

01;06

Импульсный отклик МПМ фотодиода с гетеробарьером

© С.В. Аверин

Институт радиотехники и электроники РАН, Фрязинское отделение,
141190 Фрязино, Московская область, Россия
e-mail: sva278@ire216.msk.su

(Поступило в Редакцию 14 июля 2003 г.)

В рамках двумерной модели исследуются процессы дрейфа фотогенерированных носителей заряда в активном объеме быстродействующих фотодиодов в системе выпрямляющих контактов металл–полупроводник–металл (МПМ) обычной планарной структуры и структуры с гетеробарьером. Дается сравнение двух типов фотодиодных структур с точки зрения характеристик сигнала импульсного отклика детектора и квантовой эффективности. Анализируются ограничения в отклике планарного МПМ диода, возникающие при последовательном уменьшении размеров встречно-штыревой системы контактов. Обсуждается возможность увеличения скорости отклика МПМ диода. Показано, что структура с InP/GaInAs гетеробарьером сильно видоизменяет движение фотогенерированных носителей заряда и существенно увеличивает скорость отклика МПМ фотодиода.

Введение

В последнее время наблюдается значительный исследовательский и практический интерес к фотодиодным структурам на основе выпрямляющих контактов в системе металл–полупроводник–металл (МПМ) [1–7]. Структура таких диодов достаточно проста: встречно-штыревые контакты методами фотолитографии формируются на поверхности активного слоя полупроводникового материала, выращенного на полуизолирующей подложке. Световое излучение, падающее на поверхность МПМ диода, в пределах глубины поглощения создает электронно-дырочные пары, которые разделяются внутренним электрическим полем, создавая фототок во внешней цепи. Уменьшение расстояния между встречно-штыревыми контактами при одновременном сжатии активной области диода рассматривается как основной путь увеличения быстродействия МПМ детектора [1–5]. По мере развития технологических методов межконтактный зазор МПМ диода непрерывно уменьшался, переходя в область субмикронных и даже нанометровых размеров. МПМ детектор с наименьшими размерами контактов (ширина штыря и зазора 25 nm) был изготовлен методами электронной литографии и описан в работе [4]. При этом для достижения сбалансированного влияния времени переноса носителей заряда и емкости МПМ диода с межконтактным зазором 25 nm его активная область уменьшена до $1 \times 1 \mu\text{m}$, что приводит к трудноразрешимой проблеме фокусирования принимаемого излучения при использовании таких структур в реальном эксперименте. Импульсный отклик такого диода не был измерен, а моделирование в рамках одномерной модели методом Монте-Карло дает ширину полосы пропускания детектора (400 GHz) (-3 dB) и $\text{FWHM} = 0.25 \text{ ps}$. В рамках двумерной модели мы показываем, что следует весьма осторожно использовать методы простого уменьшения линейных размеров планарной диодной структуры для достижения быстродей-

ствующего отклика детектора. Исследуется импульсный отклик планарного МПМ диода и анализируются ограничения, обусловленные уменьшением размеров встречно-штыревой системы контактов диода. В отличие от других моделей (см., например, [3–5]) в наших расчетах учитывается неоднородность электрического поля в активном объеме МПМ детектора вследствие двумерного характера его пространственного распределения. Программа моделирования ранее была успешно использована для изучения характеристик сигнала импульсного отклика фотодетекторов на GaInAs/GaAs сверхрешетках [6] и GaInAs МПМ фотодиодов [7]. В настоящей работе эта модель была развита для изучения процессов электронно-дырочного транспорта в МПМ структурах с гетеробарьером. Мы показываем, что наличие гетеробарьера в светопоглощающей области сильно видоизменяет транспорт фотогенерированных носителей и существенно увеличивает скорость отклика InP/GaInAs МПМ фотодиода.

Моделирование сигнала импульсного отклика МПМ детектора

Для исследования сигнала отклика МПМ детектора на воздействие короткого импульса оптического излучения мы использовали моделирование движения фотогенерированных носителей заряда в активной области МПМ диода. Активная область диода определяется расстоянием между соседними встречно-штыревыми контактами и глубиной проникновения падающего на диод излучения.

Уменьшение зазора между контактами в общем случае приводит к уменьшению времени переноса носителей. Время переноса, однако, существенно зависит от дрейфовой скорости носителей заряда и, таким образом, от величины электрического поля в активной области диода. Для достижения быстродействующего сигнала отклика диода его активная область должна быть полно-

стью обеднена носителями, а величина поля в активной области должна быть достаточной для обеспечения дрейфа носителей при скоростях, близких к скоростям насыщения [1,8]. В этом случае время дрейфа носителей к соответствующим встречно-штыревым контактам будет определяться [9]

$$\tau_{dr} = \frac{t\chi}{2V}, \quad (1)$$

где

$$\frac{1}{V^4} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{V_e^4} + \frac{1}{V_h^4} \right), \quad (2)$$

t — зазор между встречно-штыревыми контактами; χ — корректирующий коэффициент; V — средняя скорость дрейфа носителей; V_e , V_h — дрейфовая скорость насыщения для электронов и дырок соответственно.

Данный подход к анализу движения носителей заряда является одномерным и справедлив лишь в случае МПМ диодных структур с достаточно большим межконтактным зазором в несколько микрон. Это является следствием того факта, что глубина проникновения излучения в GaAs на длине волны 750 nm, примерно равна 1 μm . Моделирование показывает, что, если зазор между контактами превышает глубину проникновения падающего на диод излучения, электрическое поле в активной области планарного МПМ диода достаточно однородно и его величина достаточна для обеспечения условий дрейфа при скоростях, близких к скоростям насыщения для большинства фотогенерированных токовых носителей. Такой подход, однако, не является достаточно корректным для структур, в которых межконтактный зазор меньше $\sim 1 \mu\text{m}$. В этом случае весьма трудно обеспечить условия дрейфа большинства фотогенерированных носителей при скоростях, близких к скоростям насыщения, поэтому необходим двумерный анализ распределения электрического поля и движения носителей заряда в таких структурах. Наша модель подробно описана в работах [6,7]. Моделирование является двумерным в том смысле, что оно рассматривает распределение фотогенерированных носителей заряда, потенциала и электрического поля по координатам X и Y единичной ячейки (активной области) МПМ диода. Влияние гетеробарьера учитывается посредством поля, создаваемого разностью потенциалов двух полупроводниковых слоев. На каждом шаге моделирования поле гетеробарьера добавляется к внутреннему полю, создаваемому разностью потенциалов на встречно-штыревых контактах и фотогенерированными носителями заряда. Двумерная модель позволила установить ограничения, связанные с уменьшением эффективности проникновения электрического поля в активный объем МПМ диода в случае субмикронных межэлектродных зазоров. Связь скорости дрейфа электронов и дырок с величиной электрического поля для GaInAs взята из литературных источников [8]. Предполагалось, что рекомбинационные эффекты как на поверхности, так и в объеме диода не являются определяющими на таких коротких временных интервалах,

которые рассматриваются в данном анализе [10]. Фототок на контактах вследствие движения носителей заряда вычисляется с помощью теоремы Рамо [11]. Анализ проводится в предположении, что скорость максимальная носителей заряда в GaInAs равна $2 \cdot 10^7 \text{ cm/s}$, что является несколько заниженным значением для МПМ диодов с зазором 100 nm между контактами вследствие явления всплеска дрейфовой скорости [5]. Строгое рассмотрение процессов дрейфа носителей заряда в структурах с нанометровым зазором требует учета этого эффекта [5,12]. Между тем достаточно хорошее соответствие расчетных и экспериментальных значений быстродействия позволяет судить о возможности применения данной модели для анализа динамического поведения подобных структур.

Внутреннее поле и динамика транспорта носителей заряда

В качестве примера на рис. 1 дается расчетное распределение электрического поля в единичной ячейке МПМ фотодиода с величиной межэлектродного зазора 0.1 μm . Моделирование показывает, что электрическое поле достаточно сильное в приповерхностной области, но быстро падает при движении в глубь диода. Так, при напряжении смещения 1.5 V электрическое поле с напряженностью 2 V/ μm находится примерно на глубине 0.1 μm , в то время как на глубине 0.3 μm напряженность поля уже в 20 раз меньше. Сильная неоднородность внутреннего поля планарного МПМ диода с малым зазором приводит к модификации скорости пространственного разделения токовых носителей — дрейфовые скорости носителей заряда зависят от величины напряженности электрического поля, причем более „тяжелые“ дырки движутся медленнее электронов [8]. В результате электроны весьма быстро собираются на контактах, поскольку они имеют высокую скорость дрейфа как в области большой напряженности электрического поля, около поверхности диодной структуры, так

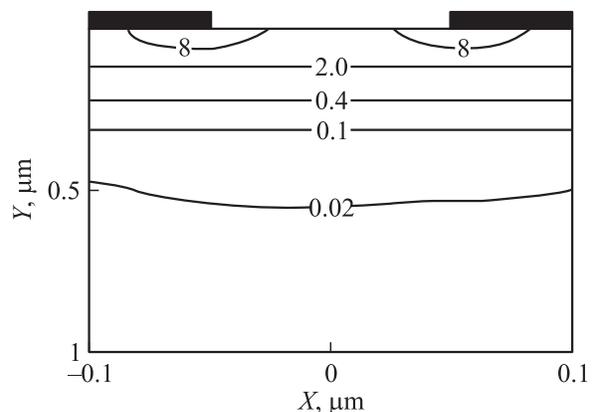


Рис. 1. Распределение электрического поля (цифры у кривых, V/ μm) в единичной ячейке планарного GaInAs МПМ диода. Напряжение смещения на контактах диода 1.5 V.

и в области низких значений поля, в глубине диода. В отличие от дырок, скорость дрейфа которых постоянно падает при уменьшении поля, скорость дрейфа электронов достигает своей максимальной величины при сравнительно низких полях [8]. Такое поведение обусловлено особенностями зонной структуры GaInAs: междолинный переборс электронов из низлежащей Γ долины зоны проводимости в энергетически более высокие L и X долины ведет к снижению их скорости дрейфа [8]. В то же время напряженность электрического поля в активном объеме диода слишком мала для большинства дырок и они движутся при скоростях, значительно меньших скорости насыщения. Между тем в области $0.5\text{--}1\ \mu\text{m}$ при движении в глубь диода электрическое поле весьма слабое, в том числе и для электронов, скорость их дрейфа здесь также мала. Все же электроны уходят из активной области диода (определяемой глубиной проникновения излучения) гораздо быстрее дырок. Моделирование показывает, что даже после $3\ \text{ps}$, когда все электроны уже покинули активную область диода, довольно много дырок все еще остается внутри диода, приводя к длинному „хвосту“ в сигнале импульсного отклика планарного МПМ диода и уменьшенной квантовой эффективности (рис. 2). Таким образом, наряду с технологической сложностью изготовления МПМ структур с субмикронным зазором и трудностями фокусирования принимаемого излучения на малую светочувствительную площадку, основной проблемой таких структур является низкая эффективная глубина проникновения электрического поля в активный объем фотодиода. Как результат скорости дрейфа носителей заряда далеки от насыщения, непостоянны и сильно зависят от местоположения носителей заряда.

Следует также заметить, что в планарных МПМ структурах с субмикронным и нанометровым зазором дистанция дрейфа фотогенерированных носителей заряда определяются не столько расстоянием между контактами, сколько глубиной проникновения принимаемого излучения, и примерно равны зазору между контактами только для носителей, которые фотогенерированы непосредственно в приповерхностной области диода (рис. 3). Дистанция дрейфа других носителей заряда к соответствующим контактам намного больше. В результате импульсный отклик детектора, несмотря на очень

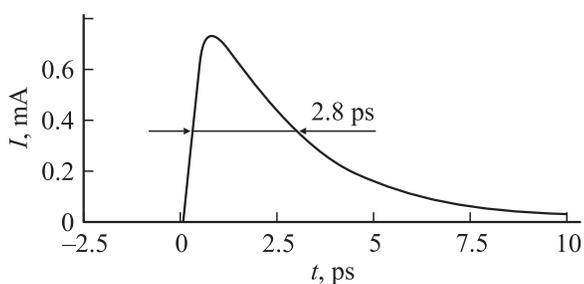


Рис. 2. Импульсный отклик планарного GaInAs МПМ диода на длине волны $750\ \text{nm}$. Ширина электрода и межэлектродный зазор $100\ \text{nm}$, напряжение смещения $1.5\ \text{V}$.

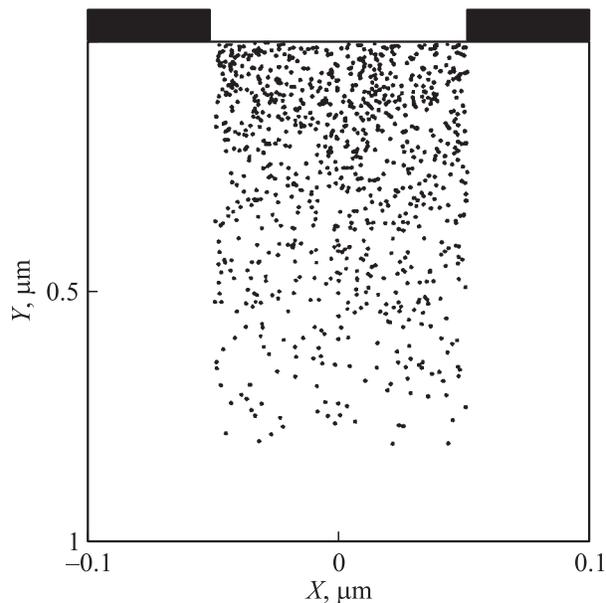


Рис. 3. Распределение электронов/дырок в единичной ячейке GaInAs МПМ диода в первый момент после прибытия импульса оптического возбуждения на длине волны $750\ \text{nm}$.

малый межэлектродный зазор, в значительной степени затягивается из-за влияния медленной компоненты дырочного тока (рис. 2). При этом FWHM (полная ширина сигнала импульсного отклика, измеренная на половине его амплитуды) равна $2.8\ \text{ps}$, а время спада отклика диода (по уровню $90\text{--}10\%$) составляет $5.5\ \text{ps}$.

Увеличение напряжения смещения приводит лишь к незначительному улучшению рассматриваемой ситуации. Хотя скорость дрейфа дырок растет при увеличении смещения, в то же время скорость электронов несколько падает относительно своего пикового значения [8]. Необходимо приложить еще большее напряжение смещения, чтобы компенсировать резкий спад напряженности поля в субмикронных структурах и достичь скоростей насыщения для большинства токовых носителей. Однако большое напряжение на обратно-смещенном барьере Шоттки приводит к высоким значениям напряженности поля на концах встречно-штыревых контактов, что ведет к лавинному пробоею перехода. По этим причинам для достижения всех преимуществ структур с малым (доли микрона) межконтактным зазором фотогенерация носителей тока должна быть ограничена только приповерхностной областью полупроводника, т. е. областью сильного поля.

МПМ диоды на основе многослойных полупроводниковых структур довольно широко используются в качестве детекторов оптического излучения на длинах волн $1.3\ \dots\ 1.6\ \mu\text{m}$ [13–15]. Обычно тонкий слой широкозонного полупроводникового материала вводится между светопоглощающим GaInAs и металлом Шоттки контакта, чтобы уменьшить темновой ток МПМ диода вследствие низкой высоты естественного барьера на GaInAs.

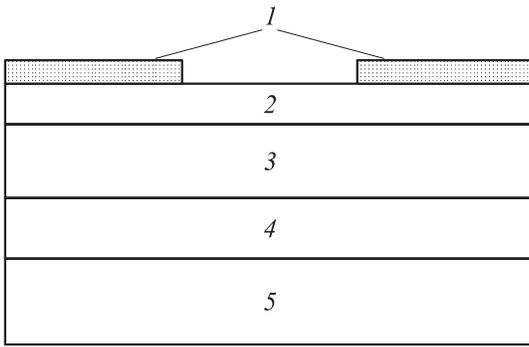


Рис. 4. Разрез InP/GaInAs гетерофотодиодной структуры. 1 — встречно-штыревые контакты, 2 — 100 nm InP, 3 — 800 nm GaInAs, 4 — 300 nm InP (буфер), 5 — полуизолирующая подложка InP.

При этом добавочный слой не поглощает световое излучение в длинноволновой области, а образующийся гетеробарьер является вредным, поскольку препятствует эффективному проникновению электрического поля в активный GaInAs [14]. Мы исследовали возможность быстродействующего детектирования оптического сигнала, которая заключается в использовании InP/GaInAs гетеробарьера для эффективного блокирования носителей заряда, фотогенерированных в области слабого поля. Последовательность полупроводниковых слоев такой гетерофотодиодной структуры состоит из 800 nm GaInAs и верхнего слоя InP толщиной 100 nm (рис. 4). Металлические встречно-штыревые контакты формируются поверх слоя InP. Моделирование показывает, что присутствие гетеробарьера, его местоположение, напряжение смещения, плотность оптического возбуждения — все эти факторы в значительной степени изменяют условия дрейфа фотогенерированных токовых носителей. При этом активный InP слой должен быть по возможности тонким, чтобы обеспечить максимальную скорость отбора носителей, а с точки зрения эффективности детектора его толщину следует выбирать достаточной, чтобы обеспечить поглощение большей части излучения в этом слое. Коэффициенты поглощения оптического излучения в этих полупроводниках различны [8]. Мы выбрали толщину слоя InP равной 100 nm. В этом случае поглощается 30% падающего на диод излучения на длине волны 750 nm и тем самым обеспечивается разумный компромисс между быстродействием детектора и его эффективностью.

Чтобы убедиться в справедливости такого подхода, мы смоделировали импульсный отклик МПМ диода с InP/GaInAs гетеробарьером. Влияние гетеробарьера проявляется в резком скачке электрического поля вследствие различий в зонной структуре InP и GaInAs: ширина запрещенной зоны InP равна 1.35 eV, в то время как у InGaAs — 0.73 eV. Величина гетеробарьера между InP и InGaAs достаточна, чтобы уменьшить дистанции дрейфа носителей заряда в МПМ гетерофотодиоде и сделать

их равными толщине InP слоя. Пространственное распределение электронов и дырок в активной области детектора по времени иллюстрирует эффект гетеробарьера (рис. 5). Моделирование показывает, что гетеробарьер в значительной степени предотвращает возможность сбора на контактах диода „медленных“ носителей заряда, фотогенерируемых в области слабого электрического поля. Видно, что спустя 3 ps после прибытия импульса оптического возбуждения почти все носители заряда уже

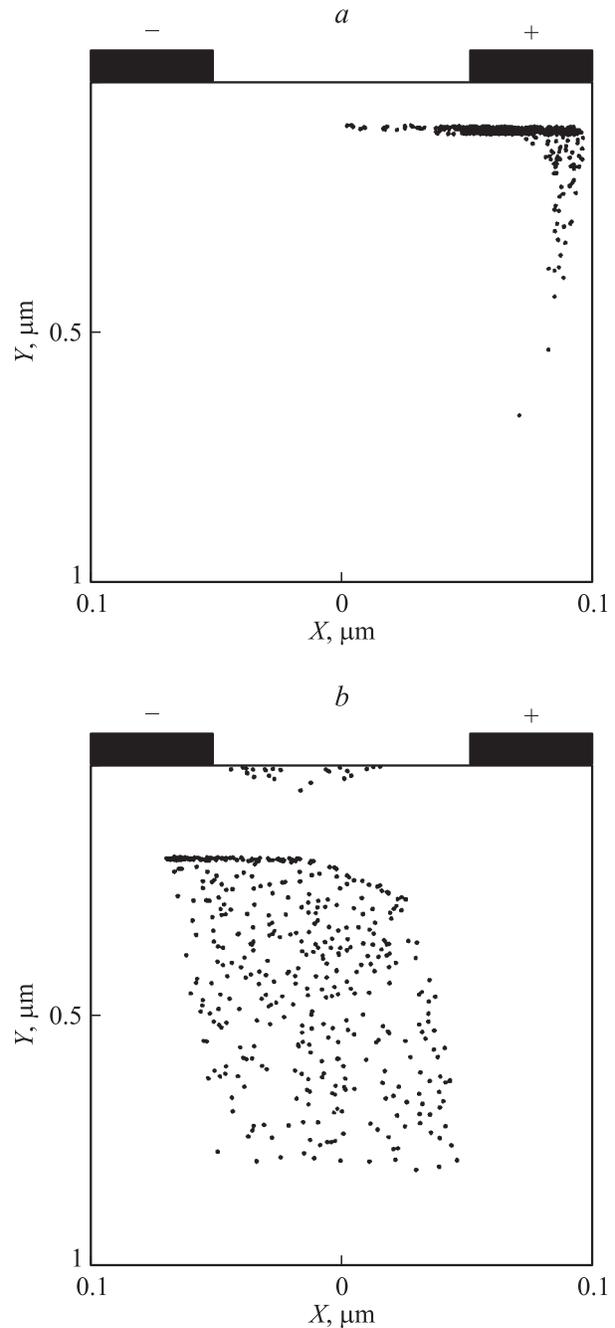


Рис. 5. Распределение электронов (a) и дырок (b) в активном объеме InP/GaInAs МПМ гетерофотодиода спустя 3 ps после прибытия импульса оптического возбуждения с энергией 0.01 pJ на длине волны 750 nm.

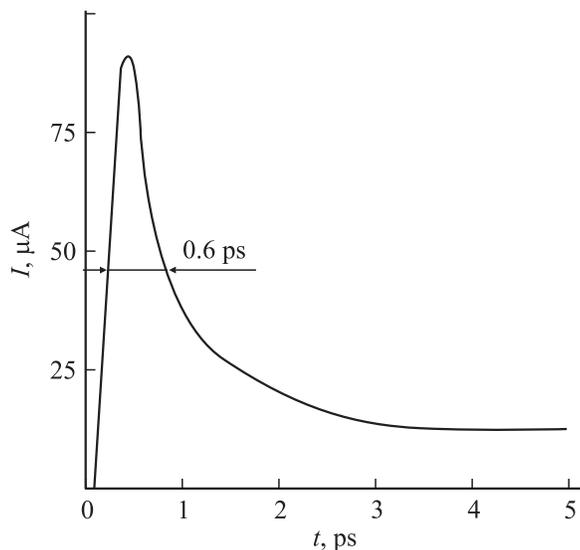


Рис. 6. Импульсный отклик МПМ гетерофотодиода на воздействии импульса оптического возбуждения с энергией 0.01 pJ на длине 750 nm. Напряжение смещения 1.5 V.

покинули слой InP. При этом на контактах МПМ диода собираются только носители, фотогенерируемые в верхнем полупроводниковом слое, приводя к очень быстрому отклику детектора (рис. 6). Фотогенерированные носители либо собираются на встречно-штыревых контактах, либо рекомбинируют в узкозонном полупроводниковом материале на временном интервале, много большем, чем время переноса из активного слоя к контактам, и не дают заметного вклада в фототок. При этом захват носителей заряда на центрах рекомбинации в узкозонном полупроводниковом материале является полезным с точки зрения увеличения широкополосности детектора, поскольку в этом случае уменьшается „хвост“ в сигнале отклика диода. Такой подход, однако, накладывает определенные ограничения на выбор напряжения смещения МПМ гетерофотодиода, которое в данном случае должно быть сравнительно небольшим, чтобы уменьшить отток электронов и дырок из GaInAs через гетеробарьер к контактам Шоттки. При больших смещениях блокирующее действие гетеробарьера становится менее эффективным.

При таком подходе удастся наиболее просто реализовать субмикронные размеры активной области МПМ диода и, таким образом, малые дистанции дрейфа токовых носителей, которые в данном случае определяются толщиной слоя InP. Уместно напомнить, что в обычном планарном МПМ диоде дистанции дрейфа определяются величиной межэлектродного зазора (т.е. литографически возможными) и глубиной проникновения светового излучения в базу диода. Следует также отметить, что уменьшение толщины слоя InP не приводит к увеличению емкости диода, но ведет лишь к некоторому снижению его эффективности. Однако улучшение в скорости отклика весьма существенно. Моделирование показыва-

ет, что МПМ структура с гетеробарьером позволяет реализовать сверхбыстрый режим фотодетектирования для энергий фотона, превышающих ширину запрещенной зоны InP, расчетная величина FWHM сигнала отклика гетеробарьерной МПМ структуры с шириной зазора 0.1 μm и площадью встречно-штыревой системы контактов 10 × 10 μm² составляет 0.6 ps (рис. 6). Это в пять раз короче отклика обычного МПМ детектора с такой же геометрией (рис. 2) и сравнимо с откликом МПМ диода на низкотемпературном GaAs [16,17]. Улучшение в скорости отклика детектора сопровождается снижением его эффективности. Моделирование показывает, что квантовая эффективность МПМ гетерофотодиода составляет 0.1. Такие фотодиодные структуры представляют интерес в случаях, когда скорость отклика является более важной характеристикой детектора, чем его эффективность.

Наши расчеты подтверждаются экспериментальными исследованиями. Ранее методом внешнего электрооптического стробирования мы измерили электрический отклик гетеробарьерного InP/GaInAs МПМ диода. Длительность сигнала отклика детектора, совмещенного с копланарной СВЧ линией передач, составила FWHM = 0.6 ps [18]. Следует, однако, заметить, что по условиям эксперимента энергия импульса оптического возбуждения составляет 3–10 pJ. Известно, что световой импульс с большой энергией может существенно видоизменить внутреннее электрическое поле [19,20]. Детальный анализ динамического поведения МПМ диодных структур при больших интенсивностях падающего на диод излучения должен учитывать эффекты экранирования внутреннего поля.

Заключение

Исследован импульсный отклик МПМ фотодетектора на воздействие короткого импульса света с точки зрения распределения фотогенерированных носителей заряда и внутреннего электрического поля. Исследованы ограничения, обусловленные уменьшением линейных размеров встречно-штыревой системы контактов планарного МПМ диода: сильная неоднородность электрического поля в активном объеме субмикронных МПМ структур приводит к снижению быстродействия детектора. Показано, что наличие гетеробарьера в активной области МПМ диода видоизменяет процессы дрейфа фотогенерированных носителей заряда в МПМ диоде и существенно увеличивает скорость отклика InP/GaInAs МПМ диода. Такая концепция может быть эффективной при разработке сверхбыстродействующих оптоэлектронных устройств.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 03-01 00219).

Список литературы

- [1] *Ito M., Wada O.* // IEEE J. Quantum Electronics. 1986. Vol. 22. N 7. P. 1073–1077.
- [2] *Rogers D.L.* // J. Lightwave Technology. 1991. Vol. 9. N 9. P. 1635–1638.
- [3] *Soole J.B.D., Schumacher H.* // IEEE J. Quantum Electronics. 1991. Vol. 27. N 3. P. 737–752.
- [4] *Chou S.Y., Liu M.Y.* // IEEE J. Quantum Electronics. 1992. Vol. 28. N 10. P. 2358–2368.
- [5] *Chou S.Y., Liu M.Y., Fisher P.B.* // Appl. Phys. Lett. 1992. Vol. 61. N 4. P. 477–479.
- [6] *Hugy J., Haddab Y., Sachot R., Hegems M.* // J. Appl. Phys. 1995. Vol. 77. N 4. P. 1785–1794.
- [7] *Averin S., Sachot R. et al.* // J. Appl. Phys. 1996. Vol. 80. N 3. P. 1553–1558.
- [8] *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов. Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 456 с.
- [9] *Kato K.* // IEEE Trans. 1999. Vol. MTT-47. N 7. P. 1265–1281.
- [10] *Sarto A.W., Van Zeghbroeck B.J.* // IEEE J. Quantum Electron. 1997. Vol. 33. N 12. P. 2188–2194.
- [11] *Ramo S.* // Proc. IRE. 1939. Vol. 27. N 9. P. 584–585.
- [12] *Пожелла Ю.* Физика быстродействующих транзисторов. Вильнюс: Моклас, 1989. 261 с.
- [13] *Kikuchi T., Ohno H., Hasegawa H.* // Electron. Lett. 1988. Vol. 24. N 19. P. 1208–1210.
- [14] *Yang L., Sudbo A.S. et al.* // IEEE Photonics Technol. Lett. 1990. Vol. 2. N 1. P. 56–58.
- [15] *Kuhl D., Hieronymi F. et al.* // Electron. Lett. 1990. Vol. 26. N 25. P. 2107–2109.
- [16] *Chiu Y.J., Flecher S.B., Lasaosa D., Bowers J.E.* // Appl. Phys. Lett. 1997. Vol. 71. N 17. P. 2508–2509.
- [17] *Kordos P., Foster A., Marso M., Ruders F.* // Electron. Lett. 1998. Vol. 34. N 1. P. 119–120.
- [18] *Аверин С.В., Штейн фон Камински Е.* и др. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 1. С. 81–90.
- [19] *Moglestue C., Rosenzweig J. et al.* // J. Appl. Phys. 1991. Vol. 79. N 4. P. 2435–2448.
- [20] *Averin S.V., Sachot R.* // Solid State Electronics. 2000. Vol. 44. N 9. P. 1627–1634.