

**Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций**

На правах рукописи

Шуков Иван Викторович

**Исследование влияния условий роста и особенностей дизайна ХВп
гетероструктур на фотоэлектрические характеристики ИК фотоприемников,
изготовленных на их основе**

| | |
|------------------------|--------------------------------|
| Направление подготовки | Физика и астрономия (03.06.01) |
|------------------------|--------------------------------|

Код и наименование

| | |
|----------------|--------------------------------------|
| Направленность | Физика полупроводников (03.06.01_07) |
|----------------|--------------------------------------|

Код и наименование

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы

Автор работы: Шуков Иван Викторович
Научный руководитель: д.ф.-м.н.,
профессор Фирсов Дмитрий Анатольевич

Санкт Петербург – 2021

Научно-квалификационная работа выполнена в Высшей инженерно-физической школе Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ: Журихина Валентина Владимировна,
д.ф.-м.н.

Научный руководитель: Фирсов Дмитрий Анатольевич,
д.ф.-м.н., профессор

Рецензент: Прокофьев Александр Валерьевич,
к.т.н., главный метролог
АО "СИТРОНИКС КТ",

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

Оглавление

| | |
|---|----|
| Введение | 4 |
| Глава 1. Литературный обзор | 6 |
| 1.1. Предпосылки к разработке барьерных гетероструктур. Недостатки типичных ИК фотодиодов..... | 6 |
| 1.2. Конструкция барьерных фотодетекторов. Принцип работы | 8 |
| 1.3. Стандартная конструкция ХВп..... | 13 |
| 1.4. Развитие барьерных детекторов на основе InAsSb..... | 16 |
| Выводы и постановка задачи..... | 23 |
| Глава 2. Образцы для исследования..... | 24 |
| 2.1. Дизайн и изготовление барьерных гетероструктур..... | 24 |
| 2.2. Планарный этап изготовления тестовых фотоприемников | 29 |
| Глава 3. Методика исследования | 30 |
| Глава 4. Результаты измерений | 32 |
| Заключение | 36 |
| Список литературы | 37 |

Введение

Детекторы инфракрасного (ИК) излучения широко применяются практически во всех высокотехнологичных сферах деятельности человека. Непрерывное развитие военной и аэрокосмической отраслей становится причиной все возрастающих требований к производительности и эффективности тепловизионных систем высокого разрешения. Основным элементом данных систем являются охлаждаемые фотоприемные устройства (ФПУ), изготовленные на базе широкоформатных фотоприемных матриц (ФПМ). На сегодняшний день существует несколько основных технологий производства таких матриц, каждая из которых предполагает определенный дизайн гетероструктуры (ГС), изготавливаемой на основе конкретного материала или их группы.

До недавнего времени основой класса фотонных детекторов, чувствительных в среднем (3 – 5 мкм) и дальнем (8 – 12 мкм) ИК диапазонах были фотодиоды с p-n- или гетеропереходом, изготовленные на основе узкозонных материалов. Наиболее широкое распространение получили ИК детекторы на основе системы твердых растворов HgCdTe. Определенную конкуренцию в среднем ИК диапазоне им составляли фотодиоды на основе InSb и PbSe. Для работы в окне прозрачности атмосферы 8 – 10 мкм также применялась технология изготовления ГС с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs (QWIP).

Главным ограничением для применения детекторов, чувствительных в среднем и дальнем ИК диапазонах, является необходимость поддержания низкой рабочей температуры устройства (<150 К). Данное условие продиктовано необходимостью повышения соотношения сигнал/шум путем снижения уровня темновых токов ФПУ, ограничивающих его производительность. Это приводит к удорожанию итогового прибора, увеличению его габаритов и веса, времени выхода в рабочий режим и потребления энергии.

Задача по разработке фотоприемника, не требующего глубокого охлаждения в последние годы решается во многом благодаря использованию архитектуры барьерных детекторов ХВп. Преимуществом данной конструкции является существенное снижение вклада в суммарный темновой ток процессов генерации-

рекомбинации Шокли-Рида-Холла, а также поверхностных утечек. Данное преимущество позволяет добиваться высоких значений характеристик чувствительности при меньшем охлаждении ФПУ.

В реферате рассмотрено влияние особенностей дизайна ХВn гетероструктур, изготовленных на основе твердого раствора InAsSb, на фотоэлектрические характеристики ИК фотоприемников, чувствительных в среднем ИК диапазоне.

Глава 1. Литературный обзор

1.1. Предпосылки к разработке барьерных гетероструктур. Недостатки типичных ИК фотодиодов

Темновой ток в типичном p-n фотодиоде определяется как сумма вкладов тока трех областей структуры: объема материала, его поверхности и области пространственного заряда (ОПЗ) [1]. Объемные или, так называемые, диффузионные токи являются следствием трех основных процессов рекомбинации, происходящих в объеме структуры: излучательной, Оже- и Шокли-Рида-Холла (ШРХ) [2]. Помимо диффузионной составляющей (I_{diff}), на суммарный темновой ток фотодиода (I_{dark}) оказывают влияние процессы генерации-рекомбинации (ГР) в ОПЗ (I_{GR}), туннелирования через ОПЗ (I_{tun}) и поверхностных утечек (I_{surf}):

$$I_{dark} = I_{GR} + I_{diff} + I_{surf} + I_{tun} .$$

Излучательная рекомбинация, ШРХ- и Оже-механизмы являются фундаментальными межзонными процессами, которые определяются зонной структурой и качеством материала полупроводника. Температурная зависимость диффузионного тока, являющегося следствием данных процессов, имеет вид: $\sim T^3 \exp(-\frac{E_{g0}}{kT})$, где E_{g0} - ширина запрещенной зоны при $T = 0$ К.

Ток ГР, связанный с процессами взаимодействия носителей с ловушками ШРХ, сильнее всего проявляется в ОПЗ фотодиода. Интенсивность процессов ШРХ в ОПЗ на порядки больше, чем в объеме структуры. Температурная зависимость ГР составляющей имеет вид: $\sim T^{\frac{3}{2}} \exp(-\frac{E_{g0}}{2kT})$.

Разница в поведении температурных зависимостей основных компонент I_{dark} проявляется в существовании, так называемой, «температуры перегиба» (T_c) – температуры, при достижении которой вклад диффузионной и ГР составляющих уравнивается. Соответственно, при температуре выше T_c величина суммарного темного тока определяется вкладом диффузионных процессов, ниже T_c – вкладом процессов ГР в ОПЗ [3].

На рисунке 1 изображен общий вид логарифмической зависимости суммарного темнового тока фотодиода от обратной температуры. На участке 1 определяющим является вклад диффузии носителей в объеме структуры. Далее при температуре T_c для фотодиода стандартной конструкции наклон зависимости уменьшается, начинает преобладать компонента ГР (участок 3). В конечном итоге, подавление процессов ШРХ в ОПЗ позволяло бы сохранить изначальный характер температурной зависимости темнового тока и при охлаждении ниже T_c (участок 2). Точками 4 и 5 помечены рабочие режимы, реализуемые в данном случае в сравнении со стандартной конструкцией (точка 3): 4 – равенство соотношений сигнал/шум при более высокой температуре; 5 – более высокое соотношение сигнал/шум при равенстве температур.

В случае типичных ИК фотодиодов T_c составляет около 200 К. В результате доминирующий вклад процессов ГР в ОПЗ для узкозонных InSb, InAsSb или HgCdTe, приводит к увеличению темного тока на 3-4 порядка для работы в среднем и на 1-2 порядка для работы в дальнем ИК диапазоне при 77 К [4].

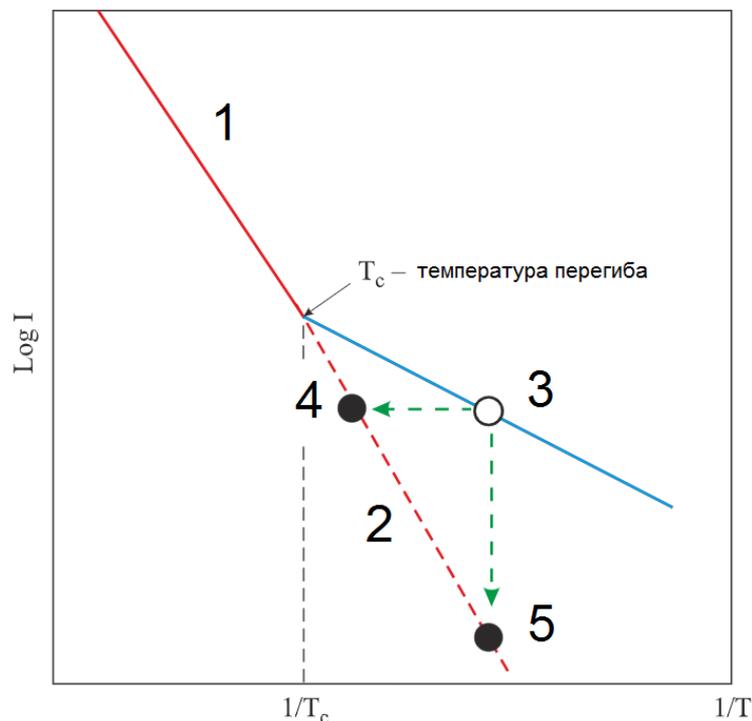


Рис.1 – Общий вид логарифмической температурной зависимости темнового тока p-n фотодиода

Помимо объемных и ОПЗ составляющих, важны также поверхностные токи, часто ограничивающие характеристики фотодиодов. Их величина связана исключительно с плотностью поверхностных дефектов материала и существенно не

зависит от температуры [5]. В частности, при создании отдельных фоточувствительных элементов на основе стандартных фотодиодов, формирование мез происходит путем травления структуры глубже уровня ОПЗ. Из-за повреждений травлением и оборванных связей на боковых стенках структуры значительно увеличивается плотность дефектов. Вклад поверхностных токов можно снизить только путем пассивации поверхности. Однако, данный процесс является технологически сложным и сильно удорожает производство.

В случае производства ФПМ, представляющих собой массивы таких элементов, проблема поверхностных токов выходит на первый план. Причиной тому потребность в постоянном увеличении разрешения ФПМ, а, следовательно, в уменьшении размера пикселей и увеличении их количества [6]. Фоточувствительные элементы меньшего размера более восприимчивы к поверхностным токам, поскольку они имеют более высокое отношение поверхности к площади. В итоге, ограничение суммарного темнового тока процессами поверхностных утечек приводит к тому, что обнаружительная способность детектора D^* масштабируется как корень квадратный из линейного размера детектора. Следовательно, при уменьшении размера пикселя вклад поверхностных процессов все больше ограничивает величину D^* [7].

1.2. Конструкция барьерных фотодетекторов. Принцип работы

Концепция устройства с энергетическим барьером, препятствующим току носителей только одного знака, впервые была описана при создании лазера на базе двойной ГС в 1963 году [8]. Позже, в 1983 году, М.Уайт [9] представил патент на конструкцию детектора ИК излучения, на базе широкозонного полупроводника р-типа, окруженного двумя узкозонными слоями с донорным легированием. Узкозонные слои выполняли функции коллектора (поглощающего слоя) и эмиттера (контактного слоя). В результате введения между ними широкозонного слоя возникал энергетический разрыв в зоне проводимости. Образовавшийся барьер, ограничивал сквозной ток основных носителей заряда (ОНЗ) – электронов. Таким образом предлагалось снижать уровень постоянного тока устройства на фоне слабого тока

фотоотклика. В этом случае в качестве фотосигнала регистрировался бы ток неосновных носителей заряда (ННЗ) – дырок, для которых барьера в валентной зоне не существовало.

Данная архитектура была предложена для детекторов на основе твердых растворов HgCdTe. Кроме того, Уайт предложил использовать в качестве материала узкозонных слоев полупроводники с разной шириной запрещенной зоны. В такой структуре при смене полярности напряжения смещения слои эмиттера и коллектора функционально менялись местами, что позволяло бы реализовать устройство детектора, чувствительного сразу в двух спектральных диапазонах.

Несколько вариантов конструкций ГС для изготовления фотодиодов среднего ИК диапазона, сходных с предложенными Уайтом, запатентовал в 2003 году Ф.Клипштейн [4]. Идея также заключалась во введении широкозонного слоя между двух узкозонных слоев, выполняющих функции поглощающего и контактного. Дизайн и легатура широкозонного слоя должны были быть подобраны таким образом, чтобы препятствовать току ОНЗ, а также исключать возникновение ОПЗ в узкозонном поглощающем слое. Предполагалось, что такая архитектура ГС позволит полностью подавить ГР составляющую темнового тока устройства. Варианты конструкций отличались типом легирования и материалом слоев. В патенте описаны структуры на основе GaSb, InAsSb, InSb, InAlSb, сверхрешеток (СР) InAs/InGaSb, а также общий вид их зонных диаграмм.

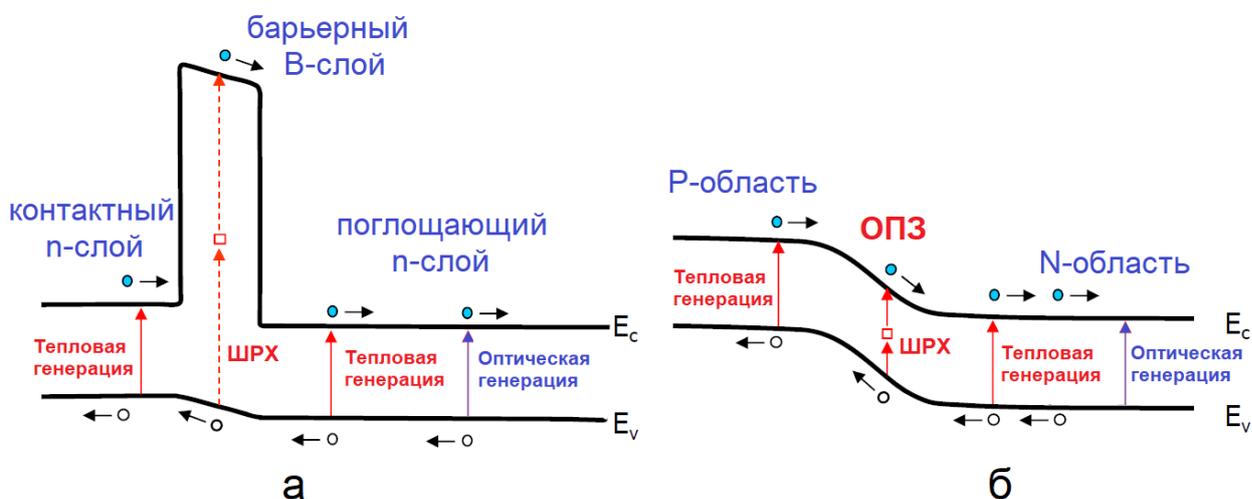


Рис.2 – Зонные диаграммы:

а) nVn структура под действием внешнего напряжения смещения $U_{\text{см}}$; б) p-n фотодиод.

В том же году С.Маймон и Г.В.Уикс предложили похожее устройство барьерной ГС [10]. В данной работе такая структура получила название «nВn», обозначающее совокупность двух легированных донорами узкозонных слоев InAsSb («n») и нелегированного широкозонного слоя GaAlSb («В») между ними. Обе группы заявили о перспективности использования данных видов ГС с целью минимизации вклада процессов ГР в темновой ток детектора. Общий вид зонной диаграммы подобной структуры изображен на рисунке 2а.

Принцип работы nВn детектора, описанный впоследствии в большом количестве работ [2–6, 10–23], можно сформулировать следующим образом. Первый «n» слой выполняет функцию контактного слоя (КС) и предназначен для подключения детектора к измерительной цепи и подачи на него смещающего напряжения. Его толщина может составлять от нескольких десятков до сотен нанометров. Второй «n» слой является поглощающим слоем (ПС). Его толщина выбирается сравнимой с обратной величиной коэффициента поглощения излучения в материале, но меньше диффузионной длины неосновных носителей заряда [11]. Ширина запрещенной зоны ПС, а точнее его край поглощения, также задает спектральный диапазон фоточувствительности детектора. Ввод барьерного слоя (БС) «В» из определенного широкозонного материала позволяет реализовать ситуацию, при которой возникает значительный энергетический разрыв зоны проводимости, в то время как сдвиг валентной зоны остается практически нулевым. Зонная диаграмма данного вида получила название «униполярного барьера» (УБ). Состав КС оказывает влияние только на величину оптимального рабочего напряжения детектора и почти не влияет на остальные его характеристики. Таким образом, основное влияние на характеристики фотоприемника оказывают параметры пары БС – ПС [12].

При подаче смещающего потенциала на такую структуру основная часть напряжения падает на БС, оставляя границы зон в КС и ПС плоскими почти по всей глубине за исключением тонких приграничных к БС областей. В результате, сквозной ток электронов через структуру полностью блокируется барьером в зоне проводимости. Дырки, сгенерированные в ПС под действием тепла или излучения, беспрепятственно дрейфуют в сторону КС, где рекомбинируют с электронами,

поступающими от электрода. Таким образом, именно ток ННЗ определяют величину темнового тока и фототока [11].

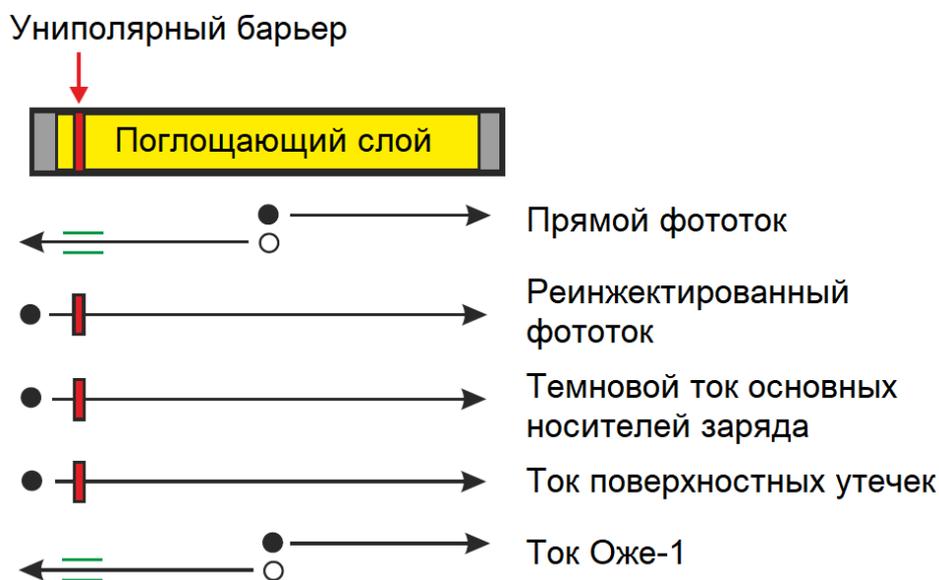


Рис.3 – Схематическая иллюстрация влияния УБ на токовые составляющие в nВn структуре

Схематично распространение различных токовых компонент в nВn структуре показано на рисунке 3. УБ не препятствует току носителей, сгенерированных в ПС при поглощении излучения. При этом ток реинжектированных носителей из КС, темновой ток ОНЗ и поверхностный ток оказываются заблокированы. Последний факт, как уже было сказано, особенно важен при производстве ФПМ. Присутствие в конструкции структуры УБ позволяет упростить процедуру разделения пикселей: при формировании мезы травление можно останавливать на уровне широкозонного полупроводника, который сам по себе выполняет функции пассивирующего материала. Было показано, что применения УБ для фотоприемников на основе InAs позволяет снизить величину тока поверхностных утечек на шесть порядков [13].

Единственная паразитная компонента, которая не подавляется с помощью УБ – ток носителей, связанный с Оже-рекомбинацией. Причина этого заключается в том, что Оже-процессы также, как и фотогенерация, происходят в ПС. Ограничение производительности Оже-процессами ставит nВn структуры в один ряд с традиционными HgCdTe детекторами, в которых данное свойство сформулировано в так называемом «Правиле 07» [14].

Режим «плоских зон», при котором для ННЗ не существует потенциального барьера, на практике реализуется не всегда. В валентной зоне также может существовать энергетический разрыв [15] (см.рис.4). Следовательно, ННЗ необходимо преодолеть определенный потенциальный барьер в энергии между плоским краем валентной зоны в ПС, и самой нижней точкой края изогнутой валентной зоны БС. Высота барьера обычно определяется как $\varphi_U \approx 3k_B T_{op}$, где k_B – постоянная Больцмана, а T_{op} – рабочая температура. Минимальное напряжение смещения, при котором дырка преодолевает барьер φ_U – «напряжение включения» (U_{min}). Существует также и максимальное смещающее напряжение (U_{max}), при превышении которого ОПЗ на границе БС начинает распространяться в сторону ПС, что становится причиной резкого роста вклада ГР процессов в темновой ток. В результате для реального nВn детектора напряжение смещения должно выбираться из расчета $U_{min} < U < U_{max}$, при котором реализуется режим плоских зон [16].

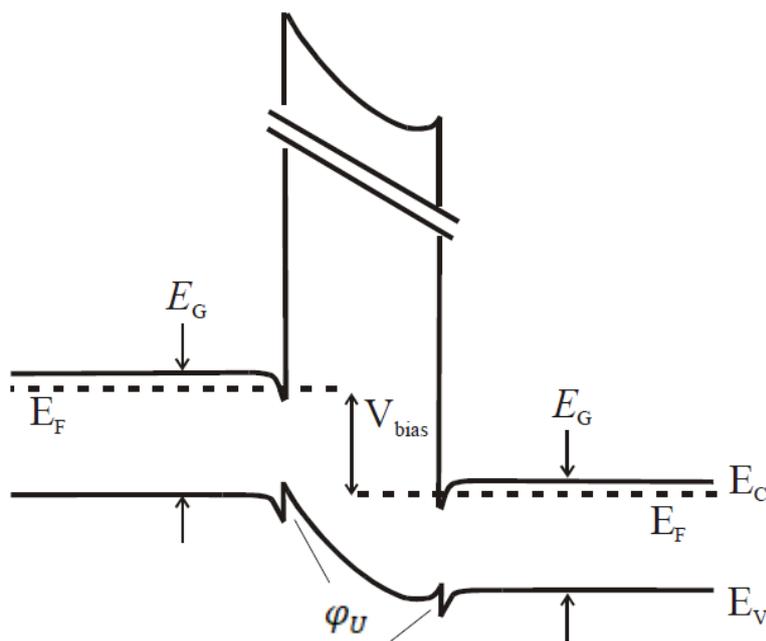


Рис.4 – зонная диаграмма nВn детектора с барьером φ_U в валентной зоне

Однако главной особенностью nВn структуры в сравнении с типичным фотодиодом (см.рис.2б) является почти полное исключение главной причины возникновения ГР составляющей темнового тока путем замены ОПЗ широкозонным БС. В 2010 году Д.Тинг [17] привел результаты расчета пространственной зависимости скорости рекомбинации ШРХ в nВn структуре и в стандартном p-n

фотодиоде при 80 К (рис.5). Пик зависимости для фотодиода соответствует области пространственного заряда. Провал зависимости для nВп – барьерному слою.

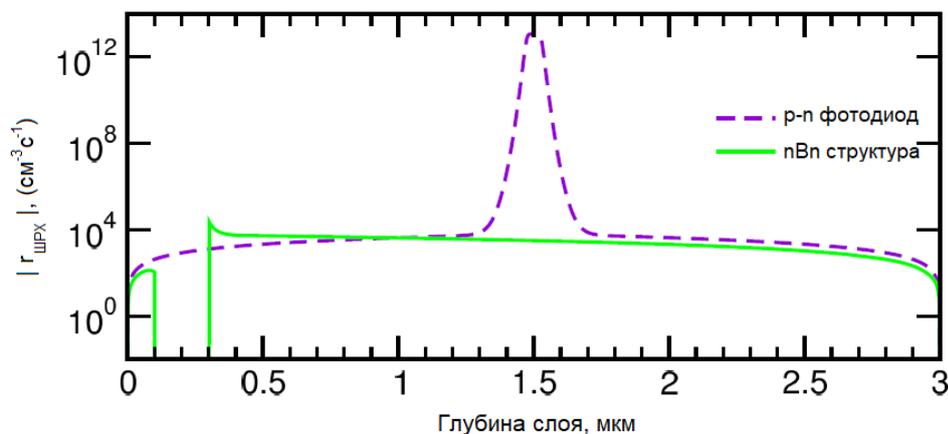


Рис.5 – Расчетная пространственная зависимость скорости рекомбинации ШРХ в nВп структуре и p-n фотодиоде

1.3. Стандартная конструкция ХВп

В 2006 году С.Маймон и Г.В.Уикс объявили о создании первого ИК фотодетектора, чувствительного в окне прозрачности атмосферы 3-5 мкм на основе новой nВп структуры [3]. Фотоприемники размером 100x100 мкм² были реализованы в системе материалов InAs/AlAs_xSb_{1-x}/InAs (КС/БС/ПС) на подложке InAs, а также InAsSb/AlAs_xSb_{1-x}/InAsSb на подложке GaSb.

В изготовленных на основе InAs приемниках режим равенства фонового и темнового тока (Background Limited Performance – BLIP) реализовывался уже при 230 К при напряжении смещения -0,5 В, что на 100 К выше, чем у типичного InAs p-n фотодиода. При данной температуре край поглощения составил 3,4 мкм и 4,2 мкм для InAs и InAsSb nВп детекторов соответственно.

В 2008 году Ф.Клипштейн расширил класс барьерных структур, предложив к рассмотрению ГС с различной лигатурой и составом слоев [15]. В зависимости от типа проводимости ПС барьерные структуры предлагалось разделить на две группы: ХВп и ХВр. Внутри каждой подгруппы может отличаться тип легирования КС и БС. Кроме того, были предложены варианты изготовления КС и ПС из материалов, совпадающих или различающихся по составу, а, следовательно, и по ширине запрещенной зоны. В первом случае КС обозначается «n» или «р» - в зависимости от

легирования, во втором – литерой «С» с указанием типа проводимости. Общий вид зонных диаграмм основных $XB_{n,p}$ и $XB_{p,p}$ структур представлен на рисунке 6.

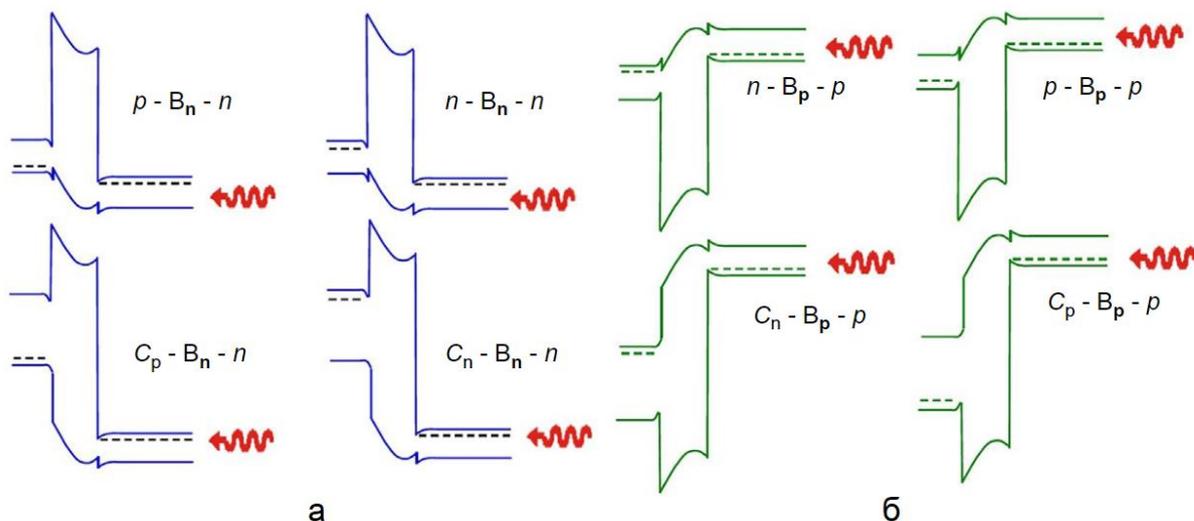


Рис.6 – общий вид зонных диаграмм основных $XB_{n,p}$ (а) и $XB_{p,p}$ (б) структур

На основе рассчитанных моделей структур типа $C_pB_{n,p}$, $C_pB_{p,p}$ и $C_nB_{n,p}$ реализованных в системе материалов GaSb/AlAsSb/InAsSb, Клипштейн описал основные принципы работы барьерных детекторов и оценил связь величины барьера для ННЗ в валентной зоне и смещающего напряжения, упомянутую в предыдущем параграфе. Главными результатами работы можно считать выводы о нецелесообразности разнотипного легирования ПС и БС, пренебрежительно малом вкладе процессов туннелирования и термоэмиссии в темновой ток, а также о высоком потенциале реализации $XB_{n,p}$ структуры на основе разносоставных слоев InAsSb (для среднего ИК) и сверхрешеток 2го рода (CP2P) InAs/GaSb (для дальнего ИК). Также была проведена оценка граничной длины волны ($\sim 4,2$ мкм) и рабочей температуры (~ 150 К) $XB_{n,p}$ детектора.

Вопрос о влиянии типа легирования БС на рабочие характеристики $XB_{n,p}$ детектора также рассматривался командой Клипштейна в 2009 и 2015 годах [16, 18]. В данных публикациях сформулировано заключение о том, что разнотипное легирование БС и ПС приводит к возникновению ОПЗ в структуре, вследствие чего поведение барьерного детектора становится близким к поведению типичного p-n фотодиода. Из зависимости, представленной на рисунке 7, видно, что токовая

характеристика $nV_p n$ детектора проявляет поведение, связанное не только с диффузионной, но и с ГР составляющей. В результате, темновой ток для такой структуры при 150 К на 2 больше, чем ток стандартной $nV_n n$. Проблему возникновения ОПЗ при разнотипном легировании ПС и БС Клипштейн в 2010 [19] предложил решать путем сильного легирования ПС. Но при этом уменьшается длина волны края поглощения детектора вследствие сдвига Бурштейна-Мосса.

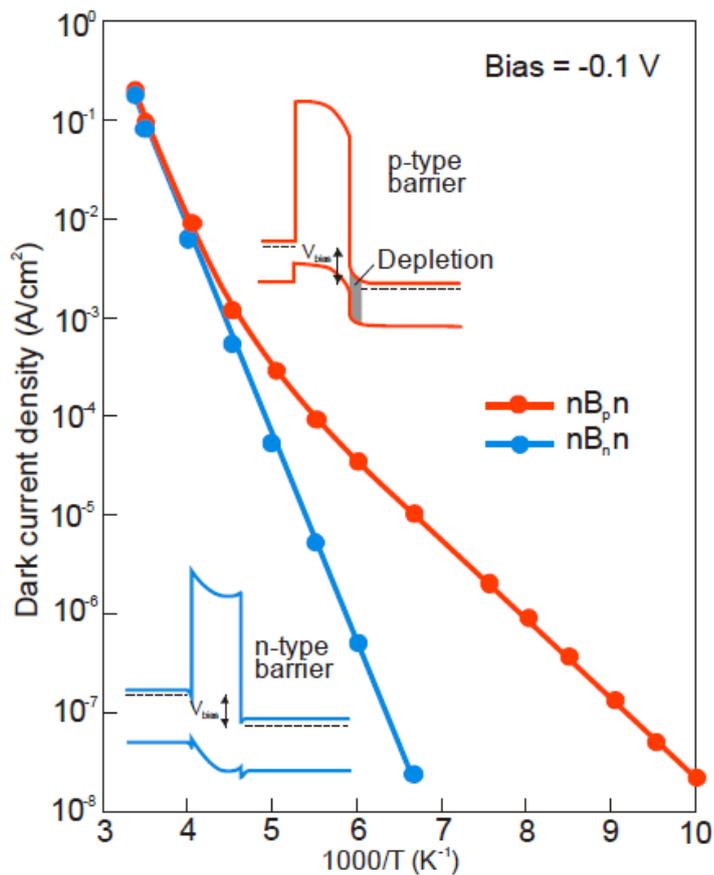


Рис.7 – зависимости плотности темнового тока от обратной температуры для $nV_n n$ и $nV_p n$ детекторов. На вставках зонные диаграммы

В 2011 году была изготовлена первая широкоформатная ФПМ 640x512 с пикселями размером 15x15 мкм. ФПМ продемонстрировала эквивалентную шуму разность температур (ЭШРТ) 22 мК и рабочую температуру до 165 К. В 2012 году [21] впервые были изготовлены nV_n детекторы на GaAs подложке с толстым переходным буферным слоем. В 2013 году П.Мартынюк и А.Рогальский разработали модели высокотемпературных nV_n детекторов на основе InAsSb [22] и HgCdTe [23] с различными вариантами параметров ГС (толщины БС, легирования и пр.). Стандартная конструкция ХВп детектора, представленная в данных работах

изображена на рисунке 8. Те же авторы в 2014 году предсказали температурные зависимости темновых токов различных типов ИК-детекторов, включая детекторы InAsSb nВn с краем поглощения 5 мкм [24].

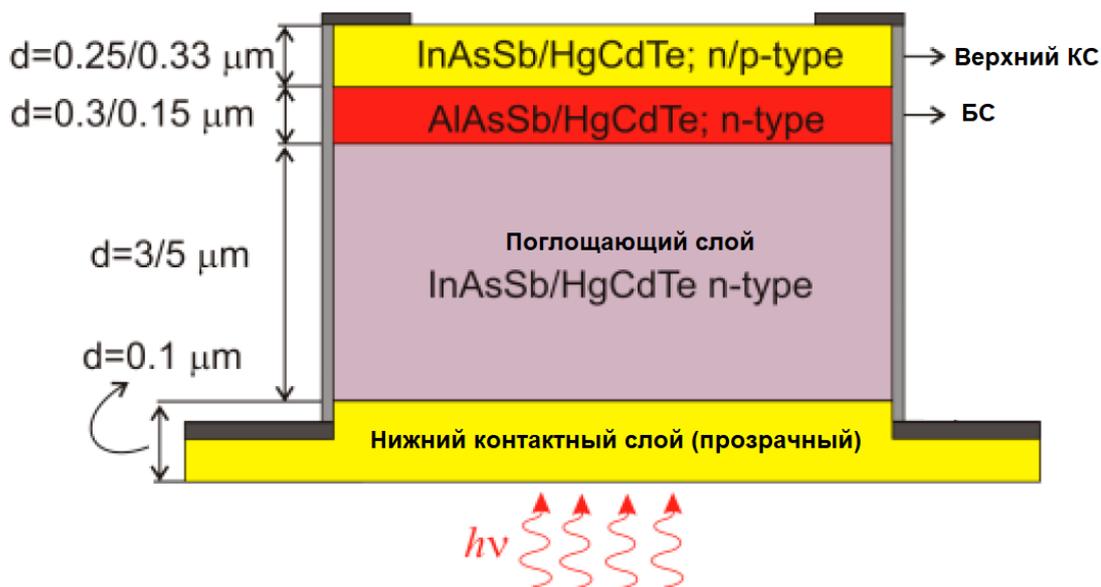


Рис.8 – стандартная конструкция nВn детектора

1.4. Развитие барьерных детекторов на основе InAsSb

Соединения на основе сурьмы, выращенные методом МЛЭ, впервые были описаны в конце 1970-х годов [25, 26]. На сегодняшний день методы создания и определения характеристик InAsSb широко освещены в литературе А.Рогальским [27, 28] и Е.Стинбергенем [29]. По сравнению с арсенидами, рост антимоонидных структур характеризуется относительно низкими давлениями паров элемента V группы. Температура подложки во время роста GaSb обычно составляет от 550 до 600 С.

Причиной высокого интереса к антимоонидам является хорошее согласование по параметру решетки трех бинарных соединений (см.рис. 9а): GaSb (6,0959 Å), AlSb (6,1355 Å) и InAs (6,0584 Å). Что еще более важно, зона проводимости InAs находится ниже валентной зоны GaSb (см.рис. 9б). В качестве основы для эпитаксиальных слоев на основе Sb чаще всего используются подложки InSb, InAs и GaSb. Кроме того, широко разрабатывается тема применения GaAs подложек, а также Si подложек с

GaAs покрытием для решения проблемы отсутствия у антимонидов полупрозрачной подложки.

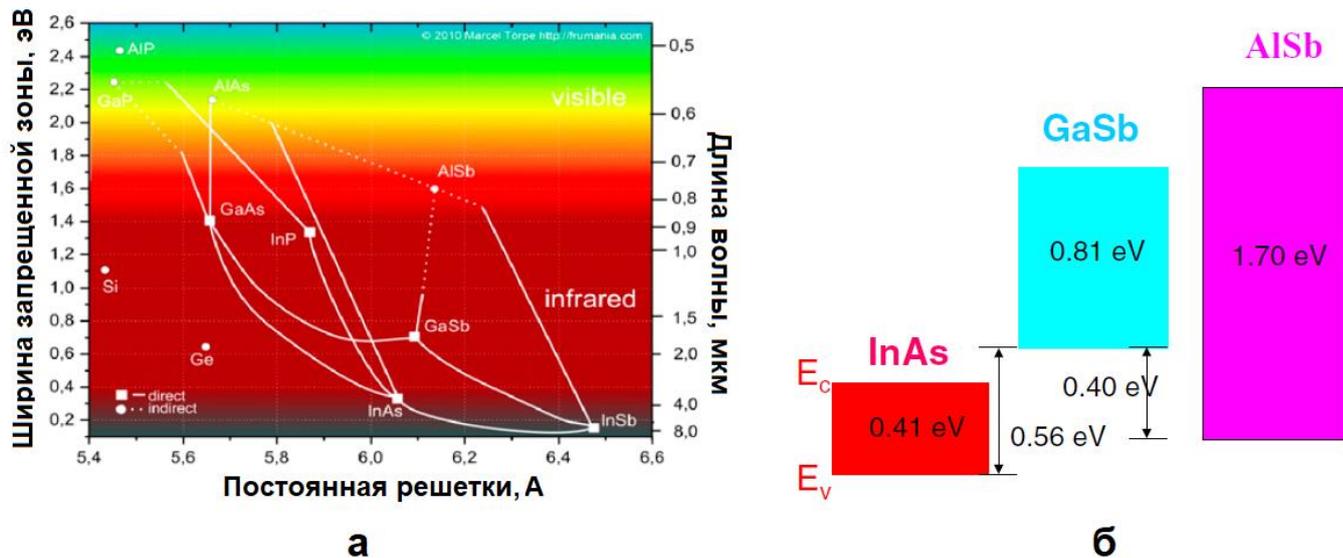


Рис. 9 – Основные характеристики группы материалов 6.1 А: а – соотношение материалов по ширине запрещенной зоны и постоянной решетки, б – положение запрещенных зон материалов группы 6.1 А на энергетической диаграмме относительно друг друга

Выбор МЛЭ в качестве ростового метода предоставляет широкий спектр возможностей для изготовления структур со сложной архитектурой: квантовых ям, сверхрешеток, толстых слоев с градиентом состава. Благодаря относительно низкой скорости роста (~1 монослой/сек) и близкому расположению заслонок к тиглям становится возможным контролировать состав растущего кристалла с разрешением до одного монослоя. Кроме того, низкое фоновое давление позволяет осуществлять контроль качества растущих слоев, а также соотношения потоков материалов III и V групп с помощью методов дифракции быстрых электронов на отражение (БДЭ) и метода измерения молекулярных потоков датчиком Байярда-Альперта. Главным достоинством подобных методов контроля является их применение непосредственно в процессе роста (in-situ).

Первые разработки барьерных детекторов на основе InAsSb предполагали рост слоев, согласованных по параметрам решетки с подложками GaSb. Край поглощения таких детекторов был ограничен ~ 4,1 мкм. На сегодняшний день для более эффективного использования средневолнового окна прозрачности атмосферы

предприняты различные пути расширения области спектральной чувствительности выше 5 мкм.

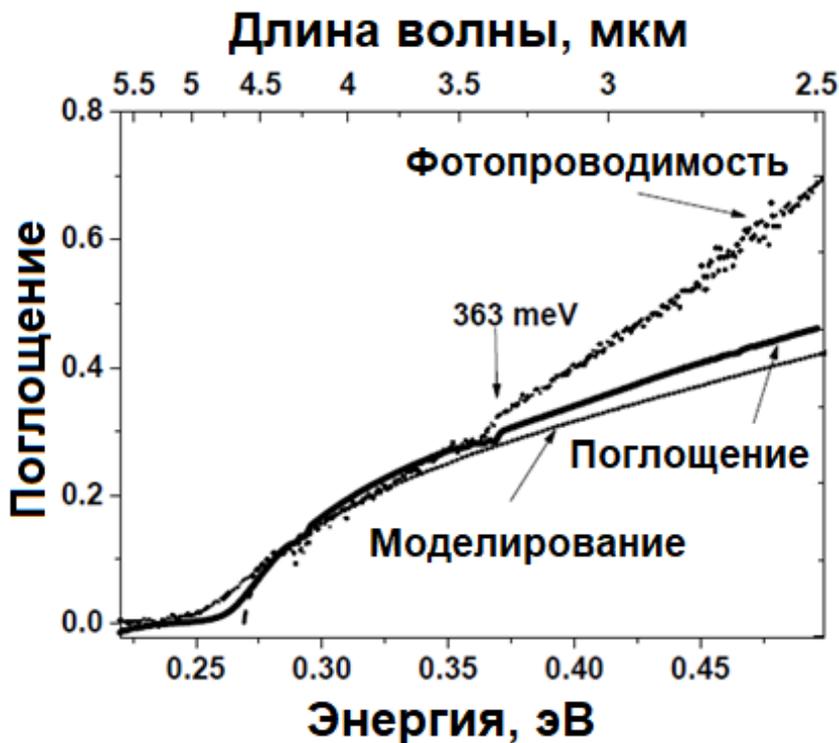


Рисунок 10 – Спектр пропускания слоя $InAs_{0,91}Sb_{0,09}$ толщиной 0,8 мкм [38]

Сложность при практическом проектировании заключается в зависимости ширины запрещенной зоны ПС от состава материала, напряжения в буферном слое, кристаллического качества, которое определяется методом и условиями выращивания. Для определения ширины запрещенной зоны $InAsSb$ применяется набор стандартных методов: абсорбция (см.рис.10), эллипсометрия, фотолюминесценция, электролюминесценция. Методики и результаты применения данных методов подробно описаны Е.Стинбергом [29].

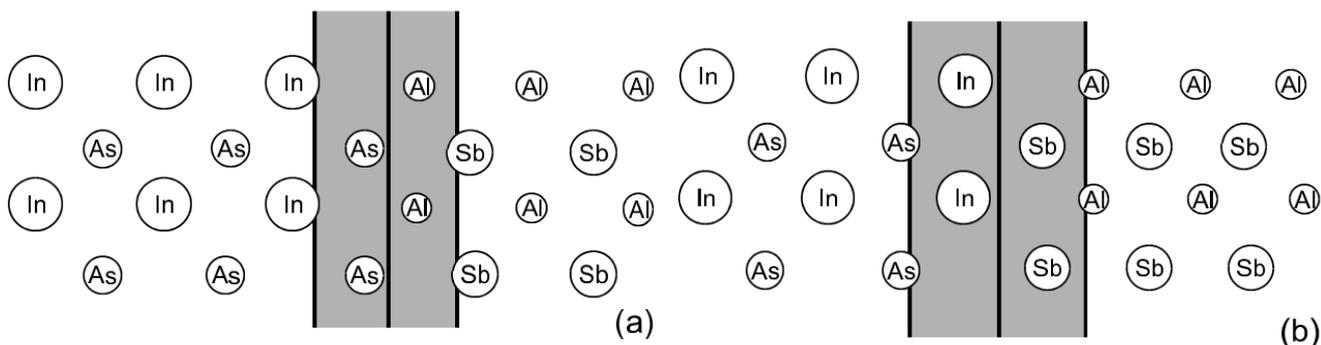
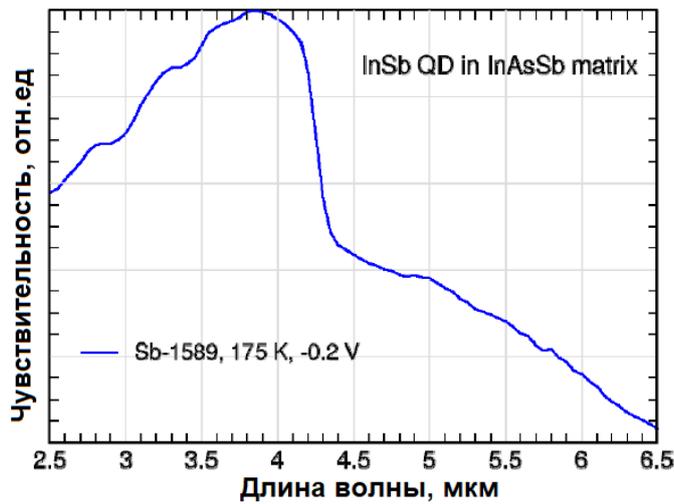


Рис. 11 – Возможные варианты реализации гетероперехода $InAs(Sb)/Al(As)Sb$ через монослои а) $AlAs$ и б) $InSb$

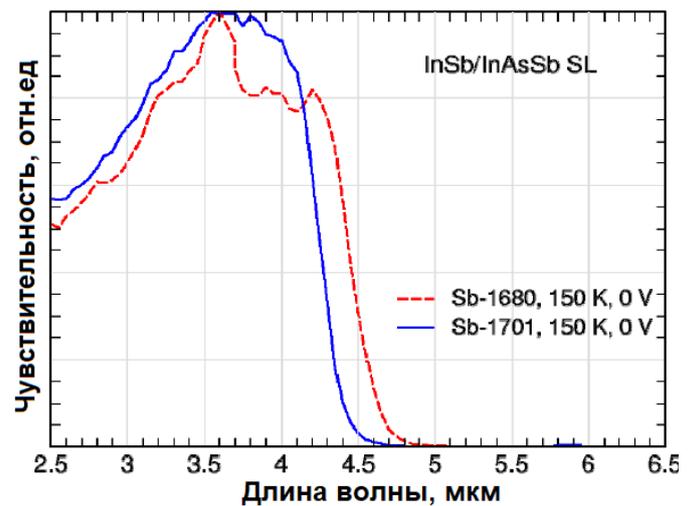
Необходимость одновременной смены концентрации компонент III и V группы в процессе роста стандартной XВn структуры, приводит к возникновению механических напряжений на слоевых интерфейсах из-за образования монослоя, сильно рассогласованного по параметру решётки состава. В результате переход от одного материала к другому осуществлялся через один атомарный слой либо Al(Ga)As либо InSb, что иллюстрирует рисунок 11. Оба эти соединения обладают настолько большим рассогласованием по параметру решётки с GaSb, что возникающее механическое напряжение приводит к разрыву эпитаксиальной плёнки толщиной порядка одного монокристаллического слоя.

Детекторы nВn на основе InAs/GaSb CP2P для среднего ИК диапазона были впервые продемонстрированы Родригесом в 2007 г. [30]. С 2008 года Д.Тинг и Jet Propulsion Laboratory проводили исследования на тему влияния материала ПС на характеристики итогового детектора. В частности, в качестве материала ПС были опробованы: объемный InAsSb с квантовыми точками InSb [31, 32]; CP2P из InSb/InAsSb с периодом монослоев 1/15 [33, 34]; CP2P InSb/InAs с периодом монослоев 1,5/13 [35]; CP2P InAs/InAsSb [36, 37].

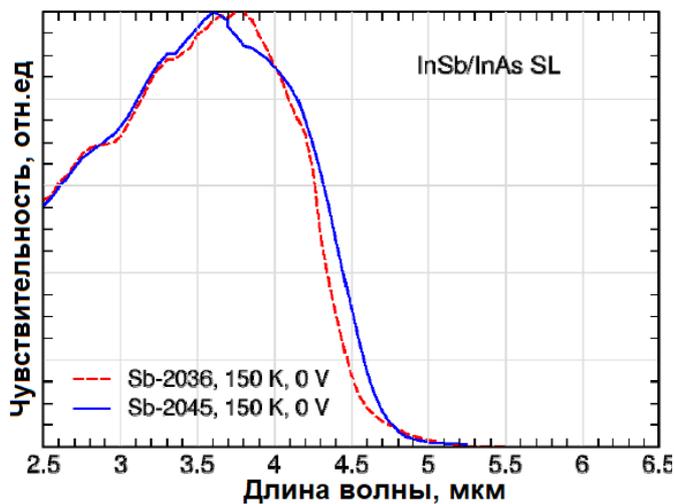
Во все структурах со CP2P с крайне важным условием было поддержание минимальной толщины InSb (< 2 монослоев), таким образом достигалось равновесие между противоположно направленными тензорами напряженности слоев InSb и InAs (или InAsSb). Ограничение толщины слоя InSb проявляется также в ограничении края поглощения структуры. Для CP2P InAs/InAsSb рассогласование решеток гораздо меньше, поэтому критическая толщина слоев InAsSb может быть больше. Снятие этих ограничений позволяет довольно легко достичь длины волны отсечки более 5 мкм. На рис. 12 показаны спектральные характеристики всех перечисленных типов CP2P. При этом нужно отметить, что в CP InAs/InAsSb слои $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ (при $x > 0,3$) подвергаются деформации сжатия и волновые функции дырок локализованы в этих слоях InAsSb. Напротив, в сверхрешетке InAsSb/InSb слои $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ (при $x < 0,09$) испытывают деформацию растяжения и волновые функции дырок локализованы в слоях InSb.



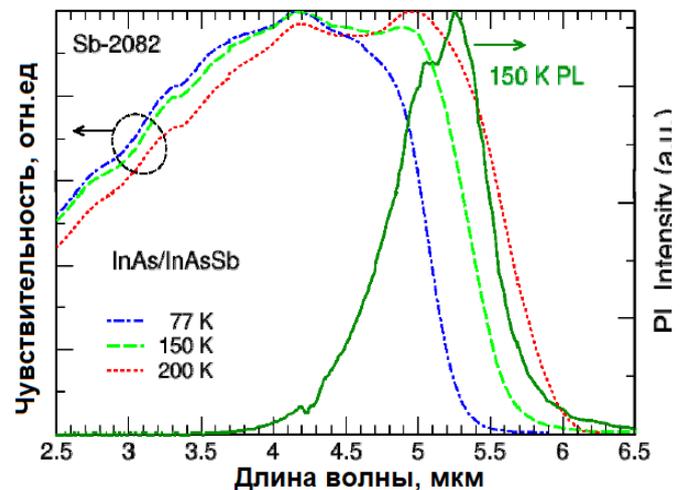
а



б



в



г

12 – Спектральные зависимости чувствительности барьерных детекторов с различными материалами ПС: а – квантовые точки InSb, б – CP2P InSb/InAsSb, в – CP2P InSb/InAs, г – CP2P InAs/InAsSb.

На сегодняшний день использование CP2P InAs/InAsSb в качестве ПС позволяет изготавливать барьерные детекторы для работы в среднем, дальнем и сверхдальнем (> 15 мкм) ИК диапазонах [38]. Кроме того, InAs/InAsSb меньше подвержены образованию дефектов, что упрощает процедуру роста относительно CP2P со слоями InSb и GaSb. Добавим, что в подобных структурах выше степень подавления межзонного туннелирования и Оже-рекомбинации, чем в объемном материале [39, 40].

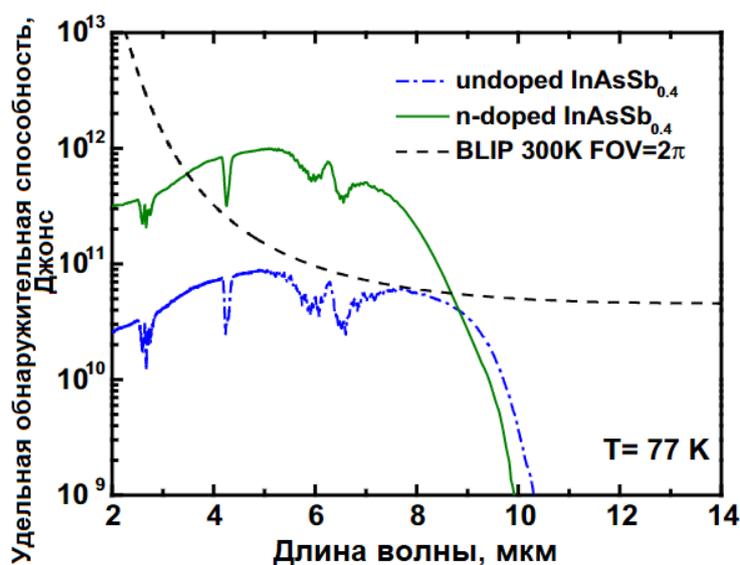


Рис.13 – спектральная зависимость удельной обнаружительной способности nVn детектора из [30]

Помимо применения CP2P свое распространение получило использование сложных буферных слоев. В 2016 году Н.Бэрил [41] представил nVn детектор с краем поглощения $\sim 5,3$ мкм. В качестве материала ПС использовался объемный $InAs_{0.81}Sb_{0.19}$, с измененной постоянной решетки с 6.09 \AA до 6.13 \AA . Такой сдвиг был достигнут путем выращивания метаморфного буферного слоя $AlSb$ в качестве переходного от $GaSb$ к $InAs_{0.81}Sb_{0.19}$.

В 2015 Лин [42] описал объемные барьерные детекторы $InAsSb$ с краем поглощения около 10 мкм при 77 К. Спектральная зависимость удельной обнаружительной способности представлена на рисунке 13. ГС состояла из следующей последовательности слоев: буфер $GaIn_xSb_{1-x}$ толщиной 3 мкм с линейно изменяющимся составом x от 0% до 44%, виртуальная подложка $GaIn_xSb_{1-x}$ толщиной 200 нм с $x = 34\%$ (ненапряженный слой), ПС $InAs_{0.6}Sb_{0.4}$ толщиной 1 мкм, БС $Al_{0.6}In_{0.4}As_{0.1}Sb_{0.9}$ толщиной 20 нм и КС $InAs_{0.6}Sb_{0.4}$ толщиной 20 нм.

Таким образом, современные барьерные детекторы на основе $InAsSb$ обладают рядом преимуществ по сравнению с другими типами ИК фотоприемников, в частности: снижение вклада токов ГР и поверхностных утечек, поглощение нормально падающего излучения. Однако максимальные смоделированные характеристики для XVn детекторов среднего ИК диапазона еще не достигнуты, а барьерные детекторы для дальнего ИК, несмотря на достигнутые параметры, из-за некачественной кристаллической структуры по своим характеристикам значительно уступают фотодиодам из $HgCdTe$. Наиболее перспективной архитектурой барьерных

детекторов на данный момент является применение CP2P InAs/InAsSb. Сравнение плотности темновых токов nVn с другими современными детекторами представлено на рисунке 14.

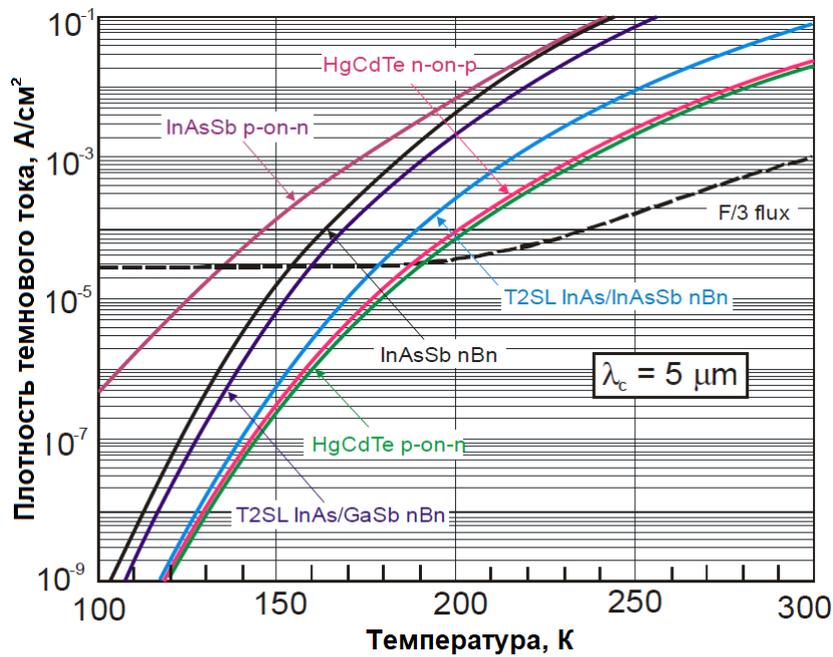


Рис. 14 – температурная зависимость плотность темнового тока охлаждаемых ИК детекторов с краем поглощения 5 мкм

Выводы и постановка задачи

Основными выводами из проделанного литературного обзора являются:

1. Применение барьерной архитектуры позволяет значительно улучшить рабочие параметры ИК детекторов относительно стандартных фотодиодов. Во многом это происходит за счет подавления токов ГР в ОПЗ и токов поверхностных утечек;
2. Важной проблемой в развитии барьерных детекторов является расширение спектрального диапазона fotocувствительности для эффективного использования окон атмосферы, соответствующих среднему и дальнему ИК диапазонам;
3. Оптимизация дизайна ХВп ГС для смещения края поглощения в длинноволновую область приводит к ухудшению кристаллического качества структуры вследствие возникновения сильных механических напряжений между активными слоями.

Глава 2. Образцы для исследования

2.1. Дизайн и изготовление барьерных гетероструктур

Глава 3. Методика исследования

Глава 4. Результаты измерений

Заключение

Список литературы

1. Rogalski A., Razeghi M. Narrow-gap semiconductor photodiodes //Photodetectors: Materials and Devices III. – International Society for Optics and Photonics, 1998. – Т. 3287. – С. 8.
2. Martyniuk P., Rogalski A. Performance comparison of barrier detectors and HgCdTe photodiodes //Optical Engineering. – 2014. – Т. 53. – №. 10. – С. 106105.
3. Maimon S., Wicks G. W. n B n detector, an infrared detector with reduced dark current and higher operating temperature //Applied Physics Letters. – 2006. – Т. 89. – №. 15. – С. 151109.
4. Klipstein P. Depletion-less photodiode with suppressed dark current and method for producing the same : пат. 7795640 США. – 2010.
5. Pedrazzani J. R., Maimon S., Wicks G. W. Use of nBn structures to suppress surface leakage currents in unpassivated InAs infrared photodetectors //Electronics Letters. – 2008. – Т. 44. – №. 25. – С. 1487.
6. Rogalski A., Martyniuk P., Kopytko M. Challenges of small-pixel infrared detectors: a review //Reports on Progress in Physics. – 2016. – Т. 79. – №. 4. – С. 046501.
7. Maniv S. Current leakage analysis in narrow gap semiconductor diodes //Infrared technology XIII. – International Society for Optics and Photonics, 1987. – Т. 819. – С. 105.
8. Kroemer H. A proposed class of hetero-junction injection lasers //Proceedings of the IEEE. – 1963. – Т. 51. – №. 12. – С. 1782-1783.
9. White M. Infra red detectors : пат. 4679063 США. – 1987.
10. Maimon S., Wicks G. W. InAsSb/GaAlSb/InAsSb nBn IR detector for the 3-5 μ m //Program and Abstracts, 11th International Conference on Narrow Gap Semiconductors. – 2003. – Т. 70.
11. Пономаренко В. П. Квантовая фотосенсорика //М.: АО" НПО Орион. – 2018.
12. Klipstein P. et al. MWIR InAsSb XB [sub] n [/sub] n detector (bariode) arrays operating at 150K //Infrared Technology and Applications XXXVII. – International Society for Optics and Photonics, 2011. – Т. 8012. – С. 80122R.

13. Savich G. R. et al. Benefits and limitations of unipolar barriers in infrared photodetectors // *Infrared Physics & Technology*. – 2013. – T. 59. – C. 152-155.
14. Tennant W. E. "Rule 07" revisited: Still a good heuristic predictor of p/n HgCdTe photodiode performance? // *Journal of Electronic Materials*. – 2010. – T. 39. – №. 7. – C. 1030-1035.
15. Klipstein P. "XBn" barrier photodetectors for high sensitivity and high operating temperature infrared sensors // *Infrared Technology and Applications XXXIV*. – International Society for Optics and Photonics, 2008. – T. 6940. – C. 69402U.
16. Klin O. et al. Progress with antimonide-based detectors at SCD // *Infrared Technology and Applications XXXV*. – International Society for Optics and Photonics, 2009. – T. 7298. – C. 72980G.
17. Ting D. Z. et al. Antimonide-based barrier infrared detectors // *Infrared Technology and Applications XXXVI*. – International Society for Optics and Photonics, 2010. – T. 7660. – C. 76601R.
18. Klipstein P. C. XBnn and XBpp infrared detectors // *Journal of Crystal Growth*. – 2015. – T. 425. – C. 351-356.
19. Klipstein P. et al. XBn barrier detectors for high operating temperatures // *Quantum Sensing and Nanophotonic Devices VII*. – International Society for Optics and Photonics, 2010. – T. 7608. – C. 76081V.
20. Klipstein P. et al. XBn barrier photodetectors based on InAsSb with high operating temperatures // *Optical Engineering*. – 2011. – T. 50. – №. 6. – C. 061002.
21. Klipstein P. et al. High operating temperature XBn-InAsSb barrier detectors // *Quantum Sensing and Nanophotonic Devices IX*. – International Society for Optics and Photonics, 2012. – T. 8268. – C. 82680U.
22. Martyniuk P., Rogalski A. Modeling of InAsSb/AlAsSb nBn HOT detector's performance limit // *Infrared Technology and Applications XXXIX*. – International Society for Optics and Photonics, 2013. – T. 8704. – C. 87041X.
23. Martyniuk P., Gawron W., Rogalski A. Theoretical modeling of HOT HgCdTe barrier detectors for the mid-wave infrared range // *Journal of electronic materials*. – 2013. – T. 42. – №. 11. – C. 3309-3319.

24. Martyniuk P., Rogalski A. Performance comparison of barrier detectors and HgCdTe photodiodes //Optical Engineering. – 2014. – T. 53. – №. 10. – C. 106105.
25. Chang C. A. et al. Molecular-beam epitaxy (MBE) of $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ and $\text{GaSb}_{1-y}\text{As}_y$ //Applied Physics Letters. – 1977. – T. 31. – №. 11. – C. 759-761.
26. Ludeke R. Electronic properties of (100) surfaces of GaSb and InAs and their alloys with GaAs //IBM Journal of Research and Development. – 1978. – T. 22. – №. 3. – C. 304-314.
27. Rogalski A. $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ infrared detectors //Progress in Quantum Electronics. – 1989. – T. 13. – №. 3. – C. 191-231.
28. Rogalski A. New ternary alloy systems for infrared detectors //Liquid and Solid State Crystals: Physics, Technology and Applications. – International Society for Optics and Photonics, 1993. – T. 1845. – C. 52-60.
29. Steenbergen E. H. InAsSb-based photodetectors //Mid-Infrared Optoelectronics. – Woodhead Publishing, 2020. – C. 415-453.
30. Rodriguez J. B. et al. n B n structure based on InAs/GaSb type-II strained layer superlattices //Applied Physics Letters. – 2007. – T. 91. – №. 4. – C. 043514.
31. Hill C. J. et al. Mid-infrared quantum dot barrier photodetectors with extended cutoff wavelengths //Electronics letters. – 2010. – T. 46. – №. 18. – C. 1286-1288.
32. Ting D. Z. Y. et al. Superlattice and quantum dot unipolar barrier infrared detectors //Journal of electronic materials. – 2013. – T. 42. – №. 11. – C. 3071-3079.
33. Hill C. J., Ting D. Z., Gunapala S. D. Digital alloy absorber for photodetectors : пат. 9466741 CIIIA. – 2016.
34. Soibel A. et al. Mid-wavelength infrared InAsSb/InSb nBn detector with extended cut-off wavelength //Applied Physics Letters. – 2016. – T. 109. – №. 10. – C. 103505.
35. Ting D. Z. et al. Development of InAs/InAsSb type II strained-layer superlattice unipolar barrier infrared detectors //Journal of Electronic Materials. – 2019. – T. 48. – №. 10. – C. 6145-6151.
36. Ting D. Z. et al. Mid-wavelength high operating temperature barrier infrared detector and focal plane array //Applied Physics Letters. – 2018. – T. 113. – №. 2. – C. 021101.

37. Ting D. Z. et al. InAs/InAsSb type-II superlattice mid-wavelength infrared focal plane array with significantly higher operating temperature than InSb //IEEE Photonics Journal. – 2018. – T. 10. – №. 6. – C. 1-6.
38. Ting D. Z. et al. Antimonide e-SWIR, MWIR, and LWIR barrier infrared detector and focal plane array development //Infrared Technology and Applications XLIV. – International Society for Optics and Photonics, 2018. – T. 10624. – C. 1062410.
39. Smith D. L., McGill T. C., Schulman J. N. Advantages of the HgTe-CdTe superlattice as an infrared detector material //Applied Physics Letters. – 1983. – T. 43. – №. 2. – C. 180-182.
40. Grein C. H., Young P. M., Ehrenreich H. Minority carrier lifetimes in ideal InGaSb/InAs superlattices //Applied physics letters. – 1992. – T. 61. – №. 24. – C. 2905-2907.
41. Baril N. et al. Bulk InAs_xSb_{1-x} nBn photodetectors with greater than 5 μm cutoff on GaSb //Applied Physics Letters. – 2016. – T. 109. – №. 12. – C. 122104.
42. Lin Y. et al. Development of bulk InAsSb alloys and barrier heterostructures for long-wave infrared detectors //Journal of Electronic Materials. – 2015. – T. 44. – №. 10. – C. 3360-3366.
43. Rogalski A. et al. InAsSb-Based Infrared Photodetectors: Thirty Years Later On //Sensors. – 2020. – T. 20. – №. 24. – C. 7047.