

# Многоцветный фотодетектор на основе гетероструктуры ZnSe/ZnTe/GaAs

С.В.Аверин, П.И.Кузнецов, В.А.Житов, Л.Ю.Захаров, В.М.Котов

*Исследованы структурные, оптические и фотоэлектрические свойства гетероструктуры ZnSe/ZnTe/GaAs и металл–полупроводник–металл-детектора (МПМ-детектора) на ее основе. Состав и толщины отдельных слоев гетероструктуры определены методами энергодисперсионного анализа и рамановской спектроскопии, оптические свойства изучены по спектрам фотолюминесценции. МПМ-детектор на основе ZnSe/ZnTe/GaAs-гетероструктуры обладает высокой чувствительностью. Так, на длине волны 620 нм сигнал отклика детектора соответствует ампер-ваттной чувствительности 0.19 А/Вт и внешней квантовой эффективности 38%. Фотоотклик МПМ-детектора демонстрирует три пика, расположенных на длинах волн 510, 620 и 870 нм. Для МПМ-диода с шириной встречно-штыревых контактов 2.8 мкм, расстояниями между ними 2.8 мкм и общей площадью фоточувствительной области 100 × 100 мкм плотность темнового тока при комнатной температуре составляет 10<sup>-8</sup> А/см<sup>2</sup>.*

**Ключевые слова:** фотодетектор, МПМ-диод, гетероструктура, темновой ток, спектральный отклик.

## 1. Введение

Одним из перспективных направлений исследований в области фотоэлектропреобразователей является разработка полосовых детекторов отдельных участков УФ, видимой и ближней ИК областей спектра [1]. Такие многоцветные фотоприемники необходимы для ряда практических применений, в том числе в военном деле, спектроскопии, для визуализации изображения, мониторинга окружающей среды, для систем связи и т. д. [2]. В этих областях спектра обычно используются кремниевые и арсенид-галлиевые фотодетекторы. Однако они осуществляют прием в довольно широком диапазоне длин волн и не обладают спектральной избирательностью. Для обеспечения селективного отклика на определенных длинах волн такие детекторы требуют использования внешних фильтров, что приводит к усложнению приемной системы и заметно снижает ее чувствительность. Селективное детектирование двух и более отдельно стоящих участков спектра излучения позволяет существенно облегчить анализ наблюдаемого объекта, поскольку в этом случае можно определить его излучательную способность в зависимости от длины волны и реализовать возможность избирательного выделения и опознавания [3].

Ключевым моментом при создании эффективных селективно-чувствительных детекторов в указанных областях спектра является изготовление наногетероструктур широкозонных полупроводниковых соединений. Недавно нами были исследованы детектирующие свойства низкоразмерных гетероструктур с квантовыми ямами ZnCdS, разделенными барьерными слоями ZnMgS, которые обес-

печивали двухцветное детектирование УФ излучения на длинах волн 350 и 450 нм [4].

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований структурных, оптических и электрических характеристик гетероструктуры ZnSe/ZnTe/GaAs и металл–полупроводник–металл-фотодиода (МПМ-фотодиода) на ее основе. МПМ-детектор обладает высокой чувствительностью. На длине волны 620 нм сигнал отклика детектора соответствует ампер-ваттной чувствительности  $S = 0.19$  А/Вт и внешней квантовой эффективности  $EQE = 38\%$ . Спектральная характеристика МПМ-детектора обеспечивает детектирование одним фотодiodом трех отдельно стоящих длин волн видимого и инфракрасного излучения.

## 2. Экспериментальные результаты

Гетероструктура была выращена методом химического газофазного осаждения из металлоорганических соединений (MOCVD) путем последовательного осаждения двенадцати пар слоев ZnSe/ZnTe на полуизолирующей

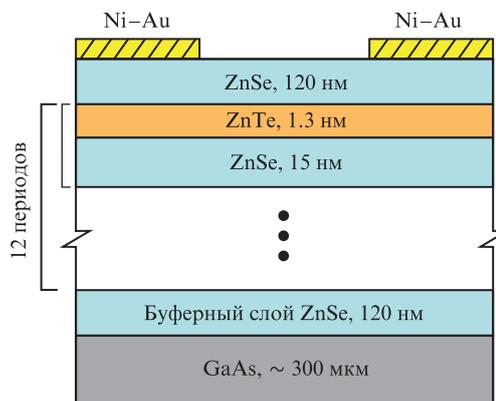


Рис.1. Система слоев гетероструктуры ZnSe/ZnTe/GaAs и встречно-штыревые контакты МПМ-диода на ее основе.

С.В.Аверин, П.И.Кузнецов, В.А.Житов, Л.Ю.Захаров, В.М.Котов. Филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Россия, Московская обл., 141190 Фрязино, пл. Акад. Введенского, 1; e-mail: sva278@ire216.msk.su

Поступила в редакцию 27 ноября 2017 г.

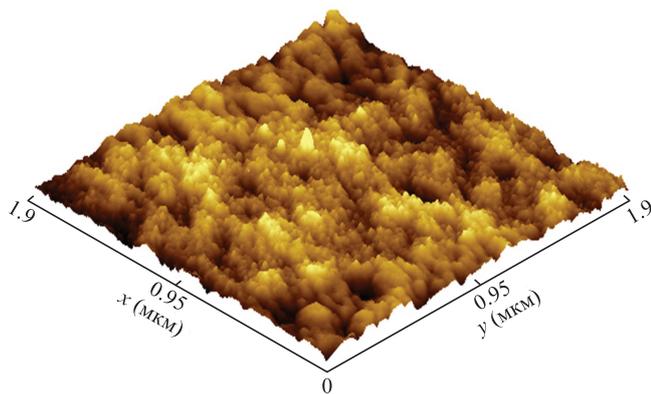


Рис.2. Микрофотография поверхности структуры ZnSe/ZnTe/GaAs.

подложке из GaAs (рис.1). Поверх структуры выращивался тонкий покровный слой ZnSe. Процесс осаждения проводился в атмосфере водорода при температуре 470°C с использованием диэтилцинка, диэтилселенида и диэтилтеллурида в качестве исходных реагентов. При росте слоев ZnSe и ZnTe поддерживался двукратный избыток халькогена в газовой фазе. Перед ростом каждого нового слоя делался перерыв в 10 с. Качество ростовой поверхности оценивалось с помощью атомно-силовой микроскопии на приборе SmartSPM (AIST-NT). Поверхность гетероструктуры была достаточно плотной и состояла из равномерно распределенных небольших зерен (рис.2). Согласно измерениям шероховатость ростовой поверхности на площади 2 × 2 мкм составляла 3.2 нм.

### 2.1. Метод энергодисперсионного анализа (EDS)

Для качественного и количественного определения состава гетероструктуры использовался энергодисперсионный спектрометр X-MaxN (Oxford Instruments) с площадью активной зоны кристалла 50 мм<sup>2</sup>. Обработка результатов проводилась в программе INCA (Oxford Instruments, версия 21). Для стандартизации и оптимизации профилей эмиссионных линий характеристического излучения были использованы стандарты простых веществ: кристаллического Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> (для стандартизации линии Se L<sub>α</sub>), ZnS (линии Zn L<sub>α</sub>) и PbTe (линии Te L<sub>α</sub>). Измерения стандартов и анализ образцов выполнялись в идентичных условиях при ускоряющем напряжении 10 кВ, токе электронного зонда 1.4 нА и постоянной времени 5 мс. Скорость накопления данных составляла 12 × 10<sup>3</sup> импульсов в секунду при величине «мертвого» времени от 25% до 30%. Время накопления спектров в диапазоне энергий от 0 до 10 кэВ с дисперсией по 2048 каналам задавалось равным 100 с. В этих условиях дисперсия концентраций определяемых компонентов не превышала 0.5%, а порог обнаружения для всех анализируемых элементов составлял 0.03–0.05 масс.%. На рис.3 приведен EDS-спектр исходной гетероструктуры ZnSe/ZnTe. Анализовались три точки образца, в которых содержание теллура варьировалось в пределах 1.05–1.1 ат.%. Расчет показал, что суммарная толщина 12 слоев ZnTe равна 9.5 нм, отсюда толщина единичного слоя составила 0.8 нм. Это в 1.6 раза меньше толщины, рассчитанной исходя из кинетики процесса эпитаксиального осаждения, и связано, по-видимому, с нестационарностью процесса осаждения в короткий промежуток времени роста единичного слоя ZnTe (5.5 с).

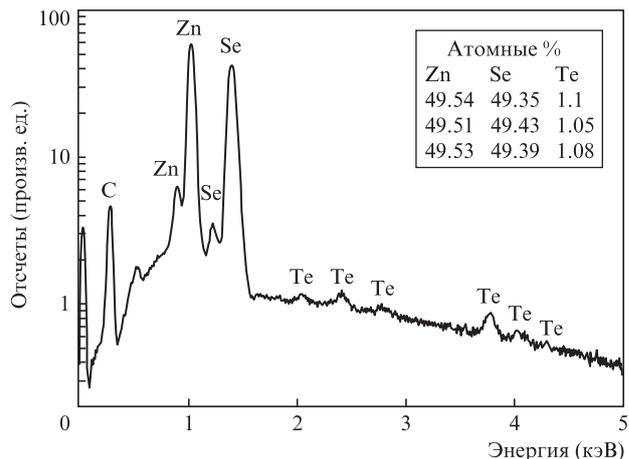


Рис.3. EDS-спектр гетероструктуры ZnSe/ZnTe.

### 2.2. Рамановское рассеяние

Спектры рамановского рассеяния измерялись спектрометром XPlora (Horiba Scientific) с использованием лазера с длиной волны излучения 532 нм и 100<sup>×</sup>-ного объектива, фокусирующего излучение лазера в пятно диаметром ~1 мкм. Для измерения использовалась дифракционная решетка 1800 штрих./мм, время накопления составило 3 × 30 с, мощность лазера – от 3 мВт, диапазон регистрации спектров – от 50 до 1000 см<sup>-1</sup>. На рис.4 (кривая 3) показан рамановский спектр гетероструктуры, служащей основой для последующего изготовления МПМ-детектора, на котором видны LO-мода ZnSe и соответствующие слабые моды ZnTe и подложки GaAs. Для сравнения на этом же рисунке приведены спектры эпитаксиальных пленок ZnSe и ZnTe равной толщины, выращенные на полужолирующих подложках (100) GaAs (кривые 1 и 2). Сопоставление этих кривых с кривой 3 позволяет идентифицировать пики рамановского рассеяния для исследуемой гетероструктуры на частотах 200 (ZnTe), 248 (ZnSe) и 289 см<sup>-1</sup> (GaAs).

### 2.3. Фотолюминесценция

Спектры сигнала фотолюминесценции измерялись при комнатной температуре. В качестве источников возбуждения использовались импульсный N<sub>2</sub>-лазер с длиной вол-

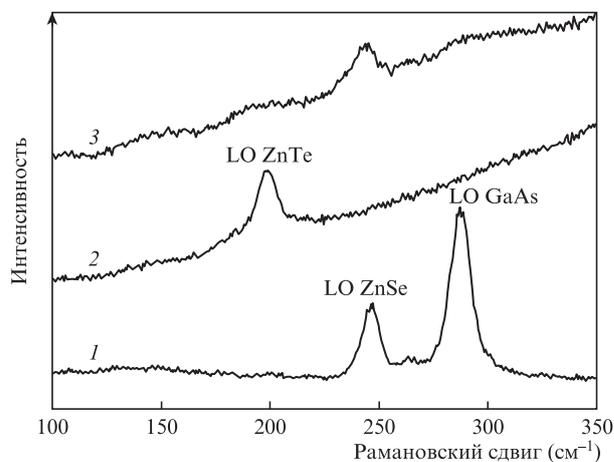


Рис.4. Спектры рамановского рассеяния исследуемой гетероструктуры ZnSe/ZnTe (3) и эпитаксиальных пленок ZnTe и ZnSe толщиной 400 нм на полужолирующей подложке (100) GaAs (1, 2).

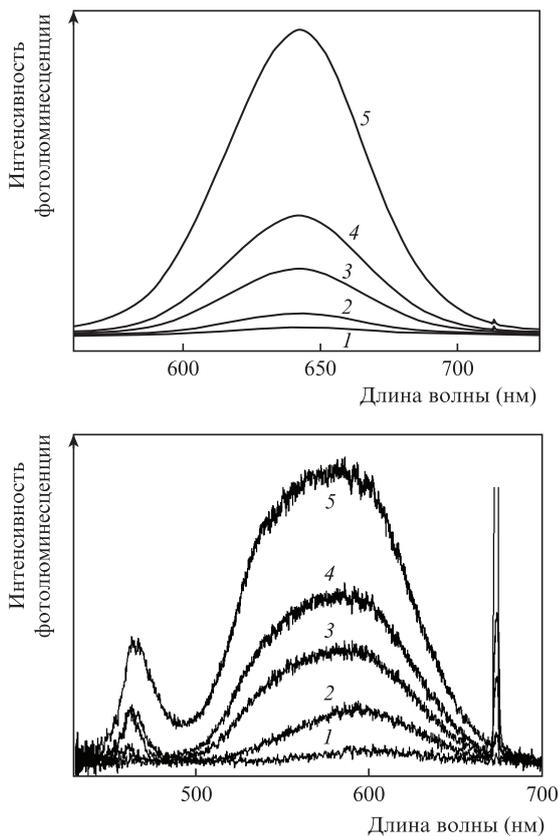


Рис.5. Спектры сигнала фотолюминесценции, возбуждаемой излучением непрерывного He–Cd-лазера ( $\lambda_{ex} = 441.6$  нм) при плотности оптического возбуждения 9 (1), 18 (2), 36 (3), 50 (4) и 100 Вт/см<sup>2</sup> (5) (а) и излучением импульсного N<sub>2</sub>-лазера ( $\lambda_{ex} = 337$  нм) при плотности возбуждения 10<sup>6</sup> (1), 5 × 10<sup>6</sup> (2), 2.1 × 10<sup>7</sup> (3), 3.7 × 10<sup>7</sup> (4) и 10<sup>8</sup> Вт/см<sup>2</sup> (5) (б). T = 300 К.

ны излучения 337 нм и непрерывный He–Cd-лазер с длиной волны 441.6 нм. Излучение He–Cd-лазера фокусировалось в пятно диаметром 30 мкм, а N<sub>2</sub>-лазера – в пятно 50 мкм. Плотность сигнала оптического возбуждения изменялась с помощью нейтральных фильтров.

Спектры сигнала фотолюминесценции исследуемой гетероструктуры ZnSe/ZnTe представлены на рис.5. При возбуждении образца излучением He–Cd-лазера наблюдаются только непрямые переходы с максимумом на длине волны ~640 нм, положение которого не зависит от плотности сигнала оптического возбуждения (рис.5,а). При возбуждении образца импульсным N<sub>2</sub>-лазером максимумы спектров фотолюминесценции смещаются в сторону более коротких длин волн (область 600 нм), причем с увеличением плотности сигнала оптического возбуждения происходит коротковолновый сдвиг участка спектра, обусловленного прямым переходом, и наблюдается усиление сигнала прямого зонного перехода в слоях ZnSe (рис.5,б). Коротковолновый сдвиг сигнала фотолюминесценции, регистрируемый при росте плотности сигнала оптического возбуждения, подтверждает наличие перехода второго рода в исследуемой сверхрешетке ZnSe/ZnTe [5].

**2.4. Характеристики МПМ-диода**

На выращенной гетероструктуре методами фотолитографии были сформированы встречно-штыревые контакты МПМ-диода с шириной контактов 2.8 мкм, расстоянием между ними 2.8 мкм и общей площадью фоточув-

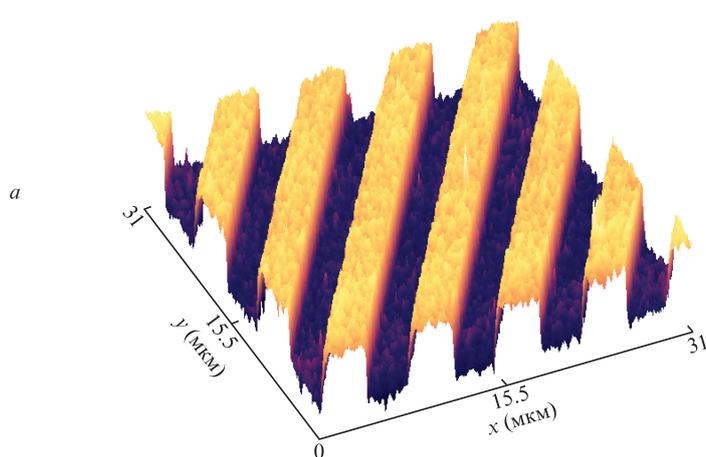


Рис.6. Поверхность гетероструктуры ZnSe/ZnTe/GaAs и встречно-штыревые контакты МПМ-фотодиода.

ствительной области детектора 100 × 100 мкм. В качестве металла контакта Шоттки использовалась пара Ni–Au. На рис.6. представлена микрофотография поверхности гетероструктуры ZnSe/ZnTe и встречно-штыревой системы Шоттки контактов МПМ-диода.

Вольт-амперные характеристики изготовленных МПМ-детекторов были исследованы на измерителе параметров полупроводниковых приборов Agilent B 1500A. Рентгеновское исследование показало, что в случае тонких (меньше 1 нм) эпитаксиальных слоев ZnTe гетероструктура изоморфная, и большого количества структурных дефектов не возникает. В результате, МПМ-детектор на основе сверхрешетки ZnSe/ZnTe обладает низкими темновыми токами даже при больших напряжениях смещения. Темновой ток составил 10<sup>-12</sup> А при напряжении смещения 40 В, что более чем на два порядка меньше, чем у МПМ-детекторов на основе AlGaIn при почти такой же геометрии контактов [6], и сравнимо с темновыми токами МПМ-диодов на основе низкоразмерной структуры ZnCdS/ZnMgS/GaP [4]. Плотность темнового тока МПМ-детектора на гетероструктуре ZnSe/ZnTe/GaAs при комнатной температуре составила 10<sup>-8</sup> А/см<sup>2</sup>.

**2.5. Спектральная фоточувствительность**

Измерения спектральной фоточувствительности исследуемых диодных структур выполнялись при комнатной температуре с использованием ксеноновой лампы в качестве источника излучения, монохроматора, модулятора и селективного вольтметра в режиме синхронного детектирования электрического сигнала исследуемого МПМ-диода. Мощность падающего на данный фотодиод оптического излучения измерялась калиброванным кремниевым фотодиодом. Ампер-ваттная чувствительность фотодетектора определялась как отношение измеренного сигнального тока МПМ-диода к мощности излучения ксеноновой лампы на соответствующей длине волны.

На рис.7 представлена зависимость сигнала фотоотклика МПМ-детектора на гетероструктуре ZnSe/ZnTe/GaAs от длины волны оптического излучения. Фотоотклик детектора демонстрирует три пика, расположенных на длинах волн 510, 620 и 870 нм. Положение максимума сигнала отклика детектора на длине волны 620 нм практически совпадает с максимумом сигнала фотолюминесценции сверхрешетки ZnSe/ZnTe (см. рис.5,а). Пик сигнала от-

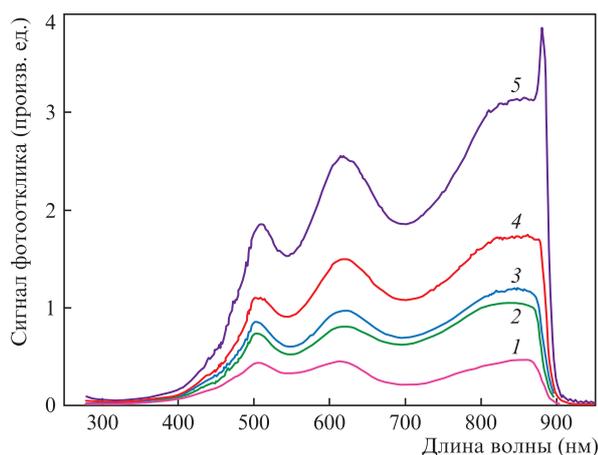


Рис.7. Спектры сигнала фотоотклика МПМ-детектора на основе гетероструктуры ZnSe/ZnTe/GaAs при напряжениях смещения 20 (1), 30 (2), 40 (3), 50 (4) и 60 В (5).

клика детектора на длине волны 510 нм обусловлен интерференцией света между верхней и нижней границами полупроводниковой структуры и может быть подстроен соответствующим изменением толщин слоев гетероструктуры (аналогичный эффект наблюдался в [7] при интерференции света в эпитаксиальных слоях ZnSSeTe/GaAs). Увеличение напряжения смещения от 20 до 60 В позволяет исключить блокирующее действие гетеробарьера на границе раздела ZnSe/GaAs, поэтому детектор обеспечивает эффективный сбор фотоносителей из низлежащего слоя GaAs (кривая 5 на рис.7). Этим объясняется пик сигнала фотоотклика детектора на длине волны 870 нм (край зоны поглощения GaAs) при напряжении смещения 60 В. Таким образом, спектральная характеристика детектора демонстрирует возможность селективного детектирования видимого и ИК излучения в диапазоне длин волн 500–870 нм.

Детектор обладает высокой чувствительностью. На длине волны 620 нм сигнал отклика детектора соответствует ампер-ваттной чувствительности  $S = 0.19$  А/Вт и внешней квантовой эффективности  $EQE = 38\%$ , а на длине волны 840 нм  $S = 0.28$  А/Вт и  $EQE = 41\%$ . Если принять во внимание потери света вследствие отражения от встречно-штыревых контактов и поверхности полупроводника, квантовая эффективность детектора на соответствующих длинах волн близка к расчетной. Для сравнения внешняя квантовая эффективность МПМ-диода на основе GaAs с использованием поверхностных плазмонов составляет 46% на резонансной длине волны 790 нм [8]. Внутренняя квантовая эффективность ZnSTeSe/ZnSe/GaAs фотодиода равна 42% на длине волны 620 нм и 75% на 820 нм [7]. SWIR-детектор со структурой n-i-p на сверхрешетке второго рода InAs/InAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>/AlAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> демонстрирует на длине волны 1.5 мкм ампер-ваттную чувствительность  $S = 0.47$  А/Вт и эффективность  $EQE = 37\%$ , но при существенно большей плотности темнового тока, равной  $9.6 \times 10^{-5}$  А/см<sup>2</sup> [9]. Квантовая эффективность pin-детектора на сверхрешетке InAs/GaAsSb составляет 18.6% на длине волны 1.15 мкм, ампер-ваттная чувствительность  $S =$

0.17 А/Вт, причем плотность темнового тока равна  $2.9 \times 10^{-9}$  А/см<sup>2</sup> при 77 К [10]. Следует отметить, что в спектре фотоотклика предложенного нами МПМ-детектора также присутствует слабый всплеск на длине волны 470 нм, обусловленный наличием покровного слоя ZnSe. Низкая эффективность на этой длине волны обусловлена сильной поверхностной рекомбинацией.

### 3. Заключение

Исследованы структурные, электрические и оптические свойства ZnSe/ZnTe/GaAs-гетероструктуры. Состав и толщины отдельных слоев гетероструктуры определены методами энергодисперсионного анализа и рамановской спектроскопии, а оптические свойства изучены по спектрам фотолюминесценции. Коротковолновый сдвиг сигнала фотолюминесценции, наблюдаемый при увеличении плотности оптического возбуждения, подтверждает наличие перехода второго рода в сверхрешетке ZnSe/ZnTe. На основе гетероструктуры ZnSe/ZnTe/GaAs изготовлен и исследован МПМ-фотодетектор. Детектор демонстрирует низкий темновой ток, высокую ампер-ваттную чувствительность и квантовую эффективность. Максимальный сигнал фотоотклика МПМ-детектора на длине волны 620 нм соответствует токовой чувствительности 0.19 А/Вт и внешней квантовой эффективности 38%. Для МПМ-гетеродиода с шириной встречно-штыревых контактов 2.8 мкм, расстоянием между ними 2.8 мкм и общей площадью фоточувствительной области  $100 \times 100$  мкм плотность темнового тока при комнатной температуре составила  $10^{-8}$  А/см<sup>2</sup>. Спектральная характеристика детектора демонстрирует возможность селективного детектирования видимого и ИК излучения в диапазоне длин волн 500–870 нм.

Авторы выражают благодарность В.Д.Щербакову, В.О.Япаскурту и М.П.Темиряевой за помощь в проведении экспериментов по рамановской спектроскопии, энергодисперсионного анализа и атомно-силовой микроскопии образцов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-07-00205).

1. Бланк Т.В., Гольдберг Ю.А. *ФТП*, **37**, 1025 (2003).
2. Steenberg E.H., DiNezza M.J., Dettlaff W.H.G., Lim S.H., Zhang Y.-H. *Appl. Phys. Lett.*, **97**, 161111-1 (2010).
3. Rogalski A. *Acta Physica Polonica A*, **116**, 389 (2009).
4. Averin S.V., Kuznetsov P.I., Zhitov V.A., Zakharov L.Yu., Kotov V.M., Alkeev N.V. *Sol. State Electron.*, **114**, 135 (2015).
5. Ledentsov N.N., Bohler J., Beer M., Heinrichsdorff F., Grundmann M., Bimberg D., Ivanov S.V., Meltser B.Ya., Shaposhnikov S.V., Yassievich I.N., Faleev N.N., Kop'ev P.S., Alferov Zh.I. *Phys.Rev. B*, **52**, 14058 (1995).
6. Averin S.V., Kuznetsov P.I., Zhitov V.A., Alkeev N.V. *Sol. State Electron.*, **52**, 618 (2008).
7. Chen W.R., Meen T.H., Cheng Y.C., Lin W.J. *IEEE Electron. Device Lett.*, **27**, 347 (2006).
8. Коллин С., Пардо Ф., Аверин С.В., Бардо Н., Пелар Ж.-Л. *Квантовая электроника*, **40**, 421 (2010) [*Quantum Electron.*, **40**, 421 (2010)].
9. Haddadi A., Suo X.V., Adhikary S., Dianat P., Hoang A.M., Razeghi M. *Appl. Phys. Lett.*, **107**, 141104-1 (2015).
10. Zhang Y., Ma W., Huang J., Cao Y., Liu K., Huang W., Zhao Ch., Ji H., Yang T. *IEEE Electron Device Lett.*, **37**, 1166 (2016).