

УДК 621.315.592

XIX симпозиум „Нанопластика и наноплектроника“,
Нижний Новгород, 10–14 марта 2015 г.

Селективное детектирование УФ-излучения на основе низкоразмерных гетероструктур ZnCdS/ZnMgS/GaP и ZnCdS/ZnS/GaP

© С.В. Аверин*,[¶], П.И. Кузнецов*, В.А. Житов*, Л.Ю. Захаров*, В.М. Котов*,
Н.В. Алкеев*, Н.Б. Гладышева⁺

* Фрязинский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
141190 Фрязино, Россия

⁺ Федеральное государственное унитарное предприятие „Пульсар“,
105187 Москва, Россия

(Получена 22 апреля 2015 г. Принята к печати 12 мая 2015 г.)

Исследованы детектирующие свойства периодических гетероструктур с квантовыми ямами ZnCdS, разделенными барьерными слоями ZnMgS или ZnS. Гетероструктуры выращены на полуизолирующих подложках GaP методом MOVPE. На их основе изготовлены МПМ-диоды с шириной встречно-штыревых контактов с барьером Шоттки и расстоянием между ними 3 мкм при общей площади детектора 100×100 мкм. Детекторы обладают низкими темновыми токами (10^{-12} А) и при низких напряжениях смещения обеспечивают узкополосный отклик (FWHM = 18 нм на длине волны 350 нм), определяемый составом квантовой ямы ZnCdS. При увеличении смещения до 70 В наблюдается сдвиг максимальной чувствительности детектора на длину волны 450 нм, обусловленный проникновением электрического поля внешнего смещения в полуизолирующую GaP подложку, при этом узкополосный отклик детектора на длине волны 350 нм сохраняется, т. е. обеспечивается двухцветное детектирование светового излучения.

1. Введение

Повышенный интерес к ультрафиолетовой (УФ) фотонике в последние годы обусловил интенсивные исследования широкозонных полупроводниковых материалов и фотодиодных структур на их основе [1,2]. Созданы и исследованы различные типы полупроводниковых фотодетекторов УФ части спектра, включая диоды с *p-n*-переходом [3], PIN-фотодиоды [4,5], детекторы с барьером Шоттки [6], детекторы на основе системы контактов металл–полупроводник–металл (МПМ-диоды) [7,8].

Твердые растворы AlGaN являются основой современной УФ-фотоэлектроники поскольку путем изменения содержания алюминия можно сдвигать длинноволновую границу фоточувствительности детектора в широком диапазоне УФ области спектра [1,2,7,8]. Обычно слои GaN, AlGaN выращиваются на сапфире [1,2]. Вследствие большого рассогласования постоянных решеток и коэффициентов термического расширения эпитаксиальных слоев и подложки из сапфира, в процессе роста и последующего охлаждения в эпитаксиальных слоях образуется большое количество дислокаций. Эти дефекты создают электронные состояния в запрещенной зоне полупроводника, являющиеся центрами рассеяния и рекомбинации фотогенерированных носителей заряда. Они отрицательно влияют на

характеристики детекторов, приводя к низкой квантовой эффективности и увеличенному темновому току фотодиодов [9].

В работах [6,10] были исследованы детекторы УФ излучения на основе широкозонного ZnSe ($E_g = 2.7$ эВ) на GaAs-подложках, однако даже небольшое рассогласование решеток ZnSe и GaAs (0.27% при комнатной температуре) при толстых эпитаксиальных слоях в ряде случаев также приводило к большой плотности дефектов, что заметно снижало чувствительность и эффективность таких детекторов [11,12].

Для реализации УФ-детектора в области длин волн 300–450 нм были использованы твердые растворы ZnCdS с кристаллической решеткой типа сфалерита [7]. Тщательный подбор состава и режимов роста позволил вырастить эпитаксиальные слои ZnCdS, изопериодные полуизолирующим подложкам GaP, и снизить плотность дислокаций в эпитаксиальном слое ZnCdS до их уровня в GaP-подложке. Это существенно уменьшило темновой ток фотодетектора и увеличило его чувствительность [7]. Следует также заметить, что при таком подходе к реализации детектора полупроводниковая подложка GaP может быть общей со схемами усиления и обработки принимаемого оптического сигнала, т. е. удовлетворять требованиям интеграции.

Важной задачей является разработка и исследование детекторов отдельных участков УФ-спектра, т. е.

[¶] E-mail: sva278@ire216.msk.ru

селективных узкополосных фотодетекторов [2]. Такие детекторы позволяют уже на входе информационной системы отфильтровать принимаемый оптический сигнал. Это существенно упрощает информационную систему, повышает ее потенциал. Спектральный отклик традиционно используемых в настоящее время фотодетекторов на кремнии и арсениде галлия наблюдается в достаточно широкой полосе и не удовлетворяет требованиям селективности [13,14]. Реализация селективного приема с такими детекторами требует использования внешних фильтров. Недавно предложены фильтры проходящего светового излучения на основе интерференционного взаимодействия в ультратонких полупроводниковых структурах, помещенных между двумя металлическими пленками [15]. Фильтры обеспечивали ширину полосы пропускания 150 и 160 нм (по уровню 30% от максимума) соответственно на центральных длинах волн 488 и 514 нм. Подстройка фильтров к определенной длине волны излучения осуществлялась изменением толщины полупроводникового слоя Si. Как видим, полоса пропускания таких фильтров достаточно большая, она составляет $\sim 30\%$ от длины волны принимаемого излучения и не обеспечивает эффективную фильтрацию и узкополосный прием сигналов. В другом методе фильтрация оптического излучения выполнялась с использованием химических пигментов [16]. Их недостатком является подверженность вредному воздействию как теплового, так и УФ излучения. Наконец, недавно появившиеся фильтры на основе поверхностных плазмонных поляритонов имеют сильную зависимость коэффициента пропускания от угла падения оптического излучения [15]. Как видим, современные методы фильтрации оптического излучения УФ и видимой части спектра весьма разнообразны, но общим их недостатком является усложнение приемной системы и снижение ее чувствительности [13–15]. В этой связи необходим фотодетектор с характеристиками, обеспечивающими достаточно высокую спектральную селективность.

Мы исследовали новый тип фотодиодных структур — селективных фотодетекторов, максимум спектральной чувствительности которых может быть подстроен к определенной длине волны излучения УФ-части спектра, а фильтрация полезного информационного сигнала обеспечивается узким спектральным откликом фотодетектора. Детекторы выполнены на базе низкоразмерных гетероструктур ZnCdS/ZnMgS/GaP и ZnCdS/ZnS/GaP, обладают низкими значениями темновых токов и обеспечивают двухцветное детектирование принимаемого излучения. Мы показываем, что, изменяя напряжение смещения на МПМ-гетерофотодиоде, можно смещать его спектральный отклик в достаточно широком диапазоне длин волн. В отличие от детекторов на основе Si и GaAs, они потенциально устойчивы к воздействию излучения высоких энергий и напряжений смещения.

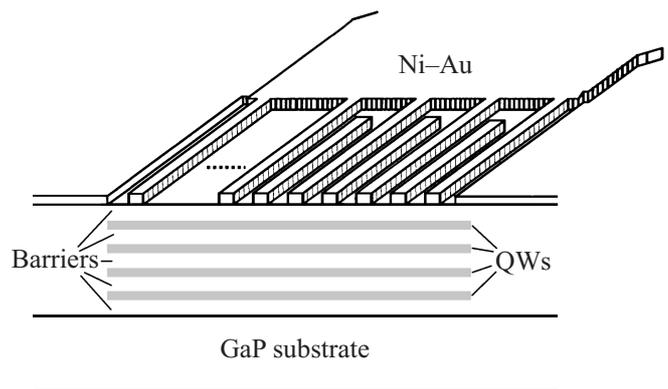


Рис. 1. Гетероструктура (см. параметры в таблице) и встречно-штырьевые контакты МПМ-фотодиода на ее основе.

2. Экспериментальные результаты

2.1. Структура МПМ-фотодиода, изготовление гетероструктур

В качестве базовой структуры для исследований были выбраны поверхностно-барьерные планарные диоды на основе выпрямляющего контакта в системе металл-полупроводник-металл (МПМ-диод) [7,8]. МПМ-детекторы (рис. 1) изготовлены на основе периодических гетероструктур с квантовыми ямами ZnCdS, разделенными барьерными слоями ZnMgS, или ZnS (см. таблицу). Гетероэпитаксиальные структуры выращены методом химического газофазного осаждения из металлоорганических соединений (MOVPE). В качестве подложек использованы легированные хромом до 10^{15} см^{-3} полуизолирующие (удельное сопротивление не менее $10^6 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) пластины (100) GaP. Процесс осаждения проводили в щелевидном кварцевом реакторе с оптическим окном для *in-situ* рефлектометрии при давлении водорода, близком к атмосферному. В качестве исходных веществ использованы диэтилцинк, диметилкадмий, бис-метилциклопентадиенилмагний и дитрет-бутилсульфид. Температура подложки составляла 450°C . Толщину отдельных слоев контролировали *in-situ* рефлектометрией, суммарная толщина гетероструктуры также рассчитывалась по спектрам отражения. Качество ростовой поверхности оценивалось с помощью атомно-силовой микроскопии на приборе Smart SPM (АИСТ-НТ). Для определения состава твердых растворов были выращены в аналогичных условиях толстые контрольные образцы ZnCdS и ZnMgS. Их состав определялся по спектрам рентгеновской дифракции в предположении выполнения закона Вегарда.

В таблице сведены основные параметры трех гетероструктур, использованных нами для изготовления МПМ-фотодетекторов.

Параметры гетероструктур МПМ-детекторов

Шифр гетероструктуры/ МПМ-детектора	Состав квантовой ямы	Состав барьера	Период/общая толщина, нм	Число периодов	Толщина КЯ, нм	Максимум излучения КЯ в спектре ФЛ, нм	rms поверхности 2 × 2 мкм, нм
UV 1199	Zn _{0.92} Cd _{0.08} S	Zn _{0.8} Mg _{0.2} S	133/800	5	13.4	351.5	10.6
A7	Zn _{0.65} Cd _{0.35} S	ZnS	40/360	8	3.7	366.1	3.2
A8	Zn _{0.65} Cd _{0.35} S	ZnS	45/405	8	6.1	382	3.5

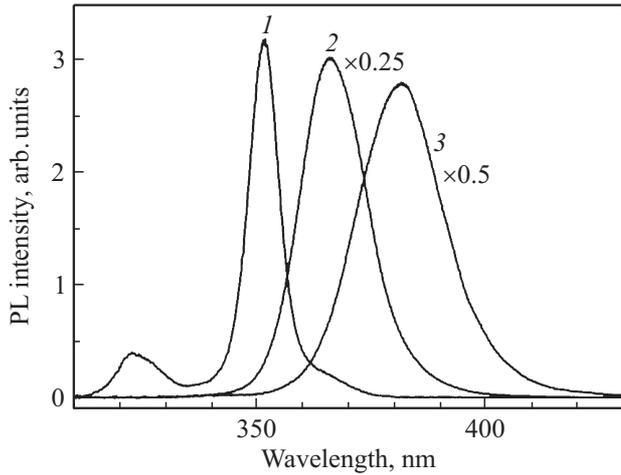


Рис. 2. Спектры сигнала фотолюминесценции при 300°С гетероструктур: 1 — UV 1199; 2 — A7; 3 — A8. FWHM для пиков сигнала ФЛ на кривых равны: 1 — 80 мэВ (8 нм), 2 — 160 мэВ (17 нм), 3 — 185 мэВ (22 нм).

2.2. Фотолюминесценция

На рис. 2 приведены спектры фотолюминесценции (ФЛ) исследуемых гетероструктур при 300 К. Для возбуждения использовалась четвертая гармоника (266 нм) твердотельного импульсного лазера (YAG: Nd+3). В спектре ФЛ образца UV 1199 (кривая 1) присутствуют два пика, обусловленные зонными переходами в квантовых ямах (КЯ) ZnCdS (351.5 нм) и барьерных слоях ZnMgS (322 нм). Несмотря на относительно большую толщину барьерных слоев 119.6 нм, происходит эффективный сток неравновесных носителей в КЯ и их излучение доминирует в спектре сигнала ФЛ. Следует отметить, что полуширина пика излучения КЯ образца UV 1199 составляет всего 8 нм, что свидетельствует о хорошем качестве гетероструктуры. В гетероструктурах A7 и A8 использована комбинация барьерных слоев ZnS и квантовых ям Zn_{0.65}Cd_{0.35}S, параметры кристаллических решеток которых 5.41 и 5.53 Å находятся по обе стороны от соответствующего параметра 5.4505 Å подложки GaP. Для предотвращения релаксации общая толщина, период и ширина КЯ в гетероструктурах A7 и A8 были существенно уменьшены по сравнению с образцом UV 1199 (см. таблицу). Спектры ФЛ этих образцов представлены кривыми 2 и 3 на рис. 2.

Излучение барьерных слоев ZnS полностью отсутствует, эффективный сток неравновесных носителей в КЯ свидетельствует о хорошем структурном совершенстве выращенных гетероструктур. Следует отметить, что увеличение толщины КЯ с 3.7 до 6.1 нм привело к сдвигу максимума их излучения с 366 до 393 нм и уширению пиков с 17 до 28 нм.

2.3. МПМ-диоды. Вольт-амперные характеристики и темновые токи

На выращенных гетероструктурах методами контактной фотолитографии были сформированы встречно-

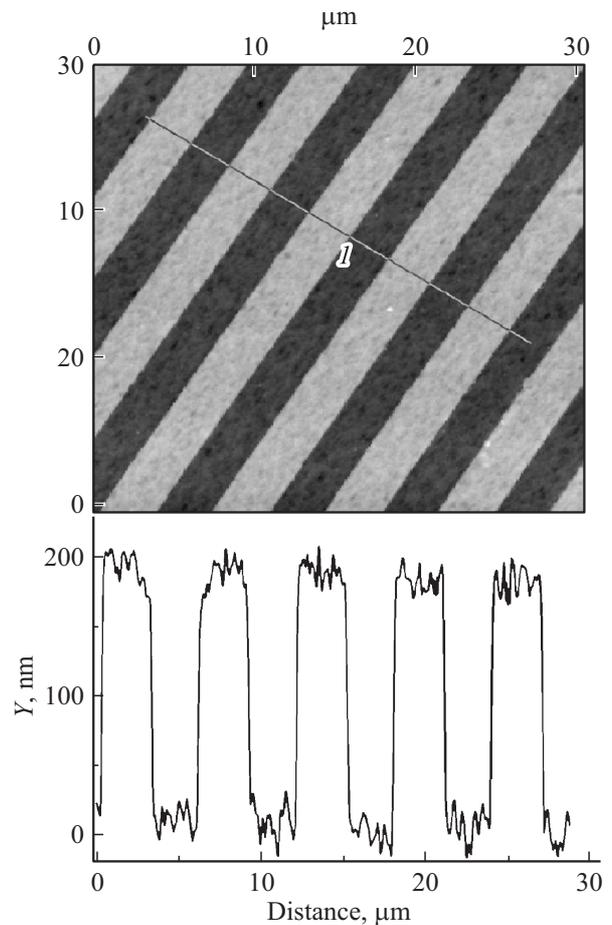


Рис. 3. Микрофотография встречно-штырьевой системы Шоттки барьерных контактов МПМ-диода UV 1199 и профиль поверхности разреза вдоль линии I.

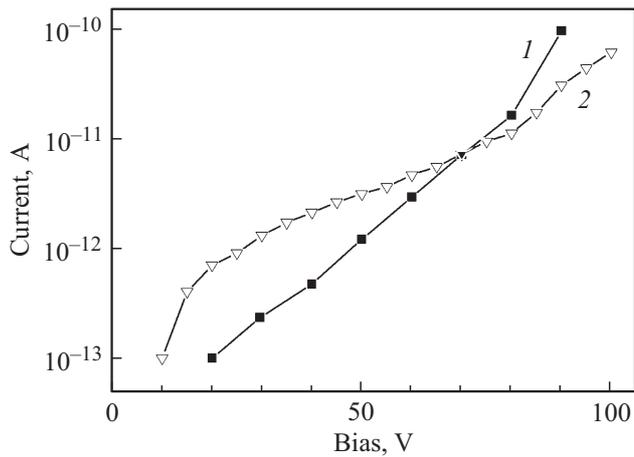


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики МПМ-гетероструктур: 1 — А7, 2 — UV 1199.

штыревые МПМ-диоды с шириной контактов с барьером Шоттки (двуслойный барьер Ni–Au) и расстоянием между ними 3 мкм при общей площади детектора 100×100 мкм. На рис. 3 представлена микрофотография поверхности гетероструктуры UV 1199 со встречно-штыревой системой Шоттки барьерных контактов МПМ-диода, а также профиль поверхности разреза вдоль линии 1, выполненные на атомно-силовом микроскопе Smart SPM (АИСТ-НТ).

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) изготовленных МПМ-гетероструктур были исследованы на измерителе параметров полупроводниковых приборов Agilent B 1500A и показывали возможность работы фотодиодов при больших напряжениях смещения с очень малыми токами утечки (рис. 4). Темновой ток МПМ-диода UV 1199 составлял $2 \cdot 10^{-12}$ А при напряжении смещения 45 В и $8 \cdot 10^{-12}$ А при 70 В, что более чем на 2 порядка величины меньше, чем у AlGaIn МПМ-диодов с той же геометрией контактов и при тех же напряжениях смещения [8], и намного меньше темновых токов МПМ-диодов на основе MgZnO $3.8 \cdot 10^{-11}$ А при смещении 4 В [17]. Темновой ток диода А7 был еще меньше, $8 \cdot 10^{-13}$ А при 45 В и $7 \cdot 10^{-12}$ А при 70 В. Темновой ток в значительной степени определяет чувствительность фотодетектора и должен быть, по возможности, уменьшен [18]. В наших диодах темновой ток может быть еще больше снижен за счет изоляции контактных площадок МПМ-диода от активного слоя полупроводника. Это, однако, приводит к усложнению технологии МПМ-детектора. Следует отметить небольшую асимметричность положительной и отрицательной ветвей ВАХ у изготовленных диодов, обусловленную отличием высот барьеров двух последовательно включенных шоттки-барьерных контактов МПМ-диода вследствие различий плотности состояний на границе раздела металл–полупроводник двух контактов и дефектов роста, приводящих к неровностям поверхности выращенной полупроводниковой структуры (см. таблицу) и, как результат, к неодинаковым актив-

ным площадям контактов. Пробивные напряжения в диодных матрицах немного отличались при переходе от одного диода к другому и составляли 90–100 В (МПМ-диод А7), 80–90 В (А8) и 100 В и выше для диода UV1199.

2.4. Спектральная чувствительность

Измерения спектральной fotocувствительности исследуемых диодных структур были 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.

2.4.1. Спектральная чувствительность МПМ-гетерофотодиодов при низких напряжениях смещения. На рис. 5, 6 представлены зависимости сигнала фотоотклика МПМ-гетерофотодиодов на основе ZnCdS/ZnMgS/GaP и ZnCdS/ZnS/GaP от длины волны принимаемого оптического излучения. Хорошо видно различное поведение исследуемых фотодиодов при разных напряжениях смещения. Спектр сигнала фотоот-

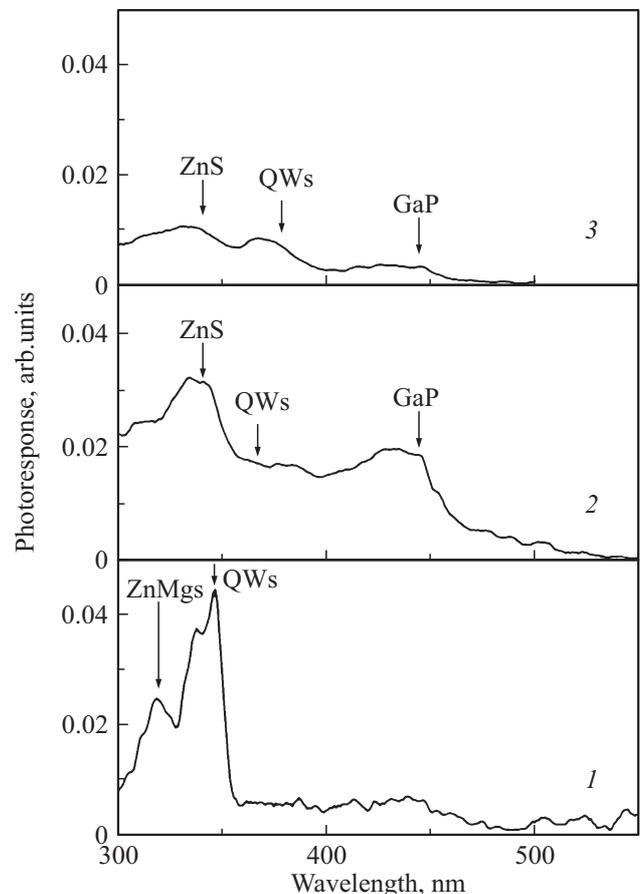


Рис. 5. Спектральный отклик МПМ-диодов при напряжении смещения 20 В: 1 — UV 1199, 2 — А7, 3 — А8.

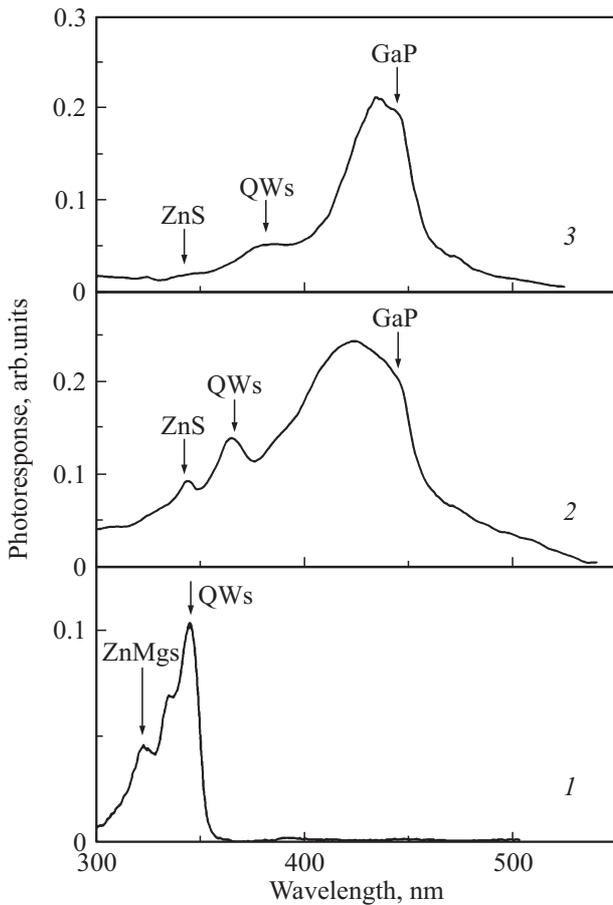


Рис. 6. Спектр сигнала фотоотклика МПМ-диодов при напряжении смещения 40 В: 1 — UV 1199, 2 — А7, 3 — А8.

клика диода UV 1199 при смещениях 20 и 40 В имеет два очевидных всплеска на длинах волн 320 нм (ZnMgS-барьерный слой) и 350 нм (ZnCdS-квантовая яма), они хорошо совпадают с положениями пиков сигнала фотолуминесценции квантовых ям и барьерных слоев (рис. 2, см. таблицу). Уровень сигнала фотоотклика прямо пропорционален приложенному напряжению. Спектры фотоотклика фотодетекторов А7 и А8 имеют иной характер и сильно трансформируются с изменением напряжения смещения. Даже при смещении 20 В на спектрах присутствуют всплески на 440 нм, которые многократно (более чем на порядок!) возрастают при смещении 40 В и доминируют в сигнале отклика детекторов А7 и А8 при таком смещении. Отклик детекторов А7 и А8 на длине волны 440 нм достаточно хорошо согласуется с пороговой энергией прямых оптических переходов в GaP: $E_0 = 2.8$ эВ ($\lambda = 443$ нм) [2]. Следует также заметить, что на спектрах фотоотклика детекторов А7 и А8 есть всплески на длинах волн барьерного слоя ZnS и квантовых ям $Zn_{0.65}Cd_{0.35}S$. Они сверхлинейно (в 5–8 раз) возрастают с увеличением смещения от 20 до 40 В.

При низких напряжениях смещения детектора UV 1199 фотогенерированные носители сосредоточены

в основном в квантовых ямах и частично в барьерных ZnMgS слоях. В таких условиях детектор обеспечивает узкополосный отклик на воздействие ультрафиолетового излучения с максимумом спектральной чувствительности на длине волны 350 нм (рис. 5, 6). Отсутствие отклика детектора UV 1199 на длинах волн, превышающих 360 нм, при напряжениях смещения 20–40 В позволяет характеризовать данный детектор как УФ детектор нечувствительный к видимому излучению. Детектор достаточно узкополосен, на длине волны 350 нм полная ширина сигнала фотоотклика детектора на половине амплитуды (FWHM) составляет 18 нм (рис. 5). Это меньше, чем у селективно-чувствительного МПМ-детектора на основе AlGaN-гетероструктуры (FWHM = 50 нм) [19] и AlGaN/AlN МПМ-детектора при его освещении со стороны подложки (FWHM = 27 нм) [17]. В работе [17] был реализован узкополосный отклик (FWHM = 7 нм) МПМ-детектора на основе ZnMgO-гетероструктуры на сапфире. Однако, как уже отмечалось, в этих диодах темновые токи существенно превышают темновые токи, реализованные в наших исследованиях.

Нами продемонстрировано, что положение пика сигнала узкополосного отклика МПМ-детектора определяется составом и шириной квантовых ям. При увеличении содержания Cd в квантовых ямах наблюдался сдвиг положения пика сигнала узкополосного отклика детектора в сторону более длинных волн. Экспериментально реализован сдвиг максимума узкополосного отклика гетеробарьерного МПМ-детектора в пределах 345–395 нм.

2.4.2. Спектральный отклик МПМ-гетерофотодиодов при больших напряжениях смещения. Как уже отмечалось, детекторы демонстрируют сильную зависимость фотоотклика от напряжения смещения. Измерения показали, что увеличение смещения детектора UV 1199 с 20 до 50 В дает трехкратное приращение сигнала фотоотклика без существенного изменения формы его спектральной характеристики, а начиная с 60 В происходит увеличение широкополосности детектора и сдвиг его максимальной чувствительности на длину волны 450 нм с последующим резким спадом (рис. 7). Кривая 2 на рис. 7 представляет спектральный отклик МПМ-детектора UV 1199 при напряжении смещения 70 В. При таком смещении детектор UV 1199 демонстрирует двухцветный отклик с максимумом чувствительности на 350 и 450 нм. В спектральном отклике доминирует полоса в области прямых оптических переходов в GaP, что свидетельствует о локализации сильного электрического поля в подложке при больших напряжениях смещения. В этом случае детектор захватывает всю фиолетовую часть видимого света, и его спектральная чувствительность близка к области максимального эффекта пигментационного излучения Солнца (360–440 нм) [2]. Сдвиг максимума чувствительности детектора при больших смещениях мы объясняем эффективным отбором фотогенерированных носителей

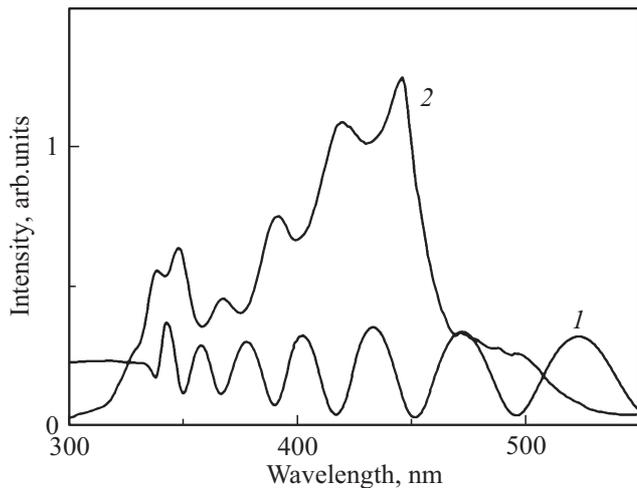


Рис. 7. Спектр фотоотражения гетероструктуры UV 1199 при 300 К (кривая 1) и спектральный отклик детектора на ее основе при смещении 70 В (кривая 2).

заряда из низлежащего слоя GaP вследствие недостаточной толщины квантово-размерного слоя ZnCdS/ZnMgS для полного поглощения носителей заряда в условиях больших смещений, когда поле эффективно проникает на всю толщину образца. Это хорошо показано на рис. 6, когда общая толщина гетероструктур детекторов A7 и A8 составляет соответственно 360 и 405 нм, т.е. в ~ 2 раза меньше, чем у детектора UV 1199, у которого влияние подложки на сигнал отклика МПМ-гетерофотодиода начинает проявляться при значительно больших смещениях, начиная с 60 В. У этих детекторов длинноволновый отклик наблюдается уже при смещении 20–40 В. Длинноволновый отклик детектора UV 1199 также хорошо согласуется с пороговой энергией прямых оптических переходов в GaP. При напряжении смещения 70 В максимальный сигнал фотоотклика детектора UV 1199 на длине волны 440 нм соответствует ампер-ваттной чувствительности 0.11 А/Вт и внешней квантовой эффективности $EQE = 28\%$. С учетом потери 50% светового излучения за счет его отражения от встречно-штыревых контактов диода и допуская 30% отражение света от поверхности полупроводника, можно считать внутреннюю квантовую эффективность детектора близкой к теоретическому пределу. На длине волны 350 нм ампер-ваттная чувствительность этого детектора составляет 0.033 А/Вт, а $EQE = 12\%$. Для сравнения ампер-ваттная чувствительность AlGaIn PIN фотодиода на этой длине волны равна 0.06 А/Вт [20], а токовая чувствительность МПМ-детектора на MgZnO на длине волны 250 нм равна 0.022 А/Вт и $EQE = 10.5\%$ [21].

Следует отметить сильную модуляцию спектрального отклика детектора UV 1199 (кривая 2 на рис. 7), что связано с интерференцией падающего и отраженного света от ростовой поверхности и интерфейса структура/подложка. Это утверждение сделано на основании

совпадения экстремумов кривой 2 спектрального отклика детектора и кривой 1 сигнала фотоотражения от поверхности гетероструктуры, находящейся рядом с активной областью исследуемого фотодетектора. Аналогичный эффект модуляции сигнала отклика фотодетектора вследствие интерференции света в эпитаксиальных слоях ZnSSeTe/GaAs наблюдали авторы работы [12].

Таким образом, наши эксперименты показывают, что в случае малой толщины активных слоев (детекторы A7, A8), трудно исключить влияние GaP-подложки на сигнал отклика МПМ-гетерофотодиода в видимой части спектра. С другой стороны, известно, что глубина эффективного проникновения электрического поля в активный объем МПМ-диода резко снижается с уменьшением расстояния между встречно-штыревыми контактами диода [22,23]. Моделирование в рамках двумерной модели показывает, что если этот размер уменьшить с 3 до 0.5 мкм, то электрическое поле будет максимально сконцентрировано у поверхности МПМ-диода [22] и, таким образом, влияние подложки на отклик детектора будет исключено даже для тонких активных гетеробарьерных слоев.

3. Заключение

1. Методом MOVPE на подложке (100) GaP выращены периодические гетероструктуры с множественными квантовыми ямами ZnCdS, пригодные для создания на их основе МПМ-детекторов ультрафиолетового излучения.
2. МПМ-детекторы демонстрируют низкие значения темновых токов и сильную зависимость спектрального отклика от напряжения смещения.
3. При низких напряжениях смещения детекторы являются узкополосными детекторами УФ-излучения, максимум их спектральной чувствительности определяется составом и шириной квантовых ям. Экспериментально показано, что положение максимума спектральной чувствительности детектора может быть подстроено к желаемой длине волны излучения в диапазоне 345–385 нм.
4. Увеличение напряжения смещения приводит к существенному увеличению широкополосности детекторов и сдвигу максимума спектральной чувствительности на длину волны 450 нм. Показано, что суммарная толщина гетероструктуры определяет нижнее значение напряжения смещения, при котором наблюдается длинноволновый отклик, связанный с подложкой.
5. Высокая селективность созданных фотодиодных структур позволяет разделять оптические каналы по длинам волн и повысить динамический диапазон и помехозащищенность информационных и измерительных систем.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 15-07-02312 и № 14-07-00014).

Список литературы

- [1] O. Ambacher. Phys. D: Appl. Phys., **31**, 2653 (1998) (и ссылки в этой статье).
- [2] Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдберг. ФТП, **37**, 1025 (2003) (и ссылки в этой статье).
- [3] E. Monroy, E. Muñoz, F.J. Sánchez, F. Calle, E. Calleja, B. Beaumont, P. Gibart, J.A. Muñoz, F. Cussó. Semicond. Sci. Technol., **13** (9), 1042 (1998).
- [4] G. Parish, S. Keller, P. Kozodoy, J.A. Ibbetson et al. Appl. Phys. Lett., **75** (2), 247 (1999).
- [5] X.H. Xie, Z.Z. Zhang, C.X. Shan, H.Y. Chen, D.Z. Shen. Appl. Phys. Lett., **101**, 081104 (2012).
- [6] E. Monroy, F. Vigue, F. Calle, J.I. Izpura, E. Muñoz, J.-P. Faurie. Appl. Phys. Lett., **77**, 2761 (2000).
- [7] S. Averin, P. Kuznetzov, V. Zhitov, L. Zakharov, N. Alkeev, N. Gladisheva. Phys. Status Solidi C, **10** (3), 298 (2013).
- [8] S.V. Averin, P.I. Kuznetzov, V.A. Zhitov, N.V. Alkeev. Sol. St. Electron., **52**, 618 (2008).
- [9] I.K. Sou, M.C.W. Wu, T. Sun, K.C. Wong, G.K.L. Wong. J. Electron. Mater., **30** (6), 673 (2001).
- [10] F. Vigue, E. Tournie, J.-P. Faurie. Electron. Lett., **36** (4), 352 (2000).
- [11] S.J. Chang, Y.K. Su, W.R. Chen, J.F. Chen, W.H. Lan, W.J. Lin, Y.T. Cherng, C.H. Lin, V.H. Liaw. IEEE Phot. Techn. Lett., **14** (2), 188 (2002).
- [12] W.-R. Chen, T.-H. Meen, Yi-Ch. Cheng, W.-J. Lin. IEEE Electron. Dev. Lett., **27** (5), 347 (2006).
- [13] R.A. Metzger. Compound semiconductors, May/June, 29 (1996).
- [14] E. Monroy, F. Omnes, F. Calle. Semicond. Sci. Technol., **18**, R33 (2003).
- [15] Kyu-Tae Lee, Sugyong Seo, Jae Yong Lee, L. Jay Guo. Appl. Phys. Lett., **104**, 231112 (2014).
- [16] R.W. Sabnis. Displays, **20**, 119 (1999).
- [17] Zipeng Zhang. Appl. Phys. Lett., **99**, 083502 (2011).
- [18] C. Pernot, A. Hirano, M. Iwaya, T. Detchprohm, H. Amano, I. Akasaki. Jpn. J. Appl. Phys., **38**, Pt. 2 (5A), L487 (1999).
- [19] S.K. Zhang, W.B. Wang, F. Yun, L. He, H. Morkoc, X. Zhon, M. Tamargo, R.R. Alfano. Appl. Phys. Lett., **81**, 4628 (2002).
- [20] Z. Yan, S. Jinglan, W. Nili, H. Li, L. Xiangyang, Li Xiangyang, M. Xiangjian. J. Semiconductors, **31** (12), 124015 (2010).
- [21] Y.N. Hou, Z.X. Mei, Z.L. Liu, T.C. Zhang, X.L. Du. Appl. Phys. Lett., **98**, 103506 (2011).
- [22] S. Averin, R. Sachot, J. Hugi, M. de Fays, M. Ilegems. J. Appl. Phys., **80** (3), 1553 (1996).
- [23] S. Averin, O. Bondarenko, R. Sachot. Sol. St. Electron., **46**, 2045 (2002).

Редактор А.Н. Смирнов

Selective detection of UV-radiation on the base of low-dimensional ZnCdS/ZnMgS/GaP, ZnCdS/ZnS/GaP heterostructures

S.V. Averin*, P.I. Kuznetzov*, V.A. Zhitov*, L.Yu. Zakharov*, V.M. Kotov*, N.V. Alkeev*, N.B. Gladisheva⁺

* Fryazino branch of the Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian academy of sciences, 141190 Fryazino, Russia

⁺ Federal governmental unitary enterprise „Pulsar“, 105187 Moscow, Russia

Abstract Detecting properties of periodic heterostructures with quantum wells ZnCdS separated by barrier layers ZnMgS or ZnS have been investigated. Heterostructures were grown on semi-insulating GaP substrates by MOVPE. The MSM diodes with a width of interdigital Schottky contacts and distance between them of $3\mu\text{m}$ and a total detector area of $100 \times 100\mu\text{m}$ have been fabricated. Detectors have low dark currents (10^{-12} A) and at low bias provide narrowband response (FWHM = 18 nm at a wavelength of 350 nm) determined by the composition of ZnCdS quantum well. Increasing a bias up to 70 V shifts maximum detector sensitivity at the wavelength of 450 nm due to the penetration of external electric field down the semi-insulating GaP substrate, while a narrowband detector response at 350 nm remains. Thus, a two-color detection of light emission is provided