

поверхности позволяет говорить об одновременном процессе рекристаллизации пленки и наноструктурирования поверхности, вследствие которого коэффициент отражения пленки изменяется. Оптимальный режим лазерной обработки в таком случае будет представлять собой такую комбинацию значений мощности лазерного излучения и скорости сканирования, при которой одновременно будет обеспечиваться как можно более полная перекристаллизация материала пленки и формирование такого массива субмикронных структур, который обеспечивал бы как можно более низкий коэффициент отражения.

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать вывод, что, управляя параметрами лазерной обработки (мощностью и скоростью сканирования), можно целенаправленно изменять оптические и морфологические свойства полупроводниковых материалов.

Примечания.

1. Двуреченский, А. В. // Соросовский образовательный журнал. – 2004. – № 8. – С. 108-114.
2. Лисоченко В. Н., Конакова Р. В., Коноплев Б. Г. и др. // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т. 44. – Вып. 3. – С. 326-329.
3. Li L., Hong M., Schmidt M. et al. // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2011. – V. 60. – P. 735-755.
4. Geaucarne, G. // Advances in OptoElectronics. – 2007. – Article ID 36970. – 12 P.
5. Гременок, В. Ф. Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов / В. Ф. Гременок, М. С. Тиванов, В. Б. Залесский. – Минск: Изд. Центр БГУ, 2007. – 222 с.
6. Лапшин К. Э., Обидин А. З., Токарев В. Н. и др. // Российские нанотехнологии. – 2007. – Т. 2. – № 11-12. – С. 50-57.
7. Лапшин К. Э., Обидин А. З., Токарев В. Н. и др. // Физика и химия обработки материалов. – 2008. – № 1. – С. 43-49.
8. Klinger D., Lusakowska E., Zymierska D. // Materials Science in Semiconductor Processing. – 2006. – V. 9. – P. 323-326.
9. Tavera T., Pérez N., Rodríguez A. et al. // Applied Surface Science. – 2011. – V. 258. – P. 1175-1180.
10. Le Harzic R., Dörr D., Sauer D. et al. // Physics Procedia. – 2011. – V. 12. – P. 29-36.

ВЛИЯНИЕ БЫСТРОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА И СВЧ НА УДЕЛЬНОЕ КОНТАКТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ К InP и GaAs

¹Ткаченко А. К., ²Новицкий С. В., ²Шеремет В. Н.

¹Житомирский государственный университет им. И.Я. Франка, г. Житомир, Украина

²Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАН Украины, г. Киев, Украина

Неотъемлемой частью любого полупроводникового прибора является невыпрямляющий контакт металл-полупроводник (омический контакт). Одним из основных требований к качественным омическим контактам является низкое удельное контактное сопротивление R_c в широких температурных и временных интервалах, что особенно важно при создании мощных полупроводниковых приборов для минимизации процессов деградации вследствие массопереноса

при дополнительном разогреве во время работы прибора [1].

Для создания надёжных омических контактов, оптимально использование многослойных контактных структур с применением тугоплавких металлов и их соединений в качестве диффузионных барьеров, которые противодействуют процессам массопереноса в контактной структуре, возникающий при температурном и радиационном влиянии на полупроводниковый прибор. Стабильную работу полупроводникового прибора в реальных условиях эксплуатации в значительной мере определяет надёжный омический контакт. Для создания омических контактов необходима температурная обработка, поэтому выбор оптимальных режимов термообработки для формирования контакта с минимальным сопротивлением является актуальной задачей. Также большое значение для формирования контактов с равномерным распределением параметров имеет микроволновая обработка [2].

Нами исследованы контактные структуры Au(2000Å)-TiB₂(1000Å)-Au(1800Å)-Ge(300Å)-n-n⁺-n⁺⁺-InP(GaAs), сформированные магнетронным распылением последовательных слоев контактной металлизации на предварительно очищенную фотонной обработкой поверхность полупроводника n-n⁺-n⁺⁺-InP(GaAs). В n-слое InP толщиной d~2 мкм концентрация доноров составляла n=9·10¹⁵ см⁻³, в n⁺-слое – d~3 мкм, n=5·10¹⁷ см⁻³, в n⁺⁺-подложке – d~350 мкм, n~10¹⁸ см⁻³. В n-слое GaAs толщиной d~3 мкм концентрация доноров составляла n=6·10¹⁵ см⁻³, в n⁺-слое – d~3 мкм, n=5·10¹⁷ см⁻³, в n⁺⁺-подложке – d~300 мкм, n~2·10¹⁸ см⁻³. Омический контакт формировался в процессе быстрой термической обработки (БТО) при температурах T=410, 435, 450 и 460 °C (время отжига 30 с) для InP и при 440, 520, 550 °C (время отжига 30 с) для GaAs. Контакты подвергались безнагревному СВЧ-облучению с частотой 2,45 ГГц и мощностью 7,5 Вт/см² длительностью 2 и 10 секунд. Удельное контактное сопротивление R_c исследовалось методом TLM с радиальной геометрией контактных площадок в интервале температур 100 – 380 К.

В результате измерений зависимости удельного сопротивления контактных структур от температуры был выявлен рост R_c в интервале температур 100-380 К. Подобные зависимости можно описать с помощью модели предложенной в [3], где такие зависимости объясняются токопереносом по металлическим шунтам, сформированным на дислокациях в приконтактной области полупроводника, с ограничением диффузионным подводом носителей. Согласно модели, удельное контактное сопротивление R_{c0}, определяемое одной дислокацией, в случае невырожденного полупроводника, описывается формулой

$$R_{c0} = \frac{kT}{q} \left(1 + \frac{0.6V_T}{4D_n} e^{y_{c0}} L_D \right) / \frac{qV_T}{4} n e^{y_{c0}}, \quad (1)$$

где k – постоянная Больцмана, T – температура, q – заряд электрона, V_T – средняя тепловая скорость электронов, D_n – коэффициент диффузии электронов, y_{c0}=qφ_{c0}/kT – равновесный безразмерный потенциал в полупроводнике у торца металлического шунта (φ_{c0} – контактный потенциал), L_D – дебаевская длина экранирования, n – концентрация доноров в полупроводнике. При этом если выполняется условие V_Te^{y_{c0}}L_D/4D_n >> 1 то термоэлектронный ток ограничивается

диффузионным подводом и уменьшается с ростом температуры. Как следствие возрастет контактное сопротивление.

Полное сопротивление контакта R_c будет определяться по формуле

$$R_c = R_{diff} + R_{sh} = \frac{R_{c0}}{\pi L_D^2 N_D} + \frac{\rho_0(1 + \alpha T)d_p}{\pi r^2 N_D}, \quad (2)$$

где R_{diff} – контактное сопротивление, определяемое механизмом диффузионного подвода носителей, для контакта единичной площади, N_D – концентрация проводящих дислокаций, R_{sh} – сопротивление металлических шунтов, ρ_0 – удельное сопротивление металла при $T=0$ °C, α – температурный коэффициент металла, d_p – расстояние которое электроны проходят по дислокации из объема полупроводника до сплошного металлического контакта, r – радиус металлического шунта.

Зависимость R_c и теоретически вычисленной N_D от температуры БТО и длительности СВЧ обработки контактных структур Au-TiB₂-Au-Ge-n-n⁺-n⁺⁺-InP(GaAs) представлены на рисунках 1 и 2 соответственно.

Как видно из рис. 1, с ростом температуры БТО, сопротивление омического контакта к InP уменьшается с увеличением температуры БТО и достигает минимального значения $R_c = 5,2 \cdot 10^{-5}$ Ом·см² после отжига при температуре 450°C. При этом с увеличением температуры БТО в 1,3 раза увеличивается концентрация дислокаций (от 10^8 см⁻² при $T=410$ °C до $1,3 \cdot 10^8$ см⁻² при $T=450$ °C). В соответствии с формулой (2) увеличение плотности дислокаций и приводит к уменьшению R_c . После последующего БТО при $T=460$ °C R_c резко возрастает до $1,1 \cdot 10^{-4}$ Ом·см², но при этом концентрация дислокаций практически не изменяется. Что возможно связано с процессами фазообразования, стимулированными БТО. Для контактов к GaAs R_c практически не изменяется с ростом температуры БТО и составляет $\sim 6,5 \cdot 10^{-5}$ Ом·см², но при этом значительно уменьшается величина N_D , которая после БТО при $T=550$ °C составляет $9 \cdot 10^6$ см⁻². Соответственно для формирования стабильного контакта к GaAs необходимо проводить отжиг омических контактов при температуре не меньше 550°C.

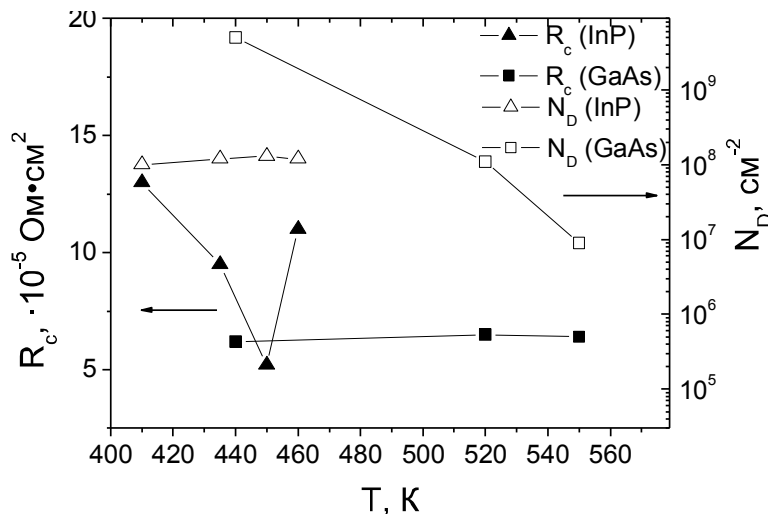


Рис. 1. Зависимость удельного контактного сопротивления при 300 К (левая ось) и концентрация дислокаций (правая ось) от температуры БТО для InP (▲, Δ) и GaAs (■, □).

Исследование зависимости удельного контактного сопротивления и плотности дислокаций от длительности СВЧ-облучения (рис. 2) указывает на то, что при обработке до 10 с в омическом контакте к InP под влиянием СВЧ происходит уменьшение N_D от 10^8 см^{-2} до $4,5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$, что приводит к увеличению удельного контактного сопротивления с $1,3 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ до $8,8 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. В случае контакта Ge-Au-TiB₂-Au к GaAs минимальная плотность дислокаций была получена после обработки длительностью 2 с и составляла $8,6 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$, удельное контактное сопротивление полученное при этом составляет $5 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. Увеличение длительности СВЧ обработки приводит к росту и R_c до $5,4 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ и N_D до $2 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$, что свидетельствует о деградиационных процессах в контактной структуре. Полученные результаты, указывают на то, что оптимальная длительность СВЧ-облучения для контактных структур Au-TiB₂-Au-Ge-n-n⁺-n⁺⁺-InP(GaAs) две секунды, в результате которой получено минимальное значение R_c и N_D в случае контакта к GaAs и уменьшение N_D с неизменной величиной R_c в случае контакта к InP.

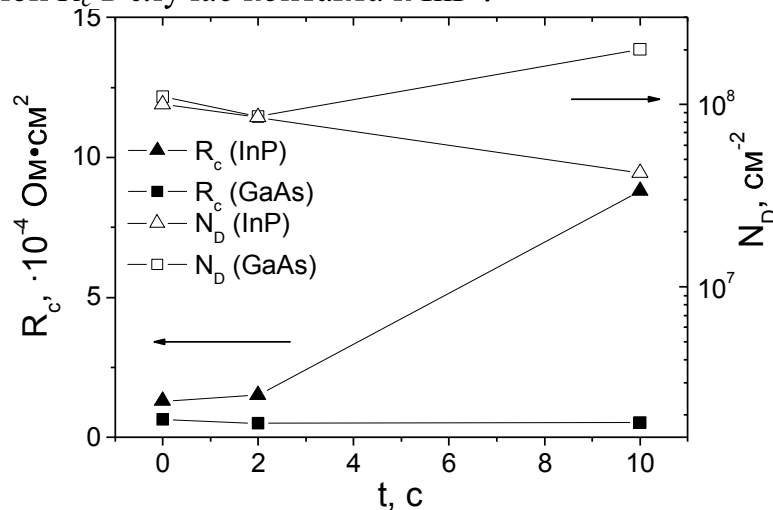


Рис. 2. Зависимость удельного контактного сопротивления при 300 К (левая ось) и концентрация дислокаций (правая ось) от времени СВЧ для InP (\blacktriangle , \triangle) и GaAs (\blacksquare , \square).

В ходе исследований определено оптимальную температуру БТО для формирования омического контакта, которая для InP составляет 450°C , при которой $R_c = 5,2 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ и для GaAs — 550°C , при которой получено минимальное значение $N_D = 6,5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$. Полученные результаты, свидетельствуют о минимальном значении R_c и N_D в случае контакта к GaAs и уменьшение N_D с неизменной величиной R_c в случае контакта к InP после СВЧ обработки длительностью 2 с.

Авторы признательны В. Н. Иванову за предоставление образцов для исследования.

Примечания.

1. Бланк, Т. В. Механизмы протекания тока в омических контактах металл-полупроводник. Обзор / Т. В. Бланк, Ю. А. Гольдберг // ФТП. — 2007. — Т. 41. — №11. — С. 1281-1308.

2. Влияние микроволновой обработки на механизмы протекания тока в омических контактах Au-TB_x-Al-Ti-n⁺-n-n⁺-GaN-Al₂O₃ / А. Е. Беляев, Н. С. Болтовец, С. А. Витусевич,

В. Н. Иванов, Р. В. Конакова, Я. Я. Кудрик, А. А. Лебедев, В. В. Миленин, Ю. Н. Свешников, В. Н. Шеремет // ФТП. – 2010. – Т. 44. – №6. – С. 775-781.

3. Temperature dependence of contact resistance of Au-Ti-Pd₂Si-n⁺-Si ohmic contacts / A. E. Belyaev, N. S. Boltovets, R. V. Konakova, Ya. Ya. Kudryk, A. V. Sachenko, V. N. Sheremet // SQO. – 2010. – V. 13. – №4. – P. 436-438.

О ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ НЕИСКАЖЕННОЙ ТЕМНОВОЙ ВАХ Р-N ПЕРЕХОДА СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА

Чижиков А. Е., Поворинский А. А.

Рязанский государственный радиотехнический университет,
г. Рязань

К.п.д., ток и напряжение холостого хода СЭ определяются такими параметрами структуры, как тепловой ток и величина потенциального барьера, непосредственно связанных с другими параметрами базовой и эмиттерной областей (удельное сопротивление, время жизни носителей, подвижность, геометрические размеры, концентрация носителей, их подвижность, коэффициент диффузии, диффузионная длина и др.). Зная тепловой ток и величину потенциального барьера можно определить практически все электрофизические параметры структуры.

Ключевым источником информации обо всех параметрах *p-n* перехода может служить прямая ветвь неискаженной темновой вольтамперной характеристики СЭ.

Основными причинами отклонения реальной темной ВАХ от экспоненциального хода являются последовательные и параллельные сопротивления структуры, а также появление, помимо инжекционной составляющей тока, токов генерации и рекомбинации. Учет влияния этих факторов приводит к следующей зависимости:

$$I + \frac{U}{R_1} = I_s \left[\exp \frac{e(U - IR)}{\alpha k T} - 1 \right] + I_{R0} \left[\exp \frac{e(U - IR)}{2kT} - 1 \right],$$

где I – полный ток структуры, U – внешнее напряжение на *p-n* переходе, R_1 – шунтирующее сопротивление, k – постоянная Больцмана, $\alpha=1,1-1,5$ – коэффициент неидеальности. I_s , I_{R0} – тепловой ток и ток рекомбинации, зависящие от коэффициентов диффузии носителей, диффузионных длин носителей, контактной разность потенциалов ϕ_k , удельного сопротивления соответствующих областей структуры, подвижности носителей, толщины и площади перехода, времени жизни носителей в переходе, собственной концентрации носителей.

Для решения уравнения необходимо знать величины последовательного и шунтирующего сопротивлений, которые к тому же зависят от величины тока (модулируются). Экспериментально суммарное шунтирующее сопротивление можно определить по измерениям на высокой частоте. Однако величины сопротивлений зависят от тока, что практически исключает возможность получе-

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПРАВИТЕЛЬСТВО РЕСПУБЛИКИ МОРДОВИЯ
АКАДЕМИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ НАУК РФ
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК
ФГБОУ ВПО «МОРДОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ ИМ. М. Е. ВСЕВЬЕВА»
МОРДОВСКОЕ РЕГИОНАЛЬНОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОГО СОЮЗА НИО
САРАНСКИЙ ДОМ НАУКИ И ТЕХНИКИ
ТЕХНОПАРК «МОРДОВИЯ»
ФГБОУ ВПО «МОРДОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Н. П. ОГАРЕВА»
ГУБ РМ НИИС ИМ. А. Н. ЛОДЫГИНА
ОАО «ЭЛЕКТРОВЫПРЯМИТЕЛЬ»
ФГБОУ ВПО «ПЕНЗЕНСКИЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. В. Г. БЕЛИНСКОГО»
ФГБОУ ВПО «МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. М. В. ЛОМОНОСОВА»
ФГБОУ ВПО «РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Физико-математический факультет

Кафедра физики и методики обучения физике

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ

Часть I

МАТЕРИАЛЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

28–30 мая 2012 г.

САРАНСК 2012