

06:07

©1995 г.

СВЕРХБЫСТРЫЙ МЕХАНИЗМ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДРЕЙФА НОСИТЕЛЕЙ ТОКА В МПМ ГЕТЕРОБАРЬЕРНЫХ СТРУКТУРАХ

С.В.Аверин,¹ Е.Штейн фон Камински, Х.Г.Роскос, Х.И.Гелен, Р.Керстинг,² И.Плеттнер,² К.Лео,³ А.Коль, Б.Шпангенберг, Х.Куриц, О.Холлригер³

¹Институт радиотехники и электроники РАН, 141120 Фрязино, Россия.

²Институт полупроводниковой электроники, Аахен, Германия.

³Институт полупроводниковой и ионной техники, Юлих, Германия.

(Поступило в Редакцию 9 ноября 1993 г.

В окончательной редакции 14 сентября 1994 г.)

Встречно-штыревые МПМ (металл-полупроводник-металл) фотодиоды на основе гетероструктур $\text{InP}/\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ предложены в качестве сверхбыстродействующих фотодетекторов видимого диапазона волн. Режим вертикального дрейфа фотогенерированных носителей в таких структурах позволяет наиболее просто реализовать субмикронные размеры активной области фотодиода и значительно увеличить его быстродействие без существенного снижения эффективности ввода светового излучения. Методом внешнего электрооптического стробирования измерен субпикосекундный электрический отклик детектора ($\text{FWHM}=0.6$ пс), встроенного в копланарную линию передач СВЧ энергии. При напряжении смещения 1 В и энергии импульса оптического возбуждения 10 пДж изменение напряжения на фотодиоде составило 40% от величины напряжения смещения, что делает такие диодные структуры достаточно эффективными и чрезвычайно быстродействующими фотодетекторами оптического излучения.

Введение

В последнее время достигнут значительный прогресс в области детектирования сверхкоротких оптических импульсов [1,2]. Увеличение быстродействия обычно достигается путем уменьшения пролетных расстояний при одновременном уменьшении паразитных емкостей устройства. Так, GaAs встречно-штыревые фотодиодные структуры на основе выпрямляющего контакта металл-полупроводник-металл (МПМ) при расстоянии между контактами 0.5 мкм и активной области диода 12×12 мкм обеспечивали $\text{FWHM}=4.8$ пс и широкополосность

105 ГГц [1]. Попытки дальнейшого увеличения скорости действия таких структур обычно ведут к еще большему уменьшению межэлектродного расстояния при одновременном уменьшении активной области диода [2]. Однако наряду с чисто технологическими трудностями изготовления МПМ встречно-штыревых структур с размерами контактных электродов и расстояниями между ними, лежащими в области десятков и сотен нанометров, это приводит к уменьшению темнового сопротивления диода и существенно снижает эффективность ввода излучения в фотодиод, поскольку для снижения паразитной емкости диода размеры его активной области должны быть заметно уменьшены.

При другом подходе исследователи используют новые полупроводниковые материалы для быстрого удаления фотогенерированных носителей из активной области прибора, причем скорость отклика в этом случае улучшается в ущерб эффективности преобразования [3]. К настоящему времени наиболее быстродействующие МПМ фотодиодные структуры используют низкотемпературно выращенный GaAs (*LT-GaAs*) с большой плотностью улавливающих центров, что позволяет осуществить процессы фотодетектирования с временем отклика порядка 1 пс [3].

МПМ диоды на основе твердого раствора $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ довольно широко исследованы в качестве детекторов оптического излучения на длинах волн 1.3–1.6 мкм [4–7]. Обычно тонкий слой широкозонного полупроводникового материала вводится между активным GaInAs слоем и металлом контакта для увеличения естественной высоты барьера Шоттки и снижения темнового тока контакта. При этом добавочный слой не поглощает излучение в длинноволновой области, а образующийся гетеробарьер является вредным для работы такого МПМ диода с барьером Шоттки, поскольку препятствует эффективному проникновению электрического поля в активный GaInAs слой [4].

В настоящей работе был исследован другой механизм фотодетектирования, основанный на вертикальном дрейфе фотогенерированных носителей с использованием гетеробарьерной структуры, встроенной в МПМ фотодиод. Излучение поглощается при этом в тонком слое широкозонного полупроводникового материала, расположенного в поверхностном слое МПМ диода. Фотогенерированные носители либо собираются на встречно-штыревых контактах, либо за счет поля гетеробарьера переносятся из рабочего слоя в резервный слой узкозонного полупроводника (InGaAs), где рекомбинируют на временном интервале, много большем, чем время переноса из активного слоя в резервный, и не дают заметного вклада в фототок. Это, однако, накладывает определенные ограничения на выбор напряжения смещения МПМ диода, которое в данном случае должно быть сравнительно небольшим, чтобы уменьшить отток электронов и дырок из GaInAs слоя через гетеробарьер к металлическим Шоттки контактам. Рассматриваемая фотодиодная структура (рис. 1) позволяет наиболее просто реализовать субмикронные размеры активной области (увеличение быстродействия) в отличие от режима горизонтального дрейфа носителей тока в обычном МПМ диоде, размеры активной области которого и межэлектродные расстояния определяются возможностями литографии.

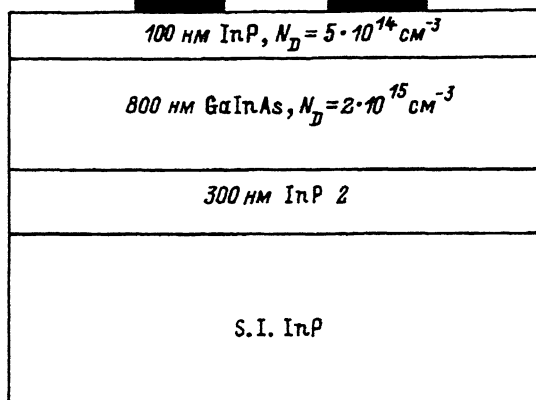


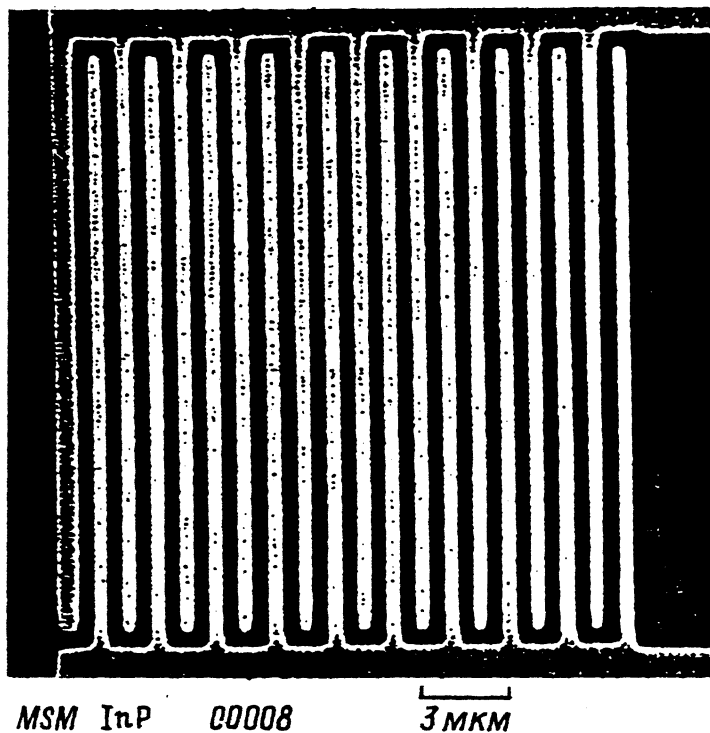
Рис. 1. Структура МПМ гетерофотодиода.

1 — металлические контакты,
2 — буферный слой.

В эксперименте исследовались МПМ фотодиодные структуры с InP/Ga_{0.47}In_{0.53}As гетеробарьером. Ширина запрещенной зоны GaInAs составляет 0.73 эВ, а InP — 1.35 эВ. Таким образом, гетеробарьер InP/GaInAs достаточен для того, чтобы оттянуть фотогенерированные носители в резервный слой GaInAs. С точки зрения обеспечения максимальной скорости переноса фотогенерированных носителей толщина InP слоя должна быть как можно меньше, с точки зрения эффективности фотодетектора его толщину следует выбирать достаточной для того, чтобы обеспечить поглощение большей части излучения в этом слое. Мы выбрали толщину активного InP слоя равной 100 нм. На длине волны $\lambda = 750$ нм (энергия фотона 1.65 эВ) это обеспечивает поглощение 32% излучения, падающего на диод.

Параметры диодной структуры

На рис. 1 дается разрез исследуемой слоистой фотодиодной структуры. Гетероструктура образуется 800 нм слоем Ga_{0.47}In_{0.53}As и 100 нм слоем InP. Оба слоя нелегированы и выращивались методом эпитаксии из металлоорганических соединений при пониженном давлении (LP MOVPE) на полужолирующей InP подложке. Температура процесса роста составляла 640°C. Триметил галлий TM Ga[(C₂H₅)₃Ga], триметил индий TM In[(C₂H₅)₃In], арсин AsH₃ и фосфин PH₃ были использованы в качестве источников для выращивания GaInAs и InP соответственно. С помощью электронной литографии на поверхности структуры создавалась встречно-штыревая система Шоттки барьерных контактов с параметрами: активная область 20×20 мкм, ширина контактных электродов и расстояние между ними 0.5 мкм. На рис. 2 показан вид встречно-штыревой контактной области МПМ фотодиода. Его емкость по оценкам составляет 0.025 пФ. Мы также использовали процессы электронной литографии для формирования копланарной линии передачи СВЧ энергии с шириной линии 20 мкм и расстоянием между линиями копланарного волновода 20 мкм. Один из концов копланарной линии был связан с встречно-штыревой контактной системой электродов, другой конец линии представлял собой плавный переход к контактным площадкам для подачи напряжения смещения. Для того чтобы свести к минимуму влияние отражения импульса от концов



MSM InP

00008

3 мкм

Рис. 2. Микрофотография встречно-штыревой контактной области МПМ гетерофотодиода.

линии на форму импульсного сигнала с гетерофотодиода, электроды копланарной линии были выбраны достаточно длинными (5 мм). Следует отметить, что в предыдущих электрооптических измерениях отклика МПМ GaAs диода [1] использовалась гибридная сборка, состоящая из собственно МПМ диода и микрополоскового модулятора света на танталате лития. Кроме значительных проблем монтажа устройства гибридная сборка существенно ухудшает импульсные характеристики измеряемого устройства, поскольку на частотах ~ 100 ГГц даже сверхкороткие проволочные соединения (несколько десятков микрон) обуславливают заметную индуктивность. По этой причине для сверхбыстродействующих диодных структур необходима монокристаллическая интеграция активной части диода и СВЧ линии передач.

Электрооптические измерения

Увеличение быстродействия современных полупроводниковых приборов привело к тому, что традиционные методы измерения быстродействия становятся неприемлемыми. Так, временное разрешение лучших стробоскопических осциллографов не выходит за пределы 30 пс, кроме того, статистический разброс между моментом поступления исследуемого сигнала и моментом стробирования — джиттер ограничивает временное разрешение осциллографических измерений на уровне ~ 50 пс.

Альтернативным способом измерения характеристик сверхбыстрых электрических процессов является метод электрооптического стробирования [8]. Поскольку в этом случае генератор измеряемых электрических импульсов (фотодиод) и стробирующее устройство (электрооптический кристалл) запускаются от одного и того же физического источника — сверхкороткого лазерного импульса, то джиттер в такой измерительной системе практически отсутствует, а временное разрешение определяется длительностью импульса лазера. Мы использовали метод внешнего электрооптического стробирования, который позволяет реализовать временное разрешение < 300 фс [9] без какого-либо оптического взаимодействия с материалом подложки измеряемой электронной схемы. Метод основан на электрооптическом эффекте Погкельса и использует то обстоятельство, что любая двумерная электронная схема, имеющая открытую систему контактных электродов, обуславливает существование краевых электрических полей над поверхностью контактов. Метод является удобным инструментом при исследовании различных электронных схем на GaAs, Si, InP и керамических подложках и даже для проводников печатных плат, поскольку электрооптическое взаимодействие осуществляется посредством электрического поля и не требуется никакого контакта с исследуемой схемой. Существует лишь совсем небольшая добавка к емкостной компоненте схемы, однако при использовании низковольтных линий передач это приводит только к незначительному искажению формы импульса исследуемого сигнала [9].

Принцип внешнего электрооптического стробирования по существу не отличается от обычного электрооптического стробирования, за исключением самого электрооптического модулятора, который в рассматриваемом примере представляет собой электрооптический зонд. При помощи прецизионной системы $x-y-z$ перемещений зонд может быть расположен над любой точкой исследуемой электронной схемы. В нашем эксперименте электрооптический зонд представлял собой кристалл LiTaO_3 в форме четырехгранной усеченной пирамиды с верхним основанием 80×40 мкм с напыленным на ее поверхность диэлектрическим отражающим покрытием. Стробирующие импульсы лазера фокусировались на электрооптический зонд с помощью $\times 10$ объектива, создавая оптическое пятно диаметром ~ 20 мкм. В ходе эксперимента зонд помещался в непосредственной близости (5–10 мкм) над исследуемым МПМ гетерофотодиодом.

Рис. 3 дает представление о работе электрооптической измерительной схемы. Активным элементом системы является фемтосекундный ($\text{FWHM} = 100$ фс) титан-сапфировый лазер с синхронизацией мод с высокой (100 мГц) частотой повторения импульсов, работающий на длине волны излучения 750 нм. Оптическое излучение лазера делится на два луча: запускающий и стробирующий. Первый луч проходит через низкочастотный модулятор (для синхронного детектирования) и фокусируется на МПМ фотодиодную структуру, в результате чего создается последовательность электрических импульсов субпикосекундной длительности, которые нужно измерить. Второй, стробирующий луч направляется на переменную линию задержки (связанную с дисплеем) и затем, проходя через электрооптический зонд, отражается от диэлектрического покрытия и одновременно модулируется полем электрического сигнала с МПМ фотодиода; интенсивность каждого оптического

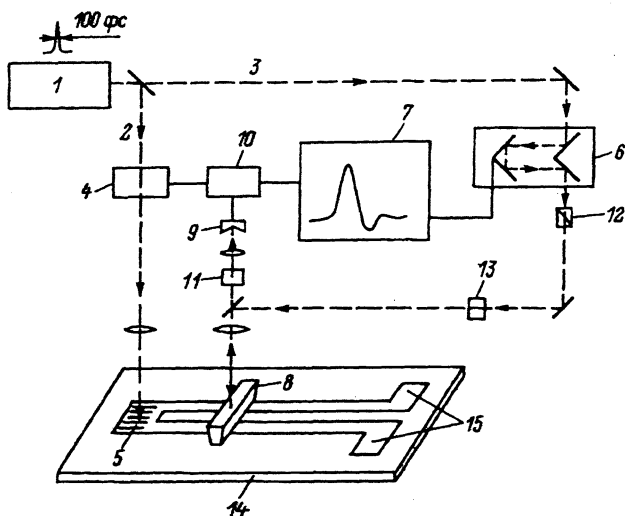


Рис. 3. Принцип работы электрооптической измерительной системы.

1 — фемтосекундный титан-сапфировый лазер, 2 — запускающий луч, 3 — стробирующий луч, 4 — модулятор, 5 — МПМ-гетерофотодиод, 6 — переменная линия задержки, 7 — дисплей, 8 — электрооптический зонд, 9 — “медленный” фотодиод, 10 — синхронный усилитель, 11 — анализатор, 12 — поляризатор, 13 — компенсатор, 14 — InP подложка, 15 — контакты подачи смещения на диод.

го импульса изменяется в соответствии с величиной электрического поля, в котором находится электрооптический зонд. Интенсивность стробирующего луча измеряется при этом обычным “медленным” фотодиодом, чье быстродействие определяется только частотой модуляции первого запускающего луча. Синхронный усилитель измеряет амплитуду протектированного сигнала, а использование синхронного детектирования позволяет эффективно уменьшить $1/f$ шум. Выходной сигнал строится в функции оптической задержки, давая, таким образом, эквивалентное временное представление измеряемого электрического сигнала с исследуемого гетерофотодиода.

В ходе эксперимента была установлена заметная дисперсия импульсного сигнала с МПМ фотодиода, по этим причинам лучшие результаты были получены при измерении импульсного отклика над копланарной линией в непосредственной близости (100 мкм) к встречно-штыревой системе контактов МПМ диода.

На рис. 4 показывается измеренный протектированный электрический сигнал с фотодиода при напряжении смещения 1.0 В для различных уровней энергий падающих оптических импульсов, лежащих в пределах от 3 до 26 пДж (что соответствует плотности носителей в InP слое $2-15 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$). Электрический отклик с МПМ гетерофотодиода, измеренный методом внешнего электрооптического стробирования, составил 0.6 пс (FWHM) и почти не зависел от величины энергии оптического импульса (рис. 4). Напротив, амплитуда электрического сигнала менялась в зависимости от величины энергии оптического импульса нелинейно. При низких уровнях возбуждения форма электрического импульса униполярна (рис. 4), в то время как достаточно высокие энергии возбуждения приводят к биполярным характери-

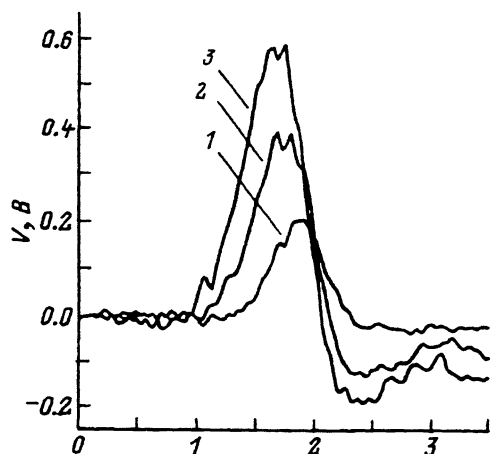


Рис. 4. Отклик МПМ гетерофотодиода, измеренный методом внешнего электрооптического стробирования. 1 — 3, 2 — 12, 3 — 26 пДж.

кам для отклика. Изменение знака электрического сигнала при больших уровнях возбуждения, по-видимому, является результатом изменения внутреннего поля диода вследствие пространственного изменения высоты барьера Шоттки. С другой стороны, отрицательный пик на характеристике отклика фотодиода может объясняться фотогенерированными носителями, которые непреднамеренно возбуждаются вне области встречно-штыревой структуры контактных электродов.

Ширина полосы пропускания детектора (по уровню 3 дБ), вычисленная с использованием выражения $B = 0.441/\text{FWHM}$ [2], составила 740 ГГц и является рекордной для МПМ фотодиодов на настоящее время. Важность вертикального транспорта фотогенерированных но-

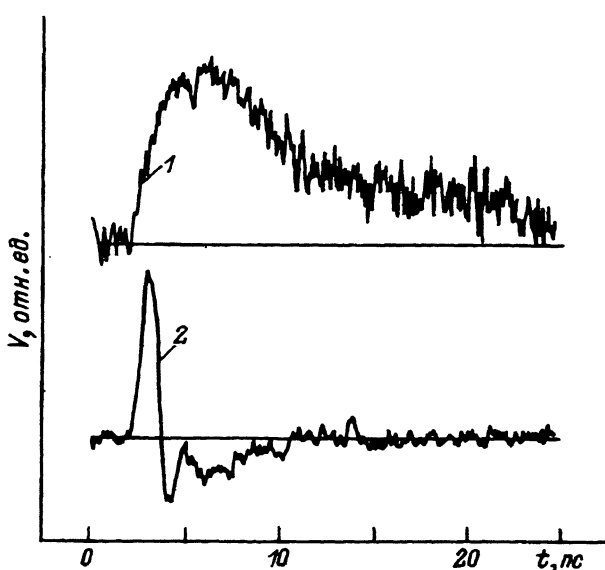


Рис. 5. Нормализованный отклик МПМ диода при его возбуждении 100 фс импульсами лазера.

1 — InP слой стравлен в межконтактной области, излучение поглощается в слое GaInAs; 2 — с InP/GaInAs гетеробарьером, излучение поглощается в слое InP.

сителей для увеличения быстродействия МПМ диода подтверждается контрольным экспериментом с диодом, у которого верхний слой InP в активной области диода был селективно стравлен. В этом случае поглощение излучения происходит только в слое $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$. На рис. 5 показан нормализованный продетектированный электрический отклик для такого контрольного эксперимента (верхняя часть рис. 5) в сравнении с данными для диода с InP слоем между встречно-штыревыми электродами (нижняя часть рис. 5). Напряжение смещения в обоих случаях было 1 В, уровень оптического возбуждения ~ 25 пДж. Как видно из рис. 5, МПМ гетеробарьерная структура позволяет реализовать существенно большее быстродействие фотодиода. Мы объясняем увеличение быстродействия МПМ гетерофотодиода за счет быстрого переброса фотогенерированных носителей из InP слоя в резервный GaInAs слой.

Исследование быстродействия МПМ-диода методом фотолюминесценции

Для исследования процесса переноса фотогенерированных носителей заряда в МПМ гетерофотодиода был также использован метод измерения сигнала фотолюминесценции с края зоны [10]. В ходе эксперимента измерения проводились на МПМ гетерофотодиодах с размерами активной области встречно-штыревой системы Шоттки контактных электродов 100×100 мкм и шириной контактных электродов и расстоянием между ними 3 мкм. Увеличение активной области диода в экспериментах с измерением сигнала фотолюминесценции имеет преимущество в большей интенсивности сигнала люминесценции без увеличения плотности фотогенерированных носителей. При этом увеличение расстояния между контактными электродами МПМ встречно-штыревой системы контактов увеличивает время дрейфа фотогенерированных носителей в межконтактной области в этом случае до 15 пс. В отличие от метода электрооптического стробирования не требуется никакого дополнительного монтажа диода в СВЧ линию передач. Сигнал фотолюминесценции непосредственно измерялся из активной области МПМ диода при его освещении сверхкороткими импульсами лазера. Методика измерения сигнала фотолюминесценции с МПМ диода была подробно описана в работе [10].

В эксперименте МПМ гетерофотодиод возбуждался 100 фс оптическими импульсами керровского титан-сапфирового лазера с синхронизацией мод, работающего на длине волны 710 нм (энергия фотона 1.75 эВ). Сигнал люминесценции с МПМ диода фокусировался на нелинейный оптический кристалл LiIO_3 и смешивался со вторым импульсным сигналом от того же лазера, но задержанным по времени. Сигнал на суммарной частоте спектрально анализировался на монохроматоре и измерялся фотоумножителем. Изменение фотолюминесценции во времени строилось в функции задержки опорного импульса относительно импульса, возбуждающего образец. Измерения проводились при температуре окружающей среды. На рис. 6 показана зависимость сигнала фотолюминесценции на длине волны 906 нм (энергия фотона 1.37 эВ) в функции от времени. При этом энергия возбуждающего импульса лазера составляла 400 пДж. После возбуждения гетерофотодиода коротким оптическим импульсом сигнал фотолюминесценции

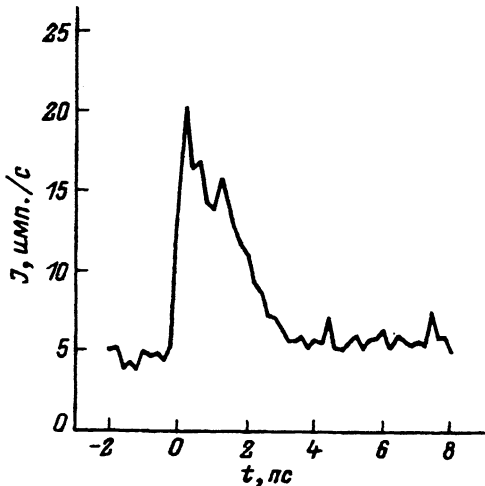


Рис. 6. Интенсивность сигнала фотолюминесценции с активной области МПМ гетерофотодиода в функции от времени. Напряжение смещения 0.2 В.

спадал с постоянной времени 2 пс до небольшого остаточного уровня. При измерении на длине волны 906 нм (т.е. близкой к краю поглощения в InP) сигнал люминесценции с МПМ диода пропорционален плотности фотогенерированных носителей в верхнем слое InP. Быстрый спад люминесценции показывает быстрое уменьшение плотности носителей в InP слое. Однако наблюдаемая постоянная времени (~ 2 пс) слишком мала, чтобы ее можно было объяснить за счет дрейфа носителей к металлическим электродам (~ 15 пс). Процессы рекомбинации носителей и их улавливание на различного рода дефектах в InP также могут быть исключены из рассмотрения как процессы, способные уменьшить плотность фотогенерированных носителей так быстро. Быстрый спад сигнала люминесценции есть доказательство эффективного переноса фотогенерированных носителей заряда из активного слоя InP в резервный GaInAs слой.

Обсуждение результатов измерений

Характеристики быстрого действия исследуемых МПМ структур на много превышают быстрое действие GaInAs гетеробарьерных диодов в более ранних публикациях [4-6]. В этих случаях разрешающая способность используемых измерительных систем и неудачный монтаж исследуемых диодов, по-видимому, не позволяли реализовать рекордные величины быстрого действия. Однако уже в этих экспериментах было показано, что гетероструктуры на основе соединений GaInAs обладают заметно большим быстрым действием в видимой части спектра, чем в случае детектирования сигналов на более длинных волнах (1.3-1.6 мкм), там, где фотогенерация носителей заряда происходит только в слое GaInAs [6,7].

Мы полагаем, что быстрый перенос фотогенерированных носителей из активного слоя InP в резервный GaInAs слой увеличивает быстрое действие МПМ гетерофотодиода. Высота гетеробарьера между InP и GaInAs (~ 0.6 эВ) достаточна для того, чтобы при низких напряжениях смещения существенно уменьшить фототок к металлическим

встречно-штыревым контактам Шоттки. Подтверждением этому является низкая величина выпрямленного тока через диод: в эксперименте мы определили, что только несколько процентов фотогенерированных носителей заряда собирается на контактах Шоттки. Большинство носителей заряда втягивается полем гетероперехода в резервный GaInAs слой и рекомбинирует на гораздо большем временном интервале. Интересно отметить, что захват носителей заряда в узкозонном полупроводниковом материале в случае МПМ гетерофотодиода является полезным для уменьшения времени отклика фотодиода.

Переключаемое напряжение, напротив, достаточно большое. При напряжении смещения 1 В и энергии оптического импульса 12 пДж (26 пДж) переключаемое напряжение, как измерено, равно 0.4 В (0.6 В), что делает исследуемые МПМ гетеробарьерные структуры достаточно эффективными сверхбыстродействующими фотодетекторами.

Работа доложена на конференции по сверхбыстродействующей электронике и оптоэлектронике (Сан-Франциско, 25–27 января 1993 г.) и на I Российской конференции по физике полупроводников (Нижний Новгород, 10–14 сентября 1993 г.).

Список литературы

- [1] *Van Zeghbroeck B.J., Patrick W., Halbout J.-M., Vettiger P.* // IEEE Electron Dev. Lett. 1988. Vol. 9. N 10. P. 527–529.
- [2] *Chou S.Y., Liu Y., Khalil W., Hsiang T.Y., Alexandrov S.* // Appl. Phys. Lett. 1992. Vol. 61. N 7. P. 819–821.
- [3] *Klingenstein M., Kuhl J., Notzel R. et al.* // Appl. Phys. Lett. 1992. Vol. 60. N 5. P. 627–629.
- [4] *Yang L., Sudbo A.S., Logan R. et al.* // IEEE Photonics Techn. Lett. 1990. Vol. 2. N 1. P. 56–58.
- [5] *Soole J.B.D., Schumacher H.* // IEEE J. Quantum Electron. 1991. Vol. QE-27. N 3. P. 737–752.
- [6] *Kuhl D., Hieronymi F., Bottcher E.H. et al.* // Electron. Lett. 1990. Vol. 26. P. 2107–2109.
- [7] *Hieronymi F., Kuhl D., Bottcher E.H. et al.* // Proc. of 4th Intern. Conf. on InP and Related Materials. Newport (RI USA), 1992. P. 561–564.
- [8] *Valdmanis G.A., Mourou G., Gabel C.W.* // IEEE J. Quantum Electron. 1983. Vol. QE-19. P. 664–667.
- [9] *Valdmanis J.A.* // Electron. Lett. 1987. Vol. 23. N 24. P. 1308–1310.
- [10] *Kersting R., Leo K., Plettner J. et al.* // Appl. Phys. Lett. 1993. Vol. 62. N 7. P. 732–734.