

06.1;06.2;12

Особенности формирования и термостабильность барьерных контактов к высокочувствительным карбидкремниевым детекторным диодам

© Н.С. Болтовец, А.В. Зоренко, В.Н. Иванов, С.И. Власкина,
Р.В. Конакова, Я.Я. Кудрик, П.М. Литвин, О.С. Литвин,
В.В. Миленин, С.К. Абдижалиев

Государственное предприятие Научно-исследовательский институт
„Орион“, Киев, Украина
Институт физики полупроводников НАН Украины, Киев
E-mail: konakova@isp.kiev.ua

Поступило в Редакцию 19 августа 2002 г.

Исследовано влияние быстрой термической обработки (БТО) при $T = 1000^\circ\text{C}$ на особенности формирования барьерных $\text{TiB}_x-n\text{-SiC}_6\text{H}$ (000 $\bar{1}$) и омических $\text{Ni}-n\text{-SiC}_6\text{H}$ контактов. Показано, что БТО не нарушает слоевой структуры и термостабильности барьерных контактов.

При БТО структуры $\text{Ni}-n\text{-SiC}_6\text{H}$ (0001) формируется стабильный омический контакт. БТО практически не изменяет параметров статической вольт-амперной характеристики диодов Шоттки $\text{Au}-\text{TiB}_x-n\text{-SiC}_6\text{H}$ (000 $\bar{1}$).

Показано, что термостойкие диоды Шоттки $\text{Au}-\text{TiB}_x-n\text{-SiC}_6\text{H}$ (000 $\bar{1}$) обладают чувствительностью по напряжению $\sim 3300-3500\text{ mV/mW}$ при входной мощности 10^{-7} W и способны работать при повышенной СВЧ-мощности вплоть до 1 W. Динамический режим линейного участка передаточной характеристики составляет 50 dB.

Успехи высокотемпературной твердотельной электроники, базовым материалом которой является карбид кремния, как показано в ряде последних работ, зависят не только от качества исходного полупроводникового материала, но в значительной мере определяются свойствами омических и барьерных контактов [1–5]. Особенно это относится к микроволновым диодам с барьером Шоттки, для которых при высоком уровне входной мощности весьма существенным становится термостабильность контактов. Поскольку физико-химические и структурные свойства переходного слоя в контакте металл–полупроводник

обуславливают качество и надежность дискретных полупроводниковых приборов и интегральных схем [6,7], то остается актуальным поиск материалов для контактов, обеспечивающих минимально возможные переходные слои, либо вообще не взаимодействующих с полупроводником до температур, значительно превышающих рабочие [8–10]. Как было показано на примере контактов к кремнию и арсениду галлия в работах [11–15], таким требованиям отвечают аморфные и квазиморфные пленки нитридов и боридов титана. Это обеспечивается, прежде всего, химической пассивностью и низкой диффузионной проницаемостью таких пленок в сочетании с их высокой электропроводностью. Именно таким условиям должны отвечать барьерные контакты к карбиду кремния, чтобы можно было реализовать его уникальные высокотемпературные свойства. В соответствии с этим последние годы активизировался поиск таких контактов к SiC (преимущественно карбиды, вольфраматы, нитриды тугоплавких металлов). В настоящей работе предпринята попытка реализовать подобные барьерные контакты на основе TiV_x для карбидкремниевых детекторных диодов с барьером Шоттки.

В нашей работе исследуются барьерные контакты TiV_x–*n*-SiC-6H (0001), полученные методом магнетронного распыления TiV_x из мишени стехиометрического состава на предварительно очищенную подложку монокристаллического карбида кремния *n*-типа (политип 6H), выращенного методом Лели с концентрацией донорной примеси $\sim 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

Омический контакт создан путем нанесения никеля магнетронным распылением с последующим вжиганием в вакууме $1.33 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}$ при температуре 1000°C в течение двух минут. Контакты для микросварки формировались методом микрогальванического осаждения золота после быстрой термической обработки (БТО) с использованием микроэлектронных технологий.

Исследовались два типа образцов: тестовые структуры и диоды с барьером Шоттки. Тестовые образцы представляли собой TiV_x–*n*-SiC-6H (0001) и Ni–*n*-SiC6H (0001) структуры. TiV_x толщиной $\sim 800 \text{ \AA}$ наносился на грань (0001) SiC, Ni толщиной $\sim 1000 \text{ \AA}$ — на грань SiC (0001). Противоположная грань не металлизировалась. Диодные структуры с барьером Шоттки диаметрами 20 и 100 μm формировались в предварительно протравленных в слое SiO₂ окнах. После разделения пластины на чипы, последние монтировались в корпуса СВЧ-диодов.

Образцы обоих типов: тестовые и приборные структуры на пластине подвергались быстрому термическому отжигу в вакууме $1.33 \cdot 10^{-4}$ Па при $T = 1000^\circ\text{C}$ в течение 90 с.

До и после БТО на тестовых структурах методом Оже-электронной спектроскопии измерялись профили распределения компонентов в контактах $\text{TiB}_x-n\text{-SiC-6H}$ (0001) и Ni-n-SiC6H (0001), с помощью атомной силовой микроскопии — морфология поверхности пленок TiB_x и Ni , и методом рентгеновской дифракции — фазовый состав барьерного и омического контактов.

До и после БТО были измерены прямые ветви вольт-амперных характеристик (ВАХ) и вольт-фарадные характеристики (ВФХ) диодных структур на пластине и корпусированных диодах Шоттки.

Для исследования передаточных характеристик диоды были включены в гибридно-интегральную схему детектора. Измерительная схема реализована на несимметричных полосковых линиях с волновым сопротивлением 50Ω . Измерения передаточных характеристик производились при разных токах смещения ($0.0-13.8 \mu\text{A}$) на частоте 300 MGz .

Прямые ветви ВАХ диода Шоттки $\text{Au-TiB}_x-n\text{-SiC6H}$ (0001) до и после БТО при $T = 1000^\circ\text{C}$ описываются типичной зависимостью

$$I = I_s \exp\left(\frac{eV}{nkT} - 1\right),$$

где $I_s = A^* T^2 S \exp\left(-\frac{\phi_B}{kT}\right)$, I_s — ток насыщения, $A^* = 194 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$ — эффективная постоянная Ричардсона для $n\text{-SiC6H}$, S — площадь диодной структуры, T — температура, e — заряд электрона, k — постоянная Больцмана, ϕ_B — высота барьера Шоттки, n — фактор идеальности, V — напряжение.

Параметры барьера Шоттки после БТО изменились незначительно. Высота барьера в исходном образце составила 0.69 eV , фактор идеальности $n = 1.5$, после БТО $\phi_B = 0.69 \text{ eV}$, $n \approx 1.6$. Оценка ϕ_B по напряжению отсечки на зависимости $1/C^2 = f(V)$ показала, что ϕ_B после БТО практически не изменяется и составляет величину $\sim 0.7 \text{ eV}$, что указывает на термостабильность границы раздела контакта $\text{TiB}_x-n\text{-SiC}$ и стабильность по составу переходного слоя. Результаты измерений передаточных характеристик детекторных диодов приведены на рис. 1. До значений входной мощности 10 mW детектор имеет характеристику, близкую к квадратичной. Переход от квадратичной зависимости к квазилинейной наблюдался при входной мощности

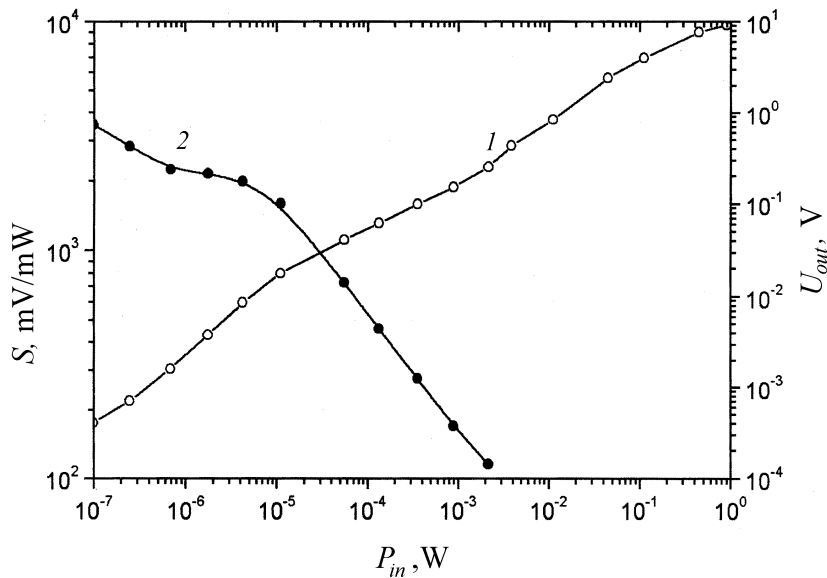


Рис. 1. Зависимости напряжения на диоде (1) и чувствительности (2) от входной СВЧ мощности при токе смещения $3.2 \mu\text{A}$.

$\sim 10 \mu\text{W}$. Детекторные диоды на квадратичном участке зависимости имеют максимальную чувствительность при величинах прямого тока $0.5 \div 3 \mu\text{A}$. При этом токи смещения в исследуемых диодах на порядок ниже, чем в арсенидгаллиевых диодах Шоттки.

Как следует из рис. 1, особенностью карбидкремниевых детекторных диодов с барьером Шоттки является возможность их работы при подаче на вход детектора мощности до 1 W. Динамический диапазон линейного участка передаточной характеристики составляет 50 dB. Чувствительность диода по напряжению на этом участке слабо зависит от тока смещения и снижается с повышением мощности. Приведенные выше динамические характеристики диодов Шоттки $\text{TiV}_x\text{-n-SiC6H}$ (0001) удалось получить благодаря термостойкости и стабильности границы раздела барьерного контакта. Действительно, как показали данные рентгеновской дифрактометрии, исходная пленка TiV_x находится в квазиаморфном состоянии. БТО при $T = 1000^\circ\text{C}$ не изменяет фазовый

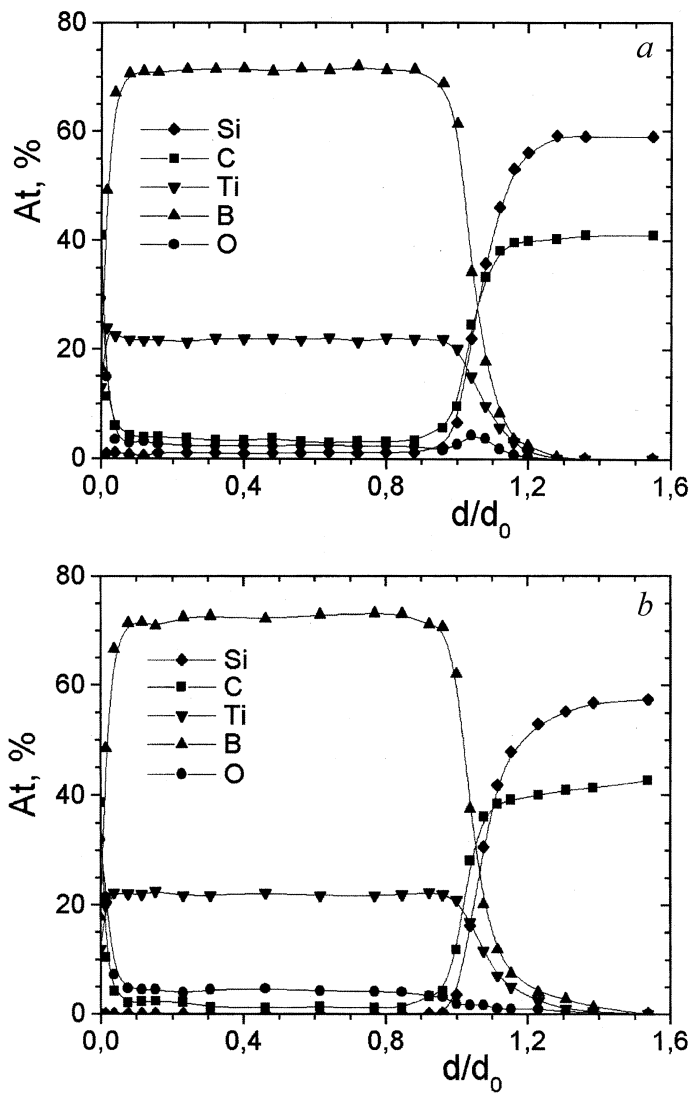


Рис. 2. Профили распределения компонентов в контакте $\text{TiB}_x - n\text{-SiC6H}$ (000 $\bar{1}$):
a — исходный; *b* — после БТО при $T = 1000^\circ\text{C}$.

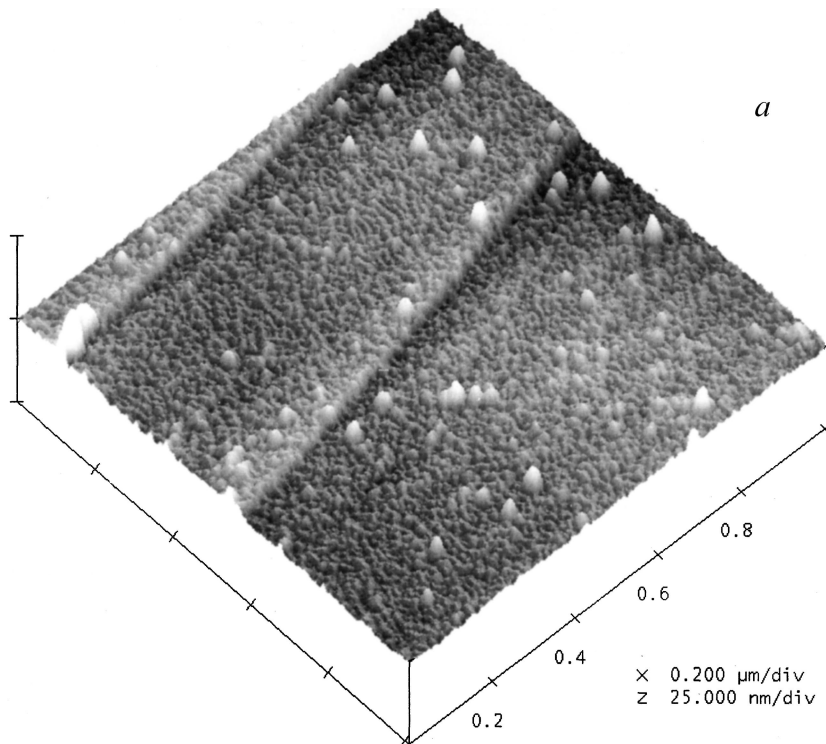


Рис. 3. Морфология поверхности $TiB_x-n-SiC_6H$ (0001: *a* — исходный; *b* — после БТО при $T = 1000^\circ C$.

состав, что согласуется с данными Оже-электронной спектроскопии (рис. 2), из которых видно, что БТО не влияет на усиление химического взаимодействия между пленкой TiB_x и SiC. Протяженность переходного слоя ($\sim 200 \text{ \AA}$) и его состав сохраняются идентичными до и после БТО, что подтверждает выводы о термической стабильности барьерных свойств контакта, следующей из анализа ВАХ и ВФХ. Небольшие отклонения в ВАХ могут быть связаны с морфологическими трансформациями поверхности TiB_x .

Как видно из рис. 3, отжиг не привел к заметному росту шероховатости пленки TiB_x ($\sim 0.5 \text{ nm}$ как в исходном, так и в отожженном

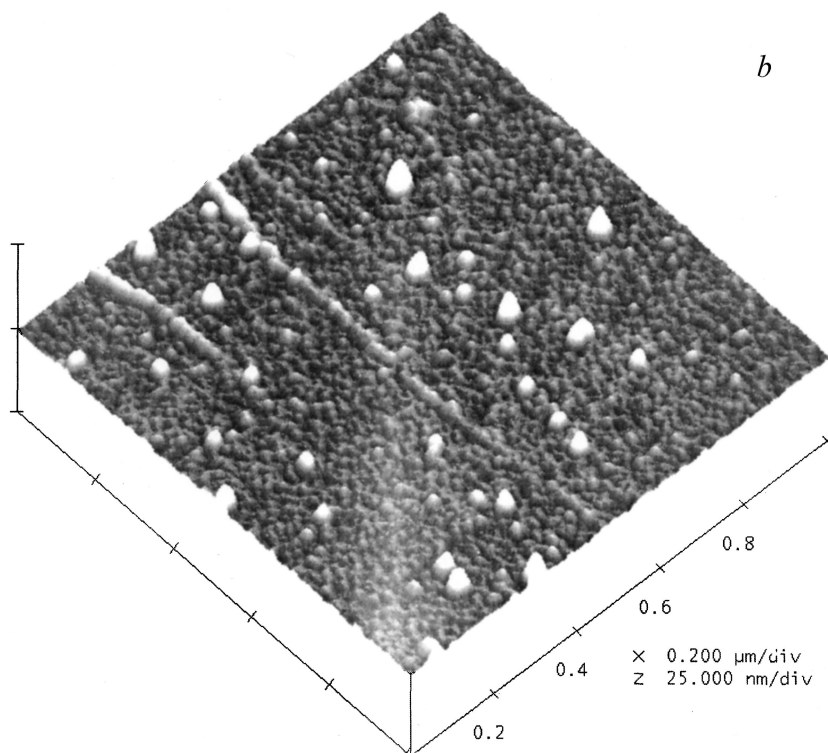


Рис. 3 (продолжение).

образцах). Но при этом на отожженной поверхности TiB_x отмечены nanoостровки большей плотности и размеров (от 4.0 nm высотой и 45.0 nm диаметром основания островка в исходном до 7.0 nm высотой и 50.0 nm диаметром в отожженном). Кроме того, отжиг стимулировал некоторую организацию nanoостривков небольших размеров в цепи, что может свидетельствовать о перераспределении полей механических напряжений в пленке TiB_x .

Структуры Ni-n-SiC6H (0001) в исходном состоянии формируются преимущественно поликристаллической фазой никеля. Омический контакт создается в результате БТО. Фазовые трансформации никеля,

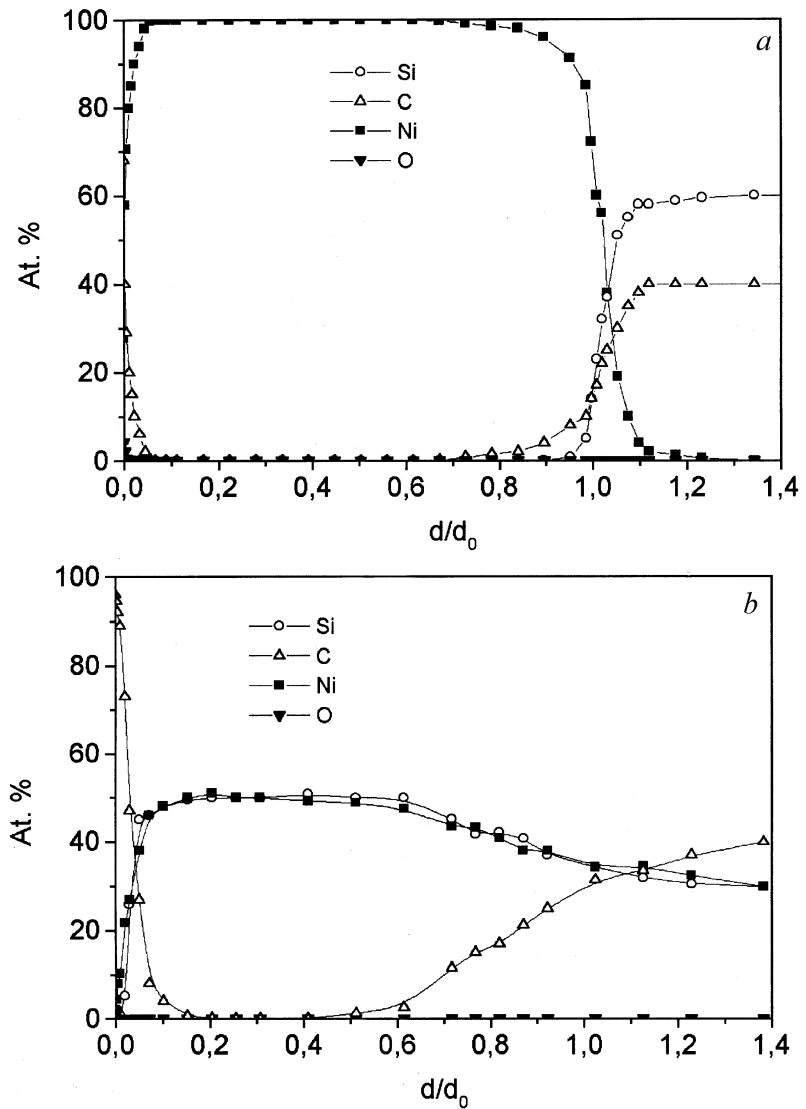


Рис. 4. Профили распределения компонентов в контакте Ni-n-SiC₆H (0001): a — исходный; b — после БТО при $T = 1000^\circ\text{C}$.

вызванные БТО, приводят к тому, что при исчезновении чистого никеля количество силицидных соединений никеля возрастает и практически не изменяется при повторном БТО при $T = 1000^\circ\text{C}$. Профили распределения компонентов в омическом контакте до и после БТО представлены на рис. 4.

Таким образом, использование в качестве барьерного контакта к $n\text{-SiC}_6\text{H}$ (0001) квазиаморфного сплава TiB_x и омического контакта на основе силицидов никеля позволяет создать высокочувствительный термостабильный детекторный диод, перспективный для применения как датчик СВЧ-мощности.

Список литературы

- [1] Иванов П.А., Челноков В.Е. // ФТП. 1995. Т. 29. В. 11. С. 1921–1943.
- [2] Лебедев А.А., Челноков В.Е. // ФТП. 1999. Т. 33. В. 9. С. 1096–1099.
- [3] Давыдов С.Ю., Лебедев А.А., Тихонов С.К. // ФТП. 1997. Т. 31. В. 5. С. 597–599.
- [4] Defiver D., Durand O., Wycisk F., Noblanc J., Brylinski C., Meyer F. // Microelectron. Eng. 2001. V. 55. N 3. P. 369–374.
- [5] Precz B. // Appl. Surf. Sci. 2001. V. 153. N 1. P. 1–8.
- [6] Дорфман В.Ф. Микрометаллургия в микроэлектронике. Принципы технологии в полупроводниковом приборостроении. М.: Металлургия, 1978. 272 с.
- [7] Murarka S.P. Silicides for VLSI Application. Academic Press. New-York–London–Paris, 1983.
- [8] Via La F., Roccaforte F., Makhtari A., Kaineri V., Musumeci P., Calcagno L. // Microelectron. Eng. 2002. V. 60. P. 269–282.
- [9] Hara S. // Surf. Sci. 2001. V. 494. P. L805–L810.
- [10] Sang Youn Han, Ki Hong Kim, Jong Kyn Kim, Ho Won Jang, Kwang Ho Lee, Nam-Kyun Kim, Eun Dong Kim, Jong-Lam Lee // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 79. N 12. P. 1816–1818.
- [11] Венгер Е.Ф., Миленин В.В., Ермолович И.Б., Конакова Р.В., Иванов В.Н., Войцеховский Д.И. // ФТП. 1999. Т. 33. В. 8. С. 948–953.
- [12] Миленин В.В., Конакова Р.В. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 14. С. 30–35.
- [13] Boltovets N.S., Goncharuk N.M., Krivutsa V.A., Chaika V.E., Konakova R.V., Milenin V.V., Soloviev E.A., Tagaev M.B., Voitsikhovskiy D.I. // Semicond. Phys., Quantum Electron. & Optoelectron. 2000 V. 3. N 3. P. 352–358.
- [14] Lee S.K., Zetterling C.M., Ostling M. // J. Appl. Phys. 2000. V. 87. N 11. P. 8039–8044.
- [15] Porter L.M., Gavis R.F. // Mater. Sci. Eng. 1995. V. B34. N 1. P. 83–105.