

06

Солнечно-слепые УФ-фотокатоды на основе гетероструктур AlGaN с границей спектральной чувствительности в диапазоне 300–330 nm

© М.Р. Айнбунд, А.Н. Алексеев, О.В. Алымов, В.Н. Жмерик, Л.В. Лапушкина, А.М. Мизеров, С.В. Иванов, А.В. Пашук, С.И. Петров

ОАО «ЦНИИ „Электрон“», Санкт-Петербург
ЗАО „Научное и технологическое оборудование“ (НТО), Санкт-Петербург
E-mail: petrov@semiteq.ru
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию 24 октября 2011 г.

Одним из важных применений структур на основе нитридов металлов третьей группы является создание так называемых солнечно-слепых ультрафиолетовых фотоприемников на основе фотокатодов. В большинстве работ по этой теме упоминаются фотокатоды с активной областью p -GaN с длинноволновой границей чувствительности 360 nm. Однако поскольку регистрируемые излучения сосредоточены в основном в диапазоне менее 240–290 nm, то сдвиг длинноволновой границы чувствительности путем получения фотокатодов с активной областью p -AlGaN является чрезвычайно актуальной задачей. В данной работе представлены предварительные результаты получения фотокатодов с активной областью на основе p -Al_xGa_{1-x}N с $x = 0.1$ и 0.3 (с границей чувствительности 330 и 300 nm соответственно).

Оптические системы, работающие в ультрафиолетовой (УФ) области спектра, широко используются для наблюдения астрономических и космических объектов, высоковольтных разрядов, обнаружения пламени, факелов и других целей. Максимальная чувствительность фотоприемников в этих системах должна обеспечиваться в спектральном диапазоне с длинами волн от 240 до 290 nm, поскольку излучение в более коротковолновых диапазонах сильно поглощается атмосферой, а излучение с большими длинами волн занимает заметную часть спектра солнечной радиации [1]. В качестве удовлетворяющих данному

требованию фотоприемников (называемых в этом случае „солнечно-слепыми“) наибольшее применение получили фотокатоды (ФК) на основе теллуридов щелочных металлов CS_2Te и Rb_2Re . Наряду с этими приборами в последнее время активно разрабатываются альтернативные им полупроводниковые ФК с отрицательным электронным сродством на основе эпитаксиальных гетероструктур широкозонных нитридных соединений III группы AlGaN . Ожидается, что значения квантового выхода (Y) и крутизны спада чувствительности вблизи видимого диапазона у ФК на основе этого материала будут существенно улучшены. Кроме того, существенным достоинством приборов на основе соединений $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ является возможность управления в них длинноволновой границей фоточувствительности в пределах от 360 до 200 нм за счет изменения состава твердого раствора ($x = 0-1$ соответственно). Однако до сих пор большинство известных нам публикаций посвящено разработке ФК на основе структур, использующих в качестве активного слоя бинарное соединение $\text{GaN} : \text{Mg}$ с фиксированной длинноволновой границей 360 нм [2,3]. Несмотря на упоминаемую во многих работах актуальность сдвига этой границы в сторону меньших длин волн, экспериментальные данные по разработке таких ФК практически отсутствуют [4].

В данной работе представлены результаты по ФК с активной областью $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{N} : \text{Mg}$ и $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N} : \text{Mg}$, которые демонстрируют коротковолновый сдвиг спектральной чувствительности по сравнению с аналогичными структурами на основе бинарного соединения GaN .

Гетероструктуры AlGaN были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии с использованием в качестве источника активного азота как высокотемпературного крекинга аммиака, так и плазменной активации молекулярного азота. С этой целью соответственно использовались установки STE3N2 (ЗАО „НТО“, SemiTEq) в Прикладной лаборатории ЗАО „НТО“ и Compact 21T (Riber, Франция) в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. С помощью первого метода на подложках $c\text{-Al}_2\text{O}_3$ выращивались буферные слои, состоявшие из последовательности слоев AlGaN/AlN общей толщиной $\sim 1 \mu\text{m}$. Используя при этом экстремально высокие температуры подложки $T_s = 950-1150^\circ\text{C}$ позволили значительно уменьшить плотность дислокаций в активной области до концентрации $8 \cdot 10^8 - 1 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$ [5]. После переноса структуры с буферным слоем во вторую установку она подвергалась кратковременному отжигу при температуре 700°C , после чего на ней выращивались

активные слои $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N} : \text{Mg}$ с различным содержанием алюминия ($x = 0.1$ и 0.3) в металлобогатых стехиометрических условиях при относительно невысокой температуре подложки $T_s = 650^\circ\text{C}$ и одинаковом потоке Mg из твердотельного эффузионного источника, как было подробно описано в [6]. Толщина активных слоев составляла 200–250 nm. Далее структуры обрабатывались на постростовой установке в ЦНИИ „Электрон“. В вакуумной камере установки, имеющей предельное давление $5 \cdot 10^{-11}$ Torr, образцы подвергались очистке методом прогрева в вакууме, после чего производилась их активировка цезием и кислородом по технологии, описанной в работе [7].

Для промежуточной характеристики гетероструктур с легированными слоями $\text{AlGaN} : \text{Mg}$ использовались растровая электронная микроскопия (РЭМ), вторичная ионная масс-спектрометрия (ВИМС) и измерения спектров низкотемпературной (20 К) фотолюминесценции (ФЛ) и спектров возбуждения ФЛ, проводившихся с помощью Хе-лампы с минимальной длиной волны $\lambda = 260$ nm.

Рис. 1 демонстрирует РЭМ-изображение приповерхностной области гетероструктуры с верхним (активным) слоем $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N} : \text{Mg}$ (перед передачей структуры на активировку), которое характеризуется наличием яркостного контраста между легированным и нелегированным слоями. Кроме того, РЭМ-изображение свидетельствует о планарной морфологии поверхности слоя. Атомарная гладкость этой поверхности подтверждается также линейчатой картиной дифракции отраженных быстрых электронов, которая наблюдалась в течение всего роста и показана на вставке рис. 1. Аналогичные контраст и морфологию поверхности демонстрировала структура с активным слоем $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N} : \text{Mg}$. Измерения с помощью ВИМС показали, что вблизи поверхности исследовавшихся слоев концентрация Mg составила $\sim 1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.

На рис. 2 приводятся спектр возбуждения ФЛ (кривая 1) с длиной волны регистрации $\lambda = 360$ nm в области низкоэнергетичной полосы ФЛ (кривая 2) для слоя $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N} : \text{Mg}$. Этот спектр позволяет оценить ширину запрещенной зоны данного слоя равной ~ 4.1 eV, что примерно соответствует задававшемуся в процессе роста составу тройного соединения [8]. Основной пик в спектре ФЛ этого слоя ($\lambda = 360$ nm) можно приписать рекомбинации доноро-акцепторных пар. Необходимо отметить сильное смещение положения этого пика относительно края поглощения — разница соответствующих энергий составила ~ 700 meV, в то время как для слоев $\text{GaN} : \text{Mg}$ аналогичная разница энергий при

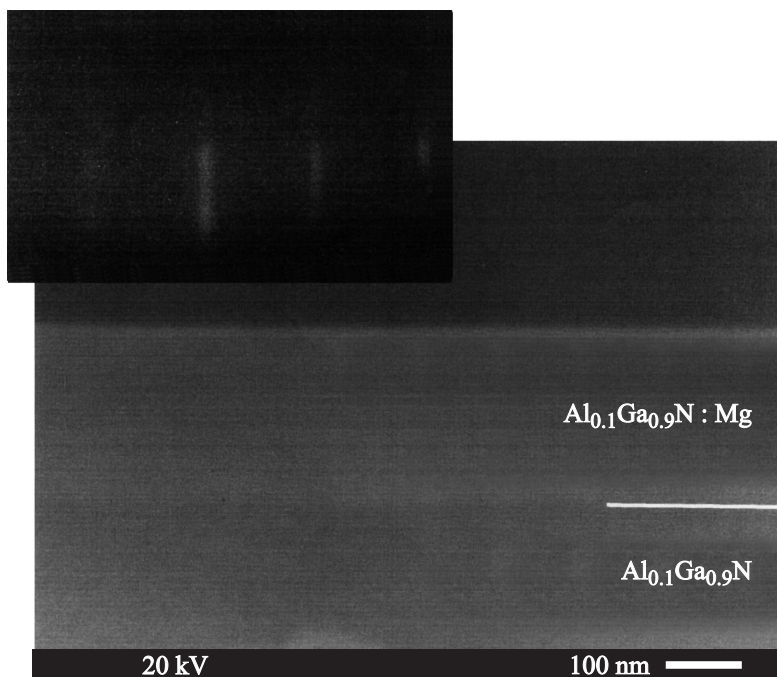


Рис. 1. РЭМ-изображение верхней части гетероструктуры с активным легированным слоем $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N} : \text{Mg}$. На вставке приводится характерная линейчатая картина дифракции отраженных быстрых электронов, наблюдавшаяся во время роста этого слоя.

той же концентрации Mg составляет $\sim 200 \text{ meV}$ [9]. Положение этого пика в тройном соединении $\text{AlGaN} : \text{Mg}$ определяется несколькими эффектами, а именно — возрастанием энергии ионизации акцепторной примеси с ростом содержания Al [10], локализацией носителей заряда на флуктуациях состава твердого раствора и неравномерностью распределения атомов Mg [11]. Данные исследования оптических свойств слоев $\text{AlGaN} : \text{Mg}$ будут продолжены.

Спектральные зависимости квантового выхода структур $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ и $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ при их освещении с лицевой (кривые 1 и 3) и тыльной стороны (кривые 4 и 5), измеренные в условиях камеры, изобра-

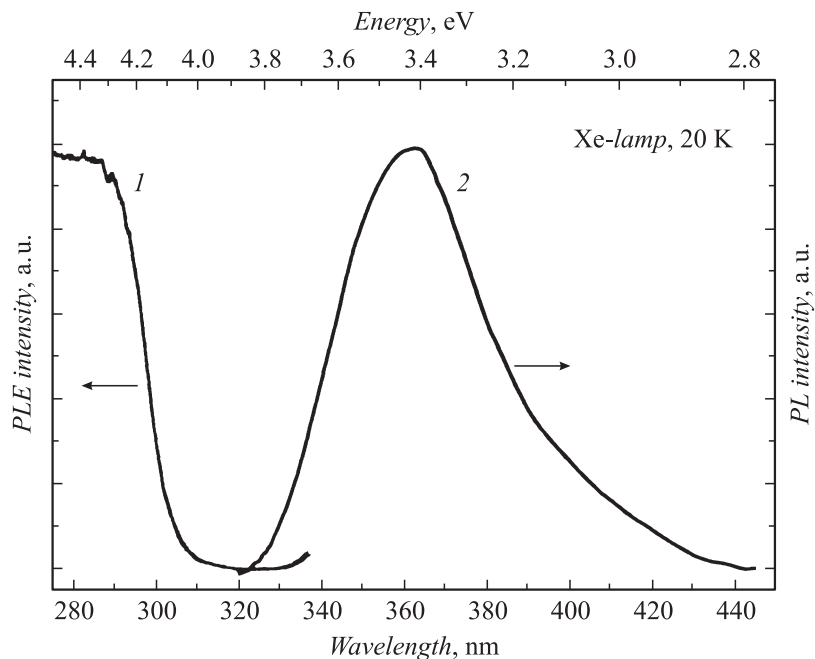


Рис. 2. Низкотемпературный (20 К) спектр возбуждения фотолюминесценции (кривая 1) с длиной волны регистрации $\lambda = 360$ нм в области низкоэнергетической полосы на спектре фотолюминесценции (кривая 2) для слоя $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N} : \text{Mg}$.

жены на рис. 3, а. При освещении с лицевой стороны был получен достаточно высокий квантовый выход $Y = 10\text{--}25\%$, а длинноволновая граница фотоэмиссии сдвинулась до 330 и 300 нм соответственно. При освещении с тыльной стороны были получены существенно меньшие чувствительности с резкими максимумами при $\lambda \approx 340$ и 300 нм (кривые 4 и 5). Такой ход спектральных характеристик связан с оптическим поглощением излучения при его прохождении через буферный слой структуры, поскольку содержание алюминия в завершающей части буферного такое же, как и в активной области $p\text{-AlGaN}$. Эти данные приведены, поскольку они показывают возможность получения узкополосных фотоприемников при использовании содержания алюминия

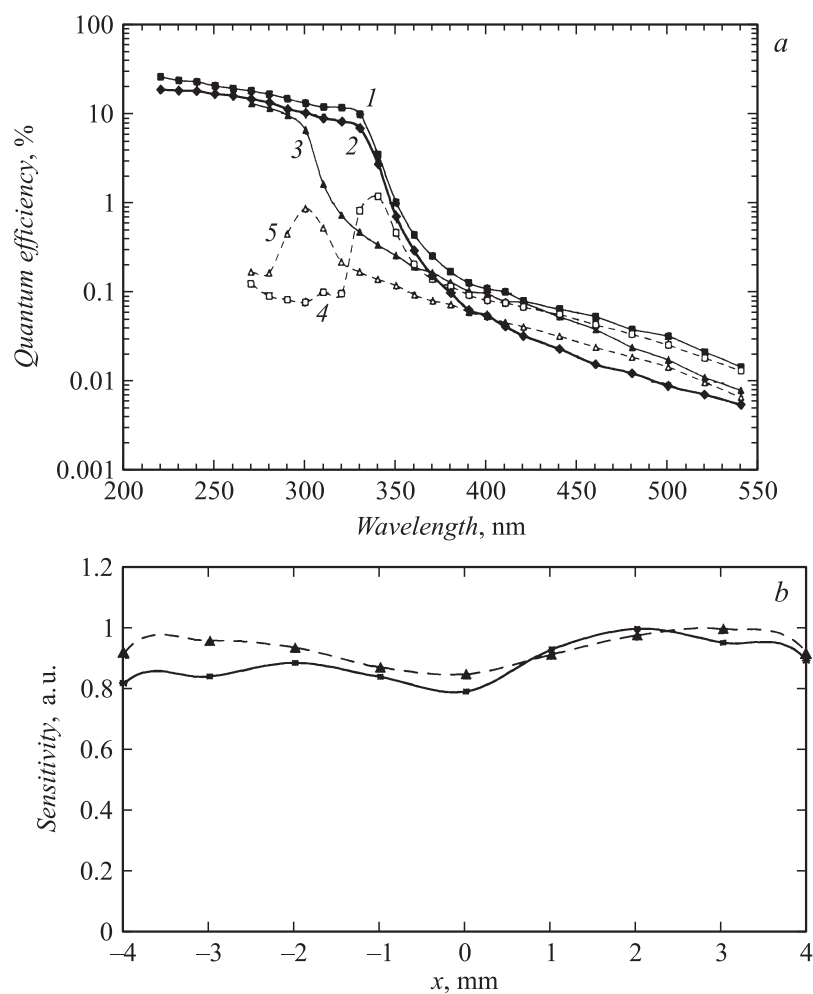


Рис. 3. *a* — зависимость квантового выхода от длины волны излучения для образцов $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ (кривые 1 и 4) и $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ (кривые 3 и 5). Кривая 2 измерена в макете фотоэлемента. *b* — зависимость чувствительности фотокатода от места облучения на $\lambda = 250 \text{ nm}$ (в макете фотоэлемента).

в завершающей части буферного слоя незначительно больше, чем в активной области.

С использованием одной из структур $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ размером $12 \times 12 \text{ nm}$ был изготовлен макет фотоэлемента с входным окном из фтористого магния. Спектральная зависимость квантового выхода структуры в макете изображена на кривой 2 (рис. 3, *a*). В фотоэлементе также были проведены измерения неравномерности спектральной чувствительности по площади фотокатода. Фотокатод облучался с лицевой стороны излучением с длиной волны 250 nm через диафрагму диаметром 1 mm. Перемещение прибора производилось относительно диафрагмы по двум взаимно перпендикулярным направлениям (по горизонтали и по вертикали). Неравномерность чувствительности фотокатода на длине 8 mm находилась в пределах $\pm 15\%$ (рис. 3, *b*), что указывает на высокую однородность свойств гетероструктуры.

Одной из важных проблем, препятствующих получению эффективных ФК с длинноволновой границей fotocувствительности менее 360 nm, является уменьшение эффективности легирования активной области $p\text{-AlGaN}$ при увеличении содержания алюминия из-за роста энергии ионизации [10]. Как видно из рис. 3, *a*, квантовый выход образцов с содержанием алюминия 10 и 30% находится примерно на одном уровне в области длинноволновой границы fotocувствительности, что предположительно указывает на достаточный уровень легирования. В настоящее время проводится оптимизация конструкции буферного слоя AlN/AlGaN , обеспечивающая, с одной стороны, уменьшение плотности дислокаций в активной области по сравнению со стандартным буферным слоем AlN , а с другой — необходимое пропускание в рабочем УФ спектральном диапазоне для получения эффективных полупрозрачных фотокатодов.

Таким образом, впервые в России представлены результаты получения фотокатодов в режиме отражения с активной областью на основе $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ с $x = 0.1$ и 0.3. Показано, что увеличение содержания алюминия в активной области позволяет сдвинуть длинноволновую границу чувствительности от 330 до 300 nm. В настоящее время проводится оптимизация конструкции буферного слоя AlN/AlGaN с целью получения эффективных фотокатодов с длинноволновой границей чувствительности менее 300 nm в режиме пропускания.

В ЗАО „НТО“ работа проводилась в рамках ГК № 02.523.11.3019 при поддержке Министерства образования и науки РФ.

Список литературы

- [1] *Айнбунд М.Р., Суриков И.Н., Чернова О.В., Чукунов В.В.* // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2007. В. 1. С. 69–74.
- [2] *Siegmund O., Vallerga J., McPhate K., Malloy J., Tremsin A., Martin A., Ulmer M., Wessels B.* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2006. V. 567. P. 89–92.
- [3] *Wang Xiaohui, Chang Benkang, Ren Ling, Gao Pin.* // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 98. P. 082109–082111.
- [4] *Sumiya M., Kato Y., Ohashi N. et al.* // Applied Surface Science. 2010. V. 256. P. 4442–4446.
- [5] *Alexeev A., Krasovitsky D., Petrov S., Chaly V.* // 16th European Molecular Beam Epitaxy Workshop, Alpe d'Huez. 2011. M3.3.
- [6] *Komissarova T.A., Jmerik V.N., Mizerov A.M., Shmidt N.M., Ber B.Ya., Kasantsev D.Yu., Ivanov S.V.* // Phys. Status Solidi C. 2009. V. 6. N S2. P. S466–S469.
- [7] *Айнбунд М.Р., Вилькин Е.Г., Пащук А.В., Петров А.С., Суриков И.Н.* // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 11. С. 14–16.
- [8] *Жмерик В.Н., Мизеров А.М., Шубина Т.В., Сахаров А.В., Ситникова А.А., Копьев П.С., Иванов С.В., Луценко Е.В., Данильчик А.В., Ржеуцкий Н.В., Яблонский Г.П.* // ФТП. 2008. Т. 42. В. 12. С. 1452–1458.
- [9] *Pozina G., Paskov P.P., Bergman K.P., Hemmingsson C., Hultman L., Monemar B., Amano H., Usui A.* // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 91. P. 221901–221903.
- [10] *Kim J.K., Waldron E.L., Li Y.-L., Gessmann Th., Schubert E.F., Jang H.W., Lee J.-L.* // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 84. P. 3310–3312.
- [11] *Reshchikov M.A., Yi G.-C., Wessels B.W.* // Phys. Rev. B. 1999. V. 59. N 20. P. 13176–13183.