздействие электрических и магнитных полей (например, термоионное осаждение, полевой эффект);
- облучение поверхности подложки импульсами УФ излучения, обеспечивающими фотодесорбцию адсорбированных газов.

Механические воздействия на подложку

Наиболее простым в аппаратном оформлении методом активации в процессе осаждения пленки является механическое воздействие (прежде всего изгибом) на подложку.

Пленки $Ni_{0,75}$ — $Fe_{0,25}$ осаждались при ориентирующем в плоскости постоянном магнитном поле на напряженные изгибом стеклянные подложки (прогиб подложек размером $10 \times 24 \times 0,5$ мм обеспечивался размещенной вдоль короткой стороны между подложкой и держателем медной проволокой и составлял 50 мкм). В зависимости от характера распределения упругих напряжений на локальных участках образцов наблюдается как усиление наведенной магнитным полем одноосной анизотропии, так и полная ее компенсация при одновременном существенном изменении направления оси легкого намагничивания [8].

Одной из важных задач полупроводниковой тензометрии является изготовление тензодатчиков с линейной и симметричной деформационной характеристикой. В зависимости от причины возникновения нелинейности эту характеристику компенсируют определенными методами. Асимметричность деформационной характеристики пленочных полупроводниковых тензорезисторов, скорее всего, связана с внутренними механическими напряжениями в пленках, которые мало изучены. В работе [9] приводятся результаты исследований статической деформационной характеристики поликристаллических пленок $(Bi_{0.5}Sb_{0.5})_2Te_3$, в которых существенны структурно-технологические внутренние механические напряжения, а также предлагаются некоторые способы линеаризации и симметризации этих характеристик. Предварительная деформация подложек осуществлялась с использованием вогнутого подложкодержателя. На рабочий участок подложки действовал постоянный изгибающий момент, который вызывал равномерную деформацию одностороннего сжатия рабочего участка. Когда подложка с нанесенной на нее пленкой освобождается от подложкодержателя, то они приходят к исходному недеформированному состоянию, а пленка уже испытывает деформацию, равную по величине, но обратную по знаку предварительной деформации подложки.

В работе [10] приведены результаты напыления покрытий Cr(6...8 мкм) — Cu(40 нм) на подложки из стекла марки C49-2 при осуществлении их обратного прогиба (соответствующего напряжениям, измеренным после напыления в обычном режиме, но обратные по знаку). Подложки толщинами 5 и 10 мм изгибали до напряжений соответственно $\sim 5.9 \cdot 10^6$ и $\sim 1.96 \cdot 10^6$ H/м². Остаточные напряжения в подложках, которые напылялись с использованием обратного прогиба, уменьшались в 5...6 раз по сравнению с напыленными без прогиба. Создание обратного прогиба привело к увеличению прочности сцепления покрытий с подложками практически в 3 раза.

В способе получения алюминиевой фольги для повышения качества и облегчения отделения пленки алюминия от подложки конденсацию материала осуществляют на упругодеформированную металлическую подложку из бериллиевой бронзы толщиной 0,2 мм [11]. Обезжиренную подложку размещают в камере установки так, что ее вогнутая полированная поверхность обращена к испарителю; стрела прогиба составляла 15 мм при размерах подложки 50 × 60 мм. Отделение конденсата от подложки происходит самопроизвольно в момент развакуумирования камеры. Здесь на перераспределение напряжений в слое алюминия сказывается образование естественного оксида на внешней поверхности. Предел прочности на разрыв фольги составлял $(1...2) \cdot 10^5$ H · м⁻² при толщине 6...10 мкм.

Условия ввода ультразвуковых колебаний из колебательных систем с помощью металлических рабочих инструментов в газовые среды неэффективно. Удельное волновое сопротивление жидких сред значительно (для воды в 3500 раз) больше, чем у газов, и поэтому большая мощность излучается из колебательной системы в жидкость при одинаковой амплитуде колебаний инструмента. Кроме того, в жидких средах возникает и протекает специфический физический процесс — ультразвуковая кавитация, обеспечивающая максимальные энергетические воздействия на твердые тела в жидкостях, поэтому изгибным колебаниям подвергают вне рабочей камеры установки осаждения. Подложку подвергают изгибным колебаниям в процессах электрохимического осаждения; "озвучиваниие" подложек может выполняться до и после осаждения пленки в целях либо снижения поверхностного заряда в структурах полупроводник-диэлектрик, либо уплотнения и снижения дефектности, перераспределения механических полей [12-15].

Влияние внешних магнитных и электрических полей

При наложении статического магнитного поля в пределах ~50 Э, ориентированного параллельно поверхности подложки, реализуют процессы формирования магнитных пленок. Направление магнитного поля определяет направление вектора намагниченности, и в зависимости от этого можно получать анизотропные или изотропные пленки [16—17].

В способе, описанном в [18], в котором при получении магнитных наночастиц на подложке используются осаждение на поверхность подложки наночастиц и намагничивание их в заданном направлении, подложки перемещают в зазор магнитопровода, в котором создают магнитное поле с помощью постоянного магнита или электромагнита, при этом упомянутый цикл повторяют до получения требуемого среднего размера наночастиц. Точность получения среднего размера наночастиц обеспечивают за счет продолжительности осаждения и намагничивания, средним расстоянием между соседними наночастицами на подложке управляют с помощью силы магнитного поля, а формой наночастиц — с помощью направления магнитного поля.

Гранулированные магнитные пленки наравне с другими структурами, обладающими эффектом магнитосопротивления, в настоящее время активно исследуются применительно к сенсорам различного назначения, компьютерной памяти и носителям информации с высокой плотностью записи [19]. В результате проведенных исследований [20] был обнаружен эффект магнитомиграции основных и примесных компонентов в гранулированных пленках Со-Си, осаждаемых ионно-плазменным методом при дополнительном воздействии внешнего постоянного магнитного поля с градиентом, направленным по нормали к поверхности подложки. Необходимым условием проявления данного эффекта является высокая подвижность адатомов. Под воздействием внешнего поля диамагнитные и парамагнитные атомы разнонаправленно мигрируют вдоль его градиента. Используя данный эффект, можно получать тонкие магнитные пленки с низким содержанием нежелательных примесей, таких как хлор, водород, углерод, аргон и др., обладающих высокой диамагнитной восприимчивостью.

Внешнее электрическое поле, включенное во время осаждения тонкой пленки, часто вызывает изменения в ее структуре. Чопра К. Л. [21] установил, что под действием электрического поля напряженностью ~100 $\text{B} \cdot \text{см}^{-1}$ и выше, приложенного вдоль поверхности подложки, удельное сопро-

тивление растущей пленки оказывается меньше, чем без поля. Это обусловлено изменением свободной энергии в присутствии заряда, что, в свою очередь, влияет на равновесную форму зародышевого островка (при наложении поля островок будет вместо шаровидной формы иметь форму эллипсоида, вытянутого вдоль направления вектора поля). Эффект наблюдается на начальной стадии осаждения до тех пор, пока пленка не становится физически сплошной (это наступает примерно при вдвое меньших толщинах, чем в условиях отсутствия поля). Соответственно, уменьшается удельное сопротивление металлических пленок; имеется возможность получения ориентированных пленок полупроводниковых соединений на неориентированных подложках [22].

В [23] предложен способ контроля удельного поверхностного сопротивления при осаждении тонких резистивных пленок с помощью образцов свидетелей, учитывающий эффект воздействия электрического поля источника напряжения измерительной аппаратуры на условия роста резистивной пленки. Эффективность такого способа контроля подтверждается уменьшением влияния случайной составляющей контролируемой величины [24].

Воздействие на поверхность подложки заряженных частиц и различного вида излучений

Независимую возможность в управлении процессом роста пленки способно дать воздействие пучком ионов на ее поверхность в процессе осаждения [25—31]; при этом к уже существующим параметрам управления добавляются энергия ионного пучка, его плотность и длительность воздействия. Ионное воздействие может осуществляться:

- на предростовой стадии за счет ионно-стимулированной реконструкции поверхности подложки;
- на стадии зарождения;
- на стадии межслоевой диффузии и срастания двумерных островков;
- на стадии формирования сплошного слоя. Для традиционного ионного легирования, как правило, используют энергии ионного пучка от 10 кэВ до 1 Мэв, что обусловлено необходимостью формирования областей структуры на определенных глубинах от поверхности. Проблемы образования при таких энергиях дефектов структуры решаются отжигом. Однако при высоких температурах происходит диффузионное размытие концентрационных профилей легирования, что является нежелательным при создании приборных структур для микро- и наноэлектроники. Ионное легирование, проводимое непосредственно в про-

цессе эпитаксиального осаждения пленок Si, позволяет снизить энергию ионов до значения порядка 0,1 кэВ. Плотность тока при этом составляет 0,1...0,6 мкА \cdot см⁻², а длительность воздействия — 0,25...0,6 с. Нижний предел определяется инерционностью натекателя ионизируемого газа (криптона), а верхний — условием сохранения сверхвысокого вакуума в камере после импульсного воздействия [32].

Показано [33], что пленки, полученные данным методом, имеют целый ряд полезных свойств: повышенную отражательную способность, адгезию, износостойкость. Поэтому можно заключить, что влияние бомбардировки одноименными ионами на структуру пленок (как и на сопротивление) носит специфический характер и не сводится к дополнительному нагреву, вызываемому термализацией кинетической энергии ионов при торможении.

Термоионное нанесение покрытий широко применяется при изготовлении интегральных микросхем, магнитных пленок, оптических и износостойких слоев. Осаждение пленок в условиях, когда материал поступает на подложку в виде атомов и ионов, позволяет в широких пределах изменять композиционный состав покрытия и его структуру. Термоионное осаждение осуществляется при энергиях частиц 0,2...2000 эВ путем подачи ВЧ или постоянного смещения на подложку. Доля ионной компоненты в потоке осаждаемых частиц составляет 1...10 %, причем ионы движутся по нормали к поверхности подложки, а нейтральные частицы направляются по закону косинуса [34].

Одним из наиболее распространенных методов получения интенсивной термоионной плазмы является электронно-лучевое испарение с внешней инжекцией электронного пучка [35]. Его недостатком является то, что электронная пушка и тигель с испаряемым веществом во избежание электрического пробоя пушки вследствие повышения давления при испарении должны быть разнесены в пространстве. Более простыми и надежными при сравнимой эффективности осаждения являются плазменные электронно-лучевые системы, в которых формирование электронного пучка происходит непосредственно у поверхности испаряемого вещества [36]. Преимуществом плазменных систем является то, что в них практически исключен пробой пушки, поскольку формирование потока происходит в пушке с плазменным эмиттером, т. е. в отсутствие твердотельного отрицательного электрода, на котором, как правило, и развивается пробой. Кроме того, ускоряющий промежуток вследствие большой электропроводности плазмы автоматически уменьшает свои размеры с ростом тока при повышении давления, что обеспечивает эффективный проход через него заряженных частиц. Вторая важная особенность — это отсутствие пространства транспортировки между пушкой и тиглем, что делает систему некритичной к энергии пучка и позволяет в широких пределах варьировать ею, делая ее наиболее оптимальной с точки зрения максимальной эффективности ионизации рабочего пара.

В [37, 38] показано, что кинетика роста фторполимерных покрытий из газовой фазы определяется основными механизмами вторичной полимеризации адсорбированных молекул и фрагментов, поступающих на поверхность, и радиационной полимеризации радиационно-привитых молекулярных комплексов, которые соединяются в крупные трехмерносшитые структурные агрегаты типа кластеров и образуют структуру полимера. Путем направленной электронной обработки растущего слоя фторполимерной пленки возможно осуществлять управление свойствами полимерного покрытия. В области оптимальных температур конденсации вакуумные покрытия имеют наиболее совершенную молекулярную и надмолекулярную структуру. Здесь в процессе активации электронно-ионной бомбардировкой образуются группы частиц макромолекул, которые мигрируют на поверхности подложки и участвуют в процессе полимеризации с образованием радиационных поперечных сшивок молекул. Вакуумные фторполимерные пленки, получаемые в ВЧ плазме во внешнем электрическом поле при температуре 340...385 К, формируются в более плотную упорядоченную молекулярную структуру и имеют наилучшие электрофизические характеристики. Наблюдается повышение оптического коэффициента пропускания фторполимерных покрытий, что обусловлено снижением кристалличности и сферолитного порядка в структуре пленок.

Обработка поверхности подложки с растущей пленкой может осуществляться ультрафиолетовым и лазерным излучением, которые удобно сочетаются с другими способами нетермической активации.

При осаждении методом реактивного испарения ряда соединений стехиометрического состава (CdS, ZnO, AlN и др.) вероятность взаимодействия компонентов может быть увеличена за счет активации одного из них с помощью ультрафиолетового излучения [39, 40]. Образующаяся смесь молекул и атомов азота обладает повышенным запасом энергии и вступает в химическую реакцию с алюминием в зоне подложки.

В [41] предложено при выращивании алмазных пленок из молекулярных пучков одновременно осуществлять воздействие на исходные вещества и подложку светового излучения (лазерное излучение с длиной волны 193 нм) на расстоянии от подложки, меньшем длины свободного пробега молекул исходных веществ. Этим обеспечивается получение пленок и структур на их основе с заданными свойствами путем контроля и управления ростовым процессом на уровне атомных монослоев, снижение расхода исходных веществ.

В способе нанесения покрытия [42] бомбардировка подложки положительными ионами газового разряда (гелий, аргон, азот и воздух с энергией в пределах 1,5...3,5 кэВ) чередуется с процессом облучения ультрафиолетовым излучением и потоком электронов. При этом дополнительное воздействие на поверхность диэлектрика ультрафиолетового излучения в области частот $1 \cdot 10^{15} \dots 5 \cdot 10^{15}$ Гц усиливает эти процессы, так как энергия фотонов, соответствующая этому диапазону частот, равна 4...20 эВ и совпадает с энергией связи углеродных соединений и оксидов металлов, составляющих основу большинства диэлектриков. Данное техническое предложение обеспечивает увеличение адгезионной прочности контакта металлизированного покрытия и диэлектрической подложки, а также предотвращает возможность появления брака покрытия, являющегося следствием формирования объемного положительного заряда на поверхности подложки, за счет компенсации объемного положительного заряда, усиления процессов очистки поверхности от гидроксильных групп, органических загрязнений, а также за счет химической активации поверхности.

Влияние состава газовой среды в рабочей камере при осаждении пленок

Состав газовой среды в плазменных процессах осаждения пленок может существенно влиять на структурные и электрофизические параметры пленок. Например, авторы [43] установили, что высокое парциальное давление кислорода (3...5%) в газовой смеси Ar + O₂ при реактивном распылении мишени из сплава индия (90%) и олова (10%) способствовало формированию на стеклянной подложке при температуре 350 °С пленок с текстурой (111), в то время, как в чистом аргоне кристаллиты ориентировались вдоль направления (100). Пленки с текстурой (100) имели меньшее сопротивление, чем с (111), что объясняется уменьшением искажения решетки оксида индия вследствие снижения доли внедренного в нее кислорода.

Наличие в составе рабочего газа таких примесных элементов, как кислород или азот, вызывает вертикальный рост зерен в пленках алюминиевых сплавов при магнетронном распылении [44]. Столбчатой структурой обусловлен температурный коэффициент сопротивления (ТКС) осаждаемых в кислородосодержащей смеси платиновых пленок. Для пленок толщиной 1...3 мкм ТКС составлял 0,00385 °C⁻¹, что совпадает с ТКС платиновой проволоки Пл-4 и превышает указанный параметр для пленок, полученных при распылении в чистом аргоне [45].

Заключение

Атомистический характер процесса роста пленок из газовой фазы обеспечивает возможность получения множества сплавов и соединений с нормальной и аномальной структурами и свойствами, которые имеют иные значения, чем массивные образцы. В отличие от традиционных способов управления свойствами растущих пленок обеспечение детерминированности процесса осаждения возможно за счет введения дополнительных воздействий с нетермической природой активации, позволяющих управлять физико-химическими процессами как в пролетном пространстве, так и на поверхности подложки.

В статье даны общие представления о процессах активации, однако необходимы дальнейшие теоретические разработки, позволяющие учитывать влияние примесей и загрязнений, материалов подложек, сочетание конкретного способа с другими способами нетермической активации и других условий, обеспечивающих воспроизводимость результатов.

Для реализации рассмотренных приемов, создающих предпосылки оптимизации технологии создания изделий нано- и микросистемной техники, могут быть использованы базовые типы установок с дополнительными блоками и внутрикамерной оснасткой, не требующей сложных условий применения.

Список литературы

1. Белецкий В., Киреев В., Князев С. и др. Применение вакуумно-плазменных технологий в электронике // Современная электроника. 2012. № 2. С. 12—19.

2. Броудей И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии: Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 496 с.

3. Данилин Б. С., Сырчин В. К. Магнетронные распылительные системы. М.: Радио и связь, 1982. 72 с.

4. Venables J. A., Spiller G. D. T. and Hanbucken V. Nucleation and Growth of Thin Films // Rep. Prog. Phys. 1984. V. 47. P. 399–459.

5. Voigtlander B. Fundamental processes in Si/Si and Ge/Si epitaxy studient bu scanning tunneling microscopy luring growth // Surfage Science Reports. 2001. V. 43. P. 127–254.

6. Пчеляков О. П., Болховтянов Ю. Б., Двуреченский А. В. и др. Кремний-германиевые наноструктуры с квантовыми точками: механизмы образования и электрические свойства // Физика и техника полупроводников. 2000. Т. 34, вып. 11. С. 1281—1299.

7. Чистяков Ю. Д., Райнова Ю. П. Физико-химические основы технологии микроэлектроники. М.: Металлургия, 1979. 408 с.

8. Беляев Б. А., Изотов А. В. Исследование влияния упругих напряжений на анизотропию магнитных пленок методами ферромагнитного резонанса // ФТП. 2007. Т. 49, вып. 9. С. 1651—1659.

9. **Султонов Ш. Д., Юлдашев Н. Х.** Роль внутренних механических напряжений в формировании деформационных характеристик поликристаллических пленок *p*-(Bi_{0,5}Sb_{0,5})₂Te // Физическая инженерия поверхности. 2009. Т. 7, № 1–2. С. 123–129.

10. Коньков Н. В., Метелкин И. Н., Шнек В. М. Металлизация подложек вакуумным напылением с контролем внутренних напряжений на границе подложка—покрытие // Электронная техника, сер. "Электроника СВЧ", вып. 1 (415), 1989. С. 57—59.

11. Смолин В. К., Сысоев В. С., Уткин В. П. Способ получения алюминиевой фольги. Авт. свидетельство на изобретение № 965129, опубл. 1982.

12. Сологуб Л. В., Квасов Н. Н. Способ формирования структур полупроводник — диэлектрик. Пат. РФ № 1797411, опубл. 29.10.2000.

13. Кормишина Ж. А., Скупов В. Л., Смолин В. К. Влияние ультразвуковой очистки на микродефектную структуру кристаллов кремния // Новые промышленные технологии. 1999. Вып. 1–2. С. 9–12.

14. Скупов В. Д., Смолин В. К. Нетрадиционные методы обработки структур в технологии микроэлектроники // Новые промышленные технологии. 2004. Вып. 1. С. 6—10.

15. **Латышева Н. Д., Скупов В. Д., Смолин В. К.** Возможности управления свойствами слоев диоксида кремния при одновременном воздействии электрического поля и ультразвука // Новые промышленные технологии. 2003. Вып. 6. С. 31—32.

16. Гусев В. К., Тулина Л. И., Уткин В. П. Способ получения многослойных магнитных пленок. Пат. RU 2233350, опубл. 27.07.2004.

17. Способ изготовления слоистой пленки с высокой магнитной проницаемостью. Пат. Японии № 5060641, опубл. 02.09.93.

18. **Лапшин Р. В., Азанов П. В.** Устройство и способ получения наночастиц. Пат. РФ № 2 476 620, опубл. 27.02.2013.

19. Магнетизм наносистем на основе редкоземельных и 3d-переходных металлов: Хрестоматия / Под ред. В. О. Васьковского. Екатеринбург, 2007. 133 с.

20. Бучин Э. Ю., Коканов Д. А., Симакин С. Г. и др. Эффект магнитомиграции в гранулированных пленках Со-Си, осаждаемых ионно-плазменным методом // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39, вып. 12. С. 35–43.

21. **Чопра К. Л.** Электрические явления в тонких пленках. М.: Мир, 1972. 436 с.

22. Chopra K. L. Deposition of Thin Films. US Patent 3463667, publication 26.08.1969.

23. Смолин В. К., Уткин В. П. Способ контроля удельного поверхностного сопротивления тонких резистивных пленок в процессе нанесения. Пат. России 2032237, опубл. 27.03.1995.

24. Седаков А. Ю., Смолин В. К. Тонкопленочные элементы микроэлектроники: основы проектирования и изготовления. М.: Радиотехника, 2011. 168 с.

25. **Rabalais J. W., Al-Bayati A. H., Boyd K. J.** et all. Ion effects in silicon-beam epitaxy // Phys. Rev. B. 1996. Vol. 53. N. 16. P. 10781–10792.

26. **Wagner T. A., Oberbeck L., Bergmann R. B.** Low-temperature epitaxial silicon films deposited by ion-assisted // Material Science and Engineering B. 2002. Vol. 89. P. 319–322.

27. Herbots N., Hellman O. C., Cullen P. A. et all. Semiconductor-based heterostructure formation using low-energy ion beams Ion Beam Deposition (IBD) & Combined: Ion and Molecular Deposition (CIMD) // Deposition and Growth Limits for Microelectronics. ed. by Rubiolf G. W. American Institute of Physics, Conference Proceeding. New York, 1988, no. 167. 459 p.

28. **Marton D.** Film deposition from low-energy ion beams. Ed. Rabalais J. W. // Low Energy Ion-Surface Interaction. Wiley & Sons. 1994. 524 p.

29. **Degrote B., Vantomme A., Pattyn H.** et all. Hyperthermal effects on nucleation and growth low-energy ion deposition // Phys. Rev. B. 2002. Vol. 65. P. 195401-1—195401-11.

30. Габович М. Д., Плешивцев Н. В., Семашко Н. Н. Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза. М.: Энергоатомиздат, 1986. С. 152—202.

31. **Саенко В. А.** Устройства термоионного осаждения (обзор) // ПТЭ. 1985. № 3. С. 9–21.

32. Зиновьев В. А. Процессы на поверхности кремния при низкоэнергетическом воздействии в условиях молекулярнолучевой эпитаксии. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, ИФП СО РАН, 2004. 174 с.

33. Костин Е. Г. Применение разрядов в парах испаряемых металлов для осаждения пленок из ионизированного потока // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения (5). 2006. № 5. С. 131—135.

34. Валиев К. А., Маишев Ю. П., Шевчук С. Л. Реактивный ионно-лучевой синтез тонких пленок непосредственно из пучка ионов // Физическая инженерия поверхности. 2003. Т. 1, № 1. С. 27—33.

35. Данилин Б. С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. М.: Энергоатомиздат, 1989. 328 с.

36. Целуйко А. Ф., Зиновьев Д. В. и др. Магнетронное напыление пленок нитридов титана и хрома, стимулированное ВЧЕ-разрядом // Тр. Украинского вакуумного общества. Киев. 1995. Т. 1. С. 251—255.

37. **Рогачев А. А., Лучников П. А., Рогачев А. В.** Особенности формирования наноразмерных пленок из газовой фазы на начальной стадии роста // Наноматериалы и наноструктуры. 2010. Т. 1, № 1. С. 35–44.

38. **Лучников П. А.** Управление качеством вакуумных фторполимерных покрытий направленной технологической электронной обработкой // Матер. Междунар. научно-техн. конф. 14—17 ноября 2011 г., Москва INTERMATIC-2011. Ч. 4, МИРЭА. 2011. С. 151—166.

39. Степанов И. В., Кутолин С. А., Антонов М. И. и др. Исследование процессов получения и применения диэлектрических пленок на основе нитрида алюминия в МИП-транзисторах // Электронная техника. Сер. 12. 1970. № 5. С. 51–60.

40. Волик Н. Н., Кондаков М. И., Неустроев С. А. Структура и морфология поверхностных слоев AlN на сапфировых и полупроводниковых подложках // Тезисы докладов Всесоюзного совещания по широкозонным полупроводникам. Л., 1979. С. 87—88.

41. Ломовой В. В., Лукашик М. М., Никулин В. В., Точицкий Э. И. Способ выращивания алмазных пленок. Патент РФ № 2023325, опубл. 15.11.1994.

42. **Кучанов С. Н.** Способ нанесения вакуумного металлизированного покрытия на диэлектрические подложки. Патент РФ № 2052538, опубл. 20.01.1996.

43. Бажин А. И., Троцан А. Н., Чертопалов С. В. и др. Влияние режима магнетронного распыления и состава реакционного газа на структуру и свойства пленок ITO // Физическая инженерия поверхности. 2012. Т. 10, № 4. С. 343—349.

44. **Новицки Р. С.** Физическое распыление при изготовлении СБИС // Плазменная технология в производстве СБИС / Под ред. Н. Айнспрука, Д. Брауна. М.: Мир, 1987. С. 56.

45. Аржанников А. А., Куликова С. В., Москалева Н. Е. и др. Исследование возможности создания платинового термометра с ТКС, близким к значению его для платиновой проволоки // Приборы и системы управления. 1993. № 8. С. 8—10.

V. K. Smolin, Ph. D., Senior Researcher, niiis@niiis.nnov.ru, Research Institute of Measuring Systems (NIIIS) named after Yu. Ye. Sedakov

Nonthermal Activation of the Processes on a Substrate Surface in PVD Methods

Control over the morphological and structural properties of the growing films obtained by the gas phase or molecular beam deposition traditionally boils down to a change of the substrate temperature, energy of the deposited particles and material deposition rate. However, for manufacture of the devices for micro- and nanoelectronics high temperatures are often undesirable. The determinancy of the deposition process may be increased by introduction of the extra effects with a nonthermal activation enabling us to control the physical-chemical processes both in the drift space and on the substrate surface. This paper analyzes the nonthermal activation processes of the film deposition and growth, and demonstrates application conditions and the specified process efficiency.

Keywords: nonthermal activation, gas phase physical deposition, thin-film technology, VLSI production

Introduction

Obtaining of high-quality thin-film layers and coatings from metals, alloys, dielectrics and semiconductors is an important task for manufacture of the elements and devices in electronics, optics and highprecision mechanics. For example, in the technological processes involving manufacture of the integrated microcircuits with substonanometer norms about 30...60 % of the works are operations connected with obtaining of the thin-film layers for insulation and metallization systems [1].

Deposition of layers of a material in thin-film technology represents a sequence of the following events [2, 3]:

• generation of an atom-molecule state of substance;

- transportation (mass transfer) of the particles;
- interaction of particles with a substrate.

The last stage is often subdivided into two, separating the interaction of particles with a substrate and film growth, i.e. interaction of the deposited particles with a continuous layer of a film material. This separation of the stages of deposition of coatings is of a principle character both in case of a concrete synthesis, and of its modeling. The way of generation of the atom-molecule state of substance characterizes two classes of the processes of the physical vapor deposition (PVD): thermal evaporation and ion-plasma sputtering. In the first case the electric energy from the source is transformed into the thermal energy and then into the mechanical energy of particles due to the influence of such forces on the initial material as Joule heat, induction heating, burning of an electric arch, electron-beam heating, heating by a laser radiation in the visible light and near IR spectrum; in the second case - the electric energy of a source is transformed into the mechanical energy of particles.

Some researchers consider separately the class of the mixed processes of PVD, in which deposition of films is carried out by means of simultaneously evaporated and/or sprayed in vacuum directly or in low pressure plasma of the materials in the form of atomic and ion beams on the surface of a substrate without a change of their chemical compound.

In the given work the specific features of the nonthermal methods of activation for formation of thinfilm coatings are considered.

The traditional method of control of the morphological and structural properties of the films obtained by deposition from a gas phase or molecular beams consists in a change of the temperature of a substrate, energy of the deposited particles and speed of deposition [4-6]. During creation of structures for micro- and nanoelectronics application of high temperatures is undesirable. This causes a diffusive degradation of the concentration profiles of doping and can lead to strengthening of the uncontrollable factors, which cause nonreproductivity of the parameters [7]. It is possible to raise the determinancy of the deposition due to additional influences with a nonthermal character of activation, allowing us to control the physical-chemical processes in the drift region and on the substrate surface. Such actions can be:

- static deformation of a substrate by bending or excitation of its bending vibrations;
- influence of the electric and magnetic fields (for example, thermoionic deposition, field effect);
- irradiation of the surface of a substrate by impulses of UV radiation, which ensures photodesorption of the adsorbed gases.

Mechanical influences on a substrate

The most simple hardware method of activation of a film deposition is a mechanical influence (first of all bending) on a substrate.

 $Ni_{0,75}$ — Fe_{0,25} films were deposited in a plane focusing constant magnetic field on the glass substrates strained by a bend (the deflection of the substrates with size of 10 × 24 × 0,5 mm was ensured by a copper wire placed along the short side between the substrate and the holder, and was equal to 50 µm). Depending on the distribution of the elastic strains on the local sites of samples there was strengthening of the monaxonic anisotropy induced by the magnetic field and its full compensation with a simultaneous change of the direction of the axis of light magnetization [8].

One of the tasks of the semi-conductor tensometry is manufacture of the strain sensors with linear and symmetric deformation characteristics. Depending on a reason for nonlinearity it is compensated for by certain methods. The asymmetric property of the deformation characteristic of the film semi-conductor resistivestrain sensors, is most likely connected with the insufficiently studied internal mechanical strains in the films. In [9] the authors present a research of the static deformation characteristics of the polycrystalline films $(Bi_{0.5}Sb_{0.5})_{2}Te_{3}$, in which the structural-technological internal mechanical strains play a considerable role, and also offer methods for linearization and symmetrization of those characteristics. Preliminary deformation of the substrates was carried out with the use of an incurved substrate holder. A constant bending moment influenced the working site of a substrate, which caused a uniform deformation of the unilateral compression of the working site. When the substrate with the deposited film was released from the substrate holder, they returned to the initial non-deformed state, while the film was already under deformation equal by the value, but reversed by the sign, of the preliminary deformation of the substrate.

In [10] there are results of deposition of coatings of Cr(6...8 μ m)—Cu (40 nm) on the substrates from glass C49-2 with inflection (the corresponding strains measured after the deposition in a usual mode, but with the reversed sign). The substrates with thickness of 5 and 10 mm were bent up to the strains of accordingly ~5,9 \cdot 10⁶ and ~1,96 \cdot 10⁶ N/m². The residual strains in the substrates, which were deposited with the use of an inflection, decreased 5...6 times in comparison with those deposited without an inflection. The inflection resulted practically in a triple increase of the durability of the coupling of the coatings with the substrates.

In the method for obtaining of an aluminum foil for improvement of the quality and simplification of separation of the aluminum film from the substrate material a condensation is carried out on the elastic-deformed metal substrate from beryllium bronze with thickness of 0,2 mm [11]. A degreased substrate is placed in the installation chamber so, that its concave polished surface is turned to the evaporator; the deflection arrow is 15 mm and the size of the substrate is 50×60 mm. Separation of the condensate from the substrate occurs spontaneously during the moment of devacuumization of the chamber. Here, on a redistribution of the strains in the aluminum layer the natural oxide formation affects the external surface. The ultimate tensile strength of the foil with thickness of 6...10 μ m is $(1...2) \cdot 10^5$ N \cdot m⁻².

The conditions of input of ultra sonic oscillations from the oscillatory systems by means of metal working tools into the gas environments are inefficient. The specific wave resistance of the liquid environments is considerable (of water it is 3500 times more, than of gases), therefore big power is radiated from the oscillatory system into a liquid at the identical amplitudes of oscillations of the tool. Besides, in liquid environments a physical process appears and goes on - U3 cavitation, which ensures the maximal power impacts on solid bodies, therefore, a substrate is subjected to bend oscillations outside the working chamber of the deposition installation. It is subjected to bend oscillations during electrochemical sedimentation; "scoring" of the substrates can be carried out before and after sedimentation of a film with a view to ensure a decrease of the value of the surface charge in the semiconductor-dielectric structures or consolidation and decrease in deficiency, redistribution of the mechanical fields [12-15].

Influence of the external magnetic and electric fields

During imposition of a static magnetic field within the limits of ~50 Oe, oriented in parallel to the substrate surfaces, the processes of formation of the magnetic films are realized. The direction of the magnetic field determines the direction of the vector of magnetization and depending on this it is possible to receive anisotropic or isotropic films [16–17].

In [18] during obtaining of magnetic nanoparticles on a substrate, the deposition on the substrate surface of nanoparticles and their magnetization in the set direction are used, the substrates are moved to the gap of the magnetic conductor, in which a magnetic field is created by means of a constant magnet or an electromagnet. The above-mentioned cycle is repeated up to obtaining of the required average size of the nanoparticles. The accuracy of obtaining of this size is ensured due to duration of the sedimentation and magnetization. The average distance between the neighboring nanoparticles on a substrate is controlled by means of force of the magnetic field, and the form of the nanoparticles — by means of its direction.

The granulated magnetic films, just like other structures with magnetoresistance, are investigated actively with reference to the different-purpose sensors, computer memory and high density data carriers [19]. As a result of the research [20] the effect of magnetomigration of the basic and doped components was discovered in Co-Cu granulated films, deposited by the ion-plasma method under the influence of an external constant magnetic field with a gradient, directed via a normal to the substrate surface. A necessary condition for appearance of the effect is high mobility of the adatoms. Under the influence of the external field the diamagnetic and paramagnetic atoms migrate multidirectionally lengthways of its gradient. Using the effect it is possible to obtain thin magnetic films with a low content of the undesirable impurities, such as chlorine, hydrogen, carbon, argon, etc., possessing high diamagnetic susceptibility.

The external electric field turned on during the time of deposition of a film, often causes changes in its structure. Chopra K. L. [21] established, that under the action of the electric fields with intensity of $\sim 100 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ and over, applied along the substrate surface, the specific resistance of the growing film is less, than without the field. This is due to a change of the free energy in the presence of a charge, which influences the equilibrium form of a germinal islet (when the field is overlaid, instead of the spherical form the islet acquires the form of ellipsoid extended along the field vector). The effect is observed at the initial stage of deposition, till the film becomes physically continuous (it happens approximately at twice smaller thicknesses, than in the conditions of absence of the field). Accordingly, the specific resistance of the metal films decreases, and there is a possibility of obtaining of oriented films of semi-conductor compounds on non-oriented substrates [22].

In [23] the control of specific superficial resistance is offered during deposition of thin resistive films by means of samples-witnesses, taking into account the influence of the electric field of a voltage source of the measuring equipment on the growth of the resistive film. Efficiency of such a control is proved by the reduction of the influence of the random component of the controlled quantity [24].

Influence of the charged particles and various radiations on the surface of a substrate

An independent possibility of control over the film growth can be provided by the influence by a beam of ions on its surface during deposition [25-31]: to the already existing control parameters the energy of an ion beam is added, its density and duration of influence.

The ion influence can be carried out at the following stages:

- at the pre-growth stage due to the ion-stimulated reconstruction of the surface of a substrate;
- at the origin stage;
- at the stage of an inter-layer diffusion and accretion of the two-dimensional islets;
- at the stage of formation of a continuous layer.

For a traditional ion doping the energy of an ion beam from 10 keV up to 1 MeV is used, which is due to the necessity of formation of the structure areas at certain depths from the surface. The formation problems at such energy defects of the structure are solved by annealing. However, at high temperatures a diffusion degradation of the concentration profiles of doping occurs, which is undesirable for creation of the instrument structures for micro- and nano-electronics. Ion doping done directly during an epitaxial deposition of Si films, allows us to lower the energy of ions down to the value of about 0,1 keV. The current density is 0,1...0,6 μ A·cm⁻², and duration of influence – 0,25...0,6 s. The bottom limit is determined by the lag effect of the leak valve of the ionized gas (krypton), and top one - by the condition of preservation of ultrahigh vacuum in the chamber after the pulse action [32].

It was demonstrated [33], that the received films had a number of useful properties: higher reflective ability, adhesion, and wear resistance. Therefore it is possible to conclude, that the influence of the bombardment by similar ions on the structure of films (as well as on resistance) has a specific character and is not reduced to the additional heating caused by thermalization of the kinetic energy of the ions during braking.

The thermoionic deposition of coatings is widely applied for manufacture of integrated microcircuits, magnetic films, optical and wearproof layers. Deposition of films in the conditions, when a material arrives on a substrate in the form of atoms and ions, allows us to change the composition of a coating and its structure. The thermoionic deposition is carried out at the energies of particles of 0,2...2000 eV by supplying high frequency or constant displacement on a substrate. The share of the ionic component in a flow of the deposited particles is 1...10 %, at that, the ions move along the normal to the substrate surface, while the neutral particles go under the law of cosine [34].

One of the most widespread methods for obtaining of the intensive thermoionic plasma is electron-beam evaporation with an external injection of an electronic beam [35]. Its drawback is that an electronic gun and a crucible with the substance should be separated in space in order to avoid an electric breakdown of the gun owing to the pressure increase during evaporation. More simple and reliable ways with comparable efficiency of deposition are offered by the plasma electron beam systems, in which formation of an electronic

beam occurs at the surface of the evaporated substance [36]. An advantage of the plasma systems is that a gun breakdown is eliminated in them, because formation of a flow occurs in a gun with a plasma emitter, i.e. in absence of a solid-state negative electrode, on which a breakdown develops. Besides, the accelerating interval owing to high electroconductivity of plasma automatically reduces the sizes with a current growth in case of a pressure increase, which ensures an effective passage of the charged particles through it. The second important feature is absence of the transportation space between the gun and crucible, which makes the system noncritical to the energy of a beam and allows us to vary it over in a wide range, making it optimal from the point of view of the maximal efficiency of ionization of the working steam.

In [37, 38] it is shown, that the kinetics of the growth of polymericfluorine coatings from a gas phase is determined by the basic mechanisms of the secondary polymerization of the adsorbed molecules and fragments arriving to the surface, and radiating polymerization of the radiation-imparted molecular complexes, which incorporate into large 3D structural units of a cluster type and form a polymer structure. By a directed electronic processing of the growing layer of a polymericfluorine film it is possible to control the properties of the polymeric coating. In the field of the optimal temperatures of condensation the vacuum coatings have the most perfect structure. Here, during activation by an electronic-ion bombardment the groups of particles of macromolecules are formed, which migrate to the surface of the substrate and participate in polymerization with formation of radiating cross-section linkages of molecules. The vacuum polymericfluorine films obtained in HF plasma in the external electric field at 340...385 K are formed into a more dense ordered molecular structure and have the best electrophysical characteristics. An increase of the optical coefficient of the transmission of polymericfluorine coatings is observed, which is due to a decrease of the crystallinity and spherulitic order in the structure of the films.

Processing of the surface of a substrate with a growing film can be carried out by ultraviolet and laser radiation, which can be conveniently combined with the other ways of nonthermal activation.

During deposition by a jet evaporation of a number of compounds of a stoichiometric composition (CdS, ZnO, AlN, etc.) the probability of interaction of the components can be increased due to activation of one of them by means of an ultra-violet radiation [39, 40]. The formed mix of the molecules and atoms of nitrogen has a raised reserve of energy and enters into a chemical reaction with aluminum in the substrate zone.

In [41] it is proposed that during the growth of the diamond films from molecular beams a simultaneous influence should be applied to the initial substances and

the substrate of the light radiation (laser radiation with the wavelength of 193 nm) at a distance from the substrate smaller than the length of a free run of the molecules of the initial substances. This ensures obtaining of films and structures on their basis with the set properties by means of control over the growth at the level of the nuclear monolayers, and decrease of consumption of the initial substances.

In the method of deposition of coating [42] the bombardment of a substrate with positive ions of the gas discharge (helium, argon, nitrogen and air with energy of 1,5...3,5 keV) alternates with UV irradiation and a flow of electrons. An additional influence on the surface of the dielectric of UV radiation in the range of frequencies from $1 \cdot 10^{-15}$ up to $5 \cdot 10^{15}$ Hz encourages these processes, since the energy of the photons corresponding to this range of frequencies is equal to 4...20 eV and coincides with the energy of the bonds of the carbon compounds and metal oxides, which make the basis of most dielectrics. The given offer ensures an increase of the adhesive durability of the contact of the metalized coating and a dielectric substrate, prevents waste of the coating as a consequence of formation of a volume positive charge on the surface of the substrate due to compensation for the volume positive charge, strengthening of cleaning of the surface from the hydroxyl groups, organic pollution, and also due to chemical activation of the surface.

Influence of the composition of the gas environment in the working chamber during deposition of films

The composition of the gas environment in the plasma processes of deposition of films can influence their structural and electrophysical parameters. For example, in [43] it was established, that high partial pressure of oxygen (3...5%) in the mix of Ar + O₂ in case of a jet dispersion of a target from an alloy of indium (90%) and tin (10%) promoted formation of films with a structure of (111) on a glass substrate at 350 °C, while in pure argon the crystallites were oriented along direction of (100). The films with the structure of (100) had smaller resistance, than with (111), which is explained by a smaller distortion of the lattice from indium oxide, owing to a decrease of the share of oxygen introduced into it.

Presence in the working gas of such impurities as oxygen or nitrogen causes a vertical growth of the grains in the films of aluminum alloys during a magnetron dispersion [44]. A columnar structure determined the temperature coefficient of resistance (TCR) of the platinum films deposited in the oxygen-containing mixes. For the films with thickness of 1...3 μ m TCR was 0,00385 °C⁻¹, which coincided with TCR of platinum wire Pl-4 and exceeded the specified param-

eter for the films received as a result of dispersion in pure argon [45].

Thus, the use for formation of the physical and chemical structure of films in PVD methods of the processes of nonthermal activation can be effective and be applied in the technology for creation of nano- and microsystem products.

Conclusion

Atomistic character of the growth of films from a gas phase ensures possibility of obtaining of numerous alloys and compounds with normal and abnormal structures and properties, which have other values, than the massive samples. Unlike the traditional ways for control of the properties of the growing films, the determinancy of deposition is possible due to introduction of the additional influences with a nonthermal nature of activation, allowing to control the processes both in the drift space, and on the substrate surface.

The article gives a general idea about activation, however, the further theoretical research is necessary, which would allow us to consider the influence of impurities and pollution, materials of the substrates, combination of the method with another nonthermal activation, and the other conditions ensuring reproducibility of the results.

For realization of the considered techniques, which create preconditions for optimization of the technology for development of nano- and microsystem products, the basic types of installations can be used with additional units and intrachamber equipment, which do not require complex conditions for their application.

References

1. Beletskiy V., Kireyev V., Knyazev S. i dr., Primeneniye vakuumno-plazmennykh tekhnologiy v elektronike. *Sovremennaya elektronika*, 2012, no. 2, pp. 12–19.

2. Broudey I., Merey Dzh. Fizicheskiye osnovy mikrotekhnologii: Per.s angl. M.: Mir, 1985. 496 p.

3. Danilin B. S., Syrchin V. K. Magnetronnyye raspylitel'nyye sistemy. M.: Radio i svyaz', 1982. 72 p.

4. Venables J. A., Spiller G. D. T. and Hanbucken V. Nucleation and Growth of Thin Films. *Rep. Prog. Phys*, 1984, vol. 47, pp. 399–459.

5. **Voigtlander B.** Fundamental processes in Si/Si and Ge/Si epitaxy studient bu scanning tunneling microscopy luring growth. *Surfage Science Reports*, 2001, vol. 43, pp. 127–254.

6. **Pchelyakov O. P., Bolkhovtyanov Yu. B., Dvurechenskiy A. V.** i dr. Kremniy-germaniyevyye nanostruktury s kvantovymi tochkami: mekhanizmy obrazovaniya i elektricheskiye svoystva. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2000, vol. 34, vyp. 11, pp. 1281–1299.

7. Chistyakov Yu. D., Raynova Yu. P. Fiziko-khimicheskye osnovy tekhnologii mikroelektroniki. M.: Metallurgiya, 1979. 408 p.

8. **Belyayev B. A., Izotov A. V.** Issledovaniye vliyaniya uprugikh napryazheniy na anizotropiyu magnitnykh plenok meto-

dami ferromagnitnogo rezonansa. FTP. 2007, vol. 49, vyp. 9, pp. 1651–1659.

9. **Sultonov Sh. D., Yuldashev N. Kh.** Rol' vnutrennikh mekhanicheskikh napryazheniy v formirovanii deformatsionnykh kharakteristik polikristallicheskikh plenok r-(Bi_{0,5}Sb_{0,5})₂Te. *Fizicheskaya inzheneriya poverkhnosti*, 2009, vol. 7, no. 1–2, pp. 123–129.

10. Kon'kov N. V., Metelkin I. N., Shnek V. M. Metallizatsiya podlozhek vakuumnym napyleniyem s kontrolem vnutrennikh napryazheniy na granitse podlozhka-pokrytiye. *Elektronnaya tekhnika. Ser. Elektronika SVCH*, 1989, vyp. 1 (415), pp. 57–59.

11. Smolin V. K., Sysoyev V. S., Utkin V. P. Sposob polucheniya alyuminiyevoy fol'gi. Avt. svidetel'stvo na izobreteniye № 965129, opubl. 1982.

12. Sologub L. V., Kvasov N. N. Sposob formirovaniya struktur poluprovodnik — dielektrik. Pat. RF № 1797411, opubl. 29.10.2000.

13. Kormishina Zh. A., Skupov V. L., Smolin V. K. Vliyaniye ul'trazvukovoy ochistki na mikrodefektnuyu strukturu kristallov kremniya. *Novyye promyshlennyye tekhnologii*, 1999, vyp. 1–2, pp. 9–12.

14. **Skupov V. D., Smolin V. K.** Netraditsionnyk metody obrabotki struktur v tekhnologii mikroelektroniki. *Novyye promy-shlennyye technologii*, 2004, vyp. 1, pp. 6–10.

15. Latysheva N. D., Skupov V. D., Smolin V. K. Vozmozhnosti upravleniya svoystvami sloyev dioksida kremniya pri odnovremennom vozdeystvii edektricheskogo polya i ul'trazvuka. *Novyye promyshlennyye tecknologii*, 2003, vyp. 6, pp. 31–32.

16. Gusev V. K., Tulina L. I., Utkin V. P. Sposob polucheniya mnogosloynykh magnitnykh plenok. Pat. RU 2233350, opubl. 27.07.2004.

17. **Sposob** izgotovleniya sloistoy plenki s vysokoy magnitnoy pronitsayemost'yu. Pat. Yaponii № 5060641, opubl. 02.02.93.

18. Lapshin R. V., Azanov P. V. Ustroystvo i sposob polucheniya nanochastits. Pat. RF № 2 476 620, opubl. 27.02.2013.

19. **Magnetizm** nanosistem na osnove redkozemeľ nykh i 3d-perekhodnykh metallov: Khrestomatiya. Pod red. V. O. Vas'kovskogo. Yekaterinburg, 2007. 133 p.

20. Buchin E. Yu., Kokanov D. A., Simakin S. G. i dr. Effekt magnitomigratsii v granulirovannykh plenkakh Co–Cu, osazhdayemykh ionno-plazmennym metodom. *Pis'ma v ZHTF*, 2013, vol. 39, vyp. 12, pp. 35–43.

21. **Chopra K. L.** *Elektricheskiye yavleniya v tonkikh plenkakh*, M.: Mir, 1972. 436 p.

22. Chopra K. L. Deposition of Thin Films. US Patent 3463667, opubl. 26 avg. 1969 g.

23. Smolin V. K., Utkin V. P. Sposob kontrolya udel'nogopoverkh-nostnogo soprotivleniya tonkikh rezistivnykh plenok v protsesse naneseniya. Pat. Rossii 2032237, opubl. 27.03.1995.

24. Sedakov A. Yu., Smolin V. K. Tonkoplenochnyye elementy mikroelektroniki: osnovy proyektirovaniya i izgotovleniya. M.: Radiotekhnika, 2011. 168 p.

25. **Rabalais J. W., Al-Bayati A. H., Boyd K. J.** et all. Ion effects in silicon-beam epitaxy. *Phys. Rev. B.*, 1996, vol. 53, no. 16, pp. 10781–10792.

26. Wagner T. A., Oberbeck L., Bergmann R. B. Low-temperature epitaxial silicon films deposited by ion-assisted. *Mater. Science and Engineering B*, 2002, vol. 89, pp. 319–322.

27. Herbots N., Hellman O. C., Cullen P. A. et all., Semiconductor-based heterostructure formation using low-energyion beams Ion Beam Deposition (IBD) & Combined: Ion and Molecular Deposition (CIMD). Deposition and Growth Limits for Microelectronics. Ed. by Rubiolf G. W. American Institute of Physics, Conference Proceedings. New York, 1988, no. 167, 459 p. 28. **Marton D.** Film deposition from low-energy ion beams. Ed. Rabalais J. W., Wiley & Sons. *Low Energy Ion-Surgce Interaction*, 1994. 524 p.

29. **Degrote B., Vantomme A., Pattyn H.** et all. Hyperthermal effects on nucleation and growth low-energy ion deposition. *Phys. Rev. B*, 2002, vol. 65, pp. 195401–1-195401-11.

30. Gabovich M. D., Pleshivtsev N. V., Semashko N. N. Puchki ionov i atomov dlya upravlyayemogo termoyadernogo sinteza. M.: Energoatomizdat, 1986, pp. 152–202.

31. **Sayenko V. A.** *Ustroystva termoionnogo osazhdeniya (obzor)*. PTE, 1985, no. 3, pp. 9–21.

32. **Zinov'yev V. A.** *Protsessy na poverkhnosti kremniya pri nizkoenergeticheskom vozdeystvii v usloviyakh molekulyarno-luchevoy epitaksii.* Dis. ... kand. fiz.-mat. nauk. Novosibirsk, IFP SO RAN. 2004 g., 174 p.

33. **Kostin Ye. G.** Primeneniye razryadov v parakh isparyayemykh metallov dlya osazhdeniya plonok iz ionizirovannogo potoka. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki*. Ser.: Plazmennaya elektronika i novyye metody uskoreniya (5), 2006, no. 5, pp. 131–135.

34. Valiyev K. A., Maishev Yu. P., Shevchuk S. L. Reaktivnyy ionno-luchevoy sintez tonkikh plenok neposredstvenno iz puchka ionov. *Fizicheskaya inzheneriya poverklmosti*, 2003, vol. 1, no. 1, pp. 27–33.

35. **Danilin B. S.** *Primeneniye nizkotemperatumoy plazmy dlya naneseniya tonkikh plenok.* M.: Energoatomizdat, 1989. 328 p.

36. **Tseluyko A. F., Zinov'yev D. V.** i dr. Magnetronnoye napyleniye plenok nitridov titana i khroma stimulirovannoye VCHErazryadom. *Trudy Ukrainskogo vakuumnogo obshchestva*, Kiyev, 1995, vol. 1, pp. 251–255.

37. **Rogachev A. A., Luchnikov P. A., Rogachev A. V.** Osobennosti formirovaniya nanorazmernykh plenok iz gazovoy fazy na nachal'noy stadii rosta. *Nanomaterialy i nanostruktury*, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 35–44.

38. Luchnikov P. A. Upravleniye kachestvom vakuumnykh ftorpolimernykh pokrytiy napravlennoy tekhnologicheskoy elektronnoy obrabotkoy. *Mater. Mezhdunar. nauchno-tekhn. konf., 14–17 noyabrya 2011 g.*, Moskva INTERMATIC-2011. Ch. 4, MIREA, 2011, pp. 151–166.

39. **Stepanov I. V., Kutolin S. A., Antonov M. I.** i dr. Issledovaniye protsessov polucheniya i primeneniya dielektricheskikh plenok na osnove nitrida alyuminiya v MIP-tranzistorakh. *Elektronnaya tekhnika*. Ser. 12, 1970, no. 5, pp. 51–60.

40. Volik N. N., Kondakov M. I., Neustroyev S. A. Struktura i morfologiya poverkhnostnykh sloyev AlN na sapfirovykh i poluprovodnikovykh podlozhkakh. *Tezisy dokladov Vsesoyuznogo soveshchaniya po shirokozonnym poluprovodnikam*. L., 1979, pp. 87–88.

41. Lomovoy V. V., Lukashik M. M., Nikulin V. V., Tochitskiy E. I. Sposob vyrashchivaniya almaznykh plenok. Pat. RF N 2023325, opubl. 15.11.1994.

42. **Kuchanov S. N.** Sposob naneseniya vakuumnogo metallizirovannogo pokrytiya na dielektricheskiye podlozhki. Pat. RF N 2052538, opubl. 20.01.1996.

43. **Bazhin A. I., Trotsan A. N., Chertopalov S. V.** i dr. Vliyaniye rezhima magnetronnogo raspyleniya i sostava reaktsionnogo gaza na strukturu i svoystva plenok ITO. *Fizicheskaya inzheneriya poverkhnosti*, 2012, vol. 10, no. 4, pp. 343–349.

44. **Novitski R. S.** Fizicheskoye raspyleniye pri izgotovlenii SBIS. *Plazmennaya tekhnologiya v proizvodstve SBIS*. Pod. red. N. Aynspruka, D. Brauna, M.: Mir, 1987. 56 p.

45. Arzhannikov A. A., Kulikova S. V., Moskaleva N. Ye. i dr. Issledovaniye vozmozhnosti sozdaniya platinovogo termometra s TKS, blizkim k znacheniyu yego dlya platinovoy provoloki. *Pribory i sistemy upravleniya*, 1993, no. 8, pp. 8–10.

Элементы MHCT Micro-AND NANOSYSTEM TECHNIQUE ELEMENTS

УДК 621.363

Р. Ю. Дорофеев, нач. группы, e-mail: rdorof@yandex.ru, И. П. Смирнов, нач. сектора, А. А. Жуков, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр., А. С. Корпухин, канд. техн. наук, доц., ОАО "Российские космические системы"

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОБАЛКИ ВИБРАЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Поступила в редакцию 27.06.2015

Представлены результаты системных исследований характеристик вибрационного преобразователя электрического поля, экспериментально получены зависимости нагрузок, возникающих на экранирующем электроде вибрационного преобразователя электрического поля, от угла деформации этого электрода. Проведена расчетная оценка зависимости частотных показателей вариантов электродов вибрационного преобразователя электрических полей с различной геометрией от силовых характеристик.

Ключевые слова: вибрационный преобразователь электрического поля, микробалка, экранирующий электрод, изгибная жесткость, резонансная частота, амплитуда колебания

Введение

Современные тенденции развития космической отрасли России, связанные с применением создаваемых космических аппаратов (КА), характеризуются необходимостью повышения их ресурса и соответственно надежности бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРА) и оборудования. Одним из отрицательных факторов, влияющих на успешность решения данной задачи, является проблема электризации КА в орбитальных условиях. Воздействие статического электричества на КА приводит к накоплению зарядов, соответствующих потенциалам приблизительно 1...20 кВ. Вследствие электризации возникают электрические разряды, создающие интенсивные электромагнитные помехи, приводящие к повреждению элементов аппаратуры. Кроме того, активное использование в настоящее время в создании БРА достижений нанои микротехнологий, в том числе нано- и пикоспутников, снижает степень устойчивости применяемой аппаратуры к воздействию электромагнитных полей (особенно в случае применения бескорпусных и многовыводных микросхем и диэлектрических слоев в их составе с уменьшенной толщиной), что обусловливает необходимость решения задачи определения напряженности электрических полей для условий космического пространства малогабаритной датчико-преобразующей аппаратуры. Таким образом, актуальным является контроль за электростатической обстановкой и повышение защищенности радиоэлектронных компонентов бортовой аппаратуры от электрических полей с помощью аппаратуры с уменьшенными массогабаритными характеристиками.

Целью работы является создание малогабаритного высокочувствительного вибрационного преобразователя электрических полей, обеспечивающего контроль электризации поверхности КА в орбитальных условиях.

Задачами, позволяющими достичь поставленную цель, являются определение и оценка расчетно-экспериментальных характеристик и степени их влияния на чувствительность устройства контроля (вибрационного преобразователя) электростатической обстановки КА.

Современные конструкции устройств измерения полей

Большинство известных приборов для измерения напряженности электрического поля основаны на явлении электростатической индукции, которое заключается в том, что проводник, помещенный в электрическое поле, приобретает потенциал, зависящий от его положения и конфигурации, величины и геометрии поля. В измерительных системах регистрируемой величиной является разность потенциалов между проводниками, находящимися в разных точках пространства, или ток, возникающий на сопротивлении утечки между проводниками. Методы и устройства регистрации электрических полей различаются способами возбуждения этой разности потенциалов.

В настоящее время в РФ известны две ведущие школы по созданию и разработке устройств контроля электрических полей КА: ОАО "НПО ИТ" и Новосибирский государственный университет.

Принцип работы датчика Новосибирского государственного университета [1] (рис. 1) устроен следующим образом. Пластина из магнитомягкого материала с помощью катушки возбуждения, постоянного магнита и катушки обратной связи (1) приводится в колебательное движение на частоте механического резонанса. На другом конце пластины укреплен чувствительный электрод 2, подключенный к входному усилителю.

При колебаниях чувствительный электрод углубляется внутрь экранирующего корпуса (3) или выдвигается из него. При наличии электрического поля это приводит к изменению потенциала чувствительного электрода. После усиления и синхронного детектирования на выходе получается напряжение, пропорциональное напряженности электрического поля, имеющее соответствующий знак. Недостатком такого устройства является малая амплитуда механических колебаний, которая не превосходит 1 мм. Вследствие малой амплитуды скорость изменения площади поверхности чувствительного электрода dS/dt мала, что, по нашему мнению, недостаточно для определения потенциалов на КА меньше 1 кВ.

Известный датчик электрического поля "Зонд-ЗМ" (ОАО "НПО ИТ") [2, 3] имеет ряд недостатков, связанных с большими массогабаритными параметрами, такими как:

- габаритные размеры датчика $56 \times 30 \times 27$ мм;
- масса датчика 0,3 кг;
- ток потребления 0,3 А.

Принцип действия устройства измерения электрических полей вибрационного преобразователя, созданного в ОАО "Российские космические системы", основан, так же как и у устройства, описанного выше, на возбуждении механических колебаний (рис. 2), но конструктивно существенно отличается.



Рис. 1. Схема датчика напряженности электрического поля Fig. 1. Diagram of the electric field sensor



Рис. 2. Объекты исследования: a - 3D-модель вибрационного преобразователя электрических полей; b - принцип движения микробалки вибрационного преобразователя; 1 - катушка; 2 - чувствительный электрод; 3 - экранирующий электрод *Fig. 2. Objects of research:* a - 3D model of the electric fields of the

Fig. 2. Objects of research: a - 3D model of the electric fields of the vibration transducer; b - the principle of the movement microbeam of the vibration transducer: <math>1 - coil; 2 - sensitive electrode; 3 - shielding electrode

От низкочастотного генератора на катушки индуктивности подается переменное напряжение с определенной частотой, приводящее в колебательное движение заземленную микробалку (экранирующий электрод 3) на частоте механического резонанса. Так как обмотки катушек включены в противофазе и создают неоднородные магнитные поля, вызывающие магнитное взаимодействие между катушками и экранирующим электродом, то создаваемые ими магнитные потоки складываются, благодаря чему вдоль оси между катушками создается магнитное поле, амплитуда которого изменяется по синусоидальному закону. Это поле взаимодействует с экранирующим электродом, выполненным из ферромагнитного материала, заставляя перемещаться электрод в направлении максимума магнитного поля. При колебаниях экранирующий электрод З углубляется по оси чувствительного электрода (экспонирование) или выдвигается над ним (экранирование). При экспонировании заряженные частицы будут скапливаться на чувствительном электроде, что приводит к изменению потенциала чувствительного электрода 2. Ток утечки с чувствительного электрода через резистор поступает на вход усилителя. Значение измеряемой напряженности электрического поля у поверхности экранирующего электрода пропорционально измеряемой напряженности поля, т. е. информацией о его величине служит изменение под воздействием измеряемого поля напряжения между экранирующим электродом и электрическим полем. Конструкция описанного устройства имеет габаритные размеры $10 \times 10 \times 5$ мм, массу 40 г, ток потребления 30 мА.

Увеличение переменной площади чувствительного электрода, "освещенного" полем, повышает вероятность обнаружения заряда. В поле с напряженностью *E* находится чувствительный электрод площадью *S*, нормальной к полю, индуцированный на ней заряд определяется следующим выражением:

$$q = \frac{\varepsilon ES}{4\pi},\tag{1}$$

а потенциал электрода, обусловленный этим зарядом, будет

$$Q(t) = k \varepsilon E S(t), \qquad (2)$$

где S — площадь чувствительного электрода, "освещенная" полем; k — коэффициент формы, зависящий от геометрии электрода.

Таким образом, чувствительность тем выше, чем выше скорость изменения площади. Параметр S(t)/d(t) зависит от амплитуды колебаний и частоты при гармонических колебаниях.

Движение экранирующего электрода с максимальной амплитудой для придания высокой чувствительности устройств детектирования электрических полей вызывает наибольшие технические трудности и является предметом исследования данной работы.

Подготовка к проведению эксперимента

Для получения образцов экранирующих электродов из фольги магнитомягкой стали 79HM (толщиной 20 и 50 мкм) были выполнены заготовки, а затем методами двухсторонней фотолитографии и электрохимического травления из них изготовлены образцы — десять вариантов подвижных пластин различных геометрических конфигураций (рис. 3). На этих образцах были проведены исследования амплитуды перемещения хвостовиков экранирующих электродов, их резонансных частот и изгибной жесткости.

Методика проведения эксперимента

В основе методики измерения жесткостных характеристик экранирующего электрода вибрационного преобразователя электрического поля (ВМЭП) лежит применение цифровых высокоточных прецизионных весов, а также элементарной кинематической системы, связывающей образец ВМЭП и предметный столик весов. Благодаря вы-



Рис. 3. Геометрические формы образцов экранирующего электрода Fig. 3. The geometric shape of the shield electrode patterns

сокой точности измерительного инструмента, которым являются весы, возможно измерение очень малых нагрузок. Максимальным углом отклонения хвостовика микробалки для данной конструкции является угол 27° (соответствует перемещению 3,3 мм), что удовлетворяет задаче по обеспечению устройства необходимой амплитудой перемещения хвостовика экранирующего электрода в целях обеспечения высокой чувствительности датчика электрических полей. На максимальном угле отклонения хвостовика диапазон жесткости составлял от 1,63 до 33,94 мН для образцов с различной геометрической формой.

При измерении резонансных частот применялся гониометр и синусоидальный генератор сигналов. Путем варьирования частоты колебания микробалки с помощью гониометра осуществлялся поиск наибольшей амплитуды перемещений хвостовика микробалки. Частота, при которой достигалась наибольшая амплитуда перемещений хвостовика в данной конструкции, считалась резонансной для каждого из образцов. При наибольшей амплитуде, равной 3,5 мм колебаний хвостовика, диапазон частот составлял от 208 до 752 Гц.

Результаты

Для вариации геометрии образцов экранирующего электрода было создано десять вариантов подвижных пластин различных конфигураций (см. рис. 3). В ходе эксперимента подтвердилось, что у образцов, имеющих наименьшую изгибную жесткость при фиксированной амплитуде перемещения, оказывалась наименьшая резонансная частота собственных колебаний микробалки.

Эксперимент по определению зависимости силовых характеристик экранирующих электродов от толщины образца выявил следующее.

Нагрузка на хвостовике экранирующих электродов линейно зависит от толщины. Таким образом, при увеличении толщины образца с 20 до 50 мкм происходит увеличение изгибной жесткости экранирующего электрода вибрационного преобразователя, что приводит к увеличению резонансной частоты в среднем в 2,4 раза для геометрически одинаковых образцов. На рис. 4 представлена полученная силовая характеристика в виде зависимости нагрузки, воздействующей на экранирующий электрод, от изгибной жесткости.

Наряду с испытаниями были проведены расчеты коэффициента формы, чтобы определить зависимость резонансной частоты от геометрической формы экранирующего электрода [4]. При варьировании геометрической формы экранирующего электрода использовались два основных подхода. В первом подходе варьировалось расстояние между



Рис. 4. Силовая характеристика параметров экранирующих электродов толщиной 20 и 50 мкм: 1 — образцы толщиной 50 мкм; 2 — образцы толщиной 20 мкм

Fig. 4. Power characteristic parameters of the screening electrode thickness of 20 μ m and 50 μ m: 1 — samples with thickness of 50 μ m; 2 — samples with thickness of 20 μ m

эллипсовидным утолщением и основанием крепления электрода, во-втором — вертикальная полуось эллипсовидного утолщения экранирующего электрода. Расчет коэффициента формы электрода проводился путем разбиения сложной формы электрода на простейшие геометрические фигуры (прямоугольники, треугольник и др.). Ниже приведены формулы расчета коэффициентов геометрической формы прямоугольного треугольника и прямоугольника

$$K_{fT} = 2 \operatorname{ctg}^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) \operatorname{ctg}\left(\frac{\gamma}{2}\right) = 1 + 2 \frac{1 + \operatorname{ctg}(\alpha/2)}{1 - \operatorname{tg}(\alpha/2)}, \quad (3)$$

где а и ү — углы прямоугольного треугольника;

$$K_{f_{\Pi}} = 2\left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a}\right) = 4\left(k + \frac{1}{k}\right),\tag{4}$$

где a и b — стороны прямоугольника, k = a/b.

Методика расчета коэффициента формы простейших геометрических фигур изложена в работе [5].

В большинстве вибрационных устройств имеются встроенные генераторы для возбуждения механических колебаний электрода, что обусловливает необходимость наличия экранирующего электрода с резонансной частотой, соответствующей частоте генератора, в нашем случае генератор возбуждения механических колебаний работает на частоте 300 Гц. Рассчитанный коэффициент фор-



Рис. 5. Зависимость резонансной частоты образцов экранирующего электрода от геометрической формы

Fig. 5. Dependence of the resonant frequency samples shielding electrode from the geometrical shape



Рис. 6. Экранирующий электрод с нанесенной каплей токопроводящего клея

Fig. 6. The shield electrode with applying a drop of conductive adhesive



Рис. 7. Пример амплитудно-частотной характеристики образца экранирующего электрода

Fig. 7. Example of the amplitude-frequency characteristic of the sample of the shielding electrode

мы образцов экранирующих электродов, согласно формулам (3), (4) определил диапазон значений коэффициента формы, который составил от 48,15 до 62,39. Расчет образцов экранирующих электродов выявил линейную зависимость значения коэффициента формы от значения изгибной жесткости. Зависимость резонансной частоты от коэффициента геометрической формы представлена на рис. 5. Расчет показал, что при определенном изменении геометрической формы экранирующих электродов в месте крепления возможно моделировать резонансную частоту экранирующих электродов с точностью 5...10 Гц.

Для дополнительных исследований по увеличению амплитуды механических колебаний использована технология по наращиванию массы хвостовика экранирующего электрода (рис. 6).

Увеличение массы было достигнуто нанесением капли токопроводящего клея на край экранирующего электрода. Капля по массе подбиралась равной массе электрода и фактически увеличивала массу колеблющегося элемента в два раза. В зависимости от геометрической формы масса электродов находилась в диапазоне 3...7 мг, масса электродов с клеем 6...14 мг. В соответствии с изменением таких физических характеристик, как плечо и момент силы, перенос центра масс на край должен был увеличить перемещение хвостовика и, следовательно, амплитуду колебаний электрода. Увеличение массы хвостовика десяти образцов экранирующих электродов привело к двухкратному снижению резонансной частоты и совсем не изменило амплитуду механических колебаний. Эксперимент показал, что определенное увеличение массы хвостовика электрода приводит к управляемому изменению резонансной частоты и не влияет на амплитуду перемещения электрода.

В ходе экспериментов выяснилось, что все образцы имеют достаточно широкую полосу резонансных частот. Ширина полосы составляет порядка 5...6 Гц при максимальной амплитуде колебания экранирующего электрода (рис. 7). Наличие широкой полосы резонансных частот позволяет допускать некую погрешность в точности проектирования геометрической формы экранирующего электрода вибрационного преобразователя.

Заключение

Проведенные испытания и расчет позволяют оценить диапазон возможностей ВМЭП, акцентируя при этом внимание на высокой стабильности силовых характеристик подвижных экранирующих электродов и возможности изменения силовых характеристик микроактюаторов геометрическими методами. Измерения силовых характеристик балок ВМЭП позволили экспериментально получить зависимости нагрузок, возникающих на хвостовике балки преобразователя, от угла деформации этой балки. Полученные результаты позволяют судить о линейности силовой характеристики относительно угла перемещения балки электрического актюатора.

Таким образом, предложена и реализована методика измерения силовых характеристик экранирующих электродов вибрационных преобразователей электрических полей, подвергнутых воздействию контролируемой нагрузки.

Полученные данные принципиально важны и необходимы для проектирования устройств вибрационного типа, так как дают возможность создавать микроактюаторы с заранее заданными точностями амплитуды и частоты колебаний, что кроме того может позволять расширить спектр применения таких устройств.

Список литературы

1. Князев Б. А. Отчет по проекту "Новосибирский научно-образовательный консорциум по подготовке специалистов по приоритетным направлениям фундаментальных исследований и критическим технологиям на базе Новосибирского государственного университета и ведущих научных школ Новосибирского научного центра СО РАН". Новосибирск; Новосибирский государственный университет, 1999. С. 77—87.

2. А. с. 845119 СССР. Датчик электрического поля / Н. М. Пушкин, Ю. А. Брагин, А. А. Кочеев, А. Г. Игнатенко, А. А. Тютин, В. И. Гусельников, А. С. Машков. 2592727/18-09. Заявл. 20.03.78; опубл. 07.07.81. Бюл. № 29, 1981. 2 с.

3. А. с. 769455 СССР. Датчик электрического поля / Н. М. Пушкин, Ю. А. Брагин, А. А. Кочеев, А. Г. Игнатенко, А. А. Тютин, В. И. Гусельников, А. С. Машков, В. И. Струминский. 2701569/18-09. Заявл. 26.12.78; опубл. 07.10.80, 1980. Бюл. № 29. 2 с.

4. **Фетисова М. А.** Коэффициент формы как геометрическая характеристика // Молодой ученый. 2011. Т. 1. № 5. С. 105—107.

5. Коробко А. В. Геометрическое моделирование формы области в двумерных задачах теории упругости. М.: Изд-во ACB, 1999. 320 с.

6. Дорофеев Р. Ю., Жуков А. А. Особенности защиты бортовой аппаратуры космических аппаратов от электрического разряда на этапе ее схемотехнического проектирования // Тр. II Всероссийской научно-техн. конф. "Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий". 2—4 июня 2009 г. М.: Радиотехника, 2010. С. 140—149.

7. Козлов Д. В., Жуков А. А., Смирнов И. П., Шахнов В. А. Экспериментальное исследование силовых характеристик рабочего элемента тепловых микроактюаторов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. "Приборостроение". 2011. № 2. С. 84—94.

8. Королева В. А., Жуков А. А., Гоголинский К. В., Усеинов А. С. Оценка изгибной жесткости и деформации микроразмерных элементов устройств микросистемной техники // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 1. С. 39—42.

R. Yu. Dorofeev, Head of the Group of Engineers, e-mail: myhavkedah@mail.ru,
I. P. Smirnov, Chief of the Section of Engineers, A. A. Zhukov, Chief Researcher, Ph. D., Professor,
A. S. Korpukhin, Head of Department,

Joint Stock Company "Russian Space Systems" (JSC "RSS")

Computational and Experimental Evaluation of Characteristics Microbeam Vibrating Electrostatic Field Transducer

The results of system researches the characteristics of the vibration transducer of the electric field. Experimentally obtained depending loads arising on the shield electrode mikrobeams vibratory transducer electric field, depending on the thickness of the electrode. The dependence of the thickness of the electrode mikrobeams showed a linear relationship is also the dependence on the angle bending stiffness deformation of the electrode. Spend the estimate depending mikrobeams force characteristics with different geometry of the oscillation frequency performance options electrodes vibration transducer electrical fields. Experiment capacity mass end of the electrode showed no increase in the amplitude fluctuations of the electrode, but steady decrease in the resonant frequency. Determined bandwidth resonant frequencies at a fixed vibration amplitude, the range of 5...6 Hz bandwidth will allow to have an error in the selection and design geometry mikrobeams vibration transducer electrical fields.

Keywords: vibration transducer of the electric field, microbeam, shielding electrode, flexural stiffness, resonant frequency, the amplitude of the oscillation

Introduction

Development of the space branch in Russia, connected with application of space vehicles (SV) is characterized by the necessity to increase of their life time and reliability of the onboard equipment (ORE). One of the negative factors influencing the problem is electrization of SV in the orbital conditions. Influence of the static electricity leads to accumulation of the charg-

es corresponding approximately to the potentials of 1...20 kV. As a result electric discharges appear creating intensive electromagnetic hindrances, leading to damage of the elements of equipment. Besides, a wide application of nano- and microtechnologies for development of ORE, including nano- and pico-satellites reduces resistance of equipment to the influence of the electromagnetic fields (especially in case of application of unpackaged and multi-output microcircuits and dielectric layers in their composition with reduced thickness), which presents a problem of determination of the intensity of the electric fields for the space small-sized sensor-transforming equipment. Thus, the control over the electrostatic conditions and higher protection of the radio-electronic components of the onboard equipment from the electric fields by means of equipment with reduced weight-dimension characteristics is very important.

The aim of the work is development of a small-sized highly sensitive vibration modulator of the electric fields ensuring control of electrization on the surface of SV in the orbital conditions.

The tasks allowing us to reach the set target are determination and estimation of the settlement-experimental characteristics and the degree of their influence on the sensitivity of the control unit (vibration modulator) in the electrostatic conditions of SV.

Modern design devices for measuring fields

Most of the known devices for measurement of the intensity of the electric field are based on an electrostatic induction, which means that a conductor in the electric field acquires a potential depending on its position and configuration, size and field geometry. In the measuring systems the recorded value is the difference of the potentials between the conductors in different points of space, or the current arising through resistance of leak between them, while the methods and devices for recording of the electric fields differ by ways of excitation of this potential difference.

In Russian Federation there are two leading schools for development of control units for the electric fields of SV: NPO IT Co. and Novosibirsk State University.

The principle of operation of the transducer from Novosibirsk State University [1] (fig. 1) is the following. A plate from a soft magnetic material by means of a coil of excitation, constant magnet and feedback coil (1) is set in an oscillatory motion on the frequency of a mechanical resonance. On the other end of the plate a sensitive electrode 2 is fixed, connected to the input amplifier.

During fluctuations the sensitive electrode goes deep into the shielding case (3) or out of it. In the presence of the electric field this leads to a change of the potential of the sensitive electrode. After strengthening and synchronous detection at the output we get the voltage, proportional to the intensity of the electric field with a corresponding sign. The drawback of the device is a small amplitude of the mechanical oscillations, not exceeding 1 mm. Owing to the small amplitude the speed of change of the area of the surface of the sensitive electrode dS/dt is also small, and is not enough in SV for determination of the potentials less than 1 kV.

Zond-3M electric field sensor (NPO IT Co.) [2, 3] has certain drawbacks connected with big weight-dimension parameters, such as:

- dimensions $56 \times 30 \times 27$ mm;
- weight 0,3 kg;
- current consumption 0,3 A.

The principle of operation of the device for measurement of the electric fields of the vibration modulator developed by Russian Space Systems Co. is based, just like the one of the device described above, on the excitation of the mechanical oscillations (fig. 2), but differs essentially in its design.

Alternating voltage of certain frequency is supplied from the low-frequency generator to the inductance coils resulting in an oscillatory movement of the earthed microbeam (shielding electrode 3) on the frequency of a mechanical resonance. Since the windings of the coils are switched on in an antiphase and create non-uniform magnetic fields causing magnetic interaction between the coils and the shielding electrode, the created magnetic flows are summed up, thanks to which a magnetic field is created along the axis between the coils, the amplitude of which changes under the sinusoidal law. This field interacts with the shielding electrode made from a ferromagnetic material, forcing the electrode to move in the direction of the maximal magnetic field. During fluctuations the shielding electrode 3 goes deep along the axis of the sensitive electrode (exhibiting) or is put forward over it (shielding). During exhibiting the charged particles will accumulate on the sensitive electrode, which results in a change of the potential of the sensitive electrode 2. The leakage current arrives from it through the resistor to the amplifier input. The value of the measured intensity of the electric field at the surface of the shielding electrode is proportional to the measured field intensity, i.e. the information on its size is the change under the influence of the measured field of the voltage between the shielding electrode and the electric field. The device has dimensions of $10 \times 10 \times 5$ mm, weight of 40 g, current consumption of 30 mA.

An increase of the variable area of the sensitive electrode "illuminated" by the field raises the probability of detection of a charge. In a field with normal to field E intensity there is such an electrode with

area S and the induced charge is determined by the following expression:

$$q = \frac{\varepsilon ES}{4\pi},\tag{1}$$

and the potential of the electrode determined by this charge is

$$Q(t) = k \varepsilon E S(t), \qquad (2)$$

where S — the area of the sensitive electrode "illuminated" with the field.

Thus, the higher is the speed of change of the area, the higher is the sensitivity. S(t)/d(t) parameter depends on the amplitude of oscillations and frequency during the harmonious fluctuations.

Movement of the shielding electrode with the maximal amplitude intended to ensure high sensitivity to the devices for detection of the electric fields causes the greatest technical difficulties and is an object of research of the given work.

In order to obtain samples of the shielding electrodes intermediates were manufactured from the foil of 79 HM soft magnetic steel (with thickness of 20 and 50 μ m), and then the samples were made by the method of double-sided photolithography and electrochemical etching — ten versions of the movable plates of various geometrical configurations (fig. 3). These samples present the research of the amplitude of movement of the wiring tails of the shielding electrodes, their resonant frequencies and winding rigidity.

Method of the experiment

At the heart of measurement of the rigid characteristics of the shielding electrode of the vibration modulator of the electric field (VTEF) is application of digital high-precision scales and elementary kinematic system, connecting the VTEF sample and a little table of the scales. Thanks to high accuracy of the measuring tool, which the scales are, measurement of very small loads is possible. The maximal deviation angle of the wiring tails of the microbeam for the given design is 27° (corresponds to movement of 3,3 mm), which satisfies the device with the necessary amplitude of movement of the wiring tail of the shielding electrode in order to ensure high sensitivity of the sensor of the electric fields. At the maximal angle of deviation of the wiring tail the rigidity range was from 1,63 up to 33,94 mH for the samples with varied geometry.

During measurement of the resonant frequencies a goniometer and a sinusoidal generator of signals were applied. By varying the frequency of oscillation of the microbeam with the help of the goniometer a search was done of the greatest amplitude of movement of the wiring tail of the microbeam. The frequency, at which the greatest amplitude of movements of the wiring tail was achieved in the given design, was considered resonant for each of the samples. At the greatest amplitude equal to 3,5 mm of the oscillations of the wiring tail the range of frequencies was from 208 up to 752 Hz.

Results

For variation of the geometry of the samples of the shielding electrode ten variants of the movable plates of various configurations were created (fig. 3). It was proved that the samples with the least flexural stiffness at the fixed amplitude of movement had the least resonant frequency of the own oscillations of the microbeam.

The experiment for determination of the dependence of the power characteristics of the shielding electrodes on thickness of a sample revealed the following facts.

The load on the wiring tail of the shielding electrodes linearly depends on the thickness of a sample. Thus, if it is increased from 20 up to 50 μ m, there is an increase of the flexural stiffness of the shielding electrode of the vibration modulator, which leads, on average, to 2,4 times increase of the resonant frequency for the geometrically identical samples. Fig. 4 presents a power characteristic in the form of the load influencing the shielding electrode on the flexural stiffness.

Alongside with the tests, calculations were done of the form factor, in order to determine the dependence of the resonant frequency on the geometrical form of the shielding electrode [4]. During its variation two basic approaches were used. In the first one the distance between the ellipse thickening and the basis of fastening of the electrode varied, in the second one the vertical semiaxis of the ellipse thickening of the shielding electrode varied. Calculation of the form factor of the electrode was done by breaking of the complex form of the electrode into elementary geometrical figures (rectangles, triangles, etc.). Below are the formulas for calculation of the geometrical form factors of a rectangular triangle and a rectangle:

$$K_{f_{\rm T}} = 2 \operatorname{ctg}^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) \operatorname{ctg}\left(\frac{\gamma}{2}\right) = 1 + 2 \frac{1 + \operatorname{ctg}(\alpha/2)}{1 - \operatorname{tg}(\alpha/2)}, \quad (3)$$

where α and γ – angles of a rectangular triangle;

$$K_{f\Pi} = 2\left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a}\right) = 4\left(k + \frac{1}{k}\right),\tag{4}$$

where a and b — the rectangle sides, k = a/b.

The method for calculation of the form factor of the elementary geometrical figures is described in [5].

In most vibration devices there are embedded generators for excitation of the mechanical oscillations of an electrode, which causes necessity of presence of a shielding electrode with the resonant frequency corresponding to the frequency of the generator. In our case the generator for excitation of the mechanical oscillations works on frequency of 300 Hz. The calculated form factor of the samples of the shielding electrodes according to formulas (3), (4) determined the range of the values of the form factor, which was from 48,15 up to 62,39. Calculation of the samples of the shielding electrodes revealed a linear dependence of the form factor on the flexural stiffness. Dependence of the resonant frequency on the geometrical form factor is presented in fig. 5. Calculation demonstrated that in case of a certain change of the geometrical form of the shielding electrodes in the attaching point it is possible to simulate their resonant frequency with accuracy of 5...10 Hz.

For additional research concerning the increase of the amplitude of the mechanical oscillations the technology of the weight growth of the wiring tail of the shielding electrode was used (fig. 6). It was reached by deposition of a drop of a current-conductive adhesive on the edge of the shielding electrode. The drop was equal to the weight of the electrode, and actually doubled the weight of the oscillating element. Depending on the geometrical form, the weight of the electrodes was within the range of 3...7 mg, the weight of the electrodes with glue - 6...14 mg. In accordance with the change of such physical characteristics as the shoulder and moment of force, the transfer of the centre of weight to the edge was to increase the movement of the wiring tail and, hence, the amplitude of oscillations of the electrode. The increase of the weight of the wiring tail of ten samples of the shielding electrodes led to a double decrease of the resonant frequency and did not change the amplitude of the mechanical oscillations. The experiment demonstrated that a certain increase of the weight of the wiring tail of the electrode lead to a controllable change of the resonant frequency, and did not influence the amplitude of movement of the electrode.

During the experiments it was found out, that all the samples had a wide enough band of the resonant frequencies. The width of the band was 5...6 Hz at the maximal amplitude of oscillation of the shielding electrode (fig. 7). Presence of a wide band of the resonant frequencies allows us to admit an error in the accuracy of designing of the geometrical form of the shielding electrode of the vibration modulator.

Conclusion

The conducted tests and calculations allow us to estimate the range of opportunities of VTEF, focusing

attention on high stability of the power characteristics of the movable shielding electrodes and possibility to change the power characteristics of the micro-actuators by geometrical methods. Measurements of the power characteristics of beams of VTEF allowed us to receive experimentally the dependences of the loads on the wiring tail of a beam of the transducer on the angle of its deformation. The results allow us to judge linearity the power characteristics concerning the angle of movement of the beam of the electric actuator.

Thus, the technique for measurement of the power characteristics of the shielding electrodes of the vibration modulators of the electric fields subjected to the influence of the controllable loads was proposed and realized.

The obtained data are important and necessary for designing of the devices of the vibrating type, because they provide opportunities for development of the micro-actuators with a preset accuracy of the amplitude and frequency of oscillations, which can expand the spectrum of applications of such devices.

References

1. Knjazev B. A. Otchet po proektu "Novosibirskij nauchnoobrazovatel'nyj konsorcium po podgotovke specialistov po prioritetnym napravlenijam fundamental'nyh issledovanij i kriticheskim tehnologijam na baze Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta i vedushhih nauchnyh shkol Novosibirskogo nauchnogo centra SO RAN". Novosibirsk: Novosibirskij gosudarstvennyj universitet, 1999, pp. 77–87.

2. A. s. № 845119. SSSR. *Datchik jelektricheskogo polja*. N. M. Pushkin, Ju. A. Bragin, A. A. Kocheev, A. G. Ignatenko, A. A. Tjutin, V. I. Gusel'nikov, A. S. Mashkov. 2592727/18-09. Zajavl. 20.03.78; opubl. 07.07.81. Bjul. № 29. 2 p.

3. A. s. Nº 769455. SSSR. Datchik jelektricheskogo polja. Pushkin N. M., Ju. A. Bragin, A. A. Kocheev, A. G. Ignatenko, A. A. Tjutin, V. I. Gusel'nikov, A. S. Mashkov, V. I. Struminskij. 2701569/18-09. Zajavl. 26.12.78; opubl. 07.10.80. Bjul. Nº 29. 2 p.

4. Fetisova M. A. Kojefficient formy как geometricheskaja harakteristika. *Molodoj uchenyj*, 2011, no. 5, pp. 105–107.

5. **Korobko A. V.** *Geometricheskoe modelirovanie formy oblasti v dvumernyh zadachah teorii uprugosti.* M.: Izd-vo ASV, 1999. 320 p.

6. Dorofeev R. Ju., Zhukov A. A. Osobennosti zashhity bortovoj apparatury kosmicheskih apparatov ot jelektricheskogo razrjada na jetape ee shemotehnicheskogo proektirovanija. *Tr. II Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoj konferencii "Aktual'nye* problemy raketno-kosmicheskogo priborostroenija i informacionnyh tehnologij". 2–4 ijunja 2009 goda. M.: Radiotehnika, 2010, pp. 140–149.

7. Kozlov D. V., Zhukov A. A., Smirnov I. P., Shahnov V. A. Jeksperimental'noe issledovanie silovyh harakteristik rabochego jelementa teplovyh mikroaktjuatorov. *Vestnik MGTU im. N. Je. Baumana. Serija Priborostroenie*, 2011, no. 2, pp. 84–94.

8. Koroleva V. A., Zhukov A. A., Gogolinskij K. V., Useinov A. S. Ocenka izgibnoj zhestkosti i deformacii mikrorazmernyh jelementov ustrojstv mikrosistemnoj tehniki. *Nano- i mikrosistemnaja tehnika*, 2011, no. 1, pp. 39–42. В. П. Драгунов, д-р техн. наук, проф., e-mail: drag@adm.nstu.ru,

В. Ю. Доржиев, аспирант, e-mail: dorzhiev@corp.nstu.ru,

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ И ДИНАМИЧЕСКИЙ PULL-IN-ЭФФЕКТ В МЭМС С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ МЕЖЭЛЕКТРОДНЫМ ЗАЗОРОМ

Поступила в редакцию 20.05.2015

При разработке МЭМС возникает необходимость в оценке диапазона управляемых перемещений их подвижных элементов и допустимых значений управляющих напряжений, превышение которых приводит к неконтролируемому перемещению подвижных элементов (pull-in phenomenon). В данной работе представлены результаты исследований особенностей функционирования МЭМС с изменяющимся межэлектродным зазором и гребенчатой конструкцией электродов при произвольных начальных условиях с учетом электромеханических взаимодействий и инерционных свойств системы. Анализ проводили в линейном и нелинейном для возвращающей силы приближениях. Показано, что в переходном режиме эффект схлопывания можно наблюдать в данных МЭМС и при напряжениях источника питания меньших критического, которые определяются из условия статического равновесия. Получены выражения, позволяющие определить область начальных условий (смещений и скоростей), при которых эффект схлопывания электродов еще не проявляется. Получено условие разбиения сепаратрисы на две области, ограничивающие области периодических колебаний, у которых смещение подвижного электрода не меняет знак. Рассчитаны зависимости достижимой глубины модуляции емкости от приложенного напряжения.

Ключевые слова: электростатическая сила, сепаратриса, глубина модуляции емкости, статическое равновесие, начальные условия, фазовая диаграмма

Введение

Развитие микросистемной техники привело к созданию целого ряда микроэлектромеханических устройств, нашедших широкое применение в различных отраслях науки и техники. При разработке микроэлектромеханических систем (МЭМС) возникает необходимость в оценке диапазона управляемых перемещений их подвижных элементов и допустимых значений управляющих напряжений, превышение которых приводит к неконтролируемому перемещению подвижных элементов (*pull-in phenomenon*).

В настоящее время оценку этих параметров в большинстве случаев проводят исходя из условия статического равновесия, а в тех случаях, когда учитывают и динамические свойства системы, полагают, что в начальный момент времени система находилась при нулевых начальных условиях, т. е. смещение и скорость подвижного электрода к моменту подачи электрического напряжения равнялись нулю [1—8].

В работе [9] был проведен анализ особенностей функционирования при произвольных начальных условиях двухэлектродных МЭМС с изменяющимся межэлектродным зазором. В данной работе проводится анализ особенностей функционирования МЭМС с изменяющимся межэлектродным зазором и гребенчатой конструкцией электродов при произвольных начальных условиях с учетом электромеханических взаимодействий.

Модель анализируемой МЭМС

Проанализируем поведение МЭМС на примере электромеханической системы, показанной на рис. 1, где l и 2 — неподвижные электроды; 3 — подвижный электрод; 4 — упругие подвесы; V_0 — приложенное напряжение; d_0 — расстояние между электродами в состоянии покоя; x — смещение подвижного электрода от положения в состоянии покоя.

При гребенчатой конструкции электродов подвижный электрод *3* перемещается между двумя неподвижными электродами *1* и *2*, электрически соединенными между собой [10, 11].





Будем полагать, что на подвижный электрод МЭМС действуют только две силы: сила упругости пружин и электростатическая сила.

Линейное приближение

При сделанных допущениях уравнение равновесия (баланс сил) в линейном для силы упругости пружин приближении для такой системы может быть представлено в виде

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = -kx + \frac{\varepsilon_0\varepsilon S}{2} \left[\left(\frac{V_0}{d_0 - x}\right)^2 - \left(\frac{V_0}{d_0 + x}\right)^2 \right], \quad (1)$$

где m — масса подвижного электрода; k — коэффициент квазиупругой силы; ε_0 — электрическая постоянная; ε — относительная диэлектрическая проницаемость среды между электродами; S площадь электрода.

Вводя безразмерные переменные $z = x/d_0$, $\lambda = C_0 V_0^2 / (2kd_0^2)$ и $\tau = \omega_0 t$ (здесь, $\omega_0 = \sqrt{k/m}$, а $C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon S/d_0$), выражение (1) можно представить в виде

$$\frac{d^2 z}{d\tau^2} + z = \frac{4\lambda z}{(1-z^2)^2}.$$
 (2)

В этих обозначениях поведение системы определяется одним параметром λ , а уравнение, связывающее λ с координатой положения равновесия \bar{z} , принимает вид

$$\Phi(\bar{z},\,\lambda) = \bar{z}(1-\bar{z}^2)^2 - 4\lambda\bar{z} = 0.$$
(3)

Анализ уравнения (3) показывает, что равновесие в системе возможно только если $\lambda \le 1/4$. Если же значение λ превысит 1/4, то при любых начальных условиях подвижный электрод в конце концов приблизится к неподвижному, произойдет соприкосновение электродов (статический *pull-in*-эффект) и система станет неуправляемой.

Данное критическое значение λ соответствует условию статического равновесия. При этом остается неясным, будет ли система устойчивой в динамическом режиме при произвольных начальных условиях, если использовать $\lambda < 1/4$.

Будем полагать, что в начальный момент времени $t_0 = 0$ смещение подвижного электрода $z = z_0$, а скорость смещения подвижного электрода $\dot{z} = v_0$.

Учитывая нелинейный характер электромеханических взаимодействий, анализ поведения электромеханической системы, описываемой уравнением (2), проведем с помощью исследования фа-



Рис. 2. Интегральные кривые — сепаратрисы МЭМС с гребенчатой конструкцией электродов, рассчитанные с использованием уравнения (5) при $\lambda = 0,15$ — (кривая 1), $\lambda = 0,2$ (кривая 2), $\lambda = 1/4$ (кривая 3)

Fig. 2. Integral curves — MEMS separatrices with comb electrodes' structure, calculated using equation (5) at $\lambda = 0,15$ — (curve 1), $\lambda = 0,2$ (curve 2), $\lambda = 1/4$ (curve 3)

зовых траекторий [12]. Для этого введем фазовые координаты

$$\upsilon = \frac{dz}{d\tau} \operatorname{I} \frac{d\upsilon}{d\tau} = \frac{4\lambda z}{\left(1 - z^2\right)^2} - z.$$
(4)

В обозначениях (4) с учетом симметрии задачи уравнение сепаратрисы можно представить в виде

$$\upsilon^2 = \frac{4\lambda}{1-z^2} - z^2 + 1 - 4\sqrt{\lambda}.$$
 (5)

На рис. 2 приведены интегральные кривые — сепаратрисы, рассчитанные с использованием уравнения (5) для нескольких значений λ . Если изображающая точка в начальный момент времени находится внутри области, ограниченной петлей сепаратрисы, то подвижный электрод в дальнейшем будет совершать периодические колебания (система останется управляемой). Если же изображающая точка в начальный момент времени окажется вне области, ограниченной петлей сепаратрисы, то подвижный электрод будет двигаться по направлению к неподвижному, пока не произойдет соприкосновение электродов и система станет неуправляемой (динамический *pull-in*-эффект).

Таким образом, используя уравнение (5), при заданном λ можно установить, какие начальные условия попадают в область, ограниченную соответствующей сепаратрисой, и, следовательно, гарантируют отсутствие эффекта схлопывания. Так, например, согласно уравнению (5) при $\upsilon_0 = 0$ эффект схлопывания будет отсутствовать, если на-

чальное смещение $|z_0| < z_{\text{max}} = \sqrt{1 - 2\sqrt{\lambda}}$.

Из рис. 2 видно, что при увеличении λ особые точки (центр *a* и седло *b* с координатами (0, 0) и $(\pm \sqrt{1-2\sqrt{\lambda}}, 0)$, соответственно) сближаются, область начальных условий, соответствующая периодическим колебаниям, сокращается, и при $\lambda = 0,25$ остается одна особая точка (седло). Она соответствует состоянию неустойчивого равновесия. В этом случае при любых начальных условиях подвижный электрод будет двигаться к неподвижному до соприкосновения электродов.

Подчеркнем, что согласно рис. 2, эффект схлопывания в такой системе может иметь место и при $\lambda < 0,25$, если координаты представляющей точки, соответствующие начальным условиям (z_0 , υ_0), будут находиться вне области, ограниченной соответствующей сепаратрисой.

На рис. 3 (сплошные линии) приведены зависимости смещения подвижного электрода от нормированного времени, рассчитанные с использованием выражения (2) при $\lambda = 0,15$, нулевой начальной скорости $\upsilon_0 = 0$, но не нулевом начальном смещении ($z_0 \neq 0$).

Видно, что колебательный режим системы наблюдается лишь тогда, когда координата изображающей точки, соответствующая начальным условиям (z_0 , 0), находится в области, ограниченной сепаратрисой, соответствующей $\lambda = 0,15$ (кривые 2 и 3). Если же начальное смещение превышает z_{max} в системе наблюдается эффект схлопывания (кривая 1).



Рис. 3. Зависимости смещения подвижного электрода от времени, рассчитанные при $\lambda = 0,15$ и следующих начальных условиях: $(1,05z_{max}, 0) -$ кривая l; $(0,999z_{max}, 0) -$ кривая 2; $(0,9z_{max}, 0) -$ кривая 3. Здесь $z_{max} = 0,4747666 -$ максимально допустимое значение начального смещения z, соответствующее $\lambda = 0,15$

Fig. 3. Displacement dependencies of the movable electrode on time, calculated at $\lambda = 0,15$ and at the initial conditions: $(1,05z_{max}, 0) - curve 1$; $(0,999z_{max}, 0) - curve 2$; $(0,9z_{max}, 0) - curve 3$. Here $z_{max} = 0,4747666 - the maximum allowable value of the initial displacement z, corresponding to <math>\lambda = 0,15$

При проведении анализа мы не учитывали возможные потери энергии. Для оценки влияния диссипативной составляющей введем в уравнение (1) слагаемое, учитывающее потери энергии механической системы. Предположив, что затухание пропорционально первой степени скорости смещения подвижного электрода (вязкое трение), выражение (2) можно представить в следующем виде:

$$\frac{d^{2}z}{d\tau^{2}} + \frac{1}{Q}\frac{dz}{d\tau} + z = \frac{4\lambda z}{(1-z^{2})^{2}},$$
(6)

где *Q* — добротность механической системы.

На рис. 3 (пунктирные кривые) приведены зависимости смещения подвижного электрода от времени, рассчитанные с использованием выражения (6) при Q = 5, $\lambda = 0,15$, $\upsilon_0 = 0$, но не нулевом начальном смещении. Видно, что на начальном этапе даже при такой низкой добротности системы учет потерь энергии в первую очередь проявляется на зависимостях смещения подвижного электрода от времени, рассчитанных для z, меньших $z_{\text{max}} = 0,4747666$. В то же время зависимость, рассчитанная для $z = 1,05 z_{max}$ (т. е. превышающего критическое значение всего на 5 %), практически не изменилась. Таким образом, можно предположить, что для 0 > 5 выражения, полученные ранее без учета потерь, будут достаточно адекватно учитывать влияние начальных условий на эффект схлопывания в линейном для силы упругости пружин приближении.

На этапе предварительного проектирования для анализа поведения МЭМС часто бывает достаточно знать лишь экстремальные характеристики сепаратрисы: максимальные левую и правую точки сепаратрисы с координатами (z_L , 0) и (z_R , 0), характеризующие диапазон контролируемых перемещений подвижного электрода, а также максимальные верхнюю и нижнюю точки сепаратрисы с координатами ($0, \pm v_{max}$), характеризующие диапазон допустимых начальных скоростей перемещения подвижного электрода. Анализ показывает, что для рассматриваемой системы

$$|z_L| = |z_R| = |z| = \sqrt{1 - 2\sqrt{\lambda}};$$
(7)
$$|v_{\text{max}}| = \sqrt{4\lambda - 4\sqrt{\lambda} + 1}.$$

Из системы (7), в частности, следует, что при заданном λ максимальное отношение $C_{\text{max}}/C_{\text{min}} = \eta$ (глубина модуляции емкости) для данной конструкции не превысит $0.5/\sqrt{\lambda}$.

На рис. 4 приведены соответствующие зависимости η , |z| и $|\upsilon_{max}|$ от λ . Из рисунка видно, что допустимые значения начального смещения и мак-



Рис. 4. Зависимости η , |z| и $|v_{max}|$ от λ Fig. 4. Dependencies of η , |z| and $|v_{max}|$ from λ

симальной скорости подвижного электрода, а также глубины модуляции емкости существенно зависят от λ .

Нелинейное приближение

В случае больших перемещений подвижных элементов МЭМС упругие подвесы начинают работать в нелинейном режиме [13]. В этом случае уравнение равновесия в нелинейном для силы упругости пружин приближении [14, 15] во многих случаях может быть представлено в виде

$$m\frac{d^{2}x}{dt^{2}} = -kx - k_{3}x^{3} + \frac{\varepsilon_{0}\varepsilon S}{2} \left[\left(\frac{V_{0}}{d_{0} - x}\right)^{2} - \left(\frac{V_{0}}{d_{0} + x}\right)^{2} \right], \quad (8)$$

где *k* и *k*₃ — соответственно линейный и нелинейный коэффициенты квазиупругой силы.

В безразмерных переменных уравнение (8) принимает вид

$$\frac{d^2 z}{d\tau^2} + z + \beta z^3 = \frac{4\lambda z}{(1-z^2)^2},$$
(9)

здесь $\beta = k_3 d_0^2 / k.$

В этих обозначениях поведение системы определяется двумя параметрами λ и β , а уравнение, связывающее λ с координатой положения статического равновесия \bar{z} , имеет следующий вид:

$$\Phi(\bar{z}, \lambda, \beta) = (1 + \beta \bar{z}^2)(1 - \bar{z}^2)^2 - 4\lambda = 0.$$
 (10)

На рис. 5 приведены зависимости \bar{z} от λ , рассчитанные с использованием уравнения (10) при нескольких значениях β . Случай $\beta = 0$ соответствует линейному приближению.

Видно, что при увеличении β от 0 до 2 изменения носят лишь количественный характер, а при $\beta > 2$ появляются и качественные изменения. Из условия статического равновесия (10) следует, что при $\beta > 2$ система останется управляемой, если значение λ будет меньше

$$\lambda_{\rm kp}^{\rm H} = \frac{1}{27\beta^2} (\beta + 1)(\beta - 1)^2,$$

а приложенное напряжение V_0 не превысит

$$V_{0, \, \mathrm{kp}}^{\mathrm{H}} = \sqrt{\frac{2kd_0^2}{27\,C_0}(\beta+1)\left(1-\frac{1}{\beta}\right)^2}$$

Согласно уравнению (10) при приложении такого напряжения в статическом случае смещение подвижного электрода достигнет

$$|\bar{z}_{\rm Kp}| = \sqrt{\frac{\beta-2}{3\beta}}$$

Если под действием приложенного напряжения (статический случай) смещение подвижного электрода превысит $|\bar{z}_{\rm kp}|$, то при любых начальных условиях подвижный электрод в конце концов неуправляемо приблизится к неподвижному и произойдет соприкосновение электродов. При увеличении β значение $|\bar{z}_{\rm kp}| \rightarrow 1/\sqrt{3}$.

чении β значение $|\bar{z}_{\rm Kp}| \rightarrow 1/\sqrt{3}$. На рис. 6 приведены зависимости $|\bar{z}_{\rm Kp}|$ и $\lambda_{\rm Kp}^{\rm H}$ от величины β , рассчитанные с использованием условия статического равновесия.



Рис. 5. Зависимости \overline{z} от λ , рассчитанные при следующих значениях β : $\beta = 0$ (кривая *1*), $\beta = 2$ (кривая *2*), $\beta = 5$ (кривая *3*), $\beta = 10$ (кривая *4*)

Fig. 5. Dependencies of \overline{z} from λ calculated at β : $\beta = 0$ (curve 1), $\beta = 2$ (curve 2), $\beta = 5$ (curve 3), $\beta = 10$ (curve 4)



Рис. 6. Зависимости $|\bar{z}_{\kappa p}|$ и $\lambda_{\kappa p}^{H}$ от значения величины β

Fig. 6. Dependencis of $|\overline{z}_{\kappa p}|$ and $\lambda_{\kappa p}^{H}$ from β

Чтобы определить будет ли система устойчивой в динамическом режиме при произвольных начальных условиях, если значение λ меньше $\lambda_{\text{кр}}^{\text{H}}$, необходимо построить соответствующую сепаратрису.

В данном случае с учетом (9), (10) и симметрии задачи уравнение сепаратрисы можно представить в виде

$$\upsilon^{2} = \left[\frac{(1-b^{2})(1+\beta b^{2})}{(1-z^{2})} - 1 - \frac{\beta}{2}(z^{2}+b^{2})\right] \times (z^{2}-b^{2}), \qquad (11)$$

где b — координата z крайней правой (или левой) точки области, ограниченной петлей сепаратрисы. Отметим, что |b| определяет значение максимально допустимого смещения подвижного электрода к неподвижным (а значит, и глубину контролируемой модуляции емкости) при заданном β .

Зная β и задаваясь значением необходимого максимального смещения (значением *b*), с помощью уравнения (11) можно построить соответствующую сепаратрису и определить область допустимых начальных условий, при которых система останется управляемой. Допустимое значение λ в этом случае можно найти, подставив *b* (вместо \bar{z}) в уравнение (10).

Если же изначально значение b неизвестно, а известно необходимое λ , то допустимое b можно найти, используя следующее выражение:

$$|b| = \sqrt{\frac{2\beta - 1}{3\beta} - \frac{A}{6\beta} - \frac{\beta^2 + 2\beta + 1}{6\beta A}} \rightarrow \frac{\beta^2 + 2\beta + 1}{-i\frac{1}{2\sqrt{3}\beta}} (A - \frac{\beta^2 + 2\beta + 1}{A}), \qquad (12)$$

где

$$A = \sqrt[3]{-\beta^3 - 3\beta^2 - 3\beta + 54\beta^2\lambda - 1 +}$$

$$\rightarrow \frac{}{+ 6\beta\sqrt{-3\lambda(\beta^3 + 3\beta^2 + 3\beta - 27\beta^2\lambda + 1)}}$$

На рис. 7 приведены сепаратрисы, рассчитанные с использованием уравнения (11) для нескольких значений β при $\lambda = 0,23$.

Видно, что в этом случае ($\beta \le 2$) изменения носят лишь количественный характер. При этом с увеличением β площадь, охватываемая петлей сепаратрисы при заданном λ , и максимальные ординаты сепаратрисы увеличиваются.

На рис. 8 приведены сепаратрисы, рассчитанные с использованием уравнения (11) при $\beta = 5$ и нескольких значениях λ .

Видно, что при $\beta > 2$ изменения носят уже и качественный характер. С увеличением λ площадь, охватываемая петлей сепаратрисы, и ордината, соответствующая нулевому смещению, уменьшаются, а затем сепаратриса разбивается на две симметричные односвязные области в областях положительных и отрицательных смещений подвижного электрода. Такие односвязные сепаратрисы ограничивают области периодических колебаний, у которых смещение подвижного электрода не меняет знак.

Разбиение на две области происходит, если при заданном $\beta > 2$ использовать

$$\lambda \ge \lambda^* = 0.03125(\beta + 2)^2/\beta.$$
 (13)

На рис. 9 приведены зависимости смещения подвижного электрода от времени, рассчитанные с



Рис. 7. Сепаратрисы для МЭМС с гребенчатыми электродами, рассчитанные с использованием уравнения (11) при $\lambda = 0,23$ и при следующих значениях β , равного: $\beta = 2$ (кривая *I*), $\beta = 1,3$ (кривая *2*), $\beta = 0$ (кривая *3*)

Fig. 7. Separatrices for MEMS with interdigital electrodes, calculated using equation (11) at $\lambda = 0,23$ and at the following values β equal to: $\beta = 2$ (curve 1), $\beta = 1,3$ (curve 2), $\beta = 0$ (curve 3)

использованием (9) при $\beta = 5$ и нескольких значениях λ . Расчеты проводили при нулевой начальной скорости ($\upsilon_0 = 0$), но не нулевом начальном смещении ($z_0 \neq 0$). При этом для каждой пары β и λ для сохранения колебательного режима начальное смещение z_0 выбиралось несколько меньшим значения *b*, рассчитанного с использованием (12). Из рис. 9 видно, что при увеличении λ колебания по форме все более отличаются от гармонических (ос-



Рис. 8. Сепаратрисы для МЭМС с гребенчатыми электродами, рассчитанные с использованием уравнения (11) при $\beta = 5$ и при следующих значениях λ : $\lambda = 0,275$ (кривая 1); $\lambda = 0,287$ (кривая 2); $\lambda = 0,305$ (кривая 3); $\lambda = 0,3062$ – (кривая 4), $\lambda = 0,312$ (кривая 5)

Fig. 8. Separatrices for MEMS with interdigital electrodes calculated by the equation (11) at $\beta = 5$ and λ : $\lambda = 0,275$ (curve 1); $\lambda = 0,287$ (curve 2); $\lambda = 0,305$ (curve 3); $\lambda = 0,3062$ – (curve 4), $\lambda = 0,312$ (curve 5)



Рис. 9. Зависимости смещения подвижного электрода от времени, рассчитанные с использованием уравнения (9) при $\beta = 5$ и λ , равной: $\lambda = 0,275$ ($z_0 = 0,623$) — (кривая *I*); $\lambda = 0,305$ ($z_0 = 0,551$) (кривая *2*); $\lambda = 0,31$ ($z_0 = 0,533$) (кривая *3*); $\lambda = 0,31$ ($z_0 = -0,533$) (кривая *4*)

Fig. 9. Displacement dependencies of the movable electrode from time calculated by using the equation (9) at $\beta = 5$ and λ equal to: $\lambda = 0,275$ ($z_0 = 0,623$) — (curve 1); $\lambda = 0,305$ ($z_0 = 0,551$) (curve 2); $\lambda = 0,31$ ($z_0 = -0,533$) (curve 3); $\lambda = 0,31$ ($z_0 = -0,533$) (curve 4)



Рис. 10. Зависимости достижимой глубины модуляции емкости η от λ , рассчитанные при следующих значениях β : $\beta = 0$ (кривая *1*); $\beta = 1,5$ (кривая *2*); $\beta = 2,1$ (кривая *3*); $\beta = 4$ (кривая *4*); $\beta = 6$ (кривая *5*); $\beta = 8$ (кривая *6*)

Fig. 10. Dependencies of the achievable depth of capacity modulation η from λ calculated at β : $\beta = 0$ (curve 1); $\beta = 1,5$ (curve 2); $\beta = 2,1$ (curve 3); $\beta = 4$ (curve 4); $\beta = 6$ (curve 5); $\beta = 8$ (curve 6)

таваясь периодическими), в окрестности нулевого смещения скорость смещения подвижного электрода уменьшается, а при $\lambda > \lambda^*$ в зависимости от начального смещения колебания локализуются либо в области положительных (кривая *3*), либо в области отрицательных (кривая *4*) смещений.

Анализ показывает, что при $\lambda > \lambda^*$ максимальное смещение подвижного электрода $|z_{max}|$ по модулю не превысит $1/\sqrt{2}$, а глубина контролируемой модуляции емкости η , соответственно, не превысит 2.

В тех случаях, когда параметры системы соответствуют сепаратрисам с одной односвязной областью, с увеличением β при заданном λ максимально достижимая глубина модуляции емкости η (определяемая максимально допустимым смещением подвижного электрода) возрастает.

На рис. 10 приведены зависимости достижимой глубины модуляции емкости η от λ , рассчитанные для нескольких значений β .

Видно, что в зависимости от β и λ достижимые значения контролируемой глубины модуляции емкости η существенно изменяются.

Заключение

Проведен анализ влияния начальных условий на поведение двухэлектродных МЭМС с изменяющимся межэлектродным зазором и гребенчатой конструкцией электродов. Анализ проводился с учетом электромеханических взаимодействий в линейном и нелинейном для возвращающей силы приближениях.

Проведено описание особенностей функционирования МЭМС данной конструкции с использо-

ванием математических моделей, позволивших найти аналитические соотношения.

Показано, что в переходном режиме эффект схлопывания может наблюдаться в таких МЭМС и при напряжениях источника питания, меньших $V_{0, \text{ кр}}$, которые определяются из условия статического равновесия.

Получены выражения, позволяющие в линейном и нелинейном для силы упругости приближении определить область начальных условий (смещений и скоростей), при которых эффект схлопывания электродов еще не проявляется.

Установлено, что при $\beta > 2$ возможно разбиение сепаратрисы на две односвязные области, ограничивающие области периодических колебаний, у которых смещение подвижного электрода не меняет знак.

Получено условие разбиения сепаратрисы на две области.

Рассчитаны зависимости достижимой глубины модуляции емкости от приложенного напряжения.

Список литературы

1. **Elata D., Bamberger H.** On the dynamic pull-in of electrostatic actuators with multiple degrees of freedom and multiple voltage sources // Journal of Microelectromechanical Systems. 2006. Vol. 15. N. 1. P. 131–140.

2. Nayfeh A. H., Younis M. I., Abdel-Rahman E. M. Dynamic pull-in phenomenon in MEMS resonators // Nonlinear Dynamics. 2007. Vol. 48. N. 1–2. P. 153–163.

3. Драгунов В. П., Остертак Д. И. Расчет латеральной составляющей электростатической силы в МЭМС // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2009. № 1. С. 229—233.

4. Драгунов В. П., Остертак Д. И. Электростатические взаимодействия в МЭМС с плоскопараллельными электродами. Часть I. Расчет емкостей // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 7. С. 37—41.

5. Драгунов В. П., Остертак Д. И. Электростатические взаимодействия в МЭМС с плоскопараллельными электродами. Часть II. Расчет электростатических сил // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 8. С. 40—47.

6. **Ouakad H. M., Younis M. I., Alsaleem F.** Dynamic response of an electrostatically actuated microbeam to drop-table test // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2012. Vol. 22. N. 9. P. 1–7.

7. **Ouakad H. M.** An electrostatically actuated MEMS arch bandpass filter // Shock and Vibration. 2013. Vol. 20. N. 4. P. 809-819.

8. Драгунов В. П., Доржиев В. Ю. Анализ влияния pull-in эффекта на параметры трехэлектродных МЭМС // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2013. № 2. С. 87—97.

9. Драгунов В. П., Драгунова Е. В. Особенности функционирования МЭМ систем // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 6. С. 43-52.

10. **Dorzhiev V., Karami A., Basset P., Dragunov V., Galayko D.** MEMS electrostatic vibration energy harvester without switches and inductive elements // Journal of Physics: Conference Series. 2014. Vol. 557. N. 1. P. 12126–12130.

11. Dorzhiev V., Karami A., Basset P., Marty F., Dragunov V., Galayko D. Electret-free micromachined silicon electrostatic vibration energy harvester with the Bennet's doubler as conditioning circuit // IEEE Electron Device Letters. 2015. Vol. 36. N. 2. P. 183–185.

12. Андронов А. А., Витт А. А., Хайкин С. Э. Теория колебаний. М.: Наука, 1981. 568 с.

13. Драгунов В. П. Нелинейная динамическая модель упругого элемента микромеханических систем // Нано- и микросистемная техника. 2004. № 10. С. 23—29.

14. **Zhang W., Baskaran R., Turner K. L.** Effect of cubic nonlin-earity on auto-parametrically amplified resonant MEMS mass sensor // Sensors and Actuators A: Physical. 2002. Vol. 102. N. 1–2. P. 139–150.

15. Драгунов В. П. Нелинейная модель упругого элемента микроэлектромеханических систем // Нано- и микросистемная техника. 2004. № 6. С. 19—24.

V. P. Dragunov, D. Sc, Professor, drag@adm.nstu.ru, V. Yu. Dorzhiev, Postgraduate Student, dorzhiev@corp.nstu.ru, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk

The Initial Conditions and Dynamic Pull-In Effect in Gap-Closing MEMS

During development of MEMS it is necessary to estimate the range of the controllable displacements of the moving elements and the allowable values of the control voltages, above which the system becomes uncontrollable (pull-in phenomenon). This paper presents the results of investigation of the specific features of functioning of MEMS with a comb electrode gap-closing structure under arbitrary initial conditions with the electromechanical interactions and inertial properties of the system. The analysis was conducted in the linear and nonlinear approximations for the elastic force. It was demonstrated that in a transient mode a pullin phenomenon may occur, when the power supply voltage is less than the critical value, which is determined by the condition of the static equilibrium. Analytical expressions were obtained allowing us to determine the sphere of the initial conditions (displacement and velocity), at which the collapse effect of the electrodes is not yet manifested. The condition of the separatrix splitting into two simply connected regions, limiting the field of periodic oscillations, in which the displacement of the movable electrode does not change sign, was determined. The dependences of the achievable depth of the capacitance modulation on the applied voltage were calculated.

Keywords: electrostatic force, separatrix, depth of capacitance modulation, static equilibrium, initial conditions, phase diagram

Introduction

Development of the microsystems technology led to the creation of a number of microelectromechanical devices have found application in science and technology. In the development of microelectromechanical systems (MEMS), a need arises to assess the range of controlled movements of their movable elements and allowable values of the control voltages, the excess of which leads to uncontrolled movement of the movable elements (pull-in phenomenon). The evaluation of these parameters is given in most cases on the basis of the conditions of static equilibrium, and taking into account the dynamic properties of a system, it is believed that initially it was in zero initial conditions, i.e., the displacement and the velocity of the movable electrode at the time of voltage application was equal to zero [1-8].

In [9], the analyze of operation of the two-electrode MEMS under the arbitrary initial conditions with changing interelectrode gap is given. In this study, an analysis of the features of functioning of MEMS with such a gap, and a comb electrode structure under the arbitrary initial conditions taking into account the electromechanical interactions is given.

The model of the analyzed MEMS

Let's analyze the behavior of MEMS on the example of the electromechanical system (fig. 1), where I and 2 — the fixed electrodes; 3 — movable electrode; 4 — elastic suspensions; V_0 — applied voltage; d_0 — the distance between the electrodes at a standstill; x — displacement of the movable electrode from a standstill.

At the comb-structure, the movable electrode 3 is moved between two fixed electrodes 1 and 2, which are electrically connected with each other [10, 11].

We assume that at the movable electrode are only affected by two forces: the elasticity of springs and electrostatic.

The linear approximation

Under these assumptions, the equation of equilibrium (balance of forces) in the linear approximation for elastic force of the springs can be written as

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = -kx + \frac{\varepsilon_0\varepsilon S}{2} \left[\left(\frac{V_0}{d_0 - x}\right)^2 - \left(\frac{V_0}{d_0 + x}\right)^2 \right], \quad (1)$$

where *m* — the mass of the movable electrode; *k* — the coefficient of quasi-elastic force; ε_0 — the dielectric constant; ε — the relative dielectric permittivity of the

medium between the electrodes; S — the area of the electrode.

Introducing the dimensionless variables $z = x/d_0$, $\lambda = C_0 V_0^2 / (2kd_0^2)$ and $\tau = \omega_0 t$ ($\omega_0 = \sqrt{k/m}$, a $C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon S/d_0$), the expression (1) can be written as

$$\frac{d^2 z}{d\tau^2} + z = \frac{4\lambda z}{(1-z^2)^2}.$$
 (2)

The behavior of the system is determined by the parameter λ and the equation relating λ to the position coordinate of the equilibrium \overline{z} takes the form:

$$\Phi(\bar{z}, \lambda) = \bar{z}(1 - \bar{z}^2)^2 - 4\lambda \bar{z} = 0.$$
 (3)

The analysis of the equation (3) shows that the balance in the system is possible if $\lambda \le 1/4$. If λ exceeds 1/4, the movable electrode will come closer to the fixed electrode at any initial conditions, their contact will occur (static pull-in-effect), and the system will become unmanageable.

This critical value of λ corresponds to the static equilibrium. It remains unclear whether the system is stable in the dynamic mode at arbitrary initial conditions if use $\lambda < 0.25$.

Let's assume that at the initial moment $t_0 = 0$ the displacement of the movable electrode is $z = z_0$, and the speed of its displacement is $\dot{z} = v_0$. Taking into account the non-linear nature of the electromechanical interactions, analysis of the behavior of the electromechanical system, described by equation (2), let's conduct it with the help of research of the phase trajectories [12]. For this we introduce the phase coordinates

$$\upsilon = \frac{dz}{d\tau}$$
 and $\frac{d\upsilon}{d\tau} = \frac{4\lambda z}{\left(1-z^2\right)^2} - z.$ (4)

In the notation (4), the equation of the separatrix taking into account the symmetry can be written as follows

$$\upsilon^2 = \frac{4\lambda}{1-z^2} - z^2 + 1 - 4\sqrt{\lambda}.$$
 (5)

Fig. 2 shows integral curves — separatrices calculated using equation (5) for several λ . If the representation point at the initial time is located within the area bounded by a separatrix loop, the movable electrode will continue to make periodic oscillations (the system will stay controlled). If the representation point at the initial time will be located outside of the area bounded by a separatrix loop, the movable electrode will move toward the fixed electrode until a contact and the system will become unmanageable (dynamic pull-in-effect).

As can be seen from the above, using equation (5), with a given λ , you can determine what the initial conditions fall within the area bounded by the separatrix, and therefore guarantee the absence of collapse. Thus, according to equation (5) at $v_0 = 0$ the collapse will be absent if the initial displacement is $|z_0| < z_{\text{max}} =$

$$=\sqrt{1-2\sqrt{\lambda}}$$

It can be seen that at increase of λ , the specific points (the center (*a*) and the saddle (*b*) with coordinates (0, 0) and $(\pm \sqrt{1-2\sqrt{\lambda}}, 0)$, respectively) converge. The area of initial conditions, corresponding to the periodic fluctuations, reduces. At $\lambda = 0.25$, the singular point (saddle) remains. It corresponds to an unstable equilibrium. At any initial conditions, the movable electrode moves to the fixed electrode until their contact.

Let's emphasize that the collapse in such a system can occur also at $\lambda < 0.25$, if the coordinates of the points corresponding to the initial conditions (z_0 , v_0) are located outside the region bounded by a separatrix.

Fig. 3 (solid lines) shows the dependencies of the displacement of the movable electrode from the normalized time, calculated using expression (2) at $\lambda = 0,15$, zero initial velocity $v_0 = 0$, nonzero initial displacement ($z_0 \neq 0$).

It is seen that the oscillation mode of the system occurs when the coordinate of the representative point corresponding to the initial conditions (z_0 , 0) is located in the region bounded by the separatrix, corresponding $\lambda = 0,15$ (curves 2 and 3). If the initial displacement is greater than z_{max} , a collapse is observed in a system (curve 1).

We did not take into account the possible losses of energy. To assess the effect of the dissipative component, let's introduce a term into the equation (1), taking into account the losses of energy of the mechanical system. Assuming that the damping is proportional to the first-order velocity of displacement of the movable electrode (viscous friction), the expression (2) can be written as:

$$\frac{d^2 z}{d\tau^2} + \frac{1}{Q} \frac{dz}{d\tau} + z = \frac{4\lambda z}{(1-z^2)^2},$$
 (6)

where Q – quality factor of the mechanical system.

Fig. 3 (dashed curves) shows the dependences of the displacement of the movable electrode from time

to time, calculated using the expression (6) at Q = 5, $\lambda = 0,15$, $v_0 = 0$, but at nonzero initial displacement. It is evident that in the initial stage, even at such a low Q factor of the system, the accounting of the energy losses is primarily occurs in the time dependences of the displacements of the movable electrode, calculated for z smaller than $z_{max} = 0,4747666$. At the same time, the dependence for $z = 1,05z_{max}$ exceeding the critical value for only 5 % became virtually unchanged. It can be assumed that for Q > 5 the expressions without losses adequately take into account the influence of the initial conditions on the collapsing in the linear approximation for the elastic force of the springs.

At the stage of the preliminary design for analysis of the behavior of MEMS, it is often enough to know only the extreme characteristics of the separatrix: maximum left and right points with the coordinates (z_L , 0) and (z_R , 0), describing the range of the controlled movements of the movable electrode, the maximum upper and lower points of the separatrix with the coordinates (0, $\pm v_{max}$), describing the range of the admissible initial velocities of its movement. The analysis shows that for the examined it is

$$|z_L| = |z_R| = |z| = \sqrt{1 - 2\sqrt{\lambda}};$$

$$|v_{\text{max}}| = \sqrt{4\lambda - 4\sqrt{\lambda} + 1}.$$
(7)

From the system (7), in particular, it follows that at a given λ , the maximum ratio $C_{\text{max}}/C_{\text{min}} = \eta$ (depth of capacity modulation) will not exceed $0.5/\sqrt{\lambda}$.

Fig. 4 shows the dependences η , |z| and $|v_{max}|$ on λ . It is seen that the allowable values of the initial displacement and the maximum speed of the movable electrode, as well as the depth of the depth of capacity modulation significantly depends on λ .

Nonlinear approximation

In the case of large displacements of the MEMS moving parts, the elastic suspensions begin to work in a nonlinear regime [13]. The equilibrium equation in a nonlinear approximation for elastic force of springs [14, 15] may be represented as

$$m\frac{d^{2}x}{dt^{2}} = -kx - k_{3}x^{3} + \frac{\varepsilon_{0}\varepsilon S}{2} \left[\left(\frac{V_{0}}{d_{0} - x}\right)^{2} - \left(\frac{V_{0}}{d_{0} + x}\right)^{2} \right],$$
(8)

39

where k and k_3 — linear and non-linear coefficients of the quasi-elastic force. In dimensionless variables, the equation (8) takes the form

$$\frac{d^2 z}{d\tau^2} + z + \beta z^3 = \frac{4\lambda z}{(1-z^2)^2},$$
(9)

where $\beta = k_3 d_0^2 / k$.

In this notation, the behavior of the system is determined by two parameters λ and β . The equation, relating λ with a position's coordinate of the static equilibrium \overline{z} , has a form as follows:

$$\Phi(\bar{z},\,\lambda,\,\beta) = (1+\beta\bar{z}^2)(1-\bar{z}^2)^2 - 4\lambda = 0.$$
(10)

Fig. 5 shows the dependencies \overline{z} from λ , calculated with (10) at several β . The case $\beta = 0$ corresponds to a linear approximation.

With an increase of β from 0 to 2, the changes have the quantitative in nature, but at $\beta > 2$, the qualitative changes are also occur there. From the condition of static equilibrium (10) it follows that the system will remain manageable, if λ less than

$$\lambda_{\rm kp}^{\rm H} = \frac{1}{27\beta^2} (\beta + 1)(\beta - 1)^2,$$

and the applied voltage V_0 not exceeds

$$V_{0, \,\mathrm{Kp}}^{\mathrm{H}} = \sqrt{\frac{2kd_{0}^{2}}{27C_{0}}(\beta+1)\left(1-\frac{1}{\beta}\right)^{2}}.$$

According to equation (10) at the same voltage in the static case, the displacement of the movable electrode reaches

$$|\bar{z}_{\mathrm{KP}}| = \sqrt{\frac{\beta-2}{3\beta}}.$$

If under the influence of the applied voltage (static case), the displacement of the movable electrode exceeds $|\bar{z}_{\rm Kp}|$, the movable electrode uncontrollable approaches to a fixed electrode at any initial conditions and the contact between them happens. By increasing β , it follows that $|\bar{z}_{\rm Kp}| \rightarrow 1/\sqrt{3}$. Fig. 6 shows the dependences $|\bar{z}_{\rm Kp}|$ and $\lambda_{\rm Kp}^{\rm H}$ on β calculated using the conditions of the static equilibrium.

To determine whether the system is sustainable in the dynamic mode at an arbitrary initial conditions, if λ is less than $\lambda_{\text{kp}}^{\text{H}}$, it is necessary to construct the corresponding separatrix. Using (9), (10) and the symme-

try equation, the problem of separatrix can be represented as

$$\upsilon^{2} = \left[\frac{(1-b^{2})(1+\beta b^{2})}{(1-z^{2})} - 1 - \frac{\beta}{2}(z^{2}+b^{2})\right] \times (z^{2}-b^{2}), \qquad (11)$$

where b — coordinate z of the far right (left) point of a region bounded by a separatrix loop. Let's note, that |b| defines the maximum allowable displacement of the movable electrode to the fixed one (a depth of the controlled modulation of capacity) at a given β .

Knowing β and setting the required maximum displacement (*b*), using the equation (11) we can construct a separatrix and define the scope of the admissible initial conditions under which the system is controllable. The allowable λ can be found substituting *b* (instead \bar{z}) to (10).

If originally *b* is not known, but we know the needed λ , the allowable *b* can be found using the expression

$$|b| = \sqrt{\frac{2\beta - 1}{3\beta} - \frac{A}{6\beta} - \frac{\beta^2 + 2\beta + 1}{6\beta A}} \rightarrow \frac{\beta^2 + 2\beta + 1}{-i\frac{1}{2\sqrt{3}\beta}} (A - \frac{\beta^2 + 2\beta + 1}{A}), \qquad (12)$$

where

$$A = \sqrt[3]{-\beta^3 - 3\beta^2 - 3\beta + 54\beta^2\lambda - 1} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{}{+ 6\beta\sqrt{-3\lambda(\beta^3 + 3\beta^2 + 3\beta - 27\beta^2\lambda + 1)}}.$$

Fig. 7 shows the separatrices, calculated using equation (11) for a number β at $\lambda = 0,23$.

It is seen that in the case of $(\beta \le 2)$, the changes have quantitative character. With increase of β , the area covered by a separatrix loop at a given λ and the maximum ordinates of the separatrix increase.

Fig. 8 shows the separatrices calculated using equation (11) at $\beta = 5$ and multiple λ . At $\beta > 2$, the changes have qualitative character. With the increase of λ , the area covered by a separatrix loop, and the ordinate corresponding to zero displacement, reduce, and then the separatrix becomes divided into two symmetrical simply connected regions in the areas of positive and negative displacements of the movable electrode. Such separatrices limit the scope of periodic fluctuations, where the displacement of the movable electrode does not change sign. Splitting into two regions occurs if at a given $\beta > 2$ to use

$$\lambda \ge \lambda^* = 0.03125(\beta + 2)^2 / \beta.$$
 (13)

Fig. 9 shows the dependencies of the displacement of the movable electrode depending on the time calculated using (9) at $\beta = 5$ and several λ . The calculations were carried out with zero initial velocity ($\upsilon_0 = 0$) and nonzero initial displacement ($z_0 \neq 0$). For each pair of β and λ , the starting displacement z_0 was chosen somewhat smaller than *b* for prevention of the oscillation mode, calculated using (12). It is seen that with increasing λ , the fluctuations more different from the harmonic by form (remaining periodically). In the vicinity of the zero displacement, the displacement speed of the movable electrode decreases, while at $\lambda > \lambda^*$, the fluctuations localize in the positive displacement area (curve β) or in the negative displacement area (curve 4), depending on the initial displacement.

The analysis shows that at $\lambda > \lambda^*$ the maximum displacement of the movable electrode $|z_{max}|$ by modulo does not exceed $1/\sqrt{2}$, and the capacity of the controlled modulation depth η accordingly not higher than 2.

When the parameters of the system correspond to separatrices with a simply connected region, at increase of β with the given λ , the maximum achievable depth of capacity modulation η , determined by the maximum displacement of the movable electrode, increases.

Fig. 10 shows the dependences of the achievable depth of capacity modulation η on λ , the calculated for several β . It can be seen that, depending on β and λ , the controlled depth of capacity modulation η changes substantially.

Conclusion

The influence of initial conditions on behavior of the two-electrode MEMS with variable interelectrode gap and a comb electrode structure was studied. The analysis was performed taking into account the electromechanical interactions in the linear and nonlinear approximations for the restoring force.

A description of the features of MEMS of such structure was made using the models that help to find the analytical relationships. It was shown that in such MEMS in the transitional regime, the collapse may occur when the power supply voltage is less than $V_{0, \text{ Kp}}$, which determined from the static equilibrium.

The expressions were obtained, allowing in the linear and nonlinear approximations for elastic force to determine the area of initial conditions (displacements and velocities) at which the collapse of the electrodes have not yet appeared. It was found that at $\beta > 2$, the splitting of the separatrix into two simply connected regions, limiting the field of periodic oscillations, in which the displacement of the movable electrode does not change sign, is possible. The condition of the separatrix splitting into two areas was obtained. The dependences of the achievable depth of capacity modulation of the applied voltage were calculated.

References

1. Elata D., Bamberger H. On the dynamic pull-in of electrostatic actuators with multiple degrees of freedom and multiple voltage sources, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2006, vol. 15, no. 1, pp. 131–140.

2. Nayfeh A. H., Younis M. I., Abdel-Rahman E. M. Dynamic pull-in phenomenon in MEMS resonators, *Nonlinear Dynamics*, 2007, vol. 48, no. 1–2, pp. 153–163.

3. Dragunov V. P., Ostertak D. I. Raschet lateral'noj sostavljajushhej jelektrostaticheskoj sily v MJeMS, *Nauchnyj vest-nik Novosibirskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta*, 2009, no. 1, pp. 229–233.

4. **Dragunov V. P., Ostertak D. I.** Jelektrostaticheskie vzaimodejstvija v MJeMS s ploskoparallel'nymi jelektrodami. Chast' I. Raschet emkostej, *Nano- i mikrosistemnaja tehnika*, 2010, no. 7, pp. 37–41.

5. **Dragunov V. P., Ostertak D. I.** Jelektrostaticheskie vzaimodejstvija v MJeMS s ploskoparallel'nymi jelektrodami. Chast' II. Raschet jelektrostaticheskih sil, *Nano- i mikrosistemnaja tehnika*, 2010, no. 8, pp. 40–47.

6. **Ouakad H. M., Younis M. I., Alsaleem I.** Dynamic response of an electrostatically actuated microbeam to drop-table test, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2012, vol. 22, no. 9, pp. 1–7.

7. **Ouakad H. M.** An electrostatically actuated MEMS arch band-pass filter, *Shock and Vibration*, 2013, vol. 20, no. 4, pp. 809–819.

8. Dragunov V. P., Dorzhiev V. Ju. Analiz vlijanija pull-in jeffekta na parametry trehjelektrodnyh MJeMS, *Doklady Akademii nauk vysshej shkoly Rossijskoj Federacii*, 2013, no. 2, pp. 87–97.

9. Dragunov V. P., Dragunova E. V. Osobennosti funkcionirovanija MJeM sistem, *Nano- i mikrosistemnaja tehnika*, 2015, no. 6, pp. 43–52.

10. Dorzhiev V., Karami A., Basset P., Dragunov V., Galayko D. MEMS electrostatic vibration energy harvester without switches and inductive elements, *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 557, no. 1, pp. 12126–12130.

11. Dorzhiev V., Karami A., Basset P., Marty F., Dragunov V., Galayko D., Electret-free micromachined silicon electrostatic vibration energy harvester with the Bennet's doubler as conditioning circuit, *IEEE Electron Device Letters*, 2015, vol. 36, no. 2, pp. 183–185.

12. Andronov A. A., Vitt A. A., Hajkin S. Je. Teorija kolebanij. Moscow, Nauka, 1981, 568 p.

13. **Dragunov V. P.** Nelinejnaja dinamicheskaja model' uprugogo jelementa mikromehanicheskih sistem, *Nano- i mikrosistemnaja tehnika*, 2004, no. 10, pp. 23–29.

14. Zhang W., Baskaran R., Turner K. L. Effect of cubic nonlinearity on auto-parametrically amplified resonant MEMS mass sensor, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2002, vol. 102, no. 1–2, pp. 139–150.

15. **Dragunov V. P.** Nelinejnaja model' uprugogo jelementa mikrojelektromehanicheskih sistem, *Nano- i mikrosistemnaja tehnika*, 2004, no. 6, pp. 19–24.

В. Ф. Лукичев^{1, 2}, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, и. о. директора, **Ю. Л. Шиколенко¹**, аспирант, ¹ Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники

² Физико-технологический институт РАН

ПОСТОЯННЫЕ ЗАПОМИНАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ ХРАНЕНИЯ ЗАРЯДА

Поступила в редакцию 02.06.2015

Представлен обзор полупроводниковой энергонезависимой памяти на основе хранения заряда и тенденции ее развития. Рассмотрены передовые технологические решения в сфере организации и механизмов работы ячеек flash-памяти. Проведен анализ существующих и перспективных типов ячеек flash-памяти. Исследованы особенности и предложена классификация элементов постоянных запоминающих устройств на основе хранения заряда.

Ключевые слова: плавающий затвор, туннелирование, инжекция, ячейка flash-памяти, SST, Charge-Trap, SONOS, TANOS, 3D HAND

Введение

Одним из наиболее активно развивающихся сегментов рынка микроэлектроники являются полупроводниковые запоминающие устройства (память). 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 данный момент созданы десятки типов элементов хранения заряда. Практически каждая компания разрабатывает собственную ячейку памяти исходя из требований к энергопотреблению, топологическим нормам и функциональным возможностям изделия. Для достижения наилучшей интеграции массива памяти в устройство разрабатывается архитектура построения и определяется механизм записи/стирания ячеек памяти. Многообразие механизмов записи/стирания, архитектур построения и типов ячеек памяти привело к необходимости обобщить и классифицировать постоянные запоминающие устройства (ПЗУ) на основе хранения заряда.

Классификация ПЗУ на основе хранения заряда

Полупроводниковая энергонезависимая память занимает особое место в области ЗУ. Если энергозависимая память способна увеличить скорость обработки информации, то полупроводниковая энергонезависимая память способна десятилетия хранить данные и обладает огромным потенциалом масштабирования и интеграции. На рис. 1 предложена классификация существующих видов энергонезависимой памяти.

Устройства, программируемые фотошаблоном ПЗУ (ROM). Типовые микросхемы ПЗУ (ROM) также называют программируемыми фотошаблонами или масочно-программируемыми, поскольку любые содержащиеся в них данные жестко прошивают в процессе производства с помощью фотошаблона. Фотошаблоны используют для создания транзисторов и соединяющих их на кремниевом кристалле металлических проводников, которые называют также слоями металлизации.



Рис. 1. Классификация энергонезависимой (nonvolatile memory) памяти Fig. 1. Classification of nonvolatile memory

УФ и электрически стираемые программируемые ПЗУ (EPROM, EEPROM). Программируемое ПЗУ (ППЗУ) — это транзистор, имеющий плавающий затвор. Этот затвор окружен очень тонким изолирующим слоем оксида кремния. Существенным отличием в функционировании элементов хранения EPROM (Erasable Programmable Read Only Memory) и EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory) является механизм стирания данных. Микросхемы памяти с ячейками типа EPROM оборудованы специальным кварцевым стеклом, через которое посредством ультрафиолетового излучения осуществляется удаление электронов с плавающего затвора. Для элементов ЕЕРROМ процесс стирания организован посредством специальных электрических сигналов и не требует дополнительных изменений корпуса микросхемы.

Flash-технология. Технология, известная как Flash, ведет свою родословную от технологии изготовления электрически стираемых ППЗУ (ЭСППЗУ). Первоначально название *flash* было присвоено устройствам, выполненным по этой технологии, чтобы отразить характерное для них чрезвычайно малое время стирания по сравнению с устройствами стираемых ППЗУ (СППЗУ). Компоненты, выполненные по *flash*-технологии, могут быть реализованы во множестве архитектур. Такие устройства могут иметь ячейки памяти, выполненные на транзисторе с плавающим затвором такой же площади, как в ячейках СППЗУ, но с гораздо более тонкими изолирующими слоями оксида кремния. Информацию в таких устройствах стирают электрическим способом, но при



Рис. 2. Кроссекция ячейки flash-памяти Fig. 2. Cross-section of flash-memory cell

этом только путем очистки больших секторов памяти (рис. 2).

Flash-память на сегодняшний день является самым распространенным и быстро развивающимся типом энергонезависимой полупроводниковой памяти.

Классификация *flash*-памяти по видам организации ячеек

Существует несколько вариантов организации ячеек *flash*-памяти, рассмотрим самые распространенные.

1. В архитектуре NOR используется классическая двумерная матрица проводников, в которой на пересечении строк и столбцов установлено по одной ячейке. В такой конструкции легко считать состояние конкретного транзистора, подав определенную комбинацию сигналов на один столбец и одну строку.

2. Архитектура NAND представляет собой трехмерный массив. В основе та же самая матрица, что и в NOR, но вместо одного транзистора в каждом пересечении установлен столбец из последовательно включенных ячеек. В такой конструкции получается много затворных цепей в одном пересечении. Плотность компоновки можно резко увеличить, однако алгоритм доступа к ячейкам для чтения и записи заметно усложняется.

3. В архитектуре DINOR используются суббитные строки в поликремнии. Эта архитектура отчасти является комбинацией NAND и NOR. Преимуществами ее являются низкий уровень рассеиваемой мощности и произвольный доступ.

4. В архитектуре AND битовые линии из металла заменены на диффузионные линии. Это обеспечивает уменьшение размера ячейки. В режиме произвольного доступа устройство работает медленнее, чем NOR, но может нормально функционировать при скорости операций в 50 нс. На рис. 3 представлены основные типы архитектур *flash*-памяти [1].

Классификация *flash*-памяти по механизмам записи/стирания

Все существующие ячейки *flash*-памяти работают на квантовых и инжекционных механизмах записи/стирания. В зависимости от архитектуры и типа применяемой ячейки производители используют различные механизмы записи/стирания для нахождения наилучших характеристик по энергопотреблению, скорости функционирования [2].



Рис. 3. Типы архитектур flash-памяти Fig. 3. Types of flash-memory architectures



Рис. 4. Классификация памяти по механизмам помещения/снятия заряда в соответствии с организацией доступа к данным Fig. 4. Classification of memory by the mechanisms of charge insertion/elimination in accordance with the organization of the data access

1. Квантовый эффект туннелирования Фаулера-Нордхейма (*Fowler*—*Nordheim* — *FN*).

2. Горячая инжекция электронов (*channel hot-electron injection — CHEI*).

3. Квантовый эффект туннелирования через полиоксид (*Enhanced tunneling through polyoxides — ETP*).

4. Горячая инжекция электронов в подложку (substrate hot — electron Injection — SHEI).

5. Горячая инжекция электронов со стороны истока (*source — side hot — electron injection SSI*).

6. Вторичная ударная ионизация, вызванная горячей инжекцией электронов (secondary impact ionization — SII) [15].

На рис. 4 предложена классификация памяти по механизмам помещения/снятия заряда в соответствии с организацией доступа к данным [1].

Классификация *flash*-памяти по типам ячеек

Опираясь на имеющиеся данные, рассмотрим существующие виды ячеек памяти (рис. 5).

Как видно из рис. 5, существуют десятки типов ячеек *flash*-памяти. Все они схожи по своим фундаментальным принципам работы, но по структуре, технологическому процессу производства и применяемым материалам существенно различаются. Предложено разделить все рассмотренные виды ячеек памяти на два класса: ячейки с поликремниевым плавающим затвором (Floating Gate — *FG*) и ячейки с ловушкой заряда (*Charge-Trap* — *CT*).

Ячейки памяти с плавающим затвором

В основе ячейки с плавающим затвором лежит полевой транзистор, имеющий, впрочем, некоторое отличие от классического аналога в виде еще одного, так называемого плавающего затвора. Этот затвор является неотъемлемой частью всех модификаций *flash*-памяти: он играет ту же роль, что и конденсатор в DRAM, т. е. хранит запрограммированное значение. На плавающий затвор путем квантового процесса туннелирования либо инжекции помещают заряд, который влияет на поле основного, или управляющего затвора. Таким образом, состояние транзистора (проводящее или непроводящее) зависит в данном случае от наличия либо отсутствия электронов на плавающем затворе. Плавающий затвор изолирован от стока, истока и управляющего затвора тончайшим слоем оксида кремния.

Во многом время хранения заряда, а также корректная работа ячейки *flash*-памяти определяются состоянием и свойствами диэлектрика. Вследствие дефектов в слое оксида, образовавшихся при производстве или в процессе эксплуатации, возникают эффекты избыточного удаления (*overerase*) и медленного стекания заряда (*slow leaking bits*), вызывающие снижение скорости чтения и даже битовые ошибки. Деградация слоя оксида в некоторых случаях влечет за собой появление "залипающих" битов (*stuck bits*) — ячеек, быстро теряющих заряд.

Ячейка ATW (Asymmetrical Tunnel Window). Особенность данного типа ячеек заключается в асимметричной толщине туннельного оксида вдоль канала. Это позволяет улучшить процесс программирования методом инжекции горячих электронов, уменьшить энергопотребление и повысить коэф-



Рис. 5. Классификация ячеек памяти

Fig. 5. Classification of memory cells

фициент инжекции к плавающему затвору *flash*-ячейки.

Ячейка TDI-LOCOS с дополнительной местной изоляцией. Такие ячейки, как правило, изготавливают для космической отрасли по технологии кремний на изоляторе. Их характерной особенностью является наличие дополнительной местной изоляции (LOCOS), способствующей минимизации токов утечки при увеличении общей дозы ионизирующего излучения (TDI).

Ячейка Two Transistor Thin Oxide Cell (двухтранзисторная ячейка с тонким слоем оксида). Второй



Рис. 6. Кроссекция двухтранзисторной ячейки памяти Fig. 6. Cross-section of the two-transistor memory cells



Fig. 7. SCSG memory cell

транзистор (транзистор доступа) в таких ячейках используется для изоляции ячейки от битовой линии и позволяет избавиться от многих недостатков, присущих однотранзисторным ячейкам. Напряжения стирания и программирования несколько снижены за счет формирования небольшой зоны более тонкого слоя оксида кремния (8,5 нм). Ток программирования достигает всего 10 пА значительный шаг вперед по сравнению с описанным выше типом ячейки (1 мА). В двухтранзисторной ячейке (рис. 6) все операции с плавающим затвором основаны на эффекте туннелирования.

> Чтобы запрограммировать ячейку, отрицательное высокое напряжение подается на управляющий затвор (электроны туннелируют на плавающий затвор), а чтобы стереть ячейку, положительное напряжение подается на сток (электроны туннелируют с плавающего затвора на сток).

> Ячейка SCSG (The source-coupled split — gate) — источник, сопряженный с расщепленным затвором. SCSG-ячейка создана для оптимальной интеграции в существующие технологические решения компании Motorola. Структура SCSGячейки (рис. 7) состоит из поликремниевого плавающего затвора со стороны стока и управляющего поликремниевого затвора со стороны истока, образующих структуру с расщепленным затвором. Программирование ячейки осуществляется горячей инжекцией электронов в стоковой области. Стирание выполняется путем экстракции электронов через туннельный слой, перекрывающий линию источника (данная особенность отражена в названии ячейки) за счет квантового эффекта туннелирования Фаулера-Нордхейма. Основной целью включения управляющего затвора в данную конфигурацию является преодоление эффекта избыточного удаления (overerase), свойственного однотранзисторным ячейкам [3].

> Ячейка памяти MoneT. Данный вид ячеек (рис. 8) получил свое название в честь французского импрессиониста Клода Моне. Компания Motorola разработала данную

конфигурацию ячеек памяти для увеличения плотности компоновки ячеек и скорости чтения. В основе данной разработки лежит предыдущая технология FETMOS (*floating-gate electron tunneling MOS*). Запись и стирание происходят за счет квантового эффекта туннелирования Фаулера—Нордхейма [4].

Ячейка SuperFlash 1-го поколения. Элемент хранения SuperFlash был реализован компанией SST (Silicon Storage Technology). В сравнении с описанными выше устройствами SuperFlash Cell выглядит немного иначе (рис. 9). Ячейки объединены вдоль линий слов (страницы) и линий бит (сектора). Ячейки, соединенные управляющими базами, образуют слова, ячейки, соединенные стоками битовые линии. Четные и нечетные биты, связанные общим истоком, называют страницей, которая удаляется как единый элемент. Страничная организация частично снимает вопрос перекрестного влияния операций удаления и программирования, ограничивая этот эффект пределами одной страницы.

Процесс удаления заключается в снятии с плавающего затвора отрицательного заряда за счет эффекта туннелирования Фаулера-Нордхейма между управляющей и плавающей базами. Во время удаления к управляющей базе (линия слова) прикладывается высокое напряжение (15 В), в то время как исток и сток ячейки заземляются. За счет выгнутой области у края плавающей базы образуются весьма благоприятные условия для туннелирования. Под воздействием сильного электрического поля электроны, составлявшие отрицательный заряд плавающего затвора, переносятся через тонкий слой диэлектрика — оксида на управляющую базу. В конце концов, на "истощенном" плавающем затворе формируется положительный заряд. При программировании необходимо сообщить плавающей базе отрицательный заряд, своим полем преграждающий путь электронам от истока к стоку. Здесь применяется эффект горячих электронов. Сток заземляется, а к истоку прикладывают напряжение 12 В; на управляющий затвор подается напряжение, которое открывает часть канала составного транзистора вплоть до области, контролируемой плавающей базой. Высокое напряжение и мощное электрическое поле, возникающее между истоком и стоком, генерируют так называемые горячие тепловые электроны, обладающие высокой энергией, достаточной, чтобы преодолеть барьер 3,2 эВ, создаваемый оксидным изолирующим слоем, и присоединиться к заряду плавающей базы. Процесс останавливается естественным путем, когда емкость плавающей базы исчерпывается.



Рис. 8. Ячейка памяти MoneT *Fig. 8. MoneT memory cell*



Рис. 9. Кроссекция ячейки SuperFlash 1-го поколения: УЗ — управляющий затвор (CG — control gate), ПЗ — плавающий затвор (FG — floating gate)

Fig. 9. Cross-section of SuperFlash-cell of the 1^{st} generation: CG – control gate, FG – floating gate)

Технология SuperFlash является абсолютным лидером по совокупности положительных качеств. Процесс производства ее прост — 14 масочных слоев против 19 или 21, требуемых для одно- и двухтранзисторных ячеек. Толстый слой оксида (40 нм) снижает вероятность возникновения утеч-ки электронов. Страничная организация уменьшает эффект взаимовлияния при программировании и стирании. Поскольку канал управляется плавающим затвором лишь частично, о такой неприятной вещи, как чрезмерное стирание, можно забыть. Более того, особая форма плавающего затвора снижает требования к напряжению программирования и стирания, а также повышает скорость выполнения данных операций [5].

Преимуществами SuperFlash 1-го поколения являются упрощенная конструкция, низкое энергопотребление, хорошая масштабируемость технологии от 1 мкм до 65 нм и низкая интенсивность отказов [5]. Ячейка SuperFlash 2-го поколения. Элементы хранения SuperFlash 2-го поколения применяют как в автономных ИС памяти, так и во встроенной *flash*-памяти с 2006 г. Эти ячейки также используют архитектуру расщепленного затвора и имеют плавающий затвор в качестве элемента хранения.

Улучшение SuperFlash 2-го поколения заключается в простоте формирования ячейки памяти в технологическом процессе. Уменьшено число масок, необходимых для создания ячейки памяти. Ячейка 1-го поколения была уменьшена с 180 до 110 нм. На рис. 10 (см. третью сторону обложки) представлена кроссекция SuperFlash 2-го поколения.

Ячейка SuperFlash 3-го поколения. По состоянию на середину 2012 г. SST и ее партнеры произвели более 400 млн интегральных схем, основанных на этой архитектуре. Эти ячейки также используют архитектуру расщепленного затвора и имеют плавающий затвор в качестве элемента хранения с пятью узлами для чтения, стирания и программирования (рис. 11, см. третью сторону обложки).

Процесс формирования ячейки 3-го поколения является более простым, чем формирование ячейки 2-го поколения, несмотря на наличие дополнительных узлов, повышающих производительность и масштабирование. Ячейки SuperFlash 3-го поколения сохраняют архитектуру 1-го поколения. Во время операции стирания, напряжение подается на стирающий затвор (EG), который стирает все ячейки за один импульс. Ячейки могут быть запрограммированы с помощью битовых линий или страниц относительно низким напряжением от линии источника (SL).

Ячейки памяти, выполненные по технологии Charge-Trap

Ячейки данного типа отличаются от ячеек с плавающим затвором использованием нитрида кремния (Si_3N_4) вместо поликристаллического кремния для материала накопления зарядов, что обеспечивает более высокое качество хранения заряда. Это происходит вследствие использования гладкой однородной пленки Si_3N_4 вместо поликристаллической, которая имеет неровности. Число гарантированных циклов перезаписи превышает 10 млн. В данной технологии решена проблема электростатических помех в ультрамалых ячейках памяти [5].

Ячейка SONOS (полупроводник—оксид—нитрид—оксид—полупроводник). Ячейка SONOS является разновидностью flash-памяти, выполненной по технологии Charge-Trap. Элемент хранения SONOS позволяет использовать более низкое напряжение при программировании и имеет большее число циклов перезаписи, чем *flash*-память на основе поликремния. Продукцию на основе технологии SONOS предлагают следующие компании: *Global Foundries, Cypress Semiconductor, Macronix, Toshiba* и United Microelectronics Corporation. На рис. 12 (см. третью сторону обложки) представлено наглядное сравнение ячейки типа SONOS и ячейки с плавающим затвором [6].

Ячейка TFT (Thin-Film Transistor) BE (bandgap engineered) SONOS (поликремниевый тонкопленочный транзистор SONOS)

Повышение качества туннельного слоя сделает данный тип ячеек наиболее пригодным для 3D-моделирования. Дополнительный слой нитрида позволяет улучшить инжекцию дырок, что, в свою очередь, повышает скорость стирания. Дополнительный слой BE-туннельного барьера обеспечивает эффективное стирание и исключает утечку при прямом туннелировании (записи).

Ячейка Ω -Gate TFT SONOS. Благодаря угловатой форме Омега-образного затвора (Ω -затвор) TFT SONOS повышена эффективность электрических полей, проходящих через туннельный оксид, тем самым улучшены скоростные характеристики памяти. Ω -Gate TFT SONOS показала отличную эффективность записи/стирания и увеличение объема памяти по сравнению с 2D-ячейками. Кроме того, в связи с большей управляемостью затвора, Ω -Gate TFT SONOS также показывает превосходную производительность транзисторов при меньшем пороговом напряжении.

Ячейка MONOS (металл—оксид—нитрид—оксид—полупроводник). Данный тип ячеек широко применяют в контроллерах смарт-карт. Их основное преимущество состоит в том, что в отличие от обычных ячеек дефект может возникнуть только в месте стока в связи с особенностями техпроцесса. Этим и объясняется значительное увеличение надежности с сохранением размера ячейки или даже с последующим уменьшением топологии. Применение металлического затвора позволяет увеличить скорость чтения до 10 нс в широком спектре температур (от -40 до более чем +150 °C). На рис. 13 (см. четвертую сторону обложки) представлена ячейка MONOS и ячейка с расщепленным затвором Splie Gate MONOS.

Преимуществами этого типа ячейки являются высокая скорость чтения и низкое энергопотребление при чтении (произвольный доступ на частоте выше 100 МГц), а также низкая стоимость.

Ячейка TANOS (титан—оксид алюминия—нитрид—оксид—полупроводник). Применение оксида алюминия в качестве блокирующего диэлектрика позволяет уменьшить порог напряжения стирания до менее чем 3 В. Данную технологию применяют для более качественной работы с низкими уровнями энергии заряда (1,28 эВ).

Ячейки памяти, выполненные по данной технологии, имеют лучшую помехоустойчивость и уменьшенное количество дефектов.

Считается, что данная технология является единственной реальной альтернативой технологии с плавающим затвором, но она плохо масштабируется, вследствие наличия металлического затвора, и не позволяет существенно уменьшить напряжение, необходимое для процесса стирания.

На рис. 14 (см. четвертую сторону обложки) представлены существующие виды ячеек памяти, выполненные по технологии Charge-Trap [7].

Многоуровневые запоминающие устройства (Multilevel Cell)

Существуют типы ячеек *flash*-памяти, способные хранить несколько уровней заряда. Предложено ввести отдельную классификацию многоуровневых ячеек, представленную на рис. 15.

Основной задачей многоуровневых ячеек является возможность хранения более чем одного бита информации в одной стандартной ячейке. Типичным направлением для развития является хранение четырех состояний в одной ячейке (четыре состояния из двух бит: 00, 01, 10 и 11).

Ячейка Strata Flash. Strata Flash за счет технологии MLC позволяет хранить два бита информации в каждой ячейке. Это достигается тем, что Strata Flash оперирует четырьмя уровнями заряда, которые кодируют два бита. Уровень заряда определяет напряжение, которое необходимо приложить к управляющему затвору, чтобы открыть транзистор. Скорость чтения одного блока для Strata Flash-памяти превосходит скорость чтения для обычной памяти более чем в 1,5 раза. Это связано с тем, что из одной ячейки памяти читаются сразу два бита, а не один, но в то же время прибавляется некоторое время задержки, связанное с расшифровкой значения битов. Это же относится и к записи/стиранию. На сегодняшний момент реализуется уже четвертое поколение Strata Flash-ячеек. Следующее поколение технологий — "три бита в ячейке" (TLC) и "четыре бита в ячейке" (QLC) потребует различения восьми и шестнадцати пороговых значений напряжения соответственно [8].

Ячейка MirrorBit. Технология ячеек MirrorBit позволяет хранить два бита данных в одной ячейке



Рис. 15. Основные типы многоуровневых ячеек памяти Fig. 15. Main types of multilevel memory cells

памяти и достигать двойной плотности устройства без ущерба для целостности данных или производительности системы. Компания AMD создала архитектуру ячейки MirrorBit, используя принципиально новую конструкцию и технологический процесс, позволяющий уменьшить стоимость и существенно повысить надежность *flash*-памяти. На рис. 16 (см. четвертую сторону обложки) представлена ячейка MirrorBit и ее архитектура.

Преимуществами ячейки MirrorBit являются двойная емкость, высокая производительность и надежность, увеличенная скорость чтения (от 3 до 4 раз) и записи (до 16), а также площадь массива, которая на 20 % меньше, чем у некоторых конкурентов при том же объеме.

Ячейка NROM. Данный тип ячеек выполнен по технологии Charge-Trap и имеет более высокую плотность записи, сокращенное число масок и повышенное число циклов перезаписи, в отличие от ячеек с плавающим затвором.

Элемент памяти NROM представляет собой MOSFET-транзистор с ловушкой заряда типа оксид—нитрид—оксид. Помещение заряда осуществляется посредством горячей инжекции электронов. Особенностью ячейки NROM является высокая эксплуатационная надежность, некорректное чтение (erratic bits, over erase phenomena) практически полностью исключено, ошибки возможны в случае дефектов в структуре ячейки. Возможность хранения 2 и 4 бит в одной ячейке независимо друг от друга, отличные показатели надежности, возможность организации реверсивного чтения делают ячейки NROM наиболее перспективными для хранения кода в современных интегральных схемах [9].

Заключение

Широкое распространение *flash*-памяти приведет к уменьшению ее стоимости, однако дальнейшая миниатюризация ставит проблему поддержки надежности при сохранении износоустойчивости. Для надежности *flash*-памяти масштаба менее 19 нм потребуются новые алгоритмы организации массива данных. Множество исследований в настоящее время посвящено архитектуре памяти, энергосбережению и высокоскоростным интерфейсам ввода-вывода. В ряде проектов проблемы масштабирования двумерной *flash*-памяти решаются за счет перехода к 3D-структурам и использованию многоуровневых типов ячеек. Сегмент Charge-Trap на мировом рынке неуклонно растет в связи с увеличением спроса на 3D NANDпамять, в которой данная технология особенно актуальна.

Несмотря на наличие новых видов энергонезависимой памяти (FRAM, MRAM, PRAM), с успехом применяющихся в различных изделиях микроэлектроники, их совокупная доля на рынке невелика. Основным видом ПЗУ, интегрируемых в ИМС, остается энергонезависимая память на основе хранения заряда.

Список литературы

1. Bez R., Camerlenghi E., Modelli A., Visconi A. Introduction to Flash Memory // Proc. of the IEEE, apr. 2003, vol. 91, pp. 489–502.

2. **Tewksbury S. K., Brewer J. E.** Nonvolatile memory technologies with emphasis on flash // Series Editors. IEEE Press Series on Microelectronic Systems. 2009. Vol. 2. N. 1. P. 143–157.

3. Chang K.-M., Cheng S., Kuo C. Modular Flash EEPROM Technology for 0,8 μ m High Speed Logic Circuits // Proc. of the IEEE. 1991. CICC. P. 18.7/1–18.7/4.

4. Kuo C., Yeargain J. R., Downey W., Ilgenstein K., Jorvig J., Smith S. An 80 ns 32K EEPROM Using the FETMOS Cell // IEEE J. Solid-State Circuits. 1982. Vol. 17, N. 5. P. 821–827.

5. Markov V., Kotov A., Levi A., Dang T., Tkachev Y. SuperFlash Memory Program / Erase Endurance // IEEE Nonvolatile Memory Technology Symposium. Nov. 2003. P. 231-234.

6. Yeh F., Liu Y., Wang X., Ma T. SONOS-Type Non – Volatile Memory with all Silicon Nitride Dielectric // 36th IEEE Semiconductor Interface Specialist Conference, Washington, DC, Dec. 1–3, 2005.

7. Lu Chih Yuan., Lue Hang Ting., Chen Yi Chou. State-ofthe-art flash memory devices and post-flash emerging memories. Science China., Special issue. May 2011. Vol. 54, N. 5. P. 1039–1060.

8. Atwood G., Fazio A., Mills D., Reaves B. Intel StrataFlash Memory Technology Overview // Intel Technology Journal. 1997. Q4. P. 1–8.

9. Eitan B., Cohen G., Shappir A., Lusky E., Givant A. 4-Bit per Cell NROM Reliability // IEEE International Electron Devices Meeting EDM Tech. 2005. P. 539–542.

V. F. Lukichev^{1, 2}, Corresponding Member of RAS, Acting Director,

Yu. L. Shikolenko¹, Postgraduate Student

¹ Moscow State University of Information Technologies, Radiotechnologies and Electronics

² Physical-Technological Institute of RAS

Read-only Memory Devices Based on Charge Storage

The article presents a review of the charge storage semiconductor nonvolatile memory and trends of its development. Advanced technological solutions in the sphere of the flash-memory cells are considered. Analysis is done of the existing and promising flash-memory cells. Different cell types and special features of the charge storage elements are investigated.

Keywords: floating gate, charge-trap, Fowler-Nordheim tunneling, channel hot-electron injection, flash memory cell

Introduction

The semiconductor memory is one of the rapidly developing microelectronic market's segments. Improvement of the technological processes and production scale the semiconductor memory led to its cost reduction and availability on the world market. Compactness, high integration capacity and low power consumption make it essential for all high-tech products.

Tens of charge storage elements were developed. Each company develops its own memory cell based on the power requirements, topological rules and functionality of the product. The building architecture is being developed and the write/erase mechanism of memory cells is being determined for the best integration of the memory array in to the device. The variety of write/erase mechanisms, the building architectures of memory cells led to the need to compile and classify the ROM devices based on charge storage.

Classification of the ROMs based of charge storage

The semiconductor non-volatile memory has a special place in the memory. If the volatile memory can increase the speed of information processing, it is capable of long-term data storing and has a great potential of scaling and integration. Fig. 1 shows the proposed classification of types of nonvolatile memory.

Devices programmable by ROM photomask. The typical ROM chips are also called "programmable photomasks" or "mask-programmable", since any data therein are fixedly flashed during the production process using a photomask. The photomasks are used to create transistors and metallic conductors connecting them in a silicon chip, which are also called "metallization layers".

UV and electrically erasable programmable ROM (EPROM, EEPROM). EPROM transistor having a floating gate, which is surrounded by a very thin insulating layer of silicon oxide. A significant difference in the operation of EPROM storage elements (Erasable Programmable Read Only Memory) and EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory) is a mechanism for data erasure. Memory chips with EPROM cells are equipped with a special quartz glass, through which the removal of electrons from the floating gate is done by the means of UV radiation. For EEPROM elements, the erasing of data is organized by special electrical signals and does not require additional changes to the body of the chip.

Flash-technology. The technology is descended from the manufacture of EEPROM. Originally, the name "flash" was given to the devices made by this technology to reflect the extremely small for them erasing time compared with EPROM devices. The components made by flash-technology may be implemented in a variety of architectures. Such devices may have memory cells on a transistor with the floating gate of the same area as in the EPROM cells, but with a much thinner insulating layers of silicon oxide. The information in such devices is erased electrically, but only by erasing of large memory sectors (fig. 2).

Flash-memory is the most common and fastest growing type of non-volatile semiconductor memory.

Classification of flash-memory by types of the cells' organization

There are several options for flash-memory cells organization, let's consider the most common:

1. The NOR architecture uses the classic two-dimensional matrix of conductors, in which a single cell is set at the intersection of rows and columns. In such a construction it is easy to assume the status of a particular transistor by applying a certain combination of signals to a column and one row.

2. The NAND architecture is a three-dimensional array. Its basis is the same matrix as in NOR, but instead of one transistor, a column of serially connected cells is set in each intersection. In this arrangement,

there a lot of gate circuits in a single intersection. The density of the layout can be dramatically increased, but the access algorithm to the cells for reading/writing becomes more complicated.

3. The DINOR architecture uses sub-bite lines in a polysilicon. In some measure, is a part of NAND and NOR combination. Advantages: low power dissipation, random access.

4. In the AND architecture, metal bit lines replaced by a diffusion lines. This enables reduction in size of the cell. In the random access device is slower than NOR, but may operate at operations speed of 50 ns. Fig. 3 shows the main types of flash-memory architectures [1].

Classification of flash-memory by writing/erasing mechanisms

All cells of flash-memory work on quantum and injection writing/erasing mechanisms. Depending on the architecture and type of a cell, the manufacturers use different writing/erasing mechanisms in order to find the best performance for energy consumption and the rate of operation [2]:

1. Fowler-Nordheim quantum effect of tunneling (FN).

2. The channel hot-electron injection (CHEI).

3. Enhanced tunneling through polyoxides (ETP).

4. The hot electron injection into the substrate (substrate hot electron injection - SHEI).

5. The hot electron injection from the source (source - side hot - electron injection - SSI).

6. The secondary impact ionization caused by hot electron injection (secondary impact ionization - SII).

Fig. 4 shows the classification of memory by the mechanisms of charge insertion/elimination, in accordance with the organization of the data access [1].

Classification of flash-memory by types of cells

Based on the available data, let's consider the existing types of memory cells (fig. 5). There are dozens types of flash-memory cells. They all are similar in terms of the fundamental principles of work, but on the structure, production and used materials vary considerably. It is proposed to divide all kinds of memory cells on cells with a polysilicon floating gate (FG) and cells with a charge trap (CT).

The memory cells with a floating gate

A field effect transistor underlie such a cell, having a contrast to classical analog of another floating gate. This gate is an integral part of all versions of flashmemory: it plays the same role as the capacitor in DRAM, i.e. stores the programmed value. A charge is placed on the floating gate by the quantum tunneling or injection that affects on the field of the main control gate. Thus, the state of the transistor (conductive or non-conductive) depends on the presence of electrons on the floating gate. The floating gate is isolated from the drain, source and control gate thin layer of silicon oxide.

The charge storage time and work of the flash-memory cell are determined by the state and properties of the dielectric. As a result of defects in the oxide layer formed during manufacture or operation, the over erase and slow leaking bits effects arise, causing a decrease in reading speed and bit errors. Degradation of the oxide layer in some cases results in the emergence of stuck bits — the cells that quickly lose its charge.

ATW cell (Asymmetrical Tunnel Window). The feature of this type of cells is in asymmetric thickness of the tunnel oxide along the canal. This improves the programming by injection of hot electrons, reduces power consumption and increases the rate of injection to the floating gate of flash-cell.

TDI-LOCOS cell with additional local insulation. Such cells are usually made for the space industry by silicon on insulator technology. Their characteristic feature is presence of the additional local insulation (LOCOS), facilitating to minimize the leakage currents at increase of the total dose of ionizing radiation (TDI).

Two Transistor Thin Oxide Cell. The second transistor (access transistor) in these cells is used to isolate a cell from the bit line, and eliminates the disadvantages of one-transistor cells. Erase and programming voltages somewhat reduced due to the formation of a small area over a thin layer of silicon oxide (8,5 nm). The programing current reaches only 10 pA — a significant improvement compared to the above-described type of cell (1 mA). In a two-transistor cell, all operations with a floating gate are based on the tunneling effect. To program a cell, a negative high voltage is applied to the control gate (the electrons tunneling to the floating gate) and to erase the cell, a positive voltage is applied to the drain (electrons tunneling from the floating gate to the drain).

SCSG cell (source-coupled split gate). SCSG-cell is designed for optimal integration of data storage elements in to the technological solutions of Motorola. Structure of SCSG cell consists of a polysilicon floating gate from the drain and the polysilicon control gate from the source, forming a split-gate structure. Programming of the cell is carried out by hot electron injection in the drain area. The erasing is performed by extracting of electrons through a tunnel layer, overlapping the line of a source (a feature is reflected in the name of the cell) by the Fowler-Nordheim quantum

tunneling effect. The main purpose of inclusion of the control gate in this configuration is to overcome the over erase effect, characteristic to the one-transistor cells [3].

Cell of MoneT. This type of cells gets its name in honor of the impressionist Claude Monet. Motorola has developed such configuration of the memory cells to increase cells component density and reading speed. The previous technology FETMOS (floating-gate electron tunneling MOS) forms the basis of this technology. Writing and erasing occur due to the Fowler—Nordheim quantum tunneling effect [4].

Super flash cell of the 1st generation. Storage element SuperFlash was developed by company SST (Silicon Storage Technology). In comparison with the above described devices, SuperFlash Cell looks a little different (fig. 9). The cells are combined along the lines of words (pages) and bit lines (sectors). The cells connected by the control base form words, the cells connected by the drains — bit lines. Even and odd bits associated by common source are called a page, which is erased as a single unit. The paging partly removes the question of cross coupling of erasing and programming operations, limiting it within a single page.

The erasing consists in removal of a negative charge from the floating gate by the Fowler - Nordheim tunneling between the control and floating bases. During the removal, the voltage of 15 V is applied to a control base (word line), while the source and drain of the cell are grounded. The favorable conditions for tunneling become formed due to the curved area near the edge of the floating base. Under the influence of a strong electric field, the electrons that make up the negative charge of the floating gate become transferred through a thin layer of dielectric oxide to the control base. The positive charge becomes formed on the "exhausted" floating gate. When programming, it is necessary to give the negative charge to the floating base, which stops by its field the way for the electrons from source to drain. It applies the effect of hot electrons. The drain becomes grounded, and the voltage of 12 V becomes applied to the source; the control gate receives the voltage, which exposes a part of channel of the composite transistor until the area controlled by the floating base. High voltage and powerful electric field between the source and drain generate so-called hot thermal electrons with have high energy, enough to overcome the barrier of 3,2 eV, created by the oxide insulating layer, and join the charge floating base. The process stops when the capacity of the floating base becomes exhausted.

SuperFlash technology is an absolute leader in the aggregate positive qualities. The process is simple — 14 mask layers against 19 or 21 one- and two-transistor cells. A thick layer of oxide (40 nm) reduces the chance of leakage of electrons. The paging reduces the inter-

ference in programming and erasing. Since the channel is controlled by the floating gate partially, the over-erase issue can be forgotten. Moreover, a special form of a floating gate reduces the need for programming and erasing voltage, increases the speed of these operations [5].

Advantages of SuperFlash of the 1^{st} generation are simplified design, low power consumption, good scalability of technology from 1 μ m to 65 nm and low failure rate [5].

SuperFlash cell of the 2^{nd} generation. SuperFlash storage elements of the 2^{nd} generation are used in stand-alone memory ICs and in the built-in flashmemory since 2006. These cells also use the architecture of the split gate and have a floating gate as a storage element. Improvement of SuperFlash of the 2^{nd} generation consists in the ease of formation of the memory cell. It reduced the number of masks to create a memory cell. The 1st generation cell is decreased from 180 to 110 nm. Fig. 10 (see the 3-rd side cover) shows the cross-section of the 2^{nd} generation SuperFlash.

SuperFlash cell of the 3rd generation. As of mid-2012, SST and its partners have produced more than 400 million ICs on this architecture. These cells also use the architecture of the split gate and have a floating gate as a storage element with five units for reading, erasing and programming (fig. 11, see the 3-rd side cover).

Formation of the 3^{rd} generation cell is simpler than formation of the cells of the 2^{nd} generation, despite the presence of the additional units, increasing performance and scalability. 3^{rd} generation SuperFlash cells preserve the architecture of the 1^{st} generation Super-Flash cells. During erasing, the voltage is applied to the erasing gate (EG), which erases all the cells in a single pulse. The cells may be programmed using bit lines or pages by a relatively low voltage source line (SL).

The memory cells made on Charge-Trap technology

The cells differ from the cells with the floating gate by using of silicon nitride (Si_3N_4) instead of the polycrystalline silicon for charge storage, which provides higher storage of a charge. This occurs because of the use of a smooth uniform film instead of polycrystalline Si_3N_4 , which has unevenness. The number of guaranteed write cycles exceeds 10 million. The technology solved the problem of electrostatic interferences in ultrasmall memory cells [5].

SONOS cell (semiconductor—oxide—nitride—oxide—semiconductor) is a kind of flash-memory made by Charge-Trap technology. SONOS storage element allows to use the lower programming voltage and has a larger number of write cycles than flash-memory on polysilicon. The devices based on SONOS technology are offered by: Global Foundries, Cypress Semiconductor, Macronix, Toshib, and United Microelectronics Corp. Fig. 12 (see the 3-rd side cover) shows a comparison of SONOS type cell and a cell with the floating gate [6].

TFT cell (Thin-Film Transistor) BE (bandgap engineered) SONOS (polysilicon thin film transistor SONOS). Improving the quality of the tunnel layer makes this type of cells most suitable for 3D-modeling. The additional nitride layer improves the holes injection, which enhances the erasing speed. An additional layer of BE-tunnel barrier provides effective erasing and prevents leakage at direct tunneling (writing).

 Ω -Gate TFT SONOS cell. Due to an angular forms of omega-shaped gate (Ω -gate) of TFTSONOS, it has increased efficiency of electric fields passing through the tunnel oxide, improved speed characteristics of memory. Ω -Gate TFT SONOS showed excellent writing/erasing efficiency and increase in the amount of memory as compared with 2D-cells. Due to the greater gate handling, it shows superior performance of transistors at a lower threshold voltage.

MONOS cell (metal—oxide—nitride—oxide—semiconductor). They are widely used in smart cards controllers. Their main advantage is that unlike to the conventional cells, the defect may only occur in the drain place due to the specific process technology. This explains the increase in reliability while maintaining the size of the cell, or even at a decrease in the topology. Application of the metal gate allows to increase reading, speed up to 10 ns in a wide temperature range (-40 °C to over 150 °C). Fig 13 (see the 4-th side cover) shows MONOS cell and the split gate cell — Split Gate MONOS.

The advantages of this type of cell is a high reading speed and low power consumption (random access at the frequencies above 100 MHz), low cost.

TANOS cell (titanium—aluminum oxide—nitride oxide—semiconductor). Application of aluminum oxide as a blocking dielectric allows to reduce erasing threshold voltage to less than 3 V. This technology is used to better work with the low levels of charge energy (1,28 eV).

The memory cells made by this technology, have better noise immunity and reduced number of defects.

It is believed that this technology is the only alternative to floating gate technology, but it does not scale well because of the presence of a metal shutter, and cannot significantly reduce the voltage required to erasing.

Fig. 14 (see the 4-th side cover) presents the existing types of memory cells, made by Charge-Trap technology [7].

Multilevel storage devices

There are types of flash-memory cells capable of storing of multiple levels of charge. It is proposed to introduce a separate classification of multilevel cells (fig. 15).

Multilevel cell (multi-level storage device). The main objective of such cells is the ability to store more than one bit of information in a standard cell. The typical direction of development is storing of the four states in one cell (four states of two bits: 00, 01, 10 and 11).

Strata Flash cell by MLC technology allows you to store two bits of information in each cell. This is achieved by the fact, that Strata Flash handles four levels of charge that encode two bits. The level of charge determines the voltage to be applied to the control gate to open the transistor. The reading speed of a single block for Strata Flash-memory exceeds the reading speed for conventional memory in more than 1,5 times. This is connected with a fact that two bits are read at once from one memory cell, rather than one, but at the same time a time delay is added, associated with decoding of bits' value. The same applies to the writing/erasing. At the present time, it implemented the fourth generation of StrataFlash-cells. The next generation of technology "three bits in the cell" (TLC) and "four bits in the cell" (QLC) will require distinguishing of eight and sixteen threshold voltages, respectively [8].

MirrorBit cell. MirrorBit technology allows to store two bits of data in a single cell and to achieve doubledensity in device without compromising in the integrity or performance. AMD has created the architecture of the MirrorBit cell, using a new design and process technology, which allows to reduce the cost and increase the reliability of flash-memory. MirrorBit cell and its architecture are shown in fig. 16 (see the 4-th side cover). The advantages of MirrorBit cell — double capacity, high performance and reliability, increased reading speed (from 3 to 4 times) and writing (up to 16), the area of the array is 20% less than some of its competitors for the same size.

NROM cell is formed by Charge-Trap technology and has a higher recording density, reduced number of masks and increased number of write cycles in contrast to the cells with floating gate. NROM memory cell transistor represents a MOSFET transistor with charge trap of "oxide-nitride-oxide" composition. Placing of a charge is carried out by hot electron injection. A feature of the cell is high reliability, incorrect reading (erraticbits, over erase phenomena) is completely excluded, the errors are possible in case of defects in the structure of the cell. The ability to store 2 and 4 bits in a single cell independent of each other, excellent reliability, possibility of reversing reading make NROM cells most promising for code storage in modern integrated circuits [9].

Conclusion

Widespread acceptance of the flash-memory will reduce its value, but further miniaturization raises the problem of reliability support, while maintaining durability. The reliability of flash-memory with the size less than 19 nm will require new algorithms for organization of the data array. A lot of researches are devoted to the memory architecture, energy efficiency and high-speed input-output interfaces. In a number of projects the scaling problems of two-dimensional flash-memory were solved by transfer to 3D-structures and use of the multi-level cells. Charge-Trap segment on the world market grows steadily due to the increasing demand for 3D NAND memory in which this technology is particularly relevant.

Despite the availability of new types of non-volatile memory (FRAM, MRAM, PRAM), successfully applied in a variety of microelectronic devices, their combined market share is small. The non-volatile memory based on charge storage stays is the main type of ROM that can be integrated into IC chips.

References

1. Bez R., Camerlenghi E., Modelli A., Visconi A. Introduction to Flash Memory, *Proc. of the IEEE*, Apr. 2003, vol. 91, pp. 489–502.

2. Tewksbury S. K., Brewer J. E. Nonvolatile memory technologies with emphasis on flash, *Series Editors. IEEE Press Series on Microelectronic Systems*, 2009, vol. 2, no. 1, pp. 143–157.

3. Chang K.-M., Cheng S., Kuo C. Modular Flash EEPROM Technology for 0,8 μ m High Speed Logic Circuits, *Proc. of the IEEE*, 1991. CICC., pp. 18.7/1–18.7/4.

4. Kuo C., Yeargain J. R., Downey W., Ilgenstein K., Jorvig J., Smith S. An 80 ns 32K EEPROM Using the FETMOS Cell, *IEEE J. Solid-State Circuits*, 1982, vol. 17, no. 5, pp. 821–827.

5. Markov V., Kotov A., Levi A., Dang T., Tkachev Y. SuperFlash Memory Program / Erase Endurance, *IEEE Nonvolatile Memory Technology Symposium*. Nov. 2003, pp. 231–234.

6. Yeh F., Liu Y., Wang X., Ma T. SONOS-Type Non – Volatile Memory with all Silicon Nitride Dielectric, 36th IEEE Semiconductor Interface Specialist Conference, Washington, DC, Dec. 1–3, 2005.

7. Lu Chih Yuan., Lue Hang Ting, Chen Yi Chou. State-ofthe-art flash memory devices and post-flash emerging memories, *Science China, Special issue*, May 2011, vol. 54, no. 5, pp. 1039–1060.

8. Atwood G., Fazio A., Mills D., Reaves B. Intel Strata-Flash Memory Technology Overview, *Intel Technology Journal*, 1997, Q4, pp. 1–8.

9. Eitan B., Cohen G., Shappir A., Lusky E., Givant A. 4-Bit per Cell NROM Reliability. *Proc. of IEEE International Electron Devices Meeting EDM Tech.*, 2005, pp. 539–542.

УДК 621.373.52

В. П. Тимошенков, проф. кафедры, e-mail: valeri04@hotmail.com; **К. С. Стародубцев**, магистр, e-mail: starodubtsevks@gmail.com; **В. А. Ваньков**, аспирант, e-mail: vankov_victor@mail.ru, НИУ "МИЭТ", Москва, Зеленоград

ГЕНЕРАТОР, УПРАВЛЯЕМЫЙ НАПРЯЖЕНИЕМ, ДЛЯ БЕСПРОВОДНЫХ МУЛЬТИСТАНДАРТНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

Поступила в редакцию 13.05.2015

Рассмотрены различные типы генераторов, управляемых напряжением (ГУН), их преимущества и недостатки в ограничениях, поставленных стандартом 802.11.b. Разработана схема ГУН с центральной частотой 2,44 ГГц, диапазоном перестройки частоты 2,4...2,48 ГГц, фазовым шумом — 73,8 дБ/Гц и — 122 дБ/Гц на частотах отстройки 10 кГц и 1 МГц соответственно, с напряжением питания 3B, по технологии кремний—германий с технологической нормой 0,25 мкм.

Ключевые слова: ГУН, кольцевой генератор, LC-генератор, варакторы, ФАПЧ, беспроводные приемопередатчики

Введение

Быстрый рост числа радиочастотных устройств привел к увеличению спроса на беспроводные приемопередатчики, приемники и передатчики. Их используют как на коротких дистанциях (Wi-Fi), так и в коммуникационных системах дальнего действия (спутниковая связь). В зависимости от области применения на устройство накладывают требования по расходу энергии, шумовым характеристикам и по условиям, в которых ему предстоит работать.

Синтезаторы частот используют в приемопередатчиках для получения необходимой частоты от опорного источника для модуляции и демодуляции сигналов. В свою очередь, генератор, управляемый напряжением (ГУН), является ключевым блоком синтезатора частот. Он во многом определяет характеристики всего синтезатора.

В данной работе рассмотрен подход к выбору типа генератора, управляемого напряжением, для стандарта 802.11.b. Приведены основные ограничения, связанные с выбранной спецификацией и накладываемые на ГУН в процессе проектирования. Рассмотрены основные характеристики различных типов ГУН, преимущества и недостатки каждого из типов, приведена методика проектирования и результаты расчета ГУН с использованием варакторов в режиме насыщения для достижения необходимого настроечного диапазона частот.

1. Ограничения, накладываемые на ГУН стандартом 802.11.b

Основными техническими характеристиками генератора являются центральная частота, диапа-

зон перестройки частот, напряжение питания, потребляемая мощность и фазовый шум [1]. В качестве дополнительных характеристик можно рассматривать площадь, занимаемую на чипе, стоимость и др.

Основные ограничения на ГУН накладывают выбранная технология и стандарт передачи данных, для которого разрабатывается устройство. При проектировании данного ГУН используется технология кремний—германий с технологической нормой 0,25 мкм. Основные ограничения, накладываемые стандартом 802.11.b, представлены в табл. 1.

Спецификация для разрабатываемого ГУН Table		
Specifications of the developed VCO		
Диапазон выходных частот, ГГц Range of the output frequencies, GHz	2,42,48	
Центральная частота, ГГц Central frequency, GHz	2,44	
Диапазон настроечного напряжения, В Range of the tuning voltage, V	0,63	
Перепад выходного напряжения, В Output potential swing, V	3	
Фазовый шум (при отстройке по частоте 100 кГц), дБ/Гц Phase noise (in case of detuning on frequency 100 kHz), dB/Hz	-96,6	
Фазовый шум (при отстройке по частоте 1 МГц) дБ/Гц <i>Phase noise (in case of detuning on frequency 1 MHz)</i> dB/Hz	-108	
Время установки, мкс Installation time, µs	≤100	

Таблица 1

Полностью интегрированный генератор, управляемый напряжением, может быть выполнен в виде кольцевого генератора, генератора Колпитца или *LC*-генератора с отрицательной проводимостью. Далее будут рассмотрены и проанализированы преимущества и недостатки каждого из них в поставленных ограничениях.

2. ГУН на основе кольцевого генератора

Кольцевой генератор представляет собой цепь инверторов с обратной связью. Типичная схема кольцевого генератора представлена на рис. 1. Важно заметить, что в такой схеме должно быть нечетное число инверторов. А также для того чтобы колебания не прекращались, необходимо правильно соблюсти баланс задержек.

Для начала колебаний в таком генераторе необходимо выполнение критерия Брокгаузена [2]. При достаточной энергии колебания начинаются спонтанно и для их поддержания необходим фазовый сдвиг 2π и единичное усиление по напряжению на частоте колебаний. Управление частотой в таком генераторе происходит путем добавления МОП-транзисторов в последовательном включении к *n*- и *p*-канальным транзисторам инвертора и подачи на их затворы управляющего напряжения. Такой ГУН имеет ряд достоинств: он достаточно легко проектируется, может работать при низком напряжении питания, обладает широким диапазоном перестройки частот, а также малой рассеиваемой мощностью. Основным достоинством кольцевого ГУН является то, что при его проектировании не используют емкостные элементы и индуктивности. Это позволяет значительно уменьшить зани-

> Таблица 2 Характеристики кольцевых генераторов

> > Characteristics of the ring oscillators

Тип кольцевого генератора Types of ring oscillators	Диапазон частот, ГГц <i>Range</i> of frequencies, GHz	Фазовый шум, дБ/Гц Отстройка 1 МГц Phase noise, dB/Hz, Detuning 1 MHz		
Синверторами [4] With inverters [4]	2,42,5	-97		
Сдифференциальными инверторами [5] With differential inverters [5]	1,11,9	-99,5		
Ha вентилях И-НЕ [6] AND-NOT gates [6]	1,942,57	-84,56		



Рис. 1. Схема кольцевого генератора *Fig. 1. Circuit of a ring oscillator*

маемую площадь и упрощает расчеты. Из недостатков можно выделить ограничение по максимальной частоте работы и отсутствие пассивных элементов, приводящее к значительному ухудшению шумовых характеристик [3].

Характеристики кольцевых генераторов рассмотрены на основе ГУН, представленных в работах [4—6]. Их характеристики представлены в табл. 2.

Из табл. 2 можно сделать вывод о том, что фазовый шум кольцевого генератора на основе инверторов превосходит значения, определяемые стандартом 802.11.b ($-120 \text{ дБ}/\Gamma \mu$ при отстройке в 1 МГ μ). В работах [5, 6] авторы рассматривают кольцевые генераторы на основе дифференциальных инверторов и вентилей И-НЕ. Их шумовые характеристики (-99,5 и -84,56 дБ/Г μ при отстройке в 1 МГ μ) также не удовлетворяют требованиям стандарта ($-108 \text{ дБ}/\Gamma \mu$).

Таким образом, можно сделать вывод, что для выбранного стандарта кольцевой генератор не подходит.

3. ГУН на основе генератора Колпитца и *LC*-генератора с отрицательной проводимостью

Другим вариантом реализации ГУН является генератор Колпитца [7]. Схема такого генератора приведена на рис. 2.

Генератор такого типа состоит из одного или нескольких транзисторов, обеспечивающих достаточное для начала колебаний усиление. *LC*-генератор работает по такому же принципу. Управление частотой в таких схемах происходит за счет варакторов. Емкость варакторных структур меняется в зависимости от поданного на них напряжения, что позволяет управлять частотой. Схема стандартного *LC*-генератора с отрицательной проводимостью представлена ниже в разд. 4.

Дальнейшее рассмотрение проведем в виде сравнения. Генераторы могут быть представлены в виде системы из индуктивно-емкостного контура, в котором происходят затухающие колебания, и активной части, которая состоит из одного, двух или четырех транзисторов, компенсирующих поте-

Table 2

ри. Тогда критерий Брокгаузена начала колебаний в генераторе Колпитца имеет вид:

$$g_{mtot} \ge \frac{4}{R_p},$$
 (1)

где g_{mtot} — общая крутизна активной схемы; R_p — эквивалентное параллельное сопротивление колебательного контура.

Для *LC*-генератора с отрицательной проводимостью (использующего дифференциальную пару *n*-МОП):

$$g_{mtot} \ge \frac{1}{R_p}$$
 (2)

Из неравенств (1) и (2) видно, что для транзистора в генераторе Колпитца g_{mtot} должна быть в 4 раза больше, чем g_{mtot} для каждого из транзисторов в *LC*-генераторе с отрицательной проводимостью. Это становится проблемой, если добротность индуктивности Q_L достаточно мала, что приводит к малому значению R_p . Такая ситуация характерна для современной КМОП-технологии. Приравняв уравнения для крутизн в режиме насыщения транзисторов в каждом из генераторов и приняв в учет, что в *LC*-генераторе с отрицательной проводимостью каждый из транзисторов с общим



Рис. 2. Генератор Колпитца *Fig. 2. Colpitts oscillator*

стоком использует только половину тока смещения, получим

$$\frac{W}{L_{Colpit}} = 8\frac{W}{L_{LC}}.$$
(3)

Из уравнения (3) можем сделать вывод, что транзистор в генераторе Колпитца имеет достаточно большие размеры, что, в свою очередь, приводит к увеличению паразитных емкостей. Большие паразитные емкости сокращают настроечный диапазон ГУН, что во многих случаях критично [7].

Из преимуществ ГУН на основе генератора Колпитца можно выделить лучшие шумовые характеристики по сравнению с кольцевым ГУН. Кроме того, в отличие от *LC*-генератора с отрицательной проводимостью, в нем используется всего одна индуктивность, что позволяет уменьшить площадь. Но малый настроечный диапазон и большие размеры транзистора, уменьшающие выигрыш в площади, делают предпочтительней для выбранного стандарта *LC*-генератор с отрицательной проводимостью.

5. Методика проектирования *LC*-генератора с отрицательной проводимостью

Существует несколько конфигураций *LC*-генератора с отрицательной проводимостью. Основные из них представлены на рис. 3.

Лучшим выбором для стандарта 802.11.b является реализация ГУН с помощью *n*- и *p*-канальных пар (рис. 3, *c*). Такая схема имеет ряд преимуществ по сравнению со схемами, где используются только *n*-канальные или *p*-канальные пары транзисторов. Главным преимуществом такой реализации является удвоенный перепад уровней напряжения на выходе. Также в такой схеме уменьшается шум в диапазоне частот $1/\Delta f^3$ [8]. Дополнительная пара *p*-канальных транзисторов позволяет компенсировать потери в *LC*-контуре с меньшим током смещения транзисторов, что приводит к уменьшению потребления ГУН.

Центральная частота колебаний в таком ГУН определяется по формуле

$$f_{cent} = \frac{1}{\sqrt{LC_{tot}}},\tag{4}$$

где $C_{tot} = \frac{1}{2} (C_{nmos} + C_{pmos} + C_{var} + C_{ind} + C_{load});$ C_{nmos} — емкость *n*-канального транзистора; C_{pmos} — емкость *p*-канального транзистора; C_{ind} — емкость, вносивносимая индуктивностью; C_{var} — емкость, вносимая варактором; C_{load} — нагрузочная емкость (часто для ГУН является входной емкостью делителя частот или выходного буфера).



Рис. 3. Электрические схемы *LC*-генератора с отрицательной проводимостью: a - co смещением с помощью резистора; b - co смещением с помощью транзистора; c - c использованием пар n- и p-канальных транзисторов в активной схеме

Fig. 3. Electric circuits of LC-oscillator with negative conductivity: a - displacement by means of a resistor; b - displacement by means of a transistor; c - with use of pairs of n- and p-channel transistors in the active circuit

Значение индуктивности и паразитные емкости остаются постоянными, а максимальная и минимальная частоты зависят от максимальной и минимальной емкостей варакторов. Первым этапом проектирования ГУН является выбор планарной интегральной индуктивности.

Основными критериями при выборе индуктивности являются его добротность (желательно, чтобы она была как можно больше) и занимаемая площадь. Дизайн топологии и моделирование индуктивностей выполняются в таких программных средствах, как ASITIC и ADS Momentum. Для создания индуктивностей используют верхние слои металлизации. При проектировании ГУН используют либо две отдельные индуктивности [9], либо дифференциальную индуктивность, которая имеет большую добротность [10]. В работе используется дифференциальная индуктивность с готовой топологией, предоставляемой фабрикой.

Для получения необходимого перепада уровней напряжения на выходе, предварительно рассчитав для индуктора R_p , выберем ток смещения пары транзисторов с общим стоком I_{tail} :

$$I_{tail} = \frac{V_{out}\pi}{4R_p},\tag{5}$$

где V_{out} — амплитуда выходного напряжения генератора.

Для запуска *LC*-генератора необходимо выполнение неравенства (2), причем для устойчивых колебаний обычно выбирают:

$$g_m = g_{mn} + g_{mp} = \alpha(2g_{mtot}), \quad (6)$$

где g_{mn} — крутизна *n*-канальных транзисторов; g_{mp} — крутизна *p*-канальных транзисторов, g_m крутизна всей схемы, $\alpha = 3...3,5$ [9]. Зная необходимые значения крутизны для транзисторов, можно рассчитать их размеры из уравнения для тока в режиме насыщения.

Финальной стадией в разработке ГУН является выбор варакторов. По исследованию характеристик варакторов проведено множество исследований [11], [12]. Варакторы в инверсном режиме и в режиме насыщения позволяют получить наибольший настроечный диапазон. Для варакторов в инверсном режиме он составляет

около 20 %. Другим преимуществом варакторных структур в таких включениях является то, что их рабочая частота выше, чем у варактора, включенного в конфигурации, в которой сток, исток и подложка закорочены. В данной работе были выбраны *n*-МОП варакторы в режиме насыщения.

Зная индуктивность и диапазон перестройки частот, можно получить значения емкости контура для максимальной и минимальной частот:

$$C_{\max}(f) = \frac{1}{L2\pi f_{\min}};$$
(7)

$$C_{\max}(f) = \frac{1}{L2\pi f_{\max}}.$$
 (8)

Для выбранного стандарта $f_{\min} = 2,4$ ГГц, $f_{\max} = 2,48$ ГГц. Вычитая из емкости контура все постоянные составляющие (паразитные емкости транзисторов, нагрузочную емкость и емкость, вносимую индуктивностью) получим минимальную емкость, которой должен обладать варактор. В соответствии с этой емкостью необходимо задать ширину варакторов.

5. Результаты работы

В результате проделанной работы разработана схема *LC*-генератора с отрицательной проводимостью, представленная на рис. 4.



Рис. 4. Схема разработанного ГУН *Fig. 4. Circuit of the developed VCO*

В качестве активной части схемы используются дифференциальные пары *n*- и *p*-канальных транзисторов. В контуре схемы использована дифференциальная индуктивность. В качестве настроечных элементов были взяты МОП-варакторы в режиме насыщения, позволяющие получить настроечный диапазон 2,4...2,48 ГГц, при контролирующем напряжении 0,7...1,9 В. Результаты PSS (periodic steady state) моделирования, полученные при моделировании в ADE (Cadence), представлены на рис. 5.

Частота ГУН линейно изменяется на участке 2,375...2,48 ГГц, что позволяет легко управлять генератором в заданном диапазоне. Нелинейные участки не попадают в желаемый диапазон.

Результаты временного моделирования и моделирования по фазовому шуму приведены на рис. 6 и 7 соответственно.

Амплитуда выходного сигнала ГУН составляет 3 В.

При частотах отстройки 10 кГц и 1 МГц фазовый шум составляет -73,8 и -122 дБ/Гц соответственно.

Заключение

В ходе данного исследования был разработан ГУН с центральной частотой 2,44 ГГц. Диапазон перестройки составляет 80 МГц. Учитывая спецификацию стандарта 802.11.b, разработанный ГУН позволяет получить 16 каналов шириной 5 МГц каждый. Амплитуда выходного сигнала 3 В. Фа-











Рис. 7. Зависимость фазового шума от частоты отстройки Fig. 7. Dependence of the phase noise on the detuning frequency

зовый шум устройства -73,8 и -122 дБ/Гц на частотах отстройки 10 кГц и 1 МГц соответственно. Особенностью данного ГУН является то, что он удовлетворяет не только спецификациям стандарта 802.11.b, но и спецификациям стандарта ZigBee. Это позволяет использовать устройство в мультистандартных беспроводных приемопередатчиках.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, госконтракт от 4 октября 2013 г. № 14.427.11.0008.

Список литературы

1. **Tiebout M.** Low power VCO design in CMOS. Springer, 2006. 127 p.

2. Jovanović G., Stojčev M., Stamenkovic Z. A CMOS Voltage Controlled Ring Oscillator with Improved Frequency Stabil-

ity // Scientific PUBLICATIONS of the State University of Novi Pazar Ser. A: Appl. Math. Inform. and Mech. 2010. Vol. 2, 1. P. 1–9.

3. Hajimiri A., Lee T. H. Jitter and phase noise in ring oscillators // IEEE J. Solid State Circuits. 1999. Vol. 34. P. 790–804.

4. **Zhinian Shu, Ka Lok Lee, Bosco H. Leung.** A 2,4 GHz Ring-Oscillator-Based CMOS Frequency Synthesizer With a Fractional Divider Dual-PLL Architecture // IEEE J. Solid-State Circuit. 2004. Vol. 39. P. 452–462.

5. Eken Y. A., Uyemura J. P. A 5,9-GHz Voltage-Controlled Ring Oscillator in 0,18 um in CMOS // IEEE J. Solid-State Circuit. 2004. Vol. 39, N. 1. P. 230–233.

6. Lee S. Y., Hsieh J. Y. Analysis and implementation of a 0,9-V voltage-controlled oscillator with low phase noise and low power dissipation // IEEE Transactions on Circuits and Systems II. 2008. Vol. 55, N 7. P. 624–627.

7. **Kim J.-M.** A 0,5V 2,41 GHz, 196,3 dBc/Hz FoM differential colpitts VCO with an output voltage swing exceeding supply and ground potential requiring no additional inductor //

Proc. of Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC), Seattle, WA, IEEE. 2013. P. 39–43.

8. **Viessmann A., Damitz F.** Comparison of fully integrated differential voltage controlled Colpitts oscillator to the cross-coupled oscillator topology // Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems, San Diego, CA, IEEE. 2011. P. 3–7.

9. **Lee T. H.** The design of CMOS radio-frequency integrated circuits, 2nd edition. New York, Cambridge University Press, 2004, 777 p.

10. **Gagliolo S.** Low phase noise differential Cross-Coupled CMOS VCOs with Resistive and Inductive Tail biasing. Ph. D Thesis, University of Genoa, 2008, 142 p.

11. **Brunch R. L., Raman S.** Large signal analysis of MOS varactors in CMOS – Gm LC VCOs // IEEE J. Solid-State Circuits. 2003. Vol. 38, N. 8. P. 1325–1332.

12. Amselem E., Gonzalez B., Garcia J., Aldea I., Marrero M., Iturri A. G., del Pino J., Khemchandani S. L., Hernandez A. Influence of gate geometry in integrated MOS varactors on accumulation mode for RF // Electron Devices, 2007. P. 68–71.

V. P. Timoshenkov, Professor, valeri04@hotmail.com, K. S. Starodubtsev, Master, Department of Integrated Electronics and Microsystems, starodubtsevks@gmail.com,
V. A. Vankov, Postgraduate Student, vankov_victor@mail.ru
MIET National Research University of Electronic Technology, Zelenograd, Moscow

Voltage-Controlled Oscillator for Wireless Multi-Standard Applications

This paper presents a method for selection of a voltage-controlled oscillator for the wireless standard of 802.11.b. Colpitts oscillator and LC - Gm oscillator with the center frequency of 2,4 GHz were designed. Cross-coupled pairs of n-MOS and p-MOS transistors were used in the active part of the circuit. This allowed us to improve the noise characteristics and the chip size. MOS varactors and differential inductance with high quality factor were used in the tank circuit. LC - Gm oscillator has linear frequency-voltage characteristic within the frequency range of 2,375–2,48 GHz. Phase noise of the oscillator is 73,8 dBc/Hz at a 10-kHz offset and 122 dBc/Hz at a 1-MHz offset. Output voltage swing is 3 V. This VCO can be used in multi-standard wireless transceivers.

Keywords: CMOS, LC oscillators, phase noise, ring oscillators, voltage-controlled oscillator (VCO), wireless transceivers

Introduction

Growth of the number of the radio-frequency devices stimulates the demand for the wireless transceivers. They are used at short distances (Wi-Fi) and in long-distance communication systems (satellite communication). Depending on its application a device has to meet the requirements to power consumption, noise characteristics and conditions, in which it is expected to operate.

Synthesizers of frequencies are used in transceivers for reception of the necessary frequency from the basic source for modulation and demodulation of signals. Voltage-controlled oscillator (VCO) is a key unit of the frequency synthesizer. It determines characteristics of the whole synthesizer.

The given work describes an approach to selection of VCO for 802.11.bis standard. It presents the basic restrictions connected with the specification and imposed on VCO during designing, and basic characteristics of various VCO, advantages and drawbacks of each of the types, and the techniques of designing and results of calculation of VCO with the use of varactors in the saturation mode for achievement of the necessary tuning range of frequencies.

The restrictions imposed on VCO by 802.11.b standard

The basic technical characteristics of the oscillator are the central frequency, range of frequency tuning, power supply voltage and phase noise [1]. As additional characteristics it is possible to consider the area on a chip, cost, etc.

The basic restrictions are imposed on VCO by the technology and the data transmission standard, for which the device was developed. In the process of designing the silicon-germanium technology was used with the technological standard of $0,25 \ \mu\text{m}$. The basic restrictions of 802.11.b standard are presented in table 1.

A fully integrated voltage-controlled oscillator can be implemented in the form of a ring, Colpitts oscillator or LC oscillator with negative conductance. Below, the advantages and drawbacks of each of them in the set restrictions are considered and analyzed.

VCO on the basis of a ring oscillator

A ring oscillator is a chain of inverters with a feedback, a typical circuit of which is presented in fig. 1. It is important to point out, that in such a circuit there should be an odd number of inverters. And also, in order to prevent a stoppage of oscillations, it is necessary to keep the balance of the delays correctly.

In order to initiate oscillations in such an oscillator the Brockhausen criterion [2] should be implemented. At a sufficient energy level the oscillations begin spontaneously, and in order to maintain them 2π phase shift and individual voltage amplification on the frequency of oscillations are necessary. Control of the frequency in it is implemented by adding of MOS transistors in a consecutive connection to n- and p-channel transistors of the inverter and supplying of control voltage to their gates. Such a VCO has a number of advantages: it is rather easy to design, it can operate at a low power supply voltage, it has a wide range of retuning of frequencies, and small dissipation power. The main advantage of a ring VCO is that its designing does not require capacitor elements and inductance. This allows us to reduce the occupied space and simplify the calculations. Out of the drawbacks it is possible to mention the restriction on the maximal frequency of operation and absence of the passive elements, leading to deterioration of the noise characteristics [3].

Characteristics of the ring oscillators are considered on the basis of VCO [4-6]. Their characteristics are presented in table 2.

It is possible to draw a conclusion, that the phase noise of the ring oscillator based on inverters surpasses the values necessary for 802.11.b standard (-120 dB/Hz at detuning of 1 MHz). In [5, 6] the ring oscillators on the basis of differential inverters and AND — NOT gates are considered. Their noise characteristics (-99,5 and -84,56 dB/Hz at detuning of 1MHz) also do not meet the standard requirements -108 dB/Hz. Thus, the ring oscillator does not suit the chosen standard.

VCO on the basis of Colpitts oscillator and LC oscillator with negative conductivity

Another variant of realization of VCO is a Colpitts oscillator [7] (fig. 2).

An oscillator of such type consists of one or several transistors, which ensure amplification for the start of oscillations. LC oscillator works on the same principle. Control of frequency in such circuits is implemented due to varactors. The capacity of the varactor structures varies depending on the voltage supplied to them, which allows us to control the frequency. The circuit of a standard LC oscillator with negative conductivity is presented below.

Let us make a comparison. Oscillators can be presented in the form of a system of an inductance-capacitor contour, where fading oscillations occur, and an active part, which consists from the compensating losses one, two or four transistors. Then Brockhausen criterion for the beginning of oscillations in a Colpitts oscillator looks like the following:

$$g_{mtot} \ge \frac{4}{R_p},$$
 (1)

where g_{mtot} — mutual conductance of the active circuit; R_p — equivalent parallel resistance of the oscillation circuit.

For LC oscillator with negative conductivity and a differential pair of *n*-MOS:

$$g_{mtot} \ge \frac{1}{R_p}$$
 (2)

From inequalities (1) and (2) it is visible, that for the transistor in Colpitts oscillator g_{mtot} should be four times bigger than g_{mtot} each of the transistors in LC oscillator with negative conductivity. It becomes a problem, if good quality of inductance Q_L is rather small, which results in a small R_p . Such a situation is characteristic for CMOS technology. Having equated the equations for steepness in the mode of saturation of transistors in each of the oscillators and considering, that in LC oscillator with negative conductivity each transistor with a common drain uses only half of the displacement current, we will receive

$$\frac{W}{L_{Colpit}} = 8\frac{W}{L_{LC}}.$$
(3)

From equation (3) we can draw a conclusion, that the transistor in Colpitts oscillator has rather big dimensions, and this leads to an increase of the parasitic capacities, which reduce the tuning range of VCO, which in many cases is critical [7].

Among the advantages of VCO based on Colpitts oscillator in comparison with a ring VCO it is possible to mention better noise characteristics. Besides, unlike LC oscillator with negative conductivity, it uses only one inductance, which allows us to reduce the area. But the small tuning range and big dimensions of the transistor reducing the advantage of the area, make LC oscillator with negative conductivity more preferable for the chosen standard.

Techniques of designing of LC oscillator with negative conductivity

There are several configurations of LC oscillator with negative conductivity (fig. 3). The best choice for 802.11.b standard is realization of VCO by means of *n*- and *p*-channel pairs (fig. 3, *c*). Such a circuit has a number of advantages in comparison with the circuits, where only *n*-channel or *p*-channel pairs of transistors are used. The main advantage is the doubled difference of the voltage levels at the output. Also the noise is less in the range of frequencies of $1/\Delta f^3$ [8]. An additional pair of *p*-channel transistors allows us to compensate for the losses in LC contour with a less displacement current of the transistors, which results in a smaller consumption of VCO.

The central frequency of oscillations in such VCO is determined under the formula:

$$f_{cent} = \frac{1}{\sqrt{LC_{tot}}},\tag{4}$$

where $C_{tot} = \frac{1}{2} (C_{nmos} + C_{pmos} + C_{var} + C_{ind} + C_{load});$ C_{ind} — capacity brought by inductance, C_{load} — load capacity (for VCO it is often the input capacity of the divider of frequencies or the output buffer).

Inductance and parasitic capacities remain constant, while the maximal and minimal frequencies depend on the capacities of varactors. The first stage in designing of VCO is selection of a planar integrated inductance. The basic criteria for inductance choice are its good quality (the higher, the better) and the occupied area. The design of topology and modeling of the inductancies are carried out in ASITIC and ADS Momentum software. For creation of inductancies the top layers of metallization are used. During designing of VCO two separate inductancies [9] or a differential inductance, which has better quality [10], are used. In the work we use differential inductance with the ready topology provided by manufacturer.

In order to obtain the necessary difference of the voltage levels at the output, having preliminary calculated it for inductor R_p , we will choose the displacement current for the pair of the transistors with a common drain I_{tail} :

$$I_{tail} = \frac{V_{out}\pi}{4R_p},\tag{5}$$

where V_{out} — the amplitude of the output voltage of generator.

In order to start operation of LC oscillator the inequality (2) should be implemented, at that, for steady oscillations the following one is usually chosen:

$$g_m = g_{mn} + g_{mp} = \alpha (2g_{mtot}), \tag{6}$$

where g_{mn} — transconductance of *n*-channel transistors; g_{mp} — transconductance of *p*-channel transistors; g_m — transconductance of the whole circuit, $\alpha = 3...3,5$ [9]. Knowing the necessary transconductance of the transistors we can calculate their dimensions from the equation for the current in the saturation mode.

The final stage in development of VCO is selection of varactors. A lot of research works were done on characteristics of the varactors [11, 12]. Varactors in the inverse and saturation modes allow us to receive the greatest tuning range. For varactors in the inverse mode it is about 20 %. Other advantage of the varactor structures in such connections is that their working frequency is higher, than that of the varactor included in the configurations in which the drain, source and substrate are abridged. For the given work we chose *n*-MOS varactors in the saturation mode.

Knowing the inductance and the range of retuning of frequencies, it is possible to receive the capacity of the contour for the maximal and minimal frequencies:

$$C_{\max}(f) = \frac{1}{L2\pi f_{\min}}; \qquad (7)$$

$$C_{\max}(f) = \frac{1}{L2\pi f_{\max}}.$$
(8)

For the selected standard $f_{min} = 2,4$ GHz, $f_{max} = 2,48$ GHz. By subtracting all the constant components (parasitic capacities of the transistors, load capacity and capacity brought by inductance) from the contour capacity we will receive the minimal capacity, which a varactor should possess. In conformity with it we should set the width of the varactors.

Results of work

As a result of the work a circuit with negative conductivity (fig. 4) was developed.

Differential pairs of *n*- and *p*-channal transistors were used as the active part of the circuit. Differential inductivity was applied in the contour of the circuit. As tuning elements MOS varactors were applied in the saturation mode, allowing us to receive a tuning range from 2,4...2,48 GHz, at controlled voltage of 0,7...1,9 V. Results of PSS (periodic steady state) modeling were received with the help of the circuit package of ADE (Cadence) (fig. 5).

Frequency of VCO linearly changes in the interval of 2,375...2,48 GHz, which allows us to operate it easily in the set range. Nonlinear intervals are not within the desirable range.

The results concerning the timing simulation and phase noise are presented, accordingly, in fig. 6 and 7. The amplitude of the output signal of VCO is 3 V. At detuning frequencies of 10 kHz and 1 MHz the phase noise is -73.8 dB/Hz and -122 dB/Hz.

Conclusion

During research a VCO was developed with the central frequency of 2,44 GHz and retuning range of 80 MHz. Considering the standard specification of 802.11.b standard, VCO allows us to obtain 16 channels with the width of 5 MHz each. Amplitude of the output signal is 3 V. Phase noise of the device is equal to -73.8 dB/Hz and -122 dB/Hz on the detuning frequencies of 10 kHz and 1 MHz, accordingly. A specific feature of VCO is that it meets the standard specifications of 802.11.b and ZigBee standards. This allows us to use the device in the multistandard wireless transmitters-receivers.

The work was done with the financial support from the Ministry of Education and Science of Russia, State Contract N_{2} 14.427.11.0008 of October, 4th, 2013.

References

1. **Tiebout M.** Low power VCO design in CMOS, Springer, 2006, 127 p.

2. Jovanović G., Stojčev M., Stamenkovic Z. A CMOS Voltage Controlled Ring Oscillator with Improved Frequency Stability, *Scientific PUBLICATIONS of the State University of Novi Pazar Ser. A.: Appl. Math. Inform. and Mech.*, 2010. vol. 2, no. 1, pp. 1–9.

3. Hajimiri A., Lee T. H. Jitter and phase noise in ring oscillators, *IEEE J. Solid State Circuits*, 1999, vol. 34, pp. 790–804.

4. Zhinian Shu, Ka Lok Lee, Bosco H. Leung. A 2.4GHz Ring-Oscillator-Based CMOS Frequency Synthesizer With a Fractional Divider Dual-PLL Architecture, *IEEE J. Solid-State Circuit*, 2004. vol. 39, pp. 452–462.

5. Eken Y. A., Uyemura J. P. A 5,9-GHz Voltage-Controlled Ring Oscillator in 0,18 um in CMOS, *IEEE J. Solid-State Circuit*, 2004, vol. 39, no. 1, pp. 230–233.

6. Lee S. Y., Hsieh J. Y. Analysis and implementation of a 0,9-V voltage-controlled oscillator with low phase noise and low power dissipation, *IEEE Transactions on Circuits and Systems II*, 2008, vol. 55, no. 7, pp. 624–627.

7. **Kim J.-M.** A 0,5 V 2,41 GHz, 196,3 dBc/Hz FoM differential colpitts VCO with an output voltage swing exceeding supply and ground potential requiring no additional inductor", *Proc. of Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC), Seattle, WA, IEEE*, 2013, pp. 39–43.

8. Viessmann A., Damitz F. Comparison of fully integrated differential voltage controlled Colpitts oscillator to the cross-coupled oscillator topology, *Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems, San Diego. CA, IEEE*, 2011, pp. 3–7.

9. Lee T. H. *The design of CMOS radio-frequency integrated circuits*, 2nd edition, New York, Cambridge University Press, 2004, 777 p.

10. **Gagliolo S.** Low phase noise differential Cross-Coupled CMOS VCOs with Resistive and Inductive Tail biasing, Ph. D Thesis, University of Genoa, 2008, 142 p.

11. Brunch R. L., Raman S. Large signal analysis of MOS varactors in CMOS – Gm LC VCOs, *IEEE J. Solid-State Circuits*, 2003, vol. 38, no. 8, pp. 1325–1332.

12. Amselem E., Gonzalez B., Garcia J., Aldea I., Marrero M., Iturri A. G., del Pino J., Khemchandani S. L., Hernandez A. Influence of gate geometry in integrated MOS varactors on accumulation mode for RF, *Electron Devices*, 2007, pp. 68–71.

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромынский пер., 4. Телефон редакции журнала (499) 269-5510. E-mail: nmst@novtex.ru Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением закондательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Технический редактор Т. А. Шацкая. Корректор Е. В. Комиссарова

Сдано в набор 23.08.2015. Подписано в печать 17.09.2015. Формат 60×88 1/8. Заказ MC1015. Цена договорная

Оригинал-макет ООО «Адвансед солюшнз». Отпечатано в ООО «Адвансед солюшнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru