

06;12

Гетероструктуры AlN/AlGaN для селективно-чувствительных MSM-детекторов ультрафиолетовой части спектра

© С.В. Аверин,¹ П.И. Кузнецов,¹ В.А. Житов,¹ Н.В. Алкеев,¹ В.М. Котов,¹ А.А. Дорофеев,² Н.Б. Гладышева²

¹ Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники РАН,
141190 Фрязино, Московская область, Россия
e-mail: sva278@ire216.msk.su

² Федеральное государственное унитарное предприятие «Пульсар»,
105187 Москва, Россия
e-mail: mail6@pulsarnpp.ru

(Поступило в Редакцию 8 апреля 2010 г. В окончательной редакции 5 июля 2010 г.)

MSM-фотодетекторы на основе AlN/AlGaN-гетероструктур обладают низкими значениями темновых токов, а спектральные характеристики демонстрируют возможность использования для селективно-чувствительного солнечно-слепого детектирования с максимумом чувствительности на длине волны 240 nm.

Твердые растворы на основе GaN являются перспективными полупроводниковыми материалами для создания фотодетекторов и излучателей ультрафиолетовой части спектра. Нитриды обладают высокой скоростью дрейфа носителей, чрезвычайно устойчивы к агрессивным воздействиям окружающей среды, а подбором мольного состава длина волны фотодетектора может подстраиваться в довольно широком диапазоне длин волн (200–400 nm) [1,2]. Использование гетероструктур AlN/AlGaN позволяет создавать селективно-чувствительные солнечно-слепые фотодетекторы. Фотодиодные структуры на основе выпрямляющих контактов в системе металл–полупроводник–металл (в английской аббревиатуре — MSM) являются наиболее удобными для создания таких детекторов. Они не требуют выращивания полупроводниковых слоев *p*-типа легирования, могут быть изготовлены с использованием групповых методов технологии, в то же время емкость MSM-диодов при равной площади составляет 1/4 емкости PIN-диода [3].

В настоящей работе описывается технология гетероструктур AlN/AlGaN для селективно-чувствительных MSM-детекторов ультрафиолетовой части спектра и представляются результаты их экспериментальных исследований.

Гетероструктуры (рис. 1) выращивались на Al₂O₃ (0001) подложках методом MOCVD (химическое газофазное осаждение из металлоорганических соединений) при давлении 40–60 mbar. Вначале при температуре 1050°C выращивался буферный слой AlN толщиной 110 nm. Ранее было показано, что использование буферного слоя позволяет выращивать эпитаксиальные слои AlGaN с уменьшенной плотностью дефектов [4]. Этот слой одновременно является и фильтрующим, его роль заключается в том, чтобы отсечь влияние излучения с длиной волны < 200 nm на отклик детектора при освещении детектора со стороны подложки. Активный слой Al_{0,6}Ga_{0,4}N (300 nm) отделен от фильтрующего слоя тонким изолирующим слоем Al_{0,8}Ga_{0,2}N

толщиной 50 nm. Скорость роста слоев AlGaN составляла 0.8 Å/s, их толщина контролировалась *in situ* рефлектометрией. Мольное содержание Al определялось по спектрам катодолюминесценции и пропускания (рис. 2) исходя из известной зависимости граничной длины волны от состава твердого раствора Al_xGa_{1-x}N [5]. Узкий пик интенсивности сигнала катодолюминесценции (полная ширина сигнала, измеренная на половине его амплитуды, FWHM=190 meV) является свидетельством высокого кристаллического и оптического совершенства выращенного эпитаксиального AlGaN и подтверждается измерением полуширины рентгеновской кривой качания в области отражения (0002), FWHM=120''.

На выращенных таким образом гетероструктурах были изготовлены MSM-диоды. MSM-диод представляет собой планарное устройство, состоящее из двух встречно-штыревых контактов, сформированных на поверхности активного слоя Al_{0,6}Ga_{0,4}N (рис. 1). Для наших образцов гребенчатые контакты MSM-диодов были изготовлены методами фотолитографии при осаждении и последующим *lift-off* Ni и Au (250 nm). Ширина встречно-штыревых контактов и расстояние между ни-

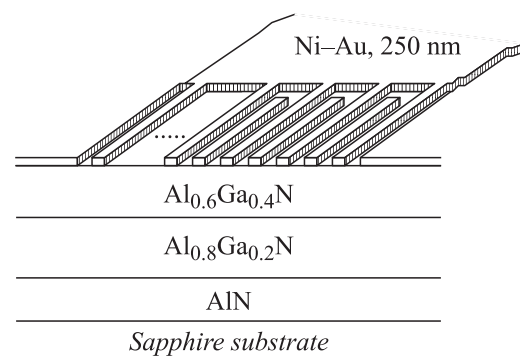


Рис. 1. Последовательность полупроводниковых слоев исследуемых гетероструктур и встречно-штыревые контакты MSM-диода.

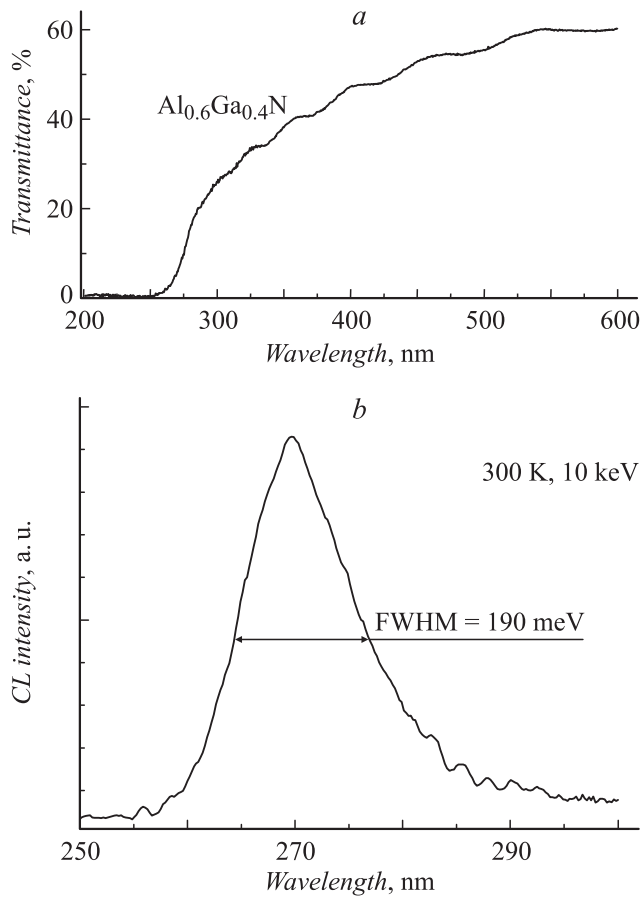


Рис. 2. Оптическая прозрачность образца (а) и интенсивность сигнала катодолуминесценции (b).

ми равнялись $2\ \mu\text{m}$, размеры активной площади диода составляли $90 \times 90\ \mu\text{m}$.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) изготовленных диодных структур были исследованы при комнатной температуре на анализаторе параметров полупроводниковых приборов Agilent В 1500 и показывали очень низкую величину темнового тока. Для встречно-штыревых Шоттки барьерных контактов из Ni–Au на $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$ величина темнового тока составляет 10 pA при смещении 20 V. Это ниже, чем недавно опубликованные 72 pA при 10 V для MSM-диодов на гетеробарьерных слоях $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}/\text{GaN}$ [6]. Темновой ток в значительной степени определяет чувствительность фотодетектора и зависит от параметров барьера Шоттки. Его низкое значение подтверждает высокое качество выращенных AlGaN эпитаксиальных слоев. Анализ ВАХ исследуемых диодов показал, что темновой ток описывается в рамках диодной теории выпрямления. Коэффициент идеальности контактов находится в пределах 1.1–1.2, что свидетельствует о высоком качестве исследуемых Шоттки-барьеров MSM-диода. Высота потенциального барьера Шоттки определялась по температурной зависимости тока насыщения обратносмещенного контакта MSM-диода [7] и составила 1.1 eV, что находится в

хорошем соответствии с опубликованными данными для Ni–Au-контактов к $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ [8].

Исследование спектральных характеристик AlGaN MSM-диодов показало, что при освещении со стороны подложки структуры имеют высокую чувствительность в области спектра с энергиями, превышающими ширину запрещенной зоны активного слоя $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$ ($\lambda = 250\ \text{nm}$), и обеспечивают незначительный отклик при меньших энергиях (рис. 3). В области длин волн $< 200\ \text{nm}$ отклик детектора почти полностью подавлен за счет поглощения в фильтрующем слое AlN. Детектор обладает высокой спектральной избирательностью, FWHM спектрального отклика детектора составляет 46 nm (рис. 3). При освещении образца со стороны встречно-штыревых контактов отклик детектора не имел ярко выраженной селективной чувствительности, он показывал максимум чувствительности на длине волны $\sim 240\ \text{nm}$, с последующим постепенным снижением сигнала при продвижении в область высоких энергий, что обусловлено сильной поверхностной рекомбинацией фотогенерированных носителей.

Детекторы позволяют использовать высокие рабочие напряжения. В эксперименте созданные образцы фотодиодных структур выдерживали без пробоя напряжение смещения вплоть до 100 V. Это позволяет сместить энергетический порог экранирования внутреннего поля детектора в область больших значений и увеличить уровень энергии импульса сигнала оптического возбуждения фотодетектора [9]. Измерение длительности сигнала импульсного отклика детектора не было проведено из-за отсутствия пикосекундного лазера, моделирование дает для такой геометрии диодной структуры длительность сигнала отклика детектора $\sim 30\ \text{ps}$.

Интересно сравнить полученные результаты с данными других исследовательских групп. В работе [10] слой $\text{Al}_{0.58}\text{Ga}_{0.42}\text{N}$ используется в качестве „окна“ для освещения активного слоя $\text{Al}_{0.44}\text{Ga}_{0.56}\text{N}$ толщиной 180 nm. При этом пик сигнала отклика MSM-детектора соответствует длине волны излучения 270 nm, а ампер-ваттная

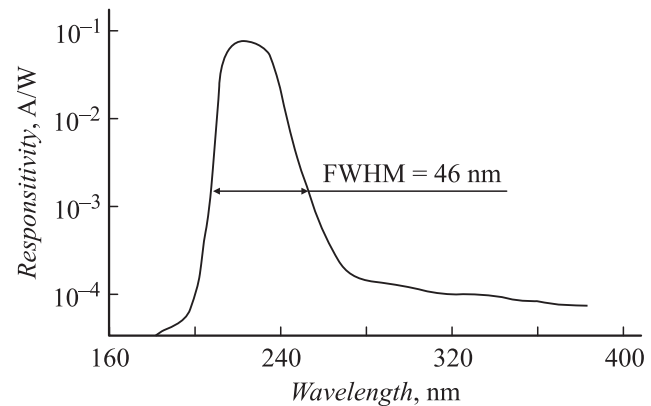


Рис. 3. Спектральная чувствительность MSM-диода на основе гетероструктуры AlN/AlGaN при освещении со стороны подложки. Напряжение смещения 10 V.

чувствительность хорошо согласуется с данными наших измерений. В работе [11] представлены результаты исследований селективно-чувствительных MSM-диодов на основе гетероструктур GaN/Al_{0.18}Ga_{0.82}N. При освещении со стороны подложки получен узкий спектральный отклик детектора в области длин волн 343–365 nm, а максимум чувствительности составил 1.35 A/W и обусловлен эффектами внутреннего фотоусиления, связанными с наличием глубоких ловушек. Следует заметить, что фотоусиление существенно снижает быстродействие фотодетектора.

В последние годы быстро развиваются исследования в области органических полимеров, используемых в качестве активных полупроводниковых материалов для диодов. Селективно-чувствительные фотовольтаические ячейки на основе гетероструктуры PEDOT-PSS/SrTiO₃:Nb имеют коэффициент идеальности контакта 1.9 при высоте барьера Шоттки 1.4 eV [12]. Чувствительность таких диодов (0.05 AW в диапазоне волн 290–320 nm) пока еще уступает гетеробарьерным диодам на основе AlGaN, темновые токи также превышают величины, достигнутые в наших исследованиях. В отличие от цитируемых работ спектральная чувствительность нашего MSM-диода смещена с область более коротких длин волн, что обеспечивает „солнечно-слепое“ селективно-чувствительное детектирование оптических сигналов в достаточно узком диапазоне длин волн 210–250 nm.

Заключение

Изготовлены и исследованы селективно-чувствительные солнечно-слепые MSM-фотодетекторы на основе AlN/AlGaN-гетероструктур. Эпитаксиальные слои AlN/AlGaN выращены методом MOCVD на сапфировых подложках и позволяют осуществить режим подсветки детектора с обратной стороны, предотвращая потери света за счет отражения от контактов. Детекторы обладают низкими значениями темновых токов, а их спектральные характеристики демонстрируют возможность использования для селективно-чувствительного солнечно-слепого детектирования с максимумом чувствительности на длине волны 240 nm. Непосредственно на MSM-диодной структуре были измерены высота потенциального барьера контакта Шоттки (1.1 eV) и коэффициент идеальности контакта (1.1–1.2). Эти параметры свидетельствуют о высоком качестве исследуемых барьеров Шоттки MSM-диода. Детекторы могут использовать высокие рабочие напряжения смещения. Это позволяет сместить энергетический порог экранирования внутреннего поля детектора в область больших значений и увеличить уровень сигнала оптического возбуждения фотодетектора.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 09-07-00047).

Список литературы

- [1] Бланк Т.Б., Гольдберг Ю.А. // ФТП. 2003. Т. 37. Вып. 9. С. 1025–1055.
- [2] Ambacher O. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1998. Vol. 31. N 20. P. 2653–2710.
- [3] Аверин С.В., Гуляев Ю.В., Дмитриев М.Д., Потапов В.Т., Сапо П. // Квант. электрон. 1996. Т. 23. № 3. С. 284–286.
- [4] Аверин С.В., Кузнецов П.И., Житов В.А., Захаров Л.Ю., Якущева Г.Г. // Тез. 6-й Всеросс. конф. „Полупроводники-2005“. М., 2005. С. 281.
- [5] Yun F., Reshnikov M.A., He L., King T. et al. // J. Appl. Phys. 2002. Vol. 92. N 8. P. 4837–4839.
- [6] Seo In.-S., Lee In.-H., Park Y.-J., Lee Ch.-R. // J. Crystal Growth. 2003. Vol. 252. N 1–3. P. 51–57.
- [7] Averin S.V., Chan Y.C., Lam Y.L. // Appl. Phys. Lett. 2000. Vol. 77. N 2. P. 274–276.
- [8] Su Y.K., Chang P.C., Chen C.H. et al. // Solid State Electron. 2005. Vol. 49. N 3. P. 459–463.
- [9] Averin S.V., Sachot R. // Solid State Electron. 2000. Vol. 44. N 9. P. 1627–1634.
- [10] Wong M.M., Chowdhury U., Collins C.J. et al. // Phys. Stat. Sol.(a). 2001. Vol. 188. N 1. P. 333–336.
- [11] Zang S.K., Wang W.B., Shtau I. et al. // Appl. Phys. Lett. 2002. Vol. 81. N 25. P. 4862–4864.
- [12] Yamaura J., Muraoka Y., Yamauchi T. et al. // Appl. Phys. Lett. 2003. Vol. 83. N 11. P. 2097–2099.