

Исследование температурной зависимости темновых токов *pin*-фотодиодов на основе эпитаксиальных гетероструктур $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}/\text{InP}$ с метаморфными буферными слоями

© Е.И. Василькова¹, О.В. Баранцев¹, А.И. Баранов¹, Е.В. Пирогов¹, К.О. Воропаев²,
А.А. Васильев², Л.Я. Карачинский^{1,3}, И.И. Новиков^{1,3}, М.С. Соболев¹

¹ Санкт-Петербургский Академический университет Российской академии наук им. Ж.И. Алфёрова,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² АО „ОКБ-Планета“,
173004 Великий Новгород, Россия

³ Университет ИТМО,
197101 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: elenvasilkov@gmail.com

Поступила в Редакцию 19 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 10 октября 2024 г.

Принята к публикации 10 октября 2024 г.

Методом взрывной фотолинтографии изготовлены кристаллы *pin*-фотодиодов спектрального диапазона 2.2–2.6 мкм на основе наногетероструктур $\text{InAlAs}/\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}/\text{InP}$, полученных методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Конструктивной особенностью предложенных гетероструктур является включение метаморфных буферных слоев InAlAs для последующего малонапряженного роста активной области $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$. Из электрохимической вольт-фарадной характеристики получен вид распределения носителей заряда по структуре, определена концентрация носителей $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ в активном слое $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$. Исследованы темновые вольт-амперные характеристики кристаллов *pin*-фотодиодов с типичными ($\sim 2 \text{ мА/см}^2$ при -10 мВ) и завышенными ($\sim 3 \text{ мА/см}^2$ при -10 мВ) значениями темновых токов, взятых с одной пластины, в диапазоне температур 80–300 К. Продемонстрирована связь механизмов генерации темнового тока, ассоциируемых с прорастающими дислокациями в активной области фотодиода, с увеличением плотности темнового тока в диапазоне обратных напряжений 0.3–1 В. При малом приложенном смещении -10 мВ в обоих образцах кристаллов фотодиодов обнаружен доминирующий вклад процессов поверхностной рекомбинации и туннелирования носителей заряда через глубокие уровни при температурах 180–240 К, и генерации-рекомбинации носителей заряда в области объемного заряда при 260–300 К в образовании темновых токов.

Ключевые слова: фотодетекторы ближнего ИК диапазона, темновые токи, метаморфные гетероструктуры, вольт-амперная характеристика, электрохимическое вольт-фарадное профилирование.

DOI: 10.61011/FTP.2024.07.59178.6329H

1. Введение

Фотодетекторы ближнего и коротковолнового инфракрасного спектрального диапазонов на основе гетероструктур InGaAs/InP на сегодняшний день имеют множество применений в приборах ночного видения, спектроскопии газов и органических веществ и др. [1,2]. Принцип детектирования заключается в поглощении излучения от источника активными слоями InGaAs и его последующем преобразовании в дрейфовый электрический ток или фототок. Длинноволновый предел диапазона спектральной чувствительности таких фотодетекторов на сегодняшний день достигает 2.6 мкм благодаря использованию твердых растворов InGaAs с содержанием индия $\sim 82\text{--}83\%$. Однако материалы $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ и InP имеют довольно большое относительное рассогласование параметров кристаллической решетки, составляющее $\sim 2\%$. Рассогласование кристаллических параметров при эпитаксиальном росте приводит к накоплению упругих напряжений деформации, которые релаксируют

через образование дислокаций. Дислокации являются структурными дефектами кристалла, и наличие их в рабочей области активных приборов оптоэлектроники в больших концентрациях крайне нежелательно. В частности, прорастание дислокаций в активную область фотодетектора приводит к существенному возрастанию темновых токов, что в свою очередь отрицательно влияет на обнаружительную способность прибора.

Поэтому для обеспечения согласования параметров кристаллической решетки активных слоев $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ и подложки InP в конструкцию фотодиода включают метаморфные буферные слои, т.е. слои из полупроводниковых материалов с переменным составом в направлении эпитаксиального роста, используемые в качестве промежуточных между подложкой и активными слоями. К гетероструктурам с метаморфными буферными слоями прибегают при создании ряда приборов с целью достижения низкой плотности дефектов кристаллической структуры. Буферные слои обычно делаются довольно толстыми, порядка 1–2 мкм, в зависимости

от их конструкции и назначения конечного прибора. Постепенное изменение состава на всей толщине буферного слоя обеспечивает плавный переход от постоянной решетки используемой подложки к постоянной решетки материала активной области. При этом такие буферные слои способны затормозить прорастание дислокаций в активную область, обеспечить их загибание.

Метаморфные гетероструктуры высокого структурного качества, в частности $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ фотодетекторы с метаморфными буферными слоями, могут быть получены методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) [2–6]. Метод МПЭ роста полупроводниковых гетероструктур позволяет с высокой точностью варьировать композиционный состав буферных слоев и реализовывать сложные профили градиента состава. Подобные структуры с метаморфными буферными слоями характеризуются высокой степенью релаксации упругих напряжений и низкой плотностью дислокаций в активном слое.

Несмотря на большое количество работ, посвященных исследованию буферных слоев для перехода от InP подложки к слоям $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с $x > 0.53$ [2,6–9], фотодетекторы на основе метаморфных гетероструктур $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ характеризуются избыточными темновыми токами по сравнению с фотодетекторами на решеточно-согласованной паре материалов $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$. Так, плотность темнового тока метаморфных InGaAs/InP одноэлементных фотодиодов без охлаждения составляет $\sim 0.1\text{--}0.5\text{ mA/cm}^2$ при напряжении -10 мВ [10–12], что на много порядков превышает плотность темнового тока решеточно-согласованных InGaAs/InP фотодиодов, составляющую порядка нескольких nA/cm^2 при комнатной температуре [13].

Тем не менее в спектральном диапазоне $2.2\text{--}2.6\text{ мкм}$ InGaAs/InP -фотодетекторы выигрывают у устройств на основе антимонидов [14], в том числе сверхрешеток II типа (T2SL) [15], по значениям темновых токов, а также у технологии CdHgTe по стоимости и простоте изготовления. Таким образом, основными техническими и технологическими преимуществами фотодетекторов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ в расширенном коротковолновом диапазоне $2.2\text{--}2.6\text{ мкм}$ являются низкая стоимость, относительно низкие темновые токи и, вследствие этого, высокая обнаружительная способность.

Ранее нами были продемонстрированы кристаллы pin -фотодиодов на основе метаморфных гетероструктур $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}/\text{InP}$ с буферными слоями из InAlAs , на которых удалось зарегистрировать фотоотклик при излучении 2.5 мкм в нормальных условиях [9]. Типичные значения плотности темнового тока данных фотодиодов при обратном напряжении смещения -10 мВ составили $\sim 1.9\text{ mA/cm}^2$. Однако в ходе дальнейших исследований на пластине были обнаружены кристаллы фотодиодов с завышенными значениями темновых токов $\sim 3\text{ mA/cm}^2$ (-10 мВ), что с наибольшей вероятностью связано с

прорастанием большого количества дислокаций в активную область данных элементов. Таким образом, текущая работа посвящена определению вклада токов утечки через дислокации в обратные темновые токи фотодиодов с типичными и избыточными значениями темновых токов. Для этого в работе были получены и проанализированы температурные зависимости обратных ветвей вольт-амперных характеристик фотодиодов в диапазоне обратных напряжений до -1 В .

2. Экспериментальные образцы

Для проведения настоящего исследования использовались кристаллы pin -фотодиодов коротковолнового инфракрасного спектрального диапазона на основе полупроводниковых гетероструктур $\text{InAlAs}/\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}/\text{InP}$, представленные в работе [9]. Образцы гетероструктур эпитаксиально выращивались на двух легированных подложках $n^+\text{-InP}$ (100) качества „epi-ready“ с использованием промышленной установки МПЭ Riber MBE49. Область метаморфного буферного слоя представляла собой слои $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ общей толщиной 2 мкм с линейным градиентом состава по индию от 52 до 86% и дополнительными тонкими вставками, каждая из которых состояла из трех периодических повторений сверхрешеток InAs (4 \AA)/ InAlAs (10 \AA). В конце роста градиентного слоя был осуществлен пиковый отжиг при температуре 630°C с последующим снижением температуры подложкодержателя до 50°C . Подробно условия эпитаксиального роста данных метаморфных буферных слоев описаны в работе [6]. Для формирования кристаллов pin -фотодиодов буферные слои были легированы кремнием (n^+), а контактные слои $\text{InAlAs}/\text{InGaAs}$ суммарной толщиной 0.62 мкм — бериллием (p^+). Активная область $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ толщиной 1.5 мкм была также однородно легирована кремнием в малых концентрациях донорной примеси $\sim 5 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-3}$ (n), при этом она выполняет функции i -области в гетероструктуре pin -фотодиода.

К изготовленной методом МПЭ гетероструктуре методом взрывной фотолитографии по двойной фоторезистивной маске были сформированы омические контакты p - и n -типа, на основе невжигаемой системы металлов $\text{Ti}/\text{Pt}/\text{Au}$, а также контактные площадки анода и катода на основе металлизации V/Au . Пассивация поверхности пластины была выполнена плазмохимическим осаждением (PECVD — Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) слоя нитрида кремния (SiN) толщиной 276 нм с последующим нанесением слоя бензоциклобутена (BCB) толщиной 4 мкм . Диаметр фоточувствительной площадки полученных кристаллов pin -фотодиодов составил $\sim 140\text{ мкм}$. Фотография кристалла pin -фотодиода изображена на рис. 1, а схематическая конструкция слоев в поперечном сечении — на рис. 2.

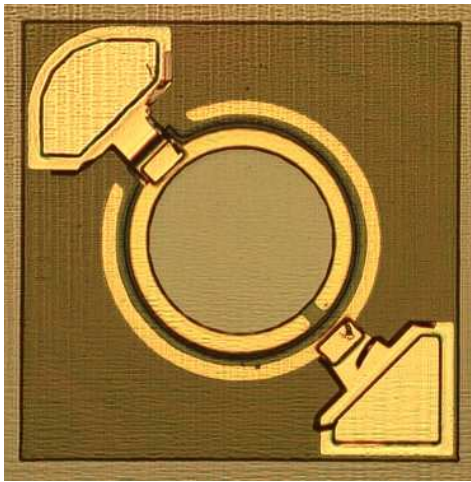


Рис. 1. Фотография кристалла *pin*-фотодиода.

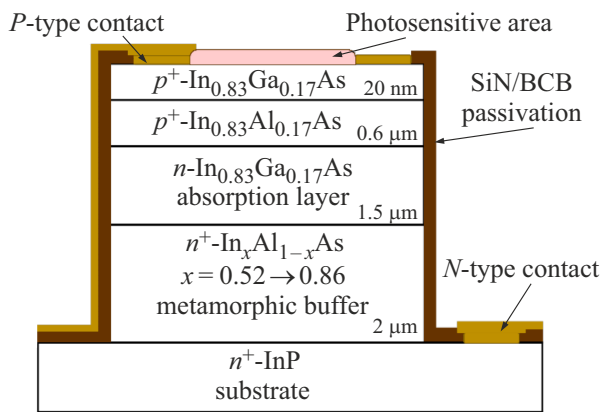


Рис. 2. Схематическое изображение структуры *pin*-фотодиода в поперечном сечении.

3. Результаты и обсуждение

Экспериментальные образцы предварительно исследовались методами стандартного и электрохимического (ECV) вольт-фардадного профилирования. Рассчитанная ранее шунтирующая емкость кристаллов *pin*-фотодиодов с минимальными значениями темновых токов оказалась равна 14 пФ [9]. ECV-профиль распределения основных носителей заряда по гетероструктуре, полученный с использованием электрохимического профилометра ECV Pro (Nanometrics, USA), представлен на рис. 3. Профиль распределения носителей характерен для *p-i-n*-перехода, где в качестве *i*-области выступает слабо легированный кремнием слой *n-In_{0.83}Ga_{0.17}As*. Толщины областей каждого типа носителей соответствуют толщинам контактных, активных и метаморфных буферных слоев, заложенным в ростовую программу. На глубинах, относящихся к активной области, наблюдается область флуктуации значений концентрации электронов, а в области буферных слоев — их резкие всплески. Эти

артефакты, предположительно, связаны с проявлением шунтирующих свойств прорастающих дислокаций. Тем не менее удалось оценить концентрацию носителей заряда в *i*-области, она составила $\sim 2.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Концентрации носителей заряда соответствующего знака в *p*⁺ и *n*⁺ областях составляют $\sim (1-2) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Расхождение экспериментального значения концентрации с заданным при МПЭ росте связано с недостаточной детальностью калибровочной кривой потока атомов кремния в области низких температур разогрева эффузионного источника, из-за чего температура источника кремния в момент синтеза гетероструктуры была задана слишком высокой. Тем не менее полученный уровень легирования высокоомного слоя позволяет сформировать структуру с резким *p*⁺-*n*-переходом, пригодную для изготовления фотодиода. Таким образом, при дальнейшем анализе вольт-амперных характеристик экспериментальных образцов реальный уровень легирования слоя *In_{0.83}Ga_{0.17}As* считался равным значению $\sim 2.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, полученному в эксперименте.

Вольт-амперные характеристики кристаллов *pin*-фотодиодов ранее были исследованы при комнатной температуре и приложенных напряжениях смещения от -1 до 0.25 В. Соответствующие кривые нескольких образцов, измеренные при комнатной температуре, были продемонстрированы и описаны в работе [9]. При напряжении смещения -1 В темновые токи обратной ветви составили в среднем ~ 10 мкА, что соответствует плотности тока 0.065 А/см^2 , а при малом напряжении смещения -10 мВ обратный ток был равен ~ 300 нА, или 1.9 мА/см^2 . Шунтирующее сопротивление R_0 , рассчитанное в соответствии с общепринятым подходом при напряжении смещения 10 мВ [16], для данных образцов составило ~ 25 кОм, а произведение $R_0A \sim 4 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. Образцы с завышенными темновыми

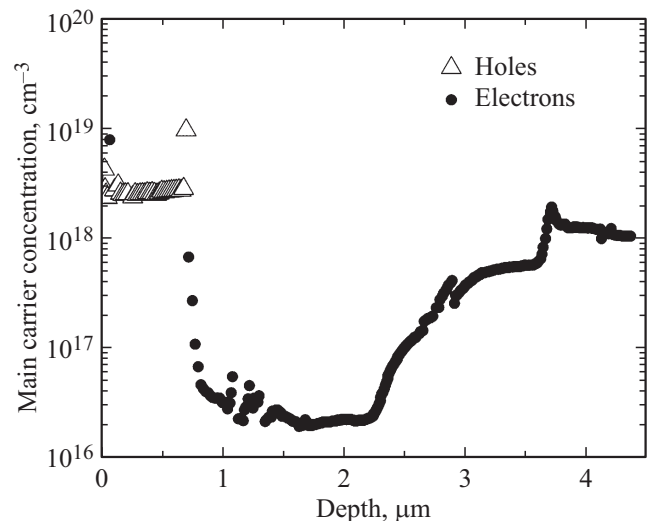


Рис. 3. Распределение концентрации носителей заряда по глубине гетероструктуры, полученное методом электрохимического вольт-фардадного (ECV) профилирования.

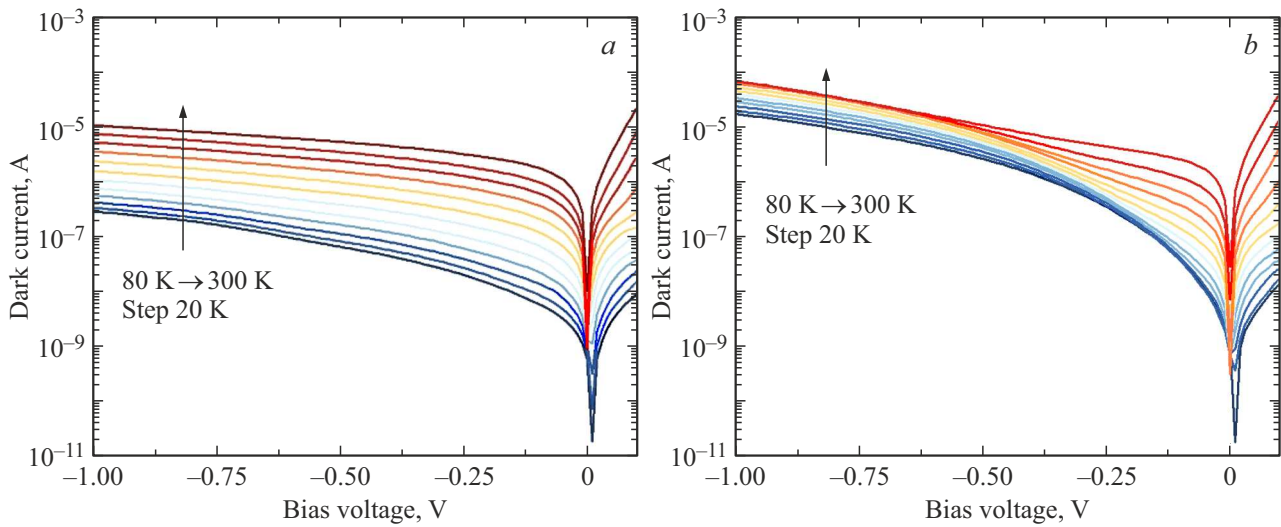


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики образцов PD-1 (a) и PD-2 (b) кристаллов *pin*-фотодиодов, полученные при температурах 80–300 К. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

тока характеризовались следующими значениями параметров: темновой ток ~ 69 мкА или 0.45 А/см² при напряжении -1 В, ~ 470 нА или 3 мА/см² при напряжении -10 мВ, сопротивление $R_0 \sim 18$ кОм и $R_0A \sim 3$ Ом · см².

Для изучения механизмов образования обратных темновых токов были получены вольт-амперные характеристики образцов в широком диапазоне температур от 80 до 300 К, с шагом 20 К. Значения темновых токов были получены при напряжениях смещения от -1 до 0.1 В через каждые 10 мВ. Охлаждение образцов осуществлялось с помощью криостата Janis VPF-100, а измерения вольт-амперных характеристик производились с использованием источника-измерителя Keithley 2400. На данном этапе исследования сравнивались образец PD-1 кристалла *pin*-фотодиода, продемонстрировавший минимальный темновой ток, и образец PD-2 с избыточным темновым током. Соответствующие семейства темновых вольт-амперных характеристик образцов представлены на рис. 4. Рисунки выполнены в полулогарифмическом масштабе, при этом обратные ветви темновых токов отражены в верхнюю полуплоскость.

Протекающие в фотодиодах темновые токи являются важной характеристикой, определяющей интенсивность излучения, которую прибор способен уловить и различить на уровне шума. Для получения прибора с лучшей чувствительностью необходимо понимать характер образования темновых токов в гетероструктуре *pin*-фотодиода. Суммарный темновой ток складывается из нескольких составляющих, а именно: а) теплового диффузионного тока неосновных носителей заряда из нейтральных *p*- и *n*-областей, б) тока генерации-рекомбинации носителей заряда в области обеднения через центры Шокли–Рида–Холла в области объемного заряда, в) тока туннелирования через ловушки в запрещенной зоне, г) тока межзонного туннелирования,

д) токов поверхностной, шунтирующей утечки [8,10,17]. Источниками состояний в запрещенной зоне, усиливающими влияние механизмов генерации-рекомбинации Шокли–Рида–Холла и туннелирования через ловушки, могут являться прорастающие дислокации.

Известно, что темновые токи, протекающие в фотодиоде, по-разному зависят от приложенного напряжения и температуры. Известно, что в идеальном *p-n*-переходе диффузионная составляющая вносит основной вклад в протекание тока в прямом направлении при положительном смещении, а при отрицательных смещениях $\gtrsim 2kT/e$ (где k — постоянная Больцмана, T — температура, e — заряд электрона) становится мала и практически не зависит от напряжения [18]. Генерационно-рекомбинационный ток имеет корневую зависимость от приложенного напряжения смещения и может вносить существенный вклад в протекание темнового тока в обоих направлениях, особенно при малых температурах [19–21]. Токи туннелирования также имеют выраженную зависимость от приложенного напряжения, при этом для активации туннелирования через глубокие ловушки необходимо приложить меньшее смещение, чем для межзонного туннелирования при прочих одинаковых условиях [20].

На рис. 4,а при снижении температуры образца на всей области исследуемых напряжений наблюдается закономерное падение значений темновых токов на ~ 2 порядка. При этом при всех исследуемых температурах наблюдается резкое возрастание тока в области обратных напряжений от 0 до 0.1 В с дальнейшим выходом в область насыщения по току, однако плоский участок насыщения вольт-амперной характеристики более выражен при температурах, близких к комнатной. Это позволяет предполагать, что при обратных напряжениях от 0.1 до 1 В в образце PD-1 диффузионная компонента

темнового тока преобладает при более высоких температурах, а в области азотных температур наблюдается вклад зависящих от величины смещения механизмов генерации-рекомбинации и туннелирования.

На рис. 4, *b*, напротив, при напряжениях от -1 до -0.3 В темновые токи меняются незначительно и их значения остаются в пределах микроампер даже при температуре 80 К. При этом во всем диапазоне температур обратный ток продолжает расти с увеличением обратного напряжения вплоть до 1 В. Таким образом, в случае образца PD-2 диффузионный механизм не является преобладающим в образовании темнового тока при обратном смещении от -1 до -0.3 В, и становится очевидно излишнее влияние токов генерации-рекомбинации и туннелирования через ловушки. Данный факт подтверждает предположение о проникновении дислокаций в активную область образца PD-2.

При малых напряжениях зависимость обратного темнового тока от температуры в общем случае является экспоненциальной: $I_T \sim \exp(-E_a/kT)$ [18]. В данном соотношении k — постоянная Больцмана, T — температура, E_a — энергия активации. При этом различным механизмам возникновения темновых токов соответствуют различные значения E_a . Диффузионному механизму отвечает энергия активации, примерно равная ширине запрещенной зоны активной области E_g (~ 0.48 эВ), а генерационно-рекомбинационному механизму — $E_g/2$ (~ 0.24 эВ) в модели рекомбинации через центры Шокли–Рида–Холла (уровни дефектов в области обеднения) [18]. Энергия активации поверхностной рекомбинации носителей заряда описывается как $\leq E_g/4$ (~ 0.12 эВ) [7,10], однако механизм поверхностных утечек в целом слабо изучен и требует дополнительного рассмотрения [20]. Кроме того, малые энергии активации обычно соотносят с преобладанием механизмов туннелирования. Так, согласно [22], туннелирование через ловушки может иметь энергии активации в диапазоне от 0.1 эВ до $E_g/2$, в том числе некоторые исследователи определяют их как равные $E_g/4$ [10]. Закономерное уменьшение ширины запрещенной зоны при нагревании [23] в InGaAs приводит к характерным энергиям активации туннелирования зона–зона < 0.1 эВ [22].

Для определения доминирующего механизма темновых токов в исследуемых кристаллах *pin*-фотодиодов при малых напряжениях смещения были построены графики зависимости силы темнового тока от величины, обратной к температуре, в заданном диапазоне 80–300 К. Значение внешней разности потенциалов было выбрано равным -10 мВ. Затем данная зависимость была аппроксимирована несколькими функциями вида $F(T) = C \exp(-E_a/kT)$, где C — константа, не зависящая от температуры. Значения E_a были приняты равными E_g , $E_g/2$, $E_g/4$ и 0.1 эВ в соответствии с описанными выше механизмами образования темновых токов.

В результате для обоих образцов были выделены участки температур, на которых преобладают разные механизмы темновых токов (рис. 5). Заметим, что, несмотря

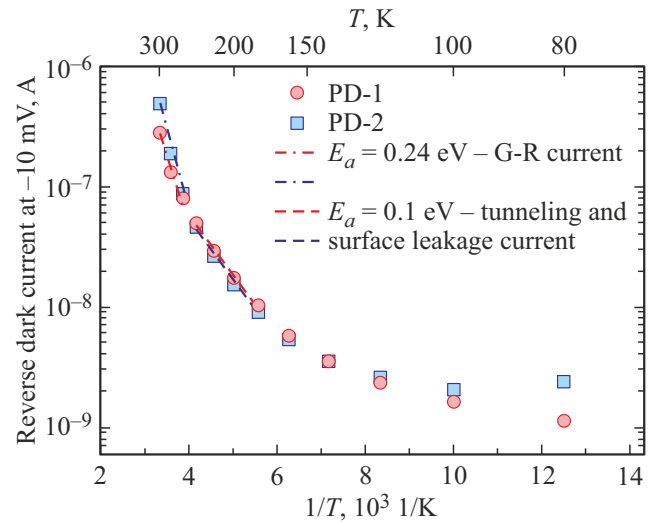


Рис. 5. Аппроксимация экспериментальной температурной зависимости обратных темновых токов образцов кристаллов фотодиодов при -10 мВ для различных значений E_a .

на существенное различие вида вольт-амперных характеристик между образцами PD-1 и PD-2 (рис. 4), рассматриваемые на рис. 5 зависимости практически совпадают. Расхождения между экспериментальными точками наблюдаются при граничных значениях исследуемых температур, т.е. при температурах порядка комнатной (280–300 К), что отмечалось ранее, и при температуре жидкого азота (80 К). При напряжении смещения -10 мВ на участке 260–300 К главный вклад в темновой ток образцов PD-1 и PD-2 вносит генерационно-рекомбинационный механизм. Температурный участок 180–240 К наилучшим образом аппроксимируется функцией с энергией активации, равной ~ 0.1 эВ, что позволяет сделать вывод о существовании поверхностных утечек и туннелирования через глубокие уровни. При более низких температурах значение силы тока слабо меняется с изменением температуры, что свидетельствует об энергиях активации ~ 0.01 эВ. На данном участке также можно говорить о вкладе механизмов поверхностных утечек и туннелирования, в том числе туннелирования зона–зона вследствие малых предполагаемых энергий активации $E_a \ll E_g$.

Таким образом, как у образца с минимальным темновым током PD-1, так и у образца с завышенным темновым током PD-2 при малых обратных напряжениях смещения -10 мВ в широком температурном диапазоне 180–300 К могут быть обнаружены составляющие темнового тока, ассоциируемые с большой плотностью прорастающих дислокаций. Одним из возможных способов дальнейшего сокращения плотности дислокаций в гетероструктурах *pin*-фотодиодов и, следовательно, генерационно-рекомбинационной и туннельной компонент темнового тока являются вставки сверхрешеток („digital-graded superlattices“) $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}/\text{In}_{0.83}\text{Al}_{0.17}\text{As}$

на гетероинтерфейсах буферный слой/активная область и активная область/контактный слой [2]. Кроме того, дополнительного исследования требует проблема процессов поверхностной рекомбинации носителей заряда, а также вклад поверхностных утечек в образование темнового тока в том или ином диапазоне температур.

4. Заключение

В данной работе были исследованы вольт-амперные характеристики кристаллов *pin*-фотодиодов спектрального диапазона 2.2–2.6 мкм с различными значениями темновых токов, изготовленных из гетероструктур In(Al)GaAs/InP с метаморфными буферными слоями In_yAl_{1-y}As ($y = 0.52–0.86$), полученных методом МПЭ. Методом электрохимического (ECV) профилирования показано, что распределение основных носителей заряда в изготовленных гетероструктурах соответствует *p–i–n*-переходу с концентрацией носителей в *i*-области $2.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Исследования вольт-амперных характеристик кристаллов фотодиодов показали, что в диапазоне обратных напряжений 0.1–1 В образца с минимальными значениями темновых токов PD-1 преобладает темновой ток диффузионной природы, тогда как у образца с избыточными темновыми токами PD-2 наблюдается вклад зависящих от плотности дислокаций темновых токов генерации-рекомбинации и туннелирования через ловушки. При этом в области малых напряжений на уровне –10 мВ вид зависимости силы темнового тока от температуры у обоих образцов одинаков. В данных условиях образование темновых токов происходит в основном за счет механизмов генерации-рекомбинации носителей заряда в области объемного заряда (260–300 К) и туннелирования через ловушки и поверхностной рекомбинации носителей (180–240 К).

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 22-79-00146 и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках выполнения государственного задания № FSRM-2022-0002.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- [1] И.Д. Бурлаков, Л.Я. Гринченко, А.И. Дирочка, Н.Б. Залетаев. УПФ, **2** (2), 131 (2014).
- [2] X. Chen, Y. Gu, Y. Zhang. *Epitaxy and device properties of InGaAs photodetectors with relatively high lattice mismatch, in Epitaxy* (IntechOpen, Rijeka, 2018).
- [3] L.Y. Karachinsky, T. Kettler, I.I. Novikov, Y.M. Shernyakov, N.Y. Gordeev, M.V. Maximov, N.V. Kryzhanovskaya, A.E. Zhukov, E.S. Semenova, A.P. Vasil'ev. *Semicond. Sci. Technol.*, **21** (5), 691 (2006).
- [4] A.Yu. Egorov, L.Ya. Karachinsky, I.I. Novikov, A.V. Babichev, T.N. Berezovskaya, V.N. Nevedomskiy. *Semiconductors*, **49** (10), 1388 (2015).
- [5] A.Yu. Egorov, L.Ya. Karachinsky, I.I. Novikov, A.V. Babichev, V.N. Nevedomskiy, V.E. Bugrov. *Semiconductors*, **50** (5), 612 (2016).
- [6] Е.И. Василькова, Е.В. Пирогов, М.С. Соболев, Е.В. Убыйвовк, А.М. Мизеров, П.В. Середин. *Конденсированные среды и межфазные границы*, **25** (1), 20 (2023).
- [7] X.Y. Chen, Y. Gu, Y.G. Zhang, Y.J. Ma, B. Du, H.Y. Shi, W.Y. Ji, Y. Zhu. *Infr. Phys. Technol.*, **89**, 381 (2018).
- [8] X. Ji, B. Liu, H. Tang, X. Yang, X. Li, H. Gong, B. Shen, P. Han, F. Yan. *AIP Adv.*, **4** (8), 087135 (2014).
- [9] Е.И. Василькова, Е.В. Пирогов, К.Ю. Шубина, К.О. Воропаев, А.А. Васильев, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, О.В. Баранцев, М.С. Соболев. *Конденсированные среды и межфазные границы*, **26** (3), 417 (2024).
- [10] Y. Liu, Y. Ma, X. Li, J. Fang. *IEEE J. Quant. Electron.*, **56** (2), 1 (2020).
- [11] Z. Jiao, T. Guo, G. Zhou, Y. Gu, B. Liu, Y. Yu, C. Yu, Y. Ma, T. Li, X. Li. *Electronics*, **13**, 1339 (2024).
- [12] L. Wan, X. Shao, Y. Ma, S. Deng, Y. Liu, J. Cheng, Y. Gu, T. Li, X. Li. *Infr. Phys. Technol.*, **109**, 103389 (2020).
- [13] C.-C. Huang, C.-L. Ho, M.-C. Wu. *IEEE Electron Dev. Lett.*, **36** (10), 1066 (2015).
- [14] I. Shafir, N. Snapi, D. Cohen-Elias, A. Glozman, O. Klin, E. Weiss, O. Westreich, N. Sicron, M. Katz. *Appl. Phys. Lett.*, **118** (6), 063503 (2021).
- [15] Y. Liang, W. Zhou, X. Zhang, F. Chang, N. Li, Y. Shan, Y. Zhang, F. Ye, C. Li, X. Su, C. Yang, H. Hao, G. Wang, D. Jiang, D. Wu, H. Ni, Y. Xu, Z. Niu, Y. Zheng, Y. Shi. *Appl. Phys. Lett.*, **125** (14), 141103 (2024).
- [16] P.R. Thompson, T.C. Larason. *Method of measuring shunt resistance in photodiodes, in 2001 Measurement Sci. Conf.* (2001).
- [17] Н.И. Яковлева, К.О. Болтарь. *Прикл. физика*, **3**, 66 (2015).
- [18] S.M. Sze. *Physics of semiconductor devices* (John Wiley & Sons, 1969).
- [19] Н.И. Яковлева. УПФ, **6** (3), 231 (2018).
- [20] А.В. Сорочкин, В.С. Варавин, А.В. Предеин, И.В. Сабинаина, М.В. Якушев. ФТП, **46** (4), 551 (2012).
- [21] K. Taguchi. *P–I–N Photodiodes, in WDM Technologies: Active Optical Components* (Elsevier, 2002).
- [22] Q. Smets, D. Verreck, A.S. Verhulst, R. Rooyackers, C. Merckling, M. Van De Put, E. Simoen, W. Vandervorst, N. Collaert, V.Y. Thean, B. Sorée, G. Groeseneken, M.M. Heyns. *J. Appl. Phys.*, **115** (18), 184503 (2014).
- [23] Y.P. Varshni. *Physica*, **34** (1), 149 (1967).

Редактор Г.А. Оганесян

Temperature analysis of dark current in *pin*-photodiodes based on $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}/\text{InP}$ epitaxial heterostructures with metamorphic buffer layers

E.I. Vasilkova¹, O.V. Barantsev¹, A.I. Baranov¹,
E.V. Pirogov¹, K.O. Voropaev², A.A. Vasiliev²,
L.Ya. Karachinsky^{1,3}, I.I. Novikov^{1,3}, M.S. Sobolev¹

¹ Alferov University,
194021 St. Petersburg, Russia

² JSC „OKB-Planeta“,
173004 Veliky Novgorod, Russia

³ ITMO University,
197101 St. Petersburg, Russia

Abstract Crystals of 2.2–2.6 μm sensitive *pin*-photodiodes were fabricated by lift-off photolithography using $\text{InAlAs}/\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}/\text{InP}$ heterostructures, grown by molecular beam epitaxy. A design feature of the proposed heterostructures is the inclusion of metamorphic InAlAs buffer layers for subsequent low-stress growth of the $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ active region. A profile of charge carrier distribution over the structure was obtained employing electrochemical capacitance-voltage characteristic, and the carrier concentration of $2.5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ in the $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ active layer was determined. Dark current-voltage characteristics of *pin*-photodiode chips from the same wafer with typical ($\sim 2 \text{ mA/cm}^2$ at -10 mV) and excessive ($\sim 3 \text{ mA/cm}^2$ at -10 mV) values of dark currents were studied in the temperature range of 80–300 K. Connection of the dark current mechanisms associated with threading dislocations in the photodiode active region with increased dark current densities was demonstrated in the reverse bias voltage range of 0.3–1 V. With a small applied bias of -10 mV , the dominant contribution of trap-assisted tunneling and surface recombination at temperatures of 180–240 K and generation-recombination of charge carriers in the space-charge region at 260–300 K to the overall dark current was found in both photodiode chip samples.