

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 10(135) ✧ 2011

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
и в систему Российского индекса научного цитирования

Издается с 1999 г.

Главный редактор
Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора
Лучинин В. В.

Редакционный совет:

Аристов В. В.
Асеев А. Л.
Волчихин В. И.
Гапонов С. В.
Захаревич В. Г.
Каляев И. А.
Квардаков В. В.
Климов Д. М.
Ковальчук М. В.
Нарайкин О. С.
Никитов С. А.
Сауров А. Н.
Серебряников С. В.
Сигов А. С.
Стриханов М. Н.
Чаплыгин Ю. А.
Шахнов В. А.
Шевченко В. Я.

Редакционная коллегия:

Абрамов И. И.
Андреевский Р. А.
Антонов Б. И.
Арсентьева И. П.
Астахов М. В.
Быков В. А.
Горнев Е. С.
Градецкий В. Г.
Гурович Б. А.
Кальнов В. А.
Карякин А. А.
Колобов Ю. Р.
Кузин А. Ю.
Мокров Е. А.
Норенков И. П.
Панич А. Е.
Панфилов Ю. В.
Петросьянц К. О.
Петрунин В. Ф.
Путилов А. В.
Пятышев Е. Н.
Сухопаров А. И.
Телец В. А.
Тимошенков С. П.
Тодуа П. А.
Шубарев В. А.

Отв. секретарь
Лысенко А. В.

Редакция:
Григорин-Рябова Е. В.
Чугунова А. В.

Учредитель:
Издательство
"Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МНСТ

- Годовицын И. В.** Перспективная конструкция миниатюрного тензорезистивного преобразователя давления 2
- Белкин Л. М., Белкин М. Е.** Бесструктурная модель поверхностно излучающего лазера с полосой модуляции в СВЧ диапазоне 9
- Абрамов И. И., Баранов А. Л., Щербакова И. Ю.** Моделирование одноэлектронных приборных структур на основе молекул 18

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

- Зарубина А. П., Лукашов Е. П., Деев Л. И., Пархоменко И. М., Образцова Е. А., Новоселова Л. А., Рубин А. Б.** Оценка рисков токсичности углеродных наноматериалов 21

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

- Белозубов Е. М., Васильев В. А., Громков Н. В.** Совершенствование тонкопленочных нано- и микроэлектромеханических систем с идентичными тензоэлементами и датчиков давления на их основе 27
- Казаков В. К., Образцов Р. М.** К вопросу о критериях отбраковки пьезоблоков и пьезоактюаторов 33

СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ

- Мальцев П. П., Матвеев О. В., Гнатюк Д. Л., Лисицкий А. П., Федоров Ю. В.** Обзор реализаций планарных встроенных антенн диапазона 5 ГГц с минимальным объемом 39

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

- Раткин Л. С.** Нано- и микросистемная техника для лазерной индустрии. 47
- Contents.** 55

Аннотации на русском и английском языках с 1999 г. по настоящее время находятся в свободном доступе на сайтах журнала (<http://novtex.ru/nmst/>) и научной электронной библиотеки (<http://elibrary.ru>). Электронные версии полнотекстовых статей расположены на сайте журнала: с 1999 г. по 2003 г. в разделе "ПОИСК СТАТЕЙ", а с 2004 г. — в разделе "АРХИВ".

ПОДПИСКА:

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

Адрес для переписки:
e-mail: nmst@novtex.ru

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МНСТ

УДК 621.38.049.77

И. В. Годовицын, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
НПК "Технологический центр" МИЭТ
E-mail: iog@tcen.ru

ПЕРСПЕКТИВНАЯ КОНСТРУКЦИЯ МИНИАТЮРНОГО ТЕНЗОРЕЗИСТИВНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДАВЛЕНИЯ

Поступила в редакцию 24.06.2011

Предлагается конструкция миниатюрного тензорезистивного преобразователя давления на КНИ-структуре. Преобразователь имеет тензорезисторы из монокристаллического кремния и мембрану из поликристаллического кремния, что позволяет совместить в конструкции достоинства традиционных и миниатюрных преобразователей давления — высокую чувствительность и маленькие габаритные размеры. Проведен расчет основных параметров преобразователя с помощью конечно-элементного моделирования.

Проведен анализ параметров предложенного преобразователя в сравнении с преобразователями других типов.

Ключевые слова: миниатюрные преобразователи давления, технология поверхностной микрообработки

Введение

Миниатюрные тензорезистивные преобразователи давления имеют существенные преимущества перед традиционными преобразователями давления в тех применениях, где предъявляются жесткие требования к габаритным размерам преобразователей. Среди этих применений в последнее десятилетие выделяются следующие:

- *Имплантируемые датчики давления с возможностью длительного нахождения в теле человека [1—3].* Основное требование к таким датчикам — небольшие габаритные размеры. Датчики применяют для получения информации о кровяном и внутричерепном давлении, они дают возможность дистанционного контроля за состоянием здоровья пациента и проведения относительно дешевого

амбулаторного лечения вместо дорогостоящего лечения в клинике.

- *Системы распределенного измерения давления с высоким пространственным разрешением — тактильные датчики.* Конструктивно тактильные датчики реализуются в виде матрицы преобразователей давления, снабженной интегрированной схемой обработки сигнала, пространственное разрешение которой определяется шагом расположения преобразователей [4, 5]. В качестве интересного примера "бытового" использования тактильного датчика можно привести сканер отпечатка пальца [6, 7].
- *Зонды для измерения давления в труднодоступных местах,* например в тонких трубках или небольших полостях, расположенных на значительном расстоянии от индикатора давления. Измерительный зонд представляет собой миниатюрный преобразователь давления в нестандартном корпусе, закрепленный на тонком стержне. Наиболее характерный пример таких зондов — катетеры для прямого измерения давления в аорте [8].

Изготовление миниатюрных тензорезистивных преобразователей давления осуществляется с помощью технологии поверхностной микрообработки кремния [9]. Мембрана преобразователей формируется с помощью осаждения, ее толщина и разброс толщины определяются только параметрами процесса осаждения. Для современных установок осаждения эти параметры составляют 0,01...2,5 мкм и 3...5 % соответственно. Небольшая толщина мембраны позволяет уменьшить ее площадь и, соответственно, уменьшить габаритные размеры кристалла преобразователя вплоть до нескольких сотен микрометров.

Основной недостаток миниатюрных тензорезистивных преобразователей давления [6, 7, 10—23] — низкая чувствительность, вследствие использования в качестве материала тензорезисторов поликремния. Коэффициент тензочувствительности пленок поликремния в 2—3 раза ниже (30—45), чем у монокристаллического кремния [24], кроме того, поликремний не обладает анизотропией тензо-

эффекта. Также, вследствие малых размеров, на мембране преобразователя часто удается разместить только один или два активных тензорезистора, что дополнительно уменьшает выходной сигнал преобразователя в 2–4 раза. Как результат, разница в чувствительности миниатюрного и традиционного преобразователей давления может достигать 10 раз [13, 15–17, 20].

В свете современных тенденций создания малогабаритных высокофункциональных датчиков повышение чувствительности миниатюрных преобразователей до значений традиционных преобразователей давления ($15 \text{ мВ} \cdot (\text{В} \cdot \text{атм})^{-1}$) представляет собой актуальную задачу. Преобразователь, имеющий не только малые размеры, но и высокую чувствительность, несомненно будет перспективным в качестве ключевого компонента измерительных систем с небольшими габаритными размерами.

Конструкция миниатюрного тензорезистивного преобразователя давления на КНИ-структуре

Для достижения чувствительности миниатюрного преобразователя, сравнимой с чувствительностью традиционного, мы здесь рассматриваем возможность использования монокристаллического кремния в качестве материала тензорезисторов. Разработанная конструкция миниатюрного преобразователя давления с тензорезисторами из монокристаллического кремния приведена на рис. 1. Для изготовления преобразователя используется КНИ-структура (кремний-на-изоляторе). Тензорезисторы формируются из рабочего слоя КНИ-структуры. Мембрана выполнена из поликристаллического кремния. Для изоляции тензорезисто-

ров от мембраны используется диэлектрический слой. От подложки тензорезисторы изолированы слоем разделительного диэлектрика КНИ-структуры. Анероидная коробка преобразователя формируется путем удаления жертвенного слоя и капсулирования окон, через которые проводится удаление; за счет этого обеспечивается чувствительность преобразователя к абсолютному давлению.

В предлагаемой конструкции сочетаются достоинства традиционных и миниатюрных преобразователей давления. За счет использования поликремниевой мембраны достигаются маленькие размеры чувствительного элемента. Тензорезисторы из монокристаллического кремния обеспечивают высокую чувствительность преобразователя. В конструкции сохранена возможность формирования структуры с помощью технологии поверхностной микрообработки кремния с применением односторонней обработки пластины. Для формирования элементов конструкции используют стандартные процессы технологии интегральных микросхем. В качестве жертвенного слоя берется разделительный слой КНИ-структуры, представляющий собой термический SiO_2 ; удаляется этот слой в растворе плавиковой кислоты.

Для повышения технологичности в миниатюрном преобразователе давления предлагается проводить удаление жертвенного слоя от центра к периферии [25]. Такой способ удаления жертвенного слоя позволяет не использовать дополнительный разделительный слой для закрепления мембраны, его роль играет жертвенный слой. В результате формируется мембрана кольцевой формы, внешний радиус которой определяется временем травления.

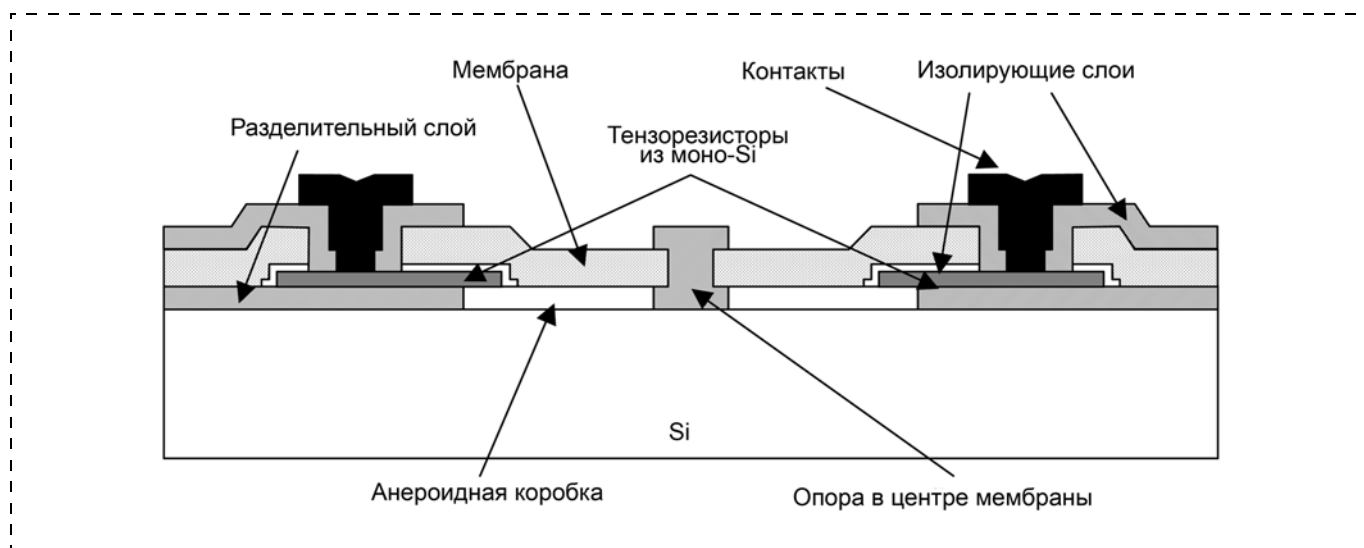


Рис. 1. Конструкция преобразователя давления на КНИ-структуре

Трехмерная модель преобразователя

Большинство современных программ конечно-элементного моделирования дает возможность расчета тензорезистивных эффектов с учетом анизотропии тензорезистивных и упругих свойств материала. В качестве примеров таких программ можно привести ANSYS, Coventor и др. Для расчета характеристик миниатюрного преобразователя давления на КНИ-пластине также использовали конечно-элементное моделирование.

На рис. 2 (см. четвертую сторону обложки) приведена трехмерная модель миниатюрного преобразователя давления на КНИ-структуре. Модель представляет собой четверть кристалла преобразователя с размерами $1,0 \times 1,0$ мм. Подложка кристалла имеет толщину 0,4 мм. На подложке расположена кольцевая поликремниевая мембрана с радиальным и тангенциальным тензорезисторами. Геометрия тензорезисторов оптимизирована для достижения одинакового номинала сопротивления. Мембрана жестко закреплена по внешнему и внутреннему радиусам путем формирования рамки из толстого слоя осажденного диэлектрика (рис. 2, см. четвертую сторону обложки). Ниже приведены основные геометрические параметры модели преобразователя.

Геометрический параметр модели	Значение, мкм
Толщина подложки	400
Длина и ширина подложки	500
Толщина мембраны	1,2
Внутренний/внешний радиус мембраны	20/80
Зазор между мембраной и подложкой	0,4
Толщина тензорезистора	0,4
Толщина разделительного слоя	0,4
Толщина изолирующего слоя	0,1
Толщина пассивирующего слоя	1,0

В конструкции миниатюрного преобразователя давления используют следующие материалы:

- монокристаллический кремний (подложка и тензорезисторы);
- поликристаллический кремний (мембрана);
- диоксид кремния SiO_2 (разделительный и пассивирующий слой);
- нитрид кремния Si_3N_4 (изолирующий слой).

В табл. 1 приведены основные параметры материалов, используемых в модели кристалла миниатюрного преобразователя давления.

Модуль упругости и коэффициент Пуассона монокристаллического кремния задавали с учетом анизотропии свойств. Как известно, упругие свойства кристаллов с кубической симметрией, к которым относится кремний, описываются всего тремя

Таблица 1
Основные параметры материалов, используемых в модели преобразователя

Материал	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона	Коэффициент теплового расширения
Монокристаллический кремний	Матрица коэффициентов (учет анизотропии свойств)		$2,3 \cdot 10^{-6}$
Поликремний [26]	1,67	0,26	$3,3 \cdot 10^{-6}$
Диоксид кремния SiO_2 [27]	0,69	0,21	$2,3 \cdot 10^{-6}$
Нитрид кремния Si_3N_4 [28]	2,5	0,24	$3,0 \cdot 10^{-6}$

коэффициентами упругости [29]. Матрица упругих коэффициентов выглядит следующим образом:

$$c_{pq} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{12} & c_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} \end{bmatrix}.$$

Для кремния значения упругих коэффициентов следующие: $c_{11} = 1,66$ ГПа, $c_{12} = 0,64$ ГПа, $c_{44} = 0,8$ ГПа [29].

Также с учетом анизотропии свойств задавались тензорезистивные коэффициенты монокристаллического кремния, необходимые для расчета измерения сопротивления тензорезисторов. Матрица тензорезистивных коэффициентов для кремния выглядит следующим образом:

$$\pi_{pq} = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{bmatrix}.$$

Основной вклад в изменение сопротивления тензорезистора дает главный тензорезистивный коэффициент π_{44} . Этот коэффициент зависит от типа, концентрации примеси и температуры. Для расчета были выбраны два значения концентрации бора в тензорезисторах: $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и $8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Концентрация $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ обеспечивает высокие значения коэффициента π_{44} и низкую температурную чувствительность сопротивления тензорезистора [30]. Концентрация $8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ обеспечива-

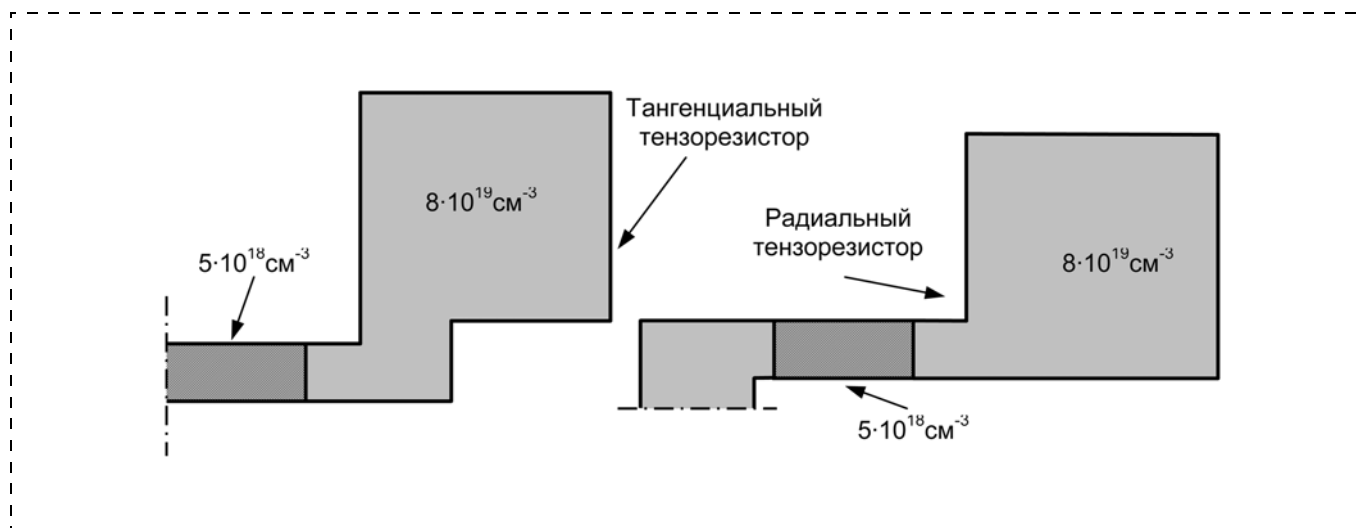


Рис. 3. Схема топологии тангенциального и радиального тензорезисторов

ет низкие значения коэффициента π_{44} и низкое омическое сопротивление слоя.

На рис. 3 приведена схема топологии радиального и тангенциального тензорезисторов. Тензорезисторы состоят из активных и пассивных участков. Активные участки имеют высокую тензочувствительность и омическое сопротивление и обеспечивают изменение выходного сигнала преобразователя при приложении давления. Пассивные участки имеют низкое омическое сопротивление и тензочувствительность и выполняют роль межсоединений. Различие в свойствах активных и пассивных участков достигается за счет разной концентрации бора. При разработке топологии тензорезисторов учитывали расположение областей с максимальными механическими напряжениями на кольцевой мембране с указанными геометрическими параметрами.

Проведенное технологическое моделирование маршрута формирования тензорезисторов с использованием программы PROWIZ1D показало равномерное распределение бора в тензорезисторах в отличие от диффузионных тензорезисторов традиционных преобразователей давления. Данный факт имеет важное значение, так как характер

распределения примеси влияет на значение главного тензорезистивного коэффициента π_{44} и его температурную зависимость [30, 31]. В табл. 2 приведены значения сопротивления и главного тензорезистивного коэффициента π_{44} для выбранных концентраций примеси с учетом равномерного легирования [30, 31], которые были использованы для проведения моделирования.

Расчет характеристик преобразователя

Для расчета характеристик преобразователя был задан ряд граничных условий и нагрузок.

К поверхностям трехмерной модели были приложены структурные нагрузки. К двум внутренним граням модели были приложены условия симметрии, налагающие запрет на смещение точек модели по нормали к грани. К нижней грани модели были приложены граничные условия жесткого закрепления. На мембрану преобразователя было приложено давление. При расчете не учитывалось рассеяние теплоты в тензорезисторах от протекающего тока.

Расчет выходной характеристики преобразователя проводился для диапазона давления 0...1 атм с шагом 0,1 атм и температур $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Выбор трех температур позволяет рассчитать важные параметры преобразователя — температурный коэффициент нулевого выходного сигнала (TK0) и температурный коэффициент чувствительности (TKЧ).

По аналогии с традиционными преобразователями предлагаемый преобразователь давления имеет четыре тензорезистора — два тангенциальных и два радиальных. Тензорезисторы объединены в полную мостовую схему. После расчета со-

Таблица 2
Значения сопротивления и коэффициента π_{44} для кремния [30, 31]

Концентрация бора, см^{-3}	Сопротивление кремния, Ом · см			$\pi_{44}, 10^{-11} \text{ м}^2 \cdot \text{Н}^{-1}$		
	$-40\text{ }^{\circ}\text{C}$	$+20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$+80\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-40\text{ }^{\circ}\text{C}$	$+20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$+80\text{ }^{\circ}\text{C}$
$5 \cdot 10^{18}$	0,015	0,015	0,015	125	100	80
$8 \cdot 10^{19}$	0,0013	0,00152	0,00174	48	45	42

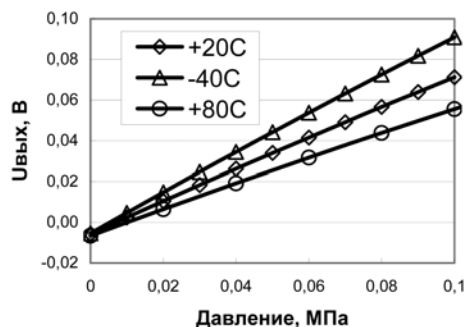


Рис. 5. Расчетная зависимость выходного сигнала преобразователя от давления и температуры

противления тензорезисторов для определенной температуры и давления проводился расчет выходного напряжения. На рис. 4 (см. четвертую сторону обложки) приведены некоторые результаты моделирования. На рис. 5 приведен результат расчета зависимости выходного сигнала преобразователя от давления и температуры.

Анализ результатов моделирования

На основе зависимости выходного сигнала разработанного преобразователя от давления и температуры были определены основные параметры преобразователя, результаты которого приведены в табл. 3. В этой таблице для сравнения даны основные параметры двух преобразователей, также разработанных и изготовленных в НПК "Технологический центр" МИЭТ. Миниатюрный преобразователь с поликремниевой мембраной и тензорезисторами был изготовлен в 2000 г. [22, 23]. Преобразователь имеет круглую мембрану диаметром 75 мкм и толщиной 1 мкм. Особенностью преобразователя является расположение пассивных тензорезисторов не на подложке, а на такой же мембране, но не обладающей чувствительно-

стью к давлению. За счет такого конструктивного решения достигнуты одинаковые условия рассеяния теплоты для активных и пассивных тензорезисторов.

Преобразователь ИПД-4, серийно выпускавшийся в НПК "Технологический центр" МИЭТ в 1990—1995 г., изготовлен по традиционной объемной технологии микрообработки кремния, и имеет четыре активных тензорезистора, объединенных в полную мостовую схему [32]. Преобразователь не имеет температурной компенсации. Диапазон давления преобразователя ИПД-4, характеристики которого приведены в табл. 3, составляет 0...1 атм.

Как можно видеть из табл. 3, чувствительность разработанного преобразователя сравнима с чувствительностью традиционного преобразователя, имеющего тот же рабочий диапазон давления. Хотя такой результат был ожидаем, необходимо отметить два фактора, непосредственно повлиявшие на чувствительность. Первый — равномерное распределение бора в тензорезисторах, второй — оптимизация топологии тензорезисторов в целях снижения вклада паразитной части тензорезисторов в выходной сигнал. В результате, достигнутое значение чувствительности в несколько раз превышает чувствительность миниатюрного преобразователя с тензорезисторами из поликремния.

Другой важный параметр разработанного преобразователя — ТКЧ, существенно больше значения данного параметра для двух других типов преобразователей (табл. 3). ТКЧ преобразователя определяется зависимостью коэффициента тензочувствительности π_{44} от температуры и зависит от типа и концентрации примеси. В преобразователях всех трех типов используется бор, концентрация которого находится в диапазоне $(5...8) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ [22, 23]. Однако для равномерно легированного кремния зависимость коэффициента тензочувствительности π_{44} от температуры более крутая, чем для неравномерно легированного [31]. Данный фактор приводит к тому, что ТКЧ разработанного преобразователя выше, чем у преобразователей двух других типов.

ТКО разработанного преобразователя достаточно низок и близок к коэффициенту традиционного преобразователя. Данный коэффициент определяется изменением сопротивления тензорезисторов от температуры и в общем случае зависит от разницы в конструкции активных и пассивных тензорезисторов, в частности, от условий температурного расширения [31]. В предложенном преобразователе активные и пассивные тензорезисторы размещены на мембране, что сводит

Таблица 3

Сравнительная таблица параметров преобразователей давления

Параметр	Разработанный преобразователь (расчет)	НПК ТЦ [22, 23]	ИПД-4 НПК ТЦ [32]
Чувствительность при +20 °С, мВ(В·атм) ⁻¹	15,4	2,8...2,9	11,9...16,6
ТКЧ, %/10 °С	-4,15	-1,7...-2,4	-1,8...-2,5
ТКО, %/10 °С	0,18	0,4...2,3	<0,1
Коэффициент нелинейности, %	1,54	0,9...1,1	<0,15

к минимуму разницу в температурных условиях. В результате, при изменении температуры активные и пассивные тензорезисторы испытывают одинаковые механические напряжения, что приводит к одинаковым значениям изменения сопротивления и, соответственно, к незначительному дрейфу начального выходного сигнала при отсутствии нагрузки (табл. 3). Однако на данный параметр также оказывает влияние рассовмещение тензорезисторов относительно мембраны и соотношение размеров тензорезисторов и мембраны, так что о реальных значениях данного параметра можно говорить только после изготовления экспериментальных образцов преобразователя.

Нелинейность выходной характеристики предложенного преобразователя на порядок выше, чем у традиционного преобразователя (см. табл. 3). Высокая нелинейность характерна для миниатюрных преобразователей [13, 16, 17] и обусловлена соотношением длины тензорезистора и стороны мембраны. В миниатюрных преобразователях давления данное соотношение составляет $1 : 4$ — $1 : 6$, в то время как в традиционных преобразователях давления данное соотношение составляет $1 : 15$ — $1 : 20$. Таким образом, тензорезисторы в миниатюрных преобразователях давления являются распределенными, а не точечными чувствительными элементами. Кроме того, толщина тензорезисторов в миниатюрных преобразователях давления сравнима с толщиной мембраны. Совокупность этих факторов приводит к тому, что тензорезисторы существенно изменяют геометрию мембраны и влияют на ее деформацию, что увеличивает нелинейность выходной характеристики преобразователя. Результаты моделирования подтверждают данные предположения.

В целом, разработанная конструкция преобразователя давления демонстрирует черты как миниатюрных, так и традиционных преобразователей. Значения чувствительности, ТК0 и ТКЧ предложенного преобразователя соответствуют или близки к значениям этих параметров традиционных преобразователей. В то же время нелинейность выходной характеристики имеет высокое значение, характерное для миниатюрных преобразователей. Высокая чувствительность является несомненным достоинством преобразователя. Вкупе с небольшими габаритными размерами это делает предложенный преобразователь перспективным компонентом для создания высокофункциональных систем контроля давления.

Заключение

В данной работе предложена конструкция миниатюрного преобразователя давления на КНИ-структуре. Преобразователь имеет тензорезисторы из монокристаллического кремния, формируемые из рабочего слоя КНИ-структуры, и мембрану из поликристаллического кремния. Такое сочетание позволяет совместить в конструкции достоинства традиционных и миниатюрных преобразователей давления — высокую чувствительность и маленькие габаритные размеры. Структура преобразователя формируется с помощью технологии поверхностной микрообработки с применением односторонней обработки пластины.

Расчет выходной характеристики преобразователя выполнен с помощью конечно-элементного моделирования. Для расчета использовалась трехмерная модель $1/4$ кристалла преобразователя, имеющая размеры $500 \times 500 \times 400$ мкм. Мембрана преобразователя имеет кольцевую форму с жестким закреплением по внешнему и внутреннему радиусам. Топология радиального и тангенциального тензорезисторов оптимизирована для обеспечения максимального изменения выходного сигнала преобразователя при приложении давления за счет участков, расположенных в областях с максимальными механическими напряжениями. Различие в свойствах активных и пассивных участков тензорезисторов достигалось за счет разной концентрации бора.

Расчет выходной характеристики преобразователя проводили для диапазона давления $0 \dots 1$ атм с шагом $0,1$ атм и температур -40 °С, $+20$ °С и $+80$ °С. Расчет показал, что чувствительность преобразователя, составляющая $15,4 \text{ мВ} \cdot (\text{В} \cdot \text{атм})^{-1}$, соответствует чувствительности традиционных преобразователей. Значения ТК0 и ТКЧ также близки к значениям данных параметров традиционных преобразователей. Недостатком преобразователя является высокая нелинейность — $1,54$ %, которая характерна для миниатюрных преобразователей и обусловлена соотношением длины тензорезистора и стороны мембраны.

В целом, разработанный преобразователь имеет свойства как миниатюрных, так и традиционных преобразователей, и в сравнении с теми и другими обладает рядом немаловажных достоинств, которые делают перспективным его применение в малогабаритных системах измерения давления.

Список литературы

1. Cote G. L., Lee R. M., Pishko M. V. Emerging Biomedical Sensing Technologies and Their Applications // IEEE Sensors Journal. June 2003. Vol. 3. P. 251—266.
2. Lekkala J. Wireless biomedical sensing: challenges and opportunities // Biomedical sensors, Foresight Workshop IV. June 2006, Tampere, Finland.
3. Saliterman S. Fundamentals of BioMEMS and Medical Microdevices. Bellingham, WA: SPIE Press, 2006.
4. Годовицын И. В., Парменов Ю. А. Матричные тактильные датчики: применение и технологии // Зарубежная электронная техника. 1996. № 3. С. 109—126.
5. Takao H., Sawada K., Ishida M. Multifunctional Smart Tactile-Image Sensor with Integrated Arrays of Strain and Temperature Sensors on Single Air-Pressurized Silicon Diaphragm // Dig. Tech. Papers of Transducers'05. P. 45—48.
6. Sugiyama S., Kawahata K., Abe M., Funabashi H., Igarashi I. High-resolution silicon pressure imager with CMOS processing circuits // Proc. of Transducer'87. 1987. P. 444—447.
7. Esashi M., Sugiyama S., Ikeda K., Wang Y., Miyashita H. Vacuum-Sealed Silicon Micromachined Pressure Sensors // Proc. of the IEEE. 1998. 86. P. 1627—1639.
8. <http://www.mate.tue.nl/mate/showabstract.php/10613>.
9. French P. J., Sarro P. M. Surface versus bulk micromachining: the contest for suitable applications // J. Micromech. Icroeng. 1998. N 8. P. 45—53.
10. Guckel H., Burns D. W., Rutigliano C. R., Showers D. K., Uglow J. Fine grained polysilicon and its applications to planar pressure transducers // Proc. 4th Int. Conf. Solid. State Sensors and Actuators (Transducers'87), Tokyo. P. 277—282.
11. Chau K. H.-L., Fung C. D., Harris P. R., Panagou J. G. Over-range behavior of sealed-cavity polysilicon pressure sensors // Sensors and Actuators A28. 1991. P. 147—152.
12. Chau K. H.-L., Fung C. D., Harris P. R., Dahrooge G. A. A versatile polysilicon diaphragm pressure sensor chip // Proc. IEDM. 1991. P. 761—764.
13. Lisec T., Stauch H., Wagner B. Surface-Micromachined piezoresistive pressure sensors // Sensors Kongress-Band. 1995. P. 21—25.
14. Kalvesten E., Lennart L., Stemme G. A small-size silicon microphone for measurements in turbulent gas flows // Sensors and Actuators A45. 1994. P. 103—108.
15. Kalvesten E., Smith L., Tenerz L., Stemme G. The first surface micromachined pressure sensors for cardiovascular pressure measurements // IEEE. 1998. P. 574—579.
16. Eaton W. P., Smith J. H. Characterization of a surface micromachined pressure sensor array // Proc. Of SPIE Micromachining and Microfabrication Symposium, Austin, TX. 1995. Vol. 2642. P. 256—264.
17. Eaton W. P., Smith J. H. Planar surface-micromachined pressure sensor with a sub-surface, embedded reference pressure cavity // Proc. Of SPIE Micromachined Devices and Components, Austin, TX. 1996. Vol. 2882.
18. Xu Y., Jiang F., Tai Y.-C., Donzier E., Loomis W., Liberman A. A Surface Micromachined Nitride-Diaphragm High-Pressure Sensor for Oil Well Application // ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Orlando, Florida. 2000. P. 425—429.
19. Melvas P., Kalvesten E., Stemme G. Media protected surface micromachined leverage beampressure sensor // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2001. September. P. 617—622.
20. Melvas P., Kalvesten E., Stemme G. A miniaturized leverage beam pressure sensors with passive temperature compensation // MME. 2001. September. P. 163—166.
21. Melvas P., Kalvesten E., Enoksson P., Stemme G. Miniaturized pressure sensor using a free hanging strain-gauge with leverage effect for increased sensitivity // Proc. Transducers. 2001. June. P. 494—497.
22. Годовицын И. В., Зимин В. Н. Сверхминиатюрный интегральный преобразователь давления пьезорезистивного типа // Сенсоры и микросистемы. 2000. С. 59.
23. Годовицын И. В., Зимин В. Н., Петров А. Ю., Шелепин Н. А. Сверхминиатюрный преобразователь давления для специальных применений // Микросистемная техника. 2001. № 7. С. 3—5.
24. French P. J. Polysilicon: a versatile material for Microsystems // Sensors and Actuators. A99. 2002. P. 3—12.
25. Годовицын И. В., Федоров Р. А., Чаплыгин Ю. А. Емкостный преобразователь давления по технологии поверхностной микрообработки // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 7. С. 54—59.
26. Guckel H., Sniegowski J. J., Chrislenson T. R., Mohny S., Kelly T. F. Fabrication of micromechanical devices from polysilicon films with smooth surfaces // Sensors and Actuators. 1989. Vol. 20 (1—2). P. 117—122.
27. Kim M. T. Influence of substrates on the elastic reaction of films for the microindentation tests // Thin Solid Films. 1996. 283. P. 12—16.
28. Tabata O., Kawahata K., Sugiyama S., Igarashi I. Mechanical property measurements of thin films using load-deflection of composite rectangular membranes // Sensors and Actuators. 1989. N 20. P. 135—141.
29. Mason W. P. Physical acoustics and the properties of solids. Princeton, N. J.: D. Van Nostrand Company, 1958. 524 с.
30. Стучебников В. М. Тензорезисторные преобразователи на основе гетероэпитаксиальных структур "кремний на сапфире" // Измерения, контроль, автоматизация: н.-т. сборник. 1982. № 4 (44). С. 15—26.
31. Ваганов В. И. Интегральные тензопреобразователи. М.: Энергоатомиздат, 1983. 136 с.
32. Зимин В. Н., Данилова Н. Л., Панков В. В., Шабратов Д. В. Базовые конструкции интегральных тензопреобразователей на ряд давлений от 0,01 до 40 МПа // Датчики и системы. 1999. № 2. С. 52—55.

Л. М. Белкин, аспирант,
М. Е. Белкин, д-р техн. наук, зав. науч. лаб.,
 Московский государственный технический
 университет радиотехники, электроники и
 автоматики
 E-mail: belkin@mirea.ru

БЕССТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕРХНОСТНО ИЗЛУЧАЮЩЕГО ЛАЗЕРА С ПОЛОСОЙ МОДУЛЯЦИИ В СВЧ ДИАПАЗОНЕ

Поступила в редакцию 26.07.2011

Предложена бесструктурная (в виде эквивалентной электрической схемы) нелинейная модель поверхностно излучающего лазера с вертикальным резонатором (VCSEL), пригодная для разработчиков аппаратуры современных сверхскоростных цифровых и аналоговых ВОСП с полосой поднесущих в СВЧ диапазоне, локальных телекоммуникационных систем волоконно-эфирной структуры, устройств СВЧ оптоэлектроники, а также оптических межсоединений в ИМС. Исходными данными для разработки модели служат результаты измерения статической и динамической характеристик электрооптического преобразования и характеристики отражения по модулирующему входу испытуемого образца. Описывается методика экстракции параметров его эквивалентной схемы с помощью высоко-развитой электронной САПР. Приводятся результаты моделирования и измерения интермодуляционных искажений третьего и пятого порядков длинноволнового VCSEL сплавной конструкции с полосой модуляции в СВЧ диапазоне. Оценивается уровень линейности испытуемого типа VCSEL при передаче аналоговых СВЧ сигналов.

Ключевые слова: сверхвысокочастотная оптоэлектроника, поверхностно излучающий лазер с вертикальным резонатором (VCSEL), бесструктурная модель, интермодуляционные искажения

Введение

Для корректного проектирования современных сверхскоростных цифровых и многоканальных аналоговых волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) с полосой поднесущих в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне, локальных телекоммуникационных систем волоконно-эфирной структуры (RoF), устройств СВЧ оптоэлектроники, а также оптических межсоединений в интегральных микросхемах (ИМС) требуются модели активных оптоэлектронных компонентов, принципы построения которых согласованы с высокоразвитыми стандартами моделирования и проектирования сосуществующих с ними радиотехнических приборов и цепей. А именно, модель должна с достаточной точностью описывать основные характеристики передачи реального прибора. Кроме того, она должна быть компактной, эффективной для использова-

ния современными системами автоматизированного проектирования (САПР) и отображать реальные режимы функционирования проектируемого схемного узла или модуля. Последнее означает, что для всех указанных выше систем и устройств лазер и даже фотодетектор необходимо моделировать в режиме большого сигнала. Важное требование к модели оптоэлектронного компонента с полосой пропускания в СВЧ диапазоне также состоит в ее совместимости с общепринятыми электрическими моделями окружающих электронных и механических узлов, например, корпуса, пассивных интерфейсов на базе линий с сосредоточенными и распределенными параметрами, драйверов, усилителей и т. д.

В соответствии с интенсивным развитием поверхностно излучающих лазеров с вертикальным резонатором (VCSEL) для локальных телекоммуникационных и вычислительных сетей [1] в настоящее время имеется большое число публикаций, связанных с моделированием VCSEL, в научной периодической и книжной литературе. В частности, в работе [2] предложена комплексная схемотехническая модель VCSEL, основанная на сложных аналитически решаемых скоростных уравнениях переноса фотонов, заряда и температуры. Эта модель детально и адекватно описывает внутренние процессы в оптоэлектронном приборе, однако электрический (модулирующий) вход лазера моделируется всего лишь постоянной емкостью в параллель с нелинейным управляемым током источником напряжения. То есть в модели практически не учитываются паразитные элементы схемы, влияние которых весьма существенно на частотах модуляции выше 100 МГц [3].

Принимая это во внимание, был разработан ряд более простых, так называемых аналитических моделей VCSEL, основанных на решении линеаризованных одномодовых скоростных уравнений. Данные модели в зависимости от структуры и конструкции лазерного кристалла можно разделить на две группы: для коротковолнового телекоммуникационного диапазона (0,8...1 мкм) с одним внутрирезонаторным контактом и оксидной апертурой [4, 5] и для длинноволнового телекоммуникационного диапазона (1,2...1,6 мкм) с двумя внутрирезонаторными контактами и туннельным переходом [6, 7]. Все перечисленные модели являются линейными, т. е. основаны на малосигнальном анализе с представлением электрического входа в виде упрощенной эквивалентной схемы RLC .

Вследствие того, что с помощью данных моделей невозможно описать работу VCSEL в режиме большого сигнала, который соответствует его ра-

боте в реальных цифровых и аналоговых ВОСП и устройствах СВЧ оптоэлектроники, были также предложены нелинейные модели лазера, основанные на так называемых SPICE-моделях [8]. В них эффект электрооптического преобразования в активной области лазера моделируется с использованием известного подхода Такера [9], заключающегося в представлении его реальной ватт-амперной характеристики в виде эквивалентной вольт-амперной характеристики активной электрической цепи. Также известна предложенная в работе [10] и развитая в работе [11] компактная нелинейная модель VCSEL, основанная на физической модели [2] с добавлением пассивных линейных цепей. Данная модель весьма аккуратно описывает его вольт-амперную характеристику в широком температурном интервале, но процедура экстракции, включающая синтез по 41 параметру (16 для входной цепи и 25 для скоростных уравнений), делает ее, на наш взгляд, непригодной для практики.

Таким образом, несмотря на многочисленные публикации, вопрос создания простой модели VCSEL схемотехнического уровня, пригодной для разработчиков передающих оптоэлектронных модулей ВОСП и устройств СВЧ оптоэлектроники, остается актуальным.

Бесструктурная модель VCSEL с полосой модуляции в СВЧ диапазоне и принципы моделирования с ее помощью

Нами разработана универсальная компьютерная модель VCSEL схемотехнического уровня, пригодная для исследования вышеупомянутых ВОСП, а также устройств СВЧ оптоэлектроники и оптических межсоединений. В ней лазер может быть представлен как отдельный кристалл, кристалл в корпусе либо как прибор в модуле. В ходе моделирования анализ и параметрическая оптимизация характеристик конкретного образца длинноволнового VCSEL с двойной внутрирезонаторной конструкцией контактов [12] реализуются с помощью высокоразвитой электронной САПР, например AWR Design Environment (AWRDE)¹.

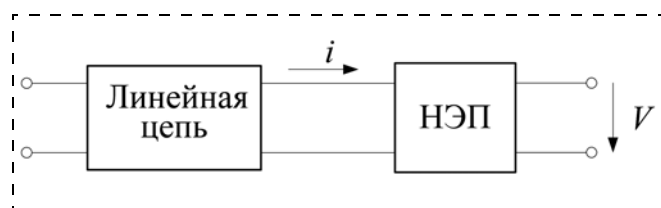


Рис. 1. Бесструктурная нелинейная модель VCSEL

Полная бесструктурная модель VCSEL, основанная на подходе Такера, представлена на рис. 1. Как следует из этого рисунка, модель разделена на две секции: линейную цепь и нелинейный эквивалентный преобразователь (НЭП) тока в напряжение. Секция НЭП содержит идеальный управляемый напряжением источник тока и библиотечный элемент LOOKUP программы AWRDE, представляющий собой, так называемую таблицу соответствия, в которой осуществляется преобразование входных данных в выходные. В ходе моделирования в этот элемент заносятся данные измерения ватт-амперной характеристики (ВтАХ) лазера.

Компьютерная реализация линейной секции в виде физической эквивалентной схемы (ФЭС) показана на рис. 2 (в центре). Основное преимущество представления в виде ФЭС заключается в том, что каждый ее элемент имеет ясную физическую интерпретацию. А именно, на рис. 2 элементы C_p и R_p описывают соответственно емкость и потери в контактной площадке кристалла лазера; R_s — последовательное сопротивление кристалла, R_j и C_j — соответственно сопротивление и емкость гетероперехода. Кроме того, элемент R_0 моделирует потери на зеркалах VCSEL, а элемент L_0 — эффект накопления фотонов. Данная схема подобна стандартному малосигнальному представлению [7], но с целью оценки влияния соединительных проводников от анодного и катодного контактов кристалла дополнительно введены индуктивные элементы L_{w1} и L_{w2} . Помимо этого, для определения реальной, а не нормированной, как обычно, частотно-модуляционной характеристики (ЧМХ) в ФЭС (рис. 2) введен идеальный управляемый напряжением источник напряжения U_1 .

Процедура моделирования начинается с экстракции параметров элементов малосигнальной ФЭС, что осуществляется в данной САПР путем автоматического последовательного перебора их числовых значений до близкого совпадения с результатами измерения характеристики коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) и ЧМХ (модуль S_{21}) испытуемого образца VCSEL, установленного в измерительную камеру, подробно описанную в работе [3]. Измерения и соответственно экстракция выполняются во всем рабочем диапазоне токов смещения и частот модуляции VCSEL.

Полная эквивалентная схема для проведения компьютерной экстракции также представлена на рис. 2. Как следует из этого рисунка, для повышения точности экстракции в схему добавлены сле-

¹ <http://web.awrcorp.com/>

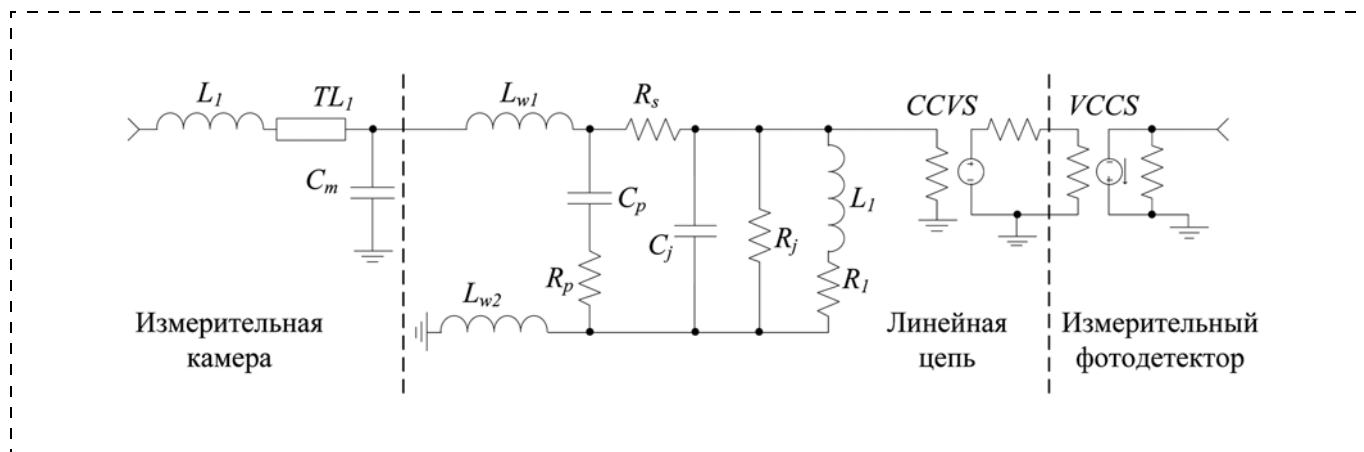


Рис. 2. Эквивалентная схема для экстракции параметров линейной ФЭС в САПР AWRDE

дующие элементы и цепи: ФЭС измерительной камеры (слева), содержащая индуктивный элемент L_1 , моделирующий соединительный провод от коаксиального разъема, элемент MLIN, моделирующий микрополосковую линию (МПЛ), и емкостный элемент C_m , моделирующий контактную площадку на конце МПЛ, а также идеальный управляемый напряжением источник тока $VCCS$ (справа). С помощью источника $VCCS$ описывается используемый при измерении ЧМХ $p-i-n$ фотодетектор, полоса пропускания которого много больше, чем у испытуемого лазера.

Одновременную численную оптимизацию такого большого набора параметров обычно не применяют при разработке на практике ввиду опасности потери физического смысла какого-либо из параметров. Поэтому была принята пошаговая методика проведения их экстракции. А именно, на первом шаге осуществляют калибровку параметров измерительной камеры, основанную на измерении характеристики коэффициента отражения (S_{11}) в режиме холостого хода, что позволяет определить значения элемента L_1 , а также длины и ширины линии TL_1 (см. рис. 2). На втором шаге, базируясь на измерении характеристики коэффициента отражения установленного в измерительную камеру образца VCSEL с закороченными (пробитыми) туннельным переходом и активной областью, определяются значения элементов ФЭС L_{w1} , C_p , R_p и минимальное значение R_s . Оставшиеся пять параметров ФЭС, включая полное значение R_s^1 , определяются путем одновременной калибровки по измеренным характеристикам КСВН и ЧМХ во всем рабочем диапазоне токов смещения

¹ Для упрощения данных расчетов предполагалось, что влияние L_{w2} мало в пределах рабочей полосы модуляции испытуемого VCSEL, т. е. $L_{w2} = 0$.

лазера. Чтобы обеспечить эффективное использование модели при любом рабочем токе, по окончании процедуры экстракции проводится полиномиальная аппроксимация полученных значений всех зависящих от тока смещения параметров ФЭС.

Для подтверждения корректности предложенных бесструктурной модели и методики экстракции ее параметров ниже приведены примеры ее разработки и модельных экспериментов для конкретной партии длинноволновых VCSEL производства *BeamExpress, SA* (Швейцария)². С этой целью были проведены соответствующие измерения параметров испытуемых образцов и на их основе выполнена согласно приведенной выше методике экстракция параметров ФЭС линейной цепи. В ходе моделирования и измерений использовались кристаллы длинноволнового (~1315 нм) VCSEL сплавной конструкции с типичным пороговым током 2 мА [12].

Калибровка измерительной камеры. Чтобы уменьшить влияние паразитных элементов в реальном модуле СВЧ диапазона, кристалл VCSEL необходимо установить на конце регулярной СВЧ линии, например микрополосковой или копланарной с известными параметрами. Для определения их в соответствии с изложенной выше методикой была измерена характеристика коэффициента отражения применяемой измерительной камеры в полосе 0,1...10 ГГц и, используя полученные данные, выполнена экстракция параметров. Результаты ее представлены на рис. 3. Как следует из рисунка, во всех трех контрольных точках на частотах 0,1, 5 и 10 ГГц наблюдается достаточно близкое совпадение данных моделирования и измерения, что свидетельствует о высокой точности проведен-

² www.beamexpress.com

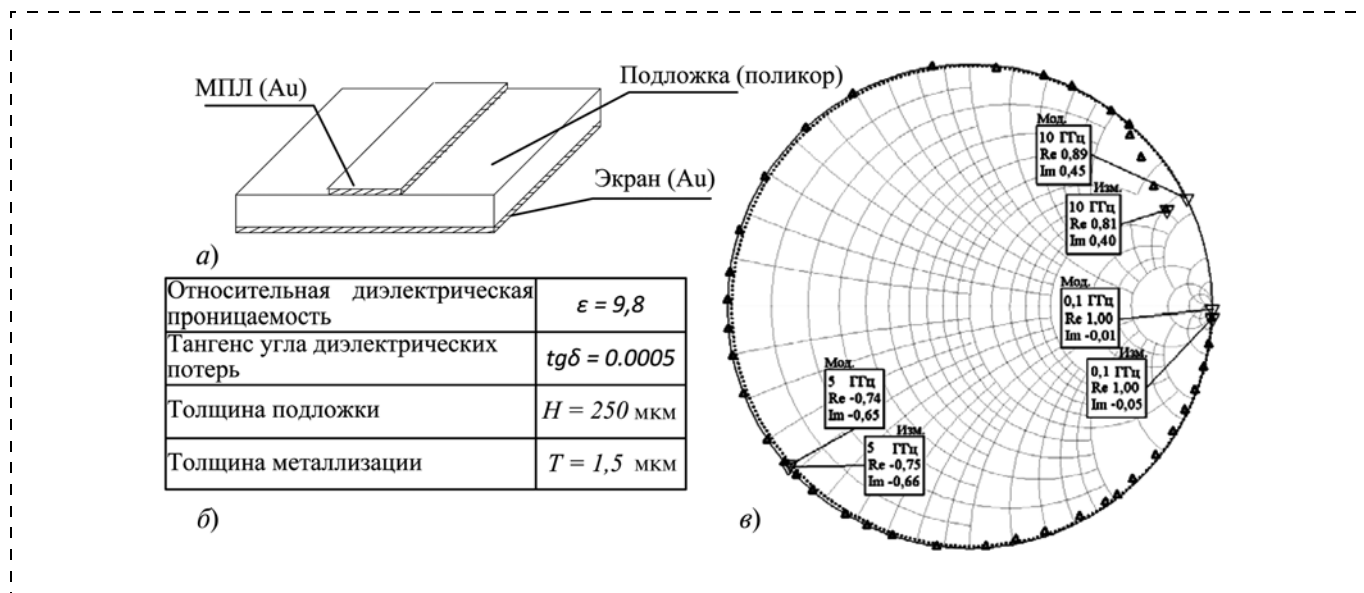


Рис. 3. Измерительная камера, результаты экстракции параметров измерительной камеры:

а — сечение подложки, б — основные параметры материала подложки, в — экстракция параметров: моделирование — пунктирная линия, эксперимент — треугольные маркеры

ной операции экстракции параметров измерительной камеры.

Входные данные. Процедура экстракции параметров разрабатываемой модели основывается на измерении трех характеристик установленного в измерительной камере кристалла испытуемого VCSEL: характеристики КСВН, малосигнальной ЧМХ и статической ватт-амперной характеристики. Для повышения точности моделирования обе динамические характеристики измеряются в типичном диапазоне постоянных токов смещения — от 4 до 9 мА с шагом 1 мА.

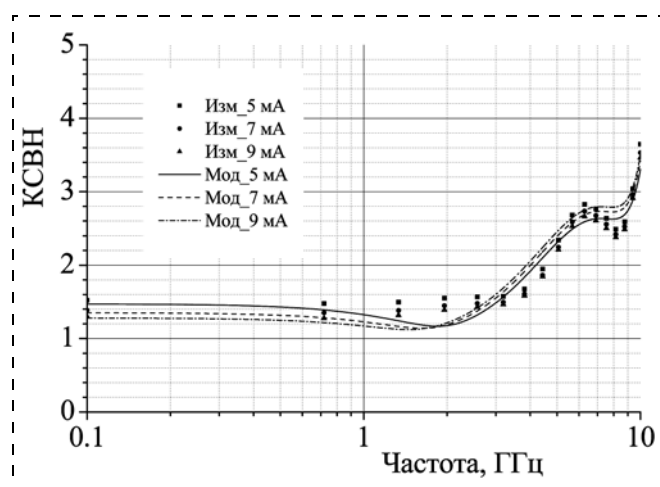


Рис. 4. Сравнение modeled (Мод_X мА) и измеренных (Изм_X мА) характеристик КСВН

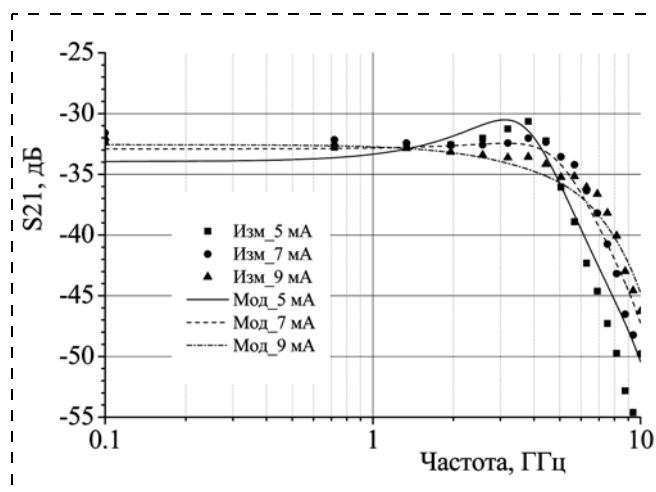


Рис. 5. Сравнение modeled (Мод_X мА) и измеренных (Изм_X мА) и измеренных частотно-модуляционных характеристик

Калибровка малосигнальной ФЭС по измеренным параметрам. Результаты расчета по экстрагированным параметрам малосигнальной ФЭС характеристик КСВН и ЧМХ исследуемого VCSEL (сплошные линии), в сравнении с результатами измерения аналогичных характеристик (в виде значков) представлены на рис. 4 и 5. Высокая точность совпадения данных расчета и измерения, особенно в области верхних частот, недостижимая для любой известной модели, построенной на базе аналитического подхода, свидетельствует о корректности выбранной физической эквивалентной схемы.

Таблица 1

Ток, мА	C_j , пФ	R_j , Ом	R_s , Ом	R_1 , Ом	L_1 , пГн
4	93,3	82	83,8	0,45	35,2
5	72,8	68	73	0,46	25,3
6	62,5	41	69,4	0,48	21
7	58,3	23	67	0,5	17,5
8	52,3	17	65,5	0,52	14,3
9	48,8	10	63,4	0,52	11,1

Полученные в результате экстракции по приведенной выше методике численные значения зависящих от тока смещения параметров ФЭС приведены в табл. 1.

Как следует из табл. 1, численные значения всех пяти параметров ФЭС, определяемых на последнем шаге приведенной методики, зависят от тока постоянного смещения лазера. Ход и пределы их изменения примерно соответствуют известным данным, полученным при малосигнальном моделировании VCSEL других конструкций [5, 7]. Параметры остальных элементов ФЭС, приведенных на рис. 2, не зависят от тока. Их численные значения получились равными: $L_1 = 0,48$ нГн; TL_1 : длина 1500 мкм, ширина 260 мкм; $C_m = 0,15$ пФ, $L_{w1} = 1,4$ нГн, $C_p = 0,81$ пФ, $R_p = 40$ Ом.

Модельные эксперименты

На базе разработанной бесструктурной модели VCSEL был проведен ряд модельных экспериментов.

А. Исследование интермодуляционных искажений. Подсоединив к ФЭС (см. рис. 2) нелинейную секцию согласно рис. 1, можно выполнить любые модельные эксперименты по расчету вносимых VCSEL линейных и нелинейных искажений. Для примера были исследованы наиболее широко применяемые в радиотехнической практике, так называемые интермодуляционные искажения (ИМИ) третьего и пятого порядков, которые представляют собой серьезную проблему при проектирова-

нии многоканальных аналоговых ВОСП и устройств СВЧ оптоэлектроники. Причиной этому является близкое расположение указанных интермодуляционных продуктов к несущим частотам передаваемых каналов, что не позволяет исключить их в приемном устройстве с помощью фильтрации. В лазерах основными источниками ИМИ считаются [9] нелинейность ВТАХ и неравномерность ЧМХ в области так называемого электрон-фотонного резонанса (см. рис. 5).

По определению одним из важнейших показателей качества аналоговой системы передачи является отношение сигнал/помеха (ОСП) комбинационной частоты, с помощью которого в ВОСП оценивается линейность характеристики электрооптического преобразования в режиме большого сигнала [13]. Данный параметр измеряется в децибелах и представляет собой величину, обратную ИМИ. Согласно известной методике, в лазерах с полосой модуляции в СВЧ диапазоне [13] исследование проводили при подаче на модулирующий вход VCSEL двух расположенных на расстоянии 100 МГц несущих одинаковой мощности с частотами в средней ($f_1 = 1,0$ ГГц и $f_2 = 1,1$ ГГц) и в верхней ($f_1 = 6,0$ ГГц и $f_2 = 6,1$ ГГц) областях полосы модуляции исследуемого VCSEL (см. рис. 5). Кроме того, чтобы оценить влияние выбора рабочей точки, было выполнено моделирование ИМИ в первой частотной области при ее установке в середине линейного участка ВТАХ (ток смещения 7 мА) и вблизи максимальных значений (ток смещения 12 мА). В соответствии с возможностями современных СВЧ измерительных приборов мощность каждого из входных сигналов составляла $P_i = 8$ дБм в первой частотной области и $P_i = 6$ дБм во второй частотной области.

Измерительная схема в САПР AWRDE (рис. 6) содержит каскадно включенные библиотечную модель многочастотного генератора TONE, под схему LIN_S линейной части модели VCSEL (рис. 2 без модели измерительного фотодетектора) и НЭП (LOOKUP) в виде таблицы соответствия. Понятно,

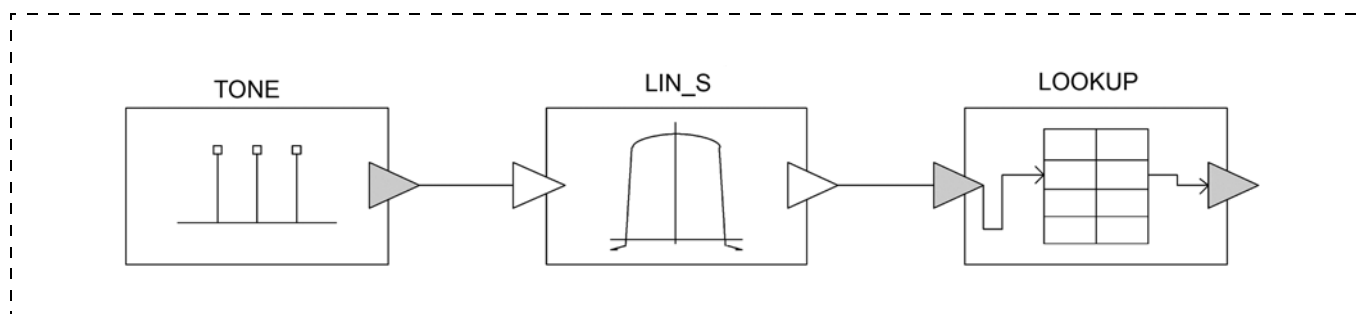


Рис. 6. Схема модельного эксперимента по исследованию интермодуляционных искажений с помощью САПР AWRDE

что при необходимости данная схема может быть без труда развита путем добавления электрических моделей корпуса лазера, микросхемы драйвера и т. д. Спектральные характеристики исследуемой нелинейной модели VCSEL представлены на рис. 7, а–в. Рассчитанные по ним ИМИ и, соответственно, ОСП третьего порядка (ОСП3) на частотах $2f_1 - f_2$ либо $2f_2 - f_1$ и пятого порядка (ОСП5) на частотах

$3f_1 - 2f_2$ либо $3f_2 - 2f_3$ приведены ниже в табл. 2 вместе с экспериментальными данными.

Полученные результаты качественно отражают известный из практики разработки мощных транзисторных СВЧ усилителей факт, что значение ОСП уменьшается при приближении рабочей точки к нелинейной области статической характеристики (в данном случае ВtАХ). Уменьшение ОСП в районе 6 ГГц объясняется заходом в область вышеупомянутого резонанса ЧМХ лазера (см. рис. 5).

Б. Исследование влияния соединительных проводников. Как отмечено выше, при разработке модели в целях упрощения и повышения точности процедуры экстракции влияние индуктивности катодной соединительной проволоки (L_{w2} на рис. 2) не принималось во внимание. Однако ее учет представляет практический интерес в связи с влиянием на полосу ЧМХ. Глядя на ФЭС на рис. 2, можно интуитивно предсказать, что влияние индуктивности анодной проволоки будет относительно небольшим, поскольку этот элемент включен последовательно с довольно высоким активным сопротивлением элемента R_s . Вместе с тем, через соединенную с землей индуктивность L_{w2} катодной проволоки протекает полный ток VCSEL, поэтому ее даже небольшое изменение, вероятно, будет оказывать существенное влияние на ЧМХ VCSEL в области верхних частот. Результаты модельного эксперимента при токе смещения 7 мА, подтверждающие высказанное предположение, представлены на рис. 8.

А именно, при значениях индуктивности L_{w1} меньших или немного больших 1,4 нГн (длина проволоки порядка 1 мм) вид ЧМХ практически не меняется, а существенное влияние на сокращение полосы ЧМХ анодной проволоки начинает сказываться только при увеличении ее длины более чем в 3 раза. Вместе с тем, даже при очень малых значениях индуктивности катодной проволоки ($L_{w2} = 10$ пГн) наблюдается существенное сокращение полосы модуляции за счет провала ЧМХ и появление локального максимума на частотах выше 10 ГГц. При увеличении индуктивности до 30 пГн провал исчезает и появляется подъем ЧМХ в области верхних частот, расширяя полосу модуляции VCSEL почти в 3 раза. При дальнейшем увеличении индуктивности амплитуда пика сначала возрастает, а затем появляются локальные провалы в полосе модуляции лазера. Обнаруженный эффект можно вполне логично объяснить резонансами с различными емкостными элементами ФЭС испытуемого VCSEL.

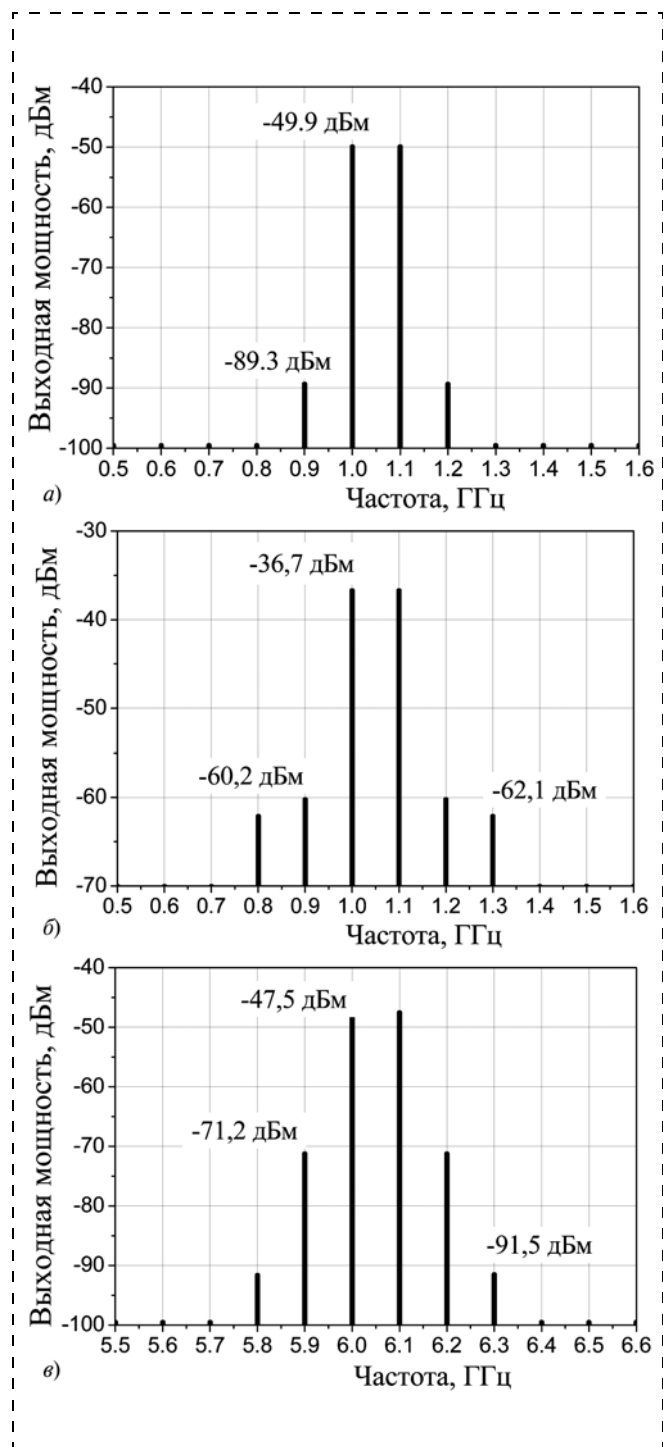


Рис. 7. Результаты моделирования интермодуляционных искажений: а — частотная область в районе 1 ГГц, ток смещения 7 мА; б — частотная область в районе 1 ГГц, ток смещения 12 мА; в — частотная область в районе 6 ГГц, ток смещения 7 мА

Таблица 2

Параметр	Тип данных	Рис. 7, а и 9, а	Рис. 7, б и 9, б	Рис. 7, в и 9, в
ОСПЗ	Моделирование Эксперимент	39 36	24 23	24 23
ОСП5	Моделирование Эксперимент	>50 48	37 40	44 44

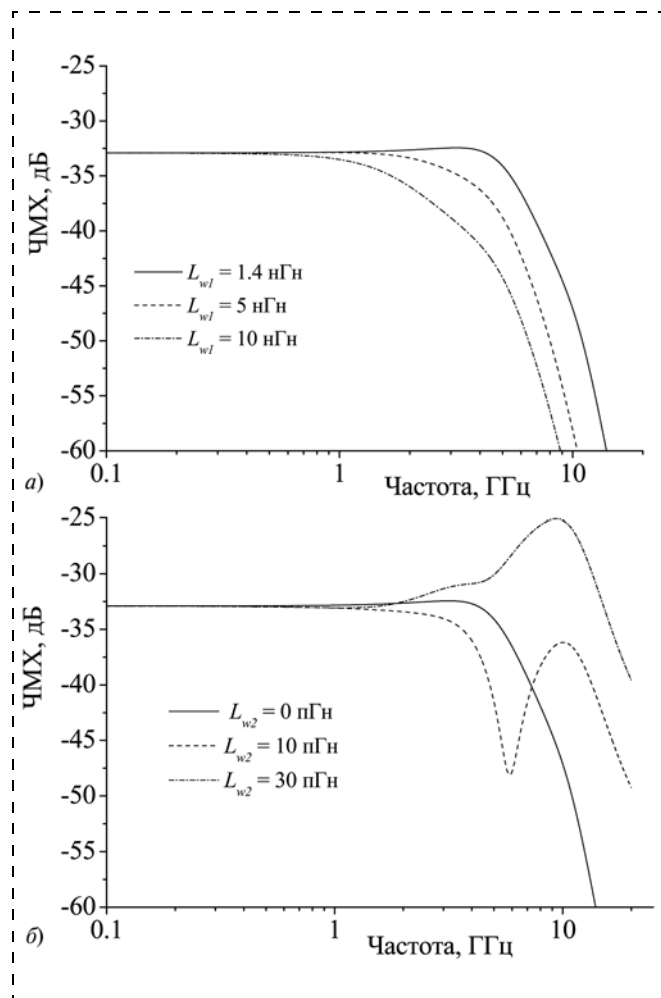


Рис. 8. Влияние индуктивностей соединительных проволок на ЧМХ VCSEL:

а — анодной проволоки (индуктивность L_{w1}); б — катодной проволоки (индуктивность L_{w2})

Отметим, что подход с последовательным включением индуктивности в цепи коллектора известен и используется для высокочастотной коррекции полосы пропускания транзисторных усилителей. В принципе, он также может быть использован для схемотехнического расширения полосы модуляции лазера типа VCSEL, однако окончательный вывод может быть сделан после проведения серьезных подтверждающих экспериментов, выходящих за рамки настоящего исследования. В данном случае проблема заключается в сложности реализации и точного измерения таких малых индуктивностей в СВЧ диапазоне.

Экспериментальное подтверждение

Для подтверждения корректности разработанной модели в режиме модуляции большим сигналом были проведены измерения ИМИ исследуемого VCSEL при аналогичных значениях токов сме-

щения лазера, мощностей и частот тестовых модулирующих СВЧ сигналов. Измерения проводили с помощью описанного ранее макета [14] по известной методике [13] с использованием фотодиода с полосой 50 ГГц и радиочастотного анализатора спектра Agilent E4448A. Для исключения влияния собственной нелинейности характеристики оптоэлектрического преобразования измерительного фотодиода уровень оптической мощности на его входе не превышал 0,5 мВт. Типичные измеренные спектральные характеристики испытуемого VCSEL представлены на рис. 9. Сравнение результатов моделирования и измерения отношения сигнал/помеха комбинационной частоты третьего и пятого порядков исследуемого VCSEL, основанное на данных соответственно рис. 7 и рис. 9, приведено в табл. 2.

Близкое совпадение полученных результатов (в пределах 3 дБ) свидетельствует о корректности разработанной модели VCSEL.

Оценка полученных результатов

Как известно, наиболее наглядный способ оценки линейных свойств активного прибора, в данном случае полупроводникового лазера, состоит в определении его так называемой точки пересечения по входу (ИП) [15], которая наиболее точно определяется графически, путем сравнения амплитудных характеристик лазера¹ по основному тону и ОСП соответствующего порядка. Достоинством данного параметра является возможность сопоставления различных устройств, независимо от мощности модулирующего сигнала P_i . Упрощенная оценка ИП третьего и пятого порядков (ИПЗ и ИП5) может быть проведена с помощью следующих формул [13]:

$$\text{ИПЗ} = P_i + \text{ОСПЗ}/2$$

$$\text{ИП5} = P_i + \text{ОСП5}/4.$$

¹ Зависимость выходной мощности измерительного фотодиода от мощности модулирующего сигнала на входе лазера.

Частотная область, ГГц	ИРЗ, дБ	ИР5, дБ
1	26	20
6	19	17

что согласуется с известными экспериментальными данными [16]. Сравнение с аналогичными результатами, приведенными в других публикациях, показывает, что точка пересечения третьего порядка исследованного в данной статье "длинноволнового" VCSEL сплавной конструкции с внутрирезонаторным расположением контактов примерно на 10 дБ выше, чем у "длинноволнового" VCSEL отличающейся конструкции [16], и находится на уровне лучших результатов для "коротковолнового" VCSEL с оксидной апертурой [17], что свидетельствует об эффективности его применения при проектировании современной передающей аппаратуры.

Заключение

В статье предложены и описаны новая бесструктурная модель поверхностно излучающего лазера с вертикальным резонатором и простая методика экстракции параметров его эквивалентной схемы, пригодные для разработчиков аппаратуры современных сверхвысокоскоростных цифровых ВОСП, многоканальных аналоговых ВОСП с полосой поднесущих в СВЧ диапазоне, устройств СВЧ оптоэлектроники, а также оптических межсоединений в ИМС. Основные особенности модели и методики по сравнению с известными результатами заключаются в следующем.

1. В линейной секции дополнительно учитывается влияние измерительной камеры, соединительного проводника между катодом и землей и потерь при электрооптическом преобразовании.

2. Нелинейная секция имеет простую конфигурацию, содержащую каскадно включенные идеальный источник тока, управляемый напряжением, и библиотечный элемент, в который записываются данные измерения ватт-амперной характеристики лазера.

3. Для повышения точности принята трехшаговая процедура экстракции параметров физической эквивалентной схемы, в которой на каждом шаге выполняется численная оптимизация не более пяти параметров.

4. Зависимые от тока смещения параметры модели аппроксимируются степенным полиномом, что обеспечивает корректное моделирование при любых токах смещения лазера.

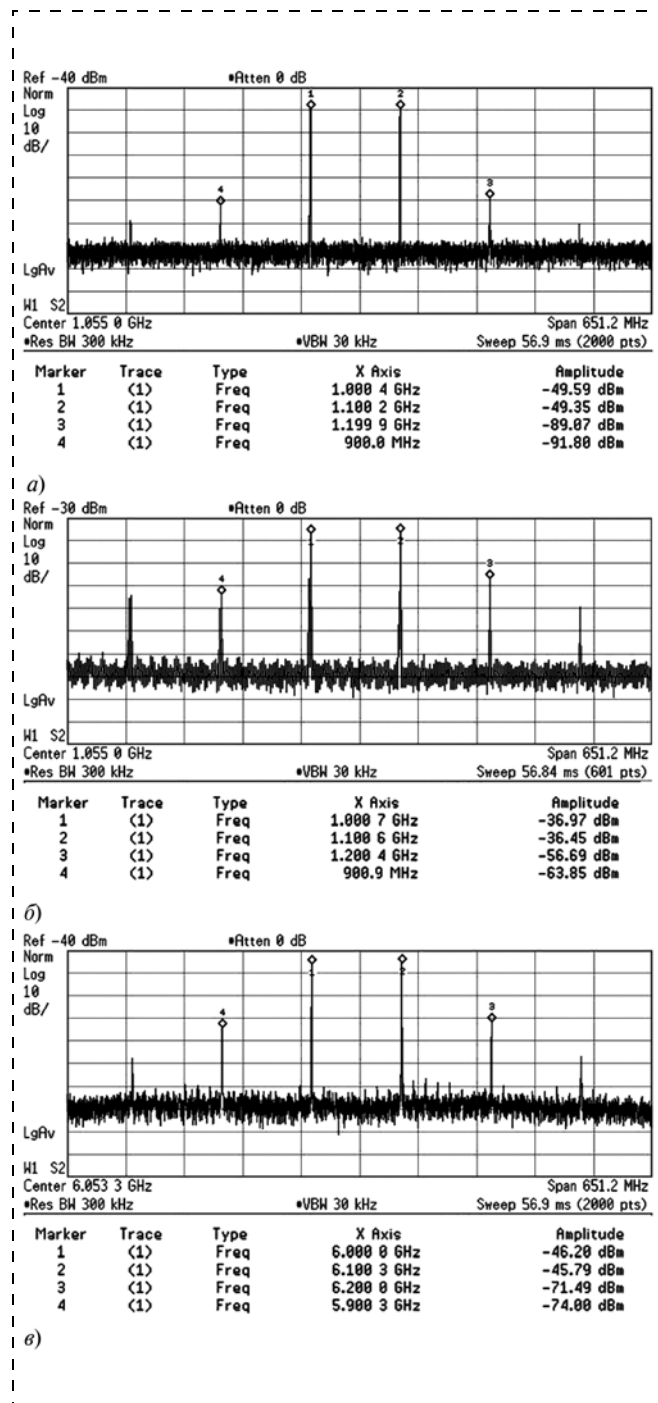


Рис. 9. Результаты измерения интермодуляционных искажений
 а — частотная область в районе 1 ГГц, ток смещения 7 мА; б — частотная область в районе 1 ГГц, ток смещения 12 мА; в — частотная область в районе 6 ГГц, ток смещения 7 мА

Базирующиеся на данных измерения (см. табл. 2) и приведенных выше формулах результаты расчета ИРЗ и ИР5 испытуемого VCSEL в частотных областях модулирующих сигналов в районе 1 и 6 ГГц приведены в табл. 3.

Как следует из табл. 3, уровень ИРЗ, а следовательно, линейность исследуемого VCSEL уменьшается по мере повышения частоты модуляции,

5. Оценка влияния соединительных проводников кристалла показала принципиальную возможность существенного расширения полосы модуляции VCSEL.

6. На базе нелинейной модели проведен оригинальный модельный эксперимент по расчету интермодуляционных искажений в режиме большого сигнала.

Работа выполнена в рамках проекта по аналитической ведомственной целевой программе Минобрнауки "Развитие научного потенциала высшей школы (2009—2011 годы)".

Список литературы

1. Koyama F. Recent advances of VCSEL photonics // IEEE Journal of Lightwave Technology. 2006. Vol. 24, N 12. P. 4502—4513.
2. Mena P. V., Morikuni J. J., Kang S.-M. et al. A comprehensive circuit-level model of vertical-cavity surface-emitting lasers // IEEE Journal of Lightwave Technology. 1999. Vol. 17, N 12. P. 2612—2631.
3. Белкин М. Е., Васильев М. Г. Полупроводниковые лазерные излучатели с высоким произведением средней мощности на полосу модуляции // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 9 (98). С. 23—33.
4. Westbergh P., Gustavsson J. S., Haglung A. et al. High-speed, low-current-density 850 nm VCSELs // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2009. Vol. 15, N 3. P. 694—702.
5. Ou Y., Gustavsson J. S., Westbergh P. et al. Impedance characteristics and parasitic speed limitations of high-speed 850 nm VCSELs // IEEE Photonics Technology Letters. 2009. Vol. 21, N 24. P. 1840—1842.
6. Piprek J., Mehta M., Jayaraman V. Design and optimization of high-performance 1,3 μm VCSELs // Proc. of SPIE. 2004. Vol. 5943. P. 375—384.
7. Bacou A., Hayat A., Yakovlev V. et al. Electrical modeling of long-wavelength VCSELs for intrinsic parameters extraction // IEEE Journal of Quantum Electronics. 2010. Vol. 46, N 3. P. 313—322.
8. Mena P. V., Morikuni J. J., Kang S.-M. et al. A simple rate-equation-based thermal VCSEL model // IEEE Journal of Lightwave Technology. 1999. Vol. 17, N 5. P. 865—872.
9. Tucker R. S. High-speed modulation of semiconductor lasers // IEEE Journal of Lightwave Technology. 1985. Vol. LT-3, N 6. P. 1180—1192.
10. Minoglou K., Kyriakis-Bitzaros E. D., Syvridis D., Halkias G. A compact nonlinear equivalent circuit model and parameter extraction method for packaged high-speed VCSELs // IEEE Journal of Lightwave Technology. 2004. Vol. 22, N 12. P. 2823—2827.
11. Minoglou K., Halkias G., Kyriakis-Bitzaros E. D. et al. VCSEL device modeling and parameter extraction technique // Proc. of 4th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, ICECS2007. 11—14 Dec. 2007. P. 14—17.
12. Kapon E., Sirbu A., Yakovlev V., Mereuta A., Caliman A., Suruceanu G. Recent developments in long wavelength VCSELs based on localized wafer fusion // ICTON 2009. Mo. D1.1. P. 1—4.
13. Белкин М. Е., Белкин Л. М. Исследование эффективности применения полупроводникового лазерного излучателя для передачи многоканального аналогового сигнала СВЧ диапазона // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 11. С. 32—37.
14. Белкин М. Е., Белкин Л. М. Исследование характеристики времени задержки включения поверхностно-излучающего лазера с вертикальным резонатором // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 11. С. 51—54.
15. Белкин М. Е. Метод расчета числа передаваемых каналов в многоканальной волоконно-оптической системе с ВЧ и СВЧ поднесущими // Радиотехника. 2006. № 12. С. 88—91.
16. Qian X., Hartmann P., Ingham J. D., Penty R. V., White I. H. Directly-modulated photonic devices for microwave applications // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. 2005. Vol. 44. P. 909—912.
17. Carlsson C., Larsson A., Alping A. RF Transmission over Multimode Fibers Using VCSELs — Comparing Standard and High-Bandwidth Multimode Fibers // IEEE Journal of Lightwave Technology. 2004. Vol. 22, N 7. P. 1694—1700.

8-я Международная выставка Силовая Электроника и Энергетика

29 ноября — 01 декабря 2011
Москва, Крокус Экспо

С 29 ноября по 1 декабря в Москве, в Крокус Экспо состоится 8-я Международная выставка "Силовая Электроника и Энергетика". На сегодняшний день выставка "Силовая Электроника и Энергетика" является уникальным для России проектом, ежегодно собирающим на своей площадке ведущих представителей отрасли.

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА — яркое событие в одной из наиболее прогрессивных и быстро развивающихся отраслей. Это единственная в России специализированная выставка для профессионалов, которая способствует продвижению наиболее интересных проектов, технологий и оборудования на российский и зарубежные рынки.

Тел.: +7 (812) 380-6003, 380-6007, 380-6000

Факс: +7 (812) 380-6001

E-mail: power@primexpo.ru

<http://www.powerelectronica.ru>

И. И. Абрамов, д-р физ.-мат. наук, проф.,
А. Л. Баранов, аспирант,
И. Ю. Щербакова, аспирант,
 Белорусский государственный университет
 информатики и радиоэлектроники, Минск,
 Республика Беларусь
 e-mail: nanodev@bsuir.edu.by

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ МОЛЕКУЛ

Поступила в редакцию 14.06.11

Показана универсальность модели, разработанной в рамках предложенного подхода к моделированию одноэлектронных приборных структур. С этой целью проведен расчет вольт-амперных характеристик структур, включающих и молекулы.

Ключевые слова: одноэлектронная приборная структура, пространственное квантование, молекула

Введение

Исследование и разработка одноэлектронных приборных структур и схем на их основе — одно из основных направлений в нанoeлектронике в целом [1, 2]. Кроме того, считается, что оно, в частности, является одним из магистральных направлений дальнейшего развития кремниевой нанoeлектроники [3].

Серьезной проблемой в рассматриваемой области является отсутствие экономичных моделей одноэлектронных приборных структур, допускающих исследование их электрических характеристик в зависимости от параметров материалов и конструкции. К сожалению, классические модели ортодоксальной теории [4] для этого использовать практически невозможно [2]. Заметим, что при построении наиболее строгих универсальных моделей одноэлектронных приборных структур необходимо решать очень сложную самосогласованную задачу [5]: систему уравнений для микрополей, кинетические уравнения и уравнение Шредингера. К сожалению, в настоящий момент времени такая задача трудноразрешима.

Целью данной статьи является иллюстрация универсальности модели, разработанной в рамках предложенного подхода к моделированию одноэлектронных приборных структур и лишенной отмеченного выше недостатка.

Подход и модель

Детальный анализ классических моделей ортодоксальной теории [4] дан в работе [2]. Главный недостаток этих моделей заключается в том, что основные подгоночные при согласовании с экспериментом параметры в них — емкости и сопротивления туннельных переходов. В результате с их помощью крайне сложно исследовать влияние конструктивно-технологических и электрофизических параметров на электрические характеристики одноэлектронных приборных структур, потому что эти параметры не являются непосредственно исходными данными таких моделей.

В связи с изложенным выше, начиная с 1998 года, развивается подход для моделирования одноэлектронных приборных структур, лишенный этого недостатка. Сущность предложенного подхода заключается в решении для таких приборных структур уравнения Пуассона и основного уравнения (master equation); вместо последнего часто целесообразно использовать метод Монте-Карло [2]. Первая модель подхода была разработана для металлического одноэлектронного транзистора с одним островком и достаточно подробно описана в работах [5, 6]. При этом для приборных структур нанoeлектроники были важны три следующих взаимосвязанных момента:

- о представлении структуры;
- о допустимости применимости основного уравнения;
- о расчете разности потенциалов на туннельном переходе до акта туннелирования и после.

Последний вопрос оказался самым сложным и привел к непростой задаче аппроксимации усредненной плотности заряда на островках в уравнении Пуассона, особенно для металлических одноэлектронных структур. Все эти три принципиально важных момента в деталях разъяснены в работе [2]. В дальнейшем предложенный экономичный подход был распространен на случай многоостровковых цепочек [7], матриц туннельных переходов [8], пространственного квантования [9], со-туннелирования [10]. Более полный список соответствующих работ приведен в [2].

Важным в развитии подхода являлось его распространение на случай моделирования как металлических, так и полупроводниковых одноэлектронных приборных структур с учетом пространственного квантования на островках [11—13]. В этом случае необходимо дополнительно решать уравнение Шредингера. Строгое численное решение уравнения Шредингера нецелесообразно, так как это приведет к существенной потере экономичности модели. Более

того, проблема идентификации параметров модели при ее согласовании с экспериментальными данными будет просто сложно разрешима.

В связи с этим нами было предложено использовать приближенные решения уравнения Шредингера на островках. В результате экономичность модели понижается несильно по сравнению со случаем неучета пространственного квантования, что позволяет использовать ее для моделирования многоостровковых одноэлектронных приборных структур. Неплохое согласование с экспериментальными данными при расчете вольт-амперных характеристик (ВАХ) было проиллюстрировано на многочисленных примерах металлических и полупроводниковых одноэлектронных приборных структур [11–13], в том числе на основе кремния и композиционных структур [14, 15]. Таким образом, и это важно, как показывают наши результаты (см. также далее), использование приближенного решения уравнения Шредингера оказывается достаточным. Модель, позволяющая учитывать пространственное квантование на островках, описана в работах [12, 13].

Результаты моделирования

По классификации работ [5, 16, 17] основными видами одноэлектронных приборных структур являются: металлические, полупроводниковые, композиционные и органические (с островками на основе молекул).

Проиллюстрируем применимость предложенного подхода и к моделированию одноэлектронных приборных структур, включающих молекулы, т. е.

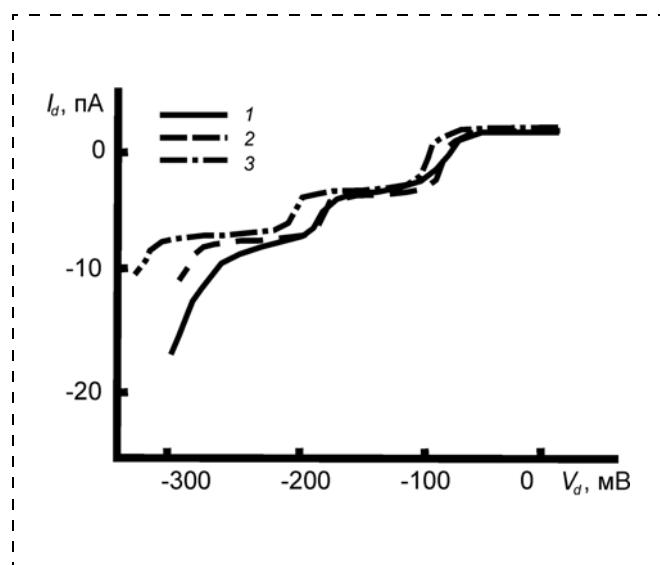


Рис. 1. ВАХ одноэлектронного транзистора:

1 — экспериментальные данные [18]; 2 — результаты моделирования (параболическая аппроксимация); 3 — результаты моделирования (без учета пространственного квантования)

фактически, и в соответствии с изложенным выше, универсальность модели, позволяющей учитывать пространственное квантование на островках.

На рис. 1 приведены результаты расчета стоковой ВАХ (I_d — ток стока, V_d — напряжение на стоке) одноэлектронного транзистора по предложенной модели с одним островком из фуллерена C_{60} и подложкой SiO_2 при температуре $T = 5$ К. Размеры островка 2×2 нм. Он расположен асимметрично относительно стока и истока на расстояниях от них 2,0 и 1,2 нм соответственно. Кривая 1 соответствует экспериментальным данным [18], 2 — результаты расчета по разработанной модели с учетом пространственного квантования (параболическая аппроксимация [12]), 3 — расчеты без учета пространственного квантования.

Как видно на рис. 1, для наилучшего согласования с экспериментальными данными необходимо использовать разработанную модель с учетом пространственного квантования на островке в рамках разработанного подхода.

На рис. 2 приведены результаты расчетов стоковой ВАХ по предложенной модели для одноэлектронного транзистора с одним островком из молекулы H_2 -TBPP (tetrakis-3,5-di-t-butylphenyl-porphyrin) при температуре $T = 5$ К. Размеры островка 2×2 нм. Островок также расположен асимметрично относительно стока и истока на расстояниях 3,1 и 1,9 нм соответственно. Кривая 1 соответствует экспериментальным данным [19], кривая 2 — результаты расчета по предложенной модели (параболическая аппроксимация [12]), кривая 3 — расчеты без учета простран-

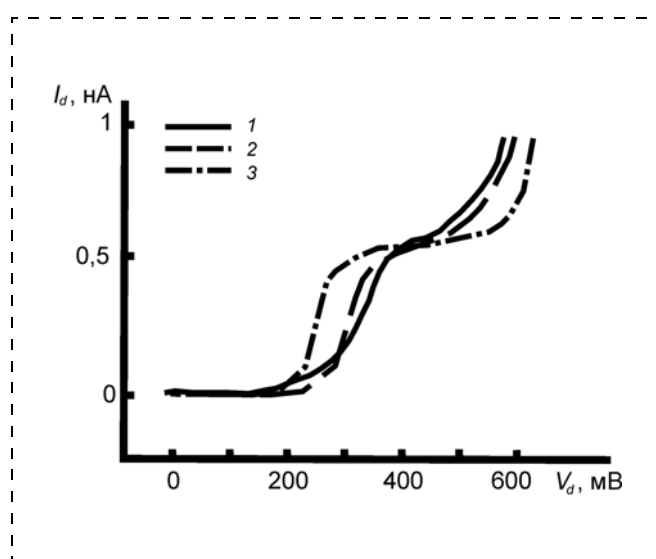


Рис. 2. ВАХ одноэлектронного транзистора:

1 — экспериментальные данные [19]; 2 — результаты моделирования (параболическая аппроксимация); 3 — результаты моделирования (без учета пространственного квантования)

ственного квантования. Как следует из рис. 2, учет пространственного квантования для данной молекулы и транзистора еще более важен.

Заключение

Показана применимость предложенного подхода к моделированию одноэлектронных приборных структур различных видов. В частности, проиллюстрирована универсальность разработанной в его рамках экономичной модели, позволяющей учитывать пространственное квантование на островках. При этом получается удовлетворительное согласование с экспериментальными данными при расчете ВАХ металлических, полупроводниковых, композиционных и органических одноэлектронных приборных структур, т. е. структур всех основных видов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Государственной программы научных исследований "Нанотех" Республики Беларусь.

Список литературы

1. **Абрамов И. И.** Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и нанoeлектроники. IV. Квантовомеханические формализмы // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 2. С. 24—32.
2. **Абрамов И. И.** Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и нанoeлектроники. VI. Одноэлектронные структуры // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 7. С. 10—24.
3. **Silicon nanoelectronics** / Ed. By S. Oda and D. Ferry. — Boca Raton: Taylor & Francis, 2006. 304 p.
4. **Likharev K. K.** Single-electron devices and their applications // Proc. IEEE. 1999. V. 87, N 4. P. 606—632.
5. **Абрамов И. И., Новик Е. Г.** Численное моделирование металлических одноэлектронных транзисторов. Минск: Бестпринт, 2000. 164 с.
6. **Абрамов И. И., Новик Е. Г.** Двумерная численная модель одноэлектронного транзистора // Микроэлектроника. 2000. Т. 29, № 3. С. 197—201.
7. **Абрамов И. И., Игнатенко С. А., Новик Е. Г.** Модель многоостровковых одноэлектронных цепочек на основе метода Монте-Карло // ФТП. 2003. Т. 37, вып. 5. С. 583—587.
8. **Абрамов И. И., Игнатенко С. А.** Физико-топологическая модель одноэлектронных матриц туннельных переходов // 13-я Международная конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". Матер. конф., 8—12 сентября 2003 г. Севастополь. Крым. Украина. С. 530—531.
9. **Абрамов И. И., Игнатенко С. А., Павленок С. Н.** Влияние поперечных размеров на характеристики одноэлектронного транзистора // 14-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". Матер. конф., 13—17 сентября 2004 г. Севастополь. Крым. Украина. С. 518—519.
10. **Абрамов И. И., Игнатенко С. А., Павленок С. Н.** Учет эффекта со-туннелирования в физико-топологической модели одноэлектронного транзистора // Изв. Белорусской инженерной академии. 2004. № 2 (18)/2. С. 87—89.
11. **Абрамов И. И., Баранов А. Л.** Учет пространственного квантования при моделировании одноэлектронных приборных структур // 17-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". Матер. конф., 10—14 сентября 2007 г. Севастополь. Крым. Украина. Т. 2. С. 591—592.
12. **Абрамов И. И., Баранов А. Л.** Моделирование металлических и полупроводниковых одноэлектронных приборных структур с учетом пространственного квантования на островках // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 3. С. 2—6.
13. **Abramov I. I., Baranoff A. L., Goncharenko I. A., Kolo-mejtseva N. V., Bely Y. L., Shcherbakova I. Y.** A nanoelectronic device simulation software system NANODEV: New opportunities // Proc. of SPIE. 2010. V. 7521. P. 75211E (11 p.).
14. **Абрамов И. И., Баранов А. Л., Щербакова И. Ю.** Моделирование полупроводниковых одноэлектронных приборных структур // Труды межд. научно-технической конф. "Нанотехнологии-2010". Дивноморское. 19—24 сентября 2010. Ч. 2. С. 24—26.
15. **Абрамов И. И., Баранов А. Л.** Моделирование одноэлектронных структур на основе кремния с использованием физико-топологических моделей // 16-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". Матер. конф., 11—15 сентября 2006 г. Севастополь. Крым. Украина. Т. 2. С. 661—662.
16. **Абрамов И. И., Новик Е. Г.** Классификация одноэлектронных структур // Изв. Белорусской инженерной академии. 1998. № 2 (6)/2. С. 4—8.
17. **Абрамов И. И., Новик Е. Г.** Классификация приборных структур одноэлектроники // ФТП. 1999. Т. 33, вып. 11. С. 1388—1394.
18. **Wakayama Y., Kubota T., Suzuki H., Kamikado T., Mashiko S.** Molecular Coulomb islands for single-electron tunneling in SiO₂/molecular layer/SiO₂ multilayers on Si(100) // J. of Appl. Phys. 2003. Vol. 94, N 7. P. 4711—4713.
19. **Noguchi Y., Kubota T., Mashiko S., Wakayama Y.** Contribution of the metal/SiO₂ interface potential to photoinduced switching in molecular single-electron tunneling junctions // J. of Appl. Phys. 2005. Vol. 97. 073613 (5 p).

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

УДК 615.9::574.579.842.11

А. П. Зарубина¹, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.,
e-mail: al-zar1@yandex.ru,

Е. П. Лукашов¹, канд. биол. наук, ведущ. науч.
сотр., e-mail: Lukashev@biophys.msu.ru,

Л. И. Деев¹, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.,
e-mail: Leo < alb2c43@ Rambler.ru,

И. М. Пархоменко¹, канд. биол. наук, ст. науч.
сотр., e-mail: iparkhomenko@mail.ru,

Е. А. Образцова², аспирант.,
e-mail: kobr@polly.phys.msu.ru,

Л. А. Новоселова¹, мл. науч. сотр.,

А. Б. Рубин¹, докт. биол. наук, зав. каф.,
член-корр. РАН, e-mail: rubin@biophys.msu.ru,

¹ Биологический факультет МГУ

им. М. В. Ломоносова,

² Физический факультет МГУ

им. М. В. Ломоносова

ОЦЕНКА РИСКОВ ТОКСИЧНОСТИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Поступила в редакцию 10.06.11

Выявлено цитотоксическое действие одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) на клетки генно-инженерных бактерий *Escherichia coli* K12 TGI. Изменения скорости потребления кислорода и интенсивности биолюминесценции бактерий предшествовали изменениям морфологии клеток и снижению выживаемости клеток. Это позволяет предложить бактериальный люминесцентный биосенсор тест-системы "Эколюм" для первичной оценки токсичности наноматериалов.

Ключевые слова: биолюминесценция, бактериальный люминесцентный тест, нанотрубки, атомно-силовая микроскопия, дыхание

Введение

Взаимодействие наночастиц, в том числе углеродных нанотрубок, с биологическими объектами вызывает особое внимание в связи с их широким применением в научных разработках и новых технологиях, в изделиях бытового и промышленного назначения [1]. Углеродные наночастицы поступают в больших количествах в окружающую среду из продуктов горения метана, бензина и дизельного топлива и др. Действие наноматериалов на биоло-

гические системы и в целом на организмы изучено недостаточно. Результаты исследований различных лабораторий зачастую противоречивы [1–4].

В данной работе изучено действие крупных конгломератов одностенных углеродных нанотрубок, их мелких агрегатов и одиночных одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) на генно-инженерные бактерии *Escherichia coli* K12 TGI с созданным светящимся фенотипом. Оценивали морфологию клеток бактерий, их жизнеспособность и метаболические эффекты: изменения потребления кислорода и интенсивности люминесценции. Обнаружено цитотоксическое действие ОУНТ, предложен биотест для первичной оценки токсичности наноматериалов.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования служили бактерии генно-инженерного штамма *Escherichia coli* K12 TGI со светящимся фенотипом, который получен и хранится в лаборатории биологически активных веществ кафедры микробиологии биологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова и является люминесцентным биосенсором тест-системы "Эколюм" для оценки токсичности различных веществ [5]. В работе использовали ночную культуру генно-инженерного штамма *E. coli*, выращенную на LB-среде при 28 °C на качалке при 220 об/мин и лиофильновысушенные клетки этих бактерий [5, 6].

ОУНТ синтезированы методом дугового разряда в лаборатории спектроскопии наноматериалов ЦНИИ ИОФ РАН им. А. М. Прохорова, они имели характерный диаметр 0,7...2 нм и длину до нескольких микрометров. Исходный нанотрубочный материал содержит частицы металлических катализаторов, различные формы углерода и около 20 % ОУНТ [7]. Специальными химическими методами получены очищенные нанотрубки [8]. Мы оценивали действие на бактериальные клетки в основном очищенных нанотрубок. При работе с их крупными конгломератами использовали как очищенный, так и исходный (неочищенный) нанотрубочный материал. Перед экспериментом водную суспензию углеродных нанотрубок подвергали

ультразвуковому воздействию в течение часа для разрушения крупных агрегатов. Суспензию бактерий в объеме 1 мл осаждали при 6000 g в течение 5 мин в пробирках Эпендорфа объемом 1,5 мл. К биомассе бактерий в контрольные образцы добавляли стерильную дистиллированную воду, а в опытные образцы — водные суспензии ОУНТ. Использовали суспензии бактерий в концентрации $8,0 \cdot 10^9$ кл/мл и ОУНТ — либо в концентрации 0,2 мг/мл, либо в концентрации 2 мг/мл. Еще в одном варианте к концентрированной пастообразной суспензии бактерий ($\approx 5,6 \cdot 10^{12}$ кл/мл) добавляли более 5 мг/мл ОУНТ. Контрольные и опытные образцы выдерживали при температуре 22 °C в течение 6 суток. Действие ОУНТ и их мелких агрегатов оценивали при конечных концентрациях в 1 мл водной суспензии на *Vortex* — 10^9 клеток и 0,2 мг ОУНТ. Контрольные образцы суспензий бактерий с дистиллированной водой и опытные с ОУНТ (в трех повторностях) в объеме 0,3 мл перемешивали и инкубировали 1, 2, 3 ч и далее от 1 до 6 суток при комнатной температуре (22 °C). После инкубации пробы доводили дистиллированной водой до 1,5 мл, перемешивали на *Vortex* и центрифугировали при 1000 g в течение 1 мин для отделения крупных агрегатов углеродных нанотрубок и прикрепившихся к ним бактерий. В опытах использовали надосадочную жидкость, содержащую одиночные ОУНТ, их мелкие агрегаты и бактерии.

Плотность бактериальных суспензий оценивали нефелометрически (при длине волны $\lambda = 670$ нм) и выражали числом клеток в 1 мл по предварительно составленным калибровочным кривым.

Изучение морфологии клеток бактерий при действии ОУНТ проведено с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ). Образцы для АСМ готовили известным методом [9]. Каплю контрольной или опытной суспензии бактерий помещали на подложку из свежесколотой слюды и высушивали. Заметной деградации образцов, приготовленных таким образом, не происходит в течение длительного времени (месяцы). Изображения получены на атомно-силовом микроскопе *Nanoscope III* (*Digital Instruments*, США). Измерения проводили при комнатной температуре и влажности в полуконтактном резонансном режиме для уменьшения воздействия зонда на поверхность образца. Для анализа полученных изображений использовали программное обеспечение *FemtoScan Online*, версия 2.2.90 (Центр перспективных технологий, Россия), поставляемое в комплекте с микроскопами.

Наличие ОУНТ в исследуемых образцах контролировали также с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света (КР). Углеродные нанотрубки имеют характерный спектр КР [7]. Наличие ОУНТ на поверхности образцов отслежи-

вали по интенсивности одной из линий в спектре (*G*-линии с частотой 1592 см^{-1}). Измерения проводили на КР спектрометре *Jobin Yvon T64000* (Франция), в качестве возбуждающего излучения использовали линию 514,5 нм Ar^+ -лазера.

Выживаемость бактерий в суспензиях с ОУНТ определяли методом разведений через 2–5 суток и по окончании эксперимента, выращивая их на агаризованной *LB* среде в течение 24 ч при 32 °C. Подсчитывали число выросших светящихся колоний (колониеобразующих единиц — КОЕ) в опытных образцах, в сравнении с контрольными.

Влияние ОУНТ на потребление кислорода бактериями в дистиллированной воде определяли полярографическим методом в герметичной термостатируемой (25 °C) кювете, содержащей кислородный электрод Кларка, датчик термометра AZ8852 и ротор магнитной мешалки. Регистрацию вольт-амперных кривых, а также изменения предельных значений диффузионного тока (при поляризующем напряжении $-0,69$ В) проводили с помощью полярографа ПУ-1, цифрового мультиметра M4660A и его программного обеспечения. Концентрацию растворенного кислорода в дистиллированной воде при 25 °C рассчитывали по соотношению Генри, учитывая при этом значение атмосферного давления во время эксперимента. Рассчитанную скорость потребления кислорода бактериями выражали в 1 нмоль O_2 /мл/мин в расчете на 10^9 клеток/мл [10].

Интенсивность свечения бактерий регистрировали с помощью люминометра "Биотокс" (Россия), оценивая в динамике взаимодействия с ОУНТ изменение интенсивности свечения биосенсора и индекса токсичности (T) исследуемых образцов [5, 6]: $T = 100(I_0 - I)/I_0$, где I_0 и I — интенсивность свечения клеток бактерий последовательно измеряемых контрольного и опытного образцов, соответственно. Использовали общепринятые критерии токсичности опытного образца по сравнению с контрольным: 1) нетоксичный образец — индекс токсичности менее 20 ($T < 20$); 2) образец токсичен — индекс токсичности от 20 до 50 ($T < 50$); 3) образец очень токсичен — индекс токсичности более 50 ($T > 50$) [11; 12].

Результаты исследований и их обсуждение

В контрольных суспензиях клетки бактерий были морфологически полноценны, имели характерную палочковидную форму длиной 2...2,5 мкм, шириной около 1 мкм и высотой 250 ± 50 нм. В областях с крупными конгломератами нанотрубок уже на 4-й день клетки бактерий были значительно уплощены, по сравнению с контрольными, их высота не превышала 70...80 нм, поверхности

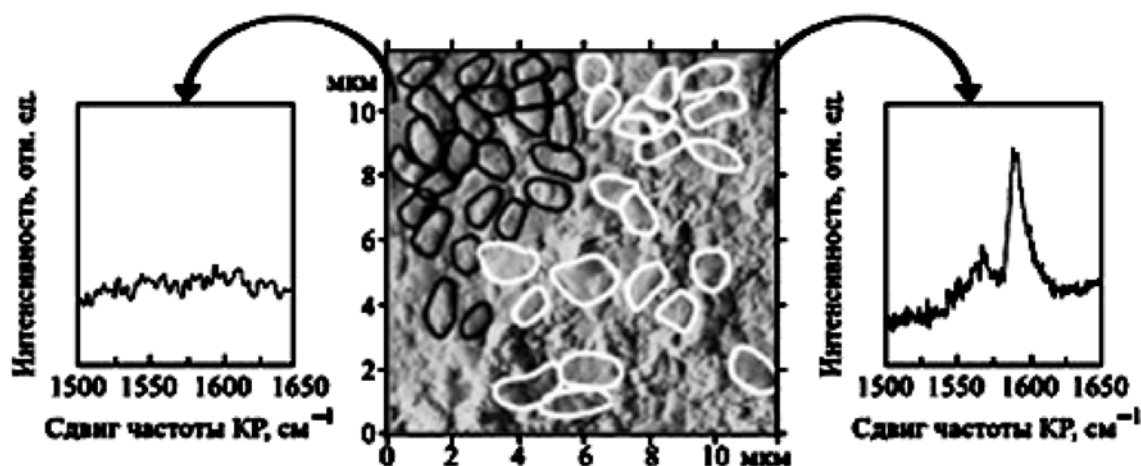


Рис. 1. АСМ изображение клеток бактерий *E. coli* на границе области, покрытой нанотрубочным материалом. Спектры комбинационного рассеяния света подтверждают наличие такой области. Белым цветом обозначены бактерии, имеющие непосредственный контакт с агрегатами ОУНТ и вследствие этого разрушенные. Черным цветом обозначены типичные клетки бактерии, не имеющие непосредственного контакта с агрегатами нанотрубок

клеток имели повторяющиеся неровности, изменялись и их размеры (рис. 1).

На рис. 1 изображена область, частично покрытая нанотрубками (справа) и частично от них свободная (слева). О наличии нанотрубок можно судить как по АСМ-изображению (справа мелкие частицы под клетками бактерий есть, слева их нет), так и по спектрам КР (слева в спектре КР нет характерных полос поглощения, справа такая полоса, G -линия с частотой 1592 см^{-1} , есть). Число и размер этих областей, покрытых скоплениями ОУНТ, изменялись в зависимости от их концентрации. Бактерии, контактирующие со скоплениями ОУНТ, деформированы, уплощены и, соответственно, имеют малую высоту. Бактерии, не имеющие контакта с конгломератами нанотрубок, идентичны описанным выше клеткам из контрольных образцов.

Следует отметить, что по результатам проведенного АСМ-анализа с использованием очищенного и исходного неочищенного нанотрубочного материала мы не обнаружили достоверных различий их действия на морфологию бактериальных клеток, т. е. их действие одинаково цитотоксично.

Аналогичные морфологические изменения были обнаружены в работе других исследователей при изучении взаимодействия бактериальных клеток с агрегатами нанотрубок как при инкубации бактерий *E. coli* и ОУНТ в солевых растворах, так и при наслаивании бактериальных клеток на готовые слои и агрегаты очищенных нанотрубок, нанесенных на миллиметровые фильтры [3]. Однако авторы не наблюдали взаимодействия клеток бактерий с одиночными нанотрубками. По нашему

мнению, биологическое действие одиночных ОУНТ и их мелких агрегатов заслуживает более детального изучения.

Мы исследовали действие одиночных ОУНТ, а возможно, и их мелких агрегатов на бактерии *E. coli*, их жизнеспособность, а также потребление кислорода и интенсивность биолюминесценции, предварительно удалив центрифугированием плотный черный осадок крупных агрегатов ОУНТ. При этом удаляются и 20–30 % клеток исходной суспензии бактерий, что показало определение числа КОЕ и регистрация спектров поглощения надосадочной жидкости при 240...370 нм. В суспензии остались бактерии, которые в течение 1–6 суток взаимодействовали с ОУНТ, но не связались с их крупными агрегатами.

На рис. 2, а (см. третью сторону обложки) представлены характерные АСМ-изображения клеток *E. coli* в контрольных суспензиях. Клетки имели палочковидную форму с длиной $2...2,5\text{ мкм}$, шириной около 1 мкм и высотой $250 \pm 50\text{ нм}$. Только на 4-е сутки инкубации ОУНТ с клетками бактерий, которые не связались с конгломератами нанотрубок и не были осаждены при центрифугировании, происходит деформация поверхности клеток бактерий. Частично утрачивается внутреннее содержимое клетки бактерии, и на рис. 2, б (см. третью сторону обложки) видно, что в клетках образуется провал в средней части. К 6-м суткам инкубации бактерий с ОУНТ содержимое клеток полностью вытекает, и на АСМ-сканах видна только сплюснутая клеточная оболочка.

Наблюдаемые нарушения морфологии клеток под действием ОУНТ очевидно связаны с бактери-

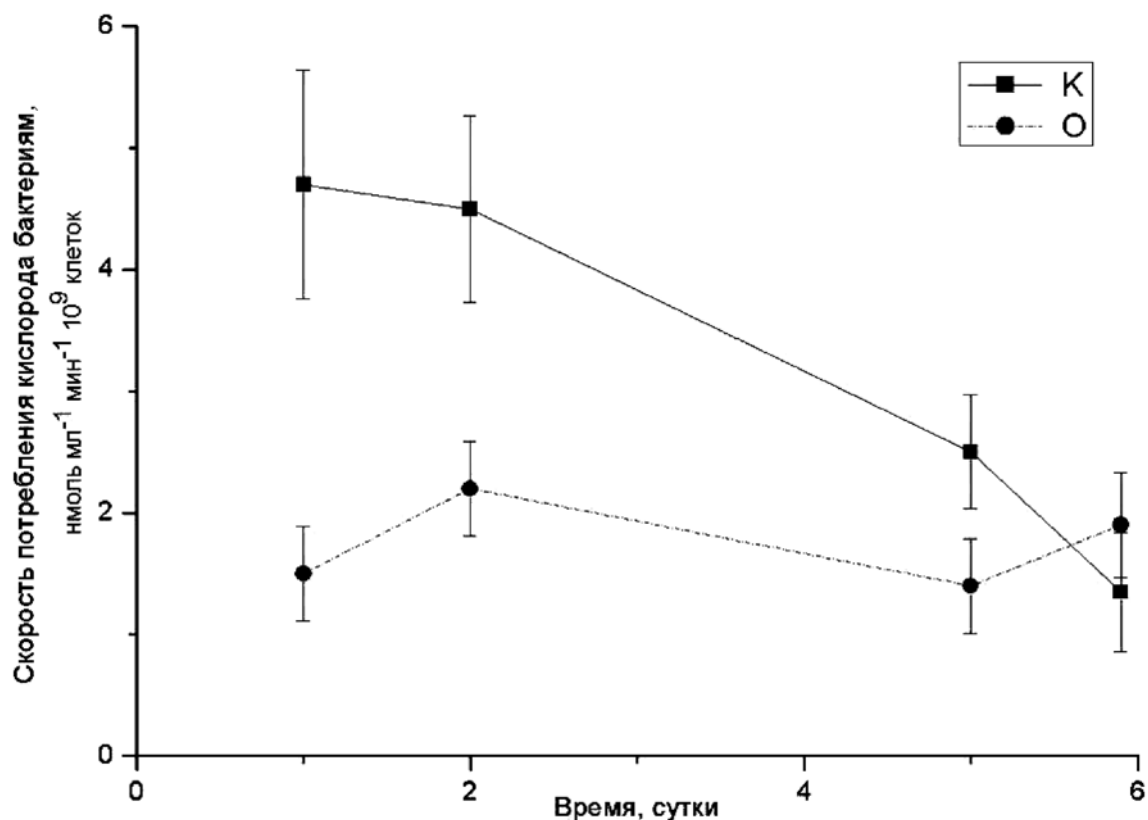


Рис. 3. Скорость потребления кислорода клетками бактерий *E. coli*, контрольными и проинкубированными с ОУНТ в течение 1—6 суток

цидным действием нанотрубок, что и подтвердили данные по выживаемости клеток бактерий. К 2-м суткам инкубации бактерий с ОУНТ титр бактерий падает вдвое (КОЕ — $7,7 \cdot 10^9$ в контроле и $4,8 \cdot 10^9$ в опыте) а к 3-м суткам — более чем на порядок (КОЕ равно $7,2 \cdot 10^9$ в контроле и $5,2 \cdot 10^8$ в опыте). Следует отметить, что снижение выживаемости клеток в суспензии с ОУНТ (через 2 и 3 суток) отмечено раньше, чем формируются (к 4-м суткам), морфологические изменения, выявляемые методом АСМ.

Скорость потребления кислорода клетками бактерий, проинкубированных с ОУНТ в течение 1—6 суток, и в контрольных образцах, представлена на рис. 3. Снижение скорости потребления кислорода бактериями наблюдали уже через сутки их инкубации с ОУНТ. В контроле, при инкубации клеток с дистиллированной водой, уровень потребления бактериями кислорода составлял 4,8...4,5 нмоль O_2 /мл/мин на 10^9 клеток в течение двух суток и к 5—6-м суткам снижался до 2,9...1,9 нмоль O_2 /мл/мин на 10^9 клеток. После инкубации бактерий с ОУНТ в течение суток скорость потребления ими кислорода значительно снижалась — до 36,6 % от соответствующего контрольного уров-

ня. В последующие сроки инкубации она изменялась незначительно, на 5—6-е сутки, в связи с падением скорости потребления кислорода в контрольных пробах, эти скорости практически не от-

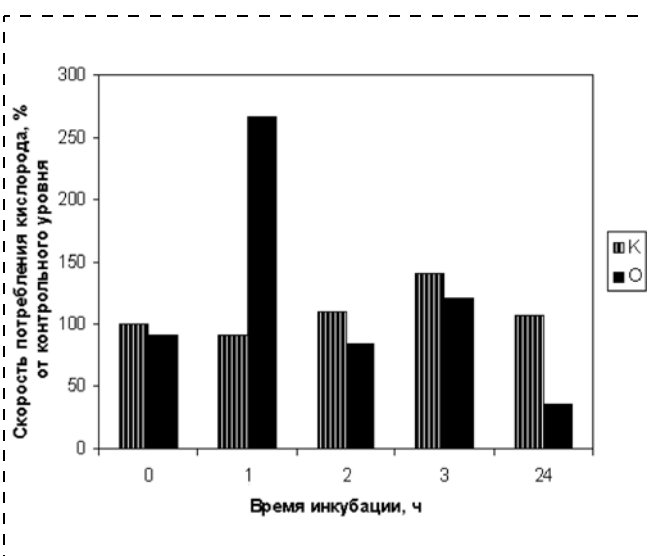


Рис. 4. Изменение потребления кислорода бактериальными клетками в ранние сроки взаимодействия с ОУНТ: К — контроль, О — инкубация с ОУНТ

Биолюминесценция клеток генно-инженерного штамма бактерий *E.-coli* с созданным светящимся фенотипом при взаимодействии с одиночными ОУНТ

Время инкубации бактерий с ОУНТ, ч	Индекс токсичности (T), выводы о токсичности ОУНТ			
	Нативные клетки бактерий		Лиофильновысушенные бактерии после их регидратации	
0	2	Нетоксичны	-7*	Нетоксичны
24	-100*	Нетоксичны, стимуляция свечения бактерий	45	Токсичны
48	56	Токсичны	52	Токсичны
72	73	Очень токсичен	81	Очень токсичен

Примечание: ($T < 0$) — стимуляция свечения, механизм неясен, в токсикологических исследованиях считают, что образец нетоксичен [5, 6].

личались в контроле и опыте. Представляют интерес данные по изменению потребления кислорода в ранние сроки инкубации бактериальных клеток с ОУНТ (рис. 4). Было обнаружено, что уже через 1 ч их совместной инкубации происходит значительное, до 2 раз, увеличение потребления кислорода, которое к третьему часу взаимодействия клеток с ОУНТ, практически, возвращается к норме. При этом в тот же срок, что и увеличение потребления кислорода, наблюдается падение интенсивности биолюминесценции клеток до 60 % от контрольного уровня. Возможно, что эти ранние эффекты связаны с влиянием нанотрубок на сопряжение реакции дыхания и биолюминесценции, которые конкурируют за восстановленный флаavin, участвующий в функционировании дыхательной цепи и начальной стадии биолюминесцентной реакции [13]. Механизмы этого эффекта, а также взаимосвязь этих начальных изменений с токсическим действием ОУНТ, проявляющимся в более поздние сроки, неясны и требуют дополнительного изучения.

Так как бактерии *E. coli* со светящимся фенотипом обладают достаточно стабильно регистрируемой биолюминесценцией в длительных стационарных условиях эксперимента, это позволило оценивать действие ОУНТ на люминесценцию бактерий в течение нескольких суток. Было обнаружено, что уже через двое суток инкубации бактерий с ОУНТ значительно снижалась их биолюминесценция (см. таблицу). В то же время выраженные морфологические изменения появляются у этих клеток только через четверо суток. Интенсивность биолюминесценции бактерий при инкубации с ОУНТ мы измеряли не только на нативных клетках, но и на лиофильновысушенных бактериях биосенсора "Эколюм", регидратированных известным методом [5, 6]. Постановка эксперимента была такой же, как и с нативными клетками ночной культуры (см. таблицу).

Лиофильновысушенные люминесцентные бактерии представляют собой стандартный материал биосенсора, они длительно хранятся (более полу-

года) и могут быть при необходимости использованы в различных экспериментах [6]. Суспензию регидратированных бактерий инкубировали с ОУНТ, конечные концентрации в 1 мл инкубируемой суспензии составляли $1 \cdot 10^9$ кл/мл и 0,2 мг ОУНТ. Интенсивность биолюминесценции клеток бактерий в опытном образце значительно снижалась уже через сутки действия ОУНТ, а не через двое суток, как у нативных бактерий, т. е. выраженную токсичность ОУНТ (индекс токсичности $T = 45...50$) на стандартном регидратированном лиофильновысушенном биосенсоре можно обнаружить даже раньше, чем в экспериментах со свежес выращенной культурой бактерий.

Отметим, что удобная и экономически выгодная тест-система на основе бактериальной люминесценции широко используется для первичной экспресс-оценки токсичности самых различных химических веществ и их смесей, а также и физических воздействий [6, 11, 12, 14, 15]. Особенно важно, что значение EC_{50} (*effective concentration*) — эффективной концентрации или объема, вызывающих тушение биолюминесценции до значений $T = 50$, коррелирует с LD_{50} эукариотных организмов. Коэффициент корреляции для многих ксенобиотиков составляет 0,8...0,95 [12]. Если ксенобиотики имеют цитотоксическое действие, то при их действии на люминесцентные бактерии тушение бактериального свечения обязательно связано не только с их токсическим действием, но и с гибелью клеток бактерий [16, 17].

Таким образом, нами было обнаружено, что при инкубации бактериальных клеток с ОУНТ происходит разрушение бактерий. При этом бактерицидным действием обладают как одиночные одностенные углеродные нанотрубки, так и их мелкие и крупные агрегаты. Мы полагаем, что при непосредственном контакте ОУНТ с клетками бактерий они вероятно механически нарушают клеточную стенку и мембрану, медленно приводя к потере содержимого цитоплазмы, и вследствие этого вызывают гибель бактерий. Динамика изменений скорости потребления кислорода бактериальными

клетками и интенсивности их биолюминесценции свидетельствует о том, что биохимические нарушения предшествуют развитию выраженных морфологических изменений клеток. Это позволяет предложить бактериальный люминесцентный тест для первичной оценки рисков различных наноматериалов, используя не только нативную культуру бактерий, но и стандартные лиофильновысушенные биосенсоры тест-системы "Эколюм".

Список литературы

1. Murr L. E. Nanoparticulate materials in antiquity: the good, the bad and the ugly // *Materials Characterization*. 2009. T. 60. N 4. P. 261–270.
2. Soto K. F., Carrasco A., Powell T. G. et al. Biological effects of nanoparticulate materials // *Materials Science and Engineering*. C. 2006. T. 26. N 8. P. 1421–1427.
3. Kang S., Pinault M., Pfefferle L. D. et al. Single-Walled Carbon Nanotubes Exhibit Strong Antimicrobial Activity // *Langmuir*. 2007. Vol. 23, N 17. P. 8670–8673.
4. Shvedova A. A., Castranova V., Kisin E. R. et al. Exposure to carbon nanotube material. Assessment of nanotube cytotoxicity using human keratinocyte cell // *J. of Toxicology and Environmental Health*. 2003. Part A 66. P. 1909–1926.
5. Данилов В. С., Зарубина А. П., Ерошников Г. Е., Соловьева Л. Н., Карташев Ф. В., Завильгельский Г. Б. Сенсорные биолюминесцентные системы на основе lux-оперонов разных видов люминесцентных бактерий // *Вестник Моск. Ун-та. Сер. 16. Биология*. 2002. № 3. С. 20–24.
6. Зарубина А. П., Мажуль М. М., Новоселова Л. А. и др. Бактериальный люминесцентный биотест // *Сенсор*. 2005. № 3. С. 14–21.
7. Obratsova E. D., Yurov V. Y., Shevluga V. M. et al. Structural investigations of close-packed single-wall carbon

nanotube material // *Nanostructured Materials*. 1999. Vol. 11, N 3. P. 295–306.

8. Terekhov S. V., Obratsova E. D., Konov V. I. et al. Laser heating method for estimation of carbon nanotube purity // *Applied Physics A: Materials Science & Processing*. 2002. T. 74, N 3. C. 393–396.

9. Сканирующая зондовая микроскопия биополимеров / Под ред. Яминского И. В. М.: Научный мир, 1997. 88 с.

10. Зарубина А. П., Лукашев Е. П., Деев Л. И., Пархоменко И. М., Рубин А. Б. Биотестирование биологических эффектов одностенных углеродных нанотрубок с использованием тест-системы люминесцентных бактерий // *Российские нанотехнологии*. 2009. Т. 4, № 11–12. С. 81–84.

11. Bulich A. A., Tung K. K., Scheibner G. The luminescent bacteria toxicity test: its potential use as an *in vitro* alternative // *Biolum. Chemilum*. 1990. Vol. 5, N 2. P. 71–77.

12. Kaiser K. L. Correlation of *Vibrio fischeri* bacteria test data with bioassay data for other organisms // *Environ. Health Perspect.* 1998. Vol. 106, N 2. P. 583–591.

13. Мажуль М. М., Завильгельский Г. Б., Зарубина А. П. и др. FMN-редуктаза из *Escherichia coli* и ее влияние на активность люциферазы из морских бактерий *Vibrio fischeri* // *Микробиология*. 1999. Т. 68, N 2. С. 149–154.

14. Steinberg S. M., Poziomek E. J., Engelmann W. H. et al. A review of environmental applications of bioluminescence measurement // *Chemosphere*. 1995. Vol. 30, N 11. P. 2155–2197.

15. Пархоменко И. М., Зарубина А. П., Лукашев Е. П. и др. О механизмах фотодинамического действия сенсibilизаторов и усовершенствовании методов их первичного отбора для фотодинамической антимикробной терапии // *Докл. РАН*. 2005. Т. 404, № 6. С. 821–825.

16. Backhaus T., Grimme L. H. The toxicity of antibiotic agents with aid of intact luminous bacterium *Vibrio fischeri* // *Chemosphere*. 1999. Vol. 38, N 14. P. 3291–3301.

17. Jassim S. A. A., Ellison A., Denyer S. P. et al. In vivo bioluminescence: a cellular reporter for research and industry // *Biolum. Chemilum*. 1990. Vol. 5, N 3. P. 115–122.



НАНОИНДЕНТИРОВАНИЕ И ЕГО ВОЗМОЖНОСТИ

Ю.И. Головин

2009. – 312 с.: ил. ISBN 978-5-94275-476-1

Цена 693 р.

Описаны принципы, методы и средства для реализации испытаний и определения механических свойств материалов в наномасштабе, которые получили в последние годы большое распространение под общим названием "наноиндентирование". Обсуждены информационные возможности этого большого и многофункционального семейства методов нано- и микромеханических испытаний. Рассмотрены различные аспекты и особенности поведения твердых тел в условиях сильно стесненной деформации, возникающей при локальном нагружении поверхности микронагрузкой. Описаны способы извлечения механических характеристик тонких приповерхностных слоев разнообразных материалов, пленок и многослойных покрытий при локальном нагружении. Особое внимание уделено физическим механизмам деформации и разрушения в этих условиях.

Книга адресована научным и инженерно-техническим работникам, занимающимся созданием, исследованием и аттестацией новых наноструктурных материалов и систем, полезна студентам и аспирантам, обучающимся по направлениям нанотехнологии и наноматериаловедения.

Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку в отдел продаж, маркетинга и рекламы:
по почте: 107076, г. Москва, Строминский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительную информацию можно получить по телефонам: (499) 269-66-00, 269-52-98 и на сайте WWW.MASHIN.RU

УДК 531.787.084.2:629/735

Е. М. Белозубов, д-р техн. наук, нач. группы,
ОАО "Научно-исследовательский институт
физических измерений", г. Пенза,
В. А. Васильев, д-р техн. наук, проф.,
Н. В. Громков, д-р техн. наук, доц.,
Пензенский государственный университет
e-mail: opto@bk.ru

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ НАНО- И МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИДЕНТИЧНЫМИ ТЕНЗОЭЛЕМЕНТАМИ И ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ НА ИХ ОСНОВЕ

Поступила в редакцию 15.06.11

Рассмотрены возможности улучшения характеристик тонкопленочных тензорезисторных нано- и микроэлектромеханических систем с идентичными тензоэлементами и датчиков на их основе в условиях воздействия нестационарных температур.

Ключевые слова: тонкопленочные тензорезисторные нано- и микроэлектромеханические системы (НиМЭМС), датчики давления, идентичные тензоэлементы, нестационарная температура

Тонкопленочные тензорезисторные датчики давления представляют собой гетерогенные структуры, использующие в качестве чувствительных элементов тонкопленочные нано- и микроэлектромеханические системы (НиМЭМС) [1, 2].

При измерении давления в условиях воздействия нестационарной температуры измеряемой среды, например, при воздействии давления жидкого кислорода на датчик, который установлен на агрегате жидкостного реактивного двигателя, находящегося в нормальных климатических условиях, на поверхности мембраны возникает нестационарное температурное поле. Последствия воздействия термоудара на мембрану исследовали путем модели-

рования температурных полей с помощью алгоритма и программы [3], а также экспериментально путем воздействия жидкого азота на приемную полость мембраны.

На рис. 1 представлены графики температурных полей на мембране в различные моменты времени с начала действия термоудара (рассматривалось воздействие жидкого азота) для случая, когда окружающей средой между мембраной (из сплава 36НХТЮ) и корпусом датчика является вакуум. Графики построены для плоской мембраны при диаметре $d = 5$ мм, толщине $h = 0,31$ мм.

Распределение температурного поля на поверхности мембраны в сильной степени зависит от диаметра мембраны и ее толщины. На рис. 2 показаны температурные поля мембран диаметром 4, 4,5 и 5 мм (остальные параметры упругого элемента — первоначальные, толщина мембраны $h = 0,31$ мм) в первую секунду после начала действия термоудара. Видно, что уменьшение диаметра мембраны при-

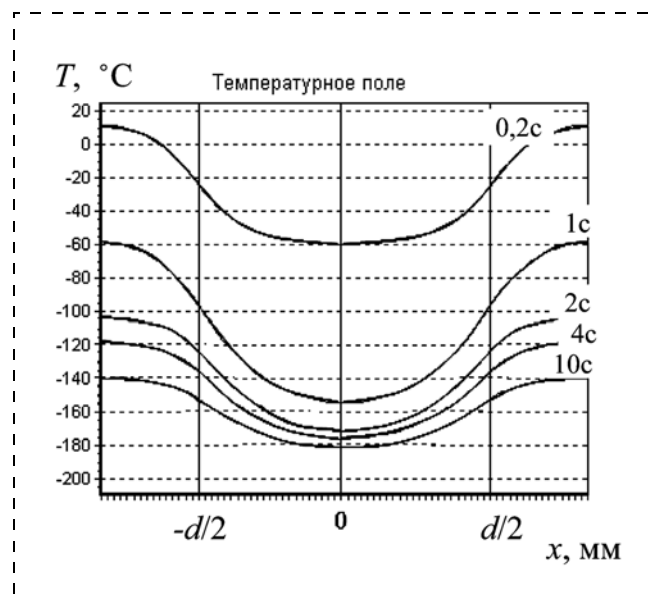


Рис. 1. Температурные поля на поверхности мембраны в различные моменты времени с начала действия термоудара

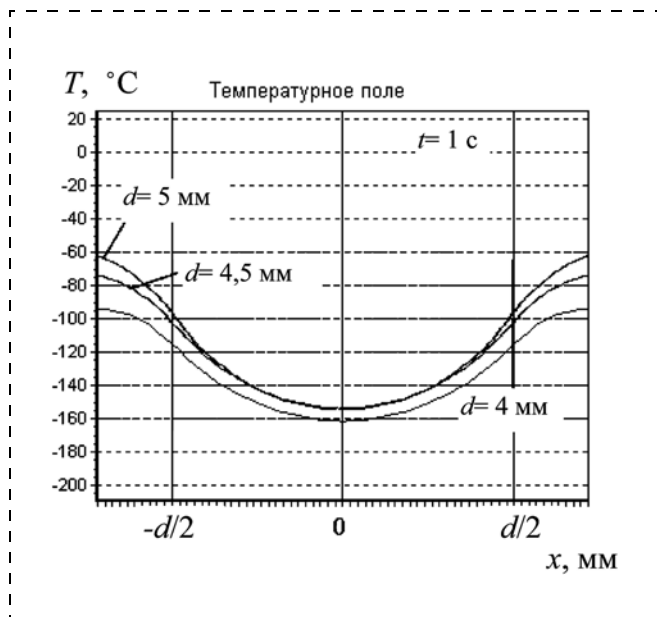


Рис. 2. Температурные поля на поверхностях мембран диаметром 4, 4,5 и 5 мм

водит ее к более быстрому охлаждению, к сокращению времени действия термоудара на датчик.

Более пологие температурные поля свойственны мембранам с большей толщиной, при этом процесс охлаждения происходит медленнее. Вследствие выполнения мембраны круглой и закрепления мембраны с помощью периферийного основания температурное поле на планарной стороне мембраны (на стороне размещения тензорезисторов) имеет ярко выраженный осесимметричный характер, т. е. температурное поле симметрично продольной оси мембраны, проходящей через ее центр.

Разработанные алгоритм и программа [3] полностью подтвердили корректность и обоснованность несколько ранее созданной конструкции тонкопленочного датчика давления [4]. Основой этого датчика давления является представленная на рис. 3 тонкопленочная НиМЭМС с гетерогенной структурой, помещенной в вакуумированный корпус 1 и состоящей из упругого элемента в виде круглой жесткозащемленной мембраны 2, выполненной как одно целое с опорным основанием 3, на которой расположены соединенные в мостовую схему окружные 4 и радиальные 5 тензорезисторы. Они представляют собой соединенные низкоомными переключками 6 и равномерно размещенные по периферии мембраны идентичных тензоэлементов 7. Каждый из них касается двумя вершинами 8 границы 9 мембраны. Диэлектрик 10 выполнен в виде тонкопленочной структуры Cr—SiO—SiO₂, тензоэлементы 7 — в виде структуры X20H75Ю, переключки 6 — в виде структуры V—Au.

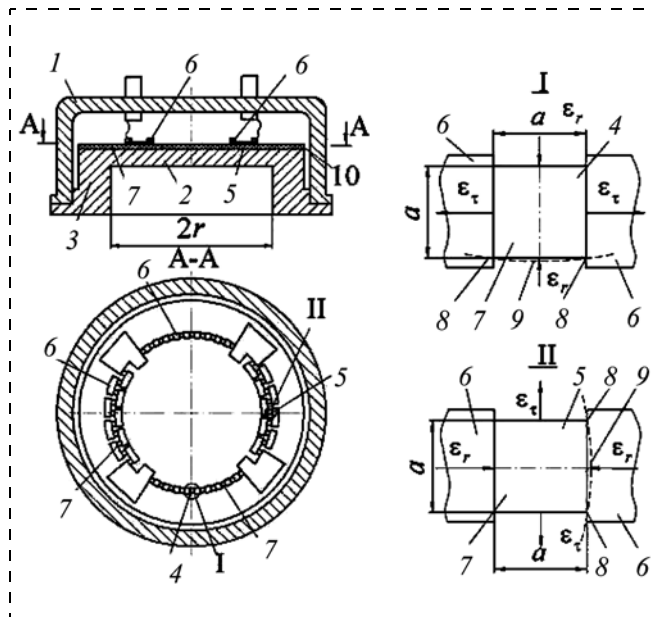


Рис. 3. НиМЭМС с минимизированным влиянием нестационарных температур

Поскольку тензоэлементы идентичны и находятся на периферии мембраны на одинаковом расстоянии от ее центра, то, несмотря на нестационарный характер изменения температуры на планарной стороне мембраны, температуры тензоэлементов окружных и радиальных тензорезисторов, изменяясь, со временем будут одинаковы в каждый момент времени. Одинаковая температура радиальных и окружных тензорезисторов в каждый момент времени вызывает практически одинаковые изменения сопротивлений тензорезисторов, которые вследствие включения тензорезисторов в мостовую схему взаимно компенсируются.

Следует отметить, что созданная тонкопленочная НиМЭМС явилась определенным качественным скачком в разработке таких НиМЭМС и позволила существенно (более чем в 10 раз) уменьшить по сравнению с аналогами погрешность датчиков давления при воздействии нестационарных температур. Поэтому созданную НиМЭМС уже достаточно широко используют в изготавливаемых серийно или разрабатываемых тонкопленочных датчиках давления. Кроме того, эта НиМЭМС послужила основой создания метода идентичных тензоэлементов [5], который также широко применяют при проектировании тонкопленочных датчиков. В то же время у этой НиМЭМС имеются недостатки, которые в некоторых случаях имеют определенное значение.

Недостатком известной конструкции является сравнительно большая нелинейность функции преобразования давления в выходной сигнал, обу-

словленная тем, что расположенные на периферии мембраны окружные и радиальные тензорезисторы неодинаково деформируются. Окружные тензорезисторы, находящиеся на периферии мембраны, испытывают меньшие деформации (окружные ε_ϕ), чем испытывают деформации радиальные тензорезисторы (радиальные ε_r). Вследствие этого происходит неодинаковое изменение сопротивлений тензорезисторов смежных плеч мостовой измерительной цепи. Появляется погрешность от нелинейности.

Между деформациями и приложенным давлением существует связь (функция преобразования) [6]:

$$\varepsilon_\phi = \frac{0,375r_M^2}{h^2 E} (1 - \mu^2) \left(1 - \frac{x^2}{r_M^2} \right) P = \frac{B_\phi r_M^2}{h^2 E} = S_\phi P, \quad (1)$$

$$\varepsilon_r = \frac{0,375r_M^2}{h^2 E} (1 - \mu^2) \left(1 - 3\frac{x^2}{r_M^2} \right) P = \frac{B_r r_M^2}{h^2 E} = S_r P, \quad (2)$$

где x — текущая координата радиуса; r_M — радиус мембраны; E — модуль упругости материала мембраны; μ — коэффициент Пуассона; B_ϕ , B_r — конструктивные коэффициенты чувствительности мембраны к давлению для случаев использования окружных и радиальных деформаций; S_ϕ , S_r — чувствительности мембраны при использовании окружных и радиальных деформаций соответственно; P — давление.

Как показывают выражения (1) и (2), функция преобразования определяется геометрическими размерами мембраны (радиусом и толщиной), характеристикой материала (модулем упругости) и коэффициентом Пуассона и зависит от того, какая деформация (радиальная или окружная) используется в качестве рабочей. Кроме того, она зависит от текущего радиуса.

Как видно из формул (1) и (2) функция преобразования прямо пропорциональна конструктивным коэффициентам чувствительности мембраны к давлению для случаев использования окружных и радиальных деформаций:

$$B_\phi = 0,375(1 - \mu^2) \left(1 - \frac{x^2}{r_M^2} \right); \quad (3)$$

$$B_r = 0,375(1 - \mu^2) \left(1 - 3\frac{x^2}{r_M^2} \right). \quad (4)$$

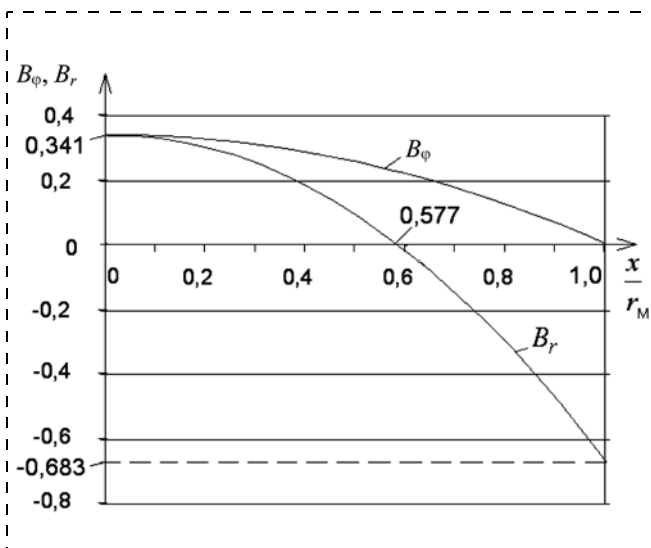


Рис. 4. Зависимости коэффициентов B_ϕ и B_r от текущего радиуса мембраны

Приняв $\mu = 0,3$ (так как для изготовления упругих элементов обычно используются металлы), можно получить зависимости коэффициентов B_ϕ и B_r от текущего радиуса мембраны, которые представлены на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что у мембраны имеются три зоны деформаций. Одна зона расположена в пределах $x/r_M = 0 \dots 1$ и соответствует использованию окружных деформаций. В этой зоне конструктивный коэффициент чувствительности имеет максимальное значение в центре мембраны и равен 0,341. Вторая и третья зоны деформаций соответствуют использованию радиальных деформаций и расположены в пределах $x/r_M = 0 \dots 0,577$ и $x/r_M = 0,577 \dots 1$ соответственно. Для второй зоны максимальное значение конструктивного коэффициента также равно 0,341, а для третьей зоны — 0,683.

Очевидно, что при расположении окружных и радиальных тензорезисторов на периферии мембраны в области различных по значению относительных деформаций ε_ϕ и ε_r относительные изменения сопротивлений окружных и радиальных тензорезисторов будут различны. При этом возникает нелинейность измерительной цепи датчика, которая зависит от коэффициента симметрии k и относительных изменений сопротивлений плеч измерительной цепи ε_1 , ε_2 , ε_3 , ε_4 [7]. Для тензорезисторных датчиков, у которых относительное изменение сопротивления одного плеча обычно не превышает 0,01, при $k = 1$ нелинейность составляет $\sim 0,3 \dots 0,6 \%$, если рабочими являются два плеча.

Таким образом, при размещении тензорезисторов на периферии мембраны возникает погреш-

ность от нелинейности измерительной цепи, которая обусловлена возникновением несимметрии сопротивлений и различием относительных изменений сопротивлений окружных и радиальных тензорезисторов при деформациях мембраны, так как восприятие относительных деформаций радиальными и окружными тензоэлементами отличаются друг от друга.

Недостатком известной конструкции является также и то, что при расположении окружных и радиальных тензорезисторов на периферии мембраны температурные деформации окружных ($\epsilon_t(T)$) и радиальных ($\epsilon_r(T)$) тензорезисторов при воздействии нестационарных температур (термоудара) могут быть различны. Так, в начальный момент времени при заполнении приемной полости датчика жидкостью с температурой, отличающейся от температуры датчика, возникает неравномерное температурное поле по поверхности мембраны. Градиент температуры между центром мембраны и ее периферией в первые секунды с момента начала действия термоудара может превышать десятки градусов [8]. При воздействии криогенных температур происходит сжатие центральной части мембраны, которое влечет за собой растяжение радиальных тензорезисторов, установленных на периферии мембраны. При этом вследствие разной ориентации относительно радиуса мембраны сопротивления окружных и радиальных тензоэлементов меняются на разные величины. В результате возникает температурная погрешность, обусловленная различным восприятием тензоэлементами температурных деформаций мембраны.

Повысить точность измерения возможно путем улучшения линейности выходной характеристики в условиях воздействия нестационарных температур (термоудара) измеряемой среды за счет расположения окружных тензорезисторов в зонах, одинаковых по величине положительных деформаций, равных по модулю отрицательным деформациям зон, в которых расположены радиальные тензорезисторы. Кроме того, повышение точности измерения достигается путем уменьшения температурной погрешности, обусловленной температурными деформациями мембраны при воздействии нестационарных температур, за счет расположения окружных и радиальных тензорезисторов в зонах, близких по величине температурных деформаций, и компенсации влияния температурных деформаций мембраны в мостовой измерительной цепи.

Предлагаемый тензорезисторный датчик давления на основе тонкопленочной НиМЭМС [9] содержит корпус, установленную в нем НиМЭМС, состоящую из упругого элемента — мембраны, жестко заделанной по контуру, сформированную на ней гетерогенную структуру из тонких пленок материалов, герметизирующую контактную колодку и соединительные проводники. Образованные в гетерогенной структуре тензорезисторы, установленные по дуге окружности и в радиальном направлении, состоят из идентичных тензоэлементов в форме квадратов, соединенных тонкопленочными перемычками, включенными в измерительный мост. Центры окружных и радиальных тензоэле-

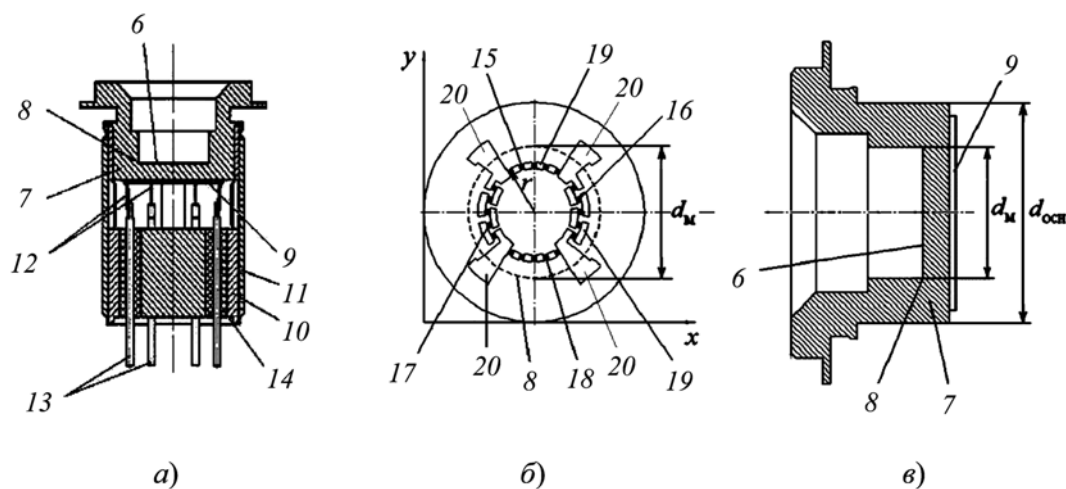


Рис. 5. Предлагаемая тонкопленочная НиМЭМС датчиков давления

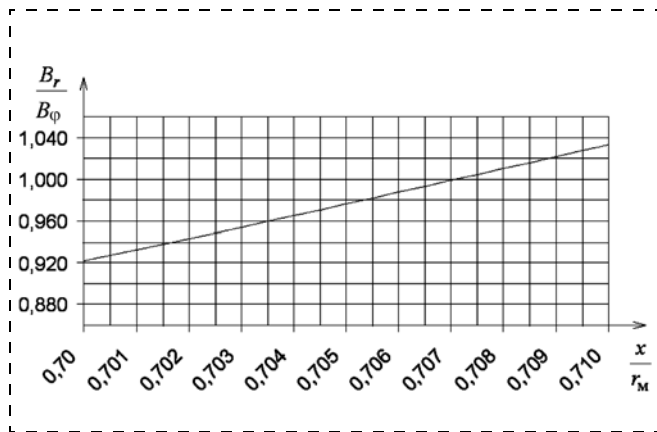


Рис. 6. График зависимости $\left| \frac{B_r}{B_\phi} \right| = f(r) = f\left(\frac{x}{r_M}\right)$

ментов размещены по окружности, радиус которой r определен по соотношению $r = 0,707r_M$.

На рис. 5 показана предлагаемая тонкопленочная НиМЭМС датчика.

Она состоит из упругого элемента — круглой мембраны 6 (рис. 5, а), жестко заделанной по контуру, с периферийным основанием 7 за границей 8 мембраны, гетерогенной структуры 9, контактной колодки 10, герметизирующей втулки 11, соединительных проводников 12, выводных колков 13, диэлектрических втулок 14. Гетерогенная структура 9 из тонких пленок материалов (тонкопленочные диэлектрические, тензорезистивные, контактные и т. п. слои материалов) сформирована на мембране 6 методами нано- и микроэлектронной технологии.

В гетерогенной структуре 9 (рис. 5, б, в) образованы тензорезисторы 15–18, установленные по дуге окружности (15, 18) и в радиальном направлении (16, 17), состоящие из идентичных тензоэлементов в форме квадратов, соединенных тонкопленочными перемычками 19. Тензорезисторы 15–18 объединены в измерительный мост. Контактные площадки 20 служат для подключения напряжения питания и съема выходного сигнала с измерительного моста из тензорезисторов 15–18.

Тензорезисторы, установленные в окружном направлении 15, 18 и в радиальном направлении 16, 17 и, соответственно, идентичные тензоэлементы в форме квадратов, размещены вдали от периферии (периферийного основания 7) мембраны в зоне с одинаковыми, но противоположными по знаку окружными и радиальными деформациями ($0,577r_M < r < r_M$), причем так, что центры окружных и радиальных тензоэлементов тензорезисто-

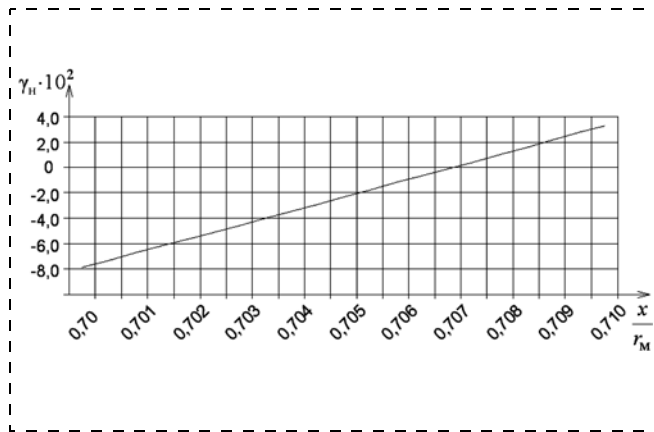


Рис. 7. График зависимости $\gamma_H = f\left(\frac{x}{r}\right)$

ров 15–18 размещены по окружности, радиус которой r определен по соотношению $r = 0,707r_M$.

При расположении окружных и радиальных тензорезисторов по окружности с радиусом $r = 0,707r_M$ улучшается линейность и уменьшается влияние температурных деформаций мембраны на выходной сигнал датчика.

Обоснование заявляемого соотношения проведем исходя из следующих соображений. Измеряемое давление действует на мембрану, которая деформируется, и на ее поверхности возникают относительные окружные ϵ_ϕ и радиальные деформации ϵ_r , определяемые выражениями (1) и (2).

Деформации ϵ_ϕ и ϵ_r воспринимаются тензорезисторами, установленными на мембране в окружном и радиальном направлениях и преобразуются в относительное изменение сопротивления тензорезисторов:

$$\epsilon_R = 2(\epsilon_\phi + \epsilon_r)S, \quad (5)$$

где S — коэффициент тензочувствительности.

Измерительная схема является выходным преобразователем датчика и преобразует относительное изменение сопротивления тензорезисторов в выходное напряжение датчика.

Функция преобразования мембранного упругого элемента, преобразующего давление в деформацию [10], имеет вид

$$\epsilon_M = \frac{B_{MP} r_M^2}{Eh^2} P, \quad (6)$$

где $B_{MP} = |B_\phi| + |B_r|$ — конструктивный коэффициент чувствительности мембраны к давлению P .

Самой оптимальной, с точки зрения повышения линейности и уменьшения погрешности от температурных деформаций, областью мембраны, где следует располагать тензорезисторы, является область, в которой значения B_ϕ и B_r равны.

Приравняем выражения (3) и (4):

$$0,375(1 - \mu^2) \left(1 - \frac{x^2}{r_M^2} \right) = \left[0,375(1 - \mu^2) \left(1 - \frac{3x^2}{r_M^2} \right) \right]. \quad (7)$$

Выберем, к примеру, радиус мембраны $r_M = 2,25$ мм. При таком радиусе соотношение (7) выполняется при $x = 1,59$ мм.

Относительный радиус, при котором $|B_\phi| = |B_r|$, определяется выражением

$$r = \frac{x}{r_M} = \frac{1,59}{2,25} = 0,707. \quad (8)$$

На рис. 6 показан график зависимости $\frac{|B_r|}{|B_\phi|} = f(r) = f\left(\frac{x}{r_M}\right)$, из которого видно, что $\frac{|B_r|}{|B_\phi|} = 1$ при $r = \frac{x}{r_M} = 0,707$.

При относительном радиусе $r = 0,707$ конструктивные коэффициенты чувствительности $B_\phi = 0,170$, $B_r = -0,170$. В этом случае конструктивный коэффициент чувствительности мембраны к давлению

$$B_{MP} = |0,170| + |-0,170| = 0,340. \quad (9)$$

С учетом этого функция преобразования мембраны (10) предлагаемого датчика

$$\varepsilon_M = \frac{0,34r_M^2}{Eh^2} P. \quad (10)$$

Обычно номинальный выходной сигнал датчика задается в относительных единицах равным $6 \cdot 10^{-3}$, коэффициент тензочувствительности тонкопленочных тензорезисторов $S = 2,1$. Исходя из этого можно определить ε_M :

$$\varepsilon_M = \frac{\varepsilon_R}{2S} = \frac{6 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 2,1} = 1,43 \cdot 10^{-3}, \quad (11)$$

где ε_R — относительные изменения сопротивления.

Подставляя (11) в (10), можно найти толщину мембраны h при выбранном радиусе мембраны r_M для заданного предела измерения давлений P .

Оценить нелинейность предлагаемого тензорезисторного датчика давления можно по функции преобразования. Для этого примем за линейную функцию преобразования

$$U_{\text{ВЫХЛ.Л}} = B_\phi = 0,375(1 - \mu^2) \left(1 - \frac{x^2}{r_M^2} \right), \quad (12)$$

а за нелинейную функцию преобразования

$$U_{\text{ВЫХ}} = B_r = 0,375(1 - \mu^2) \left(1 - 3\frac{x^2}{r_M^2} \right). \quad (13)$$

Нелинейность будем оценивать в относительных единицах:

$$\gamma_H = \frac{|U_{\text{ВЫХ}}| - |U_{\text{ВЫХЛ.Л}}|}{|U_{\text{ВЫХЛ.Л}}|} \quad (14)$$

или

$$\gamma_H = \frac{|U_{\text{ВЫХ}}|}{|U_{\text{ВЫХЛ.Л}}|} - 1. \quad (15)$$

Подставив (12) и (13) в формулу (15), получим

$$\gamma_H = \left(\frac{|U_{\text{ВЫХ}}|}{|U_{\text{ВЫХЛ.Л}}|} - 1 \right) = \left(\frac{|B_r|}{|B_\phi|} - 1 \right) = \left[\frac{1 - 3\frac{x^2}{r_M^2}}{1 - \frac{x^2}{r_M^2}} - 1 \right]. \quad (16)$$

На рис. 7 представлен график зависимости $\gamma_H = f\left(\frac{x}{r_M}\right)$, рассчитанный по выражению (16) вблизи $r = 0,707$. Из графика видно, что при относительном радиусе $r = 0,707$ нелинейность γ_H практически равна нулю.

Преимуществом данной конструкции является улучшение линейности выходной характеристики в условиях действия нестационарных температур (термоудара) измеряемой среды, в результате чего повышается точность и достоверность получаемой информации о давлении.

В предлагаемой конструкции при размещении всех тензорезисторов на мембране по окружности с радиусом r , равным $0,707r_M$, и равенстве их номинальных значений сопротивлений, теоретически не возникает погрешности от нелинейности измерительной цепи, так как не возникает несим-

метрии плеч измерительного моста при деформации благодаря равенству окружных и радиальных деформаций в местах установки тензорезисторов. При этом относительные изменения сопротивлений окружных и радиальных тензорезисторов равны. В результате испытаний экспериментальных образцов тонкопленочных датчиков давления установлено, что предлагаемые датчики позволяют уменьшить погрешность измерения давления в условиях воздействия нестационарных температур (термодара) на 20...30 %.

Список литературы

1. Белозубов Е. М., Белозубова Н. Е. Тонкопленочные тензорезисторные датчики давления — изделия нано- и микросистемной техники // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 12. С. 49—51.
2. Белозубов Е. М., Белозубова Н. Е., Васильев В. А. Тонкопленочные микромеханические системы и датчики на их основе // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 2. С. 33—39.
3. Белозубов Е. М., Васильев В. А., Измайлов Д. А. Алгоритм и программа "Моделирование влияния нестационарных температур на датчики мембранного типа". Свиде-

тельство об отрасл. регистрации разработки в отраслевом фонде алгоритмов и программ № 10700 от 26.05.2008 г. Зарегистрировано в "Национальном информационном фонде неопубликованных документов" ФАО ГКЦИТ, г. Москва, 02.06.2008 г. гос. рег. № 50200801123.

4. Белозубов Е. М. Патент РФ № 1615578 5G01L 9/04. Датчик давления. Опубл. 23.12.90. Бюл. № 47.

5. Белозубов Е. М., Белозубова Н. Е., Васильев В. А. Тонкопленочные тензорезисторные микроэлектромеханические системы с идентичными тензоэлементами // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 10. С. 34—39.

6. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Под ред. Е. П. Осадчего. М.: Машиностроение, 1979. 480 с.

7. Васильев В. А., Тихонов А. И. Анализ и синтез измерительных цепей преобразователей информации на основе твердотельных структур // Метрология. 2003. № 1. С. 3—20.

8. Белозубов Е. М., Васильев В. А., Измайлов Д. А. Моделирование термоударных характеристик тонкопленочных тензорезисторных датчиков давления // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2008. № 12. С. 16—21.

9. Белозубов Е. М., Васильев В. А., Васильева С. А., Громков Н. В., Тихонов А. И. Патент РФ № 2391640, 6G01L 9/04. Тензорезисторный датчик давления на основе тонкопленочной нано- и микроэлектромеханической системы. Бюл. № 16 от 10.06.2010.

10. Васильев В. А. Технологические особенности твердотельных мембранных чувствительных элементов // Вестник Московского государственного технического университета. Сер. Приборостроение. 2002. № 4. С. 97—108.

УДК 621.313.13-181.48 + 537.226.86

В. К. Казаков, нач. лаб.,
Р. М. Образцов, канд. техн. наук, нач. отдела
e-mail: roma_obr@mail.ru,
ОАО "НИИ "Элпа", г. Зеленоград, Москва

К ВОПРОСУ О КРИТЕРИЯХ ОТБРАКОВКИ ПЬЕЗОБЛОКОВ И ПЬЕЗОАКТЮАТОРОВ

Поступила в редакцию 10.06.2011

Предложены и обоснованы неописанные на сегодняшний момент в технической литературе два критерия отбраковки пьезоблоков или пьезоактюаторов, исключающих преждевременный выход из строя этих изделий. Проведено натурное макетирование и конечно-элементное моделирование пьезоблока с учетом дефектов в качестве подтверждения предположений.

Ключевые слова: пьезоактюатор, многослойная структура, надежность, отбраковка

Многослойные пьезоэлектрические актюаторы предназначены для преобразования электрического напряжения в пропорциональное его значению перемещение при значительных механических напряжениях. Многослойные пьезоактюаторы на сегодняшний день широко применяются в космической, лазерной, измерительной технике и оптических инструментах для осуществления перемеще-

ний их рабочих органов с точностью в десятые доли нанометра. Благодаря своей жесткой структуре такие актюаторы являются идеальным инструментом для обеспечения быстрых и точных перемещений как в статическом, так и в динамическом режимах работы.

Пьезоэлектрические модули, обеспечивающие преобразование электрического напряжения в перемещение, весьма малы, поэтому для получения значительных — порядка десятков микрометров — перемещений рабочей поверхности актюатора используются тонкие слои (толщиной порядка 50 мкм) пьезокерамического материала, электрически соединенные параллельно, а механически — последовательно. В зависимости от необходимого перемещения число этих слоев подбирается от нескольких десятков до тысячи и более.

В связи с тем, что в процессе производства возможно появление в отдельных слоях дефектов в виде трещин, полостей, расслоений, пор и т. д., а выход из строя хотя бы одного слоя автоматически ведет к выходу из строя всего изделия, получение монолитных конструкций с числом слоев более 60 является весьма трудной задачей. На практике сначала изготавливают многослойные пьезоэлементы с 50 активными слоями пьезокерамики (блоки), а затем эти блоки склеивают в стол-

бы, в которых может быть до 20 и более блоков. Внешние электроды отдельных блоков после склейки последних электрически соединяют параллельно. Склеивание блоков больше 25 в один актюатор уже нецелесообразно как из-за снижения выхода годных таких актюаторов, так и из-за угрозы потери устойчивости актюатора при его деформации во время функционирования.

Подчеркнем, что выход из строя хотя бы одного слоя блока вследствие пробоя или расслоения в этом случае будет также означать выход из строя всего актюатора, поэтому к отдельным блокам предъявляются повышенные требования.

Требования к отдельным блокам понятны — это нормированное перемещение при подаче управляющего напряжения, статическая электрическая емкость и электрическое сопротивление, а также геометрия, в первую очередь плоскостность поверхностей, участвующих в контакте с другими блоками. Выполнение этих требований обеспечивает работоспособность всего актюатора после его сборки.

На практике в процессе работы актюаторы со временем начинают выходить из строя. Наблюдается так называемая "ранняя деградация" при времени наработки на отказ порядка нескольких сотен тысяч циклов перемещений (срабатываний) вследствие грубых дефектов при изготовлении блоков и выход из строя при наработках в миллионы циклов, который вызывается усталостными напряжениями и развитием внутренних дефектов. В связи с необходимостью получения высоких значений надежности и, следовательно, больших времен наработки на отказ, достигающих у аналогичных образцов западных фирм значений $2 \cdot 10^9$ циклов перемещений, а также исключения "ранней деградации" актюаторов в процессе испытаний и у потребителя весьма важным является выявление критериев, указывающих на высокий уровень развития дефектов или на их число в еще работающем блоке или актюаторе.

Основными видами полных отказов актюаторов являются:

- тепловой пробой с последующим электрическим закорачиванием слоев;
- механическое разрушение актюатора по слоям.

Механизмы появления отказов в этих случаях разные.

Предвестником первого вида отказов является возрастание токов утечек вследствие миграции материала электродов по трещинам в присутствии влаги внутрь активного слоя пьезокерамики и уменьшение входного сопротивления. Некоторые из авторов [1—3] считают критерием отказа элек-

трический ток через актюатор, значение которого превышает 150 мкА, чему соответствует падение электрического сопротивления при измерениях на высоком напряжении до $R \leq 670 \text{ кОм} = 100 \text{ В}/150 \text{ мкА}$. Ряд авторов [1—5] считает предельным значением электрического тока 400 мкА, т. е. в этом случае падение электрического сопротивления до 250 кОм — это фактически уже пробой актюатора.

Если при первом виде полных отказов актюаторов образование и рост трещин, расположенных в областях непосредственно под электродами является только одной из причин отказа, то при втором — эта причина является основной.

Во время длительной наработки (испытаний) актюаторов наблюдаются следующие явления, описанные в технической литературе:

- изменение формы амплитудно-частотных характеристик и уменьшение амплитуды резонанса [6—8];
- появление дополнительных резонансов как в высокочастотной, так и в низкочастотной области амплитудно-частотной характеристики [9—11];
- проявление "акустической эмиссии" при образовании и росте трещин в областях непосредственно под электродами [12—14];
- изменение формы петли гистерезиса (появление и развитие микротрещин будет вести к росту рассеиваемой в актюаторе энергии, поэтому расширение петли гистерезиса представляется очевидным) [15].

Практически все эти критерии и признаки распространяются и на блоки, из которых собирается актюатор.

При отбраковке блоков перед сборкой актюатора наблюдаются следующие случаи аномального их поведения:

- "дрожание" стрелки тераомметра при измерении электрического сопротивления на высоком напряжении. Вследствие диэлектрической адсорбции, обусловленной процессами поляризации в диэлектрике, электрический ток керамического конденсатора после подачи постоянного напряжения медленно спадает со временем (соответственно, сопротивление растет). Однако у ряда многослойных пьезоэлементов наблюдается явление, когда измеряемое значение сопротивления изменяется в значительных пределах с частотой порядка нескольких герц, стрелка тераомметра "дрожит" или "мечется" по шкале прибора. Причина такого поведения неясна, возможно, это связано с микропробоями в слоях диэлектрика или электрохимическими реакциями диссоциированной воды, взаи-

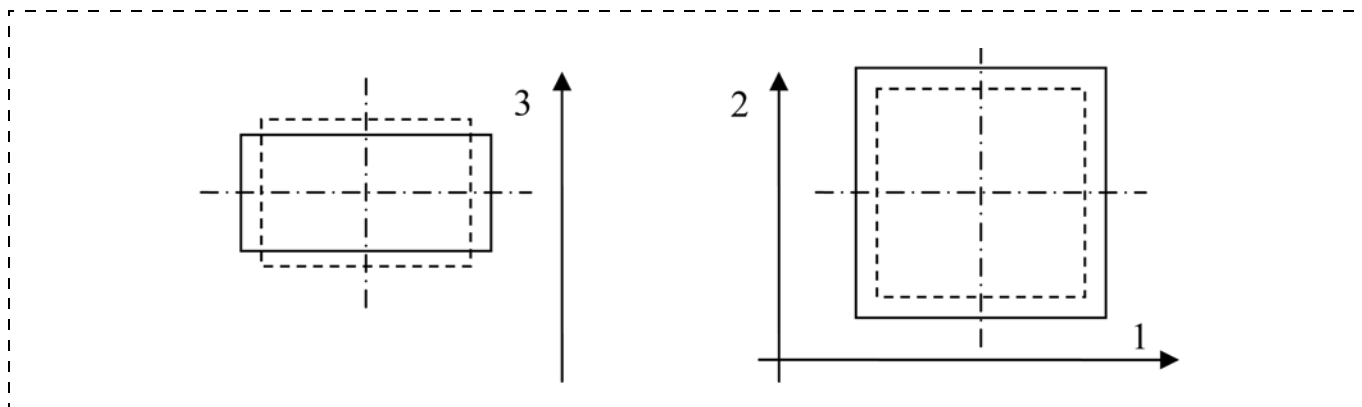


Рис. 1. Деформация многослойного элемента по различным осям при подаче напряжения. Штриховыми линиями показано деформированное состояние блока

- модействующей с металлическими электродами;
- появление звуков треска разрядов при высоком электрическом напряжении, сопровождающееся падением напряжения и бросками тока при измерениях перемещения блока при высоких напряженностях поля — фактически преобразователь находится в состоянии, при котором для развития полного электрического пробоя просто не хватает энергии или времени выдержки блока под электрическим напряжением;
 - отсутствие или значительно меньшее перемещение блока. Это связано, скорее всего, с разрушением части электродов, подводящих напряжение к слоям пьезокерамики. Возможные дополнительные проявления — падения значения электрической емкости при образовании отслоений электродов или их разрушении.

Однако для качественной отбраковки блоков перед сборкой актюатора фиксирование перечисленных случаев аномального поведения блоков недостаточно, поскольку замечено, что определенная часть некачественных блоков все-таки попадает на дальнейшие стадии производства актюаторов.

При проведении работ по освоению технологии изготовления многослойных пьезоэлементов размерами $6 \times 6 \times 2,7$ мм, состоящих из 50 активных слоев пьезокерамики, в ОАО "НИИ "Элпа" выявлен еще один вид аномального поведения блоков и сформулирован еще один критерий отбраковки пьезоблоков: значения вертикальной деформации (перемещения) при подаче электрического напряжения различаются в зависимости от взаимной ориентации измерительного контактного зонда и блока; при этом разность между двумя измеряемыми значениями вертикального перемещения достигает 25—30 %.

Рассмотрим деформацию обычного многослойного пьезоэлемента (блока). При приложении электрического напряжения 100 В и создании напряженности электрического поля в слоях блока вдоль оси 3 (рис. 1) и направленной по той же оси поляризации слоев пьезокерамики за счет пьезомодуля d_{33} возникает положительная деформация блока в вертикальном направлении порядка 2 мкм. Одновременно по осям 1 и 2 за счет деформации с учетом пьезомодуля d_{31} мы имеем отрицательную деформацию примерно такой же величины, так как пьезомодуль d_{31} примерно в два раза меньше пьезомодуля d_{33} , а деформируемый в этом случае размер (6 мм) примерно вдвое больше вертикального размера (2,7 мм) блока, деформируемого по оси 3 (рабочей оси). Вид деформации такого многослойного пьезоэлемента при приложении электрического поля приведен на рис. 1. Как видно из рисунка, все деформации симметричны вследствие симметрии конструкции.

Предположим, что в блоке имеется один или несколько слоев (рис. 2), электроды которых не соединены с питающим электрическим напряжением (дефект в виде разрыва подводящего электрода), и эти слои в преобладающем количестве расположены несимметрично относительно осевой линии блока (на рис. 2, а условно изображены в виде штриховых линий, расположенных выше осевой). При подаче электрического напряжения на такой блок по оси 3 он будет расширяться, а по осям 1 и 2 — сжиматься (рис. 2, б).

Наличие в верхней части блока слоев, которые не деформируются по осям 1 и 2 при приложении поля, приведет к тому, что деформация по этим осям в верхней половине блока будет существенно меньше, чем в нижней, в результате чего, кроме ранее рассмотренных деформаций сжатия по осям 1 и 2 и растяжения по оси 3 возникнут еще изгибные

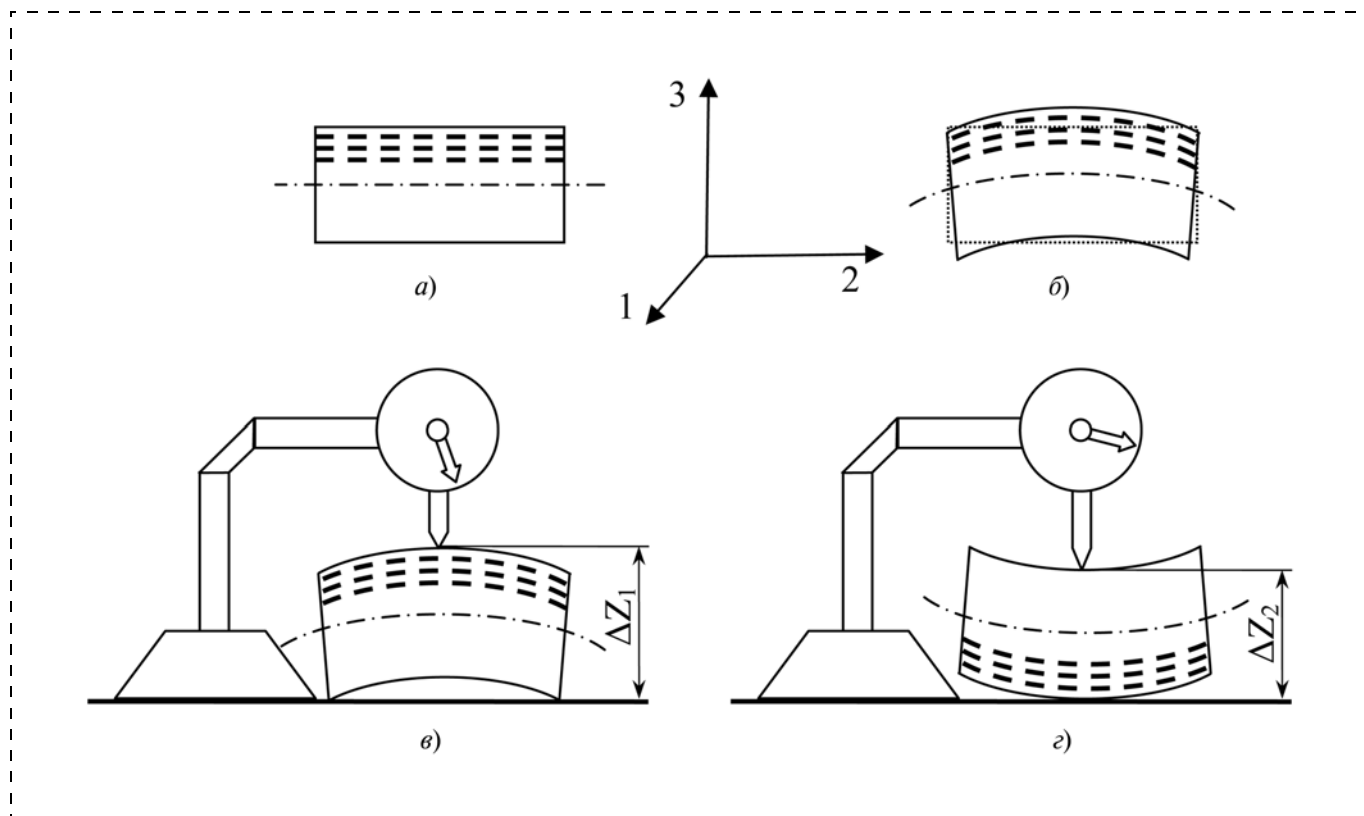


Рис. 2. Схематический вид деформации блока при наличии несимметричных дефектов (а, б) и различные случаи измерения перемещения многослойного пьезоэлемента (в, г)

деформации по осям 1 и 2, и сам блок примет изогнутую форму. Естественно, что при проведении измерений микрометром — между базовой плоскостью и зондом в случае, рассмотренном на рис. 2, в, мы будем иметь завышенные значения деформации вдоль оси 3. Если такой блок перевернуть (положить на базовую плоскость противоположной стороной), результаты измерений покажут фактическое увеличение размера блока по толщине (рис. 2, г).

Таким образом, в случае разрыва токоподводящих электродов в некотором числе слоев, лежащих несимметрично относительно центральной оси блока, как показано выше, получаем при измерениях по используемой методике два значения деформации вдоль оси 3, причем меньшая деформация будет соответствовать истинному увеличению толщины блока, а разница между большим и меньшим значением деформации будет соответствовать изгибной деформации, вызванной несимметричным расположением слоев с изолированными электродами блока.

При установке такого блока в актюатор путем склеивания он будет давать вклад в общую деформацию актюатора по оси 3, соответствующий его меньшему измеренному значению, т. е. истинной

толщине деформации, а изгибная составляющая деформации будет приводить только к увеличению внутренних напряжений в клеевом соединении, что в конечном итоге приведет к снижению общего перемещения актюатора (по сравнению с установкой нормального блока) и снижению надежности актюатора в целом.

Для проверки этого предположения проведено натурное моделирование обрыва электродов на части блока, а именно общий электрод на боковой стороне был механически удален на 1/3 его длины, что привело к отсутствию электрического напряжения на 15—20 верхних слоях. Значения деформаций, измеренные по описанной методике (рис. 2), при исходном состоянии этого блока (до обрыва электродов) и блока с электрически незапитанной частью слоев приведены в табл. 1.

Приведенное в таблице изменение значения электрической емкости на 32 % также подтвержда-

Таблица 1

Блок	C_0 , нФ	ΔZ_1 , мкм	ΔZ_2 , мкм
Исходный	416	2,4	2,5
После удаления части общего электрода	282	1,4	0,6

ет, что во втором случае не задействовано порядка 17 слоев. Следует отметить, что измерение одной электрической емкости не дает достоверной информации о такого рода дефектов блока, так как потеря электрического контакта с одним слоем приводит к уменьшению электрической емкости всего на 2 %, в то время как разброс диэлектрической проницаемости пьезоматериала в одной партии блоков обычно оказывает значительно большее влияние.

В целях подтверждения и уточнения вышеприведенных рассуждений исследована конечно-элементная модель пьезоблока $6 \times 6 \times 2,7$ мм из 50 активных слоев пьезокерамики и четырех пассивных слоев (по два с каждой стороны) со свойствами пьезоматериала ЦТС-19 на предмет характера деформаций этого блока. Для блока без дефектов получены следующие значения деформаций при подаче управляющего электрического напряжения:

- Деформация по оси 3 1,62 мкм — увеличение размера (рис. 3, а, см. третью сторону обложки);
 Деформация по оси 1 (2) минус 1,5 мкм — уменьшение размера.

Далее в модели последовательно сверху слой, находившиеся под электрическим напряжением, заменяли слоями, на которые потенциал не подавался (имитация отсутствия электрического контакта) в количествах от 2 до 10 с шагом 2 слоя (рис. 3, б, см. третью сторону обложки). Полученные значения перемещений по рабочей оси, ана-

Таблица 2

Число пассивных слоев	Измеряемые значения перемещения при двух разных положениях блока		Прогиб, мкм	Прогиб, % от значения перемещения по оси 3
	ΔZ_1	ΔZ_2		
0	1,62	1,62	0	0
2	1,63	1,51	0,12	12
4	1,68	1,46	0,22	15
6	1,74	1,40	0,34	24
8	1,8	1,4	0,4	28
10	1,83	1,28	0,55	43

логичных при используемой методике на практике, приведены в табл. 2.

Таким образом, при замене в блоке части активных слоев пассивными слоями изгибная составляющая возрастала, и вместе с этим происходил рост разности значений перемещения вдоль оси 3 между измерениями, в которых пассивные слои находились выше осевой линии, и измерениями, в которых пассивные слои находились ниже осевой линии, что наглядно показано на рис. 4.

Как видно из приведенных расчетных данных, компьютерное моделирование также подтверждает верность ранее изложенных и проверенных экспериментом соображений. Отсюда следует, что блок, имеющий различие значений перемещения по оси

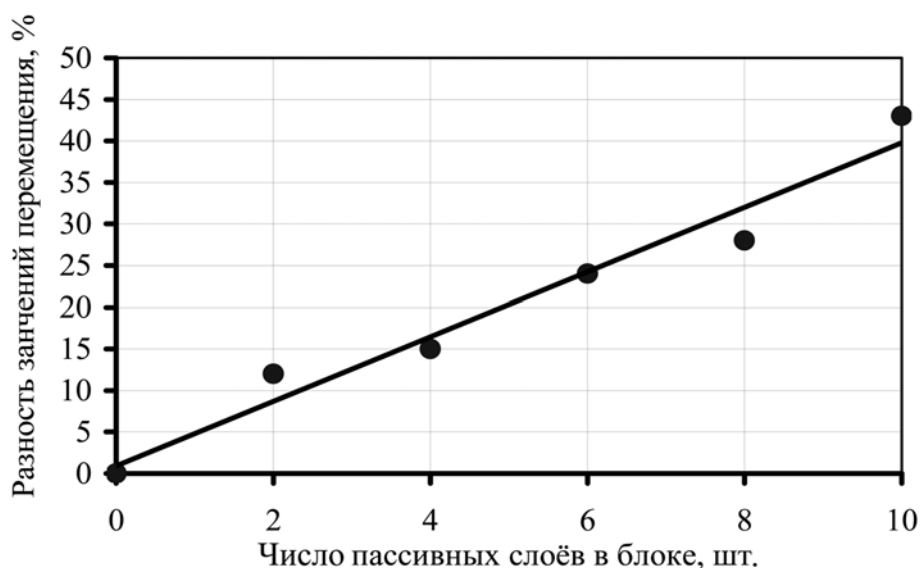


Рис. 4. Расчетные значения относительной разности измеряемых значений перемещения при различных способах установки блока на базовую плоскость от числа пассивных слоев

3 при измерениях его перемещения описанным способом, должен отбраковываться.

Дальнейшие рассуждения позволяют выявить и сформулировать еще один критерий отбраковки пьезоблоков — появление явно завышенных значений перемещений по оси 3.

Многочисленные измерения блоков позволили определить, что внутри одной партии основная часть блоков имеет перемещение, отличающееся от среднего значения всей партии на $\pm 10\%$, что согласуется с разбросом значений пьезомодулей и относительной диэлектрической проницаемости пьезоматериала. Вместе с этим, часто в партии в незначительных (до 5 %) количествах присутствуют блоки, значение перемещения по оси 3 которых в 1,5–2 раза превосходит значение перемещения остальных блоков партии и значение, рассчитанное для максимального пьезомодуля пьезокерамического материала.

Появление таких блоков может быть объяснено, если принять во внимание то обстоятельство, что разрушение блоков никогда не происходит по внутреннему межслойному электроду или по самому керамическому слою. Изучение многочисленных разрушенных образцов блоков и актюаторов показывает, что они разрушаются всегда по области, расположенной непосредственно под электродами, т. е. на одной стороне разрушенного блока остается весь слой металлизации, в то время как примыкающая к этой части блока сторона смежного с ним пьезослоя оказывается полностью лишена металлизации. Таким образом, перед разрушением слоя в блоке должны наблюдаться внутренние трещины, при которых металлизация прилегает только к одному пьезослою, в то время как от смежного пьезослоя она уже отошла, и при этом электрическое напряжение на этот пьезослой не подается (полностью или частично), т. е. один из слоев, примыкающий к внутренней трещине, является пассивным, в силу чего в структуре появляются изгибные деформации. При наличии в такой слоистой структуре большого числа трещин, которые пока еще не привели к полному разрушению блока, будут наблюдаться аномально высокие значения деформаций по оси 3, вызванные не только деформациями отдельных слоев под действием приложенного напряжения

и пьезомодуля d_{33} , а еще и изгибными деформациями из-за многочисленных частичных отрывов металлизации от пьезокерамических слоев и перехода этих слоев в число пассивных. Естественно, такие пьезоэлементы также должны отбраковываться.

* * *

Во время длительной наработки (испытаний) блоков или актюаторов специалистами ОАО "НИИ "Элпа" зафиксированы еще два явления, приводящие к преждевременному выходу из строя этих изделий, не описанные на сегодняшний момент в технической литературе. Поэтому с учетом изложенного выше при отбраковке блоков перед сборкой актюатора следует отбраковывать пьезоблоки, имеющие отличие значений перемещения по рабочей оси при двух последовательных описанных выше измерениях на базовой поверхности и аномально высокие значения перемещений.

Список литературы

1. Pepin J. G., Borland W., O'Callaghan P., Yong R. J. S. // J. Am. Ceram. Soc. 1989. Vol. 72. P. 2287–2291.
2. Nagata K., Kinoshita S. // J. Jpn Soc. Powder Powder Metall. 1994. Vol. 42. P. 975–979.
3. Nagata K., Kinoshita S. // J. Jpn Soc. Powder Powder Metall. 1995. Vol. 42. P. 623–627.
4. Nagata K., Kinoshita S. // J. Jpn Appl. Phys. 1995. Vol. 34. P. 5266–5269.
5. Thngrueng J., Tsuchiya T., Nagata K. // Jpn. J. Appl. Phys. 1998. Vol. 37. P. 5306–5310.
6. Bowen C., Mahon S., Prieto M. L. // Ferroelectrics, 2000. Vol. 241. P. 199–206.
7. Boser O., Kellawon R., Geyer R. // J. Am. Ceram. Soc. 1989. Vol. 72. P. 2282–2286.
8. Zickgraf B., Schneider G. A., Aldinger E. // Proc. 9th IEEE Int. Symp. On Applications of Ferroelectrics. Piscataway, NJ, IEEE. 1994. P. 325–328.
9. Uchino K., Takahashi S. // Curr. Opin. Solid State Mater., Sci. 1996. Vol. 5. P. 698–705.
10. Bowen C., Mahon S., Prieto M. L. // Ferroelectrics. 2000. Vol. 241. P. 199–206.
11. Kahn M., Krause D., Chase M. // Mater. Eval. 1996. Vol. 54. P. 749–754.
12. Aburatani H., Uchino K., Furuta A., Fuda Y. // Proc. 9th IEEE Int. Symp. on Applications of Ferroelectrics. Piscataway, NJ, IEEE. 1994. P. 750–752.
13. Kanayama K., Mase H., Nagayama H., Yamaoka H., Cshida Y. // Jpn. J. Appl. Phys. 1991. Vol. 30. P. 2281–2284.
14. Aburatani H., Yoshikawa S., Uchino K., DE Vries J. W. C. // Jap. J. Appl. Phys. 1998. Vol. 37. P. 204–209.
15. Zheng J., Takahashi S., Yosshikawa S., Uchino K., DE Vries J. W. C. // J. Am. Ceram. Soc. 1996. Vol. 79. P. 3193–3198.

УДК 621.396.677.3

П. П. Мальцев, д-р техн. наук, проф., директор,
О. В. Матвеев, канд. техн. наук, мл. науч. сотр.,
Д. Л. Гнатюк, мл. науч. сотр.,
А. П. Лисицкий, канд. техн. наук, зав. лаб.,
Ю. В. Федоров, зав. лаб.,
Учреждение Российской академии наук Институт
сверхвысокочастотной полупроводниковой
электроники РАН
E-mail: liant2@yandex.ru

ОБЗОР РЕАЛИЗАЦИЙ ПЛАНАРНЫХ ВСТРОЕННЫХ АНТЕНН ДИАПАЗОНА 5 ГГц С МИНИМАЛЬНЫМ ОБЪЕМОМ

Поступила в редакцию 10.08.2011

Рассмотрены планарные методы построения вибраторных антенн, антенн с щелевыми излучателями, антенн с фрактальной топологией диапазона 5 ГГц в планарной реализации с учетом экономии объема антенны. Показано, что реализованные фрактальные топологии не обеспечивают существенного снижения объема для антенн данного класса. Минимум объема достигается оптимизацией формы сигнальных и земляных проводников и мест их соединения.

Ключевые слова: планарная антенна, вибраторная антенна, щелевой излучатель, фрактальная топология

Введение

В работе [1] рассмотрены вопросы разработки встроенных антенн диапазона 5 ГГц с излучателем-монополем, развитие которых происходит в направлении усложнения топологии монополя и земляного проводника, прежде всего для расширения полосы частот. В антеннах данного типа площадь земляного проводника существенно превышает площадь монополя и при этом возможности снижения размеров земляного проводника ограничены самим видом электромагнитного поля. Поэтому в целях уменьшения объема развиваются иные типы планарных антенн: вибраторные и щелевые антенны, антенны с фрактальной топологией, объемные антенны, многослойные антенны, перестраиваемые антенны. В настоящей работе рассмотрены результаты разработки планарных встроенных антенн диапазона 5 ГГц с минимальным объемом.

Вибраторные антенны

Многолетнее развитие антенн привело к неоднозначности обозначений излучателей. Так, на сайте Википедия объединены термины *вибратор* и *диполь*. Далее вибратор обозначает излучающую систему из пары отдельных проводников, на которые подается излучаемый сигнал. Петлевой вибратор обозначает проводящую петлю при подаче излучаемого сигнала на один конец при заземленном втором.

Антенны данного типа, как и антенны с щелевыми излучателями, реализуются на диэлектрике с двухслойной (или однослойной) металлизацией и по технологичности близки к антеннам с монополем.

Вибраторная антенна вида, представленного на рис. 1 [2], имеет рабочие полосы 3,25...3,85 и 5,25...5,85 ГГц при размерах вибраторов со шлейфами $34 \times 14,1$ мм, толщине диэлектрика $n = 0,4$ мм и диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 4,4$.

Вибраторная антенна с изолированным резонатором между вибраторами показана на рис. 2 [3].

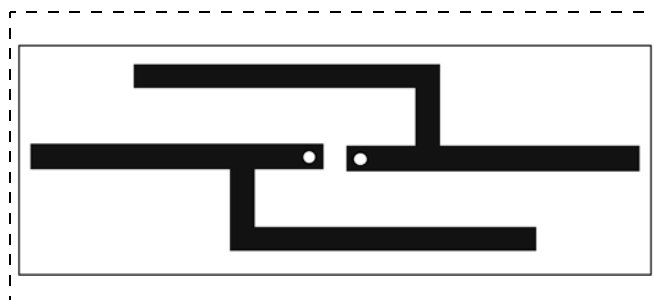


Рис. 1. Антенна с вибраторами со шлейфами. Кружки обозначают точки подачи сигнала

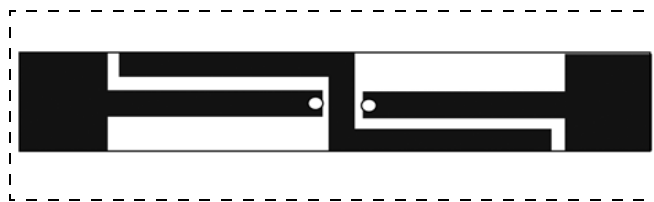


Рис. 2. Вибраторная антенна с изолированным резонатором между вибраторами



Рис. 3. Топологии сигнального и земляного проводников антенны с С-образными вибраторами

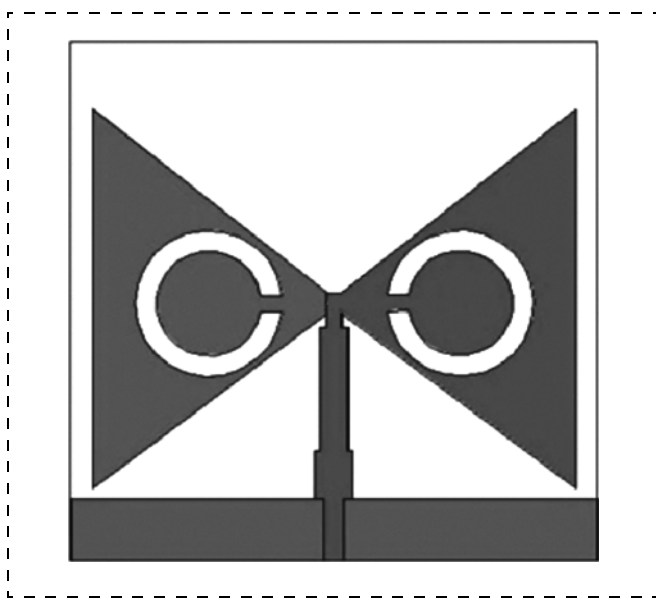


Рис. 4. Вибраторная антенна с щелевыми резонаторами круглого вида

При размерах антенны 39×7 мм, $h = 0,8$ мм и $\epsilon = 4,4$ обеспечена рабочая полоса $2,5...3,8$ ГГц. Для подачи сигнала на вибраторы необходимо использовать фазорасщепитель.

При реализации вибратора из металла земляного проводника при двухсторонней металлизации диэлектрика нет необходимости в фазорасщепителе. Такие антенны описаны в ряде работ. В работе [4] приведена топология С-образных вибраторов (рис. 3), которая имеет рабочую полосу $2,5...4,8$ ГГц.

В работе [5] изучена вибраторная антенна с щелевыми резонаторами круглого вида в каждом вибраторе (рис. 4), с щелевыми резонаторами ступенчатого вида и без резонаторов.

При резонаторах ступенчатого вида получены три узких полосы $2,4$; $3,5$; $5,3$ ГГц при размерах антенны 50×50 мм, $\epsilon = 6,15$, $h = 1,27$ мм. При круг-

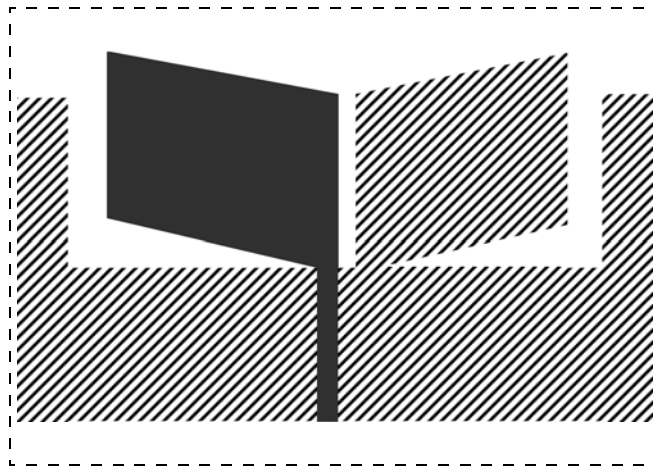


Рис. 5. Вид вибраторной антенны с неортогональными вибраторами. Штриховкой обозначен обратный (земляной) проводник

лых резонаторах наблюдаются две полосы и при отсутствии резонаторов — одна узкая полоса.

Широкая рабочая полоса $1,82...6,56$ ГГц при размерах антенны 48×30 мм получена для вибраторной антенны с неортогональными вибраторами (рис. 5) [6].

Вибраторы, показанные на рис. 6, сравнены в работе [7]. При размерах вибраторов 50×12 мм получены полосы для частот, соответственно: 21 % для $1,8$ ГГц; 11 % для $2,4$ ГГц; 10 % для $3,5$ ГГц.

Антенна с подводом сигнала емкостной связью с вибраторами, обеспечивающая высокий коэффициент усиления диаграммы направленности (ДН) предложена в работе [8]. Вибраторы асимметрично возбуждаются отрезком микрополосковой линии (рис. 7). Коэффициент усиления ДН $7,5$ дБ в рабочей полосе $2,39...2,52$ ГГц и 9 дБ в полосе $4,93...6,13$ ГГц. Размеры излучателя 30×26 мм, $\epsilon = 2,2$, $h = 0,5$.

В работе [9] исследованы петлевой вибратор Т-образного вида, выполненный на одной стороне подложки (*planar folded dipole antenna* (PFDA)), и его модификации: вибраторы выполнены на разных сторонах подложки (*both sided PFDA* (BPFDA)), подводящий фидер выполнен в виде компактного меандра (*compact BPFDA* (CBPFDA)). Показано, что последняя модификация не ухудшает характеристик антенны при существенно меньшей площади антенны.

В работе [10] описана антенна с парой петлевых вибраторов, изогнутых для экономии площади, как показано на рис. 8. Получена полоса $5,07...6,16$ ГГц при размерах вибраторов 18×18 мм, $\epsilon = 4,4$, $h = 0,8$ мм.

Планарная реализация антенны типа Яги (рис. 9) показала невысокий коэффициент усиления кардиоидной ДН $> 5,6$ дБ и полосу $4,64...6,25$ ГГц при размерах $35 \times 28 \times 1,6$ мм, $\epsilon = 4,4$ [11].

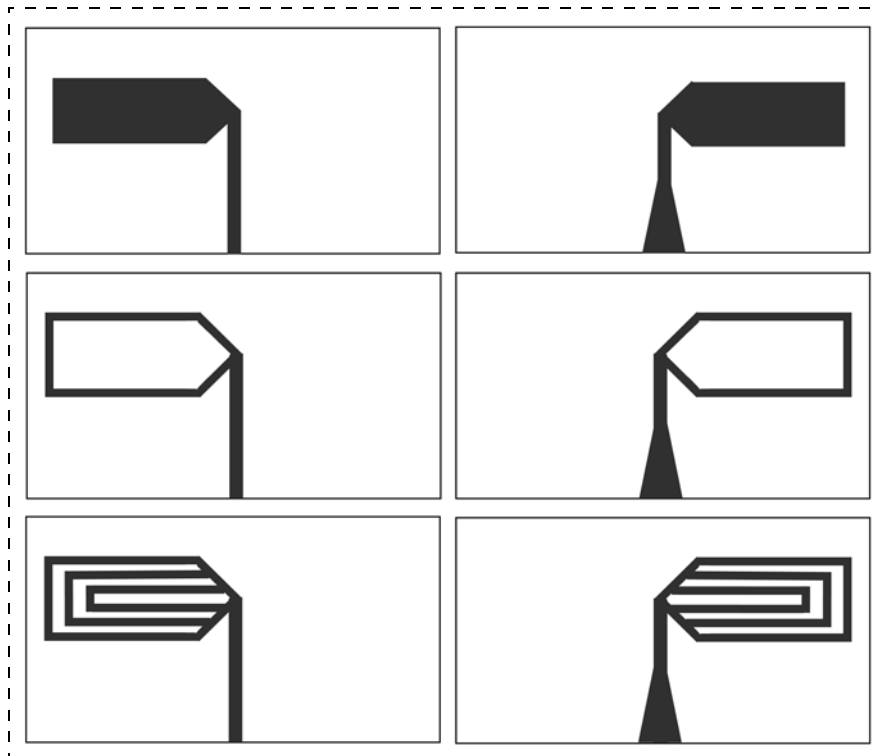


Рис. 6. Варианты вибраторных антенн

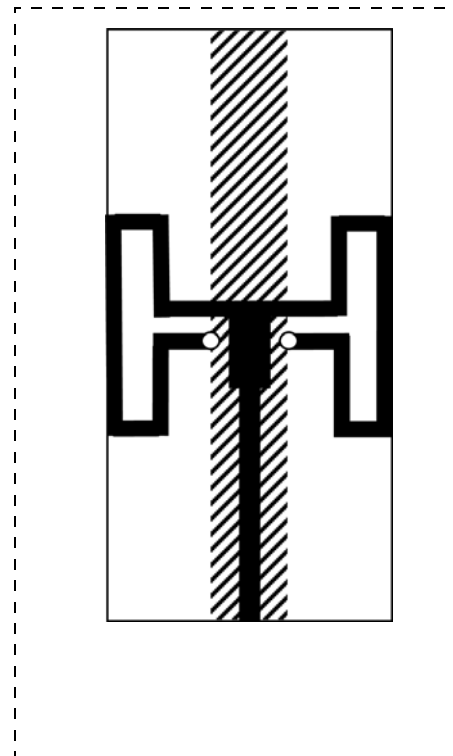


Рис. 8. Топология антенны с изогнутыми вибраторами

Патент [12 20100231477] защищает антенну (рис. 10), реализующую концепцию заземленных вибраторов. Она имеет полосу 3,0...5,5 ГГц при размерах излучателя $20 \times 10 \times 0,8$ мм, что является минимальным объемом для широкополосной антенны. Этот результат обеспечен оптимально выбранными формой проводников и оптимизацией мест заземления сигнальных проводников.

Простая топология антенны из прямоугольных проводников оптимальной формы с копланарным подводом (рис. 11) [13] обеспечивает полосу 1,65...5,06 ГГц при размерах излучателей 45×39 мм, $\epsilon = 4,4$, $h = 1,6$ мм.

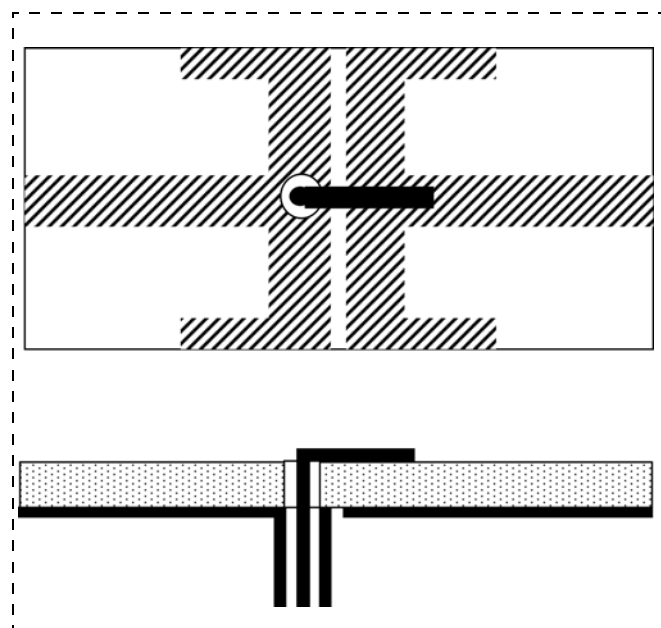


Рис. 7. Антенна с асимметричным возбуждением вибраторов отрезком микрополосковой линии (вид сверху и сечение)

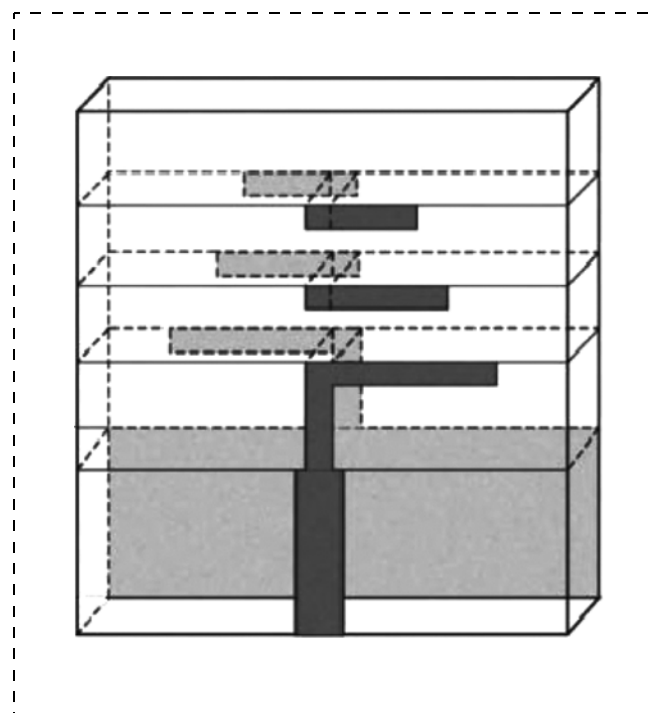


Рис. 9. Планарная реализация антенны типа Яги

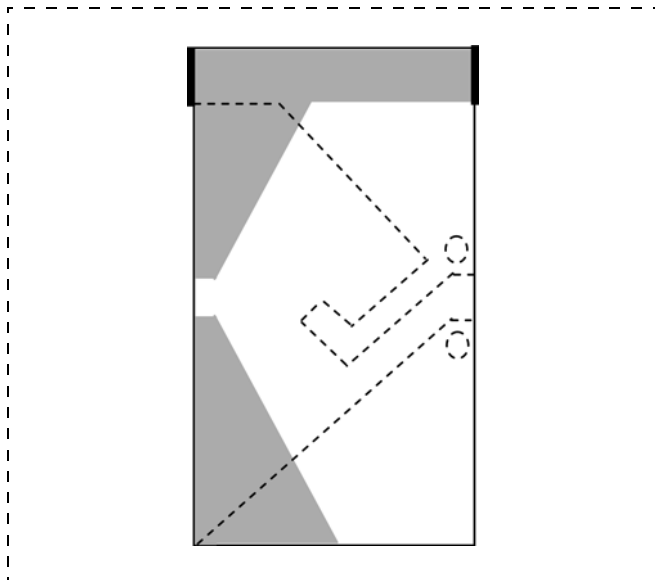


Рис. 10. Топология антенны с заземленными вибраторами. Штриховая линия обозначает контуры проводников на лицевой стороне, широкая линия на границе — соединение сигнального и земляного проводящих слоев

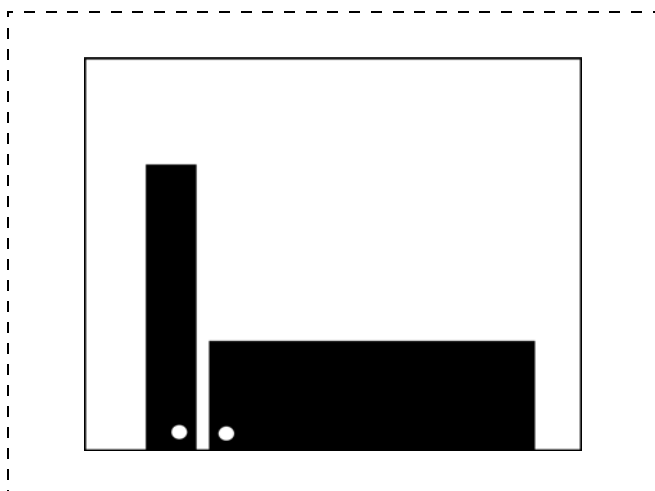


Рис. 11. Топология антенны из прямоугольных проводников

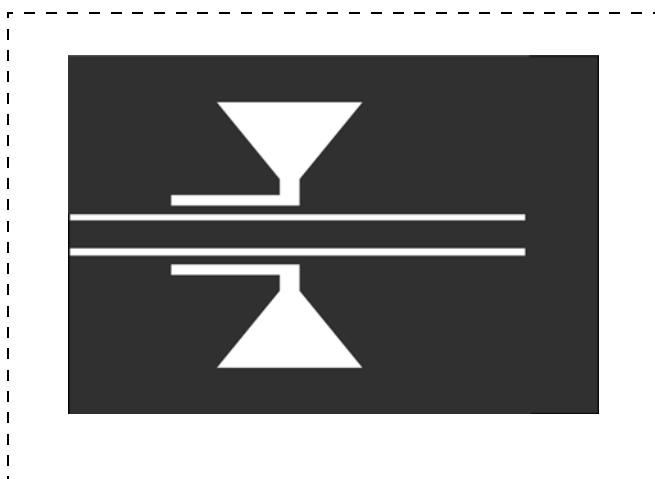


Рис. 12. Антенна с щелевыми вибраторами

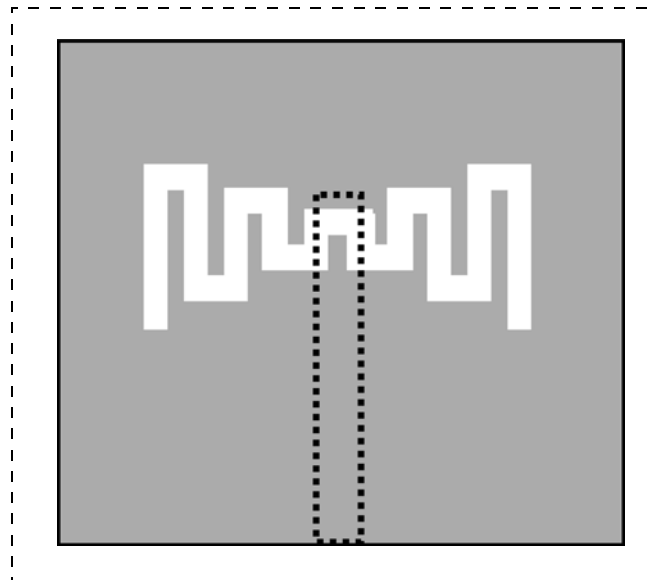


Рис. 13. Компактный щелевой излучатель

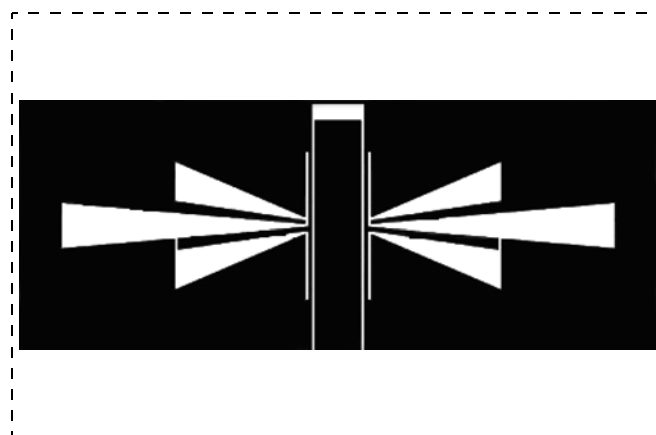


Рис. 14. Спаренные щелевые антенны

Антенны с щелевыми излучателями

Антенна с щелевыми вибраторами (рис. 12) обеспечивает полосу 8 % на частоте 2,45 ГГц, полосу 13 % на частоте 5,5 ГГц при сравнительно больших размерах 56×34 мм, $\epsilon = 4,34$, $h = 1,5$ мм [14].

Компактный щелевой излучатель (рис. 13) обеспечивает уменьшение размеров на 34,5 % до $9,5 \times 4,55$ мм, что сопровождается снижением рабочей полосы от 2,25 до 7,75 % (для центральной частоты 5,25 ГГц) при размерах $5,5 \times 5,15$ мм и $\epsilon = 2,2$, $h = 0,508$ мм [15].

Спаренные щелевые антенны (рис. 14) [16] при общем размере $76 \times 30,3$ мм и $\epsilon = 4,5$ мм обеспечивают рабочие полосы 2,393...2,565 и 3,353...3,788 ГГц.

Использование фрактальных топологий антенн

Фрактальную структуру можно строить двумя путями — усложнением контура фигуры или введением вырезов в площади фигуры с уменьшением масштабов изменения на каждой итерации. В работе [17, 18] рассмотрены общие принципы построения фрактальных структур для антенн. В обзоре, посвященном фрактальным антеннам [19], в частности, указано, что применение фрактальных топологий обеспечивает малую площадь, многополосность антенны. Ниже рассматриваются реализации антенн диапазона 5 ГГц и менее с фрактальной топологией.

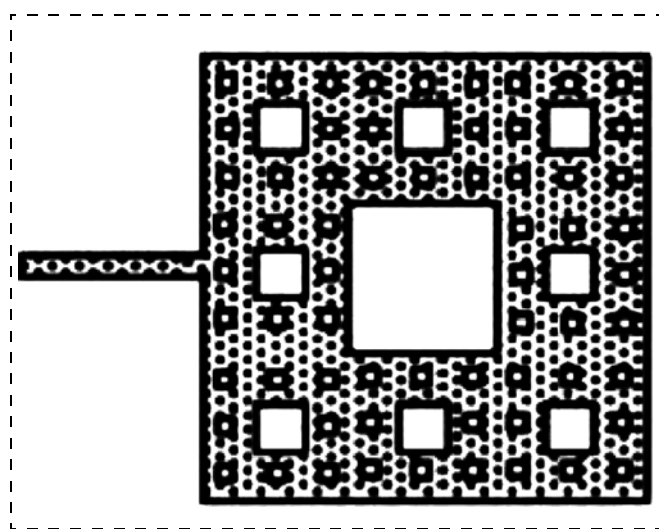


Рис. 15. Вид монополя с отверстиями-фракталами

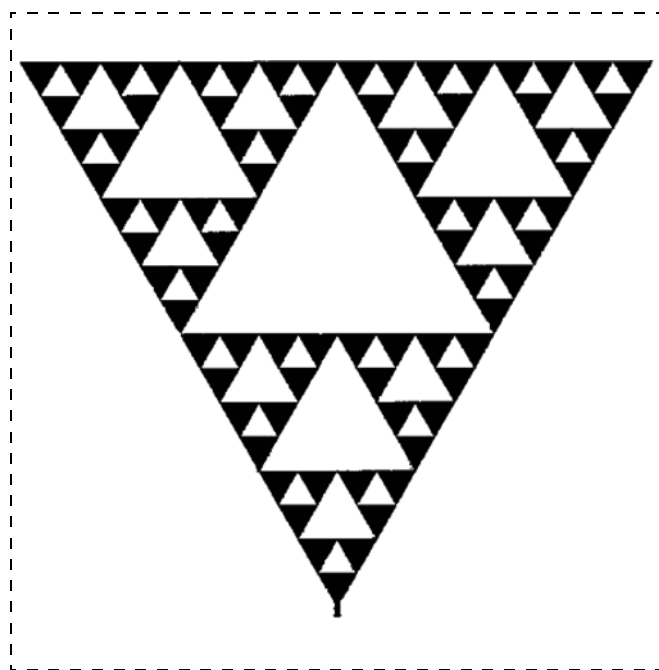


Рис. 16. Треугольный монополь с топологией фрактала Sierpinski

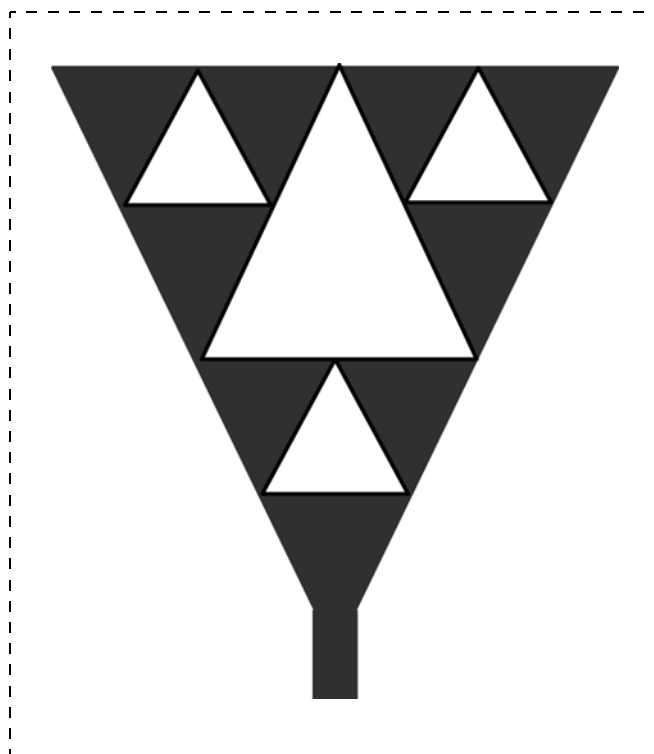


Рис. 17. Монополь меньшей итерации фрактала

Трехслойная антенна — антенна с монополем размером 54×54 мм, который имеет отверстия фракталы — Sierpinski (рис. 15) рассмотрена в работе [20].

Рассмотрен также вариант структуры с тремя разделенными диэлектриком проводящими квадратами поверх монополя, совпадающими по размерам с излучателем-монополем. Частотная зависимость S_{11} имеет у обеих антенн ряд недопустимо узких рабочих частотных полос. Таким образом, не всякое применение фрактала приводит к улучшению характеристик антенны. В данном случае структура поля обычного монополя не изменилась качественно при введении отверстий согласно рис. 15, однако они породили новые резонансы.

Для фрактала Sierpinski, примененного к треугольному монополю [21] (рис. 16), получен ряд рабочих полос: для частоты 0,62 ГГц — 7,5 %; 1,74 ГГц — 9,04 %; 3,51 ГГц — 20,5 %; 6,95 ГГц — 22 %; 13,89 ГГц — 25 % при размере излучателя $88,9 \times 88,9$ мм и $h = 1,588$ мм и $\epsilon = 2,5$.

Монополь меньшей итерации фрактала (рис. 17) при размерах 66×66 мм обеспечивает рабочие полосы 2,4...2,5; 5,725...5,825 ГГц [22].

В работе [23] исследована антенна с монополем и отверстием в земляном проводнике, граница которого модифицирована как Koch-фрактал (рис. 18). Проведено сравнение антенн с различной итера-

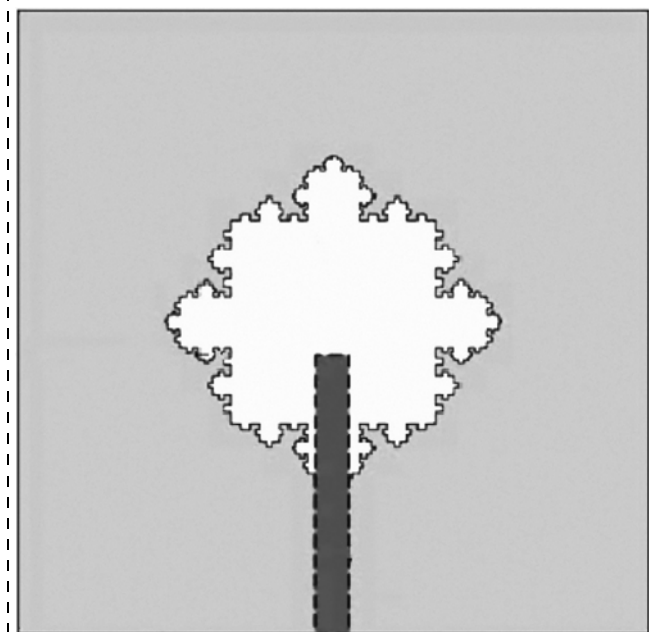


Рис. 18. Антенна с отверстием с фрактальными краями

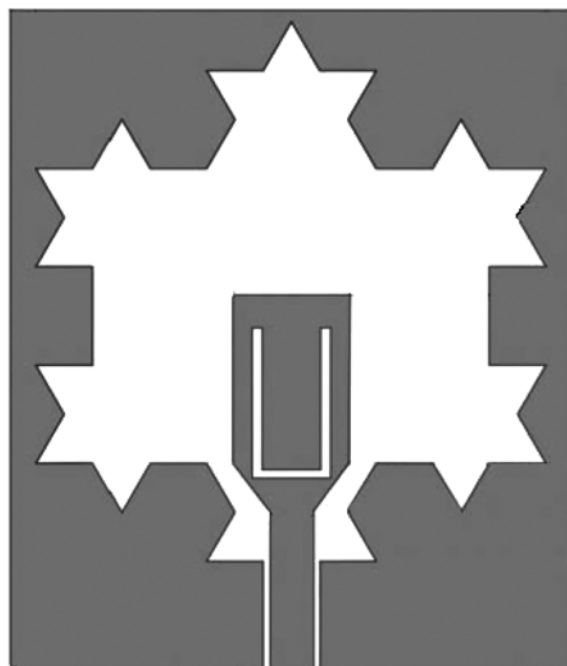


Рис. 20. Топология антенны с границей земляного проводника в форме фрактала

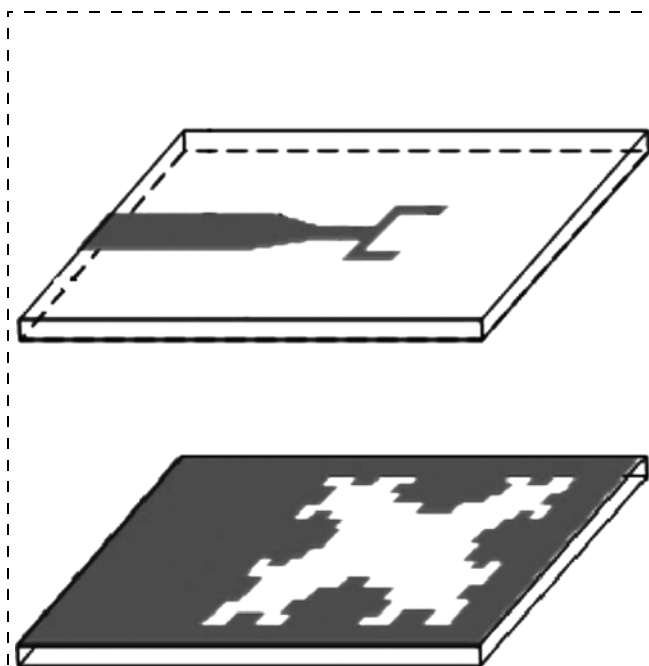


Рис. 19. Антенна с отверстием с фрактальными краями и моноподем сложной конфигурации (вид сверху и снизу)

цией фрактала. Найдено, что итерация фрактала должна быть оптимальной для достижения максимальной полосы. В оптимальной антенне два перекрывающихся частотных резонанса обеспечивают непрерывную полосу 62,3 % с центральной частотой 2,465 ГГц. Размер антенны — 70×70 мм, размер отверстия с фрактальными краями — примерно 30×30 мм, $\epsilon = 4,1$, $h = 1,5$ мм.

Подобным образом для модификации края отверстия в земляном проводнике применен *Koch*-фрактал иного вида при более сложном моноподе (рис. 19) [24]. Получены широкие рабочие полосы 2,85...4,65 и 6,4...12 ГГц. Размер антенны — 28×24 мм — меньший из рассмотренных ранее антенн, что указывает на эффективность применения фрактальной топологии. Использована подложка с $\epsilon = 2,65$, $h = 1$ мм.

Вариант выполнения границы земляного проводника в форме фрактала (рис. 20) описан в работе [25]. Проведено моделирование характеристик для материалов с ϵ от 2,2 до 10,2. Признано оптимальным $\epsilon = 4,4$: при размерах $33,5 \times 28,5$ мм измерения показали полосу 2,33...6,1 ГГц.

Фрактальная структура использована в топологии монополя, приведенной на рис. 21 [26]. Получены следующие рабочие полосы: 50 % для 1,14 ГГц; 19,5 % для 4,25 ГГц, 15 % для 7,6 ГГц при $\epsilon = 4,3$, $h = 1,53$ мм.

Вибратор, выполненный как фрактал Минковского второй итерации, описан в работе [27]

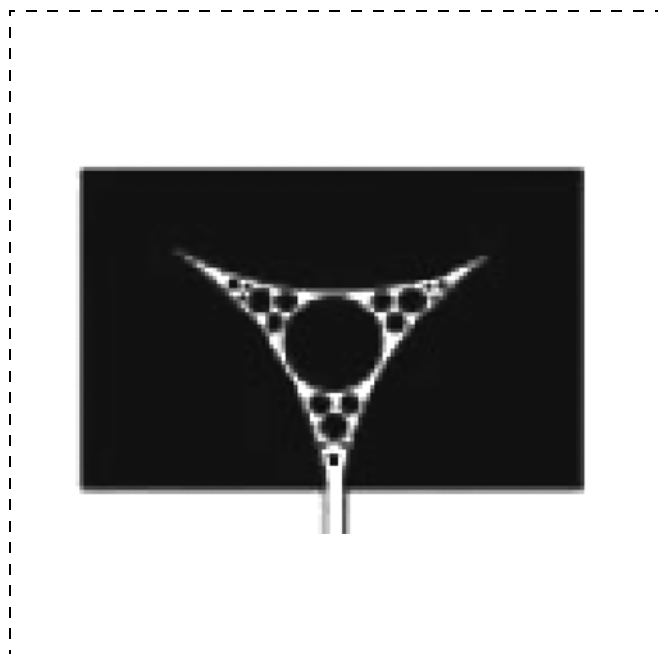


Рис. 21. Вид монополя с вырезами-фракталами

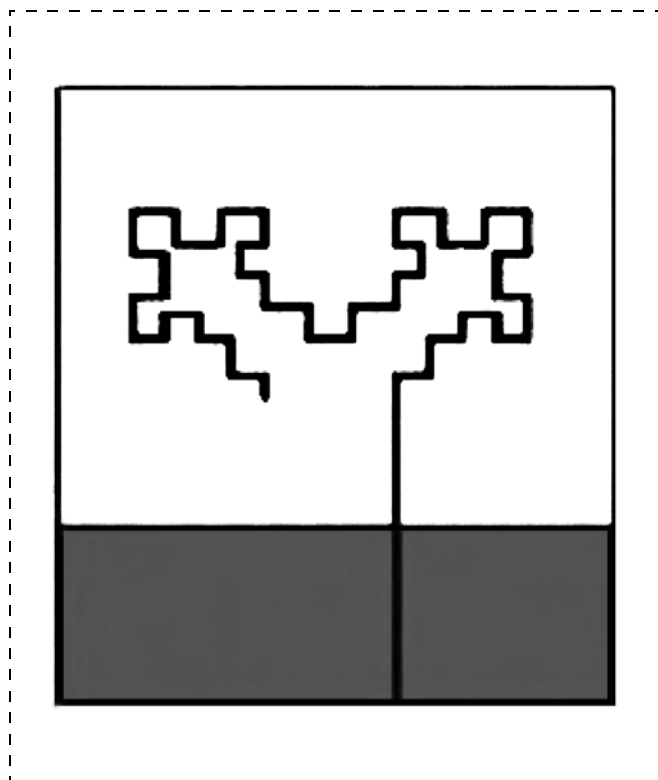


Рис. 22. Вибратор с формой фрактала Минковского

(рис. 22). Получены полосы 2,30...2,48; 3,3...3,7 и 4,9...6,0 ГГц при общем размере 35×30 мм, размере монополя — $21,5 \times 18$ мм, $\epsilon = 3,35$, $h = 0,813$ мм.

Заключение

Минимальные размеры антенн обеспечены оптимизацией топологии и точек заземления сигнальных проводников. В такой компактной топологии теряется деление элементов на общепринятые шлейф, вибратор, чему является примером антенна, приведенная на рис. 11. Фрактальные топологии не являются для антенн данного типа радикальным средством снижения размеров.

Примеры реализации показывают, что фрактальные топологии не обеспечивают существенно-го снижения объема для антенн данного класса.

Список литературы

1. Мальцев П. П., Матвеев О. В., Гнатюк Д. Л., Лисицкий А. П., Федоров Ю. В. Обзор реализаций планарных встроенных антенн диапазона 5 ГГц с излучателем монополюсом // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 9. С. 34—43.
2. Ting-Ming Hsueh, Heng-Tung Hsu, Hsi-Tseng Chou, Kwo-Lun Hung. Dual Band Omni-Directional Planar Antenna for WiMAX Applications // Proc. of Antennas and Propagation Society International Symposium, 2008. IEEE, 2008. P. 1—4.
3. Wen-Shan Chen, Shih-Hung Cheng. Characteristics of a Planar Dipole Antenna with a Parasitic Element // Proc. of Antennas and Propagation Society International Symposium, 2009 (APSURSI '09) IEEE, 2009. P. 1—4.
4. Kuramoto A. Wideband Antenna Using Unsymmetrical Planar Elements and Performance // Proc. of Antennas and Propagation Society International Symposium, 2007. IEEE, 2007. P. 5111—5114.
5. Tawk Y., Kabalan K. Y., El-Hajj A., Christodoulou C. G., Costantine J. A Simple Multiband Printed Bowtie Antenna // IEEE. Antennas and Wireless Propagation Letters. 2008. Vol. 7. P. 557—560.
6. Kuo-Yung Chiu, Jen-Yea Jan, Hua-Ming Chen. Broadband Printed Dipole Antenna with a Pair of Sleeves for 2—6 GHz/WiMAX Application // Antennas and Propagation Society International Symposium, 2009. (APSURSI'09). IEEE, 2009. P. 1—4.
7. Pengfei Wu, Zhenqi Kuai, Xiaowei Zhu. Multiband Antennas Comprising Multiple Frame-Printed Dipoles // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2009. Vol. 57, N 10. Part. 2. P. 3313—3316.
8. Li R., Wu T., Tentzeris M. A Dual-Band Unidirectional Coplanar Antenna for 2,4—5-GHz Wireless Applications // Proc. of Microwave Conference, 2008. APMC 2008. Asia-Pacific, 2008. P. 1—4.
9. Nagatoshi M., Yamano T., Morishita H. Broadband characteristics of Planar Folded Dipole Antenna with a Feed Line // Proc. of European Conference on Antennas and Propagation, 2009 (EuCAP 2009). 2009. P. 2807—2810.
10. Hsiao F. R., Wong K. L. Omnidirectional Planar Folded Dipole Antenna // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2004. Vol. 52, N 7. P. 1898—1902.

11. **Li Z., Zhang X., Guo Q., Wang J. A.** Quasi-Yagi Microstrip Antenna with Simplified Feeding Structure // Proc. of 9th International Symposium on Antennas Propagation and EM Theory (ISAPE), 2010. P. 860—863.
12. **Patent USA 2010/0231477A1.** Small — size wide band antenna and radio communication device / Kuramoto A., Mochizuki T. Опубли. 16.09.2010.
13. **Laila P., Deepu V., Sujith R., Mohanan P., Anandan C. K., Vasudevan K.** Asymmetric Coplanar Strip Fed Wide Band Antenna // International Conference on recent Advances in Microwave Theory and Applications, 2008 (MICROWAVE 2008). P. 372—373.
14. **Shams K. M. Z., Ali M.** A CPW — fed Inductively Coupled Modified Bow-Tie\ Slot Antenna // Antennas and Propagation Society International Symposium. 2005 IEEE. 2005. Vol. 3B. P. 365—368.
15. **Wi S. H., Kim J. M., Yoo T. H., Lee H. J., Park J. Y., Yook J. G., Park H. K.** Bow-tie-shaped Meander Slot Antenna for 5 GHz Application // Antennas and Propagation Society International Symposium. 2002 IEEE. 2002. Vol. 2. P. 456—459.
16. **Cheng-Feng Hou, Chien-Chang Huang.** Dual-Band Bow-Tie Slot Antenna Fed by CPW for WiFi/WiMAX System Applications // Antennas and Propagation Society International Symposium, 2007 IEEE. 2007. P. 984—987.
17. **Слюсар В.** Фрактальные антенны. Принципиально новый тип "ломаных" антенн. Ч. 1 // Электроника: наука, технология, бизнес. 2007. № 5. С. 78.
18. **Слюсар В.** Фрактальные антенны. Принципиально новый тип "ломаных" антенн. Ч. 2 // Электроника: наука, технология, бизнес. 2007. № 6. С. 82—89.
19. **Werner D. H., Ganguly S.** An Overview' of Fractal Antenna Engineering Research // IEEE Antennas and Propagation Magazine. February 2003. Vol. 45, N I. P. 38—57.
20. **Ban-Leong Ooi.** A Modified Contour Integral Analysis for Sierpinski Fractal Carpet Antennas With and Without Electromagnetic Band Gap Ground Plane // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2004. Vol. 52, N 5. P. 1286—1293.
21. **Puente-Baliarda C., Romeu J., Pous R., Cardama A.** On the Behavior of the Sierpinski Multiband Fractal Antenna // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1998. Vol. 46, N 4. P. 517—524.
22. **Krzysztofik W. J.** Modified Sierpinski Fractal Monopole for ISM-Bands Handset Applications // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2009. Vol. 57, N 3. P. 606—615.
23. **Wen-Ling Chen, Guang-Ming Wang, Chen-Xin Zhang.** Bandwidth Enhancement of a Microstrip-Line-Fed Printed Wide-Slot Antenna With a Fractal-Shaped Slot // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2009. Vol. 57, N 7. P. 2176—2179.
24. **Lui W. J., Cheng C. H., Zhu H. B.** Compact Frequency Notched Ultra-Wideband Fractal Printed Slot Antenna // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2006. Vol. 16, N 4. P. 224—226.
25. **Krishna D. D., Gopikrishna M., Anandan C. K., Mohanan P., Vasudevan K.** CPW-Fed Koch Fractal Slot Antenna for WLAN/WiMAX Applications // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2008. Vol. 7. P. 389—392.
26. **Tiwari A., Kumar R.** On the Design of CPW-fed Appollian Gasket Fractal Antenna // Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, Moscow, Russia. 2009 August 18. P. 423—426.
27. **Luo O., Salgado H. M., Pereira J. R.** Fractal Monopole Antenna Design Using Minkowski Island Geometry // Antennas and Propagation Society International Symposium, 2009 (APSURSI '09). IEEE. 2009. P. 1—4.

Sensor Test Kazakhstan

Международная профессиональная выставка

28 февраля — 01 марта 2012

Казахстан, Алматы, КЦДС "Атакент"

Выставка **Sensor Test Kazakhstan 2012** — первая профессиональная выставка в области сенсорных, измерительных и тестовых технологий для всех отраслей промышленности, а также для фактически всех областей нашей повседневной жизни.

В течение трех дней посетители и участники выставки смогут не только ознакомиться с продукцией, оборудованием и технологиями, но и приобрести новые знания и практические навыки.

Организатором мероприятия выступает компания Novex Ltd. при поддержке Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Ростехрегулирование).

Подробности на сайте <http://strexpo.ru/>

УДК 623.3

Л. С. Раткин, канд. техн. наук, директор по научной работе,
e-mail: rathkeen@bk.ru,
ООО "АРГМ"

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ИНДУСТРИИ

Поступила в редакцию 02.08.2011

Научная сессия Общего собрания Российской академии наук (РАН), состоявшаяся в Москве в середине декабря 2010 года, была посвящена полувековому юбилею лазерной техники. Рассматривались, в частности, особенности развития лазерной индустрии, отраслевые нанотехнологические приложения, изучение лазерного термоядерного синтеза, фундаментальные приложения экстремальных световых полей, биомедицинские лазерные информационные технологии, лазерно-плазменные микро- и нанотехнологии и применение лазеров в медицинской сфере.

Ключевые слова: Российская академия наук, РАН, лазер, лазерный термоядерный синтез, экстремальные световые поля, биология, лазерные информационные технологии, лазерно-плазменные микро- и нанотехнологии, медицина

Президент РАН академик Ю. С. Осипов, открывая заседание, отметил важный вклад в развитие мировой лазерной промышленности профессора Ч. Х. Таунса и академиков Н. Г. Басова и А. М. Прохорова, удостоенных звания лауреатов Нобелевской премии в 1964 г. Общепризнанной датой создания лазера является 16.05.1960, отмеченная в рабочей тетради Теодора Меймана, создавшего первый в мире лазер (рубиновый), но этому предшествовал постулат Альберта Эйнштейна (1916 г.) о существовании квантовой системы вынужденного (индуцированного) излучения.

Доклад иностранного члена РАН профессора Ч. Х. Таунса об открытии, развитии и перспективах лазерной техники представил на Научной сессии Общего собрания РАН академик С. Н. Багаев. Среди областей науки, получивших развитие благодаря лазерной технике, были отмечены не только

звездная интерферометрия, микрообработка материалов, теплофизика высоких температур и нелинейная оптика, но и гетеродинное детектирование коротких длин волн, метрология и физика низких температур. Продукция лазерной индустрии применяется для термоядерного синтеза, хирургических операций, оптической связи, микроконтроля, сварки и резки, а также для создания указателей (например, лазерных указок).

Выступление вице-президента РАН, лауреата Нобелевской премии академика Ж. И. Алферова затрагивало проблематику исследований, связанных с полупроводниковыми лазерами и нанотехнологиями. Отмечалось, что развитие полупроводниковой лазерной техники и технологии гетероструктур способствовало появлению методов, применяемых в сфере нанотехнологий. Прежде всего, благодаря жидкофазной эпитаксии были созданы гетероструктуры с узкозонным слоем в 10–20 нм. В 2009 г. за разработку технологии молекулярно-лучевой эпитаксии и полупроводниковых сверхрешеток на Втором международном нанотехнологическом форуме (Москва) премия Роснано была вручена академику Л. В. Келдышу и профессору А. Чо. Основой промышленного производства светодиодов и солнечных батарей является газофазная эпитаксия, позволяющая создавать десятки тысяч лазеров с уникальными характеристиками.

К 1994 г. относится создание квантовых каскадных лазеров — на сверхрешетках и системах с квантовыми ямами, перекрывающих диапазон спектральной дальней и средней ИК области и применяемых для диагностики и лечения болезней органов дыхания, анализов газа в атмосфере, а также в военных целях для ослепления фотоприемников на ракетах. К 1993–1994 гг. относится создание лазеров на квантовых точках с температурной независимостью пороговой плоскости тока. Срок службы высокоэффективных лазеров на квантовых точках превышает 100 лет. Преднамеренно внесенная разупорядоченность квантовых точек обуславливает создание лазеров со сверхширокими спектрами генерации, применяемых для получения оптической связи как между чипами на большом числе оптических каналов, так и между элементами интегральных схем. Современная мощность полупроводниковых лазеров с КПД 74 % с полосами

100 мкм составляет 16 Вт, что позволяет их использовать для диодной накачки, резки и сварки материалов. Важно отметить, что проблема пороговой плотности тока для полупроводниковых лазеров решается благодаря применению лазеров на квантовых точках, используемых для изготовления вживляемых в организм чипов для анализа и контроля состояния больного.

Доклад академика О. Н. Крохина и член-корреспондента РАН С. Г. Гаранина касался проблематики использования мощных лазерных систем и термоядерного синтеза. Рассмотрены процессы переноса генерируемого в бокс-конверторе по цилиндрическим каналам из разных материалов рентгеновского излучения при изучении поведения горячей плотной плазмы. Скоррелировать экспериментальные данные с результатами математического моделирования позволила проведенная впервые в мире серия экспериментов по анализу асимметрического влияния на динамику работы термоядерных мишеней и генерацию нейтронов. Поле излучения в боксе, согласно расчетам, полученным при экспериментировании с мишенью непрямого сжатия, имеет высокую степень однородности ($\sim 3\%$) и эффективную температуру 170 эВ. Зарегистрирована температура DT плазмы ~ 3 кэВ, объемное сжатие $\sim 2 \cdot 10^3$, нейтронный выход $\sim 2 \cdot 10^9$ и скорость полета оболочки $\sim 3 \cdot 10^7$. Благодаря особой конструкции мишеней непрямого облучения были проведены эксперименты с высокой симметрией облучения DT-капсулы.

При изучении влияния асимметрии поля рентгеновского излучения на динамику работы мишени было доказано, что развитые физические модели и усовершенствованные методы численного моделирования удовлетворительно описывают рассматриваемые в сложных неоднородных газодинамических течениях процессы. Возможности сопоставления экспериментальных и расчетных данных, развития физических моделей излучаемых явлений и совершенствования методов численного моделирования были продемонстрированы в рамках программы экспериментов на установке "Искра-5". При энергии $E_L = 500$ кДж на длине волны 0,35 мкм при воздействии лазерным импульсом с коэффициентом усиления $G = 10$ зажигается полимерная криогенная мишень, что было показано для одномерных газодинамических расчетов сжатия мишеней прямого облучения. В двумерных расчетах при оценке влияния на горение термоядерной мишени крупномасштабной неоднородности (КН) показано, что порог зажигания дополнительно повышают мелкомасштабные неоднородности, а КН облучения на уровне 3—5 % способствует срыву горения. Также был представлен модуль установки "Искра-6" — 4-проходный 4-канальный лазер на неодимовом фосфатном стекле (установка "Луч") с энергией в одном лазерном пучке 3,3 кДж на длине волны 1054 нм, длительностью лазерного

импульса 4 нс и размером одного лазерного пучка 20×20 см. При создании установки по проекту осуществлялась научная кооперация организаций ГК "Росатом" (РФЯЦ-ВНИИЭФ, ВНИИА, НИИЭФА и ТРИНИТИ), предприятий Минпром РФ (ГОИ, НИКИ ОЭП и ЛЗОС) и институтов РАН (ИПФ РАН, ФИАН и ИОФ РАН). Основные проектные решения для оборудования и приборов следующего поколения отрабатываются на установке "Луч". При реализации проекта по созданию установки "УФЛ-2М" сконструирована смешанная диодно-ламповая система накачки лазерных элементов, создан новый алгоритм системы наведения, выполнено облучение мишени на второй гармонике неодимового лазера и разработаны активные лазерные элементы из отечественного стекла с требуемой апертурой и лучевой прочностью. Появление ядерно-термоядерного гибридного реактора с лазерным термоядерным источником нейтронов предполагается с развитием технологий нового поколения по концептуальному проекту ЛАГИР. Это позволит не только развивать ядерно-безопасную энергетику с вовлечением в топливный цикл природного урана, но и обеспечить развитие конкурентоспособной энергетики XXI века с решением проблем ядерных отходов. Таким образом, среди основных направлений работ РФЯЦ-ВНИИЭФ по физике мощных лазеров можно отметить конструирование лазеров с ядерной накачкой и взрывных фотодиссоционных йодных лазеров, проектирование лазеров с диодной накачкой, совершенствование химических лазеров (йодно-кислородные и импульсно-периодические) и повышение силы света методами адаптивной и нелинейной оптики.

В выступлении член-корреспондента РАН А. М. Сергеева рассматривались фундаментальные приложения для экстремальных световых полей. Был представлен совместный проект ФИАН и ИСЭ СО РАН по строительству установки THL-100 мощностью 100 ТВт. В состав оборудования входит Ti:Sa-стартовый комплекс и фотохимический XeF(C-A)-усилитель с 6-сторонней накачкой ВУФ-излучением электронно-пучкового конвертера. После реализации проекта строительства мультитераваттного лазерного комплекса "Прогресс-П" с применением метода chirпованных импульсов в НИИКИ (Сосновый Бор, 1997 г.) аналогичные комплексы с мощностью порядка 10 ТВт были построены в ЦНИИМаш и ВНИИТФ. Аналогичная схема применялась при строительстве петаваттного лазера, запущенного в работу в Ливерморской национальной лаборатории в 1997 г. Первый отечественный тераваттный титан-сапфировый лазерный комплекс в ИПФ РАН также был построен в 1997 г.

Несколько систем данного класса работает в настоящее время в ряде академических институтов. В частности, уникальная фемтосекундная тераваттная лазерная система ИК диапазона частот на кристаллах "хром-форстерит" (10 Гц, 1240 нм,

2 ТВт, 80 фс) запущена в 2003 г. в ОИВТ РАН, Ti : Sa-лазерный комплекс (10 Гц, 800 нм, 3 ТВт, 45 фс) начал работу с 2005 г. в ИЛФ СО РАН. Под руководством член-корреспондента РАН Е. А. Хазанова в 2006 г. в ИПФ РАН создан лазерный комплекс PEARL (PEtawatt pARametric Laser) петаваттного уровня мощности.

Выступление директора Научного центра волоконной оптики РАН академика Е. М. Дианова было посвящено волоконной оптике и лазерам. Среди проблем передачи информации на большие расстояния посредством оптической связи отмечались не только недостаточная степень проницаемости свободной атмосферы для оптической связи, но и существенное затухание оптического сигнала (например, потери порядка 1000 дБ/км). Благодаря применению инновационных технологий стало возможным снижение оптических потерь в волоконных световодах — уже в 1980 г. они составляли 0,16 дБ/км (ослабление сигнала на длине 18 км в 2 раза), хотя десятилетием ранее этот показатель имел значение порядка 20 дБ/км (американская компания "Корнинг Гласс"). Помимо волоконных телекоммуникационных световодов широко известны специальные волоконные световоды: активные, фоточувствительные, нелинейные, микроструктурированные (фотонно-кристаллические), световоды для компенсации дисперсии, волоконные световоды для среднего ИК диапазона, поддерживающие поляризацию излучения на больших длинах и со специальными покрытиями.

Основателем направления изучения "высокочистых" веществ являлся академик Г. Г. Девярых, инициатором научных исследований по волоконной оптике являлся академик А. М. Прохоров. Работы по созданию технологии волоконных световодов с низкими потерями (ВСНП) начались в ФИАН и ИХАН уже в 1973 г., и через два года были получены первые ВСНП (7 дБ/км на длине волны 0,8 мкм). Первая экспериментальная волоконно-оптическая система связи была построена в 1977 г., и через год для систем дальней связи на волне 1,3 мкм ФИАН, ФТИАН и ИХАН разработали волоконно-оптическую линию передачи сигналов. Результатами развития волоконно-оптической индустрии в РФ стало конструирование прочных светодиодов (герметичных покрытий), создание висмутовых волоконных световодов и волоконных лазеров, изучение взаимодействия и распространения солитонов и производство рамановских волоконных усилителей. Среди научных достижений можно отметить генерацию второй гармоники с созданием соответствующей модели явления, изучение семейства высоколинейных волоконных световодов и исследование детонационно-подобного режима распространения оптического разряда в волоконных светодиодах.

К 2010 г. скорость передачи данных в коммерческих системах связи достигла 1–10 Тбит/с (в экспериментальных системах — до 70 Тбит/с)

по одному световоду, а в 1980 г. составляла всего 40 Мбит/с. Согласно экспертным оценкам, общая протяженность сетей волоконных световодов составит 2 млрд км (сейчас — 1 млрд км), и число пользователей сети Интернет в 2015 г. достигнет 5 млрд чел. Среди новых подходов к увеличению к 2030 г. скорости передачи информации до уровня 1 Пбит/с (10^{15} бит/с) можно отметить многоуровневые модуляции оптического излучения (MLM), многосердцевидные волоконные световоды (MCF) и многомодовые волоконные световоды (MMF) с уплотнением каналов.

Инновациями в физике и лазерной технике является применение волоконных лазеров в автомобильной, судостроительной и аэрокосмической отраслях. К числу преимуществ можно отнести надежность и удобство эксплуатации, в том числе при эффективном оттоке теплоты через боковую поверхность, высокое качество пучка, малый вес, высокую степень эффективности (свыше 30 % от розетки) с мощностью непрерывной генерации до 50 кВт и небольшие размеры. Инвестиционно привлекательно производство фемтосекундных волоконных лазеров, используемых для создания микро- и наноструктур и прецизионной обработки различных материалов, для медицинских и биологических приложений, для определения скорости расширения Вселенной с точностью 1 см/с и поиска экзопланет, а также для прецизионных и компактных оптических часов.

Достижения и перспективы развития технологий конструирования лазеров на свободных электронах (ЛСЭ) освещались в докладе д-ра физ.-мат. наук Н. А. Винокурова, подготовленного в соавторстве с академиком А. Н. Скринским и академиком Г. Н. Кулипановым из Института ядерной физики (ИЯФ) им. Г. И. Будкера СО РАН. Так как ЛСЭ обеспечивает монохроматическое излучение на любой заданной длине волны от 0,1 нм до 1 мм с плавной ее перестройкой, средняя излучаемая мощность может достигать 100 кВт, поскольку используется явление вынужденного ондуляторного излучения, вызванное синхронизацией отдельных излучателей. Очевидно, что энергия электрона меняется, так как скорость электрона в ондуляторе имеет поперечную компоненту. Если за время прохождения электроном одного периода ондулятора он отстает от волны ровно на длину волны, суммарное изменение энергии во всем ондуляторе может быть значительным.

ЛСЭ по длинам волн излучения перекрывают 7 порядков от 0,1 нм до 1 мм. Среди ЛСЭ субмиллиметрового диапазона можно отметить KAERI (Ю. Корея), CLEO (Франция), ИЯФ СО РАН (РФ), FELIX (Нидерланды) и UCSB (США). В США (LCLS) и ФРГ (FLASH) есть рентгеновские ЛСЭ, в Японии, КНР, Великобритании, Италии, ФРГ и Ю. Корею строят новые рентгеновские ЛСЭ. В частности, ЛСЭ университета Дюка

(США) применяется для генерации фотонов с энергией до 100 МэВ при длине волны 10^{-14} м.

В ходе работ по совершенствованию конструкции были реализованы гибридные ондуляторы на постоянных магнитах, а также оптические клистроны и ондуляторы на постоянных магнитах с изменяемым зазором. Были экспериментально изучены результаты спонтанного и вынужденного излучений оптического клистрона с созданием теории ЛСЭ на электронном накопителе. Разработан проект ЛСЭ на ускорителе-рекуператоре с рекуперацией энергии использованного в ЛСЭ электронного пучка. Для ЛСЭ видимого и УФ диапазонов были опробованы внутрирезонансные эталоны Фабри—Перо с конфокальным резонатором. Предложена оригинальная конструкция обмотки электромагнитного ондулятора, что позволило достигнуть рекордного значения короткой длины волн для ЛСЭ в 0,24 мкм. При "электронном" выводе излучения из оптического резонатора ЛСЭ была достигнута выходная мощность свыше 10 кВт. Использование длинного ондулятора позволило провести серию экспериментов по исследованию влияния на движение одного электрона в накопителе квантовых флуктуаций синхротронного излучения.

Для Сибирского центра фотохимических исследований в ИЯФ СО РАН функционируют два мощных ЛСЭ терагерцового и дальнего ИК диапазонов. Третий ЛСЭ уже спроектирован. В настоящее время проводятся строительные работы. Согласно проектной документации, в качестве основной выбрана модель 4-дорожечного ускорителя-рекуператора с максимальной энергией 40 МэВ. Для установленных на 1, 2 и 4 дорожках трех лазеров полномасштабного ЛСЭ диапазон перестройки длин волн излучения составит 5—250 мкм, что позволит проводить уникальные исследования научным организациям и учреждениям России.

Для мощных ЛСЭ применима схема рекуперации энергии отработанного электронного пучка, что обусловлено низким электронным КПД ЛСЭ (порядка 1 %). Но рекуперация позволит сократить радиационную безопасность установки и увеличить значение среднего тока электронного пучка. Субмиллиметровый терагерцовый ЛСЭ, работающий с 2003 г., имеет следующую функциональную схему: ускорение в ВЧ резонаторах до энергии 11 МэВ инжекторных электронов с энергией 2 МэВ приводит к их замедлению в ВЧ резонаторах. Предварительно часть энергии передается в ЛСЭ (возвращается в резонаторы) с отводом в поглотитель электронов с низкой энергией в 2 МэВ.

Уникальным источником когерентного электромагнитного излучения является Новосибирский ЛСЭ: в своих диапазонах волн (40—80 и 110—24 мкм) по своей средней мощности в 0,5 кВт он существенно превосходит существующие зарубежные аналоги. Рекордно высокая мощность ЛСЭ обусловлена применением уникальной конструк-

ции ускорителя-рекуператора электронов со средним током пучка 30 мА и с энергией до 40 МэВ.

После запуска второй очереди Новосибирского ЛСЭ значительно расширился спектр региональных мультидисциплинарных исследований. Совместные работы по научным программам и проектам проводятся с применением уникального лазерного оборудования в Сибирском центре фотохимических исследований СО РАН. В частности, при испытаниях оборудования для абляции оргстекла несфокусированным излучением Новосибирского ЛСЭ были получены уникальные данные: несфокусированным лазерным пучком без признаков горения материала за 3 мин в оргстекле просверливается отверстие глубиной 50 мм.

Благодаря высокой частоте повторения эксперимента технологии и оборудование совершенствуются для дальнейшей коммерциализации наукоемкого продукта, поскольку изучение механизма абляции становится возможным в ранее недостижимых условиях. Возможно наблюдение за труднодоступными технологическими процессами с производством наноматериалов. Одним из примеров является фокусировка параболическим зеркалом излучения непосредственно после выходного зеркала, позволившая получить непрерывный оптический разряд в воздухе и аргоне при атмосферном давлении. Визуализация субмиллиметрового излучения допустима с помощью разработанных в ИФП РАН тепловизионных приборов. Другой пример: в Институте цитологии и генетики СО РАН и Институте химической кинетики и горения (ИХКГ) СО РАН многократно наблюдается процесс абляции биологических макромолекул, испаряемых с поверхности твердого образца без разрушения при низкой (менее 0,01 эВ) энергии фотонов субмиллиметрового излучения. Допустимо введение определения, характеризующего ультрамягкую лазерную абляцию ДНК: спектр размеров содержит всего один пик, а при больших мощностях наблюдаются пики, соответствующие фрагментам начальных молекул. Еще одним применением технологии является молекулярная спектроскопия с применением излучения ЛСЭ: успешные эксперименты по обнаружению в водородном пламени радикалов ОН по эффекту Фарадея проведены в ИХКГ СО РАН.

Советник РАН академик С. Н. Багаев затрагивал проблематику применения лазерной техники в высокоточной физике и метрологии. Рассматривались особенности российско-французской кооперации в научной сфере по программе развития лазерных и оптических информационных технологий и нанотехнологий и гранта РФФИ. Участниками работ являются Институт лазерной физики СО РАН и Лаборатория физики лазеров Университета Париж-Норд.

Выступление академика-секретаря Отделения нанотехнологий и информационных технологий

РАН академик Е. П. Велихова было посвящено истории развития лазерной техники. Ускорению работ по лазерному оружию способствовало создание первого лазера Т. Мейманом в 1960 г. и первого CO_2 -лазера К. Пателом в 1964 г. Поскольку уникальные свойства лазерного излучения и принципиальная возможность масштабирования параметров технологических лазеров открывали пути к созданию лазерного оружия, для обеспечения безопасности государства и сохранения научного паритета на встречах Министра обороны СССР Д. Ф. Устинова и Президента АН СССР А. П. Александрова данная проблема неоднократно обсуждалась с ведущими экспертами в сфере физики мощных лазеров.

При создании отечественного лазерного оружия необходимо было решить ряд первоочередных задач [1–2]:

- конструирование систем для наведения лазерных пучков и определения местоположения быстроперемещающихся мишеней высокой степени точности;
- разработка технологий производства, в частности, спецоптики световых потоков высокой мощности;
- совершенствование процессов взаимодействия с материалами лазерного излучения для повышения уровня значений ключевых поражающих факторов;
- создание экспериментальных моделей лазеров с энергией порядка 10 МДж и мощностью от 1 МВт.

Были описаны свойства электрического газового разряда и оптики резонаторов в соответствующих физико-математических моделях, спроектированы необходимые элементы "силовой" оптики, в частности, адаптивной, обеспечивающие высокую стабильность качества лазерного пучка резонаторов и систем вывода и управления излучением [3–4], обоснованы методы получения в больших объемах активной среды [5–7] и сконструированы надежные высокоэффективные опторезонаторы.

В выступлении академика Е. П. Велихова были представлены результаты фундаментальных исследований, в том числе по проектированию электроионизационного лазера и газоразрядного CO_2 -лазера непрерывного действия с самостоятельным разрядом, наблюдению однородного разряда в быстром потоке лазерно-активного газа (Институт атомной энергии им. И. В. Курчатова, 1970 г.) и возрастанию мощности генерации CO_2 -лазера под воздействием пучка быстрых протонов. Обращалось внимание на возможность корректировки абберрации вплоть до 15-го порядка полиномов Цернике и большое значение порога разрушения отражающего покрытия порядка 3 ГВт/см² для импульсов 0,6 нс. Среди разработок были отмечены:

- передвижной комплекс "МЛТК-50" с накачкой несамостоятельным разрядом на базе лазера

мощностью 50 кВт (ИАЭ им. И. В. Курчатова, 1998 г.);

- экспериментальный технологический CO_2 -лазер "СЛАВЯНКА" с быстрым потоком рабочей смеси мощностью 13 кВт (НИИЭФА, 1990 г.);
- многолучевой CO_2 -лазер "МЛК", накачиваемый безэлектродным разрядом переменного тока с диффузионным охлаждением и мощностью 3 кВт (ИАЭ им. И. В. Курчатова, 1980 г.);
- быстропоточный CO_2 -лазер мощностью 10 кВт "23Е" с прокачкой газа посредством турбины авиационного двигателя для термотехнологии и накачкой самостоятельным разрядом (ИАЭ им. И. В. Курчатова и НПО "Красная Звезда", 1980 г.);
- импульсно-периодический лазер "ДЯТЕЛ" для разделения изотопов (ИАЭ им. И. В. Курчатова, 1980 г.);
- технологический быстропоточный CO_2 -лазер "ЛТ-1" с самостоятельным разрядом постоянного тока мощностью 3 кВт (Институт атомной энергии (ИАЭ) им. И. В. Курчатова, 1975 г.);
- импульсно-периодический CO_2 -лазер "ЛАНТАН" для обработки материалов (ИПМ АН СССР).

На промышленных предприятиях благодаря появлению первых экспериментальных CO_2 -лазеров были внедрены новые технологии, в том числе локального лазерного термоупрочнения головки блока цилиндра автомобильного двигателя (ЗИЛ, 1981 г.) и лазерной резки, например, стальных листов большой толщины или резки под водой излучением CO_2 -лазера (ИПЛИТ РАН, 1996 г.). В качестве примера применения лазерных технологий в энергетических отраслях были представлены результаты работ по функционированию участка лазерного производства изотопа C^{13} (ИСАН, ИАЭ им. И. В. Курчатова, 1985 г.) и сварке и резке топливных каналов на Курской АЭС.

Академиком Е. П. Велиховым была представлена ретроспектива созданного в 1979 г. как НИЦ по технологическим лазерам (ТЛ) АН СССР Института проблем лазерных и информационных технологий (ИПЛИТ) РАН. НИЦ ТЛ АН СССР, переименованный в ИПЛИТ РАН в 1998 г., был создан по инициативе АН СССР и при активной поддержке ее Президента академика А. П. Александрова. В 1991 г. на базе ИПЛИТ АН СССР для решения задач по организации выпуска комплексов на основе мощных CO_2 -лазеров для обработки материалов и их внедрения в промышленность были созданы инновационные структуры, при активном участии которых в период 1991–2010 гг. было произведено свыше 200 лазерных комплексов для отечественных и иностранных предприятий. В том числе были разработаны:

- CO_2 -лазер с поперечной прокачкой рабочей смеси мощностью 5 кВт из типа ИПЛИТ РАН "ТЛ-1,5/2,5/4";

- многолучевой CO₂-лазер с диффузионным охлаждением рабочей смеси мощностью 4 кВт из типоряда ИПЛИТ РАН "МЛТ-2/4/6";
- волноводный CO₂-лазер ТЛ-1000 для прецизионной резки материалов (ИПЛИТ РАН) с габаритными размерами 2,2 × 0,5 × 1,2 м, с волновой модой ЕН₁₁, импульсно-периодическим режимом генерации от 0,5 до 2,5 кГц и мощностью излучения 1,4 кВт;
- лазерный технологический комплекс на базе быстропроточного CO₂-лазера мощностью 6 кВт с применением самофильтрующего резонатора (ИТПМ СО РАН, 2010 г.) для резки листовых материалов (например, стали толщиной до 25 мм);
- CO₂-лазер с поперечной прокачкой рабочей смеси мощностью 2,5 кВт из типоряда ИПЛИТ РАН "ТЛ-5/10/15".

При резке металла излучением мощного лазера с использованием адаптивной оптики в ИПЛИТ РАН получено наивысшее оптическое качество излучения с точностью сохранения размера фокального пятна 1 % (при отсутствии корректора точность составляет 15 %). Использование лазерной литографии позволяет повысить качество изготовления технологической оснастки. Интеллектуальная медицинская система "ПЕРФОКОР" разработана на базе волноводного CO₂-лазера с накачкой разрядом переменного тока в ИПЛИТ РАН для трансмиокардиальной лазерной реваскуляризации, позволяющая лучом лазера формировать от 20 до 50 каналов диаметром от 0,5 до 1 мм в стенке миокарда (2010 г.).

Темой доклада профессора В. А. Макарова (МГУ им. В. А. Ломоносова) были нелинейные оптические приложения [8—9]. Были представлены решения уравнения С. А. Ахманова и В. И. Жарикова (1967 г.) и примеры фундаментальных исследований в теории нелинейных электромагнитных волн академика Р. В. Хохлова (1961 г.) [10]. Публичным признанием выдающихся результатов в области нелинейной оптики в СССР явилось присуждение:

- С. А. Ахманову и Р. В. Хохлову Ленинской премии в 1970 г. "за исследование нелинейных когерентных взаимодействий в оптике";
- Э. С. Воронину, В. С. Соломатину, И. Н. Матвееву, Ю. А. Ильинскому и Н. Д. Устинову Государственной премии СССР в 1970 г. "за цикл исследований, направленных на создание нелинейно-оптических преобразователей ИК сигналов и изображений в видимый диапазон";
- В. С. Летохову и В. П. Чеботареву Ленинской премии в 1978 г. "за цикл работ по нелинейным узким резонансам в оптике и их применению";
- Д. Н. Клышко, А. Н. Пенину и В. В. Фадееву Государственной премии СССР в 1978 г. "за открытие и исследование явления параметрического рассеяния света и его применение в спектроскопии и метрологии";
- Г. А. Аскарьяну, В. В. Коробкину, В. Н. Луговому, Н. Ф. Пилипецкому, А. П. Сухорукову и

В. И. Таланову Ленинской премии в 1988 г. "за открытие и исследование эффектов самофокусировки волновых пучков";

- П. А. Апанасевичу, М. С. Бродину, Ю. Н. Денисюку, Е. В. Ивакину, А. С. Рубанову, М. С. Соскину, Б. И. Степанову и А. И. Соколовской Государственной премии в 1982 г. "за разработку основ четырехволновой динамической голографии";
- Б. Я. Зельдовичу, Ф. С. Файзуллову, О. Ю. Носачу, В. В. Рагульскому и И. Г. Зубареву Государственной премии СССР в 1983 г. "за цикл работ по самообращению волнового фронта при вынужденном рассеянии на гиперзвуке";
- Б. В. Бокуть, В. Д. Волосову, В. Г. Дмитриеву, А. И. Ковригину, А. А. Кулевскому, А. С. Пискарскому, С. Р. Рустамову, А. П. Сухорукову, Т. М. Усманову и Г. И. Фрейдману Государственной премии СССР в 1984 г. "за создание теории и разработку высокоэффективных нелинейно-оптических преобразователей нового поколения";
- В. Ю. Баранову, Е. П. Велихову, Г. А. Баранову, А. А. Кучинскому, А. П. Дядькину, С. В. Пигульскому, В. С. Летохову и Е. А. Рябову Государственной премии в 2002 г. за исследования физико-химических основ лазерного разделения изотопов методом селективной многофотонной диссоциации молекул;
- О. А. Акципетрову, В. Ю. Аристову, А. М. Ионову, П. К. Кашкарову, В. Г. Лившицу, В. Н. Овсюку и В. И. Панову Государственной премии РФ в 2002 г. за изучение электронных и атомных процессов на поверхностях твердых тел.

В 2009 г. в лазерном центре МГУ им. М. В. Ломоносова А. С. Чиркиным были проведены работы по параметрическому усилению при НЧ накачке, О. Г. Косаревой и А. Б. Савельевым исследовалась филаментация фемтосекундных лазерных импульсов. С. В. Чекалиным и В. П. Кандидовым (ИС РАН) проведены спектроскопические исследования конической эмиссии фемтосекундного филамента в плавленом кварце, А. А. Карабутовым были сформулированы задачи лазерной оптоакустической диагностики. В частности, было установлено, что энергия составляла от 1 до 20 мкДж при длительности импульсов от 40 до 80 фс с длиной волны в диапазоне от 400 до 2300 нм. Сингулярности поляризации в нелинейной оптике и проблемы генерации второй гармоники от поверхности нелинейной оптически активной среды при сингулярности поляризации С-типа в центре пучка на удвоенной частоте рассматривались профессором В. А. Макаровым в 2010 г.

Отмечалось, что обратные задачи нелинейной оптики связаны с восстановлением по отклику на внешнее воздействие параметров нелинейной оптической системы. При этом особое внимание уделяется традиционной спектроскопии однородных сред, спектроскопии одномерно неоднородных сред и не-

линейной томографии неоднородных в двух или трех направлениях систем. При решении обратных задач, в том числе, в нелинейной оптике, основными проблемами является обеспечение единственности решения, неустойчивость алгоритмов восстановления и определение точности измерения исходных данных. К числу перспективных направлений относится генерация второй гармоники, изучение нелинейной оптики метаматериалов, в том числе хиральных, и освоение терагерцового диапазона частот с помощью нелинейной оптики. В данной сфере проводятся исследования коллективами ученых (А. В. Жаров, Ю. С. Кившарь и И. В. Шадриков (2005 г.), О. А. Акципетров и Т. В. Мурзина (2009 г.) и др.).

В докладе лауреата Государственной премии РФ в области науки и технологий за 2009 г., директора ИПЛИТ РАН, академика В. Я. Панченко затрагивалась проблематика лазерно-информационных технологий в биомедицине. Были представлены технологии поверхностно-селективного лазерного спекания (ПСЛС), лазерно-информационные технологии дистанционного биомоделирования, интеллектуальные лазерные системы для медицины, лазерные технологии быстрого прототипирования и стереолитографии, лазерные технологии в отолярингологии, сверхкритические флюидные технологии создания биоматериалов и матриц для тканевой инженерии и адаптивные оптические системы для офтальмологии.

Методом прямого лазерного рисования HeCd-лазером в 1991 г. были получены первые модели. На установках лазерной стереолитографии ИПЛИТ РАН LS-120, LS-250 и LS-350/500 точность изготовления стереолитографической модели составляла 20—100 мкм. Современные лазерно-информационные технологии дистанционного биомоделирования обеспечивают свыше 3500 операций более чем в 30 клиниках. В рамках научной кооперации с Центром судебно-медицинской экспертизы Министерства здравоохранения РФ первая стереолитографическая модель черепа человека была создана в ИПЛИТ РАН в 1995 г. Для получения STL-представления модели черепа и обработки томограмм на ПЭВМ с процессором Intel 486 с операционной системой MS DOS было разработано специализированное программное обеспечение. Получаемые биосовместимые имплантаты используются в Центре сердечно-сосудистой хирургии им. А. Н. Бакулева, Московском научно-исследовательском онкологическом институте им. П. А. Герцена, Московской клинической больнице № 31, Самарской областной клинической больнице им. М. И. Калинина, Российском онкологическом центре им. Н. Н. Блохина и Институте нейрохирургии им. Н. Н. Бурденко.

Технология ПСЛС основана на расплаве прозрачных для лазерного излучения поверхностей полимерных частиц при его поглощении равномерно распределенными по поверхности порошка

наночастицами углерода и золота. Возможно использование свойств сверхкритических сред, среди которых можно отметить растворяющую способность, пластифицирующую способность, высокий коэффициент диффузии и низкую вязкость. Среди преимуществ метода следует отметить применение порошков биосовместимых полимеров для формирования сложных трехмерных объектов и их комбинаций с минеральными (в частности, гидроксипатит) и биоорганическими (ферменты, протеины и т. д.) добавками.

Метод автодинного детектирования основан на выделении информационной компоненты автодинного сигнала рассеянного излучения CO₂-лазера. Это предполагает вычитание усредненной формы импульса за 10 мс из каждого импульса исходного сигнала. Применение интеллектуальных лазерных медицинских установок перспективно для прецизионного малотравматичного органосохраняющего удаления злокачественных новообразований. Удаление и диагностика их испарения проводится одним и тем же лазерным пучком, что позволяет использовать технологии в онкологии, нейрохирургии и дерматологии. Перспективна процедура трансмиокардиальной реваскуляризации одиночным лазерным импульсом, позволяющая не применять аппарат искусственного кровообращения при операции на работающем сердце и синхронизировать с ЭКГ пациента лазерный импульс (время "лазерной части" операции, как правило, не превышает 30 мин).

В завершении публикации о юбилее лазерной индустрии нельзя не упомянуть о проблеме применения лазерной техники, связанной с обеспечением безопасности полетов. С начала 2011 г., по данным Росавиации, на территории Российской Федерации зафиксировано свыше 30 инцидентов, связанных с применением против экипажей воздушных судов лазерных указок. Большинство случаев зафиксировано в районе московских аэропортов Шереметьево и Внуково, а также аэропорта города Ростов-на-Дону. Дальность действия лазерной указки мощностью от 200 до 500 мВт в безоблачную погоду составляет порядка 40 км. Это обуславливает необходимость повышенного контроля параметров приборов и показателей бортовой аппаратуры при взлете и посадке с учетом потенциального риска потери управления от объекта излучения, находящегося на расстоянии в несколько десятков километров, что значительно усложняет идентификацию его местоположения и поиск. Попытки ослепления пилотов представляют реальную угрозу жизни и здоровью не только членам экипажа, но и пассажирам, а также жителям районов по трассе маршрутов. Дополнительно следует учитывать, в частности, риски порчи имущества, например, строений, транспортных средств, элементов городской инфраструктуры, пассажирского багажа.

Для предотвращения аварии грузовых и пассажирских самолетов и вертолетов отечественного и зарубежного производства (например, Ту-204

и Боинг-737) на Кафедре робототехники и мехатроники (КРМ) Донского государственного технического университета (ДГТУ) РФ на нанотехнологической базе разработаны специальные пилотажные очки. Их стекла покрыты пленкой из оксидов металлов с толщиной напыления в несколько сот нанометров, равной ширине длины волны лазера. В этом случае при атаке на кабину пилота лучом лазерной указки интенсивность света снижается в десятки тысяч раз. Пилот не будет отвлечен от процесса пилотирования, поскольку в момент лазерного излучения через очки он увидит очень слабую светлую точку. Очки не искажают цветопередачу, эргономичны и комфортны. Поскольку они пропускают все лучи, кроме узкого диапазона, они гораздо светлее обычных солнцезащитных. В настоящее время разработка находится в стадии опытного производства, но при серийном производстве стоимость пилотажных "противолазерных" очков составит порядка трех-четырёх тысяч рублей.

Данная инновационная разработка, проводимая по наноиндустриальному инвестиционному проекту, является актуальной не только для средств воздушного транспорта, но и для сухопутных транспортных средств. Несмотря на то, что пока не зафиксировано серьезных инцидентов с применением лазерных указок против водителей средств грузового и пассажирского транспорта, они потенциально возможны и в условиях мегаполиса при перевозке особо опасных грузов (например, топлива) или при движении на предельно больших скоростях способны привести к катастрофическим последствиям. Минимизация рисков в данной категории опасностей предполагает разработку специализированного варианта "противолазерных" очков для водителей.

Также на КРМ ДГТУ РФ на нанотехнологической базе разработано устройство, включающее в себя специальные оптические элементы, устанавливаемые в кабину самолета, которые позволяют независимо от ориентации кабины пилотов отразить луч лазерной указки обратно в направлении излучения. Мощность отраженного излучения тем выше, чем мощнее исходный сигнал. Срок окупаемости данного инвестиционного проекта составляет полгода [11].

Выводы

1. Одним из важнейших направлений развития современной науки и техники является совершенствование лазерных технологий, приборов и систем, предназначенных для решения широкого класса задач в гражданском производстве и сфере вооружения и военной техники (ВВТ). Бюджетное недофинансирование соответствующих программ при полномасштабном развертывании аналогичных исследований за рубежом создает угрозу национальной безопасности и препятствует укреплению обороноспособности государства.

2. В условиях всевозрастающей конкуренции на мировом рынке ВВТ применение лазерных гра-

данских технологий в военной сфере позволило создать оборонительные системы нового поколения, конкурентоспособные на внешнем рынке. Целесообразен расширенный законодательный контроль экспорта соответствующих технологий.

3. Необходимым условием развития современного информационного общества является совершенствование технологий конструирования волоконно-оптических систем связи и передачи информации со скоростями в терабитном-петабитном диапазоне. Целесообразно финансирование данного направления через соответствующую ФЦП.

4. Современные лазерные технологии являются неотъемлемой частью современного мира. Для перехода к постиндустриальному этапу развития общества и новому технологическому укладу необходим качественный рост в восприятии проблем отраслевого развития на государственном уровне. Стратегия развития отрасли предполагает целенаправленное финансирование работ по линии госбюджета и внешних и внутренних заимствований и под гарантии возврата кредитов.

5. Целесообразно внесение изменений в российскую нормативно-правовую базу, регламентирующую норму отчислений предприятий ОПК, инвестирующих в НИОКР. В частности, необходимо предоставление налоговых льгот для инвестирования в фундаментальные и прикладные научные разработки, что создаст дополнительные стимулы для развития производства и социальной инфраструктуры [12].

Список литературы

1. Андрияхин В. М., Велихов Е. П., Ковалев Л. С., Письменный В. Д., Рахимов А. Т., Хвостин В. Е. Квазистационарный CO_2 -лазер атмосферного давления с несамостоятельным разрядом, контролируемым потоком нейтронов // Письма в ЖЭТФ. Т. 18. Вып. 1. С. 15–19.
2. Напартович А. П., Старостин А. Н. Механизмы неустойчивости тлеющего разряда повышенного давления // Химия плазмы. 1979. Вып. 6. С. 153–208.
3. Бондаренко А. В., Голубев В. С., Лебедев Ф. В. и др. Перспективы использования разряда переменного тока для накачки CO_2 -лазеров // Квантовая электроника, 1980. Т. 7. № 4. С. 775–780.
4. Велихов Е. П., Голубев В. С., Пашкин С. В. Тлеющий разряд в потоке газа // Успехи физических наук. Т. 137. № 1. С. 117–150.
5. Осипов А. И., Панченко В. Я. Тепловые эффекты при резонансном взаимодействии лазерного излучения с молекулярными газами. М.: Издательство МГУ, 1984.
6. Баранов В. Ю., Напартович А. П., Старостин А. Н. Тлеющий разряд в газах повышенного давления // Итоги науки и техники. Физика плазмы. 1984. Т. 5. С. 90–177.
7. Велихов Е. П., Ковалев А. С., Рахимов А. Т. Физические явления в газоразрядной плазме. М.: Наука, 1987.
8. Vavilov S. I., Levshin V. L. Zeitschrift für Physik, 1926. 35, 932.
9. Вавилов С. И. Микроструктура света. Исследования и очерки. М.: АН СССР, 1950.
10. Ахманов С. А., Коротеев Р. И. Методы нелинейной оптики в спектроскопии рассеянного света. М.: Наука, 1981.
11. Бровкина М. От лазеров глаза пилотов защитят очки // Российская газета, 19 июля 2011 г.
12. Раткин Л. С. Банк данных инвестиционных проектов предприятий оборонно-промышленного комплекса: его участие в процессе реформирования отрасли и место на рынке информационных продуктов // Вопросы оборонной техники. 2002. № 5 (312). С. 32–37.

Godovitsyn I. V. *A Novel Surface-Micromachined Tenzoresistive Pressure Sensor* 2

A novel SOI-based surface-micromachined tenzoresistive pressure sensor is presented. The sensor comprises monocrystalline silicon tenzoresistors and polysilicon membrane thus combining key benefits of bulk- and surface-micromachined pressure sensors – high sensitivity and small size. Finite-element simulation of the sensor characteristics is carried out. Simulation results demonstrate sensitivity of $15,4 \text{ mV} \cdot (\text{V} \cdot \text{atm})^{-1}$, temperature coefficient of sensitivity and offset of $-4,15$ and $0,18 \text{ \%}/10^\circ\text{C}$ respectively and non-linearity of $1,54 \text{ \%}$ in range of $0-1 \text{ atm}$. The simulation results of proposed sensor in comparison with parameters of realized sensors are discussed.

Keywords: miniature pressure sensors, surface micromachining technology

Belkin L. M., Belkin M. E. *Unstructured Model of Vertical Cavity Surface Emitting Laser with Microwave Modulation Bandwidth*. 9

An unstructured nonlinear circuit-level model of VCSEL suitable for designers of transmission modules of modern optical fiber-based systems, microwave photonics devices, and IC optical interconnects is proposed. The small-signal modulation parameters are extracted by fitting the experimental voltage standing wave ratio (VSWR) plot and frequency response (magnitude of S_{21}) of a VCSEL mounted in a specific test fixture. The large-signal modulation parameters are extracted from the measured light-current plot. An advanced simulation procedure realized on a microwave E-CAD tool AWR Design Environment (AWRDE) is described. The 3-order and 5-order intermodulation distortion simulation of a wafer-fused long-wavelength VCSEL is produced and validated by the experimental results. The level of linearity of the VCSEL under test in a multichannel microwave-band analog environment is estimated.

Keywords: microwave photonics, vertical cavity surface emitting laser (VCSEL), unstructured model, intermodulation distortions

Abramov I. I., Baranoff A. L., Shcherbakova I. Yu. *Simulation of Single-Electron Devices Based on Molecules*. . 18

Universality of the model for simulation of single-electron devices developed according to the proposed approach is shown. The IV-characteristics of devices including molecules are calculated for this purpose.

Keywords: single-electron device, spatial quantization, molecule

Zarubina A. P., Lukashev E. P., Deev L. I., Parkhomenko I. M., Obratsova E. A., Novoselova L. A., Rubin A. B. *The Evaluation of Carbon Nanomaterials Toxicity Risks*. 21

The effect of single-wall carbon nanotubes (carbon SWNT) on bacterial cells of genetically engineered strain *Escherichia coli K12 TG1* was studied. Using atom force microscopy (AFM) bacterial cell morphological changes were revealed and cell viability decrease was controlled by the number of colony-forming units count. It was shown that prior to these changes we can observe diminishing of the intensity of oxygen consumption and bacterial luminescence. This allows to recommend well-known and easy-to-use bioluminescent test "Ecolum" for initial testing of nanomaterial toxicity.

Keywords: bioluminescence, the bacterial luminescent testing, nanotubes, atomic force microscopy, oxygen consumption

Belozubov E. M., Vasil'ev V. A., Gromkov N. V. *The Improvement of the Thin-Film Nano- and Microelectromechanical Systems with Identical Strain-Sensing Elements and Pressure Sensor on their Base* 27

The possibilities of the improvement of the features thin-film strain gauge nano- and microelectromechanical systems with identical strain-sensing elements and sensors on their base in conditions of the influence transient temperatures are considered.

Keywords: thin-film strain gauge nano- and microelectromechanical systems (Na-MEMS), pressure sensors, identical strain-sensing elements, transient temperature

Kazakov V. K., Obratsov R. M. *Concerning Criteria of Screening Piezoelectric Blocks and Piezoactuators.* . . 33
There have been posed and substantiated two criteria of screening piezoelectric blocks and piezoactuators. These criteria exclude premature outage of these blocks. These criteria have not been described in technical literature so far. There have been conducted breadboarding and the finite-element modeling of piezoelectric blocks' with defects as the confirmation of the guesses.

Keywords: a piezoactuator, a multilayer structure, a reliability, a screening

Maltsev P. P., Matveenko O. V., Gnatyuk D. L., Lisitskiy A. P., Fedorov Yu. V. *Review of Implementation of 5 GHz Planar Dipole.* 39

5 GHz planar dipole, slot and fractal antennas are examined relying on the criterion of size reduction. It is demonstrated that reviewed fractal antennas do not provide significant size reduction for the given antennas class. Size reduction is resulted from optimization for topology of signal and ground patch and cross location.

Keywords: planar antenna, dipole antenna, slot antenna, fractal antenna

Rathkeen L. S. *Nano & Microsystem Techniques for Laser Industry* 47

The Scientific session of the Common meeting of Russian academy of sciences (RAS), which took place in the middle of December 2010 in Moscow, was dedicated for 50th anniversary of laser techniques. Were discussed the main features of development of laser industry, branch nanotechnological applications, researching of laser thermonuclear synthesis, the fundamental applications of extreme light poles, biological and medical laser information technologies, laser-plasma micro & nanotechnologies and usage of lasers in medical sphere.

Keywords: Russian academy of sciences, RAS, laser, laser thermonuclear synthesis, extreme light poles, biology, laser information technologies, laser-plasma micro- & nanotechnologies, medical sphere

For foreign subscribers:

Journal of "NANO and MICROSYSTEM TECHNIQUE" (Nano- i mikrosistemnaya tekhnika, ISSN 1813-8586)

The journal bought since november 1999.

Editor-in-Chief Ph. D. Petr P. Maltsev

ISSN 1813-8586.

Address is: 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel./Fax: +7(499) 269-5510.

E-mail: nmst@novtex.ru; http://novtex.ru/nmst/

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 законодательства

в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Дизайнер *Т. Н. Погорелова*. Технический редактор *Е. М. Патрушева*. Корректор *Е. В. Комиссарова*

Сдано в набор 17.08.2011. Подписано в печать 20.09.2011. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 7,88. Заказ 694. Цена договорная

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика", 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15