

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

PACS 85.60.Dw; 81.16.Rf

Высокоэффективные быстродействующие МПМ-фотодетекторы*

С.Коллин, Ф.Пардо, С.В.Аверин, Н.Бардо, Ж.-Л.Пелар

Разработаны принципы построения и технология изготовления высокоэффективных быстродействующих фотодетекторов на основе МПМ-наноструктур. Для эффективной локализации излучения в области сильного поля, а также для уменьшения потерь света при отражении от контактов диода использовалась наноразмерная встречно-штыревая дифракционная решетка и многослойное брэгговское зеркало. Измерения коэффициентов отражения и квантовой эффективности для многослойной структуры находятся в хорошем соответствии с теоретическими оценками. Получено рекордное значение квантовой эффективности ($QE = 46\%$) для сверхбыстродействующих МПМ-фотодетекторов. Детектор обладает высокой спектральной селективностью ($\Delta\lambda_{1/2} = 17$ нм) на длине волны 800 нм. С учетом емкости диода и времени дрейфа фотогенерированных носителей быстродействие рассматриваемых детекторов составляет ~ 500 ГГц. Низкая плотность темнового тока в исследуемых структурах ($j = 1$ нА/мкм²) позволяет реализовать на их основе высокочувствительные быстродействующие селективные детекторы оптического излучения.

Ключевые слова: фотодетектор, наноструктуры, МПМ-диод, квантовая эффективность.

Быстродействующие фотодетекторы в значительной степени определяют перспективы создания широкополосных волоконно-оптических систем, представляют большой интерес для генерации терагерцевого излучения посредством оптического смешения сигналов двух лазеров на фотодиоде и, наконец, необходимы для проведения многих научных экспериментов. Значительный прогресс в области детектирования сверхкоротких оптических импульсов в последнее время был достигнут в основном за счет уменьшения пролетных расстояний при одновременном снижении паразитных емкостей полупроводниковых диодных структур [1–4]. Основными типами быстродействующих фотодиодных структур являются хорошо известные ррн-диод [4] и появившиеся сравнительно недавно фотодиодные структуры на основе контактов металл–полупроводник–металл (МПМ-диоды) [1–3]. При этом, поскольку глубина поглощения оптического излучения у известных полупроводниковых материалов составляет ~ 1 мкм, уменьшение межэлектродного расстояния ниже этого значения в попытке увеличить быстродействие детектора приводит к быстрому снижению квантовой эффективности ррн-диода и увеличению емкости для обоих типов структур. Для снижения емкости требуется уменьшение площади детектора. Поскольку при равной площади МПМ-диод имеет меньшую емкость, чем ррн-диод [5], он обладает лучшими потенциальными возможностями для увеличения быстродействия детектора.

* Доложена на Nanotoday 2009 Conference (Biopolis, Singapore, August 2–5, 2009) и 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference (Hamburg, Germany, September 21–25, 2009).

St. Collin, F. Pardo, N. Bardou, J.-L. Pelouard. Laboratoire de Photonique et de Nanostructures CNRS, Route de Nozay, 91460 Marcoussis, France
С.В.Аверин. Фрязинский 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 21 декабря 2009 г.

Структура МПМ-диода достаточно проста [2, 6]. На поверхности полупроводникового материала, выращенного на полуизолирующей подложке, методами фотолитографии создается встречно-штыревая система контактов. Падающие фотоны с энергией, большей ширины запрещенной зоны полупроводникового материала, создают в области между контактами в пределах глубины поглощения электронно-дырочные пары, которые разделяются электрическим полем диода и собираются на встречно-штыревых контактах. Быстрота и эффективность сбора носителей заряда определяют быстродействие (скорость отклика) детектора и его эффективность. Как уже отмечалось, важной особенностью является чрезвычайно малая емкость МПМ-диода, которая в 4 раза меньше емкости ррн-диода равной площади [5].

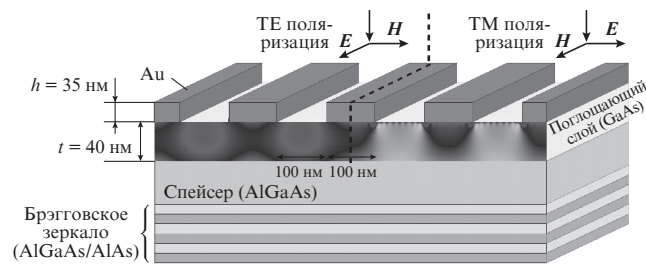
Уже изготовлены и исследованы МПМ-диоды с размерами контактов и расстояниями между ними порядка 100 и даже 25 нм [1]. Для достижения сбалансированного влияния времени дрейфа носителей и емкости структуры на скорость отклика детектора активная площадь таких структур составляет 1×1 мкм. При этом, наряду с трудностями фокусирования принимаемого излучения на малую площадку детектора и технологическими трудностями изготовления МПМ-наноструктур возникает и другая проблема, связанная с малой глубиной эффективного проникновения электрического поля в таких структурах [6]. Электрическое поле, достаточно сильное в приповерхностной области структуры, быстро спадает в структурах субмикронных размеров при движении в глубь диода. Поэтому большинство носителей заряда рождается в области слабого поля МПМ-диода и их скорости дрейфа малы. Следует также отметить, что средняя длина пути дрейфа носителей заряда к соответствующим контактам в МПМ-наноструктурах определяется не столько межконтактным зазором, сколько глубиной поглощения излучения. Это приводит к затягиванию сигнала импульсного отклика детектора и к низкой чувствительности. Отражение света от встречно-штыревых контактов также ведет к сниже-

нию эффективности МПМ-диодов, и, несмотря на столь малые характеристические размеры, граничные частоты таких детекторов составляют 300–500 ГГц, а квантовая эффективность – только 3%–5% [1, 6].

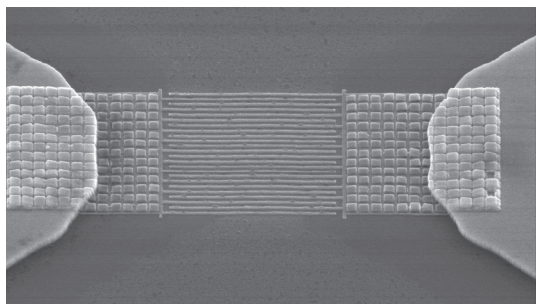
Скорость отклика детектора может быть увеличена в структуре с гетеробарьером [6]. Наличие гетеробарьера в активной области диода позволяет эффективно блокировать электроны и дырки, генерированные в области слабого электрического поля, снизить дистанции дрейфа носителей заряда и существенно увеличить быстродействие детектора. Однако, в этом случае значительная часть носителей заряда бесполезно теряется, поэтому квантовая эффективность гетеробарьерного МПМ-диода мала, всего ~8%. Для достижения высокого быстродействия и высокой квантовой эффективности фотодетектора необходимы поиски путей локализации оптического излучения в приповерхностной области МПМ-диода и снижения потерь на отражение светового излучения вследствие непрозрачности встречно-штыревых контактов диода.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований фотодиодной МПМ-структуры с использованием наноразмерной встречно-штыревой решетки контактов, позволяющей эффективно локализовать излучение в области сильного поля диода и уменьшить потери света при отражении от его контактов. Это обеспечивает существенное повышение эффективности фотодетектора при сохранении высокого быстродействия.

На рис. 1 представлена структура МПМ-фотодетектора. Встречно-штыревая система контактов МПМ-диода образует частично-отражающую, оптически прозрачную дифракционную решетку, которая является верхним зеркалом резонатора Фабри–Перо. Нижнее зеркало резонатора выполнено в виде многослойного брэгговского зеркала (24 периода четвертьволновых слоев $\text{AlAs}/\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$),



а



б

Рис. 1. Фотодиодная структура и пространственное распределение интенсивности электрического поля в активном объеме МПМ-фотодетектора для TE и TM поляризаций оптического излучения (а) и фотография фотодетектора на сканирующем электронном микроскопе (б).

а резонансная полость образована тонким поглощающим слоем (GaAs , 40 нм), расположенным на поверхности оптически прозрачного спейсера ($\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$, 30 нм). Структура выращена на полуизолирующей подложке GaAs методом молекулярно-пучковой эпитаксии.

Встречно-штыревая система МПМ-детектора образована решеткой контактов высотой 35 нм и изготовлена напылением Au (27 нм) электронным лучом с последующим отслаиванием (lift-off) в трихлорэтилене. Подслоем Ti (2–5 нм) обеспечивает лучшую адгезию контактов к GaAs . Ширина контактов и расстояние между ними равны 100 нм, активная область детекторов составляла 3×3 , 5×5 и 10×10 мкм. При такой геометрии, как показали исследования, обеспечивается резонансное поведение структуры в области длин волн 800 нм. Таким образом, длина волны принимаемого оптического излучения в 8 раз превышает характеристический размер решетки. На рис. 1, б представлена фотография МПМ-детектора, выполненная на сканирующем электронном микроскопе.

Несколько слов относительно оптической прозрачности (на определенной длине волны) дифракционной решетки, которую представляет собой встречно-штыревая система контактов МПМ-диода. Сравнительно недавно авторы [7], исследуя оптические свойства решеток на основе субмикронных цилиндрических отверстий в металлических пленках, установили, что на длинах волн, значительно превышающих период решетки, такие структуры обеспечивают прозрачность, во много раз превышающую ту, которая получается исходя из стандартной апертурной теории. Такие необычные оптические свойства двумерной периодической структуры с характеристическими размерами в десятки раз меньше длины волны света, обусловлены возбуждением плазмонов на поверхности периодической структуры. Возбуждение горизонтальных поверхностных плазмонов ведет к сильному увеличению интенсивности поля на горизонтальных поверхностях металлической пленки, что, в свою очередь, приводит к эффективному резонансному туннелированию светового излучения через решетку с размерами меньше длины волны [8]. Эти наблюдения инициировали ряд теоретических работ, посвященных взаимодействию светового излучения с нанометровыми периодическими структурами [8–10], и привели к возможности создания новых фотонных приборов. Свойства поверхностных резонансов в периодических структурах уже нашли применение в оптоэлектронных устройствах, в частности, они использованы в излучающих устройствах [11] и перестраиваемых фильтрах [12]. Мы впервые использовали способность поверхностных плазмонов эффективно пропускать световое излучение через решетку с размерами меньше длины волны для эффективного ввода оптического сигнала в активную область МПМ-диода (рис. 1). Результаты электромагнитного расчета всей структуры, выполненного с использованием модального метода [9, 10], показали, что при выбранных параметрах детектора исследуемая диодная структура весьма перспективна для приема оптического излучения TE поляризации. В этом случае фотогенерация носителей заряда происходит в очень узкой приповерхностной области с высокой напряженностью электрического поля между электродами встречно-штыревой системы контактов.

На рис. 2 приведены спектры отражения и поглощения для нанометровой решетки контактов, выполненной из Au с подслоем Ti (2 нм) для TE поляризации падаю-

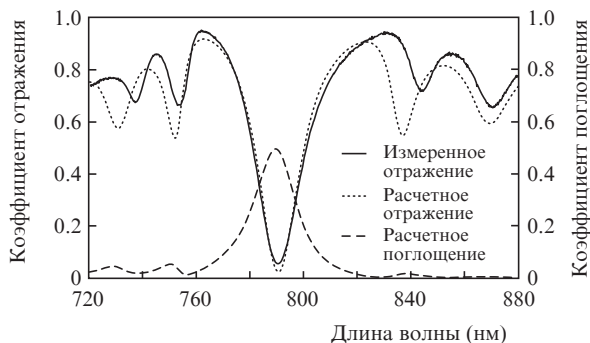


Рис.2. Спектры отражения и поглощения для нанометровой решетки контактов, выполненной из Au (30 нм) с подслоем Ti (2 нм) для ТЕ поляризации падающего света.

шего света. Как расчеты, так и экспериментальные исследования показывают, что, несмотря на наличие металлических встречно-штыревых контактов МПМ-диода, только небольшая часть падающего излучения на длине волны 790 нм отражается от поверхности детектора, в то время как 50% света попадает в объем структуры и поглощается в активном слое GaAs толщиной 40 нм. Отметим очень хорошее совпадение расчетных и экспериментально измеренных коэффициентов отражения для исследуемых наноструктур.

Для достижения высокой чувствительности фотодетектора необходимым условием является получение высококачественных контактов с барьером Шоттки. Вольт-амперные характеристики МПМ-диодов были исследованы на анализаторе параметров полупроводниковых структур Agilent 4156С. Типичное значение темнового тока диода с размерами активной области 5×5 мкм равно 10 пА при напряжении смещения 1 В и менее 50 пА при 2 В (рис.3). В таких структурах имеет место понижение высоты барьера вследствие сильного электрического поля в области контакта (эффект Шоттки). Ранее мы показали возможность определения основных характеристик контакта Шоттки непосредственно на МПМ-микроструктуре [13]. Принимая во внимание понижение барьера за счет поля и туннелирование, мы определили, что в исследуемых контактах высота барьера $\Phi = 0.6$ эВ, ток насыщения $I_s = 2.5 \times 10^{-11}$ А и коэффициент идеальности равен 1.05. Эти параметры свидетельствуют о высоком качестве барьера Шоттки в изготовленных контактах и отсутствии промежуточного окисного слоя на границе раздела Ti–GaAs. Низкая плотность темнового тока в исследуемых структурах позволяет реализовать на их основе чувствительные детекторы оптического излучения.

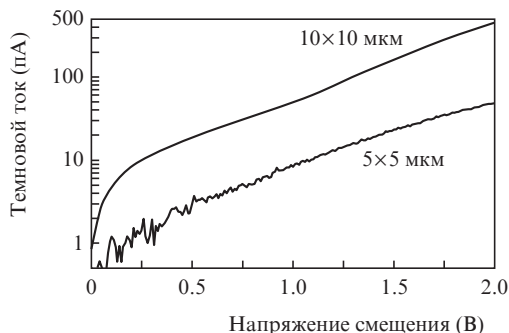


Рис.3. Вольт-амперная характеристика исследуемых фотодиодных структур с размерами активной области 5×5 и 10×10 мкм.

Спектральная чувствительность МПМ-диодов изменялась с использованием перестраиваемого источника лазерного излучения (лазер на Ti–сапфире) и спектрометра Jvon-Jobin. Спектральная зависимость всех оптических компонентов и лазера измерялась калиброванным детектором Newport 818-ST. Излучение лазера фокусировалось на активную область МПМ-детектора при помощи объектива и фиксировалось CCD-камерой. Оптическая мощность, падающая на испытуемые диоды, менялась с помощью калиброванных фильтров и измерялась эталонным детектором. На рис.4 показана спектральная селективность квантовой эффективности исследуемого МПМ-детектора при измерениях в диапазоне длин волн 760–820 нм, хорошо согласующаяся с расчетными данными. Максимальная внешняя квантовая эффективность детектора при мощности падающей волны ТЕ поляризации 20 нВт составила 46% ($\lambda = 790$ нм). Это более чем на порядок превышает эффективность обычного МПМ-фотодиода такой же геометрии и является рекордом для сверхбыстродействующих фотодетекторов оптического излучения. При увеличении мощности оптического сигнала эффективность детектора снижается вследствие экранирования темного электрического поля диода пространственным зарядом фотогенерированных дырок [14].

Эффективный сбор генерированных носителей заряда в исследуемом диоде достигается за счет локализации оптического излучения в приповерхностной области сильного электрического поля МПМ-детектора. Поскольку средняя длина пути носителя заряда составляет ~50 нм, а емкость диода равна ~8 фФ, это позволяет реализовать граничную частоту МПМ-детектора ~500 ГГц. Детектор достаточно узкополосен (рис.4), при максимальной чувствительности на длине волны 790 нм ширина полосы пропускания на половине высоты составляет 17 нм. Длину волны максимальной чувствительности детектора можно менять путем изменения геометрии встречно-штыревой системы контактов МПМ-диода. Селективно-чувствительный детектор позволяет осуществить спектральную фильтрацию принимаемого оптического излучения, используемую в системах спектрального мультиплексирования [15], он также оказывается удобным в открытых системах передачи оптических информационных сигналов, поскольку исключена необходимость использования специальных фильтров, снижающих потенциал системы.

Таким образом, в настоящей работе исследован новый тип МПМ-фотодиодных структур с характеристическими размерами много меньше длины волны принимаемого оптического излучения. Наноразмерная встречно-штыревая решетка контактов совместно с брэгговским зеркалом используется как для уменьшения потерь света

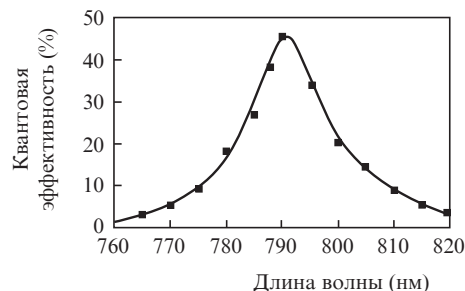


Рис.4. Зависимость квантовой эффективности МПМ-фотодиода от длины волны излучения.

при его отражении от контактов диодной структуры, так и для эффективной локализации излучения в области сильного поля МПМ-диода. Возбуждение горизонтальных поверхностных плазмонов приводит к эффективному резонансному прохождению светового излучения через решетку контактов с размерами меньше длины волны. Это обеспечивает эффективный сбор фотогенерированных носителей заряда, резонансную чувствительность и высокое быстродействие МПМ-диода. На резонансной длине волны квантовая эффективность разработанного МПМ-фотодетектора с такой же геометрией. Низкая плотность темнового тока в исследуемых структурах позволяет реализовать на их основе чувствительные селективные детекторы оптического излучения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-07-00047 и грант № 09-02-12396).

1. Chou S.Y., Liu M.Y. *IEEE J. Quantum Electron.*, **28**, 2358 (1992).
2. Soole J.B.D., Schumacher H., *IEEE J. Quantum Electron.*, **27**, 737 (1991).
3. Averin S.V., Chan Y.C., Lam Y.L. *Sol.-State Electron.*, **45**, 441 (2001).
4. Bowers J.E., Burrus C.F. *J. Lightwave Technol.*, № 5, 1339 (1987).
5. Аверин С.В., Гуляев Ю.В., Дмитриев М.Д., Потапов В.Т., Сашо Р. *Квантовая электроника*, **22**, 284 (1996).
6. Averin S.V., Bondarenko O., Sachot R. *Sol.-State Electron.*, **46**, 2045 (2002).
7. Ebbesen T.W., Lezec H.J., Ghaemi H.F., Thio T., Wolff P.A. *Nature*, **391**, 667 (1998).
8. Martin-Moreno L., Garcia-Vidal F.L., et al. *Phys. Rev. Lett.*, **86**, 1114 (2001).
9. Porto J.A., Garcia-Vidal F.J., Pendry J.B., *Phys. Rev. Lett.*, **83**, 2845 (1999).
10. Collin St., Pardo F., Teissier R., Pelouard J.-L. *Phys. Rev. B*, **63**, 033107 (2001).
11. Worthing P.T., Barnes W.L. *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 3035 (2001).
12. Kim T.J., Thio T., Ebbesen T.W., Grupp D.E., Lezec H.J. *Opt. Lett.*, **24**, 4 (1999).
13. Averin S.V., Chan Y.C., Lam Y.L. *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 274 (2000).
14. Averin S.V., Sachot R. *Sol.-State Electron.*, **44**, 1627 (2000).
15. Chen X., Nabet B., Quaranta F., Cola A., Currie M. *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 3222 (2002).