

МПМ детектор видимого диапазона длин волн на сверхрешетке ZnSe/ZnTe второго типа

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

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
 Российской академии наук,
 141190 Фрязино, Московская область, Россия
 E-mail: pik218@ire216.msk.su, sva278@ire216.msk.su

(Получена 9 июня 2016 г. Принята к печати 23 июня 2016 г.)

На основе сверхрешетки ZnSe/ZnTe второго типа создан и исследован МПМ фотодетектор. Детектор обладает низкими темновыми токами и высокой чувствительностью. Спектральная характеристика детектора показывает возможность селективного детектирования трех отдельных участков спектра видимого и ближнего инфракрасного излучения.

DOI: 10.21883/FTP.2017.02.44115.8349

1. Введение

В последние годы возрастает интерес исследователей, инженеров, технологов к периодическим структурам, состоящим из различных полупроводниковых материалов, — полупроводниковым сверхрешеткам.

Композиционные сверхрешетки второго типа позволяют реализовать новые возможности при создании ряда оптоэлектронных устройств, в частности фотодетекторов [1–6]. Ступенчатая структура зон дает возможность детектировать оптическое излучение с энергией фотона много меньше ширины запрещенной зоны каждого из полупроводников, формирующих сверхрешетку [3]. Уже созданы фотодетекторы среднего и длинноволнового участка спектра инфракрасного излучения на сверхрешетках второго типа InAs/GaSb, рабочая длина волны которых может меняться в определенном интервале за счет изменения толщины одного или двух слоев сверхрешетки [6]. В фотодиодных структурах на основе сверхрешеток второго типа также можно ожидать существенного снижения темнового тока и увеличения чувствительности [7]. Однако практическое использование гетероструктур второго рода до сих пор лимитируется недостаточным пониманием их фундаментальных свойств и ограниченным числом экспериментально исследованных систем. В настоящей работе мы впервые приводим результаты экспериментальных исследований МПМ детектора излучения видимой части спектра на сверхрешетке второго типа ZnSe/ZnTe.

2. Методика эксперимента

В качестве базовой структуры для исследований были выбраны поверхностно-барьерные планарные диоды на основе выпрямляющего контакта в системе металл–полупроводник–металл (МПМ диод) [8–10]. МПМ детекторы изготовлены на сверхрешетке ZnSe/ZnTe, структура и толщины слоев которой приведены на рис. 1.

Гетероэпитаксиальная структура выращена методом химического газофазного осаждения из металлоорганических соединений (MOVPE) путем последовательного осаждения полупроводниковых слоев ZnSe, ZnTe (12 пар) на полуизолирующей подложке GaAs. Сверху осажден покровный слой ZnSe толщиной 120 нм. Процесс осаждения проведен в атмосфере водорода при температуре 470°C с использованием диэтилцинка, диэтилселенида и диэтилтеллурида в качестве исходных реагентов. При росте слоев ZnSe и ZnTe поддерживался 2-кратный избыток халькогена в газовой фазе. Перед ростом каждого нового слоя делали перерыв в 10 с.

Состав и толщины отдельных слоев гетероструктуры определены методами энергодисперсионного анализа, рамановской спектроскопии и рефлектометрии *in situ*, а оптические свойства изучены по спектрам фотолюминесценции. Качество ростовой поверхности исследуемой гетероструктуры оценено с помощью атомно-силовой микроскопии на приборе SmartSPM (AIST-NT). Согласно измерениям, шероховатость ростовой поверхности 20 × 20 мкм составила 15 нм.

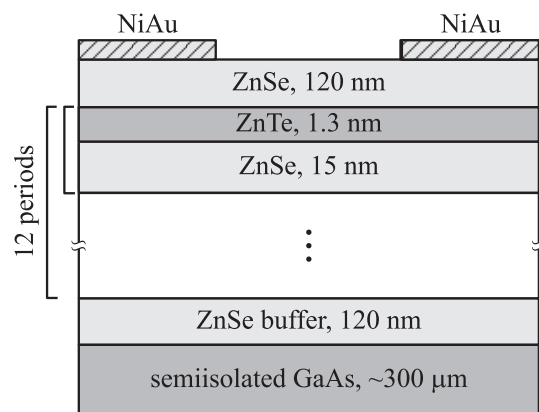


Рис. 1. Встречно-штыревые контакты МПМ диода и последовательность гетероэпитаксиальных полупроводниковых слоев сверхрешетки ZnSe/ZnTe.

Электронно-зондовые исследования образцов проведены на сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM-6480LV. Для измерения составов структур использовался энергодисперсионный спектрометр X-Max^N (Oxford Instruments) с площадью активной зоны кристалла 50 мм². 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 Bi₂Se₃ (для стандартизации Se *L*_α), ZnS (Zn *L*_α) и PbTe (Te *L*_α). Измерения стандартов и анализ образцов выполнялись в идентичных условиях при ускоряющем напряжении 10 кВ, силе тока электронного зонда 1.4 нА и постоянной времени 5. Скорость накопления данных составляла (12–13) · 10³ импульсов в секунду при величине „мертвого“ времени в диапазоне от 25 до 30%. Время накопления спектров в диапазоне энергий от 0 до 10 кэВ с дисперсией по 2048 каналам задавалось равным 100 с. При этих условиях относительная дисперсия концентраций определяемых компонентов не превышала 0.5%, а пороги обнаружения для всех анализируемых элементов составляли 0.03–0.05% по массе.

Рамановские спектры сняты на спектрометре XPloRA (Horiba Scientific) с использованием лазера с длиной волны 532 нм и 100-кратного объектива при локальности ~ 1 мкм. Условия съемки: дифракционная решетка 1800, время накопления 3 раза по 30 с, мощность лазера от 3 мВт, диапазон съемки от 50 до 1000 см⁻¹.

Спектры фотолюминесценции измерены при комнатной температуре. В качестве источников возбуждения использованы импульсный N₂-лазер с длиной волны излучения 337 нм и непрерывный He–Cd лазер с длиной волны излучения 441.6 нм. Излучение He–Cd лазера фокусировалось в пятно диаметром 30 мкм, а N₂-лазера в пятно диаметром 50 мкм. Плотность возбуждения менялась с помощью нейтральных фильтров.

3. Экспериментальные результаты

3.1. Фотолюминесценция, рамановское рассеяние, энергодисперсионная спектроскопия

На рис. 2, *a, b* приведены спектры фотолюминесценции исследуемой гетероструктуры. При возбуждении образца He–Cd-лазером наблюдаются только „косые“ переходы с максимумом на длине волны ~ 640 нм, положение которого не меняется в зависимости от плотности возбуждения (рис. 2, *a*). При возбуждении импульсным N₂-лазером максимумы спектров фотолюминесценции смещаются в сторону более коротких волн (область 600 нм), причем с увеличением плотности оптического возбуждения происходит коротковолновый сдвиг участка спектра, обусловленного непрямыми переходами, и проявляется усиление сигнала прямых зонных переходов

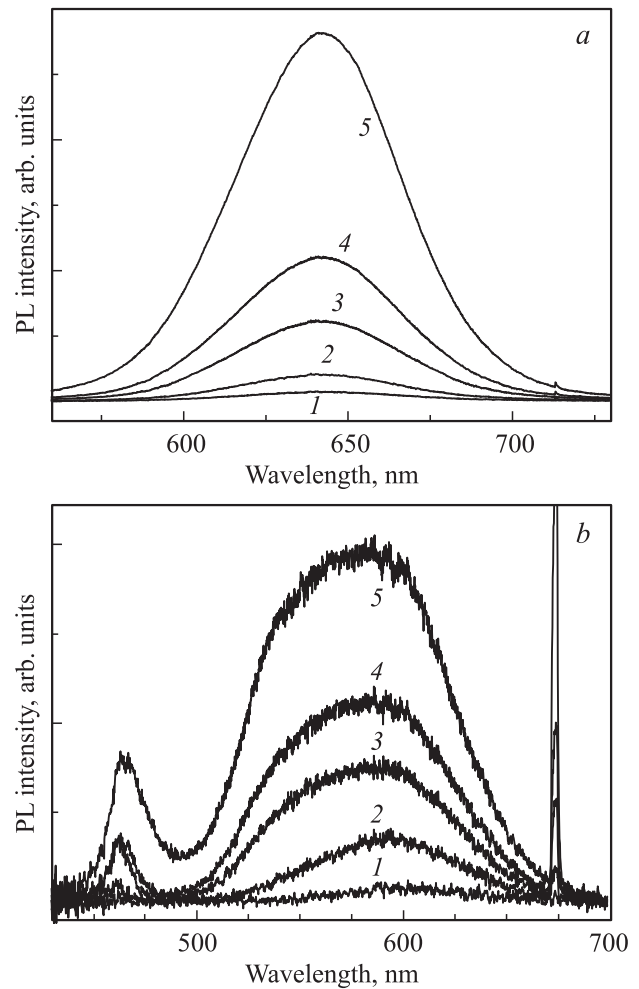


Рис. 2. Спектры сигнала фотолюминесценции (PL) при 300 К: *a* — возбуждение He–Cd-лазером, плотность возбуждения 9 (1), 18 (2), 36 (3), 50 (4), 100 Вт/см² (5); *b* — возбуждение N₂-лазером, плотность возбуждения 10⁶ (1), 5 · 10⁶ (2), 2.1 · 10⁷ (3), 3.7 · 10⁷ (4), 10⁸ Вт/см² (5).

в слоях ZnSe, (рис. 2, *b*). Коротковолновый сдвиг сигнала фотолюминесценции, наблюдаемый при увеличении плотности оптического возбуждения, подтверждает наличие гетероперехода второго рода в исследуемой сверхрешетке ZnSe/ZnTe [11].

На рис. 3 кривая 3 представляет собой рамановский спектр гетероструктуры, использованной для изготовления МПМ детектора. Видны продольная оптическая (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, выращенных на подложках GaAs (кривые 1, 2). Их сопоставление с кривой 3 позволяет идентифицировать пики рамановского рассеяния для исследуемой гетероструктуры на частотах 200 (ZnTe), 248 (ZnSe) и 289 см⁻¹ (GaAs).

Для качественного и количественного определения состава исследуемой гетероструктуры был использо-

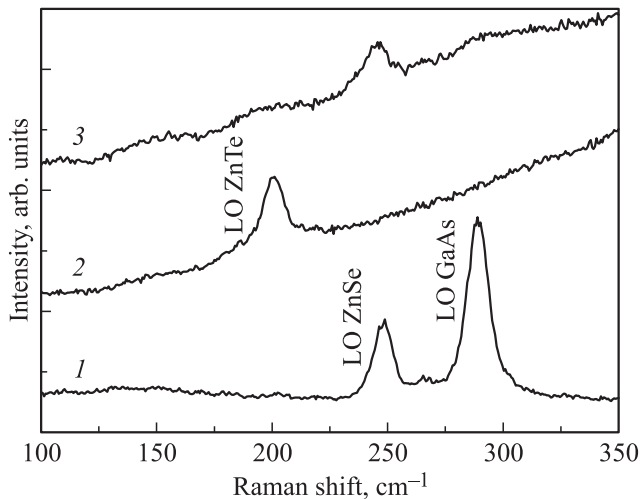


Рис. 3. Спектры рамановского рассеяния исследуемой гетероструктуры ZnSe/ZnTe (3) и эпитаксиальных пленок ZnTe (1), ZnSe (2) толщиной 400 нм на подложке (100) GaAs.

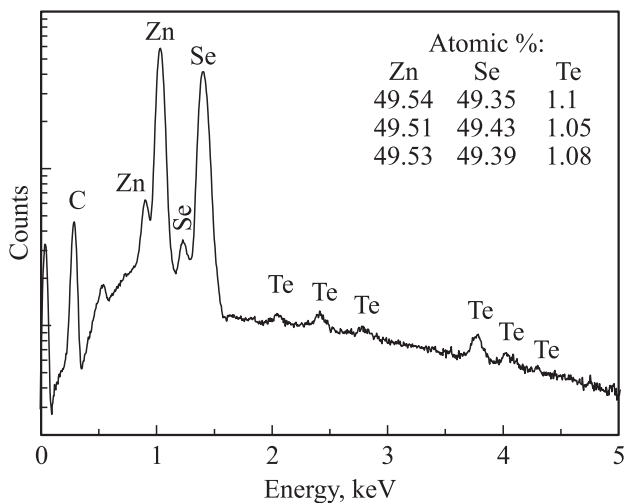


Рис. 4. Энергодисперсионный спектр гетероструктуры ZnSe/ZnTe.

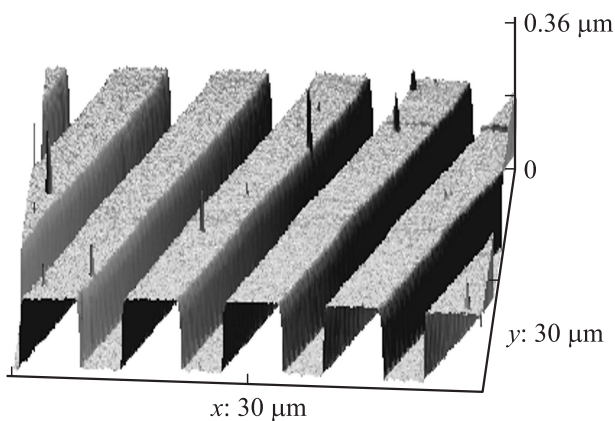


Рис. 5. Вид встречно-штыревой системы контактов МПМ диода в атомно-силовом микроскопе.

ван метод энергодисперсионной спектроскопии (EDS). На рис. 4 приведен энергодисперсионный спектр исходной гетероструктуры ZnSe/ZnTe. Анализ проведен в трех точках образца, в которых содержание теллура варьировалось в пределах 1.05–1.1 ат%. Расчет дал суммарную толщину 9.5 нм для 12 слоев ZnTe, соответственно 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).

3.2. МПМ детектор. Вольт-амперные характеристики, темновые токи

На выращенной гетероструктуре методами контактной литографии были сформированы встречно-штыревые контакты МПМ детектора. В качестве металла барьера контакта Шоттки использовалась пара Ni–Au. На рис. 5 приведена микрофотография поверхности гетероструктуры ZnSe/ZnTe и встречно-штыревой системы барьерных контактов Шоттки МПМ диода с шириной и расстоянием между ними 2.8 мкм при общей площади детектора 90×90 мкм.

Вольт-амперные характеристики изготовленных МПМ детекторов были исследованы на измерителе параметров полупроводниковых приборов Agilent B 1500A. Рентгеновское исследование показало, что в случае тонких эпитаксиальных слоев ZnTe (< 1 нм) гетероструктура изоморфная и не возникает большого количества структурных дефектов. В результате реализованный МПМ детектор на основе сверхрешетки ZnSe/ZnTe обладает низкими темновыми токами даже при больших напряжениях смещения. Темновой ток составляет 10^{-12} А при напряжении смещения 40 В, т.е. более чем на два порядка величины меньше по сравнению с МПМ детекторами на AlGaIn при почти той же геометрии контактов [9] и сравнимо с темновыми токами МПМ диодов на основе низкоразмерной гетероструктуры ZnCdS/ZnMgS/GaP [10].

3.3. Спектральная чувствительность

Измерения спектральной fotocувствительности исследуемых диодных структур выполнены с использованием ксеноновой лампы в качестве источника излучения, монохроматора, модулятора и селективного вольтметра с применением режима синхронного детектирования электрического сигнала исследуемого МПМ гетерофотодиода. Мощность падающего на испытуемый фотодиод оптического излучения измерялась откалиброванным кремниевым фотодиодом.

На рис. 6 представлены зависимости сигнала фотоотклика МПМ детектора на сверхрешетке ZnSe/ZnTe от длины волны принимаемого оптического излучения. Детектор обеспечивает детектирование оптического излу-

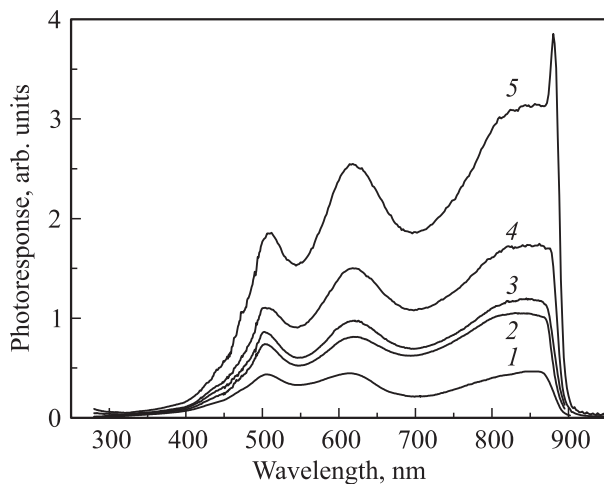


Рис. 6. Спектры сигнала фотоотклика МПМ детектора на сверхрешетке ZnSe/ZnTe второго типа. Напряжение смещения, В: 1 — 20, 2 — 30, 4 — 50, 5 — 60.

чения в диапазоне длин волн 500–870 нм. Известно, что композиционные сверхрешетки второго типа позволяют осуществить сдвиг отклика детектора в длинноволновую часть спектра в сравнении с исходными полупроводниками, образующими систему слоев сверхрешетки, что иллюстрирует реальный отклик с максимумом на длине волны 620 нм (рис. 6). По положению в спектре максимум сигнала отклика детектора почти совпадает с максимумом спектра сигнала фотолюминесценции сверхрешетки ZnSe/ZnTe (рис. 2, *b*). Увеличение смещения с 20 до 50 В дает некоторое приращение сигнала фотоотклика детектора без изменения формы его спектральной характеристики, а при 60 В приводит к существенному увеличению отклика детектора и сдвигу его максимальной чувствительности на длину волны 870 нм. При больших смещениях удается исключить блокирующее действие гетеробарьера на границе раздела ZnSe/GaAs и детектор обеспечивает эффективный сбор фотоносителей из нижележащего GaAs. Этим объясняется пик в сигнале фотоотклика детектора на длине волны 870 нм (край зоны поглощения GaAs) при напряжении смещения 60 В (рис. 6). Таким образом, спектральная характеристика детектора демонстрирует возможность селективного детектирования трех отдельно расположенных участков спектра видимого и ближнего инфракрасного диапазона длин волн. При напряжении смещения 60 В максимальный сигнал фотоотклика детектора на длине волны 620 нм соответствует ампер-ваттной чувствительности $EQE = 38\%$. На длине волны 840 нм ампер-ваттная чувствительность этого детектора составляет 0.28 А/Вт, а $EQE = 41\%$. С учетом потери 50% светового излучения за счет его отражения от встречно-штыревых контактов диода и допуская отражение света от поверхности полупроводника 30%, можно считать внутреннюю квантовую эффективность детектора близкой к теоретическому

пределу. Для сравнения внутренняя квантовая эффективность фотодиода ZnSe/ZnTe/GaAs на длине волны 620 нм равна 42% и на длине волны 820 нм 75% [12].

Следует заметить, что в спектре фотоотклика детектора также присутствует слабый всплеск на длине волны 470 нм, обусловленный покровным слоем ZnSe. Его низкая эффективность является результатом поверхностной рекомбинации.

4. Заключение

Методом MOVPE на полуизолирующей подложке GaAs выращена сверхрешетка ZnSe/ZnTe второго типа, на основе которой изготовлен МПМ детектор.

Спектральная характеристика детектора демонстрирует возможность селективного детектирования трех отдельно расположенных участков спектра видимого и ближнего инфракрасного диапазона длин волн на одной фотодиодной структуре.

МПМ детектор на основе сверхрешетки ZnSe/ZnTe обладает низкими темновыми токами и высокой чувствительностью.

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 Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 14-07-00014 и 15-07-02312).

Список литературы

- [1] H. Kroemer, G. Griffiths. *IEEE Electron. Dev. Lett.*, **EDL-4**, 20 (1983).
- [2] D.L. Smith, C. Mailhot. *J. Appl. Phys.*, **62**, 2545 (1987).
- [3] Ж.И. Алферов. *ФТП*, **32**, 1 (1998).
- [4] М.П. Михайлова, И.А. Андреев, К.Д. Моисеев, Э.В. Иванов, Г.Г. Коновалов, М.Ю. Михайлов, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **45**, 251 (2011).
- [5] Y. Sharabani, Y. Paltiel, A. Sher, A. Raizman, A. Zussman. *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 232 106 (2007).
- [6] P. Martyniuk, M. Kopytko, A. Rogalski. *Opto-Electronics Rev.*, **22**, 127 (2014).
- [7] N. Gautam, H.S. Kim, M.N. Kutty, E. Plis, L.R. Dawson, S. Krishna. *Appl. Phys. Lett.*, **96**, 231107 (2010).
- [8] S. Averin, R. Sachot, J. Hugi, M. de Fays, M. Ilegems. *J. Appl. Phys.*, **80**, 1553 (1996).
- [9] S.V. Averin, P.I. Kuznetsov, V.A. Zhitov et al. *Sol. St. Electron.*, **52**, 618 (2008).
- [10] S.V. Averin, P.I. Kuznetsov, V.A. Zhitov, L.Yu. Zakharov, V.M. Kotov, N.V. Alkeev. *Sol. St. Electron.*, **114**, 135 (2015).
- [11] N.N. Ledentsov, J. Bohrer, M. Beer, F. Heinrichsdorff, M. Grundmann, D. Bimberg. *Phys. Rev. B*, **52**, 14058 (1995).
- [12] W.-R. Chen, T.-H. Meen, Y.-C. Cheng, W.-J. Lin. *IEEE Electron. Dev. Lett.*, **27**, 347 (2006).

Редактор Л.В. Шаронова

Visible MSM detector on the base of type-II ZnSe/ZnTe superlattice

*P.I. Kuznetsov, S.V. Averin, V.A. Zhitov,
L.Yu. Zakharov, V.M. Kotov*

Fryazino Branch of Kotel'nikov Institute
of Radioengineering and Electronics,
Russian Academy of Sciences,
141190 Fryazino, Russia

Abstract MSM photodetector on the base of type-II ZnSe/ZnTe superlattice is created and investigated. Detector has low dark current and high sensitivity. The spectral characteristic of the detector demonstrates the possibility to detect selectively three separate parts of visible and near infrared radiation.