

НОВЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 621.382.23,621.396

ДВУХЦВЕТНЫЙ ФОТОДЕТЕКТОР ВИДИМОЙ ЧАСТИ СПЕКТРА НА ОСНОВЕ БРЭГГОВСКОГО РЕФЛЕКТОРА ZnSe/ZnS/GaAs

© 2019 г. С. В. Аверин¹*, П. И. Кузнецов¹, В. А. Житов¹, Л. Ю. Захаров¹, В. М. Котов¹

¹Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Российская Федерация, 141190 Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1

*E-mail: sva278@ire216.msk.su

Поступила в редакцию 23.01.2019 г.

После доработки 20.02.2019 г.

Принята к публикации 28.02.2019 г.

Исследовано влияние распределенного брэгговского рефлектора (РБР) ZnSe/ZnS/GaAs на характеристики спектрального отклика фотодиода на основе выпрямляющих контактов в системе металл–полупроводник–металл (МПМ). Получено хорошее соответствие расчетных и экспериментальных спектров фотоотражения гетероструктуры ZnSe/ZnS/GaAs. Показано, что МПМ-диод обеспечивает двухцветный отклик детектора на длинах волн 420 и 472 нм, резкий спад fotocувствительности в длинноволновой части сигнала отклика, высокую квантовую эффективность (53%) и низкий темновой ток (5×10^{-10} А). Найдено, что узкополосный двухцветный отклик детектора может быть подстроен к желаемой длине волны путем соответствующего выбора параметров гетероструктуры, формирующей брэгговский рефлектор.

DOI: 10.1134/S0033849419090031

ВВЕДЕНИЕ

Актуальной задачей современной оптоэлектроники является разработка полосовых детекторов отдельных участков видимой и ближней инфракрасной части спектра [1]. Такие детекторы позволяют уже на входе информационной системы отфильтровать принимаемый оптический сигнал. Это существенно упрощает информационную систему, повышает ее потенциал. Режим селективного детектирования 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 объекта [2]. При этом важной задачей является разработка многоцветных фотодетекторов, чувствительность которых может быть подстроена к определенному участку спектра излучения. Многоцветные фотоприемники необходимы для ряда практических применений в военном деле, спектроскопии, для визуализации изображения, мониторинга окружающей среды, для систем связи и т.д. [3–6].

В спектральной области 0.3...0.9 мкм обычно используются кремниевые и арсенид-галлиевые детекторы. Область их fotocувствительности занимает довольно широкий участок спектра и для обеспечения селективного отклика на определен-

ных длинах волн необходимы внешние фильтры [7–9]. Это приводит к усложнению приемной системы и заметно снижает ее чувствительность.

Ключевым моментом при создании эффективных селективно-чувствительных детекторов в данной области спектра является получение наногетероструктур широкозонных полупроводниковых соединений. Недавно нами были исследованы детектирующие свойства низкоразмерных гетероструктур с квантовыми ямами ZnCdS, разделенными барьерными слоями ZnMgS, которые обеспечивали двухцветное детектирование УФ-излучения на длинах волн 350 и 450 нм [10]. В данной работе исследован новый тип фотодиодных структур – металл–полупроводник–металл (МПМ)-диодов на основе периодических низкоразмерных гетероструктур ZnSe/ZnS, формирующих распределенный брэгговский рефлектор (РБР).

Брэгговский рефлектор уже был использован в качестве зеркала для отражения светового излучения из низлежащих областей планарных фотодиодов в приповерхностную область сильного поля диода, т.е. для увеличения квантовой эффективности фотодетектора [11, 12]. Ранее нами была исследована возможность увеличения коэффициента отражения брэгговского рефлектора на периодической гетероструктуре ZnS/ZnSe, выращенной на GaAs подложке, за счет оптимизации процесса роста [13]. В данной работе РБР впервые

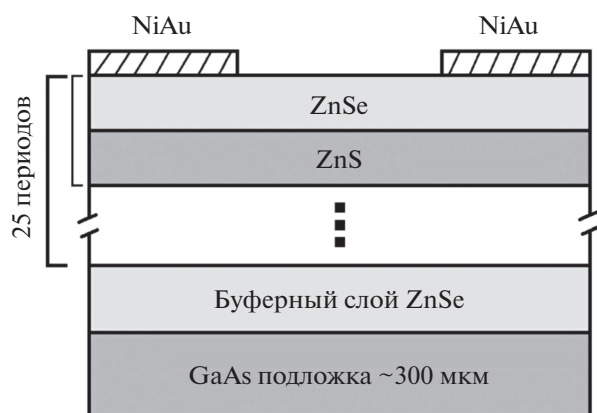


Рис. 1. Последовательность слоев гетероэпитаксиальной структуры, формирующей брэгговский рефлектор МПМ-фотодиода.

используется для формирования узкополосного двухцветного отклика МПМ-диода. Спектральная характеристика МПМ-диода обеспечивает детектирование двух отдельно стоящих длин волн видимого излучения одним фотодиодом. В работе показано, что, изменяя параметры гетероэпитаксиальных слоев ZnSe/ZnS, можно менять положение максимума сигнала отражения брэгговского рефлектора и тем самым спектральный отклик МПМ-гетерофотодиода в достаточно широком диапазоне длин волн видимой части спектра. В отличие от детекторов на Si и GaAs разрабатываемые детекторы на основе гетероэпитаксиальных слоев широкозонных полупроводниковых соединений ZnSe/ZnS потенциально устойчивы к воздействию излучений высоких энергий и напряжений смещения [8].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве базовой структуры для исследований были выбраны поверхностно-барьерные планарные диоды на основе выпрямляющего контакта в системе металл–полупроводник–металл (МПМ-диод) [13]. Важной особенностью этого детектора является структурная и технологическая простота — в нем используется полупроводник только одного типа проводимости. Нашей целью было изучить влияние Брэгговского рефлектора на характеристики спектральной чувствительности МПМ-детектора на его основе.

Распределенный брэгговский рефлектор был выращен методом MOVPE путем последовательного осаждения двадцати пяти пар четвертьволновых слоев ZnSe и ZnS на полуизолирующей подложке (100) GaAs (рис. 1). Осаждение проводили в горизонтальном кварцевом реакторе при давлении водорода близком к атмосферному при температуре 450°C и использовании диэтилцин-

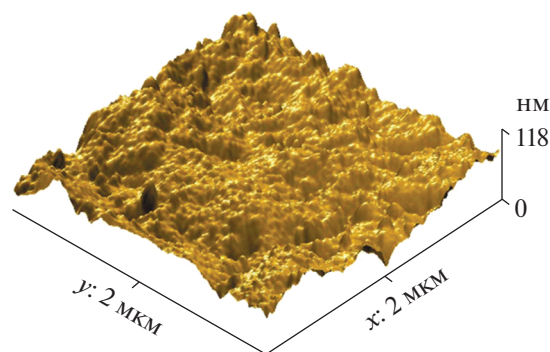


Рис. 2. Микрофотография поверхности структуры ZnSe/ZnS, полученная на атомно-силовом микроскопе SmartSPM (AIST-NT).

ка, диметилселенида и диэтилсульфида в качестве исходных реагентов. (Подробнее см. в работе [14].) Качество ростовой поверхности оценено с помощью атомно-силовой микроскопии на приборе SmartSPM (AIST-NT). Поверхность гетероэпитаксиальной структуры достаточно ровная и состоит из равномерно распределенных зерен (рис. 2). Согласно измерениям среднеквадратичная шероховатость поверхности на площади 20 × 20 мкм составляет 20.2 нм. На выращенных структурах методами контактной фотолитографии были сформированы встречно-штыревые контакты МПМ-детектора. Ширина и расстояние между контактами были одинаковыми и равными 2.8 мкм, площадь активной области детектора 100 × 100 мкм².

Для расчета спектра отражения многослойной гетероэпитаксиальной структуры ZnSe/ZnS₂₅ZnSe/GaAs использовали метод 2 × 2 матриц [15]. Метод основан на том, что уравнения Максвелла, описывающие распространение света, линейны и что непрерывность тангенциальных компонент электрического и магнитного полей световой волны на границе между двумя изотропными средами можно описать с помощью линейного 2 × 2 матричного преобразования. Предполагается, что каждый слой структуры (рис. 3) представляет собой линейную однородную и изотропную среду, описываемую комплексным показателем преломления $N(\lambda)$. Оптические свойства постоянны внутри каждого слоя, и они скачком изменяются на резких границах между слоями.

Матрица рассеяния S связывает комплексные амплитуды электрического поля E во внешней среде и подложке в плоскостях, непосредственно примыкающих к границам раздела со слоями структуры, $E(z_{1-0}) = SE(z_{(m+1)+0})$. Она может быть представлена как произведение матриц границ раздела I и слоев L :

$$S = I_{01} \times L_1 \times I_{12} \times L_2 \dots I_{(j-1)j} \times L_j \dots L_m \times I_{m(m+1)}. \quad (1)$$

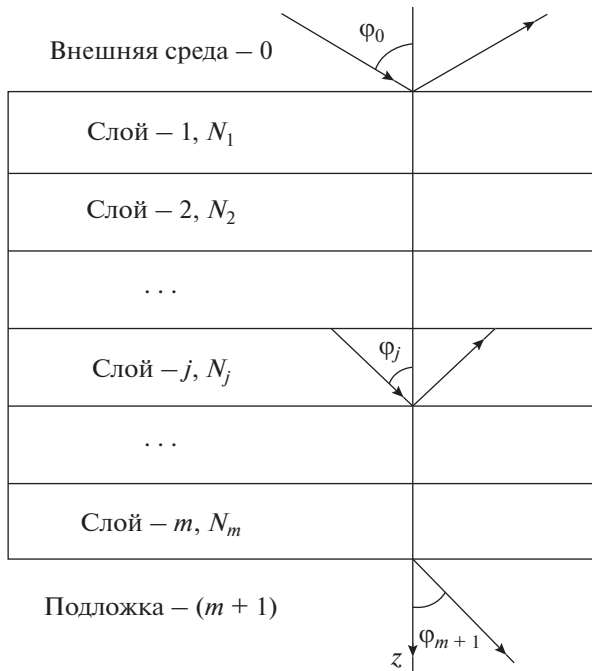


Рис. 3. Отражение и пропускание многослойной структуры.

Матрица границы раздела **I** выражается через френелевские коэффициенты отражения и пропускания для границы раздела, которые, в свою очередь, определяются из комплексных показателей преломления граничащих сред (N_{j-1} и N_j), угла падения в данной точке и поляризации света, параллельной (p) или перпендикулярной (s) плоскости падения. Матрица слоя **L** выражается через фазовый сдвиг β плоской волны λ при прохождении через слой толщиной d в направлении под углом φ к перпендикулярно к границам раздела (оси z):

$$\beta = (2\pi d N / \lambda) \cos(\varphi). \quad (2)$$

Коэффициенты отражения R и пропускания T слоистой структуры выражаются через элементы матрицы рассеяния **S**:

$$R = (S_{21}/S_{11}), \quad T = (1/S_{21}). \quad (3)$$

В соответствии с экспериментальными условиями измерения отражения (геометрия хода лучей, используемый источник света) при расчете спектров отражения был использован угол падения, равный нулю, а вклад p - и s - поляризаций в отражение принимался одинаковым.

Для проверки соответствия расчетных и экспериментальных данных были выращены несколько РБР с максимумом отражения (полоса непрозрачности РБР) на различных длинах волн и измерены их спектры отражения. На рис. 4 для одной из выращенных гетероструктур приводятся расчетные и экспериментальные спектры отра-

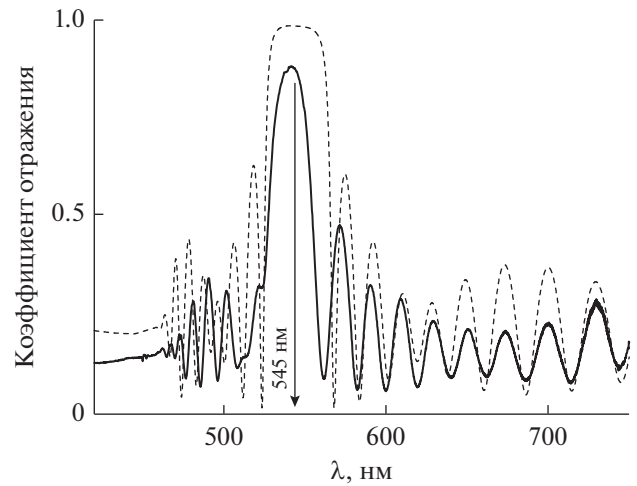


Рис. 4. Расчетные (штриховая кривая) и экспериментальные (сплошная) спектры отражения для гетероэпитаксиальной структуры $(\text{ZnSe}/\text{ZnS})_{25}\text{ZnSe}/\text{GaAs}$.

жения для системы слоев воздух $> (\text{ZnSe}/\text{ZnS})_{25} \rightarrow \text{ZnSe} \rightarrow \text{GaAs}$. В расчетах толщины каждого единичного слоя ZnS и ZnSe гетероструктуры были заданы равными соответственно 57 и 51.5 нм, толщина нижнего буферного слоя ZnSe составляла 567 нм. Для такой системы слоев из рис. 4 видно достаточно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных кривых фотоотражения.

На рис. 5а представлен экспериментальный спектр отражения гетероструктуры с приведенными выше параметрами и спектральный отклик МПМ-диода на ее основе. Положение основного пика отражения РБР находится на длине волны 545 нм и не оказывает заметного влияния на характеристику спектрального отклика МПМ-диода, которая в этом случае почти не отличается от спектрального отклика МПМ-диода, изготовленного на относительноном "толстом" (200 нм) эпитаксиальном слое ZnSe, выращенном на полужолирующем GaAs [9]. По этой причине мы изменили параметры эпитаксиальных слоев гетероструктуры $(\text{ZnSe}/\text{ZnS})_{25}\text{ZnSe}/\text{GaAs}$, формирующих брэгговский рефlector, и для смещения максимума отражения РБР в синюю область спектра в соответствии с расчетом вырастили 25 пар слоев ZnSe и ZnS толщиной 46.7 и 39 нм соответственно при толщине буферного слоя ZnSe 430 нм. Как показано на рис. 5б, это позволило не только сместить основной пик сигнала фотоотражения в сторону более коротких длин волн, но и существенно изменить спектральный отклик МПМ-фотодиода. Максимум отражения РБР на длине волны 458 нм теперь находится почти на середине спектра фоточувствительности МПМ-диода без эффективного влияния брэгговского рефлятора (см. рис. 5а и 5б). Как результат в сигнале отклика МПМ-диода с таким РБР образуется два пика фотоотражения.

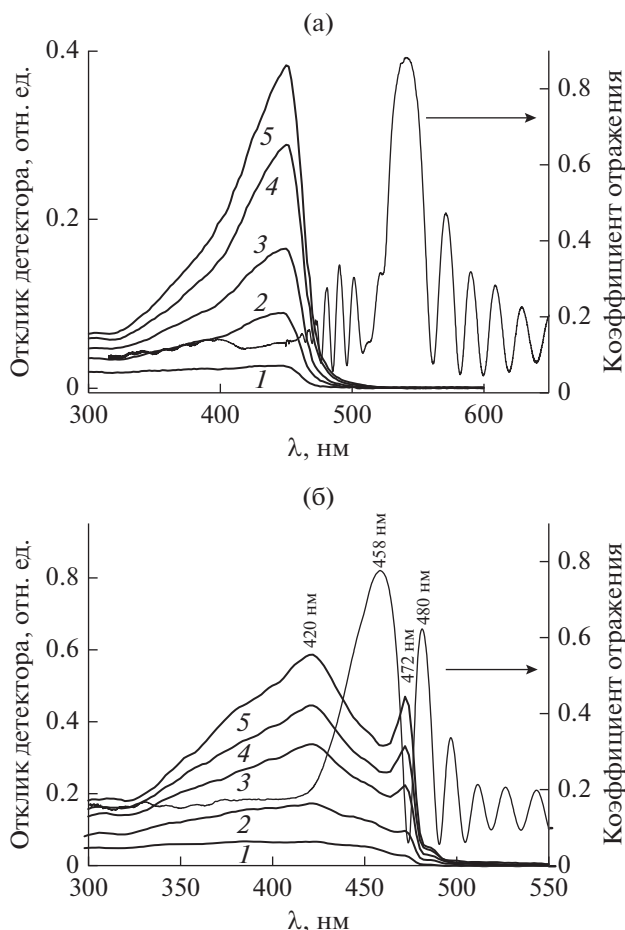


Рис. 5. Спектр сигнала фотоотражения периодической гетероструктуры $(\text{ZnSe}/\text{ZnS})_{25}/\text{GaAs}$ и спектральный отклик МПМ-фотодиода на ее основе. (а) Напряжение смещения: 20 (1), 40 (2), 60 (3), 80 (4), 90 В (5), пик отражения брэгговского рефлектора соответствует длине волны 545 нм и не оказывает заметного влияния на характеристику спектрального отклика МПМ-диода; (б) напряжение смещения: 30 (1), 50 (2), 70 (3), 80 (4), 90 В (5), брэгговский рефлектор обеспечивает двухцветное узкополосное фотодетектирование МПМ-фотодиода.

тельности на длинах волн 420 и 472 нм. В то же время пик сигнала отражения брэгговского рефлектора на длине волны 480 нм (первый побочный пик) приводит к увеличению крутизны спада фоточувствительности исследуемого МПМ-диода в длинноволновой части сигнала отклика детектора. Распределенный брэгговский рефлектор действует как встроенный режекторный фильтр (notch-фильтр) входного излучения, падающего на фотодетектор. Он эффективно отражает излучение на выбранной длине волны (458 нм) и обеспечивает спектральную селекцию принимаемого оптического сигнала. В результате формируется узкополосный двухцветный отклик МПМ-детектора на основе периодической гетероструктуры

$(\text{ZnSe}/\text{ZnS})_{25}/\text{GaAs}$ (см. рис. 5б). Длинноволновый отклик исследуемого МПМ-диода хорошо согласуется с пороговой энергией прямых оптических переходов в ZnSe, а подбором параметров гетероструктуры узкополосный двухцветный отклик фотодетектора может быть подстроен к желаемой длине волны излучения в диапазоне 350...480 нм.

При напряжении смещения 90 В максимальный сигнал фотоотклика МПМ-диода на длине волны 420 нм соответствует амперваттной чувствительности 0.18 А/Вт и внешней квантовой эффективности $\text{EQE} = 53\%$. Темновой ток детектора равен 5×10^{-10} А при напряжении смещения 40 В, что сравнимо с темновыми токами МПМ-диодов на основе низкоразмерной гетероструктуры $\text{ZnCdS}/\text{ZnMgS}/\text{GaP}$ с такой же геометрией контактов [10] и существенно меньше темнового тока МПМ-диода на ZnSe 5×10^{-9} А при смещении 4 В [16]. Можем сравнить чувствительность детектора, полученную в данной работе, с результатами других исследовательских групп. В диодах на ZnSe с полупрозрачными Ni/Au-контактами с барьером Шоттки реализована амперваттная чувствительность 0.1 А/Вт на длине волны 460 нм [8, 9]. Максимальная чувствительность ZnSe МПМ-диода составила 0.128 А/Вт на длине волны 448 нм, квантовая эффективность 38% [16]. Наконец, токовая чувствительность гетеробарьерного МПМ-диода на ZnSTeSe в диапазоне длин волн 350...450 нм равна 0.4 А/Вт, а темновой ток $\sim 4 \times 10^{-10}$ А при смещении 40 В [17], что находится в хорошем соответствии с нашими результатами. Детектор достаточно узкополосен. Он обеспечивает ширину полосы пропускания 15 и 50 нм (по уровню 50% от максимума) соответственно на центральных длинах волн 472 и 420 нм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследован новый тип фотодиодных структур — МПМ-фотодиодов с распределенным брэгговским рефлектором на основе периодической гетероструктуры ZnSe/ZnS. Распределенный брэгговский рефлектор образует встроенный режекторный фильтр входного излучения, падающего на фотодетектор. Он эффективно отражает световое излучение на выбранной длине волны (458 нм) и обеспечивает спектральную селекцию принимаемого излучения. В результате формируется узкополосный двухцветный отклик МПМ-детектора с пиками фоточувствительности на длинах волн 420 и 472 нм. МПМ-детектор демонстрирует резкий спад фоточувствительности в длинноволновой части сигнала отклика детектора, высокую квантовую эффективность (53%) и низкий темновой ток (5×10^{-10} А). Узкополосный двухцветный отклик детектора может быть подстроен к

желаемой длине волны путем соответствующего выбора параметров слоев гетероструктуры, формирующей Брэгговский рефлектор.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 17-07-00205 и 18-07-00259).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бланк Т.Б., Гольдберг Ю.А. // Физика и техника полупроводников. 2003. Т. 37. № 9. С. 1025 (и ссылки в этой статье).
2. Rogalski A. // Acta Physica Polonica A. 2009. V. 116. № 3. P. 389.
3. Steenbergen E.H., DiNezza M.J., Dettlaff W.H.G. et al. // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 97. P. 161111. <https://doi.org/10.1063/1.35051>
4. Majumdar A., Choi K.K., Rokhinson L.P. // J. Appl. Phys. 2002. V. 19. № 7. P. 4623.
5. Choi K.K. // The Physics of Quantum Well Infrared Photodetectors. N.-J.: World Sci., River Edge, 1997.
6. Chen C.J., Choi K.K., Chang W.H., Tsui D.C. // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 72. P. 7.
7. Metzger R.A. // Comp. Semicond. 1996. May/June. P. 29.
8. Monroy E., Omnes F., Calle F. // Semicond. Sci. Technol. 2003. V. 18. P. R33.
9. Vigue F., Tournie E., Faurie J.-P. // Electron. Lett. 2000. V. 36. № 4. P. 352.
10. Averin S.V., Kuznetsov P.I., Zhitov V.A. et al. // Solid State Electronics. 2015. V. 114. P. 135.
11. Collin St., Pardo F., Bardou N. et al. // Opt. Express. 2011. V. 19. № 18. P. 1729. <https://www.osapublishing.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-19-18-17293>
12. Gallo E.M., Cola A., Quaranta F., Spanier J.E. // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 102. P. 161108.
13. Averine S.V., Chan Y.C., Lam Y.L. // Solid State Electronics. 2001. V. 45. № 3. P. 441.
14. Kuznetsov P.I., Zhitov V.A., Zakharov L.Yu. et al. // Phys. Status Sol. (b). 2002. V. 229. № 1. P. 171.
15. Аззам П., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981.
16. Lin T.K., Chang S.J., Su Y.K. et al. // Mat. Sci. Eng. 2005. V. B119. P. 202.
17. Chang S.J., Su Y.K., Chen W.R. et al. // IEEE Photonics Technol. Lett. 2002. V. 14. № 2. P. 188.