

ТРА

**ТЕХНОЛОГИЯ И
КОНСТРУИРОВАНИЕ В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ**

ПЯТНАДЦАТАЯ
МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ



**СОВРЕМЕННЫЕ
ИНФОРМАЦИОННЫЕ
И ЭЛЕКТРОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**

26 — 30 мая 2014 года
Украина, г. Одесса

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



www.tkea.com.ua

6 2013

НОЯБРЬ — ДЕКАБРЬ

Издательство «Политехперіодика»



E-mail: tkea@optima.com.ua, web-сайт: www.tkea.com.ua
Login Skype: politehperiodika, тел. +38 (048)728-18-50, тел./факс 728-49-46

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).

Включен в базы данных Ulrich's Periodicals Directory, DOAJ и наукометрическую базу РИНЦ

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

В Украине Отделения связи. «Каталог видань України». Индекс 23785.
Подписное агентство «Идея», www.idea.com.ua. Индекс 11146.
Подписное агентство «KSS», 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 23785.
В редакции «ТКЭА» можно подписаться с любого номера.



Номер выпущен при поддержке
НПП «Сатурн», (г. Киев)
ЧАО «Укрналит» (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, web-сайт: 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. Корещук.

Компьютерное обеспечение: П. В. Назаров.

Подписано к печати 19.12.2013. Формат 60×84 1/8. Печать офсетная.

Печ. л. 7,0+1,0. Уч.-изд. л. 9,5. Тираж 200 экз. Заказ № 7.

Издательство «Политехперіодика»
(65044, г. Одесса-44, а/я 17).

Отпечатано в типографии РА «ART-V»
(65026, г. Одесса, ул. Гаванная, 3).

**ТЕХНОЛОГИЯ
И
КОНСТРУИРОВАНИЕ
В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2013

№ 6

Год издания 37-й

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

К.т.н. В. М. Чмиль

СОДЕРЖАНИЕ

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. Кончиц (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)
Д.ф.-м.н. В. В. Должиков (г. Харьков)
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. И. Круковский (г. Львов)
Д.т.н. С. Ю. Лузин (г. С.-Петербург)
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)

УЧРЕДИТЕЛИ

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

Одобрено к печати Ученым советом
ОНПУ
(Протокол № 4 от 24.12 2013 г.)

Современные электронные технологии

Наноструктурированные антидиффузионные слои в контактах к широкозонным полупроводникам. *Кудрик Я. Я.*

3

СВЧ-техника

Комплексный коэффициент редукции для цилиндрического потока электронов с изменяющейся амплитудой переменной составляющей тока в ЛБВ. *Часнык В. И., Строковский Я. Н.*

14

Системы передачи и обработки сигналов

Баркероподобные системы последовательностей и их обработка. *Голубничий А. Г.* (на английском языке)

19

Быстрое отслеживание частоты. *Прокопенко И. Г., Омельчук И. П., Чирка Ю. Д., Вовк В. Ю.* (на английском языке)

25

Методы получения РСА-изображений захороненных объектов для георадара. *Unal M., Caliskan A., Turk A. S., Bakbak P. O.* (на английском языке)

32

Эксплуатационные показатели качества транспортной телекоммуникационной первичной сети Украины. *Бондаренко О. В., Костик Б. Я., Степанов Д. Н., Левенберг Е. В.*

37

Технологические процессы и оборудование

Получение двухсторонних высоковольтных эпитаксиальных кремниевых $p-i-n$ -структур методом ЖФЭ. *Вакив Н. М., Круковский С. И., Тимчишин В. Р., Васькив А. П.*

41

Материалы электроники

Изучение адсорбционных состояний в керамике ZnO—Ag методом ТВЭ-кривых. *Ляшков А. Ю.*

46

Получение пригодного для сенсорики пористого кремния методом неэлектролитического травления MacEtch. *Яцунский И. Р.*

52

Список рецензентов номера

56

Новые книги

13, 18, 45

ЗМІСТ

Сучасні електронні технології

Наноструктуровані антидифузійні шари у контактах до широкозонних напівпровідників. *Кудрик Я. Я.* (3)

НВЧ-техніка

Комплексний коефіцієнт редукції для циліндричного потоку електронів зі змінюваною амплітудою змінної складової струму в ЛБХ. *Часник В. І., Строчковський Я. М.* (14)

Системи передачі та обробки сигналів

Баркероподібні системи послідовностей та їх обробка. *Голубничий О. Г. (англійською)* (19)

Швидке відслідковування частоти. *Прокопенко І. Г., Омельчук І. П., Чирка Ю. Д., Вовк В. Ю. (англійською)* (25)

Методи отримання РСА-зображень захоронених об'єктів для георадара. *Unal M., Caliskan A., Turk A. S., Bakbak P. O. (англійською)* (32)

Експлуатаційні показники якості транспортної телекомунікаційної первинної мережі України. *Бондаренко О. В., Костик Б. Я., Степанов Д. М., Левенберг Є. В.* (37)

Технологічні процеси та обладнання

Отримання двосторонніх високовольтних епітаксійних кремнієвих $p-i-n$ -структур методом РФЕ. *Ваків М. М., Круковський С. І., Тимчишин В. Р., Васків А. П.* (41)

Матеріали електроніки

Вивчення адсорбційних станів у кераміці $ZnO-Ag$ методом ТВЕ-кривих. *Ляшков О. Ю.* (46)

Отримання придатного для сенсорики пористого кремнію методом неелектролітичного травлення MacEtch. *Яциунський І. Р.* (52)

CONTENTS

Modern electronic technologies

Nanostructured antidiffusion layers in contacts to wide-gap semiconductors. *Kudryk Ya. Ya.* (3)

Microwave engineering

Complex reduction coefficient for a cylindrical electron beam with variable amplitude of the variable current component in the TWT. *Chasnyk V. I., Strocovsky Ya. N.* (14)

Systems of transfer and processing of signals

Barker-like systems of sequences and their processing. *Holubnychyi A. G. (in English)* (19)

Fast frequency tracking. *Prokopenko I. G., Omelchuk I. P., Chyrka Yu. D., Vovk V. Yu. (in English)* (25)

Subsurface and through-wall SAR imaging techniques for ground penetrating radar. *Unal M., Caliskan A., Turk A. S., Bakbak P. O. (in English)* (32)

Operational performance of the primary transport telecommunication network of Ukraine. *Bondarenko O. V., Kostik B. Ya., Stepanov D. N., Levenberg E. V.* (37)

Technological processes and equipment

Obtaining of bilateral high voltage epitaxial $p-i-n$ Si structures by LPE method. *Vakiv N. M., Krukovsky S. I., Tymchyshyn V. R., Vas'kiv A. P.* (41)

Materials of electronics

Study of adsorption states in $ZnO-Ag$ gas-sensitive ceramics using the ECTV curves method. *Lyashkov A. Yu.* (46)

Obtaining porous silicon suitable for sensor technology using MacEtch nonelectrolytic etching. *Iatsunskyi I. R.* (52)

УДК 621.315.592

К. т. н. Я. Я. КУДРИК

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАН Украины
E-mail: bh_@mail.ru

НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ АНТИДИФФУЗИОННЫЕ СЛОИ В КОНТАКТАХ К ШИРОКОЗОННЫМ ПОЛУПРОВОДНИКАМ

Исследована связь между антидиффузионными свойствами пленок на основе TiB_2 и их нанокристаллической структурой, определены оптимальные размеры нанокристаллитов и условия образования нанокристаллической пленки. Применение таких пленок в качестве антидиффузионных слоев в контактах к широкозонным полупроводникам позволяет повысить термостойкость приборов на их основе.

Ключевые слова: антидиффузионный слой, нанокристаллическая пленка, термическая стабильность, широкозонный полупроводник, контакт.

Создание качественных омических и барьерных контактов к широкозонным полупроводникам является одной из важных задач при проектировании и создании элементов экстремальной электроники. При увеличении диапазона рабочей температуры прибора, плотности токов ужесточаются требования к надежности контактов. Как правило, обеспечить низкое удельное сопротивление омического контакта при высоких термостабильности и адгезионной прочности, используя всего один металл, не удастся. Вместо этого используют многослойную структуру, каждый из слоев которой несет свою функциональную нагрузку. В зависимости от назначения контакта и требований к его параметрам он может содержать один или несколько функциональных слоев: подлежащий, контактообразующий, адгезионный, антидиффузионный и слой внешней металлизации. Антидиффузионный слой (диффузионный барьер) предупреждает взаимную диффузию материалов полупроводника, контактообразующего слоя и внешней металлизации.

Рассмотрим способы создания антидиффузионных слоев и их роль в формировании и функционировании контакта.

Основные требования, предъявляемые к антидиффузионным слоям, довольно противоречивы: с одной стороны, нужно минимизировать диффузию сквозь слой металлизации и обеспечить химическую инертность слоя, с другой — обеспечить хорошую адгезию; с одной стороны, нужна высокая прочность материала, с другой — пластичность для компенсации критических внутренних механических напряжений без образования микротрещин. Кроме того, материал ан-

тидиффузионного слоя должен обладать высокой электро- и теплопроводностью.

В качестве материалов антидиффузионных слоев чаще всего используют тугоплавкие поликристаллические слои металлов и сплавов, а также их нитриды и бориды [1–6]. В настоящей работе будут рассмотрены особенности контактной металлизации с антидиффузионными слоями на основе диборида титана, используемой при изготовлении омических и барьерных контактов к широкозонным полупроводникам. Ранее в наших работах [5, 6] были рассмотрены контакты с антидиффузионными слоями на основе квазиаморфных боридов тугоплавких металлов и показана их перспективность для повышения надежности активных микроволновых элементов на основе Si, SiC и некоторых соединений A_3B_5 . Однако в этих работах не рассматривалась связь между повышением прочности и пластичности пленок при достижении нанокристаллического состояния и их антидиффузионными свойствами. В данной работе предпринята попытка восполнить этот пробел.

Как показано в работах, проведенных на большом количестве пленок [7, 8], при уменьшении диаметра d зерна поликристаллической пленки до определенного предела (в общем случае примерно до 10 нм, для некоторых нитридов и боридов, в т. ч. и TiB_2 , — до 4–5 нм) происходит увеличение энергии образования дислокаций, что приводит к значительному увеличению микротвердости материала H по механизму Холла–Питча ($H \sim d^{-1/2}$) (рис. 1) [8–16]. По достижении упомянутого предела диаметра d происходит смена доминирующего механизма, определяющего микротвердость, а именно:

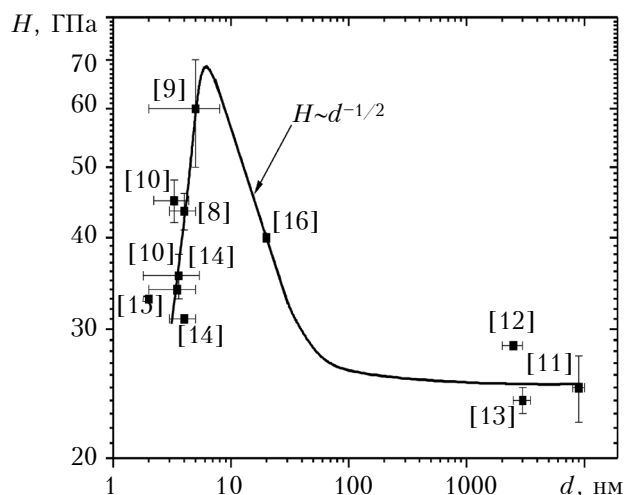


Рис. 1. Зависимость микротвердости слоя TiB_2 от размера зерна (по данным из источников, указанных на рисунке)

микротвердость начинает определяться вкладом тройных стыков границ и уменьшается с дальнейшим уменьшением размеров кристаллитов. Другие работы указывают на одновременное увеличение пластичности (относительного удлинения до разрушения) σ полученных материалов в том же диапазоне размеров зерна [17, 18] ($\sigma \sim d^{-1/2}$). Особенностью боридов и нитридов тугоплавких металлов, по сравнению с чистыми металлами, является заполнение межзеренного пространства аморфным веществом, препятствующим межзеренному проскальзыванию при механических нагрузках, что, по-видимому, является причиной продления действия механизма Холла—Питча до меньших размеров зерна. Иными словами, использование наноструктурированной пленки TiB_2 позволит получить уникальные физико-механические свойства антидиффузионных слоев, недостижимые при других состояниях того же материала.

Целью данной работы является исследование контактов к широкозонным полупроводникам (SiC, GaP, InP) с диффузионными барьерами на основе наноструктурированных слоев диборида титана и определение связи между их диффузионными свойствами и размерами нанокристаллитов.

Методика эксперимента

Образцы для исследований представляли собой сплошные пленки и контактные структуры, изготовленные и прошедшие термообработку по одинаковой методике. Исследования профилей атомного состава по глубине контактной металлизации проведены методом Оже-электронной спектроскопии, фазового состава — методом рентгеновской дифракции, морфологии поверхности — методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) и растровой электронной микроскопии.

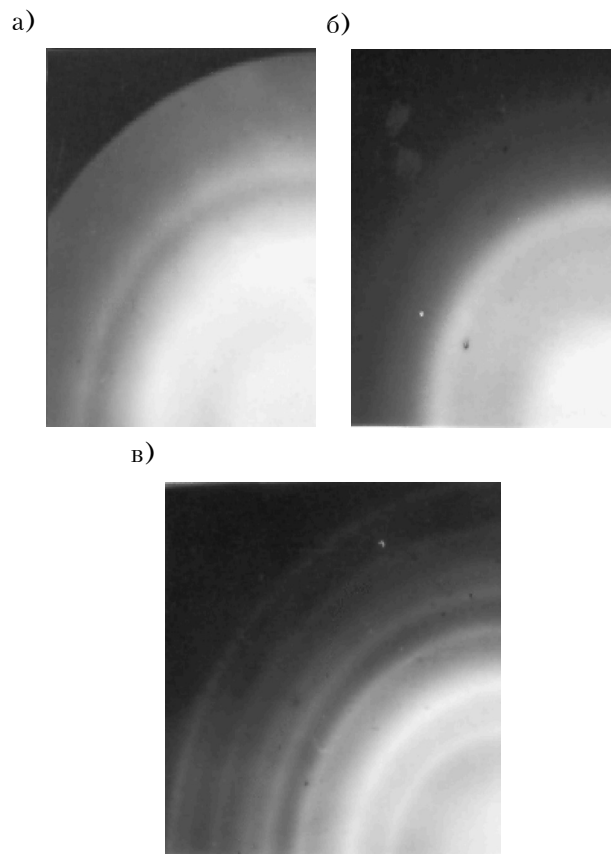


Рис. 2. Электронограммы пленок TiB_x , полученных при различных значениях тока распыления [19]:

a — 0,2 А; b — 0,4 А; c — 1 А

Удельное контактное сопротивление исследовано методом линии переноса (transmission-line method). Структура, состав нанесенных контактов, характерный размер кристаллитов d и параметры быстрой термической обработки (БТО) представлены в **таблице**.

Для получения наноструктурированной пленки диборида титана была отработана технология магнетронного напыления на полупроводниковую подложку. Производили напыление пленок одинаковой толщины при разном токе распыления (скорости напыления). На электронограммах пленок, нанесенных при токе 0,2 А (рис. 2, a), видны сильно размытые рефлексы отражения от плоскости (101), имеющие 100%-ную интенсивность в решетке. Структура пленки квазиаморфна, размеры упорядоченных участков — до 3 нм.

Повышение тока разряда до 0,4 А (см. рис. 2, b) приводит к укрупнению нанокристаллитов (размер упорядоченных участков около 3—5 нм). Сформированная пленка характеризуется наличием плотной высокодисперсной структуры, сглаживающей шероховатость поверхности подложки. При увеличении тока разряда до 1 А (см. рис. 2, c) структура слоя становится более кристаллической, хотя остается сильнодисперсной (размеры кристаллических областей в аморфной фазе превышают 5 нм). Электронограмма фиксирует рефлексы уже от нескольких плоскостей

Структура и состав исследованных контактов, а также параметры проведения БТО

Контактная структура	Толщина слоев, нм	Размер зерна d , нм	Температура отжига T_o , °C	Время отжига, с	C_O^{***} , ат. %
$TiB_x-n-SiC$ 6H	50	3–5 (5–10*)	1000	90	4
$Au-TiB_x-n-SiC$ 6H	50/50	3–5	1000	60	6
$Au-TiB_x-n-SiC$ 6H**	50/50	30–50*	1000	60	нет данных
TiB_x-GaP	100	10–30*	800	60	8
$Au-TiB_x-Au-Ge-GaP$	300/200/180/20	20–40*	600	60	14
$TiB_x-Ge-Au-InP$	100/50/50	20–40*	490	60	17

*Оценка размера сверху по данным АСМ; **Параметры распыления не оптимальны;

***Содержание кислорода в мишени TiB_x

(101), (110), (111), однако размытость линий не позволяет сделать точный расчет размеров кристаллических областей. Таким образом, для получения оптимального антидиффузионного слоя ток разряда должен составлять 0,4 А.

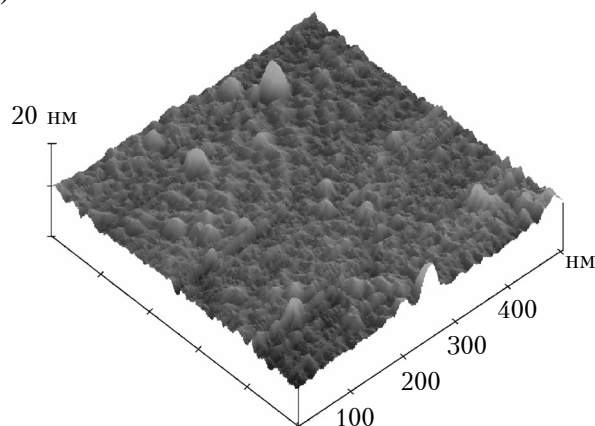
**Контакты к 6H-SiC.
Термическая стойкость**

Наглядно продемонстрировать возможности нанокристаллических пленок можно на примере контакта $TiB_x-n-SiC$ 6H.

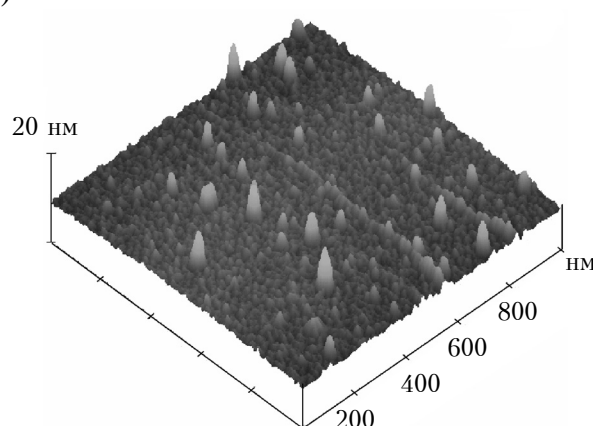
При исследованиях морфологии поверхности, конечно же, нельзя определить точный размер упорядоченных областей, однако если предпо-

ложить, что неровности на поверхности пленки TiB_x связаны с выходом на поверхность нанокристаллитов, можно для оценки плотности размещения кристаллитов в аморфной матрице и проведения оценки их размеров сверху использовать такие параметры, как наиболее вероятная высота неровностей и расстояние между пиками, как это сделано в [20]. Тогда из анализа приведенных на **рис. 3 а, б** АСМ-изображений можно сделать вывод, что размеры неровностей поверхности пленки TiB_x до и после БТО значительно не изменились, а размеры кристаллитов не превышают 5–10 нм.

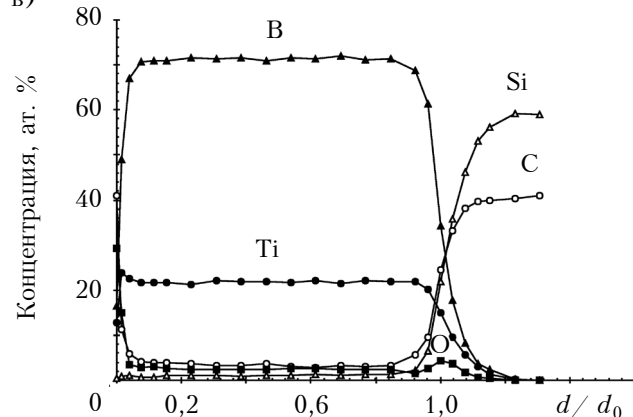
а)



б)



в)



г)

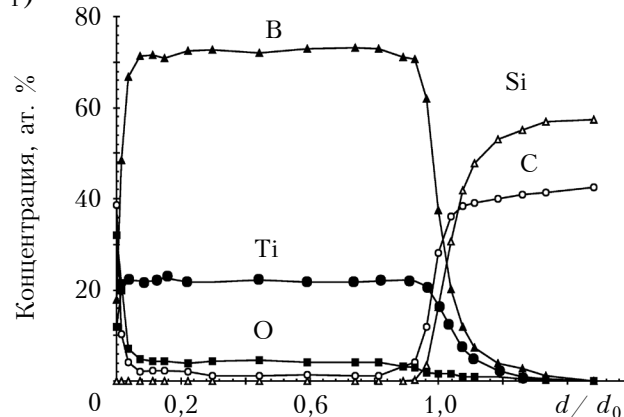


Рис. 3. Морфология поверхности в контакте $TiB_x-n-SiC$ 6H (а, б) и профили атомного состава по глубине контактной металлизации (в, г) до отжига (а, в) и после БТО при 1000°C (б, г) [21]

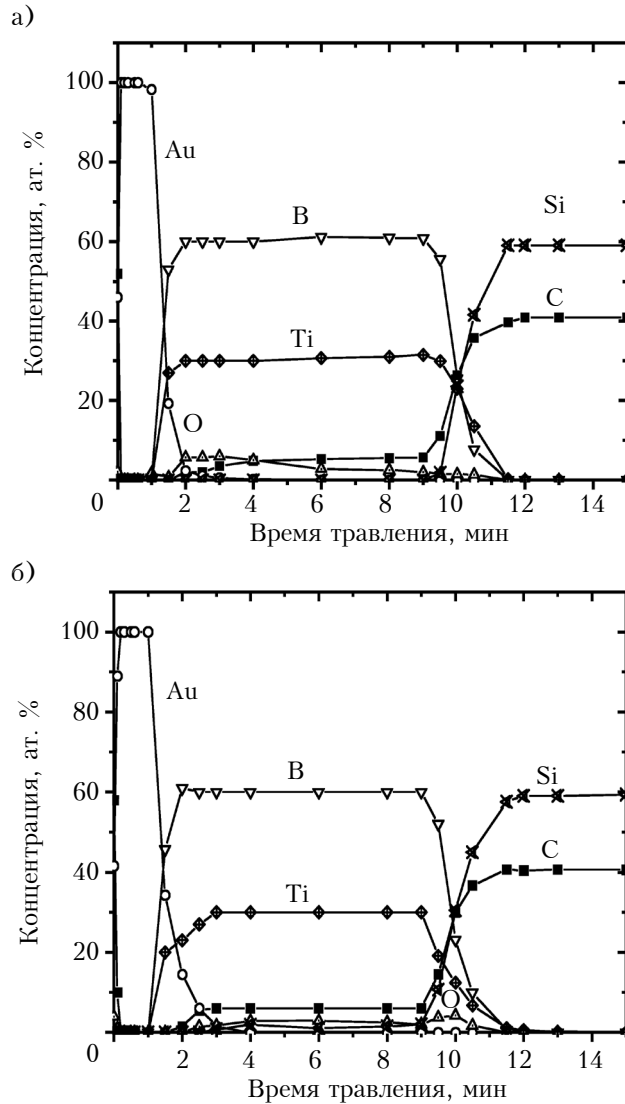


Рис. 4. Профили атомного состава по глубине контактной металлизации в контакте Au-TiB_x-n-SiC 6H до отжига (а) и после БТО при 1000°C (б) [22]

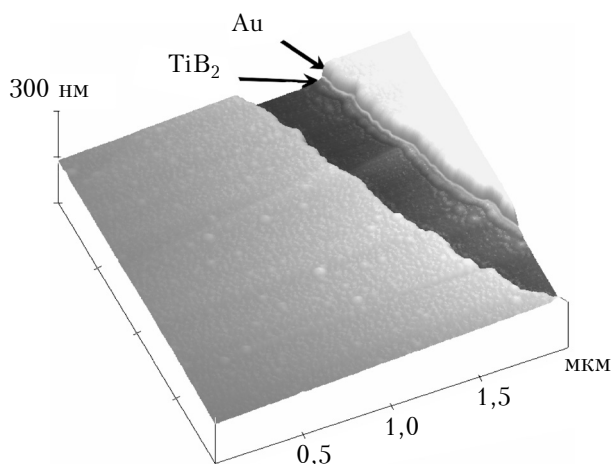


Рис. 5. Морфология поверхности структуры Au-TiB_x-n-SiC 6H с поликристаллическим слоем TiB_x после БТО при 1000 °C

Анализ профилей распределения компонентов по глубине образца показал отсутствие значительной взаимодиффузии компонентов антидиффузионного слоя и полупроводника как в TiB_x-n-SiC 6H (рис. 3 в, з), так и в контакте Au-TiB_x-n-SiC 6H (рис. 4). Это свидетельствует об ослаблении диффузии по границам зерен в нанокристаллической пленке TiB_x, скорее всего из-за наличия аморфной фазы в межзеренном пространстве. Параметры низковольтных диодов Шоттки на основе таких контактов [23] не изменились после БТО при 1000°C в течение 90 с. Высота барьера до и после БТО составляла 0,7 эВ, фактор идеальности — 1,5. Рабочий температурный диапазон такого диода — от -190 до 425°C [24].

В то же время пленка с более крупными кристаллитами при тех же условиях отжига не выдерживает внутренних механических напряжений, возникающих во время БТО, и релаксирует с образованием микротрещин. На рис. 5, где показана морфология поверхности структуры Au-TiB_x-n-SiC 6H после БТО при 1000°C, в глубине микротрещины виден крупнокристаллический антидиффузионный слой, размер зерна практически соответствует толщине слоя TiB₂.

Контакты к GaP. Влияние кислорода на размер зерна

При формировании контактов к фосфиду галлия параметры напыления были теми же, однако количество кислорода в мишени диборида титана было больше.

На рис. 6, где представлены АСМ-изображения поверхности контактов TiB_x-GaP, видно, что плотность распределения пиков значительно меньше, чем на контактах к карбиду кремния. При этом разброс значений высоты неровностей в два раза меньше, что может указывать на больший размер нанокристаллита (до 30 нм) и, одновременно, на больший объем аморфной фазы в исследуемой пленке TiB_x.

На это же указывают и результаты фазового анализа барьерного контакта TiB_x-GaP. На рентгенодифрактограммах (рис. 7) были обнаружены рефлексы, связанные с включениями поликристаллической гексагональной фазы TiB₂. Высота пиков не изменяется до температуры БТО 800°C. Это свидетельствует об отсутствии межфазных реакций, по крайней мере, с нанокристаллической фазой TiB₂. Причиной отклонения размеров кристаллитов исследуемой пленки от расчетных значений может быть наличие в распыляемой мишени TiB_x довольно большого количества кислорода (рис. 8), стимулирующего образование более крупных кристаллитов (см. таблицу). Тем не менее, наличие до 10 ат. % кислорода практически не влияет на электрофизические характеристики контактов с исследуемыми антидиффузионными слоями.

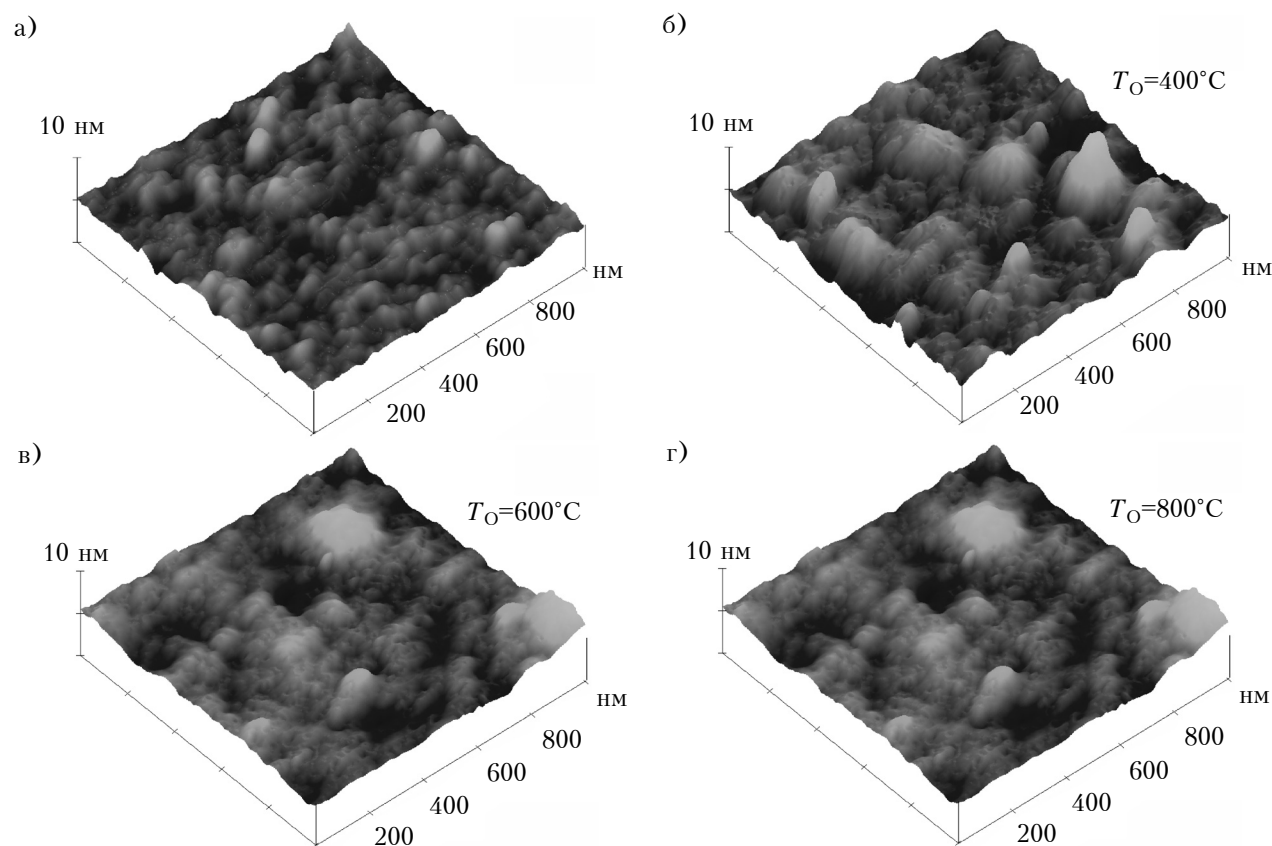


Рис. 6. Морфология поверхности структуры $\text{TiB}_x\text{—GaP}$ до отжига (а) и после БТО при разной температуре (б, в, г) [4]

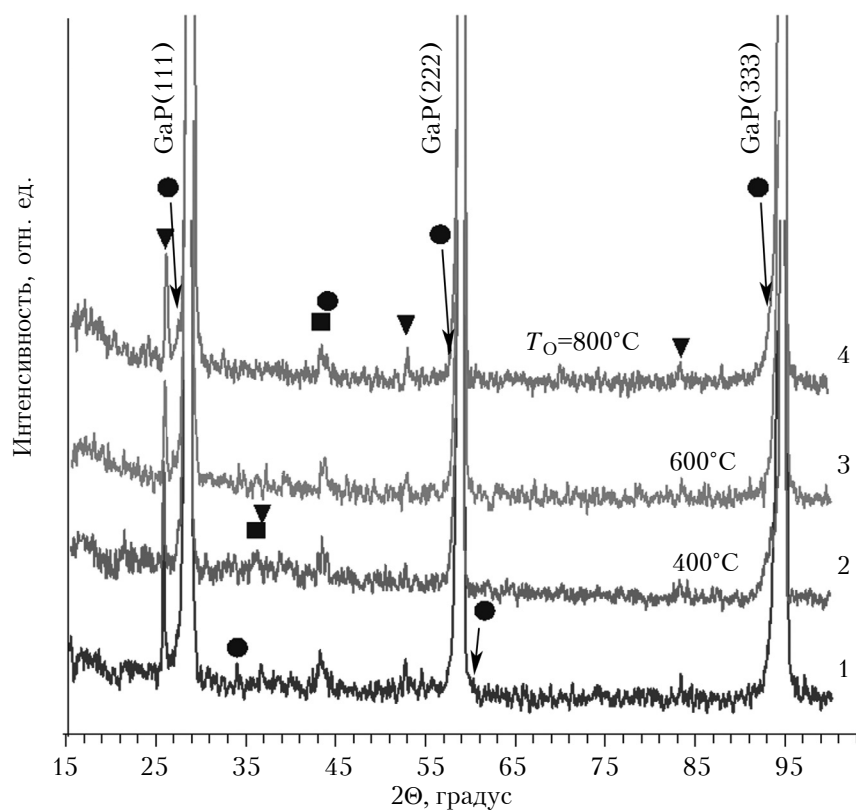


Рис. 7. Рентгенодифрактограммы барьерного контакта $\text{TiB}_x\text{—GaP}$ до отжига (1) и после БТО при разной температуре (2–4) [21] (■ TiB , ● TiB_2 , ▼ TiO_2)

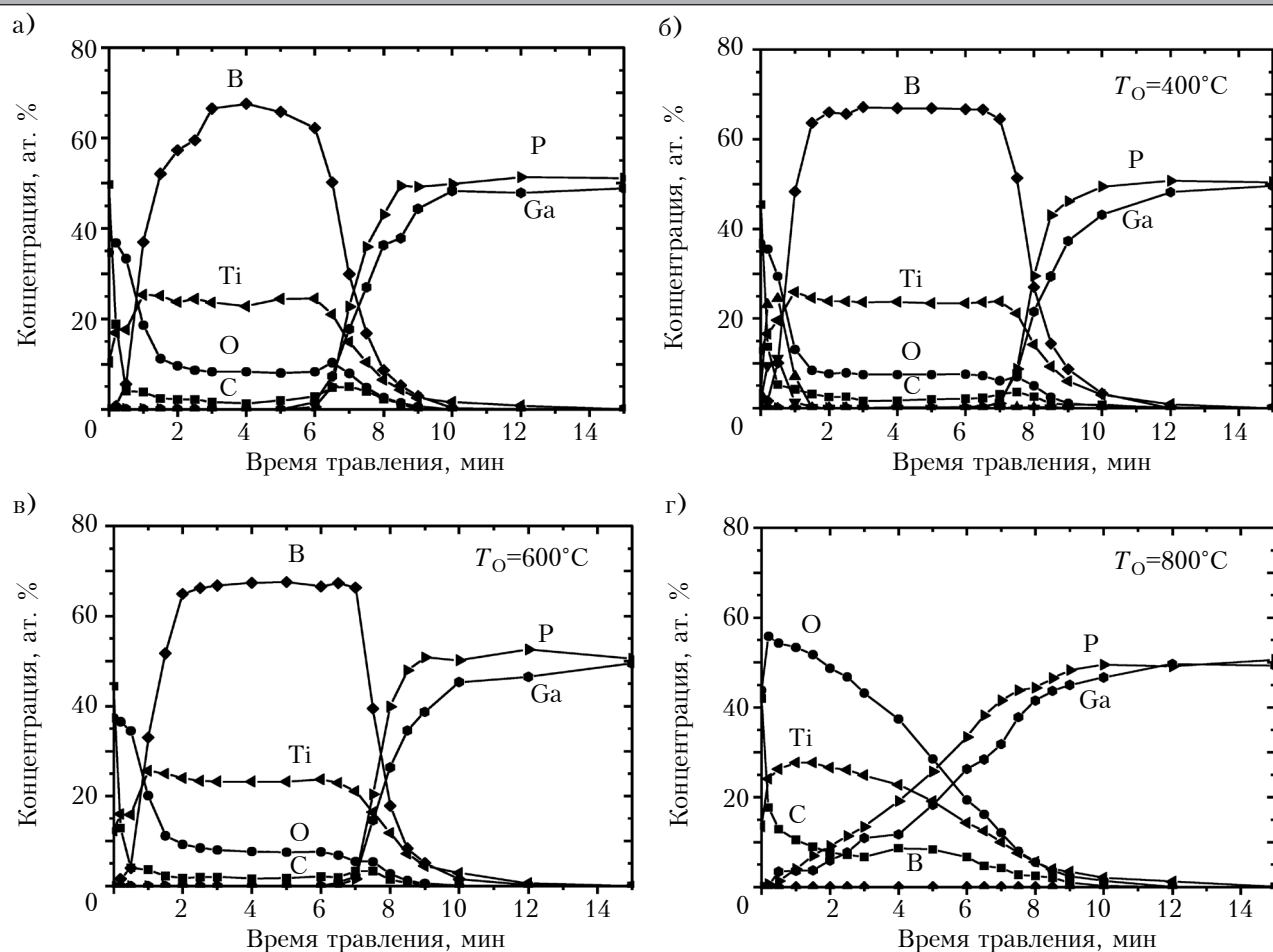


Рис. 8. Профили атомного состава по глубине контактной металлизации в контакте $\text{TiB}_x\text{-GaP}$ до отжига (а) и после БТО при разной температуре (б, в, г) [4]

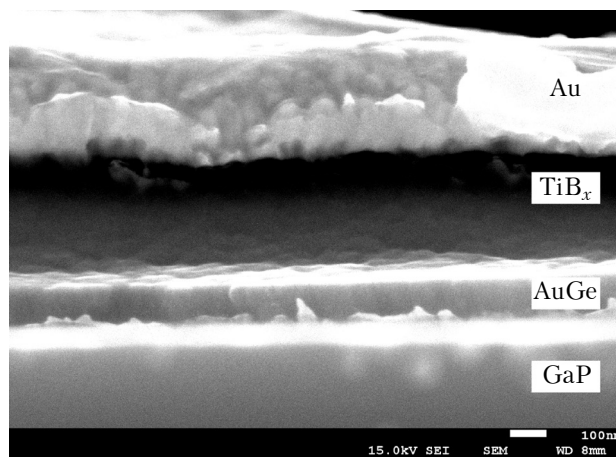


Рис. 9. Морфология скола контакта $\text{Au-TiB}_x\text{-Au-Ge-GaP}$

Кроме барьерных, были исследованы омические контакты $\text{Au-TiB}_x\text{-Au-Ge-GaP}$, в которых в качестве контактообразующего слоя применяется AuGe-металлизация, широко используемая для омических контактов к некоторым полупроводниковым соединениям A^3B^5 [4, 6].

Микрорельеф скола одного из таких образцов представлен на рис. 9.

Как оказалось, в антидиффузионных пленках контактов $\text{Au-TiB}_x\text{-Au-Ge-GaP}$ количество кислорода было еще выше, соответственно, понизилась максимальная температура БТО, ко-

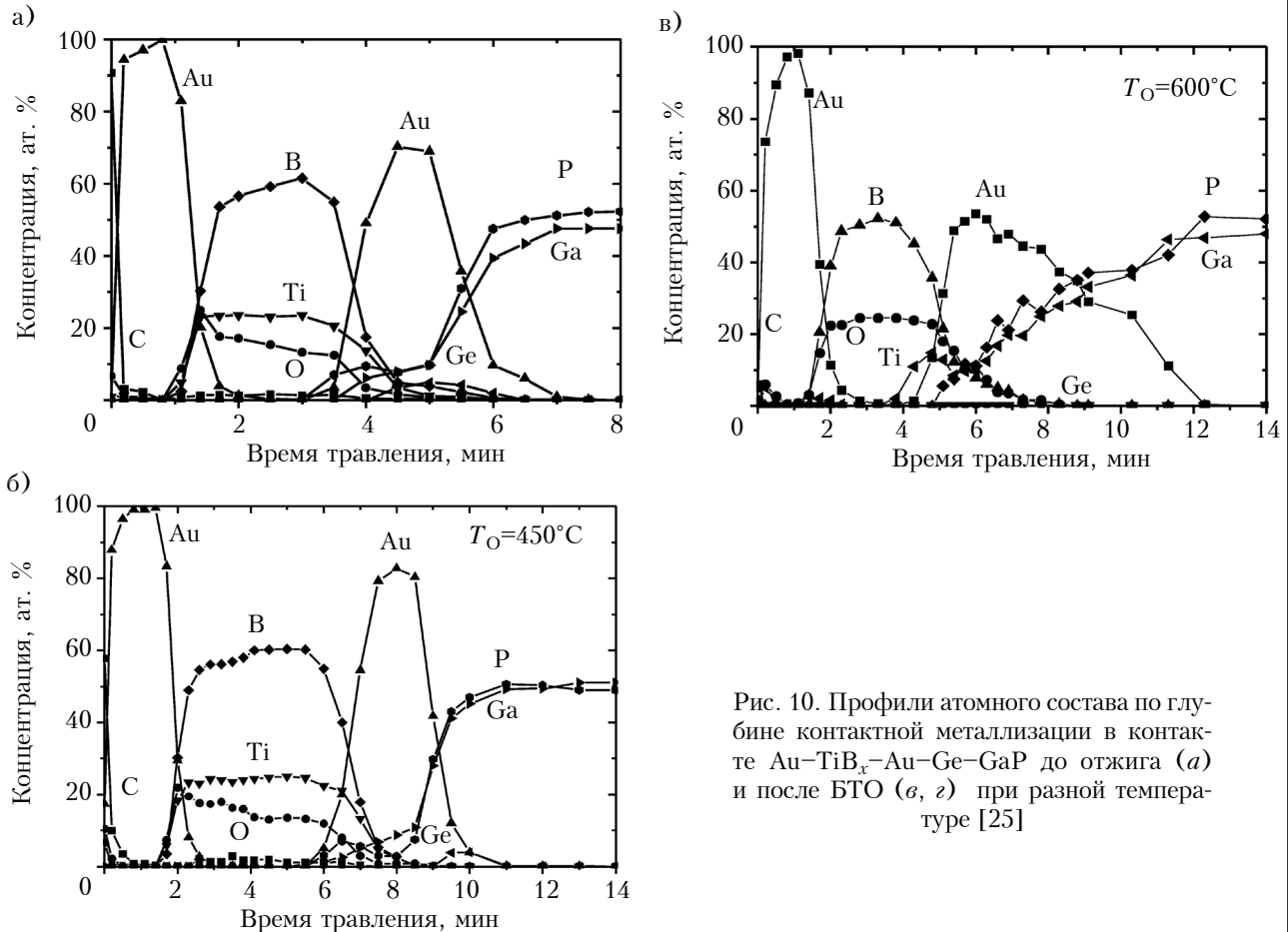


Рис. 10. Профили атомного состава по глубине контактной металлизации в контакте $\text{Au-TiB}_x\text{-Au-Ge-GaP}$ до отжига (а) и после БТО (б, в) при разной температуре [25]

торую выдерживает образец. На рис. 10, где изображены профили распределения компонентов по глубине таких контактов, видно, что содержание кислорода в пленке TiB_x можно оценить в 15–20 ат. %. Размер нанокристаллитов в исследуемой пленке составляет 20–40 нм. Минимальное контактное сопротивление наблюдалось в образце, прошедшем БТО при 600°C , и составляло $(1-5) \cdot 10^{-5}$ Ом·см² при концентрации легирующей примеси в $n\text{-GaP}$ примерно 10^{17} см⁻³ [25].

Контакты к InP. Эффект Киркендалла

При отжиге контакта $\text{TiB}_x\text{-Ge-Au-InP}$ возникает эффект Киркендалла: под диффузионным барьером образуются поры (рис. 11) из-за интенсивной диффузии золота вглубь фосфида индия (рис. 12). Как видно из приведенных на рис. 13 данных рентгенографических исследований такого контакта с нанесенным на него слоем золота, при температуре отжига 400°C образуется фаза AuIn_2 , преимущественно ориентации (220). Механизм такой интенсивной диффузии, очевидно, может заключаться в межфазном взаимодействии золота с индием, вследствие чего наблюдается массоперенос индия с границы раздела вглубь металла. При этом образуются вакансии индия, заполняемые атомами германия с меньшим атомным радиусом, что облегчает даль-

нейшую диффузию атомов индия наружу и германия с золотом внутрь фосфида индия.

При таких интенсивных процессах фазообразования особенно важно качество диффузионного барьера, препятствующего распространению пористости на поверхность и принимающего на себя дополнительные механические нагрузки, которые могут возникать при разогреве полупроводниковой структуры. Нанокристаллический

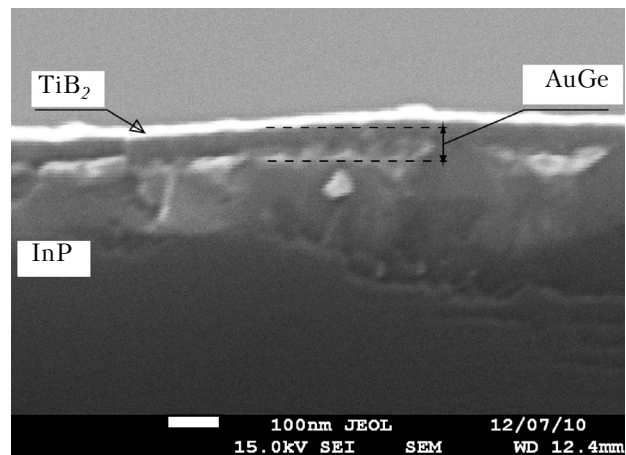


Рис. 11. Морфология скола и поверхности контакта $\text{TiB}_x\text{-Ge-Au-InP}$ после БТО при 490°C

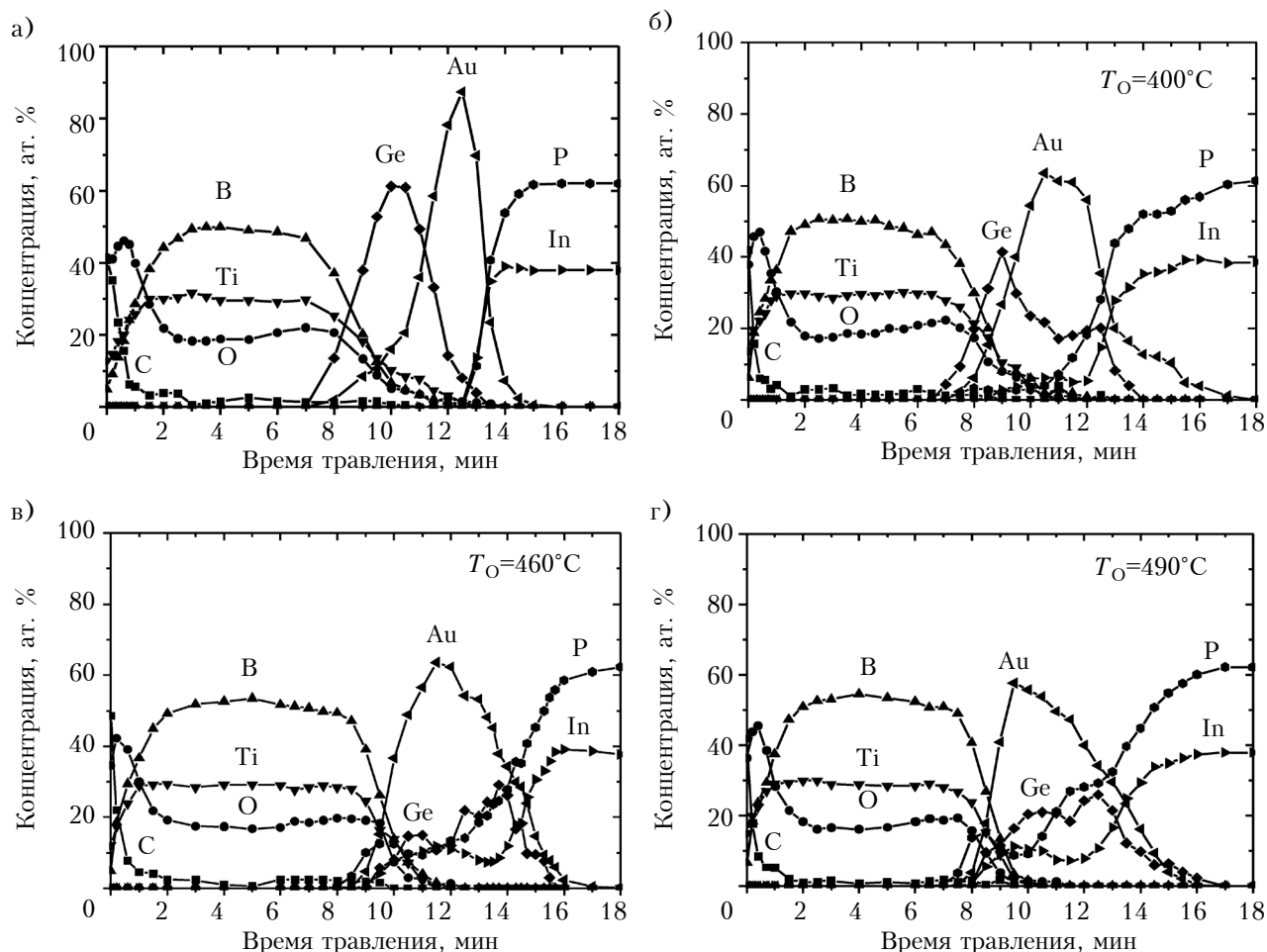


Рис. 12. Профили атомного состава по глубине контактной металлизации в контакте $\text{TiB}_x\text{-Ge-Au-InP}$ до отжига (а) и после БТО при разной температуре (б, в, г) [5]

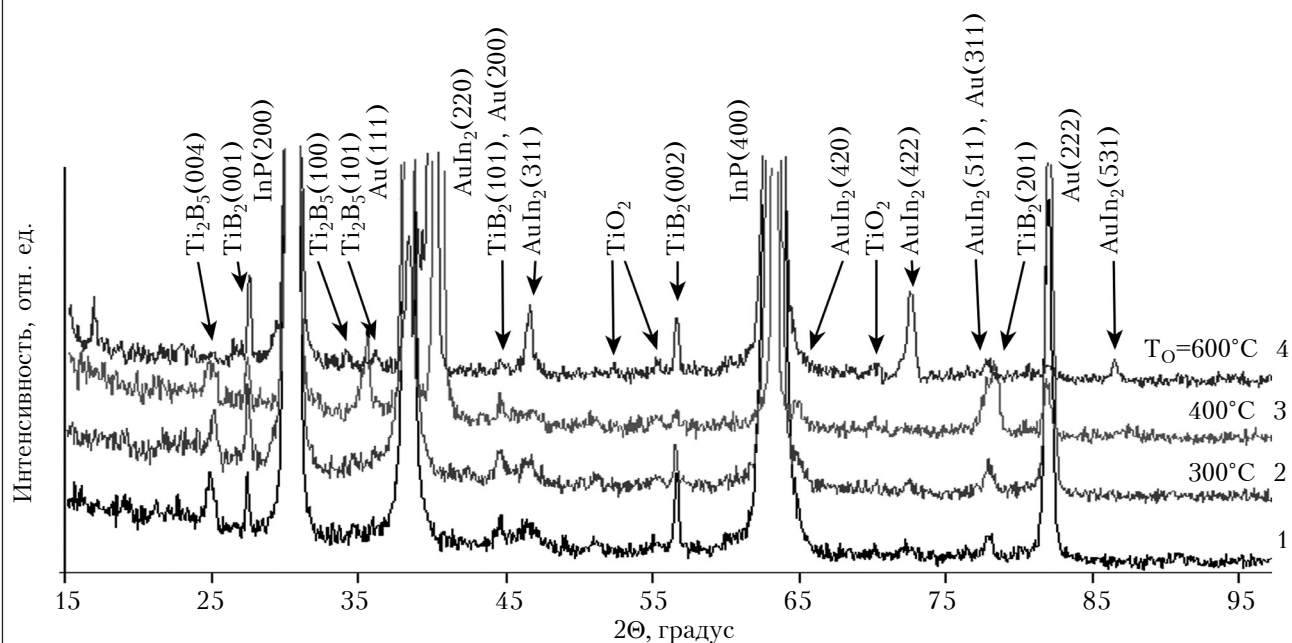


Рис. 13. Рентгенодифрактограммы системы $\text{Au-TiB}_x\text{-Ge-Au-InP}$ до отжига (1) и после БТО при разной температуре (2–4) [4]

диборид титана образует плотную пленку без заметных дефектов (см. рис. 11). Содержание кислорода в антидиффузионном слое составляет около 20 ат. %. Оценка размеров нанокристаллитов по морфологии поверхности дает значения 20–40 нм. Антидиффузионный слой остается стабильным по крайней мере до температуры БТО 490°C. Контактное сопротивление контактов Au–TiB_x–Ge–Au–InP составляет 1,7·10⁻⁵ Ом·см².

Одной из причин повышения диффузионной стойкости нанокристаллических пленок может быть то, что структура нанокристаллической пленки не колончатая (см. рис. 9), вследствие чего диффузия по границам зерен в нанокристаллической пленке затруднена из-за намного большего эффективного диффузионного пути (по аналогии с [26]). С другой стороны, как видно из рис. 8 и 10, диффузия сквозь слой TiB₂ стимулируется процессами формирования омического контакта, возможно, посредством образования внутренних механических напряжений и их релаксации с образованием протяженных дефектов, которые становятся проводниками диффузии. Поэтому нанокристаллическая пленка, обладая повышенной твердостью и пластичностью, оказывается более диффузионно стойкой по сравнению с поликристаллической.

Выводы

Проведенные исследования показали, что для получения максимальной механической прочности и термостойкости размеры нанокристаллитов в пленках, создающих диффузионные барьеры, должны находиться в пределах 3–15 нм. Пленки диборида титана с оптимальными параметрами нанокристаллитов можно получить методом магнетронного напыления с током разряда 0,4 А при количестве кислорода в мишени до 8 ат. %. Применение нанокристаллических пленок на основе диборида титана в качестве антидиффузионных слоев в омических и барьерных контактах к широкозонным полупроводникам позволяет расширить рабочий температурный диапазон и повысить надежность приборов на их основе.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Nicolet M.-A. Diffusion barriers in thin films // *Thin Solid Films*. — 1978. — Vol. 52. — P. 415–443.
2. Macherynski W., Paszkiewicz B. Development of diffusion barriers for Ti/Al based ohmic contact to AlGaIn/GaN heterostructures // *Proceed. of 9th International Conf. Advanced Semiconductor Devices & Microsystems*. — Slovakia, Smolenice Castle. — 2012. — P. 203–206.
3. Shalisha I., Shapira Y. Stability of Schottky contacts with Ta–Si–N amorphous diffusion barriers and Au overlayers on 6H–SiC // *J. Vac. Sci. Technol. B*. — 2000. — Vol. 18, N 5. — P. 2477–2481.
4. Агеев О. А., Беляев А. Е., Болтовец Н. С. и др. Фазы внедрения в технологии полупроводниковых прибор-

ров и СБИС / Под ред. Р. В. Конаковой. — Харьков: НТК «Институт монокристаллов», 2008.

5. Болтовец Н. С., Иванов В. Н., Беляев А. Е. и др. Контакты с диффузионными барьерами на основе фаз внедрения TiN, Ti(Zr)B_x в СВЧ диодах диапазона 75–350 ГГц // *ФТП*. — 2006. — Т. 40, № 6. — С. 753–757.
6. Belyaev A. E., Boltovets N. S., Konakova R. V. et al. Diffusion barriers in ohmic contacts to semiconductor device structures: technology, properties, application // In book: *Advances in Materials Science Research*. Vol. 12 / Ed. by M. C. Whithers. — NY: Nova Science Publishers, 2012. — P. 135–162.
7. Коротаев А. Д., Мошков В. Ю., Овчинников С. В. и др. Наноструктурные и нанокompозитные сверхтвердые покрытия // *Физическая мезомеханика*. — 2005. — Т. 8, № 5. — С. 103–116.
8. Андриевский Р. А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы // *Журнал российского химического общества им. Д. И. Менделеева*. — 2002. — Т. 46, № 5. — С. 50–56.
9. Андриевский Р. А. Основы наноструктурного материаловедения. Возможности и проблемы. — Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012.
10. Андриевский Р. А. Наноматериалы на основе тугоплавких карбидов, нитридов и боридов // *Успехи химических наук*. — 2005. — Т. 74, № 12. — С. 1163–1175.
11. Munr R. G. Material properties of titanium diboride // *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. — 2000. — Vol. 105, N 5. — P. 709–720.
12. Itoh H., Naka S., Matsudaira T., Hamamoto H. Preparation of TiB₂ a sintered compacts by hot pressing // *Journal of Materials Science*. — 1990. — Vol. 25. — P. 533–536.
13. Park June-Ho, Lee Yong-Ho, Koh Young-Hag, Kim Hyoun-Ee. Effect of hot-pressing temperature on densification and mechanical properties of titanium diboride with silicon nitride as a sintering aid // *J. Am. Ceram. Soc.* — 2000. — Vol. 83, N 6. — P. 1542–1544.
14. Андриевский Р. А., Калинин Г. В., Штанский Д. В. Высокорастворяющая просвечивающая и сканирующая электронная микроскопия наноструктурных боридонитридных пленок // *Физика твердого тела*. — 2000. — Т. 42, № 4. — С. 741–746.
15. Pfohl C., Bulak A., Rie K.-T. Development of titanium diboride coatings deposited by PACVD // *Surface and Coatings Technology*. — 2000. — Vol. 131. — P. 141–146.
16. Mayrhofer P. H., Mitterer C., Wen J. G. et al. Self-organized nanocolumnar structure in superhard TiB₂ thin films // *Applied Physics Letters*. — 2005. — Vol. 86. — P. 131909-(1–3).
17. Береснев В. М., Погребняк А. Д., Азаренков Н. А. и др. Нанокристаллические и нанокompозитные покрытия, структура, свойства // *Физическая инженерия поверхности*. — 2007. — Т. 5, № 1–2. — С. 4–27.
18. Андриевский Р. А., Глезер А. М. Прочность наноструктур // *Успехи физических наук*. — Т. 179, № 4. — С. 337–358.
19. Boltovets N. S., Ivanov V. N., Konakova R. V. et al. Technology and experimental studies of contacts for microwave diodes based on interstitial phases // *SQO*. — 2001. — Vol. 4, N 2. — P. 93–105.
20. Todorović B., Jokić T., Rakočević Z. et al. The effect of rapid thermal annealing on structural and electrical properties of TiB₂ thin films // *Thin Solid Films*. — 1997. — Vol. 300, N 1–2. — P. 272–277.
21. Болтовец Н. С., Иванов В. Н., Конакова Р. В. и др. Межфазные взаимодействия и особенности структурной релаксации в контактах TiB_x-n-GaAs (InP, GaP, 6H-SiC), подвергнутых активным обработкам // *ФТП*. — 2004. — Т. 38, № 7. — С. 769–774.

22. Агеев О. А., Беляев А. Е., Болтовец Н. С. и др. Диоды с барьером Шоттки Au-TiB_x-n-6H-SiC: особенности токопереноса в выпрямляющих и невыпрямляющих контактах // ФТП. — 2009. — Т. 43, № 7. — С. 897–903.

23. Болтовец Н. С., Иванов В. Н., Ковтонюк В. М. и др. Диоды Ганна из InP с катодным контактом, инжектирующим горячие электроны. Часть 1. Межфазные взаимодействия в катодных контактах // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2010. — № 5–6. — С. 3–6.

24. Кудрик Я. Я. Исследование термостойких барьерных контактов к монокристаллам n-6H SiC // Тр. 4-й МНТК

«Микроэлектронные преобразователи и приборы на их основе». — Азербайджан, Баку — Сумгаит. — 2003. — С. 22–26.

25. Беляев А. Е., Болтовец Н. С., Иванов В. Н. и др. Межфазные взаимодействия и механизм токопереноса в омических контактах Au-TiB_x-AuGe-n-GaP // ФТП. — 2009. — Т. 43, № 11. — С. 1468. — 1472.

26. Gupta A., Wang H., Kvit A. et al. Effect of microstructure on diffusion of copper in TiN films // J. Appl. Phys. — 2003. — Vol. 93, N 9. — P. 5210–5214.

Дата поступления рукописи
в редакцию 23.07 2013 г.

Я. Я. КУДРИК

Україна, Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України
E-mail: bh_@mail.ru

НАНОСТРУКТУРОВАНІ АНТИДИФУЗІЙНІ ШАРИ У КОНТАКТАХ ДО ШИРОКОЗОННИХ НАПІВПРОВІДНИКІВ

Досліджено зв'язок між антидифузійними властивостями плівок TiB₂ та їх нанокристалічною структурою, визначено оптимальний розмір нанокристалітів та умови утворення нанокристалічної плівки. Застосування таких плівок як антидифузійних шарів в контактах до широкозонних напівпровідників дозволяє підвищити термостійкість приладів на їх основі.

Ключові слова: антидифузійний шар, нанокристалічна плівка, термічна стабільність, широкозонний напівпровідник, контакт.

YA. YA. KUDRYK

Ukraine, V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine
E-mail: bh_@mail.ru

NANOSTRUCTURED ANTIDIFFUSION LAYERS IN CONTACTS TO WIDE-GAP SEMICONDUCTORS

The interrelation between the antidiffusion properties of titanium diboride films and their nanocrystalline structure is investigated. We made a valid assumption that the main reason for degradation of contacts with TiB₂-based diffusion layers is diffusion through the TiB₂ film through dislocations (formed due to stresses that appear in the course of ohmic contact formation) rather than chemical interaction. In that case, increase of mechanical strength of the TiB₂ film at reduction of grain size will affect its diffusion strength more strongly than growth of diffusion penetrability owing to increase of grain boundary role. Our investigations showed that, to ensure maximal mechanical strength and heat stability, the size of nanocrystallites in films forming diffusion barriers has to lie within 3–15 nm. The TiB₂ films with optimal nanocrystallite parameters can be obtained using magnetron sputtering with discharge current of 0,4 A and oxygen content in a target up to 8 at.%. Application of TiB₂-based nanocrystal films as antidiffusion layers in contacts to wide-gap semiconductors makes it possible to raise heat stability of devices based on such semiconductors.

Keywords: antidiffusion layer, nanocrystal film, heat stability, wide-gap semiconductor, contact.

REFERENCES

1. Nicolet M.-A. Diffusion barriers in thin films. *Thin Solid Films*, 1978, vol. 52, pp. 415-443.

2. Macherzynski W., Paszkiewicz B. Development of diffusion barriers for Ti/Al based ohmic contact to AlGaIn/GaN heterostructures. *Proceed. of 9th International Conf. Advanced Semiconductor Devices & Microsystems*, Slovakia, Smolenice Castle, 2012, pp. 203-206.

3. Shalisha I., Shapira Y. Stability of Schottky contacts with Ta-Si-N amorphous diffusion barriers and Au overlayers on 6H-SiC. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2000, vol. 18, no 5, pp. 2477-2481.

4. Ageev O. A., Belyaev A. E., Boltovets N. S., Konakova R. V., Milenin V. V., Pilipenko V. A. *Fazy vnedreniya v*

tekhnologii poluprovodnikovyykh priborov i SBIS [Phase of implementation in semiconductor devices and VLSIs technology] Khar'kov, NTK Institut monokristallov, 2008 (in Russian).

5. Belyaev A. E., Konakova R. V., Kudrik Ya. Ya., Milenin V. V., Arsent'ev I. N., Bobyl A. V., P. Brunkov N., Tarasov I. S., Tonkikh A. A., Ulin V. P., Ustinov V. V., Cirlin G. E. Diffusion-barrier contacts based on the TiN and Ti(Zr)B_x interstitial phases in the microwave diodes for the range of 75–350 GHz. *Semiconductors*, 2006, vol. 40, iss. 6, pp 734-738. DOI: 10.1134/S1063782606060200

6. Belyaev A. E., Boltovets N. S., Konakova R. V., Kudrik Ya. Ya., Milenin V. V. Diffusion barriers in ohmic contacts to semiconductor device structures: technology, properties, application. In book: M. C. Whithers (Ed.)

Advances in Materials Science Research, vol. 12, NY, Nova Science Publishers, 2012, pp. 135-162.

7. Korotaev A.D., Moshkov V.Yu., Ovchinnikov S.V., Pinzhin Yu.P., Savostikov V.M., Tyumentsev A.N. Nanostructured and nanocomposite superhard coatings. *Phys. Mesomech.*, 2005, vol. 8, no 5-6, pp. 93-104.

8. Andrievskii R. A. [Nanomaterials: the concept and current problems] *Zhurnal rossiiskogo khimicheskogo obshchestva im. D. I. Mendeleeva*, 2002, vol. 46, no 5, pp. 50-56 (in Russian).

9. Andrievskii R. A. *Osnovy nanostrukturnogo materialovedeniya. Vozmozhnosti i problemy* [Fundamentals of nanostructured materials science. Opportunities and challenges] Moscow, "BINOM. Laboratoriya znaniy", 2012 (in Russian).

10. Andrievskii R. A. Nanomaterials based on high-melting carbides, nitrides and borides. *Russian Chemical Reviews*, 2005, vol. 74, no 12, pp. 1061-1072. DOI:10.1070/RC2005v074n12ABEH001202

11. Munr R. G. Material properties of titanium diboride, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 2000, vol. 105, no 5, pp. 709-720.

12. Itoh H., Naka S., Matsudaira T., Hamamoto H. Preparation of TiB_2 a sintered compacts by hot pressing, *Journal of Materials Science*, 1990, vol. 25, pp. 533-536.

13. Park June-Ho, Lee Yong-Ho, Koh Young-Hag, Kim Hyoun-Ee. Effect of hot-pressing temperature on densification and mechanical properties of titanium diboride with silicon nitride as a sintering aid. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2000, vol. 83, no 6, pp. 1542-1544.

14. Andrievskii R. A., Kalinnikov G. V., Shtanskii D. V. High-resolution transmission and scanning electron microscopy of boride-nitride nanostructured films. *Physics of the Solid State*, 2000, vol. 42, iss. 4, pp. 760-766. doi: 10.1134/1.1131287

15. Pfohl C., Bulak A., Rie K.-T. Development of titanium diboride coatings deposited by PACVD. *Surface and Coatings Technology*, 2000, vol. 131, pp. 141-146.

16. Mayrhofer P. H., Mitterer C., Wen J. G. et al. Self-organized nanocolumnar structure in superhard TiB_2 thin films. *Applied Physics Letters*, 2005, vol. 86, pp. 131909-(1-3).

17. Beresnev V. M., Pogrebniak A. D., Azarenkov N. A., Farenik V. I., Kirik G. V. Nanocrystalline and nanocomposite coverings, structure, properties. *Physical surface engineering*, 2007, vol. 5, no 1-2, pp. 4-27 (in Russian).

18. Andrievskiy R. A., Glezer A. M. Strength of nanostructures. *Physics-USpekhi*, 2009, vol. 52, no 4, pp. 315-334. DOI: 10.3367/UFNr.0179.200904a.0337

19. Boltovets N. S., Ivanov V. N., Konakova R. V. Kurakin A. M., Milenin V. V., Soloviev E. A., Verimeychenko G. M. Technology and experimental studies of contacts for microwave diodes based on interstitial phases, *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2001, vol. 4, no 2, pp. 93-105.

20. Todorovich B., Jokich T., Rakocevic Z. Markovich Z., Gakovich B., Nenadovich T. The effect of rapid thermal annealing on structural and electrical properties of TiB_2 thin films, *Thin Solid Films*, 1997, vol. 300, no 1-2, pp. 272-277.

21. Boltovets N. S., Ivanov V. N., Konakova R. V., Kudrik Ya. Ya., Litvin O. S., Litvin P. M., Milenin V. V. Interphase interactions and features of structural relaxation in TiB_x -n-GaAs (InP, GaP, 6H-SiC) contacts subjected to active treatment. *Semiconductors*, 2004, vol. 38, iss. 7, pp. 737-741. DOI: 10.1134/1.1777591

22. Ageev O. A., Belyaev A. E., Boltovets N. S., Ivanov V. N., Konakova R. V., Kudryk Ya. Ya., Lytvyn P. M., Milenin V. V., Sachenko A. V. Au- TiB_x -n-6H-SiC Schottky barrier diodes: Specific features of charge transport in rectifying and nonrectifying contacts. *Semiconductors*, 2009, vol. 43, iss. 7, pp. 865-871. DOI: 10.1134/S1063782609070070

23. Boltovets N. S., Ivanov V. N., Kovtonyuk V. M., Rayevskaya N. S., Belyaev A. E., Bobyl A. V., Konakova R. V., Kudryk Ya. Ya., Milenin V. V., Novitskiy S. V., Sheremet V. N. InP Gunn diodes with a cathode contact injecting hot electrons. Part 1. Interactions between phases in the cathode contacts. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 2010, no 5-6, pp. 3-6 (in Russian).

24. Kudrik Ya. Ya. [Investigation of heat-resistant barrier contacts to n-6H SiC] *Trudy 4 MNTK "Mikroelektronnye preobrazovateli i pribory na ikh osnove"* [Proc. 4th Int. Confer. "Microelectronic converters and devices on their basis"]. Azerbaidzhan, Baku-Sumgait, 2003, pp. 22-26. (in Russian)

25. Belyaev A. E., Boltovets N. S., Ivanov V. N., Kamalov A. B., Kapitanchuk L. M., Kladko V. P., Konakova R. V., Kudryk Ya. Ya., Milenin V. V., Nasyrov M. U., Nevolin P. V. Interphase interactions and the mechanism of current flow in Au- TiB_x -AuGe-n-GaP ohmic contacts. *Semiconductors*, vol. 43, iss. 11, pp. 1428-1432. DOI: 10.1134/S1063782609110062

26. Gupta A., Wang H., Kvit A., Duschner G., Narayan J. Effect of microstructure on diffusion of copper in TiN films. *J. Appl. Phys.*, 2003, vol. 93, no 9, pp. 5210-5214.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Хансен Р. С. Фазированные антенные решетки.— Москва: Техносфера, 2012.

В книге приведен всесторонний анализ особенностей проектирования и исследования характеристик фазированных антенных решеток и входящих в них систем. Особое значение придается рассмотрению алгоритмов, пригодных для использования в ПК. Представлена также обширная информация о различных типах антенных устройств с электронным управлением лучом и входящих в них функциональных системах. Книга предназначена для научных работников и инженеров, занимающихся исследованиями и разработками фазированных антенных решеток, а также аспирантов и студентов старших курсов, специализирующихся в области антенн и устройств СВЧ.



УДК 621.385.632

К. т. н. В. И. ЧАСНЫК, к. т. н. Я. Н. СТРОКОВСКИЙ

Украина, г. Киев, НИИ «Орион»

E-mail: ndiorion@tsua.net

КОМПЛЕКСНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ РЕДУКЦИИ ДЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ПОТОКА ЭЛЕКТРОНОВ С ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ АМПЛИТУДОЙ ПЕРЕМЕННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТОКА В ЛБВ

Получены формулы для расчета вещественной и мнимой частей комплексного коэффициента редукции для цилиндрического потока электронов с экспоненциально изменяющейся амплитудой переменной составляющей тока в лампе бегущей волны (ЛБВ). Показано, что учет мнимой части коэффициента редукции для линейного режима работы ЛБВ может изменить расчетную величину объемного заряда в 1,5–2 раза, что в свою очередь достаточно сильно влияет на формирование начальных условий нелинейного режима, а затем и на выходные характеристики ЛБВ.

Ключевые слова: комплексный коэффициент редукции, цилиндрический поток электронов, переменная составляющая тока, объемный заряд, ЛБВ.

Лампы бегущей волны (ЛБВ) с замедляющими системами на спирали или на связанных резонаторах являются электровакуумными приборами, усиливающими СВЧ-сигнал в диапазоне от 1 до 100 ГГц. По комплексу своих параметров и характеристик ЛБВ не имеет себе равных среди других электровакуумных СВЧ-приборов — клистронов и магнетронов. Именно сочетание таких параметров, как высокое усиление СВЧ-сигнала (до 60 дБ), высокая средняя мощность (от десятков до сотен ватт и даже кВт для ЛБВ на связанных резонаторах) и одновременно с этим — широчайшая полоса частот (до одной-двух октав) и обуславливает широкую область применения ЛБВ в качестве выходных усилителей для спутников связи, для радиолокационных станций гражданского и военного профиля, а также в электронных системах радиопротиводействия.

Усиление СВЧ-сигнала в ЛБВ происходит в результате длительного взаимодействия электронного потока с электромагнитной волной, распространяющейся вдоль замедляющей системы прибора. Единственным недостатком ЛБВ, который обусловлен длительным характером такого взаимодействия, является сравнительно невысокий электронный КПД, обычно не превышающий 15–20 % в спиральных ЛБВ. Способ одновременного повышения КПД и устойчивости ЛБВ к самовозбуждению на обратной гармонике был предложен еще в 1970 г. [1]: в замедляющую систему ЛБВ, начиная примерно с середины выходной секции лампы, вводится неоднородность в виде скачкообразного уменьшения шага замедляющей системы. Развитию этого направления в 1970–80 гг. было посвящено большое число работ — как теоретических, так и экспериментальных.

В ходе экспериментальных исследований было установлено, что КПД ЛБВ с одним скачком фазовой скорости (**ФС**) повышается не так значительно, как это получается в теоретических расчетах, к тому же несколько падает и коэффициент усиления ЛБВ. Более того, в некоторых случаях в экспериментальных макетах изохронной ЛБВ и ЛБВ со скачком **ФС**, введенным в точку максимума выходной мощности для однородной ЛБВ, рассчитанное повышение КПД вообще не было реализовано из-за невозможности обеспечения устойчивой работы выходной секции ЛБВ [2]. Причины такого несоответствия экспериментальных результатов расчетам в то время не были найдены.

Вместе с тем, в экспериментальных макетах ЛБВ с двойным скачком фазовой скорости КПД взаимодействия был увеличен в 1,5 раза по сравнению с КПД однородной ЛБВ [2]. При этом мы обратили внимание на то, что в таких ЛБВ отличия экспериментальных значений КПД и длины выходного участка спирали от расчетных были значительно меньшими, чем в ЛБВ с одним скачком фазовой скорости для случаев с высоким КПД. По нашему мнению, это связано с тем, что длина двойного скачка **ФС** составляет не более 10% длины выходной секции ЛБВ, в то время как протяженность участка спирали с одним скачком **ФС** намного больше (в 3–4 раза). Следовательно, точность исходных значений безразмерных параметров ЛБВ обязательно скажется на расчетных характеристиках ЛБВ, особенно в случае с одним скачком фазовой скорости, когда расчет происходит на большей длине взаимодействия.

Известно, что от величины параметра объемного заряда $4QC$ сильно зависят выходные характеристики ЛБВ — усиление и КПД [3, 4]. Для

вычисления параметра $4QC$ необходимо знать коэффициент депрессии p^2 , значению которого он прямо пропорционален. Для однородных спиральных ЛБВ значения коэффициента депрессии (или редукции) были определены еще в 1950-х — в начале 1960-х годов [3, 5]. С тех пор они неизменно применялись для вычисления параметра объемного заряда и позволяли рассчитывать выходные характеристики ЛБВ. Отличие расчетных и экспериментальных значений КПД, усиления и длины участков однородных спиральных ЛБВ были несущественными и определялись допущениями, принятыми при выводе основных уравнений ЛБВ. Поэтому при расчетах объемного заряда для ЛБВ со скачками фазовой скорости традиционно использовали те же значения коэффициентов депрессии, полученные с учетом только его действительной части. Вместе с тем, нетрудно заметить, что если в выражениях для определения коэффициента редукции [3, 6] переменная составляющая возбуждающего тока изменяется по амплитуде, то коэффициент редукции является комплексной величиной. Вероятно, неучет этого факта может существенно влиять на расчетное значение объемного заряда, а значит и на параметр несинхронности при тех его значениях, которые характерны для ЛБВ со скачком фазовой скорости.

Целью настоящей работы является вывод уравнений для вычисления комплексного коэффициента редукции и анализ влияния его мнимой части на точность вычисления параметра объемного заряда в спиральной ЛБВ.

Расчет комплексных коэффициентов редукции

Будем искать действительную (p_1) и мнимую (p_2) части комплексного коэффициента редукции для аксиально-симметричного потока электронов с переменной составляющей плотности тока (в дальнейшем — тока), изменяющейся по амплитуде:

$$i \sim \exp[j(-\beta_0 + j \cdot \Delta\beta)z], \quad (1)$$

где j — мнимая единица;

β_0 — постоянная распространения;

$\Delta\beta$ — амплитудная постоянная;

z — продольная координата.

Для этого воспользуемся выражением для коэффициента редукции (см. формулу (7) в [6]), положив $n=0$. Поперечную постоянную распространения с учетом (1) и условия $|\Delta\beta| \ll \beta_0$ (что обычно соблюдается на практике) запишем как

$$\gamma = [(\beta_0 - j \cdot \Delta\beta)^2 - (kR)^2]^{0.5} = (\beta_0^2 - k^2)^{0.5} + j \cdot \Delta\beta = \gamma_0 + j \cdot \Delta\beta. \quad (2)$$

Подставив это выражение в формулу (7) из [6], разложив в ряд по малому параметру $\Delta\beta$ и отделив вещественную и мнимую части в выражении для коэффициента редукции, получаем

$$p^2 = p_1 + j p_2 r_n \cdot \Delta\beta, \quad (3)$$

где

$$p_1 = 0,5 v^2 [I_0(v) K_0(v) + I_1(v) K_1(v) - A_1(\alpha v) A_0(v)] - 0,5 I_1^2(v) / A_0(v); \quad (4)$$

$$p_2 = v \gamma_0 \Delta\beta [I_0(v) K_0(v) - A_1(\alpha v) I_0^2(v) - I_0(v) I_1(v) [v A_0(v) - I_0(v) I_1(v)] / [v^2 A_0^2(v)] + 0,5 A_0(v) / I_0^2(\alpha v)]. \quad (5)$$

При этом

$$A_0(v) = I_0^2(v) - I_1^2(v);$$

$$A_1(\alpha v) = K_0(\alpha v) / I_0(\alpha v);$$

$$v = \gamma_0 r_n; \quad \alpha = \gamma_0 R / v;$$

$$\gamma_0 = (\beta_0^2 - k^2)^{0.5};$$

$$k = \omega(\epsilon_0 \mu_0)^{0.5};$$

$I_0(v)$, $I_1^2(v)$, $K_0(\alpha v)$, $K_0(\alpha v)$ — модифицированные функции Бесселя порядка 0 и 1.

В этих формулах приняты следующие обозначения:

r_n — радиус потока (пучка) электронов;

R — радиус цилиндрического волновода с идеальной проводимостью стенок;

ϵ_0 , μ_0 — диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума соответственно;

ω — круговая частота.

Функция распределения тока по радиусу совпадает здесь с распределением поля синхронной волны.

На рис. 1, а, б штриховыми линиями приведены рассчитанные по формулам (4) и (5) значения вещественной и мнимой частей комплексного коэффициента редукции для разных значений заполнения пролетного канала электронным пучком r_n/R . Сплошными линиями показаны коэффициенты редукции при равномерном распределении тока по радиусу пучка (сплошные линии), которые были получены по формулам

$$p_1 = 1 - 2 I_1(v) [K_1(v) + A_1(\alpha v) I_1(v)];$$

$$p_2 = 2 v (I_1^2(v) / [v I_0^2(\alpha v)] - 2 [I_0(v) - I_1(v) / v] A_1(\alpha v) I_1(v) - I_0(v) K_1(v) + I_1(v) [K_0(v) + 2 K_1(v) / v]).$$

Следует отметить, что значения вещественной части коэффициента редукции, приведенные на рис. 1, а, примерно совпадают с теми, что обычно используются в расчетах в случае равномерного распределения тока.

На рис. 1, а, б штриховые и сплошные линии совпадают при $\gamma_0 r_n < 0,6$, т. е. в этой области значения вещественной и мнимой частей коэффициента редукции не зависят от характера распределения тока по радиусу. В интервале $0,6 < \gamma_0 r_n < 0,9$ такая зависимость уже наблюдается, однако значения p_1 и p_2 , полученные для разных видов распределения тока по радиусу, отличаются между собой не более чем на 8%.

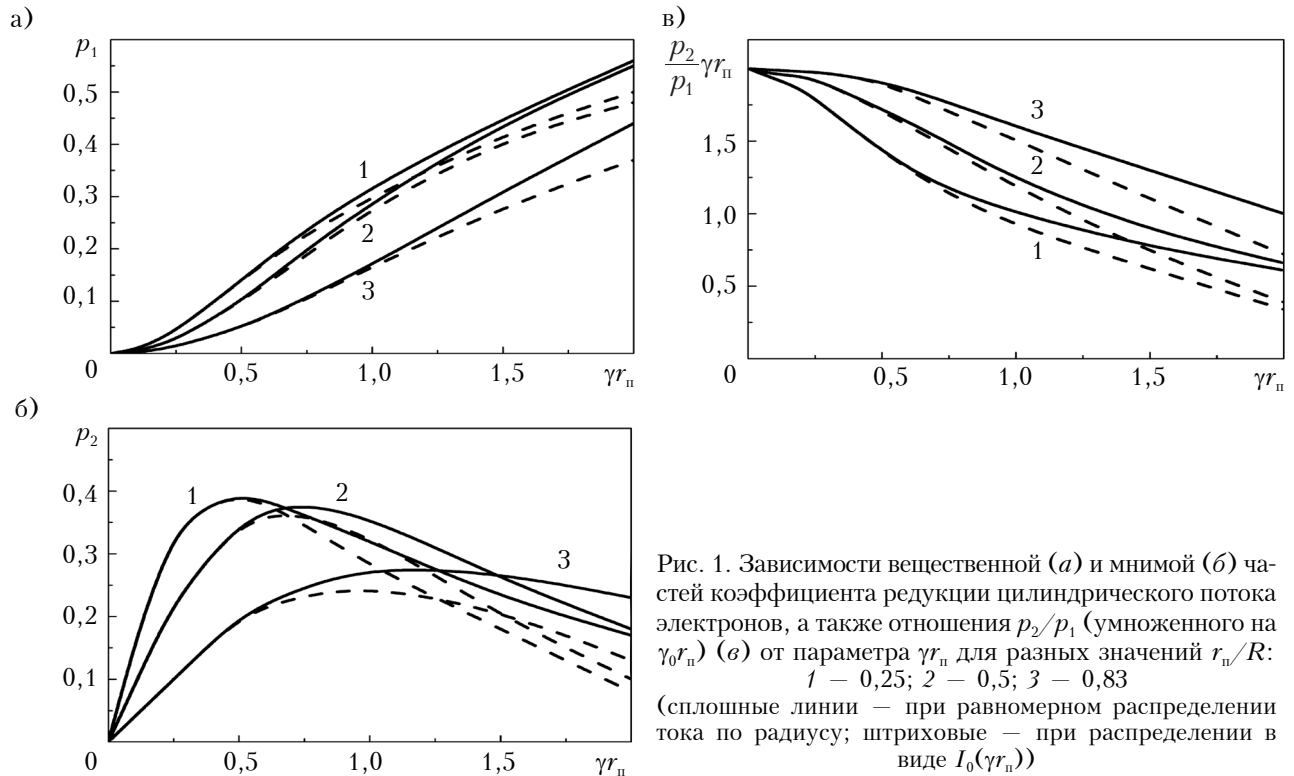


Рис. 1. Зависимости вещественной (а) и мнимой (б) частей коэффициента редукции цилиндрического потока электронов, а также отношения p_2/p_1 (умноженного на $\gamma_0 r_n$) (в) от параметра γr_n для разных значений r_n/R : 1 — 0,25; 2 — 0,5; 3 — 0,83 (сплошные линии — при равномерном распределении тока по радиусу; штриховые — при распределении в виде $I_0(\gamma r_n)$)

Из рис. 1, в видно, что в области значений $\gamma_0 r_n < 0,9$ (типичных для спиральных ЛБВ) величина отношения $p_2/p_1 \cdot \gamma_0 r_n$ находится в пределах 1,3–2,0 для случаев, когда параметр заполнения пучком пролетного канала r_n/R составляет более 0,5, что характерно для выходного участка ЛБВ в динамическом режиме работы. Следовательно, поправка, обусловленная мнимой частью коэффициента редукции, довольно значительна и ее необходимо учитывать при расчетах параметров и характеристик ЛБВ.

Влияние комплексных коэффициентов редукции на параметры ЛБВ, работающей в линейном режиме

Для оценки этого влияния выразим, используя (1), значение $\Delta\beta_0 r_n$ через возбуждающий ток и его производную по продольной координате z :

$$j r_n i \cdot \Delta\beta = -\gamma_0 r_n i - j r_n di/dz. \quad (6)$$

Подставляя полученное выражение в формулу (3) и используя записанный таким образом коэффициент редукции для определения поля пространственного заряда, а также следуя методике составления линейных уравнений ЛБВ [3], получаем

$$I_1'' + 4(QC)_3 I_1 = j(1+bC)^2 F, \quad (7) \\ F' + j b_3 F = I_1;$$

где F' , I_1'' — первая и вторая производные, соответственно, безразмерных амплитуд поля и первой гармоники тока по безразмерной длине замедляющей системы;

$$4(QC)_3 = 4QC[1 - K_2 C / (1 + bC)];$$

b — параметр несинхронности;

C — параметр усиления;

$$b_3 = b - \delta b;$$

$$\delta b = 4QC \cdot K_2 C / [2(1 + bC)];$$

$$K_2 = \gamma_0 r_n p_2 / p_1.$$

Из анализа выражения (7) видно, что на участках замедляющей системы ЛБВ до насыщения выходной мощности при $C=0,1$ и $b=\pm(2-4)$ (что характерно для приборов со скачком фазовой скорости в замедляющей системе) поправки могут увеличивать эквивалентный параметр объемного заряда $4(QC)_3$ приблизительно в два раза при $b=-(2-4)$ или уменьшать его, тоже приблизительно в два раза при $b=2-4$. Кроме того, эквивалентный параметр несинхронности b_3 зависит от параметра объемного заряда и отношения $p_2/p_1 \cdot \gamma_0 r_n$ (см. рис. 1, в).

Отметим, что при нелинейном режиме работы ЛБВ изменение амплитуды переменной составляющей тока не является экспоненциальным и мало меняется вдоль продольной оси прибора, т. е. в этом случае комплексные поправки можно было бы и не учитывать. Однако на линейном участке взаимодействия влияние поправок существенно, а значит, они оказывают сильное влияние на начальные условия нелинейного режима и, соответственно, на выходные характеристики ЛБВ.

Полученные здесь комплексные коэффициенты редукции могут быть применены в нелинейных уравнениях ЛБВ для первого приближения.

Для этого случая p_2 удобно представить в форме

$$p_2 = p_1 [1 + jK_2 C / [2(1 + bC)] \cdot (I_1 I_1^*)' / (I_1 I_1^*)], \quad (8)$$

где I_1, I_1^* — безразмерная амплитуда первой гармоники тока и сопряженная ей величина гармоники тока;

$(I_1 I_1^*)'$ — производная по безразмерной длине замедляющей системы.

Подставив выражение (8) в формулу для поля пространственного заряда (IV.24) из [3], можно увидеть, что мнимая часть (8) дает поправку к полю пространственного заряда, которая легко может быть учтена в системе нелинейных уравнений ЛБВ.

Выводы

Таким образом, проведенные исследования показали, что для более точного расчета параметра объемного заряда в ЛБВ со спиральной замедляющей системой в случае цилиндрического потока электронов с экспоненциально изменяющейся амплитудой переменной составляющей плотности тока следует учитывать мнимую часть коэффициента редукции. В линейном режиме работы ЛБВ при величине параметра усиления $S=0,1$ и параметра несинхронно-

сти $b=\pm(2-4)$ в области значений $\gamma_0 r_n < 0,9$ такая поправка приводит к изменению вычисленного без нее объемного заряда в 1,5 — 2 раза. Это, в свою очередь, оказывает существенное влияние на формирование начальных условий нелинейного режима и, соответственно, на расчетные характеристики ЛБВ.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Pat. USA 3.614.517. Traveling wave electron interaction device having efficiency enhancement means / Norman J Dionne. — 30.04.1970.
2. Маливанчук В. И., Рукин В. П. Исследование ЛБВ с двумя скачками фазовой скорости // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. — 1974. — Вып. 11. — С. 51–56.
3. Цейтлин М. Б., Кац А. М. Лампа с бегущей волной. — Москва: Советское радио, 1964.
4. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. Т. 2. — Москва: Высшая школа, 1972.
5. Branch G. M., Mihan T. G. Plasma frequency Reduction factors in electron beam // IRE Trans. Electr. Dev. — 1955. — Vol. ED-2. — P. 3–11.
6. Строковский Я. Н., Часнык В. И. Вычисление коэффициентов депрессии для цилиндрического потока электронов с вариацией переменной составляющей плотности тока по азимуту // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. — 1980. — Вып. 4. — С. 94–97.

Дата поступления рукописи
в редакцию 25.09 2013 г.

В. И. ЧАСНИК, Я. М. СТРОКОВСКИЙ

Україна, м. Київ, НДІ «Оріон»
E-mail: ndiorion@tsua.net

КОМПЛЕКСНИЙ КОЕФІЦІЄНТ РЕДУКЦІЇ ДЛЯ ЦИЛІНДРИЧНОГО ПОТОКУ ЕЛЕКТРОНІВ ЗІ ЗМІНЮВАНОЮ АМПЛІТУДОЮ ЗМІННОЇ СКЛАДОВОЇ СТРУМУ В ЛБХ

Отримано формули для обчислення дійсної та уявної частин комплексного коефіцієнта редукції для циліндричного потоку електронів з експоненціально змінюваною амплітудою змінної складової струму в лампі біжучої хвилі (ЛБХ). Показано, що врахування уявної частини коефіцієнта редукції для лінійного режиму роботи ЛБХ може змінювати розрахункову величину об'ємного заряду у 1,5–2 рази, що в свою чергу достатньо сильно впливає на формування початкових умов нелінійного режиму, а згодом і на вихідні характеристики ЛБХ.

Ключові слова: комплексний коефіцієнт редукції, циліндричний потік електронів, змінна складова струму, об'ємний заряд, ЛБХ.

V. I. CHASNYK, YA. N. STROCOVSKY

Ukraine, Kiev, SRI «Orion»
E-mail: ndiorion@tsua.net

COMPLEX REDUCTION COEFFICIENT FOR A CYLINDRICAL ELECTRON BEAM WITH VARIABLE AMPLITUDE OF THE VARIABLE CURRENT COMPONENT IN THE TWT

The conventional approach to calculating the space charge for the traveling-wave tube (TWT) with phase velocity jumps is to use the same values of the depression coefficient as the ones for homogeneous helical TWTs. However, if the variable component of the exciting current in the expressions for determining the reduction coefficient is changed in amplitude, then the reduction factor is a complex value. Perhaps the neglect of

this fact can significantly affect the volume discharge calculated value, and hence the non-synchronization parameter, for those of its values, which are characteristic of the TWT with a phase velocity jump. In this paper, formulas have been obtained for computation of real and imaginary parts of the complex reduction coefficient for a cylindrical electron beam with exponential variable amplitude of variable current component in the TWT. Influence of complex reduction coefficient on the parameters of the TWT operating in the linear mode is estimated. It is shown that taking into account the imaginary part of the reduction coefficient for linear operation of the TWT makes it possible to change the estimated amount of space charge 1.5 to 2 times, which in its turn has quite a strong effect on the formation of the initial conditions of the nonlinear mode and, subsequently, on the output characteristics of the TWT.

Keywords: complex reduction coefficient, cylindrical electron beam, variable current component, space charge, TWT.

REFERENCES

1. N. J. Dionne. *Traveling wave electron interaction device having efficiency enhancement means*. Patent USA no 3.614.517, 1970.
2. Malivanchuk V. I., Rukin V. P. [Research TWT with two jumps of the phase velocity]. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. Elektronika SVCh*, 1974, iss. 11, pp. 51–56 (in Russian).
3. Tseitlin M. B., Kats A. M. *Lampa s begushchei volnoi* [Tube with a traveling wave]. Moscow, Sovetskoe Radio, 1964 (in Russian).
4. Lebedev I. V. *Tekhnika i pribory SVCh*. T. 2 [Microwave equipment and Devices. Vol. 2]. Moscow, Vysshaya shkola, 1972 (in Russian).
5. Branch G. M., Mihran T. G. Plasma frequency reduction factors in electron beams. *Electron Devices, IRE Transactions on*, 1955, vol. 2, iss. 2, pp. 3–11. doi: 10.1109/T-ED.1955.14065
6. Stokovskii Ya. N., Chasnyk V. I. [Calculation of the depression coefficients for a cylindrical electron beam with the azimuth variation of the current density variable component] *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. Elektronika SVCh*, 1980, iss. 4, pp. 94–97 (in Russian).

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Гилмор-мл. А. С. Лампы с бегущей волной.— Москва: Техносфера, 2013.

Книга основана на материалах лекций и семинаров по СВЧ-лампам, которые автор многократно представлял в ведущих фирмах и университетах США. В ней сосредоточены базовые знания по теории и технике наиболее востребованного в течение многих, в том числе и последних десятилетий, прибора — лампы с бегущей волной (ЛБВ). Книга написана доступным для широкого круга читателей и образным языком, методически сбалансирована. Широко используемые цитаты из работ известных специалистов и обширная библиография способствуют более глубокому восприятию излагаемого материала. Книга может быть полезна как для подготовки студентов старших курсов и аспирантов вузов, так и специалистов, занятых разработкой и применением ЛБВ в различных областях радиоэлектроники.



НОВЫЕ КНИГИ



Нанотехнологии в электронике. Вып. 2 / Под ред. Ю. А. Чаплыгина.— Москва: Техносфера, 2013.

Настоящее издание — второй выпуск книги, вышедшей несколько лет назад. Каждую из частей книги представляет группа авторов, активно развивающих данное направление в Национальном исследовательском университете «МИЭТ». Коллектив авторов старался осуществить частичную преемственность материала, содержащегося в первом выпуске, однако структура книги существенно изменилась: группировка статей по условным разделам (теоретико-экспериментальные работы, методы исследований, технологии, приборы и устройства) представляется более правильной с точки зрения понимания общего направления работ в МИЭТ. Каждая из работ представляет собой законченный научный труд обзорного или обобщающего характера, либо является частью оригинальных исследований, полученных за последние 3–5 лет.



UDC 621.396.9

A. G. HOLUBNYCHYI, Ph.D. (Eng.)

Ukraine, Kyiv, National Aviation University

E-mail: a.holubnychyi@nau.edu.ua

BARKER-LIKE SYSTEMS OF SEQUENCES AND THEIR PROCESSING

New systems of binary sequences, that give the similar correlation properties after signal processing as that of the Barker sequences, are suggested and analyzed. The author considers processing of such systems, as well as ways of their application to radio systems and their comparison with complementary sequences.

Keywords: Barker sequences, complementary sequences, correlation properties, sidelobe suppression, signal processing.

Barker sequences (codes) are generally well known in telecommunication systems (DSSS technology, synchronization) and radar technology. They are characterized by low sidelobes of normalized autocorrelation function (ACF) $|R^{SL}(\tau)| \leq 1/N$ (N is the length of sequence) [1]. Binary Barker sequences (elements $a_i \in \{\pm 1\}$) are only known for lengths $N = 2; 3; 4; 5; 7; 11; 13$. There are no these sequences for odd lengths $N > 13$, but it is unknown about an existence of these sequences for even lengths $N > 4$ [2, p. 109]. Ternary Barker sequences (elements $a_i \in \{0, \pm 1\}$) are also known up to length $N = 31$ [3, p. 23]. There is a known kind of sequences called "Generalized Barker Sequences (Codes)", they are polyphase sequences which consist of elements $a_i \in \{\exp(j \cdot 2\pi k/M)\}$, $k \leq M$ [4]. Polyphase Barker sequences are known up to length $N = 77$ [5].

The problem boils down to a controversy concerning the existence of sequences or systems of sequences with a greater length that would make it possible to obtain after their processing an ACF-signal with a low value of sidelobes and a narrow central-lobe (as that of the Barker sequences). One of the solutions of this problem is the complementary sequences [6]. They are pairs of sequences of lengths $N = 2^n \cdot 10^k \cdot 26^m$ ($n \geq 0, k \geq 0, m \geq 0$; except for the case $n = k = m = 0$) with a property that the result of adding of sidelobes of their ACF is equal to zero. Complementary sequences are used in pulse compression radar systems, telecommunication systems IEEE 802.11b/g and other applications. Although the complementary sequences are a good technical solution, the optimal ACF structure synthesis problem still hasn't been solved in general, and there may be some other kinds of sequences that can, for instance, provide better noise stability of radio systems and consistency with some digital modulation techniques, e.g., QAM.

This research is a continuation of the research described in [7] and concerns the problem of synthesis of the optimal ACF structure. The goal of this study is to suggest new systems of binary sequences (generation rules for such sequences) and their application in signal processing, which would make it possible to obtain ACF-signals with the maximum normalized absolute value of sidelobes $1/N_{\max}$ (as that of the Barker sequences), where N_{\max} is the maximum length of sequence in the system of sequences.

Systems of Barker-like Sequences

Systems of sequences being suggested consist of the Barker sequence $a = \{-1; 1; -1; -1; -1\}$ (length $N = 5$) and binary sequences of lengths $N = 20 \cdot 2^q$, $q = 0, 1, 2, 3, \dots$, which can be obtained by using the generation rule

$$a_i = \begin{cases} -1, & i = 1; \\ (-1)^m, & i = 2m + 1; \\ (-1)^n a_{2n-1}, & i = 2n; \\ \begin{cases} a_{2n} & \text{for subtype A,} \\ -a_{2n} & \text{for subtype B,} \end{cases} & i = N + 1 - 2n; \\ \begin{cases} -a_{2n-1} & \text{for subtype A,} \\ a_{2n-1} & \text{for subtype B,} \end{cases} & i = N + 2 - 2n; \\ m = 1, (N/4 - 1); n = 1, N/4. \end{cases} \quad (1)$$

Such systems of sequences allow to obtain, after the joint signal processing (considered below), an ACF-signal with the maximum normalized absolute value of sidelobes $1/N_{\max}$, which would match to the maximum value of sidelobes in a Barker sequence of length N_{\max} , if it existed. Therefore, such systems of sequences may be called "Barker-like systems of sequences".

Such system can contain subtype A or subtype B sequences (signs of some ACF sidelobes depend

on the subtype, but their absolute values do not depend on the subtype).

Generation rule (1) generally gives binary sequences of lengths $N = 4k$, $k = 1, 2, 3, \dots$, but in our case only lengths $N = 20 \cdot 2^q$, $q = 0, 1, 2, 3, \dots$ are required.

The ACF of sequences that have been obtained by (1) is partly presented for certain τ values and $N \geq 12$ in

$$R(\tau) = \begin{cases} N, \tau = 0; \\ \begin{cases} 1 & \text{for subtype A, } \tau = 1, 3; \\ -1 & \text{for subtype B, } \tau = 1, 3; \end{cases} \\ 0, \tau = 2 + 4m, m = 0, \left(\frac{N}{4} - 1\right); \\ N - 16, \tau = 4. \end{cases} \quad (2)$$

It is important that the central lobe of ACF $R(0) = N$ is always separated from the first high sidelobe by low sidelobes (0 or ± 1); high sidelobes are concentrated between zero sidelobes (at $\tau = 2 + 4m$, $m = 0, 1, 2, 3, \dots$).

The structure of sequences which have been obtained by (1) is shown in Fig. 1.

Signal processing and ways of using Barker-like systems of sequences

Signal processing and ways of application of the suggested systems of sequences are based on the following property of the systems: the result of multiplication of ACF-signals (at the outputs of matched filters), that exist at the same time interval and match to these sequences, constitutes a signal that is similar to the ACF-signal with a narrow central-lobe (equals to the duration of the

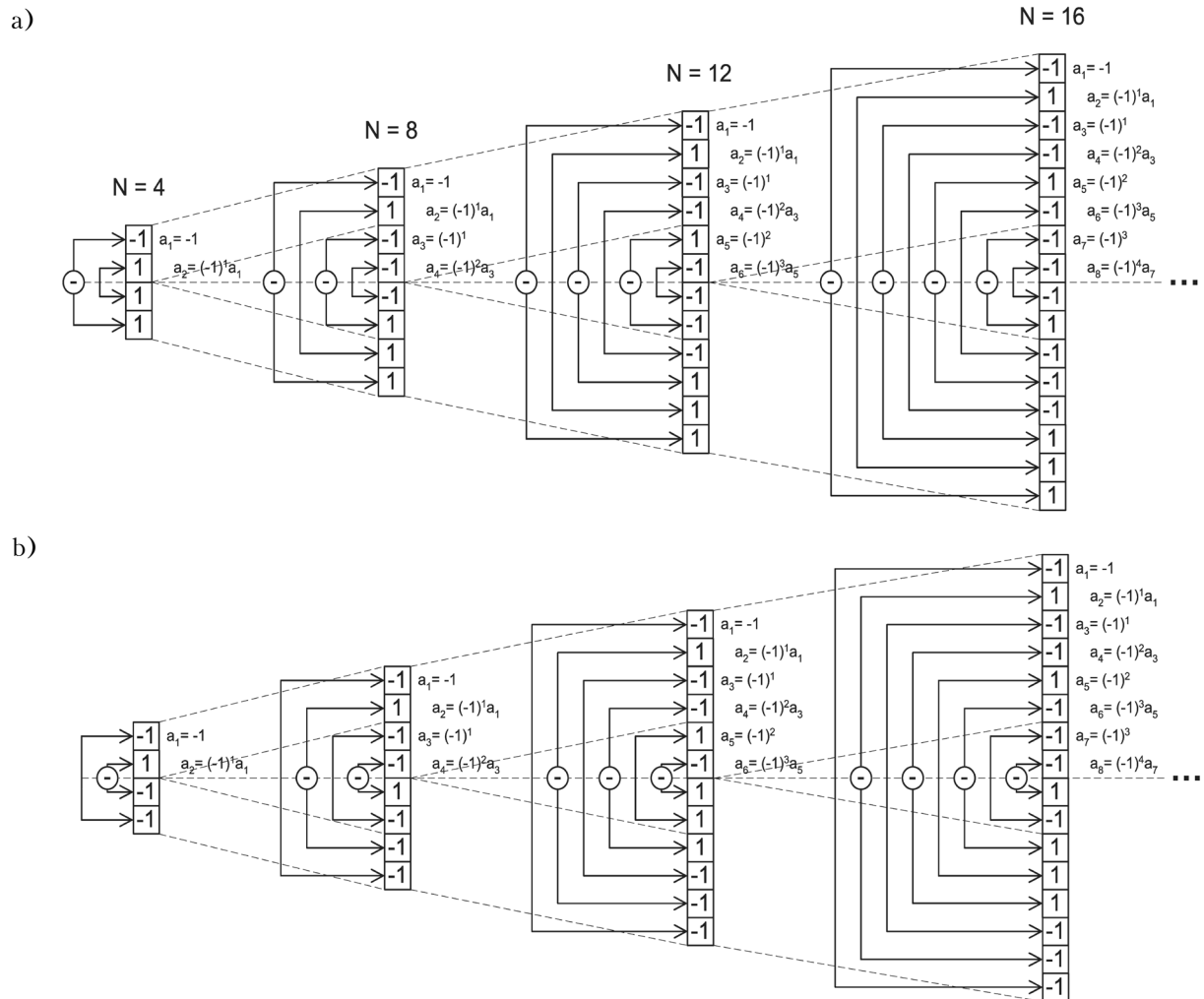


Fig. 1. Structure of suggested subtype A (a) and subtype B (b) sequences

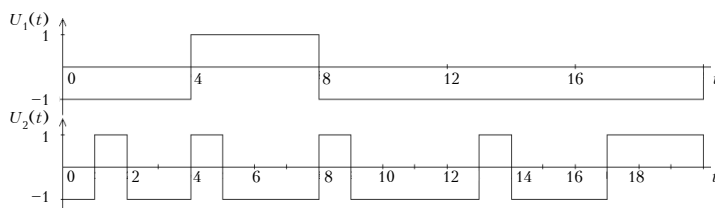
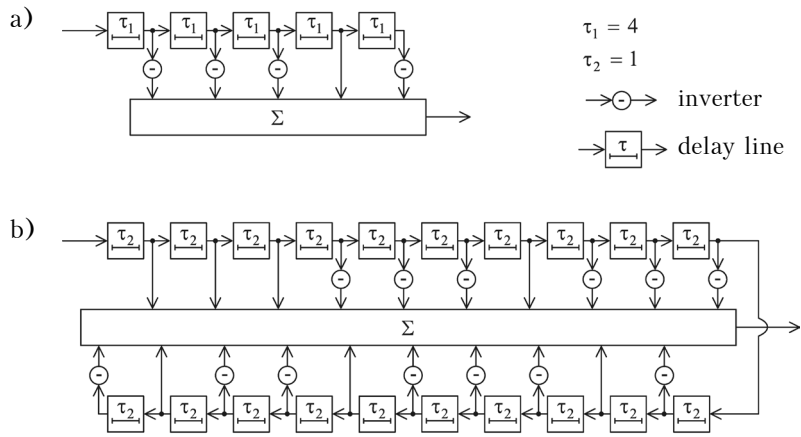
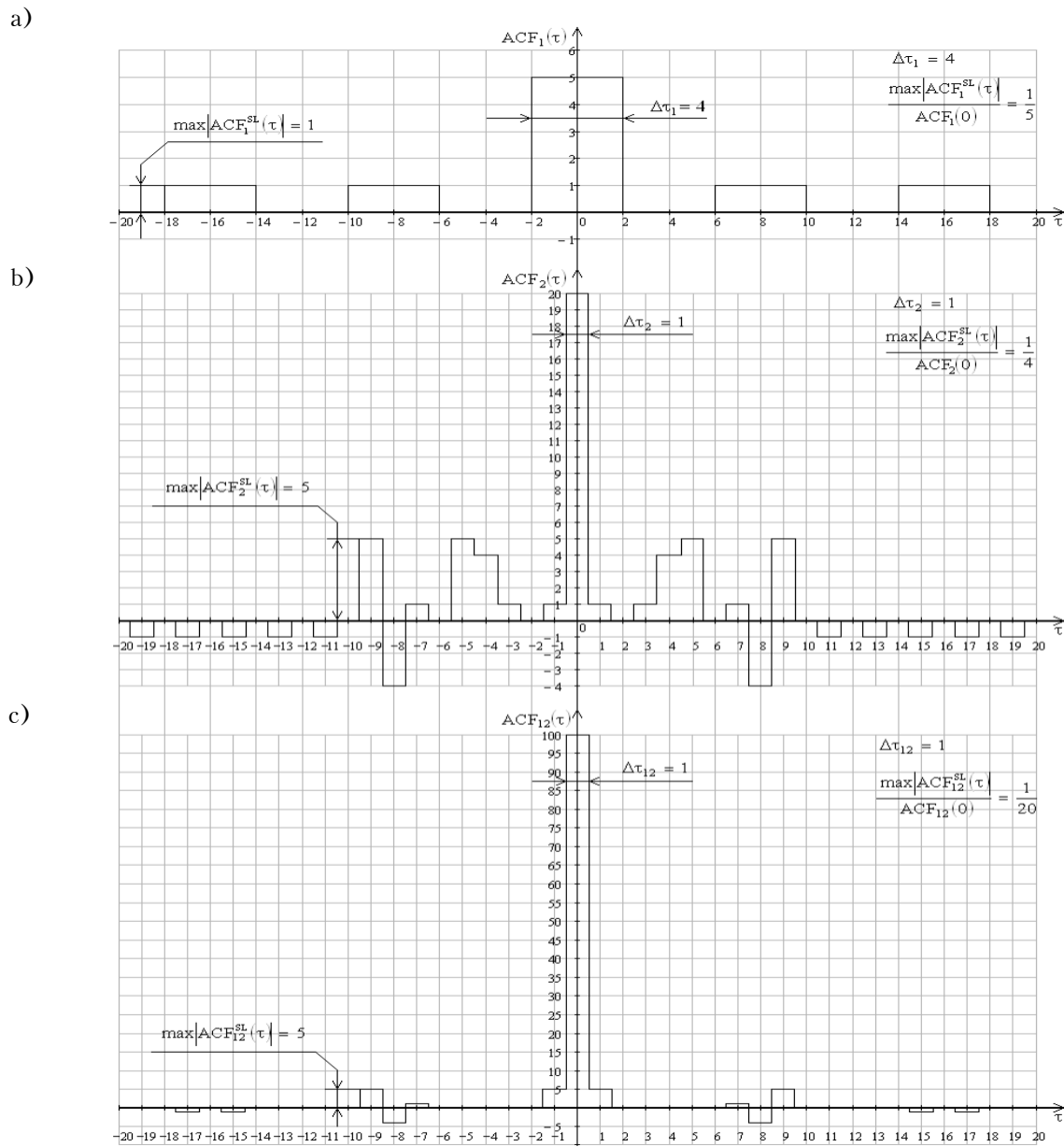


Fig. 2. Signals in the considered example of Barker-like system of sequences


 Fig. 3. Matched filters for sequences $N_1=5$ (a) and $N_2=20$ (b)

 Fig. 4. Forms of signals after MF for sequences $N_1=5$ (a) and $N_2=20$ (b), and the result of their multiplication (c)

shortest element of sequences in all the system) and low sidelobes (normalized absolute values do not exceed $1/N_{\max}$).

Let us take a detailed look at signal processing by using the example of the Barker-like system consisting of two sequences $\{-1; 1; -1; -1; -1\}$ ($N_1 = 5$, Barker sequence) and $\{-1; 1; -1; -1; 1; -1; -1; -1; 1; -1; -1; -1; 1; 1\}$ ($N_2 = 20$, sequence of subtype A). In Fig. 2 are shown signals for those sequences (the same time interval, e. g. $20 \mu\text{s}$, is used). Matched filters (MF) for signals of each sequence are shown in Fig. 3, and ACF-signals after the matched filters and the result of their multiplication (central-lobes of ACF-signals are reduced to the zero moment) are illustrated in Fig. 4.

In the case of the suggested systems of sequences the multiplication of ACF makes it possible to combine their advantages (low sidelobes of ACF_1 and narrow central-lobe of ACF_2) and neutralize their disadvantages (wide central-lobe of ACF_1 and high sidelobes of ACF_2). It is possible because the ACF of suggested sequences has a comb structure: the central-lobe is always separated from the first high sidelobe by low sidelobes (0 or ± 1) – this results in the appearance of a narrow central-lobe after multiplication. High sidelobes are also separated from one another by zero sidelobes. Thus low and high sidelobes of different ACFs are partially or totally cross-thinned – this leads to partial or total sidelobe suppression.

Characteristics of some of the suggested Barker-like systems of sequences (data are confirmed by computer modeling) are given in Table 1.

Theoretical justification of the fact, that the maximum normalized absolute value of ACF sidelobes is $1/N_{\max}$ for any possible number of sequences in a system, is expected in further research.

Using the Barker sequence of length $N = 5$ in the suggested systems is important for the considered case, because if other basic binary Barker sequence (e.g., $N=13$) and system (e.g., $N_1=13$ and $N_2=52$) were used, the resultant maximum normalized absolute value of sidelobes wouldn't be $1/N_{\max}$ (for the case $N_1=13$ and $N_2=52$ it would be $7/169$, which is more than $1/N_{\max} = 1/N_2 = 1/52$).

In Fig. 5 is shown the signal processing system for Barker-like systems of sequences. Delay lines $(2^{q+1} - 0.5)\tau_{q+2}$ in this system are used to align in time the centers of the central lobes.

In Table 2 an example of possible modulation scheme for DSSS technology is shown. In this example we have used the system of sequences $N_1=5$ and $N_2=20$ and QPSK modulation with Gray coding.

In our example, for correct operation of the signal processing system in a DSSS-transmitter, to transmit

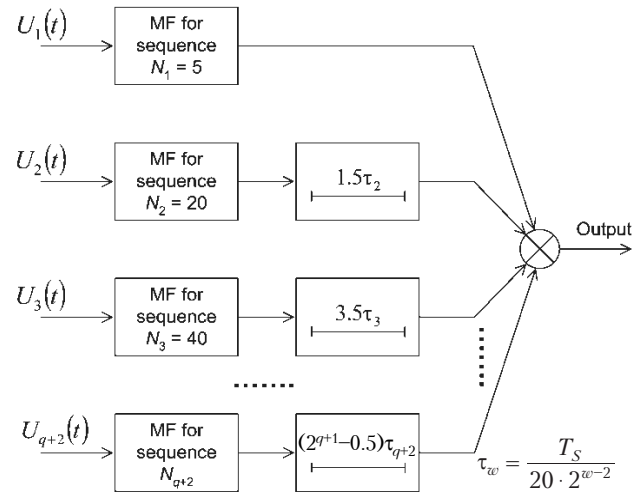


Fig. 5. Signal processing of Barker-like systems of sequences

Table 1

Characteristics of some of the suggested Barker-like systems of sequences

Sequences in the system	Central-lobe width of ACF in the result of multiplication	Maximum normalized value of sidelobes of ACF in the result of multiplication	Example of the suitable modulation
$N_1 = 5$ and $N_2 = 20$	$T_S / 20$	$1 / 20$	QPSK
$N_1 = 5$, $N_2 = 20$ and $N_3 = 40$	$T_S / 40$	$1 / 40$	8-PSK
$N_1 = 5$, $N_2 = 20$, $N_3 = 40$ and $N_4 = 80$	$T_S / 80$	$1 / 80$	16-PSK or 16-QAM
$N_1 = 5$, $N_2 = 20$, $N_3 = 40$, $N_4 = 80$ and $N_5 = 160$	$T_S / 160$	$1 / 160$	32-QAM
$N_1 = 5$, $N_2 = 20$, $N_3 = 40$, $N_4 = 80$, $N_5 = 160$ and $N_6 = 320$	$T_S / 320$	$1 / 320$	64-QAM

T_S – signal duration.

Table 2

Example of using of the considered sequences in DSSS

Bit	1															0																								
Chips ($N_1=5$)	-1		1		-1		-1		-1		-1		1		-1		-1		-1																					
Chips ($N_2=20$)	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1				
QPSK phases	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{3\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{5\pi}{4}$	$\frac{7\pi}{4}$	$\frac{7\pi}{4}$	$\frac{7\pi}{4}$	$\frac{3\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{3\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{3\pi}{4}$	$\frac{3\pi}{4}$	$\frac{3\pi}{4}$	$\frac{3\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{3\pi}{4}$	$\frac{3\pi}{4}$	$\frac{7\pi}{4}$	$\frac{5\pi}{4}$	$\frac{5\pi}{4}$	$\frac{5\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{3\pi}{4}$	$\frac{3\pi}{4}$	$\frac{3\pi}{4}$	$\frac{3\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{3\pi}{4}$	$\frac{3\pi}{4}$	$\frac{3\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$

Table 3

Comparison of Barker-like systems of sequences with complementary sequences

Parameter	Barker-like systems of sequences	Complementary sequences
The main principle of signal processing	Multiplication of results of matched filtering of each sequence	Adding of results of matched filtering of each sequence
Quantity of sequences in the system	$L \geq 2$	$L = 2$
Lengths of sequences in the system	$N_1 = 5$ (Barker) $N_w = 20 \cdot 2^{w-2}$, $w = 2, \dots, L$	$N_1 = N_2 = 2^n \cdot 10^k \cdot 26^m$, $n \geq 0$, $k \geq 0$, $m \geq 0$, except for the case $n = k = m = 0$
Maximum normalized value of sidelobes of ACF in the result of signal processing	$1/(20 \cdot 2^{L-2})$	0
Central-lobe width in the result of signal processing	T_s/N_L	T_s/N_1
Suitable modulation	2^L -level shift keying modulation (e.g., 64-QAM for $L = 6$)	4-level shift keying modulation (e.g., QPSK)

a zero bit, it is necessary to invert only one chip flow, which matches to the sequence $N_2 = 20$; the chip flow for the sequence $N_1 = 5$ is constant and doesn't depend on the bit value. Generally, in such systems may be inverted a certain odd number of chip flows, but not more than the total number of these flows.

Comparison of Barker-like systems of sequences with complementary sequences

One of the nearest analogs of the suggested Barker-like sequences are the complementary sequences. Their comparison is shown in **Table 3**.

Thus, by the criterion of value of ACF sidelobes after signal processing, the proposed systems of sequences are slightly inferior to known complementary sequences and equal to Barker sequences. Another important factor in the application of the proposed systems of sequences is noise stability of a telecommunication or radar system. In the case of application of such systems of sequences, after signal processing non-stationary noise tends to ap-

pear if stationary noise is at the input (unlike complementary systems, where after signal processing the stationary noise appears). However, multiplication of useful signals during signal processing (used for Barker-like systems of sequences) may give better noise stability than adding of useful signals (used for complementary systems). The issue of noise stability when using the suggested Barker-like systems of sequences will be addressed in further research.

Conclusions

The proposed systems of binary sequences and signal processing using such systems make it possible to obtain ACF-signals with the same maximum normalized absolute value of sidelobes as the one for the Barker sequences. It has been established using computer modeling, that the maximum length of binary sequences of such systems is at least 320.

Comparison of the suggested sequences with the known complementary sequences shows that

both this types are complementary, but matched filtering results in the case of the proposed sequences are multiplied, while for the known sequences the results are added.

Due to their properties after signal processing, the suggested systems of sequences can be used in the pulse-compression radar technology, in synchronizing system, and in DSSS technology for wideband signal forming and data transfer.

REFERENCES

1. Barker R. H. Group synchronizing of binary digital sequences. *Communication Theory*, London, Butterworth, 1953, pp. 273–287.
2. Babak V. P., Bilets'kii A. Ya. [*Deterministic signals and spectra*] Kiev: Tekhnika, 2003. (in Russian) [Бабак В. П., Білецький А. Я. Детерміновані сигнали і спектри. – Київ: Техніка, 2003]
3. Gantmakher V. E., Bystrov N. E., Chebotarev D.V. *Noise-like signals. Analysis, synthesis, processing*, St-Petersburg, Nauka i tekhnika, 2005. [Гантмахер В. Е., Быстров Н. Е., Чеботарев Д.В. Шумоподобные сигналы. Анализ, синтез, обработка. – Санкт-Петербург: Наука и техника, 2005]
4. Golomb S. W., Scholtz D. A. Generalized Barker Sequences. *IEEE Trans. on Inf. Theory*, 1965, vol. 11, no 4, pp. 533–537. DOI: 10.1109/TIT.1965.1053828
5. Nunn C. J., Coxson G. E. Polyphase pulse compression codes with optimal peak and integrated sidelobes. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronics Systems*, 2009, vol. 45, no 2, pp. 775–781. DOI: 10.1109/TAES.2009.5089560.
6. Turyn R. J. Hadamard matrices, Baumert-Hall units, four-symbol sequences, pulse compression, and surface wave encodings. *Journal of Combinatorial Theory (Series A)*, 1974, vol. 16, no 3, pp. 313–333. DOI: 10.1016/0097-3165(74)90056-9.
7. Holubnychyi A. Generalized binary Barker sequences and their application to radar technology. *Proc. of the Signal Processing Symposium (SPS-2013)*, Poland, Jachranka, 2013, pp. 1–9. DOI: 10.1109/SPS.2013.6623610.

Received 05.09 2013

О. Г. ГОЛУБНИЧИЙ

Україна, м. Київ, Національний авіаційний університет
E-mail: a.holubnychyi@nau.edu.ua

БАРКЕРОПОДІБНІ СИСТЕМИ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ ТА ЇХ ОБРОБКА

Запропоновано та проаналізовано нові системи бінарних послідовностей, які дають такі ж властивості функції автокореляції після обробки сигналів, що і послідовності Баркера. Розглянуто принцип їх обробки, шляхи використання в радіосистемах, виконано їх порівняльний аналіз з комплементарними послідовностями.

Ключові слова: послідовності Баркера, комплементарні послідовності, кореляційні властивості, придушення бічних пелюсток, обробка сигналів.

А. Г. ГОЛУБНИЧИЙ

Украина, г. Киев, Национальный авиационный университет
E-mail: a.holubnychyi@nau.edu.ua

БАРКЕРОПОДОБНЫЕ СИСТЕМЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ И ИХ ОБРАБОТКА

Предложены и проанализированы новые системы бинарных последовательностей, которые дают такие же свойства функции автокорреляции после обработки сигналов, что и последовательности Баркера. Рассмотрены принцип их обработки, пути использования в радиосистемах, выполнен их сравнительный анализ с комплементарными последовательностями.

Ключевые слова: последовательности Баркера, комплементарные последовательности, корреляционные свойства, подавление боковых лепестков, обработка сигналов.

УДК 621.396.962.3/045

I. G. PROKOPENKO, Dr. Sci. (Techn), I. P. OMELCHUK, Yu. D. CHYRKA, V. Yu. VOVK

Ukraine, Kiev, National Aviation University

E-mail: prokop-igor@yandex.ru, omelip@ukr.net

FAST FREQUENCY TRACKING

A method of periodical signal frequency tracking by the frequency-locked loops is proposed. Increasing of frequency adjustment accuracy is achieved by using of a new fast frequency discriminator, based on estimates of an instantaneous frequency. Reasonability of an input signal pre-filtering in case of nonlinear distortions, harmonics interferences and strong noise is proved.

Keywords: FLL, speed, frequency estimation, interference, adaptive filter, open loop.

Periodic signals processing is an important part of electronic support measures (ESM) technologies on which a variety of different modern technical systems are based. Thus, the problem of frequency synchronization in telecommunication systems is still relevant [1]. The same applies to panoramic receivers, the main feature of which is fast detection of signals with a priori unknown parameters [2]. Coherent processing algorithms that are used in the receiver require measurements of phase and frequency of weak radio signals in the presence of noise. Signals in Global Satellite Navigation Systems besides have a large frequency (Doppler) uncertainty at the receiver that is consequence of the high relative satellite-to-receiver velocity [3]. The specificity of power systems of grid-connected converter type is high-precision frequency tuning to known nominal value and ensuring phase synchronization [4–5].

In the most of above-mentioned systems, the signal (x) can be considered as a single-tone (s) with additive white Gaussian noise (η):

$$x_i = s_i + \eta_i = \rho \sin\left(\sum_{\tau=0}^j \omega_i \tau + \varphi_0\right) + \eta_i, \quad i = \overline{1, j},$$

where j – the current sample index;

ρ – the amplitude;

φ_0 – the initial phase;

ω – the unknown frequency that can vary in time;

τ – the sampling period.

The measurement of these parameters is considered in [6] the main point of which is an algorithm of instantaneous frequency estimation. It was this work which became the basis of the present study, where we solve the problem of improving performance of harmonic signal synchronization systems. We propose a new frequency tracking method based on estimation of instantaneous frequencies

and fast frequency-locked loop (FLL) system with a new fast frequency discriminator (FD) and an open loop to enhance the frequency tracking with nonlinear element in the closed loop. We also propose to implement the input signal pre-filtering using an adaptive low-pass filter (ALPF).

At first we consider general principles of frequency tracking with the use of phase-locked loops (PLL) and frequency-locked loops. Then we provide detailed description of the proposed system and its structural elements. System effectiveness is researched by computer simulations and analysis of frequency tracking transient processes for different versions of the FLL. Finally, we prove it necessary to use an adaptive filter for reduction of noise, interferences and higher harmonics.

Basic methodology

The conventional synchronization technique is based on the application of PLL which also provides phase synchronization of reference and generated signals. These systems generally include the three typical structural blocks: phase discriminator, control unit (CU) and controlled oscillator (CO).

The typical examples of such systems are three-phase PLL-systems [4]. Although these systems are fast and accurate under balanced conditions, they become inapplicable when the utility voltage is unbalanced. This circumstance leads to system decomposition onto three independent channels with individual parameters tracking [4]. The usage of the single-phase PLL is typical for the above-mentioned ESM-systems.

As it is said in [5], PLLs synchronize with the phase of the input signal, and hence, the accuracy and dynamical response of its estimation under transient conditions are highly influenced by phase jumps. An FLL, on the other hand, estimates the frequency of the input signal, which does not

experience such sudden changes and can acquire and track signals which are at higher frequency offsets than a PLL can. A significant improvement of measurement ability in FLL is achieved by reducing the parametric dimension of the problem.

The general approach to designing the FLL is to adjust the output signal frequency to the reference signal frequency, which may be constant or changed by an unknown law. It is similar to the PLL, but a phase discriminator is replaced by FD (see Fig. 1).

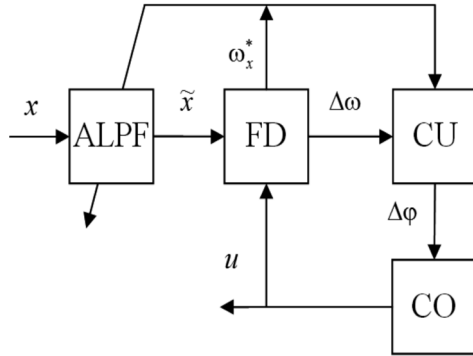


Fig. 1. Proposed fast FLL structure

There is also an open loop of an instantaneous frequency ω^* estimation of the reference signal besides the closed loop and the ALPF of the reference signal. The digital harmonic output signal (u) with the desired frequency is generated by the CO, which is schematically shown in Fig. 2.

In order to approximate this model to real technical systems, it is considered that the dependence of CO on the control signal adjusting characteristic $\Delta\phi_j$ is nonlinear and generally can be represented by functional transformation

$$\Delta\tilde{\phi}_j = G(\Delta\phi_j),$$

where $\Delta\tilde{\phi}_j$ is an actual generator phase growth at j -th step.

The instantaneous frequency of the output signal equals

$$\omega_{u,j} = \Delta\tilde{\phi}_j / \tau.$$

The current phase $\tilde{\phi}_j$ of the output signal $u_j = \sin \tilde{\phi}_j$ is formed in the block Φ (see Fig. 2) as the sum of all phase growths between the adjacent samples

$$\tilde{\phi}_j = \sum_{i=1}^j \Delta\tilde{\phi}_i.$$

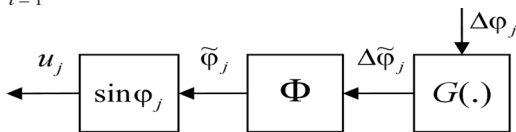


Fig. 2. Controlled oscillator block diagram

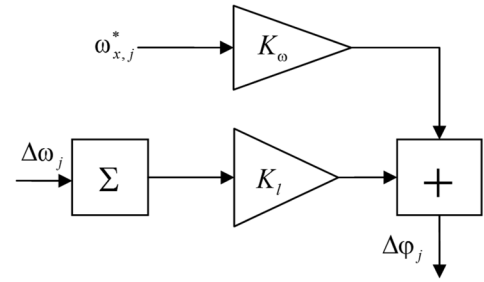


Fig. 3. Control unit structure

The CU considered in the paper (Fig. 3) is the simplest first order unit, which provides astatism by frequency. The corresponding mathematical model of the CU can be written as

$$\Delta\phi_j = K_l \sum_{i=1}^j \Delta\omega_i + K_\omega \omega_{x,j}^*,$$

where K_l , K_ω – gains of close and open control loops, respectively;

$\Delta\omega_j$ – the difference between instantaneous frequency estimates of the reference $\omega_{x,j}^*$ and output $\omega_{u,j}^*$ signals.

Fast frequency discriminator

Frequency tracking speed in the FLL system is largely determined by the inertia of the FD. Usually the FD includes a mixer (multiplier) of two signals connected in series with a low pass filter [7] without direct frequency estimation. The fundamental need for a filter to isolate low-frequency component leads to considerable inertia of a closed loop control. A transient process may exceed approximately ten cycles of the harmonic signal. Construction of the FD by zero-crossing digital method also reduces adjustment time because data appearance tempo is only half of the signal period.

The problem of FLL performance improvement is solved in this study by using a new FD, the block diagram of which is shown in Fig. 4. Instantaneous frequency estimates of reference and output signal are obtained independently in fast frequency estimation (f_FE) blocks. It also allows us to use the value of the instantaneous frequency estimation of the reference signal in the open loop control. Another considerable feature is absence of a filter in opposite to the classical FD.

Digital instantaneous frequency measurement receivers have been used for wideband monitoring of radar environments in naval, airborne and

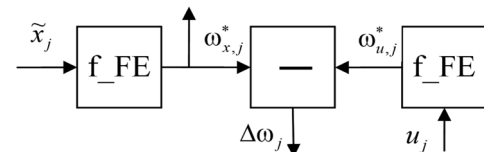


Fig. 4. The structure of the proposed fast frequency discriminator

ground-based ESM-systems all over the world for over 50 years [8]. There are a lot of researches on algorithms improvement at present time, but they usually provide sufficient noise immunity only on condition of significant observation interval and can be based, for example, on Fourier and Hilbert transforms. It is necessary to use algorithms that can work with a short sample of signal, in particular, the one developed by authors of [6, 9].

These algorithms are based on an auto regression model of sine wave:

$$s_n = \alpha s_{n-1} - s_{n-2}, \quad n = \overline{3, M}, \quad \alpha = 2\cos(\gamma),$$

where γ is a phase shift between adjacent samples of the signal. This phase shift is named normalized frequency.

Auto regression model allows building the phase shift estimate:

$$\gamma_{1(2)}^* = \arccos\left(\left(B(\bar{x}) \pm \sqrt{B(\bar{x})^2 + 2}\right) / 2\right),$$

where $B(\bar{x})$ is calculated in M -size running window as

$$B(\bar{x}) = 0.5 \frac{\sum_{k=j-M+1}^j [(x_{k+1} + x_{k-1})^2 - 2x_k^2]}{\sum_{k=j-M+1}^j [x_k(x_{k+1} + x_{k-1})]}.$$

The next step is to select the value of γ^* located in the zone of the method unambiguity $(0, \pi/2)$. And finally, the real frequency is calculated as

$$f_s^* = \gamma^* / (2\pi\tau).$$

The single instantaneous frequency value at a certain point j of discrete time is calculated by f_{FE} algorithm on the basis of several (M in number) previous consecutive signal samples (the so-called “window”). The size of this window must be at least 4 samples. Larger window sizes in real systems increase stability in noise conditions.

For the current time j window models of reference and output signals, which are processed parallel in two f_{FE} blocks, can be written in a vector form:

$$\mathbf{X}_j = \{x_{j-M+1}, x_{j-M+2}, \dots, x_j\},$$

$$\mathbf{U}_j = \{u_{j-M+1}, u_{j-M+2}, \dots, u_j\}.$$

A model of the fast harmonic signal frequency discriminator can be written as

$$\Delta\omega_j^* = \omega_{x,j}^* - \omega_{u,j}^*, \quad \omega_{x,j}^* = E_\omega(\mathbf{X}_j), \quad \omega_{u,j}^* = E_\omega(\mathbf{U}_j).$$

Thus, sequential evaluation of the input process instantaneous frequencies is performed by the f_{FE} in running window mode step by step for each point in discrete time.

The appearance of the proposed fast FD leads to a necessity of carrying out a specific research on the influence of open loop and adaptive filtration on effectiveness of frequency adjustment. Quality

of the frequency adjustment is determined by the stability and duration of the transition process and steady-state error.

Because the fast FD is a nonlinear element, the behavior of the frequency closed loop control cannot be accurately described in the framework of classical control theory. Therefore, initial research of the f_{FLL} , as the new system, is implemented by computer simulation.

Open loop

First of all, it is necessary to point out that in case of linear adjusting characteristic ($K_\omega \cdot G(\Delta\phi_j) \equiv 1$), only the open loop is enough to carry out the frequency adjustment in an FLL-system. Thus, close loop becomes unnecessary. So from now on we shall consider the nonlinear adjusting characteristic. As an example, we have chosen the following expression:

$$\Delta\tilde{\phi}_j = (\Delta\phi_j)^{3/4},$$

and the following general conditions for computer simulations: the reference signal frequency range is 25–400% of the nominal value of 1 MHz; sampling frequency 50 MHz ($\tau = 20 \mu s$); running window size $M=50$, which corresponds to 1 cycle of the nominal signal.

Fig. 5 demonstrates acceleration of the transient process by the open loop when the closed loop gain is invariable $K_l = 0.012$. It should be noted, that this coefficient is almost proportional to the τ value.

The maximum value of the open loop gain $K_\omega=0.9$, with which the best result was obtained, is close to the stability boundary for the given frequency range (16-fold frequency variation). In different situations, the duration of the aperiodic transient process (up to 5% deviation level) is 3 to 5 signal cycles. There is a possibility to shorten this time by simultaneously decreasing the frequency range by means of increasing K_ω coefficient. It was found that nonlinearity of quadratic and square root functions leads to considerable dynamic range narrowing from the point of view of its stability.

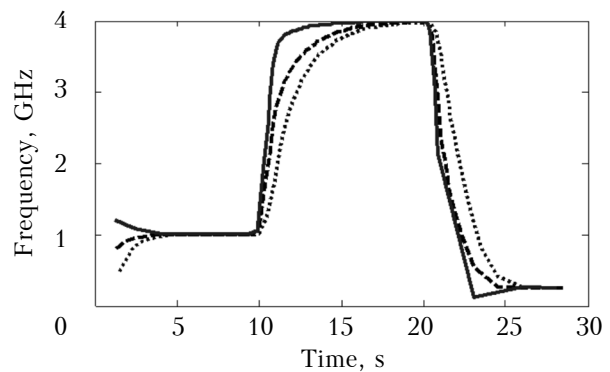


Fig. 5. Transient processes of the fast FLL with an open loop for different K_ω values:
..... 0; ----- 0,5; — 0,9

Adaptive filtering

The main disadvantage of the estimator [10] is its sensitivity to interferences (in particular higher harmonics) and noises, especially in low frequency range. It is reasonable to use preliminary filtering of input (reference) signal to reduce the influence of such factors [10–12]. It is the possibility to estimate the instantaneous frequency in the proposed fast FLL that allows the filter bandwidth adaptation to be carried out. It means that coefficients $\{a_j\}$, $\{b_j\}$ of the transfer function $H_j = H_b(\{b_j\})/H_a(\{a_j\})$ should be modified at each step j by filter synthesis laws

$$\{a_j\} = \mathfrak{I}_a(\omega_{x,j}^*), \quad \{b_j\} = \mathfrak{I}_b(\omega_{x,j}^*).$$

Hence, the bandwidth depends on the obtained frequency estimate. The adaptive filter as an element of the fast FLL is shown in Fig. 6.

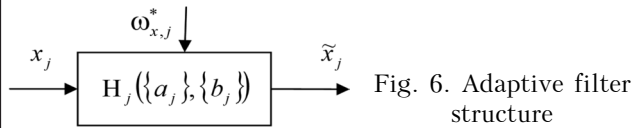


Fig. 6. Adaptive filter structure

As the preliminary research has shown, it is preferable to use the first order Butterworth filter as a low-pass IIR due to the advantages of the former in operating speed and stability. Thus, it is this filter we focus on hereafter.

The first fundamental reason to use the filter is that it allows maintaining the maximum signal-to-noise ratio (SNR) which can be reached because the filter cutoff frequency (f_{co}) equals the signal frequency. This can be seen from the graph of the transient processes in Fig. 7 for SNR=10 dB. The figure clearly shows that the system is virtually inoperable with such noise level without the filter.

Using the nonadaptive filter adjusted to nominal frequency significantly reduces the frequency tracking error for the low-frequency signal, but worsens the precision for the high-frequency signal by suppressing it. The adaptive filter decreases the tracking error for the low-frequency signal even more, and significantly improves precision for

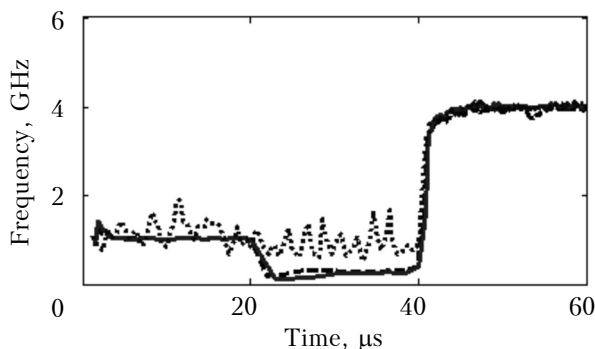


Fig. 7. Transient processes of the fast FLL with sinusoidal reference signal:
..... without filtering; ----- with a nonadaptive filter;
—— with an adaptive filter

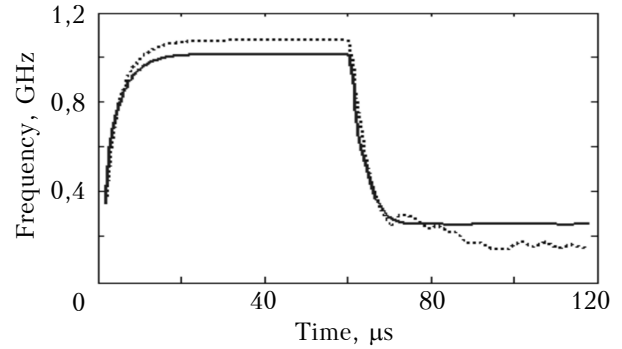


Fig. 8. Transient processes of the fast FLL with triangular reference signal:

..... without filtering; —— with an adaptive filter

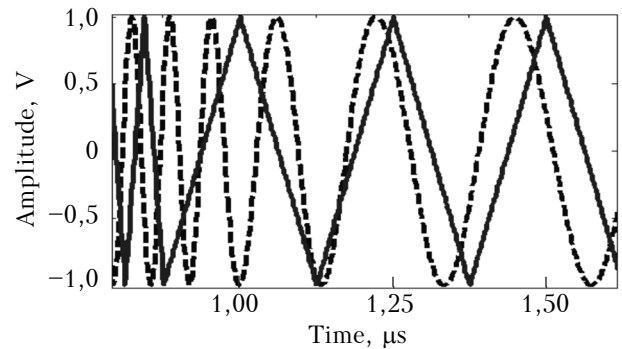


Fig. 9. Visualisation of adaptation process

..... output signal; —— reference signal

the high-frequency signal. Minor loss at nominal frequency, as compared to the non-adaptive filter, is caused by instantaneous frequency fluctuations and, respectively, cut-off frequency fluctuations. It should be noted, that the presence of the filter virtually does not delay the transient process of the frequency jump.

The second positive effect of the adaptive frequency filtering is the suppression of higher harmonics, which enables to perform error estimation of the main tone frequency of periodic nonsinusoidal signals. This effect is considered further, on an example of a triangular signal without noise.

Fig. 8 shows transient processes of the system with and without filter. One can see that the adaptive filter provides a sufficiently higher precision of tracking of the first harmonic frequency of the triangular signal. Fig. 9 shows a fragment of tracking of the output sinusoidal signal to the triangular reference signal. As can be seen from the figure, the transient process lasts no more than two cycles of lower frequency signal.

Properties of the frequency estimation algorithm with pre-filtering

Above mentioned positive features of the new FLL first of all depend on the precision of the frequency estimation of the disturbed reference signal. Therefore, the behavior of pre-filter and estimator as a pair must be analyzed in more detail for different input processes.

Frequency estimation errors in the presence of the harmonic interference

The appearance of an additional harmonic ξ with different frequency f_ξ and power P_ξ considerably decreases the estimation accuracy because the algorithm does not have any filtering properties. **Fig. 10** shows the graph of the estimation mean which depends on the frequency ratio and the signal to interference power ratio $m_f(f_\xi/f_S, P_\xi/P_S)$ when the noise is absent. Estimations randomness is caused by randomization of the signal and the interference initial phases and the standard deviation lies within 9% zone relative to the nominal frequency. The obtained surface of the estimation mean $m_f(\cdot)$ is characterized by smoothness, and one-dimensional dependencies $m_f(f_\xi/f_S)$ at $P_\xi/P_S = \text{const}$ are characterized by high enough linearity.

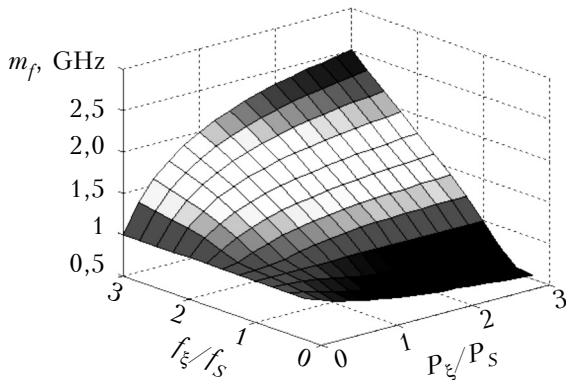


Fig. 10. Estimation mean for the harmonic interference

It was found that frequency estimations are virtually independent of the window size and the sampling frequency, if such frequency is much higher than f_S and f_ξ .

It should be noted, that in this situation there is no point in studying the pre-filtering, because it is quite enough to determine the signal to interference power ratio from amplitude-frequency characteristic of the filter and directly address the function $m_f(f_\xi/f_S, P_\xi/P_S)$.

Influence of frequency deviation on estimation precision

In the case of the locally non-stationary signal, when its actual instantaneous frequency (IF) is significantly varied within a single window, the estimation depends on the variation degree. For example, in the case of the linear deviation, the frequency estimation approximately equals to the medium value between the initial (f_b) and the final (f_e) frequencies of the window:

$$f^* = (f_b + f_e)/2 + \Delta f^*.$$

The character of deviation Δf^* is shown in **Fig. 11**. The charts for each window size (8, 16, 32, 64) are different because of the difference in phase distances between the samples.

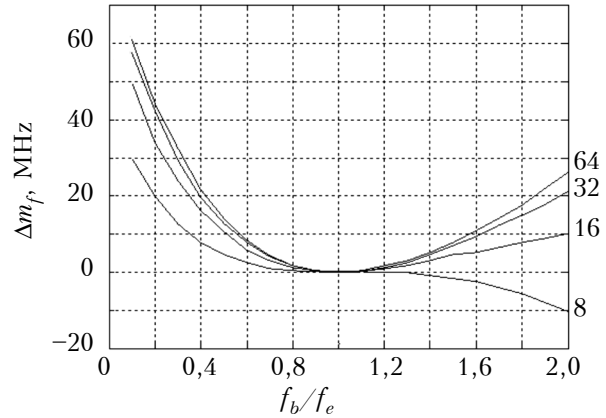


Fig. 11. Frequency estimation with deviation for different window size

Reasonability of the input signal pre-filtering

In actual practice, the correlative noise process is formed by pre-filtering before using the frequency estimation algorithm. An input parameter for research is the signal-to-noise ratio $SNR = P_s/\sigma_g^2$, where σ_g^2 is the variance of the additive white Gaussian noise.

The graph of the estimation mean (**Fig. 12**) for the 1st order low-pass filter (LPF) shows a sufficiently larger working area near nominal frequency in comparison to the case, when the LPF is not used.

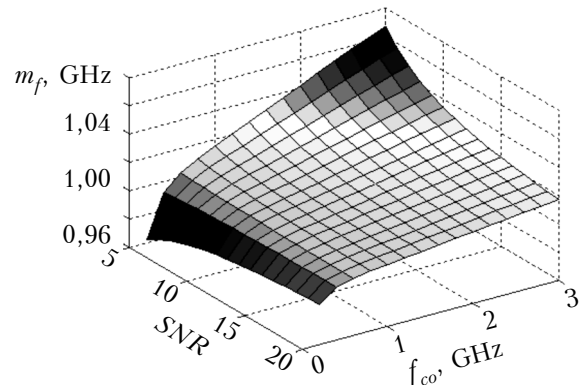


Fig. 12. The estimation mean for the 1st order preliminary LPF (f_{co} – cutoff frequency)

This can also be confirmed by the mean square error (MSE) of frequency estimation (**Fig. 13, a**). The surface is characterized by the reduction of the argument of the MSE function minimum, while SNR is increasing. This means that greater signal suppression by the filter is allowed.

Some decrease of the error mean can be achieved by reducing the sampling frequency and the number of samples in the window. But we must remember that reducing the number of samples generally causes the increase of the MSE.

The 2nd order LPF can be considered as more efficient in use. The MSE surface for such filter is shown in **Fig. 13, b**. Such MSE value, in comparison to **Fig. 13, a**, decreases 2 to 3 times at the

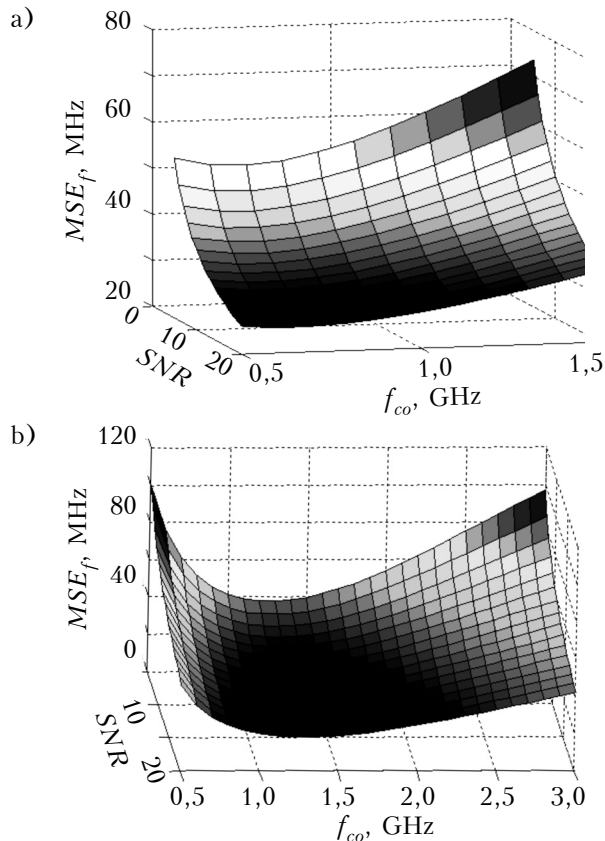


Fig. 13. The mean square error for the 1st (a) and the 2nd (b) order preliminary LPF

points of optimum, but if the cutoff frequency f_{co} is less than $0.7f_s$, the MSE increases much sharper.

The application of a band-pass filter allows us to further reduce the MSE at optimal points, but requires a precise coordination of frequency tuning to a range of possible signal frequencies. According to research results for the 1st order band-pass filter with a 20% bandwidth, the prior uncertainty range should not exceed 0.8–1.2 relative to the true frequency value. When the 2nd order filter is used or the bandwidth is narrower, the requirements for prior knowledge become stricter.

Improvement of non-harmonic signals estimation

As it was mentioned earlier, pre-filtering is also useful for estimation of frequency of periodic non-harmonic signals, the main feature of which is presence of higher harmonics. For example, the MSE surface of estimation of square wave frequency after the 1st order LPF is shown in Fig. 14.

As it can be seen, there is a gradual shift of f_{co}^{opt} towards zero, due to the negative value of the second derivative of response of the LPF in the high frequency range. Without pre-filtering the errors of square wave frequency estimation (even without the noise) exceed 50%, which proves the reasonability of application of pre-filtering.

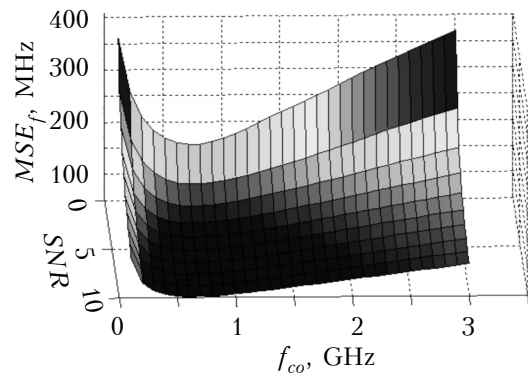


Fig. 14. The MSE for the 1st order preliminary LPF

It was found that the value of the MSE for trapezoidal signals (which have much smaller harmonics), decreases 4–6 times in comparison to the meander.

Detection of the signal frequency modulation

A great feature of the algorithm is a sufficiently accurate estimation at intervals (windows) equal to a period of the signal [6] and even at a half period when the noise level is low, which brings us nearer to the actual IF and provides the opportunity to observe its modulation over time. This property is investigated on the example of a linear frequency-modulated (LFM) signal processing with pre-filtering by the 1st order LPF. The results of measuring the IF of such signal with the frequency that varies from 0.9 to 1.8 MHz during the time interval of 10 ms with the sampling frequency of 16 MHz are shown in Fig. 15. The MSE is obtained by averaging of differences at each signal sample.

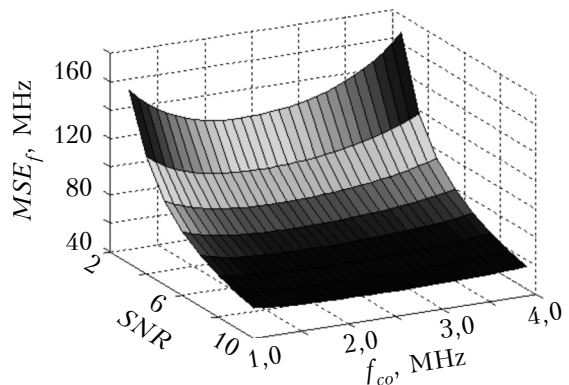


Fig. 15. The MSE for the LFM signal

Conclusions

The application of the new frequency discriminator with an estimation of instant frequencies of reference and generated signals allows adding to the FLL-system an adaptive filter of the reference signal and an open regulation contour. Small lagging of blocks of the instant frequency estimation and the open regulation contour provide fast frequency tracking. The speed of a transient process reaches 3 to 5 cycles of a signal. The adaptive

pre-filtering allows increasing the signal to interference ratio at FLL-system input and improves the accuracy of frequency tracking. The application of the 2nd order band-pass pre-filter is only reasonable for a small prior frequency ambiguity range (not more than 20%), while in other cases the 1st order low-pass filter is more preferable.

REFERENCES

1. Xin Jin, Runbo Fu, J. S. Nielsen. Method and apparatus for frequency tracking in a space timetransmit diversity receiver. Pat. USA no 2012288041A1, 2012.
2. Rembovsky A. *Radio Monitoring*. Springer, 2009.
3. Curran J. T., Lachapelle G., Murphy C. C. Improving the design of frequency lock loops for GNSS receivers. *IEEE Trans. on aerospace and electronic systems*, 2012, Vol. 48, no 1, pp. 850-868.
4. Xiao-Qiang Guo, Wei-Yang Wu, He-Rong Gu. Phase locked loop and synchronization methods for gridinterfaced converters: a review. *Przegl d Elektrotechniczny (Electrical Review)*, 2011, Vol. 87, no 4, pp. 182-187.
5. Rodriguez P., Luna A., Candela I., Mujal R., Teodorescu R., Blaabjerg F. Multiresonant frequency-locked loop for grid synchronization of power converters under distorted grid conditions. *IEEE Trans. on industrial electronics*, 2012, Vol. 58, no 1, pp. 127-138.
6. Prokopenko I.G., Omelchuk I.P., Chyrka Y.D. Radar signal parameters estimation in the MTD tasks. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 2012, Vol. 58, no 2, pp. 159-164.
7. Talbot D. *Frequency acquisition techniques for Phase-locked loops*. IEEE Press, 2012.
8. East P. W. Fifty years of instantaneous frequency measurement. *IET Radar, Sonar and Navigation*, 2011, Vol. 6, no 2, pp. 112-122.
9. I.G. Prokopenko, I.P. Omelchuk. Method for harmonic signal frequency estimation. Pat. UA no 2345679, 2009.
10. Weigang Sun, Huainan Ma, Wenshen Wang. Mutual loop circuit device for decimal fraction frequency division lock. Pat. CN no 201004621Y, 2008.
11. Haykin S. *Adaptive filter theory*, 3rd edition. Prentice Hall, 1995.
12. Kušljevic M. D. A simple method for design of adaptive filters for sinusoidal signals. *IEEE Trans. on instrumentation and measurement*, 2008, Vol. 57, no 10, pp. 2242-2249.

Received 30.09 2013

I. Г. ПРОКОПЕНКО, І. П. ОМЕЛЬЧУК, Ю. Д. ЧИРКА, В. Ю. ВОВК

Україна, г. Київ, Національний авіаційний університет
E-mail: prokop-igor@yandex.ru, omelip@ukr.net

ШВИДКЕ ВІДСЛІДКОВУВАННЯ ЧАСТОТИ

Пропонується метод відслідковування частоти періодичного сигналу. Підвищення точності підлаштування частоти досягається завдяки використанню нового швидкого частотного дискримінатора на основі оцінок миттєвої частоти. Також доводиться доцільність попередньої фільтрації вхідного сигналу у випадку нелінійних спотворень, гармонічних завад та сильного шуму.

Ключові слова: ФАПЧ, швидкість, оцінювання частоти, завада, адаптивний фільтр, розімкнений контур.

И. Г. ПРОКОПЕНКО, И. П. ОМЕЛЬЧУК, Ю. Д. ЧИРКА, В. Ю. ВОВК

Украина, г. Киев, Национальный авиационный университет
E-mail: prokop-igor@yandex.ru, omelip@ukr.net

БЫСТРОЕ ОТСЛЕЖИВАНИЕ ЧАСТОТЫ

Предлагается метод отслеживания частоты периодического сигнала. Повышение точности подстройки частоты достигается благодаря использованию нового быстрого частотного дискриминатора на базе оценок мгновенной частоты. Также доказывается целесообразность предварительной фильтрации входного сигнала в случае нелинейных искажений, гармонических помех и сильного шума.

Ключевые слова: ФАПЧ, скорость, оценивание частоты, помеха, адаптивный фильтр, разомкнутый контур.

UDC 623

M. UNAL, A. CALISKAN, Prof. Dr. A. S. TURK, P. O. BAKBAK

Turkey, Istanbul, Yildiz Technical University

E-mail: mehmetu@yildiz.edu.tr, acaliskan@yildiz.edu.tr, asturk@yildiz.edu.tr, pozkan@yildiz.edu.tr

SUBSURFACE AND THROUGH-WALL SAR IMAGING TECHNIQUES FOR GROUND PENETRATING RADAR

This paper presents some useful signal processing and synthetic aperture radar imaging techniques for ultra-wide band (UWB) ground penetrating radar. Novel UWB antenna structures are experimentally designed in this work. Raw and processed data collected in the course of experimental studies of subsurface sensing and through-wall imaging scenarios are demonstrated in B-scan and C-scan target images.

Keywords: ground penetrating radar, synthetic aperture radar, subsurface imaging, radar signal processing.

In the last decades, ground-penetrating radar (**GPR**) has become a leading non-destructive testing (**NDT**) technology for the detection, identification, and imaging of subsurface artifacts, abnormalities, and structures such as pipes, mines, gaps, water channels, oil wells, tunnels, and roads. It has a very broad range of applications, including geophysics, hydrogeology, archeology, mine detection, civil engineering, transportation, security and remote sensing [1–4]. GPR performance is associated with the electrical and magnetic properties of local soil and buried targets as well as with implementation of the GPR hardware and software. The frequency band of the GPR signal is the key factor for the detection performance. Higher frequencies are needed for better resolution, nevertheless lower frequency bands are preferred to detect something buried too deep due to the dramatically increased wave attenuation in the soil with increasing frequency. Thus, ultra-wide band (**UWB**) GPR systems that transmit short impulse signals are proposed primarily to benefit from both low and high frequencies [5].

The impulse durations can vary from a few nanoseconds to a hundred picoseconds corresponding to a broad spectrum from 100 MHz to 10 GHz. It can be extended up to 15 GHz for stepped-frequency GPR systems, which may use microwave tomography methods for high resolution imaging [6]. Therefore, the stepped-frequency (**SF**) technique offers some distinct signal processing benefits compared to the time-domain GPR systems,

such as higher dynamic range and more effective control of the source frequency spectrum. Apart from increased resolution and increased depth of penetration, the signal spectrum received by SF-GPR provides the advantage of reading the real and phase parts, which can be made use of in analyzing subtle and complex inhomogeneities, particularly when carrying out tomographic inversion [7].

The subsurface target detection and imaging performances of the GPR depend significantly on the convenient design of UWB transmitter and receiver (*T/R*) antennas to radiate efficiently the GPR impulse signal into the buried or concealed target [8]. The antennas must have a flat, high-directivity gain, a narrow beam, and low side lobe and input reflection levels over the operational frequency band to reach the largest dynamic range, best focused illumination area, lowest level of *T/R* antenna coupling, reduced ringing, and uniformly shaped impulse radiation.

Synthetic aperture radar (**SAR**) is a well-known technique which uses signal processing to improve the resolution beyond the limitation of physical antenna aperture [9]. In SAR, forward motion of actual antenna is used to ‘synthesize’ a very long antenna. SAR allows the possibility of using longer wavelengths and still achieving good resolution with antenna structures of reasonable size. SAR is very useful over a wide range of applications, including sea and ice monitoring, mining, oil pollution monitoring, oceanography, snow monitoring, classification of earth terrain etc. [10].

In this study, a UWB SF-GPR system scenario is designed and realized by Rohde Schwarz ZVL-13 network analyzer. The network analyzer

This work was supported by grant 110E222 of TUBITAK (The Scientific and Technological Research Council of Turkey) research fund.

sweeps a wide signal band between 10 MHz and 15 GHz with 201 frequency steps. The continuous SF method is applied. The UWB transmitter and receiver antennas designed for this GPR system are the partial dielectric loaded transverse electromagnetic (TEM) fed ridged horn (PDTEM-RH) and Vivaldi shaped TEM horn (PDVA). Due to GPR data collecting process for *B*-scan plots requires simultaneous measurements, Basic macro codes are evaluated for data acquisition from the network analyzer to the PC. Moreover, by using the constructed SAR scenario, *B*-scan and *C*-scan images of subsurface and back wall objects with better resolution are exhibited in figures.

Antenna systems and measurements

The PDTEM horn, PDVA horn and array combinations have been introduced by A. S. Turk as efficient UWB impulse radiators operating from 150 MHz up to 10 GHz [11–14]. In this work, novel TEM and ridged horn antenna versions, which are operating in the frequency band of 400 MHz – 18 GHz, were designed with enhanced gain and VSWR performances. The measurement bandwidth is 10 MHz – 15 GHz. The antenna gain is sufficiently high and almost stable over the wide band. Instead of using dielectric aperture filling methods (i. e. hemispherical lenses) that increase the physical dimensions and weight of the antenna, the partial dielectric lens loading has been proposed for TEM horn and double-ridged horn antenna (DRHA) models to improve the gain performance and to eliminate radiation pattern deterioration without significant changes on the antenna sizes and weight.

It is shown that PDTEM and PDTEM-RH designs are highly suitable for multi-band GPR operations, due to advantages of up to 10 dB enhanced gain performances (in comparison with standard RH) over 1:40 bandwidth ratio.

Data acquisition and simultaneous test measurement

This study is devoted to data transfer from the network analyzer to the PC, signal processing techniques for transferred data, and post-processing by SAR algorithms. The network analyzer is set up for instantaneous measurement. However, *B*-scan GPR process requires simultaneous measurement. Thus, desired simultaneous measurements are collected by “for loop” written in Basic macro code. The measurement number is defined as 200. Also, the time interval between the simultaneous measurements is implemented by “sleep” command. This interval is set to 50 milliseconds.

An indoor test pool facility consisting of a wood box filled with dry soil has been constructed at our microwave research laboratory. The dimensions of the soil pool are 3.2×1.2×0.3 meters. The transmission coefficient S_{21} is measured by the network analyzer over the operational band. For *B*-scan and *C*-scan images data, S_{21} must be dependent

on time. Therefore, the inverse Fourier transform of S_{21} is applied to obtain matrix

$$T = \text{ifft}(S_{21}). \quad (1)$$

The mathematical representation of “ifft” command is given as

$$T = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} S_{21} \exp \frac{-2\pi jkn}{N}, \quad (2)$$

where k represents the sampled points in the time domain, n represents the sampled points in the frequency domain, and N is the number of sampled points.

The background signal can be considered as a calibration or the reference signal for amelioration of the image of collected data. This signal consists of the direct pulse from transmitting and receiving antennas, ringing from the antennas, and clutter from other objects (not targets) that reflect the electromagnetic energy within the antenna beam width. The clutter can be minimized by using lower band radiator antennas. Nevertheless, this case will degrade the image resolution, which will cause hard-recognition of small buried objects. To reduce the clutter effect on *B*-scan plot, the reference signal is collected at the non-target position of the soil pool. If the transmission coefficient S_{21} dependent on time is symbolized by a , then background removed *A*-scan signal is calculated as

$$a_B(z) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i(z); \quad (3)$$

$$a_{BR}(z) = a(z) - a_B(z), \quad (4)$$

where a_B represents the non-target background signal; a_i is each *A*-scan data obtained from initial clear region and N is its number, and a_{BR} corresponds to background removed *A*-scan signal.

Then, the absolute of background removed T matrix is plotted by “surface” command and *B*-scan image is obtained:

$$B = |T|. \quad (5)$$

As shown in **Fig. 1**, the test measurement system of SF-GPR uses PDVA horn shown in **Fig. 2** as



Fig. 1. Measurement set up with network analyzer

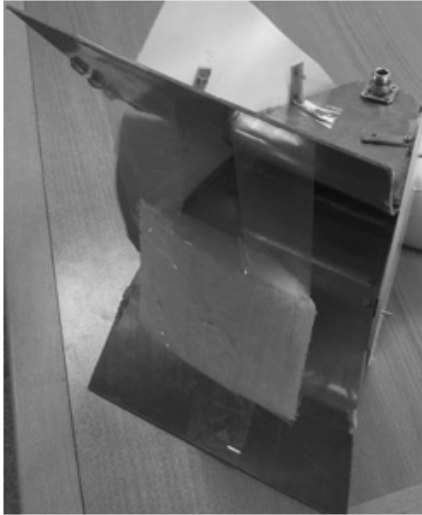


Fig. 2. Vivaldi shaped TEM horn design

Table 1

Test scenario of the buried objects

Parameters	Buried objects			
	Plastic pipe	Water pipe	Metal sheet	Glass (bottle)
Distance to reference point, cm	60	120	180	240
Depth, cm	3	3	3	3
Position	Vertical	Horizontal	Horizontal	Vertical

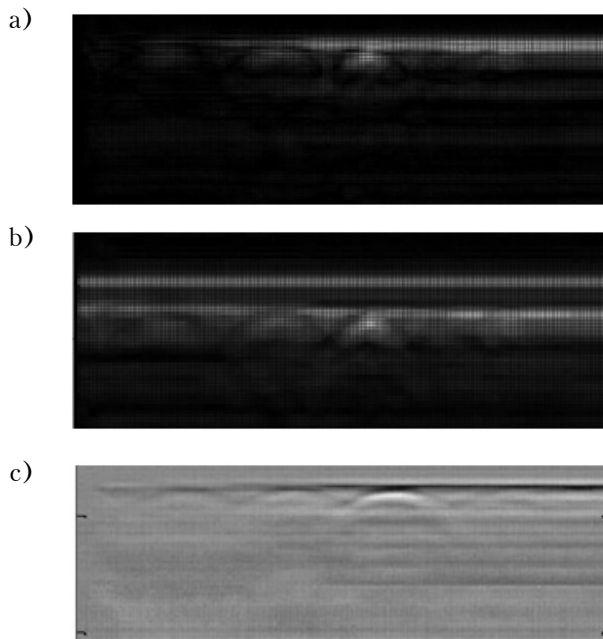


Fig. 3. B-scan measurement:
a — background removed; *b* — compressed sensing;
c — data with impulse GPR

T/R antenna head. A typical metal plate separator is used for shielding between antennas so that coupling signal reduced. Buried objects scenario is given at **Table 1**. Measurement results of the B-scan data are plotted in **Fig. 3, a**, which can be seen successfully on the parabolas of the buried objects.

The reference signal is collected at the start point of the soil pool, although there can be slight differences between start and stop locations because of the heterogeneity of the soil. Fig. 3, *a* shows that four different types of objects can be detected clearly, and it is observed that metal plate reflects more signal as compared to other objects.

Another graphical representation of determining of position of the object is cumulative distribution, which represents the sum of vertical data changes on B-scan measurement data. As shown in **Fig. 4**, there are four peak points, which correspond to the correct cross-range positions of the buried objects. On the other hand, the compressed sensing technique is applied to collected data and four parabolas in Fig. 3, *b* are obtained more clearly than the image in Fig. 3, *a*. Obtained B-scan image by impulse GPR is given in Fig. 3, *c*.

For SAR test scenario, four objects (*U*-shaped metal strip, metal plate, water glass and dielectric plate) are buried as defined in **Table 2**. The operating principle scheme of fictive antenna array for SAR algorithm is shown in **Fig. 5**.

To obtain SAR beam of antenna at each scan point, a balance phase term is added to S_{21} pa-

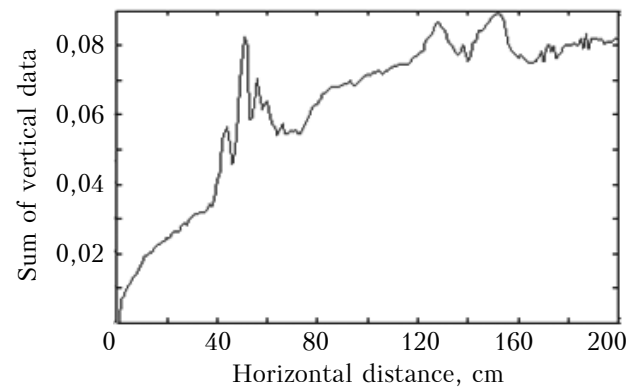


Fig. 4. Cumulative distribution of the buried objects

Table 2

Test scenario of SAR

Parameters	Buried objects			
	<i>U</i> -shaped metal strip	Metal plate	Water glass	Dielectric plate
Size, cm	20×30	10×10	6×20	10×12
Distance to the reference point, cm	80	150	184	220
Depth, cm	1	15	1	2
Position	Horizontal			

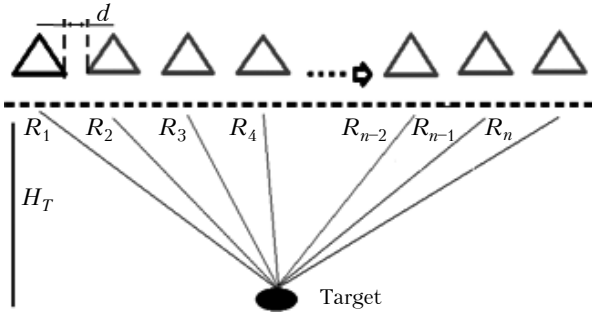


Fig. 5. Operating principle of fictive antenna array on SAR progress

parameter depending on the distance from location of n^{th} antenna to target point given as

$$R_n = \sqrt{H_T^2 + (nd)^2}, \quad (6)$$

where H_T and d are vertical distance from location of reference antenna to target point and distance between antennas, respectively.

Difference between the distance from location of each antenna to the target point and the distance from location of reference antenna to the target point is given as

$$\Delta R_n = R_n - H_T. \quad (7)$$

Then, SAR effect to S parameter can be calculated as

$$S_{21SAR} = \sum_{n=1}^N S_{21} \exp(jk\Delta R_n), \quad (8)$$

where k and N are the wave number and the number of antennas, respectively.

Also, SAR length of this process is calculated as

$$L_{SAR} = N \cdot d. \quad (9)$$

Three slices obtained from C-scan structure are given in Fig. 6. In this figure, the buried objects are clearly visible. Since the location of metal plate is deeper than the other objects and the soil

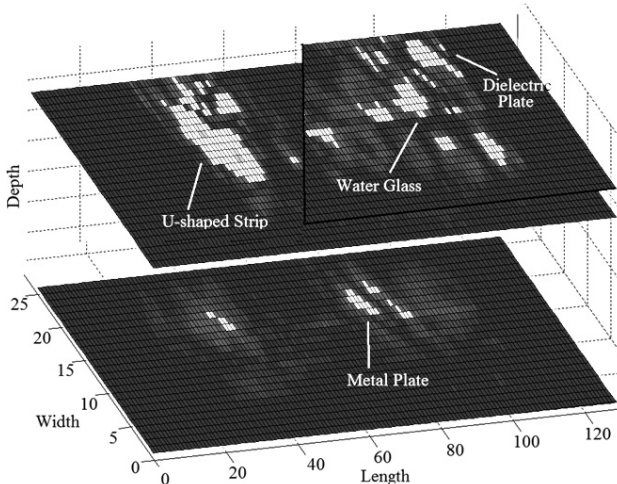


Fig. 6. SAR images for four buried objects (see in color on page 3 of the cover)

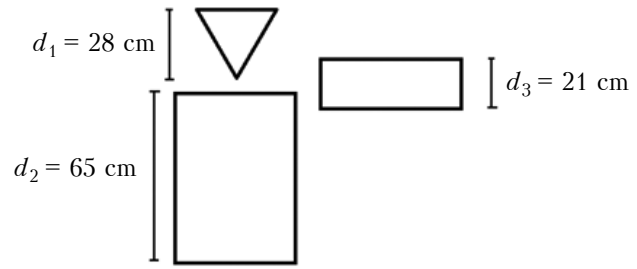


Fig. 7. Body model for TWI SAR operation

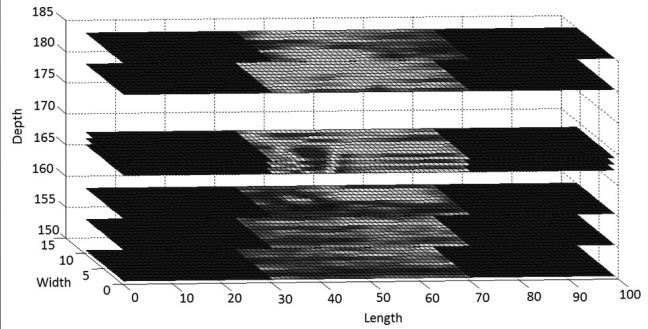


Fig. 8. C-scan slices of TWI SAR images (see in color on page 3 of the cover)

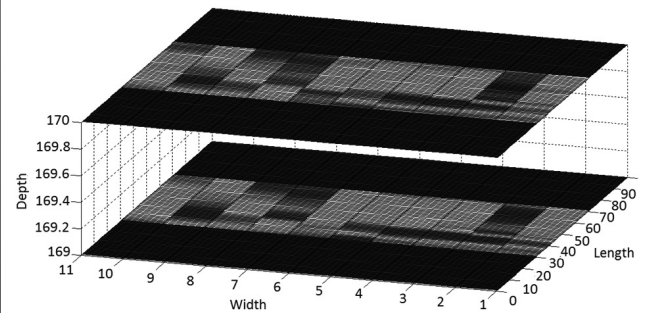


Fig. 9. Slices for the head and the trunk of the model (see in color on page 3 of the cover)

has high loss, the reflection from the metal plate is seen lower than U-shaped strip.

The other SAR application of our work is investigation of body model behind the brick wall. This target object model is shown in Fig. 7. The width of the wall is 50 cm. The distance from the wall to the target is 60 cm. The wall is almost homogeneous.

The C-scan slices of through-wall imaging SAR operation are given in Fig. 8. In this figure, it is seen that there is no object on near zone of the back wall, and the target body model behind the wall is clearly visible. The head and the trunk of body model can be seen in Fig. 9. It is seen that through-wall imaging SAR operation gives better resolution than the conventional GPR operation.

Conclusion

The target detection and signal processing performances of the ground penetrating radar are presented by using novel UWB partial dielectric loaded horn designs. The subsurface and through-wall imaging of the buried target objects are

demonstrated by using adaptive signal processing techniques in our GPR test scenario. It is shown that background removal, compressed sensing and SAR techniques provide enhanced resolution for imaging objects at different depths using novel antenna designs.

REFERENCES

1. Daniels D. J. Surface penetrating radar. *IEE Radar, sonar, navigation and avionics, series 6*. London, IEE, 1996.
2. Turk A. S., Hocaoglu A. K. Buried object detection. In book: *Encyclopedia of RF and microwave engineering*, Hoboken, NJ, Wiley-Interscience, 2005, vol. 1, pp. 541-559.
3. Borchert O., Aliman M., Glasmachers A. Directional borehole radar calibration. *Proc. of the 4th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR 2007)*, Naples (Italy), 2007, pp. 19-23.
4. MacDonald J., Lockwood J. R. *Alternatives for landmine detection*. Santa Monica, CA, RAND Science and Technology Policy, RAND Co., 2003.
5. Sahinkaya D. A., Turk A. S. UWB GPR for detection and identification of buried small objects. *Proc. SPIE*, 2004, vol. 5410, pp. 174-184.
6. Taylor D. *Ultra-wide band technology*. Boca Raton, FL, CRC Press, 2001.
7. Kong F. N., By T. L. Theory and performance of a GPR system which uses step frequency signals. *J. Appl. Geophys*, 1993, vol. 33, pp. 453-445.
8. Parrini F., Pieraccini M., Atzeni C. A high-speed continuous wave GPR. In *Proc. of the 10th International Conference on Ground Penetrating Radar*, Delft (The Netherlands), 2004, pp. 183-186.
9. Curlander J. C., McDounough R. N. *Synthetic aperture radar, systems and signal processing*. New York, John Wiley & Sons, 1991.
10. Chan Y. K., Koo V. C. An introduction to synthetic aperture radar (SAR). *Progress In Electromagnetics Research B*, 2008, vol. 2, pp. 27-60.
11. Turk A. S. Ultra-wideband Vivaldi antenna design for multi-sensor adaptive ground-penetrating impulse radar. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2006, vol. 48, no 5, pp. 834-839.
12. Turk A. S., Sahinkaya D. A. Partial dielectric loaded TEM horn design for ultra-wideband ground penetrating impulse radar systems. In book: *Ultra-Wideband Short-Pulse Electromagnetics. Series 7. Chapter 34*. Berlin, Springer, 2007.
13. Turk A. S., Nazli H. Hyper-wide band TEM horn array design for multi band ground-penetrating impulse radar. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2008, vol. 50, no 1, pp. 76-81.
14. Turk A. S., Keskin A. K. Partially dielectric-loaded ridged horn antenna design for ultrawide band gain and radiation performance enhancement. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2012, vol. 11, pp. 921-924

Received 05.11 2013

M. Unal, A. Caliskan, A. S. Turk, P. O. Bakbak

Turkey, Istanbul, Yildiz Technical University

E-mail: mehmetu@yildiz.edu.tr, acaliskan@yildiz.edu.tr, asturk@yildiz.edu.tr, pozkan@yildiz.edu.tr

МЕТОДИ ОТРИМАННЯ РСА-ЗОБРАЖЕНЬ ЗАХОРОНЕНИХ ОБ'ЄКТІВ ДЛЯ ГЕОРАДАРА

У статті представлено методи обробки сигналу та отримання зображень за допомогою радіолокаційного синтезування апертури (РСА) для надширокопоздовжового (НШП) георадара. Запропоновано нові НШП-антенні структури. Результати експериментального дослідження методів підповерхневого зондування об'єктів, що знаходяться під землею і за стіною, представлені у вигляді зображень, отриманих В- та С-скануванням.

Ключові слова: георадар, радіолокатор з синтезованою апертурою, підповерхневе отримання зображень, обробка радіолокаційного сигналу.

M. Unal, A. Caliskan, A. S. Turk, P. O. Bakbak

Turkey, Istanbul, Yildiz Technical University

E-mail: mehmetu@yildiz.edu.tr, acaliskan@yildiz.edu.tr, asturk@yildiz.edu.tr, pozkan@yildiz.edu.tr

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ РСА-ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗАХОРОНЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ГЕОРАДАРА

В статье представлены методы обработки сигнала и получения изображений при помощи радиолокационного синтезирования апертуры (РСА) для сверхширокополосного (СШП) георадара. Предложены новые СШП-антенные структуры. Результаты экспериментального исследования методов подповерхностного зондирования объектов, находящихся под землей и за стеной, представлены в виде изображений, полученных В- и С-сканированием.

Ключевые слова: георадар, радиолокатор с синтезированной апертурой; подповерхностное получение изображений, обработка радиолокационного сигнала.

УДК 621.371:621.37

Д. т. н. О. В. БОНДАРЕНКО, д. т. н. Б. Я. КОСТИК, к. т. н. Д. Н. СТЕПАНОВ, Е. В. ЛЕВЕНБЕРГ

Украина, Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова

E-mail: vols@onat.edu.ua

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ТРАНСПОРТНОЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ ПЕРВИЧНОЙ СЕТИ УКРАИНЫ

Приведены статистические данные о количестве, причинах и характере повреждений подземных волоконно-оптических линий связи, которые являются основой транспортной телекоммуникационной первичной сети на примере Донецкой и Луганской областей за период с 2001 по 2010 годы. Сравнение значений этих характеристик со значениями аналогичных параметров за 2001–2005 гг. позволяет разработать рекомендации по повышению надежности телекоммуникационных сетей.

Ключевые слова: волоконно-оптическая линия связи, транспортная телекоммуникационная первичная сеть, эксплуатационные показатели качества работы, статистические данные.

Задача обеспечения надежности кабельной техники включает в себя широкий круг вопросов, связанных с проектированием, строительством и технической эксплуатацией, а также разработкой и производством ее элементов. В первую очередь это относится к волоконно-оптическим линиям связи (**ВОЛС**) [1].

Расчет параметров надежности проектируемых ВОЛС становится возможным на основе сбора и обработки эксплуатационных статистических данных о времени, длительности, количестве, характере и причинах повреждений действующих линий. Эти данные позволяют установить среднестатистические эксплуатационные показатели качества ВОЛС: плотность повреждений, интенсивность отказов, среднее время восстановления связи $t_{в\text{ ср}}$ и среднее время полного восстановления связи $t_{пв\text{ ср}}$.

В ряде работ, например [1–4], обоснованы подходы к определению статистических показателей качества работы волоконно-оптических линий связи. В частности, в [1] приведены статистические показатели надежности транспортной первичной сети Донецкой, Одесской та Львовской областей за десятилетний период эксплуатации. В работе [2] приведены статистические данные характеристик надежности за пятилетний срок эксплуатации подземных ВОЛС на базе бронированных и небронированных оптических кабелей транспортной телекоммуникационной первичной (**ТПП**) сети связи Украины, а также Донецкой и Луганской областей с 2001 года по 2005 год. В [2] указано, что эти данные возможно использовать в первом приближении для расчета эксплуатационных показателей качества работы подземных ВОЛС Донецкой, Луганской областей и всей Украины в целом. Однако, достоверность этих статистических эксплуатационных показателей

качества работы, которые характеризуют надежность ВОЛС, не являются окончательными и нуждается в уточнении [1, 2]. Кроме того, в известной авторам литературе отсутствуют исходные материалы для расчета эксплуатационных показателей качества работы кабельных ВОЛС Украины.

Поэтому целью настоящей работы является получение более достоверных исходных данных для расчета показателей качества работы подземных ВОЛС на основе обработки статистических данных об эксплуатации транспортной телекоммуникационной первичной сети Украины на примере Донецкой и Луганской областей за период с 2001 по 2010 годы.

Для численного выражения надежности ВОЛС используют разнообразные характеристики, совокупность которых позволяет наиболее полно оценить ее надежность как системы или оптического кабеля (**ОК**) как изделия. Надежность кабельной линии при эксплуатации зависит от качества не только кабеля, но также и всех других устройств и элементов, которые входят в ее состав [1–3].

Разнообразие условий местности, где проходит трасса ВОЛС, приводит к необходимости применения на отдельных ее участках разных конструкций оптического кабеля и разных методов его прокладки. Поэтому при оценке надежности ОК, в зависимости от места прокладки, кабели группируют по типам: бронированные, которые прокладываются непосредственно в почве или в кабельной канализации, и небронированные, которые прокладываются в субканале кабельной канализации [1, 2].

Интенсивность отказов при повреждениях или авариях ВОЛС на 1 км трассы за 1 час определяется по выражению [3, с. 44; 5, с. 515]

$$\lambda = \frac{m}{8760 \cdot 100}, \quad (1)$$

где m — плотность отказов (повреждений или аварий) ВОЛС, приходящаяся на 100 км трассы в год (8760 — количество часов в году).

В соответствии с [3, с. 37; 5, с. 514]

$$m = \frac{N}{L} \cdot 100, \quad (2)$$

где N — количество отказов на ВОЛС на протяжении года;

L — длина линии в километрах.

С учетом этого формулу (1) представим в виде

$$\lambda = \frac{m}{8760L}. \quad (3)$$

Среднее время восстановления связи определяется как [3, с. 36]

$$t_{в\text{ср}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{vi}, \quad (4)$$

Таблица 1

Распределение по месяцам количества повреждений сети с прерыванием связи в Донецкой и Луганской областях за 2001–2010 гг.

Год	Количество повреждений с прерыванием связи											
	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Донецкая область												
2001	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—
2002	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—
2003	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2004	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—
2005	—	—	—	—	—	—	—	1	1	—	—	—
2006	—	—	—	1	—	—	1	—	—	—	—	—
2007	—	—	—	—	—	—	2	3	—	—	—	—
2008	—	—	—	—	—	—	1	1	—	1	—	—
2009	—	—	—	—	—	2	—	1	1	—	—	—
2010	—	—	—	—	—	—	—	—	1	1	1	—
Луганская область												
2001	—	1	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—
2002	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—
2003	—	—	—	1	—	2	—	—	—	1	—	—
2004	—	—	—	—	—	1	1	—	—	—	—	1
2005	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—
2006	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2007	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2008	—	—	—	—	—	1	1	—	—	1	—	—
2009	—	—	2	—	1	—	—	—	1	1	—	—
2010	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	2	—

где t_{vi} — время восстановления связи при i -м повреждении (аварии);

N — количество отказов на ВОЛС в течение заданного времени.

Аналогично определяется и среднее время полного восстановления связи $t_{пв\text{ср}}$.

Нами проанализированы статистические данные о количестве повреждений по месяцам транспортной телекоммуникационной первичной сети Донецкой и Луганской областей Украины за период с 2001 по 2010 год с учетом [2, 3]. Этот анализ показал, что по сравнению с 2001–2005 гг. в период с 2006 по 2010 гг. количество повреждений в весенне-летний период увеличилось на 72 %, а в осенне-зимний — на 42 % (табл. 1).

Следует отметить, что в настоящее время в Украине еще не в полной мере сложилась практика оценки доли отказов ВОЛС в общем числе повреждений ТТП. Это в значительной степени объясняется, с одной стороны, сравнительно поздним внедрением ВОЛС в транспортной телекоммуникационной сети Украины и быстрым темпом этого процесса, а с другой, трудоемкостью работ по сбору, обработке и анализу эксплуатационных статистических данных [2].

Наблюдение за причинами отказов подземных ВОЛС транспортной сети показало, что наибольшее число отказов происходит в результате действий злоумышленников (рис. 1).

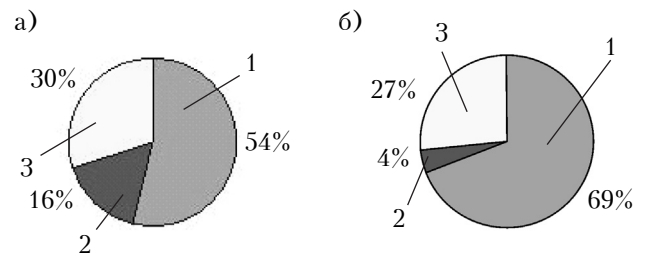


Рис. 1. Процентное соотношение количества повреждений ВОЛС ТТП сети связи за счет действий злоумышленников (1), стихии (2) и других факторов (3) в Донецкой и Луганской областях за периоды с 2001 по 2005 гг. (а) и с 2001 по 2010 гг. (б)

На основе статистических данных, полученных за 10 лет эксплуатации, по выражениям (2) и (4) были определены значения эксплуатационных показателей качества ВОЛС транспортной первичной сети, реализованной на кабелях типа ОКЛБг и ОКЛ, в Донецкой и Луганской областях. На рис. 2 представлены графики их изменения по годам, а также средние значения, рассчитанные для разных периодов времени (2001–2005, 2006–2010, 2001–2010 гг.).

На рис. 3 показано процентное соотношение количества повреждений ВОЛС с различными типами ОК и условиями их прокладки в Донецкой и Луганской областях за периоды 2001–2005 и 2001–2010 гг. Как видно, в обеих областях доля

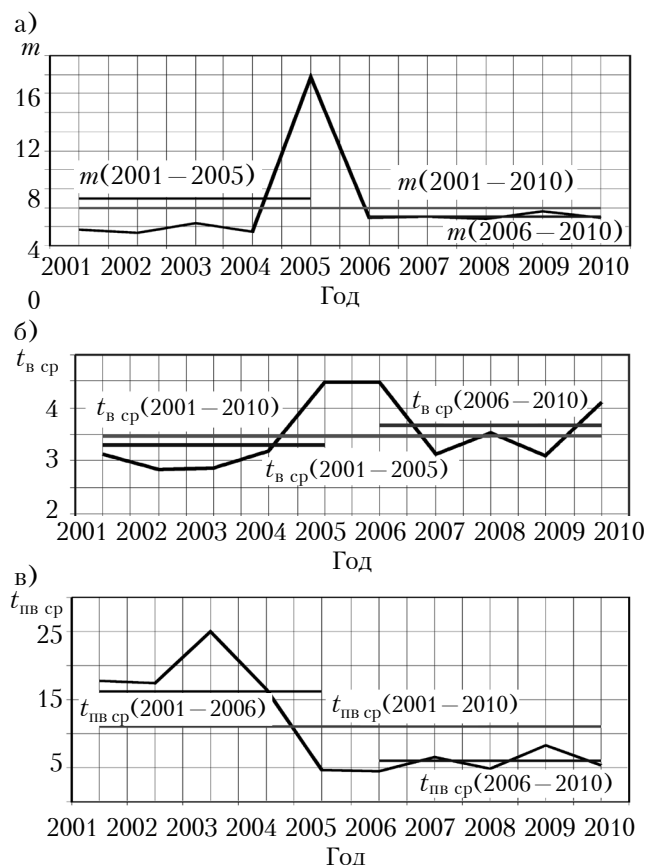


Рис. 2. Эксплуатационные показатели качества ВОЛС ТТП сетей связи Донецкой и Луганской областей в период с 2001 по 2010 гг.:

а — плотность отказов; б — среднее время восстановления связи; в — среднее время полного восстановления связи

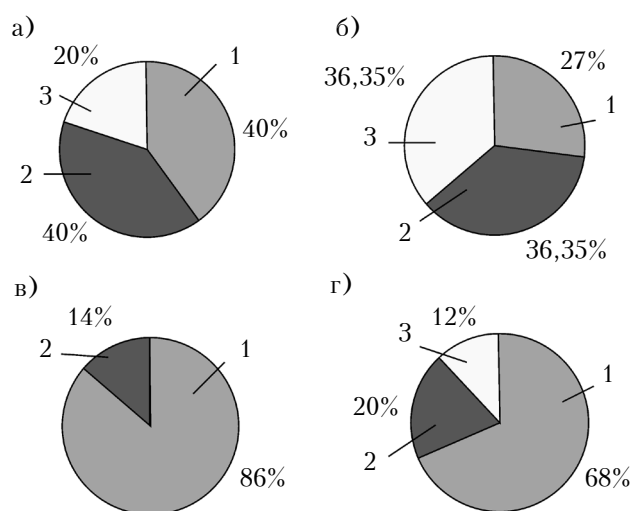


Рис. 3. Процентное соотношение количества повреждений ВОЛС ТТП сети связи Донецкой (а, б) и Луганской (в, г) областей за пятилетний и десятилетний периоды для бронированного кабеля в почве (1) и в кабельной канализации (2), а также небронированного кабеля в кабельной канализации или субканале (3)

повреждений бронированного кабеля, рассчитанная за период с 2001 по 2010 год, меньше, чем за период с 2001 по 2005 гг., а повреждений кабеля, проложенного в субканалах, увеличилось.

Расчет плотности отказов на 100 км трассы за период с 2001 по 2010 гг. показывает, что она на 19% ниже, чем за период 2001 — 2005 гг., что может свидетельствовать, например, об улучшении охранно-разъяснительных работ. Среднее время полного восстановления связи также меньше на 32%, что, вероятно, связано с повышением оперативности работ аварийно-восстановительных бригад.

В соответствии с полученными данными, очевидно, что расчет эксплуатационных показателей качества работы кабельных линий связи необходимо выполнять не только согласно среднегодовым, но и согласно максимальным и минимальным показателям интенсивности отказов.

В табл. 2 представлены средние, максимальные и минимальные значения λ для разного вида кабельных линий, рассчитанные по выражению (1), которые получены на базе обработки статистических данных о повреждении сети связи Донецкой и Луганской областей за период эксплу-

Таблица 2

Интенсивность отказов ВОЛС на 1 км трассы, рассчитанная для разных периодов и для различных условий прокладки кабеля

Период	Интенсивность отказов на 1 км трассы, 10^{-7} 1/ч		
	$\lambda_{\text{ср}}$	λ_{max}	λ_{min}
Бронированный кабель в почве			
2001 — 2005 гг.	15,48	19,00	10,38
2006 — 2010 гг.	27,62	39,15	16,32
2001 — 2010 гг.	21,55	29,08	13,35
Бронированный кабель в кабельной канализации			
2001 — 2005 гг.	105,59	202,70	16,44
2006 — 2010 гг.	41,37	45,54	37,21
2001 — 2010 гг.	69,58	124,12	26,83
Небронированный кабель в кабельной канализации или субканале			
2001 — 2005 гг.	—	—	—
2006 — 2010 гг.	23,97	52,16	16,32
2001 — 2010 гг.	23,97	52,16	16,32

атации с 2001 по 2010 гг. Согласно этим данным, интенсивность отказов бронированных кабелей, которые прокладываются непосредственно в почве, за период с 2006 по 2010 годы увеличилась по сравнению с предыдущим периодом на 78%. Это объясняется увеличением доли злоумышленных повреждений ОК (рис. 1) и несогласованных земляных работ в охранной зоне кабеля.

Таким образом, получены эксплуатационные показатели качества работы ВОЛС транспортной телекоммуникационной первичной сети Донецкой и Луганской областей, которые позволяют выпол-

нять ориентировочные расчеты надежности кабельных линий, определять и сравнивать качество работы оптических кабелей разных типов между собой и др. В случае необходимости это дает возможность наметить соответствующие мероприятия и разработать практические рекомендации по минимизации риска повреждения ВОЛС и по обеспечению норм показателей надежности систем связи в различных условиях эксплуатации.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Bondarenko O. V., Kostik B. Y., Stepanov D. M., Levenberg E. V. Performance indicators of work quality of transport telecommunication primary network in Donetsk, Lviv and Odessa regions of Ukraine // Proc. of the IXth

International Conference «Antenna theory and techniques». — Odessa, 2013. — P. 489–491.

2. Бондаренко О. В. Статистичні дані для розрахунку показників надійності підземних волоконно-оптичних ліній зв'язку // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. — 2009. — № 1. — С. 64 — 69.

3. Гуревич А. С., Курбатов Н. Д. Надежность кабелей связи. — Москва: Связь, 1968. — 136 с.

4. Алексеев Е. Б. Основы проектирования и технической эксплуатации цифровых волоконно-оптических систем передачи: учебное пособие. — Москва: ЧПК МТУСИ, 2004. — 120 с.

5. Гроднев И. И., Курбатов Н. Д. Линейные сооружения связи: учебник для ВУЗов. — Москва: Связь, 1974. — 544 с.

Дата поступления рукописи
в редакцию 31.05 2013 г.

О. В. БОНДАРЕНКО, Б. Я. КОСТИК, Д. М. СТЕПАНОВ, Є. В. ЛЕВЕНБЕРГ

Україна, Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова

E-mail: vols@onat.edu.ua

ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ТРАНСПОРТНОЇ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ ПЕРВИННОЇ МЕРЕЖІ УКРАЇНИ

В роботі наведено статистичні дані про кількість, причини та характер пошкоджень підземних волоконно-оптичних ліній зв'язку, які є основою транспортної телекомунікаційної первинної мережі, на прикладі Донецької та Луганської областей за період з 2001 по 2010 рр. Порівняння значень цих характеристик із значеннями аналогічних характеристик за 2001–2005 рр. дозволяє розробити рекомендації по підвищенню надійності телекомунікаційних мереж.

Ключові слова: волоконно-оптична лінія зв'язку, транспортна телекомунікаційна первинна мережа, експлуатаційні показники якості роботи, статистичні дані.

O. V. BONDARENKO, B. YA. KOSTIK, D. N. STEPANOV, E. V. LEVENBERG

Ukraine, A. S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications

E-mail: vols@onat.edu.ua

OPERATIONAL PERFORMANCE OF THE PRIMARY TRANSPORT TELECOMMUNICATION NETWORK OF UKRAINE

The paper presents statistical data on the number, nature and causes of the damage to underground fiber-optic communication lines, on which the transport telecommunication primary network is based, using an example of Donetsk and Lugansk regions for the period between 2001 and 2010. Comparison of these characteristics with the values of similar parameters over 2001–2005 allows to develop recommendations for the improvement of the reliability of telecommunication networks.

Keywords: fiber-optic communication line, transport telecommunication primary network, operating indicators of work quality, statistical information.

REFERENCES

1. Bondarenko O. V., Kostik B. Y., Stepanov D. M., Levenberg E. V. Performance indicators of work quality of transport telecommunication primary network in Donetsk, Lviv and Odessa regions of Ukraine. Proc. of the IXth International Conference «Antenna theory and techniques». Odessa, 2013. pp. 489-491.

2. A. Bondarenko [Statistical data for the calculation of reliability indices of underground fiber-optic communications] *Naukovi pratsi of A.S. Popov ONAT*, 2009, no 1, pp. 64-69. (in Ukrainian)

3. Gurevich A. S., Kurbatov N. D. *Nadezhnost' kabelei svyazi* [Reliability of communication cables] Moscow, Communications, 1968, 136 p. (in Russian)

4. Alekseev E. B. *Osnovy proektirovaniya i tekhnicheskoi ekspluatatsii tsifrovyykh volokonno-opticheskikh sistem peredachi* [Basis of design and technical operation of digital fiber-optic transmission systems] Moscow, ChPK MTUSY, 2004, 120 p. (in Russian)

5. Grodnev I. I., Kurbatov N. D. *Lineinye sooruzheniya svyazi: uchebnik dlya VUZov* [Linear communication structures: a textbook for universities] Moscow, Svyaz', 1974, 544 p. (in Russian)

УДК 621.315.592

Д. т. н. Н. М. ВАКИВ¹, д. т. н. С. И. КРУКОВСКИЙ¹,
В. Р. ТИМЧИШИН^{1,2}, А. П. ВАСЬКИВ³

Украина, г. Львов, ¹НПП «Карат»; ²НУ «Львовская политехника»;

³Львовский Национальный университет имени Ивана Франко

E-mail: carat207@i.ua

ПОЛУЧЕНИЕ ДВУХСТОРОННИХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ КРЕМНИЕВЫХ $p-i-n$ -СТРУКТУР МЕТОДОМ ЖФЭ

Разработана технология выращивания двухсторонних высоковольтных кремниевых $p-i-n$ -структур методом жидкофазной эпитаксии в едином технологическом процессе. Электрофизические параметры полученных структур позволяют изготавливать на их основе высоковольтные диоды.

Ключевые слова: эпитаксиальный слой, жидкофазная эпитаксия, редкоземельный элемент, легирование.

Особенностью кремниевых эпитаксиальных $p-i-n$ -структур является наличие толстой (около 200 мкм) высокоомной i -области, с обеих сторон которой формируются контактные слои p - и n -типа. Как правило, Si $p-i-n$ -структуры получают традиционным диффузионным методом или методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ). В первом случае формирование p - и n -слоев происходит, как правило, в двухэтапном процессе диффузии акцепторных и донорных примесей из боро- или фосфоросиликатного стекла в высокоомную кремниевую подложку толщиной 200–250 мкм при температуре 1000–1200°C [1, 2]. Вследствие такой высокотемпературной обработки удельное сопротивление подложки p , составляющее изначально более 500 Ом·см, уменьшается в два-три раза. Соответственно, низким будет и пробивное напряжение высоковольтного диода (не более 1000 В), поскольку его величина определяется значением p . К тому же при формировании эпитаксиальных структур диффузионным способом нельзя обеспечить хорошую воспроизводимость процесса.

Формирование контактных слоев методом ЖФЭ проводится при температуре на 200–300°C ниже, чем диффузионным, в двух отдельных технологических процессах: сначала эпитаксиальные слои кристаллизуются на одной стороне подложки, затем на другой. Такой технологический подход является достаточно сложным, а длительная термообработка структур в течение двух процессов роста практически сводит на нет эффект от снижения температуры, поскольку она все равно остается высокой (степень деградации высокоомной кремниевой подложки зависит не только от температуры обработки, но и от ее продолжительности [3, 4]).

В настоящей работе предложена технология получения двухсторонних кремниевых $p-i-n$ -структур методом ЖФЭ в едином технологическом

процессе, что позволяет существенно уменьшить длительность термообработки.

Особенности процесса кристаллизации двухсторонних кремниевых эпитаксиальных $p-i-n$ -структур при ЖФЭ

Одной из проблем, возникающих при ЖФЭ слоев кремния n - и p -типа проводимости, является смачиваемость расплавами галлия и олова Si-подложки при низких значениях температуры эпитаксии. При температуре 850°C и ниже даже на подложках кремния, прошедших стандартную предэпитаксиальную обработку в травителях [5], удаляющих естественный оксид SiO₂, а также подрастворяемых в недонасыщенных по кремнию растворах галлия или олова, образуются дефекты в виде незарощенных участков разной площади [6]. Одним из решений этой проблемы является использование раскисляющих добавок, таких, например, как алюминий, который при формировании слоев p -Si выполняет одновременно и роль акцепторной примеси. Значительно сложнее эта задача решается при получении сильнолегированных слоев n -Si, поскольку алюминий применять нельзя ввиду его акцепторного воздействия. В настоящей работе для этого использован редкоземельный элемент иттербий, имеющий очень высокую химическую активность к кислороду и его оксидам. Поскольку количество Yb в растворах олова не превышало 0,15 ат. %, его влияние на электрофизические свойства слоев было незначительным.

Удельное сопротивление i -слоя в составе Si $p-i-n$ -структуры является одним из основных параметров, определяющих ее качество. Поэтому для выбора максимально допустимой температуры процесса кристаллизации проводили отжиг высокоомных подложек i -Si в атмосфере высокочистого водорода при различных значениях температуры T_0 . Длительность

отжига составляла не менее 90 мин, что имитировало продолжительность процесса ЖФЭ слоев Si. Результаты экспериментов приведены в **таблице**. Из этих данных следует, что существенное уменьшение удельного сопротивления Si-подложек происходит при $T_o \geq 880^\circ\text{C}$, т. е. температура начала кристаллизации высокоомных Si $p-i-n$ -структур при ЖФЭ должна находиться ниже 880°C .

Удельное сопротивление четырех i -Si-подложек

$T_o, ^\circ\text{C}$	Удельное сопротивление подложки, Ом·см		Толщина подложки, мкм
	до отжига	после отжига	
800	109	108	186
850	115	110	183
890	112	90	193
950	114	74	171

Наращивание эпитаксиальных слоев осуществляли в температурном диапазоне $860-650^\circ\text{C}$ в герметичном кварцевом реакторе проточного типа в атмосфере водорода с точкой росы -70°C в графитовой поршневой кассете, которая была специально разработана нами для получения двухсторонних структур в едином технологическом процессе [7]. Во избежание деградации подложки максимальная температура процесса не превышала 860°C .

Процесс наращивания двухсторонних структур происходит следующим образом. Растворы-расплавы выдерживаются в течение 60 мин при температуре 860°C для их гомогенизации. После этого на Si-подложку сверху подается раствор-расплав олова, и в течение 30 мин происходит ее подрастворение на глубину 8–10 мкм. Затем ростовой зазор заполняется насыщенным по кремнию раствором-расплавом олова, легированным сурьмой и иттербием, и из него в течение 3 ч при снижении температуры со скоростью $0,7-1,0^\circ\text{C}/\text{мин}$ кристаллизуется слой кремния n -типа проводимости. При достижении 750°C с обратной стороны подложки для ее подрастворения продавливается раствор-расплав галлия. Далее температура снижается до 740°C в течение 30 мин, после чего сюда подается насыщенный по Si раствор-расплав Ga, легированный алюминием, и при дальнейшем снижении температуры до 650°C наращивается p -Si-слой в течение примерно 3 ч, при этом скорость снижения температуры составляет $0,6^\circ\text{C}/\text{мин}$. При достижении температуры 650°C реактор с кассетой удаляется из термоблока.

Для получения структур с необходимыми параметрами в процессе исследований варьировали атомные массы компонентов растворов-расплавов, меняя при этом и величину ростового зазора. Было установлено, что для достижения необходимых параметров структур ростовой зазор для получения слоев n -Si должен составлять 1,5 мм, а для p -Si — 0,8 мм.

Результаты исследований электрофизических параметров полученных структур

Исследование проводилось по методике измерения эффекта Холла.

На **рис. 1**, где представлена зависимость концентрации дырок C_p в p -Si-слое от содержания Al в галлиевом расплаве, видно, что увеличение количества алюминия X_{Al} от 0,2 до 1,0 ат. % приводит к увеличению концентрации дырок в пять раз. При этом в области $X_{\text{Al}} > 0,8$ ат. % наблюдается насыщение концентрационной зависимости.

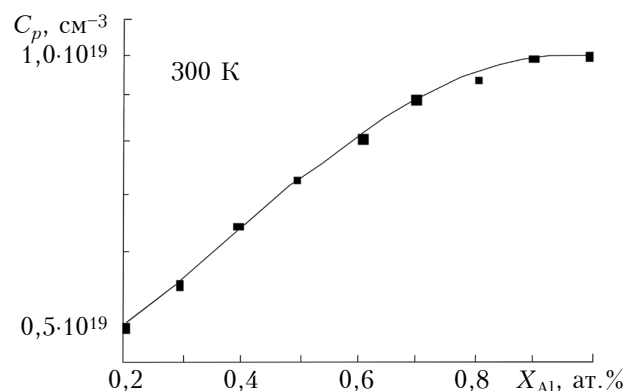


Рис. 1. Зависимость концентрации дырок в p -Si-слое от содержания алюминия в галлиевом расплаве

Следует отметить, что при содержании Al, меньше 0,4 ат. %, формируются несплошные и неоднородные по толщине эпитаксиальные слои p -Si, что обусловлено плохой смачиваемостью кремниевой подложки расплавом из-за присутствия на ее поверхности естественного оксида. При низкой температуре эпитаксии растворение подложки начинается в тех местах, где толщина естественного диоксида кремния наименьшая. Травленая поверхность имеет ячеистый характер. Если травление проводить на большую глубину (около 20 мкм и более), то травленая поверхность постепенно выравнивается. Однако при низких температурах эпитаксии охлажденный на $15-20^\circ\text{C}$ расплав галлия насыщается кремнием, и при дальнейшем снижении температуры растворение прекращается, а в вытравленных окнах диоксида кремния начинается кристаллизация кремния. В дальнейшем, в зависимости от площади участков подложки, которые остались нетравленными, и толщины наращиваемого слоя, в нем формируются дефекты в виде незарощенных участков разной площади, а на более поздней стадии — дефекты в виде ямок, которые видны на **рис. 2, а** (см. здесь, а также в цвете на 3-й стр. обложки). Добавление алюминия в расплав галлия способствует удалению собственного оксида с поверхности подложки, равномерному ее подрастворению перед началом кристаллизации эпитаксиального слоя кремния и формированию поверхности, качественной

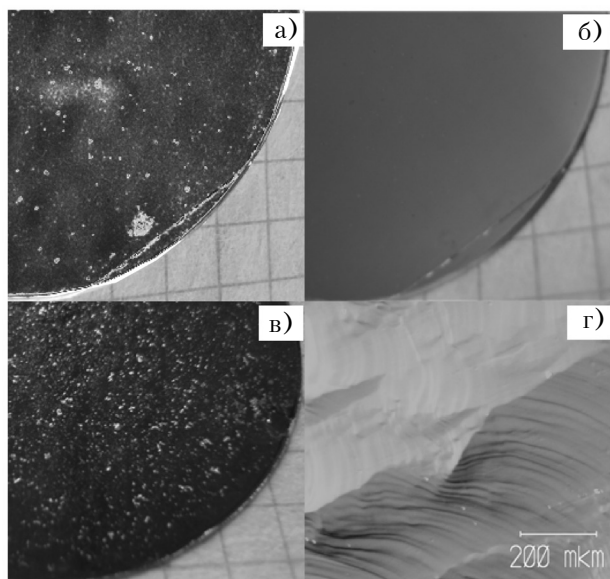


Рис. 2. Макроморфология (а–в) и микроморфология (г) поверхности *p*-Si-слоев, кристаллизованных в интервалах температуры 740–650°C из расплава Ga при различном содержании в нем алюминия (в ат. %): а – 0,25; б, г – 0,76; в – 1,25

с точки зрения макроморфологии (см. рис. 2, б и микроморфологию поверхности этого слоя на рис. 2, г). Однако при концентрациях алюминия, превышающих 1 ат. %, растворимость кремния увеличивается, что приводит к непланарному подрастворению подложки и возникновения бугорчатого рельефа (рис. 2, в). Таким образом, оптимальная концентрация Al в расплаве Ga, обеспечивающая получение качественной поверхности, находится в диапазоне 0,4–0,8 ат. %.

Увеличение растворимости Si в Ga–Al-расплаве приводит к немонотонному возрастанию скорости кристаллизации и, соответственно, к увеличению толщины слоя. На рис. 3 приведена зависимость толщины *h* слоев *p*-Si от концентрации Al в расплаве Ga. Здесь видно, что при повышении концентрации Al до 0,6 ат. %

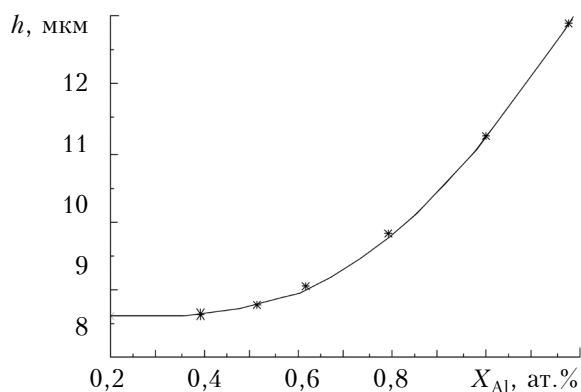


Рис. 3. Зависимость толщины слоев *p*-Si, кристаллизованных в диапазоне температуры 740–650°C, от концентрации Al в расплаве Ga

толщина увеличивается незначительно, а при $X_{Al} > 0,8$ ат. % наблюдается резкое ее возрастание. Очевидно, что диапазон концентрации Al в галлиевом расплаве, обеспечивающий получение качественной поверхности *p*-Si-слоев, является также оптимальным с точки зрения воспроизводимости процесса.

Для получения сильнолегированных эпитаксиальных *n*-Si-слоев использовался раствор-расплав на основе олова, насыщенный кремнием и легированный Sb в пределах концентрации 6,2–8,5 ат. %, а также редкоземельным элементом иттербием (Yb) в количествах 0,001–0,150 ат. %. Иттербий, как отмечалось выше, в таких количествах действует в основном как раскисляющая добавка, улучшающая смачивание кремниевой подложки раствором-расплавом на основе олова. При отсутствии Yb в расплаве Sn на начальной стадии процесса наблюдается островковый рост, что при кристаллизации относительно толстых (5–6 мкм и больше) эпитаксиальных слоев кремния приводит к образованию бугорчатой поверхности, которая видна на рис. 4, а (здесь и в цвете на 3-й стр. обложки), а также к большой неоднородности по толщине. Добавление Yb в количестве от 0,03 до 0,15 ат. % позволяет кристаллизовать планарные слои *n*-Si с разбросом по толщине не более 1% на подложках диаметром 50,8 мм и зеркально-гладкой поверхностью (см. рис. 4, б и микроморфологию поверхности этого слоя на рис. 4, г). При повышении концентрации Yb в растворе-расплаве олова больше 0,15 ат. % неоднородность слоев существенно ухудшается. Это может быть связано с образованием в объеме

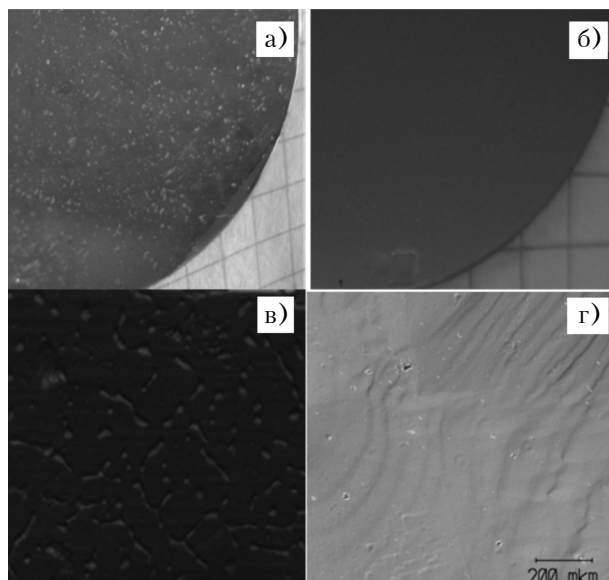


Рис. 4. Макроморфология (а–в) и микроморфология (г) поверхности *n*-Si-слоев, кристаллизованных в интервале температуры 850–750°C из расплава Sn, легированного сурьмой (8,5 ат. %), при различном содержании иттербия (в ат. %): а – 0; б, г – 0,07; в – 0,18

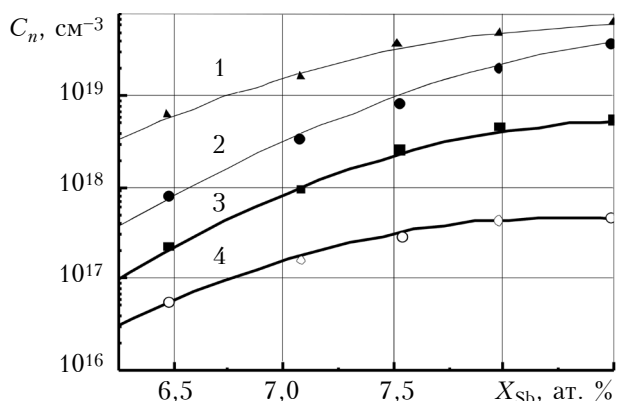


Рис. 5. Зависимость концентрации электронов в n -Si-слоях от содержания Sb в расплаве Sn при различном уровне легирования иттербием (в ат. %): 1 — 0; 2 — 0,03; 3 — 0,09; 4 — 0,15

расплава оксидов иттербия, которые выступают в роли дополнительных центров кристаллизации, нарушающих условия гомогенного роста слоев. Образовавшиеся микровключения второй фазы нарушают диффузионный механизм массопереноса кремния в объем расплава, а также могут захватываться кристаллизующимся эпитаксиальным слоем, ухудшая качество его поверхности (рис. 4, в).

На рис. 5, где приведена зависимость концентрации электронов C_n в n -Si-слое от состава раствора-расплава, видно, что при концентрациях Yb, превышающих 0,1 ат. %, и оптимальном количестве донорной примеси Sb (8,0—8,5 ат. %) значение C_n становится ниже $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (кривая 4). Электрофизические параметры структур с такими слоями не являются оптимальными для использования их в качестве контактных. Наиболее вероятной причиной уменьшения уровня легирования слоев n -Si при увеличении концентрации иттербия в Sn-расплавах является, по-видимому, уменьшение фоновых донорных примесей вследствие их взаимодействия с Yb. Аналогичный эффект уменьшения фонового легирования наблюдается в соединениях A_3B_5 , кристаллизованных методом ЖФЭ [5]. Возможно также проявление компенсирующего действия иттербия вследствие его акцепторного воздействия при концентрациях в расплаве олова более 0,03 ат. %, о чем свидетельствует уменьшение угла наклона кривых 3 и 4 по сравнению с кривой 2 на рис. 5.

Таким образом, использование растворов-расплавов олова, легированных одновременно

сурьмой и иттербием, позволило кристаллизовать при низкой температуре эпитаксиальные слои кремния n -типа проводимости с уровнем легирования более $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ толщиной 8—16 мкм, имеющих зеркально-гладкую поверхность.

Выводы

Отработанные низкотемпературные технологические режимы кристаллизации эпитаксиальных планарных слоев позволяют получать двухсторонние Si p — i — n -структуры методом жидкофазной эпитаксии в едином технологическом процессе. Уровень легирования выращенных контактных p -Si- и n -Si-слоев превышает $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Определенные в процессе исследований значения оптимальной концентрации алюминия (0,4—0,8 ат. %) и иттербия (0,03—0,15 ат. %) в расплавах галлия и олова обеспечивают получение зеркально-гладкой поверхности эпитаксиальных слоев p -Si и n -Si. Параметры полученных структур позволяют изготавливать на их основе высоковольтные диоды, используемые в навигационной аппаратуре, системах связи бытового и специального назначения, бортовых системах электроснабжения, в радиолокационных системах, медицинской аппаратуре и др.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Харламов Р.В. Разработка технологии производства кремниевых эпитаксиальных структур для силовых приборов // Дисс. ... канд. тех. наук. — Москва, 2000. — С. 166.
2. Скоробогатова Л.А., Зубрицкий С.М., Петров А.Л., Семёнов А.Л. Технологии материалов для микро- и нанoeлектроники: учеб. пособие. — Иркутск: Изд-во Иркутского гос. ун-та, 2009. — 83 с.
3. Уфимцев В.Б., Ачкурин Р.Х. Физико-химические основы жидкофазной эпитаксии. — Москва: Металлургия. — 1983.
4. Гореленок А.Т., Каманин А.В., Шмидт Н.М. Редкоземельные элементы в технологии соединений A^3B^5 и приборов на их основе // ФТП. — 2003. — Т. 37, вып. 8. — С. 922—940.
5. Ваків М.М., Круковский С.І., Тимчишин В.Р. Низькотемпературна рідиннофазна епітаксія р-Si шарів в складі р-і-n Si високовольтних структур // Вісник Національного університету «Львівська Політехніка». Серія «Електроніка». — 2011. — № 708. — С. 50—54.
6. Королев М.А., Красюков А.Ю., Поломошнов С.А. Современные проблемы технологии нанoeлектроники: учеб. пособие. — Москва: МИЭТ, 2011. — 100 с.
7. Пат. України № 73670 на корисну модель. Графітова касета для отримання двосторонніх епітаксійних структур // Ваків М.М., Круковский С.І., Тимчишин В.Р. — 2012. — Бюл. № 19.

Дата поступления рукописи
в редакцию 10.09 2013 г.

М. М. ВАКІВ, С. І. КРУКОВСЬКИЙ, В. Р. ТИМЧИШИН, А. П. ВАСЬКІВ

Україна, м. Львів, НПП «Карат», НУ «Львівська політехніка»,
Львівський національний університет імені Івана Франка
E-mail: carat207@i.ua

ОТРИМАННЯ ДВОСТОРОННІХ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЕПІТАКСІЙНИХ
КРЕМНІЄВИХ p — i — n -СТРУКТУР МЕТОДОМ РФЕ

Розроблено технологію вирощування двосторонніх високовольтих кремнієвих $p-i-n$ -структур методом рідиннофазної епітаксії в єдиному технологічному процесі. Електрофізичні параметри отриманих структур дозволяють виготовляти на їх основі високовольтні діоди.

Ключові слова: епітаксійний шар, рідиннофазова епітаксія, рідкоземельний елемент, легування.

N. M. VAKIV¹, S. I. KRUKOVSKY¹, V. R. TYMCHYSHYN^{1,2}, A. P. VAS'KIV³

Ukraine, Lviv, ¹SPE "Karat", ²Lviv Polytechnic National University,

³Ivan Franko Lviv National University

E-mail: karat207@i.ua

OBTAINING OF BILATERAL HIGH VOLTAGE EPITAXIAL $p-i-n$ SI STRUCTURES BY LPE METHOD

Silicon $p-i-n$ -structures are usually obtained using conventional diffusion method or liquid phase epitaxy (LPE). In both cases, the formation of p - and n -layers occurs in two stages. This technological approach is quite complex. Moreover, when forming bilateral high-voltage epitaxial layers, their parameters significantly deteriorate as a result of prolonged heat treatment of active high-resistivity layer. Besides, when using diffusion method, it is impossible to provide good reproducibility of the process. In this paper a technique of growing bilateral high-voltage silicon $p-i-n$ -structures by LPE in a single process is proposed. The authors have obtained the optimum compounds of silicon-undersaturated molten solutions for highly doped ($5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) contact layers: 0.4–0.8 at. % aluminum in gallium melt for growing p -Si-layers and 0.03–0.15 at. % ytterbium in tin melt for n -Si-layers. Parameters of such structures provide for manufacturing of high-voltage diodes on their basis. Such diodes can be used in navigational equipment, communication systems for household and special purposes, on-board power supply systems, radar systems, medical equipment, etc.

Key words: epitaxial layer, liquid-phase epitaxy, rare-earth element, doping.

REFERENCES

1. Kharlamov R.V. *Razrabotka tekhnologii proizvodstva kremnievykh epitaksial'nykh struktur dlya silovykh priborov*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of production technology of silicon epitaxial structures for power devices. Ph.D. tech. diss.] Moscow, 2000. 166 p. (in Russian)
2. Skorobogatov L.A., Zubritskiy S.M., Petrov A.L., Semenov A.L. *Tekhnologii materialov dlya mikro- i nanoelektroniki* [Materials technology for micro- and nanoelectronics]. Irkutsk State University, 2009. 83 p. (in Russian)
3. Ufimtsev V.B., Achkurin R.Kh. *Fiziko-khimicheskie osnovy zhidkofaznoi epitaksii* [Physico-chemical principles of liquid-phase epitaxy]. Moscow, Metallurgiya, 1983. (in Russian)
4. Gorelenok A. T., Kamanin A. V., Shmidt N. M. Rare-earth elements in the technology of III–V compounds and

devices based on these compounds. *Semiconductors*, 2003, vol. 37, iss. 8, pp. 894–914. DOI: 10.1134/1.1601656

5. Vakiv M.M., Krukovsky S.I., Tymchyshyn V.R. [Low-temperature liquid-phase epitaxy of p -Si layers in composition of $p-i-n$ Si high-voltage structures] *Visnik Natsional'nogo universitetu "Lviv's'ka Politekhnik"*, Ser. "Elektronika", 2011, no. 708, pp. 50–54. (in Ukraine)

6. Korolev M.A., Krasnyukov A.Yu., Polomoshnov S.A. *Sovremennye problemy tekhnologii nanoelektroniki* [Modern problems of nanoelectronics technology] Moscow, MIET, 2011. 100 p. (in Russian)

7. Vakiv M.M., Krukovsky S.I., Tymchyshyn V.R. *Grafitova kaseta dlya otrimannya dvostoronnikh epitaksiinikh struktur* [Graphite cassette for obtaining bilateral epitaxial structures]. Pat. of Ukraine no. 73670, 2012. (in Ukraine)

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Берлин Е. В., Сейдман Л. А. Получение тонких пленок реактивным магнетронным распылением. — Москва: Техносфера, 2014.

Книга представляет собой подробное справочное руководство по физическим основам, технологическим особенностям и практическому применению процесса реактивного магнетронного нанесения тонких пленок сложного состава. Подробно описаны физические процессы, протекающие во время реактивного магнетронного нанесения, технологические особенности магнетронного нанесения. Особое внимание уделено способам управления процессами нанесения пленок, обеспечивающим стабильность и воспроизводимость как самого процесса, так и свойств получаемых пленок. Рассмотрены модификации процесса нанесения, различающиеся используемыми источниками питания: постоянного тока, среднечастотных импульсов, импульсов большой мощности и высокочастотные. Даны практические рекомендации по освоению известных и разработке новых процессов получения пленок сложного состава методом реактивного магнетронного распыления.



УДК 621.315.592: 533.583.2

А. Ю. ЛЯШКОВ

Украина, Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

E-mail: vdnud@yandex.ru

ИЗУЧЕНИЕ АДсорбЦИОННЫХ СОСТОЯНИЙ В КЕРАМИКЕ $\text{ZnO}-\text{Ag}$ МЕТОДОМ ТВЭ-КРИВЫХ

Приведены результаты экспериментальных исследований поверхностных электронных состояний, обусловленных адсорбцией газов на поверхности газочувствительной керамики $\text{ZnO}-\text{Ag}$, методом термовакуумных кривых электропроводности. Исследования проводились в интервале температур 300–800 К. Предложена модель, позволяющая оценить глубину залегания уровня Ферми в неоднородных полупроводниковых материалах.

Ключевые слова: керамика, оксид цинка, Ag, вакуум, адсорбция, десорбция, электропроводность, уровень Ферми, зонная диаграмма.

Керамическая система $\text{ZnO}-\text{Ag}$ достаточно давно предложена в качестве материала для полупроводниковых сенсоров паров этанола [1]. К настоящему времени на основе оксида цинка с добавкой серебра кроме собственно керамических материалов [2–3] синтезированы тонкие и толстые пленки [4–8], а также различные наноструктуры [9–15]. Основным направлением исследований является изучение оптических свойств и структуры полученных образцов. Что же касается изучения газочувствительных свойств и химических процессов, протекающих на поверхности системы $\text{ZnO}-\text{Ag}$, существенное внимание этому уделено лишь в отдельных работах [7, 8, 14–16].

Недостаточное количество информации о молекулярно-электронных процессах, ответственных за газочувствительность, и о поверхностных электронных состояниях, связанных с адсорбцией, сдерживает развитие такой области электроники, как полупроводниковые газовые сенсоры, при разработке которых сих пор преобладает эмпирический подход [17].

Основной задачей настоящей работы являлось исследование поверхностных электронных состояний керамической системы на основе оксида цинка с добавкой серебра и их связи с электрическими свойствами.

Образцы и методика измерений

Керамика была изготовлена путем смешивания порошков ZnO и Ag_2O субмикронного размера квалификации «хч» в этиловом спирте. Полученная таким образом шихта высушивалась. Количество Ag_2O изменялось в диапазоне 0,1–2,0% по массе. Полученный порошок был спрессован в диски диаметром 12 мм и толщиной до 4 мм под осевым давлением 100 МПа.

Спекание производилось на воздухе в течение 1 ч при температуре 1170 К, что ниже температуры плавления серебра. Для электрических измерений на образцах были сформированы планарные электроды либо электроды типа «сэндвич» путем вжигания серебряной пасты [18] при 973 К на воздухе.

Сканирующая электронная микроскопия поверхности и рентгеновский микроанализ были выполнены при помощи микроскопа Nova NanoSEM 200 (компания FEI, США). Рентгенофазовый анализ образцов проводили на дифрактометре PANalytical Empyrean ($\text{CuK}\alpha$, $\lambda=1,5406 \text{ \AA}$). Образцы имели поликристаллическую структуру, типичную для спеченных оксидов металлов. Включения металлического серебра были локализованы между зернами оксида цинка. Размеры зерен ZnO варьировались от 300 до 500 нм [3]. Рентгенофазовый и рентгеновский микроанализ образцов после отжига показал, что оксид серебра восстанавливался до металла и не создавал с ZnO совместных фаз. Другие соединения в объеме и на поверхности исследуемого материала обнаружены не были. Электропроводность материала определялась потенциальными энергетическими барьерами на границах зерен ZnO (высотой 0,20–0,25 эВ) [3].

Для исследования поверхностных электронных состояний образцов был выбран метод термовакуумных кривых электропроводности (ТВЭ-кривых), предложенный А. А. Дуловым и его сотрудниками [19], который представляет нам одним из наиболее информативных способов мониторинга состояния катализаторов. Состояние поверхности твердого тела исследуется по его электропроводности в зависимости от температуры прогрева как предварительного, так и в

ходе измерений, проводимых, как правило, в вакууме, поскольку в таком случае лучше всего проявляется влияние десорбции на электропроводность. Метод ТВЭ-кривых позволяет провести анализ фазового состава поверхности образцов и исследовать зависимость этого состава от различных факторов. Основной особенностью метода является то, что в процессе исследований фиксируются необратимые изменения электропроводности σ и энергии активации такого процесса E_o .

Измерение ТВЭ-кривых проводилось следующим образом. Образец медленно (5 К/мин) прогревался в вакууме (1 Па) до определенной температуры (T_{vac}), выдерживался до стабилизации электропроводности, после чего фиксировалась температурная зависимость его электрической проводимости в интервале от T_{vac} до комнатной температуры T_o . Такие измерения проводились для различных значений T_{vac} в интервале от 310 до 800 К через каждые 20–30 К.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Форма ТВЭ-кривых, полученных для образцов исследуемой керамики (рис. 1), была типовой для данного метода [19, 20] и не зависела от содержания серебра. Кривые хорошо аппроксимируются эмпирическим уравнением $\sigma(T) = \alpha \cdot \exp(-E_o/(kT))$, где $\sigma(T)$ — электропроводность; T — абсолютная температура; α — предэкспоненциальный множитель; k — постоянная Больцмана. Это позволило построить кривые в координатах Аррениуса [19] и охарактеризовать энергией активации E_o , определяемой на линейном участке вблизи комнатной температуры. В рамках барьерной модели электропроводности величина E_o отождествлялась с величиной межкристаллитного потенциального барьера ϕ_s [21].

С целью идентификации механизмов электропроводности и процессов, протекающих на поверхности и в объеме керамики, были изуче-

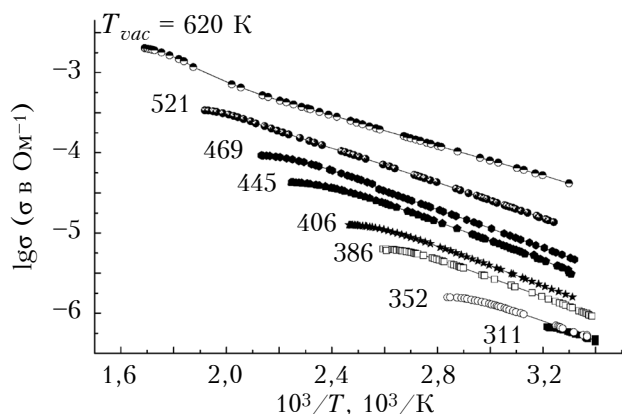


Рис. 1. ТВЭ-кривые, полученные для различных значений температуры вакуумирования (в К) образца с «сэндвич»-электродами (чистый ZnO)

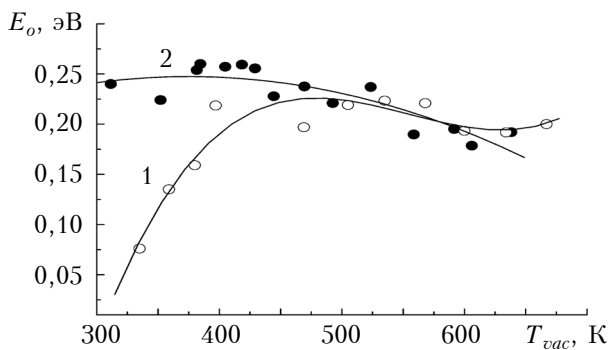


Рис. 2. Температурные зависимости энергии активации для образцов керамики с планарными (1) и «сэндвич» (2) электродами

ны зависимости энергии активации от температуры вакуумирования образцов с разными типами электродов. Типичные зависимости представлены на рис. 2.

Поскольку влияние десорбции на электрические свойства полупроводников наиболее выражено проявляется в поверхностных слоях материала, основное внимание при исследованиях уделялось образцам с планарными электродами. При использовании ТВЭ-кривых, полученных для образцов с различным содержанием Ag_2O , были построены зависимости электропроводности σ_o образца с планарными электродами при комнатной температуре от температуры его прогрева T_{vac} (рис. 3). Отмечено, что за исключением образца с 2%-ным содержанием Ag_2O , во всех образцах увеличение температуры вакуумирования выше 300 К не сразу приводило к увеличению σ_o (см. кривые 1 и 3 на рис. 3), а в некоторых случаях значение σ_o даже снижалось (кривая 2). Этот эффект, как и постепенное увеличение E_o для таких образцов, можно пояснить десорбцией воды с поверхности керамики [22, 23].

Как видно на рис. 3, в диапазоне относительно низких значений T_{vac} зависимость $\sigma_o(T_{vac})$

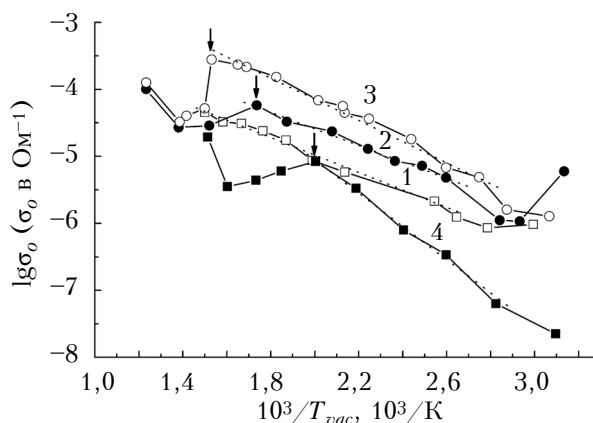


Рис. 3. Зависимость электропроводности при комнатной температуре от температуры вакуумирования образцов с планарными электродами и различным содержанием Ag_2O (в мас. %): 1 — 0; 2 — 0,1; 3 — 1,0; 4 — 2,0

удовлетворительно спрямляется в координатах Аррениуса. Это позволяет, как и в случае ТВЭ-кривых (рис. 1), аппроксимировать эти зависимости аналогичным уравнением: $\sigma_o(T) = \beta \cdot \exp(-W/(kT))$, где β — предэкспоненциальный множитель, и оценить энергию активации сдвига ТВЭ-кривых W . Из таблицы видно, что значение W увеличивается с ростом массовой доли серебра: от 0,24 эВ для чистого ZnO до 0,52 эВ для образца с 2 мас. % Ag_2O .

Повышение T_{vac} приводит к уходу с поверхности образцов кислорода, который адсорбируется в виде ионов O_2^- и O^- и является для ZnO акцептором [23]. Уравнение, отражающее данный процесс, можно записать в виде $\text{O}_2^- \rightarrow \text{O}_2 + e^-$ либо $2\text{O}^- \rightarrow \text{O}_2 + 2e^-$, где e^- — электрон. Десорбция физадсорбированного (нейтрального) кислорода представляется более вероятной в связи со слабым его взаимодействием с адсорбентом [23], и существенного влияния на электропроводность он не оказывает. В результате происходит снижение межкристаллитных потенциальных барьеров в керамике, существование которых в основном и зависит от слоя хемосорбированного в заряженной форме кислорода [23]. Уменьшение потенциальных энергетических барьеров, в свою очередь, приводит к увеличению проводимости [24], т. к. удельная электропроводность полупроводника в объеме зерен существенно больше, чем керамики в целом [23, 24]. Этим можно объяснить характер зависимости $\sigma_o(T_{vac})$ на рис. 3 при T_{vac} до 600 К.

В области высоких температур наблюдается резкое уменьшение σ_o при увеличении T_{vac} выше определенных значений (на рис. 3 эти точки отмечены стрелками), причем значения эти зависят от состава образца: при меньшей плотности снижение электропроводности начинает проявляться при меньших температурах (см. T_{vac}^* в таблице). Данное снижение объясняется либо испарением с поверхности ZnO металлического цинка [25], либо диффузией кислорода из внутренних областей зерна к поверхности [26].

После указанного спада σ_o дальнейшее повышение T_{vac} вновь приводит к увеличению электропроводности (см. рис. 3).

Увеличение энергии активации W зависимости $\sigma_o(T_{vac})$ с ростом концентрации серебра можно объяснить тем, что оно не только кон-

центрируется в межзеренной фазе [3] оксидно-цинковой керамики, но и проникает в кристаллическую решетку ZnO. Согласно [6], серебро образует в запрещенной зоне оксида цинка акцепторный энергетический уровень, расположенный примерно на 0,2 эВ выше потолка валентной зоны. Увеличение количества акцепторной примеси (легирование) приводит к сдвигу уровня Ферми вниз (ближе к валентной зоне) и частичной компенсации донорных уровней, контролирующих объемную проводимость кристаллитов ZnO. Это обуславливает уменьшение их электропроводности.

Зависимость электропроводности от давления, наблюдаемая при адсорбции кислорода оксидом цинка, описывается выражением, идентичным уравнению изотермы Фрейндлиха, что поясняется экспоненциальным распределением состояний адсорбции по энергии [23]. Исходя из этого можно предположить существование непрерывного спектра поверхностных электронных состояний (ПЭС) в запрещенной зоне ZnO, связанных с адсорбцией кислорода, что согласуется с [23]. Согласно статистике Ферми — Дирака [27] вероятность заполнения ПЭС, как и любых других электронных состояний, при увеличении энергии выше уровня Ферми (E_F) существенно уменьшается. Это приводит к тому, что ПЭС выше уровня Ферми практически не заряжены [28, 29]. Кислород находится на них уже не в форме ионов O_2^- или O^- , а в нейтральной — O_2 . Таким образом, увеличение проводимости возможно лишь при десорбции кислорода с ПЭС, лежащих ниже уровня Ферми полупроводника: $W = (E_c - E_F) + \phi_s$, где $(E_c - E_F)$ — энергетическое расстояние между уровнем Ферми и дном зоны проводимости в объеме кристаллита (глубина залегания уровня Ферми).

Если бы в рамках эксперимента отслеживалась зависимость давления в экспериментальной камере от температуры вакуумирования, можно было бы получить данные для расчета энергии активации десорбции физадсорбированного кислорода с поверхности твердого тела. Ожидаемые значения энергии активации десорбции у хемосорбированного кислорода ≥ 1 эВ [23]. Однако в методе ТВЭ-кривых отслеживается электропроводность образца, которая увеличивается в результате десорбции хемосорбированного кис-

Электrofизические параметры экспериментальных образцов

Доля Ag_2O , мас. %	Плотность образца, кг/м ³	Тип электродов	W , эВ	ϕ_s , эВ	T_{vac}^*	$E_c - E_F$, эВ
0	4360	«сэндвич»	0,26	0,23	> 640	0,03
		планарные	0,24	0,20	> 670	0,04
0,1	3390	планарные	0,25	0,17	660	0,08
1,0	4070		0,31	0,18	680	0,13
2,0	3100		0,52	0,18	540	0,34

лорода. Фиксируется не энергия активации десорбции кислорода, а энергия активации электронного отклика на этот процесс. Поскольку значения энергии активации ТВЭ-кривых W (см. таблицу) намного меньше 1 эВ и различны для образцов с разной концентрацией серебра, они не могут быть идентифицированы как энергия активации хемосорбированного кислорода.

Полученные значения энергии активации ТВЭ-кривых W можно пояснить тем, что согласно распределению Больцмана даже при небольших температурах всегда существует некоторое количество хемосорбированных ионов кислорода, обладающих энергией, достаточной для десорбции. При рассмотрении хемосорбированного состояния как единой квантово-механической системы, объединяющей молекулу адсорбента и захваченный электрон [23], логично предположить, что системы, в которых электрон обладает большей энергией, менее устойчивы. То есть кислород, хемосорбированный ПЭС вблизи уровня Ферми, десорбируется с поверхности полупроводника более активно, чем с более глубоких уровней. При этом происходит освобождение с ПЭС электрона, захваченного ранее кислородом. Уровни ниже уровня Ферми почти полностью заполнены, что делает маловероятным переход электрона в более низкоэнергетическое состояние. Само существование ПЭС выше уровня Ферми маловероятно, т. к. оно связано с хемосорбированным кислородом, который фактически их и создает. Это подтверждается данными о высоте барьеров в ZnO-керамике на воздухе ($\geq 0,2$ эВ) и их доадсорбционной высоте (около 0,01 эВ) [23]. Таким образом, для электрона, освободившегося с уровней, лежащих значительно ниже уровня Ферми, наиболее вероятен переход только на относительно слабо заполненные состояния вблизи уровня Ферми, где осуществляется их перезахват на ПЭС с последующим возможным переходом на уровни зоны проводимости, также слабо заполненные. Следует отметить, что после термообработки в вакууме увеличивается концентрация электронов в зоне проводимости.

Туннелирование электронов с состояний вблизи уровня Ферми в зону проводимости представляется маловероятным в связи со значительной шириной обедненной области (около 10^{-7} м согласно расчетам).

Данная модель позволяет оценить глубину залегания уровня Ферми под дном зоны проводимости в объеме кристаллитов непосредственно из выражения $W = (E_c - E_F) + \phi_s$ (см. таблицу).

Исходя из вышеизложенного можно предположить, что при легировании ZnO донорными примесями число заполненных поверхностных электронных состояний увеличивается, а при легировании акцепторными — уменьшается. Это, в свою очередь, должно вызвать увеличение или, соответственно, уменьшение газочувствительности материала (при условии такого же влияния примеси на другие электрофизические свойства

полупроводника, от которых также зависит газочувствительность). Данное предположение находит свое подтверждение в экспериментальных работах, например в [30].

Выводы

Проведенные экспериментальные исследования показали, что электропроводность образцов керамики ZnO—Ag снижается при их прогреве в вакууме при температуре, лежащей в диапазоне от 540 до 680 К.

Для обеспечения высокой газочувствительности полупроводниковых газовых сенсоров, принцип действия которых основан на окислении активного газа на поверхности датчика, необходимо, чтобы поверхностные электронные состояния были максимально заполнены ионами кислорода, что, в свою очередь, достигается легированием материалов n -типа донорными примесями.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Pat. 4017792 USA. Device for determining and/or measuring alcohol content in a gas and method of manufacturing a semiconductor body for use in alcohol detection / G. Heiland, C.-D. Kohl. — 12.04.1977.
2. Kuo S.-T., Tuan W.-H., Shieh J., Wang S.-F. Effect of Ag on the microstructure and electrical properties of ZnO // Journal of the European Ceramic Society. — 2007. — Vol. 27. — P. 4521-4527. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2007.02.215
3. Lyashkov A. Yu., Tonkoshkur A. S., Aguilar-Martinez J. A., Glot A. B. ZnO—Ag ceramics for ethanol sensors // Ceramics International. — 2013. — Vol. 39. — P. 2323-2330. DOI: 10.1016/j.ceramint.2012.08.080
4. Khomchenko V.S., Kryshab T.G., Savin A.K., Zavyalova L.V., Roshchina N.N., Rodionova V.E., Lytvynova O.S., Kushnirenko V.I., Khachatryan V.B., Andracadameb J.A. Fabrication and properties of ZnO:Cu and ZnO:Ag thin films // Superlattices and Microstructures. — 2007. — Vol. 42. — P. 94-98. DOI: 10.1016/j.spmi.2007.04.016
5. Duan L., Gao W., Chen R., Fu Z. Influence of post-annealing conditions on properties of ZnO:Ag films // Solid State Communications. — 2008. — Vol. 145. — P. 479-481. DOI: 10.1016/j.ssc.2007.12.013
6. Грузинцев А. Н., Волков В. Т., Якимов Е. Е. Фотоэлектрические свойства пленок ZnO, легированных акцепторными примесями Cu и Ag // Физика и техника полупроводников. — 2003. — Т. 37, вып. 3. — С. 275-278.
7. Takayama H., Fujitsu S. Gas-sensitive Ag ion conduction in semiconducting ZnO thin films // Solid State Ionics. — 1989. — Vol. 35. — P. 411-415. DOI: 10.1016/0167-2738(89)90329-9
8. Tarwal N. L., Rajgure A. V., Patil J. Y., Khandekar M. S., Suryavanshi S. S., Patil P. S., Gang M. G., Kim J. H., Jang J. H. A selective ethanol gas sensor based on spray-derived Ag—ZnO thin films // Journal of Materials Science. — 2013. — Vol. 48, iss. 20. — P. 7274-7282. DOI: 10.1007/s10853-013-7547-7
9. Lin T.-H., Chen T.-T., Cheng C.-L., Lin H.-Y., Chen Y.-F. Selectively enhanced band gap emission in ZnO/Ag₂O nanocomposites // Optics express. — 2009. — Vol. 17, N 6. — P. 4342-4347. DOI: 10.1364/OE.17.004342
10. Irimpan L., Nampoori V.P.N., Radhakrishnan P. Spectral and nonlinear optical characteristics of nanocomposites of ZnO—Ag // Chemical Physics Letters. — 2008. — Vol. 455. — P. 265-269. DOI: 10.1016/j.cplett.2008.02.097
11. Kim J. Y., Park H.-H., Reddy A. S., Changb H. J., Jeon H., Changd Y., Parka H.-H. Electromagnetic shielder compatible ZnO transparent conducting oxides hybridized with various sizes of Ag metal nanoparticles // Ceramics

International. — 2008. — Vol. 34, iss. 4. — P. 1055–1058. DOI: 10.1016/j.ceramint.2007.09.075

12. Song Y.-W., Kim K., Lee S. Y. Morphology transition of Ag-doped ZnO nanostructures in hot-walled pulsed laser deposition // Thin Solid Films. — 2009. — Vol. 518, iss. 4. — P. 1318–1322. DOI: 10.1016/j.tsf.2009.07.206

13. Sun Z.-P., Liu L., Zhang L., Jia D.-Z. Rapid synthesis of ZnO nanorods by one-step, room-temperature, solid-state reaction and their gas-sensing properties // Nanotechnology. — 2006. — Vol. 17. — P. 2266–2270. DOI: 10.1088/0957-4484/17/9/032

14. Zong Y., Cao Y., Jia D., Bao S., Lu Y. Facile synthesis of Ag/ZnO nanorods using Ag/C cables as templates and their gas-sensing properties // Materials Letters. — 2010. — Vol. 64, iss. 3. — P. 243–245. DOI: 10.1016/j.matlet.2009.09.032

15. Cui J., Wang D., Xie T., Lin Y. Study on photoelectric gas-sensing property and photo-generated carrier behavior of Ag-ZnO at the room temperature // Sensors and Actuators B. — 2013. — Vol. 186. — P. 165–171. DOI: 10.1016/j.snb.2013.05.088

16. Lyashkov A. Yu., Tonkoshkur A.S. Gas sensitivity of ZnO-based ceramics to vapors of saturated monohydric alcohols // Materials Chemistry and Physics. — 2013. — Vol. 140, iss. 1. — P. 31–36. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2013.02.018

17. Obvintseva L.A. Metal oxide semiconductor sensors for determination of reactive gas impurities in air // Russian Journal of General Chemistry. — 2008. — Vol. 78, iss. 12. — P. 2545–2555. DOI: 10.1134/S1070363208120347

18. Окадзакі К. Технологія керамічних діелектриків. — Москва: Энергія, 1976.

19. Дулов А. А., Абрамова Л. А. Возможности метода электропроводности в исследованиях катализаторов // Итоги науки и техники. Сер. кинетика и катализ. — 1984. — Т. 12. — С. 144–194.

20. Макаров В. О., Тонкошкур А. С., Черненко И. М. Влияние термообработки в вакууме на электропроводность оксида цинка // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. — 1987. — Т. 23, № 12. — С. 2016–2020.

21. Валеев Х. С., Квасков В. Б. Нелинейные металлоксидные полупроводники. — Москва: Энергоиздат, 1983.

22. Yadav B.C., Richa Srivastava, Dwivedi C.D., Pramanik P. Synthesis of nano-sized ZnO using drop wise method and its performance as moisture sensor // Sensors and Actuators A: Physical. — 2009. — Vol. 153, iss. 2. — P. 137–141. DOI: 10.1016/j.sna.2009.05.010

23. Мясников И. А., Сухарев В. Я., Куприянов Л. Ю., Завьялов С. А. Полупроводниковые сенсоры в физико-химических исследованиях. — Москва: Наука, 1991.

24. Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S., Makarov V. O. Desorption thermal degradation model of zinc oxide ceramics // Journal of the European Ceramic Society. — 2004. — Vol. 24, iss. 15–16. — P. 3709–3712. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2003.12.004

25. Makarov V.O., Tonkoshkur A.S., Chernenko I.M. Effect of vacuum heat treatment on the electrical conductivity of zinc oxide // Inorganic Materials. — 1988. — Vol. 23, iss. 12. — P. 1769–1773.

26. Амorfные и поликристаллические полупроводники / Под ред. В. Хейванга. — Москва: Мир, 1987.

27. Мікроелектронні сенсори фізичних величин Т. 1. / Під ред. З. Ю. Готри. — Львів: Ліґа-Прес, 2002.

28. Chengxiang W., Longwei Y., Luyuan Z., Dong X., Rui G. Metal oxide gas sensors: sensitivity and influencing factors // Sensors. — 2010. — Vol. 10, iss. 3. — P. 2088–2106. DOI: 10.3390/s100302088

29. Khandetskyi V.S., Tonkoshkur Yu. A. Basic models of isothermal depolarization analysis for diagnostics of heterogeneous materials // Multidiscipline Modeling in Materials and Structures. — 2012. — Vol. 8. — P. 105–119. DOI: 10.1108/15736101211236001

30. F. Paraguay D, M. Miki-Yoshida, J. Morales, J. Solis, W. Estrada L. Influence of Al, In, Cu, Fe and Sn dopants on the response of thin film ZnO gas sensor to ethanol vapour // Thin Solid Films. — 2000. — Vol. 373, iss. 1–2. — P. 137–140. DOI: 10.1016/S0040-6090(00)01120-2

Дата поступления рукописи
в редакцию 08.08 2013 г.

О. Ю. ЛЯШКОВ

Україна, Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара

E-mail: vdn@yandex.ru

ВИВЧЕННЯ АДСОРБЦІЙНИХ СТАНІВ У КЕРАМІЦІ ZnO—Ag МЕТОДОМ ТВЕ-КРИВИХ

Наведено результати експериментальних досліджень поверхневих електронних станів, обумовлених адсорбцією газів на поверхні газочутливої кераміки ZnO—Ag, методом термовакуумних кривих електропровідності. Дослідження проводилися в температурному інтервалі 300–800 К. Запропоновано модель, що дозволяє оцінити глибину залягання рівня Фермі в неоднорідних напівпровідникових матеріалах.

Ключові слова: кераміка, оксид цинку, Ag, вакуум, адсорбція, десорбція, електропровідність, рівень Фермі, зонна діаграма.

А. Yu. LYASHKOV

Oles Honchar Dnepropetrovsk National University

E-mail: vdn@yandex.ru

STUDY OF ADSORPTION STATES IN ZnO—Ag GAS-SENSITIVE CERAMICS USING THE ECTV CURVES METHOD

The ZnO—Ag ceramic system as the material for semiconductor sensors of ethanol vapors was proposed quite a long time ago. The main goal of this work was to study surface electron states of this system and their relation with the electric properties of the material. The quantity of doping with Ag₂O was changed in the

range of 0,1–2,0% of mass. The increase of the Ag doping leads to a shift of the Fermi level down (closer to the valence zone). The paper presents research results on electrical properties of ZnO-Ag ceramics using the method of thermal vacuum curves of electrical conductivity. Changes in the electrical properties during heating in vacuum in the temperature range of 300–800 K were obtained and discussed. The increase of T_{vac} leads to removal of oxygen from the surface of samples. The oxygen is adsorbed in the form of O_2^- and O^- ions and is the acceptor for ZnO. This results in the lowering of the inter-crystallite potential barriers in the ceramic. The surface electron states (SES) above the Fermi level are virtually uncharged. The increase of the conductivity causes desorption of oxygen from the SES settled below the Fermi level of the semiconductor. The model allows evaluating the depth of the Fermi level in the inhomogeneous semiconductor materials.

Keywords: ceramics, zinc oxide, Ag, vacuum, semiconductor, desorption, conductivity, the Fermi level, band diagram.

REFERENCES

1. G. Heiland, C.-D. Kohl. *Device for determining and/or measuring alcohol content in a gas and method of manufacturing a semiconductor body for use in alcohol detection*. Patent 4017792 USA. 12.04.1977.
2. Kuo S.-T., Tuan W.-H., Shieh J., Wang S.-F. Effect of Ag on the microstructure and electrical properties of ZnO. *Journal of the European Ceramic Society*, 2007, vol. 27, pp. 4521–4527. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2007.02.215
3. Lyashkov A. Yu., Tonkoshkur A. S., Aguilar-Martinez J. A., Glot A. B. ZnO-Ag ceramics for ethanol sensors. *Ceramics International*, 2013, vol. 39, pp. 2323–2330. DOI: 10.1016/j.ceramint.2012.08.080
4. Khomchenko V.S., Kryshchuk T.G., Savin A.K., Zavyalova L.V., Roshchina N.N., Rodionova V.E., Lytvyna O.S., Kushnirenko V.I., Khachatryan V.B., Andrac-Adameb J.A. Fabrication and properties of ZnO:Cu and ZnO:Ag thin films. *Superlattices and Microstructures*, 2007, vol. 42, pp. 94–98. DOI: 10.1016/j.spmi.2007.04.016
5. Duan L., Gao W., Chen R., Fu Z. Influence of post-annealing conditions on properties of ZnO:Ag films. *Solid State Communications*, 2008, vol. 145, pp. 479–481. DOI: 10.1016/j.ssc.2007.12.013
6. Gruzintsev A. N., Volkov V. T., Yakimov E. E. Photoelectric properties of ZnO films doped with Cu and Ag acceptor impurities. *Semiconductors*, 2003, vol. 37, iss. 3, pp. 259–262. DOI: 10.1134/1.1561514
7. Takayama H., Fujitsu S. Gas-sensitive Ag ion conduction in semiconducting ZnO thin films. *Solid State Ionics*, 1989, vol. 35, pp. 411–415. DOI: 10.1016/0167-2738(89)90329-9
8. Tarwal N. L., Rajgure A. V., Patil J. Y., Khandekar M. S., Suryavanshi S. S., Patil P. S., Gang M. G., Kim J. H., Jang J. H. A selective ethanol gas sensor based on spray-derived Ag-ZnO thin films. *Journal of Materials Science*, 2013, vol. 48, iss. 20, pp. 7274–7282. DOI: 10.1007/s10853-013-7547-7
9. Lin T.-H., Chen T.-T., Cheng C.-L., Lin H.-Y., Chen Y.-F. Selectively enhanced band gap emission in ZnO/Ag₂O nanocomposites. *Optics express*, 2009, vol. 17, no 6, pp. 4342–4347. DOI: 10.1364/OE.17.004342
10. Irnpan L., Nampoore V.P.N., Radhakrishnan P. Spectral and nonlinear optical characteristics of nanocomposites of ZnO-Ag. *Chemical Physics Letters*, 2008, vol. 455, pp. 265–269. DOI: 10.1016/j.cplett.2008.02.097
11. Kim J. Y., Park H.-H., Reddy A. S., Changb H. J., Jeon H., Changd Y., Parka H.-H. Electromagnetic shielder compatible ZnO transparent conducting oxides hybridized with various sizes of Ag metal nanoparticles. *Ceramics International*, 2008, vol. 34, iss. 4, pp. 1055–1058. DOI: 10.1016/j.ceramint.2007.09.075
12. Song Y.-W., Kim K., Lee S. Y. Morphology transition of Ag-doped ZnO nanostructures in hot-walled pulsed laser deposition. *Thin Solid Films*, 2009, vol. 518, iss. 4, pp. 1318–1322. DOI: 10.1016/j.tsf.2009.07.206
13. Sun Z.-P., Liu L., Zhang L., Jia D.-Z. Rapid synthesis of ZnO nanorods by one-step, room-temperature, solid-state reaction and their gas-sensing properties. *Nanotechnology*, 2006, vol. 17, pp. 2266–2270. DOI: 10.1088/0957-4484/17/9/032
14. Zong Y., Cao Y., Jia D., Bao S., Lu Y. Facile synthesis of Ag/ZnO nanorods using Ag/C cables as templates and their gas-sensing properties. *Materials Letters*, 2010, vol. 64, iss. 3, pp. 243–245. DOI: 10.1016/j.matlet.2009.09.032
15. Cui J., Wang D., Xie T., Lin Y. Study on photoelectric gas-sensing property and photo-generated carrier behavior of Ag-ZnO at the room temperature. *Sensors and Actuators B*, 2013, vol. 186, pp. 165–171. DOI: 10.1016/j.snb.2013.05.088
16. Lyashkov A. Yu., Tonkoshkur A.S. Gas sensitivity of ZnO-based ceramics to vapors of saturated monohydric alcohols. *Materials Chemistry and Physics*, 2013, vol. 140, iss. 1, pp. 31–36. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2013.02.018
17. Obvintseva L.A. Metal oxide semiconductor sensors for determination of reactive gas impurities in air. *Russian Journal of General Chemistry*, 2008, vol. 78, iss. 12, pp. 2545–2555. DOI: 10.1134/S1070363208120347
18. Okadzaki K. *Tekhnologiya keramicheskikh dielektrikov* [Ceramic dielectrics technology], Moscow, Energiya, 1976. (in Russian)
19. Dulov A. A., Abramova L. A. [Capability of electrical conductivity method in studies of catalysts] *Itogi nauki i tekhniki. Ser. Kinetika i kataliz*, 1984, vol. 12, pp. 144–194. (in Russian)
20. Makarov V. O., Tonkoshkur A. S., Chernenko I. M. [Effect of vacuum heat treatment on the zinc oxide electrical conductivity] *Izv. AN SSSR. Neorganicheskie materialy*, 1987, vol. 23, no 12, pp. 2016–2020. (in Russian)
21. Valeev Kh.S., Kvaskov V.B. *Nelineinye metalloksidnye poluprovodniki* [Nonlinear metal oxide semiconductors] Moscow, Energoizdat, 1983. (in Russian)
22. Yadav B.C., Richa Srivastava, Dwivedi C.D., Pramanik P. Synthesis of nano-sized ZnO using drop wise method and its performance as moisture sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2009, vol. 153, iss. 2, pp. 137–141. DOI: 10.1016/j.sna.2009.05.010
23. Myasnikov I. A., Sukharev V. Ya., Kupriyanov L. Yu., Zavyalov S. A. *Poluprovodnikovye sensory v fiziko-khimicheskikh issledovaniyakh* [Semiconductor sensors in physical-chemical research], Moscow, Nauka, 1991. (in Russian)
24. Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S., Makarov V. O. Desorption thermal degradation model of zinc oxide ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 2004, vol. 24, iss. 15–16, pp. 3709–3712. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2003.12.004
25. Makarov V.O., Tonkoshkur A.S., Chernenko I.M. Effect of vacuum heat treatment on the electrical conductivity of zinc oxide. *Inorganic Materials*, 1988, vol. 23, iss. 12, pp. 1769–1773.
26. *Amorfnye i polikristallicheskie poluprovodniki* [Amorphous and polycrystalline semi-conductors]. Ed. by V. Heivang, Moscow, Mir, 1987.
27. *Mikroelektronni sensory fizichnykh velichin Vol. 1* [Microelectronic physical quantity sensors] Ed. by Z. Yu. Gotra. L'viv: Liga-Pres, 2002. (in Ukrainian)
28. Chengxiang W., Longwei Y., Luyuan Z., Dong X., Rui G. Metal oxide gas sensors: sensitivity and influencing factors. *Sensors*, 2010, vol. 10, iss. 3, pp. 2088–2106. DOI: 10.3390/s100302088
29. Khandetskyi V.S., Tonkoshkur Yu. A. Basic models of isothermal depolarization analysis for diagnostics of heterogeneous materials. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 2012, vol. 8, pp. 105–119. DOI: 10.1108/15736101211236001
30. F. Paraguay D, M. Miki-Yoshida, J. Morales, J. Solis, W. Estrada L. Influence of Al, In, Cu, Fe and Sn dopants on the response of thin film ZnO gas sensor to ethanol vapour. *Thin Solid Films*, 2000, vol. 373, iss. 1–2, pp. 137–140. DOI: 10.1016/S0040-6090(00)01120-2

УДК 621.794:546.48

К. ф.-м. н. И. Р. ЯЦУНСКИЙ

Украина, Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова

E-mail: yatsunskiy@gmail.com

ПОЛУЧЕНИЕ ПРИГОДНОГО ДЛЯ СЕНСОРИКИ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ МЕТОДОМ НЕЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ MacEtch

Для получения микро- и наноструктур пористого кремния предлагается использовать метод неэлектролитического травления MacEtch (metal assisted chemical etching). Представлены результаты исследования морфологии структур, полученных при разных параметрах процессов осаждения и травления, и показана возможность их использования в качестве сенсоров газов и биологических объектов.

Ключевые слова: пористый кремний, неэлектролитическое (химическое) травление.

Перспективы использования разнообразных пористых структур, в частности на основе кремния, в качестве сенсоров базируются в первую очередь на использовании уникальных физико-химических свойств этих структур по отношению к детектируемому веществу. Поскольку между морфологией наноструктур и интенсивностью адсорбции газов и биообъектов наблюдается прямая зависимость [1–4], создание пригодного для сенсорики качественного материала с заданными свойствами невозможно без контроля параметров процесса формирования пористой структуры.

Одним из основных методов получения пористого кремния последние 20 лет является электрохимическое травление [1]. Благодаря своей простоте метод широко распространился, однако с его помощью можно получать лишь пористые микро- и наноструктуры с неравномерным распределением пор. Это ограничивает его применение в области получения материалов для сенсоров, поскольку, как показывают исследования, для эффективного детектирования различных молекул и биообъектов следует использовать не простые пористые структуры, а более сложные, имеющие разнообразную морфологию поверхности — нановискеры, поры, расположенные на определенном расстоянии друг от друга, нанопирамиды и т. д. Получать такие структуры позволяет метод химического неэлектролитического травления MacEtch (metal-assisted chemical etching) [5–7]. Суть этого метода заключается в том, что кремниевая подложка покрывается прерывистым слоем благородного металла и подвергается травлению в растворе плавиковой кислоты (HF) и окисляющего реагента, в качестве которого чаще всего используют перекись водорода (H_2O_2). При этом кремний, находящийся под слоем металла, травится намного бы-

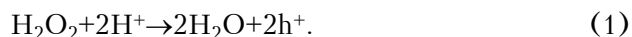
стрее, чем чистая Si-поверхность, поскольку частицы металла проникают в кремний, генерируя поры или более сложные структуры (например, квантовые нити). Особенности геометрии полученных структур зависят в основном от начальной морфологии металлического покрытия поверхности и от условия протекания реакций.

Таким образом, методом MacEtch можно получать более широкий спектр наноструктур заданной морфологии. Это, в свою очередь, позволяет повысить селективность пористого материала к определенному виду молекул и биообъектов. Так, если биообъект (вирус, бактерия) имеет размеры порядка 10 мкм, то для его эффективного обнаружения необходимы структуры (например, поры) с такими же размерами. Кроме того, в качестве материала для детекторов ДНК и газовых молекул сейчас активно используют нановискеры, которые не удается получать электрохимическим методом. Сформированный методом MacEtch наноструктурированный кремний может быть использован в качестве эффективного материала для датчиков газов и биообъектов. Однако в известных автору литературных источниках нет упоминаний об исследованиях, направленных на поиск параметров управления процессом получения такого кремния. Поэтому в продолжение [8] в настоящей работе изучены характеристики структур пористого кремния, полученного методом MacEtch при разных условиях, а также проанализирована возможность их использования в качестве сенсоров газов и биологических объектов.

Получение образцов для исследований

Возможные реакции, протекающие при реализации процесса MacEtch аналогичны реакциям при электрохимическом травлении в HF [9–12]. Известно, что H_2O_2 распадается на по-

верхности металла по следующей реакции (катодная реакция):

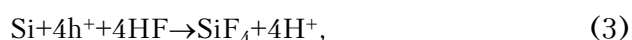


Существует предположение, что снижение количества протонов в водороде вызвано действием другой катодной реакции, в дополнение к реакции (1):

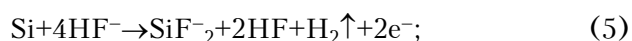


Кремниевая подложка, представляющая собой анод, окисляется и растворяется. Для описания этого процесса предлагается множество моделей растворения кремния, которые условно можно разделить на три группы [12]:

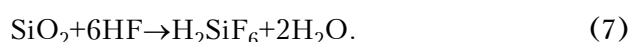
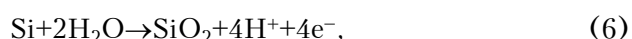
1) прямое растворение Si в четырехвалентном состоянии



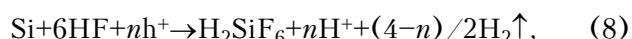
2) прямое растворение Si в двухвалентном состоянии



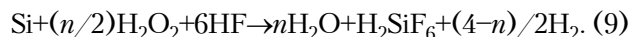
3) окисление Si с последующим растворением оксида



Модель 2 справедлива, поскольку водород выделяется и при обычном травлении. Однако реализуется и модель 3, по которой оксид образуется на поверхности кремниевой подложки до растворения Si и выделение водорода происходит одновременно с растворением Si. В [12] предполагается, что при неэлектролитическом травлении происходит смешанная реакция, включающая в себя двух- и четырехвалентное растворение кремния:



и общая реакция имеет вид



Исходя из анализа скорости травления параметр n принимают равным 3.

Для окисления и анодного растворения кремния необходим перенос заряда, который осуществляют дырки, генерируемые в процессе химического травления. В качестве катода, на котором происходит окисление по реакции (1), выступают микроскопические частицы благородного металла.

Многие явления при травлении методом MacEtch можно качественно объяснить инжекцией дырок, образовавшихся в металле, в кремниевую подложку и диффузией дырок в кремний [10]. Соответственно, атомы кремния под металлическим слоем окисляются за счет ин-

жекции дырок и растворяются под действием HF — происходит анодная реакция (3).

В наших экспериментах для получения образцов были использованы пластины кремния p -типа ориентации (100) с различной концентрацией легирующей примеси. После проведения стандартной RCA-очистки на пластины осаждали частицы серебра, погружая их на короткое время ($t_{\text{ос}}$) в раствор $\text{AgNO}_3:\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$. В экспериментах были использованы растворы с двумя значениями молярной концентрации серебра $C_{\text{mAg}} = 10^{-3}$ и 10^{-2} моль/л.

Далее пластины с осажденными частицами серебра помещали в раствор $\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}:\text{HF}$ с различным содержанием окислителя H_2O_2 для травления на время $t_{\text{тр}}$, равное 5–15 мин.

Исследование морфологии полученных образцов

В ходе эксперимента были получены образцы кремния с различной морфологией поверхности. На рис. 1 представлены АСМ-изображения

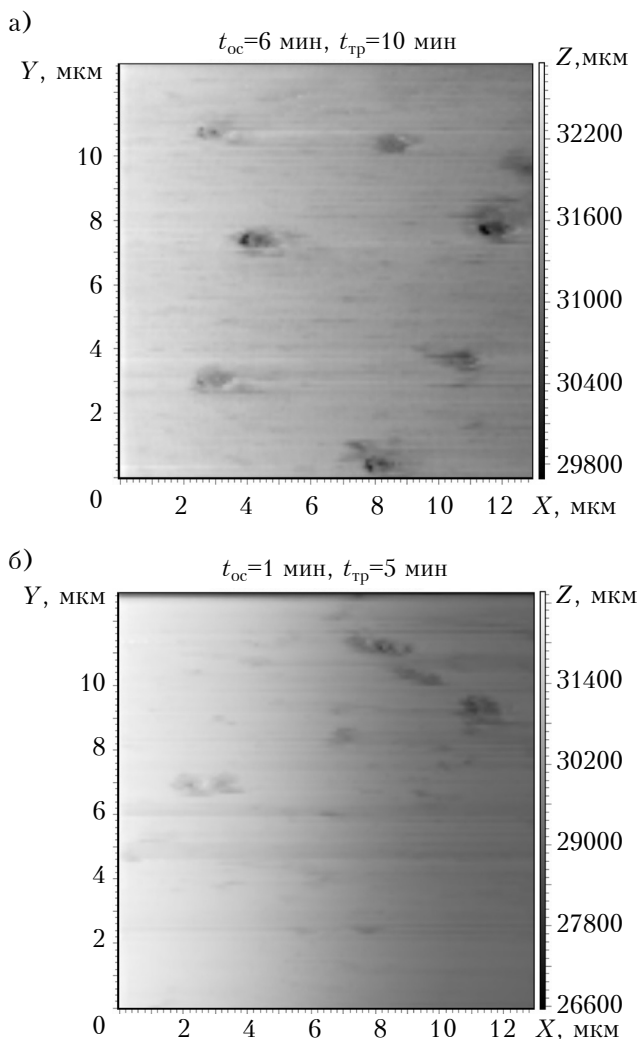


Рис. 1. АСМ-изображение поверхности образцов, полученных при разном времени осаждения и травления ($C_{\text{mAg}}=10^{-3}$ моль/л; $\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}:\text{HF}=10:80:40$)

поверхности образцов, полученных при разной длительности процессов осаждения и травления. Осаждение серебра проводилось из раствора $\text{AgNO}_3:\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ с молярной концентрацией $C_{\text{mAg}}=10^{-3}$ моль/л, травление — в растворе окислителя $\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}:\text{HF}=10:80:40$. Как видно из рис. 1, а, при большем времени осаждения ($t_{\text{oc}}=6$ мин) на поверхности образца после травления возникают равномерно распределенные поры в виде кратеров приблизительно одинаковых размеров (1,4–1,6 мкм в диаметре). При малом времени осаждения ($t_{\text{oc}}=1$ мин) частицы серебра осаждаются на поверхность кремния неравномерно, и из рис. 1, б можно увидеть, что образующиеся после травления поры имеют большой разброс по размерам и по форме, а их распределение по поверхности не носит упорядоченный характер.

Увеличение концентрации H_2O_2 приводит к увеличению концентрации инжектируемых в подложку дырок (реакция (1)) и, как следствие, к растравливанию поверхности в окрестности точки нахождения частицы серебра, т. е. к более интенсивному процессу травления. Исследования показали, что увеличение концентрации окислителя ($\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}:\text{HF}=15:80:40$) приводит к изменению морфологии поверхности кремния — от отдельных пор в виде кратеров до развитой пористой структуры (рис. 2) с размерами элементов (пор, островков) порядка 50–200 нм в зависимости от времени осаждения серебра. То есть, изменяя концентрацию окислителя, можно получать различную структуру поверхности кремния.

Для выявления зависимости морфологии полученных структур от концентрации серебра в растворе для осаждения был использован раствор AgNO_3 , молярная концентрация которого была увеличена на порядок и составила 10^{-2} моль/л. В результате более интенсивного процесса осаж-

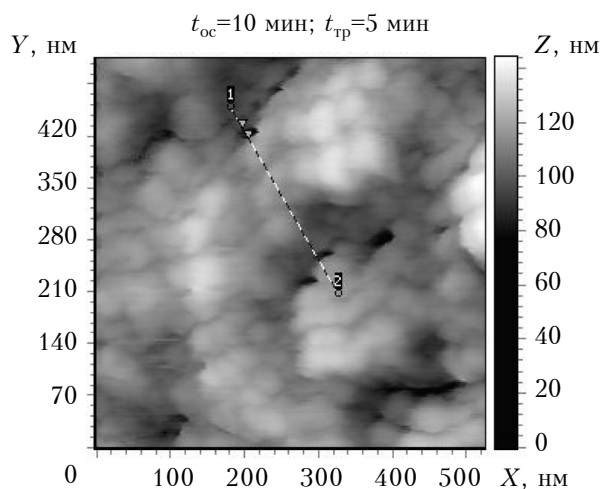


Рис. 2. АСМ-изображение развитой пористой поверхности образца, полученного при увеличении концентрации окислителя в растворе для травления ($C_{\text{mAg}}=10^{-3}$ моль/л; $\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}:\text{HF}=15:80:40$)

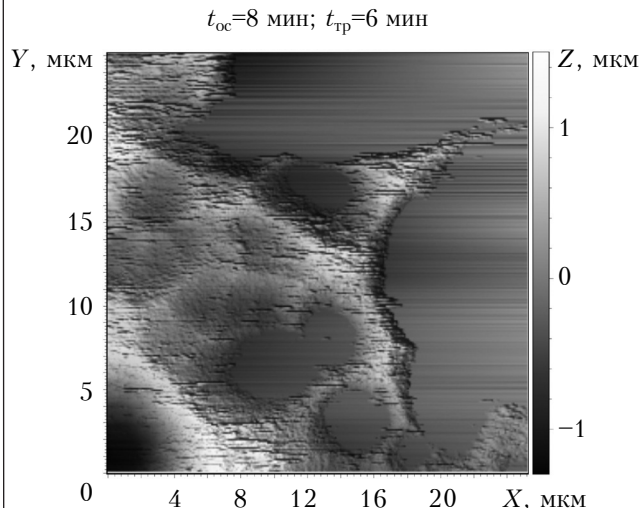


Рис. 3. АСМ-изображение макропористой поверхности образца, полученного при увеличении концентрации серебра в растворе для осаждения ($C_{\text{mAg}}=10^{-2}$ моль/л; $\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}:\text{HF}=10:80:40$)

дения и конденсации частиц серебра больших размеров образовалась макропористая поверхность (рис. 3). Средний размер пор составлял 10–25 мкм. Следует отметить, что методом электрохимического травления подобные структуры не могут быть получены ни при каких условиях, однако именно кремний с макропористой поверхностью может использоваться в качестве материала для производства эффективных оптических датчиков газов [13].

Заключение

Исследования показали, что в зависимости от параметров процессов осаждения частиц серебра и травления кремниевых пластин морфология полученной поверхности может быть различной. Это могут быть и отдельные поры в виде кратеров, и развитая пористая или же макропористая поверхность. Полученные результаты указывают на то, что метод травления MacEtch является перспективным для получения микро- и наноструктур пористого кремния, пригодного для эффективного использования в качестве сенсоров газов и биологических объектов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Bisi O., Ossicini S., Pavesi L. Porous silicon: A quantum sponge structure for silicon based optoelectronics // Surf. Sci. Rep. — 2000. — N 38. — P. 1–126.
2. Pavesi L., Turan R. Silicon nanocrystals. Fundamentals, synthesis and applications. — Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2010.
3. Kilian K. A., Bocking T., Lai Zeo M. H. et al. Organic modification of mesoporous silicon rugate filters: the influence of nanoarchitecture on optical behavior // Int. J. Nanotechnol. — 2008. — Vol. 5, N 2/3. — P. 170–178.
4. Iatsunskyi I., Smyntyna V., Pavlenko N., Sviridova O. Peculiarities of photoluminescence in porous silicon prepared by metal-assisted chemical etching // ISRN Optics. — 2012. — Article ID 958412.

5. Ben-Chorin M., Kux A. Adsorbate effects on photoluminescence and electrical conductivity of porous silicon // Appl. Phys. Lett. — 1994. — N 64. — P. 481–483.

6. Galeazzo E., Peres H. E. M., Santos G. Gas sensitive porous silicon devices: responses to organic vapors // Sens. Actuat. B. — 2003. — N 93. — P. 384–390.

7. Barillaro G., Diligenti A., Nannini A., Strambini L. Low-concentration NO₂ detection with an adsorption porous silicon FET // IEEE Sensors. J. — 2006. — N 6. — P. 19–23.

8. Павленко Н. Н., Яцунский И. Р., Смынтна В. А., Мындрол В. Б. Использование пористого кремния, полученного методом неэлектролитического травления, в сенсорике и микроэлектронике // Тр. 14-й Междунар. науч.-практич. конф. «СИЭТ-2013», Т. 2. — Украина, г. Одесса. — 2013. — С. 214–216.

9. Smyntyna V. A., Iatsunskyi I., Sviridova O., Pavlenko N. Photoluminescence properties of nanostructured silicon fabricated by metal-assisted chemical etching // Frontiers in Optics Conference. — 2012. — OSA Technical Digest (online), paper FTu1A.6.

10. Balasundaram K., Sadhu J. S., Shin J. C. Porosity control in metal-assisted chemical etching of degenerately doped silicon nanowires // Nanotechnology. — 2012. — Vol. 23, N 30. — P. 305304–305311.

11. Harada Y., Li X., Bohn P. W., Nuzzo R. G. Catalytic amplification of the soft lithographic patterning of Si. Nonelectrochemical orthogonal fabrication of photoluminescent porous Si pixel arrays // Journal of the American Chemical Society. — 2001. — Vol. 123, N 36. — P. 8709–8717.

12. Huang Z., Geyer N., Werner P. et al. Metal-assisted chemical etching of silicon: a review // Mendeley. — 2011. — N 23. — P. 285–308.

13. Iatsunskyi I. R., Smyntyna V. A., Pavlenko N. N. Ammonia detection using optical reflectance from porous silicon formed by metal-assisted chemical etching // Proceedings of SPIE “Defense + Security”. Vol. 8901A. — Germany, Dresden. — 2013. — Paper 8901–20.

Дата поступления рукописи
в редакцию 08.07 2013 г.

I. Р. ЯЦУНСЬКИЙ

Україна, Одеський національний університет ім. І. І. Мечникова
E-mail: yatsunskyi@gmail.com

ОТРИМАННЯ ПРИДАТНОГО ДЛЯ СЕНСОРИКИ ПОРИСТОГО КРЕМНІЮ МЕТОДОМ НЕЕЛЕКТРОЛІТИЧНОГО ТРАВЛЕННЯ MacEtch

Для отримання мікро- та наноструктур пористого кремнію пропонується використовувати метод неелектролітичного травлення MacEtch (metal assisted chemical etching). Надано результати дослідження морфології структур, отриманих при різних параметрах процесів осадження і травлення, та показана можливість їх використання як сенсорів газів і біологічних об'єктів.

Ключові слова: пористий кремній, неелектролітичне (хімічне) травлення.

I. R. IATSUNSKYI

Ukraine, I. I. Mechnikov Odessa National University
E-mail: yatsunskyi@gmail.com

OBTAINING POROUS SILICON SUITABLE FOR SENSOR TECHNOLOGY USING MacEtch NONELECTROLYTIC ETCHING

The author suggests to use the etching method MacEtch (metal-assisted chemical etching) for production of micro- and nanostructures of porous silicon. The paper presents research results on the morphology structures obtained at different parameters of deposition and etching processes. The research has shown that, depending on the parameters of deposition of silver particles and silicon wafers etching, the obtained surface morphology may be different. There may be both individual crater-like pores and developed porous or macroporous surface. These results indicate that the MacEtch etching is a promising method for obtaining micro-porous silicon nanostructures suitable for effective use in gas sensors and biological object sensors.

Keywords: porous silicon, nonelectrolytic etching.

REFERENCES

1. Bisi O., Ossicini S., Pavesi L. Porous silicon: A quantum sponge structure for silicon based optoelectronics. *Surface Science Reports*, 2000, no 38, pp. 1-126.

2. Pavesi L., Turan R. Silicon nanocrystals. *Fundamentals, synthesis and applications*. Weinheim, Germany, Wiley-VCH, 2010. DOI: 10.1002/9783527629954.ch1.

3. Kilian K.A., Bocking T., Lai. Organic modification of mesoporous silicon rugate filters: The influence of nanoarchitecture on optical behavior, *Int. J. Nanotechnol.*, 2008, no 5, pp. 170-178. DOI: 10.1504/IJNT.2008.016914.

4. Iatsunskyi I., Smyntyna V., Pavlenko N., Sviridova O. Peculiarities of photoluminescence in porous silicon prepared by metal-assisted chemical etching, *ISRN Optics*, 2012, article ID 958412. DOI: 10.5402/2012/958412

5. Ben-Chorin M., Kux A. Adsorbate effects on photoluminescence and electrical conductivity of porous silicon, *Appl. Phys. Lett.*, 1994, no 64, pp. 481-483. DOI: 10.1063/1.111136

6. Galeazzo E., Peres H.E.M., Santos G. Gas sensitive porous silicon devices: Responses to organic vapors, *Sens. Actuat. B.*, 2003, no 93, pp. 384–390. DOI: 10.1016/S0925-4005(03)00200-4

7. Barillaro G., Diligenti A., Nannini A., Strambini L. Low-concentration NO₂ detection with an adsorption porous silicon FET, *IEEE Sensors. J.*, 2006, no 6, pp. 19-23. DOI: 10.1109/JSEN.2005.859360

8. Pavlenko N. N., Yatsunskyi I. R., Smyntyna V. A., Myndrul V. B., Kanevskaya O. S. [Applying of porous silicon obtained by metal-assisted chemical etching in sensors and microelectronics] *Proc. of the 14th International scientific-practical conference "Modern information and electronic technologies"*, 2013, pp. 214-216. (in Russian)

9. Smyntyna V., Iatsunskyi I., Sviridova O., Pavlenko N. Photoluminescence properties of nanostructured silicon fabricated by metal-assisted chemical etching, *Frontiers in*

Optics Conference, 2012, OSA Technical Digest (online), paper FTu1A.6.

10. Balasundaram K., Sadhu J.S., Shin J.C. Porosity control in metal-assisted chemical etching of degenerately doped silicon nanowires, *Nanotechnology*, 2012, vol. 23, no 30, pp. 305304-305311. DOI: 10.1088/0957-4484/23/30/305304

11. Harada Y., Li X., Bohn P.W., Nuzzo R.G. Catalytic amplification of the soft lithographic patterning of Si. Nonelectrochemical orthogonal fabrication of photoluminescent porous Si pixel arrays, *Journal of the American Chemical Society*, 2001, vol. 123, no 36, pp. 8709-8717.

12. Huang Z., Geyer N., Werner P. et al. Metal-assisted chemical etching of silicon: a review, *Mendeley*, 2011, no 23, pp. 285-308.

13. Iatsunskyi I.R., Smyntyna V.A., Pavlenko N.N. Ammonia detection using optical reflectance from porous silicon formed by metal-assisted chemical etching, *Proceedings of SPIE "Defense + Security"*, vol. 8901A, Germany, Dresden, 2013, paper 8901-20. DOI: 10.1117/12.2028497

РЕЦЕНЗЕНТЫ НОМЕРА

Белявский Евгений Данилович, докт. физ.-мат. наук, профессор, НТУУ «Киевский политехнический институт»

Болтовец Николай Силович, канд. физ.-мат. наук, начальник отдела, НИИ «Орион», г. Киев

Дружинин Анатолий Александрович, докт. техн. наук, профессор, Национальный университет «Львовская политехника»

Костылёв Виталий Петрович, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ, г. Киев

Кудрик Ярослав Ярославович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАНУ, г. Киев

Пелешак Роман Михайлович, докт. физ.-мат. наук, заведующий кафедрой, Дрогобычский государственный педагогический университет им. И.Франко

Петлицкий Александр Николаевич, канд. физ.-мат. наук, начальник лаборатории, Филиал НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ», г. Минск

Пилипенко Владимир Александрович, докт. техн. наук, заместитель директора, Филиал НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ», г. Минск

Цона Александр Иванович, докт. техн. наук, старший научный сотрудник, Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Шинкаренко Владимир Викторович, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ, г. Киев

Dzvonkovskaya A., Dr. Sc., research scientist, Hamburg University of Technology

Kabachiev H., Dr. Habil, professor, Sofia University «St. Kliment Ohridski»

Misiurewicz J., Dr. Sc., Warsaw University of Technology

Pasternak M., professor, Military University of Technology, Warsaw

Pietrasinski J., Ph. D., Head of Remote Sensing Division, Military University of Technology, Warsaw

К статье «Получение двухсторонних высоковольтных эпитаксиальных кремниевых $p-i-n$ -структур методом ЖФЭ»

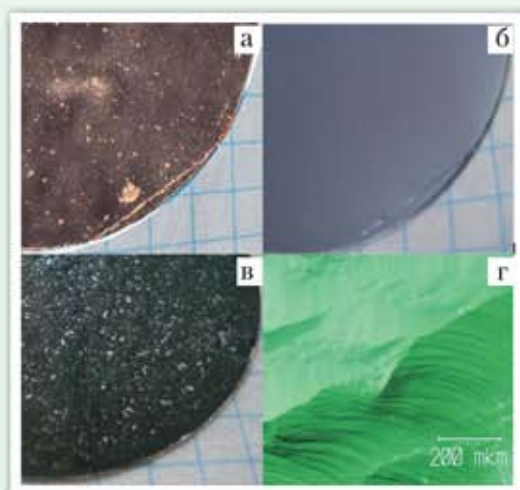


Рис. 2. Макроморфология ($a-e$) и микро-морфология (z) поверхности p -Si-слоев, кристаллизованных в интервалах температуры $740-650^{\circ}\text{C}$ из расплава Ga при различном содержании в нем алюминия (в ат. %):
 $a - 0,25$; $b, z - 0,76$; $e - 1,25$

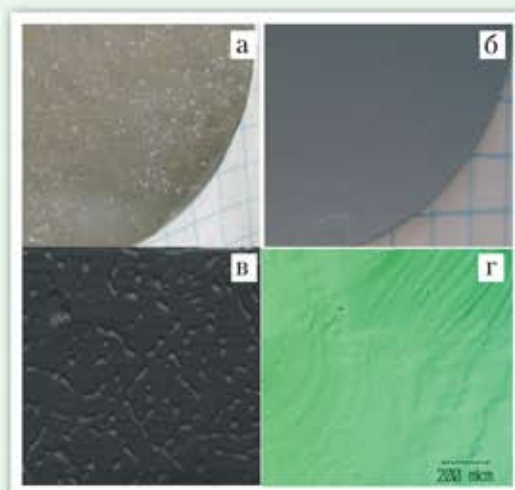


Рис. 4. Макроморфология ($a-e$) и микро-морфология (z) поверхности n -Si-слоев, кристаллизованных в интервале температуры $850-750^{\circ}\text{C}$ из расплава Sn, легированного сурьмой (8,5 ат. %), при различном содержании иттербия (в ат. %):
 $a - 0$; $b, z - 0,07$; $e - 0,18$

К статье
«Subsurface and through-wall
SAR imaging techniques for
ground penetrating radar»

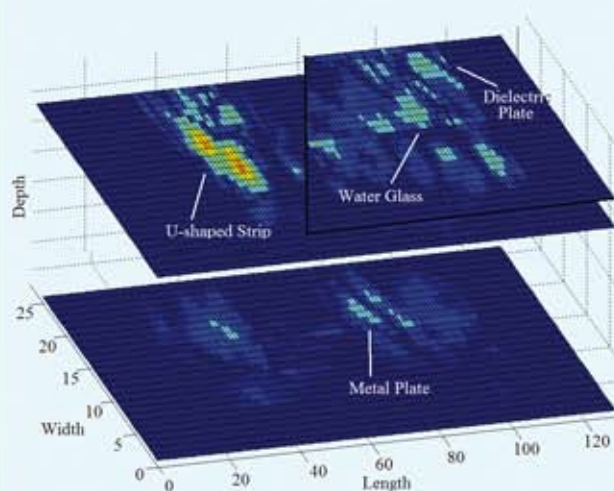


Fig. 6. SAR images for four buried objects

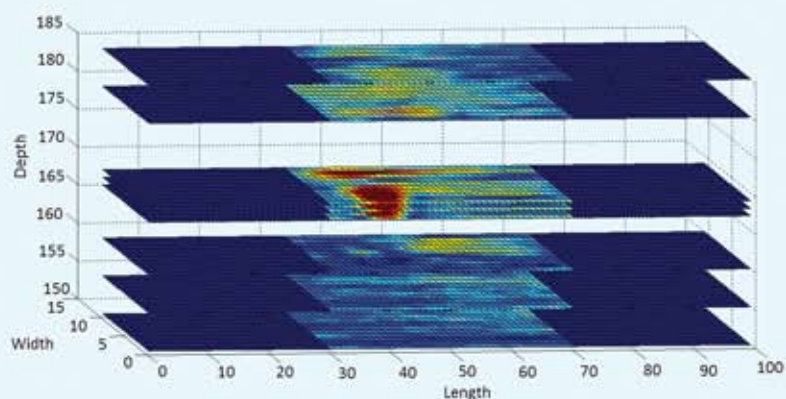


Fig. 8. C-scan slices of TWI SAR images

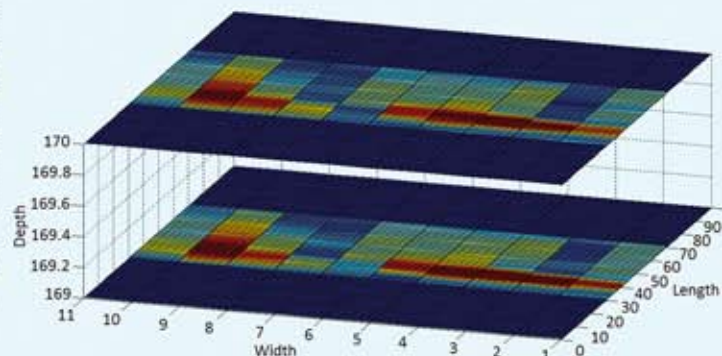


Fig. 9. Slices for the head and the trunk of model



Электрика 2014

X специализированная выставка

26—28 марта 2014 г.

Тематические разделы:

- производство, передача и распределение электроэнергии;
- коммутационные аппараты;
- кабели и провода;
- силовая электроника;
- контрольно-измерительная техника;
- устройства защиты и автоматики;
- освещение;
- электроинсталляция

Выставочный центр: Шувар Экспо
Львов, ул. Хуторивка, 4-б.
+38 (032) 221-00-69

<http://expoua.all.biz/elektrika-2014-x-specializirovannaya-vystavka-expo27080>

**Expo
Lviv**

Организатор: «ЭКСПОЛЬВОВ»
Телефон: +38 (032) 244-18-88

*Номер готовили
Варшава, Тамбург, Днепрпетровск,
Дрогобыч, Киев, Львов, Минск, Одесса,
София, Станбул, Харьков*



Пишите
Подписывайтесь
Читайте