

Интегральная схема СВЧ-модулятора сантиметрового диапазона на слоях поликристаллической алмазной пленки

© В.В. Басанец,¹ Н.С. Болтовец,¹ А.В. Гуцул,¹ А.В. Зоренко,¹ В.Г. Ральченко,² А.Е. Беляев,³
В.П. Кладько,³ Р.В. Конакова,³ Я.Я. Кудрик,³ А.В. Кучук,³ В.В. Миленин³

¹ Научно-исследовательский институт «Орион»,
03680 Киев, Украина

² Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
119991 Москва, Россия

³ Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины,
03028 Киев, Украина
e-mail: konakova@isp.kiev.ua

(Поступило в Редакцию 24 ноября 2011 г. В окончательной редакции 16 апреля 2012 г.)

Представлены экспериментальные результаты измерений параметров микрополосковой коммутирующей сверхвысокочастотной интегральной схемы в диапазоне частот 3–7 GHz на подложке из поликристаллической алмазной пленки толщиной $\sim 100 \mu\text{m}$. Показано, что затухание в экспериментальных модуляторах в открытом состоянии не превышает 1.5 dB, а в закрытом составляет не менее 30 dB. Приведен физико-химический анализ технологии формирования многослойной контактной металлизации к синтетическому алмазу и кремниевому $p-i-n$ -диоду. Показана ее термостойкость до температуры 400°C.

Введение

Теплопроводность и диэлектрические потери в подложках гибридных интегральных схем (ГИС) являются определяющими факторами для обеспечения высоких электрических характеристик и надежной работы сверхвысокочастотных (СВЧ) устройств [1,2]. Для ГИС сантиметрового и миллиметрового диапазонов перспективными являются подложки из синтетического CVD (chemical vapor deposition)-алмаза, в которых теплопроводность достигает 1800–2000 W/mK, а в очищенном от изотопов алмазе может составлять 3300 W/mK [3,4], тангенс угла диэлектрических потерь может быть очень низким (порядка 10^{-5} на частотах до 200 GHz) [5,6].

Имеющиеся технологии выращивания алмазных пленок на кремниевых подложках хорошо вписываются в технологические маршруты изготовления полупроводниковых приборов. Технологии монтажа элементов топологии могут обеспечить реализацию преимуществ синтетического алмаза: минимальные значения диэлектрических потерь в подложке, снижение рабочей температуры $p-i-n$ -диодов при модуляции большой мощности и их стабильность в течение длительного времени [7].

Однако до настоящего времени экспериментальные данные, характеризующие технологические и функциональные параметры элементов СВЧ-интегральных схем на толстых ($\sim 100 \mu\text{m}$) слоях синтетического алмаза, отсутствуют. В настоящей работе представлены результаты физико-химического анализа технологии формирования элементов топологии на слоях синтетического алмаза, а также экспериментально достигнутых параметров модулятора в диапазоне частот 3–7 GHz.

1. Образцы и методы исследования

Исследовались два типа образцов: интегральная СВЧ-схема, изготовленная по технологии, описанной в работе [7], и тестовые структуры, предназначенные для физико-химического анализа слоев металлизации на СВЧ-элементах ($p-i-n$ -диоды и линии передач на слоях синтетического алмаза). Алмазные покрытия толщиной 100–140 μm были выращены в Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН на кремниевых подложках методом химического осаждения из газовой фазы (chemical vapor deposition — CVD) при использовании СВЧ-плазмы для разложения реагентов CH_4 и H_2 [8].

СВЧ-интегральная схема на подложке из поликристаллической пленки алмаза толщиной $\sim 100 \mu\text{m}$ была смонтирована в измерительный модуль. При установке интегральной микросхемы на алмазную пленку путем пайки выполнены соединения соответствующих контактных площадок с разъемами для ввода и вывода СВЧ-сигнала. Между контактными площадками для подведения питания/управления и платой разветвления низкочастотного (НЧ) сигнала смонтированы дискретные индуктивности и емкости, предназначенные для фильтрации СВЧ- и НЧ-сигналов, а также резисторы для ограничения тока. Монтаж переключающих $p-i-n$ -диодов с балочными выводами выполнен методом термокомпрессионной сварки.

Кремниевые $p-i-n$ -диоды с балочными выводами изготавливались по технологии, описанной в [9]. При этом приповерхностные слои p -Si были легированы бором до $\sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ для формирования p^+ -типа и фосфором до $1.8 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ для формирования n^+ -типа Si. Омические контакты создавались именно к этим слоям Si. Параметры $p-i-n$ -диодов после монтажа в СВЧ-

интегральную схему обеспечивали постоянное обратное напряжение не менее 120 V при токе 0.1 μA и прямое сопротивление не более 1.1 Ohm при токе 10 mA.

Измерялись коэффициенты пропускания и затухания СВЧ-модулятора при нескольких значениях прямого тока через *p-i-n*-диоды (режим „открыто“) и обратного смещения (режим „закрыто“) [10]. Измерения проводились на панорамном измерителе коэффициента стоячей волны и затухания P2-107.

На тестовых *p-i-n*-структурах размером 1 × 1 cm² методом электронной оже-спектроскопии в сочетании с ионным травлением (ионы Ag⁺, энергия 1 keV) на оже-спектрометре LAS-2000 измерялись профили распределения компонентов металлизации Pd (30 nm)–Ti (50 nm)–Au (120 nm), одинаковой для *p*⁺- и *n*⁺-слоев *p-i-n*-диода, созданной методом вакуумного напыления металлов на подогретую до 330 °C подложку. Металлизация на алмазе создавалась послойным вакуумным напылением Ti (50 nm)–Pd (100 nm)–Au (150 nm) на подогретую до 400 °C подложку. Фазовый состав металлизации как на *p-i-n*-структурах, так и на синтетическом алмазе исследовался (*ex-situ*) методом высоко разрешающей рентгеновской дифракции (ВРРД) на рентгеновском дифрактометре Philips X’Pert-MPD (CuK_α, λ = 0.15418 nm) в геометрии Брэгга–Брентано. Для проверки термической стабильности металлизации к *p-i-n*-структурам и синтетическому алмазу проводилась термообработка (ТО) при T = 450 °C (10 min в вакууме).

2. Физико-химический анализ технологии формирования элементов топологии на слоях синтетического алмаза

Металлизация *p-i-n*-структуры. Как известно, Pd при напылении на подогретую подложку Si или в результате последующего отжига формирует омический контакт, практически одинаковый по своим параметрам как к *n*-, так и к *p*-типу кремния [11,12]. В нашем случае омический контакт с удельным контактным сопротивлением ~ 10⁻⁶ Ohm · cm² был получен в процессе напыления Pd и оказался одинаковым к *p*⁺ и *n*⁺-слоям кремния. Физико-химические свойства металлизации таких контактов также оказались практически одинаковыми. Поэтому их анализ авторы представили только на примере контакта к *n*⁺-Si. Из приведенных на рис. 1, *a* профилей распределения компонентов в исходном образце видно, что силицидная фаза палладия формируется уже в процессе напыления пленки Pd, а пленка титана содержит в своем составе кислород, что обусловлено геттерными свойствами титана. Наряду с кислородом в пленке титана наблюдается также углерод до 10%. Пленка золота имеет небольшую область размытия на границе раздела с титаном, обогащенную кислородом и углеродом. Температура обработки при T = 450 °C в течение 10 min (рис. 1, *b*), имитирующая температурную

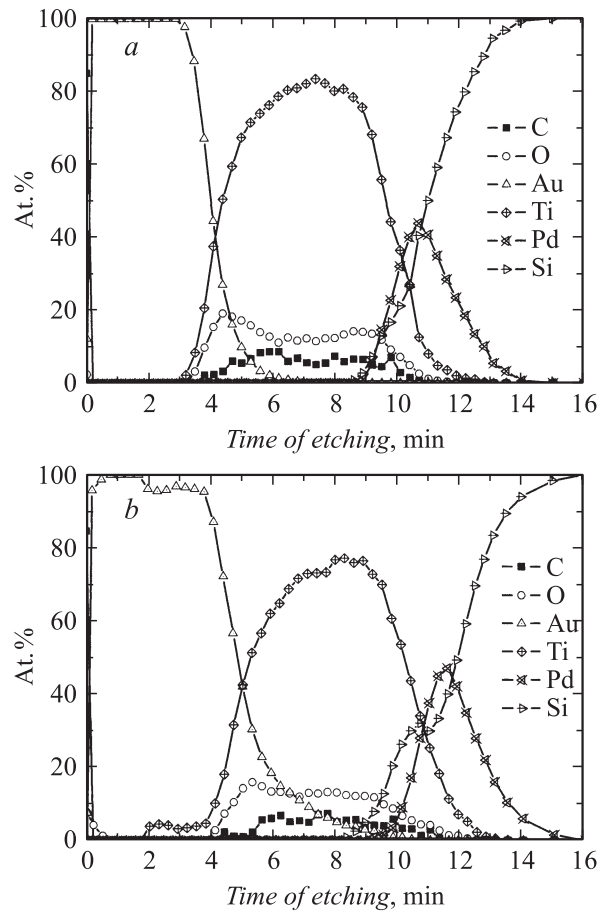


Рис. 1. Профили распределения компонентов в контактной металлизации Au–Ti–Pd–*n*⁺–Si: *a* — исходный образец; *b* — после термообработки при 450 °C, 10 min.

перегрузку *p-i-n*-диода, приводит к интенсификации или завершению процесса силицидообразования на границе раздела с кремнием и массопереносу во всех слоях металлизации. При этом на профиле распределения кремния появляется ступенька и отмечается проникновение титана практически на половину толщины пленки золота и массоперенос золота вплоть до границы раздела с кремнием.

Фазовый состав контактной металлизации Au–Ti–Pd–*n*⁺–Si исходного и прошедшего ТО при T = 450 °C в течение 10 min представлен на рис. 2, из которого видно, что единственной фазой, образовавшейся при напылении Pd на подогретую подложку Si и сохраняющейся после ТО, является Pd₂Si, которая и формирует омический контакт [13]. Наряду с рефлексами Pd₂Si (111; 002; 310) в исходных и прошедших ТО-образцах, наблюдаются рефлексы от Si (111) и пленки Au (111; 200; 220; 311), но отсутствуют рефлексы от пленки Ti. Последнее, по-видимому, связано с так называемым рентгеноаморфным состоянием титана, обладающим металлической проводимостью, о чем свидетельствует не увеличившаяся в процессе ТО величина удельного контактного сопротивления.

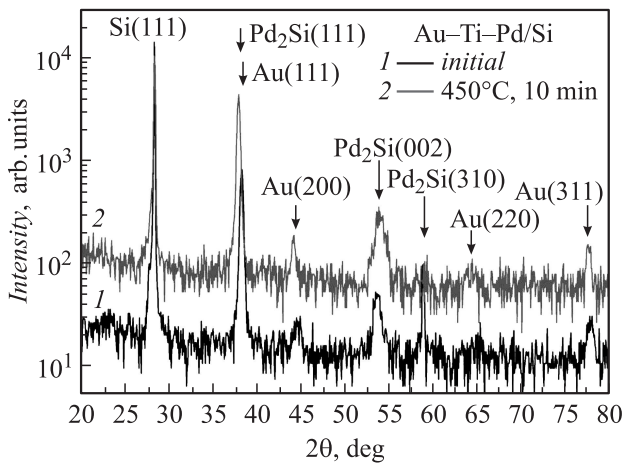


Рис. 2. Рентгенодифрактограммы структур Au-Ti-Pd- n^+ -Si: 1 — исходный образец; 2 — после термообработки при 450°C, 10 min.

Металлизация синтетического алмаза. Распределение компонентов в металлизации к синтетическому алмазу представлено на рис. 3, *a, b*, из которого видно, что исходный образец (рис. 3, *a*) обладает слоевой структурой металлизации. В пленке Ti, как и в контакте к n^+ (p^+)-Si, отмечается наличие кислорода и углерода. Термообработка в течении 10 min при $T = 400^\circ\text{C}$ существенно не изменяет слоевую структуру контактной металлизации. ТО при $T = 450^\circ\text{C}$ в течение 10 min (рис. 3, *b*) приводит к интенсивному массопереносу титана в пленку Pd и выходу Pd на поверхность пленки Au, в то время как граница раздела пленки Ti с алмазом существенных изменений не претерпевает. Изменения в профилях распределения Au, Ti и Pd указывают на возможность формирования твердого раствора, состоящего из этих компонентов.

Данные по ВРРД для металлизации к алмазу до и после ТО приведены на рис. 4. В спектрах ВРРД исходного контакта Au-Pd-Ti-C-Si (кривая 1) наблюдаются следующие рефлексы: Si (400), C (111; 220), Au (111; 200), Pd (111; 200), Ti (100; 002; 101). Семейство рефлексов от металлизации свидетельствует о поликристаллической структуре отдельных слоев металлов Au, Pd и Ti. Как видно, в спектре ВРРД отожженного при 400°C контакта Au-Ti-Pd-C-Si (кривая 2) кроме рефлексов от кремния и алмаза наблюдаются еще два максимума при ~ 39 и $\sim 46^\circ\text{C}$. Соответствующий им параметр решетки, который больше, чем у объемного кубического Pd, и меньше, чем у объемного кубического Au, свидетельствует об образовании твердого раствора, который состоит из Au, Ti и Pd. Несимметричность этих двух максимумов (наплывы с двух сторон) свидетельствует о наличии малой доли чистых фаз Au, Ti, и Pd и указывает на незавершенность процесса фазообразования. Наблюдаемая несимметричность этих максимумов исчезает при температурной обработке при 450°C (кривая 3), что, по-видимому, связано с более интенсивной взаимодиффузией атомов по границам зерен и образованием твердого раствора $\text{Au}_x(\text{Ti,Pd})_{1-x}$.

Из рис. 4 видно также, что пленка поликристаллического алмаза не претерпевает структурных изменений вследствие ТО. Неизменность положения дифракцион-

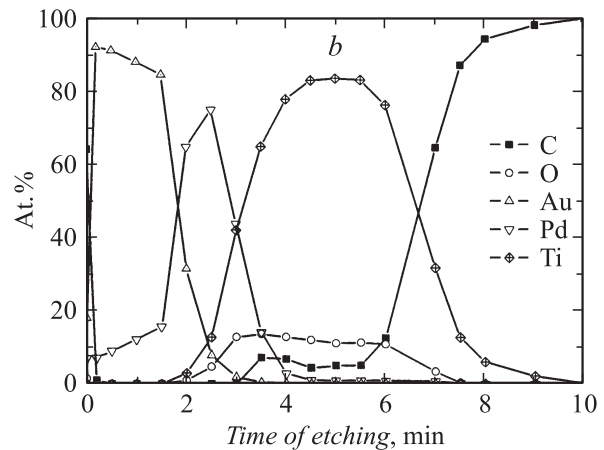
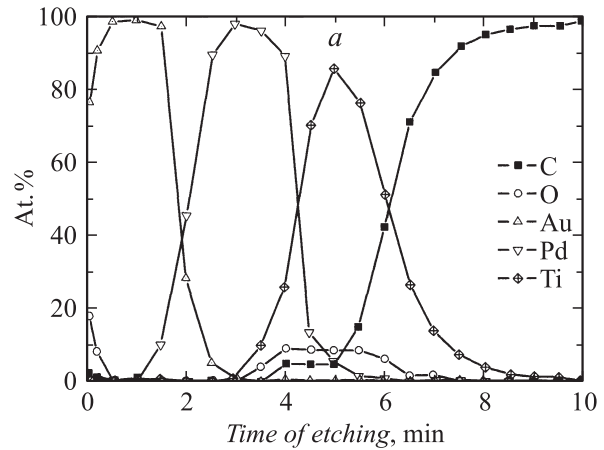


Рис. 3. Профили распределения компонентов в контактной металлизации Au-Pd-Ti-C: *a* — исходный образец; *b* — после термообработки при 450°C, 10 min.

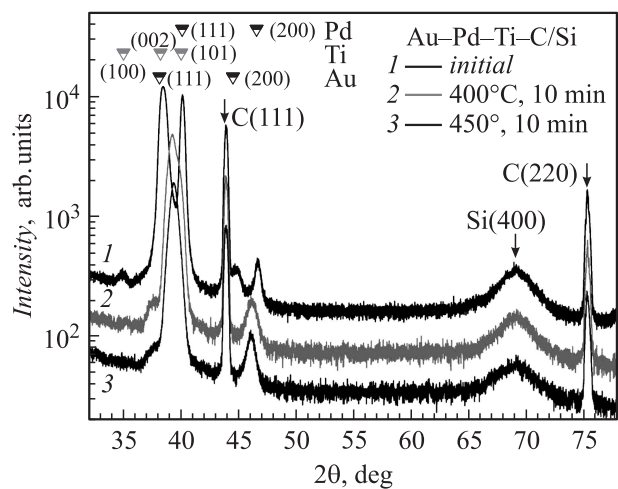


Рис. 4. Рентгенодифрактограммы структур Au-Pd-Ti-C-Si: 1 — исходный образец; 2 — после термообработки при 400°C, 10 min; 3 — после термообработки при 450°C, 10 min.

Коэффициент затухания/пропускания СВЧ модулятора на разных частотах и в разных режимах питания при прямом/обратном смещении *p-i-n*-диодов

Частота <i>f</i> , GHz	Коэффициент затухания (пропускания) <i>L</i> , dB		
	Прямое смещение <i>p-i-n</i> -диодов, ток смещения:	Обратное смещение <i>p-i-n</i> -диодов, напряжение смещения:	
		<i>I</i> = 30 mA	<i>U</i> = 0 V
3.0	-1.5	-28	-32
4.0	-1.0	-29	-33
5.0	-0.5	-28	-32
6.0	-0.4	-26	-30
7.0	-0.3	-25	-30

ных пиков и их полуширины свидетельствует о постоянстве решетки (отсутствие значительных внутренних механических напряжений) и областей когерентного рассеяния (~ 25 nm) кристаллитов алмаза соответственно.

Из приведенных результатов физико-химического анализа контактной металлизации видно, что для сохранения слоевой структуры контактной металлизации при температуре, превышающей 400°C, и замедления массопереноса Pd в контакте Au-Pd-Ti-C и Ti в контакте Au-Ti-Pd-n⁺-Si между пленкой Au и контактообразующим металлом необходимо создавать более эффективный диффузионный барьер. Наиболее перспективными являются диффузионные барьеры на основе термостабильных фаз внедрения боридов и нитридов тугоплавких металлов [11,14].

Отметим также, что системы металлизации к *p-i-n*-диоду и синтетическому алмазу подвергались ТО при *T* = 400°C в течение 5 min, что имитировало режимы микросварки и бесфлюсовой пайки. Оказалось, что элементный состав обеих систем металлизации после ТО не изменялся.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Топология микрополосковой коммутирующей СВЧ ГИС, приведенная на рис. 5, спроектирована так, чтобы иметь возможность подведения напряжения управления к *p-i-n*-диодам; предусмотрено включение диодов навстречу друг другу. При таком соединении оказывается возможным присоединение отрезков микрополосковой линии через один к заземленному проводнику и к источнику питания, что реализуется с помощью индуктивностей, которые не влияют на прохождение СВЧ-сигнала через коммутирующую микросхему, но обеспечивают протекание низкочастотных токов смещения через *p-i-n*-диоды.

На краях микросхемы изготовлены контактные площадки для подведения напряжения управления, а также для монтажа конденсаторов фильтров. Контактные площадки имеют квадратную форму и размер 1.5 × 1.5 mm,

что достаточно для монтажа всех необходимых элементов.

Результаты измерений параметров модулятора (рис. 6) представлены в таблице, из данных которой видно, что в открытом состоянии, при прямом суммарном токе через три диода, равном 30 mA, потери модуля в диапазоне частот 3–7 GHz не превышают 1.5 dB, а в диапазоне частот 5–7 GHz — 0.5 dB. В закрытом состоянии (обратное напряжение смещения 10 V) затухание составляет не меньше 30 dB. Сравнение полученных нами параметров модулятора с известными образцами такого типа показало, что величина потерь модулятора в открытом и затухание в закрытом состоянии не хуже серийно выпускаемого модулятора на подложке GaAs HMC346G8 (Hittite Microwave Corporation) [15]. Потери пропускания модулятора HMC346G8 2 dB, затухание 30 dB, рабочая частота от 0.1 до 8 GHz, диапазон рабочих температур — 40–85°C. Однако модулятор на подложке из синтетического алмаза может работать при значительно более

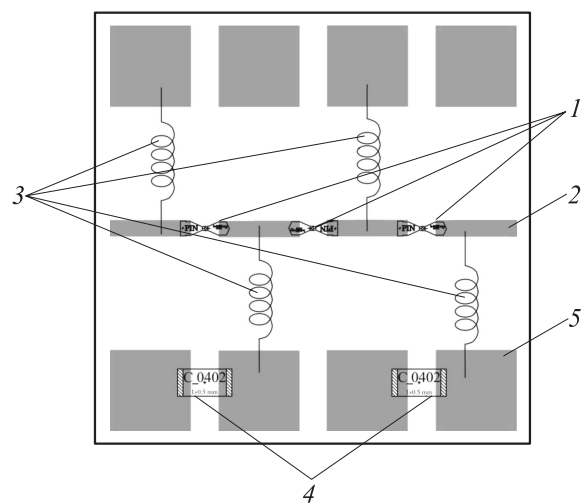


Рис. 5. Топология микрополосковой коммутирующей СВЧ интегральной схемы на подложке из синтетического алмаза: 1 — переключаемые кремниевые *p-i-n*-диоды, 2 — микрополосковая линия передач (*Z_w* = 50 Ohm), 3 — индуктивные элементы, 4 — конденсаторы, 5 — подложка из синтетического алмаза.

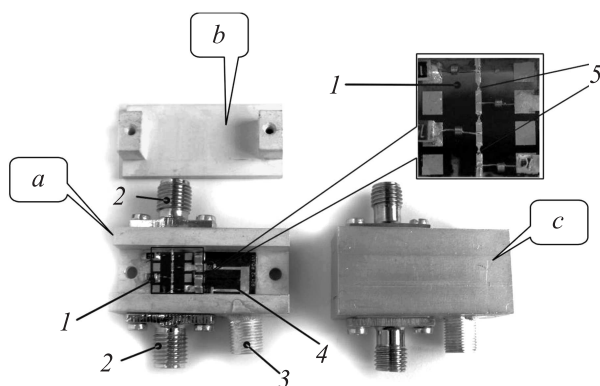


Рис. 6. Образцы двух СВЧ интегральных схем на алмазной подложке, смонтированные в измерительные модули: измерительный модуль с СВЧ интегральной схемой (а), крышка (b); измерительный модуль с СВЧ интегральной схемой в собранном состоянии (с). 1 — СВЧ интегральная схема на алмазной подложке в виде микрочипа, 2 — вход и выход СВЧ сигнала, 3 — вход сигнала управления $p-i-n$ -диодами, 4 — плата питания $p-i-n$ -диодов, 5 — кремниевые $p-i-n$ -диоды, вмонтированные в СВЧ интегральную схему.

высоких температурах окружающей среды, чем серийно выпускаемые, на это указывают как рекордно высокая теплопроводность алмаза, так и проведенные нами имитационные термообработки металлизированных образцов поликристаллического алмаза, описанные в разд. 2, свидетельствующие о термостойкости металлизации и пленки алмаза.

В целом, полученные результаты показали, что на малоразмерных слоях синтетического алмаза можно изготавливать СВЧ-модуляторы сантиметрового диапазона длин волн на $p-i-n$ -диодах с параметрами, приемлемыми для практического применения. Такие модуляторы могут представлять значительный интерес для коммутации повышенных уровней СВЧ-мощности благодаря высокой теплопроводности алмазной пленки и возможности создания промышленной технологии их изготовления.

Выводы

1. Исследования систем металлизации Ti-Pd-Au на алмазной подложке и Pd-Ti-Au к кремниевому $p-i-n$ -диоду показали высокую термическую стабильность, необходимую для выполнения на них техпроцессов микросварки и бесфлюсовой пайки при температурах до 400°C.

2. Затухание в экспериментальных модуляторах в диапазоне частот 3–7 GHz в открытом состоянии не превышает 1.5 dB, в закрытом состоянии составляет не менее 30 dB, что свидетельствует о возможности создания таких приборов на малоразмерных слоях синтетического алмаза.

Список литературы

- [1] Молчанов В.И., Поплавко Ю.М. Основы микроволновой электроники. Киев: НТУУ „КПИ“, 2010. 352 с.
- [2] Liao Samuel Y. Microwave Devices and Circuits. Prentice-Hall. Inc. Singapore, 1997. 542 p.
- [3] Sukhadolau A.V., Ivakin E.V., Ralchenko V.G., Khomich A.V., Vlasov A.V., Popovich A.F. // Diamond and Related Materials. 2005. V. 14. № 3–7. P. 589–593.
- [4] Olson J.R., Pohl R.O., Vandersande J.W., Zoltan A., Anthony T.R., Banholzer W.F. // Phys. Rev. B. 1993. V. 47. № 12. P. 14 850–14 856.
- [5] Гарин Б.М., Копнин А.Н., Паршин В.В., Ральченко В.Г., Чигряй Е.Е., Конов В.И., Мазур А.Б., Пархоменко М.П. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. № 7–8. С. 85–89.
- [6] Element six. Inc. www.cvd-diamond.com.
- [7] Болтовец Н.С., Беляев А.Е., Конакова Р.В., Коростинская Т.В., Кривуца В.А., Литвин О.С., Миленин В.В., Большаков А.П., Ральченко В.Г. // Техника и приборы СВЧ. 2009. № 2. С. 26–30.
- [8] Ральченко В.Г., Савельев А.В., Попович А.Ф., Власов И.И., Воронина С.В., Ашкинази Е.Е. // Микроэлектроника. 2006. Т. 35. № 4. С. 243–248.
- [9] Болтовец Н.С., Басанец В.В., Голынная Т.И., Кривуца В.А., Суворова Л.М., Лычман К.А. // Техника и приборы СВЧ. 2008. № 2. С. 34–36.
- [10] Ishi Thomas Koryu. Handbook of Microwave Technology: Components and Devices. Academic Press. NY., 1995. 691 p.
- [11] Громов Д.Г., Мочалов А.И., Сулимин А.Д., Шевяков В.И. Металлизация ультрабольшин интегральных схем. М.: Бинном, 2011. 277 с.
- [12] Murarka S.P. Silicides for VLSI Applications. Academ. Press. San Diego, 1983. 200 p.
- [13] Беляев А.Е., Басанец В.В., Болтовец Н.С., Зоренко А.В., Капитанчук Л.М., Кладько В.П., Конакова Р.В., Колесник Н.В., Коростинская Т.В., Крицкая Т.В., Кудрик Я.Я., Кучук А.В., Миленин В.В., Атаубаева А.Б. // ФТП. 2011. Т. 45. № 2. С. 256–262.
- [14] Азеев О.А., Беляев А.Е., Болтовец Н.С., Конакова Р.В., Миленин В.В., Пилипенко В.А. Фазы внедрения в технологии полупроводниковых приборов и СБИС / Под общей редакцией д.т.н. проф. Р.В. Конаковой. Харьков: НТК „Институт монокристаллов“, 2008. 392 с.