

1 мис

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 нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Библиотека
Новосибирского
государственного
технического университета

Новосибирск – 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской Академии наук Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирское отделение РАН.

Научный руководитель: доктор технических наук
Кириянов Валерий Павлович

Научный консультант: канд. физ.-мат. наук, с.н.с.
Клименко Анатолий Григорьевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, с.н.с.
Климов Александр Эдуардович

доктор технических наук, профессор
Гибин Игорь Сергеевич

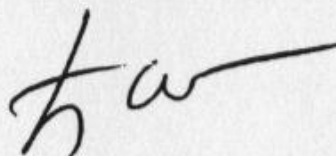
Ведущая организация: Томский государственный университет
Обособленное структурное подразделение
"Сибирский физико-технический институт
Томского государственного университета",
г. Томск

Защита диссертации состоится «14» июня 2011 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.03 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НГТУ

Автореферат разослан « 12 » мая 2011 года.

Ученый секретарь диссертационного совета



Гайслер В. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. 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, р-п переходов), который может быть сформирован на других полупроводниковых подложках. При большом количестве ФЧЭ в ФП единственным методом «гибридизации» (то есть соединение 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.

Пространственное разрешение тепловизионных приборов зависит от числа ФЧЭ в ФПУ, и в настоящее время интенсивно ведутся разработки по увеличению числа ФЧЭ. Например, в соответствии с литературными данными для диапазона 3÷5 мкм выпускаются ФПУ форматом 2048×2048 ФЧЭ и для диапазона 8÷12 мкм ФПУ форматом 640×512 ФЧЭ. Дальнейшее увеличение числа ФЧЭ в ФПУ, применяемых в этом спектральном диапазоне, увеличением размеров КМ и ФП, ограничивается рядом факторов. Важнейшими из них являются:

- а) Уменьшение процента выхода годных КМ и ФП на пластинах при значительном увеличении их размеров;
- б) Увеличение числа разрывов индиевых столбов в ФПУ из-за значительных изменений размеров КМ и ФП при их многократном охлаждении до темпе-

ратур жидкого азота (около 77 К) во время работы и нагреве до 300 К после включения ФПУ.

Одним из перспективных путей увеличения 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 эффективностью преобразования изображений здесь и далее понимается отношение числа работающих ФЧЭ в МФПУ к сумме ФЧЭ, потерянных в «слепых зонах» и работающих в МФПУ. Например, эффективность МФПУ типа «CRIRES 1024×4096» (Германия), состоящего из четырёх ФПУ форматом 1024×1024 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 10240×14336 ФЧЭ, состоящего из 35 ФПУ форматом 2048×2048 ФЧЭ.

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 или ФП на основе гетероэпитаксиальных слоёв р-типа $\text{Hg}_{0,22}\text{Cd}_{0,78}\text{Te}$ (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 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 $8\div 12$ мкм.

Объекты и методы исследования. Основным объектом исследования является зона 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 около 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 канавки (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 2,6 Дж/см²;

б) не более 6 мкм в пластинах с КМ при скрайбировании диафрагмированным излучением с плотностью энергии около 2,9 Дж/см² за один проход;

4) Методика скрайбирования ФП линейчатого типа форматом 4×288 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 энер-

гии около $2,9 \text{ Дж/см}^2$) и ФП (многопроходный с плотностью энергии около $2,6 \text{ Дж/см}^2$), 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 (ВАХ) 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 в КМ при плотности энергии около $3,6 \text{ Дж/см}^2$. 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 потерь 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 более чем в 8 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.

Апробация результатов исследования. Основные научные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 3-х Российских конференциях: Третьей Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники» (Россия, Дивноморское, 1996 г.); XIX Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Россия, Москва, 2006 г.); XXI Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Россия, Москва, 2010 г.) и 5-ти зарубежных конферен-

циях: Microelectronic Manufacturing 1999 (SPIE, Santa Clara, CA, 1999); Photonics West (SPIE, San Jose, CA, 2000); Analytical and diagnostic techniques for semiconductor materials, devices and processes (Honolulu, Hawaii, 1999); International conference on information systems, analysis and synthesis (Orlando, 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 диссертации. Диссертация состоит из списка условных обозначений и сокращений, введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 74 наименования, и двух приложений. Основной текст изложен на 151 странице, содержит 70 рисунков и четыре таблицы. Общее количество страниц в диссертации 171, список литературы включает 89 наименований, рисунков 73 и 4 таблицы.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении мотивируется актуальность темы диссертации, формулируется её цель, приводятся основные результаты, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость работы.

Глава 1 посвящена анализу литературы по теме диссертации. Даны описания современного состояния производства и конструкций МФПУ. Детально проанализирована основная причина потери информации в изображениях, считываемых с МФПУ, вызванная наличием «слепых зон», возникающих из-за использования существующих в настоящее время методов разделения пластин с КМ и ФП на чипы, при которых на краях КМ и ФП возникают широкие зоны

повреждения материала. В соответствии с литературой ширина зоны повреждения превышает $20\div 30$ мкм при абразивном разрезании КМ алмазным кругом, более 35 мкм - при лазерном скрайбировании (при использовании излучения с длиной волны, равной 1,064 мкм) и 125 мкм - при скрайбировании алмазным резцом. Дан анализ существующих решений приёма изображения без потерь информации, считываемых с МФПУ. Отмечено, что данные решения не обеспечивают широкого применения МФПУ, собираемых по технологии «флип-чип». Показано, что для повышения эффективности преобразования изображения в МФПУ необходимо уменьшать ширину «слепых зон». Для этого необходимо определить параметры режимов лазерного скрайбирования пластин с КМ и ФП, при которых ширина зон повреждения минимальна. На основе анализа данных по воздействию импульсного лазерного излучения с длинами волн (0,248), (0,531), (0,830) и (1,064) мкм и разными плотностями энергии в диапазоне от 0,1 до 6,3 Дж/см² на полупроводниковые материалы, в первую очередь Si, GaAs и CdHgTe, показано, что последовательность происходящих в полупроводниковых материалах изменений: изменение коэффициента отражения поверхности, расплавление поверхности, переход расплава в пар и выброс пара - влияет на характер поглощения энергии материалом и обуславливает пульсирующий характер воздействия излучения. Определены длины волн лазерного излучения - 0,248 и 0,337 мкм, как наиболее удовлетворяющие требованиям минимизации ширины зон повреждения в полупроводниковых материалах. Для проведения исследований выбран импульсный лазерный источник модели «ЛГИ-21», обладающий следующими характеристиками: длина волны 0,337 мкм; частота повторения 10, 25, 50 и 100 Гц; длительность импульса 7×10^{-9} сек. и средней мощностью излучения 2×10^{-3} Вт.

В главе рассмотрено изменение физических свойств поверхности полупроводниковых материалов в пятне воздействия лазерного излучения в зависимости от плотности энергии. Рассмотрены три характерных уровня плотности энергии: плотности энергии недостаточно для плавления поверхности, превышающий порог расплава поверхности и превышающий порог парообразования в материале. Выяснено, что вокруг пятна излучения даже при плотностях энер-

гии, недостаточных для формирования канавки, регистрируется зона повреждений, в которой повышена концентрация дислокаций (длины волн излучения более 0,531 мкм) и временно (24 ч для р-CdTe) изменяются значения токов, протекающих через р-п переходы. Поэтому во всех экспериментах, проведённых автором, измерения ВАХ р-п переходов в КМ и ФЧЭ в ФП после лазерного скрайбирования осуществлялись через 24 и 48 часов, соответственно. Показано, что необходимо рассматривать воздействие лазерного излучения на полупроводниковые материалы с учётом неравномерности плотности энергии в пятне, что позволит минимизировать ширину зон повреждения в пластинах с КМ и ФП.

В главе 2 приводятся экспериментальные результаты, показывающие, что в зоне повреждения ВАХ р-п переходов в КМ и ФЧЭ в ФП изменяются необратимо.

Проведено исследование причин появления зон повреждения в КМ и ФП при скрайбировании их лазерным излучением. Экспериментально исследован режим, при котором после скрайбирования ФП излучением с плотностью энергии около 1,5 Дж/см² ширина зоны повреждения составляла не менее 20 мкм. Исследование поверхности ФП вблизи канавки после химического травления в специальном травителе не выявило увеличения концентрации дислокаций в зоне повреждения, что позволяет утверждать, что выбор длины волны излучения сделан правильно. В эксперименте канавка формировалась за один проход. Введением диафрагмы непосредственно перед линзой на пути лазерного излучения пропускалась только часть излучения вблизи оптической оси, при этом уменьшалась область расплава на краях пятна излучения. Для выяснения возможности теплового повреждения материала ФП на расстоянии 20 мкм от канавки был выполнен численный расчёт пространственно-временного изменения температурного поля однослойной плёнки ФП в вакууме после импульсного нагрева части поверхности, соответствующий условиям эксперимента с лазерным излучением. На основе численного расчёта установлено, что при лазерном скрайбировании температура поверхности на расстоянии 20 мкм от края канавки повышается менее чем на 50 К (с 300 до 346 К). Экспериментально исследовано воздействия на ФП температуры 418 К в течении 720 сек в воздушной сре-

де, которое показало, что ВАХ ФЧЭ не ухудшаются и, следовательно, тепловым воздействием излучения на материал ФП нельзя объяснить ширину зоны повреждения около 20 мкм.

Определены размеры зон повреждения в КМ и ФП при разных распределениях плотности энергии в пятне излучения. Установлена положительная роль расплава на краях пятна излучения в уменьшении ширины зоны повреждения. Выполненные исследования доказывают, что расплав демпфирует ударное воздействия лазерного излучения с плотностями энергии выше порога парообразования на окружающий материал. На основе анализа результатов исследований

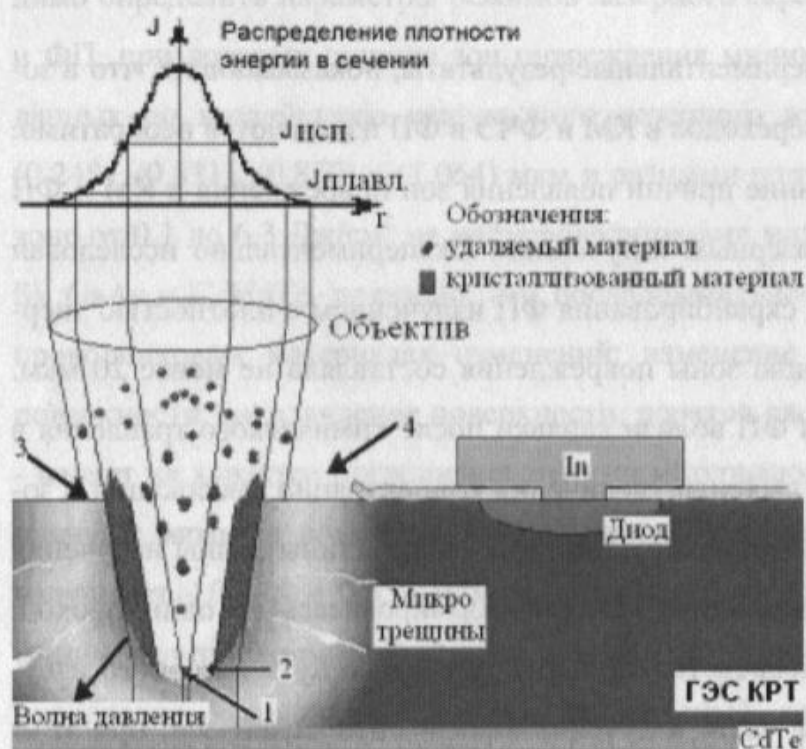


Рисунок 1 - Иллюстрация воздействия лазерного излучения после фокусирующей линзы на материал ФП с учётом неоднородности плотности энергии в сечении. Описание характерных областей взаимодействия 1, 2, 3 и 4 даны в тексте.

предложена модель взаимодействия лазерного излучения с полупроводниковыми материалами, которая учитывает неоднородность плотности энергии в пятне излучения и изменение условий её поглощения во времени. В пределах пятна излучения выделены три кольцевых характерные зоны (см. рисунок 1): 1- центральная область, в которой плотности энергии достаточно для перехода материала в газообразное (парообразное) состояние (Зона 1); 2 - область, расположенная дальше от центра, в которой плотность энергии выше порога плавления (Зона 2); 3 - область на краях пятна излучения, в которой плотность энергии меньше порога плавления (Зона

4) - область, в которой плотность энергии меньше порога плавления (Зона 4). В зоне 4 происходит плавление материала, что приводит к уменьшению ширины зоны повреждения.

3) и 4 - область вне пределов пятна излучения, в которой регистрируются повреждения полупроводниковых материалов (Зона 4).

В главе на основе данной (зонной) модели решается задача качественного объяснения природы формирования зон повреждения с размерами, значительно превышающими те, что следуют из тепловой модели повреждения, описанной в литературе: 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 во всём пятне взаимодействия.

Часть «горячих» электронов преодолевает потенциальный барьер на границе материала, остальные электроны за время $10^{-13} \div 10^{-12}$ сек «охлаждаются» до энергий, соответствующих дну зоны проводимости, отдавая свою энергию решётке в виде акустических и оптических фононов. Суммарная длительность всех этих процессов в кремнии не превышает $(1 \div 2) \times 10^{-12}$ сек. На периферии пятна излучения формируется область с повышенной концентрацией электронов. Их вклад 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 напряжения начала пробоя р-п переходов на расстояниях более 150 мкм. В описанном эксперименте 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 $4,4 \text{ Дж/см}^2$. 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.

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 7×10^{-9} сек. область с температурой плавления кремния (1685°K) увеличится менее чем на 1 мкм). В момент выброса материала из Зоны 1 волна давления, обусловленная температурным коэффициентом линейного расширения, выдавливает расплав из Зоны 2 на поверхность. В Зоне 3, 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 (в КРТ). Начиная с момента образования пара, энергия излучения полностью поглощается выбрасываемыми парами и материал в канавке и лунке начинает остывать. Известно, что время остывания материала до стационарного состояния происходит достаточно медленно, например, время охлаждения GaAs составляет 10^{-6} сек. 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 температура материала меньше температуры плавления. В Зоне 3 существует увеличенная концентрация неравновесных электронов. 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 (о чём свидетельствует расширение лунки). 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.

В главе дано описание метода раскола пластины на чипы после скрайбирования – раскол на клине с неровностью поверхности раскола менее 1 мкм. Изготовлено оригинальное устройство для раскола пластин, встраиваемое в установку лазерного скрайбирования. Пластина с чипами удерживается при расколе вакуумными присосками с тыльной (непланарной) стороны.

В главе дано описание лабораторного метода «гибридизации» ФПУ, позволяющего собрать МФПУ без применения промышленных «флип-чип» установок.

В главе 3 представлены экспериментальные результаты оптимизации оптической системы лазерных установок скрайбирования пластин с КМ и ФП. Предложен способ исследования характеристик линз, заключающийся в формировании канавки в полупроводниковой пластине на наклонной плоскости с последующим расколом и изучением изменения глубины канавки в зависимости от расстояния до центра области максимальной глубины. Определено, что для установок лазерного скрайбирования предпочтительно выбрать линзы, имеющие удлинённую, например, более 200 мкм, глубину фокуса, для этой линзы размер пятна излучения составил более 44 мкм. Рассмотрено формирование канавок в одно- и многопроходных режимах лазерного скрайбирования. Определено, что при повышении частоты повторения импульсов лазерного излучения снижается плотность энергии, необходимая для скрайбирования КМ и ФП.

Оптимизированы режимы лазерного скрайбирования пластин с КМ и ФП. Для пластин с КМ – это однопроходный режим формирования канавки с плотностью энергии около $2,9 \text{ Дж/см}^2$ диафрагмированного излучения. Ширина канавки составляет около 2 мкм, глубина более 6 мкм. Ширина зоны повреждения при этом около 6 мкм при напряжениях питания КМ не более 10 В (рисунок 2).



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

100 Гц и плотностью энергии около $2,6 \text{ Дж/см}^2$. Ширина канавки в ФП составляет около 18 мкм, глубина более 26 мкм.

Экспериментально показано, что широкие зоны повреждения при скрайбировании ФП определяются периферийной частью пятна излучения (Зона 3), в которой плотность энергии недостаточна для расплава материала. Экранирование поверхности ФП от излучения Зоны 3, позволяет уменьшить зону повреждения с 13 до 8 мкм. На рисунке 3 представлена типичная зависимость значений «темновых» токов через ФЧЭ от расстояния до канавки при обратном напряжении смещения минус 0,2 В.

Показано, что после формирования канавки на расстоянии более 70 мкм в КМ временно увеличиваются значения фототоков и фотоэдс р-п переходов (менее 10^4 сек.), что искажает рабочие характеристики элементов схемы.

Напряжение пробоя р-п перехода в этом режиме после скрайбирования снижается со 100 до 40 В. Для ФП – многопроходный режим формирования канавки, при котором объём выдавленного расплава на поверхность не мешает «гибридизации» ФПУ: 50 проходов со скоростью перемещения пластины 120 мкм/сек. на частоте повторения



Рисунок 3 - Зависимость изменения значений «темных» токов 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.

при лазерном скрайбировании пластин с КМ (в однопроходном режиме диафрагмированным излучением и многопроходном недиафрагмированным излучением) и ФП матричного и линейчатого типов в многопроходном режиме скрайбирования недиафрагмированным излучением.

В главе рассмотрено формирование симметричных («V»-образной формы) и несимметричных (когда стенка канавки со стороны ФЧЭ в ФП или элементов схем КМ перпендикулярна поверхности) профилей канавок. В первом варианте при расчете ПС учитывается ширина канавки. Для второго варианта - нет. Показано, что для скрайбирования ФП линейчатого типа применимо только формирование симметричных канавок.

На рисунке 4 показаны фотографии двух типов МФПУ: линейчатого форматом 2x64 и матричного форматом 64x64 ФЧЭ. Линейчатое МФПУ состо-

В главе описаны исследования по хранению ФП при повышенных температурах. Показано, что при хранении ФП при температуре 373 К в течении более 660 часов электрические параметры ФЧЭ стабильны. ФЧЭ, расположенные в зоне повреждения, термически стабильны более 80 часов при температуре 343 К.

В главе 4 представлены методики формирования канавки

ит из трёх ФП (обозначенных на рисунке 1) и одного КМ (2). Матричное МФПУ состоит из одного ФП (1) и четырёх КМ (2). При скрайбировании формировалась симметричная канавка.

Результат применения методики формирования двухуровневой канавки для скрайбирования ФП линейчатого типа представлен на рисунке 5. ФП линейчатого типа форматом 4×288 ФЧЭ была проскрайбирована и затем расколота.

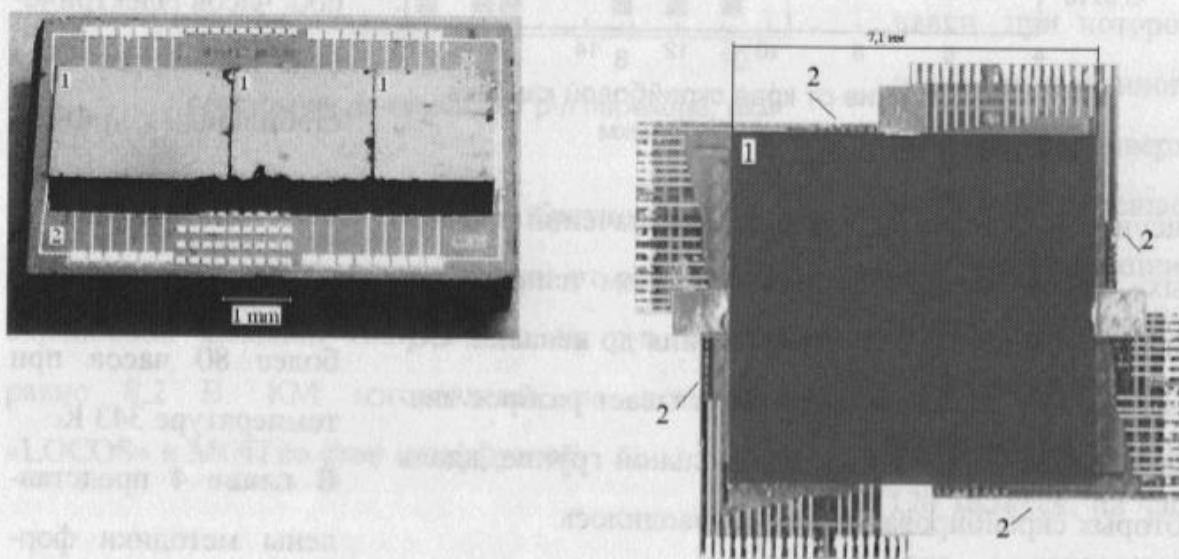


Рисунок 4 – Фотографии МФПУ линейчатого и матричного типа. 1-ФП; 2-КМ. Период следования ФЧЭ в ФП составляет 56 мкм в строке и 43 мкм в столбце. Ширина канавки между ФЧЭ составляет менее 18 мкм. Расстояние между краем канавки и ближайшими к ней ФЧЭ составляет около 8 мкм.

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 ФП или из одного КМ и нескольких ФП.

При ширине симметричной канавки около 16 мкм, неровности поверхности раскола в 1 мкм, ширине зоны повреждения в КМ около 6 мкм и в ФП - 8 мкм, и диаметре ФЧЭ, равном 10 мкм (данные взяты из проведённых экспериментов).

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.

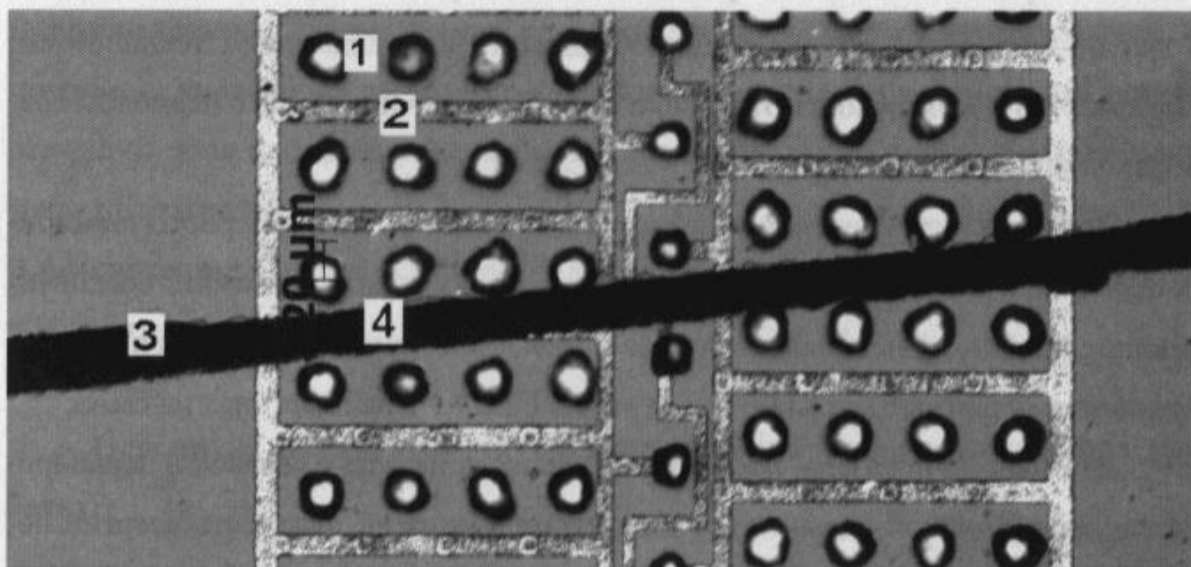


Рисунок 5 - Фотография фрагмента ФП после лазерного скрайбирования в многопроходном режиме (50 проходов) и раскола. 1-индиевый столб (размер 20×20 мкм), под ним ФЧЭ (10×10 мкм); 2- индиевая токопроводящая дорожка; 3- канавка, сформированная излучением с плотностью энергии около 3,6 Дж/см²; 4 - канавка, сформированная излучением с плотностью энергии около 2,6 Дж/см².

В главе дано описание способа оплавления индиевых столбов в КМ в вакууме в потоке молекулярного водорода при температуре около 443 К для изготовления ФПУ на основе ГЭС КРТ с усилием на отрыв ФП от КМ форматом 128×128 ФЧЭ, равным 27±1Н (при максимальном усилии на отрыв сплавленных при температуре 440 К индиевых столбов в ФПУ того же формата, равным

36±1Н). После «гибридизации» КМ и ФП на основе ГЭС КРТ ФПУ отжигалось в течении 820 сек при температуре 403 К.

В заключении сформулированы **основные результаты работы:**

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;

6) 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 $3,6 \text{ Дж/см}^2$ 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.

В приложении 1 представлены подробности проведённых экспериментов и программа численного расчёта пространственно-временного изменения температурного поля однослойной плёнки ФП в вакууме после импульсного нагрева части поверхности.

В приложении 2 представлены акты использования результатов диссертационной работы.

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. Овсюк, Д.Г. Есаев/Технология сборки крупноформатных инфракрасных фотоприёмных 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 ультра-

фиолетовом 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. Plotnikov/Optimization of nanosecond UV laser illumination for semiconductor materials (Si, HgCdTe, InSb)//Proceeding SPIE, V. 3933, 2000, P. 432-437

11. A.R. Novoselov/Processes in semiconductor materials after laser cutting//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

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета

630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

тел./факс (383) 346-08-57

Формат 60×84/16 объем 1.5 п.л., тираж 100 экз.

Заказ № 304 подписано в печать 11.05.11 г.