

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ

УДК 621

УЗКОПОЛОСНЫЙ МПМ-ДЕТЕКТОР ВИДИМОЙ ЧАСТИ СПЕКТРА НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ ZnCdSe/ZnSSe/GaAs

© 2021 г. С. В. Аверин^а*, П. И. Кузнецов^а, В. А. Житов^а, Л. Ю. Захаров^а, В. М. Котов^а

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

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

Поступила в редакцию 15.06.2020 г.

После доработки 28.09.2020 г.

Принята к публикации 30.09.2020 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований фотодиодов на основе встречно-штыревых МПМ (металл-полупроводник-металл) Шоттки барьерных контактов к гетеробарьерной структуре ZnCdSe/ZnSSe/GaAs. Детектор обеспечивает узкополосный отклик (FWHM = 4.3 нм) на длине волны 460 нм, резкий спад fotocувствительности в коротковолновой части сигнала отклика, высокую ампер-ваттную чувствительность и низкий темновой ток.

DOI: 10.31857/S0033849421020029

ВВЕДЕНИЕ

Открытые системы передачи оптических информационных сигналов, как правило, подвержены вредному воздействию внешних факторов: активные и пассивные помехи, фоновое излучения Солнца и т.д. Это приводит к снижению надежности информационной системы, уменьшению ее динамического диапазона. Фильтрация принимаемого оптического излучения позволяет уменьшить влияние внешних помех и выделить полезный информационный сигнал. В этой связи важной задачей является разработка узкополосных фотодетекторов [1–6]. Фотодетекторы видимого участка спектра перспективны для использования во многих промышленных, научных и военных применениях (космос, медицина, исследование окружающей среды и т.д.) [6]. До недавнего времени детектирование видимого и УФ-излучения выполнялось исключительно на Si- и GaAs-детекторах. Одним из недостатков детекторов на этих материалах является деградация их параметров (“старение”) при воздействии излучения с энергией, существенно превышающей ширину запрещенной зоны Si и GaAs [3, 7]. Другим недостатком приемных устройств на Si и GaAs является то, что их максимальная fotocувствительность находится в более длинноволновой инфракрасной области спектра, а реализация помехозащищенного узкополосного приема требует использования внешних фильтров [3, 6, 7]. Недавно были предложены фильтры проходящего видимого излучения на основе интерференционного взаимодействия в ультратонких полупроводниковых Si-структурах, помещенных между

двумя металлическими пленками [8], в другом методе фильтрация видимого излучения выполнялась с использованием химических пигментов [9], наконец, сравнительно недавно появились фильтры на основе поверхностных плазмонных поляритонов [8]. Следует отметить, что все эти фильтры, как и многие другие, являются внешними по отношению к фотодетектору и их использование приводит к усложнению приемной системы и снижению чувствительности [3, 6, 7].

Широкозонный полупроводник сам по себе является важным преимуществом с точки зрения создания на его основе фотодетекторов, поскольку позволяет реализовать низкие темновые токи и высокую надежность в условиях освещения излучением фотонами высоких энергий, а подбором гетероэпитаксиальных слоев может быть реализован узкополосный отклик детектора, что обеспечивает фильтрацию полезного информационного сигнала и, тем самым, помехозащищенность оптической информационной системы. Известно также, что широкозонные полупроводниковые материалы обладают существенно большей теплопроводностью и радиационной стойкостью по сравнению с Si и GaAs. Для сравнения теплопроводности GaAs и ZnSe при комнатной температуре соответственно равны 1.49 и 18 Вт м⁻¹ К⁻¹. Это позволяет использовать устройства на их основе при значительно более высоких температурах и мощностях принимаемого излучения, в то время как прочность химических связей широкозонных материалов приводит к их повышенной радиационной стойкости [3].

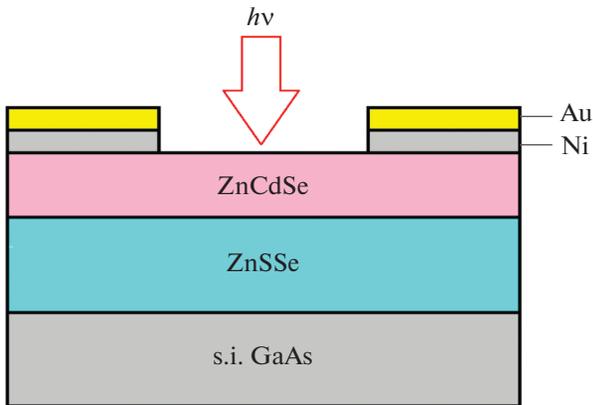


Рис. 1. Гетероструктура и встречно-штыревые контакты МПМ-диода на ее основе.

Таким образом, разработка и создание узкополосных детекторов на основе гетероструктур широкозонных полупроводниковых материалов является актуальной задачей современной оптоэлектроники.

Различные типы детекторов на основе широкозонных полупроводниковых материалов и гетероструктур были исследованы в работах [10–14]. В работе [10] представлены результаты исследований детекторов металл–полупроводник–металл (МПМ) на основе эпитаксиального слоя ZnSTeSe, выращенного на GaAs-подложке. Хотя получен достаточно резкий спад отклика детектора на длине волны 500 нм, детектор демонстрировал широкополосный отклик в области длин волн 350...500 нм и не удовлетворял требованиям селективного узкополосного приема оптического сигнала. В работе [11] исследовался фотодетектор на основе гетероструктуры ZnSTeSe/ZnSe, выращенной на GaAs-подложке. Здесь реализован достаточно эффективный широкополосный отклик детектора в спектральном диапазоне 305...900 нм с максимумом фоточувствительности на длине волны ~800 нм, обусловленным присутствием GaAs-подложки. Недавно нами были исследованы детектирующие свойства МПМ-диодов на низкоразмерных гетероструктурах с квантовыми ямами ZnCdS, разделенными барьерными слоями ZnMgS, которые обеспечивали двухцветное узкополосное детектирование излучения на длинах волн 350 и 450 нм [12]. Однако ширина полосы спектрального отклика детектора была довольно большая, на длине волны 450 нм полная ширина сигнала отклика детектора, измеренная на половине его амплитуды (*англ.* full width at half maximum, FWHM) составила 50 нм. В работе [13] были созданы и исследованы МПМ-детекторы на основе GaN/AlGaIn квантовых ям. При освещении со стороны подложки получен отклик детектора в диапазоне длин волн 297...352 нм, т.е. FWHM ~ 60 нм. Узкополосный спектральный отклик с FWHM = 27 нм был реализован в наших исследованиях

на длине волны 240 нм на AlGaIn/AlIn МПМ-фотодиоде [14]. Однако в двух последних примерах гетероструктуры были выращены на подложках из сапфира, что создает большие трудности при интеграции таких детекторов со схемами усиления и обработки сигналов. Наконец, совсем недавно авторы работы [6] опубликовали результаты исследований узкополосных фотодетекторов на основе полимерных перовскитовых слоев. Получен узкополосный отклик детектора с FWHM = 50 нм с возможностью подстройки максимальной чувствительности в диапазоне 680...710 нм. Как видим, узкополосные детекторы видимой и УФ-части спектра являются предметом интенсивных исследований в течение последних лет.

В данной работе исследована возможность уменьшения ширины спектрального отклика фотодетектора видимой части спектра с целью достижения FWHM в области единиц нанометров при сохранении высокой квантовой эффективности детектора. Детектор реализован в виде встречно-штыревых МПМ Шоттки барьерных контактов к гетероэпитаксиальной структуре ZnCdSe/ZnSSe/GaAs и обеспечивает узкополосный отклик (FWHM = 4.3 нм) на длине волны 460 нм, высокую амперваттную чувствительность и низкий темновой ток.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве базовой фотодиодной структуры был выбран поверхностно-барьерный планарный диод на основе двойных выпрямляющих контактов в системе металл–полупроводник–металл (МПМ-диод) [15–17]. МПМ-диод реализован в виде встречно-штыревых Шоттки барьерных контактов к гетеробарьерной структуре ZnCdSe/ZnSSe, выращенной методом химического газофазного осаждения из металлоорганических соединений (MOVPE) на полуизолирующей (s.i.) подложке GaAs толщиной 300 нм (рис. 1). Эпитаксии предшествовал одноминутный отжиг подложки при температуре 600°C в атмосфере водорода с целью деоксидации ее поверхности. Процесс осаждения гетероструктуры был проведен при давлении водорода, близком к атмосферному, в щелевидном кварцевом реакторе с in-situ контролем спектра отражения на длине волны 730 нм. Температура осаждения была равна 450°C. В качестве исходных веществ использованы диэтилцинк, диметилкадмий, диэтилселенид и диэтилсульфид. Толщина слоев ZnSSe (132 нм) и ZnCdSe (805 нм) рассчитана по спектрам отражения. Методами фотолитографии на поверхности гетероструктуры были сформированы встречно-штыревые контакты МПМ-диода с шириной 2 мкм и расстоянием между ними 4 мкм. В качестве металла, формирующего барьер Шоттки, использовали Ni. Общая площадь детектора 100 × 100 мкм².

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) изготовленных МПМ-гетерофотодиодов исследова-

ны при комнатной температуре на измерителе параметров полупроводниковых приборов Agilent B 1500 А. Они представлены на рис. 2 при разных направлениях напряжения смещения и демонстрируют низкие темновые токи при достаточно высоких напряжениях. При напряжении смещения 30 В темновой ток составляет 2×10^{-10} А, что сравнимо с темновыми токами МПМ-диодов на основе низкоразмерной гетероструктуры ZnCdS/ZnMgS/GaP [12]. Поскольку дробовой и обратночастотный шум пропорциональны величине тока, протекающего через переход, низкий темновой ток позволяет увеличить отношение сигнал/шум детектора. Темновой ток описывается в рамках теории термоэлектронной эмиссии. При этом высота потенциального барьера в исследуемой встречно-штыревой системе контактов МПМ согласно измерениям, выполненным по методике [18], составила 1.1 эВ, а коэффициент идеальности барьера Шоттки равен 1.16. Эти параметры свидетельствуют о высоком качестве барьеров Шоттки в исследуемых МПМ-диодах. Следует отметить небольшую асимметричность положительной и отрицательной ветвей ВАХ исследуемого МПМ-диода вследствие различий плотностей состояний на границе раздела металл–полупроводник двух контактов и дефектов роста, приводящих к неровностям поверхности выращенной полупроводниковой структуры и, как следствие, к неодинаковым эффективным площадям контактов. Пробивное напряжение детектора составляет ~ 90 В.

Измерение спектральной зависимости фоточувствительности исследуемого МПМ-диода было выполнено с использованием галогеновой лампы в качестве источника излучения, монохроматора, модулятора и селективного вольтметра с применением режима синхронного детектирования электрического сигнала отклика с МПМ-гетерофотодиода. Ампер-ваттная чувствительность определялась как отношение фототока детектора к мощности оптического излучения, падающего на МПМ-диод. Мощность излучения измеряли откалиброванными кремниевым фотодиодом. На рис. 3 представлен спектр сигнала фотоотклика детектора при различных напряжениях смещения. Детектор достаточно узкополосен, измеренная на длине волны 460 нм FWHM сигнала отклика составляет 4.3 нм, является наименьшей из известных и опубликованных в литературе для детекторов излучения видимой части спектра и позволяет обеспечить высокий уровень фильтрации полезного информационного сигнала.

В работах [3, 19] показано, что фотодетекторы на основе ZnSSe обеспечивают резкий спад чувствительности в длинноволновой части сигнала отклика детектора (“красная” граница). Это наблюдается и в наших экспериментах (см. рис. 3). Известно, что глубина поглощения оптического излучения в ZnSSe на длине волны 460 нм составляет ~ 500 нм [20]. При переходе к детектированию оптических

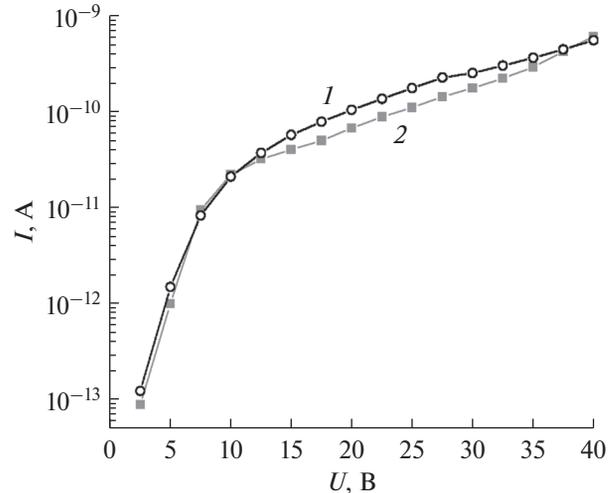


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики МПМ-гетерофотодиода: кривая 1 – прямое смещение, кривая 2 – обратное смещение.

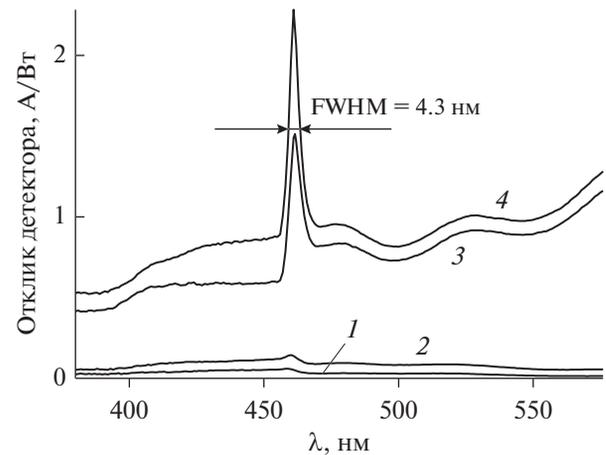


Рис. 3. Спектр сигнала фотоотклика МПМ-детектора: смещение 5 (кривая 1), 10 (2), 20 (3) и 30 В (4).

сигналов на более коротких длинах волн с увеличением энергии кванта света резко растет коэффициент поглощения падающего на детектор излучения. Оно поглощается в этом случае все ближе к поверхности гетероструктуры ZnCdSe/ZnSSe. При этом концентрация фотогенерированных электронов и дырок очень велика, что уменьшает время жизни носителей и, соответственно, увеличивает вероятность поверхностной и объемной рекомбинации [21]. Носители рекомбинируют раньше, чем уходят к встречно-штыревым контактам диода. Избыточный уровень дефектов на границе раздела ZnCdSe/ZnSSe также приводит к процессам захвата носителей и резкому спаду сигнала фотоотклика детектора. Мы объясняем резкий спад фоточувствительности в коротковолновой части сигнала отклика детектора как сильной поверхностной и объемной рекомбинацией фотоиндуцированных носителей заряда в тонком верхнем

слое ZnCdSe, так и рекомбинацией на большой плотности дефектов на границе решеточно-расогласованных слоев ZnCdSe/ZnSSe.

Моделирование в рамках двумерной модели [16] показывает, что при напряжениях смещения < 10 В и зазоре между встречно-штыревыми контактами 4 мкм детектор работает в условиях частичного обеднения активной межконтактной области. Это подтверждается существенным снижением сигнала отклика детектора в области напряжений смещений 5...10 В. Увеличение напряжения смещения приводит к полному обеднению межконтактной области и существенно увеличивает эффективность узкополосного детектора. При напряжении смещения 30 В сигнал фотоотклика МПМ-диода на длине волны 460 нм с учетом потерь на отражение от встречно-штыревых контактов соответствует ампер-ваттной чувствительности 2.3 А/Вт. Токовая чувствительность нашего детектора находится в хорошем соответствии с результатами других исследователей. В частности, ампер-ваттная чувствительность МПМ-детектора в системе контактов Ag/ZnO составляет 1.5 А/Вт [22], максимальный отклик МПМ-диода на основе встречно-штыревых контактов Ni к ZnO на длине волны 385 нм соответствовал ампер-ваттной чувствительности детектора 1.6 А/Вт, а темновой ток составлял 1.04×10^{-6} А [23]. Отметим, что ампер-ваттная чувствительность исследуемого детектора несколько выше теоретического значения вследствие эффекта внутреннего фотоусиления. Этот эффект наблюдался также и другими авторами [23–25].

Увеличение напряжения смещения приводит также и к увеличению глубины проникновения электрического поля в активный объем детектора, в сигнале отклика детектора появляется компонента отклика в инфракрасной области спектра излучения, обусловленная GaAs подложкой (см. рис. 3). Она имеет резкий спад на длине волны 870 нм, что соответствует ширине запрещенной зоны GaAs. Токовая чувствительность детектора на длине волны 800 нм составляет 2.8 А/Вт. Таким образом, исследуемый фотодетектор обеспечивает эффективное двухцветное детектирование излучения в видимой и инфракрасной части спектра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты экспериментальных исследований узкополосного фотодетектора видимой части спектра на основе МПМ-диода. Детектор реализован в виде встречно-штыревых МПМ Шоттки барьерных контактов к гетеробарьерной структуре ZnCdSe/ZnSSe/GaAs. Детектор обеспечивает узкополосный отклик на длине волны 460 нм (FWHM = 4.3 нм), резкий спад фоточувствительности в коротковолновой части

сигнала отклика, высокую ампер-ваттную чувствительность (2.3 А/Вт) и низкий темновой ток (2×10^{-10} А).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бланк Т.Б., Гольдберг Ю.А. // Физика и техника полупроводников. 2003. Т. 37. № 9. С. 1025.
2. Parisi A.V., Wong C.F. // Phys. Med. Biol. 1997. V. 42. № 7. P. 1263.
3. Monroy E., Omnes F., Calle F. // Semicond. Sci. Technol. 2003. V. 18. № 4. P. R33.
4. Konstantatos G., Clifford J., Levina L., Sargent E.H. // Nat. Photonics. 2007. V. 1. № 9. P. 531.
5. Baeg K.J., Binda M., Natali D. et al. // Adv. Mater. 2013. № 25. P. 4267.
6. Qin Z., Song D., Xu Zh. et al. // Organic Electronics. 2020. V. 76. P. 105417.
7. Metzger R.A. // Compound Semicond. 1996. May/June. P. 29.
8. Lee K.-T., Seo S., Lee J.Y., Guo L.J. // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 104. № 23. P. 231112.
9. Sabnis R.W. // Displays. 1999. V. 20. P. 119.
10. Chang S.J., Su Y.K., Chen W.R. et al. // IEEE Photonics Technol. Lett. 2002. V. 14. № 2. P. 188.
11. Chen W.-R., Meen T.-H., Cheng Y.-Ch. // IEEE Electron Device Lett. 2006. V. 27. № 25. P. 347.
12. Averin S.V., Kuznetsov P.I., Zhitov V.A. et al. // Solid State Electron. 2015. V. 114. P. 135.
13. Zhang S.K., Wang W.B., Yun F. et al. // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 81. № 24. P. 4628.
14. Averin S., Kuznetsov P., Zhitov V. et al. // Phys. Status Solidi. 2013. V. 10. № 3. P. 298.
15. Ito M., Wada M. // J. Quantum Electron. 1986. V. 22. № 7. P. 1073.
16. Averin S., Sachot R., Hugi J. et al. // J. Appl. Phys. 1996. V. 80. № 3. P. 1553.
17. Averine S.V., Chan Y.C., Lam Y.L. // Solid State Electron. 2001. V. 45. № 3. P. 441.
18. Averine S., Chan Y.C., Lam Y.L. // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 77. № 2. P. 274.
19. Sou I.K., Ma Z.H., Wong G.K.L. // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 75. № 23. P. 3707.
20. Gerhard A., Nürnberger J., Schüll K. et al. // J. Crystal Growth. 1998. V. 184/185. P. 1319.
21. Redaelli L., Mukhtarova A., Valdueza-Felip S. et al. // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 105. № 13. P. 131105.
22. Liang S., Sheng H., Liu Y. et al. // J. Crystal Growth. 2001. V. 225. P. 110.
23. Jandow N.N., Yam F.K., Thahab S.M. et al. // Current Allied Phys. 2010. V. 10. P. 1452.
24. Liu K.W., Ma J.G., Zhang J.Y. et al. // Solid State Electron. 2007. V. 51. P. 757.
25. Katz O., Bahir G., Salzman J. // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 84. № 20. P. 4092.