

УДК 621.315.592

## Селективные ультрафиолетовые фотоприемники на основе барьера Шоттки «металл—AlGaN»

С. А. Тарасов, И. А. Ламкин, И. И. Михайлов, А. С. Евсеенков, А. В. Соломонов

*Созданы селективные фотоприемники на основе барьера Шоттки Me-AlGaN, работающие в ультрафиолетовом диапазоне спектра. С целью повышения fotocувствительности в УФ-диапазоне и устранения паразитных сигналов в длинноволновом диапазоне были изготовлены селективные фотодиоды на основе барьеров Шоттки Ag-AlGaN различного состава. Это позволило создать видимослепые фотоприемники, длинноволновый край fotocувствительности которых лежал на длинах волн менее 350 нм. Ширина спектра fotocувствительности на полувывоте находилась в диапазоне 15—40 нм в зависимости от толщины слоя Ag, которая варьировалась от 15 до 150 нм. Правильный выбор состава твердого раствора  $Al_xGa_{1-x}N$  позволил увеличить фотоответ и дополнительно уменьшить ширину спектра fotocувствительности на полувывоте до 11 нм путем совмещения максимумов спектра пропускания Ag и спектра поглощения эпитаксиального слоя. Чувствительность составила 0,071 А/Вт. Сочетание эффектов широкозонного окна и надбарьерного переноса позволило создать на основе структур Au-AlGaN ультраселективные УФ-фотоприемники с полушириной спектра fotocувствительности 5—6 нм для диапазона длин волн 350—375 нм с чувствительностью до 140 мА/Вт. На основе структуры с верхним эпитаксиальным слоем  $Al_xGa_{1-x}N$  (с содержанием AlN  $x = 0,1$  и  $x = 0,06$ ) созданы селективные фотоприемники с максимумом fotocувствительности при длинах волн 355 нм и 362 нм. Использование дополнительного менее широкозонного слоя GaN позволило независимо регулировать коротковолновую и длинноволновую границы диапазона чувствительности.*

PACS: 85.60.Dw

*Ключевые слова:* ультрафиолетовый фотоприемник, AlGaN, барьер Шоттки, селективный фотодиод.

### Введение

Одной из главных задач современной оптоэлектроники является создание фотоприемников различного типа и улучшение их характеристик. В последние годы для ряда военных и гражданских применений все более востребованными становятся фотодетекторы, обладающие чувствитель-

ностью в ультрафиолетовой части спектрального диапазона. Одним из наиболее актуальных примеров использования подобных приборов являются системы УФ-локации, способные эффективно обнаруживать аппараты различного назначения по ультрафиолетовой составляющей излучения реактивной струи, в т.ч. находящиеся в космическом пространстве. К «мирным» применениям можно отнести контроль уровня УФ-излучения при обеззараживании воды и некоторых медицинских процедурах; экологический мониторинг, включая исследования состояния озонового слоя, в том числе обнаружение озоновых дыр; создание систем безопасности на основе датчиков пламени и ряд других научных и хозяйственных применений.

Для решения большинства из перечисленных задач необходимы детекторы, нечувствительные к излучению видимого диапазона спектра, т.н. видимослепые фотодетекторы, а в некоторых случаях — и солнечнослепые фотоприемники, спо-

---

Тарасов Сергей Анатольевич, доцент.  
Ламкин Иван Анатольевич, младший научный сотрудник.  
Михайлов Иван Игоревич, аспирант.  
Евсеенков Антон Сергеевич, аспирант.  
Соломонов Александр Васильевич, профессор.  
Санкт-петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ).  
Россия, 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5.  
E-mail: SATarasov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 1 августа 2016 г.

© Тарасов С. А., Ламкин И. А., Михайлов И. И., Евсеенков А. С., Соломонов А. В., 2016

способные надежно регистрировать УФ-сигнал в условиях сильной фоновой засветки солнечным излучением. Для большинства перечисленных применений УФ-фотодетекторов предпочтительным является использование селективных фотоприемников, позволяющих регистрировать сигналы на заданной длине волны в присутствии сильных «шумовых» засветок на других длинах волн. При этом использование оптических фильтров нежелательно вследствие их высокой стоимости и склонности к деградации.

Селективный фотодиод для ультрафиолетового диапазона спектра может быть создан различными методами. Например, подобный прибор может быть реализован на основе контакта металл-Si [1]. Однако такие фотоприемники имеют существенную паразитную чувствительность в видимой и ИК-области спектра. Использование GaP с более широкой запрещенной зоной позволяет устранить часть паразитных сигналов [2, 3].

Наиболее перспективным является использование широкозонных твердых растворов AlGaN [4, 5]. Ширина запрещенной зоны таких материалов является достаточно большой, чтобы устранить чувствительность в видимой части спектра. Кроме того, использование твердого раствора AlGaN позволяет совместить окно прозрачности Ag и максимум поглощения эпитаксиального слоя путем подбора его состава, тем самым увеличив фоточувствительность селективного фотодиода по сравнению с детектором на основе GaP.

Целью данной работы являлось создание селективных фотоприемников на основе барьера Шоттки Me-AlGaN, работающих в ультрафиолетовом диапазоне спектра.

### Метод создания образцов

Экспериментальные образцы селективных фотоприемников (см. рис. 1) создавались следующим образом. Использовались эпитаксиальные слои AlGaN, выращенные на подложках сапфира с

ориентацией (0001). Для уменьшения плотности дислокаций в верхнем эпитаксиальном слое в большинстве образцов использовался дополнительный буферный слой различного состава. Металлические слои наносились методом вакуумного резистивного осаждения при давлении остаточных газов не выше  $10^{-5}$  мм рт. ст. В качестве металла для выпрямляющего контакта использовались Ag, Au, Ni и др. Омические контакты создавались на основе алюминия с предварительным нанесением подслоя титана по описанной ранее методике [6, 7].

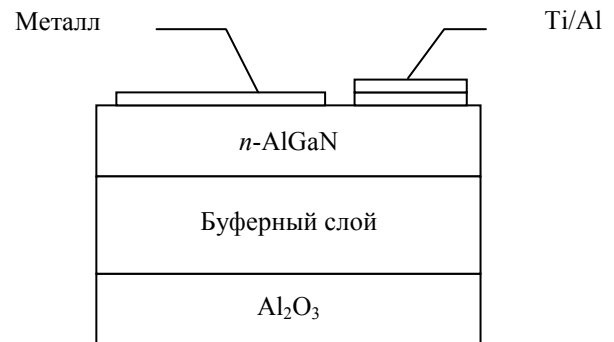


Рис. 1. Структура исследуемых образцов AlGaN.

### Фотоприемники на основе Ag-AlGaN

На основе барьера Шоттки Ag-n-Al<sub>0,08</sub>Ga<sub>0,92</sub>N была создана структура селективного фотодиода с полушириной спектра фоточувствительности 10 нм и максимальным фотоответом при 322 нм. На рис. 2 показано семейство спектральных характеристик разработанных фотодиодов при разной толщине выпрямляющего Ag контакта, толщина которого изменялась от 15 до 150 нм.

Видно, что при толщине слоя серебра, равной 15 нм, диапазон чувствительности фотоприемника находился в пределах от 240 до 350 нм с максимумом фотоответа при 335 нм и полушириной около 40 нм. Увеличение толщины слоя Ag приводит к сужению спектра при сравнительно небольшом уменьшении фотоответа в максимуме.

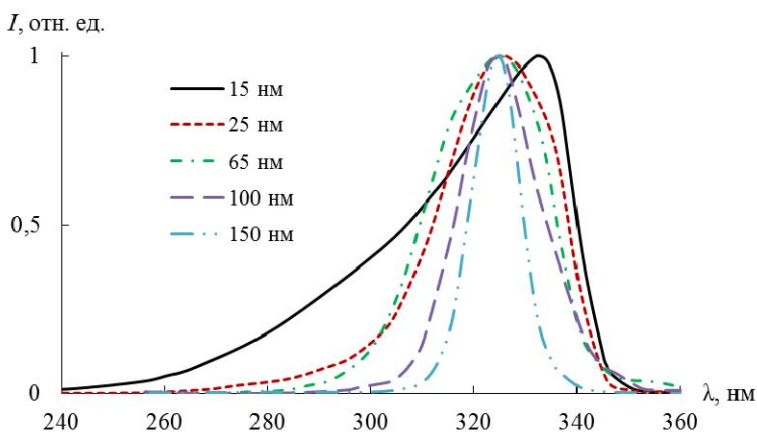


Рис. 2. Спектральные характеристики фотодиода на основе структуры Ag-Al<sub>0,08</sub>Ga<sub>0,92</sub>N при разной толщине металлического слоя.

Спектральная зависимость фоточувствительности в основном определяется спектром поглощения полупроводника. Максимальная чувствительность фотодиода находится в области наибольшего фотопоглощения, который соответствует энергии фотонов, немного превышающей ширину запрещенной зоны полупроводника. Предел чувствительности фотодиода определяется теоретическим пределом квантовой эффективности —  $\eta_{\max}$ , соответствующему случаю, при котором каждый упавший фотон генерирует электронно-

дырочную пару. На рис. 3 теоретический предел квантовой эффективности показан пунктирной линией. В реальных фотодиодах коротковолновый край чувствительности фотодиода на основе барьера Шоттки существенно зависит от скорости поверхностной рекомбинации. Чем выше скорость поверхностной рекомбинации, тем меньше квантовая эффективность фотоприемника и тем значительнее спад спектральной чувствительности в коротковолновой области.

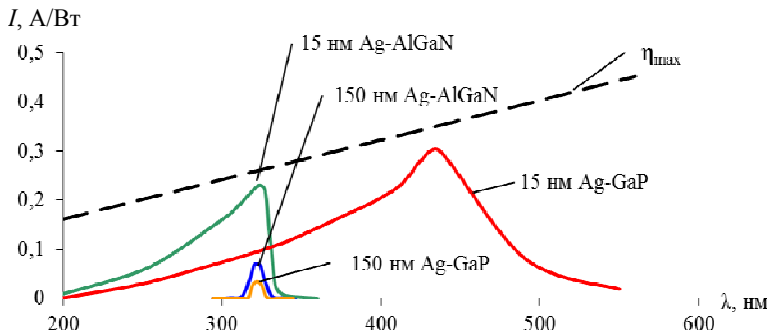


Рис. 3. Спектральные характеристики фотодиодов на основе барьера Шоттки серебро-полупроводник.

Принимая во внимание, что ширина запрещенной зоны твердого раствора AlGaN больше ширины запрещенной зоны GaP, можно сделать вывод о том, что квантовая эффективность фотодетектора на основе эпитаксиального слоя AlGaN на длине волны 322 нм будет выше, чем у детектора на основе GaP (рис. 3). Тогда селективный фотодиод на основе барьера Шоттки Ag-AlGaN будет обладать большей чувствительностью, чем структура Ag-GaP. Установлено, что при уменьшении толщины металлического слоя чувствительность увеличивается, но при слишком малых толщинах металла влияние может оказывать ухудшение физико-химических параметров пленки. Для исследованных структур наилучшей толщиной слоя серебра оказалось значение 15 нм, при котором образцы демонстрировали максимальные величины фоточувствительности.

Дополнительно управлять полушириной спектра фоточувствительности структур Ag-AlGaN можно не только путем изменения толщины слоя серебра, но и за счет регулирования состава твердого раствора AlGaN. Серия экспериментов показала, что для уменьшения диапазона чувствительности наилучшим образом подходят структуры на основе контакта Ag-Al<sub>0,2</sub>Ga<sub>0,8</sub>N. В этом случае при уменьшении толщины слоя серебра происходит смещение только коротковолновой границы фоточувствительности в область меньших длин волн, что объясняется изменением пропускания металлического слоя. Показано, что при использовании твердого раствора AlGaN с долей AlN  $x = 0,2$  изменение толщины слоя Ag-контакта влияет только на коротковолновый край фоточувствительности,

а длинноволновый край фотоответа определяется составом твердого раствора.

#### Фотоприемники на основе контакта Au-AlGaN

Вторым методом достижения эффекта селективности фоточувствительности, использованным в работе, было применение эффекта широкозонного окна [8]. Для этого были изготовлены структуры Au-AlGaN, с различными составами полупроводниковых слоев. На основе таких структур были созданы фотоприемники с «фронтальной» и «обратной» засветкой, для которых ввод излучения осуществлялся со стороны контакта, образующего барьер Шоттки с твердым раствором AlGaN, или со стороны прозрачной подложки Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> соответственно. При освещении со стороны металла были реализованы приборы с широким спектром фоточувствительности, который определялся сочетанием межзонных переходов в твердом растворе и эффектом надбарьерного переноса в выпрямляющем контакте металл-полупроводник (см. кривые 1 и 2 на рис. 4). Этот эффект возникает в барьере Шоттки в случае, когда энергия падающих фотонов меньше ширины запрещенной зоны полупроводника, но превышает высоту потенциального барьера «металл—полупроводник».

На основе структуры с твердым раствором Al<sub>0,1</sub>Ga<sub>0,9</sub>N был создан фотоприемник с фронтальной засветкой, диапазон фоточувствительности которого находился в пределах от 200 нм до 375 нм с максимумом фотоответа, лежащим на длине волны 346 нм. Полуширина спектра фоточувствительности составила 30 нм (кривая 1 на рис. 4).

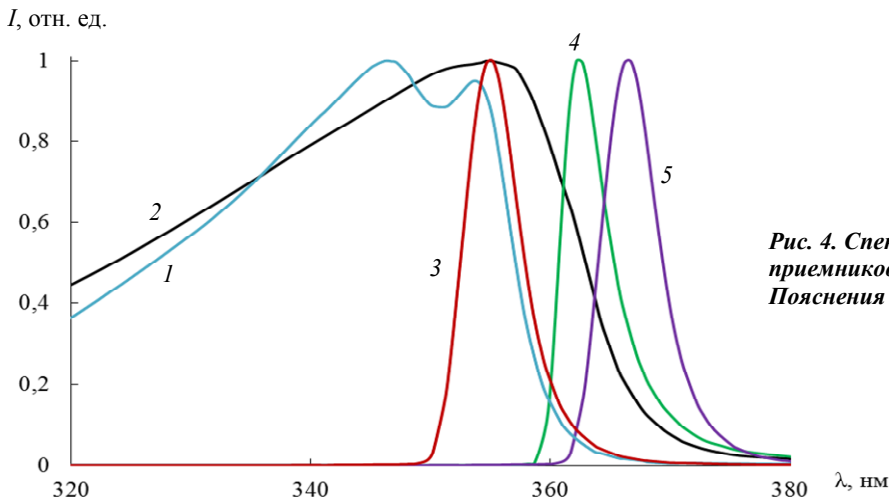


Рис. 4. Спектры fotocувствительности фотоприемников на основе контакта Au-AlGaN. Пояснения в тексте.

При обратной засветке спектр fotocувствительности существенно сужался (кривая 3 на рис. 4), так как коротковолновое излучение поглощалось в буферной области и околобуферной части верхнего полупроводникового слоя. До области объемного заряда доходили только фотоны, чья энергия была меньше ширины запрещенной зоны полупроводника. Таким образом, на спектральной характеристике наблюдался только фотоответ, обусловленный эффектом надбарьерного переноса носителей заряда. В результате был создан фотоприемник с областью fotocувствительности, уменьшенной до диапазона от 350 нм до 375 нм. Максимум фотоответа был смещен на длину волны 355 нм. При этом была достигнута очень малая полуширина спектра — 6 нм.

Регулирование положения максимума fotocувствительности осуществлялось за счет изменения состава твердого раствора верхнего полупроводникового слоя [9]. В структуре II-типа доля AlN в верхнем полупроводниковом слое была изменена таким образом, чтобы был реализован твердый раствор  $\text{Al}_{0,06}\text{Ga}_{0,94}\text{N}$ . При фронтальной засветке был создан фотоприемник с диапазоном чувствительности, расширенным до длины волны 370 нм. Максимум фотоответа при этом сместился на длину волны 355 нм, полуширина спектра чувствительности составила 40 нм (кривая 2 на рис. 4). При использовании обратной засветки был создан фотоприемник с еще большей селективностью чувствительности, полуширина спектра которого составила всего 5 нм. Диапазон fotocувствительности такого прибора находился в пределах от 358 нм до 378 нм с максимумом фотоответа при 362 нм (кривая 4 на рис. 4).

Независимость в управлении границами fotocувствительности была реализована за счет введения в структуру дополнительного эпитаксиального слоя полупроводника, выполняющего роль широкозонного окна. В фотоприемниках III-типа в качестве дополнительного слоя использовался

нитрид галлия, размещенный между буфером и твердым раствором, выполняющим роль полупроводника для барьера Шоттки. Добавление этого слоя позволило сместить границу fotocувствительности создаваемых селективных фотодетекторов на длину волны около 360 нм. При использовании обратной засветки был создан фотоприемник, максимум чувствительности которого был смещен на длину волны 366 нм при сохранении малой полуширины спектра чувствительности на уровне 5 нм. Диапазон fotocувствительности такого прибора находился в пределах от 361 нм до 375 нм (кривая 5 на рис. 4).

### Заключение

В результате работы созданы селективные фотоприемники на основе структуры «металл—AlGaN». Выработаны методы управления полушириной fotocувствительности за счет изменения состава твердого раствора и толщины металлического слоя в барьере Шоттки. Созданы фотодиоды на основе  $\text{Ag-Al}_{0,08}\text{Ga}_{0,92}\text{N}$  с полушириной fotocувствительности от 15 до 40 нм и на основе  $\text{Ag-Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N}$  с полушириной fotocувствительности от 11 до 29 нм при толщинах слоя Ag от 15 до 150 нм. Чувствительность фотоприемников составила 71 мА/Вт. Максимум чувствительности находился на длине волны 322 нм. Сочетание эффектов широкозонного окна и надбарьерного переноса позволило создать на основе структур Au-AlGaN ультраселективные УФ-фотоприемники с полушириной спектра fotocувствительности 5—6 нм для диапазона длин волн 350—375 нм с чувствительностью до 140 мА/Вт.

Работа выполнена в рамках НИР проектной части ГЗ Минобрнауки РФ в сфере научной деятельности, проект № 16.1307.2014К. Авторы выражают благодарность ЗАО «Нитридные кристаллы»,

ФТИ им. Иоффе (г. Санкт-Петербург) и научному центру Мисонова (г. Эспоо, Финляндия) за предоставленные образцы эпитаксиальных структур  $AlGaN/Al_2O_3$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Lin Chu-Hsuan, Liu Chee Wee // Sensors. 2010. Vol. 10. P. 8797.
2. Pikhitin A. N., Tarasov S. A., Kloth B. // IEEE Transactions on Electron Devices. 2003. Vol. 50. P. 215.
3. Lamkin I. A., Tarasov S. A., Solomonov A. V., Mikhailov I. I. // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 690. P. 012037.

4. Lamkin I., Tarasov S. // Journal of Physics: Conference Series. 2013. Vol. 461. P. 012025.
5. Collins C. J., Li T., D. Lambert J. H., et al. // Appl. Phys. Lett. 2000. Vol. 77. P. 2810.
6. Ламкин И. А., Тарасов С. А., Феоктистов А. О. // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. № 5. С. 14.
7. Ламкин И. А., Тарасов С. А., Менькович Е. А., Петров А. А. // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2013. Т. 5. С. 80.
8. Zhang S. K., Wang W. B., Shtau I., Yun F., He L., Morkoc H., Zhou X., Tamargo M., Alfano R. R. // Applied Physics Letters. 2002. Vol. 81. No. 25. P. 4862.
9. Ламкин И. А., Менькович Е. А., Тарасов С. А. // Научно-технические ведомости СПбГПУ, физико-математические науки. 2012. № 3. С. 28.

## Selective UV photodetectors based on the Me-AlGa<sub>N</sub> Schottky barrier

S. A. Tarasov, I. A. Lamkin, I. I. Mikhailov, A. S. Evseenkov, and A. V. Solomonov

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"  
5 Prof. Popov str., St. Petersburg, 197376, Russia  
E-mail: SATarasov@mail.ru

Received August 1, 2016

*The selective Me-AlGa<sub>N</sub> photodetectors based on the Schottky barrier and operated in different UV ranges have been fabricated. The selective photodiodes based on Ag-Al<sub>0.08</sub>Ga<sub>0.92</sub>N Schottky barriers have been manufactured in order to improve photosensitivity in the UV range and eliminate spurious signals in a long wavelength range. It allowed to realize the photodetectors which have a long wavelength edge of photosensitivity less than 350 nm. The half-width was in a range of 15–40 nm depending on the Ag layer thickness varied from 15 to 150 nm. The proper choice of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N solid solution composition provided an increased photoresponse with further reducing the half-width to 11 nm by matching the peaks of the silver transmittance spectrum and the structure sensitivity spectrum. The sensitivity was 0,071 A/W. The combination of the effects of the wide bandgap windows and over-barrier transfer allowed to create structures based on Au-AlGa<sub>N</sub> ultrasensitive UV photodetectors with a half-width of the spectrum of photosensitivity 5–6 nm for the wavelength range of 350–375 nm with a sensitivity of up to 140 mA/W. On the basis of the structure with the top epitaxial Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N layer (with an AlN content of 0.1 or 0.06), a selective photodetector with a photosensitivity maximum at 355 nm or 362 nm. The use of additional less widegap layer of GaN allowed to independently adjust the sensitivity range. It has been shown how varying the solid solution composition, which acts as a wide bandgap window, can change the range of the photosensitivity in the short-wavelength region of the spectrum.*

PACS: 85.60.Dw

*Keywords:* UV photodetector, AlGa<sub>N</sub>, Schottky barrier, selective photodiode.

## REFERENCES

1. Chu-Hsuan Lin and Chee Wee Liu, Sensors **10**, 8797 (2010).
2. A.N. Pikhitin, S.A. Tarasov, and B. Kloth, IEEE Transactions on Electron Devices **50**, 215 (2003).
3. I. A. Lamkin, S. A. Tarasov, A. V. Solomonov, and I. I. Mikhailov, J. of Physics: Conference Series. **690**, 012037 (2016).
4. I. Lamkin and S. Tarasov, J. of Physics: Conference Series **461**, 012025 (2013).
5. C. J. Collins, T. Li, D. J. H. Lambert, et al., Appl. Phys. Lett. **77**, 2810 (2000).
6. I. A. Lamkin, S. A. Tarasov, and A. O. Feoktistov, Izvest. SPb LETI No. 5, 14 (2011).
7. I. A. Lamkin, S. A. Tarasov, E. A. Men'kovich, and A. A. Petrov, Izvest. Vyssh. Uchebn. Zaved. Radioelektronika **5**, 80 (2013).
8. S. K. Zhang, W. B. Wang, I. Shtau, et al., Applied Physics Letters **81**, 4862 (2002).
9. I. A. Lamkin, E. A. Men'kovich, and S. A. Tarasov, Nauchn. Vedomost. SPbGPU, Fiz.-Mat. Nauki, No. 3, 28 (2012).