

Термостойкий диод Шоттки $TiB_x-n-GaP$

© А.Е. Беляев, Н.С. Болтовец^{*†}, В.Н. Иванов*, А.Б. Камалов, Л.М. Капитанчук⁺,
Р.В. Конакова^{††}, Я.Я. Кудрик, О.С. Литвин, В.В. Миленин, М.У. Насыров

Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева Национальной академии наук Украины,
03028 Киев, Украина

* Государственное предприятие НИИ „Орион“,
03057 Киев, Украина

⁺ Институт электросварки им. Е.О. Патона Национальной академии наук Украины,
03680 Киев, Украина

(Получена 5 сентября 2007 г. Принята к печати 14 сентября 2007 г.)

Изучалось влияние быстрой термической обработки на параметры барьеров Шоттки $TiB_x-n-GaP$ и межфазные взаимодействия на границе раздела TiB_x-GaP . Показано, что контактная система $TiB_x-n-GaP$ обладает повышенной термостойкостью без изменения электрофизических параметров барьера Шоттки вплоть до $T = 600^\circ C$.

PACS: 85.30.Hi, 81.40.Rs, 73.40.Gk

1. Введение

Фосфид галлия ($E_g \approx 2.25$ эВ при $T = 300$ К) широко применяется для изготовления целого ряда оптоэлектронных приборов [1–4]. В то же время как широкозонный полупроводник, хорошо изученный и воспроизводимо получаемый в виде монокристаллов и эпитаксиальных слоев, фосфид галлия представляет интерес для микроэлектронных приборов высокотемпературной электроники. С этой точки зрения представляются целесообразными исследования как термической стабильности полупроводника, так и термостойкости контактов. Для диодов Шоттки на основе фосфида галлия одним из основных условий их устойчивой работы при повышенных температурах должно быть отсутствие межфазных взаимодействий на границе раздела металл–GaP. К настоящему времени эта область физико-технологических исследований фосфидгаллиевых диодов с барьером Шоттки мало изучена, хотя барьерные контакты к GaP, формируемые чистыми металлами, известны давно [5–7] и показана возможность создания барьеров Шоттки с вольт-амперными характеристиками (ВАХ), близкими к идеальным (с фактором идеальности порядка 1) при $T = 300$ К [8]. Их термостойкость, однако, ограничена межфазными взаимодействиями и фазообразованием при сравнительно невысоких температурах [9,10], а также массопереносом компонентов металла и полупроводника, расширяющим переходную область в контакте. Поэтому поиск барьерообразующих контактов, не взаимодействующих с GaP, представляется актуальным.

В данной работе исследовалось влияние быстрой термической обработки на параметры барьеров Шоттки $TiB_x-n-GaP$ и межфазные взаимодействия на границе раздела TiB_x-GaP .

Учитывая опыт создания термостойких барьерных контактов на основе аморфных фаз внедрения (боридов

и нитридов тугоплавких металлов) к Si [11] и к таким полупроводникам как GaAs и SiC [12,13], можно исключить из деградационного процесса в контактах межзеренную диффузию, характерную для контактов, сформированных поликристаллическими пленками металлов (сплавов). Этот опыт нам представлялось целесообразным применить к GaP.

2. Методика эксперимента

Барьерные слои TiB_x толщиной ~ 100 нм формировались магнетронным распылением на поверхности монокристаллической пластины GaP (предварительно подвергнутой фотонному отжигу) с концентрацией донорной примеси $\sim 10^{17}$ см⁻³ и толщиной ~ 350 мкм. Формирование слоев TiB_x осуществлялось при токе разряда ~ 0.4 А, что позволяло, как следует из [11], создать квазиаморфные пленки TiB_x .

Омические контакты формировались магнетронным напылением слоев Ge, Au, TiB_x . Оптимальные толщины слоев составляли 30 нм Ge, 180 нм Au, 100 нм TiB_x , а также дополнительный слой металлизации 200 нм Au. Пленочный пакет Au с Ge в весовых процентах соответствует 97 и 3% соответственно. Точка плавления такого сплава $\sim 1000^\circ C$.

Диодные структуры с барьером Шоттки $TiB_x-n-GaP$ диаметром 100 мкм создавались с помощью фотолитографии.

Для оценки термостойкости барьерных контактов использовалась быстрая термическая обработка (БТО) при температурах 400 и 600 $^\circ C$ в течение 60 с.

До и после БТО на тестовых структурах со сплошным слоем TiB_x толщиной ~ 50 нм методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) исследовалась морфология поверхности пленки TiB_x на серийном атомно-силовом микроскопе Nanoscope IIIa. На дифрактомерте ДРОН-2 (K_α — линия Cu) исследовался фазовый состав метал-

[†] E-mail: bms@i.kiev.ua

^{††} E-mail: konakova@isp.kiev.ua

лизации. Для получения профилей распределения компонентов металлизации использовался метод электронной оже-спектроскопии.

На диодных структурах до и после БТО измерялись вольт-амперные характеристики (ВАХ), из которых определялись высота барьеров Шоттки (ϕ_b) и фактор идеальности (n).

3. Экспериментальные результаты

Общим требованием к контактам с повышенной термостабильностью является отсутствие или слабое взаимодействие между слоями металлизации и на границе раздела металл–GaP.

Как следует из приведенных далее исследований, структура $TiB_x-n-GaP$ обеспечивает эти условия. На рис. 1, 2, 3 представлены данные послойного оже-анализа пленки TiB_x и ее морфологические особенности до и после БТО. Из профилей распределения компонентов видно, что существенное перемешивание на границе раздела $TiB_x-n-GaP$ отсутствует как в исходных образцах, так и прошедших БТО при $T = 400$ и $600^\circ C$.

Приповерхностный слой TiB_x как до, так и после БТО содержит некоторое количество соединений бора с кислородом в виде BO и B_2O_3 . БТО на изменение содержания BO и B_2O_3 в приповерхностном слое TiB_x не повлияла. Содержание углерода и кислорода в пленке TiB_x в результате БТО также существенно не изменилось.

Рентгенофазовый анализ (рис. 4) показал, что пленки TiB_x содержат как аморфную фазу (широкий низкий пик в районе 25° на рентгенограмме), так и незначительное количество поликристаллического гексагонального TiB_2 . Отжиг не повлиял на фазовый состав пленки. Поэтому можно полагать, что наблюдаемые незначительные изменения на межфазной границе связаны со структурной модификацией контактирующего слоя.

Таблица 1. Параметры шероховатости поверхности до и после БТО при $T = 400$ и $600^\circ C$

Образец	Z_r , нм	RMS, нм	R_a , нм
Исходный	24.5	1.4	1.0
БТО $400^\circ C$	25.5	2.4	1.6
БТО $600^\circ C$	19.3	2.2	1.5

Примечание. Z_r — размах высот неровностей поверхности, RMS — среднеквадратическая шероховатость, R_a — среднеарифметическая шероховатость. Площадь анализируемой поверхности 1×1 мкм².

Действительно, как видно из рис. 1–3 и табл. 1, поверхность исходного образца состоит из зерен диаметром ~ 50 нм с нечеткими границами высот до 24.5 нм. БТО при 400 и $600^\circ C$ поверхность изменяет слабо (см. изменение величины Z_r).

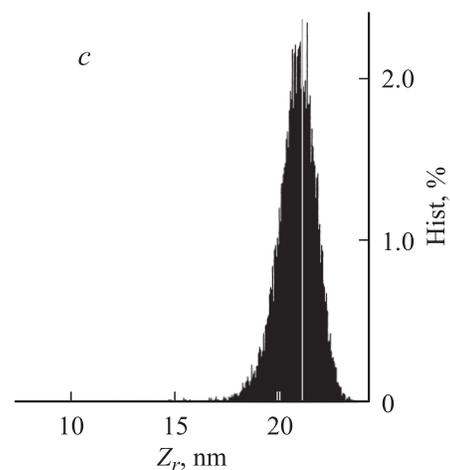
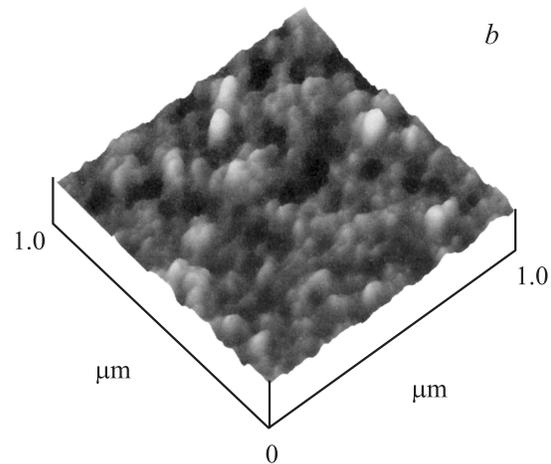
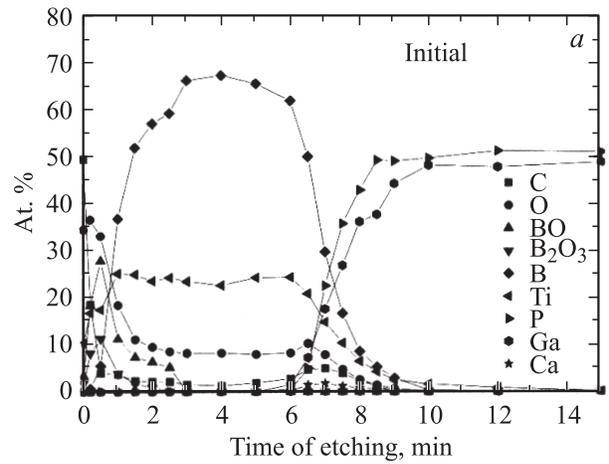


Рис. 1. Профили распределения компонентов (a), морфология поверхности (b) и c — гистограмма распределения высот неровностей (масштаб: $x = 0.2$ мкм/дел, $y = 10$ нм/дел) для структуры $TiB_x-n-GaP$ до термической обработки.

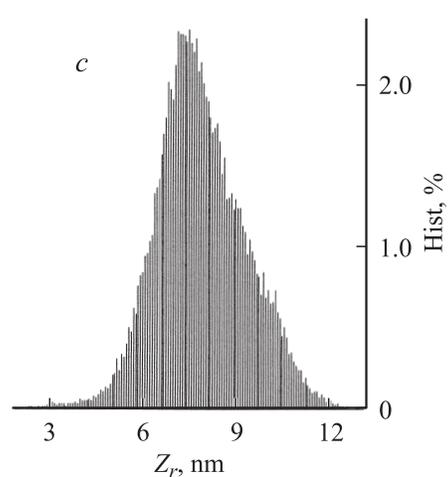
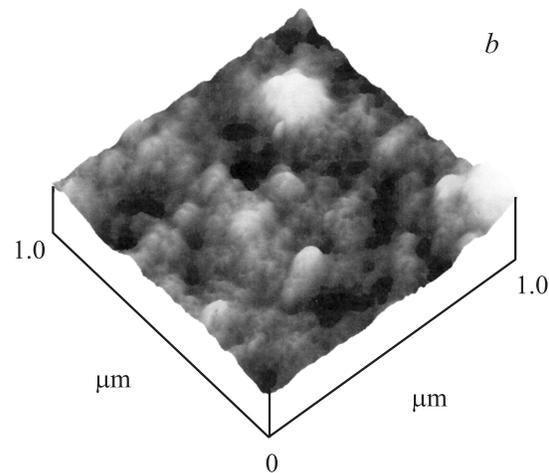
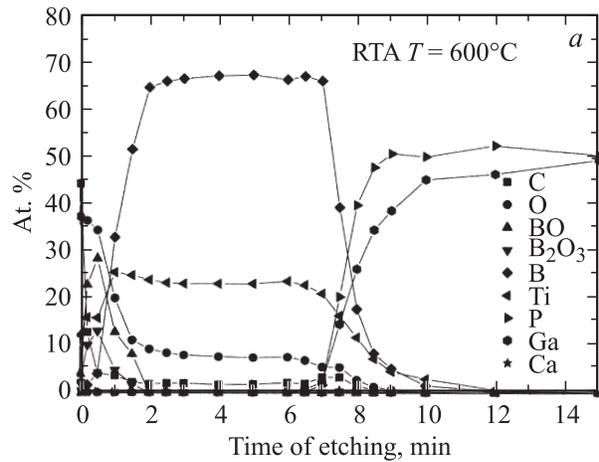
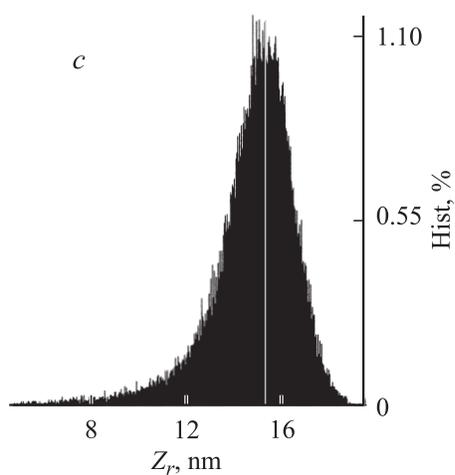
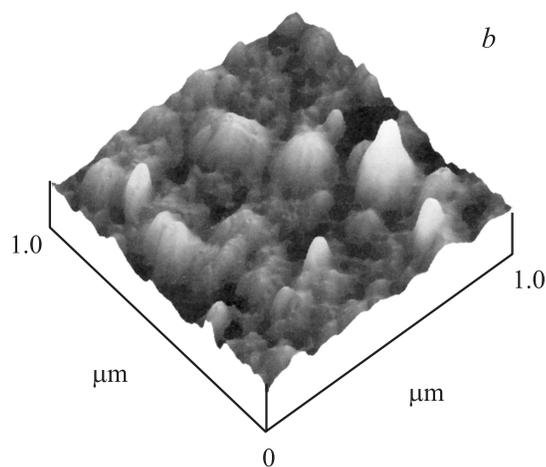
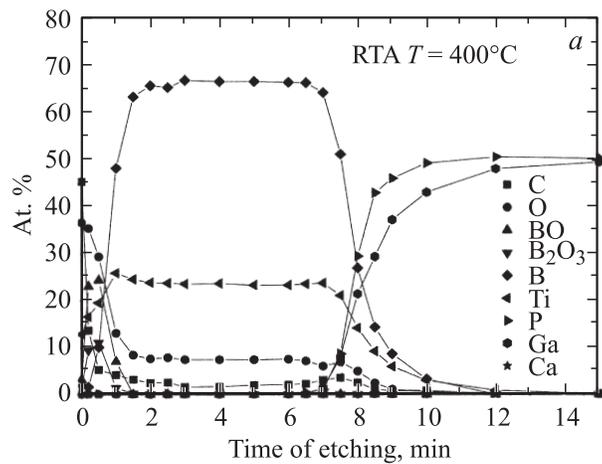


Рис. 2. Профили распределения компонентов (а), морфология поверхности (b) и с — гистограмма распределения высот неровностей (масштаб: $x = 0.2$ мкм/дел, $y = 10$ нм/дел) для структуры $TiB_x-n-GaP$ после быстрой термической обработки при $T = 400^\circ C$.

Рис. 3. Профили распределения компонентов (а), морфология поверхности (b) и с — гистограмма распределения высот неровностей (масштаб: $x = 0.2$ мкм/дел, $y = 10$ нм/дел) для структуры $TiB_x-n-GaP$ после быстрой термической обработки при $T = 600^\circ C$.

Измерения ВАХ (рис. 5) показали, что прямая ветвь ВАХ диодных структур в широком диапазоне токов описывается известной экспоненциальной зависимостью тока I от напряжения V :

$$I = I_S \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right),$$

где

$$I_S = AST^2 \exp\left(-\frac{e\phi_b}{kT}\right)$$

— ток насыщения, k — постоянная Больцмана, e — заряд электрона, T — температура, S — площадь диодной структуры, A — постоянная Ричардсона для GaP, ϕ_b — высота барьера Шоттки, n — фактор идеальности.

Оказалось, что величина n при комнатной температуре для разных диодов составляет 1.12–1.21, что в соответствии с [14] отвечает термоэлек-

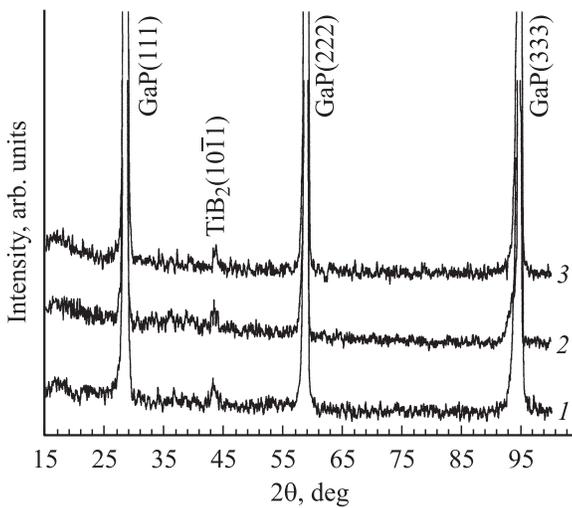


Рис. 4. Рентгенофазовый анализ структур TiB_x - n -GaP до (1) и после отжига (2, 3) при температурах 400 и 600°C соответственно.

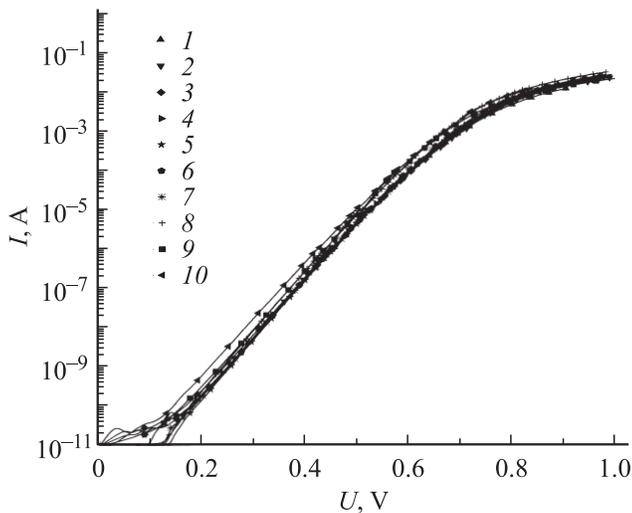


Рис. 5. Прямые ветви вольт-амперных характеристик диодов Шоттки TiB_x - n -GaP. Символы 1–10 соответствуют номерам образцов в табл. 2.

Таблица 2. Параметры барьеров Шоттки TiB_x - n -GaP, ВАХ которых представлены на рис. 3

Образец	n	ϕ_b , эВ	I_S , А
1	1.16	0.90	$4.9 \cdot 10^{-13}$
2	1.15	0.91	$2.7 \cdot 10^{-13}$
3	1.15	0.91	$2.3 \cdot 10^{-13}$
4	1.14	0.92	$2.3 \cdot 10^{-13}$
5	1.15	0.93	$2.6 \cdot 10^{-13}$
6	1.12	0.91	$3 \cdot 10^{-13}$
7	1.18	0.90	$4 \cdot 10^{-13}$
8	1.16	0.91	$2.9 \cdot 10^{-13}$
9	1.16	0.91	$2.9 \cdot 10^{-13}$
10	1.21	0.89	$7.8 \cdot 10^{-13}$

тронному механизму токопереноса, высота барьера Шоттки $\phi_b = 0.89$ – 0.93 эВ, ток насыщения $I_S = 2.3 \cdot 10^{-13}$ – $7.8 \cdot 10^{-13}$ А (табл. 2). БТО при $T = 400$ и 600°C практически не изменила эти параметры, что коррелирует с данными о свойствах границы раздела TiB_x - n -GaP, полученными методами электронной оже-спектроскопии и рентгеновской дифракции.

Таким образом, совокупность комплексных исследований барьерных контактов TiB_x - n -GaP методами АСМ, рентгеновской дифракции, оже-спектроскопии и измерений ВАХ показала, что контактная система TiB_x - n -GaP обладает повышенной термостойкостью без изменения электрофизических параметров барьера Шоттки, вплоть до $T = 600^\circ\text{C}$.

Список литературы

- [1] С.И. Радауцан, Ю.И. Максимов, В.В. Негрескул, С.Л. Пышкин. *Фосфид галлия* (Кишинев, АН МССР, 1969).
- [2] Л.И. Марина, А.Я. Нашельский, Л.И. Колесник. *Полупроводниковые фосфиды A^{III}B^V* (М., Металлургия, 1974).
- [3] Л.М. Коган. *Полупроводниковые светоизлучающие диоды* (М., Энергоиздат, 1983).
- [4] А. Берг, П. Дин. *Светодиоды* (М., Мир, 1987).
- [5] С.А. Mead. *Sol. St. Electron.*, **9** (11), 1023 (1966).
- [6] С.Г. Мадоян, М.К. Гусейханов, В.В. Болтовский. *Обзоры по электрон. техн. Сер. 2. Полупроводниковые приборы*, № 10 (328), 64 (1975).
- [7] Tan F. Lei, Chung L. Lee, Chun J. Chang. *Sol. St. Electron.*, **21** (11), 1035 (1979).
- [8] Б.В. Царенков, Ю.А. Гольдберг, Е.А. Поссе. *ФТП*, **7** (12), 2326 (1973).
- [9] Ю.А. Гольдберг, Е.А. Поссе, Б.В. Царенков. *ФТП*, **20** (8), 1510 (1986).
- [10] Ю.А. Гольдберг, Е.А. Поссе. *ФТП*, **32** (2), 200 (1998).
- [11] М.А. Nicolet. *TSE*, **52**, 415 (1978).
- [12] Н.С. Болтовец, В.Н. Иванов, Р.В. Конакова и др. *ФТП*, **38** (7), 769 (2004).
- [13] I. Shalish, Yoram Shapira. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **18** (5), 2447 (2000).
- [14] Э.Х. Родерик. *Контакты металл-полупроводник* (М., Радио и связь, 1982).

Редактор Т.А. Полянская

Heat-resistant $\text{TiB}_x-n\text{-GaP}$ Schottky barrier diode

A.E. Belyaev, N.S. Boltovets, V.N. Ivanov*,
A.B. Kamalov, L.M. Kapitanchuk⁺, R.V. Konakova,
Ya.Ya. Kudryk, O.S. Lytvyn, V.V. Milenin, M.U. Nasyrov*

V. Loshkaryov Institute of Semiconductor Physics,
National Academy of Sciences of Ukraine,
03028 Kiev, Ukraine

* State Enterprise Research Institute „Orion“,
03057 Kiev, Ukraine

⁺ E.O. Paton Institute of Electric Welding,
National Academy of Sciences of Ukraine,
03680 Kiev, Ukraine

Abstract We studied the effect of rapid thermal annealing on the parameters of $\text{TiB}_x-n\text{-GaP}$ Schottky barriers and interactions between phases at the $\text{TiB}_x-n\text{-GaP}$ interface. It is shown that the $\text{TiB}_x-n\text{-GaP}$ contact system has enhanced heat resistance, and the electrophysical parameters of the Schottky barrier do not change up to a temperature $T = 600^\circ\text{C}$.