

ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ $Cd_xHg_{1-x}Te$ НА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ МАТРИЧНЫХ ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ

В.В. Арбенина, доцент, *А.С. Кашуба, ведущий инженер-технолог,

*Е.В. Пермикина, ведущий инженер

кафедра Материалов микро- опто- и наноэлектроники

МИТХТ им. М.В. Ломоносова, Москва, 119571 Россия

*ОАО «НПО «Орион», Москва, 111123 Россия

e-mail: arbenina@mitht.ru

Установлена корреляция между фотоэлектрическими дефектами матричных фотоприемных устройств и дефектами гетероэпитаксиальных слоев твердых растворов $Cd_xHg_{1-x}Te$, выращенных молекулярно-лучевой эпитаксией, на основе которых создаются фоточувствительные элементы для матричных устройств.

Ключевые слова: матричные фотоприемные устройства (МФПУ), матричные фоточувствительные элементы (МФЧЭ), гетероэпитаксиальные слои (ГЭС), твердые растворы $Cd_xHg_{1-x}Te$ (КРТ), вольтамперная характеристика (ВАХ), V-дефекты, высокоразрешающая электронная микроскопия.

Введение

В начале XXI века началась разработка третьего поколения матричных фотоприемных устройств (МФПУ) на основе гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) теллурида кадмия-ртути ($Cd_xHg_{1-x}Te$, КРТ), работающих в инфракрасной спектральной области. В настоящее время продолжается промышленное освоение усовершенствованных фокальноплоских крупноформатных инфракрасных фотодиодных матриц: с числом 1000×8 элементов – для сканируемых по длине линеек; с числом 2000×2000 элементов – для больших смотрящих матриц. Узкозонный полупроводниковый твердый раствор КРТ занимает главное место среди материалов для производства современных МФПУ.

В связи с тем, что ширина запрещенной зоны изменяется непрерывно с изменением состава, КРТ используется для фотоприемников различных спектральных диапазонов инфракрасной области. Для $Cd_xHg_{1-x}Te$ характерна прямозонная структура, обуславливающая высокие значения коэффициента поглощения оптического излучения. Малая эффективная масса и высокая подвижность электронов, большое время жизни носителей заряда обеспечивают быстрое действие приборов на основе КРТ, а относительно небольшая диэлектрическая проницаемость позволяет МФПУ функционировать в фотодиодном режиме при небольших напряжениях смещения [1].

Цель настоящей работы – установление влияния ростовых эффектов эпитаксиальных слоев твердых растворов $Cd_xHg_{1-x}Te$, на основе которых создаются фоточувствительные элементы для матричных устройств, на фотоэлектрические дефекты МФПУ.

Экспериментальная часть

МФПУ, исследуемые в данной работе, изготавливали из гетероэпитаксиальных структур

КРТ p -типа проводимости, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на оптически прозрачных подложках GaAs. Толщина рабочих эпитаксиальных слоев $Cd_xHg_{1-x}Te$ составляла около 8 мкм при значении $x = 0.22 \pm 0.002$. С целью уменьшения рассогласования параметров кристаллических решеток подложки и рабочего слоя на подложках GaAs выращивали тонкий напряженный слой теллурида цинка толщиной 0.5 мкм, затем буферный слой из теллурида кадмия толщиной около 7 мкм и нижний варизонный слой $Cd_xHg_{1-x}Te$ толщиной 2.5 мкм. Для защиты узкозонного рабочего слоя ГЭС на его поверхность наносили верхний варизонный слой $Cd_xHg_{1-x}Te$ с увеличением значения x до 0.34 толщиной 0.35–0.4 мкм, затем пассивирующее покрытие CdTe. В пассивирующем слое CdTe протравливали окна размерами около 15 мкм (шаг 30 мкм), соответственно и в рабочем слое КРТ p -типа проводимости создавали n -области. Для контактирования каждого p – n -перехода с каналом кремниевого мультиплексора формировали индиевый столбик высотой ~10 мкм и площадью 25×25 мкм. Чтобы уменьшить отражение, на поверхность подложки GaAs наносили антиотражающее покрытие (рис. 1).

Установление корреляций между электрическими дефектами МФПУ и ростовыми дефектами гетероэпитаксиальных слоев КРТ, из которых изготавливали МФЧЭ, осуществляли путем измерения фотопараметров по всей площади матрицы ФЧЭ, вольтамперных характеристик (ВАХ) отдельных фоточувствительных элементов, исследования поверхности МФЧЭ и эпитаксиальных слоев КРТ с помощью селективного травления и электронно-ионной микроскопии высокого разрешения. Фотопараметры и ВАХ контролировали на стендах, разработанных в НПО «Орион».

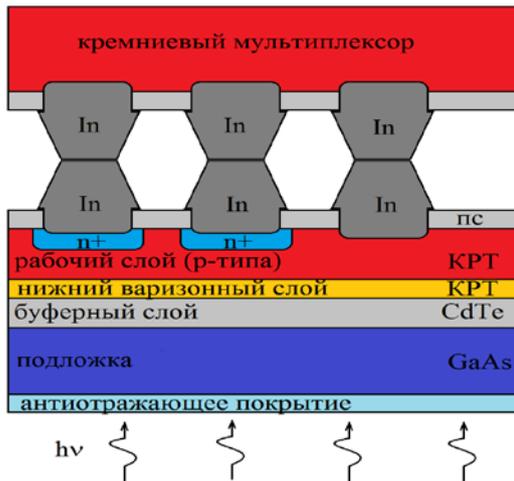


Рис. 1. Схематическое изображение МФЧЭ, состыкованной с кремниевым мультиплексором.

Эпитаксиальные слои $Cd_xHg_{1-x}Te$, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs(310), исследовали методами атомно-силовой, растровой и электронно-ионной микроскопии высокого разрешения. Изображения ростовых дефектов получали на атомно-силовом микроскопе Integra Maximus, электронно-ионном микроскопе Quanta 3D FEG ($\times 200000$) и дифференциальном интерференционно-контрастном микроскопе с призмой Номарского. Селективный раствор для выявления дислокаций травления готовили на основе CrO_3 и HCl .

Результаты и их обсуждение

МФПУ на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ разрабатываются и изготавливаются из многоэлементных фотодиодных структур – матриц фоточувствительных элементов (МФЧЭ), объединенных общей базой. В матричной фотодиодной структуре в качестве общего контакта используется прозрачная для принимаемого излучения фоточувствительная область. Благодаря тому, что фотодиодные матрицы принимают оптическое излучение с обратной (тыльной) стороны, возможна стыковка МФЧЭ с малошумящими кремниевыми мультиплексорами с помощью индиевых столбчатых контактов.

Отдельный фоточувствительный элемент матрицы на основе КРТ для МФПУ представляет собой фотодиод, изготовленный на основе $p-n$ -перехода, расположенного таким образом, что расстояние от области поглощения оптического излучения до области пространственного заряда меньше, чем диффузионная длина неосновных носителей заряда. При поглощении квантов оптического излучения фоточувствительной площадкой матрицы происходит генерация электроно-дырочных пар. Под действием встроенного электрического поля $p-n$ -перехода носители заряда диффундируют от места их генерации к области пространствен-

ного заряда, причем диффузия носителей заряда требует большего времени, чем их дрейф через область пространственного заряда. Поэтому чем дальше от области пространственного заряда генерированы носители тока, тем большее время затрачивается на диффузию и тем больше вероятность их рассеивания и рекомбинации. Под действием встроенного электрического поля неосновные носители тока дрейфуют через область пространственного заряда, электроны из p -области поступают в n -область $p-n$ -перехода, и во внешней цепи фотодиода появляется фототок I_ϕ , совпадающий по направлению с обратным током через $p-n$ переход фотодиодной структуры.

Качество работы каждого отдельного матричного фотодиодного элемента можно оценить с помощью вольтамперной характеристики (ВАХ) [2]. ВАХ фотодиода при произвольном оптическом облучении выражается уравнением:

$$I = I_d - I_\phi \quad (1)$$

где I_d – ток необлученного фотодиода («темновой» ток); I_ϕ – фототок.

Если «темновой» ток и фототок представить соответствующими соотношениями, то выражение (1) преобразуется в уравнение (2):

$$I = I_s (\exp(qV_d/kT) - 1) - qA\eta\phi_\lambda \quad (2)$$

где I_s – ток насыщения при обратном смещении, q – заряд электрона; V_d – напряжение смещения диода (обратное смещение); A – площадь фоточувствительной площадки; ϕ_λ – число фотонов, поглощаемых в фотодиоде за единицу времени; η – квантовая эффективность фотодиода – величина, показывающая, насколько эффективно преобразуются в фототок фотоны определенных длин волн – определяется из формулы:

$$\eta = (1 - R)[1 - \exp(-\alpha_\lambda t)]F, \quad (3)$$

где R – отражение от просветленной поверхности, t – толщина фотодиодной базы; α_λ – коэффициент поглощения (для $Cd_{0.2}Hg_{0.8}Te$ $\alpha_\lambda = 5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$); F – геометрический фактор, определяемый количеством фотогенерированных носителей зарядов, достигающих $p-n$ -перехода.

При эффективной работе фотоприемного устройства тепловая генерация выражена в меньшей степени, чем генерация фотонов в случае самого малого оптического потока: $I_s \ll I_\phi$

Особенности внешнего вида ВАХ фотодиода определяются вкладом следующих величин: суммарного «темнового» тока, тока поверхностной утечки и тока оптического происхождения [3]. Суммарный «темновой ток» фотодиода I_d состоит из: тока тепловой диффузии, дрейфового тока, рекомбинационного тока в объединенной области, тока межзонного туннелирования, тока туннелирования через уровни ло-

вушек, фонового тока и тока шунтирующей утечки. Ток поверхностной утечки включает ток поверхностной генерации через поверхностные состояния; генерационный ток в индуцированной полем поверхностной области обеднения; вынужденное туннелирование вблизи поверхности; омическую (или неомическую) шунтирующую утечку; лавинное увеличение тока полем, вызванным поверхностной областью. Ток оптического происхождения складывается из двух составляющих: тока, вызванного сигналом, и тока, обусловленного инфракрасным фоновым излучением.

При хорошем качестве пассивации поверхности ГЭС и функционировании МФПУ в условиях минимального ИК-фоновое излучения основной вклад в ВАХ матричного фотодиода вносят основные составляющие суммарного «темнового» тока: диффузионный и дрейфовый токи и ток туннелирования (вольтамперные характеристики матричного фотодиодного элемента будут рассмотрены ниже).

Диффузионный ток является фундаментальным механизмом переноса заряда в фотодиодах на основе $p-n$ -переходов. Появление в любом элементарном слое полупроводника избыточных диффундирующих носителей компенсируется их уменьшением вследствие рекомбинации [4]. Диффузионная составляющая «темнового» тока фотодиода в диапазоне $\lambda = 8-12$ мкм существенно превалирует при $T > 90$ К.

Дрейфовый (омический) ток в асимметричном n^+-p -переходе становится существенным в условиях повышенной инжекции $V > (2kT/q) \ln(p_p/n_i)$. При малых напряжениях смещения омическая составляющая «темнового» тока незначительна. В связи с фундаментальными особенностями КРТ (ширина запрещенной зоны $\text{Cd}_{0.2}\text{Hg}_{0.8}\text{Te}$ увеличивается с ростом температуры: $E_g(77\text{ К}) = 0.075$ эВ, $E_g(300\text{ К}) = 0.16$ эВ), генерационно-рекомбинационная составляющая вносит существенный вклад в «темновой» ток фотодиодов при низких температурах $T \sim 70$ К.

Ток туннелирования через уровни ловушек, главным образом, преобладает при температурах $T > 80$ К и напряжениях смещения $V \cong 0.4$ В [4]. Для туннелирования через уровни ловушек характерно, что примеси и дефекты в области пространственного заряда выступают как промежуточное звено. Такое туннелирование является двухступенчатым процессом, при котором первый этап – тепловой переход между одной из зон и ловушкой, а второй этап – туннелирование между ловушкой и другой зоной (рис. 2). Туннельные механизмы «темнового» тока проявляются тем сильнее, чем больше напряжение смещения.

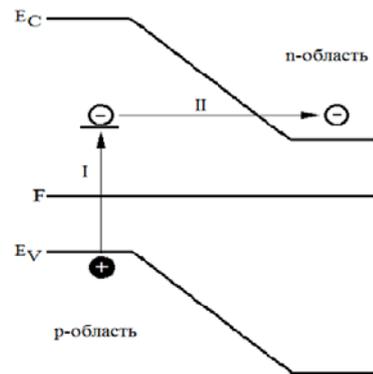


Рис. 2. Схема двухступенчатого туннелирования носителей заряда через $p-n$ -переход.

При умеренных напряжениях смещения ($V \approx -200$ мВ) к «темновому» току добавляются диффузионная и генерационно-рекомбинационная составляющие. При больших величинах напряжения обратного смещения возрастают туннельные составляющие «темнового» тока, которые непосредственно связаны с наклоном зон и возрастанием дрейфового тока. Чем меньше величина «темнового» тока и выше фототок при воздействии ИК-излучения, тем больше величина сигнала и тем эффективнее функционирует МФПУ.

Таким образом, физические процессы, происходящие в области $p-n$ -перехода, определяют величину сигнала фотоотклика каждого отдельного фоточувствительного элемента матрицы и, следовательно, влияют на основные фотоэлектрические параметры МФПУ: фоточувствительность (S_ϕ) и обнаружительную способность (D^*_λ). Чем больше величина фототока и меньше доля составляющих «темнового» тока, тем выше сигнал, меньше шум, тем более высокие значения принимают S_ϕ и D^*_λ прибора.

Исследуемое матричное фотоприемное устройство длинноволнового диапазона (10–12 мкм) функционирует в фотодиодном режиме при малых напряжениях смещения и температурах 77–80 К. Поэтому основными составляющими «темнового» тока МФЧЭ при отсутствии ростовых и структурных дефектов являются: генерационно-рекомбинационный ток, ток межзонного туннелирования (при увеличении напряжения смещения) и незначительный ток туннелирования через ловушки. ВАХ такого МФЧЭ, в области $p-n$ -перехода которого отсутствуют ростовые и структурные дефекты, представлена на рис. 3 а. Структурные и ростовые дефекты эпитаксиального материала, включая атомы примесей, скопления дислокаций, границы зерен и свободные поверхности, порождают в запрещенной зоне полупроводникового материала дискретные уровни, отщепившиеся от энергетических зон вследствие возмущения, вносимого нарушениями появлением ненасыщенных связей.

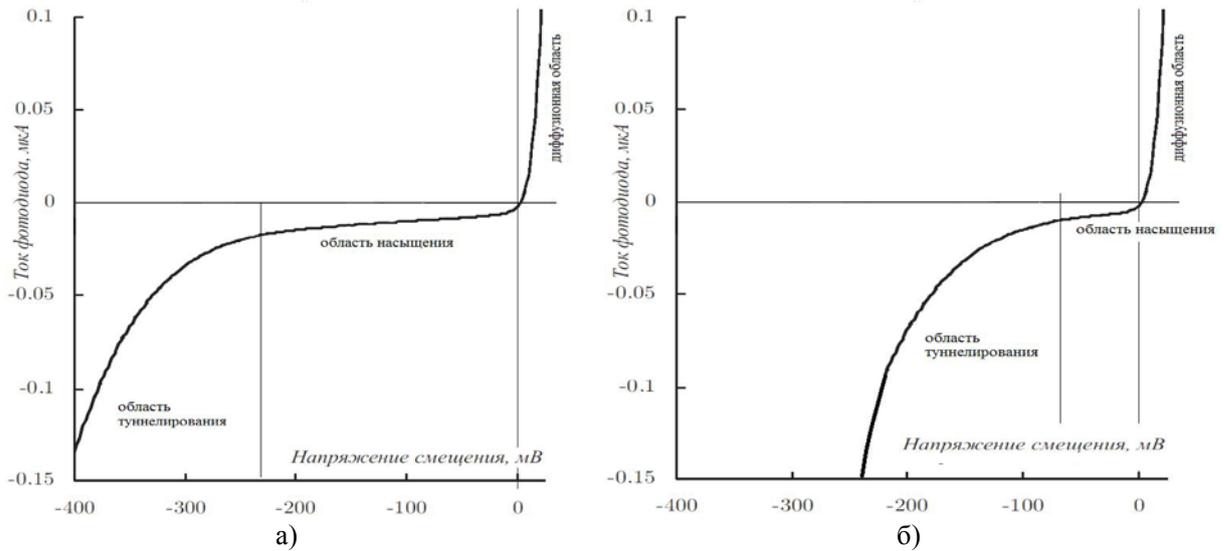


Рис. 3. ВАХ матричного фоточувствительного элемента при отсутствии ростовых и структурных дефектов в области $p-n$ -перехода (а) и при наличии структурных дефектов в области $p-n$ -перехода (б).

При этом механизм образования дискретных уровней – «ловушек» носителей заряда аналогичен для любых нарушений периодичности потенциала кристаллической решетки. Зарядовые состояния структурных дефектов, искажение дефектами регулярного распределения электрических зарядов кристаллической решетки в области $p-n$ -перехода влияют на проводимость, порождая дополнительные «темновые» токи. Возрастание туннелирования через уровни «ловушек» способствует увеличению токов утечек и шумов. Таким образом, изменяется внешний вид ВАХ фоточувствительного элемента – при небольших напряжениях обратного смещения возрастают токи туннелирования (рис. 3 б).

Увеличение составляющей «темнового» тока по сравнению с фототоком ($I_d \gg I_{\phi}$) и возрастание уровня шума приводят к уменьшению соотношения сигнал/шум. Тем самым понижается обнаружительная способность D^* и другие основные параметры фотоприемного устройства. На рис. 4 а,б приведены диаграммы распределения обнаружительной способности и «темновых» токов. На диаграммах наиболее темные пятна соответствуют низким, а светлые – высоким характеристикам. Хорошо видно (рис. 4 а,б), что области высоких значений «темновых» токов одновременно являются областями низкой обнаружительной способности ФЧЭ.

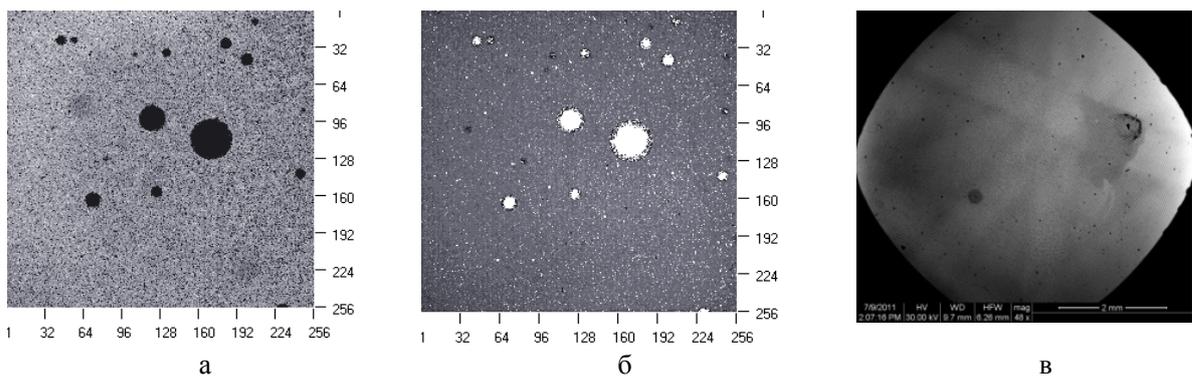


Рис. 4. Изображения МФЧЭ формата 256×256: а) диаграмма распределения обнаружительной способности; б) диаграмма распределения «темновых» токов; в) электронно-микроскопическое изображение поверхности МФЧЭ после селективного травления.

Причиной самых обширных областей дефектных пикселей тепловизионного изображения являются скопления крупных ростовых дефектов, выявленные методом высокоразрешающей электронной микроскопии после селективного травления поверхности МФЧЭ (рис. 4 в).

Размеры крупных конгломератов ростовых V-дефектов достигают нескольких десятков микрон (рис. 5 а, б), и такие конгло-

мераты могут уничтожать десятки фоточувствительных элементов.

Глубина залегания каждого V-дефекта в глубину гетероструктуры составляет 5–10 мкм. Поэтому V-дефекты, находясь в месте расположения фоточувствительных элементов матрицы, как показано на рис. 6 а, не дают возможности для формирования полноценного $p-n$ -перехода (рис. 6 б).



Рис. 5. Изображения конгломератов V-дефектов на исходной поверхности ГЭС КРТ, полученные: а) на дифференциальном интерференционно-контрастном микроскопе с призмой Номарского; б) на электронном микроскопе.

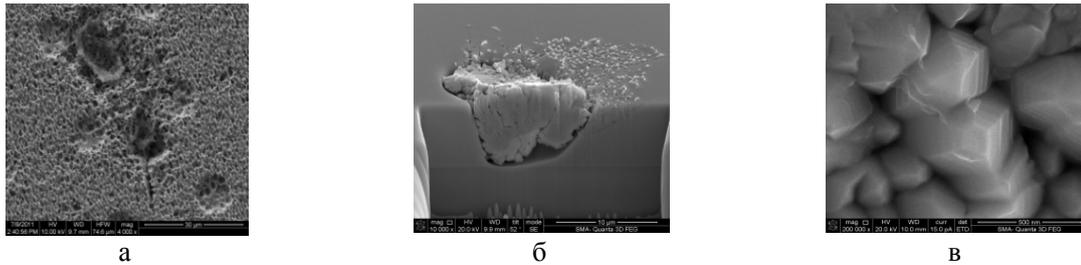


Рис. 6. Электронно-микроскопические изображения V-дефекта: а) расположенного в области фоточувствительного элемента; б) поперечного разреза, полученного травлением ионами галлия в глубину ГЭС КРТ; в) центра дефекта с высоким разрешением.

Как следует из [5], ростовой V-дефект представляет собой поликристаллическое образование, отделенное полостью от монокристалла КРТ вследствие механических напряжений, возникающих в процессе роста (рис. 5 а). Каждый поликристалл V-дефекта имеет огранку.

Грани поликристаллов представляют собой свободные поверхности (рис. 6 в). Очевидно, что любая поверхность является структурным дефектом, так как у поверхностных атомов частично оборваны связи. Поэтому в запрещенной зоне полупроводникового материала возникают дискретные уровни с плотностью поверхностных состояний, близкой к числу атомов на единице поверхности, т.е. $\sim 10^{14} \div 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Взаимодействие между поверхностными уровнями может привести к размытию их в поверхностную зону, состоящую из близко расположенных уровней энергии, соответствующих различным возможным компонентам квазиимпульса электрона p_y и p_z , параллельным поверхности. Если какая-либо из поверхностных зон заполнена электронами лишь частично, то вдоль поверхности возможна электропроводность металлического типа [2].

Известно [6], что рост центральной области V-дефекта в эпитаксиальных слоях ГЭС КРТ происходит в направлении [111] под углом 68.58° к плоскости (310). Следовательно, приложение напряжения обратного смещения к МФЧЭ по нормали относительно плоскости (310) вызывает проводимость как через границы поликристаллов в направлении [310], так и по их поверхности в направлении [111] (рис. 7).

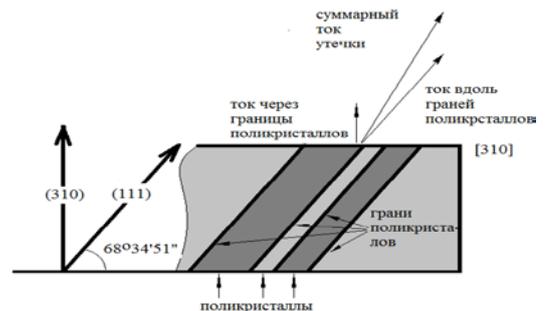


Рис. 7. Направление тока шунтирующей утечки в поликристаллической области V-дефекта.

Проводимость поликристаллических областей чрезвычайно высока. В связи с этим в областях V-дефектов и их конгломератов наблюдаются токи шунтирующей утечки. Доля «темнового» тока сильно возрастает (рис. 5 б). Таким образом, в МФЧЭ возникают резистивные области с низким сопротивлением и высокой проводимостью. Пример ВАХ такой области представлен на рис. 8.

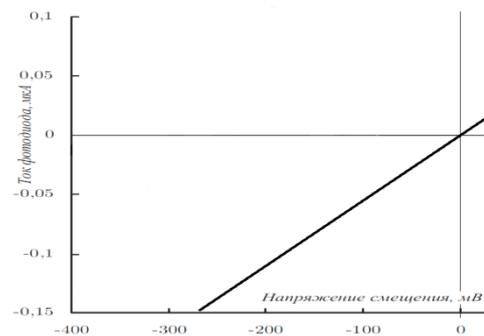


Рис. 8. ВАХ-области МФЧЭ с высоким током шунтирующей утечки.

Скопления поликристаллических V-дефектов и других ростовых дефектов создают обширные области дефектных пикселей телевизионного изображения.

Заключение

Несмотря на то, что твердый раствор $Cd_xHg_{1-x}Te$ является наиболее чувствительным и эффективным полупроводниковым материалом для матричных фотоприемников, слабая межатомная связь Hg–Cd и высокая энергия диссоциации молекул Te_2 приводят к образованию ростовых и структурных дефектов в процессе эпитаксиального выращивания слоев КРТ. Дефекты отрицательно влияют на работу МФПУ. Дефекты и структурные несовершенства эпитаксиальных слоев способствуют образованию в запрещенной зоне полупроводникового материала «ловушек», что существенно ухуд-

шает однородность распределения фоточувствительности элементов по площади матриц и понижает фотоэлектрические параметры МФПУ. Поэтому проблема дефектности КРТ стала основной при изготовлении крупноформатных фотодиодных матриц, в особенности, с малым (15–20 мкм) шагом элементов.

В работе проанализированы вольтамперные характеристики МФЧЭ, проведен анализ основных составляющих «темнового» тока и диаграммы фотоэлектрических параметров матричных фотодиодных элементов в зависимости от наличия структурных и крупных ростовых дефектов в области $p-n$ -перехода. Показано влияние дефектов на «темновой» ток, вследствие возникновения дополнительных дискретных уровней в запрещенной зоне, которые способствуют увеличению токов утечек.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Любченко А.В., Сальков Е.А., Сизов Ф.Ф. Физические основы полупроводниковой инфракрасной фотоэлектроники. – Киев: Наукова думка, 1984. С. 94–127.
2. Филачев А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. – М.: Физматкнига, 2011. С. 5–135.
3. Филиппов С.Н., Болтарь К.О. Исследование механизмов переноса заряда в фотодиодах на основе эпитаксиальных слоев $CdHgTe$ // Труды МФТИ. 2010. Т. 2. № 1(5). С. 54–65.
4. Болтарь К.О., Яковлева Н.И. Моделирование вольт-амперных характеристик фотодиодов из КРТ // Прикладная физика. 2004. № 3. С. 82–88.
5. Permikina E.V., Kashuba A.S., Arbenina V.V. Defects in $Cd_xHg_{1-x}Te$ -based heterostructures grown by molecular beam epitaxy on GaAs-substrates (310) // Inorgan. Materials. 2012. V. 48. № 7. P. 665–670.
6. Sabinina I.V., Gutakovskiy A.K., Sidorov Yu.G., Latyshev A.V. Nature of V-shaped defects in HgCdTe epilayers grown by molecular beam epitaxy // J. Crystal Growth. 2005. № 274. P. 339–346.

INFLUENCE OF $Cd_xHg_{1-x}Te$ EPITAXIAL LAYERS DEFECTS ON PHOTO-ELECTRIC PARAMETERS OF MATRIX DETECTOR DEVICES

V.V. Arbenina[®], A.S. Kashuba*, E.V. Permikina*

M.V. Lomonosov Moscow State University of Fine Chemical Technologies, Moscow, 119571 Russia

*«RD&P Center «Orion», Moscow, 111123 Russia

[®] Corresponding author e-mail: arbenina@mitht.ru

In spite of the fact that solid solution $Cd_xHg_{1-x}Te$ is the most sensitive and effective semiconductor material for matrix photodetectors, weak internuclear connection Hg–Cd and high energy dissociation molecules Te_2 result in formation $Cd_xHg_{1-x}Te$ epitaxial layers defects in process MBE epitaxial growth of layers which negatively influence on matrix detector device work. The defects and structural imperfections of epitaxial layers essentially worsens uniformity of distribution of photosensitivity of elements and lowers photo-electric parameters of matrix photodetectors. Therefore the problem of $Cd_xHg_{1-x}Te$ epitaxial layers defectiveness became the basic at manufacturing of matrix photodetectors, in particular, with small (15-20 microns) step of photosensitive elements. Voltage-current characteristics matrix photosensitive elements were investigated. The analysis of the basic components the dark current and the diagram of photo-electric parameters matrix photodetectors were carried out depending on presence structural and large defects in area $p-n$ transition. Influence of defects on the dark current of matrix detector devices was described. It was established correlations between photo-electric defects matrix detector devices and defects heteroepitaxial layers of the solid solutions $Cd_xHg_{1-x}Te$ on the basis of which photosensitive elements for matrix devices are created.

Key words: matrix detector devices, matrix photosensitive elements, heteroepitaxial layers, solid solutions $Cd_xHg_{1-x}Te$, voltage-current characteristic, V-defects, high-resolution electronic microscopy.