

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ( НИ ТГУ)  
Радиофизический факультет (РФФ)  
Кафедра квантовой электроники и фотоники (КЭиФ)

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК

Руководитель ООП

д-р физ.-мат. наук, профессор

*Войцех* / А. В. Войцеховский

подпись

« 19 » 06 2020 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**ВЛИЯНИЕ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МДП-СТРУКТУР  
ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ МЫШЬЯКА В ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ ПЛЕНКИ МЛЭ  
HGSbTE И ПОСЛЕДУЮЩЕГО АКТИВАЦИОННОГО ОТЖИГА**

по основной образовательной программе подготовки магистра  
направление подготовки 12.04.03 – Фотоника и оптоинформатика

Дзядух Станислав Михайлович

Руководитель ВКР:

д-р физ.-мат. наук, профессор

*Войцех* / А. В. Войцеховский

подпись

« 18 » 06 2020 г.

Автор работы:

студент группы № 742

*Дзядух* / С. М. Дзядух

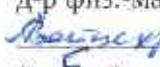
подпись

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (ТГУ)  
Радиофизический факультет (РФФ)  
Кафедра квантовой электроники и фотоники (КЭиФ)

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель ООП:

д-р физ.-мат. наук., профессор

 А. В. Войцеховский

« 5 » 09 2018 г.

ЗАДАНИЕ

по подготовке ВКР \_\_\_\_\_ магистра \_\_\_\_\_  
специалиста, бакалавра, магистра \_\_\_\_\_ нужно вписать (напечатать)  
студенту \_\_\_\_\_ Дядуху Станиславу Михайловичу \_\_\_\_\_ группы № 742  
фамилия, имя, отчество

1. Тема ВКР ВЛИЯНИЕ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МДП-СТРУКТУР ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ МЫШЬЯКА В ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ ПЛЕНКИ МЛЭ HgCdTe И ПОСЛЕДУЮЩЕГО АКТИВАЦИОННОГО ОТЖИГА

2. Срок сдачи студентом выполненной ВКР:

а) на кафедре \_\_\_\_\_ 16.06.20

б) в ГАК \_\_\_\_\_ 26.06.20

3. Исходные данные к работе: Определение влияния на электрофизические характеристики МДП-структур различных технологических процессов, таких как ионная имплантация мышьяка и двухстадийный активационный отжиг.

цели и задачи исследования

МДП-структуры на основе эпитаксиальных пленок МЛЭ HgCdTe после ионной имплантации мышьяка и двухстадийного активационного отжига. Измерение и анализ адмиттансных характеристик тестовых образцов.

объекты и методы исследования

4. Краткое содержание работы Аналитический обзор литературы (декабрь 2018); Освоение экспериментальной техники и выбор оптимальных методик исследования характеристик тестовых структур (май 2019); Проведение экспериментальных исследований электрофизических характеристик МДП МЛЭ HgCdTe (декабрь 2019). Обсуждение и анализ полученных данных. Составление и редактирование текста диссертации. (Май 2020)

дать перечень основных разделов, сроки их выполнения и ожидаемые результаты

5. Указать предприятие, организацию по заданию которого выполняется работа Национальный Исследовательский Томский государственный университет

6. Дата выдачи задания «05» сентября 2018 г.

Руководитель ВКР

Профессор, НИ ТГУ



А. В. Войцеховский

должность, место работы  
инициалы, фамилия

подпись

Задание принял к исполнению 05.09.18



дата, подпись студента

## АННОТАЦИЯ

В работе исследованы МДП-структуры, созданные на основе пленок твердого раствора теллурида кадмия и ртути с приповерхностными варизонными слоями, выращенными методом молекулярно-лучевой эпитаксии на кремниевых подложках. Пленки подвергались различным технологическим операциям: активационный отжиг примеси индия внедренной в процессе роста эпитаксиальной пленки; ионная имплантация мышьяка; ионная имплантация мышьяка с последующим активационным отжигом. Для контроля изменений происходящих после каждой операции исследовались тестовые структуры созданные на основе исходных пленок. Энергия ионов мышьяка было 200 кэВ с плотностью потока  $10^{14}$  см<sup>-2</sup>. Было показано, что электронная концентрация в приповерхностном слое полупроводника увеличивается после имплантации к значениям примерно  $10^{17}$  см<sup>-3</sup>, а после имплантации и отжига в приповерхностном полупроводниковом слое, появляется p+ слой с дырочной концентрацией более чем  $10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Профили легирования были построены в приповерхностных слоях КРТ после различных технологических операций. Было показано, что после имплантации в пленки, концентрация легирующей примеси увеличивается с расстоянием от границы раздела до глубины 0.1 мкм. Проведение термического отжига снижает величину плотности состояний в переходном слое между Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и МЛЭ HgCdTe с  $(4.7-6.0) \cdot 10^{11}$  до  $(1.2-1.8) \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup>.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>4</b>
<b>1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ.....</b>	<b>7</b>
1.1 Фундаментальные свойства $\text{HgCdTe}$ .....	7
1.2 Детекторы на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ .....	13
<b>2 ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ.....</b>	<b>17</b>
2.1 Образцы.....	17
2.2 Экспериментальная установка.....	18
<b>3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....</b>	<b>21</b>
3.1 Измерение ВФХ структур.....	21
3.2 Обработка экспериментальных результатов.....	28
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>34</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>36</b>

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время  $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$  является основным материалом для изготовления высокочувствительных инфракрасных детекторов действующих в различных спектральных диапазонах. Структуры на основе  $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$  перспективны для создания целого ряда приборов электроники и фотоники: лавинных фотодиодов, лазерных диодов, поверхностно-излучающих лазеров, фотодетекторов на основе поверхностно-барьерных структур, включая монолитные многоэлементные приборы [1]. Благодаря своим фундаментальным свойствам  $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$  может использоваться для создания многоцветных фотоприемников, а также детекторов, действующих как в ближней инфракрасной области (1-3 мкм) [2], так и в дальней инфракрасной области ( $> 20$  мкм) [3]. Основным препятствием на пути к использованию всех потенциальных преимуществ данного материала до недавнего времени оставались отсутствие решения серьезных технологических проблем получения объемного материала, таких как, отсутствие однородности, стабильности свойств, а также низкая воспроизводимость характеристик материала [4].

Метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ)  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  предоставляет возможности создания монолитных вариантов фотоприемных устройств, которые включают в себя систему обработки сигнала на основе  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ . Преимущества молекулярно-лучевой эпитаксии  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  заключаются в возможностях контролируемого изменения состава при выращивании сложных приборных структур [5].

Актуальность исследуемой проблемы определяется необходимостью модифицирования свойств эпитаксиальных пленок  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  при создании приборов оптоэлектроники с сохранением структурного совершенства приповерхностных слоев [6, 7].

Целью работы является исследование влияния на электрофизические характеристики МДП-структур (структур металл – диэлектрик – полупроводник) ионной имплантации мышьяка в эпитаксиальные пленки МЛЭ  $\text{HgCdTe}$  и последующего активационного отжига.

В рамках поставленной цели решались следующие задачи:

1. Обзор литературных источников по теме работы
2. Подбор и модернизация экспериментальных методов электрических исследования характеристик эпитаксиальных пленок МЛЭ  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ .
3. Проведение экспериментальных исследований электрофизических характеристик МДП-структур созданных на основе эпитаксиальных пленок  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  подвергнутых различным технологическим операциям участвующих в создании р<sup>+</sup>-п фотодиодов, включая контрольные исходные образцы.
4. Обработка полученных экспериментальных результатов исследования электрофизических характеристик МДП-структур. Обсуждение полученных результатов.

#### **Положение, выносимое на защиту**

Проведение операции термического отжига пленок МЛЭ КРТ снижает плотность состояний в пограничном слое между диэлектрическим покрытием  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и полупроводниковой пленкой МЛЭ  $\text{HgCdTe}$  более чем в 2.5 раза.

#### **Научная новизна**

1. Впервые проведены систематические исследования влияния различных технологических процессов на электрофизические свойства МДП-структур на основе эпитаксиальных пленок  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x=0.222-0.225$ ) с варизонными слоями, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках из кремния, в широком диапазоне напряжений смещения и частот переменного тестового сигнала при криогенных температурах;
2. Впервые определены основные параметры границы раздела эпитаксиальных пленок  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x=0.222-0.225$ ) с приповерхностными варизонными слоями с повышенным содержанием  $\text{CdTe}$  после проведения каждого технологического этапа из комплекса технологических операций по созданию р<sup>+</sup>-п фотодиодов.

Достоверность полученных результатов подтверждается: корректностью использованных методик проведения измерений и обработки результатов при исследованиях электрофизических свойств, и отсутствием противоречий с современными представлениями о физических процессах происходящих в тестовых образцах.

### **Практическое применение работы**

Полученные экспериментальные результаты могут применяться для подбора оптимальных режимов технологических операций создания фотоприемников инфракрасного диапазона на основе  $p^+-n$   $Hg_{1-x}Cd_xTe$  фотодиодов. Показано, что проведение операции термического отжига пленок МЛЭ КРТ необходимо для снижения плотности медленных состояний в пограничном слое между пассивирующим диэлектрическим покрытием и эпитаксиальной пленкой полупроводника.

## 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ

В этой главе проведен краткий обзор литературных данных, посвященным основным свойствам  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ , а также проведен анализ перспективных типов инфракрасных детекторов на основе  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ .

### 1.1 Фундаментальные свойства $\text{HgCdTe}$

$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  это полупроводниковый твердый раствор двух соединений полуметалла ( $\text{HgTe}$ ) и полупроводника ( $\text{CdTe}$ ). Ширина запрещенной зоны  $\text{HgCdTe}$  зависит от различных внешних и внутренних факторов, в том числе от содержания в данном твердом растворе  $\text{CdTe}$  и температуры, при которой находится полупроводниковый материал [8] (рисунок 1.1). Изменяя содержание  $\text{CdTe}$  в твердом растворе  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  можно варьировать ширину запрещенной зоны, что приводит к изменению граничной длины волны, а данный показатель очень важен для фотонных полупроводниковых детекторов и позволяет им работать в различных спектральных областях. Широкому использованию данного материала способствует наличие значительной величины коэффициента поглощения инфракрасного излучения, и при этом в нем электроны имеют высокую электрическую подвижность и большое время жизни. Для получения приближенного значения ширины запрещенной зоны в  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  можно использовать следующее выражение (1.1), в которое помимо содержания  $\text{CdTe}$  входит и значение температуры [9]:

$$E_g(x, T) = -0.302 + 1.93 \times x - 0.81 \times x^2 + 0.832 \times x^3 + 5.35 \times 10^{-4} \times (1 - 2 \times x) \times T \quad (1.1)$$

Также стоит отметить тот факт, что постоянная кристаллической решетки меняется не значительно при изменении содержания в твердом растворе доли  $\text{CdTe}$  от 0% до 100% [8] (рисунок 1.2). При том же изменении доли  $\text{CdTe}$  в твердом растворе ширины запрещенной зоны меняется существенно. Это позволяет создавать на основе  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  широкозонные варизонные слои и гетеропереходы при практически полном отсутствии в них механических напряжений.

Следующее выражение показывает зависимость электронного сродства  $\chi$  от содержания  $\text{CdTe}$  и температуры [10]:

$$\chi(x, T) = 4.43 - 0.813[E_g(x, T) - 0.083] \quad (1.2)$$

В численных расчетах для собственной концентрации носителей заряда в  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  можно использовать следующее выражение [11]:

$$n_i(x,T) = (5.585 - 3.82x + 1.753 \times 10^{-3}T - 1.364 \times 10^{-3}xT) \times 10^{14} E_g^{0.75} T^{1.5} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (1.3)$$

Эффективная масса электрона  $m_e^*$  в  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  определяется следующим выражением [12]:

$$m_e^* = \frac{1}{-0.6 + 6.333 \left( \frac{2}{E_g} + \frac{1}{E_g + 1} \right)} \quad (1.4)$$

В расчетах эффективную массу тяжелых дырок  $m_h^*$  для  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  можно положить равной  $0.55 \cdot m_0$ , что не противоречит литературным данным о диапазоне экспериментально измеренных значений  $(0.3-0.7) \cdot m_0$  [13].

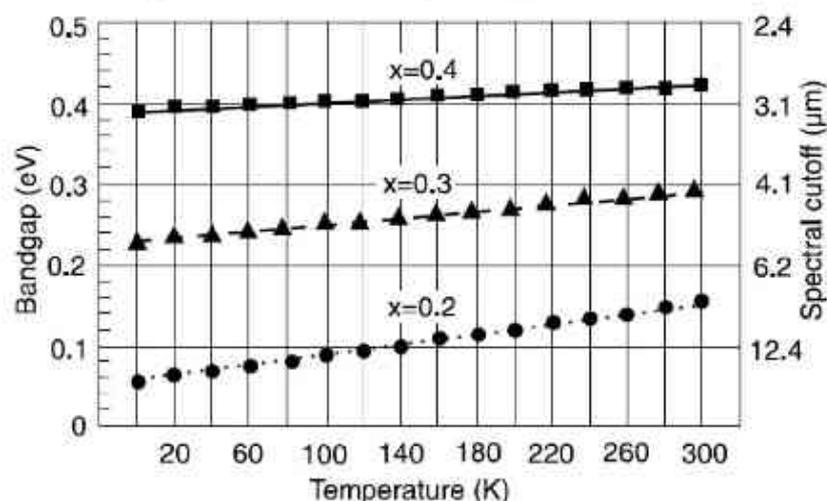


Рисунок 1.1 – Зависимость ширины запрещенной зоны  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  и граничной длины волны от температуры для различных молярных составов  $x$  [8].

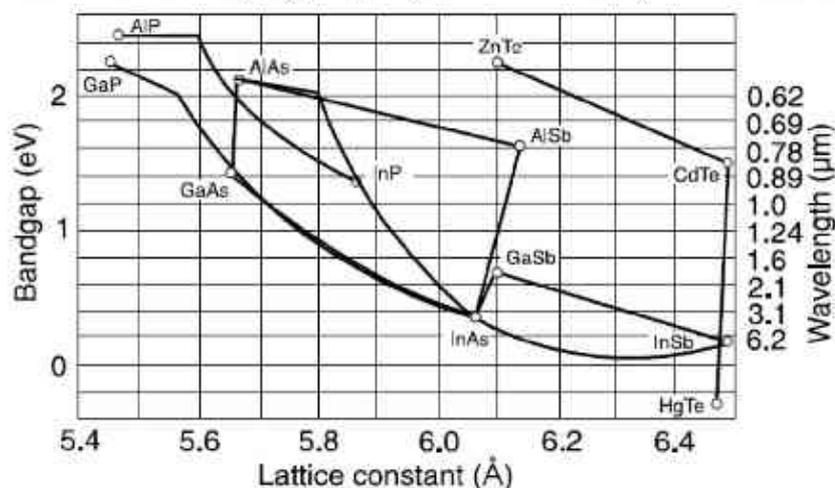


Рисунок 1.2 – Ширина запрещенной зоны, граничная длина волны и постоянная решетки для  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  и различных соединений группы  $\text{A}^3\text{B}^5$  [8].

Значение эффективной массы легких дырок можно брать близкой к эффективной массе электронов [14].

Из-за малой эффективной массы подвижность электронов в  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  высока, величина подвижности тяжелых дырок при расчете принимается величиной меньшей на два порядка относительно подвижности электронов. При расчете характеристик при температурах больше 50К, значение величины подвижности можно находить по следующей формуле [15]:

$$\mu_e = \frac{9 \times 10^8 \left( \frac{0.2}{x} \right)^{2.5}}{T^2 \left( \frac{0.2}{x} \right)^{10}} \quad (1.5)$$

Данная формула применима при малых величинах напряженности электрических полей в  $\text{HgCdTe}$ , а зависимость от концентрации легирующей примеси здесь не учитывается.

На рисунке 1.3 приводятся зависимости подвижности электронов [17]. Одним из наиболее важных параметров полупроводника является время жизни носителей заряда, которое в качественном материале *n*-типа ограничено межзонной Оже-рекомбинацией для содержания  $\text{CdTe}$   $x=0,20-0,30$  [17]. С ростом содержания  $\text{CdTe}$  увеличивается вклад излучательной рекомбинации. Температурные зависимости времени жизни представлены на рисунках 1.4, 1.5. В материале *p*-типа наибольшее значение приобретает рекомбинация через локальные центры с энергией 10-20 и 60-80 мэВ относительно потолка валентной зоны [18].

Если говорить об оптических свойствах пленок  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ , то в литературе нет однозначной позиции относительно значений коэффициентов поглощения [16]. Объяснить это можно тем, что в процессе роста у различных научных коллективов получается материал  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  с различной концентрацией дефектов, примесей и других немаловажных характеристик.

Для  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ , как для прямозонного полупроводника присутствие резкого края оптического поглощения. На рисунке 1.6 приведены коэффициенты поглощения для  $\text{HgCdTe}$  при  $T=77\text{K}$ . Поскольку  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  обладает большим коэффициентом поглощения в ИК области, то толщины рабочих слоев детекторов можно делать относительно небольшими.

Зависимости высокочастотной и статической диэлектрических постоянных от содержания CdTe в твердом растворе  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  могут быть описаны выражениями (1.6) и (1.7) [2]:

$$\epsilon_{\infty}(x)=15.2-15.6x+8.2x^2 \quad (1.6)$$

$$\epsilon_s(x)=20.5-15.5x+5.7x^2 \quad (1.7)$$

В экспериментах не обнаружено сильной зависимости диэлектрической постоянной от температуры [16].

В таблицах 1.1 и 1.2 приводятся данные об основных свойствах материала  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  для  $x=0.2$ ,  $x=0.3$  и  $x=0.4$  при температурах 77 К и 300 К соответственно.

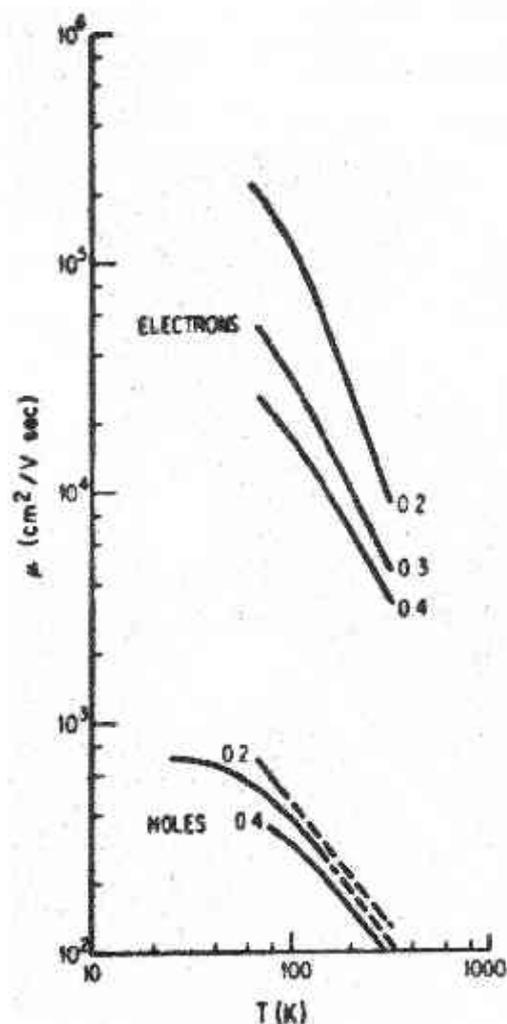


Рисунок 1.3 – Температурная зависимость подвижности электронов и дырок в  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  с  $x \sim 0.2, 0.3, 0.4$  [17]

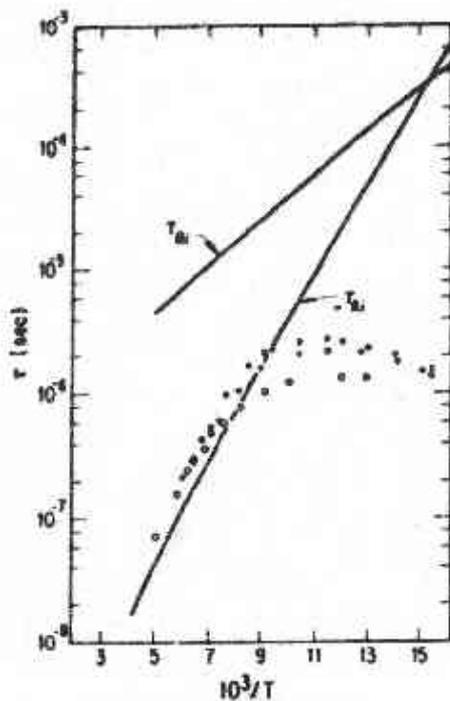


Рисунок 1.4 – Экспериментальные и теоретические зависимости времени жизни неосновных носителей заряда от  $10^3/T$  для n-типа  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  с  $x = 0.195$  [17]

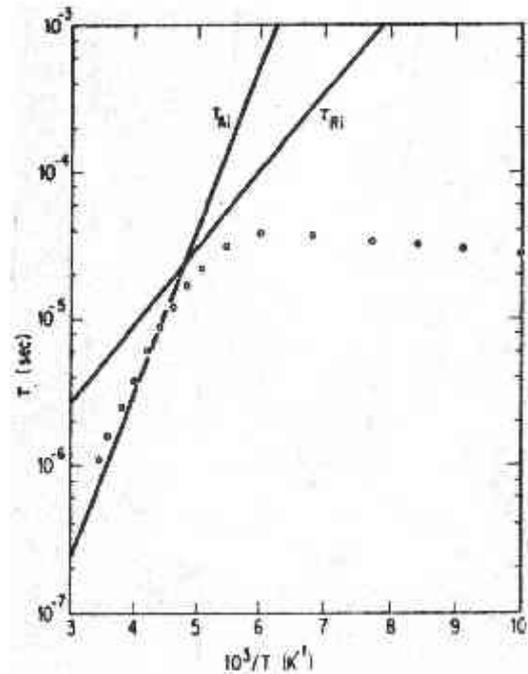


Рисунок 1.5 – Экспериментальные и теоретические зависимости времени жизни неосновных носителей заряда от  $10^3/T$  для n-типа  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  с  $x = 0.275$  [17]

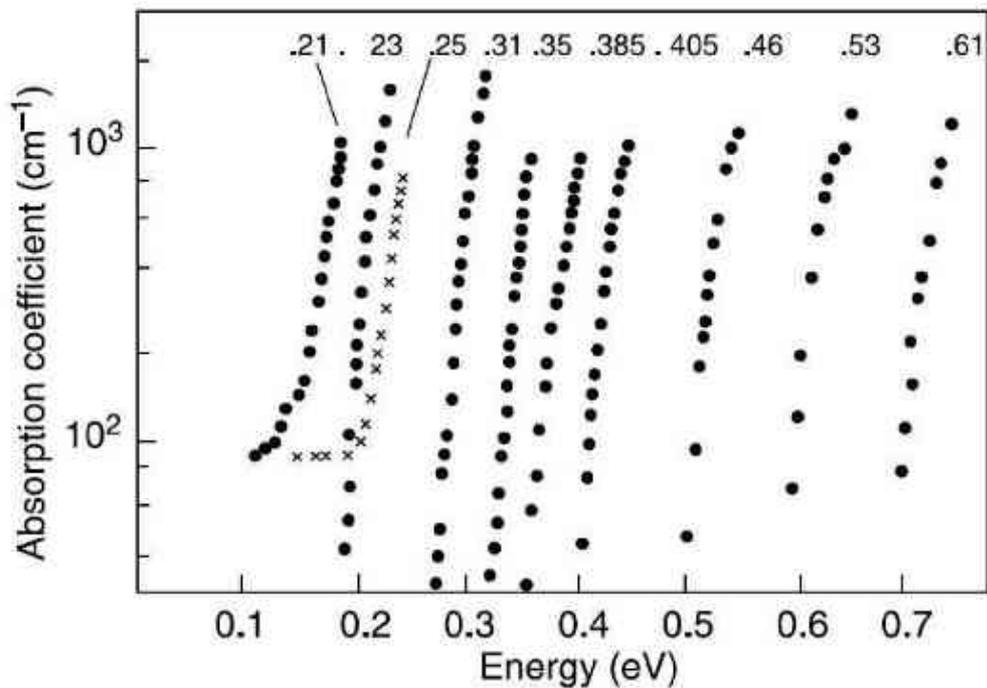


Рисунок 1.6 – Зависимость оптического коэффициента поглощения  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  от энергии для различных составов  $x$  [8].

Таблица 1.1 – Свойства материала  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  при  $T=77\text{K}$  для составов  $x=0.2$ ,  $x=0.3$  и  $x=0.4$  [19].

	$\text{Hg}_{0.8}\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$	$\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$	$\text{Hg}_{0.6}\text{Cd}_{0.4}\text{Te}$
Энергия запрещенной зоны $E_g(\text{эВ})$	0.083	0.243	0.4019
Электронное сродство $\chi(\text{эВ})$	4.23	4.10	3.97
Собственная концентрация носителей $n_i(\text{см}^{-3})$	$9.98 \times 10^{13}$	$1.20 \times 10^9$	$1.02 \times 10^4$
Эффективная масса электрона $m_e^*$ ( $m_0$ )	0.0063	0.0177	0.0282
Эффективная масса тяжелых дырок $m_h^*$ ( $m_0$ )	0.55	0.55	0.55
Подвижность электронов в слабых полях $\mu_e$ ( $\text{см}^2/\text{Вс}$ )	$2 \times 10^3$	$7 \times 10^2$	$2 \times 10^4$
Подвижность дырок в слабых полях $\mu_h$ ( $\text{см}^2/\text{Вс}$ )	$2 \times 10^3$	$7 \times 10^2$	$2 \times 10^3$
Статическая диэлектрическая постоянная $\epsilon_S$	17.99	16.90	15.93
Высокочастотная диэлектрическая постоянная $\epsilon_\infty$	12.31	11.03	9.87

Таблица 1.2 – Свойства материала  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  при  $T=300\text{K}$  для составов  $x=0.2$ ,  $x=0.3$  и  $x=0.4$  [19].

	$\text{Hg}_{0.8}\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$	$\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$	$\text{Hg}_{0.6}\text{Cd}_{0.4}\text{Te}$
Энергия запрещенной зоны $E_g(\text{эВ})$	0.155	0.291	0.426
Электронное сродство $\chi(\text{эВ})$	4.17	4.06	3.95
Собственная концентрация носителей $n_i(\text{см}^{-3})$	$3.40 \times 10^{16}$	$3.62 \times 10^{15}$	$3.24 \times 10^{14}$
Эффективная масса электрона $m_e^*$ ( $m_0$ )	0.0115	0.0209	0.0298
Эффективная масса тяжелых дырок $m_h^*$ ( $m_0$ )	0.55	0.55	0.55

Окончание таблицы 1.2

Подвижность электронов в слабых полях $\mu_n$ ( $\text{см}^2/\text{Вс}$ )	$\text{Hg}_{0.8}\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$ $2 \times 10^4$	$\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$ $8 \times 10^3$	$\text{Hg}_{0.6}\text{Cd}_{0.4}\text{Te}$ $3 \times 10^3$
Подвижность дырок в слабых полях $\mu_p$ ( $\text{см}^2/\text{Вс}$ )	$2 \times 10^2$	$8 \times 10^1$	$3 \times 10^1$
Статическая диэлектрическая постоянная $\epsilon_s$	17.99	16.90	15.93
Высокочастотная диэлектрическая постоянная $\epsilon_\infty$	12.31	11.03	9.87

### 1.2 Детекторы на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$

Уникальные свойства полупроводникового материала  $\text{HgCdTe}$ , описанные в предыдущем разделе, позволяют изготавливать различные типы детекторов излучения инфракрасного диапазона, действующие в ближней средней и дальней области. В работе [21] кратко рассматриваются различные элементарные приемники излучения и их общие характеристики, а также линейчатые, матричные приемники изображения, и устройства систем охлаждения приемников излучения. Далее кратко рассмотрим различные детекторы на основе  $\text{HgCdTe}$ .

Фоторезистор представляет собой слой  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ , толщина которого может находиться в пределах 3-20 мкм. К данному слою имеются металлические омические контакты. Оптимальная толщина активной области существенно зависит от рабочей температуры. В неохлаждаемых приборах толщины слоев имеют меньшее значение. Если снизить скорость поверхностной рекомбинации примерно до величины 500 см/с [22], то можно получить для носителей заряда условия, когда время жизни будет ограничено объемными процессами. Для достижения данной цели иногда создают слабое обогащение поверхности при помощи нанесения на поверхность собственного оксида. Часто сверху собственного оксида наносится антиотражающее покрытие. Процесс пассивации поверхности играет важную роль при изготовлении фоторезисторов, поскольку обеспечивает временную стабилизацию свойств изготовленных приборов.

В работе [23] описаны технологические операции для производства фоторезисторов на основе объемного материала. Технология производства фоторезисторов на основе эпитаксиальных слоев не требует утончения

полупроводникового слоя и подготовку тыловой стороны эпитаксиальной пленки. Для улучшения ситуации с теплоотводом, выращивать эпитаксиальные пленки лучше всего на альтернативных материалах с хорошей теплопроводностью, например это может быть кремний, сапфир или GaAs.

Фотодиоды, благодаря низкой мощности рассеяния, могут быть собраны в двумерные матрицы, число элементов в которых ограничено только возможностями технологий. В работе [24] сообщается о создании тестовых диодов на основе выращенных из металлоорганической паровой фазы длинноволновых HgCdTe гетероструктур на подложке из кремния (100).

При создании фотодиодов на основе HgCdTe, как и при создании фоторезисторов, пассивация играет важную роль. От качества наносимых пассивирующих покрытий зависит ток поверхностной утечки и температурная и временная стабильность приемника [25], поэтому многие получают патенты на свою технологию пассивации. Анодное окисление областей р-типа приводит к формированию инверсионных слоев и в данном случае не пригодно для пассивации. Обычно для пассивации фотодиодов применяют слои ZnS [26, 27], CdS [25, 28], фториды [29, 30], SiO<sub>x</sub> [31] и SiN<sub>x</sub> [32]. В последнее время особое внимание отдается пассивации с использованием CdTe, CdZnTe и гетеропереходной пассивации [33]. Приборы с широкозонными поверхностными слоями успешно пассивируются собственным оксидом [34]. На поверхность пассивирующих слоев CdTe и Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te с более широкой запрещенной зоной часто наносят SiO<sub>x</sub>, SiN<sub>x</sub> и ZnS.

Контактное сопротивление, контактная поверхностная рекомбинация, контактный 1/f шум, долговечность и термостабильность приборов это основные проблемы, связанные с контактами в фотодиодах. В течение многих лет, индий остается важнейшим металлом для n-Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te [35, 36], вместе с тем золото может использоваться как для материалов р-типа, так и для n-типа [37].

Большой интерес представляют МДП-структуры на основе HgCdTe в связи с возможностью использования их в монолитных и гибридных матрицах фокальной плоскости [17]. Около двух десятков лет технологи стремились развивать полностью монолитные ПЗС (приборы с зарядовой связью) на основе HgCdTe для приема ИК-излучения. Трудности, связанные с формированием стабильного р+-п-

перехода, привели к разработке n-канальных ПЗС. Применение материала p-типа позволило изготовить стабильный диод методом ионной имплантации, что обеспечило разработку МДП-транзисторов, с появлением которых, стало возможным создание усилителей из HgCdTe. Все это послужило созданию полностью монокристаллических ПЗС на основе HgCdTe [38]. Также можно отметить, что большое число исследований свойств поверхности и границ раздела проводится при помощи МДП-структур [7, 20].

Основным фактором, ограничивающим эффективность переноса заряда при низких частотах, является захват заряда на быстрые поверхностные состояния [17]. Поэтому важной задачей при создании ПЗС матриц является минимизация плотности быстрых состояний. Эффективность передачи на высоких частотах резко снижается из-за ограничения времени отведенного на перенос заряда между смежными ямами. Увеличение частоты работы прибора может быть достигнуто путем снижения длины затвора и максимального повышения напряжения на нем.

Классификация, общие принципы построения матричных ИК – фотоприемников и особенности их применения в различных сферах науки и техники рассмотрены в монографиях [39] и [40]. Работа [41] посвящена повышению качества изображения тепловизоров на основе матричных HgCdTe фотоприемных устройств ИК-диапазона, в ней также рассматриваются применение системы всевозможных цифровых фильтров.

Фотодиоды имеют некоторые преимущества над фотопроводящими детекторами, особенно в средне- и длинноволновой инфракрасной области (незначительный шум  $1/f$ , более плотное расположение элементов в матрице, лучшую линейность).

ИК – матрицы фокальной плоскости на основе HgCdTe изготавливаются в виде гибридных и монокристаллических матриц фокальной плоскости. Стыковка матриц на основе HgCdTe, обладающих высокими рабочими характеристиками, с хорошо разработанными кремниевыми интегральными микросхемами позволяет получать приборы хорошего качества для тепловизионных систем с тепловым и пространственным разрешением.

Технологию петледырочных соединений для HgCdTe разработали Baker с соавторами [42, 43], она состоит из двух этапов. На первом этапе создается пленка

фоторезиста с матрицей отверстий. Затем ионным травлением удаляется HgCdTe из отверстий до тех пор, пока не обнаруживаются алюминиевые контактные площадки. Отверстия заполняются проводником для формирования соединения между HgCdTe и подстилающей контактной площадкой мультиплексора. Переход формируется вокруг отверстия в момент ионного травления. Второй этап включает создание контакта к р- типу.

Метод индиевых столбов позволяет легко достигать высокого коэффициента оптического заполнения. Первоначально (на объемном HgCdTe) после гибридного соединения матриц, ширина пластины HgCdTe уменьшалась до 10 мкм для достижения оптимального поглощения излучения в области перехода и увеличения  $R_0A$  за счет уменьшения диффузионного объема ( $R_0$  – дифференциальное сопротивление при нулевом смещении,  $A$  – площадь чувствительного элемента). Детекторы, освещаемые с обратной стороны, изготавливаются из эпитаксиальных пленок HgCdTe на прозрачных подложках [44]. При этом уменьшение толщины материала после гибридизации не требуется и высокое качество эпитаксиальных пленок, по сравнению с объемными кристаллами, является дополнительным преимуществом этого подхода. Все это позволяет получить высокий процент выхода годных структур и превосходную надежность детекторов [45, 46].

Устройства ПЗС обычно разрабатываются только для диапазона длин волн 3-5 мкм. Они используются, как в режимах временной задержки и накопления, так и в режиме мультиплексирования. Один из важнейших параметров устройств ПЗС – эффективность переноса заряда, которая в сильной степени зависит от качества границы раздела полупроводник/диэлектрик.

Матрица зарядового изображения, это один из вариантов технологии приборов с зарядовой инжекцией. Данные устройства первоначально разработаны Texas Instruments для потоков излучение с высокой плотностью диапазонов 3-5 и 8-14 мкм для сканирующих систем [47, 48]. Приборы представляют собой двумерную матрицу МДП-конденсаторов, которые могут осуществлять адресацию строки, используя переключатель на чипе.

## 2 Образцы и методики измерения

### 2.1 Образцы

Для исследования влияния на электрофизические характеристики МДП-структур ионной имплантации мышьяка в эпитаксиальные пленки МЛЭ HgCdTe, а также последующего активационного отжига в ИФП СО РАН, г. Новосибирск было изготовлено две партии МДП-структур на основе ГЭС HgCdTe МЛЭ, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

Исследуемые МДП-структуры изготавливались на основе эпитаксиальных пленок HgCdTe ( $x \approx 0,225 \pm 0,002$ ) электронного типа проводимости, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках из Si(013). При выращивании гетероструктур с обеих сторон рабочего слоя создавались варизонные слои с повышенным компонентным составом CdTe (толщина приповерхностного варизонного слоя  $\approx 1.0$  мкм, содержание CdTe у поверхности достигало значения  $\approx 0.45$ ). Перед нанесением диэлектрических покрытий методом Холла определялись концентрации  $n$ , подвижности основных носителей и проводимости, а время жизни неосновных носителей определялось при помощи бесконтактной СВЧ-методики.

Полупроводниковые пленки для создания образцов выращивались на промышленно ориентированной установке "Обь-М". Установка представляет собой сверхвысоковакуумную многокамерную систему, состоящую из модуля загрузки и выгрузки образцов, и последовательно состыкованных модуля подготовки подложек, модуля выращивания буферных слоев, модуля хранения образцов, модуля выращивания КРТ и модуля загрузки и выгрузки образцов. Модули разделены шибберными затворами, что позволяет производить независимые технологические операции в каждом из них. Исходные параметры эпитаксиальных пленок представлены в таблице 2.1.

Для изготовления исследуемых образцов исходные пленки ГЭС HgCdTe МЛЭ были разделены на 4 части. На основе первой части пластины изготавливались контрольные образцы, которые не подвергались какому либо воздействию. Перед изготовлением образца на основе второй части пластин, пластины подвергались

операции активационного отжига внедренной в процессе выращивания примеси индия. Третья и четвертая части пластины подвергалась процедуре ионной имплантации мышьяка с энергией 200кэВ и концентрацией  $1e14 \text{ см}^{-2}$ . Разница между третьей и четвертой частями пластины была в том, что третья часть подвергалась процедуре активационного отжига. После выращивания и предварительной подготовки пленок, на их поверхность наносилось диэлектрическое покрытие  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Таблица 2.1 — Параметры исходных пленок

№	Толщина а, мкм	Состав, х	Концентрация n, $\text{см}^{-3}$	Подвижность $\mu$ , $\text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$	Проводимость, $\text{Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$	Время жизни, мкс
1	$7,3 \pm 0,4$	$0,225 \pm 0,00$ 2	$1,4^{e15}$	67000	14,3	0,10
2	$7,4 \pm 0,3$	$0,222 \pm 0,00$ 2	$1,2^{e15}$	73000	14,7	0,07

Из таблицы 2.1 видно, что исходные эпитаксиальные пленки структуры №1 и структуры №2 обладают довольно близкими значениями исходных параметров (состав CdTe в рабочем слое, концентрации и подвижности основных носителей заряда, проводимость и время жизни).

## 2.2 Экспериментальная установка

Для исследования различных электрических характеристик МДП-структур, созданных на основе пленок КРТ полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, использовался автоматизированный экспериментальный комплекс, собранный на базе персонального компьютера под управлением операционной системы семейства Windows (рисунок 2.1). Основные технические характеристики автоматизированного комплекса представлены в таблице 2.2. Из особенностью данной установки можно отметить возможность проведения измерений при

криогенных температурах без использования жидких хладагентов. При это точность криостатирования данной установки не хуже 0.2 К.



Рисунок 2.1 - Внешний вид автоматизированной экспериментальной установки. 1. контроллер температуры LakeShore 335, 2. LCR-измеритель Agilent E4980A, 3. Неоптический гелиевый криостат замкнутого цикла Janis CCS-400/204

Таблица 2.2 — Основные технические характеристики автоматизированного комплекса

№	Параметр	Значение/диапазон
1	Рабочий диапазон температур	От 8-300К
2	Точность криостатирования	Не хуже 0.2
3	Максимальная мощность нагревателя	50 Вт
4	Базовая погрешность измерения по $ Z $	0,05%
5	Частотный диапазон	От 20 Гц до 2 МГц. (4 разряда в любом диапазоне)
6	Диапазон прикладываемых напряжений	От -40 В до +40 В. С разрешением не хуже 0.33 мВ
7	Диапазон переменного тестового сигнала	От 0 В до 10 В. С шагом не хуже 1.0 мВ

Соединение компьютера с периферийными устройствами измерения и контроля осуществляется по шине GPIB. Особенностью данной шины является то, что каждое устройство на шине имеет уникальный адрес, и на одной шине могут располагаться до 15 различных измерительных устройств. Устройства измерения и контроля на данной шине могут находиться в двух состояниях. Либо в состоянии прослушивания, либо в состоянии передачи. Хочется отметить, что хоть стандарт для шины GPIB уже совсем не нов, он был разработан фирмой Hewlett-Packard еще в конце 1960-х годов, он до сих пор продолжает пользоваться популярностью в связи со своей высокой надежностью.

Для автоматизации процесса измерения и удобства последующего анализа полученных экспериментальных данных было использовано программное обеспечение собственной разработки. Данное ПО управляя связанным по шине GPIB измерительным приборам и другому вспомогательному оборудованию позволяет производить автоматизированное измерение полной комплексной проводимости структур в заданном диапазоне напряжений на необходимом наборе частот и температур. В программное обеспечение по обработке экспериментальных результатов заложена функция просмотра результатов экспериментальных измерений в различных режимах представления (как зависимости от напряжения, частоты или температуры). Также данное ПО включает в себя возможность проведения обработки результатов измерения по методу эквивалентных схем, что позволяет в полуавтоматическом режиме определять различные параметры, а при необходимости и перестраивать измеренные характеристики исследованных структур с учетом различных схем замещения (параллельная, последовательная) и исключить при данном перестроении некоторые элементы эквивалентной схемы. На пример, программа обработки на основании полученных экспериментальных данных может помочь построить температурные зависимости дифференциального сопротивления ОПЗ, или исключить из эквивалентной схемы последовательное сопротивление объема эпитаксиальной пленки полупроводника.

### 3 Экспериментальные исследования

#### 3.1 Измерение ВФХ структур

Измерения зависимостей емкости и проводимости МДП-структур от напряжения и частоты широко используются при исследованиях свойств диэлектрика, приповерхностного слоя полупроводника и границы раздела полупроводник-диэлектрик. Для определения, например, спектра поверхностных состояний в МДП-структуре на основе однородного полупроводника разработано значительное количество различных методов, основанных на измерении электрофизических характеристик структур в различных условиях. Для восьми МДП-структур изготовленных на основе пленок со структурами №1 и №2 были проведены измерения ВФХ при температуре 77 К на различных частотах.

На рисунке 2.3 приведены ВФХ МДП-структуры созданной на основе исходной пленки №1 измеренные при температуре 77 К при прямом и обратном направлении развертки напряжения смещения.

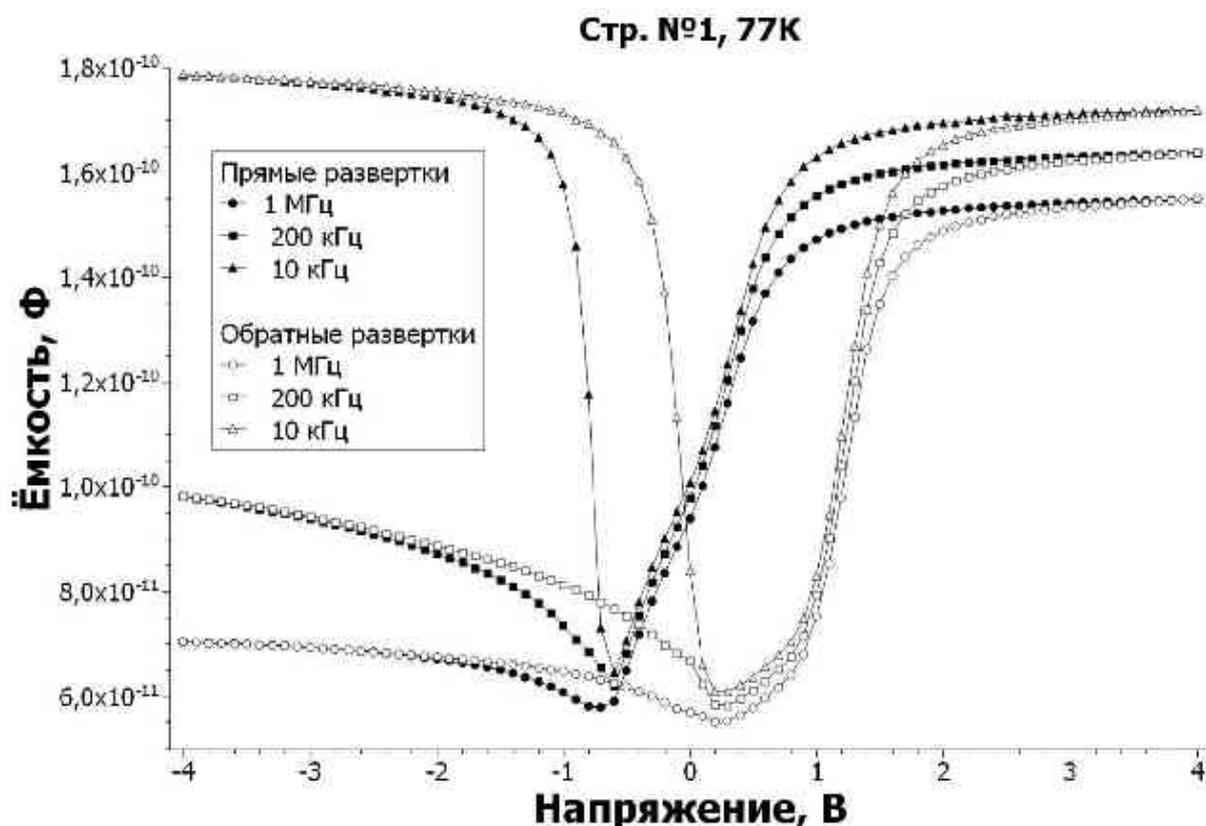


Рисунок 2.3 — ВФХ МДП-структуры созданной на основе исходной пленки №1 измеренные при температуре 77 К при прямом и обратном направлении развертки

напряжения смещения

Из рисунка 2.3 видно, что для данной структуры характерно наличие значительной величины гистерезиса инжекционного типа. Что может являться следствием наличия значительной плотности медленных поверхностных состояний. При температуре 77 К, вид ВФХ, относительно времени формирования инверсионного слоя, при увеличении частоты переменного тестового сигнала изменяется с чисто низкочастотного вида, на практически высокочастотный.

На рисунках 2.4 приведены ВФХ МДП-структуры созданной на основе исходной эпитаксиальной пленки после проведения активационного отжига измеренные при температуре 77 К при прямом и обратном направлении развертки напряжения смещения.

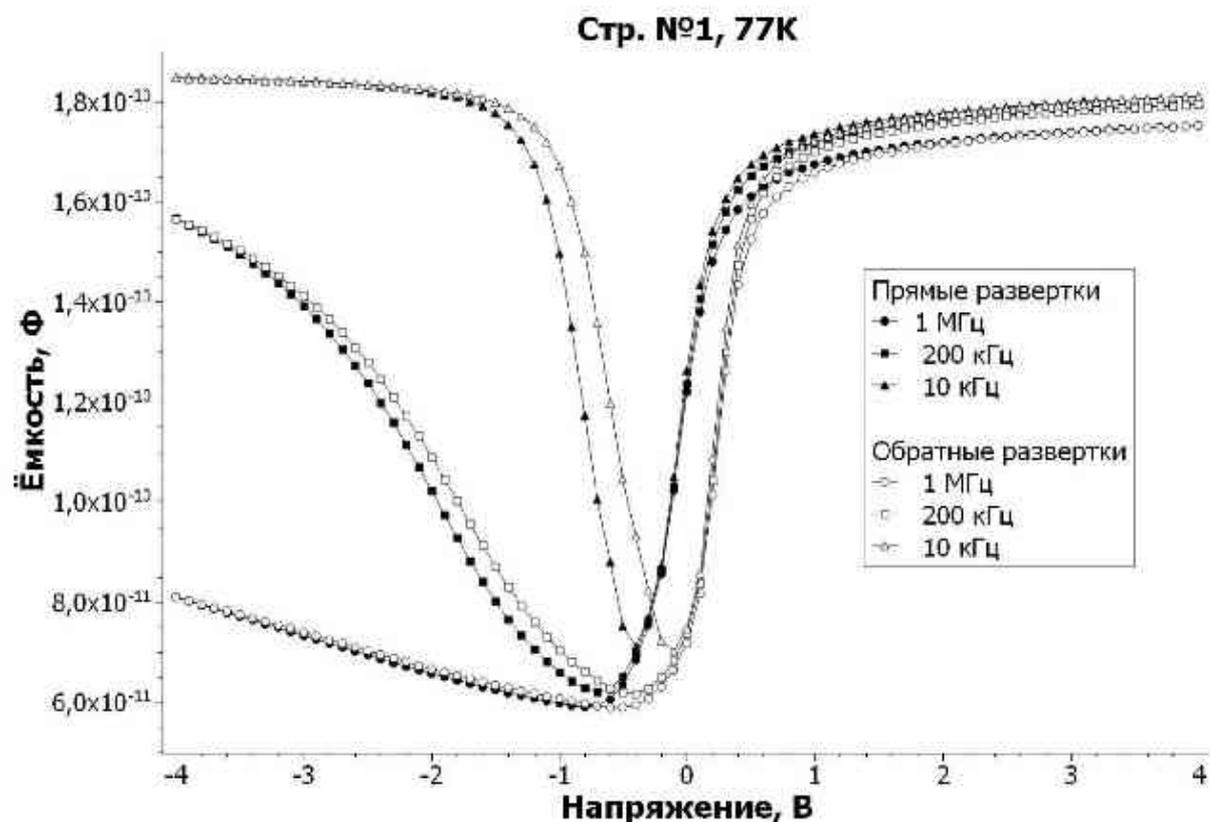


Рисунок 2.4 — ВФХ МДП-структуры созданной на основе исходной пленки №1 после проведения активационного отжига, измеренные при температуре 77 К при прямом и обратном направлении развертки напряжения смещения

Из рисунка 2.4 видно, что проведение процедуры активационного отжига значительно снизило значение плотности медленных поверхностных состояний, что привело к существенному уменьшению величины гистерезиса инжекционного

типа. Для данной структуры при температуре 77 К, вид ВФХ, относительно времени формирования инверсионного слоя, при увеличении частоты переменного тестового сигнала, аналогично предыдущему случаю, изменяется с чисто низкочастотного вида, на практически высокочастотный.

На рисунке 2.5 изображены ВФХ МДП-структур основанных на HgCdTe после ионной имплантации мышьяка. Из рисунка видно, что на ВФХ присутствует значительный гистерезис (т.е. имеется значительная плотность медленных поверхностных состояний), а сами ВФХ имеют высокочастотный вид во всем диапазоне частот (даже на относительно низкой частоте 10 кГц). Разница величин емкости в режиме обогащения для ВФХ МДП-структур после проведения разных технологических операций заключается в различных площадях индиевых полевых электродов сформированных на их поверхности при создании самих структур.

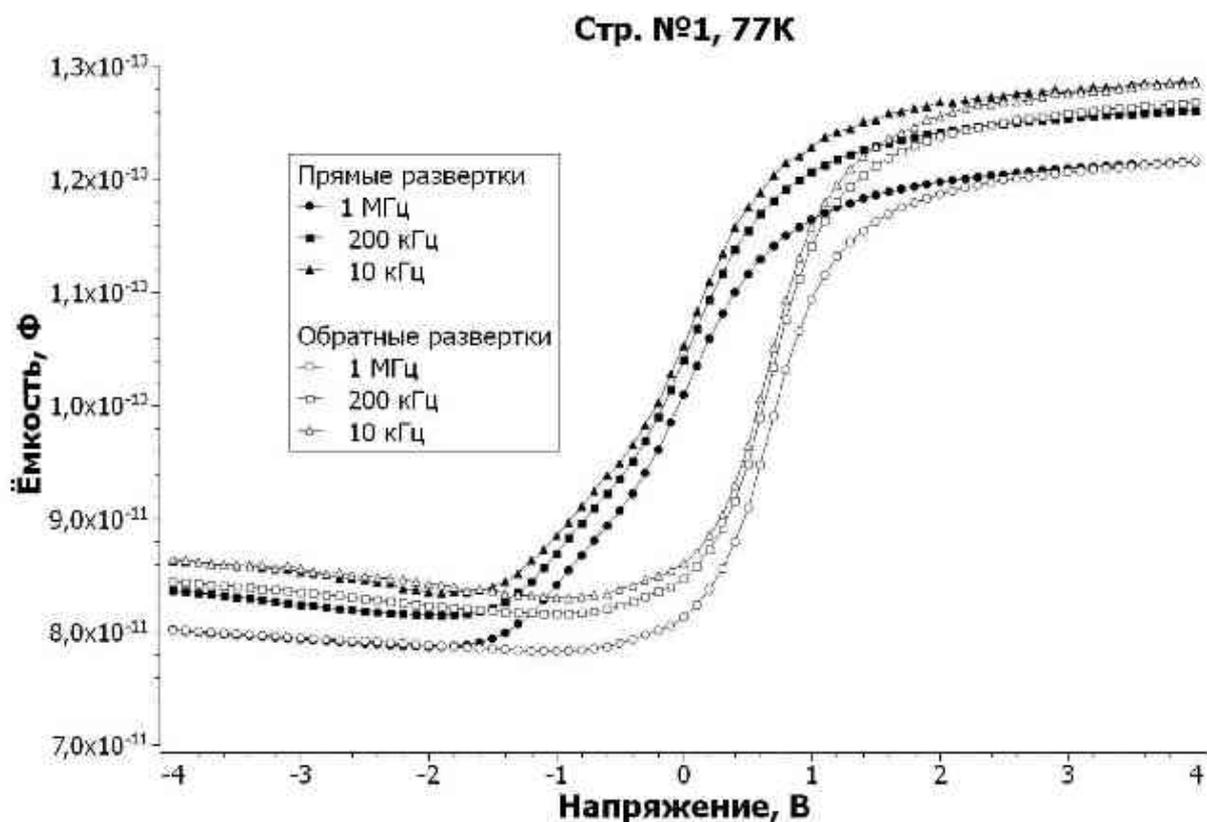


Рисунок 2.5 — ВФХ МДП-структуры созданной на основе исходной пленки №1 после проведения технологической операции ионной имплантации мышьяка измеренные при температуре 77 К при прямом и обратном направлении развертки напряжения смещения

Рисунок 2.6 показывает, что для C–V кривых МДП структуры на основе HgCdTe после имплантации и активационного отжига характерен небольшой

гистерезис. ВФХ имеют низкочастотный вид во всем используемом диапазоне частот (даже на частоте 1 МГц). Из рисунка видно, что представленная ВФХ имеет вид присущий для характеристик МДП-структур созданных на основе эпитаксиальных пленок полупроводника р-типа проводимости. Таким образом видно, что смена типа проводимости приповерхностного слоя МЛЭ HgCdTe происходит только после активационного отжига имплантированных ионов мышьяка в данную пленку.

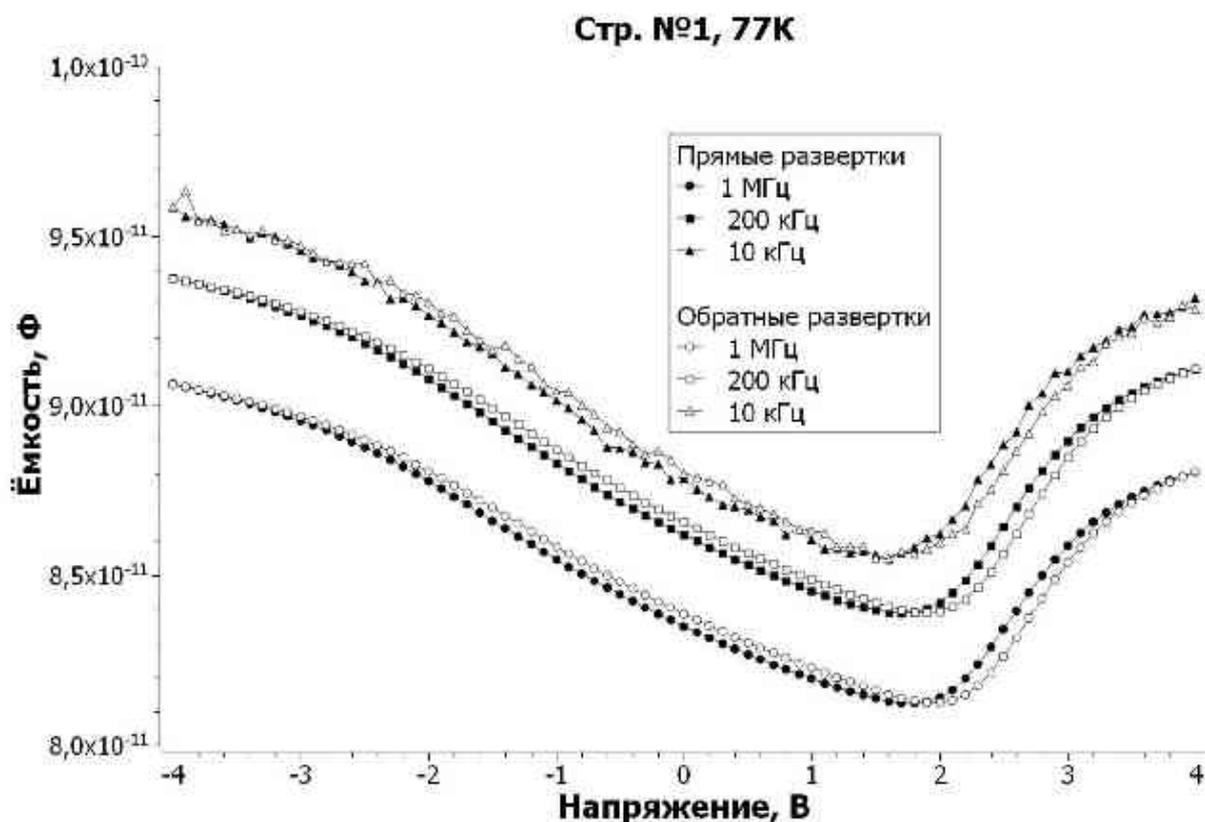


Рисунок 2.6 — ВФХ МДП-структуры созданной на основе исходной пленки №1 после проведения ионной имплантации мышьяка и последующего активационного отжига измеренные при температуре 77 К при прямом и обратном направлении развертки напряжения смещения

На рисунке 2.7 приведены ВФХ МДП-структуры созданной на основе исходной пленки №2 при температуре 77 К при прямом и обратном направлении развертки напряжения смещения. Из сравнения рисунков 2.3 и 2.7 можно сделать вывод, что МДП-структуры созданные на основе эпитаксиальных пленок структуры №1 и структуры №2 имеют в значительной степени схожие характеристики. Обе имеют значительный гистерезис прямого и обратного хода развертки по напряжению, который имеет инжекционный вид, что указывает на

наличие в них значительной плотности медленных поверхностных состояний локализованных в некоторой области вблизи границы раздела эпитаксиальная пленка HgCdTe / диэлектрическое покрытие Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Стр. №2, 77К

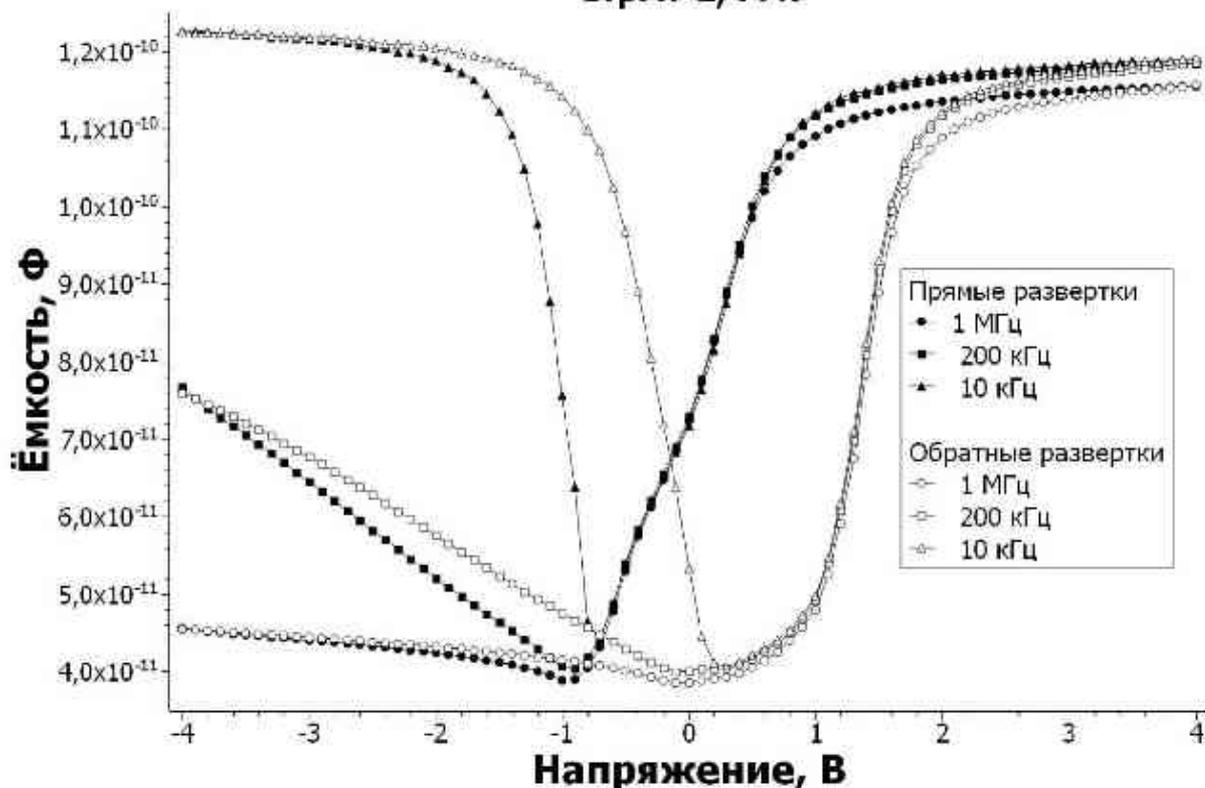


Рисунок 2.7 — ВФХ МДП-структуры созданной на основе исходной пленки №2 после проведения ионной имплантации мышьяка измеренные при температуре 77 К при прямом направлении развертки напряжения смещения

На рисунке 2.8 представлены ВФХ МДП-структуры созданной на основе исходной пленки №2 после проведения активационного отжига, измеренные при температуре 77 К при прямом и обратном направлении развертки напряжения смещения на частотах 10 кГц, 200 кГц и 1 МГц. Из рисунка 2.8 видно, что для образца изготовленного на основе эпитаксиальной пленки HgCdTe структуры №2, аналогично пленке структуры №1 проведение активационного отжига приводит к значительному снижению величины плотности медленных поверхностных состояний. Сравнивая рисунки 2.7 и 2.8 можно сделать вывод о том, что при температуре 77 К время формирования инверсионного слоя в области пространственного заряда для МДП-структур созданных на основе эпитаксиальных пленок HgCdTe после активационного отжига исходной эпитаксиальной пленки

незначительно уменьшается, поскольку вид ВФХ после отжига становится более низкочастотным.

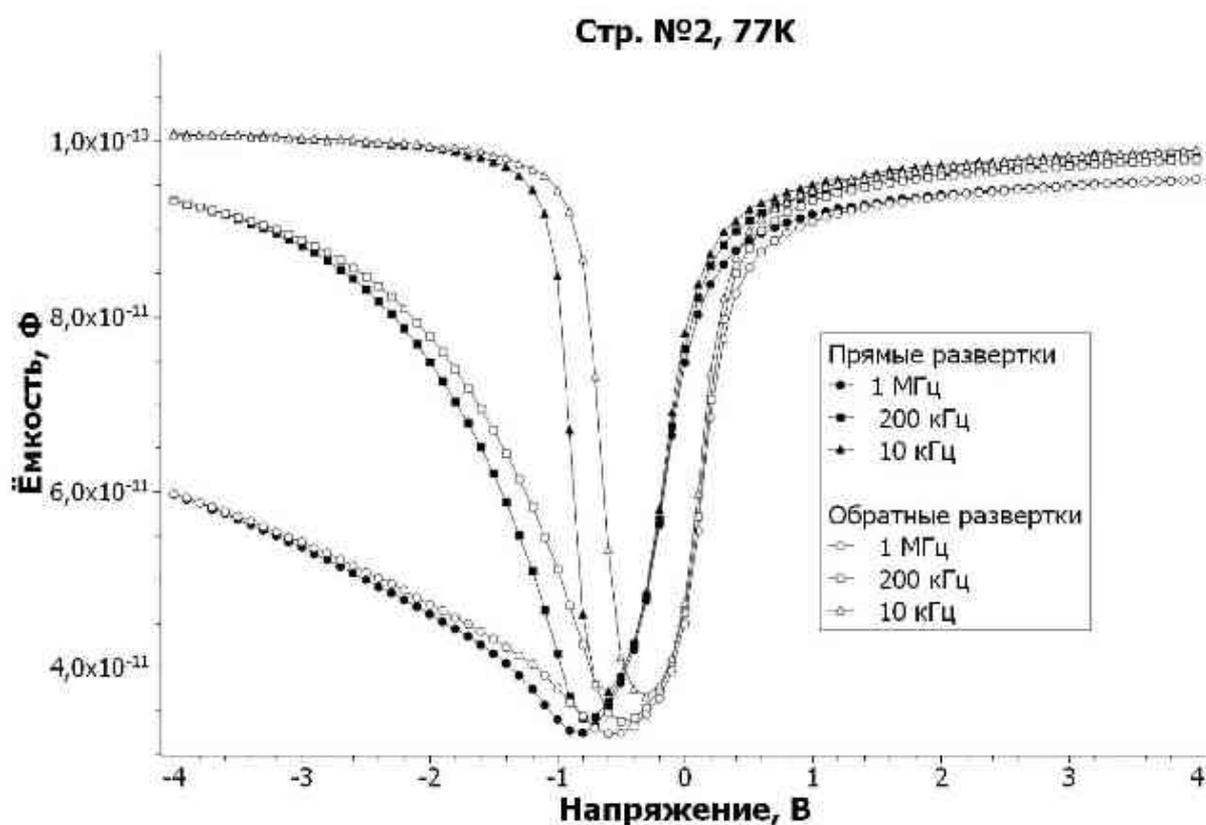


Рисунок 2.8 — ВФХ МДП-структуры созданной на основе исходной пленки №2 после проведения активационного отжига, измеренные при температуре 77 К при прямом и обратном направлении развертки напряжения смещения

На рисунке 2.9 приведены ВФХ МДП-структур созданных на основе исходной пленки МЛЭ HgCdTe структуры №2 после проведения ионной имплантации мышьяка измеренные при температуре 77 К при прямом и обратном направлении развертки напряжения смещения на различных частотах модуляции переменного тестового сигнала (диапазон 10 кГц — 1 МГц). Из рисунка видно, что на данный образец имеет значительную плотность медленных поверхностных состояний на границе раздела полупроводник / диэлектрическое покрытие. Время формирования инверсионного слоя значительно увеличилось о чем свидетельствует переход ВФХ к высокочастотному виду во всем диапазоне исследованных частот.

На рисунке 2.10 приведены ВФХ МДП-структуры созданной на основе исходной пленки №2 после проведения ионной имплантации мышьяка и последующего активационного отжига измеренные при температуре 77 К при прямом и обратном направлении развертки напряжения смещения.

Из рисунков 2.9 и 2.10 видно, что проведение процедуры активационного отжига, так же как и в первом случае (рисунки 2.5 и 2.6), значительно снизило плотность медленных поверхностных состояний, что привело к существенному уменьшению величины гистерезиса инжекционного типа. Также активационный отжиг привел к активации примеси мышьяка, внедренной методом ионной имплантации. Из данных ВФХ ясно видно, что произошла инверсия типа проводимости полупроводниковой пленки с n-типа на p-тип. Для данной структуры при температуре 77 К, вид ВФХ, относительно времени формирования инверсионного слоя, на всех исследованных частотах переменного тестового сигнала является низкочастотным.

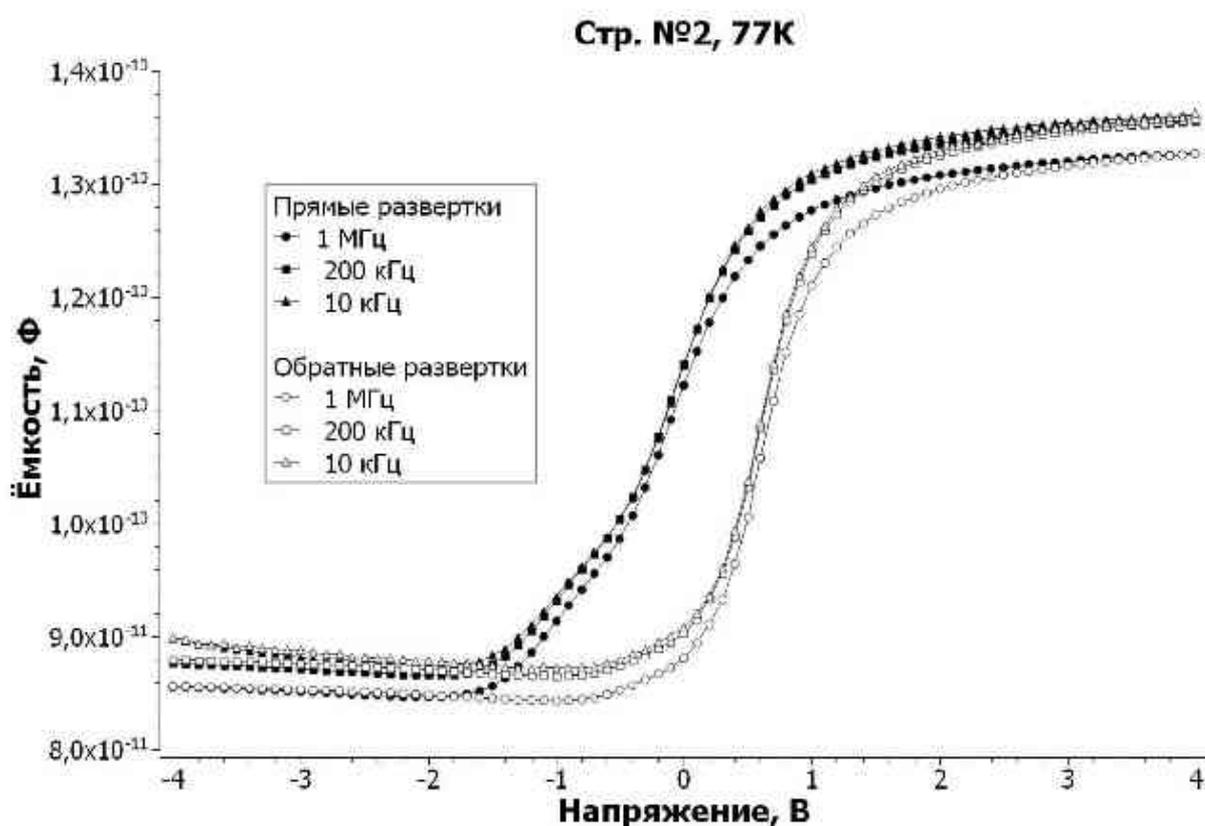


Рисунок 2.9 — ВФХ МДП-структуры созданной на основе исходной пленки №2 после проведения технологической операции ионной имплантации мышьяка измеренные при температуре 77 К при прямом и обратном направлении развертки

напряжения смещения

На основании представленных экспериментальных результатов измерений ВФХ МДП-структур созданных на основе эпитаксиальных пленок HgCdTe структуры №1 и структуры №2 проведенных на различных частотах при температуре 77 К можно сделать вывод, что свойства данных структур остаются близкими после всех проведенных технологических операций, на что указывает схожесть полученных характеристик данных структур.

Стр. №2, 77К

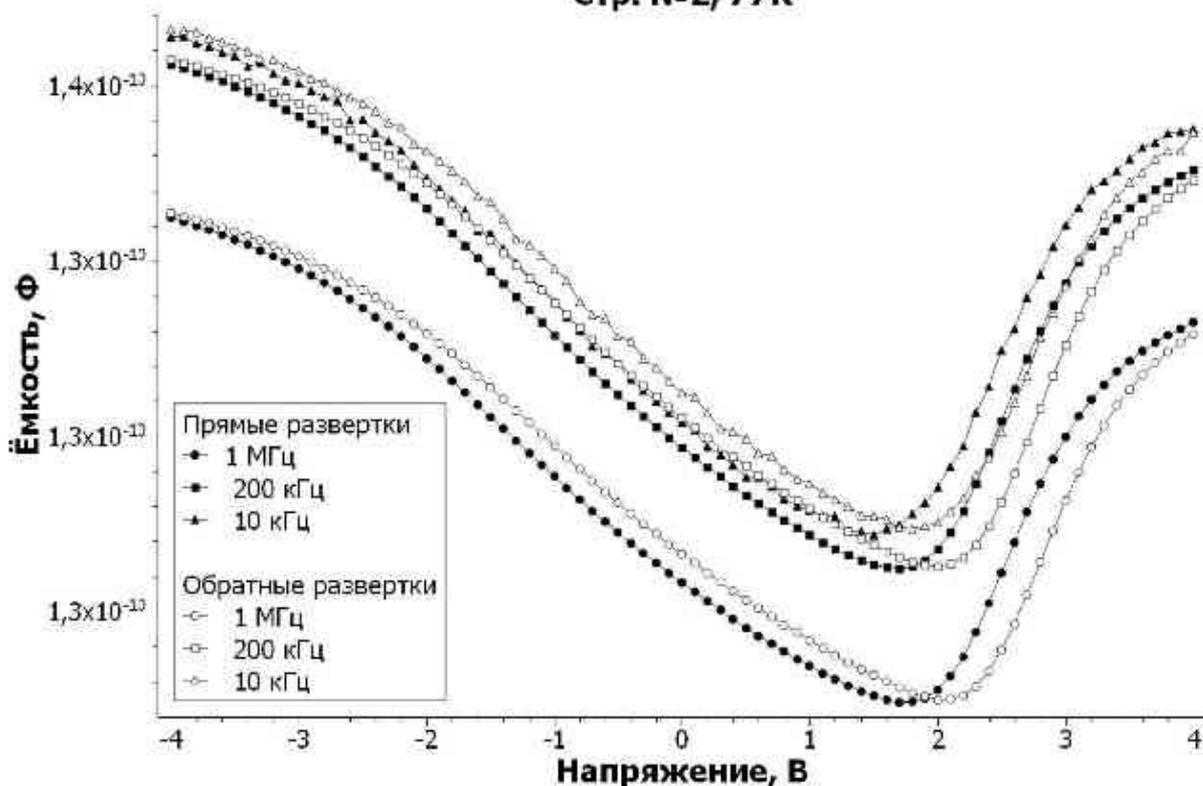


Рисунок 2.10 — ВФХ МДП-структуры созданной на основе исходной пленки №2 после проведения ионной имплантации мышьяка и последующего активационного отжига измеренные при температуре 77 К при прямом и обратном направлении развертки напряжения смещения

### 3.2 Обработка экспериментальных результатов

На рисунке 2.11 показаны зависимости концентрации легирующей примеси в приповерхностной области эпитаксиальной пленки, на границе с диэлектрическим покрытием от различных технологических операций проведенных над пленками структуры №1 и структуры №2, определенные на основании измерений ВФХ

МДП- структур. Концентрация основных носителей заряда в приповерхностном варизонном слое МЛЭ HgCdTe определялась по минимальному значению емкости на ВФХ. Из данного рисунка видно, что концентрации электронов для исходной пленки и пленки после проведения активационного отжига индия, внедренного в процессе роста эпитаксиальной пленки довольно близки и составляют  $(5-7) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$  для структур №1 и №2. После имплантации тип проводимости приповерхностного слоя полупроводника не изменился, но концентрация электронов увеличилась примерно до  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  для обоих типов пленок. После активационного отжига пленок с имплантированной примесью мышьяка тип проводимости поверхностного слоя HgCdTe МЛЭ изменился. Концентрация дырок в приповерхностном слое пленок №1 и №2 достигает величины около  $2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

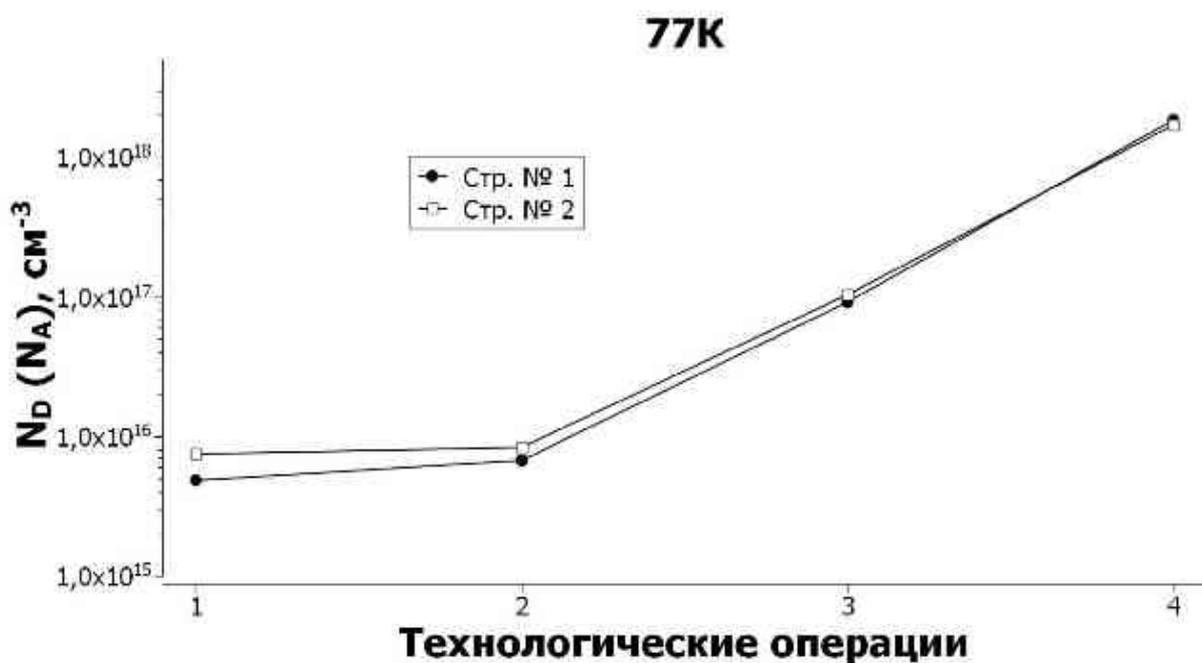


Рисунок 2.11 — Зависимости концентрации легирующей примеси в приповерхностной области эпитаксиальной пленки, на границе с диэлектрическим покрытием от различных технологических операций, определенные на основании измерений ВФХ МДП- структур созданных на основе МЛЭ HgCdTe

1 — Исходная эпитаксиальная пленка; 2 — Активационный отжиг индия, внедренного в процессе роста пленки; 3 — Имплантация ионов мышьяка; 4 — Активационный отжиг имплантированной в пленку примеси мышьяка

На рисунке 2.12 показаны значения дифференциального сопротивления ОПЗ в режиме сильной инверсии ( $R_{diff}$ ) и последовательного сопротивления объемной пленки ( $R_{bulk}$ ) после различных технологических процедур. Видно, что значение

$R_{SCR}$  для пленок после имплантации принимает большие значения, а соответствующие значения для пленок после имплантации и активации отжига чрезвычайно малы. Можно отметить, что значение  $R_{SCR}$  определяет поведение ВФХ и зависит от скорости генерации неосновных носителей заряда в приповерхностной полупроводниковой области. Эта скорость генерации определяется наличием дефектов, через которые могут проходить генерация и рекомбинация в ОПЗ. Поэтому можно предположить, что концентрация дефектов в приповерхностном слое МЛЭ HgCdTe является низкой после имплантации, но значительно увеличивается после имплантации и активационного отжига. Увеличение скорости генерации неосновных носителей заряда после имплантации и отжига может быть связано с увеличением роли дефектов, расположенных вблизи границы раздела. С увеличением концентрации легирующей примеси ширина ОПЗ уменьшается и возрастает роль генерации вблизи границы раздела.

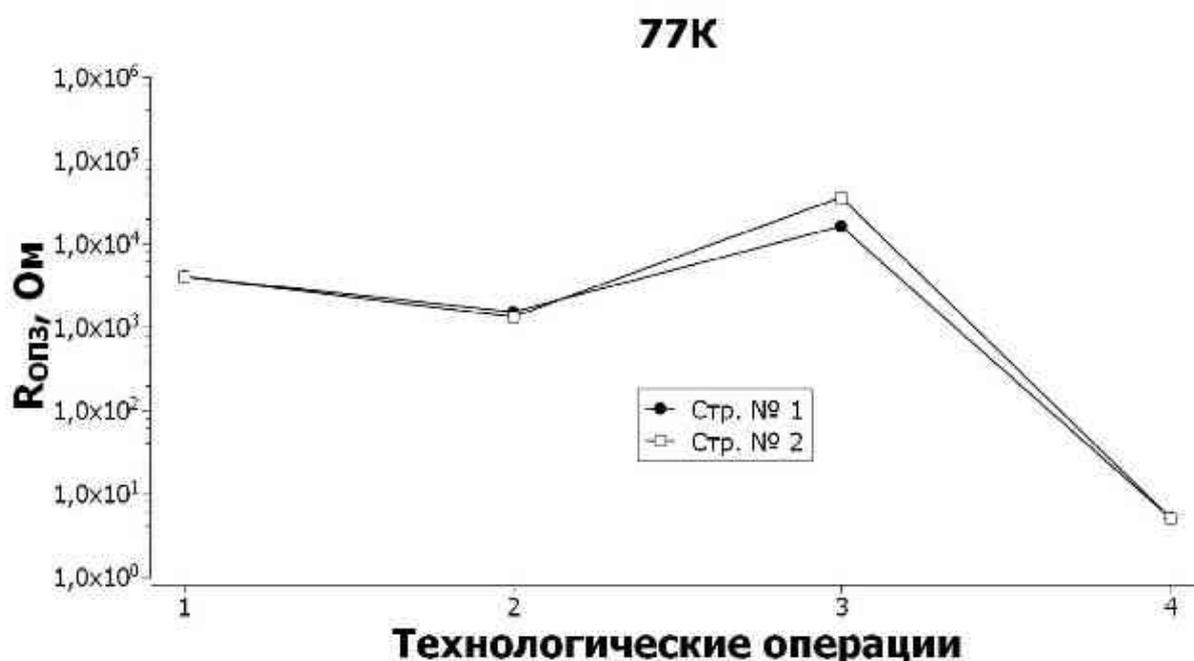


Рисунок 2.12 — Зависимости дифференциального сопротивления области пространственного заряда ( $R_{опз}$ ) эпитаксиальной пленки, от различных технологических операций, определенные на основании измерений ВФХ МДП-структур созданных на основе МЛЭ HgCdTe

1 — Исходная эпитаксиальная пленка; 2 — Активационный отжиг индия, внедренного в процессе роста пленки; 3 — Имплантация ионов мышьяка; 4 — Активационный отжиг имплантированной в пленку примеси мышьяка

77K

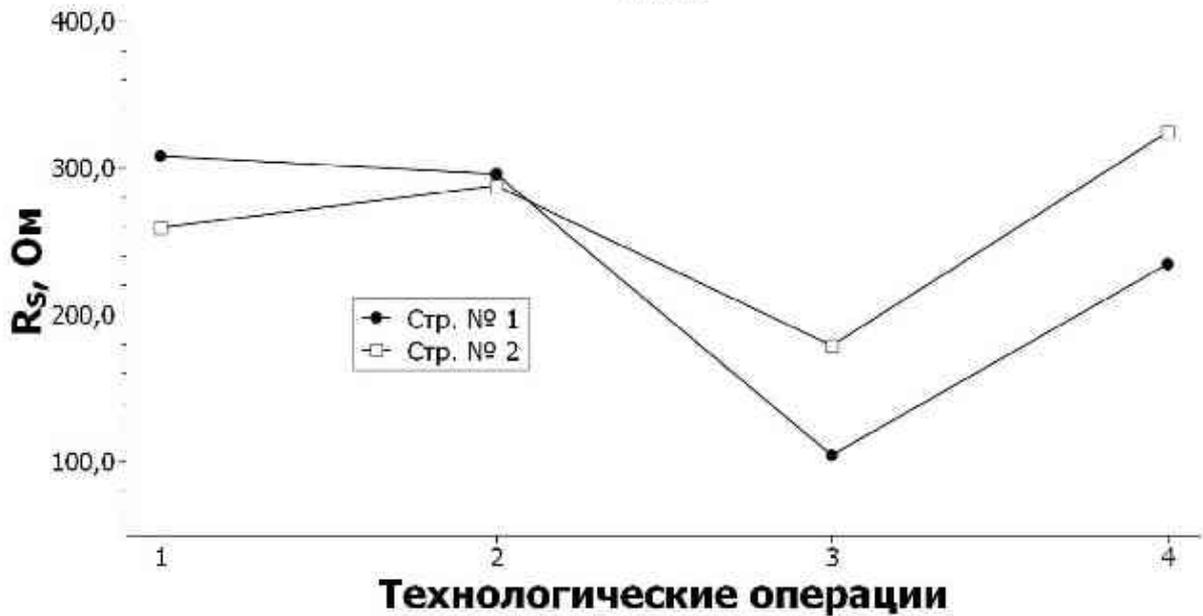


Рисунок 2.13 — Зависимости последовательного сопротивления объема эпитаксиальных пленок ( $R_s$ ), от различных технологических операций, определенные на основании измерений ВФХ МДП- структур созданных на основе МЛЭ HgCdTe

1 — Исходная эпитаксиальная пленка; 2 — Активационный отжиг индия, внедренного в процессе роста пленки; 3 — Имплантация ионов мышьяка; 4 — Активационный отжиг имплантированной в пленку примеси мышьяка

Чтобы исключить влияние перезарядки медленных состояний на ВФХ МДП-структур на основе МЛЭ HgCdTe, мы использовали метод, основанный на сложной форме развертки напряжения смещения на полевом электроде МДП-структуры, который ранее был предложен для изучения МДП-структур на основе других материалов. На рисунке 2.14 показано распределение концентрации легирующей примеси по толщине приповерхностного слоя пленок МЛЭ HgCdTe после различных технологических процедур. Профили легирующей примеси находятся в хорошем соответствии со значениями концентрации легирующей примеси, найденными по минимальным значениям емкости на ВФХ. Сравнение рисунка 2.11 и рисунка 2.14 показывает, что минимальное значение емкости определяет концентрацию легирующей примеси на границе раздела между ОПЗ и квазинейтральным объемом полупроводника. Рисунок 2.14 показывает, что после имплантации концентрация легирующей примеси в пленки увеличивается с

расстоянием от границы раздела между изолятором и полупроводником до глубины около 0,1 мкм.

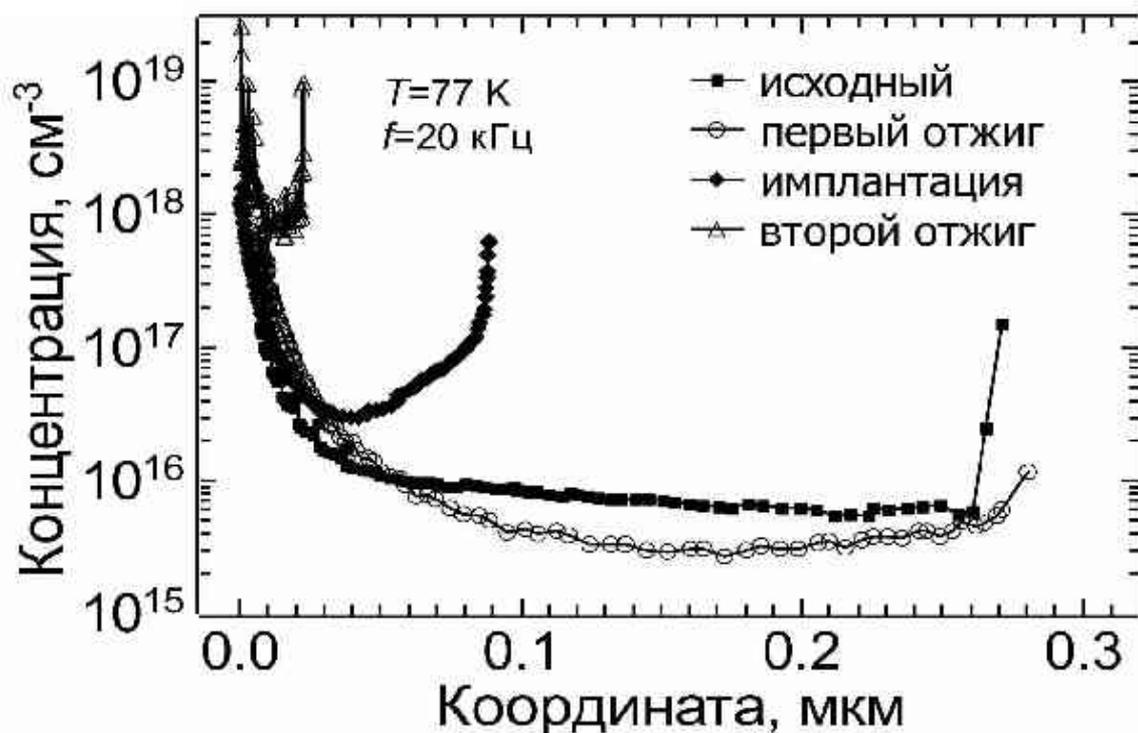


Рисунок 2.14 — Распределение концентрации легирующей примеси по толщине приповерхностного слоя эпитаксиальной пленки МЛЭ HgCdTe после различных технологических процедур

Из максимального значения емкости на ВФХ можно определить значение емкости диэлектрического слоя ( $C_d$ ), а из минимального значения емкости определить значение концентрации легирующей примеси ( $N_D$ ) в приповерхностной области. Из-за наличия приповерхностного градиентного слоя для расчета идеальной кривой ВФХ необходимо численно решать уравнение Пуассона с учетом реального профиля распределения содержания CdTe по толщине эпитаксиальной пленки. Используя заданное значение концентрации легирующей примеси, можно рассчитать значение емкости плоских зон и определить плотность медленных состояний ( $N_{ss}$ ) в пограничном с диэлектриком слое при напряжении плоских зон. Из значений емкости и проводимости в режиме накопления можно определить последовательное сопротивление объема полупроводника ( $R_V$ ), а затем рассчитать дифференциальное сопротивление области пространственного заряда ( $R_{0лз}$ ) в режиме сильной инверсии.

Для описания зависимости содержания CdTe от координаты в варизонных слоях с переменной шириной запрещенной зоны использовалось следующее выражение:

$$x(z) = x_0 + A \cdot \exp\left(-\frac{z}{B}\right), \quad (2.1)$$

численное решение уравнение Пуассона с учетом реального профиля распределения содержания CdTe по толщине эпитаксиальной пленки проводилось методом стрельбы.

Таблица 2.1 показывает основные параметры, полученные на основании результатов измерения при температуре 77 К. Значения сопротивления и дифференциального сопротивления ОПЗ были определены из измерений адмитанса на частоте 200 кГц. Емкость диэлектрика  $C_d$  определялась из измерений адмитанса на частоте 10 кГц. Из таблицы следует, что для МДП-структур на основе исходного выращенного HgCdTe МЛЭ реализуются большие значения плотности медленного состояния, а также большие значения дифференциального сопротивления области пространственного заряда по сравнению с образцами после активационного отжига. Концентрация легирующей примеси и объемное сопротивление после термического отжига существенно не изменяются. Дифференциальное сопротивление ОПЗ определяется скоростью генерации неосновных носителей заряда в приповерхностном слое HgCdTe, которая зависит от дефектности этого слоя.

Таблица 2.1 — Основные параметры МДП-структур при температуре 77 К

Образец	$C_d, \Phi$	$N_{ss}, \text{см}^{-2}$	$N_D, \text{см}^{-3}$	$R_{опз}, \text{Ом}$	$R_s, \text{Ом}$
№1 Исх.	178.7	$4.67 \cdot 10^{11}$	$3.9 \cdot 10^{15}$	4127	309
№1 Отожж.	184.9	$1.81 \cdot 10^{11}$	$4.3 \cdot 10^{15}$	1460	297
№2 Исх.	122.4	$6.03 \cdot 10^{11}$	$4.6 \cdot 10^{15}$	4100	260
№2 Отожж.	101.2	$1.26 \cdot 10^{11}$	$5.2 \cdot 10^{15}$	1280	289

## Заключение

Теллурид кадмия ртути остается основным материалом для создания высокочувствительных матричных фотоприемных устройств для среднего и дальнего инфракрасного диапазонов. Сохраняется значительный интерес к исследованию МДП-структур на основе КРТ, что связано, прежде всего, с необходимостью модифицирования свойств материала в процессе создания матриц фоторезисторов и фотодиодов для инфракрасного диапазона. Несмотря на значительное число работ, продолжают исследования, направленные на оптимизацию параметров эпитаксиальных слоев и модификацию их свойств. В литературе не достаточно освещены исследования электрофизических характеристик МДП-структур на основе пленок варизонного КРТ подвергнутых операции ионной имплантации мышьяком, хотя такие исследования необходимы для разработки матриц фокальной плоскости ИК-диапазона на основе р<sup>-</sup>-п фотодиодов.

Проведены экспериментальные исследования электрофизических характеристик МДП-структур на основе ГЭС МЛЭ КРТ; в том числе и после проведения технологических операций отжига, ионной имплантации, ионной имплантации и активационного отжига. Значительных отличий свойств исходных пленок и пленок n-HgCdTe после активационного отжига не обнаружено. Показано, что ионная имплантация приводит к появлению высокой концентрации электронов в приповерхностном слое полупроводника (около  $10^{17}$  см<sup>-3</sup>). Смена типа проводимости приповерхностного полупроводникового слоя наблюдается только после отжига полупроводниковой пленки HgCdTe с имплантированной примесью мышьяка, при этом наблюдается появление высокой концентрации дырок (порядка  $2 \times 10^{18}$  см<sup>-3</sup>). Для пленок после имплантации и отжига наблюдаются очень малые значения дифференциального сопротивления ОПЗ, что может быть связано с большим вкладом генерации неосновных носителей заряда в переходном слое между диэлектриком и полупроводником. Проведение активационного отжига уменьшает гистерезис ВФХ, что указывает на уменьшение плотности медленных состояний в приграничном слое между МЛЭ HgCdTe и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Проведение термического отжига снижает величину плотности состояний в переходном слое между Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и МЛЭ HgCdTe с  $(4.7-6.0) \times 10^{11}$  до  $(1.2-1.8) \times 10^{11}$  см<sup>-2</sup>.

На основании экспериментальных результатов, полученных в ходе выполнения данной работы были опубликованы две статьи в зарубежных рецензируемых журналах, которые приводятся в списке литературы данной работы.

### Список литературы

1. Chu J. Device Physics of Narrow Gap Semiconductors / J. Chu, A. Sher. - New York: Springer, 2010. - 506 p.
2. Рогальский А. Инфракрасные детекторы: пер. с англ. / А. Рогальский; под ред. А. В. Войцеховского. - Новосибирск: Наука, 2003. - 636 с.
3. Selamet Y. HgTe/HgCdTe superlattices grown on CdTe/Si by molecular beam epitaxy for infrared detection / Y. Selamet, Y. D. Zhou, J. Zhao, Y. Chang, C. R. Becker, R. Ashokan, C.H. Grein, S. Sivantanthan // Journal of Electronic Materials. - 2004. - V. 33, № 6. - P. 503-508.
4. Chu J. Physics and properties of narrow gap semiconductors. / J. Chu, A. Sher - New York: Springer, 2008. - 597 p.
5. Овсяк В. Н. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона / В. Н. Овсяк, Г. Л. Курышев, Ю. Г. Сидоров [и др.] - Новосибирск: Наука, 2001. - 376 с.
6. Pal R. Engineering interface composition for passivation of HgCdTe photodiodes / R. Pal, A. Malik, V. Srivastav, B. L. Sharma, V. R. Balakrishnan, V. Dhar, H. P. Vyas // IEEE Transaction on Electron Devices. - 2006. - V. 53, № 11. - P. 2727-2734.
7. Бирюлин В. П. Исследование границы раздела ZnS-CdHgTe / В. П. Бирюлин, С. А. Дудко, С. А. Коновалов, Ю. А. Пелевин, В. И. Туринов // ФТП. - 2003. - Т. 37, вып. 12. - С. 1431-1434.
8. Norton P. HgCdTe infrared detectors // Opto-Electron. Rev. - 2002. - V. 10, № 3. - P. 159-174.
9. Hansen G. L. Energy gap versus alloy composition and temperature in Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te / G. L. Hansen, J. L. Schmidt, T. N. Casselman // J. Appl. Phys. - 1982. - V. 53. - P. 7099-7101.
10. Wenus J. Two-dimensional analysis of double-layer heterojunction HgCdTe photodiodes / J. Wenus, J. Rutkowski, A. Rogalski // IEEE Trans. Electron Dev. - 2001. - V. 48, Issue 7. - P. 1326-1332.
11. Hansen G. L. Calculation of intrinsic carrier concentration in Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te / G. L. Hansen, J. L. Schmidt // J. Appl. Phys. - 1983. - V. 54. - P. 1639-1640.

12. Weiler M. Magneto-optical properties of  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  alloys / M. Weiler Ed. by R.K. Willqardson and A.C. Beer // *Semiconduct. and Semimet.* – 1981. – Vol. 16, pp. 119-191.
13. Miles R.W. Electron and Hole Effective Masses in  $\text{HgCdTe}$  // *Properties of Narrow Gap Cadmium-based Compounds* / R.W. Miles; Ed. by P. Capper. - Infra-Red Limited, London, United Kingdom: INSPEC, 1994. pp. 640.
14. Rothman J. Maximum Entropy Mobility Spectrum Analysis of  $\text{HgCdTe}$  Heterostructures / J. Rothman, J. Meilhan, G. Perrais, J. P. Belle, O. Gravrand // *J. Electr. Mater.* - 2006. - V. 35. - P. 1174-1184.
15. Scott W. Electron Mobility in  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  // *J. Appl. Phys.* - 1972. - V. 43. - P. 1055-1062.
16. Rogalski A. Narrow-Gap Semiconductor Photodiodes / A. Rogalski, K. Adamiec, and J. Rutkowski – Bellingham, WA: SPIE–The International Society for Optical Engineering, 2000. – pp. 438.
17. Kinch M. A. Metal-insulator-semiconductor infrared detectors // *Semiconductors and Semimetals.* - 1981. - V. 18. - P. 313-385.
18. Войцеховский А. В. Фотоэлектрические МДП-структуры из узкозонных полупроводников / А. В. Войцеховский, Давыдов В. Н. – Томск: Радио и связь, 1990. – 327 с.
19. Pierre-Yves Emelie  $\text{HgCdTe}$  Auger-Suppressed Infrared Detectors Under Non-Equilibrium Operation: A dissertation ... Dr. of Phil. (Electrical Engineering) / The University of Michigan. – Ann Arbor, 2009. – pp. 192.
20. Антонов В.В. Исследование электрофизических и фотоэлектрических характеристик МОП-структур на основе теллурида кадмия ртути: Дис. ... канд. физ.-мат.наук / Сибирский ордена Трудового Красного Знамени физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова при Томском ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном университете имени В.В. Куйбышева.- Томск, 1985.- 257 с.
21. Формозов Б. Н. Аэрокосмические фотоприемные устройства в видимом и ИК-диапазонах: учебное пособие / Б. Н. Формозов. - СПб.: СПбГУАП, 2002. - 120 с.

22. Elliott C.T. Infrared detectors // Handbook on Semiconductors / C.T. Elliott, N.T. Gordon Ed. by C. Hilsum.- Amsterdam: North-Holland, 1993. - V. 4. P. 841-936.
23. Piotrowski J. Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te detectors // Infrared photon Detectors / J. Piotrowski; Ed. by A. Rogalski.- Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1995. - P. 391-493.
24. Hall D. J. High-performance long-wavelength HgCdTe infrared detectors grown on silicon substrates / D. J. Hall, L. Buckle, N. T. Gordon [and etc.] // Applied physics letters. - 2004. - V. 85, № 11. - P. 2113-2116.
25. Nemirovsky Y. Passivation of mercury cadmium telluride surfaces / Y. Nemirovsky, G. Bahir // Vac. Sci. Technol. - 1989. - V. A7. - P. 450-459.
26. Kolodny A. Properties of ion implanted junction in mercury-cadmium-telluride / A. Kolodny, I. Kidron // IEEE Transactions on Electron Devices. - 1980. - V. ED-27. - P. 37-43.
27. Migliorato P. A. CdTe/HgCdTe indium-diffused photodiodes / P. A. Migliorato, R. F. C. Farrow, A. B. Dean, G. M. Williams // Infrared Phy. - 1982. - V. 22. - P. 331-336.
28. Nemirovsky Y. Anodic sulfide films on Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te / Y. Nemirovsky, I. Burstein // Applied Physics Letters. - 1984. - V. 44. - P. 443-444.
29. Weiss E. Composition, growth mechanism, and oxidation of anodic fluoride films on Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te (x=0.2) / E. Weiss, C.R. Helms // J. Electrochem. Soc. - 1991. - V. 138. Issue 4. - P. 993-999.
30. Weiss E. Composition, growth mechanism, and stability of anodic fluoride films on Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te / E. Weiss, C.R. Helms // J. Vac. Sci. Technol. - 1991. - V. B9. Issue 3. - P. 1879-1885.
31. Shacham-Diamand Y. The electrical properties of Hg-sensitized "Photox"-oxide layers deposited at 80 C° / Y. Shacham-Diamand, T. Chuh, W. G. Oldham // Solid-St. Electron. - 1987. - V. 30. - P. 277-233.
32. Kajihara N. Silicon nitride passivant for HgCdTe n+-p diodes / N. Kajihara, G. Sudo, Y. Miyamoto, K. Tonicawa // J. Electron. Soc. - 1998. - V. 135. - P. 1252-1255.
33. Zimmermann P.H. Surface passivation of HgCdTe photodiodes / P. H. Zimmermann, M. B. Reine, K. Spignese, K. Maschhoff, J. Schirripa // J. Vac. Sci. Technol. - 1990. - V. A8. - P. 1182-1184.

34. Bubulac L.O. P-on-n activated junction in LWIR HgCdTe/GaAs / L. O. Bubulac, D. D. Edwall, D. McConnel, R. E. DeWames, E. R. Blazejewski, E. R. Gertner // *Semicond. Sci. Technol.* - 1990. - V. 5. N. S3. - P. S45-S48.
35. Reine M.B. Photovoltaic infrared detectors / M.B. Reine, A.K. Sood, T.J. Tredwell Ed. by R.K. Willardson and A.C. Beer // *Semiconductors and Semimetals.*- New York: Academic press, 1981. - V. 18. - P. 201-311.
36. Rogalski A. Intrinsic infrared detectors / A. Rogalski, J. Piotrowski // *Prog. Quant. Electr.* - 1988. - V. 12. Issues 2-3. - P. 87-289.
37. Byrne C. F. Infrared photodiodes formed in mercury cadmium telluride grown by MOCVD / C. F. Byrne, P. Knowles // *Semicond. Sci. Technol.* - 1988. - V. 3. - P. 377-381.
38. Wadsworth M. V. Monolithic CCD imagers in HgCdTe / M. V. Wadsworth, S. R. Borrello, J. Dodge, R. Gooh, W. McCardel, G. Nado, M. D. Shilhanek // *IEEE Trans. Electron Devices.* - 1995. - V. 42. - P. 244-250.
39. В.В. Тарасов, Ю.Г. Якушенков Инфракрасные системы “смотрящего” типа. – М.: Логос, 2004. – 444 с. +8 с. цв. вкл.
40. Тарасов В. В. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения / В. В. Тарасов, Ю. Г. Якушенков. – М.: Университетская книга, Логос, 2007. – 192 с.
41. Кремис И. И. Повышение качества изображения тепловизоров на основе матричных HgCdTe фотоприемных устройств ИК- диапазона // *Прикладная физика.* - 2010. - № 1. - С. 108-114.
42. Baker I. M. Photovoltaic CdHgTe - silicon hybrid focal planes / I. M. Baker, R. A. Ballingall // *Proc. SPIE.* - 1984. - V. 510. - P. 121-129.
43. Baker I. M. CdHgTe-CMOS hybrid focal plane arrays - a flexible solution for advanced infrared systems / I. M. Baker, G. J. Crimes, J. E. Parsons, E. S. O'Keefe // *Proc. SPIE.* - 1994. - V. 2269. - P. 636-647.
44. Новоселов А. Р. Индиевые столбы для FLIP-CHIP технологии матричных фотоприемных устройств на основе пленок Cd-Hg-Te, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии / А. Р. Новоселов, И. Г. Косулина, А. Г. Клименко, А. Г. Паулиш, В. В. Васильев // *Материалы электронной техники.* - 2008. - № 3. - С. 60-63.

45. Kozłowski L. J. SWIR staring FPA performance at room temperature / L. J. Kozłowski, W. E. Tennant, M. Zandian, J. M. Arias, J. G. Pasko // *Proc. SPIE.* - 1996. - V. 2746. - P. 93-100.
46. Kozłowski L. J. HgCdTe focal plane arrays for high performance infrared cameras // *Proc. SPIE.* - 1997. -V. 3179. - P. 200-211.
47. Morris H. B. Infrared Sensing Charge Imaging Matrix / H. B. Morris, S. R. Borrello, A. Simmons, R. A. Schiebel // *Technical Digest of the International Electron Devices Meeting.* - 1982. - P. 153.
48. Borrello S. R. Charge imaging matrix for infrared scanning / S. R. Borrello, H. B. Morris, R. A. Schiebel, C. G. Roberts // *Proc. SPIE.* - 1984. V. 409. - P. 69-75.
49. A. Vlasov High temperature arsenic doping of CdHgTe epitaxial layers / A. Vlasov, V. Bogoboyashchyy, O. Bonchyk, A. Barcz // *Cryst. Res. Technol.* 39, No. 1, 11 – 22 (2004)
50. A.G. Korotaev Admittance studies of modification of HgCdTe surface properties with ion implantation and thermal annealing / A.G. Korotaev, A.V. Voitsekhovskii, I.I. Izhnin, K.D. Mynhaev, S.N. Nsmelov, S.M. Dzyadukh, V.S. Varavin, S.A. Dvoretzky, N.N. Mikhailov, M.V. Yakushev, G.Y. Sidorov // *Surface & Coatings Technology* 392 (2020) 125760
51. A.V. Voitsekhovskii Investigation of the Effect of Thermal Annealing on the Electrical Properties of the Near-Surface Layer of MBE n-HgCdTe Using MIS Techniques / A.V. Voitsekhovskii, S.N. Nsmelov, S.M. Dzyadukh, V.S. Varavin, S.A. Dvoretzky, N.N. Mikhailov, M.V. Yakushev, G.Y. Sidorov, M.V. Yakushev, and D.V. Marin // *Journal of ELECTRONIC MATERIALS*, Vol. 49, No. 5, 2020, P. 3202-3208

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (ТГУ)

Радиофизический факультет (РФФ)  
Кафедра квантовой электроники и фотоники (КЭиФ)

УДК 621.38

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель ООП  
д-р физ.- мат. наук, профессор  
*А.В. Войцеховский* А.В. Войцеховский  
"19" 06 2020

### ОТЧЕТ О ПАТЕНТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

МДП-структуры на основе эпитаксиальных пленок МЛЭ HgCdTe. Ионная имплантация мышьяка и активационный отжиг эпитаксиальных пленок МЛЭ HgCdTe

Томск 2020

**ЗАДАНИЕ**  
на проведение патентных исследований

Наименование работы (темы): Влияние на электрофизические характеристики МДП-структур ионной имплантации мышьяка в эпитаксиальные пленки МЛЭ HgCdTe и последующего активационного отжига

Сроки его выполнения с 5 сентября 2018 по 10 июня 2020 г.

Задачи патентных исследований: Исследование современного уровня технологий. Анализ научно-производственной деятельности ведущих научных коллективов и компаний. Исследование новизны предполагаемых результатов исследования.

Ответственный исполнитель

магистрант группы 0742 С. М. Дзядух С.М. Дзядух

Руководитель проекта

зав. каф. КЭиФ РФФ ТГУ, д.ф.-м.н., А.В. Войцеховский А.В. Войцеховский

Регламент поиска

22.09.2018

*дата составления регламента*

Наименование работы (темы) Влияние на электрофизические характеристики МДП-структур ионной имплантации мышьяка в эпитаксиальные пленки МЛЭ HgCdTe и последующего активационного отжига

Шифр работы (темы) ИИ-МДП

Номер и дата утверждения задания от 17.09.2018 Этап работы первый

Цель поиска информации (в зависимости от задач патентных исследований, указанных в задании)

Задачей является анализ технического уровня разработок в области исследования электрофизических характеристик МЛЭ КРТ после имплантации ионов мышьяка; поиск методов и устройств, реализующих технологию ионной имплантации мышьяка в пленки МЛЭ КРТ и исследования их свойств.

---

Обоснование регламента поиска поиск провести в базах ФИПС и USPTO

Начало поиска 17.09.2018 Окончание поиска 15.12.2018

Предмет поиска (объект исследования, его составные части, товар)	Страна поиска	Источники информации, по которым будет проводиться поиск				Ретроспективность	Наименование информационной базы
		патентные		НТИ			
		Наименование	Классификационные рубрики МПК	Наименование	Рубрики УДК		
1	2	3	4	5	6	7	8
Разработки, методы и устройства, технологию ионной имплантации мышьяка в пленки МЛЭ КРТ и исследования их свойств	Россия, США	База данных ФИПС (Россия) База данных USPTO (США)	МПК G01N G01N 27/02 G12 H01L	МЛЭ КРТ МДП Ионная имплантация мышьяка Спектроскопия адмиттанса МВЕ HgCdTe MIS	538.911 621.315.5 621.315.592. 3	1998-2018 (Россия) 1976-2018 (США)	База данных ФИПС (Россия)  База данных USPTO (США)

Руководитель  
ВКР магистра

\_\_\_\_\_  
личная подпись

А.В. Войцеховский  
расшифровка  
подписи

22.09.18  
дата

Руководитель  
патентного  
подразделения

\_\_\_\_\_  
личная подпись

В. П. Беличенко  
расшифровка  
подписи

22.09.18  
дата

## ОТЧЕТ О ПОИСКЕ

В.1 Поиск проведен в соответствии с заданием

от 15.09.2018 и Регламентом поиска № от 22.09.2018

В.2 Этап работы первый

В.3 Начало поиска 17.09.2018 Окончание поиска 15.12.2018

В.4 Сведения о выполнении регламента поиска (указывают степень выполнения регламента поиска, отступления от требований регламента, причины этих отступлений) – регламент поиска выполнен полностью.

В.5 Предложения по дальнейшему проведению поиска и патентных исследований – провести поиск патентов аналогов наиболее значимых патентов, обнаруженных при проведении патентных исследований. Более детально проанализировать направления исследований ведущих в рассматриваемых областях фирм. Расширить поиск текущей научной и патентной информации в смежных областях.

В.6 Материалы, отобранные для последующего анализа

Таблица В.6.1 – Патентная документация

Предмет поиска (объект исследования, его составные части)	Страна выдачи, вид и номер охранного документа. Классификационный индекс	Заявитель (патентообладатель), страна. Номер заявки, дата приоритета.	Название изобретения	Сведения о действии охранного документа
1	2	3	4	5
Анализ технического уровня разработок в области исследования электрофизически х характеристик МЛЭ КРТ после имплантации ионов мышьяка; поиск методов и устройств, реализующих технологии ионной имплантации мышьяка в пленки МЛЭ КРТ и исследования их свойств	1. Свидетельство о регистрации РФ, (19)RU(11)2609222(13)C1, H01L 31/18 (2006.01)	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Томский государственный университет" (ТГУ, НИ ТГУ) (RU)	Способ определения концентрации донорного фона в структурах $Cg, Hg_{1-x}Te$	Действует.
	2. Свидетельство о регистрации РФ, (19)RU(11)2501116(13)C1 H01L 21/66 (2006.01)	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук(ИФП СО РАН) (RU)	СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ДИФФУЗИОННОЙ ДЛИНЫ НЕОСНОВНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ И ТЕСТОВАЯ СТРУКТУРА ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ	Прекратил действие, но может быть восстановлен.
	3. Свидетельство о регистрации РФ, (19)RU(11)2611211(13)C1  H01L 31/18 (2006.01)	Акционерное общество "НПО "Орион" (RU)	Способ пассивации поверхности теллурида кадмия-ртути	Действует.

<p>4. Свидетельство о регистрации РФ, (19)RU(11)2340981(13)C1 H01L 31/18 (2006.01)</p>	<p>Акционерное общество "НПО "Орион" (RU)</p>	<p>СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАТРИЧНОГО ФОТОПРИЕМНИКА</p>	<p>Действует.</p>
<p>5. Свидетельство о регистрации РФ, (19)RU(11)2618483(13)C2 H01L 31/103 (2006.01) H01L 31/18 (2006.01)</p>	<p>КОММИССАРИАТ А Л'ЭНЕРЖИ АТОМИК Э О ЭНЕРЖИ АЛЬТЕРНАТИВ (FR)</p>	<p>ДИОД С p-n-ПЕРЕХОДОМ, ИМЕЮЩИЙ РЕГУЛИРУЕМУЮ ГЕТЕРОСТРУКТУРУ, САМОПОЗИЦИОНИРУЮЩУЮСЯ НА HgCdTe, ДЛЯ ФОРМИРОВАТЕЛЯ СИГНАЛОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ В ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА</p>	<p>Действует.</p>
<p>6. Патент США 5,608,208, МПК H01L 31/0216 (20060101); H01L 31/102 (20060101); H01L 31/103 (20060101); H01L 040/14</p>	<p>Патентообладатель(и): Technion Research &amp; Development Foundation Ltd.(Haifa, IL), Заявка: 11065795 Feb 8, 1994, Опубликовано: January 25, 1995</p>	<p>Single layer planar HgCdTe photovoltaic infrared detector with heterostructure passivation and p-on-n homojunction</p>	<p>Действует.</p>
<p>7. Патент США 10,079,263, МПК H01L 27/146 (20060101); H01L 31/101 (20060101); H01L 31/103 (20060101); H01L 31/18 (20060101)</p>	<p>Патентообладатель(и): COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES(Paris, FR), Заявка: Oct 12, 2015, Опубликовано: October 10, 2016</p>	<p>Manufacture of a CdHgTe multispectral photodiode array by cadmium diffusion</p>	<p>Действует.</p>
<p>8. Патент США 10,177,193, МПК H01L 31/18 (20060101); H01L 31/103 (20060101); H01L 27/146 (20060101); H01L 27/144 (20060101); H01L 31/0296 (20060101); H01L 31/0352 (20060101)</p>	<p>Патентообладатель(и): Commissariat a l'energie atomique et aux energies alternatives(Paris, FR), Заявка: May 27, 2014, Опубликовано: May 6, 2015</p>	<p>Array of mesa photodiodes with an improved MTF</p>	<p>Действует.</p>

Таблица В.6.2 – Научно техническая, конъюнктурная, нормативная документация и материалы государственной регистрации (отчеты о научно-исследовательских работах)

Предмет поиска	Наименование источника информации с указанием страницы источника	Автор, фирма (держатель) технической документации	Год место и орган издания (утверждения, депонирования источника)
1	2	3	4
Анализ технического уровня разработок в области исследования электрофизических характеристик МЛЭ КРТ после имплантации ионов мышьяка; поиск методов и устройств, реализующих технологию ионной имплантации мышьяка в пленки МЛЭ КРТ и исследования их свойств	1. Исследование электрофизических и фотоэлектрических характеристик МОП-структур на основе теллурида кадмия ртути: Дис. ... канд. физ.-мат.наук / Сибирский ордена Трудового Красного Знамени физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова при Томском ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном университете имени В.В. Куйбышева. 257 с.	Антонов В.В.	Томск, 1985
	2. Фотоэлектрические МДП-структуры из узкозонных полупроводников. 327 с.	А. В. Войцеховский, Давыдов В. Н.	Томск: Радио и связь, 1990
	3. Инфракрасные системы "смотрящего" типа, 444 с.	В.В. Тарасов, Ю.Г. Якушенков	М.: Логос, 2004
	4. Основы инфракрасной техники, 3 изд., М., 1985; Зайдель И.Н.	Козелкин В.В., Усольцев И.Ф.	Основы инфракрасной техники. – 1985
	5. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона 376 с.	В. Н. Овсяк, Г. Л. Курышев, Ю. Г. Сидоров [и др.]	Новосибирск: Наука, 2001

## **Выводы по результатам патентного поиска**

Целью магистерской диссертации, в рамках которой проводились патентные исследования, является исследование влияния на электрофизические характеристики МДШ-структур (структур металл – диэлектрик – полупроводник) ионной имплантации мышьяка в эпитаксиальные пленки МЛЭ HgCdTe и последующего активационного отжига.

В последнее время растет востребованность в разработке новых материалов для микроэлектроники. В настоящее время  $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$  является основным материалом для создания высокочувствительных инфракрасных матриц фотодиодов и фоторезисторов для спектральных диапазонов окон прозрачности атмосферы 3-5 и 8-12 мкм. Структуры на основе  $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$  перспективны для создания целого ряда приборов электроники и фотоники: лавинных фотодиодов, лазерных диодов, поверхностно-излучающих лазеров, фотодетекторов на основе поверхностно-барьерных структур, включая монолитные многоэлементные приборы. Благодаря своим фундаментальным свойствам  $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$  может использоваться для создания многоцветных фотоприемников, а также детекторов, действующих как в ближней инфракрасной области (1-3 мкм), так и в дальней инфракрасной области (> 20 мкм). В последнее время усиливается интерес к развитию технологии создания фотодиодов p+ на n на основе МЛЭ КРТ, что показывают патентные исследования и статьи по данной тематике в научных журналах и в международной базе данных SCOPUS. Число патентов в Российском патентном ведомстве невелико. Было найдено 5 патентов в российской базе данных ФИПС. В американской базе данных USPTO было найдено большое количество патентов, три из которых непосредственно относятся к теме моей магистерской диссертации.

Актуальность исследуемой проблемы определяется необходимостью модифицирования свойств эпитаксиальных пленок  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  при создании приборов оптоэлектроники с сохранением структурного совершенства приповерхностных слоев. Проведенный патентный поиск показывает, что данное направление исследований перспективно и сильные позиции в нем занимают исследователи из Франции.



Поиск заимствований в научных текстах<sup>β</sup>

[\(/index.php/ru/\)](#) [\(/index.php/en/\)](#)

Введите текст:

...или загрузите файл:

Файл не выбран...

Выбрать файл...

Укажите год публикации:

Выберите коллекции

Все	Википедия	Российские журналы
Рефераты	Российские конференции	Энциклопедии
Авторефераты	Иностранные журналы	Англоязычная википедия
Иностранные конференции		
PubMed		

Анализировать

Проверить по расширенному списку коллекций системы Руконтекст (<http://text.rucont.ru/like>)

Обработан файл:

0 Дис.Маг. Итог Дзядух New.pdf.

Год публикации: 2020.

Оценка оригинальности документа - 97.34%

Процент условно корректных заимствований - 0.0%

Процент некорректных заимствований - 2.66%

[Просмотр заимствований в документе](#)

Время выполнения: 15 с.

Документы из базы

Источники заимствования

**1. Электрофизические и фотоэлектрические характеристики МДП-структур на основе гетерозитаксиального варизонного HgCdTe, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии, с различными диэлектриками** (<http://dlib.rsl.ru/loader/view/01004617375?get=pdf>)

Авторы: Дзядух, Станислав Михайлович.

Год публикации: 2010. Тип публикации: автореферат диссертации.

<http://dlib.rsl.ru/loader/view/01004617375?get=pdf> (<http://dlib.rsl.ru/loader/view/01004617375?get=pdf>)

[Показать заимствования \(5\)](#)

В списке литературы

Источники  
Заимствования

1.82%

**2. Курсовая работа: Фотоприемники на основе твердого раствора кадмий-ртуть-телур (КРТ)** (<http://www.bestreferat.ru/files/88/bestreferat-168988.docx>)

Год публикации: 2016. Тип публикации: реферат.

<http://www.bestreferat.ru/files/88/bestreferat-168988.docx> (<http://www.bestreferat.ru/files/88/bestreferat-168988.docx>)

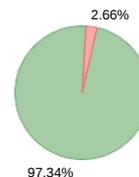
[Показать заимствования \(3\)](#)

0.84%

[Значимые оригинальные фрагменты](#)

[Дополнительно](#)

[Библиографические ссылки](#)



[Искать в Интернете](#)

© 2015 2020 Институт системного анализа Российской академии наук (<http://www.isa.ru/index.php?lang=ru>)