

# Технология и конструирование в электронной аппаратуре



К статье «Высокотемпературные датчики давления с тензорезисторами на основе нитевидных кристаллов кремния»

## 6 2012

НОЯБРЬ — ДЕКАБРЬ

ЧЕТЫРНАДЦАТАЯ  
МЕЖДУНАРОДНАЯ  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ



## СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

27— 31 мая 2013 года  
Украина, г. Одесса

Реквизиты для связи  
e-mail <tkea@optima.com.ua>  
тел. +38 (048) 728-49-46,  
728-18-50.

- Информационные системы и технологии
- Компьютерные системы и компоненты
- Системы и средства искусственного интеллекта
- Защита информации в широкополосных системах и компьютерных сетях
- Радиотехнические, телекоммуникационные и телевизионные системы
- Проектирование, конструирование, производство и контроль электронных средств
- Функциональная электроника. Микро- и нанотехнологии

С текущей информацией  
можно ознакомиться на сайте  
[www.tkea.com.ua/siet/inf.html](http://www.tkea.com.ua/siet/inf.html)

## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ «ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ»

ISSN 2225-5818

Выходит один раз в 2 месяца

Регистрационный номер КВ 13418-2302ПР

Зарегистрирован в ВАК Украины по разделам «Физико-математические науки», «Технические науки»  
Реферируется в УРЖ «Джерело» (г. Киев) и в Реферативном журнале ВИНТИ (г. Москва)

### ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

- В Украине** Отделения связи. «Каталог видань України». Индекс 23785.  
Подписное агентство «Идея», [www.idea.com.ua](http://www.idea.com.ua). Индекс 11146.  
Подписное агентство «KSS», [www.kss.kiev.ua](http://www.kss.kiev.ua). Индекс 20363.
- В России** Отделения связи. Каталог «Газеты и журналы». Индекс 71141.
- В Белоруссии** Отделения связи. Каталог «Издания стран СНГ». Индекс 71141.
- В редакции «ТКЭА»** можно подписаться с любого номера.



Номер выпущен при поддержке  
НПП «Сатурн», (г. Киев)  
ЧАО «Украналит» (г. Киев),  
НПП «Карат» (г. Львов),  
ЦКБ «Ритм» (г. Черновцы)

Адрес редакции: Украина, 65044, г. Одесса, а/я 17.

E-mail: [tkea@optima.com.ua](mailto:tkea@optima.com.ua), web-сайт: [www.tkea.com.ua](http://www.tkea.com.ua),  
тел. +38 (048) 728-18-50,  
тел./факс 728-49-46.

Редакция: Е. А. Тихонова, А. А. Ефименко,  
А. А. Алексеева, М. Г. Глава, Н. М. Колганова.

Техническая редакция, дизайн: Е. И. Корецкая.

Компьютерное обеспечение: П. В. Назаров.

Подписано к печати 27.12.2012. Формат 60×84 1/8. Печать офсетная.

Печ. л. 7,0+1,0. Уч.-изд. л. 9,0. Тираж 250 экз. Заказ № 4.

Издательство «Политехперіодика»

(65044, г. Одесса-44, а/я 17).

Отпечатано в типографии РА «ART-V»

(65091, г. Одесса, ул. Комитетская, 24а).



**ТЕХНОЛОГИЯ  
И  
КОНСТРУИРОВАНИЕ  
В  
ЭЛЕКТРОННОЙ  
АППАРАТУРЕ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2012

№ 6

Год издания 36-й

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

*К.т.н. В. М. Чмиль*

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

*Д.т.н. Н. М. Вакив* (г. Львов)  
*Д.т.н. В. Н. Годованюк* (г. Черновцы)  
*К.т.н. А. А. Дашковский* (г. Киев)  
*Н. В. Конциц* (г. Киев)  
*Д.ф.-м.н. В. Ф. Мачулин* (г. Киев)  
*Д.т.н. Г. А. Оборский* (г. Одесса)  
*Е. А. Тихонова* (г. Одесса)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

*Д.т.н. С. Г. Антощук* (г. Одесса)  
*Д.т.н. А. А. Ащеулов* (г. Черновцы)  
*Д.т.н. В. В. Баранов* (г. Минск)  
*К.т.н. Э. Н. Глушеченко*,  
зам. гл. редактора (г. Киев)  
*Д.т.н. В. В. Данилов* (г. Донецк)  
*К.т.н. И. Н. Еримичой*,  
зам. гл. редактора (г. Одесса)  
*К.т.н. А. А. Ефименко*,  
ответственный секретарь (г. Одесса)  
*Д.ф.-м.н. Д. В. Корбутяк* (г. Киев)  
*Д.т.н. С. Ю. Лузин* (г. С.-Петербург)  
*Д.т.н. В. П. Малахов* (г. Одесса)  
*К.т.н. И. Л. Михеева* (г. Киев)  
*Д.т.н. И. Ш. Невлюдов* (г. Харьков)  
*Д.т.н. Ю. Е. Николаенко* (г. Киев)  
*К.ф.-м.н. А. В. Рыбка* (г. Харьков)  
*К.т.н. В. В. Рюхтин* (г. Черновцы)  
*Д.ф.-м.н. М. И. Самойлович* (г. Москва)  
*Д.т.н. В. С. Ситников* (г. Одесса)  
*Д. т. н. Я. Стеванович* (г. Белград)  
*Д. т. н. З. Стевич* (г. Белград)  
*Д.х.н. В. Н. Томашик* (г. Киев)  
*Д.т.н. В. М. Шокало* (г. Харьков)  
*Д.ф.-м.н. О. И. Шпотьок* (г. Львов)

УЧРЕДИТЕЛИ

МПП Украины  
Институт физики полупроводников  
им. В. Е. Лашкарёва  
Научно-производственное  
предприятие «Сатурн»  
Одесский национальный  
политехнический университет  
Издательство «Политехпериодика»

Одобрено к печати Ученым советом  
ОНПУ  
(Протокол № 3 от 25.12 2012 г.)

**СОДЕРЖАНИЕ**

**Техническая политика**

Система единого генератора. *Басюк О. П.* 3

**Электронные средства: исследования, разработки**

Твердотельный импульсный микроволновой мост для спектрометров электронного спинового эха 8-мм диапазона длин волн. *Калабухова Е. Н., Олейник В. В., Савченко Д. В., Ситников А. А., Цвир А. В., Ищенко М. Г.* 5

**СВЧ-техника**

Особенности реализации микрополосковых фильтров с кольцевыми резонаторами бегущей волны. *Глушеченко Э. Н.* 11

Пределы управляемости диэлектрической неоднородности, расположенной между металлическими плоскостями. *Прокопенко Ю. В.* 16

Методы формирования алгоритмов для расчета перестраиваемых коаксиальных полосовых фильтров СВЧ. *Парфилов А. А.* 21

**Сенсоэлектроника**

Высокотемпературные датчики давления с тензорезисторами на основе нитевидных кристаллов кремния. *Дружинин А. А., Кутраков А. П., Марьямова И. И.* 25

**Функциональная микро- и нанoeлектроника**

Характеристики фотодиодов со структурой «собственный оксид – InSe», облученных высокоэнергетическими электронами. *Сидор О. Н., Сидор О. А., Ковалюк З. Д., Дубинко В. И.* 29

**Технологические процессы и оборудование**

Получение тонких пленок Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> при пониженном давлении на пластинах диаметром до 200 мм. *Наливайко О. Ю., Турцевич А. С.* 34

**Материалы электроники**

Гетеропереходы, сформированные отжигом слоистых кристаллов GaSe и InSe в парах цинка. *Кудринский З. Р., Ковалюк З. Д.* 40

Стимулируемая водородом миграция атомов металлов в структурах «металл — полупроводник». *Матюшин В. М., Жавжаров Е. Л.* 44

**Метрология. Стандартизация**

Визуальные и оптико-электронные автоколлиматоры. *Фесенко А. В., Боровицкий В. Н.* 49

**Список рецензентов номера** 3-я стр. обложки

**Новые книги** 33

**Конференции** 48; 3-я стр. обложки

**Портфель редакции** 24

## ЗМІСТ

**Технічна політика**

Система єдиного генератора. *Басюк О. П.* (3)

**Електронні засоби: дослідження, розробки**

Твердотільний імпульсний мікрохвильовий міст для спектрометрів електронного спінового еха 8-мм діапазону довжин хвиль. *Калабухова К. М., Олійник В. В., Савченко Д. В., Сітніков О. О., Цвір А. В., Іщенко М. Г.* (5)

**НВЧ-техніка**

Особливості реалізації мікрополоскових фільтрів з кільцевими резонаторами біжучої хвилі. *Глушеченко Е. М.* (11)

Межі керованості діелектричної неоднорідності, розташованої між металевими площинами. *Прокопенко Ю. В.* (16)

Методи формування алгоритмів для розрахунку перестроюваних коаксіальних смугових фільтрів НВЧ. *Парфілов О. А.* (21)

**Сенсоелектроніка**

Високотемпературні датчики тиску з тензорезисторами на основі ниткоподібних кристалів кремнію. *Дружинін А. О., Кутраков О. П., Мар'ямова І. Й.* (25)

**Функціональна мікро- та наноелектроніка**

Характеристики фотодіодів зі структурою «власний оксид — InSe», опромінених високоенергетичними електронами. *Сидор О. Н., Сидор О. А., Ковалюк З. Д., Дубінко В. І.* (29)

**Технологічні процеси та обладнання**

Одержання тонких плівок при зниженому тиску на пластинах діаметром до 200 мм. *Наливайко О. Ю., Турцевич А. С.* (34)

**Матеріали електроніки**

Гетеропереходи, сформовані відпадом шаруватих кристалів GaSe та InSe в парах цинку. *Кудринський З. Р., Ковалюк З. Д.* (40)

Стимульована воднем міграція атомів металів в структурах «метал — напівпровідник». *Матюшин В. М., Жавжаров Є. Л.* (44)

**Метрологія. Стандартизація**

Візуальні та оптико-електронні автоколіматори. *Фесенко А. В., Боровицький В. М.* (49)

## CONTENTS

**Technical policy**

Unified generator system. *Basyuk O. P.* (3)

**Electronic facilities: investigations, development**

Solid-state pulsed microwave bridge for electron spin echo spectrometers of 8-mm wavelength range. *Kalabukhova E. N., Oleinik V. V., Savchenko D. V., Sitnikov A. A., Tsvir A. V., Ishchenko M. G.* (5)

**Microwave technology**

Implementation features of the microstrip filters with traveling wave ring resonators. *Glushechenko E. N.* (11)

Controllability range of dielectric inhomogeneity located between the metal planes. *Prokopenko Yu. V.* (16)

Methods for the algorithms for calculation of tunable coaxial bandpass microwave filters. *Parfilov A. A.* (21)

**Sensoelectronics**

High-temperature pressure sensors with strain gauges based on silicon whiskers. *Druzhinin A. A., Kutrakov A. P., Maryamova I. I.* (25)

**Functional micro- and nanoelectronics**

Characteristics of photodiodes with «intrinsic oxide — InSe» structure, irradiated with high-energy electrons. *Sydor O. N., Sydor O. A., Kovalyuk Z. D., Dubinko V. I.* (29)

**Technological processes and equipment**

The deposition of silicon nitride films under low pressure on wafers up to 200 mm. *Nalivaiko O. Yu., Turtsevich A. S.* (34)

**Materials of electronics**

Heterojunctions formed by annealing of GaSe and InSe layered crystals in zinc vapor. *Kudrynskyi Z. R., Kovalyuk Z. D.* (40)

Hydrogen-stimulated migration of metal atoms in «metal — semiconductor» structures. *Matyushin V. M., Zhavzharov E. L.* (44)

**Metrology. Standartization**

Visual and opto-electronic autocollimator. *Fesenko A. V., Borovitskii V. N.* (49)

УДК 621.373.072.9

О. П. БАСЮК

Украина, г. Одесса

E-mail: tkea@optima.com.ua

## СИСТЕМА ЕДИНОГО ГЕНЕРАТОРА

*Выдвигается принципиально новая идея синхронизации частот управления передающего и приемного устройств. В случае ее практической реализации может быть достигнуто значительное повышение эффективности новых (модернизированных) систем информационного комплекса при значительном снижении его себестоимости. Представленные соображения могут быть рассмотрены именно в качестве идеи, при положительной оценке которой потребуются разработка оптимальных путей реализации комплекса в целом, отдельных его составляющих и методов реализации.*

*Ключевые слова: информационные системы, синхронизация частот, передающие и приемные устройства.*

Недавно ушел из жизни Олег Петрович Басюк, талантливый инженер, энергичный организатор производства, всю свою трудовую жизнь посвятивший разработке и производству радиоэлектронной аппаратуры связи. За время его активной деятельности было разработано и выпущено множество серий изделий, были внедрены новые научно-технические решения, в том числе на уровне изобретений. Но и на заслуженном отдыхе О. П. Басюк продолжал выдвигать различные идеи и соображения, выступал консультантом и рецензентом нашего журнала. Некоторое время назад Олег Петрович познакомил редакцию с одной из своих последних идей, связанной с синхронизацией частот, которая в силу различных причин пока еще не получила своего развития. Нам очень не хочется, чтобы эта несомненно интересная идея потерялась, поэтому редакция решила опубликовать имеющиеся у нас материалы для обсуждения специалистами.

А. А. Ефименко, отв. секретарь редколлегии

Подавляющее большинство современных информационных систем построено по схеме «передатчик — приемник». При этом используются различные методы синхронизации частот сигналов управления потоками и каналами информации, обеспечивающими достаточную идентичность переданного и принятого сигналов.

Известно, что в настоящее время подавляющее большинство информационных нужд обеспечивается на базе комплексов, формирующих передачу цифровых сигналов. Формирование аналоговых систем передачи уходит в прошлое. Принципиальное отличие между цифровыми и аналоговыми системами заключается в том, что аналоговые системы допускают нормированное отличие между собой частот переданных и принятых сигналов, в то время как цифровые требуют полной их идентичности. Поэтому частотное управление аналоговых комплексов

строится на основе максимального соответствия задающих генераторов приемника и передатчика, иногда с использованием передачи специальных «контрольных» частот, иногда с синхронизацией.

Цифровые системы всегда строятся на основе 100%-ной синхронизации управляющих частот приемника сигналами, полученными от передатчика. Характерной особенностью систем является иерархическое построение комплексов по принятой скорости (количеству каналов). Создание комплекса передачи сопровождается обязательной последовательной синхронизацией низших уровней более высокими.

Синхронизация частот управления приемниками обеспечивается «своей» генераторной системой, вырабатывающей свою главную частоту задающего генератора от сигнала передатчика своего канала. Такой метод полностью исключает расхождение частот, но уменьшает процентное содержание полезных сигналов в канале. Этот метод имеет следующие недостатки:

1. Необходимость формирования специального линейного кода, обеспечивающего «удобство» для дальнейшей обработки в приемном устройстве с целью регенерации частоты задающего генератора.

2. Необходимость иерархической синхронизации составляющих модулей передающего устройства. (И первое, и второе приводит к значительному, до 20%, увеличению затрат на реализацию комплекса и до 25% увеличения эфирного места.)

3. Даже кратковременные сбои срывают синхронизацию и требуется время на автоматическое восстановление с соответствующими потерями в объеме и качестве информации.

4. Учитывая, что современные сложные схемы коммуникации (Интернет, мобильная, управления) ведущих международных корпораций предусматривают многоуровневую цепочечную схему организации каналов (трафиков) от абонента до абонента по

цепи, включающей последовательное включение разных видов связи (мобильной, волоконно-оптической, радиорелейной, спутниковой и других, практически всех видов), создание схемы соединений требует высокоскоростной и надежной синхронизации на всех стыках, что приводит к необходимости создания международных и корпоративных центров синхронизации. Кроме того, волей-неволей должны как-то систематизироваться требования к кодам линейных сигналов различных по технологии приема-передающих устройств, что ограничивает возможности их модернизации, делает разработчиков заложниками ее величества синхронизации. Учитывая «демократичность» всемирной сети Интернет, эти же ограничения накладываются на устройства «малых форм».

5. Если проанализировать содержание и объем разработок и освоений в производстве новых систем приемопередачи, то видно, что их количество близко к нулю, при том что все остальные формы информационного хозяйства развиваются неимоверно высокими темпами как по идеологии, так и по технологии. Новшества в системах передачи ограничены исключительно технологическими достижениями, что снижает «научную» составляющую, а вместе с тем неминуемо угнетает перспективу. Надо признать, что восхищающий даже интеллектуального обывателя «прорыв» и «чудеса» в информатике последних 20–25 лет сделан на 99% головой и руками технологов и программистов на базе принципов, известных с 1930–50-х гг., недоступных при старой технологической базе для реализации.

Если реализовать предлагаемую идею, то вышеуказанных очевидных недостатков уже не будет, так как в этом случае исключается необходимость синхронизации в настоящем ее представлении.

Предлагается создать систему на основе единого генератора (ЕГ) в качестве источника (управителя) мощной глобальной сети синтезаторов различных назначений. Поскольку сетка частот синтезаторов будет сформирована от ЕГ, частоты, управляющие передатчиками и приемниками всех направлений при бесконечном количестве их номиналов, от наногерц до гигагерц, отличаться не будут совершенно.

Суть идеи проста. Изготавливается единый генератор максимально возможной точности и стабильности. Выбирается частота генератора, удобная для минимального количества номиналов опорных частот. Эти опорные частоты — производные от частоты единого генератора и каждая из них предназначена для формирования рабочих частот своего направления техники. Таких направлений могут быть десятки: магистральные системы каналообразования (потокообразования) на базе ИКМ, радиорелейные системы, системы сотовой связи, навигация, телевидение, спецсистемы для военной техники, астрономии, медицины, быта (в том числе массовое производство часов совершенной точности) и др. Принципиально новые возможности системы ЕГ дадут жизнь множеству новых направлений практически во всех сферах экономики, быта, науки.

Естественно, что для решения каждого из сегментов идеи потребуются значительные научно-тех-

нологические усилия. Это, в первую очередь, выбор оптимальной частоты, обеспечение глубокого резервирования, физической защиты, доставки сигнала ЕГ к местам дислокации центров изготовления опорных частот всех направлений. Здесь очень полезным может быть опыт и материальная база всемирной сети Интернет.

По схеме опорные частоты будут служить задающими генераторами для рабочих синтезаторов частот, которые будут размещаться в каждом приемнике и передатчике. Учитывая ограниченное количество номиналов таких синтезаторов и многомиллионную серийность в пределах каждого направления, а также перспективные возможности нанотехнологий, такие устройства будут незначительны по размерам и очень дешевы.

Автору нет смысла углубляться в детали реализации идеи, так как это будет выглядеть чистым дилетанством. Реализация идеи потребует усилий большого количества высококвалифицированных и лучших в «своей» области специалистов при условии первоклассного менеджмента. Но тогда разговоры и мечты о новой технологии превратятся в гигантский результат с созданием конкурентоспособного производства.

Basyuk O. P. **Unified generator system.**

*Keywords: information systems, synchronization frequency transmitting and receiving devices.*

Suggested in the article is a brand new concept of the synchronization of control frequencies of the transmitting and receiving devices. In the case of its implementation a significant increase can be achieved in the efficiency of the new (upgraded) information systems while significantly reducing their cost. The presented considerations may be regarded merely as an idea, which being positively assessed will require the development of optimal ways to implement the system as a whole, its individual components and methods of implementation.

Ukraine, Odessa.

Басюк О. П. **Система единого генератора.**

*Ключові слова: інформаційні системи, синхронізація частот, передавальні та прийомні пристрої.*

Висувається принципово нова ідея синхронізації частот управління передавального і приймального пристроїв. У разі її практичної реалізації може бути досягнуто значне підвищення ефективності нових (модернізованих) систем інформаційного комплексу при значному зниженні його собівартості. Представлені міркування можуть бути розглянуті саме як ідея, при позитивній оцінці якої потрібна буде розробка оптимальних шляхів реалізації комплексу в цілому, окремих його складових і методів реалізації.

Україна, м. Одеса.



УДК 621.396.6. 029.055 (075)

Д. ф.-м. н. Е. Н. КАЛАБУХОВА<sup>1</sup>, к. ф.-м. н. В. В. ОЛЕЙНИК<sup>2</sup>,  
к. ф.-м. н. Д. В. САВЧЕНКО<sup>1</sup>, А. А. СИТНИКОВ<sup>1</sup>, А. В. ЦВИР<sup>3</sup>, М. Г. ИЩЕНКО<sup>3</sup>

Украина, г. Киев, <sup>1</sup>Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАНУ;

<sup>2</sup>Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко; <sup>3</sup>НИИ «Орион»

E-mail: katia@i.kiev.ua

## ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ МИКРОВОЛНОВОЙ МОСТ ДЛЯ СПЕКТРОМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННОГО СПИНОВОГО ЭХА 8-ММ ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

*Предлагается конструкция когерентного импульсного микроволнового моста с выходной мощностью до 10 Вт с временным разрешением  $10^{-8}$  с при частоте повторения импульсов 1 кГц, предназначенного для спектрометров электронного спинового эха. Мост построен по гомодинной схеме на основе кремниевых лавинно-пролетных диодов, которые используются для модуляции и усиления СВЧ-мощности, поступающей от опорного генератора на диоде Ганна. Преимуществами моста являются оптимальная мощность и минимальная длительность импульсов, простота в управлении, а также низкая стоимость.*

**Ключевые слова:** мощный твердотельный импульсный микроволновый мост, спектрометр электронного спинового эха, двухкаскадный когерентный импульсный усилитель на ЛПД.

С развитием нанотехнологий методы электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) приобретают особое значение при определении симметрии, концентрации, структуры парамагнитных атомов и молекул, динамики их поведения, а также пространственного распределения в решетке. Однако эти возможности методов ЭПР не могут быть полностью реализованы при использовании традиционных спектрометров ЭПР, работающих в постоянном микроволновом поле (непрерывный режим). С этой точки зрения спектрометры ЭПР, работающие в импульсном режиме, так называемые спектрометры электронного спинового эха (ЭСЭ), имеют преимущества как по чувствительности, так и по спектральной и временной разрешающей способности. В частности, повышение спектральной разрешающей способности спектрометра ЭСЭ достигается за счет разделения перекрывающихся спектров ЭПР от парамагнитных центров, имеющих различное время спиновой релаксации.

Однако, несмотря на перспективность и высокую информативность, спектрометры ЭСЭ остаются практически недоступными для большинства лабораторий в мире, что связано с отсутствием технологий производства необходимых микроволновых компонентов и их высокой стоимостью. Развитие в последнее десятилетие новых технологий создания микроволновых генераторов, усилителей и других микроволновых

компонентов изменило ситуацию и инициировало разработку импульсных спектрометров ЭПР [1–4]. Фирмой Bruker Instrument (Германия) уже серийно выпускаются импульсные спектрометры с рабочей частотой 9, 35 и 95 ГГц [4].

В импульсной технике ЭПР широко применяемыми являются спектрометры ЭПР X-диапазона частот, где фирмой Bruker Instrument разработаны комбинированные спектрометры ЭПР серии ESP 380/580, позволяющие проводить эксперименты как в непрерывном, так и в импульсном режиме. Разработан также спектрометр серии E 600/680 с рабочей частотой 95 ГГц (W-диапазон частот) и мощностью СВЧ-импульсов до 100 мВт. В то же время разработке импульсных спектрометров ЭПР в промежуточном Q-диапазоне частот (8-мм диапазон частот) до сих пор уделяется мало внимания.

Целью настоящей работы была разработка мощного когерентного импульсного микроволнового моста с временным разрешением  $10^{-8}$  с, предназначенного для спектрометров ЭСЭ с рабочей частотой 35 ГГц и позволяющего измерять время спиновой релаксации, спектры ЭСЭ в условиях развертки магнитного поля, спектры модуляционного спада сигнала ЭСЭ с двух-, трех- и четырехимпульсной последовательностью [6, 7]. При этом мост должен отличаться простотой в управлении, низкой стоимостью и малым энергопотреблением.

### Общая характеристика микроволновых импульсных мостов, предназначенных для спектрометров ЭСЭ

Микроволновой мост, который является неотъемлемой частью спектрометров ЭПР, состоит из передающего и приемного модулей, предназ-

Работа выполнялась в рамках партнерского УНТЦ проекта P236 (2006–2008 гг.) и государственной целевой научно-технической программы «Разработка и создание сенсорных наукоемких продуктов» (2008–2012 гг.).

наченных для генерации и детектирования СВЧ-мощности в микроволновом тракте спектрометра ЭПР. Принцип действия микроволнового моста основан на генерации серии кратковременных микроволновых импульсов, энергия которых поглощается парамагнитным веществом в условиях ЭПР, и регистрации отклика спиновой системы вещества на импульсное возбуждение. Этот сигнал имеет название сигнала ЭСЭ, который является ответом электронной спиновой системы на импульсное СВЧ-возбуждение. При измерении спектров ЭПР в передающем модуле микроволнового моста генерируется СВЧ-сигнал, который подается на резонатор спектрометра ЭПР с исследуемым образцом, а затем сигнал, отраженный от рабочего резонатора, детектируется и усиливается в приемном модуле микроволнового моста.

Диапазон СВЧ-мощности, которая генерируется в передающем модуле микроволнового моста, отличается для импульсного и непрерывного возбуждения. При измерении сигналов ЭПР в условиях непрерывного СВЧ-возбуждения, мощность должна быть невысокой, не больше чем 100–200 мВт. При измерениях сигналов ЭПР в условиях импульсного СВЧ-возбуждения, мощность в импульсе должна быть высокой, а импульсы короткими, что связано с временем релаксации парамагнитных центров. Для регистрации спектров ЭСЭ от парамагнитных центров с малым временем спин-решеточной релаксации  $T_1$  (порядка  $10^{-7}$  с) требуются очень короткие мощные СВЧ-импульсы.

В [8, с. 83] было показано, что из соотношения между длительностью  $\tau$ , частотой  $f$  и мощностью  $P$  СВЧ-импульсов следует, что одно и то же значение  $\tau$  можно получить при различных значениях СВЧ-мощности в зависимости от рабочей частоты спектрометра. Так, например, при частоте 9 ГГц, соответствующей X-диапазону частот, длительность импульсов от 100 до 20 нс можно достичь при значениях  $P$  от 1 до 10 кВт. В то же время, при частоте 35–37 ГГц, соответствующей Q-диапазону частот, импульсы такой же длительности можно получить при СВЧ-мощности от 1 до 100 Вт в зависимости от добротности резонатора. Кроме того, с повышением частоты можно достичь меньшей длительности импульса. Так, при  $f = 35$  ГГц и при  $P = 1$  Вт можно получить минимальное значение  $\tau$  порядка 47 нс, в то время как при  $P = 18$  Вт длительность импульса может достигать 13 нс при добротности ненагруженного резонатора  $Q = 1000$  [1].

#### Передающий модуль импульсного моста

Известно, что основной характеристикой, которая определяет уровень качества спектрометра ЭПР, является его чувствительность. Чувствительность спектрометра ЭСЭ определяется его импульсными характеристиками, в частности его временным разрешением. Так, например, при временном разрешении  $10^{-7}$  с, чувствительность

когерентного спектрометра X-диапазона частот может достигать  $10^{11}$  спинов в образце [8, с. 86]. Поэтому главной проблемой при создании спектрометров ЭСЭ остается выбор конструкции микроволнового моста, в частности конструкции передающего модуля, в котором формируются СВЧ-импульсы.

Основными узлами передающего модуля импульсного микроволнового моста являются опорный генератор, работающий в непрерывном режиме, амплитудный модулятор и усилитель СВЧ-мощности. Амплитудный модулятор формирует из СВЧ-колебаний опорного генератора импульсы, которые затем поступают на усилитель. Функции модулятора и усилителя могут быть соединены в одном устройстве. Таким устройством является, например, электровакуумный усилитель на лампе бегущей волны, который используется при построении импульсного моста в спектрометрах фирмы Bruker Instrument.

Однако лампам бегущей волны присущи такие недостатки как ограниченный ресурс работы (от 500 до 1500 часов), высокий уровень шумов, необходимость юстировки и настройки в процессе эксплуатации, ухудшение технических характеристик под воздействием магнитных полей, большое энергопотребление и высокая цена. Поэтому в настоящей работе для усиления СВЧ-импульсов, поступающих от опорного генератора на диоде Ганна, использованы кремниевые лавинно-пролетные диоды (ЛПД). При этом функции модулятора и усилителя СВЧ остаются раздельными: для амплитудной модуляции используются  $p-i-n$ -диоды, а усиление импульсов осуществляется с помощью двухкаскадного импульсного усилителя на основе ЛПД [9, 10].

Твердотельный полупроводниковый усилитель на основе ЛПД имеет большой гарантийный ресурс работы (не менее 10000 часов), небольшой на протяжении всего срока эксплуатации уровень шумов, а также низкую стоимость. Кроме того, в процессе эксплуатации ЛПД не требуют юстировки и подстройки аппаратуры, также они не подвержены влиянию магнитных полей. Модули СВЧ питаются от одного стабилизированного источника питания со значительно меньшим энергопотреблением, чем при использовании лампы бегущей волны.

На рис. 1 приведена структурная схема передающего модуля, обеспечивающую мощность в импульсе до 20 Вт при временном разрешении  $10^{-8}$  с.

Двухкаскадный импульсный усилитель имеет коэффициент усиления 25–27 дБ, что дает возможность при входной мощности усилителя 30–40 мВт обеспечить усиление сигнала на его выходе до 20 Вт. При этом длительность фронта импульсов составляет 5 нс, стабильность фазы около  $5^\circ$  при  $\tau = 100$  нс. Мощность в импульсе до 20 Вт достигается благодаря оптимизации параметров ЛПД и конструкции их камер. Стабильность фазы приблизительно в  $5^\circ$  при  $\tau = 100$  нс



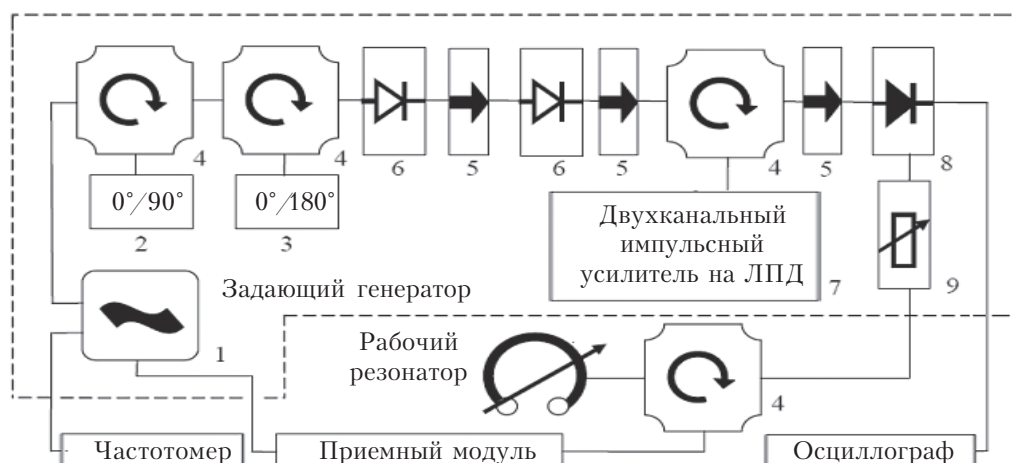


Рис. 1. Структурная схема передающего модуля импульсного микроволнового моста Q-диапазона частот: 1 – опорный генератор на диоде Ганна; 2, 3 – фазовращатели; 4 – циркуляторы; 5 – направленные ответвители; 6 –  $p-i-n$ -модуляторы; 7 – двухкаскадный импульсный усилитель; 8 – амплитудный детектор; 9 – аттенуатор

достигается с помощью специальной формы импульсного тока, протекающего через ЛПД, что обеспечивает компенсацию отклонения их частоты из-за нагревания  $p-n$ -перехода (его температура изменяется пропорционально корню квадратному из длительности импульса) [9]. Подавление СВЧ-мощности в промежутке между импульсами обеспечивается двумя секциями  $p-i-n$ -модуляторов. Уровень подавления опорного сигнала между импульсами СВЧ для одного  $p-i-n$ -модулятора составляет порядка 60 дБ, что является недостаточным. Использование двухсекци-

онного  $p-i-n$ -модулятора обеспечивает подавление в паузе до уровня около 110 дБ.

Число, длительность и частота повторений импульсов задаются формирователем импульсов с программным обеспечением. Выбор частоты повторений пачек импульсов определяется временем спин-спиновой релаксации парамагнитного центра, и оптимальное ее значение находится в диапазоне от 100 Гц до 1 кГц. Выходная мощность импульсного усилителя контролируется с помощью амплитудного детектора, расположенного на выходе усилителя. Регулировка

*Технические характеристики передающего модуля импульсного микроволнового моста, предназначенного для спектрометров ЭСЭ Q-диапазона частот*

Технические характеристики	Параметры
Рабочая частота	34,6–35,4 ГГц
Мощность в импульсе	20 Вт
Рабочий режим	Последовательность пачек импульсов
Длительность импульсов выходного сигнала	20–300 нс
Количество импульсов в пачке	1–3
Минимальная задержка между импульсами	100 нс
Скважность в пределах пачки импульсов	2–10000
Частота повторения пачек импульсов	100 Гц – 1 кГц
Длительность фронта и среза импульса выходного сигнала	не более 5 нс
Паразитное отклонение задержки между импульсами выходного сигнала	не более 3 нс
Нестабильность импульсной выходной мощности в пределах одной пачки импульсов	не более 10%
Паразитное отклонение частоты в пределах импульса	не более 1 МГц.
Уровень непрерывной мощности на выходе в паузе между импульсами	не более –110 дБ
Отклонение фазы в пределах импульса и между импульсами	не более 5° для $\tau=100$ нс не более 15° для $\tau=300$ нс
СВЧ-мощность опорного плеча	10 мВт
Потери в волноводном тракте до резонатора	не более 3 дБ

выходной мощности передающего модуля осуществляется с помощью размещенного на выходе импульсного усилителя аттенюатора, имеющего глубину модуляции 40 дБ. Технические характеристики передающего модуля приведены в таблице.

#### Приемный модуль импульсного моста

Описанная конструкция передающего модуля с возможностью циклического изменения фазы сигналов действующих импульсов позволяет использовать в приемном модуле моста двухканальную фазочувствительную схему детектирования сигнала ЭСЭ, так называемое квадратурное детектирование сигналов ЭСЭ.

В коммерческих спектрометрах ЭПР, как правило, используется фазочувствительное детектирование сигналов, которое предполагает использование когерентного СВЧ-источника. В этом случае мощность от задающего генератора разделяется на две части: одна служит сигналом, запускающим передающий модуль, вторая подается в опорное плечо к балансному смесителю, что и обеспечивает когерентное детектирование сигналов ЭПР. При этом может быть использована гомодинная или супергетеродинная схема приема сигнала ЭПР.

Гомодинная схема предполагает одинаковые частоты опорного и информационного сигналов. На выходе получается видеосигнал, который в силу своей малости подвержен вредному воздействию низкочастотных шумов со спектром типа  $1/f$ .

В гетеродинной (или супергетеродинной) схеме приема используются два генератора микроволновой частоты — сигнальный генератор (SO) и гетеродин (LO). Достоинством метода является то, что основное усиление можно осуществить на сравнительно низкой промежуточной частоте, что проще и дешевле. Для создания сигнала с частотой LO используется часть мощности сигнального генератора SO, смешанной с сигналом генератора промежуточной частоты. Частота SO служит для возбуждения исследуемого образца. Отраженный от резонатора сигнал с частотой SO смешивается с сигналом частотой LO, образуется сигнал с промежуточной частотой, который усиливается и используется для выделения полезного сигнала ЭПР. При гетеродинном приеме усиление сигнала ЭПР осуществляется на промежуточной частоте, которая существенно выше, чем те, на которых необходимо учитывать действие низкочастотных шумов со спектром типа  $1/f$ . Основными недостатками гетеродинного моста по сравнению с гомодинным являются более высокая цена, большее число элементов, относительная сложность формирования частот.

Схема микроволнового моста с гетеродинным приемом является более подходящей для высокочастотных спектрометров ЭПР — рабочая частота здесь выше 50 ГГц, когда трудно достигнуть уровня необходимой выходной мощности на основной частоте [11]. В коммерческих спектрометрах ЭПР обычно используется гомодинная схема. Это становится возможным благодаря появ-

лению интегральных малошумящих усилителей, которые позволяют обеспечить высокий уровень чувствительности приемного модуля без использования супергетеродинной схемы усиления.

Исключением является выпускаемый Bruker Instrument спектрометр ELEXSYS E580 с временным разрешением  $10^{-8}$  с, в котором используется супергетеродинная схема микроволнового моста [4, 8]. Такая схема позволяет построить комбинированный спектрометр ЭПР, который может работать на частоте 9 и 35 ГГц. При этом на частоте 35 ГГц в приемном модуле гетеродинного типа частота 9 ГГц выбрана как промежуточная.

Таким образом, гомодинная схема усиления сигнала ЭСЭ для приемного модуля импульсного

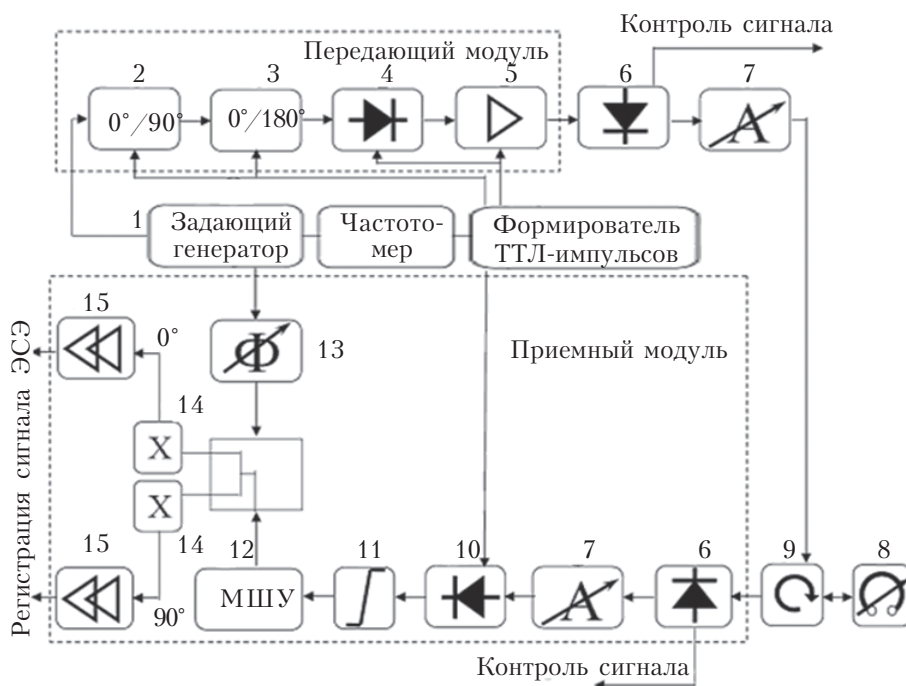


Рис. 2. Структурная схема импульсного микроволнового моста Q-диапазона частот:

1 — задающий генератор; 2, 3 — фазовращатели; 4 —  $p-i-n$ -модуляторы; 5 — двухкаскадный импульсный усилитель; 6 — амплитудные детекторы; 7 — аттенюаторы; 8 — резонатор; 9 — циркулятор; 10, 11 — защитное устройство; 12 — МШУ; 13 — фазовращатель; 14 — ортомодовые балансные смесители; 15 — видеоусилители

микроволнового моста с рабочей частотой 35 ГГц является оптимальной, т. к. она может обеспечить высокий уровень чувствительности спектрометра и его надежности при небольшом количестве элементов и сравнительно низкой стоимости.

На рис. 2 представлена структурная схема импульсного моста, построенного по гомодинной схеме. Приемный модуль состоит из амплитудного детектора; аттенюатора; малощумящего усилителя, защищенного от импульсных сигналов ограничителем и ключом на  $p-i-n$ -диоде, работа которых контролируется ТТЛ-импульсами; синхронного детектора и двухканального видеоусилителя. Амплитудный детектор предназначен для контроля сигналов, отраженных от резонатора. С помощью аттенюатора регулируется мощность сигналов на выходе из резонатора. Синхронный детектор состоит из двух ортомодовых балансных смесителей, активным элементом которых являются диоды с барьером Шоттки.

Таким образом, двухканальная система детектирования регулируется с помощью двух балансных смесителей, между опорными колебаниями которых имеется фазовый сдвиг  $90^\circ$ , а информационные колебания (с выхода резонатора) синфазны — так называемое квадратурное детектирование. В результате два сигнала на выходе синхронного детектора содержат информацию о фазе исходного сигнала, отраженного от резонатора.

С помощью изменения фаз действующих импульсов можно проводить селекцию полезных сигналов ЭСЭ, т. к. они «отслеживают» фазу импульсов и складываются в памяти компьютера, а паразитные сигналы не зависят от фазы импульса и, взаимно уничтожаясь в конце фазового цикла, не проявляются в результирующем спектре ЭСЭ.

### Принцип работы моста

В соответствии с рис. 2, работа импульсного когерентного микроволнового моста, предназначенного для импульсных спектрометров ЭСЭ, осуществляется следующим образом. Выходная мощность опорного генератора (100 мВт) разделяется на две части — одна запускает передающий модуль, а вторая служит для питания двух балансных смесителей приемного модуля моста, что обеспечивает когерентное детектирование сигнала ЭСЭ. В качестве опорного источника использовался диод Ганна с механической перестройкой частоты, который в отличие от генератора с электронной перестройкой частоты не имеет фазовых сдвигов и характеризуется более низкими спектральными шумами [12]. Для контроля частоты опорного генератора небольшая часть микроволновой мощности опорного генератора (1–2 мВт) отводится к частотомеру.

Мощность, которая поступает на передающий модуль, проходит через два дискретных фазовращателя и через два амплитудных  $p-i-n$ -модулятора подается на мощный двухкаскадный импульсный усилитель.

Количество, длительность и частота повторения импульсов задается формирователем импульсов. Сформированные импульсы большой мощности поступают через циркулятор на резонатор. Микроволновая мощность, отраженная от резонатора поступает в приемный модуль, где с помощью синхронного детектора осуществляется квадратурное детектирование сигналов ЭСЭ. Сигнал ЭСЭ и опорный сигнал смешиваются и преобразуются в видеосигнал, который усиливается двухканальным видеоусилителем и направляется к интегратору с узкополосным фильтром.

В качестве синхронного детектора использован смеситель типа XM1001 фирмы Mimix Broadband, имеющий потери на преобразование 8 дБ. На сигнальный вход смесителя поступает мощность, отраженная от резонатора, а на гетеродинный вход — сигнал от опорного генератора Ганна. В цепи сигнала от опорного генератора установлен фазовращатель, с помощью которого можно механически регулировать фазу опорного сигнала. Таким образом, на выходе получаются две квадратурные компоненты продетектированного сигнала.

Улучшение собственного соотношения сигнал/шум достигается за счет использования в схеме моста МШУ типа АММС-6241 фирмы Agilent, коэффициент усиления которого составляет 21 дБ.

Двухканальный видеоусилитель построен на основе операционных усилителей типа AD 8011. На входе двух каналов видеоусилителя установлены аттенюаторы, позволяющие регулировать амплитуду сигналов в пределах  $\pm 3$  дБ. Коэффициент передачи видеоусилителя составляет +36...+39 дБ в полосе пропускания 82 МГц.

### Заключение

Таким образом, разработана конструкция когерентного импульсного микроволнового моста Q-диапазона частот, который имеет выходную мощность до 10 Вт, минимальную длительность импульсов до 20 нс при частоте их повторения 1 кГц.

По сравнению с импульсным мостом, разработанным фирмой Bruker Instrument, предлагаемый мост проще в управлении и имеет более высокую выходную мощность, низкую стоимость, меньший и стабильный уровень шумов, больший ресурс работы, малую величину энергопотребления, но более ограниченный круг методик, который может быть осуществлен с его помощью.

Импульсный спектрометр ЭСЭ, оснащенный разработанным мостом, позволит проводить эксперименты по измерению времени спин-спиновой и спин-решеточной релаксации, спектров ЭСЭ в условиях развертки магнитного поля, а также спектров модуляционного спада сигнала ЭСЭ с использованием двух-, трех- и четырехимпульсной последовательности с преобразованием Фурье.



ІСПОЛЬЗОВАННІ ІСТОЧНИКИ

1. Davoust C.E., Doan P.E., Hoffman B. M. Q-band Pulsed Electron Spin-Echo Spectrometer and Its Application to ENDOR and ESEEM // J. Magn. Reson. — 1996. — Ser. A 119, N 0049. — P. 38–44.
2. Gromov I., Shane J., Forrer J. et al. A Q-band pulse EPR/RNDOR spectrometer and the implementation of advanced one- and two-dimensional pulse EPR methodology // J. Magn. Reson. — 2001. — Vol. 149. — P. 196–203. — DOI:10.1006/jmre.2001.2298
3. Tkach I., Baldansuren A., Kalabukhova E. et al. A home-built ESE-spectrometer based on a high power Q-band microwave bridge // Appl. Magn. Reson. — 2008. — Vol. 35. — P. 95–112. — DOI: 10.1007/s00723-008-0141-5
4. ELEXSYS Spectrometer Series, BRUKER, <http://www.bruker.de>
5. Пат. 58891 України. Передавальний модуль мікрохвильового мосту для імпульсного когерентного спектрометру ЕПР 8 мм діапазону довжин хвиль / К. М. Калабухова, О. О. Сітніков А. В. Цвір та ін. — Бюл. “Промислова власність”. — 2011. — № 8. [Pat. 58891 Ukraini. / K. M. Kalabukhova, O. O. Sitnikov A. V. Tsvir ta in. Byul. “Promislova Vlasnist”. 2011. N 8]
6. Пат. 67160 України. Приймальний модуль твердотілого мікрохвильового мосту для імпульсного когерентного спектрометра електронного парамагнітного резонансу 8 міліметрового діапазону довжин хвиль / К.М. Калабухова, О.О. Сітніков А.В. Цвір та ін. — Бюл. “Промислова власність”. — 2012. — № 3. [Pat. 67160 Ukraini. / K.M. Kalabukhova, O.O. Sitnikov A.V. Tsvir ta in. Byul. “Promislova Vlasnist”. 2012. N 3]
7. Салихов К. М., Семенов А. Г., Цветков Ю. Д. Электронное спиновое эхо и его применение. — Новосибирск: Наука, 1976. [Salikhov K. M., Semenov A. G., Tsvetkov Yu. D. Elektronnoe spinovoe ekho i ego primeneniye. Novosibirsk: Nauka, 1976]
8. Hofer P., Heilig R., Maier D. C. et al. “The super Q-FT Accessory”, Bruker BioSpin GmbH, EPR Division; Реклама FT-EPR Spectrometer E 580, ELEXSYS, Bruker.
9. Касаткин Л. В. Твердотельные импульсные генераторы на лавино-пролетных диодах миллиметрового диапазона длин волн // Электронная техника. Сер. СВЧ-техника. — 1998. — № 2. — С. 41–47. [Kasatkin L. V. // Elektronnaya tekhnika. Ser. SVCh-tehnika. 1998. N 2. P. 41]
10. Іщенко М.Г., Касаткін Л.В., Тарасюк В.М. і др. Імпульсний когерентний напівпровідниковий генератор для спектрометра електронного спінового еха міліметрового діапазону волн // Радиоелектроника. — 2000. — № 8. — С. 50–55. [Ishchenko M.G., Kasatkin L.V., Tarasyuk V.M. i dr. // Radioelektronika. 2000. N 8. P. 50]
11. Чміль В. М., Сундучков К. С., Сундучков І. К. Техніка і технологія систем міліметрових волн // Технологія і конструювання в електронній апаратурі. — 2003. — № 4. — С. 6–14 [Chmil' V. M., Sunduchkov K. S., Sunduchkov I. K. // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature. 2003. N 4. P. 6]
12. Іванов В. Н., Ковтонюк В. М., Раєвська Н. С. Розробка конструкції і технології виготовлення діодів Ганна для КВЧ терапії // Інтегральні схеми напівпровідникових пристроїв. — 2004. — № 3. — С. 55–57. [Ivanov V. N.,

Kovtonyuk V. M., Raevskaya N. S. // Integral'nye skhemy poluprovodnikovye pribory. 2004. N 3. P. 55]

*Дата поступлення рукопису  
в редакцію 13.08 2012 г.*

Kalabukhova E. N., Oleinik V. V., Savchenko D. V., Sitnikov A. A., Tsvir A. V., Ishchenko M.G. **Solid-state pulsed microwave bridge for electron spin echo spectrometers of 8-mm wavelength range.**

*Keywords: power solid-state pulsed microwave bridge, electron spin echo spectrometer, two-stage coherent pulsed amplifier based on IMPATT diodes.*

The article presents a construction of a coherent pulsed microwave bridge with an output power up to 10 Wt with a time resolution of  $10^{-8}$  seconds at a pulse repetition rate of 1 kHz designed for electron spin echo spectrometers. The bridge is built on a homodyne scheme based on IMPATT diodes, which are used for modulation and amplification of microwave power coming from the reference Gunn diode oscillator. The advantages of the bridge are optimal power and minimum pulse width, simple operation, low cost.

Ukraine, Kiev, V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of NASU; Taras Shevchenko National University of Kyiv; RI «Orion».

Калабухова К. М., Олійник В. В., Савченко Д. В., Сітніков О. О., Цвір А. В., Іщенко М. Г. **Твердотілий імпульсний мікрохвильовий міст для спектрометрів електронного спінового еха 8-мм діапазону довжин хвиль.**

*Ключові слова: потужний твердотілий імпульсний мікрохвильовий міст, спектрометр електронного спінового еха, двокаскадний когерентний імпульсний підсилювач на ЛПД.*

Пропонується конструкція когерентного імпульсного мікрохвильового мосту з вихідною потужністю до 10 Вт з часовим розділенням  $10^{-8}$  с при частоті повторення імпульсів 1 кГц, призначеного для спектрометрів електронного спінового еха. Міст побудовано за гомодінною схемою на основі кремнієвих лавинно-пролітних діодів, які використовуються для модуляції і підсилення НВЧ-потужності, що надходить від опорного генератора на діоді Ганна. Перевагою моста є оптимальна потужність і мінімальна тривалість імпульсів, простота в управлінні, низька вартість.

Україна, м. Київ, Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, НДІ «Оріон».

УДК 621.372.852.1

К. т. н. Э. Н. ГЛУШЕЧЕНКО

Украина, г. Киев, НПП «Сатурн»

E-mail: gen-nto@ukr.net

## ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ФИЛЬТРОВ С КОЛЬЦЕВЫМИ РЕЗОНАТОРАМИ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

*Приведена структурная схема направленного фильтра бегущей волны, а также система аналитических выражений, определяющих уровни сигналов в плечах фильтра. Рассмотрены особенности реализации фильтра в микрополосковом исполнении, приведены структурная схема такого фильтра, его базовая топология и система сигналов.*

**Ключевые слова:** направленный фильтр, ответвитель, кольцевой резонатор, микрополосковая линия передачи.

Устройства на резонаторах бегущей волны, например направленные фильтры, известны давно [1]. Основное преимущество СВЧ-устройств такого класса перед устройствами, работающими в режиме стоячей волны — практически идеальное согласование с СВЧ-трактом в диапазоне рабочих частот. Это является следствием того, что в них реализован принципиально иной тип передачи сигнала — на основе режима бегущей волны, при котором отсутствуют отраженные волны.

Однако наряду с указанным преимуществом устройства с кольцевым резонатором бегущей волны имеют существенный недостаток — очень большие габариты в случае волноводного или коаксиального исполнения, а их реализации в интегральном (микрополосковом) исполнении препятствуют технологические факторы, анализу которых посвящена настоящая статья.

### Принцип функционирования направленного фильтра

Принцип функционирования устройств с кольцевым резонатором бегущей волны рассмотрим на примере направленного фильтра бегущей волны — наиболее известного в этом классе. Его структурная схема представлена на **рис. 1**.

Фильтр состоит из двух направленных ответвителей (НО) на двух параллельных связанных линиях, вторичные каналы которых с помощью четвертьволновых отрезков линии передачи  $L_1$  и  $L_2$  объединены в замкнутый кольцевой резонатор. Поскольку вторичные каналы ответвителей НО<sub>1</sub> и НО<sub>2</sub> также четвертьволновые, на резонансной частоте электрическая длина кольцевого резонатора по осевой линии  $l$  равна целому числу длин волн в линии передачи  $l = m\lambda$ , где  $m=1, 2, \dots, n$  — число циклов обхода сигнала по кольцевому резонатору, а  $\lambda$  — длина волны на резонансной частоте.

Часть мощности сигнала, поданного в плечо 1 направленного фильтра бегущей волны (НФБВ), через ответвитель НО<sub>1</sub> поступает в кольцевой резонатор. Через ответвитель НО<sub>2</sub> часть мощности сигнала из кольцевого резонатора поступает в плечо 3 фильтра. Оставшаяся мощность будет распространяться по кольцевому резонатору к ответвителю НО<sub>1</sub>, где часть мощности ответвится в плечо 2, а оставшаяся часть — снова к ответвителю НО<sub>2</sub>.

На выходе ответвителя НО<sub>1</sub> в направлении плеча 3 НФБВ кроме волны, распространяющейся по кольцевому резонатору, имеется волна, ответвленная от плеча 1 НФБВ, т. е. происходит наложение двух волн. Если  $l = m\lambda$ , то волна в кольцевом резонаторе отстает по фазе на целое число периодов от волны, ответвленной от плеча 1. Следовательно, волны в кольцевом резонаторе на выходе ответвителя НО<sub>1</sub> и, соответственно, в плече 3 суммируются.

В плече 2 также происходит наложение двух волн. Однако здесь волны не суммируются, а

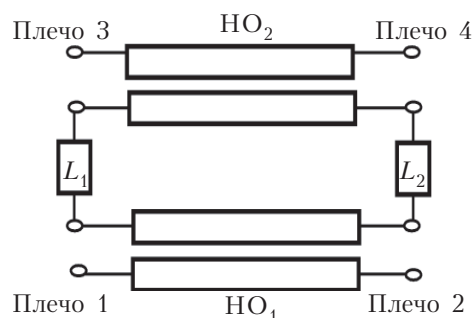


Рис. 1. Структурная схема направленного фильтра бегущей волны:

НО<sub>1</sub> и НО<sub>2</sub> — четвертьволновые направленные ответвители;  
 $L_1$  и  $L_2$  — четвертьволновые отрезки линии передачи

вычитаются, т. к. волна, ответвленная из кольцевого резонатора, отстает по фазе на  $180^\circ$  (после двукратного прохождения через ответвитель  $HO_1$ ) от волны, идущей от плеча 1. Таким образом, если плечо 1 является входным, то в плече 3 реализуется полосно-пропускающий фильтр (**ППФ**), а в плече 2 — полосно-заграждающий (**ПЗФ**). К плечу 4 во избежание отражений подключают согласованную нагрузку.

Очевидно, что на резонансной частоте в плече 2 происходит уменьшение амплитуды сигнала, а в плече 3 — ее увеличение за счет режима бегущей волны в кольцевом резонаторе. При многократном повторении процесса в кольцевом резонаторе имеет место резонанс в режиме бегущей волны, а сам процесс происходит до тех пор, пока вся возможная энергия волны не будет поступать в плечо 3 фильтра.

Для определения уровня сигналов в плечах НФБВ допустим, что:

- оба направленных ответвителя имеют идеальное согласование с линиями передачи и бесконечную направленность;
- линии передачи не имеют точек отражения, поэтому в кольцевом резонаторе с электрической длиной  $l = \lambda$  распространяется чисто бегущая волна;
- уровни сигнала в плечах НФБВ для удобства отнесены к средним плоскостям ответвителей  $HO_1$  и  $HO_2$ .

Обозначим уровни сигнала в плечах 1—4 НФБВ как  $E1$ — $E4$  соответственно, а в плечах (полюсах) вторичного канала ответвителя  $HO_1$ , являющегося частью кольцевого резонатора, обозначим следующим образом: со стороны плеча 1 — как  $ER1$ , а со стороны плеча 2 — как  $ER2$  (рис. 2).

С учетом сделанных предположений и считая, что уровень входного сигнала (в плече 1) нормирован по напряжению и равен единице, можем определить систему аналитических выражений для уровней сигналов в плечах НФБВ при первом цикле обхода кольцевого резонатора:

$$E1_1=1; E2_1=(1-C_1^2)^{1/2}; ER1_1=C_1; ER3_1=C_1C_2\exp(-\alpha l/2); \quad (1)$$

$$E4_1=0; ER2_1=ER1_1(1-C_2^2)^{1/2}\exp(-\alpha l)=C_1(1-C_2^2)^{1/2}\exp(-\alpha l), \quad (2)$$

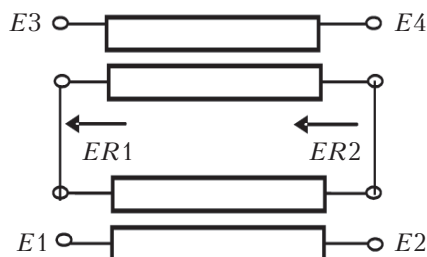


Рис. 2. Система сигналов НФБВ в режиме чисто бегущей волны

где  $C_1, C_2$  — коэффициенты связи по напряжению  $HO_1$  и  $HO_2$  соответственно;  
 $\alpha$  — постоянная затухания линий передачи НФБВ на единицу длины.

Для второго и любого  $j$ -го цикла обхода сигнала по кольцевому резонатору система сигналов в плечах НФБВ примет такой вид:

$$E1_j=1; E2_j=C_1 \cdot ER2_1=C_1(1-C_2^2)^{1/2}\exp(-\alpha l); \quad (3)$$

$$ER1_j=ER2_1(1-C_1^2)^{1/2}=C_1(1-C_1^2)^{j/2}(1-C_2^2)^{j/2}\exp(-\alpha l); \quad (4)$$

$$E3_j=ER1_j \cdot C_2\exp(-\alpha l); E4_j=0; \quad (5)$$

$$ER2_j=ER1_j(1-C_2^2)^{1/2}\exp(-\alpha l/2)=C_1(1-C_2^2)^{1/2}(1-C_1^2)^{j/2}(1-C_2^2)^{j/2}\exp(-\alpha l). \quad (6)$$

Если учесть, что независимо от цикла обхода сигнала по кольцевому резонатору  $E1 \equiv 1$  и  $E4 \equiv 0$ , а  $E2, E3$  и  $ER1$  определяются относительно значения  $ER2$ , то систему сигналов в плечах НФБВ можно представить в виде

$$E1=1; E4=0; \quad (8)$$

$$E2=(1-C_1^2)^{1/2}-C_1 \cdot ER2; \quad (9)$$

$$E3=C_2 \cdot ER2 \exp(-\alpha l/2)/(1-C_2^2)^{1/2}; \quad (10)$$

$$\text{где } ER2=C_1(1-C_2^2)^{1/2}\exp(-\alpha l) \times \{1 + \sum_{j=2}^m (1-C_1^2)^{j/2} (1-C_2^2)^{j/2}\exp(-\alpha l)\}. \quad (11)$$

Поскольку выражение (11) для  $ER2$  является степенным рядом в форме бесконечной геометрической прогрессии, при  $m \rightarrow \infty$  оно примет вид

$$ER2 = \frac{C_1 e^{-\alpha l} \sqrt{1-C_2^2}}{1 - e^{-\alpha l} \sqrt{1-C_1^2} \sqrt{1-C_2^2}}. \quad (12)$$

В результате уровни сигналов в плечах НФБВ можно определить согласно выражениям  $E1=1; E4=0;$

$$E2 = \frac{\sqrt{1-C_1^2} - e^{-\alpha l} \sqrt{1-C_2^2}}{1 - e^{-\alpha l} \sqrt{1-C_1^2} \sqrt{1-C_2^2}}; \quad (14)$$

$$E3 = \frac{C_1 C_2 e^{-3\alpha l/2}}{1 - e^{-\alpha l} \sqrt{1-C_1^2} \sqrt{1-C_2^2}}. \quad (15)$$

### Проблемы реализации интегральных НФБВ

В [2] были предложены варианты возможной реализации НФБВ в интегральном (микрополосковом) исполнении. При этом было отмечено, что  $HO_1$  и  $HO_2$  НФБВ должны иметь переходное ослабление 3 дБ. Но именно это условие явилось препятствием для реализации НФБВ на основе микрополосковых линий передачи (**МПЛ**).

На основе структурной схемы НФБВ, приведенной на рис. 1, реализовать НО с переходным ослаблением 3 дБ на двух связанных МПЛ при существующей технологии практически не-



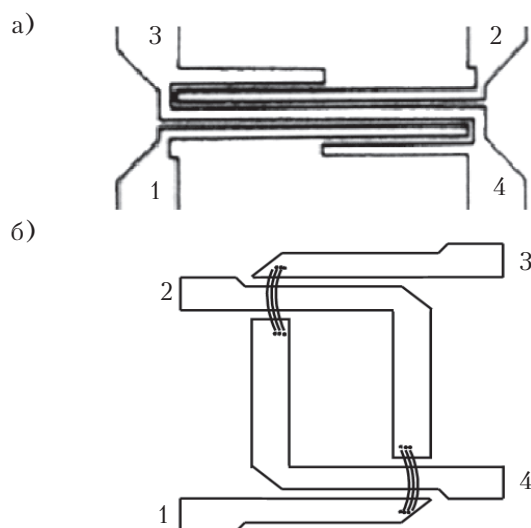


Рис. 3. Направленные ответвители с переходным ослаблением 3 дБ на многопроводной МПЛ (а) и НО типа «тандем» (б)

возможно. Это связано с тем, что в соответствии с [3] между связанными МПЛ необходимо обеспечить протяженный зазор четвертьволновой длины, т. е. он должен быть менее 15 мкм, а это практически нереализуемо. Кроме того, при этом нарушается характер распространения электромагнитной волны.

В микрополосковой СВЧ-технике известны только три топологические реализации НО с переходным ослаблением 3 дБ [3] — на основе многопроводной МПЛ типа Lange [4], НО типа «тандем» [5] и шлейфный. Шлейфный НО не имеет вторичного канала, поэтому рассматривать его для создания НФБВ не имеет смысла. Топологии двух других приведены на рис. 3, где видно, что для реализации микрополоскового НФБВ (МНФБВ) применить эти НО в известном из публикаций топологическом исполнении тоже невозможно. В НО типа Lange (рис. 3, а) полюс 2 его основного канала расположен между полюсами 3 и 4 вторичного канала, поэтому реализовать замкнутый кольцевой резонатор не представляется возможным. НО типа «тандем» (рис. 3, б) образован двумя ответвителями на двух связанных МПЛ с переходным ослаблением 8,34 дБ и двумя четвертьволновыми отрезками МПЛ. Современный уровень микрополосковой технологии (мокрой фотолитографии) позволяет реализовать такие НО на подложках как из керамики, так и из органических диэлектриков типа Duroid. Но в известном топологическом исполнении применить НО типа «тандем» для создания МНФБВ невозможно, т. к. основной и вторичный каналы этого ответвителя имеют разрывы, а распространение электромагнитной волны обеспечено с помощью гальванических перемычек.

Однако возникшую проблему удалось решить, модифицировав базовую топологию НО

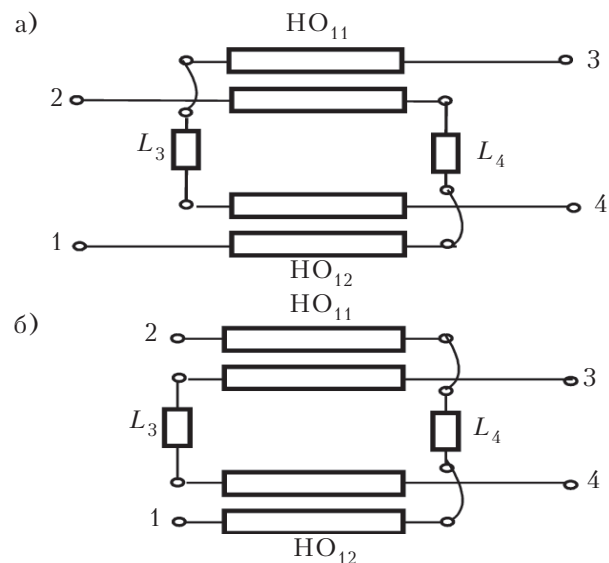


Рис. 4. Структурные схемы классического (а) и модифицированного (б) направленного ответвителя типа «тандем»

типа «тандем». Характер этой модификации можно оценить, сравнив структурные схемы классического и модифицированного ответвителей на рис. 4. Из рис. 4, б) видно, что вторичный канал 3—4 модифицированного НО позволяет реализовать замкнутый кольцевой резонатор бегущей волны. В результате структурная схема МНФБВ и его топология примут вид, приведенный на рис. 5.

Как видно из рис. 5, замкнутый кольцевой резонатор образован вторичными четвертьволновыми каналами  $HO_{11}$ ,  $HO_{21}$ ,  $HO_{22}$  и  $HO_{12}$  «тандема», которые непосредственно соединены четвертьволновыми отрезками МПЛ  $L_1$ ,  $L_6$ ,  $L_2$  и

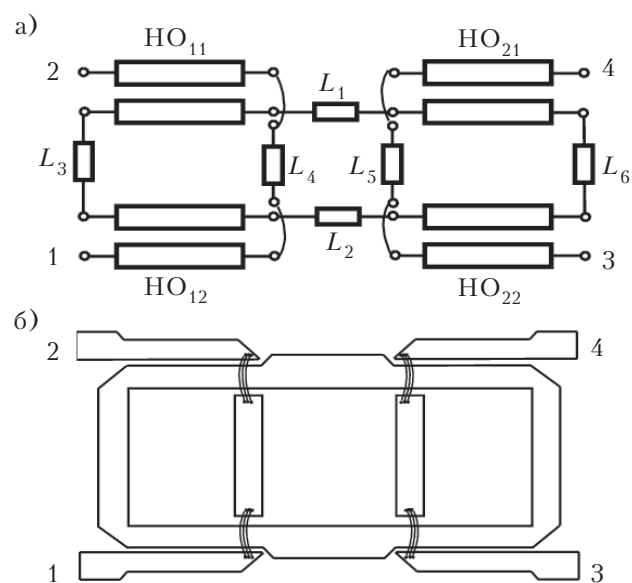


Рис. 5. Структурная схема (а) и базовая топология (б) микрополоскового направленного фильтра бегущей волны

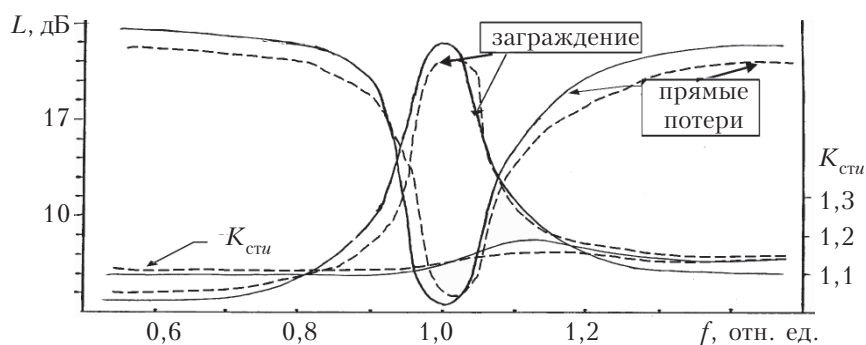


Рис. 6. Сравнительные АЧХ классического (—) и микрополоскового (---) НФБВ

$L_3$  соответственно. Поскольку все НО «тандема», а также отрезки МПЛ имеют длину  $\lambda/4$ , электрическая длина резонансного кольца (резонатора бегущей волны) в предложенном базовом варианте конструктивной реализации МНФБВ равна  $L_k = 2\lambda$ . При этом отрезки МПЛ  $L_4$  и  $L_5$ , расположенные внутри кольца между двумя НО каждого «тандема», соединены с основными каналами ответвителей гальваническими перемычками.

В предложенной реализации МНФБВ обеспечено одно из основных проблемных условий его функционирования — наличие непрерывного (замкнутого) кольцевого резонатора, в котором может распространяться бегущая волна. Второе условие — связь кольцевого резонатора с каналами входа и выхода фильтра с переходным ослаблением порядка 3 дБ — конструкцией НО типа «тандем» должно обеспечиваться автоматически, если правильно выполнить монтаж гальванических перемычек.

Гальванические перемычки в СВЧ-устройствах на связанных МПЛ применяются часто, например в НО со связью в 3 дБ на основе многопроводной МПЛ [3]. Они выполняются пайкой (микросваркой) позолоченной фольгой или золотой проволокой  $\varnothing 15-25$  мкм в зависимости от частотного диапазона. Гальванические перемычки в МНФБВ выполняются аналогично. Но при этом необходимо не только обеспечить надежный гальванический контакт перемычек, но и исключить возможность излучения через них СВЧ-энергии, чтобы не нарушить электродинамическую систему фильтра. Это можно сделать путем подбора высоты перемычек, что не является технологической проблемой.

Поскольку СВЧ-сигнал в резонатор поступает через НО, в резонансном кольце возникает резонанс двух взаимно ортогональных компонент стоячей волны, соответствующих электрической и магнитной связи. Когда обе резонансные частоты совпадают, резонансные составляющие двух видов колебаний накладываются друг на друга и образуют в резонансном кольце чисто бегущую волну, которая распространяется по часовой стрелке.

Следует отметить, что конструктивно-топологическая реализация МНФБВ, представленная

на рис. 5, 6, защищена авторскими правами по критерию научной новизны [6].

Сравнительные амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) классического НФБВ и реализованного МНФБВ приведены на рис. 6, откуда видно, что характер АЧХ обоих фильтров идентичен. При этом согласование с СВЧ-трактом ( $K_{сти}$ ) практически не изменилось, прямые потери и полоса рабочих частот по уровню 3 дБ увеличились незначи-

тельно. Уменьшились лишь потери в канале ППФ за пределами рабочей полосы и уровень заграждения в канале ПЗФ, что является следствием неидеальности направленности НО на основе МПЛ.

При расстройке кольцевого резонатора, т. е. в случае когда  $l \neq m\lambda$ , резонанс в нем не возникает и, следовательно, в плече 2 НФБВ амплитуда сигнала будет максимальна, а в плече 3 МНФБВ — близка к нулю.

#### Параметры сигналов в плечах МНФБВ

Перечисленные выше различия АЧХ модифицированного и классического НФБВ являются следствием того, что СВЧ-сигнал поступает в резонансное кольцо не через одиночный НО, а через сложную составную конструкцию модифицированного НО типа «тандем». Поэтому электромагнитная система такого МНФБВ (рис. 5) существенно отличается — вместо двух НО сигнал проходит через четыре НО, а вместо двух четвертьволновых отрезков МПЛ — через шесть. При этом и электрическая длина  $l$  резонансного кольца в  $m$  раз больше, где  $m$  — целое число не меньше 2. Следует отметить, что в приведенном на рис. 5, 6 варианте МНФБВ длина кольцевого резонатора  $l = 2\lambda$ .

Для такого варианта реализации МНФБВ соотношения для определения уровня СВЧ-сигнала в его плечах будут отличаться от полученных ранее для НФБВ по классической структурной схеме (рис. 1).

Если обозначить уровни сигналов в плечах 1—4 МНФБВ как  $ME1-ME4$  соответственно, то выражения (1) и (2) для первого цикла обхода сигнала по кольцевому резонатору МНФБВ (с учетом вышеизложенных допущений) примут вид

$$\begin{aligned} ME1_1 &= 1; ME2_1 = (1 - K_1^2)^{1/2} \exp(-\alpha l / 2); \\ MER1_1 &= K_1 \exp(-\alpha l / 2); \\ ME3_1 &= K_1 K_2 \exp(-\alpha l); \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} ME4_1 &= 0; \\ MER2_1 &= MER1_1 (1 - K_2^2)^{1/2} \exp(-2\alpha l), \end{aligned} \quad (17)$$

где  $K_1, K_2$  — коэффициенты связи по напряжению ответвителей типа «тандем», соответственно, входного НО<sub>1</sub> и выходного НО<sub>2</sub>;

$\alpha$  — постоянная затухания на единицу длины МПЛ МНФБВ.

Выполнив с (16) и (17) преобразования согласно (3) – (11), получим

$$ME1_j=1; ME2_j=K_1 \cdot MER2_j; \\ MER1_j=MER2_j(1-K_1^2)^{j/2} \exp(-\alpha\lambda); \quad (18)$$

$$ME3_j=MER1_j \cdot K_2 \exp(-3\alpha\lambda/2); ME4_j=0; \\ MER2_j=MER1_j(1-K_2^2)^{j/2} \exp(-3\alpha\lambda/2). \quad (19)$$

Соответственно получим, что

$$ME1=1; ME4=0; \quad (20)$$

$$ME2=MER1-K_1 \cdot MER2 \exp(-3\alpha\lambda/2); \quad (21)$$

$$ME3=K_2 \cdot MER2 \exp(-\alpha\lambda/2)/(1-K_2^2)^{1/2}, \quad (22)$$

$$\text{где } MER2=K_1(1-K_2^2)^{1/2} \exp(-5\alpha\lambda/2) \times \\ \times \{1 + \sum_{j=m}^{\infty} (1-K_1^2)^{j/2} (1-K_2^2)^{j/2} \exp(-2\alpha\lambda)\}. \quad (23)$$

Поскольку выражение (23) для  $MER2$  также является степенным рядом в форме бесконечной геометрической прогрессии, при  $m \rightarrow \infty$  оно будет иметь вид

$$MER2 = \frac{K_1 e^{-2\alpha\lambda} \sqrt{1-K_2^2}}{1 - e^{-3\alpha\lambda/2} \sqrt{1-K_1^2} \sqrt{1-K_2^2}}. \quad (24)$$

При этом для рассматриваемого МНФБВ с  $l=2\lambda$  уровни сигналов в его плечах можно определить согласно следующим выражениям:

$$ME1=1; ME4=0; \quad (25)$$

$$ME2 = \frac{e^{-\alpha\lambda} \sqrt{1-K_1^2} - e^{-7\alpha\lambda/2} \sqrt{1-K_2^2}}{1 - e^{-3\alpha\lambda} \sqrt{1-K_1^2} \sqrt{1-K_2^2}}; \quad (26)$$

$$ME3 = \frac{K_1 K_2 e^{-5\alpha\lambda}}{1 - e^{-3\alpha\lambda} \sqrt{1-K_1^2} \sqrt{1-K_2^2}}. \quad (27)$$

Необходимо отметить, что для  $MER1$  и  $MER2$  фазовый угол (сдвиг) составляет  $\varphi = -90^\circ$ , а для  $ME2$  и  $ME3$   $\varphi = 0^\circ$ . Кроме того, для случая МНФБВ  $l=m\lambda$ , где  $m=2... \infty$ , возможно возникновение резонансных мод, которые могут исказить характер АЧХ МНФБВ, т. е. нарушить режим его функционирования.

Однако, как было показано выше (рис. 6), характер АЧХ МНФБВ не изменяется. Это происходит потому, что СВЧ-сигнал поступает в кольцевой резонатор через систему НО. А самый широкополосный микрополосковый ответвитель — на многопроводной МПЛ типа Lange — имеет рабочую полосу с хорошим согласованием (достаточно низким  $K_{\text{сгл}}$ )  $\Delta f = f_0 \pm 20\%$ , т. е. никакие сигналы резонансных мод через НО распространяться не смогут.

### Заключение

Проведенный анализ принципа функционирования направленного фильтра бегущей волны и проблемных особенностей, препятствующих его реализации в интегральном виде, показал, что применение модифицированных направленных

ответвителей типа «тандем» в качестве элемента НФБВ позволяет реализовать его в микрополосковом исполнении. Несмотря на существенные конструктивно-топологические отличия от классического НФБВ, использование таких ответвителей не изменяет характер амплитудно-частотной характеристики фильтра.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Харвей А. Ф. Техника сверхвысоких частот. Т. 1. — Москва: Сов. радио, 1965. [Kharvei A. F. Tekhnika sverkhvysokikh chastot. Vol. 1. Moscow: Sov. radio, 1965]
2. Халыпин Д. Б. Коаксиальные и полосковые фильтры сверхвысоких частот. — Москва: Связь, 1969. [Khalyapin D. B. Koaksial'nye i poloskovye fil'try sverkhvysokikh chastot. Moscow: Svyaz', 1969]
3. Малорацкий Л. Г. Микроминиатюризация элементов и устройств СВЧ. — Москва: Сов радио, 1976. [Maloratskii L. G. Mikrominiaturizatsiya elementov i ustroystv SVCh. Moscow: Sov radio, 1976]
4. Lange J. Interdigitated stripline quadrature hybrid // IEEE Trans. MTT. — 1969. — Vol. 17. — N 12. — P. 1150–1151.
5. Shelton J. P., Wolf J., Van Wagoner R. Tandem couplers and phase shifters // Microwaves. — 1965. — P. 14–19.
6. А.с. СССР № 1406668. Микрополосковый направленный фильтр бегущей волны / Э. Н. Глушеченко. — 1988. — Бюл. № 24. [A.s. SSSR № 1406668. / E. N. Glushechenko. — 1988. — Byul. № 24]

Дата поступления рукописи  
в редакцию 30.07 2012 г.

Glushechenko E. N. **Implementation features of the microstrip filters with traveling wave ring resonators.**

*Keywords: directional filter, coupler ring resonator microstrip transmission line.*

The article presents a block diagram of a traveling wave directional filter, and a system of analytic expressions which defines the levels of the signals in the filter branches. Implementation features of the filter in the microstrip design are considered. The block diagram of such filter, its base topology and signal system are given.

Ukraine, Kiev, SPE "Saturn".

Глушеченко Е. М. **Особливості реалізації мікрополоскових фільтрів з кільцевими резонаторами біжучої хвилі.**

*Ключові слова: спрямований фільтр, відгалужувач, кільцевий резонатор, мікрополоскова лінія передачі.*

Наведено структурну схему спрямованого фільтра біжучої хвилі, а також систему аналітичних виразів, що визначають рівні сигналів в плечах фільтру. Розглянуто особливості реалізації фільтру в мікрополосковому виконанні, наведено структурну схему такого фільтру, його базову топологію та систему сигналів.

Україна, м. Київ, НВП «Сатурн».



УДК 621.372

К. т. н. Ю. В. ПРОКОПЕНКО

Украина, НТУУ «Киевский политехнический институт»

E-mail: prok@phbme.kpi.ua

## ПРЕДЕЛЫ УПРАВЛЯЕМОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ, РАСПОЛОЖЕННОЙ МЕЖДУ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ПЛОСКОСТЯМИ

Получены оценки управляемости характеристиками расположенной между металлическими плоскостями диэлектрической неоднородности как элемента микромеханически управляемых СВЧ-устройств. Показано, что при микроперемещениях металлической плоскости над диэлектриком эффективная диэлектрическая проницаемость неоднородности может изменяться от значения относительной проницаемости диэлектрика до единицы. Получены критерии необходимой малости толщины диэлектрика или частоты, при которых диэлектрический эффект не наблюдается. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании электромеханически управляемых СВЧ-устройств с использованием пьезоэлектрических и электрострикционных актюаторов или микроэлектромеханических систем.

**Ключевые слова:** микромеханическое управление, эффективная диэлектрическая проницаемость, диэлектрическая неоднородность.

Основное достоинство перестраиваемых СВЧ-устройств с электромеханическим управлением состоит в низком уровне вносимых потерь и сохранении высокой добротности [1]. Вместе с тем такие устройства обладают высокой управляемостью. Так, резонансные частоты низшего типа колебаний диэлектрических резонаторов с поперечной неоднородностью перестраиваются на 25–30% [2]. Электромеханические фазовращатели на основе микрополосковой и копланарной линий передач обеспечивают изменение фазового сдвига на сотни градусов на отрезках, равных длине волны [3].

Электромеханически управляемые устройства, как правило, строятся на основе перемещения диэлектрических или металлических частей относительно диэлектрика. Проектирование таких устройств связано с оптимальным выбором материала и размеров диэлектриков с точки зрения обеспечения возможности требуемых перемещений и необходимых характеристик управления.

В данной работе исследуется простейший элемент управляемых устройств — одномерная диэлектрическая неоднородность, расположенная между идеальными металлическими плоскостями — с точки зрения повышения эффективности управления.

### Дисперсионные характеристики диэлектрической неоднородности между металлическими плоскостями

Рассмотрим одномерную структуру, состоящую из диэлектрической неоднородности, расположенной между идеальными металлическими

плоскостями. Неоднородность состоит из двух диэлектриков со значениями относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  и толщиной  $h$  и  $d$  соответственно (рис. 1). В такой структуре диэлектрические свойства среды изменяются только в направлении  $Oy$ .

Электромагнитные колебания в рассматриваемой структуре раскладываются на колебания ЛМ- и ЛЕ-типов, являющиеся независимыми решениями уравнений Максвелла [4]. Поперечные волновые числа ЛМ-типов колебаний находят из условия непрерывности тангенциальных составляющих электромагнитного поля в плоскости  $y=h$ :

$$\frac{\beta_{y1}}{\epsilon_1} \operatorname{tg}(\beta_{y1}h) + \frac{\beta_{y2}}{\epsilon_2} \operatorname{tg}(\beta_{y2}d) = 0;$$

$$(\epsilon_1 - \epsilon_2)k^2 = \beta_{y1}^2 - \beta_{y2}^2, \quad (1)$$

где  $\beta_{y1}$ ,  $\beta_{y2}$  — поперечные волновые числа в области 1 ( $0 \leq y \leq h$ ) и в области 2 ( $h \leq y \leq h+d$ );

$k = \omega/c$  — постоянная распространения в свободном пространстве;

$\omega$  — круговая частота;

$c$  — скорость света в вакууме.

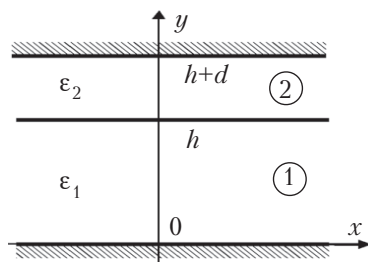


Рис. 1. Одномерная структура с диэлектрической неоднородностью

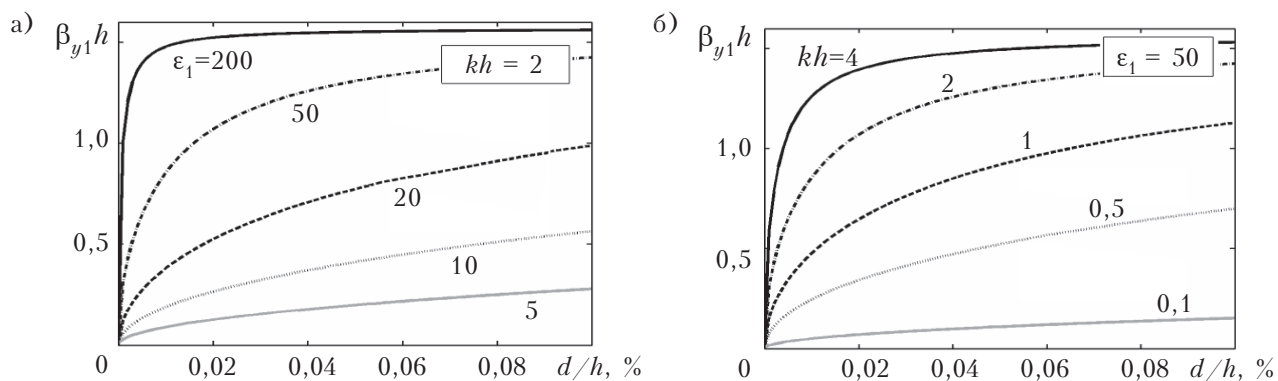


Рис. 2. Графики зависимости нормированного поперечного волнового числа в области 1 для низших ЛМ-колебаний от нормированной толщины воздушного зазора ( $\epsilon_2=1$ ) при различных  $\epsilon_1$  (а) и  $kh$  (б)

Решения дисперсионных уравнений (1) зависят только от частоты, диэлектрической проницаемости и размеров областей 1 и 2 на рис. 1. Нормированные первые корни этих уравнений при различных значениях относительной диэлектрической проницаемости области 1 и различных нормированных постоянных распространения в свободном пространстве  $kh$  показаны на **рис.2**.

Как видно из рис. 2, в случае когда область 2 является воздушной ( $\epsilon_2=1$ ), на поперечное волновое число для ЛМ-колебаний сильно влияет расстояние  $d$  от диэлектрика с проницаемостью  $\epsilon_1$  до металлической плоскости. Изменение этого расстояния всего на несколько сотых долей процента от толщины диэлектрика  $h$  приводит к существенному изменению поперечного волнового числа. Количественно эти изменения увеличиваются с ростом диэлектрической проницаемости области 1 и частоты.

Как видно из **рис.3**, колебания ЛЕ-типа свойственны значительно меньшие количественные изменения поперечного волнового числа, чем для ЛМ-типа, и требуемые изменения размеров области 2 для достижения этих изменений соиз-

меримы с размером диэлектрика в области 1. Следовательно, микромеханически перестраиваемые устройства не могут быть построены на основе ЛЕ-колебаний.

В отличие от ЛЕ-колебаний, в ЛМ-колебаниях имеется компонента  $E_y$  электрического поля, перпендикулярная плоскости диэлектрической неоднородности. Следовательно, для эффективной перестройки электродинамических свойств диэлектрических структур воздушная неоднородность должна быть расположена перпендикулярно электрическому полю. Аналогично можно показать, что для магнитных материалов эффективная перестройка возможна при наличии компоненты магнитного поля, перпендикулярной воздушной неоднородности.

Поскольку ЛЕ-типы колебаний обладают низкой управляемостью и не могут быть использованы для микромеханического управления, в дальнейшем будем рассматривать только низшие ЛМ-колебания, являющиеся основным типом колебаний и имеющие наиболее высокую чувствительность к изменению воздушного зазора между металлом и диэлектриком, а также наименьшую критическую частоту.

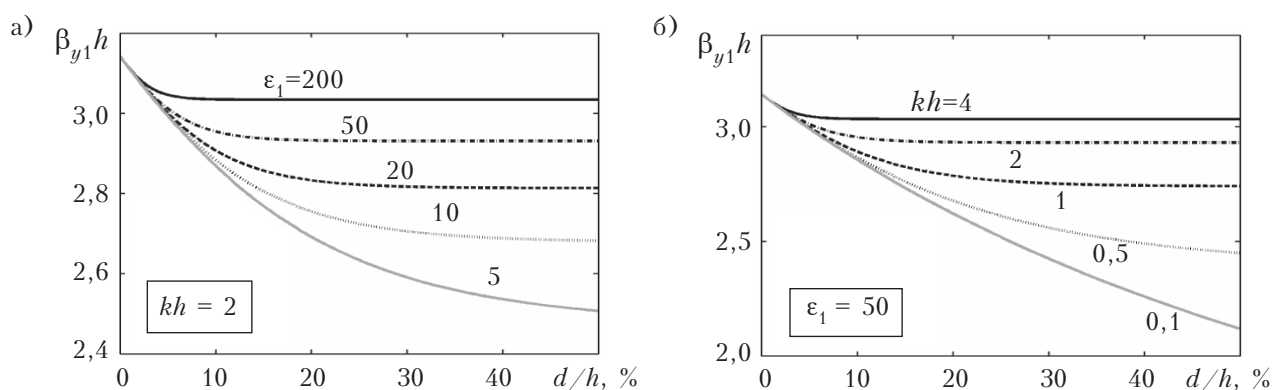


Рис. 3. Графики зависимости нормированного поперечного волнового числа в области 1 для низших ЛЕ-колебаний от нормированной толщины воздушного зазора ( $\epsilon_2=1$ ) при различных  $\epsilon_1$  (а) и  $kh$  (б)

### Эффективная диэлектрическая проницаемость

Основной управляемой характеристикой рассматриваемой одномерной диэлектрической неоднородности является длина волны. Для оценки количественного изменения длины волны удобно сравнивать ее изменение в рассматриваемой и в однородной структурах.

Под эффективной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_{eff}$  рассматриваемой неоднородной структуры будем понимать такую диэлектрическую проницаемость однородного диэлектрика, расположенного между двумя параллельными металлическими плоскостями, находящимися на расстоянии  $h+d$  друг от друга, при которой длина волны в однородной структуре будет равна длине волны в неоднородной структуре, приведенной на рис. 1. Эффективная диэлектрическая проницаемость зависит от типа колебаний.

Поскольку для ЛМ-колебаний в случае однородного диэлектрика поперечное волновое число равно нулю, то, в соответствии с введенным определением эффективной диэлектрической проницаемости, имеем

$$\epsilon_{eff} = \epsilon_1 - \frac{\beta_{y1}^2}{k^2}. \quad (2)$$

Отсюда следует, что характер зависимости эффективной диэлектрической проницаемости от величины воздушного зазора  $d$  определяется поведением функции  $\beta_{y1}(d)$ .

Рассмотрим предельный диапазон изменения эффективной диэлектрической проницаемости. Из (2) следует, что относительное изменение эффективной диэлектрической проницаемости может быть выражено через отношение нормированных волновых чисел:

$$\delta\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_{eff}}{\epsilon_1} = \frac{(\beta_{y1}h)^2}{\epsilon_1(kh)^2}. \quad (3)$$

Поскольку максимальное значение нормированного поперечного волнового числа  $\beta_{y1}h$  равно  $\pi/2$ , при больших значениях  $kh$  максималь-

ное относительное изменение  $\epsilon_{eff}$  может быть оценено как  $\delta\epsilon_{eff\max} < \pi^2/(4\epsilon_1(kh)^2)$ . Мера больших и малых  $kh$  будет оценена ниже.

Из (3) следует, что относительное изменение эффективной диэлектрической проницаемости растет с уменьшением нормированной постоянной распространения в свободном пространстве. Максимальный диапазон изменения  $\epsilon_{eff}$  достигается при  $kh \rightarrow 0$ . При этом условии, как видно из (1),  $\beta_{y1}h$  также стремится к нулю. Это позволяет, используя эквивалентность бесконечно малых величин, решить уравнения аналитически. В итоге получим

$$\lim_{kh \rightarrow 0} (\beta_{y1}h) = \sqrt{\frac{(\epsilon_1 - \epsilon_2) \frac{d}{h}}{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} + \frac{d}{h}}} \cdot kh. \quad (4)$$

Следовательно,

$$\lim_{kh \rightarrow 0} \delta\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 \frac{d}{h} + \epsilon_1}, \quad (5)$$

откуда видно, что при  $kh \rightarrow 0$  эффективная диэлектрическая проницаемость с ростом  $d$  изменяется от  $\epsilon_1$  до  $\epsilon_2$ .

Графически зависимость (5) показана на рис. 4, а и демонстрирует максимально возможное относительное изменение  $\epsilon_{eff}$  одномерной диэлектрической неоднородности при изменении воздушного зазора между диэлектриком и металлической плоскостью. Приведенные зависимости являются верхними асимптотами для других значений нормированной постоянной распространения  $kh$ , т. е. при  $kh \neq 0$  аналогичные зависимости лежат ниже тех, которые здесь представлены. Как видно из рисунка, управление эффективной диэлектрической проницаемостью за счет изменения расстояния между металлической плоскостью и диэлектриком становится более эффективным с увеличением диэлектрической проницаемости области 1.

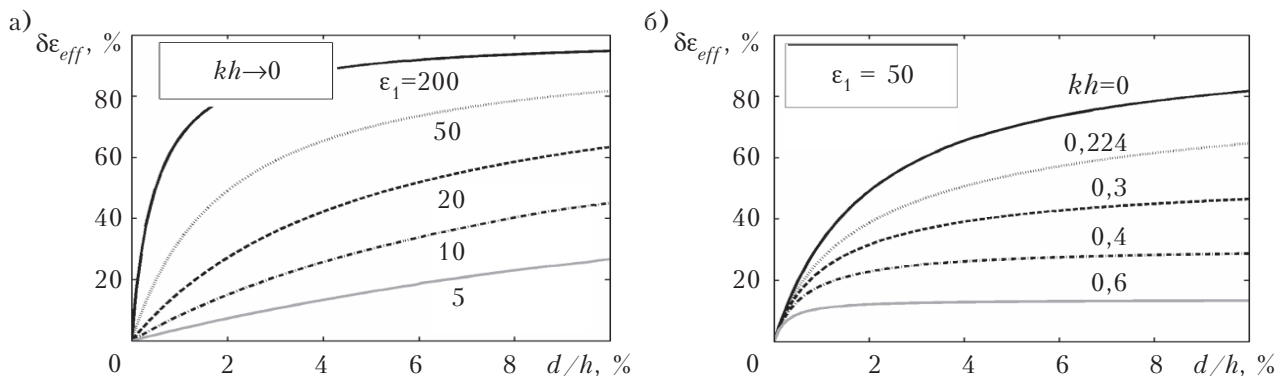


Рис. 4. Зависимость относительного изменения  $\epsilon_{eff}$  от нормированной толщины воздушного зазора ( $\epsilon_2 = 1$ ) для различных  $\epsilon_1$  (а) и различных  $kh$  (б)



Поскольку диапазон изменения  $\epsilon_{eff}$  от  $\epsilon_1$  до  $\epsilon_2$  является предельным, а максимальное значение  $\beta_{y1}h$  равно  $\pi/2$ , из (3) следует, что для достижения наилучшего управления эффективной диэлектрической проницаемостью должно выполняться условие

$$kh < \frac{\pi}{2\sqrt{\epsilon_1 - \epsilon_2}}. \quad (6)$$

Невыполнение этого условия приводит к тому, что значение  $\epsilon_{eff}$  будет ограничено величиной  $[\epsilon_1 - \pi^2/(4(kh)^2)] > \epsilon_2$ . К такому же заключению можно прийти и из анализа формулы (4) при  $d/h \rightarrow \infty$ . Аналогичный вывод можно получить и из анализа решений уравнений (1) в более общих случаях.

Влияние нормированной постоянной распространения в свободном пространстве на предельный диапазон изменения эффективной диэлектрической проницаемости проиллюстрировано на рис. 4, б.

Для  $\epsilon_1 = 50$  условие (6) приводит к требованию  $kh < \pi/14$ , т. е.  $kh < 0,224$ . Как видно из рисунка, при невыполнении этого требования предельный диапазон изменения эффективной диэлектрической проницаемости существенно уменьшается и уже при  $kh = 0,6$  составляет только около 10%, причем при  $d/h > 0,02$  ее значение практически не зависит от расстояния от диэлектрика до металлической плоскости. Аналогичный эффект в слоистых волноводах, где фазовая скорость волны слабо зависит от размера диэлектрического включения, назван диэлектрическим эффектом или эффектом диэлектрического волновода [4].

Как видно из рис. 4, б, тенденция изменения эффективной диэлектрической проницаемости в зависимости от нормированного волнового числа противоположна тенденции изменения поперечного волнового числа (рис. 2, б). Если скорость изменения последнего увеличивается с ростом нормированной постоянной распространения в свободном пространстве, то скорость изменения  $\epsilon_{eff}$  (а именно этот параметр характеризует управляемость системы) при том же условии уменьшается. Это связано с тем, что изменение  $\epsilon_{eff}$  определяется не столько самим нормированным поперечным волновым числом  $\beta_{y1}h$ , сколько его отношением к  $kh$ .

Условие (6) можно рассматривать как критерий малости нормированной постоянной распространения в свободном пространстве  $kh$ . Если это условие выполняется, то нормированное волновое число следует считать малым, в противном случае — большим.

Таким образом, для увеличения эффективности управления длиной волны низшего типа колебаний, распространяющейся в одномерной

диэлектрической неоднородности, должна быть обеспечена необходимая малость нормированной постоянной распространения в свободном пространстве. Поскольку обычно частота выбирается из условия отсечки и не может варьироваться в широких пределах, для обеспечения необходимой малости нормированного волнового числа  $\beta_{y1}h$  необходимо уменьшать толщину диэлектрика. Из (6) следует, что толщину необходимо выбрать такой, чтобы она удовлетворяла условию

$$h < \frac{\pi}{2k\sqrt{\epsilon_1 - \epsilon_2}}. \quad (7)$$

При толщине диэлектрика, не удовлетворяющей условию (7), диапазон изменения эффективной диэлектрической проницаемости ограничивается величиной  $(\pi/(2kh))^2$ . Кроме того, требуемые для управления эффективной диэлектрической проницаемостью абсолютные перемещения металлической плоскости будут возрастать.

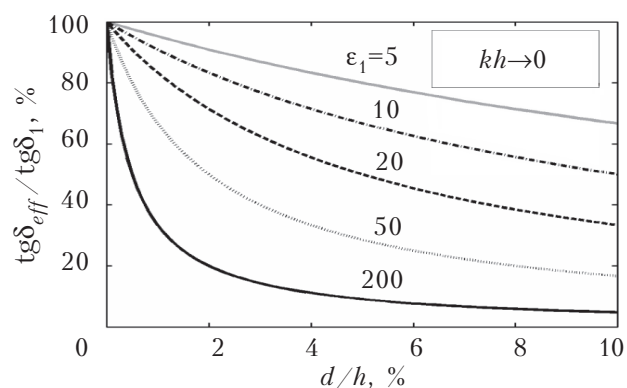


Рис. 5. Зависимость нормированного  $\text{tg}\delta_{eff}$  одномерной диэлектрической неоднородности от нормированной толщины воздушного зазора ( $\epsilon_2 = 1$ )

Если диэлектрик в области 1 имеет потери, характеризуемые тангенсом угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta_1$ , то эффективная диэлектрическая проницаемость будет комплексной величиной:  $\epsilon_{eff} = \epsilon_{eff} (1 - j \text{tg}\delta_{eff})$ , где  $\text{tg}\delta_{eff}$  — эффективный тангенс угла диэлектрических потерь, характеризующий диссипативные потери системы. Величина  $\text{tg}\delta_{eff}$  зависит от значений относительной диэлектрической проницаемости областей, соотношения их размеров и частоты.

На рис. 5 показаны зависимости нормированного тангенса угла диэлектрических потерь неоднородности «диэлектрик — воздух» от нормированной толщины воздушного зазора при  $kh \rightarrow 0$ . Эти зависимости являются нижними асимптотами аналогичных зависимостей при  $kh \neq 0$ . Как следует из рисунка, уменьшение толщины диэлектрика  $h$  не только повышает эффективность управления, но и приводит к уменьшению диэлектрических потерь.

### Заключение

Таким образом, для эффективного управления характеристиками диэлектрической неоднородности за счет изменения расстояния от металлической плоскости до диэлектрика необходимо использовать ЛМ-колебания, особенностью которых является наличие составляющей электрического поля, перпендикулярной к границе раздела «диэлектрик — воздух». Изменение размеров воздушной неоднородности приводит к сильному возмущению электромагнитного поля и, в результате, к изменению дисперсионных характеристик. Требуемые перемещения для создания перестраиваемых устройств составляют единицы процентов от толщины диэлектрика и доступны для современных пьезоэлектрических, электрострикционных актюаторов, а также микроэлектромеханических систем.

Пределы изменения эффективной диэлектрической проницаемости растут с уменьшением произведения рабочей частоты на толщину диэлектрика. При малых значениях этого произведения эффективная диэлектрическая проницаемость может изменяться от относительной проницаемости материала диэлектрика до единицы за счет микроперемещений металлической плоскости над диэлектриком. Столь высокая управляемость не может быть достигнута другими способами, включая использование нелинейности сегнетоэлектриков.

Установленный критерий максимальной толщины диэлектрика, при котором наблюдается диэлектрический эффект, вместе с условиями согласования цепи за счет уменьшения характеристического сопротивления в структуре с тонкослойным диэлектриком позволяет найти компромисс между эффективностью управления и размерами устройств.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Поплавко Ю. М., Молчанов В. И., Пашков В. М. и др. Перестраиваемые СВЧ-устройства с электромеханическим управлением // Техника и приборы СВЧ. — 2009. — Вып. 1. — С. 49—59. [Poplavko Yu. M., Molchanov V. I., Pashkov V. M. i dr. // Tekhnika i pribory SVCh. 2009. Iss. 1. P. 49]
2. Poplavko Yu. M., Prokopenko Yu. V., Molchanov V. I., Dogan A. Frequency-tunable microwave dielectric resonator // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. — 2001. — Vol. 48, N 6. — P. 1020—1027.
3. Голубева И. П., Поплавко Ю. М., Прокопенко Ю. В. МЭМС-фазовращатели на микрополосковой и компланарной линии с пьезоуправлением // Электроника и связь. — 2006. — Ч. 2. — С. 17—20. [Golubeva I. P., Poplavko Yu. M., Prokopenko Yu. V. // Elektronika i svyaz'. 2006. Part 2. S. 17]

4. Егоров Ю. В. Частично заполненные прямоугольные волноводы. — Москва: Сов. радио, 1967. [Egorov Yu. V. Chastichno zapolnennye pryamougol'nye volnovody. Moskva: Sov. radio, 1967]

*Дата поступления рукописи  
в редакцию 28.02 2012 г.*

**Prokopenko Yu. V. Controllability range of dielectric inhomogeneity located between the metal planes.**

*Keywords: micromechanical control, effective dielectric constant, dielectric inhomogeneity.*

Controllability assessment of the characteristics of dielectric inhomogeneity, located between the metal planes, as part of micromechanically controlled microwave devices has been obtained. It is shown that with the micromovements of the metal plane over the dielectric, the effective dielectric constant of heterogeneity varies from the relative permeability value to one. The authors obtained smallness criteria of the thickness of dielectric or the frequency, at which the dielectric effect is not observed. The results can be used in design of electro-mechanically controlled microwave devices using piezoelectric and electrostrictive actuators and microelectromechanical system.

Ukraine, NTUU «Kyiv Polytechnic Institute».

**Прокопенко Ю. В. Межі керованості діелектричної неоднорідності, розташованої між металевими площинами.**

*Ключові слова: мікромеханічне управління, ефективна діелектрична проникність, діелектрична неоднорідність.*

Отримано оцінки керованості характеристиками розташованої між металевими площинами діелектричної неоднорідності як елемента мікромеханічних керованих НВЧ-пристроїв. Показано, що при мікропереміщеннях металевої площини над діелектриком ефективна діелектрична проникність неоднорідності може змінюватися від значення відносної проникності діелектрика до одиниці. Отримано критерії малості товщини діелектрика або частоти, при яких діелектричний ефект не спостерігається. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні електро-механічних керованих НВЧ-пристроїв з використанням п'єзоелектричних і електрострикційних актюаторів або мікроелектромеханічних систем.

Україна, НТУУ «Київський політехнічний інститут».

УДК 621.372.54

А. А. ПАРФИЛОВ

Украина, г. Киев, ПНДП «Элисат» ОАО «НПП «Сатурн»

E-mail: elisat@online.ua

## МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ РАСЧЕТА ПЕРЕСТРАИВАЕМЫХ КОАКСИАЛЬНЫХ ПОЛОСОВЫХ ФИЛЬТРОВ СВЧ

*В статье рассмотрены особенности моделей и алгоритмов, применяемых при расчете характеристик коаксиальных полосовых фильтров СВЧ с механической перестройкой, на основании которых может быть составлена компьютерная программа расчета. Предложены способы разрешения неоднозначных моментов, возникающих при разработке аналитического алгоритма расчета перестраиваемых коаксиальных полосовых фильтров.*

**Ключевые слова:** перестраиваемые коаксиальные полосовые фильтры СВЧ, алгоритмы, коэффициенты связи, аппроксимация.

В радиотехнических системах, работающих на частотах от сотен МГц до 20 ГГц (радиорелейные и тропосферные станции связи, а также сотовые базовые станции и др.), селекция сигналов может осуществляться коаксиальными полосовыми фильтрами. При работе на ряде частот и применении одного антенно-фидерного устройства для передачи и приема сигнала необходимо применять набор фильтров, используемых для каждой из заданных частот. В то же время, использование одного перестраиваемого по частоте коаксиального фильтра вместо набора фильтров при работе в многочастотном режиме представляется наиболее целесообразным.

В качестве примера можно привести тракт приемопередатчика малой мощности станции дальней тропосферной связи, в котором применение такого типа фильтров обусловлено относительно малыми габаритами и весом, возмож-

ностью перестройки на рабочие частоты, оптимальные с точки зрения минимальных помех, эффективным подавлением широкополосных шумов передатчика и частоты зеркального канала.

В подобных фильтрах используются коаксиальные резонаторы, перестраиваемые путем плавного перемещения их внутренних проводников [1, том 1, с. 411]. Обычно одним из основных условий, необходимых для полноценной работы таких фильтров в конкретных изделиях, является способность поддерживать сравнительно постоянными полосу пропускания и форму характеристики фильтров при перестройке. Это становится возможным при выполнении ряда условий, в том числе при оптимальном расположении диафрагм и петель связи, что обеспечивается правильным подбором математических моделей, используемых при разработке алгоритмов расчета фильтра.

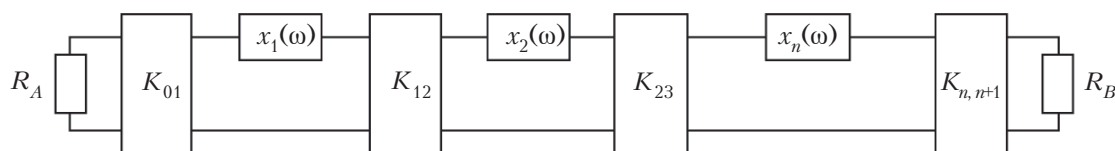


Рис. 1. Обобщенная схема фильтра с последовательными резонаторами и инверторами сопротивлений

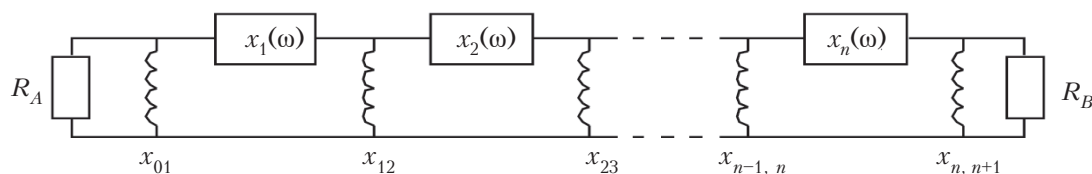


Рис. 2. Схема фильтра с параллельно-индуктивными связями



На **рис. 1** представлена обобщенная схема фильтра, содержащая ряд резонаторов, связанных инверторами сопротивлений [1, том 1, с. 416]. Здесь  $X_j(\omega)$  — реактивное сопротивление  $j$ -го резонатора,  $K_{j,j+1}$  — параметры инверторов сопротивлений,  $R_A$  и  $R_B$  — нагрузочные сопротивления на полюсах фильтра.

Чаще всего в качестве перестраиваемых фильтров используются фильтры с индуктивными связями, и тогда, при условии что ширина полосы достаточно мала (порядка нескольких процентов и менее), с хорошим приближением можно схему **рис. 1** заменить схемой, приведенной на **рис. 2** [1, том 1, с. 418].

Методика расчета фильтров такого типа, описанная в [1], хорошо поддается программированию, однако здесь присутствует ряд неоднозначностей. Их рассмотрению и описанию путей преодоления посвящена настоящая статья.

### Поиск коэффициентов связи

Первый момент, требующий рассмотрения — это выбор оптимальных значений коэффициентов связи резонаторов и нагруженных добротностей крайних резонаторов. В свою очередь, для вычисления коэффициентов связи сначала требуется найти электрическую длину  $\theta$  между короткозамкнутыми резонаторами и индуктивными диафрагмами связи, а для нагруженных добротностей — электрическую длину  $\theta_A$  между короткозамкнутыми резонаторами и входной/выходной петлями связи. Коэффициенты связи между резонаторами  $k$  и нагруженные добротности  $Q_e$  для фильтра, представленного на **рис. 2**, будут соответственно определяться так, как описано в [1, том 1, с. 422]:

$$k_{j,j+1} = \frac{4(X_{j,j+1})_m f_0 \cos^2[(\theta)_m f_0/(f_0)_m]}{\pi Z_0 (f_0)_m}, \quad (1)$$

$$j = 1, \dots, n-1,$$

$$(Q_e)_A = \frac{\frac{\pi}{4} Z_0 R_A}{(X_{01})_m^2 \frac{f_0^2}{(f_0)_m^2} \cos^2\left[(\theta_A)_m \frac{f_0}{(f_0)_m}\right]}, \quad (2)$$

где  $(X_{j,j+1})_m$  — реактивное сопротивление  $(j, j+1)$ -й индуктивности связи;

$f_0$  — любая заданная частота настройки фильтра;

$Z_0$  — волновое сопротивление линии резонатора.

Индекс  $A$  здесь и далее означает принадлежность величины к полюсу  $A$ , индекс  $m$  указывает, что параметр вычислен на средней частоте диапазона перестройки  $(f_0)_m$ . Выражение с индексом  $B$ , аналогичное (2), применяется и для нагруженной добротности  $(Q_e)_B$  для полюса  $B$ .

Условия постоянства формы характеристики и полосы пропускания будут описываться следующими соотношениями [1, том 1, с. 423]:

$$(Q_e)_A = [(Q_e)_A]_m \frac{f_0}{(f_0)_m}; \quad (3)$$

$$(Q_e)_B = [(Q_e)_B]_m \frac{f_0}{(f_0)_m}; \quad (4)$$

$$k_{j,j+1} = (k_{j,j+1})_m \frac{(f_0)_m}{f_0}. \quad (5)$$

Для нахождения  $(\theta_A)_m$  приравняем выражения (3) и (2) при  $f_0/(f_0)_m = P$  и  $f_0/(f_0)_m = Q$ , где  $P$  лежит в промежутке от  $2/3$  до 1 (что соответствует диапазону перестройки от октавного до нулевого), а  $Q = 2 - P$ . Попробуем решить полученное уравнение относительно  $(\theta_A)_m$ , как рекомендовано в [1]:

$$\begin{aligned} \frac{P}{Q} &= \frac{Q^2 \cos^2[Q \cdot (\theta_A)_m]}{P^2 \cos^2[P \cdot (\theta_A)_m]} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \frac{\cos[Q \cdot (\theta_A)_m]}{\cos[P \cdot (\theta_A)_m]} = \sqrt{\left(\frac{P}{Q}\right)^3}. \end{aligned} \quad (6)$$

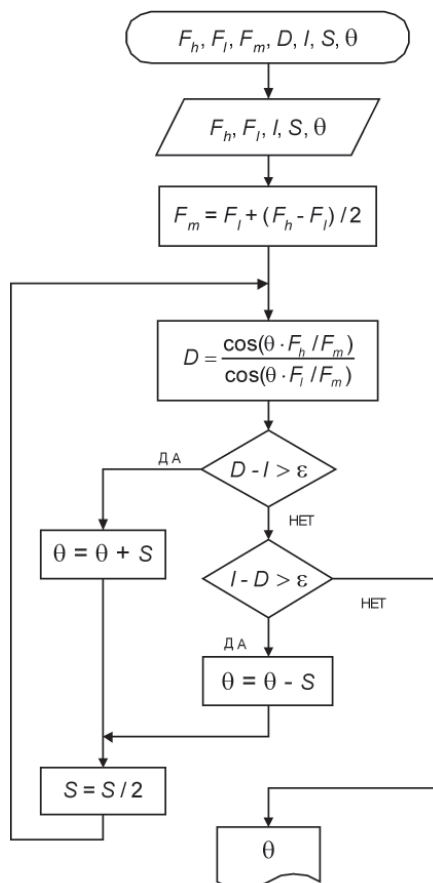
Здесь мы имеем уравнение вида  $\cos(Qx) = C \cdot \cos(Px)$ . Так как аналитическое решение данного уравнения не очевидно, идея более простого решения состоит в применении итерационного алгоритма плавного подбора значения  $(\theta_A)_m$ , для чего можно применить разновидность метода бисекции.

Для удобства введем три вспомогательные величины:  $I = \sqrt{(P/Q)^3}$ ,  $D = \frac{\cos[Q \cdot (\theta_A)_m]}{\cos[P \cdot (\theta_A)_m]}$  и шаг  $S$ , значение которого не критично и выбирается в процессе написания конкретной программы. Кроме того, перед подбором также нужно задать  $(\theta_A)_m$ . В [1, том 1, с. 423] приводится расчетное значение  $(\theta_A)_m = 0,9675$  рад для случаев  $f_0/(f_0)_m = 0,7$  и  $f_0/(f_0)_m = 1,3$ . Можно показать, что если задать это значение как начальное, и затем итерациями с помощью цикла приближаться к истинному значению  $(\theta_A)_m$ , задавая значения  $f_0/(f_0)_m$ , довольно близкие к 1 (например, 0,9999 и 1,0001), то получим:

$$\lim_{f_0/(f_0)_m \rightarrow 1} (\theta_A)_m = 0,988241. \quad (7)$$

Это и будет значением  $(\theta_A)_m$  для частного случая, когда  $f_0/(f_0)_m = 1$ , т. е. когда фильтр не имеет диапазона перестройки. В дальнейшем целесообразнее брать в качестве исходного именно это значение  $(\theta_A)_m$ .

Теперь следует организовать итерационный цикл с вычислением значения  $D$  и сравнением

Рис. 3. Блок-схема алгоритма для нахождения  $\theta$ 

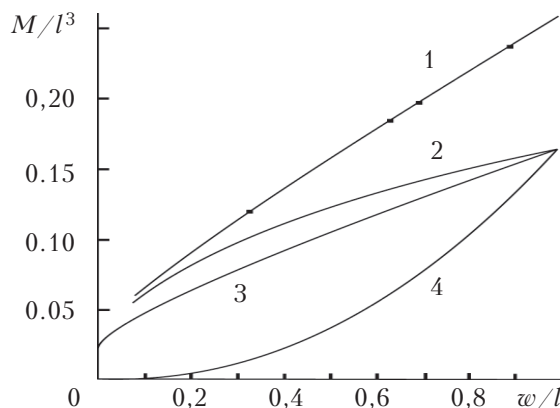
величин  $l$  и  $D$ . В зависимости от того, какая из них будет больше, к  $(\theta_A)_m$  будет прибавляться или отниматься величина  $S$  с последующим делением  $S$  пополам. Затем снова вычисляется  $D$ , и так до тех пор, пока  $l$  и  $D$  не станут равны между собой (для чисел с плавающей точкой целесообразна проверка не на абсолютное равенство, а на равенство в пределах определенной малой погрешности, например машинной эпсилон [2]).

В итоге мы получим искомое значение  $(\theta_A)_m$ , которое затем можно успешно применить для вычисления оптимальных значений нагруженных добротностей крайних резонаторов. Аналогичным образом вычисляется параметр  $\theta_m$ : приравниваются выражения (1) и (5), и при тех же самых частотах полученное уравнение разрешается относительно  $\theta_m$ .

Графическое отображение итерационного алгоритма показано на рис. 3. Здесь  $F_h$ ,  $F_l$ ,  $F_m$  — верхняя, нижняя и средняя частоты перестройки соответственно;  $\varepsilon$  — малая погрешность (машинная эпсилон).

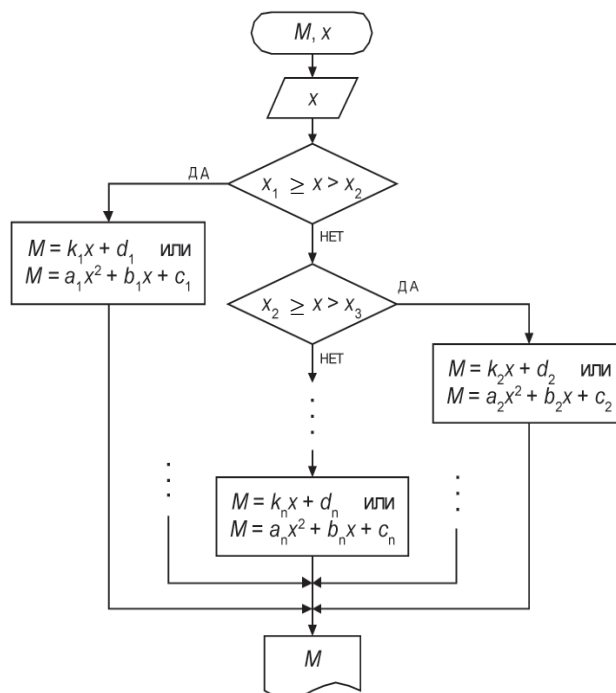
### Корректировка размеров диафрагм

Для определения размеров диафрагм связи разных типов с приемлемой точностью, необходимо знать коэффициенты магнитной поляризуемости  $M_1$  ( $M_2$ ), значения которых были в

Рис. 4. Коэффициенты магнитной поляризуемости для прямоугольной (1), овальной (2) и эллиптических (3, 4) диафрагм связи: 1, 2, 3 —  $M_1$ ; 4 —  $M_2$ 

свое время вычислены или же получены Коном экспериментально в электролитической ванне [1, том 2, с. 199]. Примеры  $M$ -коэффициентов для разных диафрагм [2, с. 200] представлены на рис. 4.

Для программного способа определения размеров диафрагм связи из этих графиков можно сразу получить некоторые значения  $M_1$ , соответствующие дискретным значениям отношения ширины диафрагмы к ее длине  $w/l$ , которые затем можно представить в виде двумерных массивов. Однако это будет лишь конечное количество дискретов, не дающее соответствующего значения  $M_1$  для произвольного отношения  $w/l$ .

Рис. 5. Блок-схема алгоритма для нахождения  $M$ -коэффициентов

Поэтому гораздо гибче и эффективней будет использовать кусочную аппроксимацию.

Для этого график кривой разбивается на несколько частей в местах наблюдаемых изломов линии. Полученные отрезки аппроксимируются линейными или параболическими зависимостями, используя которые можно легко вычислить произвольные значения  $M$ , лежащие в пределах линии на графике.

Графическое отображение обобщенного алгоритма для вычисления  $M$ -коэффициентов с использованием аппроксимации показано на **рис. 5**. Здесь  $x$  — задаваемое отношение  $w/l$ ;  $x_1, x_2, x_3$  — значения  $w/l$  для точек изломов.

### Заключение

Предложенная практическая методика расчета перестраиваемых коаксиальных полосовых фильтров СВЧ с механической перестройкой, основанная на работах Маттея, хорошо реализуется с помощью приведенных алгоритмов. Эффективность этих алгоритмов расчета перестраиваемых коаксиальных полосовых фильтров была экспериментально апробирована при исследовании реальных характеристик перестраиваемого коаксиального полосового фильтра, разработанного для приема-передающего блока базовой цифровой радиорелейной станции. При этом отмечено хорошее совпадение результатов моделирования с экспериментальными — относительная погрешность не превышает 4%.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Маттей Д. Л. и др. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. В двух томах. — Москва: Связь, 1971. [Mattei D. L. i dr. Fil'try SVCh, soglasuyushchie tsepi i tsepi svyazi. V dvukh tomakh. Moscow, Svyaz', 1971]
2. Машинная арифметика и идиомы численного программирования. <http://ltwood.wikidot.com/float> [Mashinnaya arifmetika i idiomy chislennoho programmirovaniya. <http://ltwood.wikidot.com/float>]
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. — Москва: Наука, 1968. [Korn

G., Korn T. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov. Moscow, Nauka, 1968]

Дата поступления рукописи  
в редакцию 29.04 2011 г.

Parfilov A. A. **Methods for the algorithms for calculation of tunable coaxial bandpass microwave filters.**

Keywords: *tunable coaxial bandpass microwave filters, algorithms, coupling coefficients, approximation.*

The article describes the features of the models and algorithms used for calculation of the characteristics of mechanically tunable coaxial bandpass microwave filters, on the basis of which a calculation computer program can be written. The ways are proposed to resolve ambiguities that arise in the course of development of the analytical algorithm for calculating coaxial tunable bandpass filters.

Ukraine, Kiev, Elisat PSSE of Saturn SPE OJSC.

Парфілов О. А. **Методи формування алгоритмів для розрахунку перестроюваних коаксіальних смугових фільтрів НВЧ.**

Ключові слова: *перестроювані коаксіальні смугові фільтри НВЧ, алгоритми, коефіцієнти зв'язку, апроксимація.*

У статті розглянуто особливості моделей і алгоритмів, застосовуваних при розрахунку характеристик коаксіальних смугових фільтрів НВЧ з механічним перестроюванням, на базі яких може бути складена комп'ютерна програма розрахунку. Запропоновано способи вирішення неоднозначних моментів, що виникають при розробці аналітичного алгоритму розрахунку перестроюваних коаксіальних смугових фільтрів.

Україна, м. Київ, ВНДП «Елісат» ВАТ «НВП «Сатурн».

редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

- Технология контактов к карбиду кремния (Украина, г. Киев)
- Сигма-дельта модулятор: петлевые фильтры и шум квантования (Украина, г. Киев)
- Исследование процесса формирования токовых характеристик кремниевого фотодиода с выпрямляющими барьерами (Узбекистан, г. Ташкент)
- Двухкаскадные модули на основе  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  —  $\text{SiGe}$  для термоэлектрических генераторов (Украина, г. Черновцы)
  - Модуляционная поляриметрия полного внутреннего отражения, нарушенного алмазоподобными пленками (Украина, г. Киев)
  - Метод жидкофазной эпитаксии толстых слоев (Украина, г. Одесса)
  - Модульный спектрометр для оценки качества технологии твердотельных детекторов (Украина, г. Киев)



в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле



УДК 621.315.592

Д. т. н. А. А. ДРУЖИНИН, А. П. КУТРАКОВ, к. т. н. И. И. МАРЬЯМОВА

Украина, Национальный университет «Львовская политехника»

E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

## ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ С ТЕНЗОРЕЗИСТОРАМИ НА ОСНОВЕ НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ

*Проведены исследования, направленные на создание тензорезистивных датчиков давления на основе нитевидных кристаллов кремния, работоспособных при высоких температурах. Использование стеклоприпоя для крепления тензорезисторов на упругих элементах датчиков из коварового сплава позволило повысить диапазон рабочих температур датчиков. На основе предложенной тензомодульной конструкции разработаны датчики давления различной модификации.*

**Ключевые слова:** кремний, тензорезистор, датчики давления, высокие температуры.

Развитие ряда областей техники, таких как авиационная, ракетно-космическая, химическая и др., выдвигает задачу создания датчиков давления, работоспособных при повышенных температурах. Большая часть существующих в настоящее время тензометрических полупроводниковых датчиков давления эксплуатируется при рабочей температуре не более 200°C из-за ограничений традиционных материалов, используемых для их изготовления [1]. Известные микроэлектронные датчики давления на основе технологии "кремний на диэлектрике" способны расширить рабочий диапазон приборов приблизительно до 450°C, однако это возможно либо на короткий промежуток времени, либо при использовании водяного охлаждения. Это связано с тем, что чувствительные элементы таких датчиков при высоких температурах имеют большую аддитивную погрешность из-за высоких механических напряжений, обусловленных различием температурных коэффициентов расширения слоев многослойной мембраны. Кроме того, чувствительные элементы микроэлектронных датчиков дав-

ления требуют применения сложного, дорогостоящего оборудования и имеют низкую надежность при ударных нагрузках и резких скачках измеряемого давления [2].

Целью настоящей работы является разработка высокотемпературных тензорезистивных датчиков давления специального назначения на основе новых конструкторско-технических решений.

В последнее время основным материалом для изготовления чувствительных элементов датчиков является кремний, что обусловлено его технологичностью, низкой стоимостью и работоспособностью в широком диапазоне температур [3–5]. Полупроводниковые тензорезисторы на основе нитевидных кристаллов (НК) кремния имеют высокую механическую прочность, приближающуюся к теоретическому пределу прочности данного материала (они выдерживают деформацию растяжения до 0,5–1% и свыше 10<sup>8</sup> циклов знакопеременной деформации [6]). Разработанная технология создания омических контактов методом импульсной сварки платиновой микропроволоки с НК кремния обеспечи-

Таблица 1

*Параметры тензорезисторов на основе НК p-Si с разным удельным сопротивлением*

Параметр	Значения параметров для тензорезисторов с различным $\rho$	
	$\rho = 0,01 - 0,02 \text{ Ом}\cdot\text{см}$	$\rho = 0,005 - 0,006 \text{ Ом}\cdot\text{см}$
Коэффициент тензочувствительности при 20°C	100...150	80...100
Сопротивление при 20°C, Ом	100...400	100...120
Температурные коэффициенты в диапазоне 20...320°C, %/°C <sup>-1</sup>		
– сопротивления	+(0,12...0,17)	+(0,15...0,17)
– тензочувствительности	-0,20	-0,12

вадет надежную работу тензорезисторов в разных динамических режимах и при повышенных температурах (до 500°C), поскольку температура эвтектики Si — Pt составляет 830°C. Таким образом, возможность работы этих тензорезисторов при высоких температурах обеспечивается как свойствами самого кремния, в котором микропластичность наблюдается только при температурах выше 500°C, так и технологией изготовления тензорезисторов.

В процессе исследований нами были определены оптимальные уровни легирования НК кремния бором для изготовления тензорезисторов, пригодных для работы в различных температурных диапазонах. В табл. 1 приведены основные параметры тензорезисторов на основе НК *p*-Si с разным удельным сопротивлением  $\rho$ . Тензорезисторы на основе сильнолегированных НК кремния *p*-типа с  $\rho = 0,005 - 0,006$  Ом·см обладают оптимальными характеристиками для создания на их основе высокотемпературных датчиков давления: линейной зависимостью сопротивления от температуры и минимальной зависимостью коэффициента тензочувствительности от температуры в диапазоне 20...350°C.

Для расширения температурного диапазона работы тензорезистивных датчиков механических величин на основе НК кремния в сторону высоких температур необходимо отказаться от известных высокотемпературных полимерных клеев и цементов, используемых для закрепления тензорезисторов на упругих элементах датчиков (мембранах, балках и др.) [7, 8] и перейти к принципиально новым методам крепления тензорезисторов, которые способны обеспечить их фиксацию при повышенных температурах. В результате проведенных исследований для этой цели был выбран стеклоприпой С51-1 с коэффициентом термического расширения (КТР), равным  $4,9 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , близким к КТР кремния  $(2,5 - 4,2) \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  в диапазоне температур от комнатной до 550°C. Температура размягчения стеклоприпоя С51-1 составляет 570°C. В качестве материала упругого элемента датчиков был выбран коваровый сплав 29НК, КТР которого равен  $4,6 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  [9, 10], поскольку при этом создается соединение «кремний — стеклоприпой — ковар», согласованное по КТР. Следует также отметить, что технология изготовления вакуумплотных соединений на основе спая «ковар — стекло» используется в электронной промышленности при изготовлении электровакуумного оборудования.

На кремниевый тензорезистор, закрепленный на упругом элементе датчика, действует термическая деформация, обусловленная различием КТР кремния и материала упругого элемента. Величина термической деформации рассчитывалась по формуле

$$\varepsilon_T(T) = \gamma \int_{T_0}^T [\alpha_s(T) - \alpha_c(T)] dt,$$

где  $\alpha_s$ ,  $\alpha_c$  — температурные коэффициенты линейного расширения материалов упругого элемента и тензорезистора соответственно;

$T_0$  — температура полимеризации адгезива.

В приведенной формуле коэффициент  $\gamma$  характеризует эффективность передачи деформации от упругого элемента к тензорезистору. Для предложенного способа крепления тензорезистора установлено, что  $\gamma = 0,9$ .

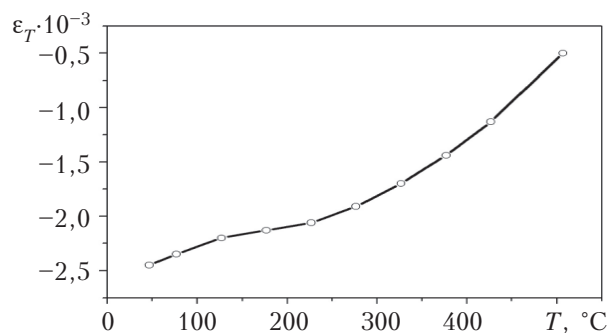


Рис. 1. Температурная зависимость термической деформации Si-тензорезистора, закрепленного стеклоприпоем на упругом элементе из ковара 29НК

Как видно из рис. 1, термическая деформация, действующая на кремниевый тензорезистор, уменьшается с повышением температуры, что обеспечивает минимальные термические напряжения и стабильность выходных характеристик датчиков при работе в диапазоне температур от комнатной до 350°C.

Среди многих конструкций датчиков давления наибольшую универсальность, на наш взгляд, имеет конструкция, в которой используется система «мембрана — шток — балка» (рис. 2). Преимуществами такой конструкции перед мембранной является более линейная деформационная характеристика упругого элемента, возможность уменьшения влияния температуры на полупроводниковые тензорезисторы, что позволяет уменьшить температурную погрешность датчика.

При создании датчиков давления использовалась разработанная нами конструкция датчика с универсальным тензомодулем — упруго-чувствительным элементом с закрепленными на нем тензорезисторами. Основу конструкции тензомодуля составляет кольцо с консольной балкой, по обе стороны которой закреплены два

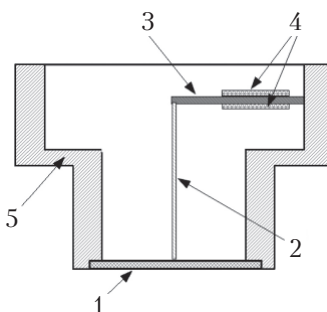


Рис. 2. Принципиальная конструкция датчика давления:

1 — мембрана; 2 — шток; 3 — балка; 4 — тензорезистор; 5 — корпус

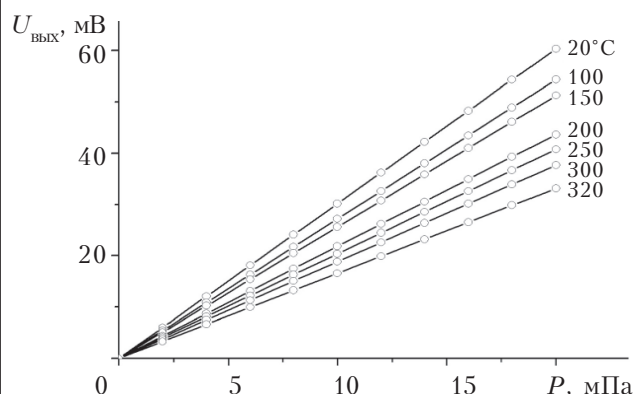


Рис. 3. Зависимость выходного сигнала датчика с универсальным тензомодулем на основе Si-тензорезисторов от давления при различных температурах

тензорезистора. Специальная форма упругого элемента позволила уменьшить нелинейность выходного сигнала датчиков до 0,01%. Разработанный универсальный тензомодуль позволяет создавать на его основе датчики для различных диапазонов давления, изменяя только геометрические размеры мембраны.

Для проведения стендовых испытаний авиационных двигателей в статическом и динамическом режимах необходимы датчики давления, которые удовлетворяли бы специфическим требованиям: малые габариты при достаточно высокой чувствительности к измеряемому давлению при повышенных температурах в широком частотном диапазоне. Были разработаны миниатюрные высокотемпературные датчики давления [11, 12] с диаметром воспринимающей мембраны 3,8 мм. Толщина мембраны датчика давления, работающего в диапазоне 0...300 кПа, составляет 60 мкм, а в диапазоне 0...20 МПа — 250 мкм. Все элементы датчиков давления выполнены из коварового сплава 29НК и соединены между собой при помощи лазерной сварки, что обеспечивает высокую жесткость и герметичность конструкции. Типичные градуировочные характеристики разработанных датчиков в диапазоне температур 20...320°C приведены на рис. 3. Здесь видно, что выходные характеристики датчиков имеют линейную зависимость во всем температурном диапазоне и достаточно высокий уровень выходного сигнала без дополнительного его усиления. Благодаря высокой тензочувствитель-



Рис. 4. Высокотемпературные датчики давления тензомодульной конструкции на основе НК кремния

Таблица 2  
Основные характеристики разработанных миниатюрных высокотемпературных датчиков давления

Параметр	Значение
Диапазон измеряемых давлений	от 0...300 кПа до 0...20 МПа
Диапазон рабочих температур	-60...+350°C
Выходной сигнал при 20°C	30 – 60 мВ
Температурный коэффициент выходного сигнала, не более	-0,14%/°C <sup>-1</sup>
Собственная частота	17 – 40 кГц
Основная погрешность	0,1 – 0,25%
Размеры: диаметр мембраны высота датчиков	3,8 – 9 мм 2 – 10 мм

ности тензорезисторов на основе НК Si *p*-типа удалось значительно повысить собственную частоту датчиков давления и уменьшить их габариты.

На рис. 4 представлено фото разработанных высокотемпературных датчиков давления, а в табл. 2 приведены их основные параметры.

Для диагностики двигателей внутреннего сгорания необходимо проводить измерения давления газов непосредственно в камере сгорания, где температура достигает 800°C. Верхняя граница температурного диапазона работы датчиков с кремниевыми тензорезисторами ограничена температурой, при которой появляется микропластичность кремния. Для таких условий была предложена конструкция, которая предусматривает охлаждение датчика жидкостью [13]. Конструкция и внешний вид разработанного датчика показаны на рис. 5. Его упругий элемент изготовлен в виде двух цилиндров, жестко соединенных нижним и верхним основаниями, что позволяет получить деформацию с разным знаком. Корпус датчика имеет канал для прохождения охлаждающей жидкости. Конструкция упругого элемента позволяет полностью защитить тензорезисторы от охлаждающей жидкости.

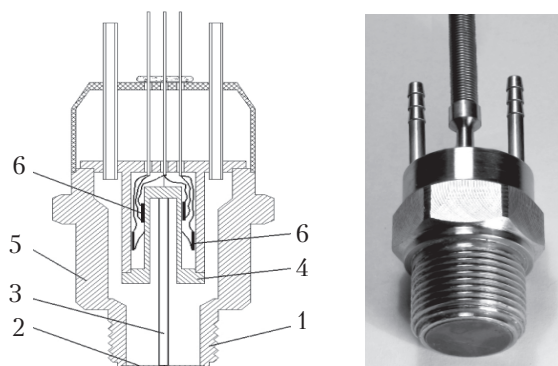


Рис. 5. Конструкция и внешний вид высокотемпературного датчика с внешним охлаждением с кремниевыми тензорезисторами:  
1 — штуцер; 2 — мембрана; 3 — шток; 4 — упругий элемент; 5 — корпус; 6 — тензорезисторы



Характеристики датчика исследовались в диапазоне давлений  $(0...4) \cdot 10^5$  Па и температур от 20 до 400°C (без внешнего охлаждения) и до 900°C с охлаждением. Градуировочные характеристики датчика линейны во всем исследованном диапазоне температур и давлений. Величина выходного сигнала разработанного датчика при температуре 400°C (около 50 мВ) достаточна для его регистрации без усиления, а температурный коэффициент выходного сигнала датчика не превышает  $0,17\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  в диапазоне температур 20...400°C. С повышением температуры возрастает чувствительность датчика, что связано с уменьшением модуля упругости и, соответственно, с уменьшением жесткости всей упругой системы датчика. Погрешность датчика в диапазоне температур 20...900°C составляет  $\pm 0,5\%$ , а дополнительная температурная погрешность датчика давления меньше, чем  $0,03\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ .

\*\*\*

Таким образом, на основе проведенных исследований и конструкторских разработок были созданы высокотемпературные датчики давления различной модификации с тензорезисторами на основе сильнолегированных НК кремния р-типа. Предложенная тензомодульная конструкция датчиков давления благодаря своей универсальности обеспечивает возможность работы датчиков в разных диапазонах давления для исследования статических и динамических процессов в жидкостях и газах. Разработанные датчики нашли применение в различных отраслях промышленности, таких как авиационная, моторостроение, нефтедобывающая и другие.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Гуревич О. С., Буряченко А. Г., Ранченко Г. С. Перспективы развития датчиков давления для авиационных и общепромышленных ГТД // Авиационно-космическая техника и технология. — 2007. — № 10. — С. 137–141. [Gurevich O. S., Buryachenko A. G., Ranchenko G. S. // Aviatcionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. 2007. N 10. P. 137]
2. Мокров Е. А., Баринов И. Н. Разработка высокотемпературных полупроводниковых датчиков давления // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2009. — № 1. — С. 23–27. [Mokrov E. A., Barinov I. N. // Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika. 2009. N 1. P. 23]
3. Ваганов В. И. Интегральные тензопреобразователи. — Москва: Энергоатомиздат, 1983. [Vaganov V. I. Integral'nye tenzopreobrazovateli. Moskva: Energoatomizdat, 1983]
4. Агеев О. А., Мамиконова В. М., Петров В. В. и др. Микроэлектронные преобразователи неэлектрических величин. — Таганрог: ТРТУ, 2000. [Ageev O. A., Mamikonova V. M., Petrov V. V. i dr. Mikroelektronnye preobrazovateli neelektricheskikh velichin. Taganrog TRTU, 2000]
5. Лепих Я. И., Гордиенко Ю. О., Дружинин А. О. та ін. Створення мікроелектронних датчиків нового покоління для інтелектуальних систем. — Одеса: Астропринт, 2010. [Lepikh Ya. I., Gordienko Yu. O., Druzhinin A. O. та ін. Stvorennnya mikroelektronnikh datchikiv novogo pokolinnnya dlya intelektual'nikh sistem. Odesa: Astroprint, 2010]
6. Maryamova I., Tykhan M., Kuttrakov A. et al. Semiconductor mechanical sensors for adverse and dynamic conditions // XIV IMEKO World Congress. — Finland, Tampere, 1997. — Vol. IXA. — P. 99–103.
7. Петрова А. П. Термостойкие клеи. — Москва: Химия, 1977. [Petrova A. P. Termostoikiye klei. Moskva: Khimiya, 1977]

8. Клокова Н. П. Тензорезисторы. — Москва: Машиностроение, 1990. [Klokov N. P. Tenzorezistory. Moskva: Mashinostroyeniye, 1990]
9. Молотиллов Б. В. Прецизионные сплавы. Справочник. — Москва: Металлургия, 1974. [Molotillov B. V. Pretsizionnye splavy. Spravochnik. Moskva: Metallurgiya, 1974]
10. Новикова С. И. Тепловое расширение твердых тел. — Москва: Наука, 1974. [Novikova S. I. Teplovoe rasshireniye tverdykh tel. Moskva: Nauka, 1974]
11. Дружинин А. А., Марьямова И. И., Лавитская Е. Н. и др. Полупроводниковые сенсоры механических величин на основе микрокристаллов кремния для экстремальных условий // Микросистемная техника. — 2001. — № 9. — С. 3–8. [Druzhinin A. A., Mar'yamova I. I., Lavitskaya E. N. i dr. // Mikrosistemnaya tekhnika. 2001. N 9. P. 3]
12. Дружинин А. А., Марьямова И. И., Лавитская Е. Н. и др. От полупроводниковых тензорезисторов к микроэлектронным датчикам // Датчики и системы. — 2001. — № 6. — С. 2–7. [Druzhinin A. A., Mar'yamova I. I., Lavitskaya E. N. i dr. // Datchiki i sistemy. 2001. N 6. P. 2]
13. Дружинин А. О., Кутраков О. П., Марьямова И. И. Тензорезистивні сенсори тиску на основі ниткоподібних кристалів кремнію для широкого діапазону температур // Вісник НУ «Львівська політехніка». Електроніка. — 2011. — № 7–8. — С. 64–71. [Druzhinin A. O., Kuttrakov O. P., Mar'yamova I. I. // Visnik NU "L'viv's'ka politekhnika". Elektronika. 2011. N 708. P. 64]

*Дата поступления рукописи  
в редакцию 07.06 2012 г.*

Druzhinin A. A., Kuttrakov A. P., Maryamova I. I.  
**High-temperature pressure sensors with strain gauges  
based on silicon whiskers.**

*Key words: silicon, strain gauge, pressure sensor,  
high temperature.*

Studies aimed at the creating of piezoresistive pressure sensors based on silicon whiskers, operating at high temperatures were carried out. Using the glass adhesive for strain gauges mounting on spring elements of covar alloy gave the possibility to elevate the sensor's operating temperature range. Several modifications of pressure sensors based on the proposed strain-unit design were developed.

Ukraine, Lviv National University «Lviv Polytechnic».

Дружинин А. О., Марьямова И. И., Кутраков О. П.  
**Високотемпературні датчики тиску з тензорезисторами на основі ниткоподібних кристалів кремнію.**

*Ключові слова: кремній, тензорезистор, датчики  
тиску, високі температури.*

Проведено дослідження, спрямовані на створення тензорезистивних датчиків тиску на основі ниткоподібних кристалів кремнію, працездатних при високих температурах. Використання склоприпою для кріплення тензорезисторів на пружних елементах датчиків з коварового сплаву дозволило підвищити діапазон робочих температур датчиків. На основі запропонованої тензомодульної конструкції розроблено датчики тиску різної модифікації.

Україна, Національний університет «Львівська політехніка».

УДК 621.315.292; 621.382.232

К. ф.-м. н. О. Н. СИДОР, к. т. н. О. А. СИДОР, д. ф.-м. н. З. Д. КОВАЛЮК,  
д. ф.-м. н. В. И. ДУБИНКО<sup>1</sup>

Украина, Черновицкое отделение ИПМ им. И. Н. Францевича НАНУ;  
<sup>1</sup>ИНИЦ «Харьковский физико-технический институт» НАНУ

E-mail: chimsp@ukrpost.ua

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОДИОДОВ СО СТРУКТУРОЙ «СОБСТВЕННЫЙ ОКСИД – InSe», ОБЛУЧЕННЫХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

*Исследовано влияние электронов с эффективной энергией 12 МэВ в диапазоне доз 0,33–33 Мрад на электрические и фотоэлектрические свойства фотодиодов со структурой «собственный оксид – p-InSe». Установлено, что минимальная доза облучения улучшает их основные параметры, а максимальная незначительно снижает ток короткого замыкания и fotocувствительность приборов. При этом наблюдается рост вольт-ваттной чувствительности и минимальное увеличение коэффициента неидеальности вольт-амперной характеристики.*

**Ключевые слова:** слоистые кристаллы, селенид индия, фотодиод, высокоэнергетические электроны, радиационные дефекты.

Одними из перспективных материалов для создания полупроводниковых приборов, пригодных для фотоэлектроники, являются анизотропные кристаллы группы  $A^3B^6$ . Слабая ван-дер-ваальсова связь между их слоями позволяет легко получать подложки с атомарно-гладкой поверхностью, что в сочетании с простой технологией термического окисления дает возможность создавать поверхностно-барьерные диоды с высокими удельными характеристиками [1, 2]. Не менее важным является наличие в слоистых кристаллах большой плотности собственных дефектов (до  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ ), что служит отправным свойством для их использования в условиях высокодозовых радиационных нагрузок. Однако число работ, посвященных поведению приборов на основе полупроводников группы  $A^3B^6$  (в большинстве случаев — барьеров Шоттки) под действием высокоэнергетического излучения, крайне ограничено. Соответственно, по-прежнему актуальным является изучение влияния различных видов проникающей радиации в широком диапазоне доз на их электрические и фотоэлектрические характеристики. В настоящей работе эти вопросы рассматриваются на примере полупроводниковой структуры «собственный оксид – p-InSe».

### Методика эксперимента

Монокристаллы селенида индия ( $\gamma$ -политип) выращивали вертикальным методом Бриджмена из предварительно синтезированных слитков. В качестве легирующего элемента для получения дырочной проводимости использовали кадмий. Его введение в количестве 0,2% от массы приводило к росту концентрации нескомпенсирован-

ных акцепторов (примерно до  $10^{13} \text{ см}^{-3}$ ) и подвижности дырок (около  $80 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$  при 300 К). Для изготовления фотодиодов (ФД) использовали пластинки селенида индия толщиной 0,3–0,4 мм. Их подвергали термической обработке на воздухе при температуре 700 К. В результате на поверхности пластин образовывались однородно окрашенные слои собственного оксида. В качестве омических контактов использовали чистый индий.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) ФД определяли на установке «Schlumberger SI 1255» с компьютерным интерфейсом. Минимальная разрешающая способность по напряжению и по току составляла, соответственно, 100 мкВ и 100 пА с допускаемыми погрешностями измерения  $\pm 0,2\%$ .

Спектры fotocувствительности ФД получали с помощью монохроматора МДР-23. Спектральное распределение фотоотклика определяли отношением фототока к числу падающих фотонов. Измерение сигнала с ФД проводили на микровольтнаноамперметре Ф-136 в режиме постоянного тока со значением основной погрешности 1,5%. Развертку спектра осуществляли с шагом, не превышающим 200 нм.

Фотоэлектрические параметры исследовали на приборе В7-21А с допускаемыми значениями погрешностей измерения напряжения постоянного тока и силы постоянного тока  $\pm 0,22$  и  $\pm 0,46\%$  соответственно.

Все измерения проводились при комнатной температуре.

Облучение полупроводниковых образцов проводили на линейном ускорителе КУТ-10 с энергией электронов 12 МэВ. Время облучения выбиралось таким, чтобы флюенсы составили

$10^{13} - 10^{15}$  электрон/см<sup>2</sup>, что соответствовало дозам 0,33–33 Мрад.

### Результаты и их обсуждение

Фотодиоды на основе полупроводниковой структуры «собственный оксид – *p*-InSe» облучали разными дозами электронов. Прямые ветви полученных ВАХ ФД на рис. 1 показывают, что структуры обладают четко выраженными диодными свойствами. Об этом свидетельствуют значения коэффициента выпрямления  $K_{\text{вып}}$  из таблицы. Ток  $J$  на начальных участках ВАХ при малых прямых смещениях  $U$  (до 0,3 В) растет по известному экспоненциальному закону [3, с. 100]

$$J = J_{\text{нас}} \left[ \exp\left(\frac{qU}{nkT}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

где  $J_{\text{нас}}$  – плотность тока насыщения;  
 $q$  – элементарный заряд;  
 $n$  – коэффициент неидеальности ВАХ;  
 $k$  – постоянная Больцмана;  
 $T$  – температура,

а затем (при  $U > 0,3$  В) начинает отклоняться от него. Основной причиной, ограничивающей ток в исследуемых ФД, является низкая электропроводность  $\sigma_{\perp c}$  в направлении, перпендикулярном слоям (вдоль кристаллографической оси *C*).

Для необлученных ФД коэффициент неидеальности ВАХ, определенный по наклону графика зависимости  $\ln J = f(U)$ , принимал значение  $n=1,4$ , что указывает на одновременное существование конкурирующих механизмов токопрохождения. Кроме диффузионной составляющей тока, для которой  $n=1$ , в данных диодах имеет место рекомбинационная составляющая, для которой  $n=2$ . В пользу этого свидетельствуют зна-

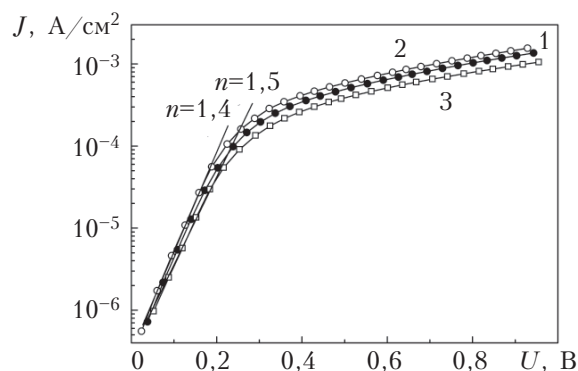


Рис. 1. Прямые ветви ВАХ исследуемого ФД до (1) и после электронного облучения дозами 0,33 Мрад (2) и 33 Мрад (3)

чительный диффузионный потенциал ( $\approx 0,7$  В), низкая концентрация и подвижность носителей заряда в селениде индия дырочного типа, а также малая диффузионная длина неосновных носителей поперек слоев в направлении *p*–*n*-перехода [4]. При этом не исключается, что при  $n > 1$  на его значение могут оказывать влияние неконтролируемые шунтирующие токи [5]. В результате электронного облучения наблюдается несущественное изменение параметра  $n$  механизмов токопереноса через потенциальный барьер и, как следствие, доза 0,33 Мрад не влияет на коэффициент неидеальности ВАХ ( $n=1,4$ ), рост (до  $n=1,5$ ) происходит при дозе в 100 раз большей (рис. 1). Последнее свидетельствует об увеличении рекомбинационной компоненты тока, протекающего через *p*–*n*-переход. Причиной является возникновение дефектов под действием высокоэнергетического излучения, которые увеличивают концентрацию рекомбинационных цент-

Параметры InSe-фотодиодов до и после электронного облучения

Параметры фотодиодов	Доза облучения, Мрад		
	0	0,33	33
Коэффициент выпрямления $K_{\text{вып}}$ (при $ U  = 1$ В)	235±5	270±5	225±5
Коэффициент неидеальности ВАХ $n$	1,4±0,05	1,4±0,05	1,5±0,05
Напряжение холостого хода $U_{\text{хх}}$ , мВ	550±5	560±5	570±5
Ток короткого замыкания $J_{\text{кз}}$ , мА/см <sup>2</sup>	3,9±0,1	4,2±0,1	3,7±0,1
Последовательное сопротивление $R_{\text{п}}$ , Ом·см <sup>2</sup>	300±5	275±5	325±5
Токовая фоточувствительность $S_I$ ( $\lambda=0,98$ мкм), мА/Вт	88±1	98±1	82±1
Вольтовая фоточувствительность $S_U$ ( $\lambda=0,98$ мкм), кВ/Вт	11±1	13±1	16±1
Крутизна длинноволновой границы спектра фотоотклика $S$ , эВ <sup>–1</sup>	51±1	67±1	60±1
Ширина спектра фотоотклика на полувысоте $\delta_{1/2}$ , эВ	0,602±0,001	0,901±0,001	1,005±0,001
Длина волны, соответствующая основному максимуму фотоотклика, $\lambda_{\text{мах}}$ , мкм	0,66±0,01		



ров в области пространственного заряда [6]. Для исследуемых структур незначительный рост  $n$  при максимальной дозе облучения доказывает, что количество радиационных дефектов не превышает количества собственных дефектов в слоистом кристалле. При облучении прямые токи, величина которых определяется квазинейтральными областями исследуемых структур, увеличиваются при меньшей дозе и уменьшаются при максимальной. Это указывает на изменение последовательного сопротивления ФД  $R_{\Pi}$  (см. таблицу), что обычно связывают с изменением проводимости материала при облучении [6]. В отличие от полупроводников с одним типом химической связи (Si, Ge и т. п.), для слоистых кристаллов характерным является, если не считать собственных дефектов решетки, наличие неконтролируемых примесей в межслоевом пространстве. К тому же, при легировании InSe ионы примеси могут входить и в слои (замещая вакансии In или занимая междоузлия), и в межслоевое пространство [7, 8]. При выбранной для эксперимента концентрации легирующей добавки значительное число ионов кадмия входит в межслоевое пространство, что снижает степень пространственной неоднородности кристаллов. В то же время, образование радиационных дефектов также происходит преимущественно в межслоевых промежутках [9], где дефекты могут взаимодействовать с внедренной примесью. В результате оба вышеупомянутых процесса оказывают влияние на движение носителей вдоль кристаллографической оси  $C$  и, как следствие, изменяют величину электропроводности  $\sigma_{\parallel C}$ .

На границах спектральной зависимости фотоотклика ФД основные изменения заметны в коротковолновой области (рис. 2). В сравнении с необлученными образцами, квантовая эффективность фототока  $\eta$  в этой области после облучения возрастает, соответственно возрастает и полная ширина спектра фотоотклика на полувысоте  $\delta_{1/2}$ : с 0,6 до 1,0 эВ (см. таблицу). При этом значение  $\lambda_{\max}$ , соответствующее основному максимуму  $\eta$ , не смещается. Появление нового пика интенсивности при энергии  $h\nu \approx 2,48$  эВ, которая растет с ростом дозы, может быть связано с глубокими межзонными состояниями экситонов [10]. Только в этом случае вклад экситонов в фототок уже положителен, и происходит это вследствие их ионизации сильным электрическим полем. Последнее может возникать на локальных микрон неоднородностях гетероинтерфейса, вызванных действием высокоэнергетических электронов. Случай с максимумами на спектральных характеристиках диодов с барьером Шоттки на основе Au —  $n$ -InSe, связанных с существованием глубоких межзонных состояний экситонов, наблюдался также авторами [11].

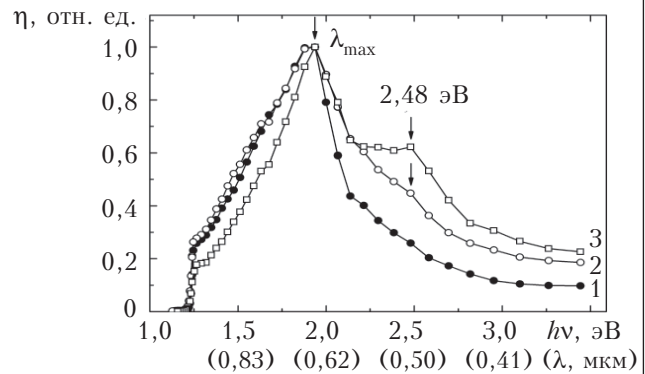


Рис. 2. Спектры фотоотклика исследуемого ФД до (1) и после электронного облучения дозами 0,33 Мрад (2) и 33 Мрад (3)

Экспоненциальная форма длинноволновой границы спектра фотоотклика позволяет ввести параметр  $S$ , который определяет ее крутизну:

$$S = \frac{d \ln \eta}{d(h\nu)}. \quad (2)$$

Параметр  $S$  для ФД со структурой «собственный оксид —  $p$ -InSe» составляет порядка  $50 \text{ эВ}^{-1}$ , что характерно для прямых межзонных переходов в InSe [12]. Он весьма чувствителен к нарушениям кристаллической решетки различного рода, что было важно в данном исследовании. При облучении малыми дозами электронов параметр  $S$  увеличился, а максимальная доза привела к его уменьшению, хотя и не до начального значения (см. таблицу). Это коррелирует с изменениями электрических характеристик, описанными выше. Подобное поведение параметра  $S$  отражает общее структурное совершенство слоистого кристалла. Другими словами, рост данного параметра ФД связан с избавлением от мелкокомасштабных нарушений кристаллической структуры, а падение — с внесением искажений в структуру за счет радиационных дефектов. Аналогичное поведение длинноволнового участка спектральной характеристики авторы наблюдали ранее в структурах на базе селенида индия при гамма-облучении [13]. Наконец, увеличение интенсивности поглощения экситона в оптических спектрах InSe интерпретировалось в [14, 15] как «залечивание» собственных структурных дефектов кристаллов.

С ростом дозы электронного облучения наблюдается некоторое увеличение и последующее уменьшение фотоотклика в спектральном диапазоне 1,2 — 2,0 эВ (рис. 2), что, вероятно, обусловлено появлением вместе с излучательными также безызлучательных центров рекомбинации. Известно [16], что высокоэнергетические электроны приводят в основном к возникновению неравновесных пар Френкеля, которые можно представить как пространственное распределение простых точечных дефектов. Такими в кри-



сталлах InSe могут быть вакансии атомов индия и атомы халькогена в междоузлиях. Точечные дефекты могут объединяться в бивакансионные комплексы  $V_{In} + V_{Se}$ . Они отвечают за безызлучательные центры рекомбинации [17], которые, накапливаясь с ростом облучения, перераспределяют на себя значительную долю рекомбинационного потока неравновесных носителей тока.

В целом следует отметить, что изучение фотоотклика (и крутизны его экспоненциального края — в частности) может служить чувствительным методом исследования влияния радиации на полупроводниковые структуры в дополнение к вольт-амперным характеристикам.

Для ФД со структурой «собственный оксид —  $p$ -InSe» после облучения дозой 0,33 Мрад наблюдалось увеличение токовой фоточувствительности  $S_I$  и монохроматической вольтовой чувствительности  $S_U$  на 11 и 20% соответственно. Последующее облучение приводило к падению величины  $S_I$  на 7% от исходного значения при росте  $S_U$  на 45%. Аналогичную динамику демонстрировали еще два параметра — ток короткого замыкания  $J_{кз}$  и напряжение холостого хода  $U_{хх}$ .

Таким образом, отсутствие значительных изменений ВАХ и спектров фотоотклика облученных электронами ФД доказывает, что количество внесенных радиационных дефектов меньше, чем количество собственных дефектов слоистого кристалла.

### Выводы

Проведенные исследования показали, что влияние высокоэнергетического (12 МэВ) электронного облучения на ФД со структурой «собственный оксид —  $p$ -InSe» сводится к возникновению в слоистом полупроводнике точечных дефектов, которые, накапливаясь с ростом дозы, могут создавать бивакансионные комплексы «металл — халькоген». Это приводит к увеличению рекомбинационной составляющей тока и к некоторому уменьшению фотоотклика в исследуемом спектральном диапазоне. При облучении дозой 0,33 Мрад происходит только улучшение всех электрических и фотоэлектрических параметров исследуемого ФД при неизменном коэффициенте неидеальности ВАХ. Даже при максимальной дозе (33 Мрад) наблюдается рост напряжения холостого хода и монохроматической вольтовой чувствительности, а также минимальное увеличение коэффициента неидеальности ВАХ. Рост последовательного сопротивления сказывается на снижении тока короткого замыкания. Можно утверждать, что значительных изменений ВАХ и спектров фотоотклика не установлено из-за того, что энергия и дозы электронного облучения оказались недостаточными для существенного преобразования собственной дефектной структуры слоистого полупроводника.

Полученные результаты показывают высокую стойкость ФД на основе структуры «собственный оксид —  $p$ -InSe» к электронному излучению и перспективность эксплуатации в условиях значительного радиационного фона.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Kovalyuk Z. D., Katerynychuk V. M., Savchuk A. I., Sydor O. M. Intrinsic conductive oxide- $p$ -InSe solar cells // Materials Science and Engineering B. — 2004. — Vol. 109. — P. 252—255.
2. Ковалюк З. Д., Сидор О. Н. Получение структуры «собственный оксид- $p$ -InSe» с улучшенными фотоэлектрическими параметрами // Альтернативная энергетика и экология. — 2006. — 10. — С. 23—25. [Kovalyuk Z. D., Sidor O. N. // Al'ternativnaya energetika i ekologiya. 2006. 10. P. 23]
3. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Кн.1. — Москва: Мир, 1984. [Zi S. Fizika poluprovodnikovyx priborov. Kn.1. Moskva: Mir, 1984]
4. Shigetomi S., Ikari T., Koga Y., Shigetomi S. Drift mobility of electrons parallel to the  $c$ -axis in InSe // Phys. St. Sol. (a). — 1985. — Vol. 88, N 1. — P. K71—K73.
5. Манассон В. А., Малик А. И., Баранюк В. Б. Эффективный солнечный элемент для работы при низких уровнях освещенности // Письма в ЖТФ. — 1981. — Т. 7, 9. — С. 549—552. [Manasson V. A., Malik A. I., Baranyuk V. B. // Pis'ma v ZhTF. 1981. Vol. 7, 9. P. 549]
6. Вавилов В. С., Ухин Н. А. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах. — Москва: Атомиздат, 1969. [Vavilov V. S., Ukhin N. A. Radiatsionnye efekty v poluprovodnikakh i poluprovodnikovyx priborakh. Moskva: Atomizdat, 1969]
7. Нуруллаев Ю. Г. К вопросу о дефектообразовании в кристаллах InSe, GaSe и  $Cd_{1-x}Hg_xTe$  // Fizika. — 1999. — Vol. 5, N 1. — P. 6—8. [Nurullaev Yu. G. // Fizika. 1999. Vol. 5, N 1. P. 6]
8. Abidinov A. Sh., Babaeva R. F., Rzaev R. M., Gasanov G. A. Photoluminescence of rare-earth-doped InSe and GaSe single crystals // Inorganic Materials. — 2004. — Vol. 40, N 6. — P. 567—569.
9. Аскеров К. А. Дефектообразование в селениде галлия при воздействии проникающей радиации // Fizika. — 1996. — Vol.2, N 2. — P. 36—39. [Askerov K. A. // Fizika. 1996. Vol.2, N 2. P. 36]
10. Alekperov O. Z., Godjaev M. O., Zarbaliev M. Z., Suleymanov R. A. Interband photoconductivity in layer semiconductors GaSe, InSe and GaS // Solid State Commun. — 1991. — Vol. 77, N 1. — P. 65—67.
11. Alekperov O. Z., Guseinov N. M., Nadjafov A. I. Intermediate type excitons in Schottky barriers of  $A^3B^6$  layer semiconductors and UV photodetectors // Phys. stat. sol. (C). — 2006. — Vol. 3, N 8. — P. 2669—2672.
12. Camassel J., Merle P., Mathie H., Chevy A. Excitonic absorption edge of indium selenide // Phys. Rev. B. — 1978. — Vol. 17, N 12. — P. 4718—4725.
13. Kovalyuk Z. D., Politanska O. A., Tkachenko V. G. et al. Radiation resistance of photodiodes based on indium monoselenides under  $g$ -irradiation // Journal of Nuclear Materials. — 2009. — Vol. 385. — P. 489—494.
14. Abay B., Guder H.S., Efeoglu H., Yogurtcu Y.K. Excitonic absorption and Urbach-Martienssen's tails in Er-doped and undoped  $n$ -type InSe // J. Phys. D: Appl. Phys. — 1999. — Vol. 32, N 22. — P. 2942—2948.

15. Gurbulak B. Growth and optical properties of Dy doped and undoped *n*-type InSe single crystal // Sol. State Commun. — 1999. — Vol. 109, N 10. — P. 665—669.

16. Вавилов В. С., Кекелидзе Н. П., Смирнов Л. С. Действие излучений на полупроводники. — Москва: Наука, 1988. [Vavilov V. S., Kekelidze N. P., Smirnov L. S. Deistvie izluchanii na poluprovodniki. Moskva: Nauka, 1988]

17. Мадатов Р. С., Аббасова А. З., Тагиев Т. Б., Шекили Ш. П. Влияние электронного облучения на фотоэлектрические свойства в слоистых полупроводниках АВ<sup>VI</sup> / Тр. Междунар. конф. "Fizika-2005". — Азербайджан, г. Баку. — 2005. — С. 373—375. [Madatov R. S., Abbasova A. Z., Tagiev T. B., Shekili Sh. P. / Tr. Mezhd. konf. "Fizika-2005". Azerbaidzhan, Baku. 2005. P. 373]

Дата поступления рукописи  
в редакцию 14.06 2012 г.

Sydor O. N., Sydor O. A., Kovalyuk Z. D., Dubinko V. I. **Characteristics of photodiodes with «intrinsic oxide — InSe» structure, irradiated with high-energy electrons.**

*Keywords: layered crystals, indium selenide, photodiode, high-energy electrons, radiation defects.*

The article describes the research of the influence of electrons with an effective energy of 12 MeV in the 0,33—33 Mrad dose range on the electrical and photovoltaic properties of photodiodes with «intrinsic oxide — *p*-InSe» structure. It has been found that the minimum dose improves their basic parameters, while

the maximum dose significantly reduces the short circuit current and devices photosensitivity. In this case, an increase in volt-watt sensitivity and a minimal increase in coupling coefficient of the I-V characteristic are observed.

Ukraine, Chernivtsi Department of Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of NASU; Kharkov Institute of Physics and Technology of NASU.

Сидор О. Н., Сидор О. А., Ковалюк З. Д., Дубінко В. І. **Характеристики фотодіодів зі структурою «власний оксид — InSe», опромінених високоенергетичними електронами.**

*Ключові слова: шаруваті кристали, селенід індію, фотодіод, високоенергетичні електрони, радіаційні дефекти.*

Досліджено вплив електронів з ефективною енергією 12 МеВ в діапазоні доз 0,33—33 Мрад на електричні та фотоелектричні властивості фотодіодів зі структурою «власний оксид — *p*-InSe». Встановлено, що мінімальна доза опромінення покращує їх основні параметри, а максимальна — незначно знижує струм короткого замикання і фоточутливість приладів. При цьому спостерігається зростання вольт-ватної чутливості і мінімальне збільшення коефіцієнта неідеальності вольт-амперної характеристики.

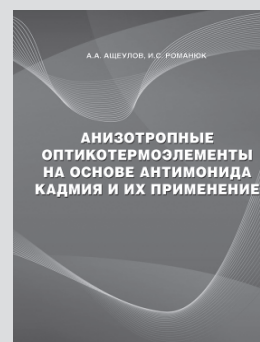
Україна, Чернівецьке відділення ІПМ ім. І. М. Францевича НАНУ; ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАНУ.

## НОВЫЕ КНИГИ

Ащеулов А. А., Романюк И. С. Анизотропные оптикотермоэлементы на основе антимонида кадмия и их применение.— Черновцы: Золотые литавры, 2012.— 228 с.

В книге представлены результаты исследования термоэлектрических явлений в оптических прозрачных анизотропных средах, поперечная составляющая термо-эдс которых стала основой для появления ряда оригинальных термоэлементов. Это позволило предложить новый метод регистрации лучистых потоков — метод «прозрачной стенки», который обусловил появление соответствующих технологий и материалов на основе антимонида кадмия и позволил реализовать новое поколение различных приборов и устройств.

Книга предназначена для научных и инженерно-технических работников в области термоэлектрического приборостроения, а также будет полезна аспирантам и студентам соответствующих специальностей.



УДК 621.382.002

О. Ю. НАЛИВАЙКО, д. т. н. А. С. ТУРЦЕВИЧ

Республика Беларусь, г. Минск, ОАО «ИНТЕГРАЛ»

E-mail: onalivaiko@integral.by

## ПОЛУЧЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК $\text{Si}_3\text{N}_4$ ПРИ ПОНИЖЕННОМ ДАВЛЕНИИ НА ПЛАСТИНАХ ДИАМЕТРОМ ДО 200 ММ

*Исследовано влияние режимов осаждения нитрида кремния на параметры полученных пленок. Установлено, что с уменьшением температуры осаждения скорость осаждения пленок нитрида кремния уменьшается, при этом повышается однородность толщины пленки по пластине. Это позволяет воспроизводимо осаждать пленки нитрида кремния толщиной менее 10 нм. Установлено, что с целью уменьшения глубины прокисления нитрида кремния окисление целесообразно проводить при температуре 850–900°С. Разработанный процесс осаждения нитрида кремния позволил получить накопительные конденсаторы с удельной емкостью 3,8–3,9 фФ/мкм<sup>2</sup> при толщине пленки 7,0 нм. Ключевые слова: нитрид кремния, конденсаторный диэлектрик, осаждение тонких пленок.*

В технологии изготовления интегральных схем пленки нитрида кремния широко используются в качестве маскирующих, пассивирующих и геттеризирующих слоев, конденсаторного и подзатворного диэлектриков [1, 2].

Основным направлением увеличения степени интеграции запоминающих устройств является уменьшение вертикальных и горизонтальных размеров ячейки памяти и, в первую очередь, накопительного конденсатора (НК) [2, 3]. В то же время, величина заряда, хранимого в ячейке памяти, должна позволять уверенно отличать логическую единицу от логического нуля при считывании содержимого ячейки, поэтому емкость конденсатора хранения должна оставаться на уровне 30 фФ на ячейку (что соответствует  $(1-2) \cdot 10^6$  электронов на ячейку) [4]. Очевидно, что при уменьшении размеров обкладок НК для того, чтобы сохранить величину этого заряда, необходимо уменьшать толщину конденсаторного диэлектрика, в качестве которого используются пленки нитрида кремния. В то же время, имеются сообщения об обнаружении размерного эффекта [1, 4], проявляющегося в уменьшении относительной диэлектрической проницаемости нитрида кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$  при уменьшении толщины пленки.

В настоящей работе решалась задача определения условий осаждения, позволяющих воспроизводимо осаждать тонкие пленки нитрида кремния, и условий окисления тонкого нитрида кремния, обеспечивающих минимальное изменение его диэлектрической проницаемости. Для этого исследовалось влияние режимов осаждения нитрида кремния на характеристики получаемых пленок (однородность и воспроизводимость толщины слоев  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , показатель преломления и диэлектрическая проницаемость получаемых пленок).

Кроме того, исследовалось влияние толщины пленок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и режимов его прокисления на электрофизические характеристики МОП-конденсаторов, в которых диэлектриком служит  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ .

### Методика эксперимента

В качестве подложек использовались кремниевые пластины КДБ-12 (100) диаметром 100, 150 и 200 мм. Осаждение пленок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  на пластины диаметром 100 и 150 мм проводилось в горизонтальном, а на пластины диаметром 200 мм в вертикальном реакторе пониженного давления (РПД). Выбор вертикального реактора обусловлен тем, что при уменьшении проектных топологических норм и увеличении диаметра обрабатываемых пластин ужесточаются требования к однородности толщины и свойств пленок. Особенности же конструкции вертикальных РПД позволяют существенно повысить однородность осаждаемых слоев [5].

Температура осаждения  $T_{\text{ос}}$  варьировалась в диапазоне от 690 до 800°С, соотношение объемных потоков  $\text{NH}_3/\text{SiH}_2\text{Cl}_2$  ( $\gamma$ ) изменялось от 3:1 до 15:1. Измерение толщины, показателя преломления пленок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  на пластинах диаметром 150 и 200 мм проводили методами спектрофотометрии и эллипсометрии на установке OptiProbe 2690UV. На пластинах диаметром 100 мм толщину измеряли на установке MPV-SP методом спектрофотометрии, а показатель преломления — на лазерном эллипсометре SPECORD-60.

Для исследования электрофизических характеристик пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  на подложках диаметром 200 мм формировали планарные тестовые конденсаторы размером 100×100 мкм.

Нижней обкладкой конденсатора служила поверхность монокристаллического кремния, ле-

гированного бором до получения  $p^+$ -области и окисленная на глубину 3,5 нм при температуре 850°C. На нее осаждали пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  различной толщины. Прокисление пленок проводили в сухом кислороде при температурах 900 и 1000°C либо пироженным окислением при 850°C.

Верхней обкладкой конденсатора служил слой поликристаллического кремния толщиной  $0,25 \pm 0,02$  мкм, легированный фосфором методом ионной имплантации с дозой  $5,0 \cdot 10^{15}$  см $^{-2}$  и энергией 40 кэВ. Верхнюю обкладку формировали плазмохимическим травлением слоя поликристаллического кремния.

Измерение электрофизических характеристик МОП-конденсаторов (емкости, токов утечки) проводили при помощи измерительной системы HP4061A на частоте 100 кГц. Диэлектрическую проницаемость нитрида кремния определяли с учетом конечной толщины слоев нитрида кремния и оксида кремния в конденсаторном диэлектрике. Кроме того, для оценки качества диэлектрика проводили выдержку МОП-конденсаторов под нарастающим напряжением для определения характеристического заряда, при котором происходит необратимый пробой диэлектрика.

### Результаты эксперимента

Было установлено, что если в реакторе при давлении 50 Па снижать  $\gamma$  от 15 до 3 и увеличивать температуру с 700 до 800°C (рис. 1, а), то скорость осаждения пленок нитрида кремния  $V_{\text{ос}}$  монотонно возрастет от 0,8 до 9,2 нм/мин (рис. 1, б). Эффективная энергия активации для процесса осаждения  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , рассчитанная из уравнения Аррениуса, с увеличением  $\gamma$  от 3 до 10 уменьшается от 122 до 106 кДж/моль (рис. 2), что на 6 кДж/моль выше, чем в [6]. В вертикальном реакторе при давлении 30 Па снижение температуры с 800 до 690°C приводит к тому, что скорость осаждения пленок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  монотонно уменьшается с 2,4 до 0,45 нм/мин, а неоднородность толщины пленки по пластине ( $\Delta$ ) уменьшается с  $\pm 4,6$  до  $\pm 1,9\%$  (рис. 3).

Следует отметить, что в вертикальном РПД достигается более высокая однородность толщи-

ны пленок по пластине. Это обусловлено тем, что при снижении температуры осаждения снижается скорость реакции, что облегчает своевременную доставку реагентов к месту реакции при одинаковых потоках и давлении. Повышение однородности толщины вдоль реактора достигается путем оптимизации профиля температуры. При этом при снижении  $T_{\text{ос}}$  уменьшается градиент температуры между началом и концом реакционной зоны, необходимый для компенсации обеднения смеси реагентов вдоль реактора и получения однородного профиля скорости осаждения вдоль реакционной зоны. Так, при  $T_{\text{ос}} = 800^\circ\text{C}$  градиент температуры вдоль зоны осаждения составляет 50–55°C, а при  $T_{\text{ос}} = 740^\circ\text{C}$  — примерно 35°C.

Однородность и воспроизводимость тонких слоев нитрида кремния повышается при уменьшении скорости осаждения. Для обеспечения управляемости процесса осаждения пленок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  толщиной менее 10 нм целесообразно поддерживать скорость осаждения не более 0,35 нм/мин. Такая скорость может быть достигнута за счет уменьшения температуры осаждения и давления, а также выбора оптимального соотношения объемного расхода дихлорсилана и аммиака.

На рис. 4, где представлена зависимость скорости осаждения пленок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  от объемного расхода дихлорсилана для пластин диаметром 200 мм, видно, что за счет варьирования расхода дихлорсилана скорость осаждения может быть уменьшена до 0,35 нм/мин. При этом неоднородность толщины пленки по пластине не превышает  $\pm 1,8\%$ , а по партии из 100 пластин не превышает  $\pm 3,9\%$ , что позволяет воспроизводимо осаждать пленки нитрида кремния толщиной менее 10 нм. Как видно из рис. 5, при снижении толщины пленки  $d$  происходит монотонное уменьшение показателя преломления  $n$ , причем при толщине менее 10 нм наблюдается его резкое уменьшение. Следует отметить, что при осаждении тонких пленок нитрида кремния в горизонтальном РПД наблюдалось существенное уменьшение показателя преломления уже при толщи-

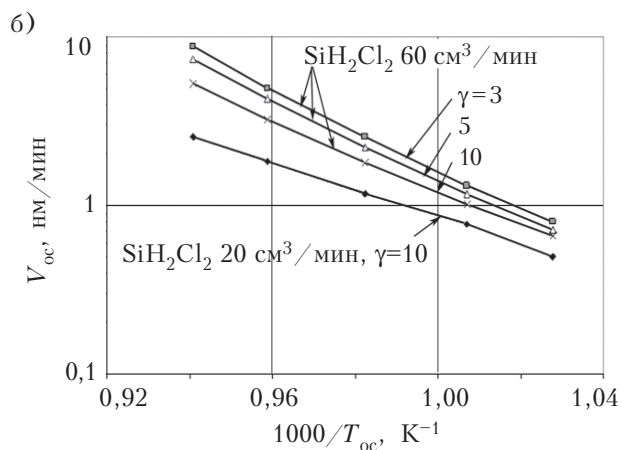
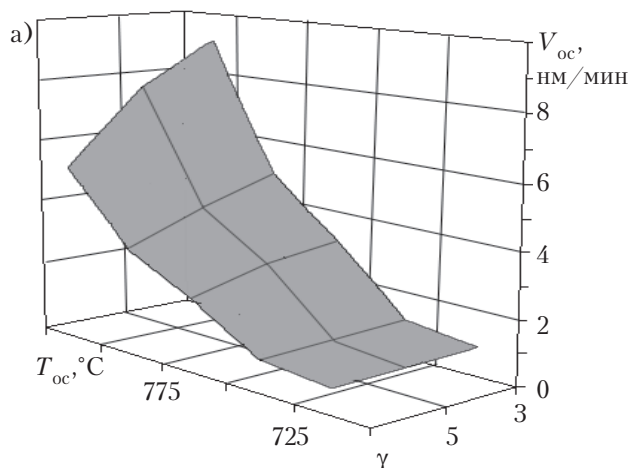


Рис. 1. Зависимость скорости осаждения  $\text{Si}_3\text{N}_4$  от режима осаждения (а) и от  $T_{\text{ос}}$  при различных  $\gamma$  (б)



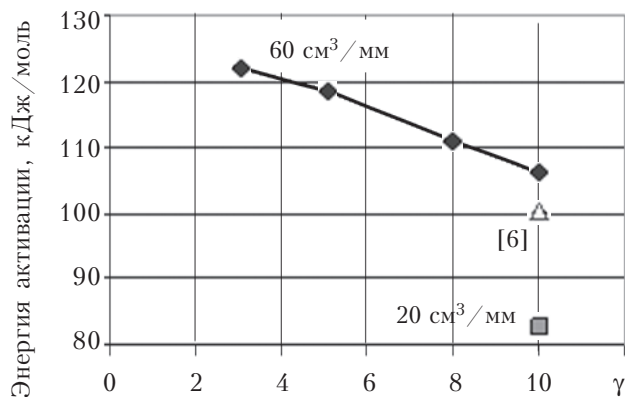


Рис. 2. Зависимость энергии активации нитрида кремния для процесса осаждения от  $\gamma$  при разном расходе  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$

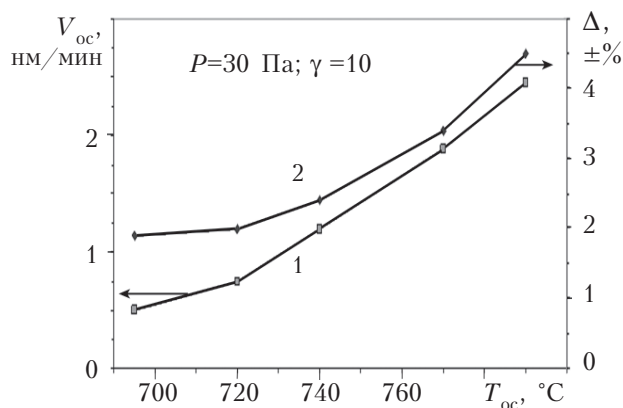


Рис. 3. Температурная зависимость скорости осаждения пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (1) и неоднородности ее толщины по пластине (2)

не менее 20 нм. По нашему мнению, это связано с более сильным окислением поверхности пластины на воздухе во время загрузки-выгрузки в горизонтальном РПД, тогда как в вертикальном РПД загрузка пластин производится в атмосфере азота. Кроме того, при проведении процессов осаждения нитрида кремния в вертикальном РПД использовались газы более высокой степени чистоты (99,9999%). Полученные результаты свидетельствуют о том, что в пленках  $\text{Si}_3\text{N}_4$  толщиной более 10 нм элементы находятся в стехиометрическом соотношении.

Для того чтобы сопоставить кинетические зависимости, полученные при различных условиях осаждения, необходимо ввести дополнительные параметры, связывающие геометрию реактора и условия проведения процесса осаждения. В качестве таких параметров можно использовать удельный поток дихлорсилана ( $\alpha$ ), определяемый как отношение его объемного потока к общей площади, на которую производится осаждение пленки в реакторе, и скорость движения газового потока ( $w$ ), определяемую как отношение суммарного объемного потока реагентов к площади зазора между внутренней поверхностью реактора и кассетой с подложками на

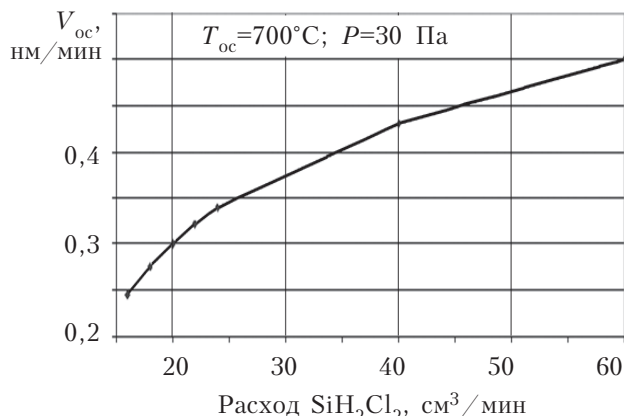


Рис. 4. Зависимость скорости осаждения пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  от объемного расхода  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$

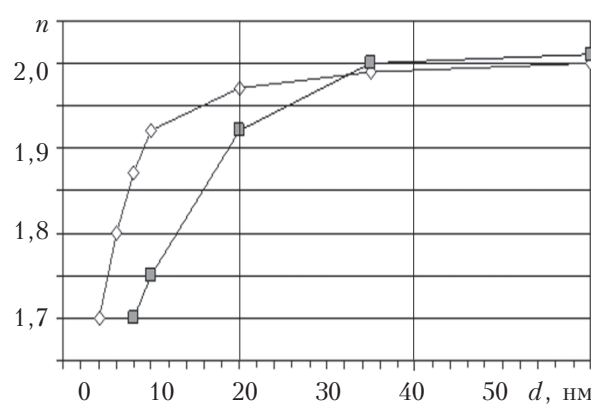


Рис. 5. Зависимость показателя преломления пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  от ее толщины:

◇ — экспериментальная; ■ — данные из [1]

консоли. Кроме того, можно оценить степень использования дихлорсилана по формуле

$$K_{\text{исп}} = V_{\text{ос}} \rho v V_{\text{моль}} / (\alpha M),$$

где  $\rho$  — плотность нитрида кремния;

$v$  — отношение количества атомов Si в молекулах газа и в пленке  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (1:3);

$V_{\text{моль}}$  — объем одного моля газа (для дихлорсилана  $V_{\text{моль}} = 22414 \text{ см}^3/\text{моль}$ );

$M$  — молярная масса  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (140,31 г/моль).

В табл. 1 представлены параметры процессов осаждения нитрида кремния в различных реакторах на пластинах диаметром 100, 150 и 200 мм и характеристики пленок.

Как видно, при увеличении диаметра пластин существенно возрастает общая площадь осаждения. Это приводит к уменьшению удельного потока дихлорсилана при одинаковом объемном расходе газа на входе в реактор и к повышению коэффициента использования дихлорсилана, что способствует более сильному обеднению газовой смеси и, как следствие, к ухудшению однородности толщины пленки нитрида кремния. Улучшение однородности и воспроизводимости толщины пленок достигается при уменьшении температуры осаждения за счет снижения скорости

реакции. При этом, как видно из табл. 1, с уменьшением температуры снижается коэффициент использования дихлорсилана, что и способствует уменьшению градиента его концентрации и повышению однородности толщины осаждаемых пленок. Кроме того, при более низких температурах осаждения можно дополнительно уменьшить объемный расход дихлорсилана, что позволяет еще больше снизить скорость осаждения для получения тонких пленок нитрида кремния.

С учетом сделанных оценок, полученные результаты можно объяснить следующим образом.

При высоких температурах осаждения в области малых потоков дихлорсилана и относительно низких скоростей движения газа  $w$  происходит обеднение смеси дихлорсилом уже в начальной зоне реактора (зоне загрузки). Это обуславливает снижение скорости осаждения по длине реакционной зоны, т. к. максимум  $V_{oc}$  находится в начальной зоне реактора. Причем данный эффект проявляется сильнее при более высоких температурах. В свою очередь, увеличение потока аммиака и, следовательно, возрастание суммарного потока реагентов при постоянном давлении в реакторе приводит к увеличению скорости движения газа, что способствует смещению максимума  $V_{oc}$  из начальной зоны реактора в рабочую зону. И, наконец, в области высоких значений скорости движения газового потока реакция переходит в кинетическую область, где скорость осаждения перестает зави-

сеть от  $w$ . При увеличении  $\gamma$  и сохранении суммарного объема потоков реагентов происходит уменьшение удельного потока дихлорсилана, что приводит к снижению скорости осаждения пленок нитрида кремния.

В области больших потоков дихлорсилана при высоких значениях  $w$  с увеличением  $\gamma$  происходит смещение максимума  $V_{oc}$  к зоне откачки. При этом из-за высоких скоростей движения газовой смеси все большая доля реагентов не успевает прореагировать в рабочей зоне. Подобный эффект описан в [7] для системы  $SiH_4-NH_3$ . Поэтому при увеличении суммарного потока реагентов сверх определенной величины может происходить снижение скорости осаждения пленок  $Si_3N_4$ . Снижение  $T_{oc}$  позволяет уменьшить коэффициент использования дихлорсилана и градиент его концентрации и, как следствие, повысить однородность осаждаемых пленок. Как видно из табл. 1, наилучшая однородность толщины пленок  $Si_3N_4$  достигается при значениях коэффициента использования дихлорсилана не более 0,35.

Таким образом, при оптимизации процесса осаждения необходимо учитывать существенное влияние на скорость осаждения и однородность пленок  $Si_3N_4$  как величины удельного потока дихлорсилана, так и скорости движения газа.

Преобразование исходных реагентов — дихлорсилана и аммиака — в твердофазный нитрид кремния является многостадийной реакцией. Пред-

Таблица 1

Сравнительная характеристика процессов осаждения нитрида кремния в различных реакторах

Параметры	Тип реактора					
	горизонтальный		вертикальный			
Диаметр пластин, мм	100	150	200			
Диаметр реактора, см	18,2	20,2	26			
Длина трубы, см	200	248	116			
Площадь трубы, см <sup>2</sup>	11430	15730	9470			
Количество пластин	220	110	169			
Площадь пластин, см <sup>2</sup>	34540	38858	106132			
Общая площадь осаждения, см <sup>2</sup>	45970	54588	115602			
Соотношение объемного расхода потоков дихлорсилан/аммиак	1:5	1:4	1:4	1:4	1:5	1:10
Удельный поток дихлорсилана, см/мин	1,3052	1,0991	0,5190	0,5190	0,5190	0,1730
Температура осаждения, °С	800	800	790	740	700	700
Давление, Па	40	40	30	30	30	25
Скорость осаждения, нм/мин	2,7	2,7	2,5	1,25	0,5	0,35
Коэффициент использования дихлорсилана	0,297	0,3532	0,6925	0,3463	0,346	0,2909
Неоднородность толщины по пластине, не более	±3,2%	±4,7%	±4,5%	±2,4%	±2,6%	±1,8%
Неоднородность толщины в партии пластин, не более	±6,2%	±6,5%	±5,0%	±3,0%	±4,5%	±3,9%

полагается, что газофазные реакции более медленные, чем поверхностные, в ходе которых происходит образование нитрида кремния [8–11].

Какие бы реакции ни происходили в газовой фазе или на поверхности, они в основном могут быть описаны как серия последовательных шагов, приводящих к замещению связей SiH, SiCl и NH связями SiN. Благодаря малому градиенту температуры вдоль реактора и избытку аммиака эти реакции обеспечивают однородное осаждение, несмотря на уменьшение содержания дихлорсилана в газовой смеси вдоль реакционной зоны.

С целью минимизации прокисления пленок нитрида кремния было проведено исследование влияния режимов окисления пленок нитрида кремния на их конечную толщину в диапазоне температур 850–1000°C. Результаты, представленные в табл. 2, показывают, что при температуре 1000°C прокисляется слой  $\text{Si}_3\text{N}_4$  толщиной 3,3–4,2 нм, что неприемлемо для пленок толщиной менее 10 нм, т. к. это приводит к существенному снижению удельной емкости накопительного конденсатора. Снижение температуры окисления до 900°C позволяет снизить глубину прокисления до 2,2 нм (при одинаковой толщине оксида кремния на контрольной кремниевой пластине), а при пироженном прокислении при 850°C она снижается до 1,9 нм.

Указанные выше режимы прокисления были также опробованы на тонких пленках нитрида кремния. Было установлено, что при температуре 1000°C происходит полное прокисление пленок толщиной менее 7 нм, что может быть связано с тем, что слой нитрида кремния толщиной 5–6 нм не является достаточным барьером для кислорода, который при высокой температуре может проникать через него к границе раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  и приводить к окислению кремния подложки. При прокислении при 900°C в сухом кислороде или пироженном окислении при 850°C прокисляется около 1,5–1,7 нм слоя нитрида кремния. Таким образом, для уменьшения глубины прокисления тонких пленок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  целесообразно проводить процессы при более низких температурах, а именно, 900 или 850°C.

Удельная емкость МОП-конденсаторов при исходной толщине пленок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  9,0 нм составила 3,5–3,6 фФ/мкм<sup>2</sup>, а при толщине 7,0 нм —

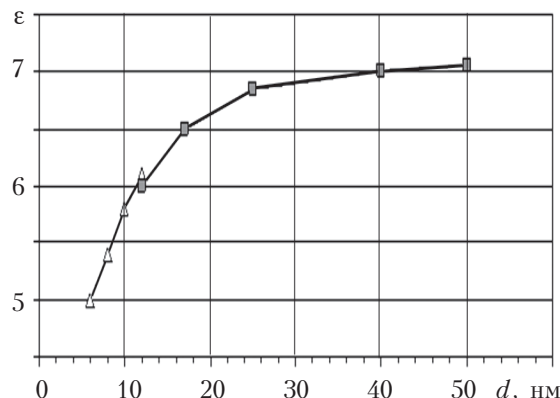


Рис. 6. Зависимость диэлектрической проницаемости пленки нитрида кремния от ее толщины:  $\Delta$  — экспериментальная;  $\blacksquare$  — данные из [1]

3,8–3,9 фФ/мкм<sup>2</sup>, что соответствует конденсаторной структуре (7,5 нм  $\text{Si}_3\text{N}_4$ )/(5,5 нм  $\text{SiO}_2$ ) и (5,5 нм  $\text{Si}_3\text{N}_4$ )/(4,2 нм  $\text{SiO}_2$ ).

На рис. 6, где представлена зависимость диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  пленки нитрида кремния от ее толщины, видно, что при снижении толщины с 10 до 6 нм происходит уменьшение диэлектрической проницаемости с 5,8 до 5,0. Причиной такого уменьшения может быть нарушение стехиометрического состава пленки из-за попадания в нее кислорода или наличие пор в ней, которые могут привести также и к снижению электрической прочности пленки. В связи с этим для повышения удельной емкости накопительных конденсаторов с тонкими пленками нитрида кремния необходимо использовать специальные методы, позволяющие повысить электрическую прочность и диэлектрическую проницаемость тонких пленок  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , например послойное их осаждение с обработкой каждого слоя в среде аммиака [12].

Для пластин с исходной толщиной слоя нитрида кремния 9,0 нм электрическая прочность конденсаторного диэлектрика составляет  $(9–10) \cdot 10^6$  В/см, токи утечки при напряжении 5 В не превышают  $10^{-13}$  А ( $10^{-17}$  А/мкм<sup>2</sup>), характеристический заряд составляет 0,8–1,6 Кл/см<sup>2</sup>. Однако дальнейшее уменьшение толщины пленки нитрида кремния приводит к резкому уменьшению характеристического заряда, что обуславливает необходимость проведения дополни-

Таблица 2

Влияние режимов прокисления на конечную толщину пленок нитрида кремния

Параметр	Режим термического окисления				
	сухое				пироженное
Температура окисления, °C	1000			900	850
Толщина $\text{SiO}_2$ на контрольной кремниевой пластине, нм	35	20	10	10	10
Исходная толщина слоя $\text{Si}_3\text{N}_4$ , нм	21,458	21,482	21,454	21,493	21,452
Толщина слоя $\text{Si}_3\text{N}_4$ после окисления, нм	17,249	17,528	18,157	19,279	20,537
Глубина окисления, нм	4,209	3,954	3,297	2,214	1,915

тельных исследований для повышения качества конденсаторного диэлектрика  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ .

### Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что с уменьшением температуры осаждения скорость осаждения пленок уменьшается, при этом повышается однородность толщины пленки по пластине и по партии пластин, что позволяет воспроизводимо осаждавать пленки нитрида кремния, в том числе и тонкие (толщиной менее 10 нм).

Установлено, что прокисление тонких пленок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  целесообразно проводить при температурах 850–900°C с целью уменьшения глубины прокисления. При снижении толщины пленки с 10 до 6 нм происходит уменьшение диэлектрической проницаемости с 5,8 до 5,0. Разработанный процесс осаждения тонких пленок позволил получить накопительные конденсаторы с удельной емкостью 3,8–3,9 фФ/мкм<sup>2</sup> при толщине пленки нитрида кремния 7,0 нм.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Турцевич А.С., Емельянов В.А. Формирование из газовой фазы функциональных слоев интегральных микросхем. — Минск: Интегралполиграф, 2007. [Turtsevich A.S., Emel'yanov V.A. Formirovanie iz gazovoi fazy funktsional'nykh sloev integral'nykh mikroskhem. Minsk: Integralpoligraf, 2007]
2. Гергель В. А., Миронов В. П., Ракитин В. В. и др., Перспективы развития и предельные характеристики накопителей сверхбольших динамических ЗВ // Микроэлектроника. — 1988. — Т. 17, вып. 3. — С. 237–243. [Gergel' V. A., Mironov V. P., Rakitin V. V. i dr. // Mikroelektronika. 1988. Vol. 17, iss. 3. P. 237]
3. Mandelman J. A. et al. Challenges and future directions for the scaling of dynamic random-access memory (DRAM) // IBM J. RES. & DEV. — 2002 — Vol. 46. — N 2/3. — P. 187–212.
4. Худяков В. В. Исследование размерного эффекта для диэлектрической проницаемости тонких пленок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и  $\text{SiO}_2$  // Электронная техника. Сер. 3 Микроэлектроника. — 1985. — Вып. 1(114). — С. 114–116. [Khudyakov V. V. Issledovanie razmernogo effekta dlya dielektricheskoi pronitsaemosti tonkikh plenok  $\text{Si}_3\text{N}_4$  i  $\text{SiO}_2$  // Elektronnaya tekhnika. Ser. 3 Mikroelektronika. 1985. Iss. 1(114). P. 114]
5. Емельянов В. А., Турцевич А. С., Наливайко О. Ю. Оборудование для химического осаждения из газовой фазы функциональных слоев — Минск: Белорусская наука, 2007. [Emel'yanov V. A., Turtsevich A. S., Nalivaiko O. Yu. Oborudovanie dlya khimicheskogo osazhdeniya iz gazovoi fazy funktsional'nykh sloev. Minsk: Belorusskaya nauka, 2007]
6. Технология СБИС / Под ред С. Зи. — Москва: Мир, 1986. — С. 160–162. [Tekhnologiya SBIS / Pod red S. Zi. Moscow: Mir, 1986. P. 160]
7. Васильева Л. Л., Гиновер Л. Я., Попов В. П. Исследование процесса осаждения пленок нитрида кремния при взаимодействии моносилана с аммиаком // Известия СО АН СССР. Сер. Химические науки. — 1979. — Вып. 5, № 12. — С. 54–58. [Vasil'eva L. L., Ginover L. YA., Popov V. P. // Izvestiya SO AN SSSR. Ser. Khimicheskie nauki. 1979. Iss. 5, N 12. P. 54]
8. Roenigk K. F., Jensen K. F. Low Pressure CVD of Silicon Nitride // J. Electrochem. Soc. — 1997. — Vol. 134, N 7. — P. 1777–1785.
9. Wittbrodt J. M., Schlegel H. B. An ab initio study of the thermal decomposition of dichlorosilane // Chem. Phys. Lett. — 1997. — Vol. 265, N 3–5. — P. 527–531.
10. Jenkins R. L., Wanderwielen A. J., Ruis S. P. et al. Pyrolysis of halosilanes and the formation and insertion reactions of chlorosilylene and fluorosilylene // Inorg. Chem. — 1973. — Vol. 12, N 12. — P. 2968–2972.
11. Swihart M. T., Carr R. W. Thermochemistry and thermal decomposition of the chlorinated disilanes ( $\text{Si}_2\text{H}_n\text{Cl}_{6-n}$ ,  $n = 0–6$ ) studied by ab initio molecular orbital methods // J. Phys. Chem. A. — 1997. — Vol. 101, N 40. — P. 7434–7445.
12. А. с. СССР 1715138. Способ формирования пленки нитрида кремния / приоритет от 09.10.1989. — 20.03.2012. [А. с. СССР 1715138. / prioritet ot 09.10.1989. 20.03.2012]

Дата поступления рукописи  
в редакцию 06.06 2012 г.

Nalivaiko O. Yu., Turtsevich A. S. **The deposition of silicon nitride films under low pressure on wafers up to 200 mm.**

*Keywords: silicon nitride, deposition, capacitor.*

The influence of silicon nitride deposition condition on parameters of the obtained films has been investigated. It has been found that the deposition rate of silicon nitride films decreases with deposition temperature decreasing, and at the same time the within wafer thickness uniformity improves. It allows performing the reproducible deposition of silicon nitride films with thickness of less than 10 nm. It has been found that in order to decrease the oxidation depth of silicon nitride, it is appropriate to carry out the oxidation under 850–900°C. The developed process of silicon nitride deposition made it possible to obtain reservoir capacitors with specific capacitance of 3,8–3,9 fF/μm<sup>2</sup> at film thickness of 7,0 nm.

Republic of Belarus, Minsk, JSC «INTEGRAL»

Наливайко О. Ю., Турцевич А. С. **Одержання тонких плівок при зниженому тиску на пластинах діаметром до 200 мм.**

*Ключові слова: нітрид кремнію, конденсаторний діелектрик, осадження тонких плівок.*

Досліджено вплив режимів осадження нітриду кремнію на параметри отриманих плівок. Встановлено, що зі зменшенням температури осадження швидкість осадження плівок нітриду кремнію зменшується, при цьому підвищується однорідність товщини плівки по пластині. Це дозволяє відтворювати осаджувати плівки нітриду кремнію товщиною менш ніж 10 нм. Встановлено, що з метою зменшення глибини прокиснення нітриду кремнію окиснення доцільно проводити при температурах 850–900°C. Розроблений процес осадження нітриду кремнію дозволив отримати накопичувальні конденсатори з питомою ємністю 3,8–3,9 фФ/мкм<sup>2</sup> при товщині плівки 7,0 нм.

Республіка Білорусь, м. Мінськ, ВАТ «ІНТЕГРАЛ».



УДК 621.315.592

З. Р. КУДРИНСКИЙ, д. ф.-м. н. З. Д. КОВАЛЮК

Украина, Черновицкое отделение Института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАНУ  
E-mail: kudrynskyi@gmail.com

## ГЕТЕРОПЕРЕХОДЫ, СФОРМИРОВАННЫЕ ОТЖИГОМ СЛОИСТЫХ КРИСТАЛЛОВ GaSe И InSe В ПАРАХ ЦИНКА

*Показан способ создания гетеропереходов из полупроводников с разным типом решетки. На подложках, изготовленных из слоистых кристаллов GaSe и InSe, отожженных в парах Zn, получены гетеропереходы  $n\text{-ZnSe-p-GaSe}$  и  $n\text{-ZnSe-p-InSe}$ , фоточувствительные в ближней инфракрасной и видимой областях спектра. Способ открывает широкие возможности изготовления гетероструктур с заданной полосой чувствительности.*

**Ключевые слова:** слоистые кристаллы, гетеропереходы, отжиг, спектральные характеристики, вольт-фарадные характеристики.

Слоистые полупроводниковые кристаллы GaSe и InSe обладают анизотропными свойствами, которые обусловлены наличием двух видов связей между атомами в кристалле. Каждый слой таких кристаллов содержит четыре атомные плоскости  $\text{Se-Ga-Ga-Se}$  ( $\text{Se-In-In-Se}$ ), расположенные перпендикулярно оси симметрии  $C$  гексагонального кристалла. Межатомные связи внутри слоев — ионно-ковалентного типа, между соседними слоями — типа слабых Ван-дер-Ваальсовых. Низкая плотность оборванных связей на поверхности Ван-дер-Ваальса позволяет применять слоистые кристаллы в качестве подложек для выращивания молекулярных, металлических наноструктур, а также гетероструктур на основе полупроводниковых материалов с различной симметрией и периодом кристаллической решетки [1–2]. На основе слоистых монокристаллов GaSe, InSe уже созданы фоточувствительные радиационно-стойкие структуры [3]. Настоящая же работа посвящена исследованию режимов отжига слоистых кристаллов GaSe и InSe в парах цинка для разработки гетеропереходов на их основе, фоточувствительных в заданной области спектра.

В экспериментах использовали монокристаллические слитки селенидов индия и галлия, выращенные методом Бриджмена. Благодаря их хорошей слоистости можно было путем скола по плоскостям спайности получать образцы заданной толщины с зеркальной поверхностью, не требующей дальнейшей обработки [4].

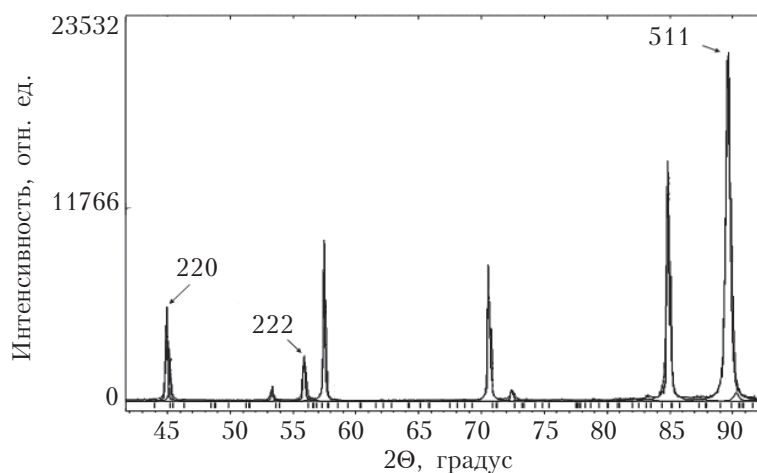
Для создания гетероструктур использовали легированные кадмием монокристаллы GaSe. Кристаллы селенида индия, также легированные Cd, были выращены из нестехиометрического состава, а именно  $\text{In}_{1,03}\text{Se}_{0,97}$ . Образцы InSe и GaSe, помещенные в вакуумированную до остаточного давления около  $10^{-5}$  Торр кварцевую ампулу, отжигали в парах Zn на протяжении двух часов при температуре  $400^\circ\text{C}$ . После такой процедуры их базовые поверхности приобретали темно-желтую окраску. При этом сохранялся неизменным цвет внутренней области.

Спектры фоточувствительности изготовленных гетеропереходов (**ГП**) исследовали с помощью монохроматора МДР-3 с разрешающей способностью 2,6 нм/мм. Все спектры нормировались относительно количества падающих фотонов.

*Электрические параметры кристаллов GaSe и InSe при комнатной температуре*

Соединение	$N_p$ , $\text{см}^{-3}$	$\mu_{\perp C}$ , $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	$\sigma_{\parallel C}$ , $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$	$\sigma_{\perp C}$ , $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$	$A = \frac{\sigma_{\perp C}}{\sigma_{\parallel C}}$
GaSe	$1\cdot 10^{13}$	35–40	$1\cdot 10^{-8}$	$6\cdot 10^{-5}$	$6\cdot 10^3$
GaSe<Cd>	$5\cdot 10^{14}$	80	$3\cdot 10^{-5}$	$6,2\cdot 10^{-3}$	$2\cdot 10^2$
$\text{In}_{1,03}\text{Se}_{0,97}$ <Cd>	$2\cdot 10^{14}$	60	$5,2\cdot 10^{-5}$	$2,1\cdot 10^{-3}$	41

Здесь  $N_p$  — концентрация носителей заряда;  $\mu_{\perp C}$  — подвижность носителей заряда вдоль слоя;  $\sigma_{\parallel C}$  — проводимость вдоль оси  $C$ ;  $\sigma_{\perp C}$  — проводимость перпендикулярно оси  $C$ ;  $A$  — анизотропия электропроводности.

Рис. 1. Рентгенограмма ГП  $n\text{-ZnSe-p-GaSe}$ 

Вольт-фарадные характеристики (**ВФХ**) ГП исследовались на установке “Schlumberger SI 1255” с компьютерным интерфейсом. Исследования кристаллической структуры проводили рентгенографическим методом на установке ДРОН-3.0, собранной по схеме фокусировки Брэгга – Брентано, в монохроматическом  $\text{CuK}\alpha$ -излучении. Для обработки полученных дифрактограмм использовали программное обеспечение LATTEK-KARTA.

Электрические параметры монокристаллов GaSe и полученных гетероструктур представлены в **таблице**.

На рентгенограмме гетероструктуры ZnSe–GaSe, приведенной на **рис. 1**, кроме отражений от подложки GaSe, были зарегистрированы также отражения, соответствующие соединению ZnSe — 220, 222, 511. В результате проведенного анализа установлено, что структура подложки соответствует 4Н-политипу GaSe, а измеренные периоды решетки селенида галлия составляют  $a=0,37550$  нм,  $c=3,18900$  нм. Монокристаллическая пленка ZnSe имеет кубическую структуру с параметром  $a=0,56666$  нм, что совпадает с результатами [5]. Поликристаллическая пленка ZnSe, выращенная на подложке InSe, имеет параметр решетки  $a=0,56650$  нм.

В процессе отжига слоистых кристаллов GaSe в парах Zn происходит межатомное взаимодействие цинка с GaSe и возникает деформация решетки, что способствует локальному скольжению слоев пакетов в базисной плоскости (001) и образованию прослоек 4Н-модификации. Следует отметить, что исходные кристаллы GaSe относились к 2Н-политипу с параметрами кристаллической решетки  $a=0,37603$  нм и  $c=1,60384$  нм [6].

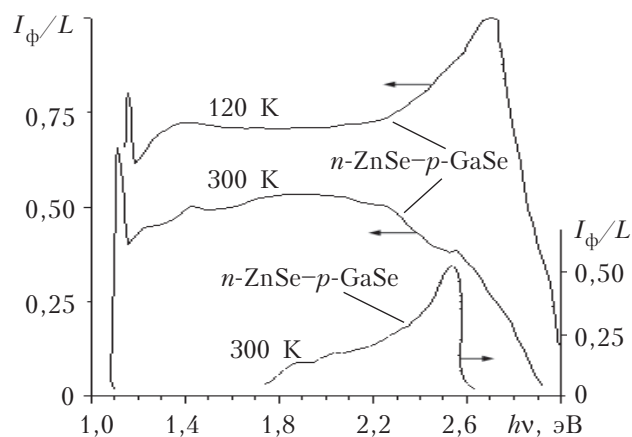
Фоточувствительность полученных ГП  $n\text{-ZnSe-p-GaSe}$  и  $n\text{-ZnSe-p-InSe}$ , как и  $p\text{-}n$ -гомопереходов, обусловлена пространственным разделением неравновесных носителей заряда контактным электрическим полем перехода.

Созданные светом электронно-дырочные пары проходят через границу раздела перехода, поэтому форма и высота потенциального барьера, а также состояние границы раздела, обусловленное несогласованностью кристаллических решеток двух полупроводников, существенно влияют на фототок и его спектральную зависимость.

Гетеропереходы, образованные полупроводниками с разным типом решеток, в частности “неслоистый полупроводник — слоистый полупроводник”, имеют хорошие фотоэлектрические характеристики, что свидетельствует об эффективности формирования потенциального барьера в таких структурах. Это позволяет

анализировать особенности спектров фотоотклика многих новых ГП и показывает широкие возможности создания гетероструктур с полосой фоточувствительности необходимого диапазона.

Анализ спектров фоточувствительности ГП ZnSe–GaSe и ZnSe–InSe позволил установить их особенности и выявить тонкую структуру спектра фотоотклика на длинноволновом крае. Спектральная фоточувствительность ГП при комнатной температуре имеет вид полосы, резко ограниченной энергетически с двух сторон (**рис. 2**). Свет с энергией  $h\nu < E_{g1}$  ( $E_{g1} = 2,7$  эВ — ширина запрещенной зоны фронтального полупроводника ZnSe) поглощается непосредственно в приповерхностной области базового полупроводника с шириной запрещенной зоны  $E_{g2}$  (2,0 эВ для GaSe или 1,25 эВ для InSe), где сосредоточена также и область  $p\text{-}n$ -перехода. То есть в таких ГП используется эффект “окна” — излучение определенной энергии ( $E_{g2} < h\nu < E_{g1}$ ) беспрепятственно проходит фронтальный полупроводник,

Рис. 2. Спектральная фоточувствительность полученных гетеропереходов при разной температуре ( $I_\phi$  — фототок;  $L$  — интенсивность освещения)

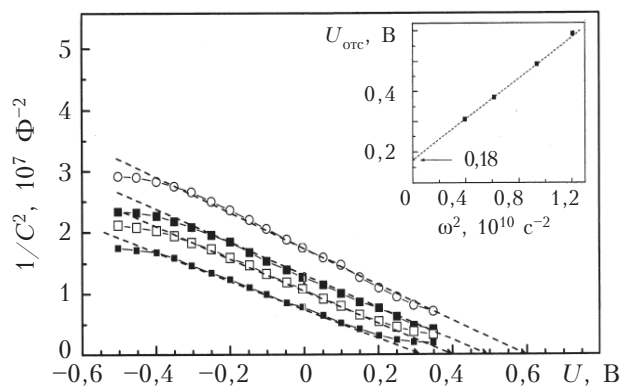


Рис. 3. ВФХ ГП  $n$ -ZnSe- $p$ -InSe при комнатной температуре на разных частотах (в кГц):  
1 – 17,5; 2 – 15; 3 – 12,5; 4 – 10  
(На вставке – частотная зависимость емкостного напряжения отсечки)

а области фотогенерации и ОПЗ совпадают. Генерированные фотоносители разделяются электрическим полем и формируют длинноволновой край спектра fotocувствительности. Как видно из рис. 2, край спектра резко изменяется и наблюдается острый пик максимума. Такие особенности спектра являются следствием экситонного поглощения в слоистых кристаллах GaSe и InSe, а также свидетельствуют о формировании обедненной области в подложке из слоистого кристалла. Кроме того, из рис. 2 видно, что спектры ГП  $n$ -ZnSe- $p$ -GaSe и  $n$ -ZnSe- $p$ -InSe имеют широкополосный характер, а квантовая эффективность фототока является практически постоянной на всем участке этой полосы. При снижении температуры с 300 до 120 К в ГП  $n$ -ZnSe- $p$ -InSe fotocувствительность растет, а спектральная полоса смещается в высокоэнергетическую область. Это обусловлено тем, что при низких температурах растет величина потенциального барьера ГП, а следовательно, расширяется и область пространственного заряда. Поэтому сбор фотоносителей барьером увеличивается, что сказывается на увеличении fotocувствительности. Поскольку в используемых полупроводниках коэффициент температурного сдвига запрещенной зоны отрицателен, эти зоны обоих контактирующих материалов сдвигаются в сторону меньших длин волн спектра при уменьшении температуры измерения.

На рис. 3 представлены ВФХ изготовленных ГП ZnSe-InSe, полученные на разной частоте при комнатной температуре. В координатах  $C^2$  от  $U$  они линейны не во всей области прикладываемого напряжения. В частности, наилучшая линейность зависимости наблюдается в интервале от  $-0,4$  до  $+0,2$  В, причем в области больших значений обратного напряжения характеристики при разных частотах практически выходят на насыщение, так же как и при небольших значе-

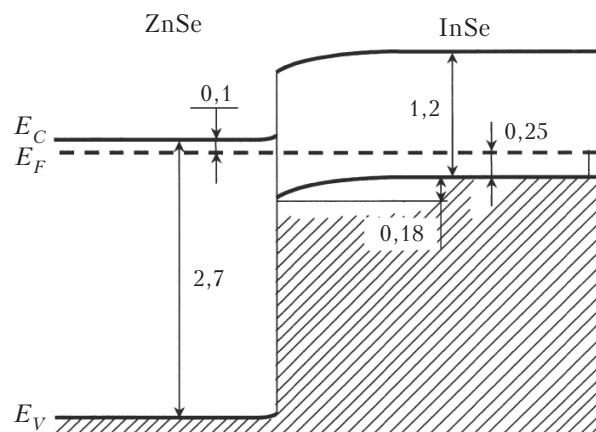


Рис. 4. Зонная диаграмма гетероперехода  $n$ -ZnSe- $p$ -InSe

ниях прямого смещения. Такой характер зависимости может быть обусловлен перераспределением спада напряжения между обедненной областью и квазинейтральными областями ГП. Линейность характеристик указывает также на резкий характер  $p$ - $n$ -перехода, сформированного в InSe. Из рис. 3 также видно, что емкость гетероперехода сильно зависит от частоты. Как известно, это наблюдается в диодах, в которых последовательным сопротивлением пренебречь невозможно. Поэтому для корректного определения диффузионного потенциала емкостное напряжение отсечки аппроксимировалось согласно функциональной зависимости  $U_{отс} = f(\omega^2)$  при  $\omega \rightarrow 0$ . Такая зависимость представлена на вставке рис. 3. Высота потенциального барьера  $\phi_0$  составляла около 0,18 эВ и использовалась в дальнейшем для построения энергетической зонной диаграммы ГП, которая показана на рис. 4.

Положение уровня Ферми в  $n$ - и  $p$ -полупроводниках оценивалось по значениям концентраций основных носителей из соотношений

$$|E_c - E_F| = kT \ln [N_c / N_n],$$

$$|E_v - E_F| = kT \ln [N_v / N_p],$$

где  $E_c$ ,  $E_v$  – энергия дна зоны проводимости и потолка валентной зоны соответственно;

$E_F$  – энергия Ферми;

$N_c$ ,  $N_v$  – эффективная плотность состояний в соответствующих зонах;

$N_n$ ,  $N_p$  – концентрация основных носителей заряда.

Особенность такого перехода в том, что большая часть обедненной зоны находится в  $p$ -области. Это подтверждается исследованиями спектров фотоотклика данных ГП, край полосы fotocувствительности которых формируется при поглощении излучения в InSe.

\*\*\*

Таким образом, в результате исследований установлено, что отжиг слоистых кристаллов GaSe и InSe в парах Zn в термодинамически равновесных условиях приводит к образованию на поверхности GaSe монокристаллических слоев ZnSe, а на поверхности InSe — поликристаллических слоев ZnSe с близкими параметрами кристаллической решетки. Разработанная технология отжига позволила создать гетеропереходы  $n$ -ZnSe- $p$ -GaSe и  $n$ -ZnSe- $p$ -InSe, фоточувствительные в ближней инфракрасной и видимой областях спектра. Предложенный способ формирования гетеропереходов из полупроводников с разным типом решетки показывает широкие возможности создания гетероструктур с полосой фоточувствительности необходимого диапазона.

## ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Wisotzki E., Klein A., Jaegermann W. Quasi Van der Waals epitaxy of ZnSe on the layered chalcogenides InSe and GaSe // *Thin Solid Films*. — 2000. — Vol. 380, N 1. — P. 263–265.

2. Бахтинов А. П., Водопьянов В. Н., Слынько Е. И. и др. Самоорганизация наноструктур теллуридов свинца олова на Ван-дер-Ваальсовой поверхности селенида галлия (0001) // *Письма в ЖТФ*. — 2007. — Т. 33, № 2. — С. 80–88. [Bakhtinov A. P., Vodop'yanov V. N., Slyn'ko E. I. i dr. // *Pis'ma v ZhTF*. 2007. Vol. 33, N 2. P. 80]

3. Ковалюк З. Д., Политанская О. А., Сидор О. Н., Маслюк В. Т. Электрические и фотоэлектрические характеристики структур на основе слоистых полупроводников InSe и GaSe при облучении электронами с энергией 12,5 МэВ // *Физика и техника полупроводников*. — 2008. — Т. 42, № 11. — С. 1321–1326. [Kovalyuk Z. D., Politanskaya O. A., Sidor O. N., Maslyuk V. T. // *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*. 2008. Vol. 42, N 11. P. 1321]

4. Williams R. H., McEvoy A. J. Electron emission studies from GaSe surface // *Journal of Vacuum Science and Technology*. — 1972. — Vol. 9, N 2. — P. 867–870.

5. Гавриленко В. И., Грехов А. М., Корбутяк Д. В., Литовченко В. Г. Оптические свойства полупроводников. Справочник. — Киев: Наукова думка, 1987. [Gavrilenko V. I., Grekhova A. M., Korbutyak D. V., Litovchenko V. G. *Opticheskie svoistva poluprovodnikov. Spravochnik*. Kiev: Naukova dumka, 1987]

6. Terhell J. C. J. M. Polytypism in the III-IV layer compound // *Progress in Crystal Growth and Characterization*. — 1983. — N 7. — P. 55–110.

7. Верма А., Кришна П. Полиморфизм и политипизм в кристаллах. — Москва: Мир, 1969. [Verma A., Krishna P. *Polimorfizm i politipizm v kristallakh*. Moskva: Mir, 1969]

*Дата поступления рукописи  
в редакцию 23.02 2012 г.*

Kudrynskyi Z. R., Kovalyuk Z. D. **Heterojunctions formed by annealing of GaSe and InSe layered crystals in zinc vapor.**

*Keywords: layered crystals, heterojunctions, annealing, spectral characteristics, current-voltage characteristics.*

The article presents a method of creating heterojunctions based on semiconductors with different lattice types. Substrates manufactured from GaSe and InSe layered crystals were annealed in Zn vapor. This way,  $n$ -ZnSe- $p$ -GaSe and  $n$ -ZnSe- $p$ -InSe heterojunctions were obtained. The obtained heterojunctions are photo-sensitive in near and infrared spectral regions. This method opens up greater possibilities of producing heterostructures with a desired sensitivity band.

Ukraine, Chernivtsi Department of the I. N. Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of NASU.

Кудринський З. Р., Ковалюк З. Д. **Гетеропереходи, сформовані відпалом шаруватих кристалів GaSe та InSe в парах цинку.**

*Ключові слова: шаруваті кристали, гетеропереходи, відпал, спектральні характеристики, вольт-фарадні характеристики.*

Представлено спосіб створення гетеропереходів з напівпровідників з різним типом решітки. На підкладах, виготовлених із шаруватих кристалів GaSe та InSe, відпалених у парах Zn, отримано гетеропереходи  $n$ -ZnSe- $p$ -GaSe та  $n$ -ZnSe- $p$ -InSe, фоточутливі в ближній інфрачервоній і видимій областях спектру. Спосіб відкриває широкі можливості виготовлення гетероструктур із заданою смугою чутливості.

Україна, Чернівецьке відділення Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАНУ.



УДК 621.382

Д. ф.-м. н. В. М. МАТЮШИН, к. ф.-м. н. Е. Л. ЖАВЖАРОВ

Украина, Запорожский национальный технический университет

E-mail: jin@zntu.edu.ua

## СТИМУЛИРУЕМАЯ ВОДОРОДОМ МИГРАЦИЯ АТОМОВ МЕТАЛЛОВ В СТРУКТУРАХ «МЕТАЛЛ — ПОЛУПРОВОДНИК»

*Представлены результаты исследования воздействия атомарного водорода на структуры Cu—Ge, Ni—Ge. Экспериментально показано, что обработка структур при комнатной температуре сопровождается внедрением атомов металла с аномально высокой концентрацией в приповерхностные слои толщиной до 1 мкм. Рассмотренный процесс может быть использован для создания омических контактов полупроводниковых устройств на основе структур «металл — полупроводник» с минимальным контактным сопротивлением.*

**Ключевые слова:** омические контакты, гетеродиффузия, атомарный водород.

Одним из важных этапов производства большинства полупроводниковых приборов является создание омических контактов с малым контактным сопротивлением. Существуют различные способы обеспечения минимального сопротивления для гетероструктуры «металл — полупроводник». Один из них — использование приконтактных областей с высокой концентрацией нескомпенсированной примеси, что может достигаться в процессе изготовления самого полупроводникового кристалла посредством, например, сплавления [1]. Однако это часто усложняет общий ход технологического процесса, что делает его невыгодным. Другой способ получения омических контактов — использование многокомпонентных металлических пленок. Однако при этом способе образование омического контакта достигается только после высокотемпературного отжига, что иногда достаточно сложно совместить с общей технологической схемой формирования приборов.

Таким образом, задача создания омического контакта сводится к созданию высоколегированных приповерхностных слоев полупроводника с помощью несложной технологии, которая оказывала бы минимальное влияние на параметры уже изготовленной структуры.

Одним из альтернативных способов решения поставленной задачи может выступать обработка структур «металл — полупроводник» в среде атомарного водорода ( $H^0$ ). На сегодняшний день известно, что такая обработка может сопровождаться процессами гетеродиффузии [2], кристаллизации [3] и распыления [4]. Целью настоящей работы является экспериментальное и теоретическое исследование механизмов миграции атомов Cu и Ni в приповерхностных сло-

ях кристаллов Ge под воздействием  $H^0$ . Выбор системы Cu—Ge и Ni—Ge был обусловлен тем, что на поверхности этих веществ реакция рекомбинации водорода протекает достаточно активно, а условия ее протекания хорошо изучены [5]. Медь и никель имеют различные коэффициенты термической диффузии в Ge, причем для Cu он аномально высок при низкой энергии активации, а пленки обоих металлов широко используются в качестве металлизации при изготовлении полупроводниковых и электронных устройств.

### Методика проведения эксперимента

Атомарный водород получали путем диссоциации молекулярного водорода в ВЧ-разряде. Молекулярный водород получали при электролизе 20%-ного раствора KOH в дистиллированной воде. Далее водород проходил через форбаллон для улавливания капель KOH, осушительную колонку, заполненную силикагелем, и поступал в реакционную камеру. Концентрация атомарного водорода в рабочей камере, измеренная калориметрическим методом, достигала  $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  при давлении в камере 15–20 Па.

Образцы закрепляли на алюминиевом держателе, отдаленном примерно на 25 см от области разряда, что позволяло исключить попадание на образец радикалов гидроксида и других ионов, образующихся в плазме [5]. Температуру образцов измеряли хромель-копелевой термпарой, закрепленной на их поверхности. При обработке в  $H^0$  образцы нагревались только за счет энергии, выделяемой при рекомбинации водорода.

В качестве материала подложки использовали монокристаллический германий (111) *n*-типа с удельным сопротивлением 15 Ом·см и плотно-

стью дислокаций  $10^2 \text{ см}^{-2}$ . С целью удаления нарушенного слоя пластины подвергали травлению в смеси 40% HF, 20%  $\text{HNO}_3$ , 40%  $\text{H}_2\text{O}$  с добавлением  $\text{AgNO}_3$ , затем — ультразвуковой очистке на установке УЗУ-0,25.

Пленки меди и никеля наносили методом термического испарения в вакууме. Толщину пленки контролировали на рентгеновском микроанализаторе MAP-2, она составляла 0,1–0,5 мкм. Состояние поверхности образцов оценивали по величине поверхностного сопротивления  $R_s$ , измеренного четырехзондовым методом на установке ИУС-3, а также с помощью интерференционного микроскопа МИМ-7.

Перед исследованием примесного состава обработанные в  $\text{H}^0$  структуры подвергали химическому травлению для снятия остатков пленок металла (в водном растворе  $\text{HNO}_3$ ).

Распределение концентрации Cu и Ni в Ge исследовали методом вторичной ионной масс-спектрометрии (**ВИМС**). Образцы бомбардировали из ионной пушки типа «Дуоплазматрон» ионами кислорода  $\text{O}_2^+$ . Энергия ионов  $\text{O}_2^+$  при исследовании образцов Cu–Ge составляла 3 кэВ при плотности тока 500 мкА/см<sup>2</sup>, образцов Ni–Ge — 4 кэВ при плотности тока 100 мкА/см<sup>2</sup>.

#### Результаты экспериментов и их обсуждение

Как показали результаты экспериментов, обработка атомарным водородом структур Cu–Ge и Ni–Ge сопровождается распылением пленок. При достижении их критической толщины (около 50 нм) начинается внедрение атомов металлов в приповерхностные слои германия, а затем их последующая диффузия в объем. Профили распределения атомов Ni и Cu в приповерхностных слоях германиевых кристаллов после их обработки в среде  $\text{H}^0$ , полученные с помощью ВИМС, представлены на рисунке.

Сравнивая кривые распределения атомов металлов можно видеть, что за одинаковое время обработки медь проникает на большую глубину, чем никель, что, очевидно, связано с более высоким коэффициентом диффузии атомов меди в условиях проведения эксперимента. Учитывая, что медь в Ge может диффундировать как по

междоузельному, так и по диссоциативному механизму (с энергией активации, соответственно, 0,18 и 1 эВ [6]), можно сделать вывод, что в случае водородостимулированной диффузии преобладает междоузельный механизм.

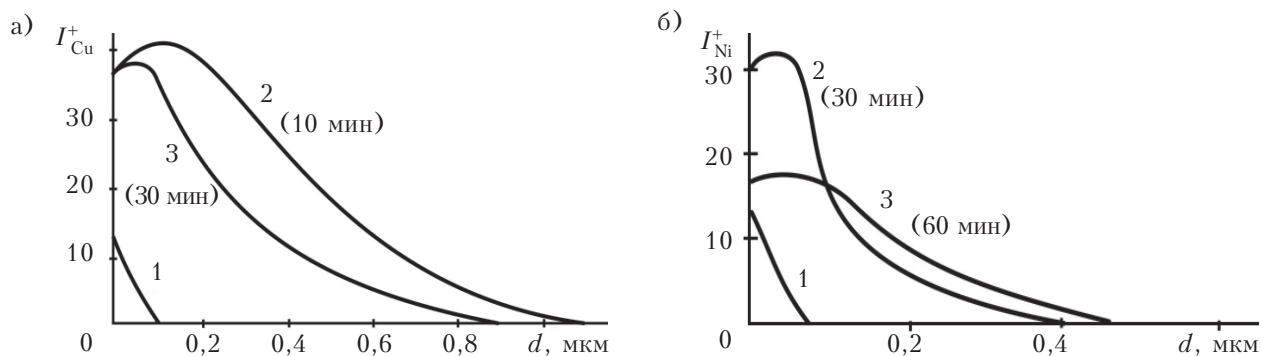
Анализ распределения примесных атомов, полученного на основе данных ВИМС и эталонных образцов, показал аномально высокие значения их концентрации ( $10^{20}$ – $10^{21} \text{ см}^{-3}$ ), которые превышают предельную растворимость металлов в Ge на 4–5 порядков ( $(2-4) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  для Cu и  $(4-8) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  для Ni) [7].

После этапа загонки атомов металла из пленки в кристалле Ge начинает доминировать процесс распыления сильнолегированных поверхностных слоев. При этом общая поверхностная концентрация металла уменьшается.

Механизм стимулирования диффузии можно представить следующим образом. При взаимодействии атомов водорода с поверхностью образцов выделяется энергия порядка 4,5 эВ. Эта энергия выделяется в результате двух актов — адсорбции (2–2,5 эВ) и рекомбинации (1,5–2 эВ) атомов водорода. Часть энергии уносится возбужденной молекулой водорода, однако большая часть энергии передается кристаллу (коэффициент аккомодации порядка 60–75% [8]).

Механизмы передачи энергии адсорбции и рекомбинации атомов водорода через электронную подсистему твердого тела и его релаксации рассмотрены в [8]. Отметим, что в зоне выделения энергии возникают локализованные колебания, которые затухают при испускании фононов [9].

Время выделения энергии химического взаимодействия атомов водорода (время обменного взаимодействия) составляет порядка  $10^{-10} \text{ с}$  [10], поэтому механизм выделения и диссипации энергии укладывается в представление о  $\Theta$ -вспышке [10]. Поскольку температура в области  $\Theta$ -вспышки достаточно высока (порядка температуры плавления), это приводит к увеличению интенсивности процесса дефектообразования. Повышенная дефектность и высокая локальная температура в области рекомбинации усложняют



Профили распределения атомов Cu (а) и Ni (б) в образцах Ge без обработки (1) и при разном времени обработки в  $\text{H}^0$  (2, 3)

отведение тепла. При этом растет роль многофононных процессов [11].

Для оценки протекающих процессов были использованы параметры модели из [12]. Время релаксации для продольных ( $\tau_{\parallel}$ ) и поперечных ( $\tau_{\perp}$ ) фононов, которые генерируются в результате рекомбинации водорода, можно оценить из выражений [12]

$$\tau_{\parallel}^{-1} = \frac{v_3}{L_C} + J\omega^4 + BT^3\omega^2; \quad (1)$$

$$\tau_{\perp}^{-1} = \frac{v_3}{L_C} + J\omega^4 + yT^4\omega + \frac{z\omega^2}{\text{sh}\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right)}, \quad (2)$$

где  $v_3$  — средняя скорость звука в кристалле (для Ge  $v_3 = 3,9 \cdot 10^3$  м·с<sup>-1</sup>);

$L_C$  — толщина слоя с аномально высокой концентрацией металла;

$\omega$  — частота колебаний кристаллической решетки;

$T$  — температура;

$k$  — постоянная Больцмана.

Параметры  $B$ ,  $J$ ,  $y$ ,  $z$  были определены в [12] из условия реальной зависимости коэффициента теплопроводности германия в интервале температур 5–1000 К. Допустив, что для активной области  $\omega \approx \omega_D$  и  $T \approx \Theta_D$  (где  $\omega_D$  и  $\Theta_D$  — частота и температура Дебая), можно получить для Cu  $\tau_{\parallel} = 1,6 \cdot 10^{-12}$  с, что соответствует длине свободного пробега  $l = 0,01$  мкм, и  $\tau_{\perp} = 10^{-15}$  с ( $l_{\perp} = 0,07 \cdot 10^{-4}$  мкм).

В приповерхностных слоях на глубине, меньшей чем  $l$  («активная зона»), фононы (преимущественно продольные) интенсивно рассеиваются на дефектах кристаллической решетки, в том числе и на атомах примеси [10], ускоряя тем самым их диффузию вглубь кристалла. На расстояниях, больших длины свободного пробега, фононы рассеиваются в основном за счет процессов переброски [13], и «фононное давление» на примесные атомы значительно ослабевает. При этом в кристалле устанавливается некоторый градиент температуры [14], который особенно возрастает вблизи поверхности [9].

При условиях, когда концентрация  $H^0$  в газовой фазе составляет  $n_H \approx 5 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup> (что соответствует экспериментальным наблюдениям), количество атомов H, которые рекомбинируют на одном поверхностном атоме за 1 с ( $N_R$ ) составляет порядка  $10^3$ . Поскольку концентрация поверхностных атомов  $n_s$  составляет примерно  $10^{15}$  см<sup>-2</sup>, поток рекомбинации  $R$  ( $R = N_R n_s$ ) в этом случае составит около  $10^{18}$  см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>.

Ввиду того, что энергия самого высокоэнергетического фонона (с дебаевской частотой)  $E = \hbar\omega$  (для Ge  $\omega = 4,8 \cdot 10^{13}$  Гц) составляет 0,037 эВ, в результате одного акта рекомбинации количество фононов  $N_F$ , которые испускаются из поверхностного слоя в объем (с учетом процесса

аккомодации), превышает  $10^2$  (даже если учитывать, что средняя энергия фононов близка  $\hbar\omega_D$ ). То есть поток фононов  $P_F$  с поверхности в объем ( $P_F = RN_F$ ) составляет больше  $10^{20}$  см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>, следовательно, можно говорить о так называемом фононном ветре, который возникает на поверхности кристалла под воздействием  $H^0$  и распространяется в его объем.

Силу «фононного давления» на расстоянии порядка длины свободного пробега фонона, который действует на атом примеси, можно записать как [15]

$$\bar{F}_{\Phi} = 3v_{\Gamma}k\nabla T \left[ \frac{\sigma^*}{\sigma} - \frac{\Omega^*}{\Omega} \right], \quad (3)$$

где  $v_{\Gamma}$  — постоянная Грюнайзена;

$\nabla T$  — градиент температуры;

$\sigma^*$ ,  $\sigma$  — сечение рассеивания фонона на атоме примеси и на атоме кристаллической решетки соответственно;

$\Omega^*$ ,  $\Omega$  — объем примесного атома и атома кристаллической решетки соответственно.

В [15] соотношение сечений рассеяния определяется как:

$$\frac{\sigma^*}{\sigma} = \frac{\chi\pi\Theta}{6\hbar v_3 n^*},$$

где  $\chi$  — теплопроводность;

$n^*$  — число атомов в единице объема.

Сила  $\bar{F}_{\Phi}$  снижает энергетический барьер атома при элементарном прыжке из одного междоузлия в другое на величину

$$\Delta E = \bar{F}_{\Phi} a, \quad (4)$$

где  $a$  — длина прыжка.

Коэффициент стимулируемой диффузии в этом случае можно записать как

$$D_{\text{хсд}} = D_0 \exp \left[ \frac{-(E_a - \Delta E)}{kT} \right]. \quad (5)$$

Следовательно, коэффициент диффузии примеси, стимулируемой атомарным водородом, за счет влияния фононного давления возрастает в «активной зоне» по экспоненциальному закону  $\exp(\Delta E/k)$ .

Выполним оценку влияния фононного давления в активной зоне системы Cu–Ge, принимая температуру на поверхности близкой температуре плавления германия (1209 К), температуру образца в объеме  $T = 320$  К, температуру Дебая  $\Theta = 371$  К,  $v_{\Gamma} = 2$ ,  $\chi = 0,6$  Вт·см<sup>-1</sup>, атомный радиус положительного иона меди  $r^* = 9,6 \cdot 10^{-11}$  м, радиус атома Ge  $r = 1,22 \cdot 10^{-10}$  м. Подставляя эти значения в (3)–(5), получаем, что скорость диффузии межузельных атомов меди под действием фононного давления в активной зоне возрастает примерно в 45 раз.

Проведенные расчеты показали, что влияние фононов (особенно продольных), которые генерируются в результате химической реакции, распространяется на глубину около 0,01 мкм, на которой действует фоновый ветер. Несмотря на незначительный импульс, фононы, рассеиваясь на дефектах решетки, передают энергию и импульс (направленный в объем кристалла) примесным атомам, способствуя тем самым миграции атомов в приповерхностной области.

Учитывая поверхностную концентрацию примесных атомов ( $C_{0Cu} \approx 1,6 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ), можно рассчитать концентрацию атомов на единицу поверхности  $C_s$  в активной зоне ( $C_{sCu} \approx 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ), т. е. на одном примесном атоме рассеивается за 1 с порядка  $10^3$  фононов (в системе Cu — Ge).

Коэффициенты диффузии определялись по кривым 2 на рисунке (в этом случае на поверхности образца еще есть остатки пленки металла) в приближении, что диффузия в полуограниченный образец с нулевой начальной концентрацией примеси происходит через поверхность, на которой поддерживается постоянная концентрация этой примеси. Среднее значение коэффициента стимулированной диффузии для системы Ni — Ge составило примерно  $4,8 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2/\text{с}$ , а термической диффузии (при  $T=320 \text{ К}$ ) — около  $1,8 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2/\text{с}$ . Среднее значение коэффициента стимулированной диффузии для системы Cu — Ge составило около  $3 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2/\text{с}$ . Расчет коэффициента термической диффузии Cu при температуре эксперимента 310 К дал значения для междоузельного механизма  $1,2 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$ , для вакансионного  $3,4 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2/\text{с}$ . Однако при температурах, меньших 1050 К, диффузия по междоузлиям в обычных условиях не происходит, т. к. атомы меди не могут при этом находиться в междоузлиях [6].

Можно оценить концентрацию атомов Cu в междоузлиях кристалла Ge как [13]

$$1/l_{\text{пр}} = \pi R_0^2 n_{\text{ф}}, \quad (6)$$

где  $l_{\text{пр}}$  — длина предельного рассеивания фононов;  
 $R_0$  — радиус дефектной области;  
 $n_{\text{ф}}$  — концентрация дефектов.

Приняв  $l_{\text{пр}} \approx 10^{-4} \text{ м}$  (размер области с аномально высокой концентрацией) и  $R_0 = 0,2 \text{ нм}$ , получаем  $n_{\text{ф}} \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Это значение показывает, что атомы меди могут локализоваться не только в междоузлиях, но и на микро- и макродефектах, особенно дислокациях, которые существуют в приповерхностной области кристалла в условиях эксперимента.

В процессе обработки структур «металл — полупроводник» измерялись их ВАХ на измерителе характеристик Л2-56. На начальных стадиях обработки (до 10—15 минут, когда ВАХ еще линейна) наблюдалось уменьшение контактного сопротивления (расчет по ВАХ) на 15—20%. При длительной обработке формировались ВАХ, характерные для диодной структуры.

Проведенные исследования адгезионной прочности сформированного контакта «металл — полупроводник» методом отрыва показали увеличение адгезии металлической пленки к германиевой подложке в 4—5 раз при обработке структуры в водороде в течение 10—30 минут (в зависимости от концентрации H). Отслоения пленки не наблюдалось. Следовательно, можно говорить о взаимной гетеродиффузии материалов, в ходе которой возникает эффект «перемешивания».

Предполагается, что эффективность данной технологии может быть еще увеличена для реальных структур, однако для каждого конкретного случая потребуется отработка оптимальных режимов.

\*\*\*

Проведенные исследования показали, что рассмотренный активированный процесс диффузии примеси в приповерхностные слои кристалла может быть использован для создания омических контактов полупроводниковых устройств на основе структур «металл — полупроводник» с минимальным контактным сопротивлением. Такая водородостимулированная технология создания гетероструктур отличается существенным уменьшением общей температуры процесса, что снижает влияние «температурного удара» на параметры уже созданных кристаллов.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. S. Noor Mohammad Contact mechanisms and design principles for alloyed ohmic contacts to n-GaN // J. Appl. Phys. — 2004. — Vol. 95, Iss. 12. — P. 7940—7952. — DOI: 10.1063/1.1712016.
2. Матюшин В. М., Концеус С. И., Полежа Д. О. Влияние низкотемпературной обработки атомарным воднем на систему медь — германий // Український фізичний журнал. — 2002. — Т. 47, № 1. — С. 69—72. [Matyushin V. M., Kontseus S. I., Polekha D. O. // Ukrayins'kii fizichnii zhurnal. 2002. Vol. 47, N 1. P. 69]
3. Жавхаров Е. Л., Бялик Г. А., Матюшин В. М. Низкотемпературная кристаллизация тонких пленок Ni под воздействием атомарного водорода // Письма в ЖТФ. — 2007. — Т. 33. — Вып. 13. — С. 64—71. [Zhavzharov E. L., Byalik G. A., Matyushin V. M. // Pis'ma v ZhTF. 2007. Vol. 33. Iss. 13. P. 64]
4. Матюшин В. М., Савин В. В. Распыление пленок индия в среде атомарного водорода // Журнал физической химии. — 2001. — Т. 75, № 7. — С. 1291—1294. [Matyushin V. M., Savin V. V. // Zhurnal fizicheskoi khimii. 2001. Vol. 75, N 7. P. 1291]
5. Волькенштейн Ф. Ф., Горбань А. Н., Соколов В. А. Радиалорекомбинационная люминесценция полупроводников. — Москва: Наука, 1976. [Vol'kenshtein F. F., Gorban' A. N., Sokolov V. A. Radikalorekombinatsionnaya lyumines-tsentsiya poluprovodnikov. Moskva: Nauka, 1976]
6. Болтакс Б. И. Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках. — Ленинград: Наука, 1972. [Boltaks B. I. Diffuziya i tochechnye defekty v poluprovodnikakh. — Leningrad: Nauka, 1972]
7. Глазов В. М., Земсков В. С. Физико-химические основы легирования полупроводников. — Москва: Наука, 1967.



[Glazov V. M., Zemskov V. S. Fiziko-khimicheskie osnovy legirovaniya poluprovodnikov. Moskva: Nauka. 1967]

8. Лавренко В. А. Рекомбинация атомов водорода на поверхности твердых тел. — Киев: Наукова думка, 1973. [Lavrenko V. A. Rekombinatsiya atomov vodoroda na poverkhnosti tverdykh tel. Kiev: Naukova dumka, 1973]

9. Аскарлов Б. А., Зайковская М. А., Каримов М. В. Радиационно-активируемые процессы в кремнии. — Ташкент: ФАН, 1977. [Askarov B. A., Zaikovskaya M. A., Karimov M. V. Radiatsionno-aktiviruemye protsessy v kremnii. Tashkent: FAN, 1977]

10. Могилевский В. М., Чудновский А. Ф. Теплопроводность полупроводника. — Москва: Наука, 1972. [Mogilevskii V. M., Chudnovskii A. F. Teploprovodnost' poluprovodnika. Moskva: Nauka, 1972]

11. Стоунхэм А. М. Теория дефектов в твердых телах. — Москва: Мир, 1978. [Stounkhem A. M. Teoriya defektov v tverdykh telakh. Moskva: Mir, 1978]

12. Classbrenner C. J., Sluck G. A. Thermal conductivity of silicon and germanium from 3 K to the melting point // Phys. Rev. — 1964. — Vol. 134, Iss. 4A. — P. A1058–A1069. — DOI: 10.1103/PhysRev.134.A1058

13. Давыдов А. С. Теория твердого тела. — Москва: Наука, 1976. [Davydov A. S. Teoriya tverdogo tela. Moskva: Nauka, 1976]

14. Buda M. J. Zagadnili termodyfuzji w ciatach stalych // Buil, Wojsk, Acad. Fech. — 1977. — Vol. 26, N 6. — P. 49–59.

15. Кузьменко П. П. Об увлечении диффундирующих ионов фононами в металлах // Украинский физический журнал. — 1970. — Т. 15, № 12. — С. 1970–1973. [Kuz'menko P. P. // Ukrainskii fizicheskii zhurnal. 1970. Vol. 15, N 12. P. 1970]

Дата поступления рукописи  
в редакцию 21.06 2012 г.

Matyushin V. M., Zhavzharov E. L. **Hydrogen-stimulated migration of metal atoms in «metal — semiconductor» structures.**

*Keywords: ohmic contacts, heterodiffusion, atomic hydrogen.*

The article presents experimental results of the effect atomic hydrogen has on the Cu—Ge and Ni—Ge structures. It has been shown experimentally that the treatment of structures at room temperature is accompanied by the introduction of metal atoms with an abnormally high concentration in the surface layers of thickness up to 1 mm.

Ukraine, Zaporozhye National Technical University.

Матюшин В. М., Жавжаров Є. Л. **Стимульована воднем міграція атомів металів в структурах «метал — напівпровідник».**

*Ключові слова: омичні контакти, гетеродифузія, атомарний водень.*

У роботі представлено результати експериментального та теоретичного дослідження впливу атомарного водню на структури Cu—Ge, Ni—Ge. Експериментально показано, що обробка структур при кімнатних температурах супроводжується проникненням атомів металу з аномально високою концентрацією в приповерхневий шар товщиною до 1 мкм.

Україна, Запорізький національний технічний університет.



## ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕН-

**8—13 сентября 2013 г.  
Украина, Севастополь**

### Направления работы конференции:

1. Твердотельные приборы и устройства СВЧ;
- 1а. Моделирование и автоматизированное проектирование твердотельных приборов и устройств;
2. Электровакуумные и микровакуумные приборы СВЧ;
3. Системы СВЧ связи, вещания и навигации;
- 3а. Информационные технологии в телекоммуникациях (в т. ч. интеллектуальные системы);
4. Антенны и антенные элементы;
5. Пассивные компоненты;
- 5а. Материалы и технология СВЧ-приборов;
- 5b. Нанoeлектроника и нанотехнология;
6. СВЧ-электроника сверхбольших мощностей и эффекты;
- 6а. Электромагнитная и радиационная стойкость материалов и электронной компонентной базы;
7. СВЧ-измерения;
8. Прикладные аспекты СВЧ-техники;
- 8а. Микроволновые технологии и техника в биологии и медицине;
9. Радиоастрономия, дистанционное зондирование и распространение радиоволн;
- Н. История развития радиотехнологий и телекоммуникаций (5-е Федотовские чтения).

Tel: +380-50-3931288  
Fax: +380-692-435258  
e-mail: [crimico.org@gmail.com](mailto:crimico.org@gmail.com)  
<http://www.crimico.org>

23-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»  
8-13 сентября 2013г., Севастополь, Украина

**KryMiKo 2013 Crimico**  
September 8-13, 2013, Sevastopol, Ukraine  
23<sup>rd</sup> International Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology»

УДК 681.7.014.2; 681.7.014.3; 681.7.013.2; 681.2.083

А. В. ФЕСЕНКО, д. т. н. В. Н. БОРОВИЦКИЙ

Украина, НТУУ «Киевский политехнический институт»

E-mail: vborovytsky@yahoo.com

## ВИЗУАЛЬНЫЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ АВТОКОЛЛИМАТОРЫ

*Показаны преимущества оптико-электронных автоколлиматоров перед визуальными. Рассмотрена возможность модернизации существующих визуальных систем путем замены автоколлимационных окуляров на блоки с многоэлементными приемниками и подключения их к компьютеру. Приведены краткие характеристики автоколлимационных окуляров и современных оптико-электронных автоколлиматоров.*

*Ключевые слова:* автоколлиматоры, оптико-электронные системы, многоэлементные фотоприемники.

Метод дистанционного измерения угловых величин широко используется в производстве, при сборке и юстировке оптических приборов, направляющих прямолинейного движения, отсчетных зубчатых соединений, взаимного расположения баз, центрирования элементов оптической системы, контроля точности угломерных приборов, фокусировки телескопических систем, контроля поверхностей оптических элементов, контроля смещений, установки ракет на стартовых позициях и т. п. [1, 2]. Для выполнения таких измерений применяются оптические приборы — автоколлиматоры. Автоколлиматор формирует изображение предмета (сетки с делениями или раstra определенной формы) в бесконечности и измеряет смещение этого изображения, которое сформировано параллельным пучком лучей, отразившихся от рабочей поверхности. Если рабочая поверхность не перпендикулярна оптической оси автоколлиматора, то при малых угловых величинах смещение изображения будет прямо пропорционально углу между оптической осью автоколлиматора и нормалью к поверхности. Преимущество автоколлимационного метода состоит в том, что расстояние до контролируемой поверхности в меньшей степени влияет на точность измерений, чем при использовании других методов.

В настоящее время существует два основных типа автоколлиматоров — визуальные и фотоэлектрические. Визуальные автоколлиматоры отличаются между собой автоколлимационными окулярами [3]. Постоянная потребность в увеличении точности измерений и контроля, автоматизации процессов и уменьшении затрат привела к широкому использованию оптико-электронных автоколлимационных систем. Развитие информационных технологий и достижения в области создания матричных фотоприемников от-

крыло новый этап — этап цифровых автоколлимационных систем. Эти системы существенно упростили регистрацию и обработку автоколлимационного изображения и обеспечили вывод и сохранение результатов измерений при помощи компьютера.

Целью данной статьи является анализ принципов работы автоколлимационных объективов и оптико-электронных автоколлиматоров и их отличий. Такой анализ, на наш взгляд, будет полезен исследователям и метрологам, работающим в области измерения угловых величин, поскольку указывает на возможности модернизации имеющихся визуальных автоколлиматоров и преобразования их в оптико-электронные.

### Автоколлимационные измерения

Автоколлиматор можно рассматривать как комбинацию в одном приборе двух оптических систем — коллиматора и зрительной трубы [3]. Эти системы имеют общую оптическую ось, что уменьшает погрешности, вносимые ими по отдельности при измерении, а также позволяет измерять малые углы при небольших удалениях от объекта.

Рассмотрим принцип работы автоколлиматора, используя **рис. 1, а**. Поток излучения, выходящий от источника 1, освещает плоскопараллельную пластину (сетку) 2, объектив 4 формирует изображение сетки, уходящее в бесконечность. Отразившись от контролируемой поверхности 5, параллельный пучок попадает на объектив 4 под углом  $\alpha$ . Автоколлимационное изображение сетки будет формироваться в плоскости второй сетки (сетки анализатора) 6. Полученное изображение наблюдается через окуляр 7. Светоделитель 3 служит для разделения осветительного и окулярного каналов. Вид сетки выбирается для каждого конкретного случая

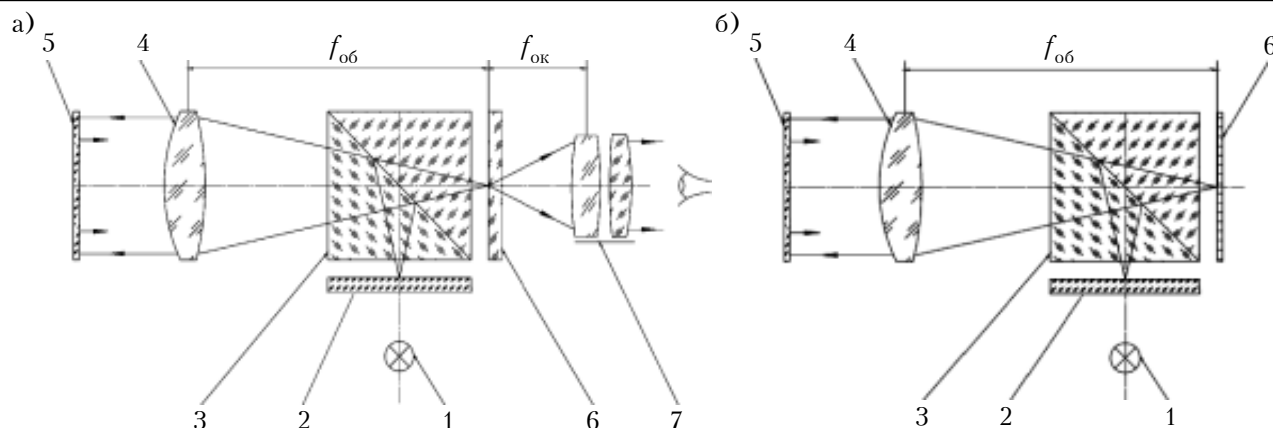


Рис. 1. Оптическая схема визуального (а) и оптико-электронного (б) автоколлиматоров:  
1 — источник излучения; 2 — сетка; 3 — светоделитель; 4 — объектив; 5 — контролируемая поверхность; 6 — сетка анализатора; 7 — окуляр

(в виде перекрестия с делениями вдоль каждой оси, с концентрическими кругами, с прозрачной точкой на темном фоне для имитации точечного источника и др.).

Главным достоинством автоколлимационного метода является высокая чувствительность к малым поворотам отражающей поверхности, которая тем больше, чем больше фокусное расстояние объектива автоколлиматора. При измерении малых углов величина смещения изображения сетки прямо пропорциональна фокусному расстоянию (рис. 1). Однако при этом надо учитывать, что автоколлиматоры, как любые оптические изображающие приборы, имеют дифракционное ограничение разрешающей способности.

#### Автоколлимационные окуляры

Для облегчения проектирования и эксплуатации автоколлиматоров были объединены в один узел сетка (или две сетки), светоделитель и окуляр, который должен обеспечивать удовлетворительную видимость автоколлимационного изображения светящегося или темного штриха сетки. Такой узел называется автоколлимационным окуляром. На практике применяются разные виды автоколлимационных окуляров. Все они отличаются исполнением, имеют различную

яркость автоколлимационного изображения и различное светопропускание. Различают окуляры со свободным, затемненным или частично затемненным полем зрения, с освещенной маркой в центре или вне центра поля. Поскольку существует большое количество справочников по оптическим приборам, в которых рассмотрены, в частности, и автоколлимационные окуляры, ограничимся представлением их параметров в табл. 1.

#### Оптико-электронные автоколлиматоры

Основным достоинством оптико-электронного автоколлиматора является возможность регистрации изображений и их цифровой обработки. Это позволяет существенно упростить и автоматизировать процесс проведения измерений и контроля, повысить точность измерений. Схема построения современных оптико-электронных автоколлиматоров основывается на использовании светодиода или лазерного диода в качестве источника излучения, многоэлементного фотоприемника и светоделительного элемента в виде призмного светоделителя или полупрозрачной пластинки. Как видно на схеме, показанной на рис. 1, б, изображение формируется не на анализирующей сетке, а в плоскости приемного

Таблица 1

Параметры автоколлимационных окуляров

Вид окуляра	Светопропускание, %	Максимальное видимое увеличение	Расстояние до зеркала, м
Куб с одной сеткой	11	30	25
Куб с двумя сетками	4—9	Не ограничено	18
Гаусса длиннофокусный	14—15	18	18
Гаусса короткофокусный	14—15	18	18
Аббе	30	30	2
Линника	30	Не ограничено	20
Тудоровского	8—10	Не ограничено	7—8
Захарьевского	30	18	18
Монченко	40	30	30

Таблица 2

Характеристики современных оптико-электронных автоколлиматоров

Производитель, тип прибора	Источник излучения	$R^*$ , угл. сек.	$\delta^{**}$	Диапазон измерений	Размеры прибора, мм	Цена, тыс. \$
Taylor Hobson, Англия DA20 DA400	Лампа 6В/2Вт Лампа 6В/2Вт	0,01 0,1	0,1'' 0,01''	$\pm 20''$ $\pm 400''$	— длина 240	— —
Trioptics, Германия TriAngle TriAngle LASER TriAngle HS	Светодиод, 530 нм Лазер, 635 нм Лазер, 635 нм	0,01 0,05 0,1	0,75'' 0,2'' 0,8%	$0,61'' \times 0,46''$ $660'' \times 490''$ 400''	— — —	— — —
Moeller-Wedel Optical, Германия ELCOMAT 3000  ELCOMAT HR	Светодиод, 660 нм  Светодиод, 660 нм	0,05  0,005	$\pm 0,1''$  $\pm 0,01''$	$2000'' \times 2000''$ (до 2,5 м) $260'' \times 260''$ (до 20 м) $300'' \times 300''$	$420 \times 95 \times 135$  $488 \times 218 \times 141$	—  —
Оптротех, Россия, ЦАК-0.1	—	0,001	0,5''	$\pm 5'$	—	—
НПК «Диагностика», Россия, АК-03Ц	—	0,05	0,3''	$20'' \times 15''$	$320 \times 120 \times 160$	10–12
Davidson Optronics, США D-897 D-720	— Сверхъяркий свето- диод, 530 нм	$\pm 0,01$ $\pm 0,1$	$\pm 0,01''$ $\pm 0,2''$	$\pm 5''$ $\pm 5'$	— $22 \times 152 \times 318$	— —
Micro-Radian Instruments, США TL-40  TL-160  T-15	Лазерный диод, 670 нм Лазерный диод, 670 нм Светодиод	0,1 0,01 0,1	0,8% 0,8% 0,2%	$\pm 3,600''$ (при 150 мм) $\pm 600''$ (при 5 м) $10800''$ (при 25 мм)	$31 \times 31 \times 120$  $43 \times 43 \times 230$  $31 \times 31 \times 51$	18–20  18–20  18–20
Integrated Equipment Solutions, США, AC 201	Лазер (класс 2), 850 нм	0,2	—	$\pm 344'$	$2,5 \times 2,8 \times 3,3$	—
Newport Corporation, США, LDS-Vector	Лазерный диод, 670 нм	0,02	—	31''	$\varnothing 38$ длина 271	>5
PIPL, Индия, EAMP800	Светодиод, 640 нм	0,01	0,04''	$\pm 300''$	—	26

\* $R$  — разрешающая способность; \*\* $\delta$  — погрешность измерений.

устройства, затем преобразуется в электрический сигнал и передается на устройство вывода. В цифровых автоколлиматорах электрические сигналы преобразуются в цифровую форму, обрабатываются и передаются в компьютер для сохранения и визуализации результатов измерений. Существуют и другие схемы построения автоколлиматоров [1–4].

Многоэлементные фотоприемники могут быть матричными и линейными. Основное их различие заключается в том, что из-за большого количества фоточувствительных элементов матричный фотоприемник имеет большее, чем линейный, время стабилизации — около двух часов [4]. Следует отметить, что для получения результата измерений с высокой точностью необходимо при их проведении строго поддерживать темпе-

ратуру матрицы. Для этой цели используют терморегуляторы или холодильники Пельтье.

Хотя на сегодняшний день на рынке оптико-электронных автоколлиматоров представлено много компаний, можно выделить основные: Taylor Hobson (Англия), Trioptics (Германия), Moeller-Wedel Optical (Германия), Оптротех (Россия), НПК «Диагностика» (Россия) и другие. Для сравнения автоколлиматоров разных производителей были выбраны однотипные приборы — цифровые автоколлиматоры небольшого размера, в том числе портативные, аналогичные по конструкции, в которых применяются матричные и линейные многоэлементные фотоприемники [4], осуществляется цифровая обработка сигналов и вывод результатов в компьютер по стандартному интерфейсу USB, COM и др.



Характеристики цифровых автоколлиматоров представлены в табл. 2.

Следует подчеркнуть, что для Украины одним из перспективных направлений развития автоколлимационных систем является модернизация существующих визуальных автоколлиматоров путем замены автоколлимационных окуляров на блоки с многоэлементными приемниками и подключения их к компьютерам. Это позволяет получить оптико-электронные автоколлиматоры по цене намного меньшей, чем цена новых цифровых автоколлимационных систем зарубежного производства. Выполненный авторами сравнительный анализ окуляров показал, что предпочтительными для такой модернизации являются окуляр «куб с одной отдельной сеткой» или окуляр Гаусса (см. табл. 1). При осуществлении модернизации автоколлиматоров рекомендуется использовать проекционный объектив, который переносит изображение сетки в плоскость линейного или матричного фотоприемника. Такой объектив должен обеспечить согласование между промежуточным изображением сетки и ее изображением в плоскости фотоприемника по полю зрения и по пространственному разрешению. Также следует учесть, что проекционные объективы, как правило, формируют перевернутое изображение. После модернизации погрешности измерений остаются примерно на том же уровне, что и в исходном визуальном автоколлиматоре, а появившиеся возможности дистанционной работы, обработки изображений (автоматический расчет угловой величины) и автоматического документирования результатов измерения полностью оправдывают затраты на такую модернизацию. При этом следует отметить, что в подавляющем большинстве случаев на производстве и в лабораториях требуется выполнять измерения с погрешностями порядка угловой минуты, а не с минимально возможной погрешностью порядка долей угловых секунд. А это существенно расширяет количество визуальных автоколлиматоров, которые могут быть превращены в цифровые оптико-электронные автоколлиматоры. Более подробно модернизация визуальных автоколлиматоров будет рассмотрена в нашей следующей статье.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Бурбаев А. М. Методы и средства испытаний, контроля и юстировки оптических приборов. — С.-Пб.: ИТМО, 2007. [Burbaev A. M. Metody i sredstva ispytaniy, kontrolya i yustirovki opticheskikh priborov. S.-Pb. ITMO, 2007]
2. Проспект компании MOELLER-WEDEL OPTICAL GmbH. Examples for Applications of collimators, telescopes, visual and electronic autocollimators. Wedel (Germany). — 2011. [Booklet of MOELLER-WEDEL OPTICAL GmbH. Examples for Applications of collimators, telescopes, visual and electronic autocollimators. Wedel (Germany). 2011]
3. Гукайло М. Я. Автоколлимация. — Москва: Машиностроение, 1963 г. [Gukailo M. YA. Avtokollimatsiya. Moskva: Mashinostroenie, 1963]
4. Королев А. Н., Гарцуев А. И., Полищук Г. С., Трегуб В. П. Цифровой автоколлиматор // Оптический журнал. — 2009. — Т. 76, № 10. — С. 42—47. [Korolev A. N., Gartsuev

A. I., Polishchuk G. S., Tregub V. P. // Opticheskii zhurnal. 2009. Vol. 76, N 10. P. 42]

5. Описание продукции компании TRIOPTICS "TriAngle". Wedel (Germany). — 2010. [Product description. TRIOPTICS "TriAngle". Wedel (Germany). 2010]

6. Каталог продукции НПК «ДИАГНОСТИКА». — С.-Пб. — 2009. [Katalog produktsii NPK «DIAGNOSTIKA». S.-Pb. 2009]

7. Описание продукции TAYLOR HOBSON «Alignment system». — Leicester (United Kingdom), 2009. [Product description. TAYLOR HOBSON «Alignment system». Leicester (United Kingdom), 2009]

8. Описание продукции MOELLER-WEDEL ELCOMAT 3000, ELCOMAT Vario, ELCOMAT HR. — Wedel (Germany). — 2011. [Product description. MOELLER-WEDEL ELCOMAT 3000, ELCOMAT Vario, ELCOMAT HR. Wedel (Germany). 2011]

9. Королев А. Н., Гарцуев А. И. Цифровой двухкоординатный автоколлиматор с разрешением 0,001 угловой секунды // Измерительная техника. — 2004. — № 12. — С. 29—32. [Korolev A. N., Gartsuev A. I. // Izmeritel'naya tekhnika. 2004. N 12. P. 29]

10. Королев А. Н., Гарцуев А. И. Исследование точности позиционирования изображения на ПЗС матрице // Измерительная техника. — 2004. — № 5. — С. 20—22. [Korolev A. N., Gartsuev A. I. // Izmeritel'naya tekhnika. 2004. N 5. P. 20]

11. Проспект компании DAVIDSON OPTRONICS Principles of Autocollimation and applications. DAVIDSON OPTRONICS: West Covina. — USA, 2011. [Booklet of DAVIDSON OPTRONICS Principles of Autocollimation and applications. DAVIDSON OPTRONICS: West Covina. USA, 2011]

12. Описание продукции LDS Vector Digital autocollimator. Newport: Irvine. — USA, 2010. [Product description. LDS Vector Digital autocollimator. Newport: Irvine. USA, 2010]

*Дата поступления рукописи  
в редакцию 17.02 2012 г.*

Fesenko A.V. Borovitskii V.N. **Visual and optoelectronic autocollimator.**

*Keywords: autocollimators, optical-electronic systems multielement photodetectors.*

The article presents advantages of optical-electronic autocollimator to the visual ones. The possibility is shown to upgrade existing visual systems by replacing the autocollimating eyepieces by the units containing multielement detectors and connecting them to the computer. The brief characteristics of autocollimating eyepieces and modern optoelectronic autocollimators are given.

Ukraine, Kiev, NTU "KPI".

Фесенко А. В., Боровицкий В. М. **Візуальні та оптико-електронні автоколіматори.**

*Ключові слова: автоколіматор, оптико-електронні системи, багатоелементні фотоприймачі.*

Показано переваги оптико-електронних автоколіматорів перед візуальними. Розглянуто можливість модернізації існуючих візуальних систем шляхом заміни автоколімаційних окулярів на блоки з багатоелементними приймачами та підключення їх до комп'ютеру. Наведено стислі характеристики автоколімаційних окулярів та сучасних оптико-електронних автоколіматорів

Україна, м. Київ, НТУУ «КПІ».

## РЕЦЕНЗЕНТЫ НОМЕРА

- Алиева Алмаз Паша-кызы*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроника», Азербайджанский технический университет, г. Баку
- Болтовец Николай Силивич*, канд. физ.-мат. наук, начальник отдела, НИИ «Орион», г. Киев
- Глушеченко Эдуард Николаевич*, канд. техн. наук, начальник отдела, НПП «Сатурн», г. Киев
- Добровольский Юрий Георгиевич*, канд. техн. наук, начальник научно-аналитического отдела, ООО «Научно-производственная фирма «Тензор», г. Черновцы
- Житарюк Виктор Григорьевич*, канд. физ.-мат. наук, доцент, Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича
- Каримов Абдулазиз Вахитович*, докт. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз, г. Ташкент
- Карушкин Николай Федорович*, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, НИИ «Орион», г. Киев
- Клюй Николай Иванович*, докт. физ.-мат. наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАНУ, г. Киев
- Кобак Николай Николаевич*, канд. техн. наук, доцент, НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев
- Ковалюк Захарий Дмитриевич*, докт. физ.-мат. наук, директор Черновицкого отделения Института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАНУ, г. Черновцы
- Николенко Анатолий Александрович*, канд. техн. наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса
- Проценко Иван Ефимович*, докт. физ.-мат. наук, зав. кафедрой прикладной физики, Сумский государственный университет, г. Сумы
- Рюхтин Вячеслав Васильевич*, канд. техн. наук, зам. председателя правления по научной работе, ЦКБ «Ритм», г. Черновцы
- Смольский Сергей Михайлович*, докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой, зам. директора Института радиотехники и электроники МЭИ, г. Москва
- Томашик Василий Николаевич*, докт. хим. наук, ученый секретарь, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАНУ, г. Киев
- Шокало Владимир Михайлович*, докт. техн. наук, профессор Харьковского национального университета радиоэлектроники



**Warsaw University of Technology**  
**Institute of Electronic Systems**  
Nowowiejska 15/19, 00-665,  
Warszawa, Poland  
tel: +48 22 234 5588  
[www.ise.pw.edu.pl/sps](http://www.ise.pw.edu.pl/sps)

The Signal Processing Symposium SPS-2013 will be held on 5–7 June 2013 in Jachranka Village (near Warsaw), Poland.

The conference is organized by: Warsaw University of Technology, Institute of Electronic Systems; Foundation for Development of Radiocommunications and Multimedia Technologies; IEEE Signal Processing Society Poland Chapter; IEEE AESS Poland Chapter; Radiolocation and Digital Signal Processing Students' Research Group.

### The Symposium Topics:

- Image processing and recognition
- High resolution imaging
- SAR, ISAR, IFSAR, tomography
- Detection of weak signals
- Moving target detection
- Algorithms for real-time processing
- DSP algorithms
- PLD implementation of DSP algorithms
- Software and hardware for DSP
- Remote sensing,
- Radar technology (Active, Passive, Noise)
- Security applications
- Automotive
- Microwave techniques
- Space technology and satellite systems
- Advanced techniques
- Radio-communication and software radio
- Digital navigation
- Tele-informatics
- Compression techniques
- Voice processing and recognition
- Signal processing for medical applications
- Fuzzy logic
- Other



## Комплект малогабаритных вакуумных установок для плазменного травления пленок и материалов



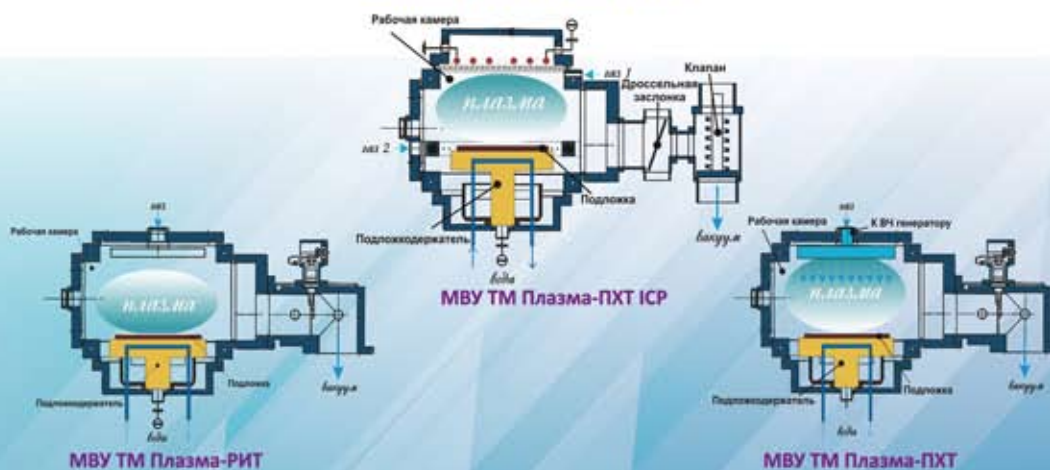
### Назначение:

Мелкосерийное производство, технологическое обучение, отработка технологических процессов, научные исследования.

### Специализация:

- «МВУ ТМ Плазма-РИТ» Малогабаритная вакуумная установка травления слоёв и материалов методом реактивно-ионной обработки.
- «МВУ ТМ Плазма-ПХТ» Малогабаритная вакуумная установка плазмохимического травления слоёв и материалов в плазме диодного разряда.
- «МВУ ТМ Плазма-ПХТ ICP» Малогабаритная вакуумная установка плазменного травления слоёв и материалов с ICP источником плазмы.

### Схемы реакторов МВУ



Россия, 124460 Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект, 10  
Телефон: +7 (495) 229-75-01 Факс: +7 (495) 229-75-22  
Почта: info@niitm.ru Сайт: www.niitm.ru

Намер готовили  
Баку, Запорожье, Киев, Львов, Минск, Москва,  
Одесса, Сумы, Ташкент, Харьков, Черновцы



Пишите  
Подписывайтесь  
Читайте