

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 TiV_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 удается. 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: подлегирующий, 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 TiV_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:

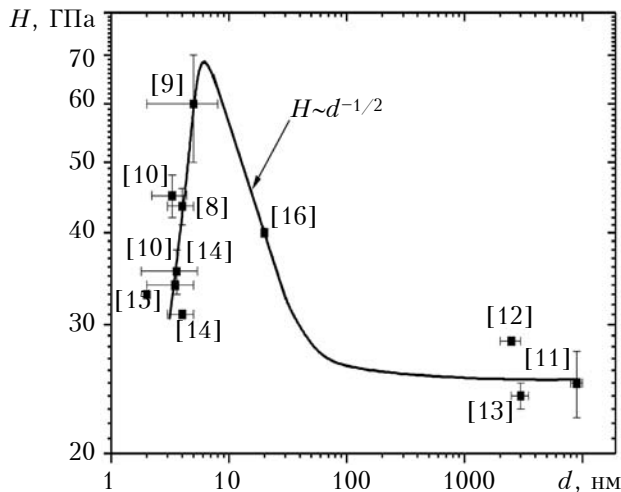


Рис. 1. Зависимость микротвердости слоя TiB_2 от размера зерна (по данным из источников, указанных на рисунке)

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.

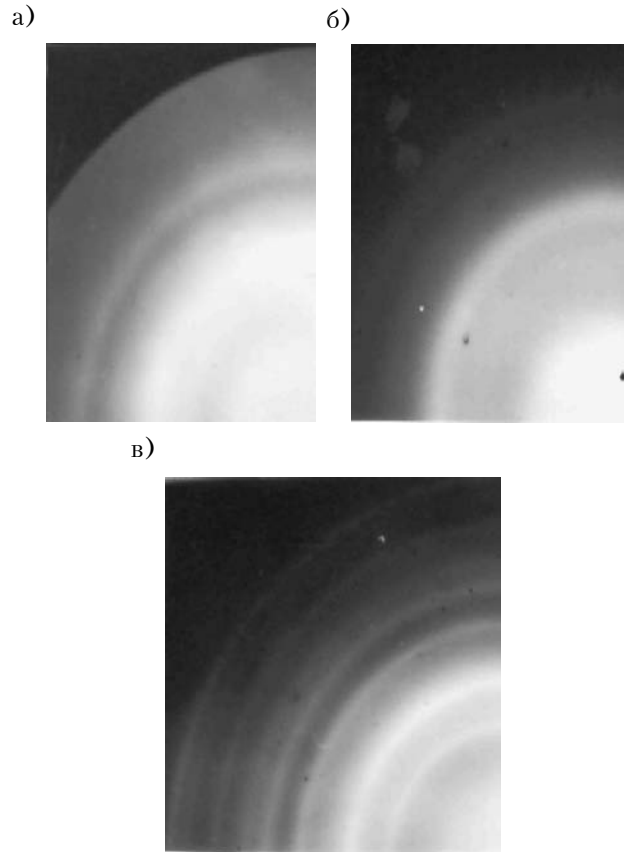


Рис. 2. Электронограммы пленок TiB_x , полученных при различных значениях тока распыления [19]: а — 0,2 А; б — 0,4 А; в — 1 А

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, а), видны сильно размытые рефлекссы 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, б) 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, в) структура слоя становится более кристаллической, хотя остается сильнодисперсной (размеры кристаллических областей в аморфной фазе превышают 5 нм). Электронограмма фиксирует рефлекссы 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.

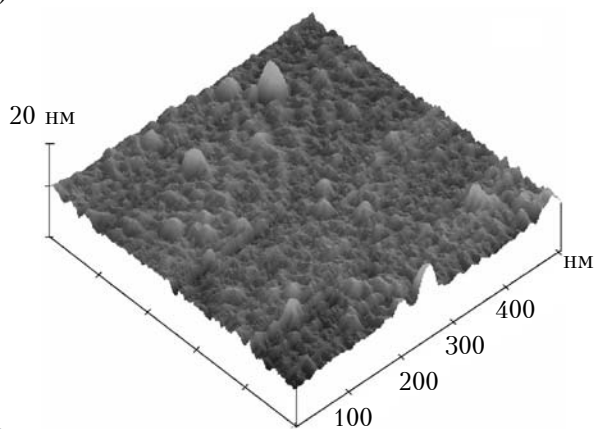
**Контакты к 6H-SiC.
Термическая стойкость**

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

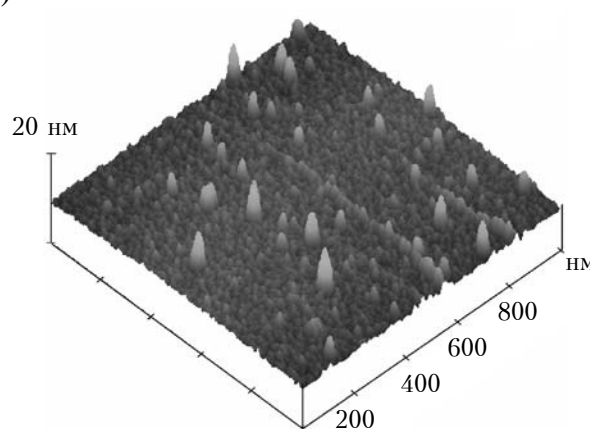
При исследованиях морфологии поверхности, конечно же, нельзя определить точный размер упорядоченных областей, однако если предпо-

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.

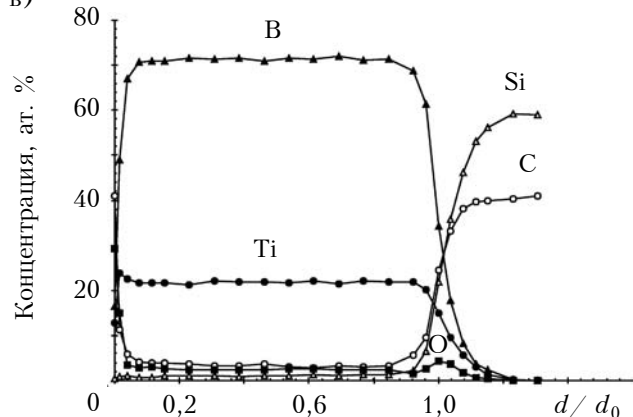
а)



б)



в)



г)

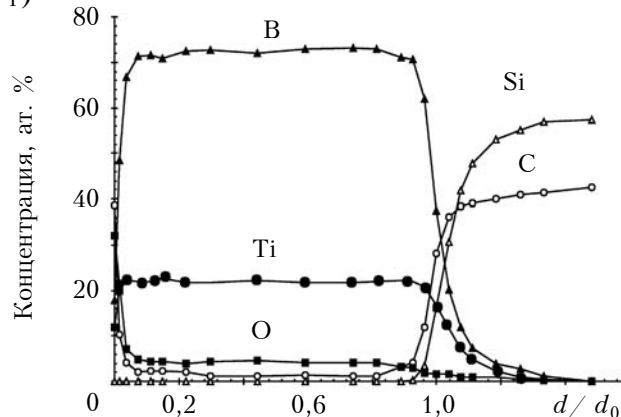


Рис. 3. Морфология поверхности в контакте TiB_x-n-SiC 6H (а, б) и профили атомного состава по глубине контактной металлизации (в, г) до отжига (а, в) и после БТО при 1000°C (б, г) [21]

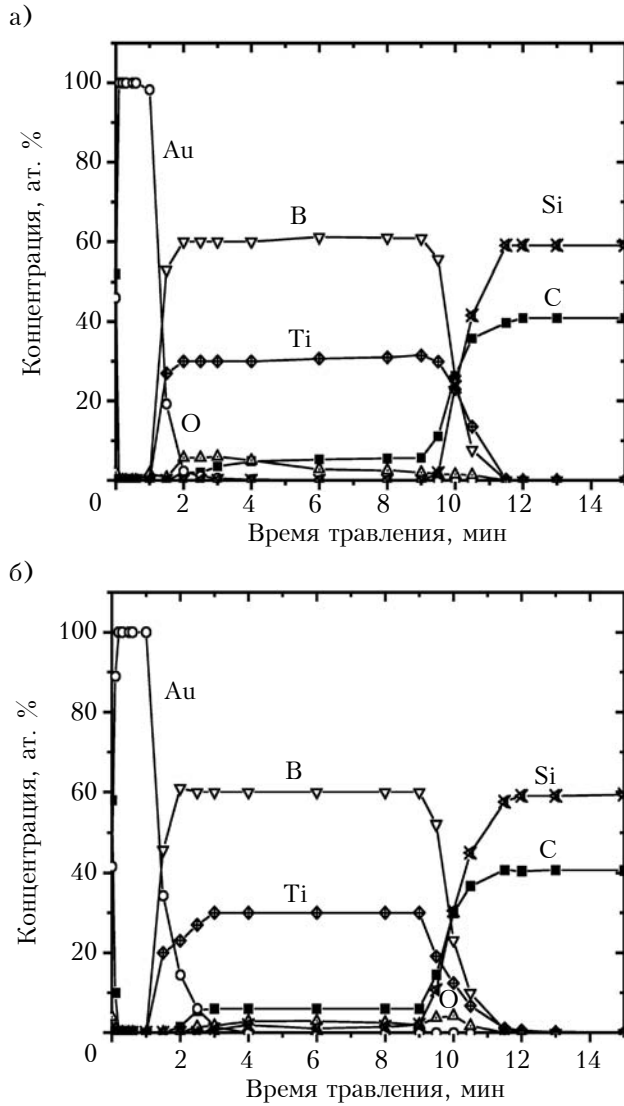


Рис. 4. Профили атомного состава по глубине контактной металлизации в контакте Au-TiB_x-n-SiC 6H до отжига (а) и после БТО при 1000°С (б) [22]

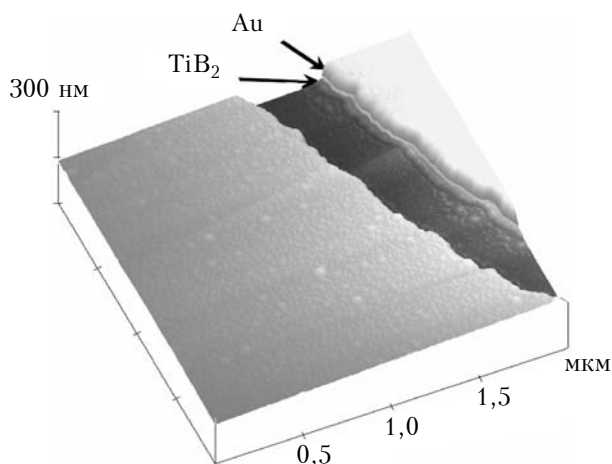


Рис. 5. Морфология поверхности структуры Au-TiB_x-n-SiC 6H с поликристаллическим слоем TiB_x после БТО при 1000 °С

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 низкобарьерных диодов Шоттки на основе таких контактов [23] не изменились после БТО при 1000°С 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°С [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°С, 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°С. 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.

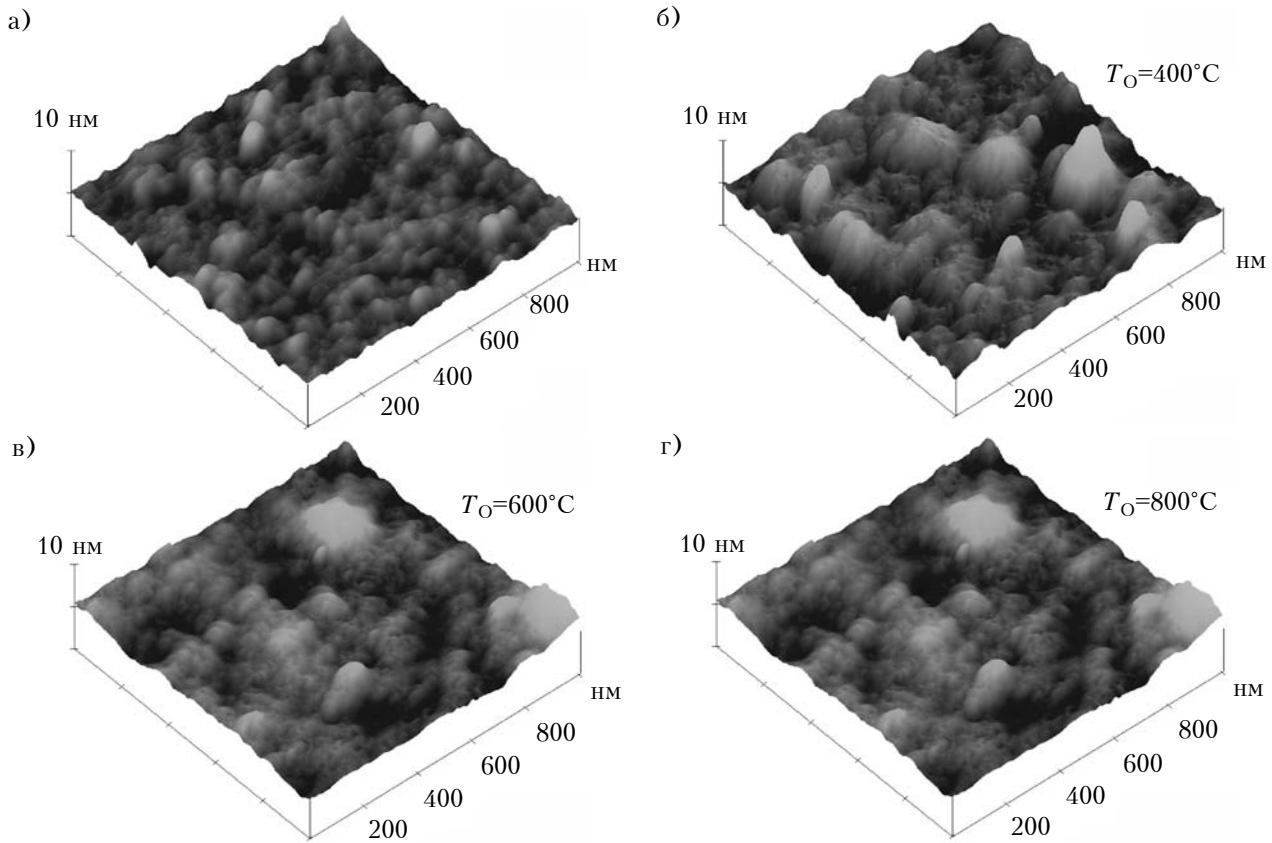


Рис. 6. Морфология поверхности структуры TiB_x-GaP до отжига (а) и после БТО при разной температуре (б, в, г) [4]

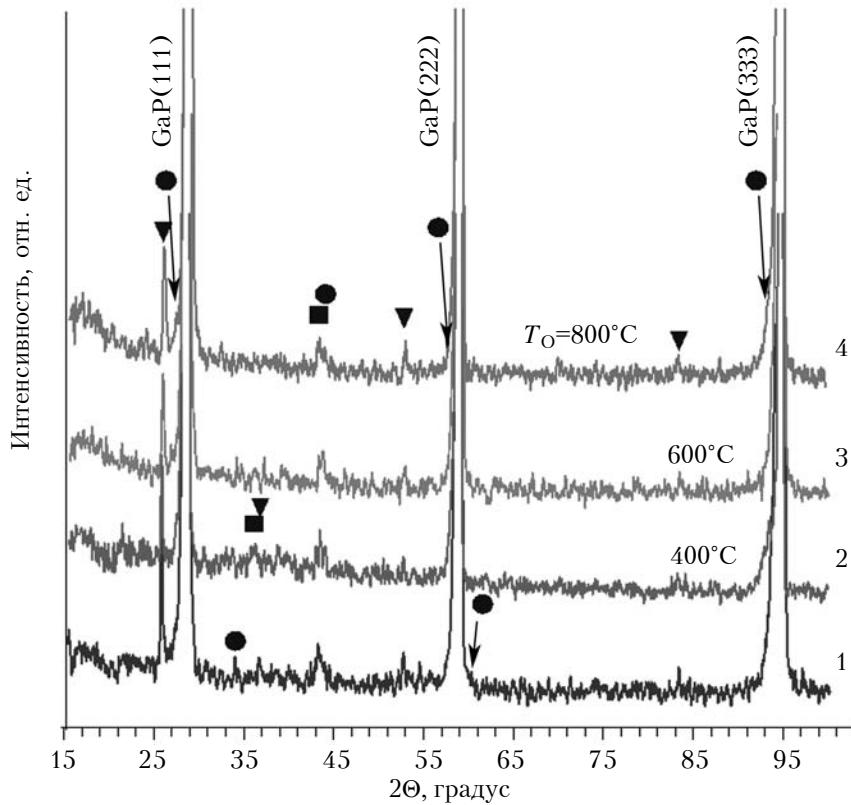


Рис. 7. Рентгенодифрактограммы барьерного контакта TiB_x-GaP до отжига (1) и после БТО при разной температуре (2–4) [21] (■ TiB , ● TiB_2 , ▼ TiO_2)

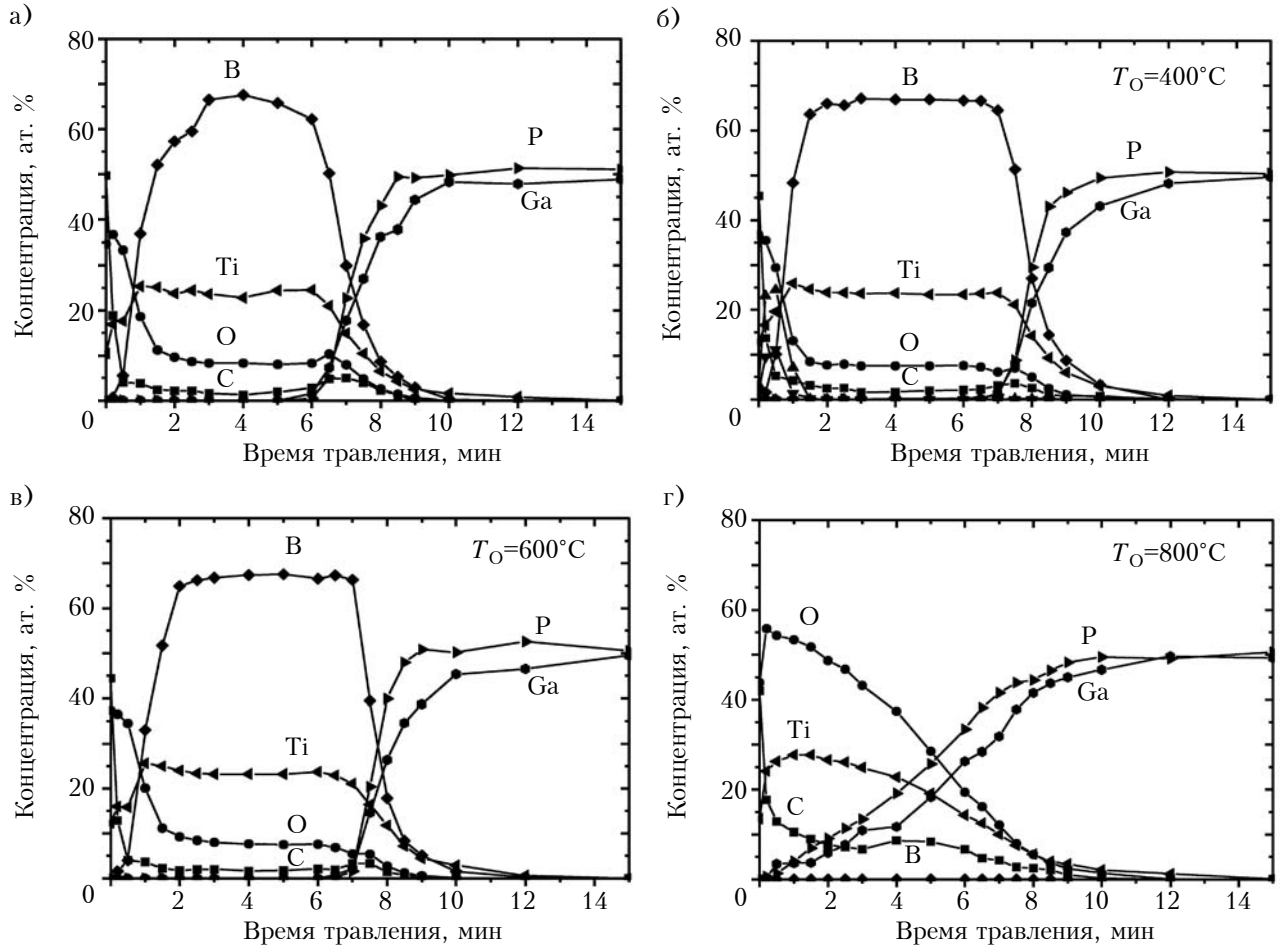


Рис. 8. Профили атомного состава по глубине контактной металлизации в контакте TiB_x-GaP до отжига (а) и после БТО при разной температуре (б, в, г) [4]

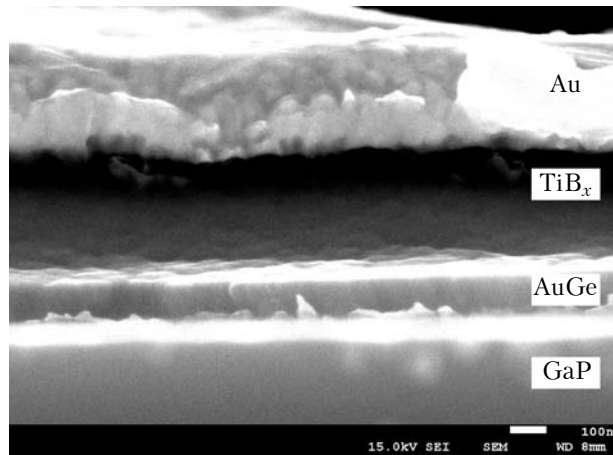


Рис. 9. Морфология скола контакта Au-TiB_x-Au-Ge-GaP

Кроме барьерных, были исследованы омические контакты Au-TiB_x-Au-Ge-GaP, в которых в качестве контактообразующего слоя применяется AuGe-металлизация, широко используемая для омических контактов к некоторым полупроводниковым соединениям A³B⁵ [4, 6].

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

Как оказалось, в антидиффузионных пленках контактов Au-TiB_x-Au-Ge-GaP количество кислорода было еще выше, соответственно, понизилась максимальная температура БТО, ко-

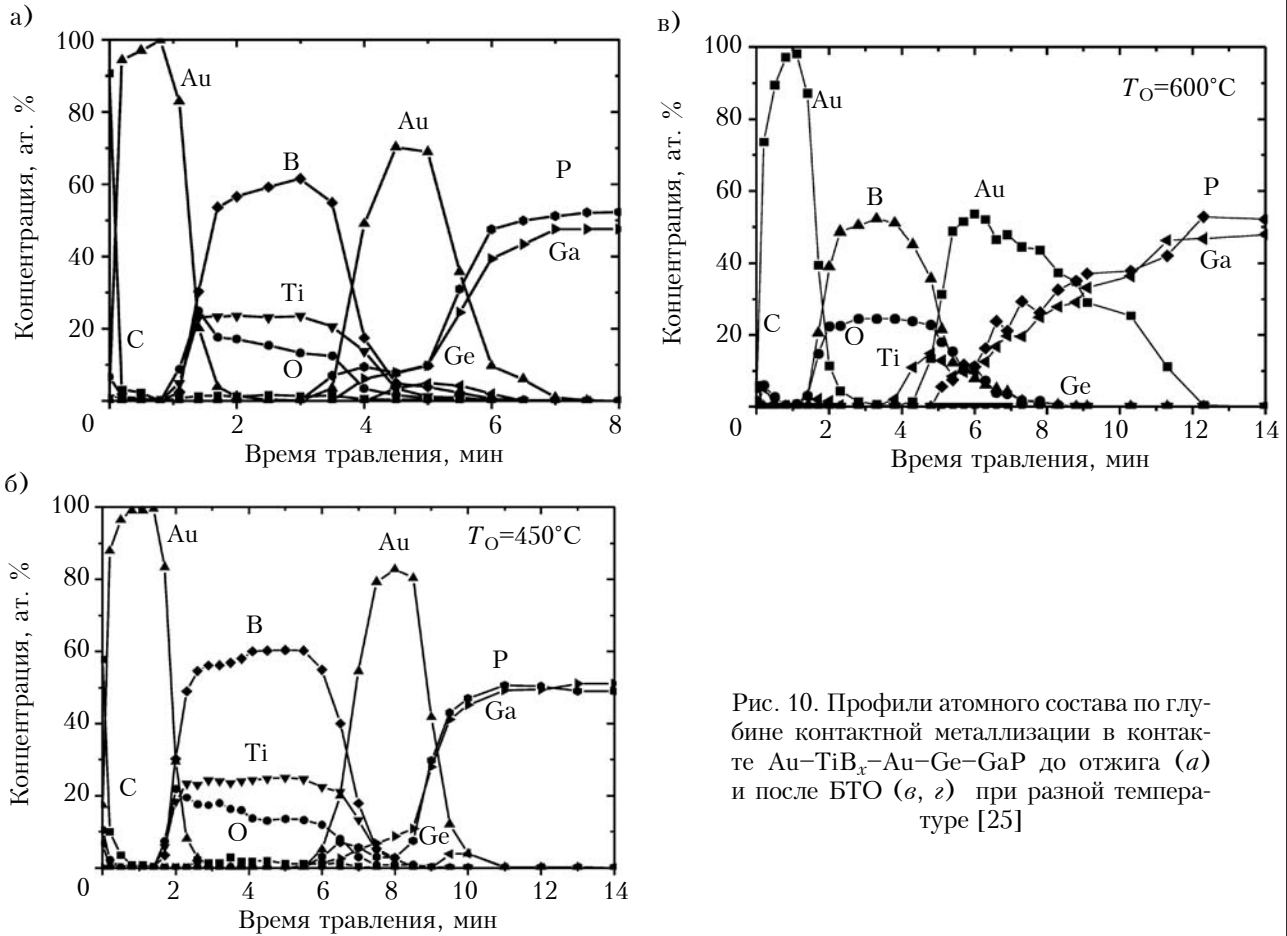


Рис. 10. Профили атомного состава по глубине контактной металлизации в контакте Au-TiB_x-Au-Ge-GaP до отжига (а) и после БТО (б, в) при разной температуре [25]

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-GaP примерно 10^{17} см⁻³ [25].

Контакты к InP. Эффект Киркендалла

При отжиге контакта TiB_x-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 AuIn₂, 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

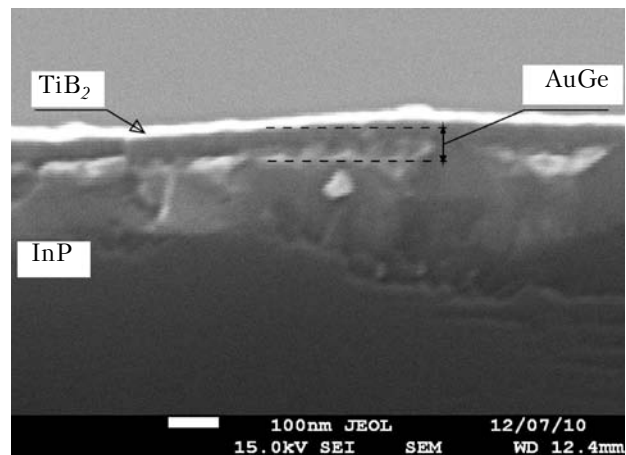


Рис. 11. Морфология скола и поверхности контакта TiB_x-Ge-Au-InP после БТО при 490°C

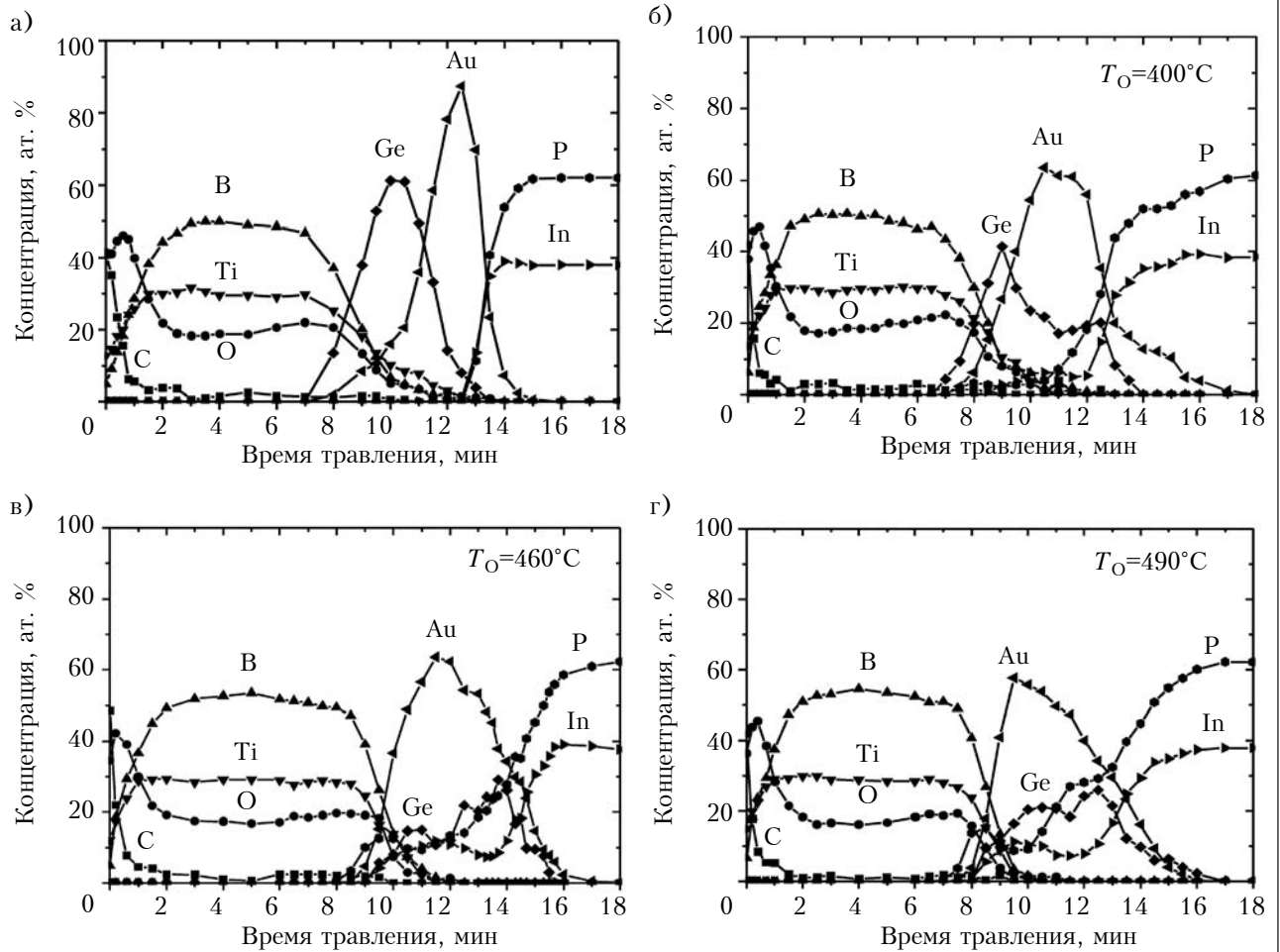


Рис. 12. Профили атомного состава по глубине контактной металлизации в контакте TiB_x-Ge-Au-InP до отжига (а) и после БТО при разной температуре (б, в, г) [5]

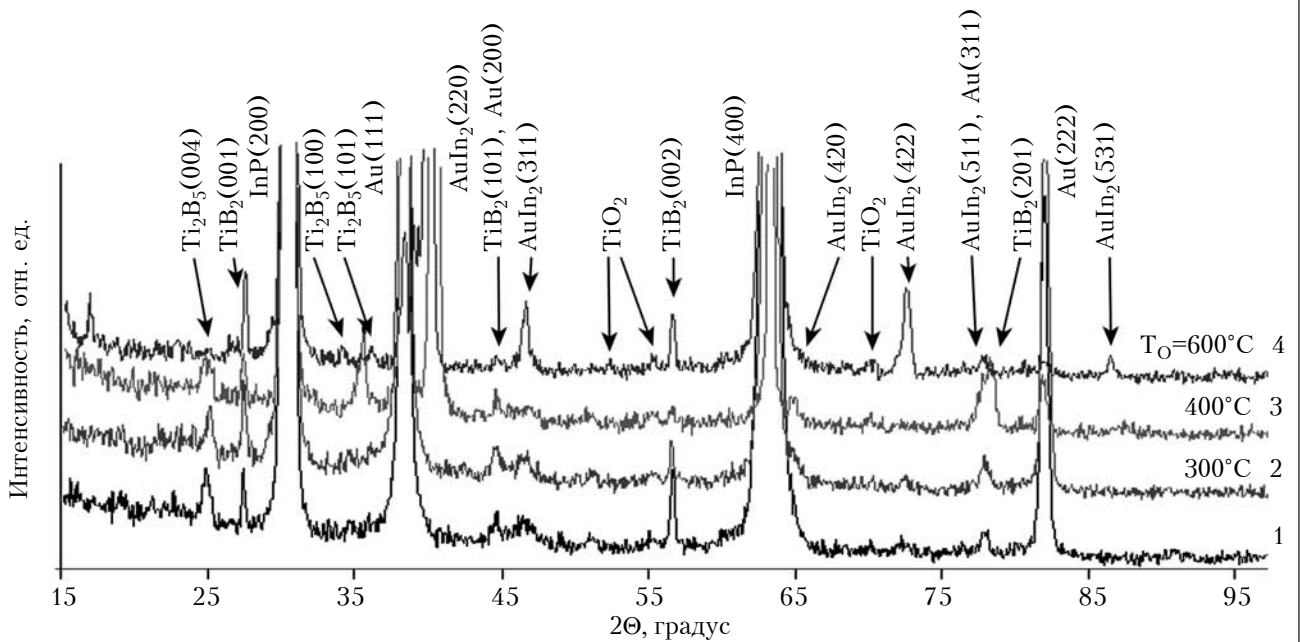


Рис. 13. Рентгенодифрактограммы системы Au-TiB_x-Ge-Au-InP до отжига (1) и после БТО при разной температуре (2–4) [4]

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. Ageev O. A., Belyaev A. E., Boltovets N. S. 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)V_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 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. Высокорастворимая 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. Ageev O. A., Belyaev A. E., Boltovets N. S. and 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. Boltovets N. S., Ivanov V. N., Kovtonyuk V. M. 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. Belyaev A. E., Boltovets N. S., Ivanov V. N. 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*

tehnologii 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. Vozможности 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 TiB₂ 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 TiB₂ 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., Rakoceвич Z. Markovich Z., Gakovich B., Nenadovich T. The effect of rapid thermal annealing on structural and electrical properties of TiB₂ thin films, *Thin Solid Films*, 1997, vol. 300, no 1-2, pp. 272-277.

21. Boltovets N. S., Ivanov V. N., Konakova R. V., Kudryk 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 elektronnoy 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 "Mikroelektronnyye 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., Duscher 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.

