УДК 621.382.2

Д.И. Засухин, О.Н. Минин, Е.А. Викторова

Формирование омического контакта к *n*-слою нитрида галлия с использованием предварительной ионной обработки

Представлены результаты измерения удельного контактного сопротивления к *n*-слою нитрида галлия системы металлов Ti/Al/Ni/Au. Исследовано влияние параметров предварительной ионной обработки поверхности, а именно скорость расхода газа и время процесса на значение удельного контактного сопротивления. Впервые получена зависимость удельного контактного сопротивления от температуры отжига после проведения ионной обработки поверхности нитрида галлия.

Ключевые слова: светодиод, нитрид галлия, омический контакт, ионная обработка.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-2-43-45

В современном мире все большее применение находят светодиодные технологии, начиная от простого использования в световой рекламе, дизайнерской подсветке и заканчивая наружным и внутренним освещением, а также полноцветными дисплеями. Однако развитие светодиодных технологий не стоит на месте, а продолжается поиск путей совершенствования светодиодов, особенно для применения в качестве освещения. В основном для этого применяются светодиоды на основе нитрида галлия (GaN), позволяющего изготовить яркие светодиодные кристаллы синего и зеленого цвета свечения.

Одним из основных этапов изготовления светодиодного кристалла является формирование омических контактов для *n*- и *p*-слоев нитрида галлия. Для этой цели используется технология послойного напыления системы металлов на поверхность нитрида галлия с последующим процессом отжига. Наиболее распространенным вариантом омического контакта к *n*-слою нитрида галлия является система металлов Ti/Al/Ni/Au с различным соотношением Ti/Al, полученная методом электронно-лучевого испарения с последующим процессом быстрого термического отжига в среде азота при температурах свыше 700 °С [1–4]. Значение удельного контактного сопротивления составляет $\sim 10^{-6}$ Ом·см² [5].

На рис. 1 представлены схематический вид планарной и вертикальной конструкции светодиодного кристалла. Для планарной конструкции светодиода формирование омического контакта к *n*-слою GaN осуществляется до формирования омического контакта к *p*-слою GaN. Таким образом, проведение процесса отжига контакта к *n*-слою при температурах 700–800 °С не оказывает влияния на характеристики контакта к *p*-слою GaN. Однако также сообщается, что высокотемпературный отжиг приводит к скорейшей деградации контакта и уменьшению срока службы светодиодного кристалла [6]. С другой стороны, современные тенденции развития светодиодов и увеличение их рабочего тока требуют перехода от планарной конструкции кристалла к вертикальной конструкции [7]. Изготовление светодиода вертикальной конструкции заключается в сплавлении эпитаксиальной структуры с пластиной крем-

ния и лазерном отделении сапфировой подложки [8]. Таким образом, формирование омического контакта к *n*-GaN проводится после отделения сапфира на заключительных этапах технологического маршрута. В этом случае проведение процесса отжига при температуре 700–800 °С неприемлемо, а температурная граница отжига будет определяться температурой плавления эпитаксиальной структуры с пластиной кремния.

Рис. 1. Схематический вид конструкций светодиодного кристалла: а – планарной; б – вертикальной

Согласно работе [9] применение ионной обработки поверхности *n*-слоя нитрида галлия непосредственно перед напылением металлов позволяет производить формирование омического контакта к *n*-слою GaN без проведения процесса отжига. Современные установки электронно-лучевого напыления оснащены необходимым оборудованием: источниками ионов для проведения предварительных обработок образцов перед напылением. В данной работе проводится оценка влияния ионной обработки с различной скоростью расхода газа на значение удельного контактного сопротивления. Также рассматривается влияние процесса отжига при различных температурах на изменение удельного контактного сопротивления.

Эксперимент

В работе были использованы эпитаксиальные структуры GaN с *n*-слоем толщиной 5 мкм, легированного кремнием с концентрацией 10^{18} см⁻³. Создание омического контакта к *n*-слою GaN осуществлялось следующим образом: в первую очередь на поверхности образцов была сформирована фоторезистивная маска; после этого осуществлялась жидко-

стная химическая обработка образцов в буферном растворе в течение 7 мин; затем проводилось последовательное нанесение системы металлов Ti/Al/Ni/Au (10/100/30/100 нм) методом электронно-лучевого напыления. Непосредственно перед напылением образцы были подвергнуты ионной обработке в среде аргона. Специально для этого установка оснащена бессеточным источником ионов Холла ЕН400 для проведения процессов обработки и напыления в одном вакуумном цикле. Заключительным этапом создания омического контакта является удаление фоторезистивной маски. Кроме этого, запланирована возможность проведения процесса отжига изготовленного контакта. Измерение параметров контактов осуществлялось до и после отжига.

Для оценки удельного контактного сопротивления был использован метод CTLM (circular transmission line method), использующий радиальную геометрию контактных площадок. Метод заключается в измерении сопротивления между контактными площадками с дальнейшим пересчетом в удельное контактное сопротивление [10]. Схематический вид тестов представлен на рис. 2. Расстояние между площадками составляет 10, 15, 20, 25 и 30 мкм при фиксированном размере внешнего радиуса 100 мкм.

Рис. 2. Схематический вид тестов CTLM для измерения удельного контактного сопротивления

Результаты

Были проведены эксперименты по влиянию ионной обработки на формирование омического контакта к *n*-слою нитрида галлия. Получено, что использование предварительной ионной обработки поверхности образца в течение 5 мин при скорости расхода газа 30 см³/мин позволяет получить значение удельного контактного сопротивления $\rho_c \sim 10^{-6}$ Ом·см² без проведения процесса отжига контактов (рис. 3). Увеличение скорости расхода газа вначале приводит к уменьшению контактного сопротивления, однако при дальнейшем росте значение удельного контактного сопротивления увеличивается.

Уменьшение удельного контактного сопротивления вызвано эффектом ионной бомбардировки поверхности нитрида галлия. В работах [11, 12] утверждается, что в результате ионной бомбардировки, на поверхности структуры формируются дополнительные вакансии азота, которые выступают в качестве доноров. С увеличением скорости расхода газа возрастает плотность плазмы, а следовательно, и число ионов, бомбардирующих структуру. Однако ионная бомбардировка также вызывает кристаллические дефекты в структуре, которые могут ухудшать качество эпитаксиального слоя и увеличивать значение контактного сопротивления [13].

Увеличение времени процесса ионной обработки приводит к уменьшению удельного контактного сопротивления (рис. 4).

Рис. 3. Зависимость удельного контактного сопротивления от скорости расхода газа во время ионной обработки, время процесса обработки 5 мин без отжига

Рис. 4. Зависимость удельного контактного сопротивления от продолжительности процесса ионной обработки, скорость расхода газа 30 см³/мин без отжига

Таким образом, проведенные эксперименты позволяют провести выбор оптимальных параметров ионной обработки для получения минимального значения удельного контактного сопротивления, а именно, скорости расхода газа и времени обработки ионным потоком. Выбранный в данной работе режим ионной обработки со скоростью расхода газа 30 см³/мин и временем обработки 20 мин, позволил получить значение удельного контактного сопротивления $\rho_c = 3,9 \cdot 10^{-7}$ Ом·см² без проведения процесса отжига.

Кроме этого, были проведены исследования влияния температуры последующего отжига на значения удельного контактного сопротивления. Образцы были подвергнуты быстрому термическому отжигу в течение 30 с в среде азота при различных температурах, при параметрах ионной обработки 30 см³/мин, 20 мин. Результаты измерений представлены на рис. 5.

Видно, что в результате отжига при температурах 100–400 °С произошло увеличение удельного контактного сопротивления. Величина удельного контактного сопротивления увеличивается с ростом температуры процесса отжига. Однако при температурах отжига выше 400 °С величина удельного контактного сопротивления начинает уменьшаться.

Объяснение такого изменения контактного сопротивления может быть следующим. В результате воздействия температуры осуществляется отжиг дефектов, сформированных в процессе ионной обработки. С ростом температуры процесса отжига уменьшается количество сформированных дефектов (вакансии азота), что отражается в росте контактно-

го сопротивления. Однако при температурах выше 400 °С начинается другой механизм формирования контакта за счет диффузии Al к границе GaN. Повышение температуры увеличивает количество алюминия, диффундирующего к границе, а следовательно, уменьшается значение контактного сопротивления.

Рис. 5. Зависимость удельного контактного сопротивления от температуры отжига

Заключение

Показано, что применение ионной обработки поверхности структуры непосредственно перед напылением системы металлов позволяет сформировать омический контакт к *n*-слою GaN без использования процесса отжига. При ионной обработке со скоростью расхода газа 30 см³/мин и временем обработки 20 мин возможно получение значения удельного контактного сопротивления $\rho_c = 3,9 \cdot 10^{-7}$ Ом·см². Однако последующее воздействие температуры приводит к увеличению удельного контактного сопротивления. Таким образом, представленный метод может быть использован при формировании омического контакта к *n*-слою нитрида галлия в процессе изготовления светодиодов вертикальной конструкции.

Литература

1. Желаннов А.В. Исследование контактной системы Ti/Al/Ni/Au для диодных структур на основе нитрида галлия / А.В. Желаннов, В.Е. Удальцов, А.В. Падорин // Вестник НовГУ. — 2010. — № 60. — С. 65–69.
2. Masakatsu M. Ohmic contact mechanism of titanium-based electrodes on n-type gallium nitride / M. Masakatsu, Y. Takao, T. Yasuo // Transactions of JWRI. — 2012. — Vol. 41, No. 1. — P. 45–48.
3. The role of Al on ohmic contact formation on n-type GaN and AlGaIn/GaN / W. Ruythooren, J. Derluyn, B. Van Daele et al. // Applied Physics Letters. — 2005. — Vol. 87, 061905. — P. 1–3.
4. Comparison between TiAl and TiAlNiAu ohmic contacts to n-type GaN / B. Boudart, S. Trassaert, X. Wallart et al. // J. of Electronic Materials. — 2000. — Vol. 29, No. 5. — P. 603–606.
5. Бланк Т.В. Механизмы протекания тока в омических контактах металл–полупроводник / Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдберг // Физика и техника полупроводников. — 2007. — Т. 41, вып. 11. — С.1281–1308.
6. Macherzynski W. Chemical analysis of Ti/Al/Ni/Au ohmic contacts to AlGaIn/GaN heterostructures / W. Macherzynski, K. Indykiewicz, B. Paszkiewicz // Optica Applicata. — 2013. — Vol. 43, No. 1. — P. 67–72.
7. GaN-based thin film vertical structure light emitting diodes fabricated by modified laser lift-off process and transferred to Cu / S. Yong-Jian, Y. Tong-Jun, J. Chuan-Yu et al. // Chinese Physics Letters. — 2010. — Vol. 27, No. 12. — P. 127303.
8. Laser lift-off GaN thin-film photonic crystal GaN-based light emitting diodes / H.K. Cho, S.K. Kim, D.K. Bae et al. // IEEE Photonics Technology Letters. — 2008. — Vol. 20, No. 24. — P. 2096–2098.
9. Very low resistance multilayer ohmic contact to n-GaN / Z. Fan, N. Mohammad, W. Kim, et al. // Applied Physics Letters. — 1996. — Vol. 68, No. 12. — P. 1672–1674.
10. Marlow G.S. The effects of contact size and non-zero metal resistance on the determination of specific contact resistance / G.S. Marlow, M.B. Das // Solid-State Electronics. — 1982. — Vol. 25, No. 2. — P. 91–94.
11. Chen J.Y. Electrical and optical changes in the near surface of reactively ion etched n-GaN / J.Y. Chen, C.J. Pan, G.C. Chi // Solid-State Electronics. — 1999. — Vol. 43, No. 3. — P. 649–652.
12. Lee J.M. Dry etch damage in n-type GaN and its recovery by treatment with an N₂ plasma / J.M. Lee, K.M. Chang, S.W. Kim et al. // J. of Applied Physics. — 2000. — Vol. 87, No. 11. — P. 7667–7670.
13. Lee C.C. Low resistance ohmic contacts to n-GaN by Ar plasma and forming gas ambient treatments / C.C. Lee, C.P. Lee, M.H. Yeh et al. // J. of Vacuum Science and Technology B. — 2003. — Vol. 21, No. 4. — P. 1501–1504.

Засухин Дмитрий Иннокентьевич

Аспирант каф. квантовой электроники и фотоники
Томского государственного университета,
инженер-конструктор АО «НИИ полупроводниковых приборов»
Тел.: +7-961-892-76-47
Эл. почта: zasuhinDI@mail.ru

Минин Олег Николаевич

Аспирант каф. КСУП ТУСУРа, инженер-технолог
АО «НИИ полупроводниковых приборов»
Тел.: +7-913-111-30-97
Эл. почта: dddai@mail.ru

Викторова Елена Александровна

Инженер-технолог АО «НИИ полупроводниковых приборов»
Тел.: +7-909-540-43-58
Эл. почта: eaviktorova@mail.ru

Zasukhin D.I., Minin O.N., Viktorova E.A.

Formation of the ohmic contact to the *n*-layer of gallium nitride using the pre-ionic treatment

The results of measurements of the specific contact resistance to the *n*-layer of gallium nitride of the Ti/Al/Ni/Au system are presented. The effect of the parameters of pre-ionic surface treatment, namely the gas flow rate and the process time, on the value of the specific contact resistance was investigated. For the first time the dependence of the specific contact resistance on the annealing temperature after pre-ionic surface treatment was obtained.

Keywords: light-emitting diode, gallium nitride, ohmic contact, ionic treatment.