

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Измерение емкости и диэлектрических потерь планарных конденсаторов на сегнетоэлектрической плёнке в диапазоне СВЧ / М. М. Гайдуков, А. Б. Козырев, А. С. Рубан и др. // Радиотехника и электроника. 1975. Т. 20, вып. 12. С. 2588–2591.
2. Вендик О. Г., Зубко С. П., Никольский М. А. Моделирование и расчет емкости планарного конденсатора, содержащего тонкий сегнетоэлектрический слой // ЖТФ. 1999. Т. 69, вып. 4. С. 1–7.
3. Вендик О. Г., Зубко С. П. Размерный эффект в сегнетоэлектриках типа смещения // Кристаллография. 2004. Т. 49, вып. 5. С. 1–7.
4. Vendik O. G., Zubko S. P. Ferroelectrics as Constituents of Tunable Metamaterials, in "Theory and Phenomena of Metamaterials" / ed. by F. Capolino. Boca Raton: CRC Press, 2009. P. 33–1–33–43.
5. Vendik O. G., Zubko S. P., Medvedeva N. Yu. "Dead Layer" Characteristics Based on a Correlation of the Ferroelectric Polarization under Relevant Boundary Conditions in a Parallel Plate Capacitor // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 105, iss. 5. P. 053515(1–4).
6. Thickness and Dielectric Constant of Dead Layer in Pt/(Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub>/YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> Capacitor / B. Chen, H. Yang, L. Zhao, J. Miao, B. Xu, X. G. Qiu, B. R. Zhao // Appl. Phys. Lett. 2004. Vol. 84, iss. 4. P. 583–585.

S. P. Zubko, A. G. Gagarin, N. Yu. Medvedeva  
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

### Effective dielectric permittivity of ferroelectric film included in parallel-plate and planar ferroelectric capacitors

*The characteristics of parallel-plate and planar ferroelectric capacitors are investigated experimentally and theoretically. The size effect in Ba<sub>0.3</sub>Sr<sub>0.7</sub>TiO<sub>3</sub> included into parallel-plate and planar capacitors is studied.*

Thin film, size effect, ferroelectrics, capacitor

Статья поступила в редакцию 18 ноября 2015 г.

---

УДК 621.315.592

С. А. Тарасов, И. А. Ламкин, А. С. Евсеенков, И. И. Михайлов, А. В. Соломонов  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Селективные фоточувствительные структуры на основе барьера Шотки Au–AlGaN

*Созданы и исследованы селективные фоточувствительные структуры на основе барьера Шотки Au–AlGaN для ультрафиолетового диапазона спектра. Показаны методы управления спектром фоточувствительности за счет применения эффектов широкозонного окна и надбарьерного переноса в структурах Au–AlGaN. Получены фотодиоды с полушириной спектра фоточувствительности 5...6 нм для длин волн 351...373 нм и чувствительностью до 140 мА/Вт.*

### Фотодиод, AlGaN, ультрафиолетовая область, барьер Шотки

Фоточувствительные структуры и приборы на их основе в настоящее время широко используются практически во всех областях человеческой деятельности [1], [2]. В последние годы для ряда военных и гражданских применений все более востребованными становятся фотоприемники, обладающие чувствительностью в ультрафиолетовой (УФ) части спектрального диапазона [3]. Одним из наиболее актуальных примеров исполь-

зования подобных приборов являются системы УФ-локации, способные эффективно обнаруживать аппараты различного назначения по УФ-составляющей излучения реактивной струи, в том числе находящиеся в космическом пространстве [4]. К гражданским применениям можно отнести: контроль уровня УФ-излучения при обеззараживании воды и при некоторых медицинских процедурах; экологический мониторинг, включая ис-

следования состояния озонового слоя и обнаружение озоновых дыр; создание систем безопасности, в частности датчиков пламени и загрязнения; а также ряд других научных и хозяйственных задач. Для большинства перечисленных применений необходимы селективные детекторы, нечувствительные к излучению видимого диапазона спектра, так называемые видимослепые фотодетекторы, а в некоторых случаях – и солнечно-слепые фотоприемники, способные корректно обнаруживать УФ-сигнал в условиях сильной фоновой засветки солнечным излучением [5]. Без применения дорогостоящих оптических фильтров это можно реализовать только за счет использования широкозонных полупроводниковых материалов с шириной запрещенной зоны 3 эВ и более [6], [7].

Для успешного внедрения подобных детекторов в производство необходима разработка технологии их создания, в рамках которой можно достичь высоких параметров приборов при сохранении их невысокой себестоимости. Одним из перспективных вариантов является использование структур на основе барьера Шотки, что должно позволить создать высокоэффективные фотодетекторы сравнительно простыми и малозатратными методами [8].

**Исследованные образцы.** Были изготовлены и исследованы фоточувствительные структуры на основе контакта металл–AlGa<sub>0.9</sub>N с различными долями AlN в составе твердого раствора (рис. 1). В качестве подложки использовался сапфир. На подложке методом хлоридно-гидридной эпитаксии вначале выращивались буферные слои AlGa<sub>0.9</sub>N переменного состава, призванные уменьшить количество дислокаций в верхнем эпитаксиальном слое. Состав буферных слоев подбирался таким образом, чтобы их ширина запрещенной зоны (ШЗЗ) была больше, чем ШЗЗ верхнего эпитаксиального слоя. Это позволило избежать поглощения в буферном слое при обратной засветке образцов (со стороны подложки). Верхний эпитаксиальный слой выполнял роль полупроводника

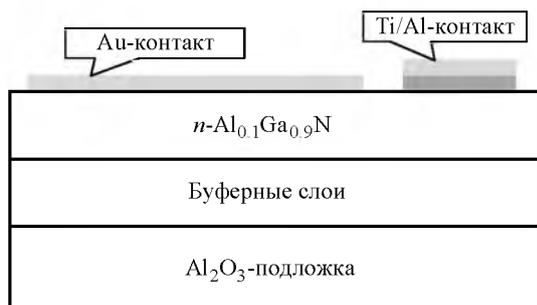


Рис. 1

для контакта Шотки и содержал в своем составе 6–10 % AlN. В некоторых образцах между буферным и верхним эпитаксиальным слоями была добавлена дополнительная прослойка GaN, выполнявшая роль широкозонного окна.

Металлические слои наносились методом вакуумного резистивного осаждения при давлении остаточных газов не выше  $10^{-5}$  мм рт. ст. Омические контакты создавались на основе алюминия с предварительным нанесением подслоя титана по описанной ранее методике [9], [10].

Основное внимание в работе было уделено исследованию спектральных характеристик образцов. Для этого использовалась автоматизированная установка на основе дифракционного монохроматора с источником света на базе ксеноновой лампы. Также исследовались остальные важнейшие характеристики фоточувствительных структур, включая вольт-амперные и ватт-амперные характеристики, а также определены их чувствительности, обнаружительные способности и другие рабочие параметры.

**Экспериментальные результаты и их обсуждение.** Созданные структуры Au–AlGa<sub>0.9</sub>N исследовались в двух режимах освещения: при использовании "прямой" засветки, когда структуры освещались со стороны металлического выпрямляющего контакта, и "обратной" засветки, когда структуры освещались со стороны подложки. В первом случае наблюдался широкополосный спектр фоточувствительности, а во втором – узкополосный, что позволило реализовать ультрафиолетовые фотодетекторы с высокой степенью селективности.

Рассмотрим результаты исследования структур на основе твердого раствора Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N (рис. 1). При прямой засветке структура проявляла фоточувствительность в диапазоне от 200 до 375 нм. При этом на спектре чувствительности наблюдалось два максимума (1 – рис. 2). Длинноволновый максимум на длине волны 353 нм связан с проявлением эффекта надбарьерного переноса. Этот эффект возникает в барьере Шотки в случае, когда энергия падающих фотонов меньше ширины запрещенной зоны полупроводника, но превышает высоту потенциального барьера "металл–полупроводник" ( $q\phi_b < h\nu < E_g$ ). При этом электроны из металла могут переходить в полупроводник, преодолев потенциальный барьер  $q\phi_b$ . Коротковолновый максимум при 346 нм связан с поглощением на переходе "зона–зона" в полупроводнике и наблюдается при энергии фотона, пре-

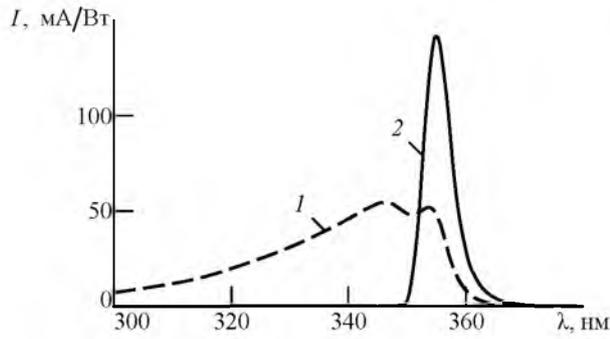


Рис. 2

вышающей ширину запрещенной зоны ( $h\nu > E_g$ ). Это означает, что поглощение происходит преимущественно в слое объемного заряда полупроводника аналогично тому, что происходит в фотодиодных структурах на основе  $p-n$ -перехода. Полуширина спектральной линии составила 30 нм.

При освещении со стороны подложки образец проявлял фотоответ в существенно меньшем диапазоне: от 350 до 375 нм (2 – рис. 2). Максимум наблюдался при 355 нм, а полуширина спектральной линии составила 6 нм. Таким образом, структура представляет селективный видимослепой фотодетектор ультрафиолетового диапазона. Объяснить вид спектральной характеристики можно на основе сравнения процессов, происходящих в образце при прямой и обратной засветке. Как указывалось ранее, при прямой засветке образца фотонами с энергией  $h\nu > q\phi_b$  в металле возбуждаются электроны с энергией, достаточной для преодоления барьера Шотки. Если при этом  $h\nu > E_g$ , а пленка металла достаточно тонкая, то свет большей частью проходит через нее и генерирует электронно-дырочные пары в полупроводнике. При обратной засветке также возможно возбуждение электронов в металле с энергией, достаточной для преодоления потенциального барьера, т. е. с  $h\nu > q\phi_b$ . Однако при  $h\nu > E_g$  свет будет сильно поглощаться вблизи тыловой поверхности полупроводника и вероятность того, что сгенерированные здесь электронно-дырочные пары достигнут границы раздела "металл–полупроводник", очень мала.

Управлять положением спектра фоточувствительности можно изменением состава твердого раствора, образующего барьер Шотки с Au. Для демонстрации этой возможности была создана структура на основе эпитаксиального слоя AlGaIn с долей AlN 0.06. Для такой структуры получен

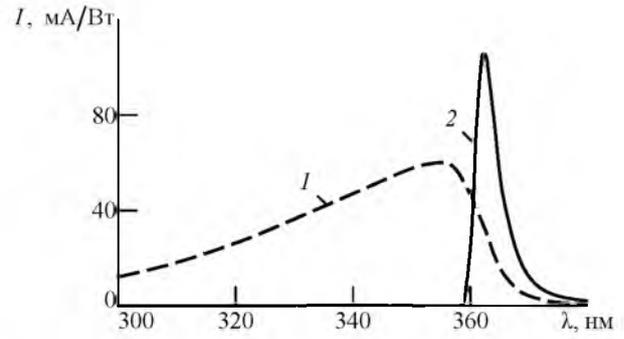


Рис. 3

диапазон фоточувствительности при освещении со стороны металла от 200 до 380 нм с максимумом при 355 нм и полушириной 40 нм (1 – рис. 3). При освещении образца со стороны подложки спектр фоточувствительности существенно сужается (358...378 нм), так как слой твердого раствора выступает в качестве широкозонного окна. Максимум наблюдается при длине волны 362 нм. Полуширина спектральной линии в таком случае будет составлять 5 нм (2 – рис. 3).

Независимость в управлении границами чувствительности была достигнута за счет добавления в структуру эпитаксиального слоя более узкозонного полупроводника GaN. При этом он по-прежнему выполняет для барьера Шотки роль широкозонного окна, смещая коротковолновую границу фоточувствительности на длину волны около 360 нм (2 – рис. 4).

Длинноволновая граница определяется высотой потенциального барьера контакта Au–AlGaIn с долей AlN 0.1. Диапазон спектра фоточувствительности лежит в пределах от 200 до 375 нм при освещении образца со стороны металла и от 361 до 375 нм при освещении со стороны подложки. При освещении образца со стороны металла на характеристике фоточувствительности также наблюдаются два максимума при длинах волн 347 и 353 нм (1 – рис. 4). Полуширина спектральной линии в этом случае составляет 30 нм. При освещении

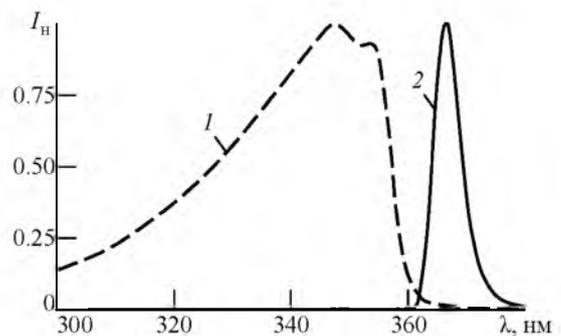


Рис. 4

Параметр	Тип структуры		
	Au-Al <sub>0,06</sub> Ga <sub>0,94</sub> N	Au-Al <sub>0,1</sub> Ga <sub>0,9</sub> N/GaN	Au-Al <sub>0,1</sub> Ga <sub>0,9</sub> N
$\lambda_{\max}$ при освещении со стороны металла, нм	355	347, 353	346, 353
$\lambda_{\max}$ при освещении со стороны подложки, нм	362	366	355
Полуширина спектральной линии при освещении со стороны металла, нм	40	30	30
Полуширина спектральной линии при освещении со стороны подложки, нм	5	5	6
Диапазон чувствительности при освещении со стороны металла, нм	200...380	200...375	200...375
Диапазон чувствительности при освещении со стороны подложки, нм	358...378	361...375	350...375

жении образца со стороны подложки, наблюдается селективный спектр fotocувствительности с максимумом при длине волны 366 нм (2 – рис. 4). Полуширина спектральной линии равна 5 нм.

Основные параметры образцов с барьерами Шоттки из Au и различными составами, исследованными в работе (максимум fotocувствительности, полуширина спектральной линии, диапазон fotocувствительности образцов), сведены в таблицу.

В процессе описанной работы созданы и исследованы селективные fotocувствительные структуры на основе твердого раствора AlGaN. При использовании структуры с верхним эпитаксиальным слоем AlGaN с долей AlN 0.1, образующего барьер Шоттки с Au, создан селективный фотодиод с максимумом fotocувствительности при 355 нм и полушириной 6 нм. Уменьшение доли AlN в твердом растворе AlGaN до 0.06 сместило

максимум fotocувствительности селективного приемника на длину волны 362 нм, уменьшив полуширину до 5 нм. Добавление в структуру Au-Al<sub>0,1</sub>Ga<sub>0,9</sub>N дополнительного слоя GaN, выполняющего роль широкозонного окна, сместило максимум чувствительности на длину волны 366 нм. Показано, что, изменяя состав твердого раствора, выполняющего роль широкозонного окна, можно изменять диапазон fotocувствительности в коротковолновой области спектра. Таким образом, продемонстрирована возможность управления селективностью чувствительности структур на основе Au-AlGaN и получены селективные фотоприемники со следующими параметрами: полуширина спектральной характеристики 5...6 нм, диапазон fotocувствительности 351...373 нм с максимумами при 355, 362 и 366 нм и чувствительностью до 140 мА/Вт.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Future of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N Materials and Device Technology for Ultraviolet Photodetectors / P. Kung, A. Yasan, R. McClintock, S. Darvish, K. Mi, M. Razeghi et al. // Proc. SPIE. 2002. № 4650. P. 199–206.
2. Высокоэффективные приборы на основе барьера Шоттки металл-AlGaN / Б. В. Калинин, И. А. Ламкин, Е. А. Менькович, С. А. Тарасов // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2012. № 5. С. 24–30.
3. Lamkin I., Tarasov S. Ultraviolet Photodiodes Based on Algan Solid Solutions // J. of Physics: Conference Series. 2013. Vol. 461. P. 012025(1–4).
4. Ulmer M., Razeghi M., Bigan E. Ultra-Violet Detectors for Astrophysics // Proc. SPIE. 1995. № 2397: Present and Future. P. 210–216.
5. Research of the Solar-Blind and Visible-Blind Photodetectors, based on the Algan Solid Solutions / I. A. Lamkin, S. A. Tarasov, A. A. Petrov, E. A. Menkovixh, A. B. Solomonov, S. Yu. Kurin // J. of Physics: Conference Series. 2014. Vol. 572. P. 012063(1–6).
6. Menkovich E. A., Tarasov S. A., Lamkin I. A. Luminescence of Nanostructures Based on Semiconductor Nitrides // Functional Materials. 2012. Vol. 19, № 2. P. 233–237.
7. Ламкин И. А., Менькович Е. А., Тарасов С. А. Ультрафиолетовые фотодиоды на основе контактов металл – твердые растворы нитридов галлия и алюминия // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. Физ.-мат. науки. 2012. № 3. С. 28–31.
8. Low-Frequency Noise in Al<sub>0,4</sub>Ga<sub>0,6</sub>N-Based Schottky Barrier Photodetectors / S. L. Romyantsev, N. Pala, M. S. Shur, R. Gaska, M. E. Levinshtein, V. Adivarahan, J. Yang, G. Simin, M. Asif Khan // Applied Physics Letters. 2001. № 79 (6). P. 866–858.
9. Ламкин И. А., Тарасов С. А., Феоктистов А. О. Оптимизация технологии получения омических контактов к эпитаксиальным слоям p-GaN // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2011. № 5. С. 14–17.
10. Оптимизация параметров контактов металл-твердые растворы AlGaN как основы фотодетекторов для ультрафиолетового диапазона спектра / И. А. Ламкин, С. А. Тарасов, Е. А. Менькович, А. А. Петров // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2013. Вып. 5. С. 80–84.

S. A. Tarasov, I. A. Lamkin, A. S. Evseenkov, I. I. Mikhailov, A. V. Solomonov  
*Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"*

### **Selective Photosensitive Structures Based On Au-Algan Schottky Barrier**

*Created and studied selective photosensitive structures based on Au-AlGaN Schottky barrier for the ultraviolet range of the spectrum. The methods of spectrum management photosensitivity by the use of the wide windows and the effects of over-barrier transport structures Au-AlGaN. Photodiodes obtained with a half-width of the spectrum of photosensitivity 5...6 nm wavelengths 351...373 nm and a sensitivity of 140 mA/W.*

Photodiode, AlGaN, ultraviolet range, Schottky barrier

Статья поступила в редакцию 22 января 2016 г.