

К. т. н. В. И. БОСЫЙ, Н. Г. ДАНИЛОВ, В. П. КОХАН,
В. А. НОВИЦКИЙ, к. ф.-м. н. Е. М. СЕМАШКО, В. В. ТКАЧЕНКО,
Т. А. ШПОНЯК

Украина, г. Киев, Научно-производственное предприятие "Сатурн"
E-mail: jssaturn@kiev.ua

Дата поступления в редакцию
13.03 2007 г.

Оппонент к. т. н. В. Н. ИВАНОВ
(НИИ "Орион", г. Киев)

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОЗРАЧНЫХ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ К *p*-GaN ДЛЯ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ

*Получены омические контакты к *p*-GaN с удельным контактным сопротивлением $(1 \dots 2) \cdot 10^{-3}$ Ом·см² и коэффициентом прозрачности 78% на длине волны 460 нм.*

Светоизлучающие диоды (СИД) представляют собой полупроводниковые приборы, которые преобразуют электрическую энергию непосредственно в свет. При этом для получения электромагнитного излучения используется эффект излучательной рекомбинации в прямо смещенном *p-n*-переходе. В настоящее время полупроводниковые СИД по своим характеристикам превосходят традиционные источники света. Они уже начинают заменять лампы накаливания, в частности в тех случаях, когда требуется долговечность, компактность, отсутствие нагрева и/или направленность (например светофоры, автомобили, дисплеи и т. п.) [1].

Для изготовления СИД используются многослойные эпитаксиальные гетероструктуры на основе широкозонных полупроводников, в частности нитрида галлия. Улучшение оптических и электрических характеристик таких приборов связано как с дальнейшим развитием технологии выращивания полупроводниковых гетероструктур, так и с совершенствованием технологии изготовления прибора. Важное значение для улучшения параметров СИД имеет снижение сопротивления омических контактов.

Известно, что создание омических контактов к *n*-области диода не представляет значительных трудностей [2, 3]. Формирование же омических контактов к *p*-GaN с низким удельным сопротивлением и высокой прозрачностью в рабочей области спектра — достаточно сложная задача из-за отсутствия металла с высокой работой выхода и из-за ограничений в легировании *p*-области GaN. Несмотря на то, что предельная растворимость Mg в GaN составляет $\approx 5 \cdot 10^{19}$ см⁻³, концентрация носителей заряда в поверхностном слое GaN обычно на два порядка ниже [4]. Кроме того, к снижению концентрации носителей заряда может приводить остаточный водород, накапливающийся в поверхностном слое *p*-GaN в процессе эпитаксиального выращивания. В результате этого концентрация свободных носителей в поверхностном слое ниже, чем в объеме.

Для получения воспроизводимых омических контактов с требуемыми характеристиками исследовано

множество схем металлизации. Были исследованы такие металлы как Au, Ni, Ti, Pd, Pt, Au/Ni, Au/Pt, Au/Cr, Au/Pd, Au/Mg/Au, Au/Pt/Pd, Au/Cr/Ni, Au/Pt/Ni, Au/Ni/Pt и др. Наиболее широко для омических контактов к *p*-GaN используется система Ni/Au, причем не только в светоизлучающих диодах, но и в экспериментальных образцах лазерных диодов, в которых требования к омическим контактам еще более жесткие. Удельное контактное сопротивление для многих контактных систем обычно находится в пределах $2,1 \cdot 10^{-2} \text{—} 9,6 \cdot 10^{-4}$ Ом·см² [5—7]. При этом следует отметить, что результаты исследований омических контактов к *p*-GaN, опубликованные различными авторами, часто весьма противоречивы. Расхождения в полученных результатах могут быть связаны с различиями в условиях эксперимента.

В данной работе приведены результаты исследований омических контактов на основе пленок Ni—Au к *p*-области нитрида галлия. Для изучения физико-химических процессов и оптимизации режимов формирования омических контактов проведены исследования влияния толщины слоев Ni и Au, условий нанесения и формирования контакта на удельное контактное сопротивление и оптические свойства контактной системы. Проведены также исследования перераспределения элементов в структурах "металл—полупроводник" с помощью метода электронной оже-спектроскопии.

В качестве исходных образцов использовали эпитаксиальные структуры *p*-GaN толщиной ≈ 2 мкм с концентрацией носителей заряда $(5 \dots 6) \cdot 10^{17}$ см⁻³, выращенные на сапфировых подложках.

Формирование тестовых структур для исследований омических контактов проводили осаждением металлических слоев Ni и Au с последующей взрывной литографией. Непосредственно перед нанесением металлов поверхность полупроводника обрабатывали в растворе HCl:H₂O=1:1 в течение 5 мин с целью удаления собственного окисла. Пленки Ni и Au нанесли последовательно методом электронно-лучевого испарения в вакуумной системе со стартовым давлением не выше $3 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. После металлизации образцы подвергали термообработке в нейтральной или окислительной среде при температурах в диапазоне 350—550°C.

Для определения удельного контактного сопротивления ρ_c омических контактов использовали метод длинной линии, описанный в работе [8]. Были изго-

товлены образцы с круглыми контактами радиусами $r_0=120$ мкм, $r_1=133,0; 148,5; 158,3; 168,2; 178,4$ и $188,3$ мкм.

Распределение элементов в образцах исследовали методом электронной оже-спектроскопии с помощью анализатора поверхности LAS-2000 фирмы «Riber» с использованием спектрометра типа «цилиндрическое зеркало». Спектры регистрировали с энергетическим разрешением 3,4 эВ.

Для измерений коэффициента прозрачности пленки Ni и Au напыляли на стекла для фотопластинок в одном технологическом цикле с образцами для электрофизических измерений. Коэффициент прозрачности металлических слоев измеряли с помощью спектрофотометра СФ-26 в диапазоне длин волн 450—700 нм с абсолютной погрешностью измерения длины волны не более 0,25%.

После формирования тестовых образцов определяли их вольт-амперные характеристики (ВАХ). Непосредственно после осаждения пленок Ni–Au ВАХ образцов были нелинейными, что свидетельствует о формировании барьерного перехода. Выпрямляющий характер ВАХ не изменялся и после термообработки в атмосфере азота во всем диапазоне температур. Однако ВАХ становились линейными после термообработки на воздухе в диапазоне температур 400—550°C в течение 10 мин. ВАХ образцов, отожженных на воздухе при температуре ниже 400°C, были нелинейными. При термообработке на воздухе менее 10 мин вольт-амперные характеристики были нестабильными. Причиной этого могло быть неполное или неоднородное окисление Ni.

Необходимо отметить, что при напылении одной лишь пленки Ni и отжиге ее на воздухе при температуре 500°C пленка из проводящей превращалась в изолирующую, но более прозрачную, что свидетельствует об окислении Ni и образовании NiO. Аналогичные результаты получены в работе [6].

На рис. 1 представлены ВАХ образцов с контактами Ni(50 Å)/Au(50 Å) после термообработки на воздухе. В таблице приведены результаты измерений удельного контактного сопротивления исследованных образцов с разной толщиной пленок Ni и Au и разными режимами термообработки.

Приведенные результаты свидетельствуют о сильной зависимости удельного сопротивления и от толщины слоев металлов, и от температуры термообра-

Результаты исследований омических контактов к p-GaN

| Металлы (толщина слоев, Å) | Условия термообработки | Удельное контактное сопротивление, Ом·см ² |
|----------------------------|------------------------|---|
| Ni/Au (100/100) | 550°C, N ₂ | Нелинейные ВАХ |
| Ni/Au (50/50) | Без термообработки | Нелинейные ВАХ |
| | 550°C, воздух | $\approx 1,6 \cdot 10^{-2}$ |
| Ni/Au (100/50) | 350°C, воздух | Нелинейные ВАХ |
| Ni/Au (80/50) | 500°C, воздух | $\approx 8 \cdot 10^{-2}$ |
| Ni/Au (50/50) | 500°C, воздух | $\approx 9 \cdot 10^{-3}$ |
| Ni/Au (50/100) | 500°C, воздух | $\approx 2 \cdot 10^{-3}$ |

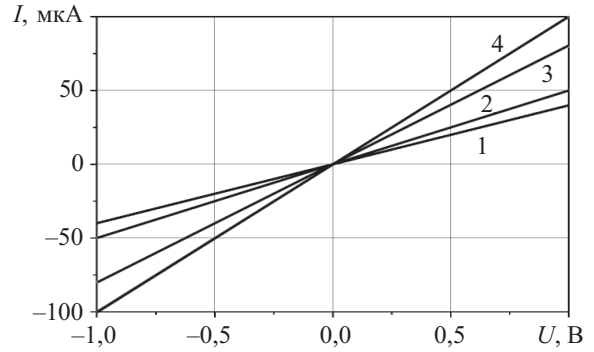


Рис. 1. Влияние термообработки в атмосфере воздуха на ВАХ образцов контактов Ni(50 Å)/Au(50 Å) к p-GaN: 1 — 400°C; 2 — 450°C; 3 — 550°C; 4 — 500°C

ботки. Минимальные значения удельного контактного сопротивления $(1...2) \cdot 10^{-3}$ Ом·см² получены на образцах с толщиной слоев Ni и Au 50 Å и 100 Å, соответственно, после отжига на воздухе в течение 10 мин при температуре 500°C.

На рис. 2 и 3 представлено распределение элементов в образцах контактов Au(50 Å)/Ni(50 Å)/p-GaN непосредственно после напыления металлов и после термообработки. В исходном образце (рис. 2) четко видны слои золота и никеля и элементы полупроводниковой подложки. При этом количество кислорода в слоях минимально. Термообработка (рис. 3) приводит к интенсивному взаимодействию в систе-

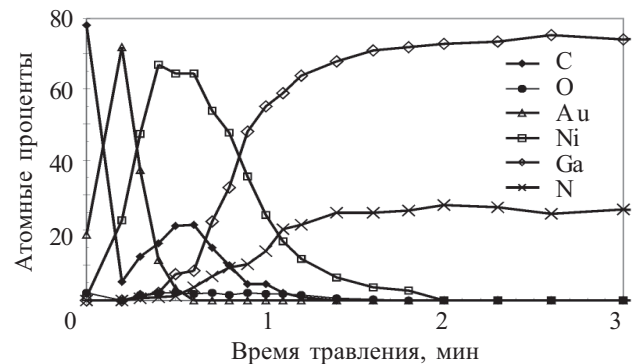


Рис. 2. Распределение элементов в исходной структуре (Au/Ni)/GaN, полученное методом электронной оже-спектроскопии с послойным травлением

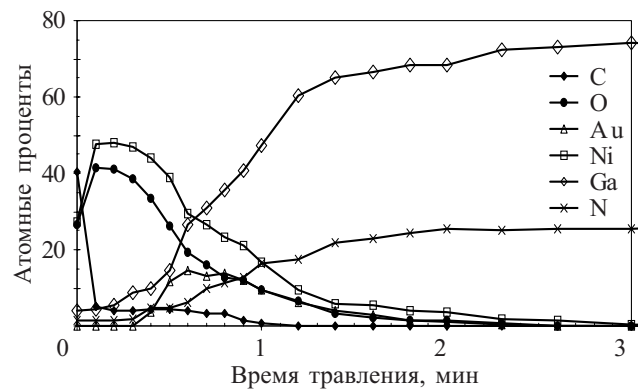


Рис. 3. Распределение элементов в образце (Au/Ni)/GaN после термообработки на воздухе при температуре 500°C в течение 10 мин, полученное методом электронной оже-спектроскопии с послойным травлением

ме "металл—полупроводник". Золото диффундирует к границе раздела "металл—полупроводник", а галлий диффундирует к поверхности металлического слоя. Кроме того, важно отметить, что в приповерхностном слое образца резко увеличивается содержание кислорода. При этом профиль распределения никеля, что свидетельствует об окислении никеля в процессе термообработки.

Как было указано выше, омические контакты к *p*-области для светоизлучающих диодов должны обладать высокой оптической прозрачностью в рабочем диапазоне спектра. На рис. 4 приведены зависимости коэффициента пропускания от длины волны для исходного образца (кривая 1) и после отжига при температуре 500°C в течение 10 мин (кривая 2). Коэффициент прозрачности металлических слоев Ni/Au на длине волны 460 нм непосредственно после напыления металлических слоев составляет ≈40% и возрастает после отжига до ≈78%, что практически совпадает с результатами, полученными другими авторами [5—7]. Точность измерения не хуже ±1%.

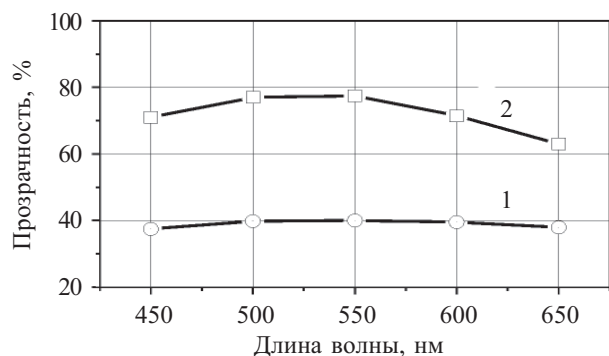


Рис. 4. Зависимость коэффициента прозрачности от длины волны для исходного образца (1) и после отжига при температуре 500°C в течение 10 мин (2)

Снижение удельного контактного сопротивления омических контактов в процессе термообработки некоторые авторы связывают с формированием в поверхностном слое *p*-GaN вакансий галлия, которые действуют как акцепторы и, следовательно, увеличивают концентрацию носителей заряда на границе раздела "металл—полупроводник" [5, 9]. Однако исследования [10] показали, что вакансии Ga в GaN *p*-типа нестабильны. Возможно образование комплексных дефектов с водородом ($V_{Ga}H_2$), дефектов замещения Ni и Au в GaN. Комплексы дефектов $V_{Ga}-Au_i$, V_N и $Ni_{Ga}-V_N$ имеют достаточно низкие энергии формирования и действуют в GaN как глубокие акцепторы. При этом они не дают заметного вклада в концентрацию носителей заряда в *p*-GaN, но могут действовать как компенсирующие центры в *n*-GaN. Поэтому улучшение свойств омических контактов Au/Ni к *p*-GaN не может быть объяснено образованием этих комплексов.

Улучшение свойств омических контактов на основе Ni/Au при отжиге в окислительной среде наблюдали в работе [6]. В работе [7] показано, что отжиг в окислительной среде снижает контактное сопротивление на порядок. Это позволяет предположить, что

создание низкоомного контакта связано с формированием *p*-NiO в присутствии Au. Без пленки золота контакт *p*-GaN/*p*-Ni неомический.

Улучшение линейности ВАХ и снижение удельного контактного сопротивления в результате термообработки могут быть объяснены формированием более тесного контакта и образованием промежуточных фаз с более высокой работой выхода и дополнительным легированием приповерхностного слоя полупроводника. Авторы работы [6] полагают, что в процессе термообработки в окислительной среде образуются переходы Au/*p*-NiO и *p*-NiO/*p*-GaN. Такие переходы могут изменять ход потенциала в приповерхностной области структуры и преобладающий механизм переноса тока. Кроме того, Au может способствовать уменьшению объемного удельного сопротивления системы Au—NiO. Однако для получения необходимых данных по плотности и энергетическому распределению состояний и для анализа зонной диаграммы такой системы необходимы дальнейшие исследования.

Таким образом, проведенные исследования показали, что на основе системы Ni/Au можно создавать омические контакты к *p*-области GaN с приемлемыми для создания светоизлучающих диодов характеристиками. Отжиг образцов контактов *p*-GaN/Ni(50 Å)/Au(100 Å) при температуре 500°C в окислительной среде в течение 10 мин позволяет получать омические контакты с удельным контактным сопротивлением примерно $(1...2) \cdot 10^{-3}$ Ом·см² и прозрачностью 78% на длине волны 460 нм.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Alferov Zh. Nobel lecture/ Reviews of Modern Physics.— 2002.— Vol. 73, N 3.
2. Mohammad S. N. Contact mechanisms and design principles for alloyed ohmic contacts to *n*-GaN // J. Appl. Phys.— 2004.— Vol. 95, N 12.— P. 7940—7953.
3. Motayed A., Davydov A. V., Boettinger W. J. et al. Realization of improved metallization-Ti/Al/Ti/W/Au ohmic contacts to *n*-GaN for high temperature application // Phys. Stat. Sol.— 2005.— Vol. C2, N 7.— P. 2536—2539.
4. DenBaars S. P. Gallium nitride materials technology // www.wtec.org/loyola/ttec/hte_e/report/hte-chap3.pdf
5. Jong K. K., Jung H. J., Jong-Lam L. et al. Microstructural investigation of Ni/Au ohmic contact on *p*-type GaN // J. Electrochem. Soc.— 2000.— Vol. 147, N 12.— P. 4645—4651.
6. Narayan J., Wang H., Oh T.-H. et al. Formation of epitaxial Au/Ni/Au ohmic contacts to *p*-GaN // Appl. Phys. Lett.— 2002.— Vol. 81, N 18.— P. 3978—3980.
7. Ho W. J., Jong-Lam L. Transparent ohmic contacts of oxidized Ru and Ir on *p*-type GaN // J. Appl. Phys.— 2003.— Vol. 93, N 9.— P. 5416—5421.
8. Marlow G. S., Das M. B. The effects of contact size and non-zero metal resistance on the determination of specific contact resistance // Solid-State Electronics.— 1982.— Vol. 25, N 2.— P. 91—94.
9. Seung Wan Chae, Joon Seop Kwak, Suk Kil Yoon et. al. Characteristics of hydrogen storage alloy *p*-GaN ohmic contacts for InGaN LEDs // Journal of the Korean Physical Society.— 2006.— Vol. 49, N 3.— P. 899—902.
10. Von Pezold Jo., Bristowe P. D. Metal (Ni, Au)-vacancy complexes in GaN // www.msm.cam.ac.uk/asp/metal_vacancy_ICNS_poster.pdf