

Учреждение Российской Академии наук
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова
Сибирское отделение РАН

На правах рукописи

Новоселов Андрей Рудольфович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ МОЗАИЧНЫХ
ФОТОПРИЁМНИКОВ БЕЗ ПОТЕРЬ ИНФОРМАЦИИ В
ИЗОБРАЖЕНИИ**

Специальность: 05.27.01 - Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и нано- электроника,
приборы на квантовых эффектах

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: д.т.н. Кирьянов В.П.
Научный консультант: к.ф.-м. н., с.н.с. Клименко А.Г.

Новосибирск - 2011

Оглавление

	Список условных обозначений и сокращений.....	5
	Введение.....	6
1	Обзор и анализ литературы.....	17
1.1	Современное состояние производства мозаичных фотоприёмных устройств.....	17
1.1.1	Конфигурация мозаичных фотоприёмных устройств.....	20
1.1.2	Особенности применяемых технологий разделения пластин на чипы.....	25
1.2	Выбор лазерного источника для скрайбирования пластин с кремниевыми мультиплексорами и фотоприёмниками.....	30
1.3	Изменение физических свойств полупроводниковых материалов при воздействии лазерного излучения.....	39
1.3.1	Характер процессов при плотности энергии, превышающей порог парообразования в материале.....	41
1.3.2	Характер процессов при плотности энергии, превышающей порог расплава поверхности материала.....	42
1.3.3	Характер процессов при плотности энергии, недостаточной для плавления поверхности материала.....	44
1.4	Изменение физических свойств полупроводниковых материалов в зоне повреждения.....	50
1.5	Фокусирование лазерного излучения.....	52
	Выводы к главе.....	56
2	Формирование зон повреждения в полупроводниковых материалах при лазерном скрайбировании.....	60
2.1	Методика измерения ширины зоны повреждения.....	60

2.2	Формирование зон повреждения в кремниевых мультиплексорах и фотоприёмниках	63
2.3	Модель взаимодействия лазерного излучения с полупроводниковыми материалами.....	75
2.4	Раскол пластин с чипами и гибридизация фотоприёмных устройств	84
	Выводы к главе.....	87
3	Режимы лазерного скрайбирования пластин с кремниевыми мультиплексорами и фотоприёмниками.....	89
3.1	Оптимизация оптической системы установок лазерного скрайбирования.....	89
3.2	Формирование канавки при однопроходном и многопроходном режиме лазерного скрайбирования.....	92
3.2.1	Формирование канавки в однопроходном режиме лазерного скрайбирования.....	92
3.2.2	Формирование канавки в многопроходном режиме лазерного скрайбирования.....	100
3.3	Однопроходный режим лазерного скрайбирования пластин с кремниевыми мультиплексорами.....	105
3.4	Многопроходный режим лазерного скрайбирования пластин с фотоприёмниками.....	113
3.5	Стабильность электрических параметров фотоприёмников после скрайбирования.....	117
	Выводы к главе.....	122
4	Методики скрайбирования пластин с кремниевыми мультиплексорами и фотоприёмниками. Практическое применение	124
4.1	Методики формирования канавки в пластинах с кремниевыми мультиплексорами.....	124
4.2	Методики формирования канавки в пластинах с фотоприёмниками	131
	Выводы к главе.....	141
	Заключение.....	142

Список использованной литературы	144
Приложение 1. Программа для численного расчёта изменения температурного поля однослойной плёнки фотоприёмника на основе гетероэпитаксиального слоя HgCdTe в вакууме после импульсного нагрева части поверхности и Вынесенные из основного текста описания экспериментов из Глав 2, 3 и 4.....	152
Приложение 2. Акты внедрения результатов диссертационной работы. Публикации автора.....	162

Список условных обозначений и сокращений

ФПУ - фотоприёмное устройство;

КМ - кремниевый мультиплексор;

ФЧЭ - фоточувствительный элемент, например, фотодиод;

ФП - фотоприёмник, массив ФЧЭ;

«флип-чип» - метод «гибридизации» КМ и ФП в ФПУ, когда КМ осуществляет параллельное управление и считывание информации с каждого ФЧЭ в ФП через индиевые столбы;

ПС - период следования - расстояние между центрами ФЧЭ в ФП и в КМ
расстояние между центрами контактных площадок для электрической связи с ФЧЭ в ФП соответственно;

РЭМ-фотография – фотография, сделанная на растровом электронном микроскопе

Введение

Актуальность темы

Применение тепловизионных приборов для контроля тепловых полей в инфракрасном (ИК) спектральном диапазоне достаточно широкое – это астрономия, медицина, научные исследования, а также слежение за наземными и воздушными целями. Одним из основных узлов современного тепловизионного прибора является фотоприёмное устройство (ФПУ), которое осуществляет преобразование оптического изображения в электрические сигналы. ФПУ может быть выполнено как в монолитном исполнении, при котором фоточувствительные элементы (ФЧЭ) и электронная схема обработки фотосигналов сформированы на кремниевой пластине, так и в «гибридном» исполнении. В последнем случае к электронной схеме обработки и управления фотосигналами с ФЧЭ – кремниевому мультиплексору (КМ) – присоединяется фотоприёмник (ФП), представляющий собой массив ФЧЭ (например, p-n переходов), который может быть сформирован на других полупроводниковых подложках. При большом количестве ФЧЭ в ФП единственным способом соединения в единый узел КМ и ФП, является метод перевёрнутого кристалла (технология «флип-чип»). Электрическая связь между ФП и КМ осуществляется через индиевые столбы, они же обеспечивают механическую прочность ФПУ [1]. В ряде других литературных источников, например, в [2], в состав ФПУ дополнительно включают холодильную машину и криостат. В диссертации использованы обозначения принятые в работе [1].

Для каждого окна прозрачности земной атмосферы в ИК диапазоне (1...2,5), (3...5) и (8...12) мкм существуют свои полупроводниковые

материалы, на основе которых изготавливаются ФП. В диссертации основное внимание уделено спектральному диапазону 8...12 мкм, для которого массив ФЧЭ формируют в плёнках твёрдых растворов кадмий-ртуть-теллур р-типа (КРТ), выращиваемых методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на GaAs подложке [3] (современное название - гетероэпитаксиальные слои КРТ - ГЭС КРТ).

Пространственное разрешение тепловизионных приборов зависит от числа ФЧЭ в ФПУ, и в настоящее время интенсивно ведутся разработки по увеличению числа ФЧЭ. Например, для диапазона 3...5 мкм выпускаются ФПУ, форматом 2048 на 2048 ФЧЭ [1] и для диапазона 8...12 мкм выпускаются ФПУ форматом 640 на 512 ФЧЭ (фирма «Sofradir», Франция). Дальнейшее увеличение числа ФЧЭ в ФПУ, применяемых в этом спектральном диапазоне, увеличением площади КМ и ФП, ограничивается рядом факторов. Важнейшими из них являются:

а) Уменьшение процента выхода годных КМ и ФП на пластинах при значительном увеличении их геометрических размеров;

б) Увеличение числа разрывов индиевых столбов в ФПУ из-за разных температурных коэффициентов линейного расширения материалов (КТР) КМ и ФП при их охлаждении до температур жидкого азота (77 К) во время работы и нагреве до 300 К после выключения устройства.

Причиной первого фактора могут быть, например, локальные дефекты (дислокации в материале, поры в диэлектрике), приводящие к потере работоспособности либо всего чипа, либо его части [4]. Причиной второго является использование в ФПУ полупроводниковых материалов с разными КТР. При изменении температуры с 300 до 80 К разница в размерах пластин GaAs (подложка ФП) и Si (КМ), имевших равные размеры (10 на 10) на 10^3 мкм

при 300 К) составит около 11 мкм [5]. В этих условиях краевые индиевые столбы в ФПУ должны выдерживать многократные смещения массива ФЧЭ относительно КМ более 5 мкм (изменение размеров происходит относительно совмещённых центров обеих пластин). При диаметрах индиевых столбов, равных 10...15 мкм, весьма вероятно разрушение последних. С увеличением размеров пластин разрушение индиевых столбов происходит быстрее. При замене подложек в ФП с GaAs на Si ФПУ выдерживают более 4000 охлаждений [6].

Одним из перспективных путей увеличение формата ФПУ является использование нескольких КМ и ФП меньшей площади, установленных стык в стык друг к другу на общем основании. Данный приём известен как мозаичный принцип построения ФПУ, а сами приборы известны как мозаичные ФПУ (МФПУ). Сдерживающим фактором применения МФПУ является наличие «слепых зон», обусловленных повреждением элементов на краях КМ и ФП, возникающих при разделении пластин на чипы методом скрайбирования или разрезания. Это так называемые зоны повреждения, ширина, которых в КМ составляет 30 и более микрометров. При этом часть оптического изображения теряется и, тем самым, снижается эффективность преобразования изображений в МФПУ. Под эффективность преобразования изображений здесь и далее понимается отношение числа работающих ФЧЭ в МФПУ к сумме ФЧЭ, потерянных в «слепых зонах» и работающих ФЧЭ в МФПУ. Например, эффективность МФПУ типа «CRIRES 1024×4096» (Германия), состоящего из четырёх ФПУ форматом 1024 на 1024 ФЧЭ с периодом следования ФЧЭ, равным 27 мкм, составляет около 83 %. Создание МФПУ без потери информации в изображении, то есть с нулевым числом потерянных ФЧЭ в «слепых зонах», является актуальной проблемой технологии МФПУ.

Перспективность работ подтверждается, например, намерениями фирмы «Teledyne Imaging Sensors» (США) создать МФПУ ИК диапазона форматом 10240 на 14336 ФЧЭ, состоящего из 35 ФПУ форматом 2048 на 2048 ФЧЭ [7].

Решение задачи изготовления МФПУ без потери информации в изображении сводится к уменьшению ширины зоны повреждения до значений, составляющих менее 50 % периода следования ФЧЭ в ФП.

Целью диссертационной работы является экспериментальное подтверждение возможности создания мозаичных фотоприёмников без потерь информации в изображении при использовании технологии разделения пластин с применением лазерного излучения (лазерного скрайбирования). Для этого необходимо было решить следующие **основные задачи**:

1) Провести анализ изменений электрофизических свойств полупроводниковых материалов в пятне взаимодействия лазерного излучения с полупроводниковыми материалами при различных плотностях энергии излучения и длинах волн. Выбрать источник излучения, наиболее подходящий для выполнения операции разделения пластин на чипы;

2) Исследовать влияние неоднородности распределения плотности энергии в пятне излучения на формирование зоны повреждения в полупроводниковых материалах. На основе экспериментальных данных и анализа данных, полученных другими авторами, создать модель взаимодействия лазерного излучения с полупроводниковыми материалами, учитывающую эту неоднородность и правильно описывающую происходящие изменения в полупроводниковых материалах в ближней и дальней зонах взаимодействия;

3) Исследовать связь между режимами лазерного скрайбирования пластин с КМ и ФП на основе гетероэпитаксиальных слоёв р-типа

$\text{Hg}_{0,22}\text{Cd}_{0,78}\text{Te}$ и шириной зон повреждения в них. Определить режимы лазерного скрайбирования, при которых ширина зон повреждения минимальна. Сформулировать требования к элементам технологических установок лазерного скрайбирования и проверить их в реальных экспериментах;

4) Исследовать стабильность во времени электрических параметров ФЧЭ, попавших в зоны повреждения;

5) Разработать методики скрайбирования пластин с КМ и ФП, обеспечивающие создание МФПУ без потерь информации в изображении, работающих в спектральном диапазоне 8...12 мкм.

Объекты и методы исследования

Основным объектом исследования является ширина зоны повреждения в пластинах с КМ и ФП при лазерном скрайбировании.

Основными методами исследования являются анализ процессов, происходящих в полупроводниковых материалах при воздействии мощного лазерного излучения, и экспериментальная регистрация изменений электрофизических параметров р-п переходов в пластинах с КМ и ФЧЭ в ФП на различных расстояниях от места воздействия лазерного излучения.

Основные результаты, выносимые на защиту

1) Модель взаимодействия лазерного излучения с полупроводниковыми материалами, учитывающая неравномерность пространственного распределения плотности энергии в пятне излучения на поверхности и многостадийность воздействия излучения на полупроводниковые материалы за время действия каждого импульса излучения;

2) Требования к установкам лазерного скрайбирования, выработанные на основе данной модели: длина волны излучения - 0,337 мкм (лазер на молекулах азота); наличие расплава материала на краях пятна воздействия и

экранирование поверхности от излучения с плотностью энергии, недостаточной для расплава материала; многопроходный режим формирования (со скоростью, равной 120 мкм/сек., обеспечивающей при частоте повторения 100 Гц 50 % перекрытие пятен) и применение линз, имеющих удлинённую каустику;

3) Оптимальные режимы лазерного скрайбирования, обеспечивающие минимальную ширину зон повреждения:

а) не более 8 мкм в пластинах с ФП в многопроходном режиме лазерного скрайбирования с плотностью энергии около 2,60 Дж/см²;

б) не более 6 мкм в пластинах с КМ при скрайбировании диафрагмированным излучением с плотностью энергии около 2,90 Дж/см² за один проход;

4) Методика скрайбирования ФП линейчатого типа форматом 4 на 288 ФЧЭ с периодом следования, равным 56 мкм, обеспечивающая создание двухуровневой (по глубине) скрайбовой канавки в многопроходном режиме скрайбирования, для изготовления МФПУ линейчатого типа без потерь информации в изображении.

Научная новизна результатов исследования

1) Показано, что зонный характер воздействия лазерного излучения с полупроводниковыми материалами позволяет минимизировать ширину зон повреждения в пластинах с КМ и ФП;

2) Показано, что наличие расплава материала на стенках скрайбовых канавок приводит к уменьшению ширины зоны повреждения в пластинах с ФП на основе ГЭС КРТ до 8 мкм, в то время как при меньших плотностях энергии излучения в пятне, когда расплав не образуется, ширина зоны повреждения материала увеличивается до 13 и более микрометров;

3) Определены параметры оптимальных режимов лазерного скрайбирования КМ (однопроходный, диафрагмированным излучением с плотностью энергии около $2,90 \text{ Дж/см}^2$) и ФП (многопроходный с плотностью энергии около $2,60 \text{ Дж/см}^2$), при применении которых ширина зоны повреждения в пластинах с ФП около 8 мкм, а для пластин с КМ не превышает 6 мкм, в то время как использование режимов, рекомендованных производителями технологического оборудования, приводит к появлению в пластинах с КМ зон повреждения, шириной 30 и более микрометров;

4) Показано, что после лазерного скрайбирования с оптимальными параметрами вольт-амперные характеристики ФЧЭ в зоне повреждения остаются стабильными на протяжении более 80 часов выдержки при температуре 340 К, как и все остальные ФЧЭ в ФП.

Практическая значимость и реализация результатов

1) Изготовлен опытный образец установки лазерного скрайбирования пластин с КМ и ФП, обеспечивающий два режима работы: однопроходный и многопроходный. Её отличие от известных установок лазерного скрайбирования заключается в том, что в оптическом тракте установки применена линза с глубиной фокуса более 200 мкм при рассчитанном диаметре пятна более 44 мкм. Применение линзы обеспечивает возможность формирования скрайбовой канавки глубиной более 130 мкм при плотности энергии около $3,60 \text{ Дж/см}^2$. В установке реализована возможность создания двухуровневых (по глубине) канавок;

2) Результаты исследований использованы при выполнении договора ИФП СО РАН № 3594 от 19.04.95 («Разработка технологии получения методом МЛЭ фоточувствительных слоёв $A^{II}B^{IV}$ многоэлементных охлаждаемых линейчатых и матричных фотоприёмников»);

3) Рекомендованные в диссертации режимы лазерного скрайбирования использованы при выполнении: Гранта РФФИ («Создание технологии и исследование свойств плёнок с предъявлением по окончании работы макета линеек фотоприёмников на их основе»); Договора ИФП СО РАН («Разработка конструкции и изготовление кремниевого мультиплексора формата 160×120 элементов с коррекцией входных сигналов») и Государственного контракта по Центру Коллективного Пользования ИФП СО РАН (2005-2006 г.г.) для осуществления контроля качества кремниевых кантилеверов в атомно-силовом микроскопе;

4) Применение режима лазерного скрайбирования в водной среде позволило приблизить край КМ к индиевым столбам, что обеспечило возможность исследования процессов сварки индиевых столбов при «гибридизации» ФПУ на основе ГЭС КРТ в растровом электронном микроскопе и обосновать способ формирования контактного столба многоконтактного гибридного соединения (патент РФ на изобретение № 2392690);

5) Применение предлагаемых режимов лазерного скрайбирования позволяет:

а) изготавливать МФПУ без потери информации в изображении: для МФПУ, состоящего из одного ФП и нескольких КМ, с периодом следования ФЧЭ, более 40 мкм и более 44 мкм для МФПУ, состоящего из нескольких ФПУ или одного КМ и нескольких ФП;

б) увеличить эффективность преобразования изображений в МФПУ в 8 и более раз по сравнению с существующими МФПУ при периоде следования ФЧЭ в ФП менее 40 мкм уменьшением зазоров между ФПУ и ширины зоны повреждения.

Соответствие диссертации паспорту специальности

Диссертация соответствует специальности 05.27.01 (Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах). Области исследований, представленные в диссертации, соответствуют пунктам 3, 4 и 5 формулы специальности 05.27.01.

Личный вклад соискателя в диссертационную работу заключается в постановке и решении научно-технических задач, проведении экспериментов, обработке, анализе и интерпретации экспериментальных результатов, разработке модели взаимодействия излучения с полупроводниковыми материалами, оформлении публикаций.

Апробация работы

Основные научные результаты диссертационной работы докладывались на 3-х Российских конференциях: 3-я Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники» (Россия, Дивногорское, 1996 г.); XIX Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Россия, Москва, 2006); XXI Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Россия, Москва, 2010). На 5-ти зарубежных конференциях: Microelectronic Manufacturing 1999 (SPIE, Santa Clara, CA, 1999); Analytical and Diagnostic Techniques for Semiconductor Materials, Devices and Processes (Honolulu, Hawaii, 1999); Photonics West (SPIE, San Jose, CA, 2000); International Conference on Information Systems, Analysis and Synthesis (Jrlando, Florida, 2001); Second International Symposium on Laser Precision Microfabrication (Singapore, 2001).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 15 работ, в том числе: 7 - в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, 1 – в сборнике всероссийской конференции, 6 – в трудах международных конференций, 1 – патент РФ.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 74 наименования, и двух приложений. Основной текст изложен на 150 страницах, содержит 70 рисунков и четыре таблицы. Общее количество страниц в диссертации 171, список литературы включает 89 наименований, рисунков 73 и 4 таблицы.

Первая глава посвящена анализу литературы по теме диссертации: современного состояния производства МФПУ, в том числе путей создания МФПУ без потери информации в изображении, и взаимодействия с полупроводниковыми материалами одиночных импульсов лазерного излучения с разными длинами волн и мощностями.

Во второй главе анализируется природа появления зон повреждения в полупроводниковых материалах. Показано, что появление зон повреждения шириной более 20 мкм нельзя объяснить только нагревом поверхности ФП при воздействии лазерного излучения. Рассмотрено влияние расплава материала на периферии пятна излучения на ширину зоны повреждения. Предложена модель взаимодействия полупроводниковых материалов с лазерным излучением, учитывающая неравномерное распределение плотности энергии в поперечном сечении пятна и позволяющая обосновать выбор режимов лазерного скрайбирования.

Третья глава посвящена анализу изменений ширины зоны повреждения при скрайбировании пластин с ФП и КМ в разных режимах. Предложен принцип выбора линз для установок лазерного скрайбирования. Сформулированы

требования к установкам лазерного скрайбирования пластин с ФП и КМ, обеспечивающие минимальную ширину зон повреждения, которые проверены на практике.

Четвёртая глава посвящена разработке методик скрайбирования приборных пластин с ФП и КМ.

1. Обзор и анализ литературы

1.1. Современное состояние производства мозаичных фотоприёмных устройств

Для повышения пространственного разрешения тепловизионных приборов требуется увеличение числа ФЧЭ в ФПУ, и в настоящее время интенсивно ведутся разработки по увеличению числа ФЧЭ. Для спектрального диапазона 3...5 мкм выпускаются ФПУ форматом до 2048 на 2048 ФЧЭ [1], а для диапазона 8...12 мкм до 640 на 512 ФЧЭ (фирма «Sofradir», Франция). Дальнейшее увеличение количества ФЧЭ в ФПУ (увеличением размеров КМ и ФП), ограничивается рядом факторов, перечисленных во введении:

а) уменьшением процента выхода годных ФП и КМ при значительном увеличении их размеров, влекущее за собой существенное повышение стоимости ФПУ и делающее невыгодным их серийное производство;

б) увеличением числа разрывов индиевых столбов в ФПУ из-за необходимости многократного охлаждения ФП до температур жидкого азота (77 К) в период работы прибора и нагревом до комнатной температуры (300 К) в нерабочем состоянии.

Первый ограничивающий фактор связан с возникновением в процессе изготовления полупроводниковых пластин с чипами локальных дефектов (например, дислокаций в материале, пор в диэлектрике), приводящих к потерям работоспособности всего чипа или его части. Вероятность изготовления

бездефектных чипов описывается распределением Пуассона и зависит от средней плотности локальных дефектов на пластине, и площади чипа [4].

Второй фактор связан с применением в ФПУ полупроводниковых материалов с разными температурными коэффициентами линейного расширения. На рисунке 1.1 представлены зависимости изменения размеров пластин Si, Ge и GaAs при их охлаждении [5]. При температуре 300 К размеры пластин составляли (10 на 10) на 10^3 мкм. В соответствии с рисунком, при снижении температуры до 80 К разница в размерах между пластинами GaAs и Si составит около 11 мкм. Если в качестве подложки для ФП применить Ge, то разница в размерах пластин Ge и Si составит около 8 мкм. Краевые индиевые столбы в ФПУ при эксплуатации должны выдерживать многократные сдвиговые нагрузки более 4 мкм и более 5 мкм для подложек ФП из GaAs (изменение размеров пластин относительно центра ФПУ) при диаметрах индиевых столбов 10...15 мкм. С увеличением размеров ФПУ разрушение индиевых столбов происходит быстрее. Применение в качестве подложки для ФП кремниевых пластин снижает вероятность разрушения индиевых столбов в ФПУ при циклических охлаждениях [6]. На рисунке 1.2 показано изменение количества работающих ФЧЭ в ФПУ при увеличении количества циклов охлаждения для двух ФПУ [6]. В качестве подложки для ФП использовалась кремниевая пластина, на которой были сформированы меза-структуры из плёнки InSb. Формат ФП 640 на 512 ФЧЭ. Из рисунка видно, что после 4000 циклов охлаждения начинается разрыв связей между КМ и ФП.

Применение мозаичного принципа построения ФПУ, когда несколько ФПУ меньшей площади устанавливаются встык друг к другу, позволяет увеличить количество ФЧЭ в МФПУ и обойти ограничения перечисленные выше.

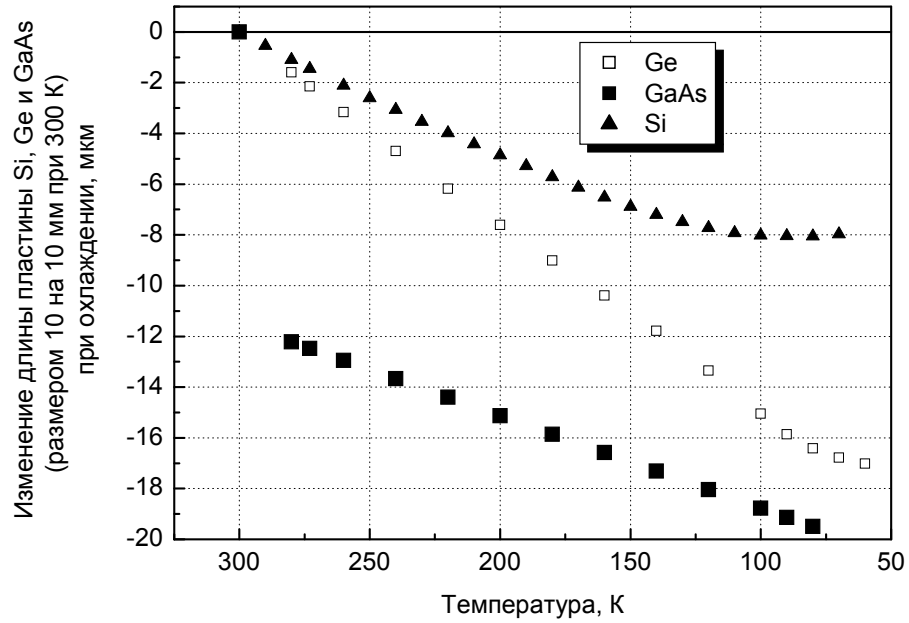


Рисунок 1.1 - Изменения размеров Ge, Si и GaAs пластин размерами (10 на 10) на 10^3 мкм при их охлаждении [5].

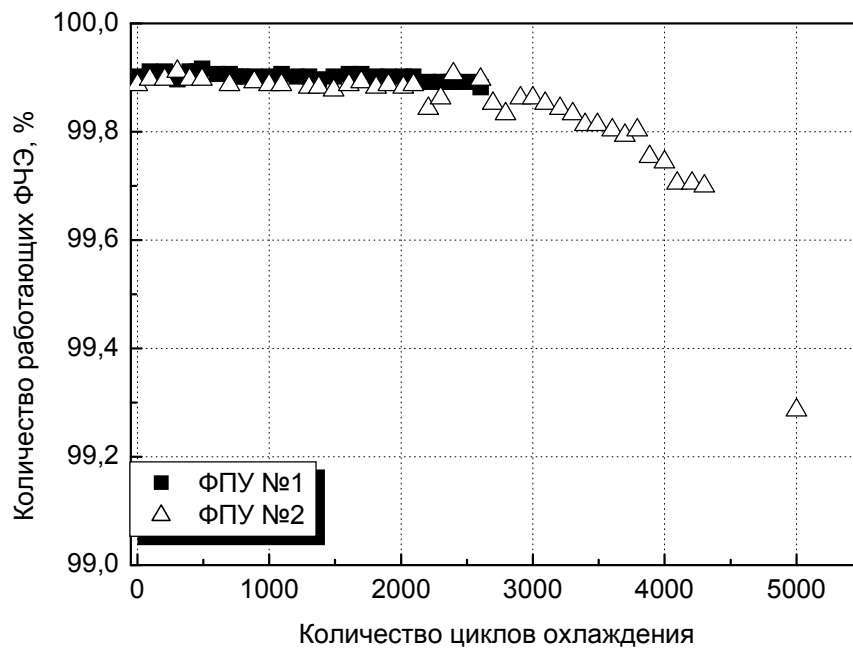


Рисунок 1.2 - Изменение количества работающих ФЧЭ в ФПУ при увеличении количества циклов охлаждения [6].

1.1.1 Конфигурация мозаичных фотоприёмных устройств

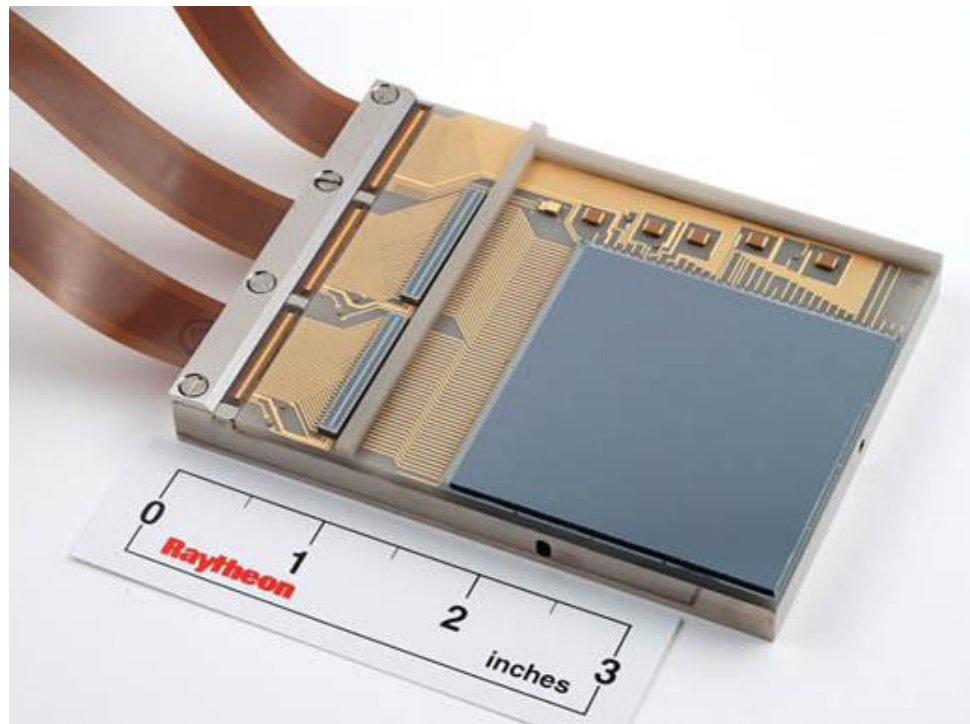
В литературе описаны следующие характерные конфигурации МФПУ:

а) Состоящие из нескольких отдельных ФПУ. На рисунке 1.3.а представлена фотография ФПУ для диапазона 1...5 мкм форматом 2048 на 2048 ФЧЭ, изготавливаемая фирмой «Raytheon Vision Systems» (США), где ФЧЭ формируются в пластине InSb. На рисунке 1.3.б представлена фотография МФПУ форматом 4096 на 4096 ФЧЭ, состоящий из четырёх ФПУ, представленных на рисунке 1.3.а [8];

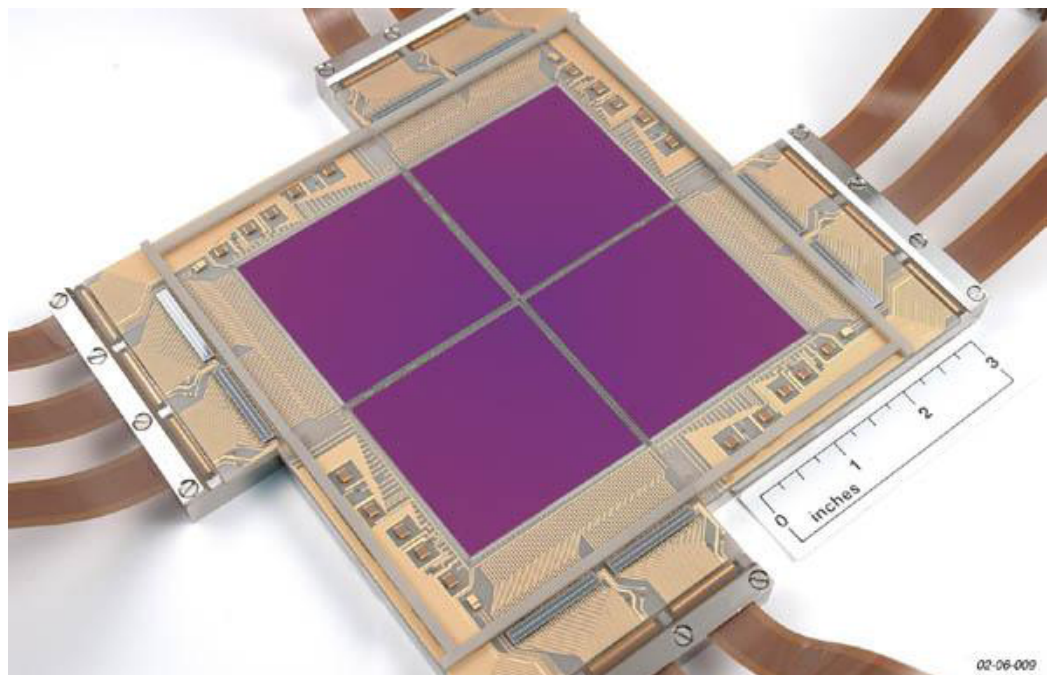
б) Одного ФП и нескольких КМ. На рисунке 1.4 представлена фотография МФПУ фирмы «ATLAS» (США) на плате коммутации. МФПУ состоит из одного ФП на основе InSb и 16 КМ [9];

в) Одного КМ и нескольких ФП. В таких МФПУ уменьшено влияние различие в КТР между КМ и ФП, но в литературе не удалось обнаружить описания подобных конструкций.

Характерной особенностью всех конструкций МФПУ является наличие «слепых зон» между ФПУ. Изготовители МФПУ стремятся к уменьшению ширины «слепых зон»: в 2003 г. она составляла 7641 мкм (около 283 ФЧЭ) [10]; в 2004 г - 7128 мкм (264 ФЧЭ) [11] и в 2009 г. – около 367 мкм (35 ФЧЭ) (стендовый доклад «"Design and Implementation of the Widefield High-Resolution UV/Optical Star Formation Camera for the THEIA Mission» на 213-й конференции американского Астрономического Общества, январь 2009). На рисунке 1.5 показано МФПУ с шириной «слепой зоны» между ФПУ, равной 7641 мкм. Эффективность преобразования изображения в таком МФПУ составляет около



а)



б)

Рисунок 1.3 – Фотография МФПУ форматом 4096 на 4096 ФЧЭ, состоящая из 4 ФПУ [8].

а) ФПУ «ORION 2048×2048» на основе InSb, «Raytheon Vision Systems», США

б) МФПУ форматом 4096 на 4096 ФЧЭ на основе четырёх ФПУ («ORION 2048×2048»).

"ATLAS" США 1999 г.

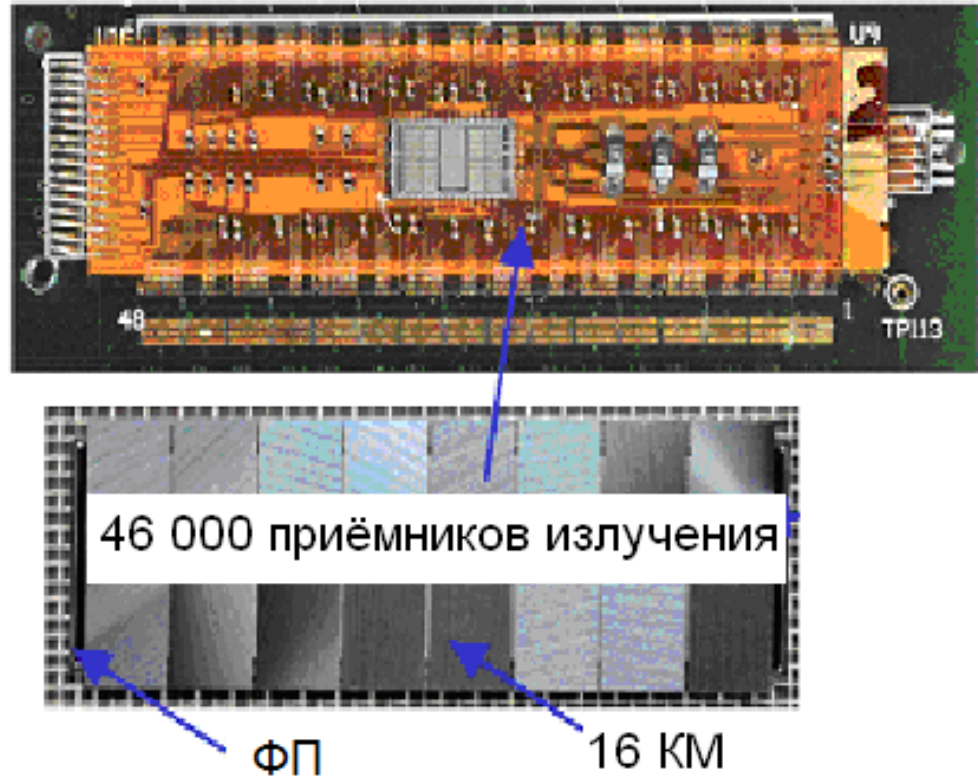


Рисунок 1.4 - Матричный МФПУ фирмы «ATLAS» (США), состоящее из одной ФП и 16-ти КМ, на плате коммутации [9].

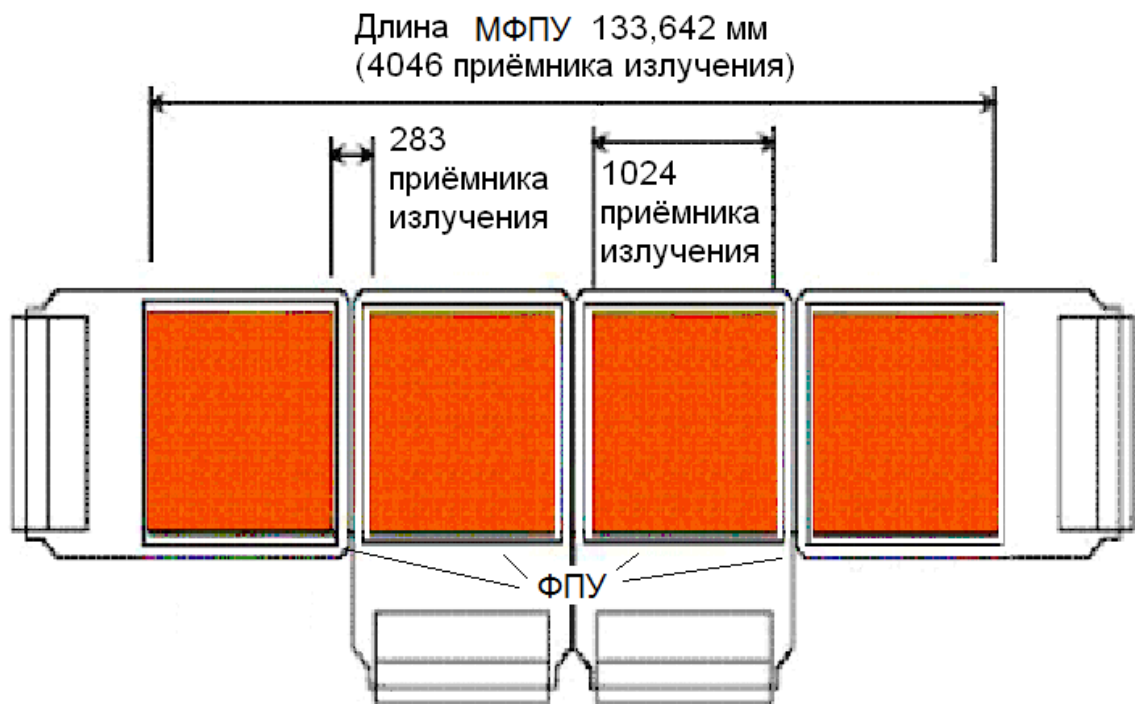


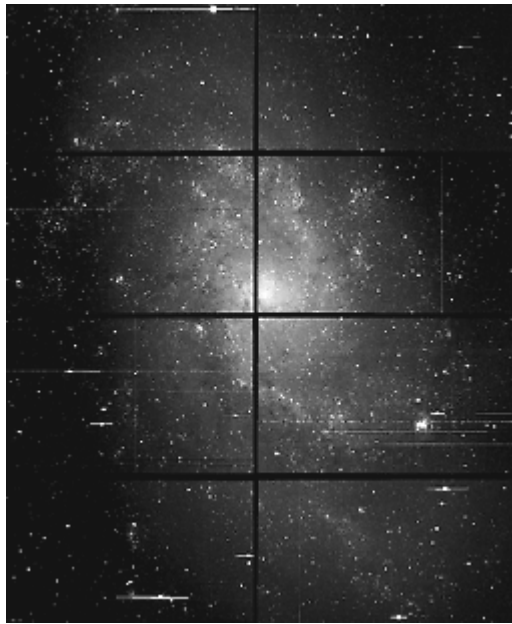
Рисунок 1.5 – МФПУ, состоящее из четырёх ФПУ форматом 1024 на 1024 ФЧЭ с периодом следования ФЧЭ равным 27 мкм [10].

83 %. В настоящее время для увеличения эффективности преобразования изображения в МФПУ применяют следующие способы:

- а) компьютерную обработку информации с МФПУ;
- б) в МФПУ на основе линейчатого ФП (ФЧЭ расположенных в ряд), где краевые ФЧЭ находятся в стороне от общего ряда.

Первый вариант применяют в МФПУ, создаваемых для исследования объектов, медленно изменяющих своё пространственное положение (например, астрономия). Многократное фотографирование объекта со смещением положения его изображения на МФПУ и последующим компьютерным сложением всех изображений, позволяет обрабатывать информацию с МФПУ больших форматов. На рисунке 1.6.а показано изображение, считанное с МФПУ, состоящее из восьми ФПУ форматом 4096 на 4096 ФЧЭ. Фотография сделана в марте 1997 года телескопом NOAO Newsletter - Kitt Peak National Observatory. На рисунке 1.6.б показано изображение после компьютерной обработки серии фотографий, сделанных со смещением. Реализация данного метода в переносных (мобильных) системах слежения за быстро движущимися объектами (например, за наземными или воздушными целями) является трудной задачей.

Второй вариант применяют в МФПУ линейчатого типа, создаваемых для наблюдения за объектами, которые достаточно быстро изменяют своё пространственное положение. МФПУ состоит из нескольких ФП. Информационный сигнал с вынесенных краевых ФЧЭ вставляется в соответствующие места изображения и «слепые зоны» в изображении отсутствуют. КМ и ФП в МФПУ расположены рядом в одной плоскости, и связь между ними осуществляется через сапфировую пластину с нанесёнными на ней металлическими шинами,



а)



б)

Рисунок 1.6. – Результат компьютерной обработки изображения звёздного неба, сделанного при помощи МФПУ, состоящего из 8 ФПУ.

а) - исходное изображение; б) - после компьютерной обработки изображения.

соединяющими КМ и ФП между собой [12]. Это решение предложено и реализовано фирмой «LEPI» (Франция). На рисунке 1.7 схематично изображена область стыковки двух соседних ФП линейчатого типа. На рисунке 1.8 представлена фотография МФПУ форматом 2 на 1500 ФЧЭ, состоящая из пяти ФП и десяти КМ линейчатого типа. ФП имеет формат 2 на 300 ФЧЭ, КМ – 1 на 300, ПС равен 30 мкм. Данное решение нельзя реализовать в ФПУ, собранных по технологии «флип-чип», так как требуется изготовление КМ с вынесенными краевыми входными контактными площадками и схемами ввода информации с ФЧЭ, что значительно усложняет их конструкцию. Для МФПУ матричного типа применения данного метода невозможно из-за отсутствия места для смещения краевых ФЧЭ.

1.1.2. Особенности применяемых технологий разделения пластин на чипы

Каждый из перечисленных вариантов повышения эффективности преобразования изображения в МФПУ имеет ограничения. Ещё один вариант повышения эффективности передачи изображения в МФПУ – это уменьшение ширины «слепых зон», состоящих из зазора между ФПУ и зон повреждения на краях КМ и ФП, которые формируются при разделении пластин на чипы методом скрайбирования или разрезания. При механическом воздействии на полупроводниковые материалы во время разрезания с помощью алмазных дисков, зона повреждения содержит (Рисунок 1.9) трещины, повышенную

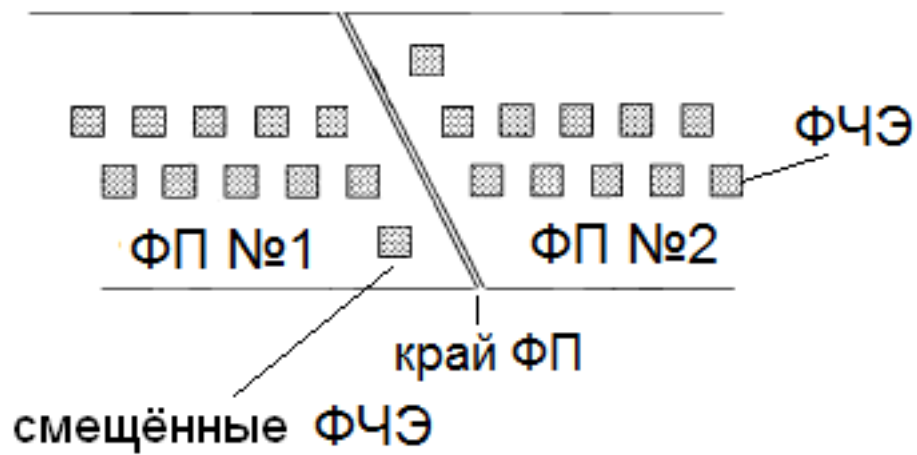


Рисунок 1.7 – Схематичный рисунок, поясняющий способ изготовления линейчатого МФПУ без потери информации с краевых ФЧЭ в ФПУ, применяемый фирмой «LETI» (Франция) [12].

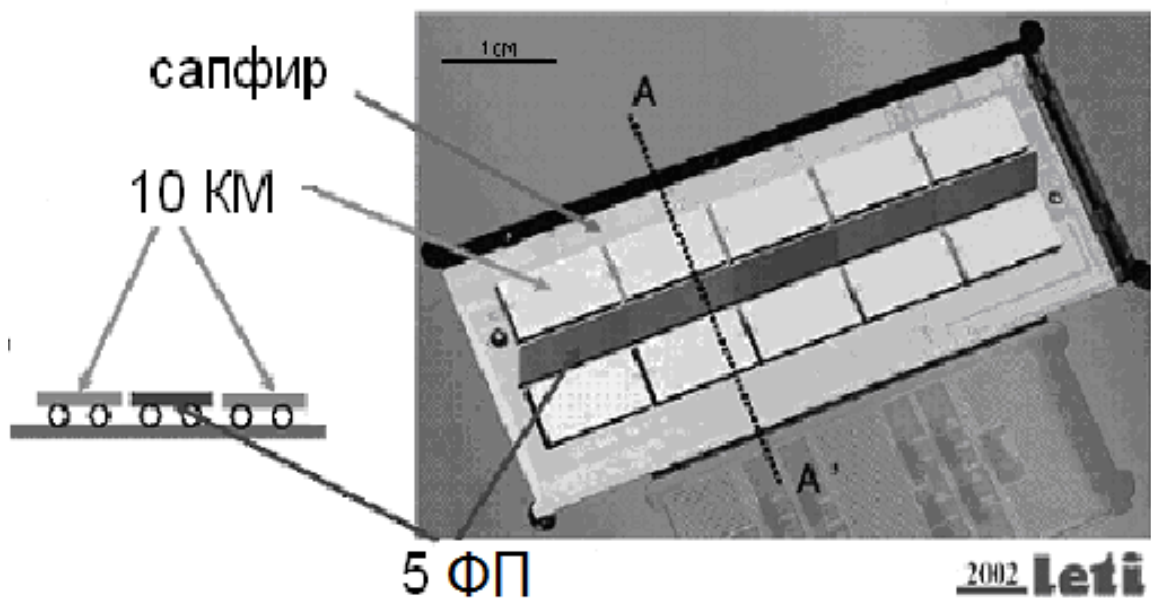


Рисунок 1.8 – Фотография МФПУ, состоящего из пяти ФП форматом 300 на 2 ФЧЭ с шагом 30 мкм и 10 КМ [12].

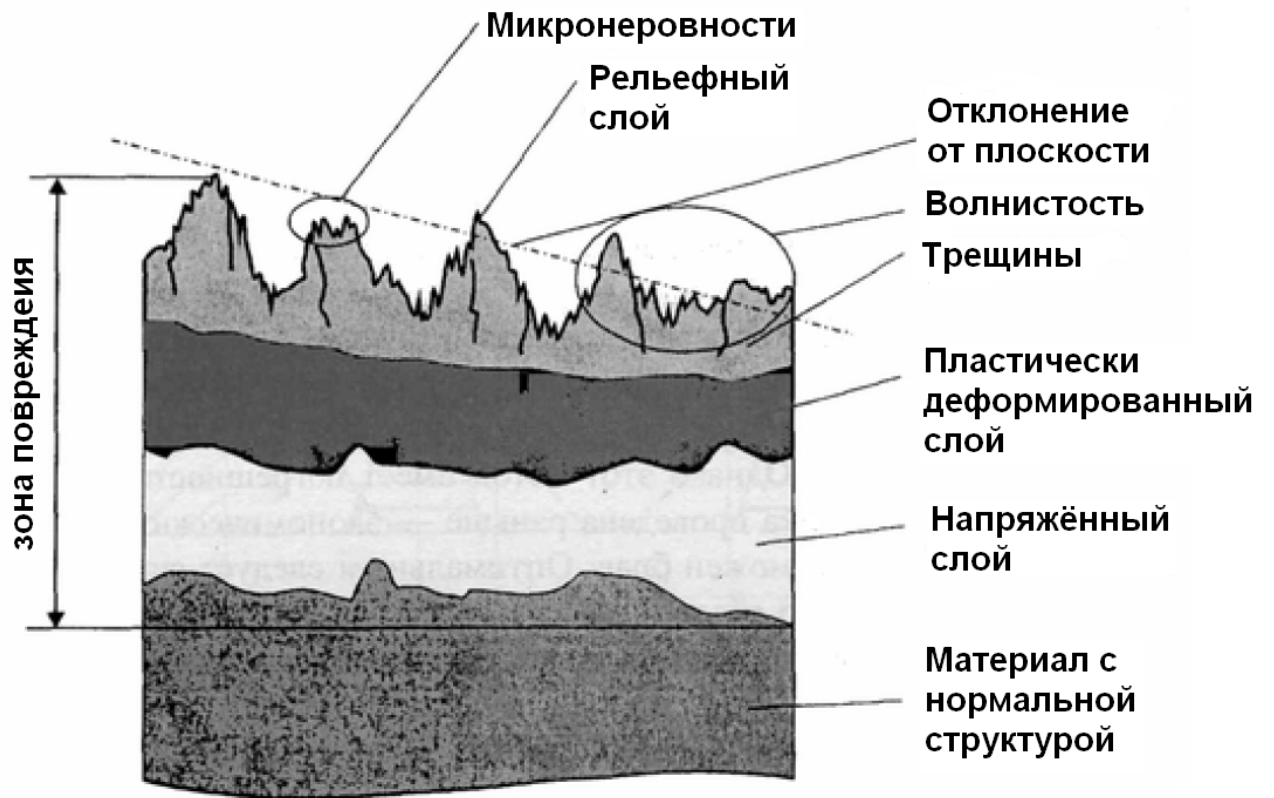


Рисунок 1.9 – Структура нарушений в полупроводниковых материалах после разрезания их алмазными дисками.

плотность дислокаций, остаточные напряжения в материале и неровности рельефа. Рисунок 1.9 взят из интернета по ссылке: <http://people.overclockers.ru/RussOver/record1>. При лазерном скрайбировании вокруг канавки образуется зона термического повреждения материала. В таблице 1.1 представлены результаты исследований ширины зоны повреждения для разных методов разделения пластин.

Таблица 1.1 - Ширина зоны повреждения для разных методов разделения приборных пластин.

Размеры в микрометрах

Метод разделения	Размеры канавки в КМ		Размер сколов	Ширина зоны повреждения
	Глубина	Ширина		
Алмазное скрайбирование	1	10	15	Для Si -более 125 [13] ¹
Лазерное скрайбирование	90	15	-	Si – минимальная ширина зоны термического влияния 35 [14...17] ²
Разрезание алмазным кругом	185	45	20	Si - 20...30; Ge – 35...40; GaAs – 34...42[18]

Примечание:

1) Ширина области с повышенной концентрацией дислокаций зависит от температуры отжига, который ускоряет релаксацию упругих напряжений в материале;

2) Данные по ширине зоны повреждения при скрайбировании лазерным излучением приведены для излучения с длиной волны 1,064 мкм, частоте повторения импульсов 10^3 Гц и скоростью разрезания пластин с КМ около 10^3 мкм/сек.

Рассчитаем минимальный ПС для МФПУ без потерь информации в изображении, в соответствии с табличными данными, по формуле:

$$ПС=W+2\Delta+2L+D, \quad (1.1)$$

где W – ширина скрайбовой канавки;

Δ – неровность поверхности раскола приборной пластины;

L – ширина зоны повреждения;

D - диаметр p-n переходов.

ПС в МФПУ без потерь информации в изображении при разделении пластин с ФП на подложке из GaAs алмазным кругом составит более 78 мкм (при L равном 34 мкм, W и Δ равном нулю (разрезание на всю глубину ФП) и D равном 10 мкм) и 50 мкм для пластин с КМ. При применении лазерного разрезания пластин с КМ ПС более 80 мкм. В [19] показано, что при лазерном скрайбировании пластин с ФЧЭ, сформированных в плёнках кремния на стекле, излучением с длиной волны 0,532 мкм расстояние от канавки до краевых ФЧЭ, чувствительных в видимой области спектра (фотоэлемент в солнечной батарее), составляет более 97 мкм. Стандартные режимы скрайбирования и разрезания пластин на чипы механическими или лазерными методами, в которых применяются лазеры с длинами волн 0,510 мкм (ЛПМ (лазер на парах меди) «Кулон 15», «Каравелла1» и «Crystalas CVL-C») и 1,064 мкм (установки на основе твердотельных лазеров «ЛТКМ-20»), не в состоянии обеспечить

изготовление МФПУ без потерь информации в изображении с ПС менее 78 мкм.

В отличие от механических способов разделения пластин с КМ и ФП, где уменьшение ширины зоны повреждения представляет достаточно трудную задачу, из-за отсутствия механического воздействия на полупроводниковый материал подбором режимов лазерного скрайбирования возможно уменьшение ширины зоны повреждения. Для выяснения этих режимов проведём анализ изменений свойств полупроводниковых материалов в пятне излучения и в окружающем материале при разных плотностях энергии и длинах волн. По результатам анализа литературных данных выберем лазерный источник для скрайбирования пластин с КМ и ФП.

1.2. Выбор лазерного источника для скрайбирования пластин с кремниевыми мультиплексорами и фотоприёмниками

Рассмотрим изменение условий поглощения энергии лазерного излучения полупроводниковыми материалами при изменении фазовых состояний поверхности во время действия импульса [20]. При облучении поверхности полупроводниковых материалов коротким лазерным импульсом в них образуются электронно-дырочные пары. Их концентрация «g» определяется соотношением:

$$g = (1 - R) \cdot I \cdot \alpha / (h\nu) \quad (1.2)$$

где R – коэффициент отражения,

I – плотность энергии лазерного излучения,

α - коэффициент поглощения излучения материалом, зависящий от длины волны и температуры,

$h\nu$ - энергия фотона (E_f) [21].

Из-за очень высокой плотности энергии концентрация электронно-дырочных пар в кремнии при облучении поверхности импульсом длительностью несколько пикосекунд достигает 10^{21} см⁻³ [22]. При этом за время возбуждения электрона (10^{-12} сек [23]) часть электронов преодолевает потенциальный барьер на границе материала (внешний фотоэффект). Функция распределения по энергиям электронов, оставшихся в материале, отличается от равновесной, то есть появляются «горячие электроны» [24]. Время термолизации «горячих электронов» в материале составляет от 10^{-13} до 10^{-12} сек [25]. За это время происходит «охлаждение» электронов до энергий, соответствующих дну зоны проводимости [26]. По оценкам, представленным в [27], для рассеяния 1 эВ электронам требуется около 20 соударений с решёткой. Расстояние, на котором электроны «охлаждаются», составляет несколько сотен ангстрем [22]. На рисунке 1.10 [21] представлены графики продолжительности различных процессов релаксации возбуждённых электронов и дырок после лазерного облучения поверхности в зависимости от их концентрации в GaAs. Графики, отражающие продолжительность Оже-рекомбинации от концентрации возбуждённых электронов и дырок в GaAs, взяты из [28].

Отметим, что при облучении поверхности полупроводниковых материалов лазерным импульсом длительностью более 10^{-12} сек., изменение фазового состояния поверхности становится важным фактором, влияющим на характер поглощения энергии. Рассмотрим изменение поглощения энергии

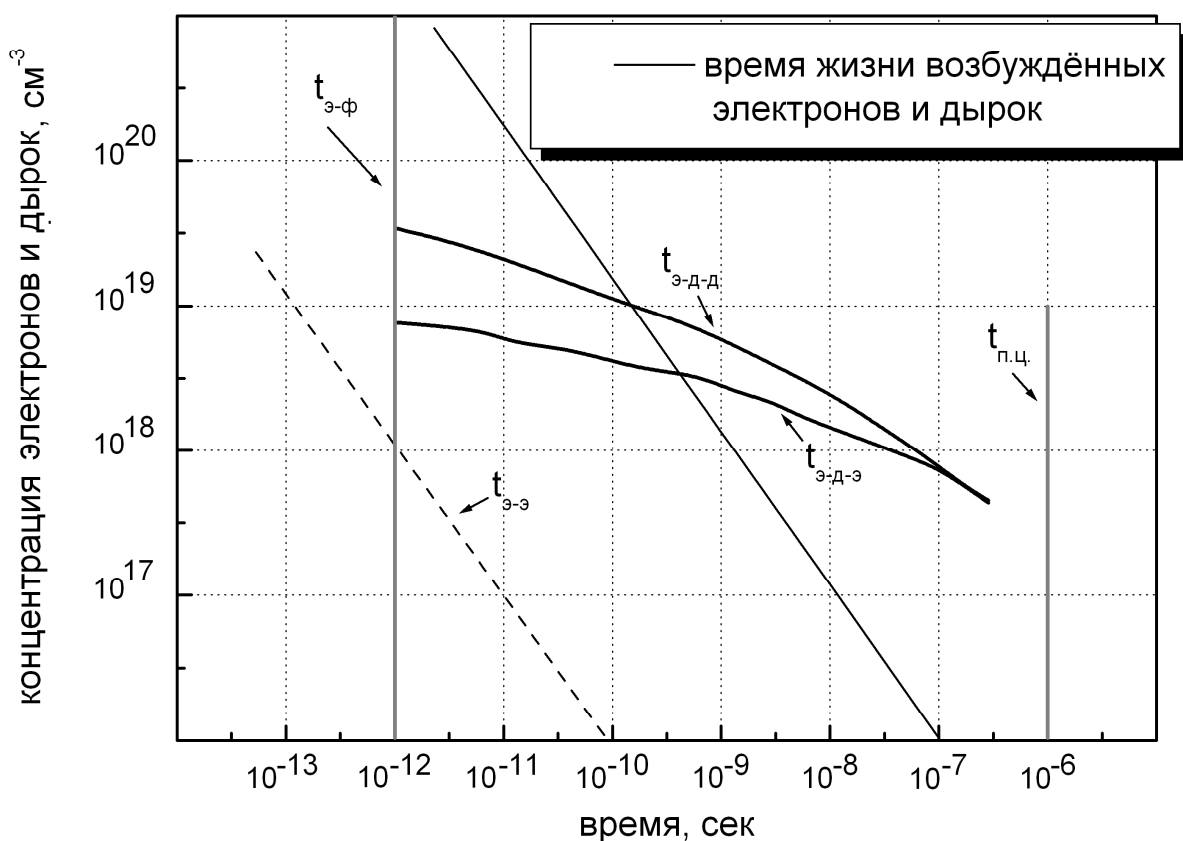


Рисунок 1.10 – Графики продолжительности различных процессов релаксации возбуждённых электронов и дырок в зависимости от их концентрации в GaAs после лазерного облучения поверхности.

$t_{э-э}$ - время релаксации энергии электронов по механизму электрон – электрон [21];

$t_{э-ф}$ - время взаимодействия электронов с оптическими фотонами[21];

$t_{п.ц.}$ - безизлучательная рекомбинация на глубоких примесных центрах[21];

$t_{э-д-э}$ - Оже - рекомбинация с участием двух электронов и одной дырки [28];

$t_{э-д-д}$ - Оже - рекомбинация с участием двух дырок и одного электрона [28].

лазерного излучения при изменении фазовых состояний. Известно, например из [29], что толщина слоя, в котором поглощается основная часть излучения, равна:

$$L_{\alpha} = 1/\alpha , \quad (1.3)$$

где α – коэффициент поглощения материала.

Для длины волны излучения, равной 0,337 мкм, толщина слоя « L_{α} » в Si, GaAs и КРТ меньше 0,1 мкм [30].

Из [31] известно, что достаточно возбуждения десяти и более процентов валентных электронов для разрушения кристаллической структуры материала и в последующем образование расплава. Причём дефекты кристаллической структуры являются центрами, с которых начинается расплав поверхности [32].

Увеличение диаметра области расплава поверхности L_D за время действия импульса может быть вычислено из соотношения:

$$L_D = \sqrt{D \cdot \tau} , \quad (1.4)$$

где D - коэффициент температуропроводности материала,

τ - время нахождения материала в жидком агрегатном состоянии (суммарное время длительности импульса излучения и времени остывания расплава) [29].

Коэффициент температуропроводности материала, который характеризует скорость изменения температуры в нестационарных тепловых процессах, связан с тепловыми параметрами материала соотношением:

$$D = \lambda / \rho \cdot c , \quad (1.5)$$

где λ - коэффициент теплопроводности материала,

ρ - удельная плотность материала,

c – теплоёмкость материала.

В [22] показано, что за время действия импульса лазерного излучения длительностью (10...50) на 10^{-12} сек на длине волны излучения 0,531 мкм и плотностях энергии 0,03...0,60 Дж/см² увеличение областей расплава поверхностей Si и GaAs составляет сотни ангстрем. Для более продолжительных импульсах излучения ((10...50) на 10^{-9} сек.) область расплава увеличивается до нескольких микрон.

При расплаве поверхности полупроводниковых материалов коэффициент отражения поверхности увеличивается, при этом уменьшается поглощение энергии материалом. При расплаве поверхности кремния количество ионов в выбросе пара с поверхности снижается на 50 % (плотность энергии в импульсе мене 6,30 Дж/см²) [33]. Для германия при плотностях излучения до 3,90 Дж/см² количество эмитировавших ионов уменьшается на 30 и более процентов. В эксперименте применялся лазер, работающий на длине волны 0,248 мкм, с длительностью импульса 25 на 10^{-9} сек. Регистрация количества ионов в выбросе осуществлялось время - пролётным методом (измерение распределения скоростей атомов, вылетевших с поверхности полупроводниковых материалов при лазерном облучении).

Изменение коэффициента отражения в полупроводниковых материалах наблюдается до начала плавления поверхности и при плотностях излучения, при которых плавления поверхности не происходит [34]. Время изменения коэффициентов отражения поверхностей Si, GaAs и InSb экспериментально определены авторами работы. В эксперименте применялось лазерное излучение с длиной волны 0,830 мкм, длительностью импульса 1,2 на 10^{-13} сек. и плотностью энергии 0,12 Дж/см². Изменение коэффициента отражения поверхности регистрировалось по интенсивности отражённого света охлаждаемой ПЗС камерой. Авторами выяснено, что время изменения

коэффициентов отражения полупроводниковых материалов зависит от плотности энергии излучения. Для плотностей энергии, превышающих порог плавления в 2 раза, изменение коэффициента отражения поверхности до значений, соответствующих расплаву материала, происходит быстрее 10^{-12} сек. С уменьшением плотности энергии изменение коэффициента отражения замедляется, но не превышает 3 на 10^{-12} сек.

На основе анализа литературных данных выяснено, что время основного поглощения энергии излучения составляет (1...3) на 10^{-12} сек., причём увеличение коэффициента отражения происходит на всей площади пятна излучения. В оставшееся время до окончания импульса излучения для плотностей энергии менее $3,90 \text{ Дж/см}^2$ из-за увеличения коэффициента отражения поглощение энергии излучения составляет всего 30...50 %.

После окончания импульса излучения расплав на поверхности начинает остывать. В [31] представлены результаты исследований времени нахождения поверхности в расплавленном состоянии после окончания импульса излучения для разных плотностей энергии и длин волн. Зависимость времени нахождения поверхности полупроводниковых материалов Si, Ge и GaAs в расплавленном состоянии после окончания импульса излучения от плотности энергии и длины волны представлена на рисунке 1.11. В соответствии с рисунком, время нахождения поверхности полупроводниковых материалов в расплавленном состоянии составляет (20...1800) на 10^{-9} сек. На длине волны 0,531 мкм пороговая плотность энергии начала плавления GaAs составляет $0,10 \text{ Дж/см}^2$; для Ge – $0,15 \text{ Дж/см}^2$ и Si – $0,33 \text{ Дж/см}^2$, а на длине волны 1,064 мкм для Si составляет около $6,00 \text{ Дж/см}^2$.

При фазовом переходе расплава в пар выброс затеняет поверхность материала и препятствует поглощению излучения. На рисунке 1.12 показаны

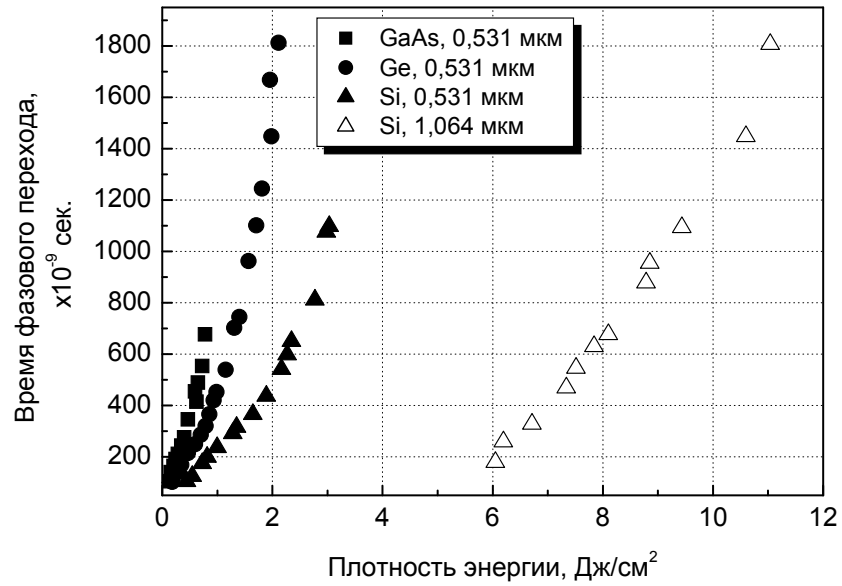


Рисунок 1.11 – Зависимость времени нахождения поверхности полупроводниковых материалов Si, Ge и GaAs в расплавленном состоянии после окончания импульса лазерного излучения от плотности энергии и длины волны [31].

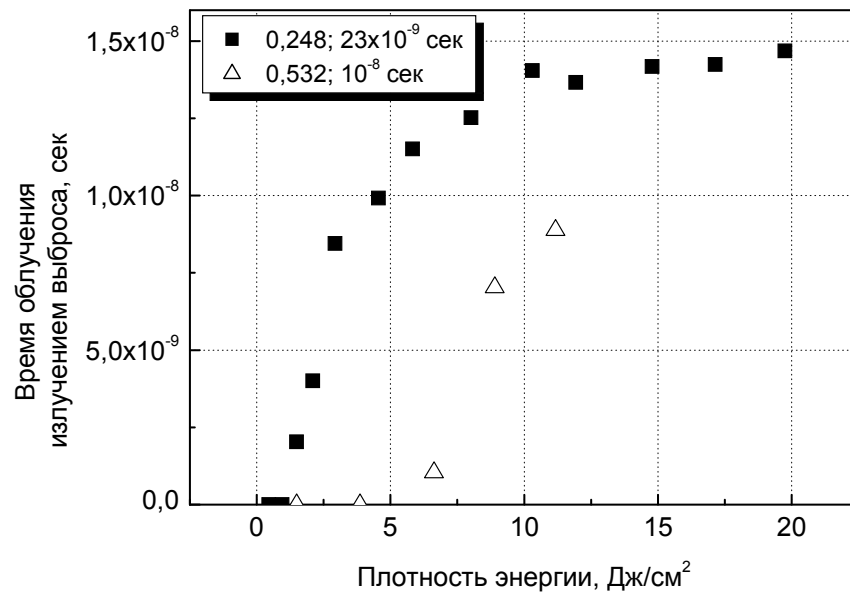


Рисунок 1.12 – Зависимости времени затенения поверхности кремния выбросом во время импульса излучения от плотности энергии для длин волн 0,248 и 0,531 мкм [35].

зависимости времени затенения поверхности кремния выбросом во время действия импульса излучения от плотности энергии для длин волн 0,248 и 0,531 мкм [35]. Из рисунка видно, что при облучении поверхности кремния лазерным излучением с длиной волны 0,248 мкм пороговая плотность энергии начала парообразования составляет около $1,00 \text{ Дж/см}^2$, а для длины волны 0,531 мкм – $4,00 \text{ Дж/см}^2$. Для плотностей энергии менее $3,50 \text{ Дж/см}^2$ при длине волны излучения 0,248 мкм и длительности импульса $23 \text{ на } 10^{-9} \text{ сек}$, и плотностей энергии менее $8,20 \text{ Дж/см}^2$ при длине волны излучения 0,531 мкм и длительности импульса $7 \text{ на } 10^{-9} \text{ сек}$. выброс пара с поверхности происходит после окончания импульса излучения.

На основе анализа литературных данных выяснено, что за время действия одного импульса характер взаимодействия излучения с полупроводниковыми материалами зависит от изменений агрегатных состояний материала и имеет пульсирующий характер при длительностях импульса превышающих время выброса пара.

На основе описанных в литературе результатов исследований, сведённых в таблицу 1.2, можно сделать вывод о том, что для лазерного скрайбирования пластин с КМ и ФП длина волны должна быть менее 0,531 мкм, а длительность импульса менее $23 \times 10^{-9} \text{ сек}$.

Рассмотрение технических характеристик промышленно выпускаемых лазеров показало, что предъявляемым требованиям удовлетворяют:

- 1) ЛГИ 21 (Россия): длина волны 0,337 мкм, длительность импульса $7 \text{ на } 10^{-9} \text{ сек}$. при средней мощности излучения $2 \text{ на } 10^{-3} \text{ Вт}$. Частоты повторения импульсов - 10, 25, 50 и 100 Гц (на частоте повторения 100 Гц мощность в импульсе $2 \text{ на } 10^3 \text{ Вт}$). Глубина поглощения в Ge и Si составляет менее 10^{-2} мкм , в GaAs – около 10^{-2} мкм ;

2) Серия эксимерных лазеров фирмы «COMPro» (США): длины волн 0,193 мкм, 0,248 мкм, 0,308 мкм и 0,353 мкм, длительность импульса $10 \dots 25$ на 10^{-9} сек. при средней мощности излучения $4 \dots 30$ Вт и частоте повторения 100 Гц;

Таблица 1.2 – Влияние длин волны излучения на изменение пороговых плотностей энергий плавления и парообразования в Ge, Si GaAs.

Параметры лазерного излучения	Материал	Длина волны, мкм.	
		0,248	0,531
Глубина поглощения ($1/\alpha$), мкм.	Ge	$<10^{-2}$	$<10^{-1}$
	Si	$<10^{-2}$	1
	GaAs	$<10^{-2}$	10^{-1}
Плотность энергии начала плавления, Дж/см ²	Ge	-	0,15
	Si	-	0,33
	GaAs	-	0,1
Плотность энергии начала парообразования, Дж/см ²	Si	1	4
Время задержки выброса, сек.	Si	До 3,50 Дж/см ² 23×10^{-9}	До 8,20 Дж/см ² 7×10^{-9}

В данной работе использован лазер ЛГИ 21: длина волны излучения 0,337 мкм, длительность импульса 7 на 10^{-9} сек., средняя мощность излучения 2 на 10^{-3} Вт. и частотами повторения импульсов - 10, 25, 50 и 100 Гц (на частоте повторения 100 Гц мощность в импульсе составляет около 2 на 10^3 Вт).

1.3. Изменение физических свойств полупроводниковых материалов при воздействии лазерного излучения

Известна модель, где рассматривается область взаимодействия излучения с материалом (пятно излучения) ограничиваемая диаметром сформированной лунки (или канавки) [36]. Нагрев материала вокруг лунки или канавки за время действия импульса, в соответствии с моделью, происходит из-за диффузии тепла от стенок в объём материала. Стенки канавки нагреваются выше температуры плавления и парообразования материала, во время выброса пара, давлением паров расплавленный материал на стенках выдавливается на поверхность. Расплав на поверхности мешает последующим технологическим операциям, например, гибридизации ФПУ и для ограничения выдавливания расплава на поверхность применяют либо фемтосекундные импульсные лазерные источники [37], либо диафрагмирование излучения [38], либо скрайбирование поверхности в струе воды [39]. Модель, ограничивающая пятно размерами лунки [36], не принимает во внимание то, что в распределении плотности энергии после фокусирующей линзы, на периферии пятна облучения, существует область с плотностью энергии менее порога парообразования. В работе [40] показано, что при облучении поверхности КРТ зона расплава находится в пределах пятна. На рисунке 1.13 представлены две РЭМ-фотографии поверхности КРТ после 1 и 32 импульсов излучения, следующих с частотой повторения 20 Гц. Длина волны лазерного излучения 0,775 мкм, длительность импульса 2×10^{-13} сек. Энергия в импульсе - 10^{-6} Дж. На фотографиях видно, что диаметр пятна превышает диаметр лунки и области с

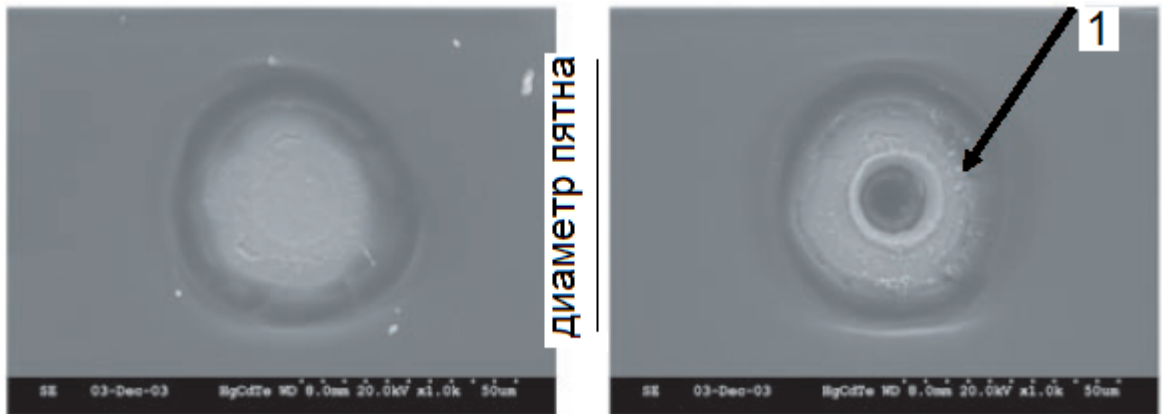


Рисунок 1.13 - РЭМ-фотографии поверхности КРТ после 1 (левая) и 32 (правая) импульсов излучения. Цифрой 1 на фотографии обозначена внешняя граница области расплава поверхности КРТ [40].

выдавленным на поверхность расплавом. Рассмотрим изменения в материале при разных плотностях энергии излучения:

1.3.1. Характер процессов при плотности энергии, превышающей порог парообразования в материале

Известно [32], что при переходе расплава в пар из-за теплового расширения на границе пар-материал возникает волна давления в материале. В кремнии давление пара составляет около 3×10^6 Па при длительности импульсов излучения (20...30) на 10^{-9} сек. и плотностях энергии (20...30) на 10^6 Вт/см². Этого давления достаточно для возникновения микротрещин на поверхности длиной до 10 мкм. В [41] дан анализ условий возникновения трещин: - если тепловая энергия выделяется быстро (короткие лазерные импульсы), то возникает волна давления, которая распространяется по всему материалу. При достижении края материала она отражается в виде волны разряжения. Если амплитуда волны разряжения превышает предел прочности материала, то возникают разрушения в материале.

Исследования результатов разрушения поверхности в монокристаллах CdTe лазерным излучением с плотностью энергии 10^6 Вт/см² и выше представлены в [42]. Пластины имели ориентации {100}, {110} и {111}. Авторами была определено, что для образования лунок в пластинах с ориентацией {110} плотность мощности должна быть более 10^6 Вт/см². При этом трещины вокруг лунки не возникают. С увеличением плотности мощности более 2×10^6 Вт/см² вокруг лунок появлялась система трещин, которые являются следами пересечения двух плоскостей скола {110} и {111} с поверхностью

{110}. Химическим травлением поверхности {111} в селективном травителе для CdTe, при котором образуются ямки травления в местах выхода дислокаций на поверхность, было определено, что концентрация дислокационных ямок травления вокруг лунок резко возрастает с 10^5 до $10^8 \dots 10^9$ см⁻². Вокруг трещин увеличения концентрации ямок травления не было зарегистрировано. Этот эксперимент показывает, что в полупроводниковых материалах существуют пороговые плотности энергии, при превышении которых вокруг лунок образуются трещины, а в окружающем материале увеличивается концентрация дислокаций.

1.3.2. Характер процессов при плотности энергии, превышающей порог расплава поверхности материала

При подаче импульса излучения с плотностью энергии, превышающей порог расплава материала, в пятне излучения происходит удаление дислокационных петель и дислокаций несоответствия, присутствовавших до облучения [43, 44]. Последующие термические отжиги не приводят к возникновению новых дислокаций [45].

Анализ воздействия на полупроводниковые материалы излучения лазерных источников с разными длинами волн не всегда позволяет сопоставить экспериментальные данные, так как пороговые плотности энергии плавления и парообразования в полупроводниковых материалах зависят от длины волны излучения. Из рисунка 1.11 видно, что для кремния при облучении поверхности излучением с длиной волны 0,531 мкм (глубина поглощения излучения около 1 мкм) пороговая плотность энергии плавления материала составляет

0,33 Дж/см². Увеличение длины волны более 1 мкм (глубина поглощения составляет 10² мкм) приводит к увеличению пороговой плотности энергии начала плавления до 6,00 Дж/см².

При неравномерном распределении плотности энергии в поперечном сечении излучения в пятне, после окончания импульса, присутствуют области с разными скоростями остывания материала. В результате этого, в пятне присутствуют области, имеющие как кристаллическую, так и аморфную структуру [46, 47]. Экспериментально было определено, что кристаллическая структура формируется, когда скорость остывания поверхности менее 10¹⁰ град/сек [48].

В [49] описаны изменения электрофизических параметров p⁺-n переходов и транзисторов в КМ, находящихся непосредственно в пятне воздействия излучения с длиной волны 1,064 мкм и длительностью импульса 60 на 10⁻⁹ сек. Плотность энергии излучения не превышала порог парообразования в кремнии. Авторы выяснили, что при облучение только p⁺-областей значения токов, протекающих через p⁺-n переходы при напряжениях смещения 5 В, увеличиваются. Последующий отжиг КМ в атмосфере азота при температурах 686...1086 К приводит к восстановлению начальных значений токов. Авторами обнаружено, что, если металлургическая граница p⁺-n перехода оказывалась в области расплава, то отжиги не приводили к восстановлению начальных значений токов. После облучения поверхности, кроме увеличения значений токов, регистрировалось снижение напряжений начала пробоя p⁺-n переходов. Увеличение токов через p⁺-n переходы было замечено только при средней мощности излучения более 0,5 на 10⁻³ Вт. Для определения глубины воздействия лазерного излучения использовались p⁺-n переходы с разной толщиной p⁺-областей (от 0,4 до 2,5 мкм). Облучение осуществлялось только в

p^+ -области излучением со средней мощностью (0,75 и 2,00) на 10^{-3} Вт. Глубина плавления кремния при средней мощности лазерного излучения 2 на 10^{-3} Вт составила 0,5...0,6 мкм. Результаты исследования изменения токов через обратно включенные p^+ - n переходы в КМ от мощности излучения представлены на рисунке 1.14. Изменения токов при обратном включении p^+ - n переходов для разных толщин p^+ -областей после облучения лазерным излучением со средней мощностью (0,75 и 2,0) на 10^{-3} Вт представлены на рисунке 1.15.

1.3.3. Характер процессов при плотности энергии, недостаточной для плавления поверхности материала

На основе анализа результатов исследований, проведённых разными авторами, по облучению поверхности полупроводниковых материалов лазерным излучением с плотностями энергии при которых не происходит плавления поверхности выяснено, что в пятне излучения:

- а) образуются новые или удаляются существовавшие уровни в запрещённой зоне;
- б) возникают новые дислокации на поверхности полупроводниковых материалов;
- в) На поверхности $Hg_{1-x}Cd_xTe$ (при $x=0,22$) изменяется химический состав.

Образование новых и исчезновение существующих уровней в запрещённой зоне в приповерхностных слоях полупроводниковых материалов при лазерном облучении наблюдали многие авторы, например, [50....53].

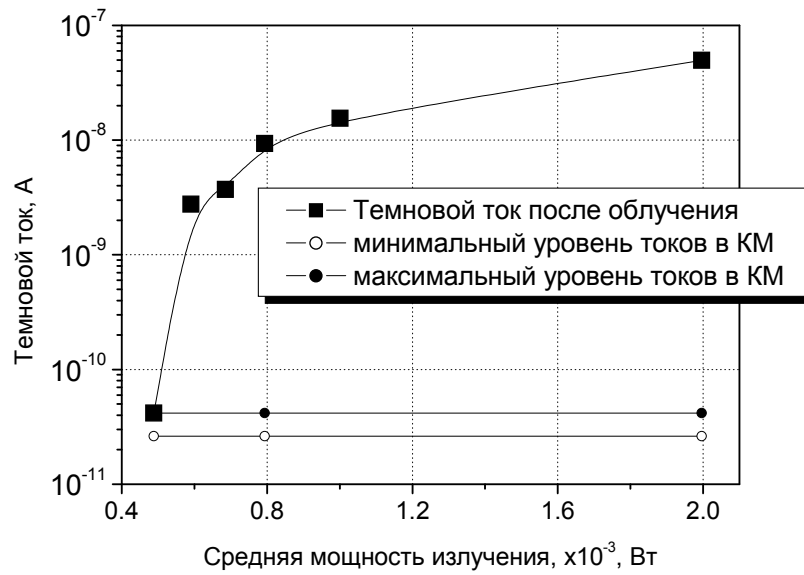


Рисунок 1.14 - Значения токов при обратном включении p^+ - n переходов в КМ при напряжении 5В в зависимости от мощности лазерного излучения [49]. Область между двумя линиями с точками – разброс значений токов до облучения.

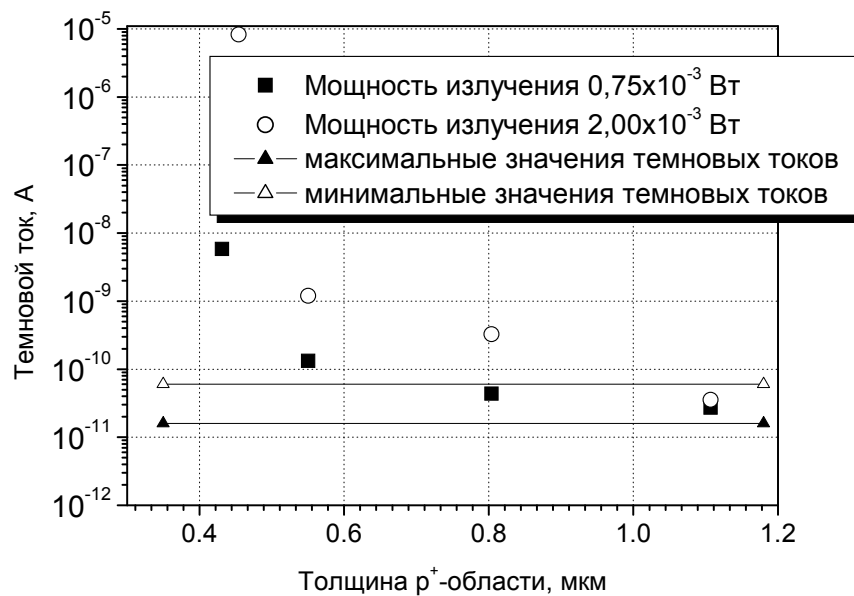


Рисунок 1.15 - Значения токов при обратном включении p^+ - n переходов в КМ при напряжении смещения 5В от толщины p^+ -области после облучения лазерным излучением со средней мощностью (0,75 и 2,00 на 10^{-3} Вт [49]. Область между двумя линиями с треугольниками – разброс значений токов до облучения.

В [50] методом релаксационной спектроскопии глубоких уровней (Deep level transient spectroscopy (DLTS)) исследованы морфологические изменения в n-Si. Зафиксировано появление новых уровней с концентрацией около 10^{14} см⁻² при облучении поверхности лазерным излучением с длиной волны 0,531 мкм и длительностью импульсов 8 на 10^{-9} сек. в диапазоне плотностей энергий от 0,06 до 0,40 Дж/см². В [51] методом ёмкостной спектроскопии после облучения поверхности n-Si, излучением с длинами волн 1,053 и 1,064 мкм при длительности импульсов 140 на 10^{-9} сек., зафиксировано образование двух новых уровней с энергиями 0,19 и 0,33 эВ (диапазон удельных сопротивлений Si, используемых в исследовании составил 0,5...5,0 Ом/см). После отжигов при температурах 783...983 К эти уровни полностью исчезали.

Исследования влияния облучения на n-GaAs не показали образования новых уровней, но, начиная с плотностей энергии более 0,30 Дж/см², были зафиксированы морфологические изменения в материале, связанные с исчезновением А-центров (с энергией 0,83 эВ), присутствовавших в исходном состоянии с концентрацией 5 на 10^{15} см⁻³. Параметры использованного лазера: длина волны - 0,69 мкм; длительность импульсов – 30 на 10^{-9} сек. и плотность энергии около 0,64 Дж/см² [52, 53].

Образование новых дислокаций на поверхности кремния было обнаружено авторами работы [54]. До плотностей энергии, при которых поверхность кремния начинает плавиться (1,55 Дж/см²), наблюдалось возникновение новых дислокаций на поверхности. Длина волны излучения 0,694 мкм, длительность импульса около 20 на 10^{-9} сек. Увеличение концентрации дислокаций на поверхности кремния зарегистрировано и при облучении её лазерным излучением с длиной волны 1,064 мкм [55]. При облучении поверхности p-CdTe лазерным излучением с длиной волны

0,694 мкм и длительностью 2 на 10^{-8} сек. также регистрируется увеличение концентрации дислокаций и изменение (уменьшение) темнового тока [56]. На рисунке 1.16 представлены фотографии поверхностей p-CdTe после травления в дислокационных травителях до (рисунок 1.16.а) и после облучения поверхности p-CdTe плотностями энергий 0,12 и 0,16 Дж/см² (рисунок 1.16.б и в). Концентрация дислокаций до облучения составляла 10^2 см⁻². Взаимосвязь изменения концентрации дислокаций с изменениями ВАХ p-n переходов после лазерного облучения поверхности неизвестна, но зависимость изменения ВАХ ФЧЭ в ФП на ГЭС КРТ при увеличении концентрации дислокаций после механического воздействия на индиевый столб, расположенный над ФЧЭ, описана в [57]. В эксперименте применялся хромокислый травитель [58], при травлении в котором на поверхности (в местах выхода дислокаций) формируются треугольные ямки травления (данный травитель применялся в экспериментах, которые будут описаны в Главе 3). Было обнаружено, что при увеличении концентрации дислокаций в 4,5 раза относительно средней по ФП ($(1...2)$ на 10^{-7} см⁻²) наблюдается увеличение токов через ФЧЭ. В работе [59] описано, что после облучения КРТ наблюдается снижение фоточувствительности и увеличение $1/f$ шумов (длина волны лазерного излучения 0,694 мкм, плотности энергии изменялась от 0,05 до 0,12 Дж/см²).

Изменение химического состава поверхности КРТ в облучённой области описано в [60]. Применяв методы Резерфордского обратного рассеяния (Rutherford backscattering- RBS), Оже-спектроскопии и измерение глубинных профилей (Auger Sputter Depth Profiling (ASDP)), представленное на рисунке 1.17, авторами было зарегистрировано увеличение концентрации ртути (Hg) и

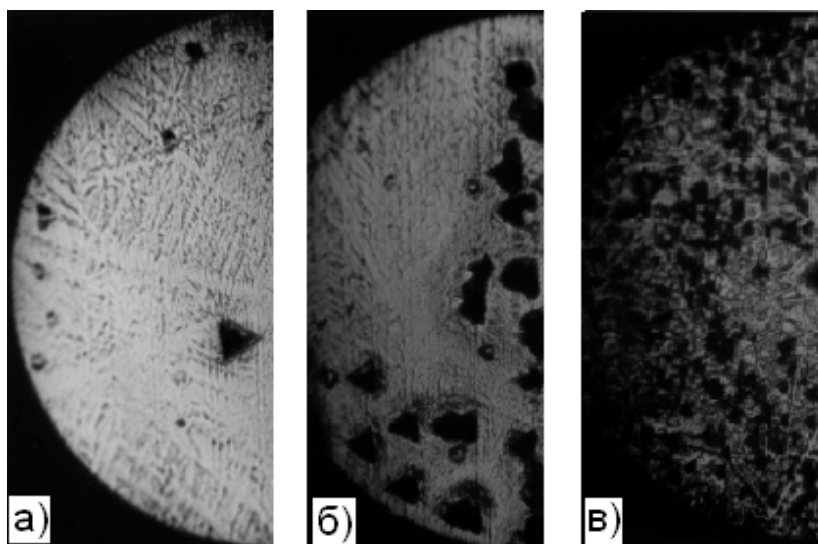


Рисунок 1.16- Фотографии дислокационной структуры поверхности p-CdTe после травления в дислокационном травителе. Необлучённая область - рисунок 1.14.а, и после облучения поверхности излучением с плотностью энергии 0,12 и 0,16 Дж/см² (рисунки 1.14.б и 1.14.в соответственно) [56].

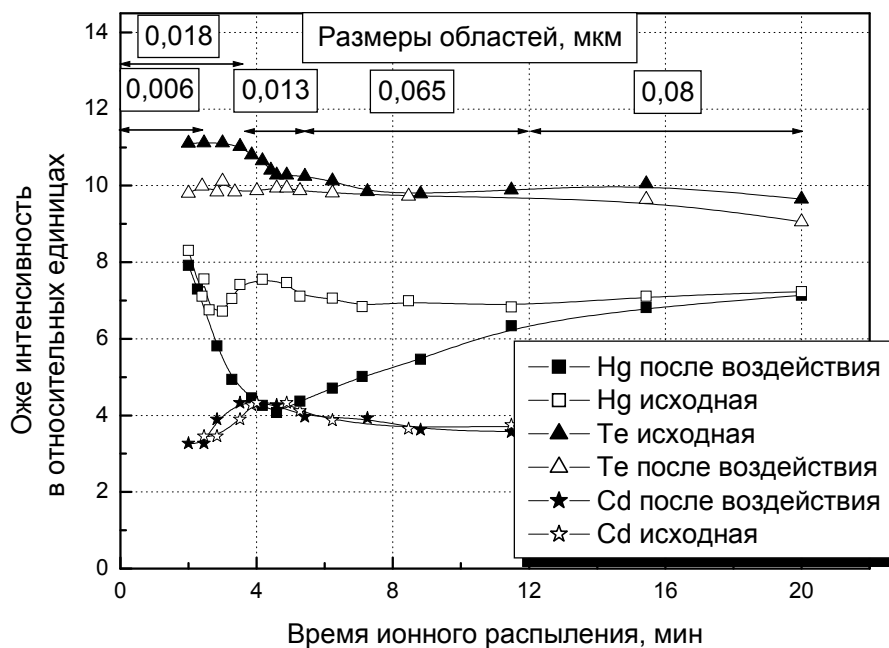


Рисунок 1.17 - Изменение концентрации Hg, Cd и Te по глубине, измеренных методом ASDP, для облучённой (светлые фигуры) и необлучённой (тёмные фигуры) участков поверхности КРТ [48]. Параметры лазерного излучения: длина волны 0,531 мкм и плотность энергии 0,143 Дж/см² [60].

теллура (Te) на поверхности. На рисунке показаны результаты ASDP измерений концентраций Hg, Cd и Te по глубине для облучённой и необлучённой областей. Параметры лазерного излучения плотность энергии $0,14 \text{ Дж/см}^2$, длина волны $0,531 \text{ мкм}$ и длительность импульса – $8 \text{ на } 10^{-9} \text{ сек.}$ При данной плотности энергии видимых изменений на поверхности авторами не было обнаружено. Исследование, проведённое авторами, показало, что глубина, на которой заметно изменение химического состава КРТ, составляла более 10^{-3} мкм . Наиболее сильное изменение концентрации по глубине наблюдается для ртути. На поверхности было зафиксировано увеличение её концентрации, а, начиная с глубины $6 \text{ на } 10^{-3} \text{ мкм}$, - уменьшение. В точке минимума концентрация ртути, по расчётам авторов, составляет $55...60 \%$ от концентрации в необлучённой области. Начиная с глубины $18 \text{ на } 10^{-3} \text{ мкм}$ концентрация ртути постепенно восстанавливается до исходных значений. Протяжённость этой области, в соответствии с рисунком, составляет около $65 \text{ на } 10^{-3} \text{ мкм}$. Уровень концентрации теллура на поверхности в области облучения также превышает концентрацию теллура на необлучённой поверхности на $10...20 \%$. Глубина, на которой концентрация теллура не меняется, составила около $22 \text{ на } 10^{-3} \text{ мкм}$. Анализ RBS спектров этой же поверхности также показал изменения концентрации Hg по глубине.

Чувствительность концентрации Hg на поверхности к облучению подтверждается и в других работах, например, [61]. При лазерном воздействии на КРТ, помещённого в герметичную ампулу [62], или при уменьшении времени облучения поверхности [63] происходит уменьшение изменения концентрации Hg на поверхности. Например, при облучении поверхности $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (для x , равного $0,20...0,31$) лазерным источником с длиной волны $1,064 \text{ мкм}$ и длительностью импульса $8 \text{ на } 10^{-9} \text{ сек.}$ в атмосфере аргона

(давление 20 атм.) изменение состава поверхности КРТ составляет менее 2 % [64].

Концентрация дефектов типа вакансии и междоузлие в нарушенном слое достигает значений $10^{18} \dots 10^{20} \text{ см}^3$ [65]. Восстановление значений токов через p-n переходы (раздел 1.3.2) после лазерного облучения отжигом может быть объяснено восстановлением структуры нарушенного слоя.

1.4. Изменение физических свойств полупроводниковых материалов в зоне повреждения

В [56] описаны эксперименты по исследованию зоны повреждения в p-CdTe, где часть поверхности в пятне излучения закрывалась металлической пластинкой. На рисунке 1.18 представлены фотографии поверхности p-CdTe в зоне повреждения после травления в дислокационном травителе при облучении поверхности излучением с плотностями энергии 0,12 и 0,16 Дж/см². На рисунке 1.19 представлены темновые токи в p-CdTe в зависимости от плотности энергии для областей, подвергнутой облучению и закрытой металлической пластинкой. Из графиков видно, что темновой ток уменьшается при увеличении плотности энергии излучения, но для зоны повреждения до 0,08 Дж/см² он неизменен. Авторы также выяснили, что темновой ток в зоне повреждения восстанавливается до исходных значений за 24 часа. Причиной формирования дислокаций в закрытой области, по мнению авторов статьи, является возникновение механических напряжений в p-CdTe, вызванных акустическими волнами широкого диапазона частот [66]. В [67] описан эффект фононной фокусировки (концентрирование потока энергии акустическим полем) в

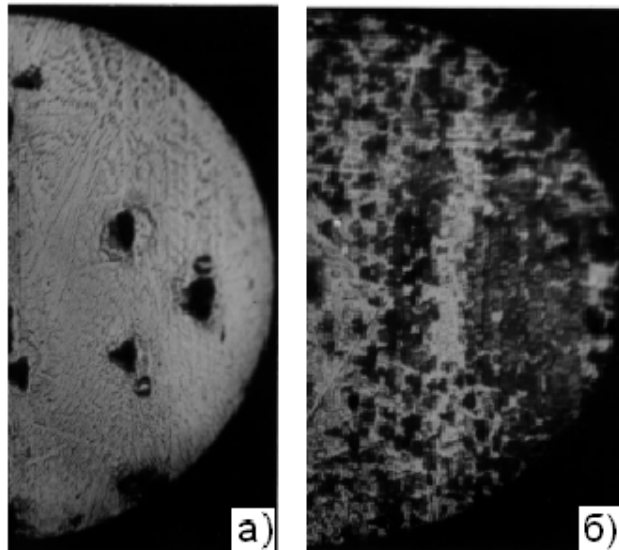


Рисунок 1.18 - Фотографии поверхностей p-CdTe в зоне повреждения после травления в дислокационном травителе при плотностях энергии в пятне излучения 0,12 и 0,16 Дж/см² [56].

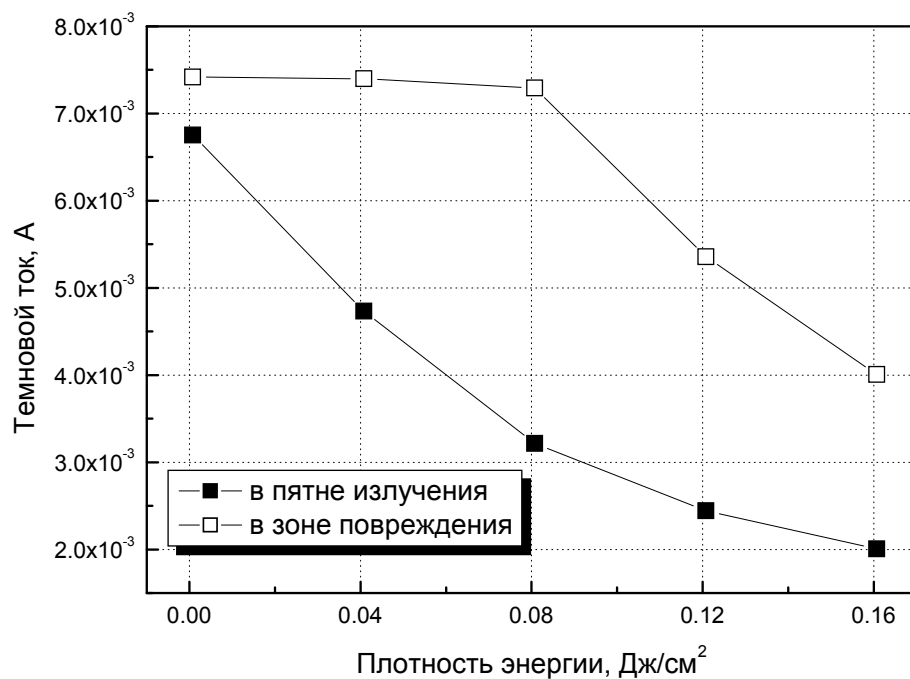


Рисунок 1.19 – Темновой ток в кристалле p-CdTe в зависимости от плотности энергии излучения в областях, которые подвергались воздействию излучения и были закрыты от излучения [56].

кремнии. В определенных направлениях, зависящих от кристаллографической ориентации кремния, под действием точечного источника возбуждения эффект фононной фокусировки был обнаружен сначала при низких температурах, а потом и при комнатных. Для генерирования в кремниевых пластинах импульсов поверхностной акустической волны (ПАВ) с длиной волны 100 мкм поверхность облучалась импульсами (длительностью $15 \cdot 10^{-9}$ сек) лазерного излучения с длиной волны 1,064 мкм. Энергия в импульсе составляла около 10^{-2} Дж, диаметр пятна около 7 мкм. В экспериментах использовались кремниевые монокристаллические пластины диаметром 10^5 мкм и толщиной 500 мкм. При облучении лазерными импульсами пластин кремния на их поверхности происходило генерирование мощных импульсов ПАВ с характерной длиной волны 100 мкм.

1.5. Фокусирование лазерного излучения

Рассмотрим фокусировку лазерного излучения линзой. Будем считать, что:

- а) длительность импульса лазерного излучения меньше времени перехода материала из твёрдого в жидкое агрегатное состояние;
- б) диаметр линзы D_L равен диаметру лазерного излучения D_I ;
- в) расстояние между линзой и полупрозрачным зеркалом на выходе из оптического резонатора менее отношения D_I^2/λ (где λ - длина волны излучения) и, в соответствии с данными статьи [38], расходимость луча можно пренебречь;

г) линза свободна от аберраций.

Известно, изменение диаметра лазерного излучения после прохождения линзы описывается уравнением светового конуса [68]:

$$2r(h)=hD_{л}/2F, \quad (1.6)$$

где $r(h)$ – радиус пятна на расстоянии h от точки фокуса;

h – расстояние, измеряемое от точки фокуса линзы;

F – фокусное расстояние линзы – расстояние между центром линзы и точкой фокуса.

Известно, что спереди и сзади от точки фокуса, в которой кружок рассеяния (диаметр лазерного излучения) не изменяется и равен:

$$d=2r=2\lambda F/D_{л}, \quad (1.7)$$

Приравняем уравнение (1.6) к (1.7) и определим расстояние от точки фокуса, где диаметр лазерного излучения становится постоянным и равен d :

$$h(F)=4\lambda F^2/D_{л}^2 \quad (1.8)$$

Введём обозначение L - глубина фокуса (область вблизи точки фокуса, где диаметр постоянен), которая равна:

$$L=2h(F)=8\lambda F^2/D_{л}^2 \quad (1.9)$$

При применении в оптических системах линз обладающих аберрациями и использования многомодовых лазеров распределение энергии излучения и диаметр пятна в точке фокуса линзы отличаются от рассмотренных выше. На рисунке 1.20.а схематично показано изменение диаметра пятна в точке фокуса линзы с аберрациями. Каждая линза обладает своей, уникальной каустикой (геометрическое место всех фокусов линзы не сходящихся в одной точке) На рисунке 1.20.б представлен результат фокусирования немонохромного излучения.

Для обозначения отклонения линзы от идеальной в литературе используют понятие качество линзы - M^2 , отражающее увеличение диаметра пятна в точке фокуса от идеального:

$$M^2 = \sqrt{1 + 8 \left(\frac{\pi C D_l^4}{F^3 \lambda} \right)}, \quad (1.10)$$

где C – безразмерный параметр, который зависит от индекса преломления и формы линзы [69].

Для идеальной линзы при Гауссовом распределении плотности энергии в сечении параметр M^2 равен 1. На рисунке 1.21 приведена расчётная кривая значений параметра M^2 в зависимости от диаметра пятна в точке фокуса (фокальной плоскости) [69]. Расчёт проведён для длины волны 0,633 мкм и линзы свободной от aberrаций с фокусным расстоянием, равным $2 \cdot 10^5$ мкм и диаметром пятна $2 \cdot 10^3$ мкм. Для оптических систем считается приемлемым, когда параметр M^2 меньше 2. Из рисунка видно, что диаметр пятна в точке фокуса линзы может превысить в 2...4 раза диаметр пятна для линзы свободной от aberrаций. Из-за немонохромности излучения и aberrаций линзы распределение плотности энергии после фокусирующей линзы не всегда совпадает с распределением плотности излучения лазерного источника. Более того, оно изменяется в зависимости от расстояния между линзой и поверхностью [70].

При скрайбировании пластин с КМ и ФП неравномерным по плотности энергии лазерным излучением при применении диафрагмы, с помощью которой отсекается часть излучения с плотностью энергии недостаточной для парообразования в материале, наблюдается увеличение глубины канавки [38].

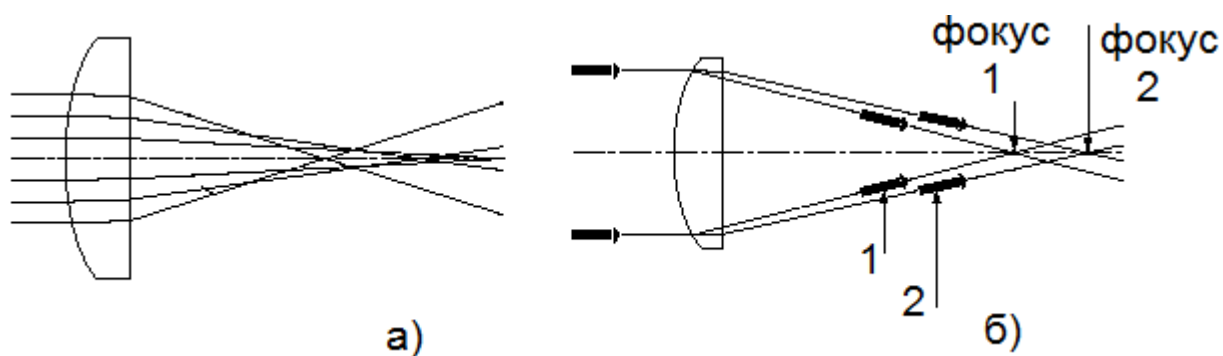


Рисунок 1.20 - Схематичное изображение хода лучей в области точки фокуса линзы, когда:

- а) - линза имеет aberrации; б) - излучение источника происходит в узкой полосе длин волн. Позиция 1 - ход краевых лучей с длиной волны, обозначенной цифрой 1; позиция 2 - ход краевых лучей с длиной волны, обозначенной цифрой 2. Длина волны 1 меньше длины волны 2.

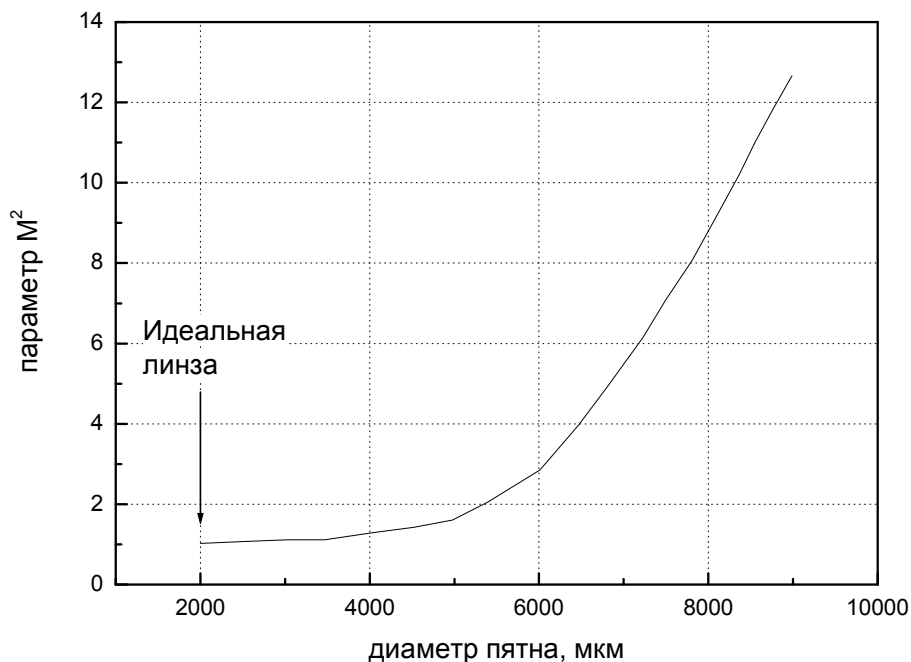


Рисунок 1.21 – Значение параметра M^2 от диаметра пятна излучения реальных объективов (расчётный диаметр пятна $2 \text{ на } 10^3 \text{ мкм}$) для излучения на длине волны $0,633 \text{ мкм}$ [69].

При применении диафрагмы с диаметром меньше размеров области парообразования материала, наблюдается уменьшение плотности энергии в пятне. На рисунке 1.22 представлены зависимости ширины и глубины лунок от диаметра диафрагм. Диафрагмы помещались непосредственно перед линзой.

Глубина канавок или лунок зависит не только от глубины фокуса линзы, но и от расстояний между линзой и поверхностью пластины, что схематично показано на рисунке 1.23 [38]. Из рисунка видно, для получения максимальной глубины канавки, что является наиболее оптимальным для скрайбирования, расстояние между центром линзы и поверхностью пластины должно быть равно фокусному расстоянию линзы или незначительно превышающее его.

Выводы к главе

На основании изучения литературы сделаны следующие выводы:

1) Изготовление МФПУ без потери информации в изображении возможно только уменьшением расстояния между ФПУ до значений, при которых период следования ФЧЭ в МФПУ не нарушается;

2) Вокруг пятна излучения на поверхности полупроводниковых материалов наблюдается зона повреждений, в которой повышена концентрация дислокаций на поверхности и временно изменяются значения токов, протекающих через ФЧЭ и р-п переходы. Во всех экспериментах, проведённых автором, описанных в главах 2, 3 и 4, измерения ВАХ р-п переходов и ФЧЭ после лазерного скрайбирования осуществлялись через 24 и 48 часов, соответственно;

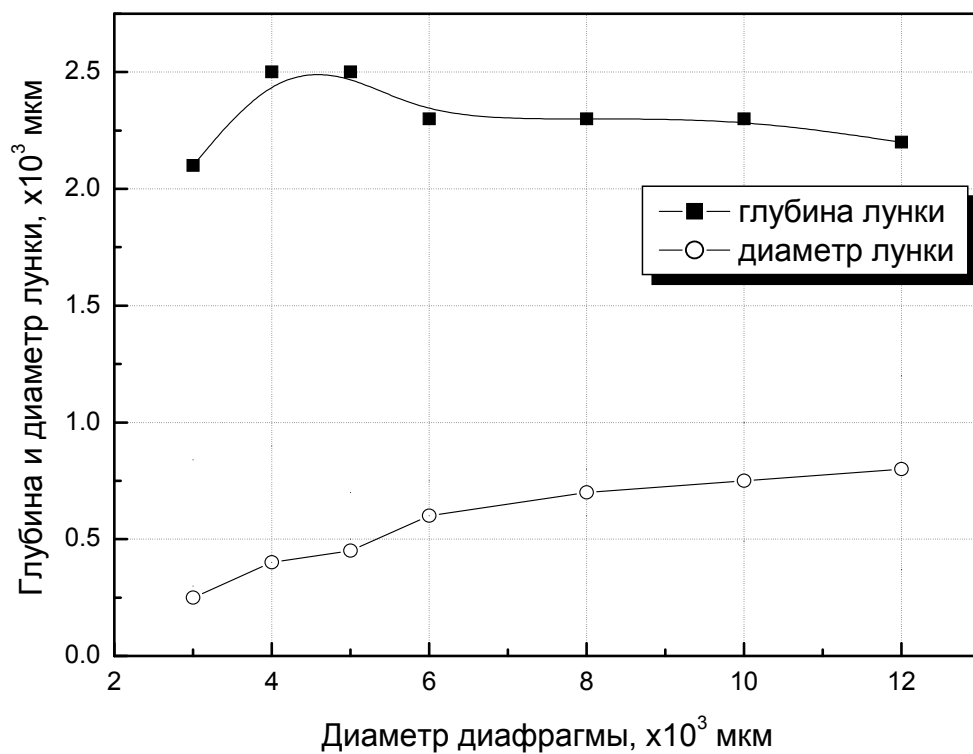


Рисунок 1.22 - Глубина и диаметр лунки в зависимости от диаметра диафрагмы

[38]

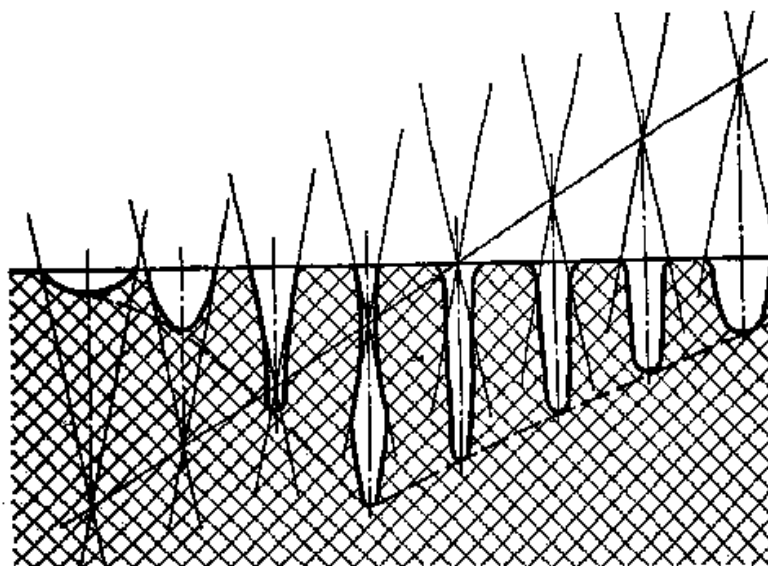


Рисунок 1.23 - Схематичное изображение формы лунки в зависимости от положения точки фокуса линзы относительно поверхности материала [38].

3) Для определения ширины зоны повреждения при лазерном скрайбировании полупроводниковых материалов необходимо учитывать неравномерность распределения плотности энергии в пятне;

4) Выбран лазер с длиной волны 0,337 мкм для лазерного скрайбирования полупроводниковых пластин с чипами, удовлетворяющий требованиям по минимизации ширины зоны повреждения.

Для исследования факторов, препятствующих уменьшению ширины зоны повреждения при разделении пластин на чипы лазерным излучением, и разработки на основе результатов данного исследования режимов скрайбирования пластин с КМ и ФП необходимо решить следующие основные задачи:

1) Провести анализ изменений электрофизических свойств полупроводниковых материалов в пятне взаимодействия лазерного излучения с полупроводниковыми материалами при различных плотностях энергии излучения;

2) Исследовать влияние неоднородности распределения плотности энергии в пятне излучения на формирование зоны повреждения полупроводниковых материалах. На основе экспериментальных данных и анализа данных, полученных другими авторами, предложить модель взаимодействия лазерного излучения на полупроводниковые материалы, учитывающую эту неоднородность, и правильно описывающую происходящие изменения в полупроводниковых материалах в ближней и дальней зонах взаимодействия;

3) Исследовать связь между режимами лазерного скрайбирования пластин с КМ и ФП на основе ГЭС КРТ и шириной зон повреждения в них, определить режимы лазерного скрайбирования, при которых ширина зон повреждения минимальна. Сформулировать требования к элементам

технологических установок лазерного скрайбирования и проверить их в реальных экспериментах;

4) Исследовать стабильность электрических параметров ФЧЭ, попавших в зоны повреждения;

5) Разработать методики скрайбирования пластин с КМ и ФП, обеспечивающие создание МФПУ без потери информации в изображении, работающих в спектральном диапазоне 8...12 мкм.

2. Формирование зон повреждения в полупроводниковых материалах при лазерном скрайбировании

2.1. Методика измерения ширины зоны повреждения

Эксперименты по отработке методики измерения ширины зоны повреждения проходили следующим образом. Под небольшим углом к расположенным в ряд p-n переходам в КМ или ФЧЭ в ФП лазерным излучением формировалась канавка. Расстояние между канавкой и границами p-n переходов в КМ и ФЧЭ в ФП измерялось с помощью оптического микроскопа «Инфрам» (погрешность измерения $\pm 0,5$ мкм). До и после лазерного скрайбирования (после скрайбирования через 24 часа для КМ и 48 часов для ФП) измерялись ВАХ или уровни токов при обратном включении ФЧЭ в ФП и p-n переходов в КМ. При этом принималось, что данный p-n переход или ФЧЭ находится в зоне повреждения, если при сравнении их электрических характеристик, измеренных до и после скрайбирования, выяснялось различие между ними, которое превышало задаваемый уровень разброса электрических параметров ФЧЭ и p-n переходов. Более детальный анализ различий электрических параметров представлен при описании экспериментов.

ВАХ ФЧЭ измерялись на компьютеризированном лабораторном стенде при температуре жидкого азота (77 К), ВАХ p-n переходов в КМ - характеристикографом TR 4805. Для измерения уровней фотоэдс p-n переходов в КМ использовался универсальный вольтметр В7-21. Генерацию неравновесных

носителей заряда при исследовании изменения уровня фотоэдс р-п переходов в КМ обеспечивала лампа накаливания. Известно, что для ФЧЭ, кроме измерения его «темновых» ВАХ, измеряют ВАХ при фоновой засветке (300 К). В нашем случае для выяснения ширины зоны повреждения измерялись только «темновые» ВАХ ФЧЭ, так как область сбора «темновых» и фотогенерированных неосновных носителей заряда в идеальных п-р переходах совпадает и определяется длиной диффузии неосновных носителей заряда.

На начальном этапе исследования проводились на установке лазерного скрайбирования с ручным позиционированием положения пластины по координатам ХУ. По мере накопления экспериментального материала, последовательно были изготовлены ещё две лабораторные установки лазерного скрайбирования. Краткое описание установок:

Установка 1. Ручное позиционирование по координатам ХУ с погрешностью перемещения пластины по координатам ± 1 мкм.

Установка 2. Компьютерное управление шаговыми двигателями. Шаг перемещения по ХУ регулировался в диапазоне от 6 до 40 мкм. Время сдвига пластины на один шаг регулировалось в диапазоне от 10^{-3} до 1 сек. Погрешность подсчёта количества импульсов лазерного излучения на один шаг установки составляла 1 импульс;

Установка 3. Установка лазерного скрайбирования полупроводниковых пластин с чипами имела электрический привод от двигателя постоянного тока по координате У, обеспечивающее движение со скоростью около 120 мкм/сек. и ручным позиционированием по координате Х с погрешностью ± 1 мкм;

В экспериментах на начальном этапе для уменьшения плотности энергии лазерного излучения использовалось диафрагмирование излучения. Расчёт плотности энергии диафрагмированного излучения осуществлялся исходя из

того, что мощность излучения пропорциональна диаметру диафрагмы. Пример расчёта - без применения диафрагмы мощность излучения на частоте повторения 100 Гц составляла $2 \text{ на } 10^3 \text{ Вт}$ при диаметре излучения $2 \text{ на } 10^3 \text{ мкм}$. Введение диафрагмы уменьшает мощность излучения пропорционально отношению площадей отверстия в диафрагме к недиафрагмированному излучению. Для диафрагмы диаметром 226 мкм мощность излучения после диафрагмы составляет 25,6 Вт (25,6 Дж/сек). Измеренный коэффициент пропускания линзы на длине волны 0,337 мкм составил 0,625, диаметр пятна 3,6 мкм. Плотность энергии в пятне при применении диафрагмы составила $1,10 \text{ Дж/см}^2$. При применении диафрагмы с диаметром 500 мкм - $1,94 \text{ Дж/см}^2$.

В экспериментах на Установках 2 и 3 для ослабления излучения использовалось полупрозрачное на длине волны 0,337 мкм стекло с коэффициентом пропускания, равным 0,7.

В таблице 2.1 представлены результаты изменения ширины и длины сквозных канавок, сформированных недиафрагмированным, диафрагмированным излучением и с применением полупрозрачного стекла, в полиимиде (толщиной 12 мкм) на наклонных поверхностях (метод описан в Главе 3). Для уменьшения длины канавок в полиимиде использовалась короткофокусная линза (с фокусным расстоянием около $4 \text{ на } 10^3 \text{ мкм}$). Из анализа данных таблицы следует, что применение полупрозрачного стекла является эффективным методом ослабления излучения, но при этом значительно уменьшается длина сквозной канавки, сформированной на наклонной плоскости, и, следовательно, необходимо для формирования глубоких канавок более точно располагать линзу относительно поверхности скрайбируемых пластин (позиционировании).

Таблица 2.1. - Длина сквозных канавок в полиимиде толщиной 12 мкм для разных способов их формирования лазерным излучением.

Размеры в микрометрах

Способ формирования канавки	Длина сквозной канавки в полиимиде	Ширина канавки в области перетяжки линзы	Максимальная ширина канавки на краях
He диафрагмированное излучение, Ø2500	351	16	40
Стекло с коэффициентом пропускания 0,7	144	9	10
Диафрагма Ø700	308	14	20

ФП были изготовлены в ИФП СО РАН (г. Новосибирск) на плёнках ГЭС КРТ р-типа на GaAs подложках с ориентацией {130} с CdTe буферным слоем. Формирование n-p переходов осуществлялось ионным легированием бором. КМ – производства ОАО «Ангстрем» (г. Москва), НПО «Восток» и ИФП СО РАН (г. Новосибирск).

2.2. Формирование зон повреждения в кремниевых мультиплексорах и фотоприёмниках

В Главе 1 показано, что при облучении поверхностей p-CdTe и КМ излучением с длиной волны 0,694 мкм и более в зонах повреждения

наблюдалось повышение концентрации дислокаций. Проведённое исследование ширины зоны повреждения при скрайбировании пластин с ФП на основе ГЭС КРТ излучением с длиной волны 0,337 мкм и плотностью энергии около $1,50 \text{ Дж/см}^2$ (диафрагмированное излучение) не выявило повышения концентрации дислокаций вокруг канавки (по всей поверхности концентрация составляла $6 \text{ на } 10^6 \text{ см}^{-2}$), но для всех ФЧЭ, расположенных на расстояниях менее 20 микрон от канавки, ВАХ изменялись. На рисунке 2.1 представлена фотография, сделанная на растровом электронном микроскопе (РЭМ-фотография) поверхности ФП вблизи канавки после травления. На рисунке 2.2 показаны изменения ВАХ при обратном включении ФЧЭ после лазерного скрайбирования для разных расстояний от ФЧЭ до канавки (менее 13, от 13 до 20 и более 20 мкм). На рисунке 2.3 представлена изменения значений токов через ФЧЭ при обратном напряжении смещения минус 0,04 В в зависимости от расстояния до канавки. Из рисунков 2.2 и 2.3 видно, что ток через ФЧЭ:

- а) превышает исходные значения в 10 и более раз на расстояниях менее 13 мкм при обратном напряжении смещения на ФЧЭ минус 0,04 В;
- б) не изменяется после скрайбирования на расстояниях более 20 мкм;
- в) в области расстояний менее 13 мкм наблюдалось уменьшение напряжения начала пробоя ФЧЭ.

Проведённый расчёт термического повреждения материала ФП вокруг лунки при импульсном нагреве материала не позволяет дать объяснение регистрируемой ширины зоны повреждения, достигающей 20 мкм. В Приложении 1, раздел П.1.1, представлена программа расчёта в «Mathcad» пространственно-временного изменения температурного поля однослойной плёнки ФП в вакууме после импульса нагрева части поверхности (в предположении отсутствия теплопередачи в глубину и тепловой конвекции с

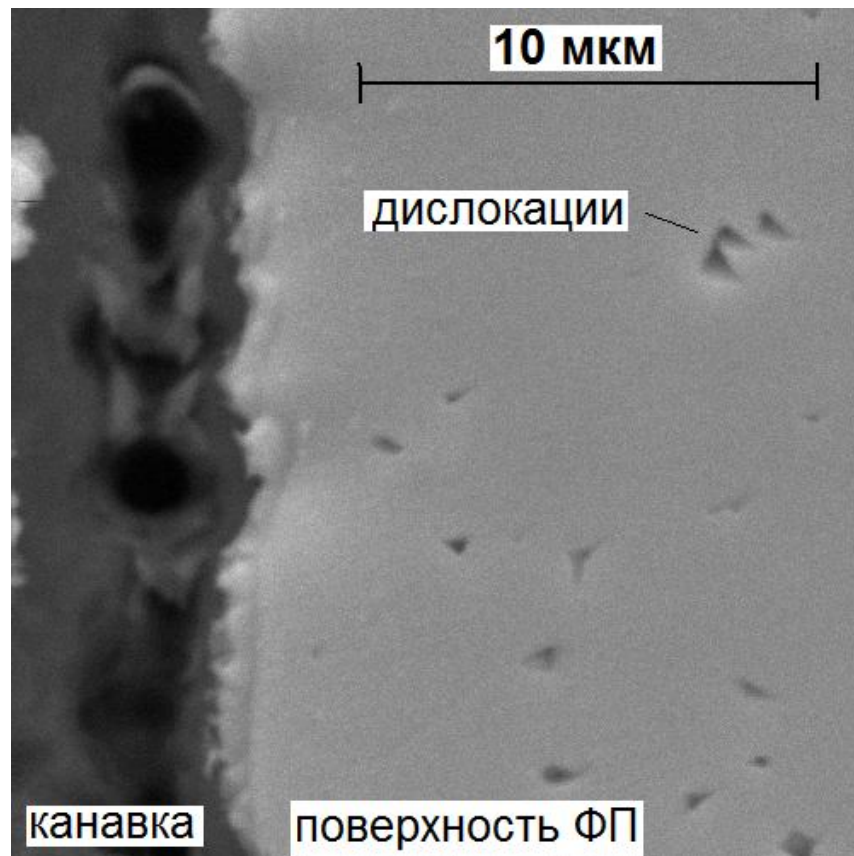


Рисунок 2.1 - РЭМ-фотография поверхности ФП на основе плёнки ГЭС КРТ после травления в селективном травителе.

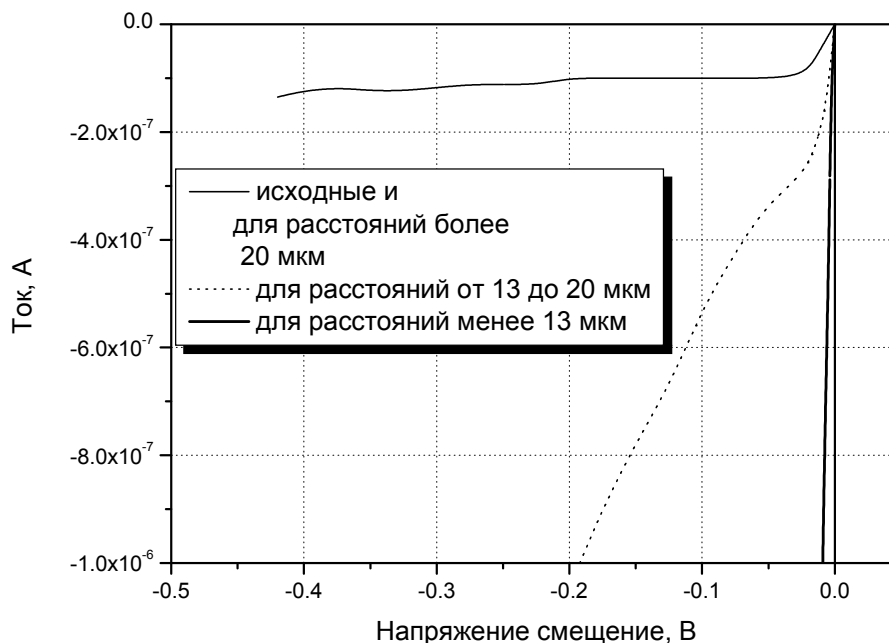


Рисунок 2.2 – Изменение ВАХ при обратном включении ФЧЭ до и после лазерного скрайбирования на разных расстояниях от ФЧЭ.

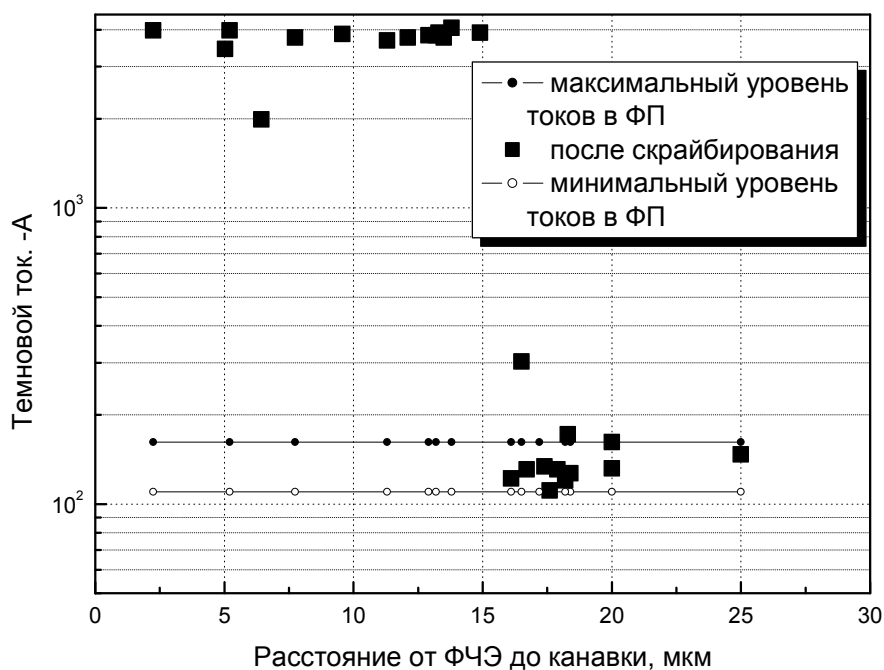


Рисунок 2.3 - Зависимость изменения значений токов ФЧЭ при обратном напряжении смещения минус 0,04 В от расстояния до канавки. Область между линиями с точками – разброс значений токов до скрайбирования.

поверхности, ускоряющих охлаждение материала). В расчётах учитывалась зависимость коэффициентов температуропроводности от температуры [63]. Для того, чтобы не учитывать постоянно изменяющиеся условия поглощения излучения материалом во время импульса, описанных в Главе 1, в расчётах распределение плотности энергии в пятне было заменено на температурное распределение. Также считалось, что расплав КРТ удаляется из пятна излучения вместе с парами материала (случай, представленный на рисунке 2.1) и, следовательно, считалось, что тепловое пятно имеет кольцевую форму. На рисунке 2.4 представлен результат расчёта пространственно-временного изменения температурного поля после импульса нагрева поверхности ФП на краю лунки и на расстояниях 8 и 20 мкм. Из расчётов следует, что после воздействия импульса излучения температура ФП на расстоянии 20 мкм изменяется примерно, менее чем на 50 К (с 300 до 346 К), а для расстояния около 8 мкм температура повышается примерно с 300 до 416 К. Для выяснения возможного изменения ВАХ ФЧЭ после нагрева ФП до температур 416 К было исследовано изменение ВАХ ФЧЭ после термических отжигов в течении 720 сек в воздушной среде при температуре 418 К. В результате исследования выяснено, что после отжига ФП ФЧЭ не деградируют. Более того, значения «темновых» токов в ФЧЭ после такой обработки снижаются. На рисунке 2.5 представлены ВАХ при обратном включении ФЧЭ, измеренных до и после отжига ФП. Таким образом, численный расчёт пространственно-временного изменения температурного поля после импульса нагрева поверхности ФП на расстоянии 20 мкм и результаты исследования влияния отжига ФП при температуре 418 К на ВАХ не позволяют объяснить ширину зоны повреждения ФЧЭ до 20 мкм только нагревом ФП.

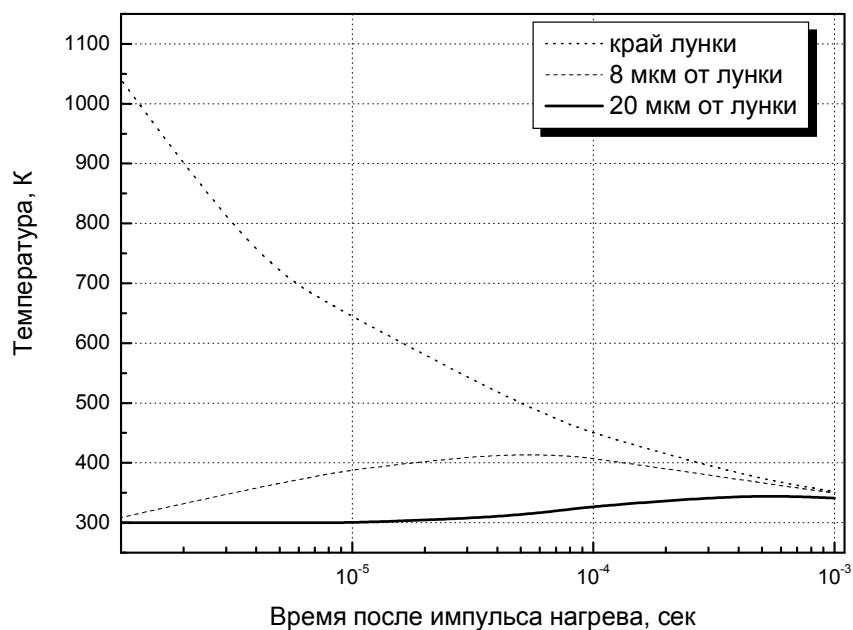


Рисунок 2.4 - Расчёт пространственно-временного изменения температурного поля после импульса нагрева поверхности ФП. Расчёт проведён для расстояний 8, 20 мкм и края лунки.

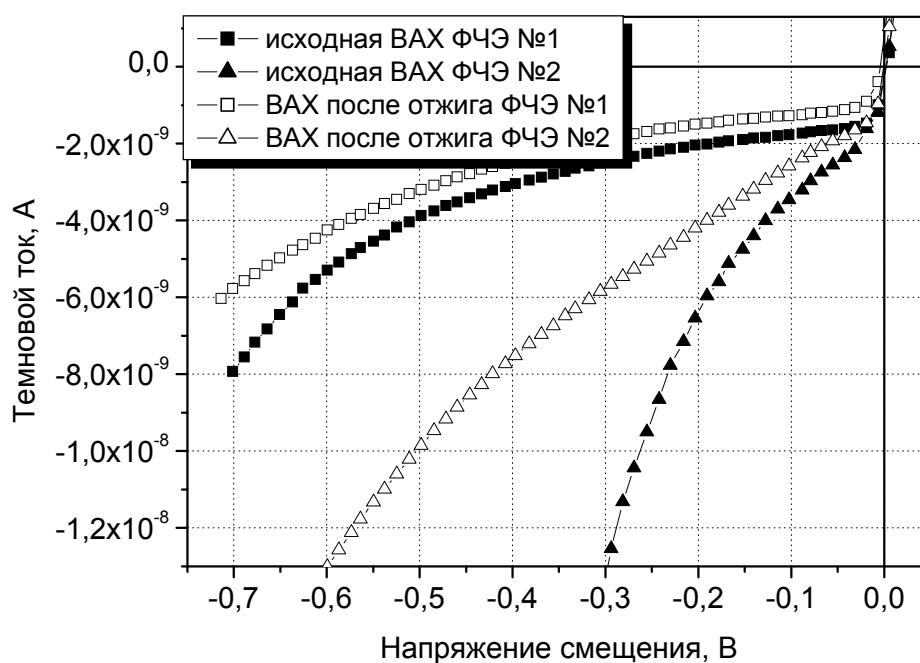


Рисунок 2.5 – Изменение ВАХ при обратном включении ФЧЭ до и после отжига ФП при температуре 418 К в течении 720 секунд.

Увеличение плотности энергии диафрагмированного излучения до $1,94 \text{ Дж/см}^2$ при скрайбировании ФП приводит к увеличению ширины зоны повреждения до 28 мкм. В то же время при скрайбировании ФП недиафрагмированным излучением с плотностью энергии $1,98 \text{ Дж/см}^2$ ширина зоны повреждения составила около 20 мкм, но при этом вокруг канавки наблюдалась область с расплавом, выдавленным из канавки, высотой более 3 мкм, что препятствует «гибридизации» ФПУ. В этом эксперименте при скрайбировании поверхности ФП расстояния между ФЧЭ и канавкой изменялось от 20 до 28 мкм. На рисунке 2.6 показаны ВАХ при обратном включении ФЧЭ до и после лазерного скрайбирования ФП на расстоянии 20 мкм. Плотность энергии диафрагмированного излучения составляла $1,94 \text{ Дж/см}^2$.

При проведении скрайбирования ФП выяснено, что для режимов скрайбирования пластин с ФП, когда диафрагмированием излучения выделяется только область с плотностью энергии превышающей пороговую парообразования КРТ, ширина зоны повреждения составляет не менее 20 мкм. Глубина канавки при этом недостаточна для раскола пластин. Так, при скрайбировании пластин с КМ диафрагмированным излучением (диафрагма диаметром 226 мкм) глубина канавки около 6 мкм, а при применении диафрагмы диаметром 500 мкм – 73 мкм. Без применения диафрагмы глубина лунки составляет приблизительно 103 мкм (диаметр излучения 2500 мкм). На рисунке 2.7 показаны зависимости изменения диаметра и глубины лунок в КМ от количества импульсов для недиафрагмированного и диафрагмированного (диаметр диафрагмы 500 мкм) излучения. Измерение глубин лунок осуществлялось по РЭМ-фотографиям расколов лунок, а диаметров лунок – в оптический микроскоп. Данный эксперимент показал, что:

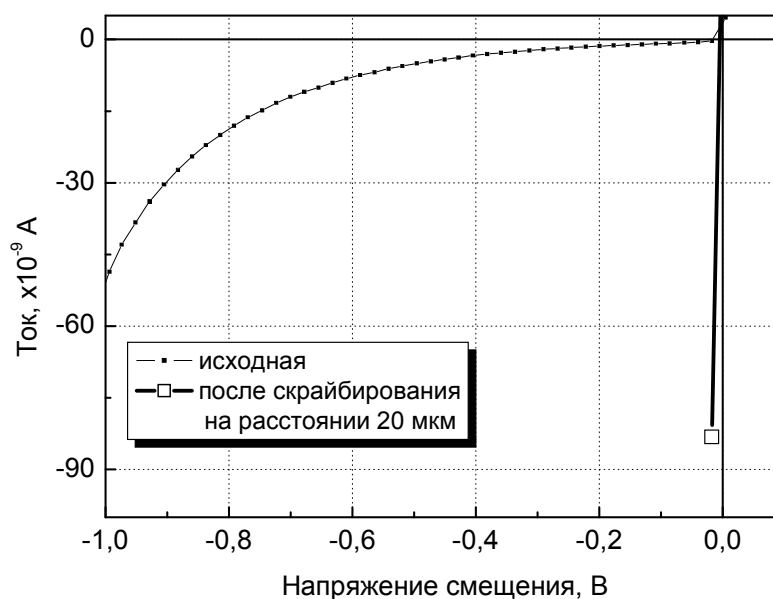


Рисунок 2.6 –ВАХ при обратном включении ФЧЭ до и после лазерного скрайбирования ФП на расстоянии 20 мкм диафрагмированным излучением с плотностью энергии 1,94 Дж/см².

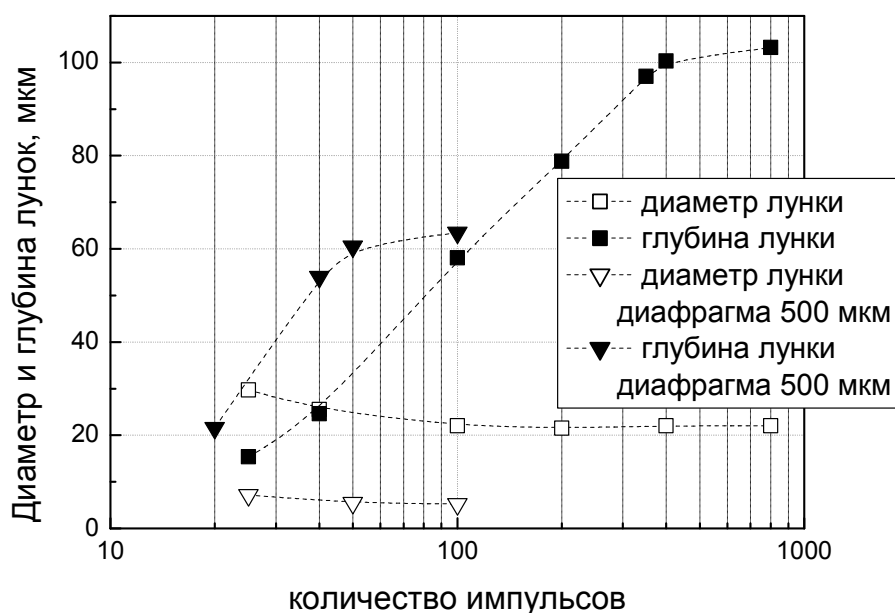


Рисунок 2.7 - Зависимость диаметра и глубины лунок в мкм от количества импульсов для двух режимов лазерного скрайбирования: диафрагмированным (диафрагма диаметром 500 мкм) и недифрагмированным (диаметр пятна 30 мкм) излучением.

а) применение диафрагмирования значительно увеличивает отношение глубины к диаметру лунки в сравнении с недиафрагмированным излучением из-за отсутствия расплава материала на краю лунки. Отношение максимальной глубины к максимальному диаметру лунки при применении диафрагмы составило около 8,8, а для случая недиафрагмированного излучения только 3,5;

б) для диафрагмированного излучения лунка сформировалась за 50 импульсов, в то время как при применении недиафрагмированного излучения более 400 импульсов;

Проведённые эксперименты показывают, что скрайбирование пластин с ФП диафрагмированным излучением не позволяет изготавливать высокоэффективных МФПУ из-за широкой зоны повреждения, и необходимы дополнительные исследования для определения режимов лазерного скрайбирования ФП. Рассмотрим другую возможность ограничения выдавливания расплава выбросом пара на поверхность, описанную в Главе 1, - скрайбирование КМ в водной среде. При проведении эксперимента для охлаждения расплава был применен способ, описанный в книге [68], когда пластина с КМ помещается в водную среду. Другая пластина с КМ скрайбировалась на воздухе. В первом случае пластина с КМ находилась под слоем воды в два миллиметра. Ширина зоны повреждения регистрировалась по изменению напряжения начала пробоя р-п переходов после скрайбирования. В результате проведенного эксперимента выяснено, что при скрайбировании на воздухе граница зоны повреждения составила около 13 мкм, а при скрайбировании в водной среде - 47 мкм. Эксперимент показал, что быстрое охлаждение расплава водой значительно расширяет границы нарушенных слоёв и не позволяет изготавливать МФПУ без потерь информации в изображении. Результаты экспериментов представлены на рисунке 2.8.

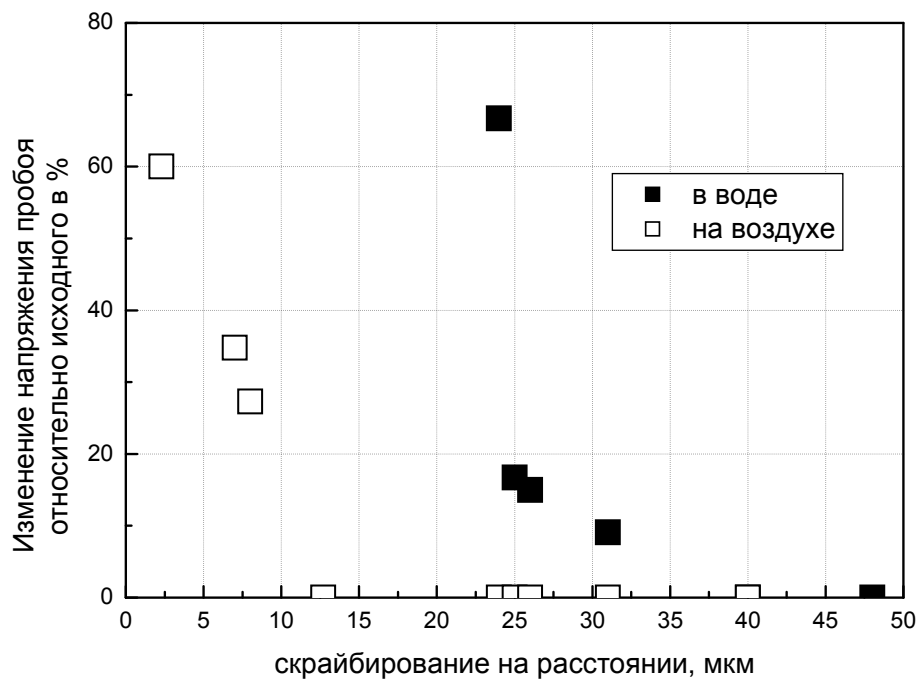


Рисунок 2.8 - Изменение напряжения пробоя относительно исходных значений для р-п переходов в КМ после лазерного скрайбирования в водной среде и на воздухе в зависимости от расстояния до канавки.

Приведённые результаты экспериментов по скрайбированию пластин с КМ и ФП показывают, что область расплава в пятне излучения выполняет положительную функцию демпфирования воздействия лазерного излучения с плотностью энергии, превышающей пороговую парообразования в материале. При этом ширина зоны повреждения уменьшается по сравнению с режимами лазерного скрайбирования с применением воды или диафрагмирования излучения.

При проведении исследований по влиянию быстрого охлаждения расплава материала водой был обнаружен эффект деформирования ближайших к канавке индиевых столбов. Это смещение можно объяснить гидроударом при вскипании воды во время лазерного импульса. На рисунке 2.9 представлена фотография фрагмента края КМ после скрайбирования пластины в водной среде и раскола. Пояснительный рисунок схематично показывает постепенное сужение области распространения волны давления от пара по мере увеличения глубины канавки. Более сильная деформация верхней части в сравнении с основанием столба является подтверждением сделанного предположения. Для оценки величины давления воды на индиевые столбы, возникающего при скрайбировании, было экспериментально определено усилие, необходимое для сдвига индиевого столба. В эксперименте механическое усилие прикладывалось ко всей боковой поверхности индиевого столба. Исследования показали, что в среднем давление, необходимое для смещения индиевого столба, изменялось от $1,5 \text{ на } 10^{-6}$ до $2,1 \text{ на } 10^{-6} \text{ кг/мкм}^2$. В результате проведённого исследования выяснено, что на расстояниях до 40 мкм от края канавки во время лазерного скрайбирования в водной среде, давление на индиевый столб составляет не менее $1,5 \text{ на } 10^{-6} \text{ кг/мкм}^2$.

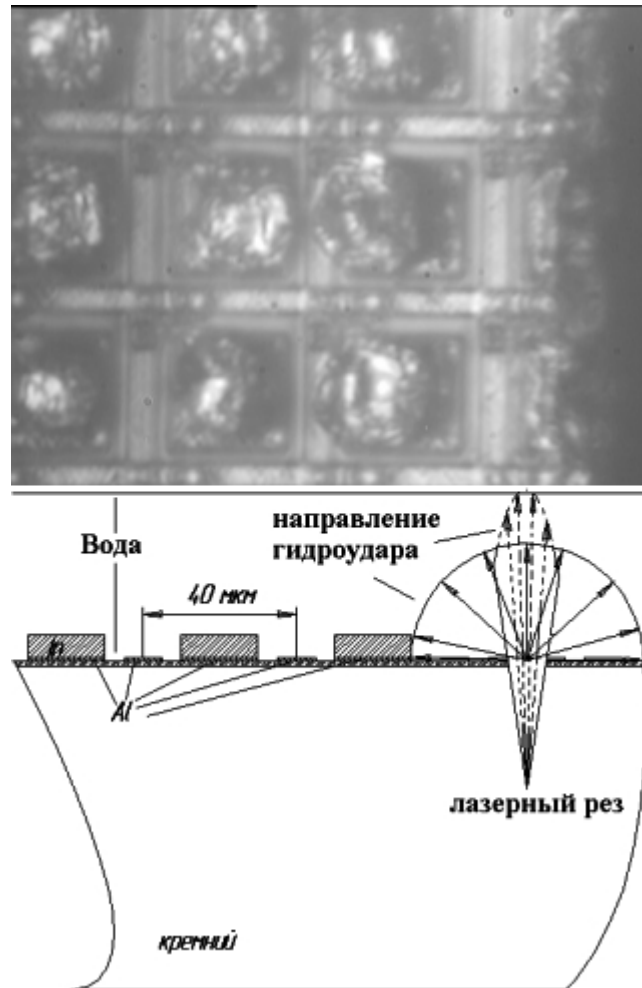


Рисунок 2.9 - Фотография края КМ с индиевыми столбами после скрайбирования и раскола. Скрайбирование проводилось в водной среде. На пояснительном рисунке показано сужение области выброса пара по мере формирования канавки.

Из-за отсутствия расплава на стенках канавки при скрайбировании в водной среде данный режим может быть использован в исследованиях слоистых структур. Лазерное скрайбирование в водной среде КМ было применено для исследования деформации индиевых столбов во время «гибридизации» ФПУ. На РЭМ-фотографии (рисунок 2.10) показан край «гибридной» сборки двух КМ, где лазерным скрайбированием в водной среде формировались канавки на расстояниях 25...40 мкм от индиевых столбов. Данные расстояния обусловлены предельными возможностями РЭМ микроскопа при рассматривании результатов сварки индиевых столбов при «гибридизации» ФПУ через щель шириной около 6 мкм (расстояние между чипами после их «гибридизации»). На фотографии видны края алюминиевых контактных площадок под индиевыми столбами, изолирующие слои диоксида кремния и алюминиевая токопроводящая дорожка.

2.3. Модель взаимодействия лазерного излучения с полупроводниковыми материалами

Анализ литературных данных, сделанный в Главе 1, показало, что:

- а) диаметр пятна излучения превышает размеры лунки или канавки;
- б) в области облучения поверхности регистрируются изменения структуры и свойств полупроводниковых материалов, которые зависят от плотности энергии: образование лунок, расплав поверхности, возникновение и исчезновение дислокаций, изменение состава поверхностных слоёв.

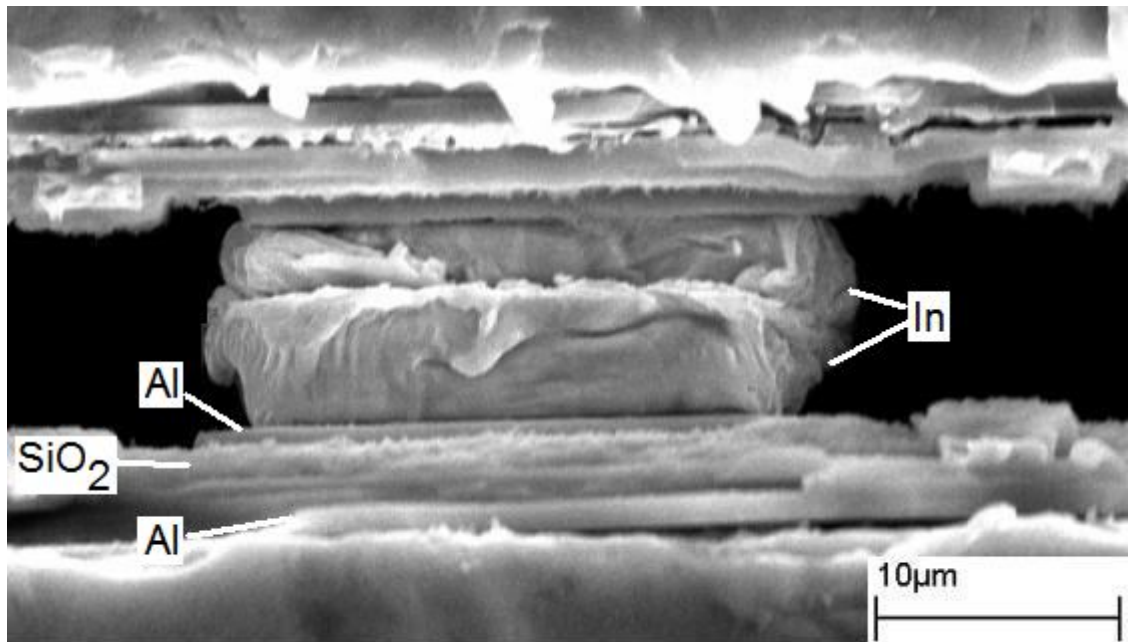


Рисунок 2.10 - Фотография края «гибридной» сборки двух КМ после скрайбирования в водной среде и раскола. Из-за отсутствия расплава на стенках канавки на фотографии видны края алюминиевых контактных площадок под индиевыми столбами, изолирующий слой диоксида кремния и алюминиевая токопроводящая дорожка.

В разделе 2.2 показано, что если в пятне образуется расплав материала, выдавливаемый выбросом пара полупроводникового материала, то ширина зоны повреждения уменьшается.

Качественно рассмотрим модель процессов, происходящих в полупроводниковых материалах при воздействии лазерного излучения с неоднородной плотностью энергии в пятне излучения и изменение условий её поглощения в течении действия импульса излучения. Из-за неоднородности плотности энергии в пределах пятна излучения на поверхности полупроводниковых материалов можно выделить три характерные кольцевые зоны:

Зона 1. Центральная область, в которой плотность энергии достаточна для перехода материала в парообразное состояние;

Зона 2. Область, расположенная дальше от центра, в которой плотность энергии излучения выше порога плавления материала;

Зона 3. Область, в которой плотность энергии излучения меньше порога плавления, но её достаточно для изменения структуры и свойств полупроводниковых материалов;

Область вне пятна излучения, в которой регистрируются повреждения полупроводниковых материалов – зона повреждения, обозначим её как Зона 4.

На рисунке 2.11 схематично представлено распределение плотности энергии в сечении и результат воздействия излучения на поверхность ФП.

При облучении поверхности неравномерным по плотности энергии излучением в пятне формируются области с разной концентрацией «горячих» электронов и в последующем разрушается кристаллическая структура полупроводникового материала, которая, в соответствии с литературными данными, регистрируется по изменению коэффициента отражения поверхности.

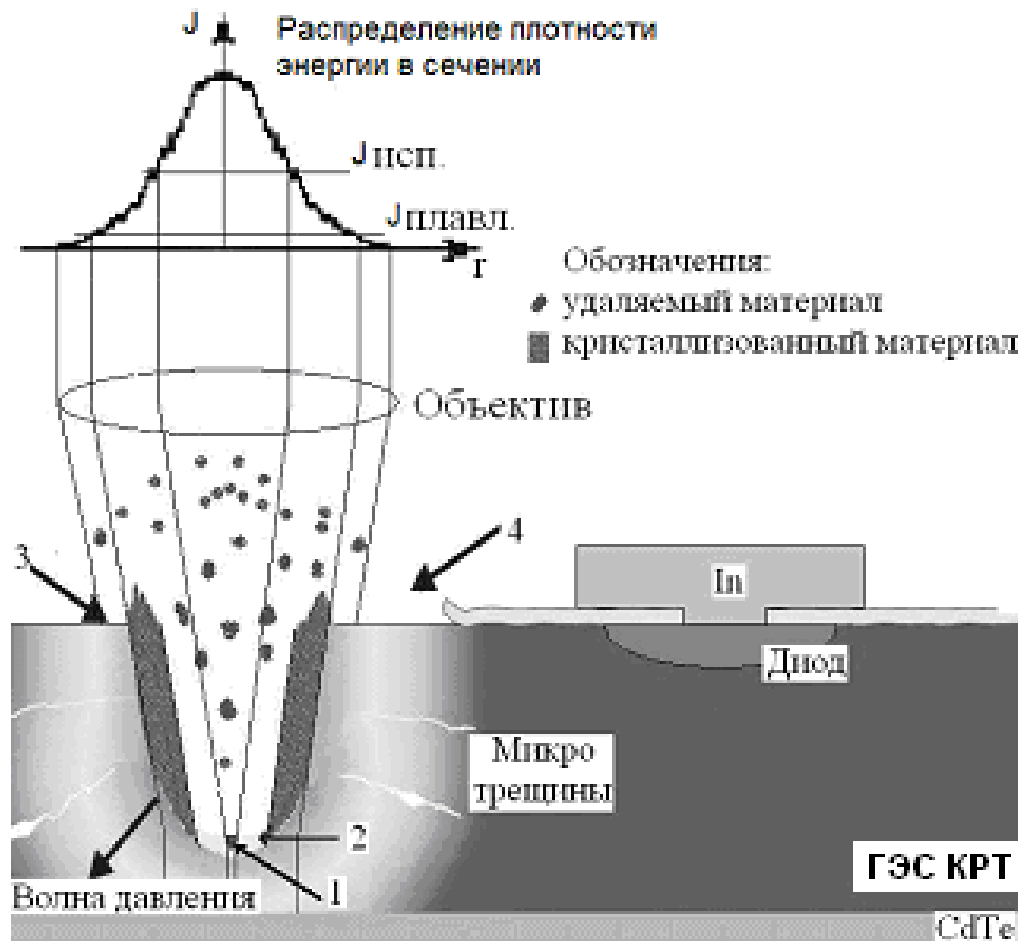


Рисунок 2.11 – Схематичный рисунок, иллюстрирующий результат воздействия лазерного излучения после фокусирующей линзы на материал ГЭС КРТ с учётом неоднородности плотности энергии в поперечном сечении.

Характерные области лазер – материал взаимодействия:

- 1 - Зона 1. Центральная область, в которой плотность энергии достаточна для перехода материала в парообразное состояние;
- 2 - Зона 2. Область, расположенная дальше от центра, в которой плотность энергии излучения выше порога плавления материала;
- 3 - Зона 3. Область, в которой плотность энергии излучения меньше порога плавления, но её достаточно для изменения структуры и свойств полупроводниковых материалов;
- 4 – зона 4 - область вне пределов пятна лазерного воздействия, в которой регистрируются повреждения полупроводниковых материалов.

Изменение коэффициента отражения поверхности происходит во всём пятне взаимодействия [32]. Часть «горячих» электронов преодолевает потенциальный барьер на границе материала (в [71] на примере алюминия показано, что, несмотря на тот факт, что энергии фотонов недостаточно для преодоления потенциального барьера на границе материала, время-пролётным методом регистрируется внешний фотоэффект), остальные электроны за время $10^{-13} \dots 10^{-12}$ сек «охлаждаются» до энергий, соответствующих дну зоны проводимости, отдавая свою энергию решётке в виде акустических и оптических фононов [25]. Суммарная длительность всех этих процессов, например, в кремнии, не превышает 2 на 10^{-12} сек. [22]. На периферии пятна излучения формируется область с повышенной концентрацией электронов. Дальнейшее остывание материала до стационарного состояния происходит достаточно медленно (для GaAs время охлаждения составляет около 10^{-6} сек. (смотри рисунок 1.10) [21]).

Вклад неравновесных электронов в формирование зоны повреждения не описан в литературе, но если при скрайбировании КМ на р-п переходы подавать напряжение, то после скрайбирования при измерении ВАХ регистрируется снижение напряжение начала пробоя р-п переходов на расстояниях более 150 мкм. Для проведения эксперимента перед скрайбированием КМ были измерены ВАХ двух рядом расположенных р-п переходов. Затем на расстоянии около 150 мкм от них была сформирована канавка. Плотность энергии лазерного излучения составляла около $4,40 \text{ Дж/см}^2$. Во время скрайбирования один из двух р-п переходов находился под напряжением развёртки характериографа, а второй – в свободном состоянии. После скрайбирования были повторно измерены ВАХ р-п переходов, показавшие, что напряжение начала пробоя р-п перехода, находившегося под напряжением при скрайбировании, изменилось с 62 до 10 В. ВАХ второго р-п

перехода не изменилась. На рисунке 2.12 показаны ВАХ при обратном включении р-п перехода в КМ до и после скрайбирования, находившегося под напряжением при лазерном скрайбировании. Скрайбирование КМ было проведено за один проход недифрагмированным излучением. Подробности эксперимента в Приложении 1, раздел П.1.2. Деграция р-п перехода, возможно, объясняется Джоулевым нагревом области р-п перехода. Возможен вариант развития туннельного или лавинного пробоя. Корректное определение механизма пробоя р-п переходов в КМ при скрайбировании требует дальнейших исследований.

В Главе 1, показано, что разрушение кристаллической структуры полупроводникового материала при нагреве ведёт к изменению (увеличению) коэффициента отражения поверхности. Причём увеличение коэффициента отражения регистрируются даже тогда, когда на поверхности не удаётся зафиксировать видимых изменений после окончания импульса излучения [32]. То есть увеличение коэффициента отражения поверхности происходит во всём пятне взаимодействия. При разрушении кристаллической структуры полупроводникового материала в Зоне 1 через время, необходимое для увеличения амплитуды колебаний атомов до значений, соответствующих парообразному состоянию, материал переходит в пар. В Зоне 2 всё это время материал остаётся в расплавленном состоянии. При этом внешняя граница Зоны 2 сдвигается на расстояния, обусловленные распространением тепла в материале (за время действия импульса излучения длительностью $7 \text{ на } 10^{-9} \text{ сек.}$ область с температурой плавления кремния (1685 К), рассчитанная по формуле 1.4, увеличится на 0,948 мкм). В момент выброса материала из Зоны 1 волна давления, обусловленная температурным коэффициентом линейного расширения, выдавливает расплав Зоны 2 на поверхность. В Зоне 3,

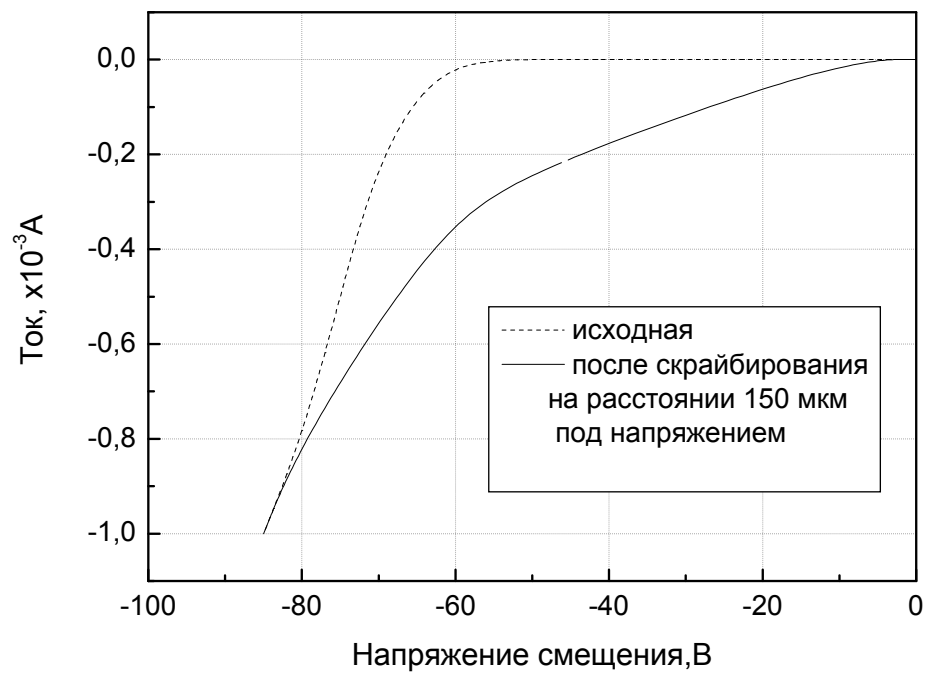


Рисунок 2.12 –ВАХ при обратном включении р-п перехода в КМ до и после скрайбирования, находившегося под напряжением при лазерном скрайбировании.

в соответствии с литературными данными (для длин волн более 0,531 мкм), регистрируется увеличение концентрации дислокаций (в Si и CdTe), возникновение новых и исчезновение существующих электронных уровней в запрещённой зоне (в Si и GaAs), и изменение химического состава материала (КРТ) обусловленное тем фактом, что энергия активации диффузии атомов в междоузлиях сравнима с энергией фотонов. За время действия импульса излучения атомы в междоузлиях перемещаются в объёме материала, и часть этих атомов достигает поверхности. Начиная с момента образования пара, энергия излучения полностью поглощается выбросом. Материал в канавке и лунке начинает остывать. Если после окончания выброса паров из области взаимодействия импульс продолжает воздействовать на материал, то взаимодействие излучения происходит с материалом, находящимся в неравновесном состоянии. В Зонах 1 и 2 расплав отсутствует, температура материала на границе Зон 2 и 3 меньше порога плавления. В Зоне 3 существует увеличенная концентрация неравновесных носителей с энергиями, соответствующими дну зоны проводимости. Процесс разогрева и взрывного выброса повторяется, но нагрев материала начинается с более высоких температур и, следовательно, внешняя граница Зоны 2 (как в глубину, так и в ширину) снова сдвигается и лунка расширяется. В зависимости от длительности импульса возможны от одного до нескольких интервалов (циклов) поглощения энергии лазерного излучения, то есть имеет место пульсирующий характер взаимодействия лазерного излучения с полупроводниковыми материалами.

Представленная в разделе модель взаимодействия лазерного излучения с полупроводниковыми материалами учитывает неоднородность распределения плотности энергии в пятне излучения и многостадийность взаимодействия

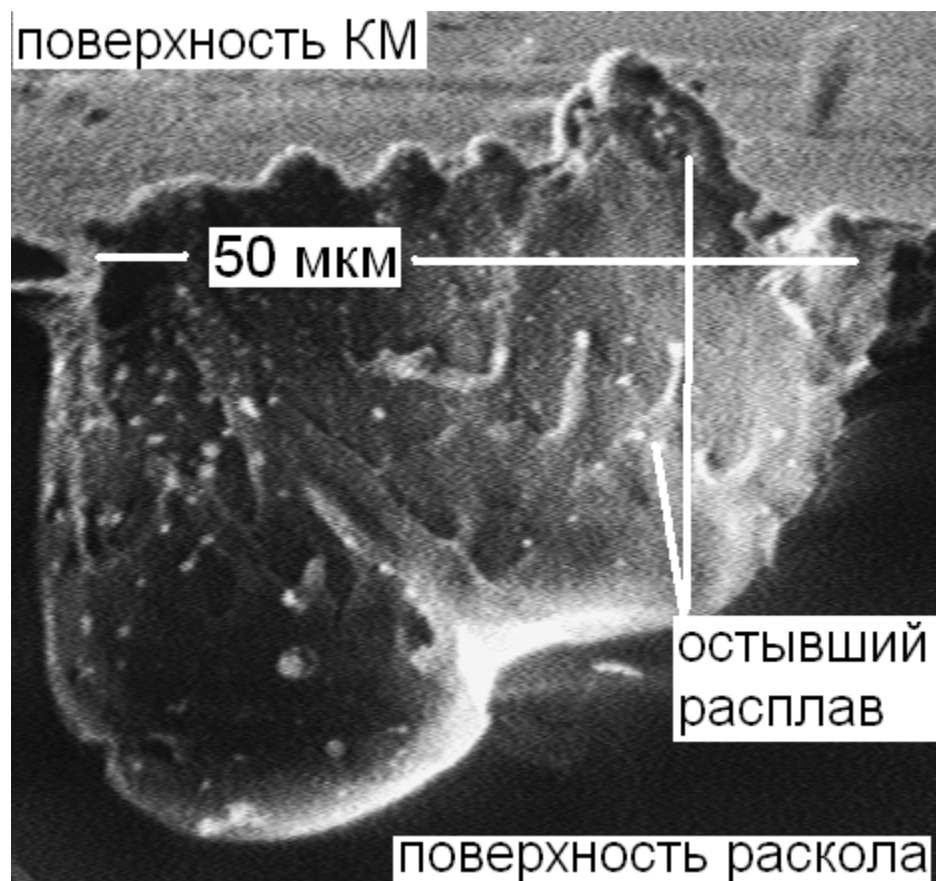


Рисунок 2.13 – РЭМ-фотография поперечного сечения лунки после 50 лазерных импульсов длительностью $7 \text{ на } 10^{-9}$ сек, частотой повторения 100 Гц и средней мощности источника, равной $2 \text{ на } 10^3$ Вт. Длина волны лазерного излучения - 0,337 мкм.

излучения с полупроводниковыми материалами.

2.4. Раскол пластин с чипами и гибридизация фотоприёмных устройств

Составной частью технологии скрайбирования является раскол приборной пластины на чипы. Основным требованием, предъявляемым к результатам раскола, является то, чтобы поверхность раскола должна быть ровной с неровностью поверхностей менее 1 мкм, а её плоскость была перпендикулярна плоскости планарной поверхности чипа или уходила под поверхность чипа. Анализ разных способов раскола показал, что применение принципа изгиба поверхностей позволяет получать требуемое качество поверхности раскола. Однако применение традиционных методов, основанных на изгибе одной или двух сторон, не обеспечивает требуемое качество поверхности раскола и ведёт к неперпендикулярности поверхности раскола и наличию на поверхности винтообразных областей, выступов и карнизов, увеличивающих расстояние между ФПУ в МФПУ.

Ровную поверхность раскола можно получить, применив метод, используемый на установках раскола пластин фирмой «SYNOVA SA». Раскол осуществляется при помощи клина, который давит на пластину с тыльной стороны. Отличие предлагаемого устройства раскола, представленного на рисунке 2.14, заключается в том, что удержание пластины осуществляется при помощи вакуумных присосок, удерживающих пластину с тыльной стороны, и оно встраивается в установки скрайбирования. На рисунке 2.15 показана фотография края «гибридной» сборки двух КМ, на которой видны поверхности

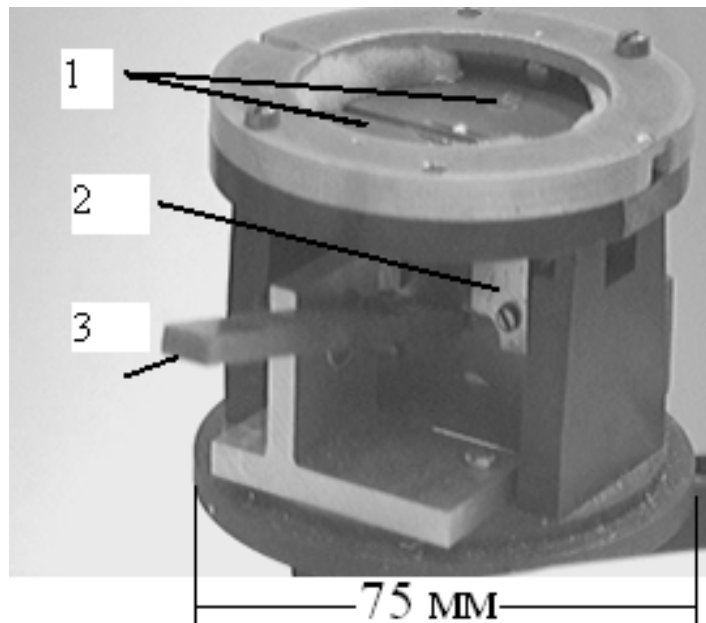


Рисунок 2.14 – Фотография столика в установке лазерного скрайбирования, позволяющего раскалывать пластины с КМ и ФП после формирования канавки. 1 – шарнирные поверхности с вакуумными присосками; 2 – подвижный клин; 3 – ручка толкателя клина.

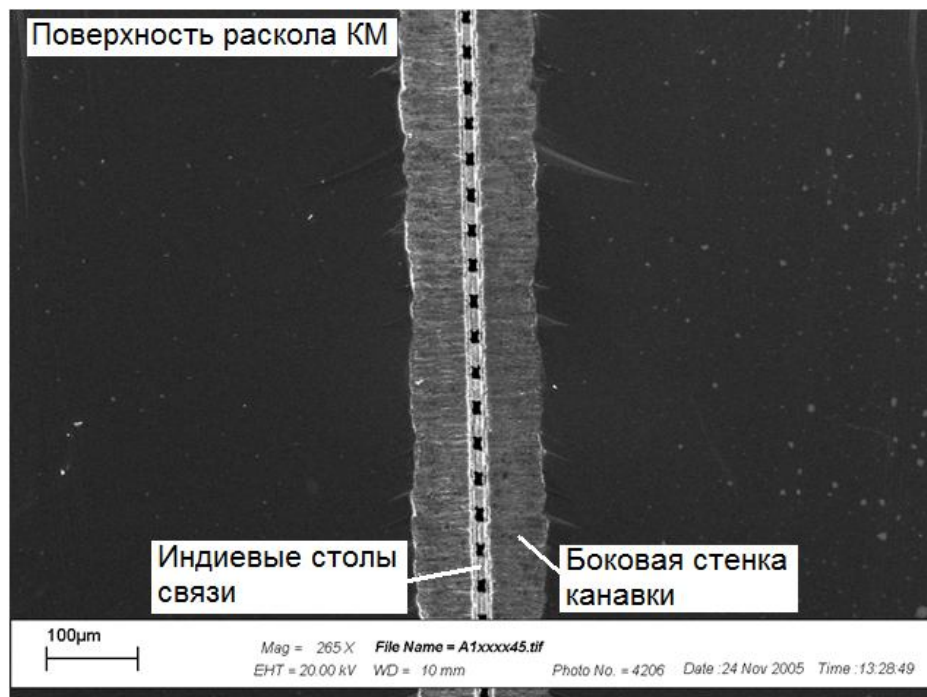


Рисунок 2.15 - Фотография поверхностей раскола КМ. После скрайбирования и раскола КМ обе половинки были гибридизированы по технологии «флип-чип» для исследований качества сварки индиевых столбов между собой.

раскола пластин с КМ, имеющих неровность поверхности менее 1 мкм.

Лабораторный метод «гибридизации» ФПУ использованный в данной работе был разработан под руководством Клименко А.Г. Последовательность операций заключается в следующем. К боковым поверхностям ФП приклеиваются фиксаторы перемещения по X и Y направлениям и реперные знаки для совмещения с КМ. На краях ФП в областях, где нет ФЧЭ, приклеиваются полиимидные ограничители расстояния между КМ и ФП при гибридации (толщиной около 6 мкм). Реперные знаки представляют собой носитель (металлическая плёнка толщиной 8 мкм), в которых лазерным излучением сделаны отверстия, которые затем закрываются полиимидной плёнкой толщиной 9 мкм. В плёнке лазерным излучением с плотностью энергии около $1,10 \text{ Дж/см}^2$ делается цепочка сквозных лунок диаметром 1...3 мкм. На краях КМ в местах, совпадающих с положением цепочки лунок реперных знаков на ФП, лазерным излучением формируется другая цепочка лунок. После окончания подготовки ФП и КМ к «гибридации» ФП переворачивается и устанавливается над КМ, так что фиксаторы перемещения совмещены по XY опорами, заранее установленными вблизи КМ. Высота опор равна толщине КМ. Поверхность опор покрыта слоем клея. КМ с ФП помещают на предметный столик оптического микроскопа. За достаточно длительное время полимеризации клея микроманипулятором осуществляется перемещение ФП относительно КМ до совпадения положения реперных знаков на ФП и КМ. После полимеризации клея на опорах КМ с ФП устанавливают на столик вертикального безлюфтового пресса, затем устанавливают на ФП сапфировую призму, совпадающую по размерам с ФП, для обеспечения равномерного распределения давления от штока пресса на всю поверхность ФП. Прикладывают усилие на сдавливание индиевых столбов в КМ и ФЧЭ.

Время пластического течения индия под давлением составляет около 600... 800 сек. Использовался специально спроектированный и изготовленный вертикальный безлюфтовый пресс, позволяющий нагревать поверхность столика прессы до температур 433 К. Для гибридизации ФПУ и МФПУ при выполнении исследований, представленных в диссертационной работе, применялся данный метод.

Выводы к главе

1) Выбран способ определения ширины зоны повреждения измерением ВАХ ближайших к канавке р-п переходов в КМ и ФЧЭ в ФП до и после лазерного скрайбирования. Определено, что в зоне повреждения изменяются ВАХ р-п переходов и ФЧЭ;

2) Исследовано возникновение зон повреждения в КМ и ФП при скрайбировании их лазерным излучением с длиной волны 0,337 мкм. Показана положительная роль области расплава на краях пятна излучения в уменьшении ширины зоны повреждения. Выполненные исследования доказывают, что расплав материала на краях пятна излучения демпфирует ударное воздействие излучения с плотностями выше порога парообразования на окружающий материал. При скрайбировании ФП диафрагмированным излучением с диаметром диафрагмы 500 мкм в сравнении с недиафрагмированным излучением, диаметром 2500 мкм, ширина зоны повреждения увеличивается с 20 до 28 мкм. При скрайбировании КМ в водной среде (для охлаждения расплава) в сравнении с результатами скрайбирования на воздухе ширина зоны повреждения увеличивается с 13 до 47 мкм.;

3) Предложена модель взаимодействия лазерного излучения с полупроводниковыми материалами, основанная на зонном представлении распределения плотности энергии в пятне и многостадийном взаимодействии излучения с полупроводниковыми материалами;

4) Выбран способ раскола пластин с чипами – раскол на клине. Изготовлено устройство для раскола пластин, встраиваемое в установку лазерного скрайбирования, которое обеспечивает неровность поверхности раскола менее 1 мкм.

3. Режимы лазерного скрайбирования пластин с кремниевыми мультиплексорами и фотоприёмниками

3.1. Оптимизация оптической системы установок лазерного скрайбирования

Для подбора линз в установку лазерного скрайбирования, применён способ, в основе которого формирование канавки в полупроводниковом материале, который установлен на наклонной плоскости. При формировании канавки расстояние между линзой и поверхностью изменяется при перемещении пластины: в верхней части полупроводникового материала оно меньше фокусного, а в нижней части - больше. Угол наклона поверхности полупроводникового материала относительно плоскости, перпендикулярной оптической оси линзы, составлял $6,27^\circ$. После скрайбирования поверхности пластина раскалывается по канавке. Глубина канавки измеряется на разных расстояниях от центра с помощью оптического микроскопа. Для примера приведём результаты исследования двух линз, использованных в данной работе. Линзы имели близкие отношения D/F и, как показали расчёты, приведённые далее по тексту, обе линзы формируют сходные канавки при скрайбировании пластин с чипами. Линза №1 была изготовлена из кварца и имела фокусное расстояние равное 15×10^3 мкм и диаметр – 5×10^3 мкм; Линза №2 изготовлена из стекла, прозрачного для УФ спектрального диапазона, с фокусным расстоянием 8×10^3 мкм и диаметром 3×10^3 мкм.

Численный расчёт глубины фокуса и минимального размера пятна в фокальной плоскости по формулам (1.7 и 1.9) дали следующие результаты: глубина фокуса для линзы №1 составила 12 мкм; для линзы №2 - 9 мкм. Минимальный размер пятна в фокальной плоскости для линзы №1 составил 2 мкм и для линзы №2 - 1,8 мкм. Расчёт диаметров пятна излучения на расстоянии 100 мкм от точки фокуса дал следующие результаты: около 33 мкм для линзы №1 и около 37 мкм для линзы №2. При формировании канавок в КМ на наклонной плоскости выяснилось различие зависимости глубины канавки от расстояния. На рисунке 3.1 приведены графики зависимости глубины канавки от расстояния для линз №1 и №2, сформированных в пластинах с КМ при скрайбировании в многопроходном режиме (30 проходов). Точка отсчёта ($L=0$) определялась как середина области, где глубина канавки максимальна. Обе линзы формируют канавки одинаковой глубины, но при сравнении протяжённости областей канавок с максимальной глубиной выяснено, что для линзы №1 она длиннее. Этот фактор является важным для лазерной установки скрайбирования, так как область глубины фокуса определяет не только максимальную глубину канавки, но и точность установки линзы относительно поверхности для скрайбирования (в пределах области с максимальной глубиной канавки). Для всех исследований, которые были проведённые на Установках 2 и 3, применялась линза №1. Такой глубиной фокуса обладают идеальные линзы, имеющие фокусное расстояние равное 30×10^3 мкм (расчет глубины фокуса по формуле 1.9), но при этом диаметр пятна в точке фокуса и ширина канавки увеличится в 2 раза и, следовательно, увеличится период следования ФЧЭ в ФПУ, рассчитываемы по формуле (1.1).

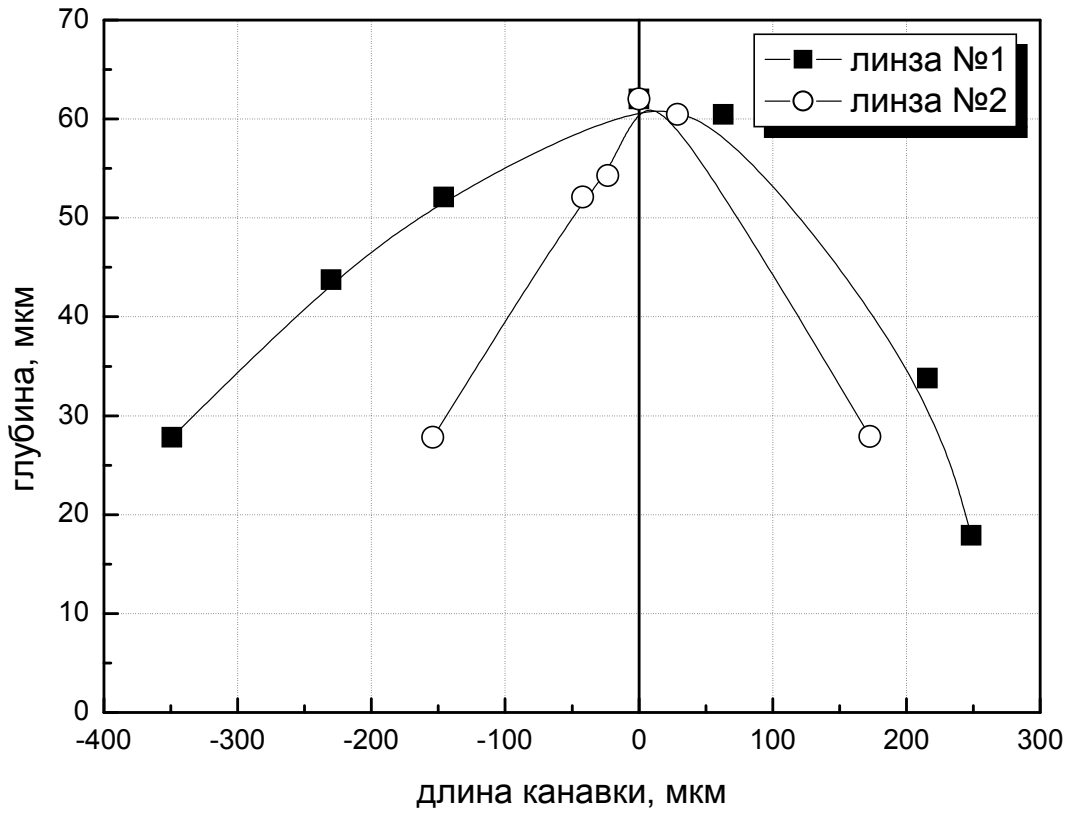


Рисунок 3.1 – Зависимость глубины канавки в пластинах с КМ от расстояния до центра области с максимальной глубиной. Канавки сформированы на наклонных плоскостях в многопроходном режиме (30 проходов) для линз №1 и №2.

3.2. Формирование канавки при однопроходном и многопроходном режиме лазерного скрайбирования

В данном разделе проанализированы два режима формирования канавок: за один и несколько проходов пластины с чипами. Исследовано влияние частоты повторения импульсов излучения и оптической системы на формирование канавки.

3.2.1. Формирование канавки в однопроходном режиме лазерного скрайбирования

Частота повторения импульсов излучения является одним из важных параметров, влияющих на формирование лунки и канавки. Выяснено, что при увеличении частоты повторения с 1 до 100 Гц давление паров кремния в выбросе материала возрастает. Сравнивались результаты воздействия на поверхность КМ с диэлектрической плёнкой диоксида кремния (толщиной около 1,5 мкм) излучения с частотами повторения импульсов 1 и 100 Гц. и плотностью энергии в пятне около 1,10 Дж/см² (диафрагмированное излучение). Диоксид кремния (SiO₂) прозрачен для излучения на длине волны 0,337 мкм. Удаление плёнки SiO₂ над лункой служило индикатором, что давление паров кремния под плёнкой было достаточным для её разрушения. При проведении исследования выяснено, что:

а) при облучении КМ серией из двух импульсов с частотой повторения, равной 1 Гц, в оптический микроскоп не наблюдалось изменений поверхности КМ. При увеличении количества импульсов в серии до 100 при той же частоте, наблюдалось изменение поверхности в области пятна излучения, но плёнка диоксида кремния не разрушалась. В контрольном эксперименте на участках поверхности КМ без диоксида кремния плотности энергии было достаточно для формирования лунки после двух импульсов излучения;

б) при частоте повторения в серии из двух импульсов, равной 100 Гц, давление паров кремния было достаточно для образования лунки и растрескивания и в 50 % случаев удаления диоксида кремния над пятном излучения.

На рисунке 3.2 показана РЭМ-фотография двух лунок. В каждой по 2 импульса с частотой повторения 100 Гц. Над первой лункой плёнка SiO_2 удалена давлением паров кремния, для второй лунки нет - произошло только растрескивание диоксида кремния над лункой.

На рисунке 3.3 показана фотография канавки на поверхности КМ с плёнкой SiO_2 и без неё. Скорость перемещения КМ составляла 5 мкм/сек., плотность энергии около 1,10 Дж/см² и частота повторения импульсов излучения составляла 100 Гц. При данной плотности энергии на поверхности КМ свободной от SiO_2 наблюдалось формирование канавки. В области КМ, покрытой плёнкой SiO_2 , канавка также была сформирована, но давления пара кремния было недостаточно для удаления плёнки вдоль всей канавки. Как видно из рисунка плёнка диоксида кремния удаляется с поверхности КМ неравномерно. При увеличении плотности энергии с 1,10 до 1,50 Дж/см² давления паров кремния в выбросе достаточно для полного удаления плёнки диоксида кремния над канавкой в КМ.

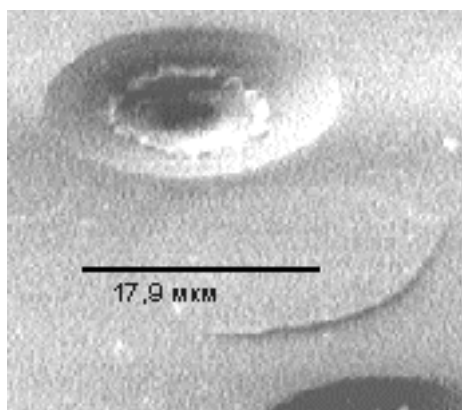


Рисунок 3.2 - РЭМ–фотография поверхности структуры SiO_2/Si (толщина SiO_2 – около 1,5 мкм) после экспериментов по облучению поверхности сериями по два импульса с частотой повторения 100 Гц при плотности энергии около 1,10 Дж/см².

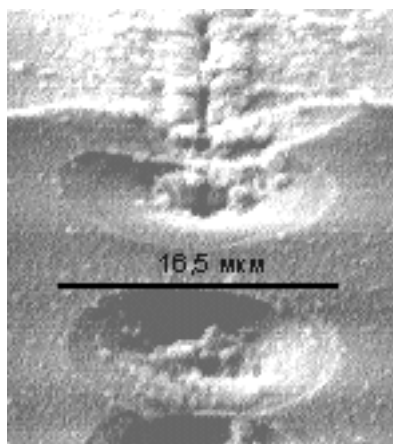
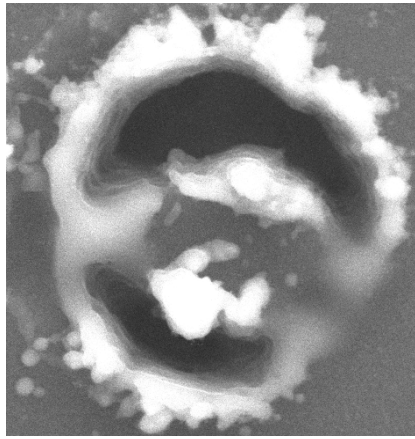


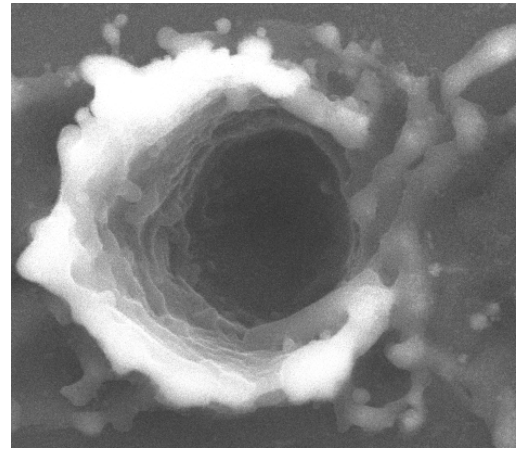
Рисунок 3.3 - РЭМ – фотография канавки на поверхности КМ с диоксидом кремния и без него. Толщина плёнки SiO_2 равна 1,5 мкм. Скорость перемещения КМ составляла 5 мкм/сек. Параметры лазерного излучения: частота повторения 100 Гц, плотность энергии около 1,10 Дж/см².

Сравнение лунок, сформированных в КМ излучением с частотами повторения 10 и 100 Гц при плотности энергии около $3,60 \text{ Дж/см}^2$, выяснено, что для частоты повторения 10 Гц профиль входного отверстия повторяет распределение плотности энергии в пятне. При этом на поверхности отсутствует выдавленный расплав из лунки. Как было показано в Главе 2, в таком режиме скрайбирования ФП, формируются зоны повреждений около 20 мкм. Для частоты повторения 100 Гц профиль входного отверстия не совпадает с распределением плотности энергии в пятне из-за сдвига внешней границы зоны расплава (Зоны 2) в сторону Зоны 3, что и приводит к постепенному увеличению диаметра лунки и выдавливанию расплава из неё на поверхность. На рисунке 3.4 показаны РЭМ-фотографии лунок в КМ при частотах повторения 10 и 100 Гц после 20 импульсов излучения в каждой. В эксперименте использовался режим лазерного скрайбирования недифрагмированным излучением. Профиль распределения плотности энергии в пятне был близок к кольцевой форме. Для проведения эксперимента использовалась Установка 2, шаг перемещения составлял 40 мкм. При таком шаге перемещения вместо непрерывной канавки формируется цепочка лунок.

Результаты исследования зависимости диаметров лунок и ширины канавок от количества импульсов для двух полупроводниковых материалов, имеющих разные температуры плавления (для Si температура плавления составляет 1703 К, для InSb – 808 К), представлены на рисунке 3.5. В эксперименте применялось импульсное излучение с частотой повторения 100 Гц. Измерялись диаметры лунок и ширина канавок на уровне поверхности в зависимости от количества импульсов.



а)



б)

Рисунок 3.4 - РЭМ – фотографии входных отверстий лазерных лунок в КМ, после 20 импульсов излучения при частотах повторения: а) 10 Гц; б) 100 Гц.

В эксперименте использовался режим лазерного скрайбирования недифрагмированным излучением. Профиль распределения плотности энергии в пятне был близок к кольцевому. Диаметры лунок около 30 мкм.

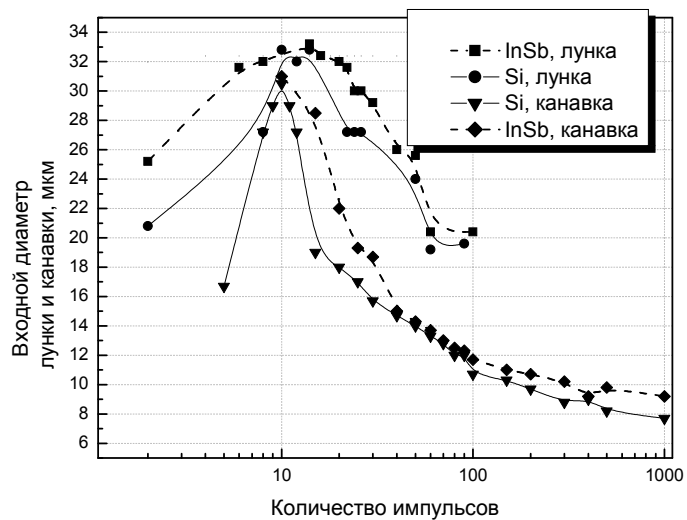


Рисунок 3.5 - Экспериментальные зависимости диаметров лунок и ширины канавок от количества импульсов при частоте повторения 100 Гц для полупроводниковых материалов InSb и Si.

Эксперимент показал, что из-за расплава материала в пятне излучения (Зона 2) диаметры лунок и ширины канавок сильно зависят от количества импульсов и температур плавления полупроводниковых материалов. При формировании лунки с каждым следующим импульсом диаметр и глубина изменяется. В начальный период формирования лунки глубина и диаметр увеличиваются, и расплав выдавливается парами материала на поверхность. В таблице 3.1 представлены диаметры лунок в InSb и HgCdTe для двух и пяти импульсов лазерного излучения. Плотность энергии диафрагмированного излучения составляла около $1,10 \text{ Дж/см}^2$. Для измерения диаметров использовались РЭМ-фотографии. Выяснено, что по мере углубления лунки наступает момент, когда давление паров в выбросе материала становится недостаточно для выдавливания расплава на поверхность, и он остаётся на боковых стенках лунки. Диаметр лунки при этом уменьшается с каждым следующим импульсом излучения. Формирование канавки происходит аналогично. Эксперимент был проведён на Установке 2. При формировании цепочек лунок шаг перемещения составлял 40 мкм, а при формировании канавок – 10 мкм.

Наблюдаемые на рисунке различия в диаметре лунок (ширине канавок) объясняются различием давления пара в выбросе.

При формировании лунки давление выброса материала на расплав уменьшается с момента, когда он достигает поверхности. При формировании канавок, из-за расширения струи пара вдоль канавки, давление выброса на расплав меньше. Как следствие, количество расплава на стенках при формировании лунки меньше, чем при формировании канавки.

Таблица 3.1 - Диаметры лунок в InSb и HgCdTe для двух и пяти импульсов.

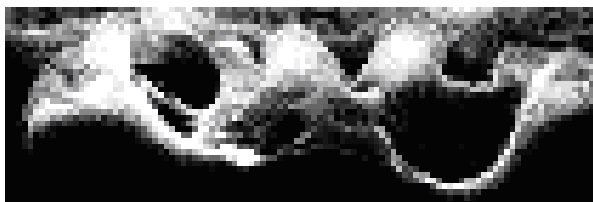
Материал	T _{плавления} , К	Диаметры лунок при разном количестве импульсов, мкм	
		2	5
InSb	808	3,4	3,8
HgCdTe (КРТ)	1063	3,0	3,2

При применении режима лазерного скрайбирования, когда канавка формируется за один проход, расплав материала на краях канавки препятствует гибридизации ФПУ. При применении диафрагмы количество расплава на поверхности уменьшается, но при этом для ФП существует ограничение на плотность энергии менее 1,50 Дж/см² (Глава 2). Ширина и глубина канавки при такой плотности энергии в ФП не превышает 6 и 25 мкм, что при расколе не обеспечивает неровность поверхности менее 1 мкм.

Проанализировано влияния частоты повторения импульсов лазерного излучения на формирование лунок и канавок и сделаны следующие выводы. При повышении частоты повторения импульсов лазерного излучения:

- а) увеличивается давление паров кремния в выбросе материала;
- б) из-за расплава на стенках ширина канавок и диаметры лунок меньше внешней границы Зоны 2. Выдавленный из области образования на поверхность расплав материала, препятствует гибридизации ФПУ.

На рисунке 3.6 показаны три РЭМ-фотографии раскола лунок с разным количеством импульсов в каждой. Профиль распределения плотности энергии в пятне был близок к кольцевой форме. Вид лунки сверху показан на рисунке 3.4.б. Плотность энергии излучения составляла около 3,60 Дж/см².



а)



б)



в)

Рисунок 3.6 – РЭМ-фотографии раскола лунок с разным количеством импульсов: а) - 30 импульсов; б) - 50 импульсов; в) - 100 импульсов. Диаметры лунок около 30 мкм.

3.2.2. Формирование канавки в многопроходном режиме лазерного скрайбирования

При частоте повторения 100 Гц наименьшее количество расплава на поверхности достигается при 50 % перекрытии световых пятен от каждого импульса, что соответствует скорости перемещения пластины 120 мкм/сек. Для формирования канавки глубиной более 100 мкм необходимо многократное прохождение пластины под лазерным излучением. Установка 3 обеспечивает данную скорость перемещения пластин и многопроходный режим лазерного скрайбирования. На рисунке 3.7 показаны зависимости изменения ширины и глубины канавки от количества проходов пластины с ФП под излучением с плотностями энергии около 2,60 и 3,60 Дж/см². Из рисунка видно, что при плотности энергии, равной 3,60 Дж/см², достаточно около 40 проходов для формирования канавок глубиной до 160 мкм. На рисунке 3.8 показаны фотографии фрагментов поверхности ФП на основе плёнки ГЭС КРТ на GaAs подложке после 1...4 проходов пластины под излучением с плотностью энергии около 2,60 Дж/см². Поверхность ФП закрыта сверху диэлектриками Si₃N₄ и SiO₂ (суммарная толщина около 0,15 мкм). Во время первого прохода на поверхности ФП разрушаются плёнки диэлектриков и происходит расплав поверхности КРТ в области пятна излучения. При каждом следующем проходе глубина канавки увеличивается без увеличения её ширины. После второго прохода пластины на краях канавки формируется область с расплавом материала шириной 1...2 мкм и высотой 0,5...1 мкм, что не создаёт препятствия для «гибридизации» ФП с КМ (расстояние между ними после

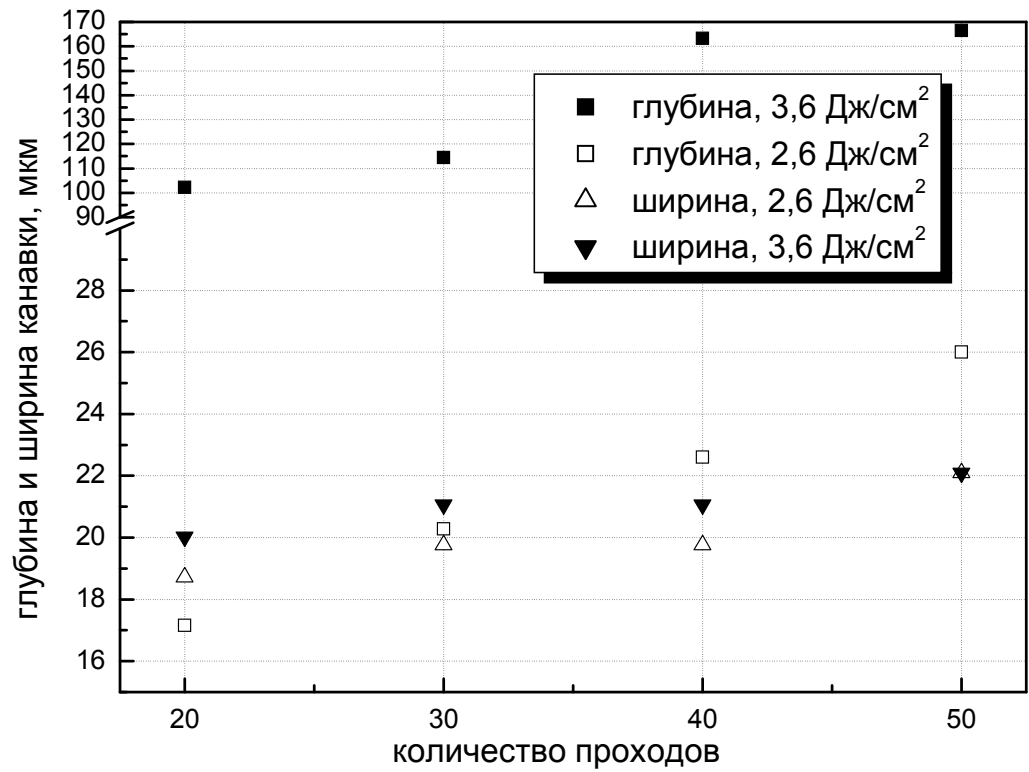


Рисунок 3.7 - Ширина и глубина канавок в пластинах с КМ в зависимости от количества проходов для двух плотностей энергии излучения.

Скорость перемещения пластины с КМ равна 120 мкм/сек, частота повторения импульсов 100 Гц.

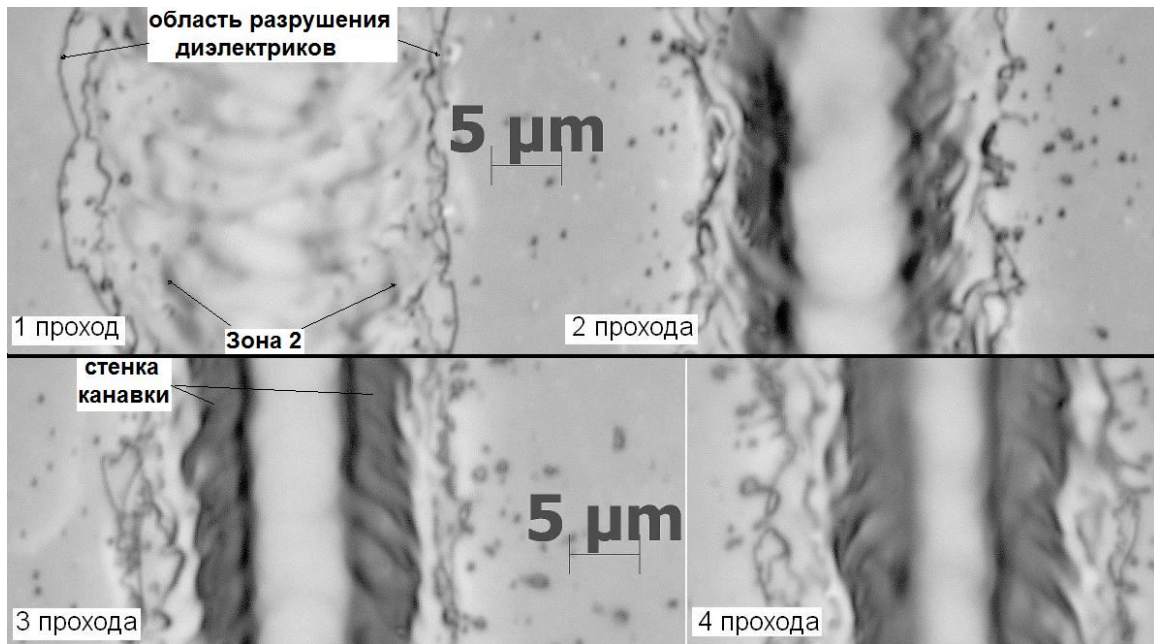


Рисунок 3.8 - Фотографии фрагментов поверхности ФП после 1, 2, 3 и 4 проходов под лазерным излучением при плотности энергии в пятне около $2,60 \text{ Дж/см}^2$.

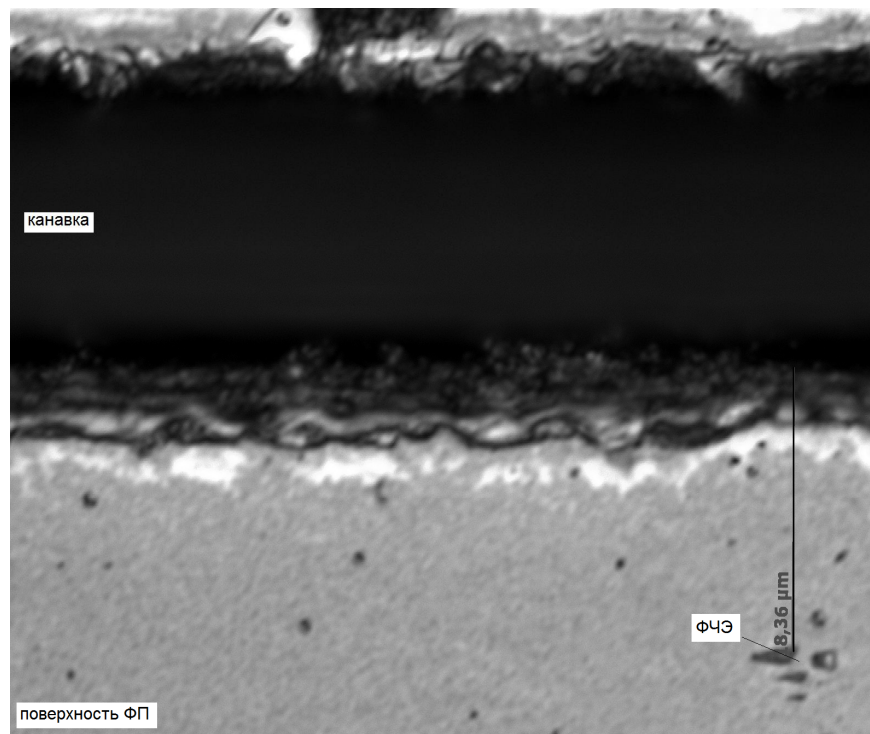
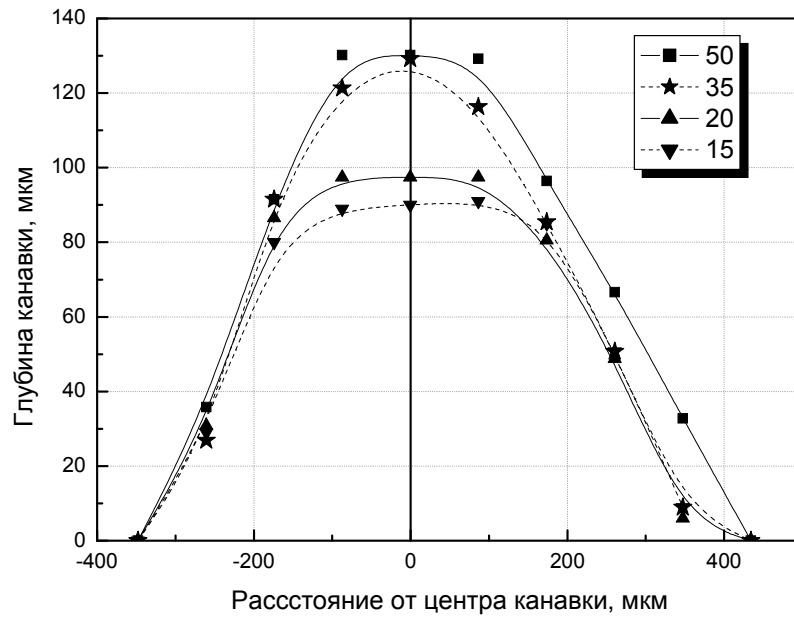


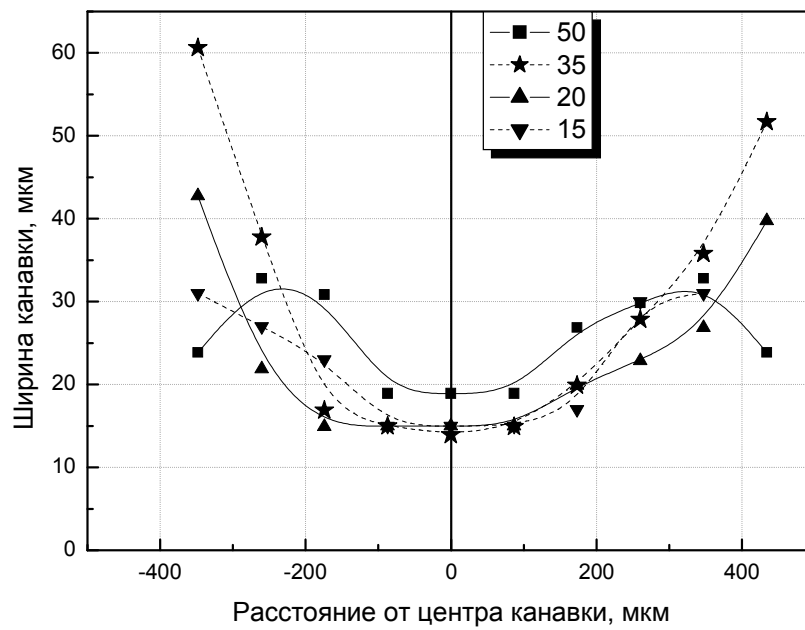
Рисунок 3.9 - Фотография фрагмента поверхности ФП с канавкой (50 проходов, плотность энергии около $2,60 \text{ Дж/см}^2$). Индиевые столбы над ФЧЭ и диэлектрики удалены химическим травлением.

«гибридизации» составляет около 6 мкм). При следующих проходах давления паров КРТ и GaAs в выбросе недостаточно для выдавливания расплава на поверхность ФП. На рисунке 3.9 показана фотография поверхности ФП со сравненными диэлектриками вблизи канавки после 50 проходов при плотности энергии около $2,60 \text{ Дж/см}^2$. Диэлектрики были удалены для более точного выяснения расстояния между центрами ФЧЭ и краем канавки. Это обусловлено тем, что ФЧЭ имеют размеры (10 на 10 мкм) меньшие, чем индиевые столбы, находящимися над ними (20 на 20 мкм).

Применив способ формирования канавки на наклонной поверхности при плотности энергии около $3,60 \text{ Дж/см}^2$, исследована взаимосвязь глубины и ширины канавки от расстояния между линзой и поверхностью КМ в зависимости от количества проходов пластины под излучением. Результаты исследования показаны на рисунке 3.10. На рисунке 3.10.а – показана зависимость глубины канавки от расстояния, измеряемого от центра канавки, при разном количестве проходов пластины с КМ под излучением. На рисунке 3.10.б показана зависимость изменения ширины канавки от количества проходов. Из рисунка 3.10.а видно, что, при увеличении количества проходов более 35, глубина канавки не увеличивается, но увеличивается протяжённость области канавки с максимальной глубиной, а это позволяет снизить точность выставления положения линзы относительно поверхности КМ с $\pm 50 \text{ мкм}$ при 35 проходах до $\pm 100 \text{ мкм}$ при 50. Сравнивая результаты эксперимента, показанные на рисунке 3.10 выяснено, что протяжённость областей с максимальной глубиной и минимальной шириной канавки совпадает при любом количестве проходов КМ.



а)



б)

Рисунок 3.10 - Зависимость глубины и ширины канавки от расстояния между линзой и поверхностью КМ при разном количестве импульсов в каждую точку канавки: а) изменение глубины канавки; б) изменение ширины канавки.

3.3. Однопроходный режим лазерного скрайбирования пластин с кремниевыми мультиплексорами

В Главе 2 показано, что при формировании канавки в ФП за один проход ширина зоны повреждения в среднем составляет около 20 мкм. Режим лазерного скрайбирования при этом следующий: частота повторения импульсов 100 Гц; излучение диафрагмировано и плотность энергии в пятне около $1,50 \text{ Дж/см}^2$. Для выяснение ширины зоны повреждения в КМ при скрайбировании в режиме диафрагмирования излучения был проведён следующий эксперимент. После диафрагмирования излучения в пятне плотность энергии составляла около $2,93 \text{ Дж/см}^2$. До и после скрайбирования в однопроходном режиме измерялись значения токов при обратном включении р-п переходов при напряжении, равном 8,2 В. Сравнение токов до и после скрайбирования пластин с КМ показало, что после скрайбирования на расстояниях менее 6 мкм они увеличились более чем в 100 раз. Для расстояний от р-п переходов до канавки более 10 мкм напряжение пробоя р-п переходов не изменились. Исследовались КМ, изготовленные по технологиям «LOCOS» (технология локального окисления поверхности подложки в местах свободных от МОП транзисторов) и МОП со стоп диффузией. Ширина канавки составила около 2 мкм и глубина - около 6 мкм. На рисунке 3.11 показаны зависимости величины тока при обратном включении р-п переходов от расстояния до края канавки при напряжении, равном 8,2 В. При увеличении плотности энергии до $10,00 \text{ Дж/см}^2$ возрастает ток при обратном включении р-п переходов: для расстояния около 12 мкм до канавки он составил $2,8 \text{ на } 10^{-8} \text{ А}$ (возрос почти в

3 раза); а для расстояния около 26 мкм ток возрос в 1,5 раза. Напряжение питания КМ составляло 20 В. При таком режиме лазерного скрайбирования с плотностью энергии около $10,00 \text{ Дж/см}^2$ ширина зоны повреждения сравнима с шириной зоны повреждения при разрезании пластин с КМ алмазными дисками.

Для режима скрайбирования недифрагмированным излучением с плотностями энергии около $8,20 \text{ Дж/см}^2$ сравнение ВАХ p-n переходов в КМ дои после скрайбирования показало, что уменьшение напряжения пробоя связано с возникновением так называемого «мягкого» пробоя p-n переходов. На рисунке 3.12 показаны ВАХ при обратном включении p-n переходов в КМ до и после лазерного скрайбирования для расстояний до канавки от p-n переходов 2, 7, 8 и 13 мкм. КМ были изготовлены на пластине кремния КЭФ Э,5 (100) ТУ 206, p-n переходы формировались ионным легированием бора с концентрацией $3,6 \text{ на } 10^{15} \text{ см}^{-2}$ по стандартной технологии. Размеры p-n переходов составляли 100 на 100 мкм.

При проведении исследований по определению ширины зоны повреждения в КМ и ФП для разных режимов скрайбирования выяснено, что после скрайбирования в ближайших к канавке p-n переходах и ФЧЭ всегда наблюдалось временное увеличение токов при любых плотностях энергии. Для КМ выяснено, что после скрайбирования временно увеличивались уровни напряжения фотоэдс и фототоков в p-n переходах. Эти изменения зависят от расстояний до канавки. В зависимости от расстояния до канавки время восстановления напряжения фотоэдс составляло 420...3600 сек. (подробности в Приложении 1, раздел П.1.3). При измерении фототока время восстановления составляло $3,6 \text{ на } 10^4 \text{ сек.}$ независимо от расстояний до канавки (2...78 мкм). При скрайбировании плотность энергии недифрагмированного илучения составляла около $5,50 \text{ Дж/см}^2$.

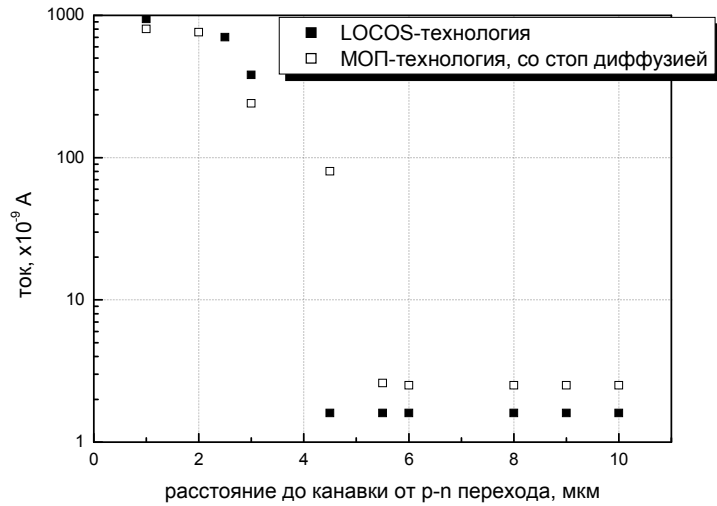


Рисунок 3.11 - Зависимость тока при обратном включении р-п переходов в КМ от расстояния до скрайбовой канавки. Напряжение на р-п переходах равно 8,2 В. КМ изготовлены по технологиям «LOCOS» и МОП со стоп - диффузией.

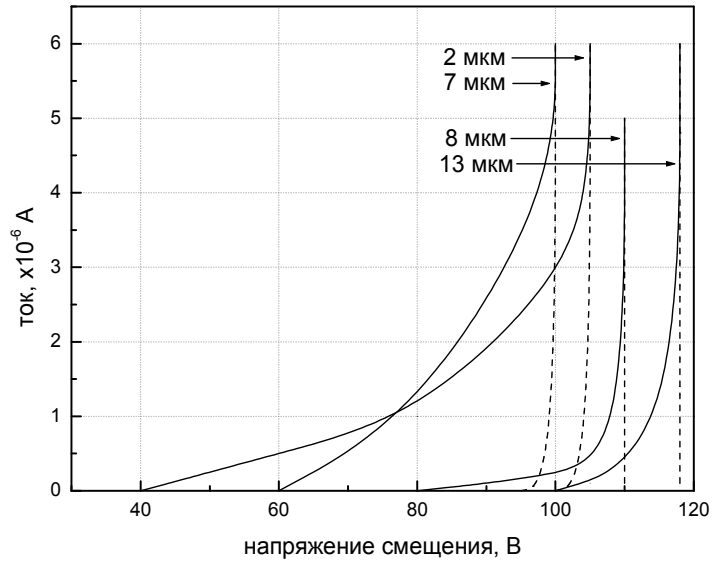


Рисунок 3.12 –ВАХ при обратном включении р-п переходов в КМ до и после лазерного скрайбирования. Расстояния до канавки указаны на графиках. Пунктирными линиями обозначены ВАХ р-п переходов до скрайбирования КМ. Сплошными линиями - после скрайбирования.

На рисунках 3.13 и 3.14 показаны графики изменения во времени напряжения фотоэдс и значений фототоков через p-n переходы в зависимости от расстояний до канавок. При скрайбировании на расстояниях от p-n переходов менее длины диффузии неосновных носителей заряда из-за изменения площади сбора фотогенерированных носителей заряда, уровень сигналов становится зависимым от расстояния до канавки. Поэтому для каждого расстояния сравнивались уровни сигналов, измеренные в разное время после скрайбирования, с установившимся во времени значением уровня фотоэдс.

Выяснено, что после лазерного скрайбирования временно нарушается стабильность электрических характеристик ФЧЭ и элементов схем КМ, что ведёт к их неправильной работе. На примере стробируемого интегратора, выполняющего функцию накопления-считывания информации с ФЧЭ в КМ, временное изменение его параметров после скрайбирования на расстояниях 6, 7 и 10 мкм от накопительной ёмкости ведёт к изменению времени разряда ёмкости с 0,6 на 10^{-6} до 1,6 на 10^{-6} сек. При повторных измерениях после скрайбирования через 24 часа время разряда ёмкости восстановилось. На рисунке 3.15 показана электрическая схема и схематичный рисунок топологии стробируемого интегратора (пояснения и подробности эксперимента в Приложении 1, раздел П.1.4). Анализировалось время разряда «Узла А» после прекращения заряда конденсатора ($2 \text{ на } 10^{-12} \text{ ф}$), образованного ёмкостями истока транзистора Т1, затвора Т2 и алюминиевой токопроводящей дорожки, соединяющей исток транзистора Т1 и затвор транзистора Т2, через транзистор Т1 до напряжения $E_{\text{п}}$. Измерялось время разряда «Узла А» на выходе истокового повторителя на транзисторе Т2 и внешнего нагрузочного сопротивления 10^4 ом .

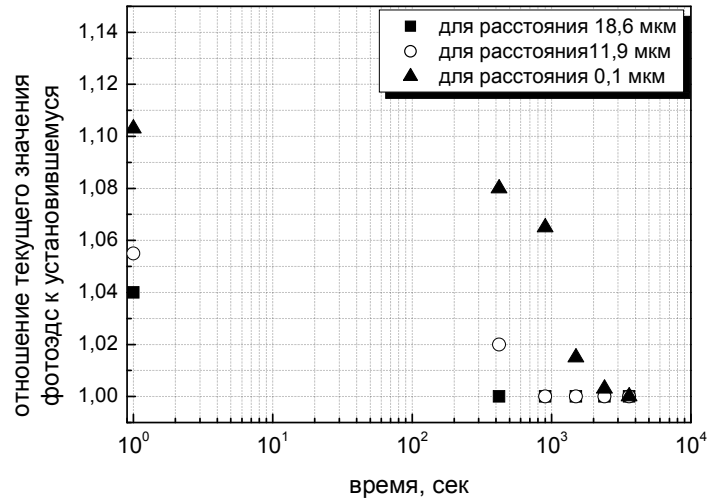


Рисунок 3.13 – Временная зависимость относительного изменения отношения текущего значения фотоэдс р-п перехода в КМ к установившемуся через $3,6 \times 10^3$ сек после скрайбирования значению для разных расстояний до канавки.

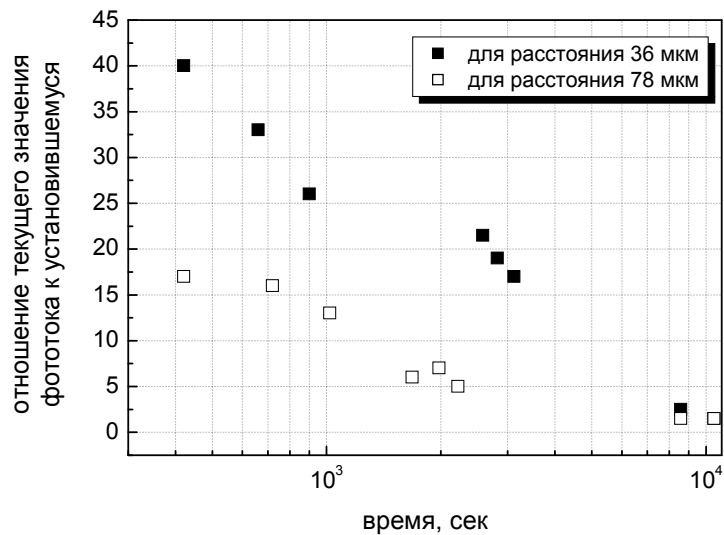
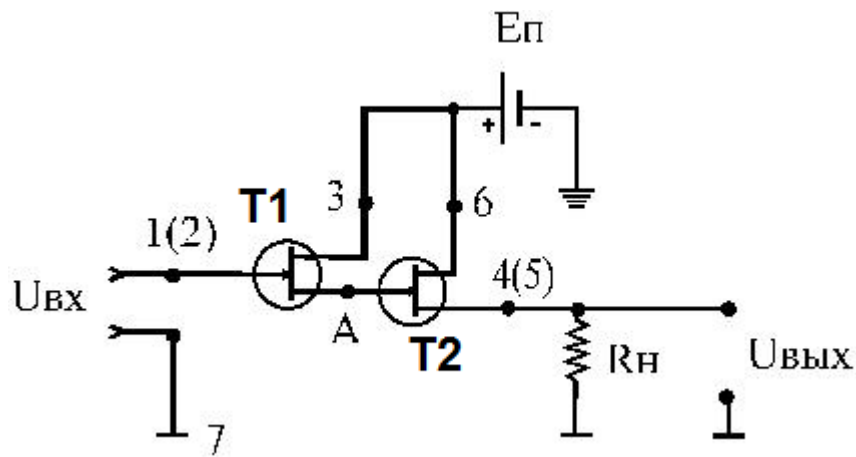
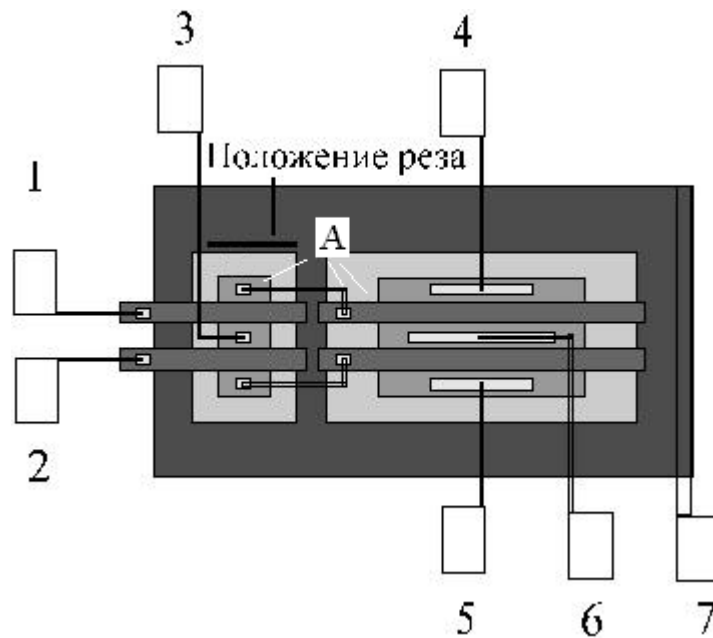


Рисунок 3.14 - Временная зависимость относительного изменения отношения текущего значения фототока при обратном включении р-п перехода в КМ к установившемуся через $1,05 \times 10^4$ сек после скрайбирования значению для расстояний до канавки 36 и 78 мкм. Напряжение смещения составляло 8,2 В.



а)



б)

Рисунок 3.15 – Электрическая схема стробируемого интегратора (рисунок а) и топологический чертёж тестовой структуры, состоящей из двух стробируемых интеграторов (рисунок б). Эксперимент проводился на одном, расположенном на топологическом чертеже вверху. Чёрной полосой показано положение канавки. А обозначен «Узел А». Цифрами 1...7 - контактные площадки тестовой структуры.

На рисунке 3.16 показаны изменения напряжения на выходе стробируемого интегратора до и после лазерного скрайбирования на расстояниях 4, 6, 7 и 10 мкм. После скрайбирования на расстояниях 6, 7 и 10 мкм (измеренных через 30 минут после скрайбирования) время разряда «Узла А» возросло. При повторном измерении через 24 часа после скрайбирования время разряда «Узла А» уменьшилось до исходных значений. При скрайбировании на расстоянии 4 мкм было зарегистрировано невосстанавливаемое изменение уровня выходного сигнала со стробируемого интегратора. Плотность энергии в эксперименте составляла около $2,93 \text{ Дж/см}^2$, ширина канавок около 2 мкм, глубина – около 6 мкм. С целью имитации накопления заряда с ФЧЭ, ускоряющей время разряда «Узла А», измерения осуществлялись при освещении стробируемого интегратора миниатюрной лампой накаливания. На рисунке 3.17 показана РЭМ-фотография стробируемого интегратора после последовательного формирования канавок на расстояниях 10, 7, 6 и 4 мкм от границы «Узла А».

При проведении исследований по скрайбированию пластин с КМ за один проход на разных расстояниях от р-п переходов выяснено:

а) Внешняя граница Зоны 4 в КМ не является резкой. Безопасное расстояние для скрайбирования (расстояние, на котором изменения ВАХ р-п переходов не влияют на работу КМ) для напряжений питания КМ в 10 В составляет не менее 6 мкм;

б) После лазерного скрайбирования регистрируется временное изменение значений токов, и уровней фотоэдс. Данный эффект для излучения на длинах волн 0,694 и 1,064 мкм описан в Главе 1.

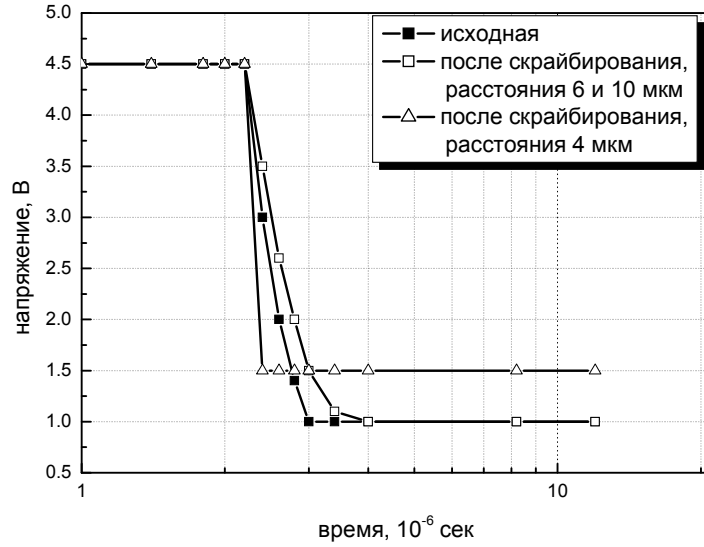


Рисунок 3.16 – Эпюры напряжения на выходе стробируемого интегратора.

Кривая с чёрными квадратиками – исходная и через 24 часа после скрайбирования на расстояниях 6, 7 и 10 мкм; кривая с белыми квадратиками – измеренная через 30 мин после скрайбирования на расстояниях 6 и 10 мкм; кривая с белыми треугольниками – измерена через 30 мин и повторно через 24 часа после скрайбирования на расстоянии 4 мкм.

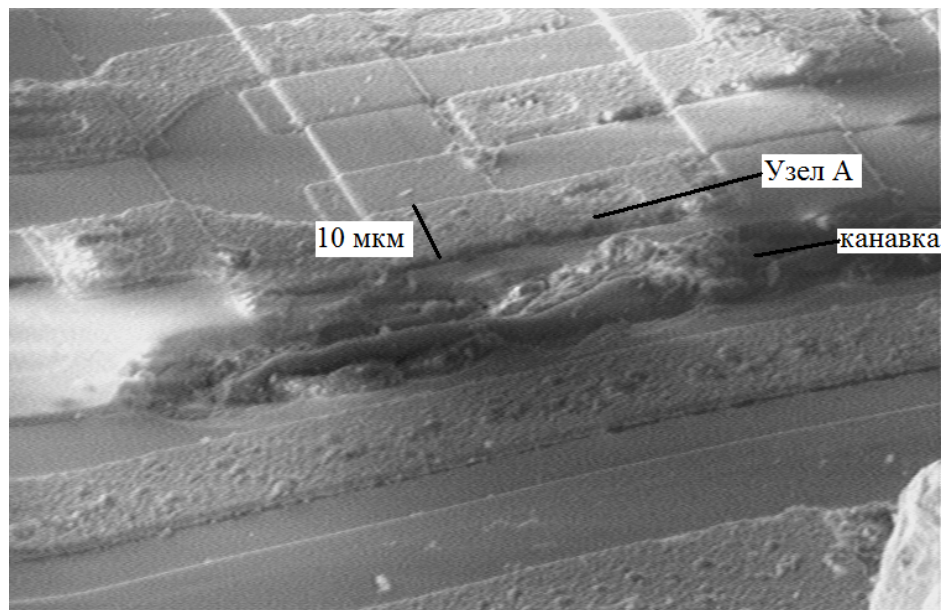


Рисунок 3.17 – РЭМ-фотография стробируемого интегратора после скрайбирования на расстоянии 4 мкм от «Узла А».

3.4. Многопроходный режим лазерного скрайбирования пластин с фотоприёмниками

В Главе 2 показано, что для однопроходного режима лазерного скрайбирования ФП на основе ГЭС КРТ ширина зоны повреждения составляет около 20 мкм. Лазерное скрайбирование осуществлялось диафрагмированным излучением с плотностью энергии в пятне около $1,50 \text{ Дж/см}^2$.

При скрайбировании в многопроходном режиме (50 проходов) при плотности энергии около $2,60 \text{ Дж/см}^2$ ширина зоны повреждения в ФП составила около 13 мкм. На рисунке 3.18 показана зависимость «темнового» тока через ФЧЭ при обратном смещении минус 0,2 В от расстояния до канавки. Область между двумя линиями показывает разброс значений токов через ФЧЭ в контрольной группе, вдоль которых скрайбирование не проводилось. В эксперименте использовалась ФП на основе ГЭС КРТ форматом 4 на 288 ФЧЭ. Для ФЧЭ, расположенном на расстоянии около 12 мкм, после скрайбирования увеличение токов составило около 83 %, а на расстоянии в 13 мкм - 40 %. При допустимом разбросе значений токов через ФЧЭ в ФП около 50% ширина зоны повреждения в ФП составляет около 13 мкм. При применении многопроходного режима лазерного скрайбирования изменения ВАХ ФЧЭ зависят от расстояния до канавки и отличаются от случая применения однопроходного режима с диафрагмированием излучения. На ВАХ ФЧЭ регистрируется область «мягкого» пробоя, причём напряжение начала «мягкого» пробоя, как и в КМ,

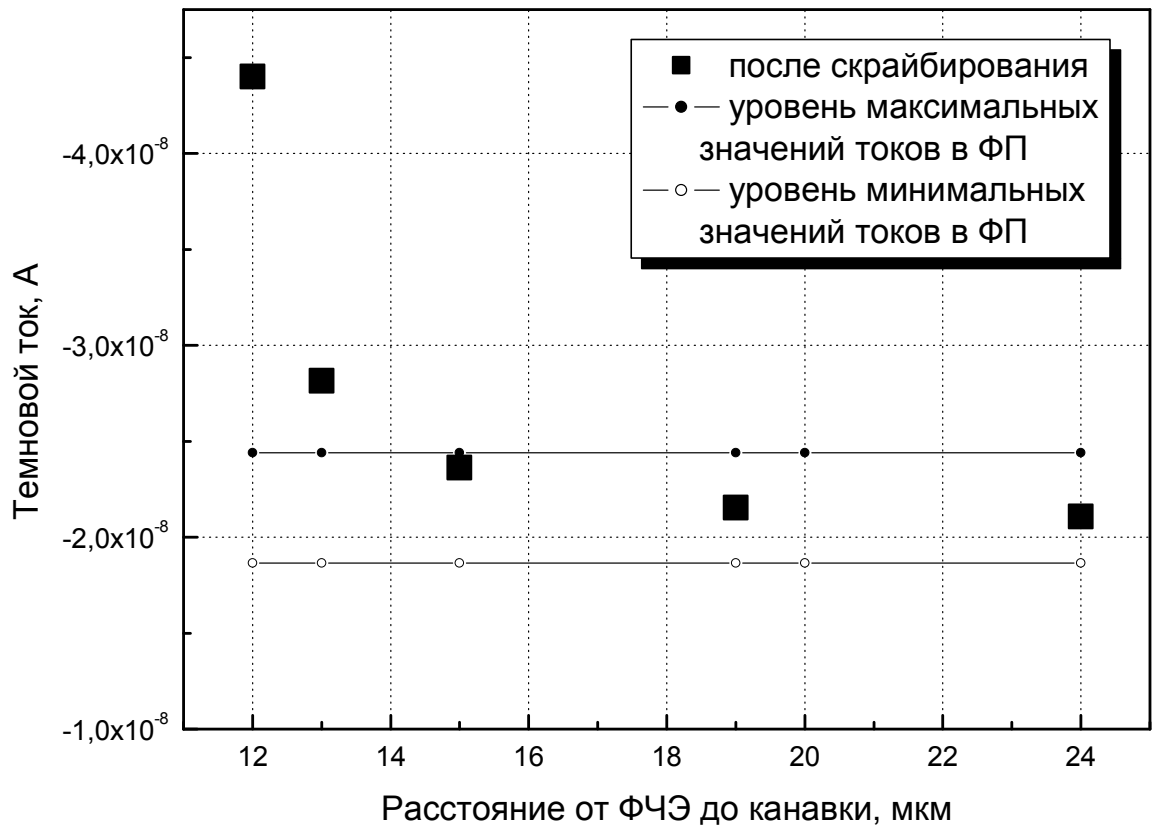


Рисунок 3.18 - Зависимость «темнового» тока через ФЧЭ при обратном напряжении смещения минус 0,2 В от расстояния до канавки. Область между линиями с точками соответствует разбросу токов через ФЧЭ до скрайбирования.

зависит от расстояния между ФЧЭ и канавкой.

При применении для скрайбирования многопроходного режима с недифрагмированным излучением по краям пятна присутствует область с плотностями энергии, недостаточными для плавления материала (Зона 3). Для уменьшения ширины зоны повреждения (Зона 4) необходимо ограничить область пятна Зонами 1 и 2. Для этого на поверхность ФП наносили непрозрачную на длине волны 0,337 мкм защитную плёнку - фоторезист. Он также предохраняет поверхность ФП от загрязнения продуктами выброса материала из канавки. На рисунке 3.19 показана зависимость «темнового» тока через ФЧЭ при обратном напряжении смещения минус 0,2 В от расстояния до канавки. Область между двумя линиями показывает разброс значений токов через ФЧЭ в контрольной группе, вдоль которых скрайбирование не производилось. Из рисунка видно, что при принятии мер по ограничению пятна Зонами 1 и 2 ширина зоны повреждения уменьшилась с 13 до 8 мкм. Глубина канавки в данном режиме лазерного скрайбирования составляла около 26 мкм при 50 проходах пластины с ФП под лазерным излучением.

При ширине канавки около 18 мкм и ширине зоны повреждения около 13 мкм размер пятна излучения составляет 44 мкм. Для случая, когда в пятне присутствует излучение с плотностями энергии, характерными для Зон 1, 2 и 3, ширину зоны повреждения определяет ширина Зоны 3. Это соответствует сделанному в Главе 1 предположению, что регистрируемые разными методами изменения в материале вокруг лунок (в оптический микроскоп или подсчётом концентрации дислокаций вокруг лунок) находятся в пределах пятна излучения. Защита поверхности ФП от излучения Зоны 3 позволяет скрайбировать с минимальной шириной зоны повреждения.

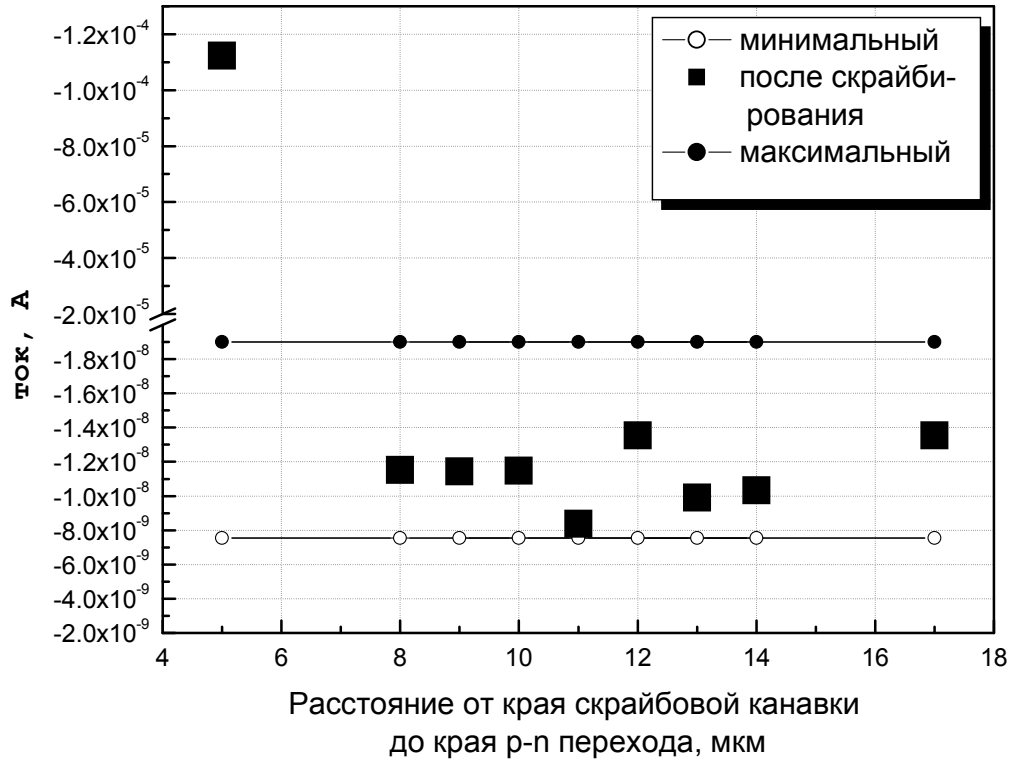


Рисунок 3.19 - Зависимость «темнового» тока через ФЧЭ при обратном напряжении смещения минус 0,2 В от расстояния до канавки. Область между двумя линиями показывает разброс значений токов через ФЧЭ в контрольной группе, вдоль которых скрайбирование не производилось.

3.5. Стабильность электрических параметров фотоприёмников после скрайбирования

Временная стабильность параметров р-п переходов в КМ и ФЧЭ в ФП является необходимым требованием в работе ФПУ. В КРТ из-за больших значений коэффициентов диффузии компонентов и точечных дефектов необходимо исследовать временную стабильность ВАХ ФЧЭ в зоне повреждения. Известно, что при повышении температуры ускоряются механизмы возникновения отказов приборов из-за ускорения химических реакций, обуславливающих деградацию электрических параметров р-п переходов в КМ (хранение при повышенных температурах). Такое испытание было проведено для ФП. Исследование проводилось на линейчатом ФП на основе ГЭС КРТ форматом 4 на 288 ФЧЭ. После скрайбирования ФП последовательно выдерживались при температуре 343 К в течении 28, 29 и 30 часов с измерением ВАХ ФЧЭ после каждого периода нагрева. Измерялись ФЧЭ, находящиеся в зоне повреждения и в контрольной группе. Режим скрайбирования ФП – многопроходный (50 проходов) с плотность энергии около $2,60 \text{ Дж/см}^2$.

На выбор температуры хранения в 343 К повлияли следующие факты:

а) при длительном хранении (4 года) при температуре 293 К ВАХ ФЧЭ не изменяются [72];

б) при повышении температуры хранения ускоряются деградационные процессы в полупроводниковых материалах [73];

в) при долговременных хранениях при температуре 373 К изменяются ВАХ ФЧЭ. На рисунке 3.20 показано изменение средних значений и ширины области разброса значений токов через ФЧЭ в двух ФП при обратном напряжении смещения минус 0,2 В во времени. В каждом ФП измерялось по 20 ФЧЭ.

Для проведения исследования по хранению ФП при повышенных температурах была выбрана температура, равная 343 К, при которой в соответствии с экспериментальными результатами [74], деграционные процессы в КРТ ускоряются в 37 раз, относительно температуры хранения 303 К, что значительно сокращает время проведения исследования. На рисунке 3.21 показаны результаты измерения ВАХ ФЧЭ контрольной группы и находящихся в зоне повреждения на расстояниях 11 и 13 мкм при хранении ФП. На рисунке из всего семейства ФЧЭ контрольной группы (5 штук) показаны только минимальная и максимальная ВАХ, графики нарисованы сплошной линией. ВАХ ФЧЭ, вблизи которых проведено скрайбирование, показаны пунктирными линиями. До скрайбирования они находились внутри области, края которой обозначены сплошными линиями. Измерение ВАХ ФЧЭ по мере нарастания времени хранения не показало ускорения деграции ФЧЭ, расположенных вблизи канавки.

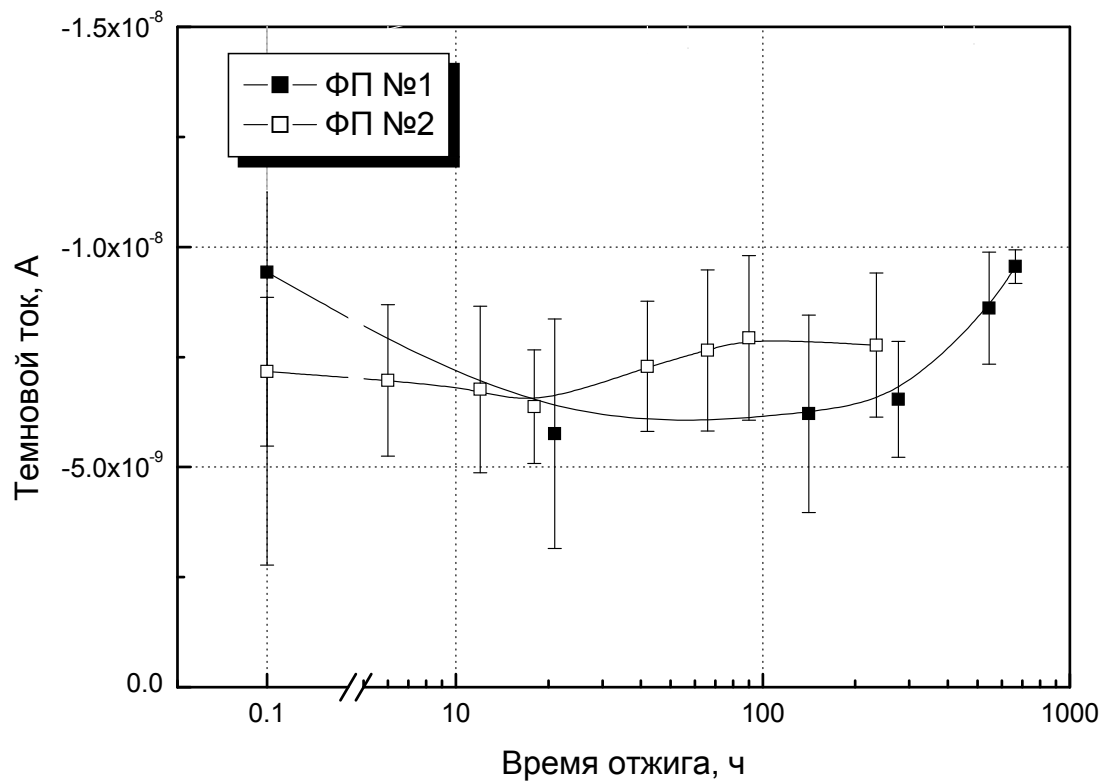
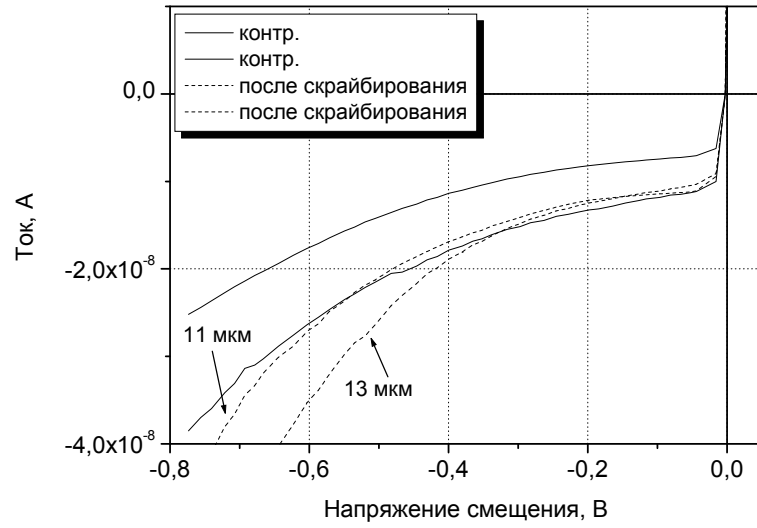
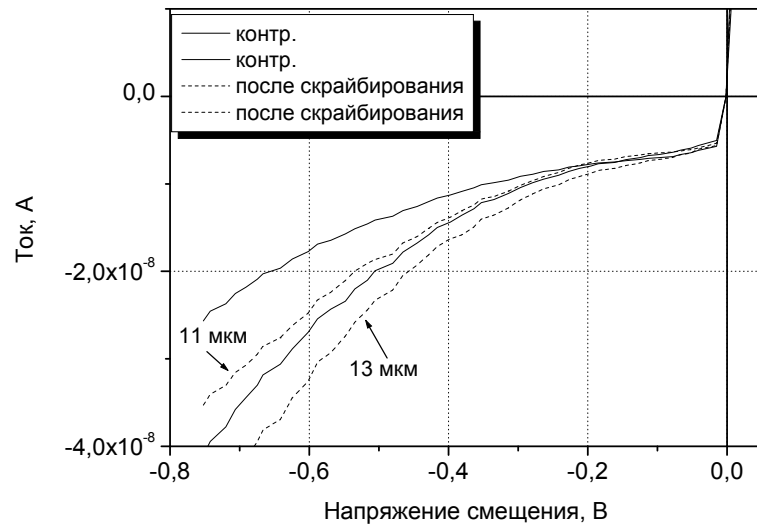


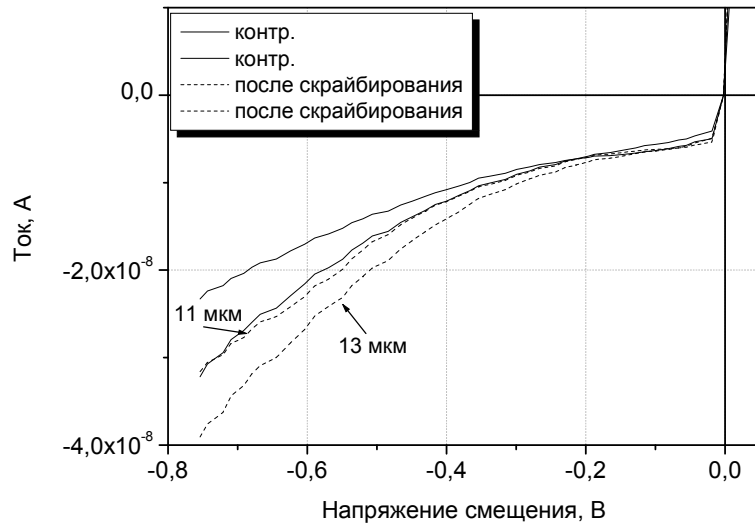
Рисунок 3.20 – Зависимость среднего значения «темнового» тока при обратном смещении ФЧЭ минус 0,2 В и температуре хранения 373 К от времени хранения. Отрезками показано изменение разброса значений «темновых» токов в группе из 20 ФЧЭ.



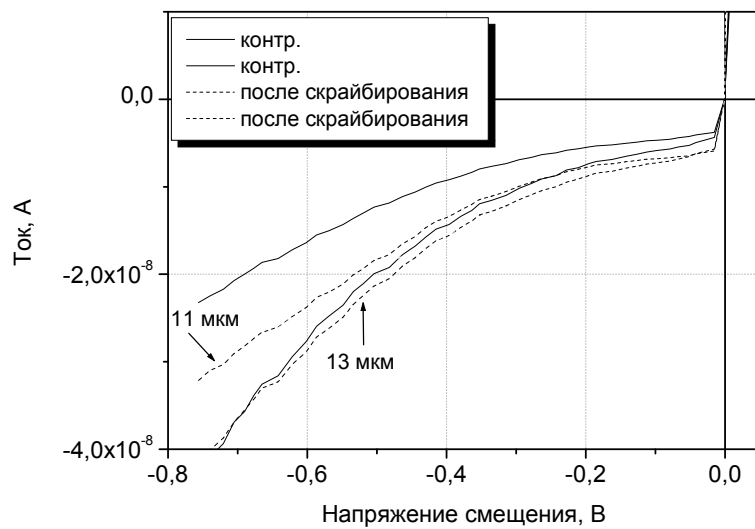
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.21 - ВАХ при обратном включении ФЧЭ до (рисунок 3.21.а) и после 28 (б), 57 (в) и 87 (г) часов хранения при температуре 343 К. ВАХ контрольной группы ФЧЭ обозначены сплошными линиями; ВАХ ФЧЭ в зоне повреждения обозначены пунктирными линиями. Расстояния от ФЧЭ до канавки указаны на рисунках.

Выводы к главе

В результате проведённых исследований по взаимодействию лазерного излучения с полупроводниковыми материалами предложены режимы скрайбирования, при которых ширина зон повреждения уменьшена для КМ с 35 до 6 мкм и до 8 мкм для ФП на основе р-типа плёнок МЛЭ КРТ на GaAs подложках. Для этого:

1) На основе проведённого анализа влияния частоты повторения импульсов излучения на формирование канавки выбрана частота повторения лазерного излучения равной 100 Гц;

2) Обоснован выбор способа перемещения пластин с КМ и ФП под лазерным излучением, при котором объём выдавленного на поверхность расплава не мешает «гибридизации» ФПУ. Для установок лазерного скрайбирования показано, что оптимальным является многопроходный режим (50 проходов) со скоростью перемещения пластины с чипами около 120 мкм/сек. на частоте повторения 100 Гц;

3) Предложен способ отбора параметров линз и на его основе сделан выбор линзы с удлинённой каустикой для установки лазерного скрайбирования;

4) Проведён анализ влияния неравномерности плотности энергии в пятне излучения на ширину зоны повреждения. Для ФП при наличии расплава на стенках канавки (Зона2) ширина зоны повреждения уменьшается с 28 до 20 мкм, а при скрайбировании КМ с 40 до 13 мкм. Защита поверхности ФП от излучения Зоны 3 и многопроходный режим скрайбирования позволяет дополнительно уменьшить ширину зоны повреждения до 8 мкм;

5) Показано, что при длине волны 0,337 мкм, частоте повторения 100 Гц, скорости перемещения пластин под излучением 120 мкм/сек. в многопроходном режиме скрайбирования (50 проходов) и применения линз с глубиной фокуса около 200 мкм, для формирования канавок глубиной 130 мкм в КМ и 170 мкм в ФП достаточно плотности энергии около 3,60 Дж/см². При скрайбировании вблизи ФЧЭ в ФП плотности энергии около 2,60 Дж/см² достаточно для формирования канавки глубиной около 26 мкм. Ширина зоны повреждения при этом составляет около 8 мкм;

6) Показано, что после хранения при температуре 373 К в течении 665 часов ФЧЭ не деградируют. ВАХ ФЧЭ, расположенные в зоне повреждения, термически стабильны не менее 87 часов при температуре отжига 343 К, как и ФЧЭ вне зоны повреждения.

4. Методики скрайбирования пластин с кремниевыми мультиплексорами и фотоприёмниками. Практическое применение

В Главах 2 и 3 представлены результаты исследования ширины зон повреждения (Зона 4) в КМ и ФП для разных режимов лазерного скрайбирования. Для скрайбирования выбраны следующие режимы: пластин с КМ - однократный диафрагмированный с плотностью энергии около $2,93 \text{ Дж/см}^2$, обеспечивающий скрайбирование на расстоянии в 6 и более микрометров от р-п переходов, и пластин с ФП (поверхность закрыта фоторезистом) - многократный с плотностью энергии около $2,60 \text{ Дж/см}^2$, обеспечивающий скрайбирование на расстоянии более 8 мкм от ФЧЭ. В данной Главе описаны разработанные автором методики скрайбирования пластин с КМ и ФП, и показаны примеры их практического применения.

4.1. Методики формирования канавки в пластинах с кремниевыми мультиплексорами

Режим лазерного скрайбирования пластин с КМ диафрагмированным излучением за один проход с плотностью энергии около $1,10 \text{ Дж/см}^2$ был применён для удаления плёнки диоксида кремния над алюминиевой дорожкой, не имеющей выхода на краевую контактную площадку. На выбранном участке КМ параллельно краям алюминиевой дорожки, с двух сторон от неё,

формировались канавки. Давлением паров кремния в выбросе над канавкой диоксид кремния разрушался и удалялся с поверхности. При этом область отрыва диоксида кремния частично располагалась над алюминиевой дорожкой. К свободной от диоксида кремния поверхности алюминиевой дорожки создавался контакт, и исследовалась работоспособность фрагмента схемы КМ для последующей её коррекции при проектировании КМ. Данная работа была проделана при выполнении Договора №51/01 от 25.07. 2005 г. («Разработка конструкции и изготовление кремниевого мультиплексора формата 160 на 120 элементов с коррекцией входных сигналов»). В Приложении 2 представлен Акт внедрения результатов диссертационной работы.

Режим лазерного скрайбирования пластин с КМ за один проход с плотностью энергии диафрагмированного излучения около $5,50 \text{ Дж/см}^2$ был применён для изготовления двух МФПУ, каждое состояло из одной матричной ФП, форматом 64 на 64 ФЧЭ с периодом их следования 100 мкм, и четырех КМ, изготовленных по КМОП технологии. Скрайбирование КМ осуществлялось на расстоянии около 28 мкм от внешней границы области р-типа кремния в n-типе. На рисунке 4.1 показана фотография МФПУ и схема его устройства. Работа проводилась в рамках выполнения НИР «Матрица X» («Разработка технологии получения методом МЛЭ фоточувствительных слоёв $A^{II}B^{VI}$ многоэлементных охлаждаемых линейчатых и матричных фотоприёмников»). Договор ИФП СО РАН №3594 от 19.05.95). В Приложении 2 представлен Акт внедрения результатов диссертационной работы.

Методика скрайбирования в однопроходном режиме пластин с КМ состоит в следующем: формируется канавка диафрагмированным излучением с плотностью энергии около $2,93 \text{ Дж/см}^2$; после этого формируется вторая канавка недиафрагмированным излучением со смещением пятна излучения на

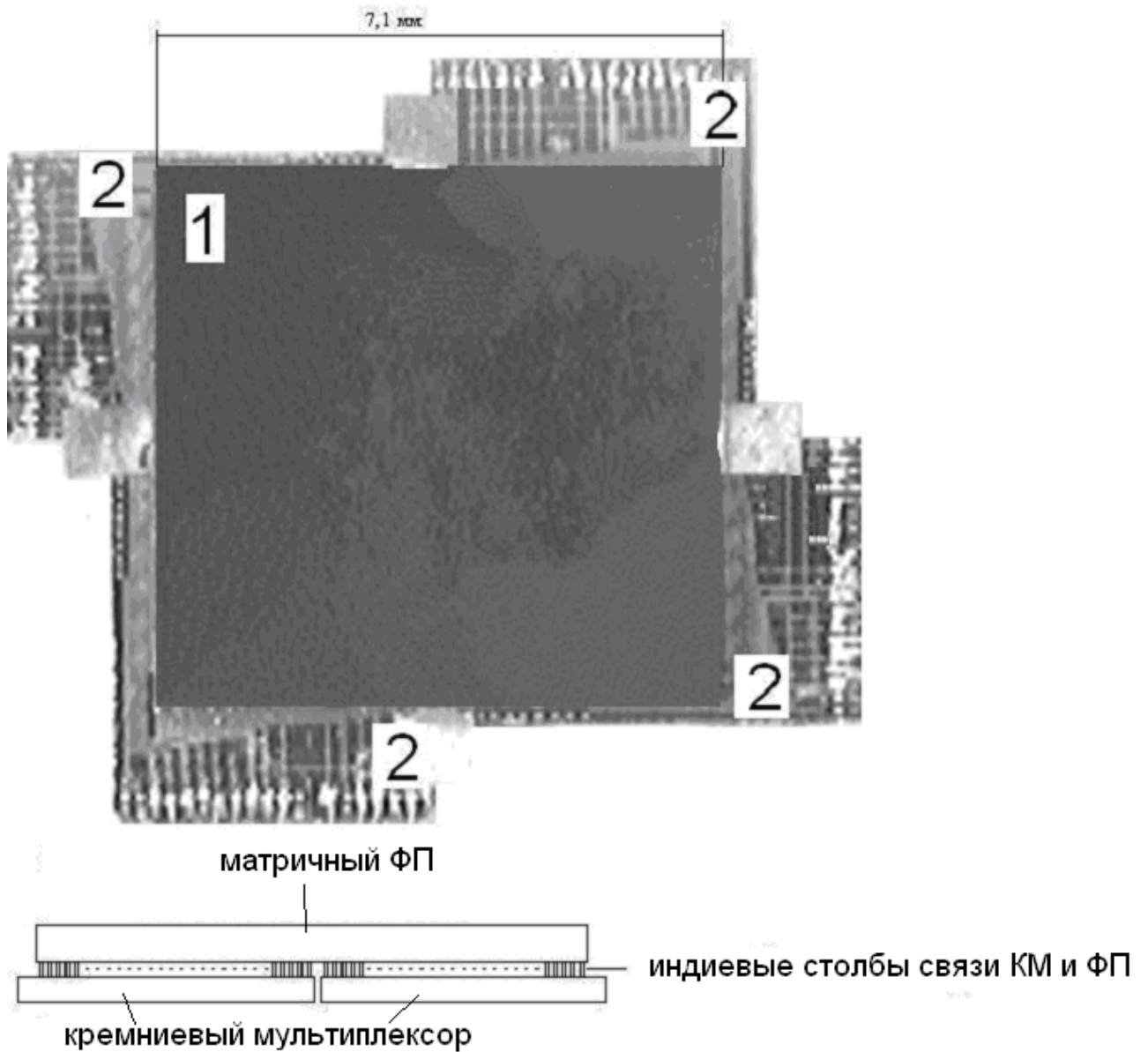


Рисунок 4.1 - Фотография МФПУ, состоящего из одного матричного ФП форматом 64 на 64 ФЧЭ и четырёх КМ форматом 32 на 32. В нижней части приведена схема МФПУ. Период следования ФЧЭ - 100 мкм. 1 – ФП; 2 - КМ

1...2 мкм в сторону от КМ. Плотность энергии излучения при скрайбировании составляет около $3,60 \text{ Дж/см}^2$. Глубина второй канавки составляет более 130 мкм. Первая канавка препятствует воздействию мощного лазерного излучения на приповерхностный слой КМ с расположенными там элементами схемы.

Применение многопроходного режима лазерного скрайбирования недифрагмированным излучением (плотность энергии около $3,60 \text{ Дж/см}^2$) с последующим расколом пластин с ФЧЭ на SiGe, имеющих размеры 650 на 650 на 400 мкм. На рисунке 4.2 показана фотография ФЧЭ на SiG в корпусе. Данная работа была проведена для выполнения гранта РФФИ 05-02-08022 «Создание технологии и исследование свойств плёнок с предъявлением по окончании работы макета линеек фотоприёмников на их основе». В Приложении 2 представлен Акт внедрения результатов диссертационной работы.

Многопроходный режим лазерного скрайбирования в водной среде, при котором отсутствует выброс расплава и частиц материала на стенках канавки, был применён для скрайбирования пластин с матричными КМ при проведении исследований по повышению качества сварки индиевых столбов при «гибридизации» ФПУ методом «флип-чип». Для предотвращения сдвига индиевых столбов при скрайбировании в водной среде (описано в Главе 2), поверхность КМ перед скрайбированием специально покрывалась фоторезистом для увеличения жёсткости индиевых столбов. Методика формирования канавки состояла в следующем: первых десять проходов осуществлялось излучением с плотностью энергии около $2,60 \text{ Дж/см}^2$ (глубина канавки около 14 мкм);. Последующие 50 проходов проводилось излучением с плотностью энергии около $3,60 \text{ Дж/см}^2$. На рисунке 2.14 (Глава 2) была

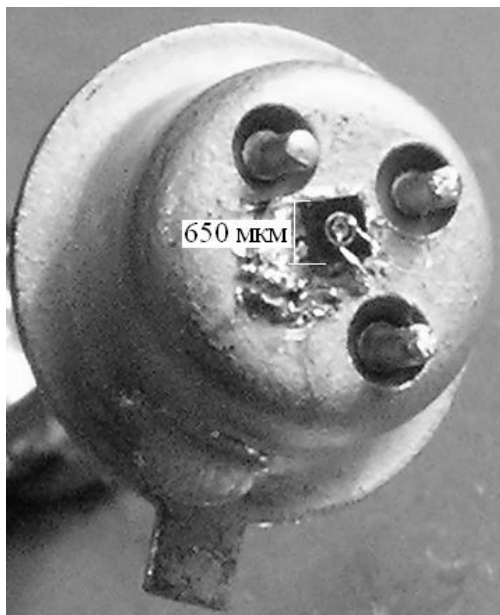


Рисунок 4.2 - Фотография ФЧЭ на основе SiGe в корпусе.

показана РЭМ-фотография «гибридной» сборки двух половинок КМ. Фотография также иллюстрирует качество раскола пластины с КМ после скрайбирования в воде. Расстояние от края КМ до индиевых столбов составляло около 25 мкм. Применение методики скрайбирования позволило контролировать результаты исследований по увеличению качества сварки индиевых столбов между КМ и ФП при гибридизации ФПУ с помощью растрового электронного микроскопа. Результатом исследований стало увеличение усилия на отрыв ФП от КМ с 8 до 27 ± 1 Н для ФПУ форматом 128 на 128 ФЧЭ (при максимальном усилии на отрыв, равном 36 ± 1 Н, при условии их сплавления) при применении отжига ФПУ при температуре 403 К в течении 820 сек. и оплавления индиевых столбов на КМ перед его «гибридизацией» с ФП. Для этого была разработана технология оплавления индиевых столбов в КМ в вакууме в потоке водорода при температуре 440 К. Для этого КМ с индиевыми столбами помещается в вакуум ($(3...4)$ на 10^{-7} мм. рт. ст.) и нагревается до температуры около 440 К. Вблизи КМ расположена титановая пластина, насыщенная водородом, которая нагревается до температуры около 983 К в течение 2 часов. При нагреве из пластины титана выделяется водород, который, взаимодействуя с окисной плёнкой на поверхности индиевых столбов, восстанавливает металлический индий из окисной плёнки на столбах. Технология оплавления индиевых столбов на КМ позволяет повторно использовать КМ после разрыва ФПУ, восстановлением формы столбов оплавлением в вакууме в потоке водорода. На РЭМ-фотографии рисунка 4.3 показан фрагмент КМ, форматом 4 на 288, после оплавления, а на рисунке 4.4 показана РЭМ-фотография фрагмента КМ, форматом 4 на 288, после разрыва ФПУ с оплавленными столбами на КМ. Для измерения усилий на отрыв автором был разработан метод и устройство, обеспечивающие

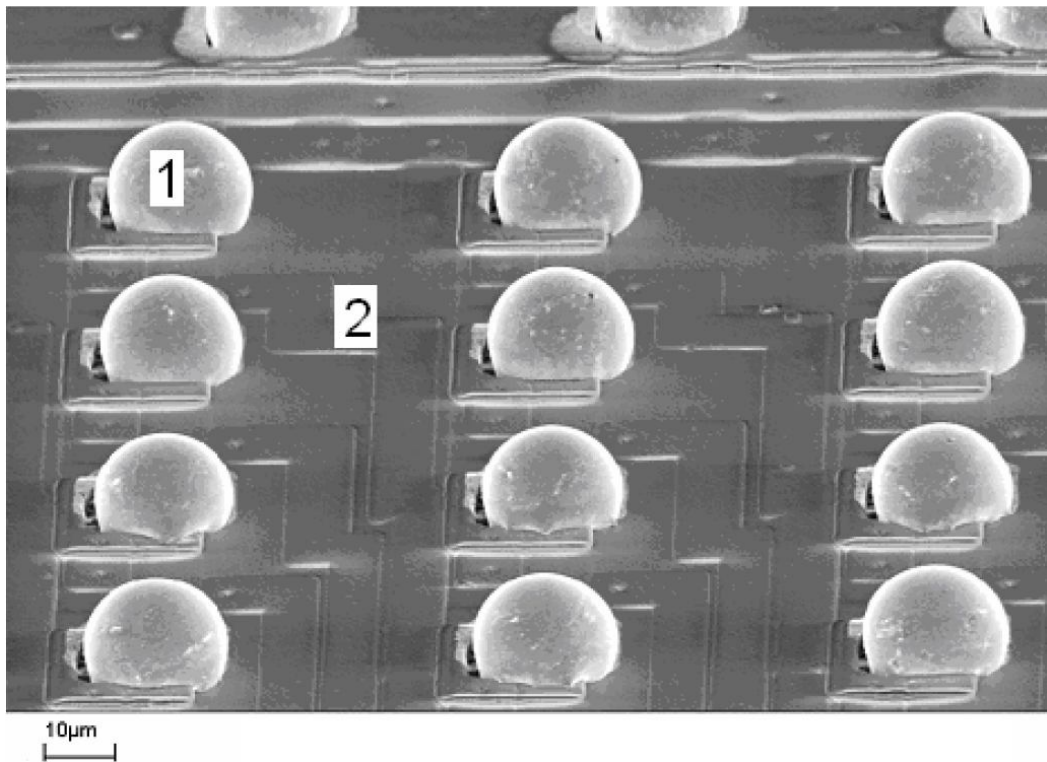


Рисунок 4.3 – РЭМ-фотография фрагмента КМ форматом 4 на 288 после оплавления. 1 – индиевый столб после оплавления; 2 – элементы схемы КМ.

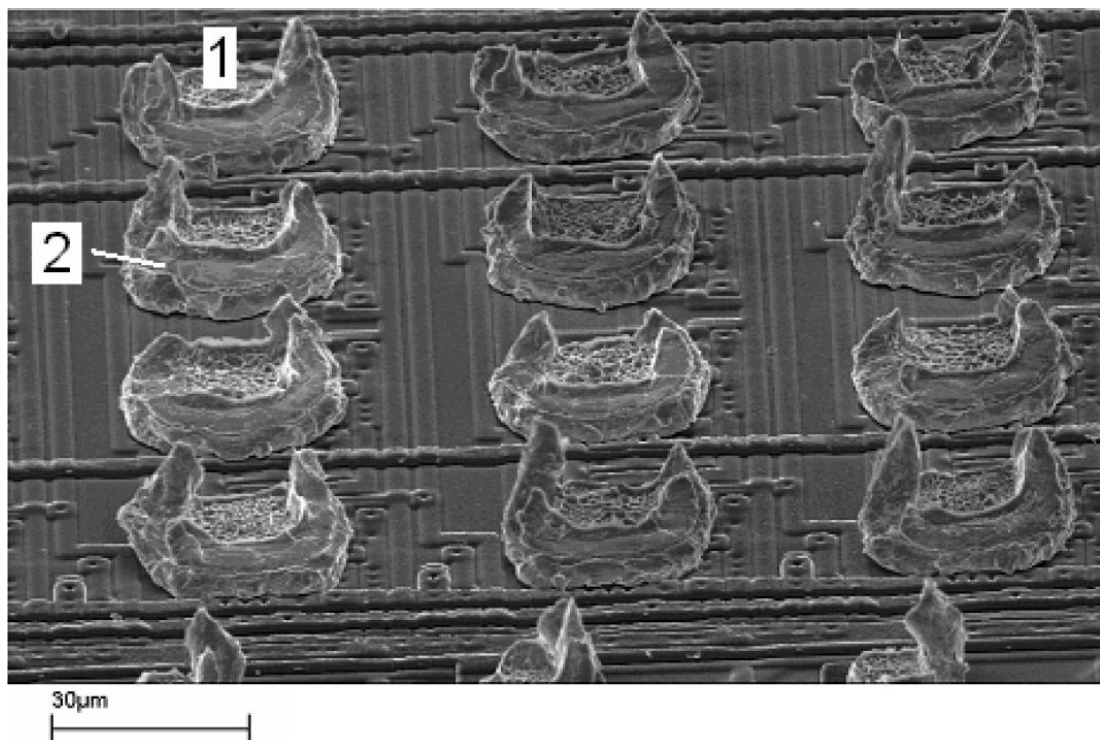


Рисунок 4.4 – РЭМ-фотография фрагмента КМ форматом 4 на 288 после разрыва ФПУ. 1 – область разрыва индиевых столбов; 2 – индий выдавленный из объёма столба при «гибридизации» КМ и ФП

плоскопараллельный отрыв ФП от КМ, нагретых до температуры около 393 К. При данной и более высоких температурах индий становится пластичным и при отрыве столбов друг от друга, он вытягивается из областей сварки в направлении отрыва. При этом формируются характерные тянущихся «пики», позволяющие, применив РЭМ микроскоп исследовать область сварки столба с ответным. Измерение усилия на отрыв осуществлялось следующим образом. Отрыв происходит под действием силы тяжести. Постепенное увеличение веса, прикладываемого к ФПУ, позволяет определять усилие на отрыв ФП от КМ. Для увеличения веса использовались металлические пластины весом по 0,05 кг, выдержка при каждом весе составляла около 300 сек. На рисунке 4.4 видна сетка из «пиков» индия на поверхности столбов. Усилие на разрыв каждого индиевого столба составляла более $295 \cdot 10^{-6}$ кг при размере столба 20 на 20 мкм.

4.2. Методики формирования канавки в пластинах с фотоприёмниками

Методика лазерного скрайбирования пластин с матричными ФП в многопроходном режиме состоит в следующем. Формируется канавка излучением с плотностью энергии около $2,60 \text{ Дж/см}^2$. Глубина канавки должна превысить толщину ГЭС КРТ на GaAs подложке (для глубины канавки в 10 мкм требуется около 10 проходов). После этого пятно излучения смещается на 1...2 мкм в сторону противоположную массиву ФЧЭ и формируется вторая канавка (50 проходов) излучением с плотность энергии около $3,60 \text{ Дж/см}^2$. При

этом воздействие лазерного излучения осуществляется только на GaAs подложку, не затрагивая слой ГЭС КРТ.

Для изготовления линейчатого МФПУ, состоящего из одного КМ и нескольких линейчатых ФП, опробованы два варианта изготовления ФП:

1) Изготавливаются ФП с меньшим количеством ФЧЭ, где количество ФЧЭ в ФП (обозначим M) вычисляется как:

$$M=N/K, \quad (4.1)$$

где N - количество ФЧЭ в МФПУ;

K – количество ФП в МФПУ.

2) Изготавливается ФП требуемого формата. Если после измерения ВАХ ФЧЭ выяснено, что в одной из частей ФП есть ФЧЭ с не удовлетворительными параметрами, то лазерным скрайбированием отделяется часть ФП с такими ФЧЭ. Исследования по выбору способа лазерного скрайбирования линейчатых ФП, были проведены по трём направлениям:

- 1) скрайбирование, аналогичное скрайбированию матричных ФП;
- 2) формирование прерывистой канавки, где вблизи ФЧЭ канавка не формируется;
- 3) формирование двухуровневой канавки, где вблизи ФЧЭ канавка формируется излучением с плотностью энергии около $2,60 \text{ Дж/см}^2$, а вне области ФЧЭ излучением с плотностью энергии около $3,60 \text{ Дж/см}^2$.

В первом варианте скрайбирования формируется несимметричные зоны повреждения. Со стороны первой канавки сохраняется работоспособность ФЧЭ на расстояниях не менее 8 мкм, в то время, как со стороны второй канавки более 20 мкм. Применение данного способа лазерного скрайбирования возможно только для изготовления линейчатых МФПУ по первому варианту изготовления ФП. Для этого пластина с ФП разрезается механическими

методами (например, алмазными дисками) и затем, используя многопроходный режим лазерного излучения, уменьшается расстояние от края ФП до ФЧЭ.

Способ формирования прерывистой канавки, состоит в следующем. Излучением с плотностью энергии около $3,60 \text{ Дж/см}^2$ вне массива ФЧЭ в линейчатом ФП формируется канавка глубиной более 100 мкм. Вблизи ФЧЭ канавка не формируется. При расколе ФП в области ФЧЭ неровность поверхности раскола более 1 мкм. На рисунке 4.5 показана фотография фрагмента линейчатого ФП после раскола, когда была сформирована прерывистая канавка. На фотографии видно: поверхность раскола ровная, но в области, где отсутствует канавка, наблюдается отклонение линии раскола от требуемого направления. Данный метод был применён для исследования распределения бора в объёме кремния после ионного легирования. Данная работа проводилась в рамках межлабораторных программ (Результаты представлены в Приложении 1, раздел П.1.5).

Создание двухуровневой канавки, где излучением с плотностью энергии около $3,60 \text{ Дж/см}^2$ вне массива ФЧЭ формируется канавка глубиной более 100 мкм, а вблизи ФЧЭ излучением с плотностью энергии около $2,60 \text{ Дж/см}^2$ формируется канавка глубиной около 26 мкм. При расколе неровность поверхности раскола менее 1 мкм. На рисунке 4.6 представлена фотография двухуровневой канавки линейчатого ФП форматом 2 на 64 ФЧЭ. Для создания двухуровневой канавки при скрайбировании в непрерывном режиме перемещения ФП в нужное время на пути излучения вводится и выводится полупрозрачная пластина.

отклонение от линии раскола

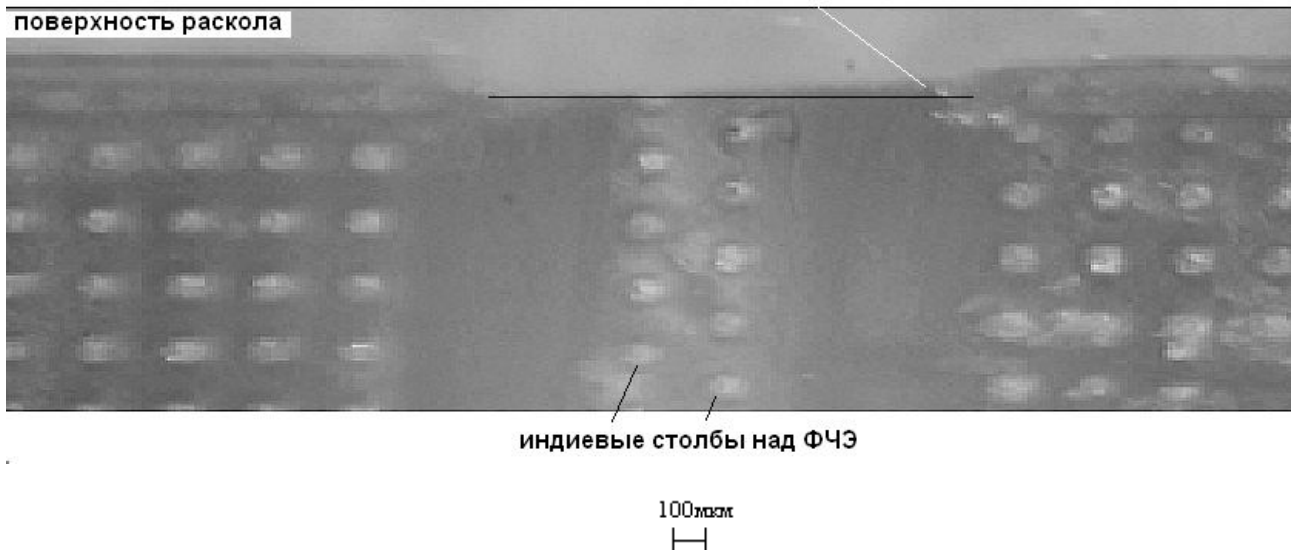


Рисунок 4.5 - Фотография фрагмента линейчатого ФП после формирования прерывистой канавки в многопроходном режиме и раскола. Рисунок демонстрирует, что, несмотря на ровный, обладающий зеркальностью скол, в области отсутствия канавки, наблюдается отклонение линии раскола от требуемого направления.

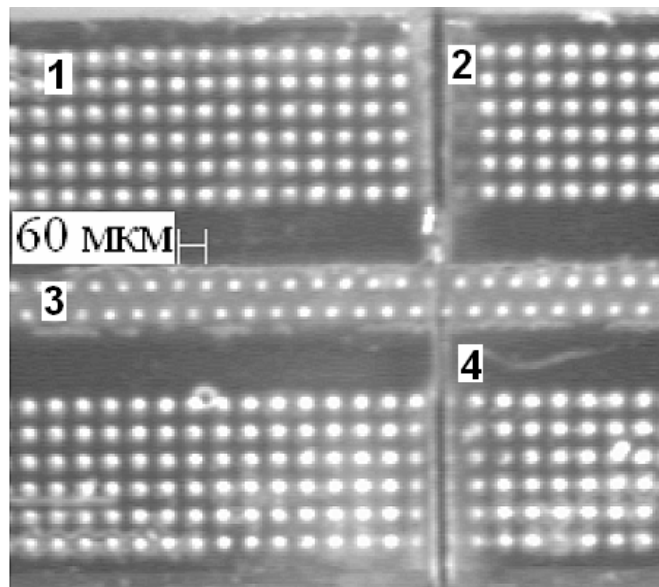


Рисунок 4.6 - Фотография двухуровневой канавки на поверхности линейчатого ФП форматом 2 на 64 ФЧЭ. 1 - крепёжные индиевые столбы; 2 – глубокая канавка, сформированная излучением около $3,60 \text{ Дж/см}^2$; 3 – индиевые столбы над ФЧЭ; 4 - канавка, сформированная излучением около $2,60 \text{ Дж/см}^2$.

Для разработки методики формирования двухуровневой канавки исследовано влияние отклонение оптической оси линзы от нормали к поверхностям ФП на качество раскола. Выяснено, что при отклонении оптической оси от нормали к поверхности ФП нарушается соосность глубокой и неглубокой части канавки и тем самым снижается качество поверхности раскола. На рисунке 4.7 схематично показаны профили канавок, формируемых лазерным излучением. Для формирования двухуровневой канавки необходимо, чтобы оптическая ось линзы совпадала с нормалью к поверхности, при этом линия раскола становится предсказуемой, несмотря на то, что канавка имеет переменную глубину. Данная методика формирования двухуровневой канавки была применена для изготовления макетного образца линейчатого МФПУ форматом 2 на 64 ФЧЭ. Скрайбирование осуществлялось перпендикулярно расположенным в две линии ФЧЭ. Из-за взаимного смещения двух рядов ФЧЭ относительно друг друга на полпериода канавка проходила через один из ФЧЭ, что вело к потере информации в изображении. Расстояние между краем канавки и ближайшими к ней ФЧЭ составляло 18 мкм. Изменений ВАХ ФЧЭ после скрайбирования не было зарегистрировано. На рисунке 4.8 показана фотография МФПУ форматом 2 на 64 ФЧЭ, состоящего из 3-х фрагментов линейчатого ФП и одного КМ.

Для изготовления линейчатого МФПУ без потери информации в изображении необходимо, чтобы канавка проходила между ФЧЭ. Реализация такого подхода на примере линейчатых ФП форматом 4 на 288 ФЧЭ, представляющих две малоразмерные матрицы форматом 4 на 144 ФЧЭ, сдвинутые относительно друг друга на полпериода (28 мкм) после скрайбирования и раскола, представлена на рисунке 4.9.

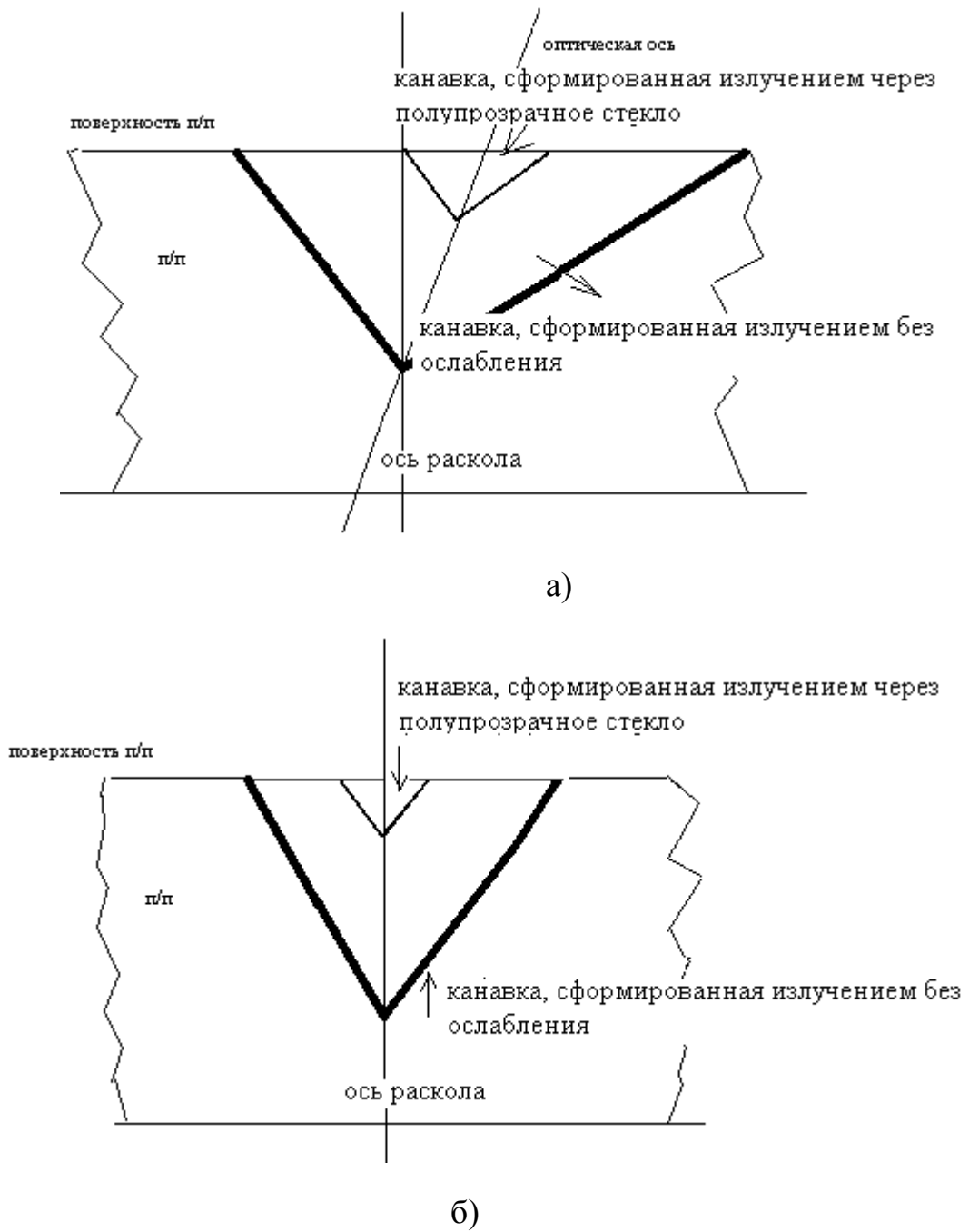


Рисунок 4.7 – схематичные рисунки, поясняющие необходимость соосности формирования двух уровневой канавки. а) показывает линию раскола несоосных канавок; б) показывает линию раскола соосных канавок.

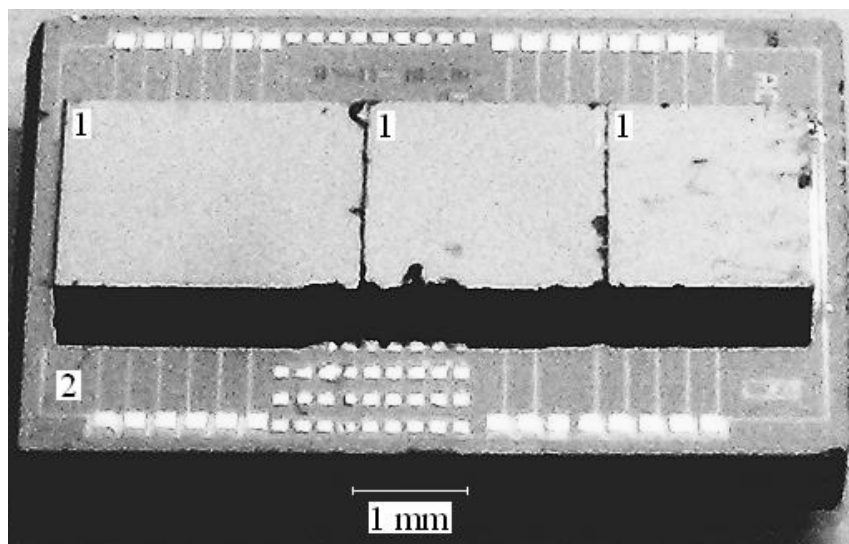


Рисунок 4.8 - Фотография МФПУ форматом 2 на 64 ФЧЭ, состоящего из 3-х фрагментов линейчатой ФП и одного КМ. 1-фрагменты ФП; 2-КМ.

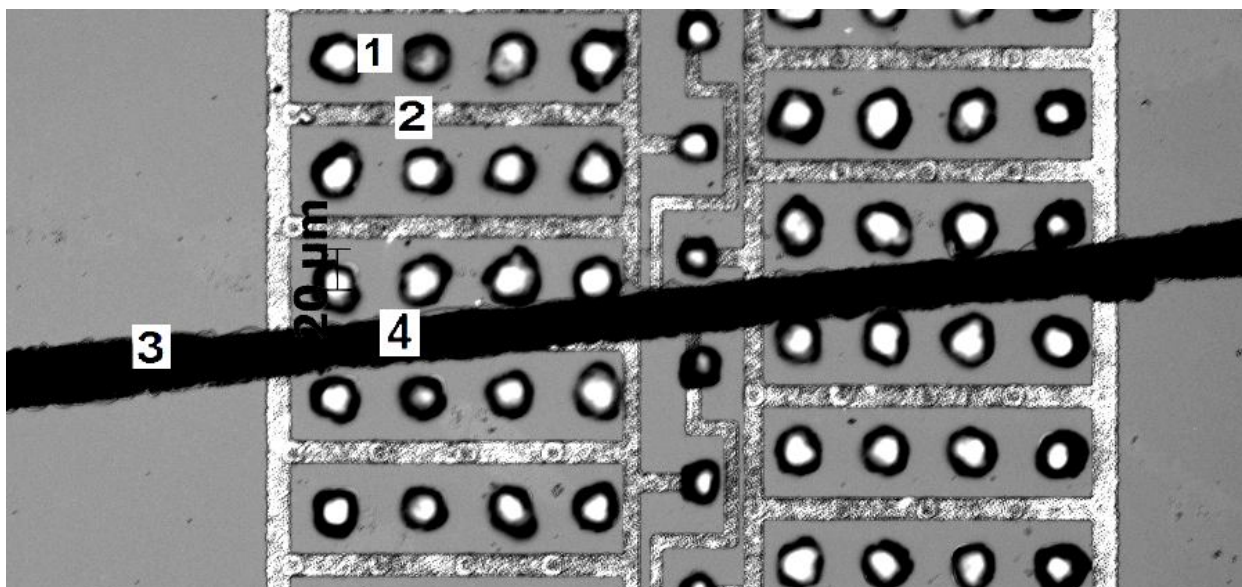


Рисунок 4.9 -Фотография фрагмента линейчатого ФП (размерностью 4 на 288 ФЧЭ, период следования 56 мкм) после лазерного скрайбирования в многопроходном режиме и раскола. 1-индиевый столб связи с КМ, размером 20 на 20 мкм, под ним ФЧЭ (n-p переход) размером 10 на 10 мкм; 2- индиевая токопроводящая дорожка; 3- канавка, сформированная за 50 проходов излучением с плотностью энергии около $3,60 \text{ Дж/см}^2$; 4 - канавка, сформированная за 50 проходов излучением с плотностью энергии около $2,60 \text{ Дж/см}^2$.

Период следования ФЧЭ в ФП составляет 56 мкм в строке и 43 мкм в столбце. Для скрайбирования таких ФП ширина канавки не должна превышать 18 мкм. При выполнении этого условия минимальное расстояние между краем канавки и ближайшим к ней ФЧЭ составит 8 мкм, максимальное - 25 мкм. Ширина канавки вне массива ФЧЭ составила 22 мкм. Было сделано 50 проходов с формированием двухуровневой канавки. Поверхность ФЧЭ перед скрайбированием покрывалась фоторезистом, который удалялся с поверхности после скрайбирования стандартными растворителями в ультразвуковой ванне. На рисунке 4.10 показаны фотографии поверхности раскола. Измеренная неровность поверхности раскола составила менее 1 мкм.

Применение методик скрайбирования пластин с КМ и ФП в оптимальных режимах скрайбирования (при формировании V-образной канавки) позволяет изготавливать МФПУ без потерь информации в изображении с периодом следования ФЧЭ в ФП, равным:

- а) 40 мкм - для МФПУ, состоящих из одного ФП и нескольких КМ;
- б) 44 мкм - для МФПУ, состоящих из нескольких ФПУ или из одного КМ и нескольких ФП.

Расчёт ПС в МФПУ без потерь информации в изображении выполнен по формуле (1.1). Для ширины симметричной канавки около 16 мкм (параметр W), неровности поверхности раскола около 1 мкм (Δ), ширине зоны повреждения в КМ около 6 мкм и в ФП - 8 мкм (L), и диаметре ФЧЭ (D), равном 10 мкм (данные взяты из проведённых экспериментов).

Для моделей МФПУ, у которых используются ФП с периодом следования фоточувствительных элементов менее 40 мкм, нарушение ПС ФЧЭ в МФПУ в местах стыковки ФПУ уменьшится в 8 и более раз по сравнению с приборами, созданными по стандартным технологиям из-за уменьшения зазоров между ФПУ и ширины зоны повреждения.

Дальнейшее уменьшение ПС (с 40 до 24 и с 44...28 мкм) в МФПУ матричного типа возможно при формировании несимметричной канавки, когда стенка канавки со стороны ФЧЭ в ФП или элементов схем КМ перпендикулярна поверхности и параметр W равен нулю. Для этого оптическая ось лазерной системы не должна совпадать с нормалью к поверхности пластины, а отклонена от неё на 5° . На рисунке 4.11 представлена фотография поверхности раскола ФП на GaAs подложке после формирования несимметричной канавки.

Для МФПУ матричного типа при формировании несимметричной канавки ПС равно:

- а) 24 мкм - для МФПУ, состоящих из одного ФП и нескольких КМ;
- б) 28 мкм - для МФПУ, состоящих из нескольких ФПУ или из одного КМ и нескольких ФП.

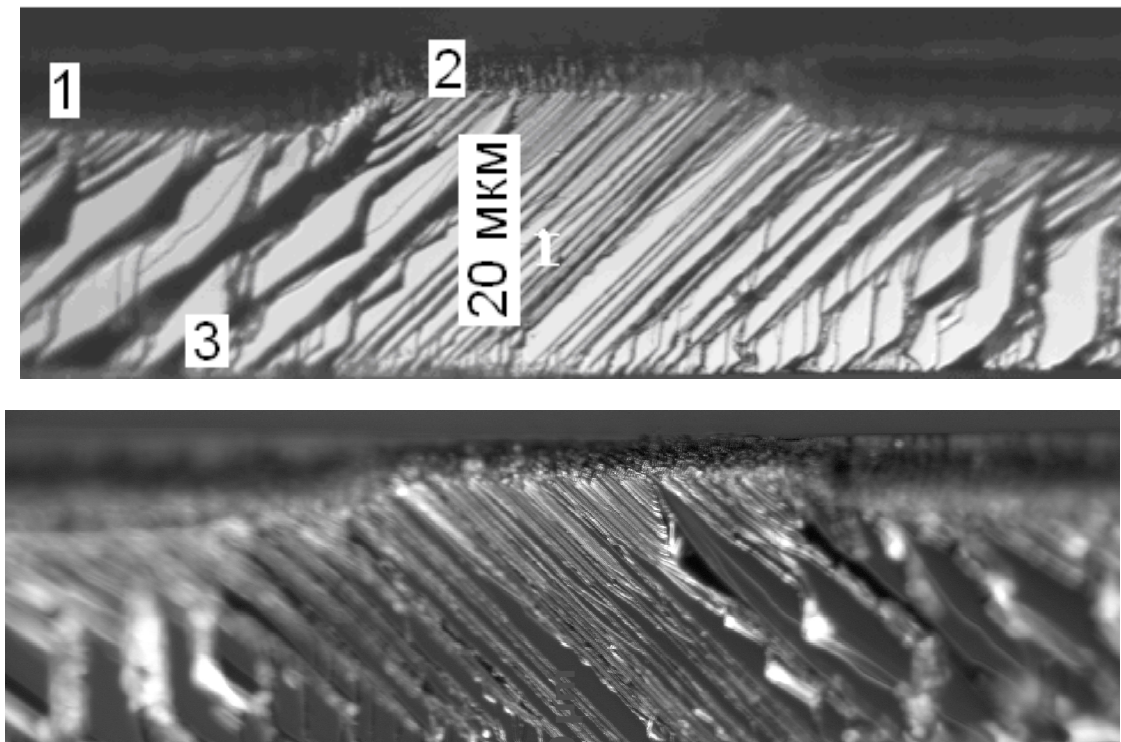


Рисунок 4.10 – Фотографии раскола ФП, показанного на рисунке 4.9. 1 – стенка канавки, сформированной за 50 проходов излучением с плотностью энергии около $3,60 \text{ Дж/см}^2$; 2 - стенка канавки, сформированной за 50 проходов излучением с плотностью энергии около $2,60 \text{ Дж/см}^2$; 3 – поверхность раскола ФП.

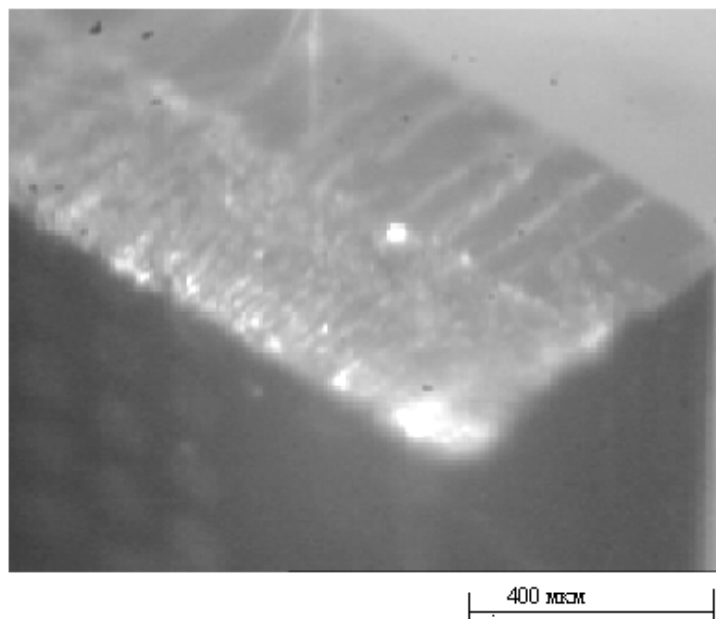


Рисунок 4.11 Фотография поверхности раскола ФП на GaAs подложке после формирования несимметричной канавки.

Выводы к главе

1) Разработаны и апробированы при выполнении договоров и исследований в институте режимы и методики лазерного скрайбирования пластин с КМ и ФП:

а) Для пластин с КМ; однопроводный с диафрагмированным излучением с плотностями энергии около: 1,10; 2,93 и 5,50 Дж/см² и многопроводный режим лазерного скрайбирования с плотностью энергии около 3,60 Дж/см²;

б) Для ФП на основе ГЭС КРТ - многопроводный режим лазерного скрайбирования с формированием двух уровневой канавки излучениями плотностью энергии около 2,60 и 3.60 Дж/см²;

2) Создана методика, позволяющая изготавливать МФПУ линейчатого типа из ФП форматом 4 на 288 ФЧЭ с ПС равным 56 мкм, основанная на формировании двухуровневой канавки в многопроводном режиме;

3) Рассмотрены технологические приёмы повышения усилий на разрыв индиевых столбов в ФПУ: оплавлением индиевых столбов на КМ перед гибридизацией с ФП, в вакууме в потоке водорода при температуре 440 К, и отжигом ФПУ при температуре 403 К в течении 820 сек.

Заключение

1) В соответствии с поставленной целью показано возможность создания МФПУ без потери информации в изображении с периодом следования ФЧЭ 40...44 мкм и более;

2) Для перспективных моделей МФПУ, у которых используются ФП с периодом следования ФЧЭ менее 44 мкм, увеличится эффективность преобразования изображений в МФПУ уменьшением зазоров между ФПУ более чем в 8 раз по сравнению с приборами, созданными по стандартным технологиям. Показано, что возможно изготовление МФПУ матричного типа с периодом следования ФЧЭ менее 28 мкм;

3) В ходе исследований разработаны новые методики лазерного скрайбирования полупроводниковых материалов в оптимальных режимах, обеспечивающие ширину зоны повреждения до 6 мкм – в Si (вместо 30 мкм при использовании стандартных методик) и до 8 мкм в ГЭС КРТ на пластинах из GaAs;

4) Впервые показано, что наличие расплава на краях канавок и экранирование периферийной части пятна излучения, в которой плотность энергии недостаточна для расплава материала ФП, позволяет уменьшить зону повреждения до 8 мкм в многопроходном режиме лазерного скрайбирования;

5) В основу разработанных методик лазерного скрайбирования положена модель взаимодействия неоднородного (в поперечном сечении) по плотности энергии лазерного излучения, предполагающая зонный характер взаимодействия. Практическое применение предложенной модели позволило обосновать выбор режимов лазерного скрайбирования пластин с КМ и ФП, при

которых зоны повреждения не превышают 6 и 8 мкм, соответственно, при диаметре пятна излучения на поверхности пластин более 44 мкм;

б) Выработаны требования к установкам лазерного скрайбирования: длина волны 0,337 мкм (лазер на молекулах азота), частота повторения 100 Гц, скорость перемещения пластин с ФП под излучением, обеспечивающая 50 % перекрытие пятен, около 120 мкм/сек. в многопроходном режиме скрайбирования. При применении линз с глубиной фокуса более 200 мкм и плотности энергии около $3,60 \text{ Дж/см}^2$ за 50 проходов в КМ формируется канавка глубиной около 130 мкм и 170 мкм в ФП, где в качестве подложек использованы GaAs пластины. При скрайбировании вблизи ФЧЭ в ФП достаточно плотности энергии около $2,6 \text{ Дж/см}^2$ для формирования канавки глубиной более 26 мкм. Ширина зоны повреждения при этом составляет около 8 мкм. Создан опытный образец установки скрайбирования пластин с КМ и ФП, обеспечивающей реализацию одно- (для КМ) и многопроходных (для ФП) методик лазерного скрайбирования и формирование одно- и двухуровневых (по глубине) скрайбовых канавок.

Список использованной литературы

1. Филачев А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А./Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы//М.:Физматкнига, 2005, 384 с.
2. Якушев М.В., Брунев Д.В., Варавин В.С., Дворецкий С.А., Предеин А.В., Сабина И.В., Сидоров Ю.Г., Сорочкин А.В., Сусяков А.О./Гетероструктуры CdHgTe на подложках Si (310) для инфракрасных фотоприёмников//Автометрия, Т. 45, №4, С. 23-31
3. Varavin V.S., Dvoretzky S.A., Liberman V.I., Mikhailov N.N., Sidorov Yu.G./Molecular Beam Epitaxy of High Quality Hg 1-x Cd x Te Films with Control of the Composition Distribution//Journal of Crystal Growth, 1996, V. 159, issues 1-4, P. 1161-1166
4. Адамов Ю. Ф., Шишина Л.Ю./Проектирование систем на кристалле//М: «МИЭТ». 2005, 112 с.
5. Новицкий Л.А., Кожевников И.Г./Теплофизические свойства материалов при низких температурах//Москва: Машиностроение, 1975, 216 с.
6. Greiner M., Davis M., Devitt J., Rawe R., Wade D., Voelker J./ State of the art in large format IR FPA development at CMC Electronics Cincinnati//Proceedings of SPIE Vol. 5074, 2003, P. 60-71
7. Sparfke T, Beletic J. W./Infrared focal plane arrays for space applications//Optics and Photonics News, 2008, V. 19, No. 6, P. 22-27
8. Gulbransen D. J., Love P. J., Murray M. P., Lum N. A., Fletcher C. L., Corrales E., Mills R. E., Hoffman A. W., Ando K. J./Megapixel and Larger Readouts and FPAs for Visible and Infrared Astronomy//Proceedings of SPIE Vol. 4841 (2003), P. 770-781

9. Rossi, L., Fischer, P., Rohe, T., Wermes, N./Pixel Detectors//Springer, 2006, 304 p.
10. Finger Gert, Beletic James W./Review of the state of infrared detectors for astronomy in retrospect of the June 2002 Workshop on Scientific Detectors for Astronomy//Proceedings of SPIE Vol. 4841, 2003, P. 839-852
11. Dorn Reinhold J., Finger Gert, Huster Gotthard, Kaeufl Hans-Ulrich, Lizon Jean-Louis, Mehrgan Leander, Meyer Manfred, Pirard Jean-Francois, Silber Armin, Stegmeier Joerg, Moorwood Alan F. M./The CRIRES InSb megapixel focal plane array detector mosaic//Proceedings SPIE V. 5499, 2004, P.510-517
12. Chamonal Jean Paul, Mottin Eric, Audebert Patrick, Ravetto Michel, Caes Marcel, Chatard Jean Pierre/Long linear MWIR and LWIR HgCdTe arrays for high resolution imaging//Proceedings of SPIE Vol. 4130, 2000, P. 452-462
13. Орлов А.М., Соловьёв А.А., Явтушенко И.О., Скворцов А.А./О перераспределении дислокаций в монокристаллах кремния вблизи концентраторов напряжений//Физика твёрдого тела, Т. 49, В. 6, 2007, С. 1039-1043
14. Вейко В. П., Либенсон М. Н./Лазерная обработка//Л: Лениздат., 1973, 191 с.
15. Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Кокора А. Н./Лазерная обработка материалов//М.: Машиностроение, 1975, 296 с.
16. Бункин Ф. В., Кириченко Н. А., Лукьянчук Б. С./Термохимическое действие лазерного излучения//УФН, Т. 138, 1982, С. 45-94
17. Промышленное применение лазеров, под ред. Кёбнера Г./М.: Машиностроение, 1988, 279 с.
18. Готра З.Ю./Технология микроэлектронных устройств//Москва: «Радио и связь», 1991, 528 с.

19. Booth Heather/Laser Processing in Industrial Solar Module Manufacturing//Journal of Laser Micro/Nanoengineering, V. 5, No. 3, 2010, P. 183-191
20. Федоров Б.Ф./Лазеры. Основы устройства и применения//М: «ДОСААФ». 1988, 190 с.
21. Garcia B.G., Martinez J., Piqueras J./Laser melting of GaAs covered with metal layers//J. Applied Physics A 51, 1990, P. 437-445
22. Карпов С.Ю., Ковальчук Ю.В., Погорельский Ю.В./Плавление полупроводников под действием импульсного лазерного излучения//ФТП, Т. 20, В. 11, 1986, С. 1945-1969
23. Seeger K./Semiconductor Physics//Springer:Berlin, Heidelberg, 1989, 522 p.
24. Двуреченский А.В., Качурин Г.А., Нидаев Е.В., Смирнов Л.С./Импульсный отжиг полупроводниковых материалов//М: Наука, 1982, 208 с.
25. Heywang W., Krimmer E.F., Runge H /Annealing mechanism of radiation damage and dopants in pulsed laser light irradiated ion implanted layers//Physics Status Solidi, V. 51A(1), 1979, P. k79-k82
26. Huang Li/Semiconductors under ultrafast laser excitation: optical studies of the dynamics//Harvard University, Cambridge, Massachusetts, 1997, 201 p.
27. Brown W.L./Laser processing of semiconductors. In laser materials processing. By M. Bass//North-Holland Publishing Company, 1983, 480 p.
28. Garbuzov D.Z./Semiconductor Optoelectronics, ed. By M.A. Herman//N.Y.:Wiley, 1980, 335 p
29. Lui X., Du D., Monrou G./Laser ablation and micromachining with ultrashort laser pulses//IEEE J. Quantum Electron, V. 33(10), 1997, P. 1706-1716

30. под ред. Зи С. М./Физика полупроводниковых приборов// М: Энергия, 1973, 655 с.
31. Huang Li, Callan J. Paul, Glezer Eli N., Mazur Eric /GaAs under intense ultrafast excitation: response of the dielectric function//Physical review letters. V. 80, No. 1, 1998, P. 185-188
32. Fattahov Ya. V., Galyautdinov M. F., L'vova T. N., Khaibullin I. B./Real-time observation of local molten – phase nucleation on a semiconductor surface under powerful light irradiation//J. Physics: Condenser Matter, V.12, No.25, 2000, P. L393-L397
33. Franghiadakis Y., Fotakis C., Tzaneyakis P. /Energy distribution of ion produced by excimer-laser ablation of solid and molten targets//Applied Physics A. 68, 1999, P. 391-397
34. Rouse A., Rischel C., Fourmaux S., Uschmann I., Sebban S., Grillon G., Balcou Ph., Forser E., Geindre J.P., Audebert P., Gauthier J.C., Hulin D./Non-thermal melting in semiconductors measured at femtosecond resolution//Nature, V.410, No. 1, March 2001, P.65-68
35. Hong M.H., Lui Yongfeng/Optical detection of laser plasma interaction during laser ablation//Proceedings SPIE, V. 3618, 1999, P. 37-44
36. Grossa M.S., Blacka I., Müllerb W.H./Numerical testbed for laser materials processing//Proceedings of SPIE Vol. 4631, 2002, P. 254 – 263
37. Iwai Y., Arai T., Honda T., Tanaka R., Takaoka T./Effect of duration on scribing of ceramics and Si wafer with ultra-short pulsed laser// Proceedings SPIE, V. 5063, 2003, P. 362-366
38. Григорьянц А.Г., Соколов А.А./Лазерная обработка неметаллических материалов//Москва: Высшая школа, 1988, 192 с

39. Nilsson T., Wagner F., Richerzhagen B./Scribing of GaN wafer for white LED by water jet guided laser//Proceedings of SPIE, V. 5366. P. 200-206
40. V V Semak, J G Thomas and B R Campbell/Drilling of steel and HgCdTe with the femtosecond pulses produced by a commercial laser system//J. Phys. D: Appl. Phys. No. 37, 2004, P. 2925-2931
41. Реди Дж./Действие лазерного излучения//М: Мир, 1974, 465 с.
42. Бароненкова Р.П., Водоватов Ф.Ф./Действие излучения ОКГ на плоскости различной ориентации монокристаллов CdTe//Физика и химия обработки материалов, №1, 1969, С. 148 –149
43. Narayan J., Young R.I./Laser annealing of diffusion - induced imperfection in silicon//Applied Physics Letter, V. 33(1), 1978, P. 14-16
44. Hofker W.K., Oosthoek D.P., Eggermont G.E.J., Tamminga Y., Stacy W.T./Laser irradiation of silicon containing misfit dislocation//J. Applied Physics letter, V. 34(10), 1979, P.690-692
45. Fairfield J.M., Schwuttke G.H./Silicon diodes made by laser irradiation//J. Solid-State Electronics. V.11(12), 1968, P. 1175-1176
46. Tsu R., Hodgson R.T., Tan T.Y., Baglin J.E./Order – disorder transition in single – crystal silicon induced by uv laser irradiation//Physics Rev. Letter, V. 42, №20 1979, P. 1356-1357
47. Бугаёв А.А., Захарченя Б.П., Иванов М.Г., Меркулов И.А./Ячеистая структура рельефа поверхности кремния при плавлении пикосекундными импульсами//Письма в ЖТФ, Т. 12, В. 4, 1986, С. 220-223
48. Lin P.L., Yen R., Bloembergen N., Hodgson R.T./Picosecond laser – induced melting and resolidification morphology on Si//Applied Physics letter, V. 34, №12, 1979, P. 864-866

49. Donald L. Parker, Fa-Yong Lin, Shan-Ji Zhu, Ding-Kang Zhang, W.Ar. Porter/Selective lifetime doping in silicon by laser scanning// IEEE Transaction on Electron Devices, V. ED-29, No 11, 1982, P. 1718-1722
50. Mooney P.M., Young R.T., Karins J., Lee Y. H., Corbett J. W./Defects in laser damaged silicon observed DLTS, J. Physic Status Solidi, v.48A,(1), 1978, P. k31-k34
51. Benton J.L., Doherty C.J., Ferris S.D., Kimerling L.C., Leamy H.J., Celler G.K./Post illumination annealing of defects in laser processed silicon. In laser and electron beam processing of materials//N.Y.: Acad. Press, 1980, P. 430-434
52. Yuba Y., Gamo K., Murakami K., Namba S./Laser - irradiation effects on unencapsulated GaAs studied by capacitance spectroscopy//Applied Physics letter, V. 35(2), 1979, P. 156-158
53. Emerson N.G., Sealy B.J./Effects of laser irradiation of GaAs obsered by DLTS//Electron letter, V.15, No. 18, 1979, P. 553-554
54. Narayan J., Young F.W./Growth of dislocations during laser melting and solidification//Applied Physics Letter, V.35, No. 4, 1979, P. 330-332
55. Банишев А.Ф., Голубев В.С., КремневА.Ю./Генерация и накопление дислокаций на поверхности кремния при воздействии импульсно-периодического излучения YAG:Nd лазера//Журнал технической физики, 2001, Т. 71, В. 8, С.33-38
56. Балдуллаева А., Власенко А.И., Кузнецов Э.И., Ломовцев А.В., Мозоль П.Е., Смирнов А.Б./Возбуждение поверхностных акустических волн в кристаллах р-CdTe при воздействии импульсным лазерным излучением//Физика и техника полупроводников, Т. 35, В. 8, 2001, С. 960-963

57. Romashko L.N., Klimenko A.G., Ovsyuk V.N., Vasilyev V.V., Voinov V.V., and Plotnicov A.E. /Influence of dislocation on MBE $\text{Cd}_{0.22}\text{Hg}_{0.78}\text{Te}/\text{GaAs}$ photodiodes// Phys. Stat. Sol. (a) V. 186, 2001, No. 3, P. 445-452
58. Hähnert, Schink M./New defect atchant for CdTe and $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ //J. Of Cnst. Growth, No. 101, 1990, P. 251-255
59. Власенко А.И., Гнатюк В.А., Копишинская Е.П., Мозоль П.Е./Влияние лазерного облучения на фотопроводимость и шумы в монокристаллах $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ //Физика и техника полупроводников. Т. 31, № 7, 1997, С. 820-822
60. Afonso C.N., Alonso M., Neira J.L.H., Sequeira A.D., da Silva M.F., Soares J.C./Pulsed laser induced effects on the HgCdTe surface//J. Vacuum Science Technology, V. A 7(6), 1989, P. 3256 – 3264
61. Dimiduk K.C., Opyd W.G., Gibbons J.F., Sigmon T.W., Magee T. J., Ormond R.D./Annealing of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ Hg loss rates and annealing of ion implantation damage//J. Vacuum Science and Technology A, Vol. 1, No. 3 1983, P. 1661-1665
62. Botha C.B., Basson J.H., Muller J.R., Booyens H. /Quartz ampoule effects on the quench rates of $\text{Hg}_{0.8}\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$ grown by the solid state recrystallization technique//J. of Crystal Growth, V. 71, I. 2, 1985, P. 391-394
63. Jevtic M.M., Scepanovic M.J./Melting and solidification in laser - irradiated HgCdTe //J. Applyid Physics, V. A53, 1991, P. 332-338
64. Compaan, R.C. Bowman, D.E. Cooper/Raman studies of composition and structural ordering in $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ //Semiconductors Science and Technology, Vol. 5, No. 3S, 1990, P. S73-S77
65. Банишев А.Ф., Голубев В.С., Кремнев А.Ю./Иницируемая лазерным воздействием аномальная диффузия кислорода в обогащённый дефектами поверхностном слое кремния//Письма ЖТФ, 2000, Т. 26, № 2, С. 8-12

66. А.А. Карабутов/Лазерное возбуждение поверхностных акустических волн: новое направление в оптико-акустической спектроскопии твёрдого тела//УФН, 1985, Т. 147, В. 3, С. 605-620
67. Коломенский Ал. А., Мазнев А.А./Наблюдение фононной фокусировки при импульсном лазерном возбуждении поверхностных акустических волн в кремнии//Письма в ЖЭТФ, Т. 53, В. 8. 1991, С. 403-406
68. Григорьянц А.Г./Основы лазерной обработки материалов//М: Машиностроение, 1989, 304 с.
69. Zorabedian Paul /Software tool boosts beam analysis efficacy//Laser Focus World. November 2003, P. 63-66
70. D.M. Hirak, D.C. Weckman, H.W. Kerr/Measuring the spatial intensity distribution of high-power focused laser beams using a rotating-wire type laser beam analyzer II: experimental validation//Measuring Science Technology, V. 5, 1994, P. 1523-1532
71. Amoruso S., Armenante M., Bruzzese R., Spinelli N., Vellota R., Wang X./Emission of prompt electrons during excimer laser ablation of aluminum targets//Applied Physics Letters, V. 75 (1), 1999, P. 7-9
72. Васильев В.В., Овсяк В.Н., Протасов Д.Ю., Талипов Н.Х./Влияние термообработок на параметры фотодиодов, сформированных ионной имплантацией бора в гетероэпитаксиальные слои МЛЭ $Cd_xHg_{1-x}Te$ р-типа//Прикладная физика. 2005, №2, С. 37-41
73. Фишер В./Методы ускоренных испытаний микроэлектронных элементов//Зарубежная радиоэлектроника, В. 11, 1982, С.3-10
74. Xavier BRENIERE, Philippe TRIBOLET/ IR detectors design and approach for tactical applications with high reliability without maintenance// Proc. of SPIE Vol. 6940, 2008, P. 69400H-1 - 69400H-13

- 1) Программа для численного расчёта пространственно-временного изменения температурного поля однослойной плёнки фотоприёмника на основе гетероэпитаксиального слоя HgCdTe в вакууме после импульсного нагрева части поверхности;
- 2) Вынесенные из основного текста описания экспериментов из Глав 2, 3 и 4

П.1.1. Программа для численного расчёта пространственно-временного изменения температурного поля однослойной плёнки фотоприёмника на основе гетероэпитаксиального слоя HgCdTe в вакууме после импульсного нагрева части поверхности

Расчёт выполнен в следующих приближениях: В соответствии с представленными в диссертации данными во время действия импульса излучения, изменяются условия поглощения излучения полупроводниковыми материалами. Поэтому, для того, чтобы не учитывать постоянно изменяющиеся условия поглощения излучения материалом, решалась задача по изменению размеров и температуры вокруг лунки на поверхности КРТ во времени.

Для численного расчёта рассмотрим случай с Гауссовым распределением плотности энергии в излучении после линзы:

$$E(r) = \frac{1}{\sigma\sqrt{\pi}} \times \exp\left(\frac{-r^2}{2\sigma^2}\right),$$

где σ - параметр определяющий крутизну спадов функции;

r - радиус излучения.

Ниже приведена программа расчёта.

1. Вычисление коэффициента температуропроводности КРТ.

Диапазон изменения температуры плёнки ГЭС КРТ $T:=300\dots 1063$

$$k_{1T} := 1.125 - 4.568 \cdot \left[(T0_T - 283) \cdot 10^{-3} \right] + 11.03 \cdot \left[(T0_T - 283) \cdot 10^{-3} \right]^2 - 8.427 \cdot \left[(T0_T - 283) \cdot 10^{-3} \right]^3$$

$$k_T := k_{1T} \cdot 10^{-6}$$

Коэффициент температуропроводности КРТ для температуры 400 К составит:

$$K_{400} = 7.8 \times 10^{-7}$$

2. Расчёт увеличения области нагрева поверхности КРТ во времени

t_{kk} – время нагрева поверхности, сек

зададим диапазон изменения параметра kk в сек.

$kk:=0\dots1000$

тогда l_{kk} , равно

$$l_{kk} := 10^6 \cdot \sqrt[3]{t_{kk} \cdot 7.8 \times 10^{-7}}$$

l_{kk} – увеличение диаметра пятна с температурой 400 К во времени.

Обозначим $\sigma=a$ радиус лунки в КРТ.

3. вычисление профилей Гауссиан в зависимости от размеров пятна

$a_1:=3$ – исходный радиус лунки в КРТ

$a_{kk}:=l_{kk}+3$ – коэффициент крутизны Гауссианы

обозначим расстояние от центра лунки как x

зададим диапазон изменения параметра x как $i:=0\dots100$, где i - точность расчёта

профиля Гауссианы, тогда

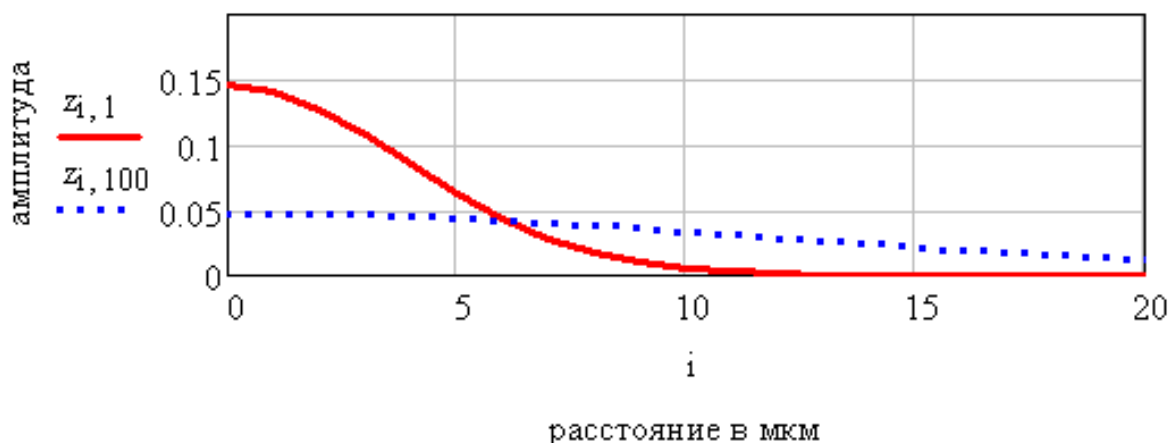
$x_i:=i$

Формула для вычисления Гауссианы:

$$z_{i, kk} := \left(\frac{1}{a_{kk} \cdot \sqrt{3.14}} \right) \cdot \exp \left[\frac{-(x_i)^2}{2 \cdot (a_{kk})^2} \right]$$

На рисунке п.2.1 представлены две Гауссианы для $a=3$ (распределение температуры на поверхности плёнки КРТ после окончания импульсного нагрева при размерах пятна с температурой 400 К равным 3,88 мкм) и $a=8,83$ (при размерах пятна с температурой 400 К равным 11,83 мкм).

Форма Гауссианы для разных коэффициентов "а"



Учтём изменение формы Гауссианы из-за выброса с паром расплава с поверхности КРТ в области расстояний 0...3 мкм, тогда

$$z_{i,kk} := \text{if}(x_i < a_i, 0, z_{i,kk})$$

По мере увеличения радиуса пятна нагрева КРТ во времени и, следовательно, снижения максимальной температуры в пятне, найдём поправочные коэффициенты, для расчёта максимальных температур в пятне. Для этого считаем, что снижение максимальной температуры в пятне обусловлено только увеличением диаметра пятна из-за отсутствия конвекции на поверхности и оттока тепла в объём КРТ

4 Расчёт множителей для определения температур поверхности при нагреве окружающего материала

Сумма значений амплитуд для разных значений коэффициента спада Гауссианы, где цифра - порядковый номер коэффициента крутизны

$$\begin{aligned} a_{aa0} &:= \sum z z^{(0)} & a_{aa1} &:= \sum z z^{(1)} & a_{aa4} &:= \sum z z^{(4)} & a_{aa8} &:= \sum z z^{(8)} & a_{aa10} &:= \sum z z^{(10)} & a_{aa40} &:= \sum z z^{(40)} \\ a_{aa80} &:= \sum z z^{(80)} & a_{aa100} &:= \sum z z^{(100)} & a_{aa400} &:= \sum z z^{(400)} & a_{aa800} &:= \sum z z^{(800)} & a_{aa1000} &:= \sum z z^{(1000)} \end{aligned}$$

Определение множителя "а" из условия равенства площадей под Гауссианой для любого коэффициента крутизны

$$\begin{aligned} a_1 &:= \frac{a_{aa0}}{a_{aa1}} & a_4 &:= \frac{a_{aa0}}{a_{aa4}} & a_8 &:= \frac{a_{aa0}}{a_{aa8}} & a_{10} &:= \frac{a_{aa0}}{a_{aa10}} & a_{40} &:= \frac{a_{aa0}}{a_{aa40}} & a_{80} &:= \frac{a_{aa0}}{a_{aa80}} & a_{100} &:= \frac{a_{aa0}}{a_{aa100}} & a_{400} &:= \frac{a_{aa0}}{a_{aa400}} & a_{800} &:= \frac{a_{aa0}}{a_{aa800}} & a_{1000} &:= \frac{a_{aa0}}{a_{aa1000}} \end{aligned}$$

Вычисление распределения профиля температур в пятне во времени

температура плавления КРТ -1063К, 300К температура материала

$$\begin{aligned}
 &aa := 1063 - 300 \\
 T1^{(0)} &:= \frac{zz^{(0)} \cdot aa}{\max(zz^{(0)})} + 300 & T1^{(1)} &:= \frac{zz^{(1)} \cdot a1 \cdot aa}{\max(zz^{(0)})} + 300 & T1^{(2)} &:= \frac{zz^{(4)} \cdot a4 \cdot aa}{\max(zz^{(0)})} + 300 & T1^{(3)} &:= \frac{zz^{(8)} \cdot a8 \cdot aa}{\max(zz^{(0)})} + 300 & T1^{(4)} &:= \frac{zz^{(10)} \cdot a10 \cdot aa}{\max(zz^{(0)})} + 300 \\
 T1^{(5)} &:= \frac{zz^{(40)} \cdot a40 \cdot aa}{\max(zz^{(0)})} + 300 & T1^{(6)} &:= \frac{zz^{(80)} \cdot a80 \cdot aa}{\max(zz^{(0)})} + 300 & T1^{(7)} &:= \frac{zz^{(100)} \cdot a100 \cdot aa}{\max(zz^{(0)})} + 300 & T1^{(8)} &:= \frac{(zz^{(400)} \cdot a400 \cdot aa)}{\max(zz^{(0)})} + 300 & T1^{(9)} &:= \frac{zz^{(800)} \cdot a800 \cdot a}{\max(zz^{(0)})} + 300 & T1^{(10)} &:= \frac{zz^{(1000)} \cdot a1000 \cdot aa}{\max(zz^{(0)})} + 300
 \end{aligned}$$

Представим изменение температуры при увеличении диаметра пятна во времени в форме таблицы.

время, $\times 10^{-6}$ сек

	0	1	4	8	10	40	80	100	400	800	1000
0	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
1	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
2	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
3	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
4	1.063·10 ³	855.641	728.82	657.811	634.949	505.314	453.959	439.682	373.684	352.77	347.374
5	762.783	712.277	651.763	608.319	592.914	493.155	448.236	435.263	372.912	352.468	347.152
6	551.174	586.275	576.127	557.028	548.633	479.268	441.53	430.052	371.979	352.1	346.882
7	421.988	486.027	507.42	507.297	504.85	464.137	433.994	424.151	370.891	351.67	346.564
8	353.016	413.127	449.099	461.748	463.822	448.259	425.796	417.675	369.657	351.177	346.201
9	320.618	364.381	402.561	422.1	427.164	432.112	417.11	410.742	368.284	350.624	345.792
10	307.175	334.288	367.511	389.172	395.811	416.137	408.109	403.477	366.781	350.014	345.339
11	302.234	317.09	342.526	363.004	370.069	400.719	398.964	395.999	365.159	349.348	344.844
12	300.623	307.971	325.634	343.067	349.739	386.17	389.833	388.428	363.428	348.628	344.309
13	300.155	303.479	314.786	328.481	334.27	372.73	380.861	380.875	361.598	347.858	343.733
14	300.035	301.421	308.162	318.222	322.919	360.558	372.175	373.44	359.681	347.039	343.12
15	300.007	300.543	304.311	311.279	314.878	349.745	363.882	366.214	357.688	346.176	342.472
16	300.001	300.194	302.179	306.754	309.374	340.311	356.067	359.274	355.631	345.271	341.789
17	300	300.065	301.054	303.913	305.733	332.227	348.797	352.683	353.523	344.327	341.074
18	300	300.02	300.488	302.193	303.403	325.416	342.113	346.493	351.373	343.347	340.33
19	300	300.006	300.216	301.189	301.961	319.775	336.04	340.737	349.195	342.335	339.557
20	300	300.002	300.092	300.624	301.097	315.179	330.584	335.44	346.999	341.293	338.759
21	300	300	300.037	300.317	300.595	311.494	325.736	330.612	344.796	340.226	337.937
22	300	300	300.014	300.155	300.314	308.586	321.476	326.254	342.596	339.136	...

П.1.2. Изменение ВАХ р-п перехода в КМ при скрайбировании под напряжением

Измерение обратных ветвей ВАХ р-п переходов в КМ осуществлялось характериографом TR 4805. Режим работы: X - 20 В/дел., Y - 10^{-6} А/дел., Rнагр = 85000 Ом. На рисунке П.1.1 представлена схема проведённого эксперимента.

Скрайбирование проводилось на Установке 2 при частоте следования лазерных импульсов 100 Гц, средней мощности излучения $2 \text{ на } 10^{-3} \text{ Вт}$. Ширина канавки составляла 20 мкм. Глубина канавки составляла примерно 20 мкм при числе импульсов – 40 на каждый шаг.

В эксперименте использовались p-n переходы в КМ, изготовленные на пластине кремния КЭФ Э,5(100) ТУ 206, легированной бором с концентрацией $3,6 \text{ на } 10^{15} \text{ см}^{-2}$ при энергии легирования 40 КЭВ. После отжига увеличение размеров области легирования составляло 2,76 мкм с концентрацией 3,49 на 10^{10} см^{-3} . Размеры p-n перехода составляли 100 на 100 мкм.

П.1.3. Описание эксперимента по измерению уровня фотоэдс в p-n переходе в КМ после скрайбирования во времени

Материал: КМ, изготовленные на пластине КЭФ Э,5 {100} ТУ 206, p-n переходы в КМ изготавливались легированием бора с дозой $3,6 \text{ на } 10^{15} \text{ см}^{-2}$ при 40 КЭВ, после отжига расширение диффузионной области составило 2,76 мкм с плотностью – $3,49 \text{ на } 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Область легирования составляла 100 на 100 мкм.

ФотоЭДС p-n перехода регистрировалось самописцем с развёрткой по оси $Y - 0,05 \text{ мкм/дел}$, засветка КМ была организована с помощью 2-х миниатюрных ламп накаливания, расположенных со стороны лазерного реза. На рисунке П.1.2 представлена схема проведённого эксперимента.

П.1.4. Исследование работы стробируемого интегратора после скрайбирования

Диагностирующая структура: КМ на р-типе кремния (концентрация 10^{15} см^{-3}) с кристаллографической ориентацией $\{100\}$, изготовлен по МДП – технологии со стоп диффузией, область под затвором легирована мышьяком с концентрацией $2 \text{ на } 10^{16} \text{ см}^{-3}$, области стока и истока транзисторов легированы As, с концентрацией 10^{20} см^{-3} .

Принцип работы: Принципиальная схема стробируемого интегратора представлена на рисунке 3.15. При поступлении разрешающего импульса на затвор транзистора T1 (поз.1), транзистор открывается и «Узел А» заряжается до напряжения E_n , поданного на сток транзистора T1. После окончания импульса на затворе T1, «Узел А» остается под плавающим потенциалом. Ёмкость «Узла А» состоит из ёмкостей истоковой области транзистора T1, алюминиевой токопроводящей дорожки, соединяющей исток транзистора T1 с затвором транзистора T2, и ёмкости затвора транзистора T2. После окончания импульса на затворе T1 потенциал «Узла А» постепенно понижается из-за накопления термогенерированных носителей. При этом транзистор начинает закрываться, ток через исток-сток уменьшается, изменяется падение напряжения на внешнем нагрузочном сопротивлении, равном 10^4 Ом . Это изменение регистрируется осциллографом.

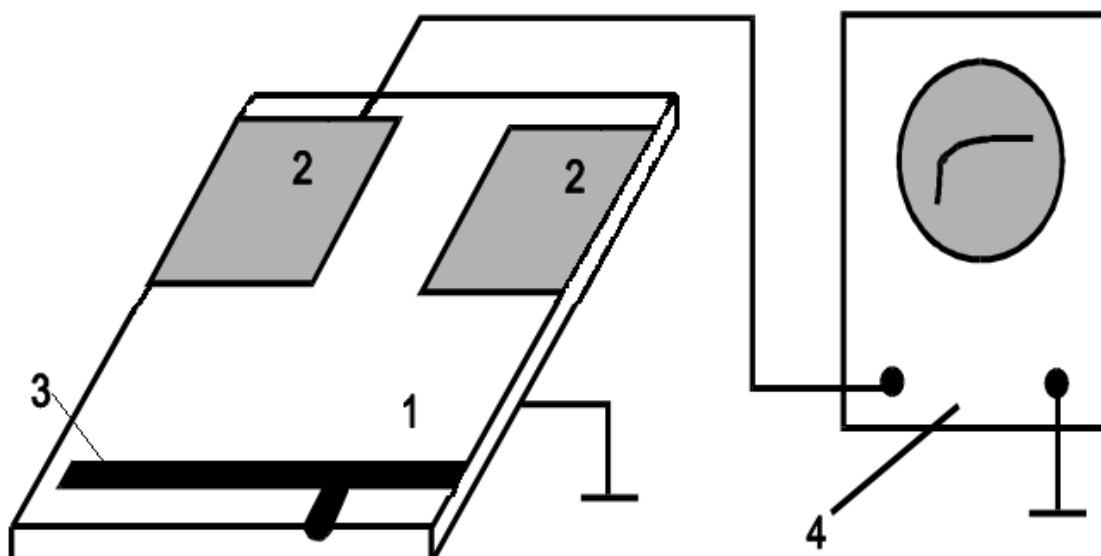


Рисунок П.1.1 - Измерения ВАХ p-n переходов в КМ.

Обозначения: 1 – КМ; 2 – p-n переходы; 3 – скрайбовая канавка; 4 – характернограф.

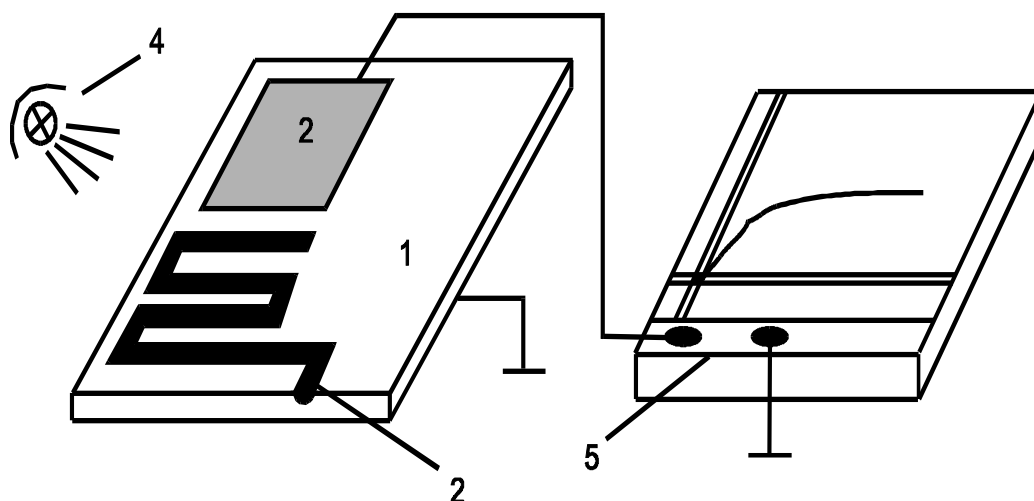


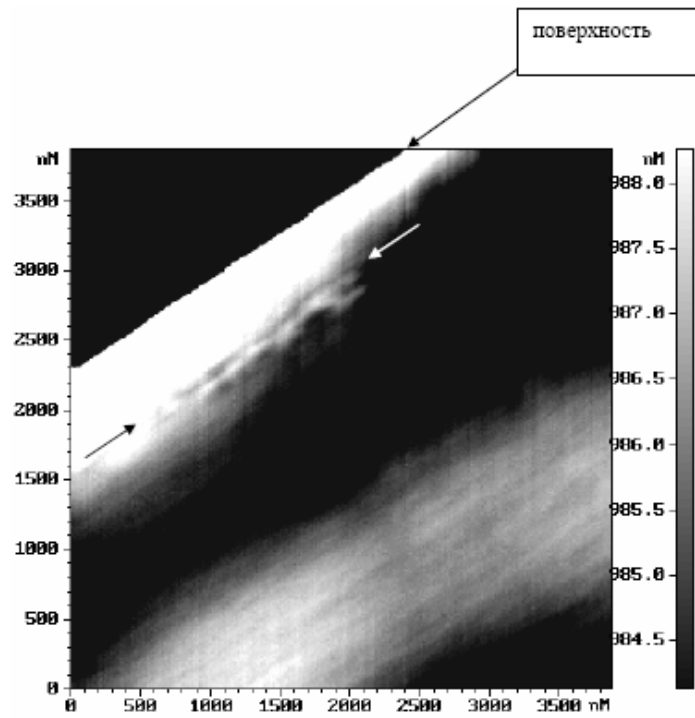
Рисунок П.1.2 – схема измерения фотоЭДС p-n перехода в КМ.

Обозначения: 1 – КМ; 2 – p-n переход; 3 – скрайбовая канавка; 4 – источник света; 5 – самописец.

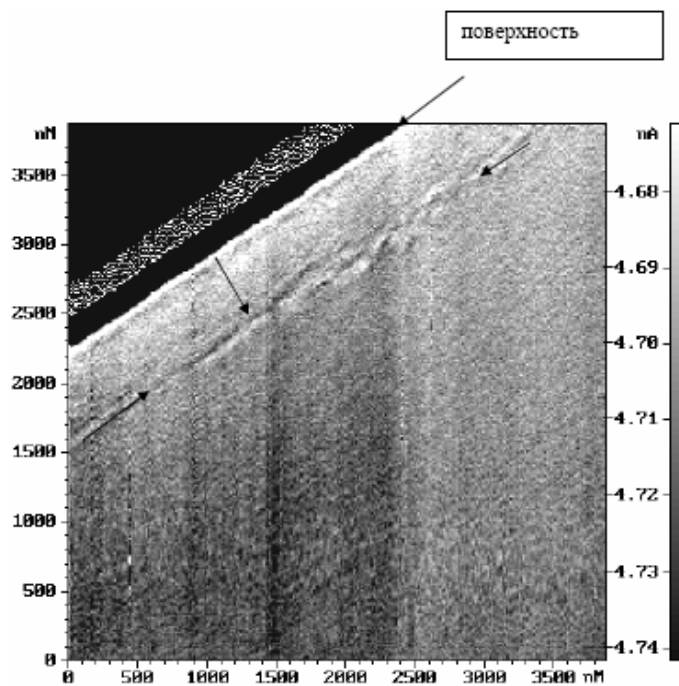
П.1.5. Исследование распределения бора в объёме кремния после ионного легирования

В экспериментах использовались пластины кремния типа «КЭФ – Э,5», толщиной 150...200 мкм. Имплантация бора осуществлялась энергией 180 кЭв и дозой 1 на 10^{16} см⁻². После имплантации образец отжигался при температуре 1183 К в атмосфере азота (N₂) в течении одного часа. На поверхности кремниевой пластины формировалась лазером прерывистая канавка глубиной 50...100 мкм вдоль направления {110}. После раскола пластины кремния, в области, где лазерное скрайбирование не осуществлялось, проводились измерения распределения бора методом АФМ.

На рисунке П.1.3 представлены: рельеф поверхности и фазовый контраст поверхности раскола. Стрелками обозначен слой с высоким содержанием Бора. Из рисунка видно по неровностям рельефа и по фазовому контрасту, что на глубине 0,5 мкм наблюдается слой имплантированного бора.



а)



б)

Рисунок П.1.3 – Фотографии рельефа поверхности (а) и фазовоконтрастное изображение (б) поверхности раскола кремниевой пластины после ионной имплантации бора . Стрелками показан слой имплантированного бора.

Акты внедрения результатов диссертационной работы

Публикации автора

УТВЕРЖДАЮ

Директор Учреждения Российской Академии
наук Институт физики полупроводников им.
А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН,

академик РАН _____ А.Л.Асеев

« » апреля 2010 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Новоселова А.Р. «Исследование возможности создания мозаичных фотоприёмников без потерь информации в изображении» в научную деятельность Учреждения Российской Академии наук Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН.

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Новоселова А.Р. «Исследование возможности создания мозаичных фотоприёмников без потерь информации в изображении», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в Учреждении Российской Академии наук Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН использовались при выполнении Договора №51/01 от 25.07.2005 г. («Разработка конструкции и изготовление кремниевого мультиплексора формата 160×120 элементов с коррекцией входных сигналов») в отделе «Физики и техники полупроводниковых структур» под руководством д.ф.-м.н., профессора Овсяюка В.Н.. Для

выполнения договора были использованы результаты исследований Главы 4 диссертации, где описаны результаты лазерного скрайбирования при пороговых плотностях излучения для кремниевых мультиплексоров. Применение данного режима лазерного скрайбирования позволило удалить защитный окисел без повреждения мультиплексора над внутренней, не имеющей выхода на контактную площадку, алюминиевой токопроводящей дорожкой в кремниевом мультиплексоре, после этого к ней был сделан электрический контакт и выявлена ошибка проектирования. Решение данной задачи позволило выполнить Договор в установленные сроки.

Зам. директора по научным вопросам
Учреждения Российской Академии наук

Института физики полупроводников

им. А.В. Ржанова

Сибирского отделения РАН,

член-корр.РАН, профессор, д.ф.-м.н.

А. В.

Двуреченский

УТВЕРЖДАЮ

Директор Учреждения Российской
Академии наук Институт физики
полупроводников им. А.В. Ржанова

Сибирского отделения РАН,

академик РАН _____ А.Л.Асеев

« » апреля 2010 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Новоселова А.Р. «Исследование возможности создания мозаичных фотоприёмников без потерь информации в изображении» в научную деятельность Учреждения Российской Академии наук Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН.

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Новоселова А.Р. «Исследование возможности создания мозаичных фотоприёмников без потерь информации в изображении», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использовались в Учреждении Российской Академии наук Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН для контроля качества кремниевых кантилеверов для атомно-силового микроскопа при выполнении Государственного контракта по Центру Коллективного Пользования (2005-2006 г.г.) в отдел «Физики и технологии полупроводников пониженной размерности, микро- и наноструктур» под руководством академика РАН Асеева А.Л. Применение методики скрайбирования кремниевых мультиплексоров

позволило проскрайбировать и расколоть кантилевер, остриё которого было далее исследовано на электронном микроскопе, что позволило выявить дефект формы острия кантилевера.

Зам. директора по научным вопросам
Учреждения Российской Академии наук

Институт физики полупроводников

им. А.В. Ржанова

Сибирского отделения РАН,

член-корр.РАН, профессор, д.ф.-м.н.

Двуреченский А. В.

УТВЕРЖДАЮ

Директор Учреждения Российской Академии
наук Институт физики полупроводников им.
А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН,

академик РАН _____ А.Л.Асеев

« » апреля 2010 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Новоселова А.Р. «Исследование возможности создания мозаичных фотоприёмников без потерь информации в изображении» в научную деятельность Учреждения Российской Академии наук Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН.

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Новоселова А.Р. «Исследование возможности создания мозаичных фотоприёмников без потерь информации в изображении», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в Учреждении Российской Академии наук Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН при выполнении Договора №3594 от 19.05.95 («Разработка технологии получения методом МЛЭ фоточувствительных слоёв АІВVI многоэлементных охлаждаемых линейчатых и матричных фотоприёмников») отделом «Физики и техники полупроводниковых структур» под руководством д.ф.-м.н., профессора Овсюка

В.Н.. Для выполнения договора были использованы как экспериментальные результаты по оптимизации режима лазерного скрайбирования полупроводниковых материалов, показывающие перспективность создания мозаичных фотоприёмников без потери информации в изображении, так и практические результаты применения методики лазерного скрайбирования кремниевых мультиплексоров, описанных в диссертации, что позволило изготовить два мозаичных фотоприёмника размерностью 64×64 фотодиода с периодом их повторения 100 мкм. Состоящие каждый из одной матрицы фоточувствительных элементов на основе МЛЭ КРТ на GaAs подложке размерностью 64×64 фотодиода и четырех кремниевых мультиплексоров считывающих информацию с 32×32 фотодиода.

Зам. директора по научным вопросам
Учреждения Российской Академии наук

Институт физики полупроводников

им. А.В. Ржанова

Сибирского отделения РАН,

член-корр. РАН, профессор, д.ф.-м.н.

Двуреченский А. В.

УТВЕРЖДАЮ

Директор Учреждения Российской
Академии наук Институт физики
полупроводников им. А.В. Ржанова

Сибирского отделения РАН,

академик РАН _____ А.Л.Асеев

« » апреля 2010 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Новоселова А.Р. «Исследование возможности создания мозаичных фотоприёмников без потерь информации в изображении» в научную деятельность Учреждения Российской Академии наук Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН.

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Новоселова А.Р. «Исследование возможности создания мозаичных фотоприёмников без потерь информации в изображении», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в Учреждении Российской Академии наук Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН при выполнении гранта РФФИ 05-02-08022 офи-п «Создание технологии и исследование свойств плёнок с предъявлением по окончании работы макета линеек фотоприёмников на их основе» под руководством д.ф.-м. н., гл.н.с. Шумского В.Н. При выполнении работы была использована методика лазерного скрайбирования приборных пластин с фоточувствительными элементами в многопроходном режиме скрайбирования для разделения их на отдельные линейки фотоприёмников.

Требуемые малые размеры чипов ($650 \times 650 \times 400$ мкм) нельзя было получить с помощью других способов разделения чипов.

Зам. директора по научным вопросам
Учреждения Российской Академии наук

Институт физики полупроводников

им. А.В. Ржанова

Сибирского отделения РАН,

член-корр.РАН, профессор, д.ф.-м.н.

Двуреченский А. В.

**Основные результаты диссертации опубликованы в
следующих работах:**

1. А.Р. Новоселов, А.Г. Клименко, В.В. Васильев/Применение импульсного УФ лазера для скрайбирования фотоприёмных матриц и линеек на МЛЭ КРТ//Прикладная физика. №1, 2008, С. 79-84
2. А.Г. Клименко, Т.Н. Недосекина, Н.В. Карнаева, И.В. Марчишин, А.Р. Новоселов, В.Н. Овсяк, Д.Г. Есаев/Технология сборки крупноформатных инфракрасных фотоприемных модулей на индиевых микростолбах//Оптический журнал. Т. 76, № 12, 2009, С. 63-68
3. А.Р. Новоселов, А.Г. Клименко/Скрайбирование поверхности кремниевого кристалла излучением импульсного ультрафиолетового лазера на микронных расстояниях от активных элементов//Автометрия. №4, 1998, С. 113-119
4. А.Р. Новоселов, А.Г. Клименко, М.А. Торлин/Исследование зоны термического поражения в CdHgTe и Si вблизи лазерных кратеров при ультрафиолетовом облучении наносекундными импульсами//Автометрия. №5, 1998, С. 78-85
5. А.Р. Новоселов, А.Г. Клименко, В.В. Васильев, Д.Г. Есаев/Метод лазерного скрайбирования узкозонных полупроводниковых подложек CdHgTe//Автометрия. №5, 1998, С. 86-91
6. А.Р. Новоселов, А.В. Предеин, И.Г. Косулина, В.В. Васильев/Оптимизация температуры сварки индиевых столбов в методе

групповой сборки многоэлементных ФП//Прикладная физика. №1, 2010, С. 73-77

7. А.Р. Новоселов/Разработка высокоэффективных мозаичных фотоприёмников на основе линеек фоточувствительных элементов//Автометрия. Т. 46, №6, 2010, С. 106-115

8. A.R. Novoselov, A.G. Klimenko/Degradation zones of semiconductor target (Si) formed as a result of nanosecond UV laser material processing//Proceeding SPIE, V. 3834, 1999, P. 269-276

9. A.R. Novoselov, A.G. Klimenko, V.V. Vasilyev, D.G. Esaev/The definition of standard methods checking electrophysical performance of p-n junctions (Si, HgCdTe) on nanosecond UV laser cutting//Proceeding «Analytical and Diagnostic Techniques for Semiconductor Materials, Devices and Processes: Joint Proceedings of the Symposia on ALTECH 99, Satellite Symposium to ESSDERC 99, Leuven, Belgium [and] the Electrochemical Society Symposium on Diagnostic Techniques for Semiconductor Materials and Devices», 1999, P. 537-547

10. A.R. Novoselov, A.G. Klimenko, E.V. Fedosenko, A.E. Plotnicov/Optimization of nanosecond UV laser illumination for semiconductor materials (Si, HgCdTe, InSb)//Proceeding SPIE, V. 3933, 2000, P. 432-437

11. A.R. Novoselov/Laser application to IC correction//Proceedings of the V World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics, ISAS/SCI 2001, V. 17, 2001, P. 457-462

12. A.R. Novoselov, A.G. Klimenko/Processes in semiconductor materials after laser cutting//Proceeding SPIE, V. 4426, 2002, P. 150-153

13. A.R. Novoselov, A.G. Klimenko, V.V. Vasilyev/Application of pulsed UV laser for dicing of arrays and linear of photodiodes based on MCT solid solution//Proceeding SPIE, V. 6636, 2006, P. 663619-1-663619-8

14. А.Р. Новоселов, В.Г. Воинов, А.Г. Клименко, Т.П. Недосекина/Теоретические ограничения и результаты приближения лазерной стенки на микронные расстояния к р-п переходам в Si//Труды 3 Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники» Дивноморск, 1996, С. 28-30
15. А.Р. Новоселов, Н.Б. Кузьмин, Н.А. Валишева, И.Г. Косулина/Патент на изобретение RU №2392690 С1. Способ формирования контактного столба многоконтактного гибридного соединения//БИ №17 от 20.06.2010, приоритет от 26.05.2009, С. 892