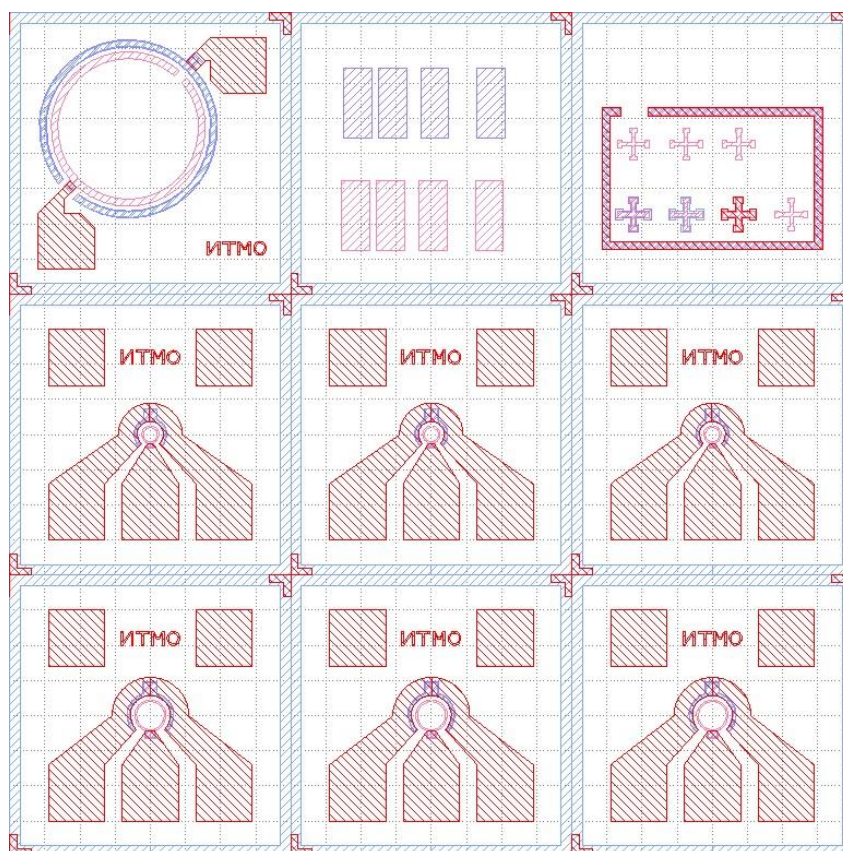


ИТМО

**В.В. Андриюшкин, Л.Я. Карачинский,
Е.С. Колодезный, П.Е. Копытов,
И.И. Новиков, С.С. Рочас**

ПЛАНАРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОПТОЭЛЕКТРОНИКЕ

Учебно-методическое пособие



**Санкт-Петербург
2023**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**В.В. Андриюшкин, Л.Я. Карачинский,
Е.С. Колодезный, П.Е. Копытов,
И.И. Новиков, С.С. Рочас**

ПЛАНАРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОПТОЭЛЕКТРОНИКЕ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО

по направлениям подготовки 12.04.05 «Лазерная техника и лазерные технологии» и 16.04.01 «Техническая физика» в качестве учебно-методического пособия для реализации основных профессиональных образовательных программ высшего образования магистратуры

ИТМО

Санкт-Петербург
2023

В.В. Андрюшкин, Л.Я. Карачинский, Е.С. Колодезный, П.Е. Копытов, И.И. Новиков, С.С. Рочас. Планарные технологии в оптоэлектронике: Учебно-методическое пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2023. – 61 с.

Рецензент: Бабичев Андрей Владимирович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории однофотонных детекторов и генераторов Университета ИТМО

Учебно-методическое пособие предназначено для использования в рамках реализуемых дисциплин образовательных программ по направлениям подготовки 12.04.05 «Лазерная техника и лазерные технологии» и 16.04.01 «Техническая физика». В пособии приведены достаточные теоретические сведения и подробные описания лабораторных работ в области создания полупроводниковых кристаллов оптоэлектронных устройств. В пособии рассматриваются вопросы изготовления и конструирования эпитаксиальных пластин, дискретных полупроводниковых кристаллов и оптических модулей. В процессе выполнения лабораторных работ учащиеся знакомятся с технологическими этапами создания кристаллов, с процессом создания фотолитографических шаблонов с использованием программного обеспечения Klayout.

ИТМО

Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2023

©В.В. Андрюшкин, Л.Я. Карачинский, Е.С. Колодезный, П.Е. Копытов, И.И. Новиков, С.С. Рочас, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Лабораторная работа № 1 «Методы изготовления и конструкции гетероструктур оптоэлектронных устройств».....	5
Лабораторная работа № 2 «Расчет параметров кристалла оптоэлектронного прибора»	13
Лабораторная работа № 3 «Технологический маршрут изготовления кристалла»	19
Лабораторная работа № 4 «Фотолитография»	32
Лабораторная работа № 5 «Оптоэлектронный модуль»	45
ПРИЛОЖЕНИЕ А Пример оформления отчета.....	50
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Задания на выполнение лабораторной работы	54
ПРИЛОЖЕНИЕ В Чертеж общего вида светодиодного модуля	57
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	58

ВВЕДЕНИЕ

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов, изучающих образовательную дисциплину «Планарные технологии в оптоэлектронике» по направлениям подготовки 12.04.05 «Лазерная техника и лазерные технологии» и 16.04.01 «Техническая физика».

В рамках дисциплины студенты изучают теоретические сведения и решают практические задания в области конструирования и технологии изготовления полупроводниковых эпитаксиальных гетероструктур, кристаллов оптоэлектронных компонентов, оптических модулей на основе кристаллов.

Целью освоения дисциплины является развитие умения исследования и проектирования приборов оптоэлектроники для организации взаимодействия между участниками процесса их производства, а также умений, необходимых для разработки и контроля технологических процессов создания излучающих и фотоприемных систем.

В рамках выполнения лабораторных работ учащиеся знакомятся с процессами создания полупроводниковых кристаллов оптоэлектронных устройств, изучают методы изготовления и конструкции гетероструктур оптоэлектронных устройств с их послойным описанием, алгоритмы расчетов основных параметров кристаллов, влияющих на рабочие характеристики оптоэлектронных устройств, знакомятся с технологическими этапами создания кристаллов оптоэлектронных устройств из полупроводниковых гетероструктур, с процессом создания фотолитографических шаблонов при использовании систем автоматизированного проектирования (САПР) и с основными типами корпусов оптоэлектронных модулей.

Оценка лабораторной работы осуществляется при предоставлении студентом отчета по лабораторной работе в бумажном виде в соответствии с продемонстрированным преподавателем шаблоном и с учетом выполнения следующих условий: достигнута указанная цель и задачи, правильно оформлен отчет по лабораторной работе, студент ответил на вопросы преподавателя по тематике лабораторной работы, студент сдал отчет по лабораторной работе в указанные преподавателем сроки, оригинальность отчета по лабораторной работе.

Лабораторная работа № 1 «Методы изготовления и конструкции гетероструктур оптоэлектронных устройств»

1. Цель

Изучение, послойное описание конструкции, описание материалов и функций слоев эпитаксиальных гетероструктур оптоэлектронных устройств, а также конструирование и описание гетероструктуры светодиода в САПР Klayout [1].

2. Теоретические сведения

В основе конструкций современных оптоэлектронных приборов лежат полупроводниковые гетероструктуры – последовательность полупроводниковых слоев для создания гетероперехода, различающиеся постоянной кристаллической решетки. Основным прогресс в создании оптоэлектронных приборов обусловлен, в том числе, развитием технологий эпитаксии гетероструктур на основе полупроводников A^3B^5 . Наиболее распространенными представляются следующие методы получения эпитаксиальных гетероструктур: металлорганическая газофазная эпитаксия (МОГФЭ), молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ).

2.1. Методы получения эпитаксиальных гетероструктур

Метод МОГФЭ позволяет формировать слои полупроводниковой гетероструктуры путем термического разложения (пиролиза) металлорганических соединений. К его плюсам можно отнести возможность создания однородных эпитаксиальных структур большой площади (6 дюймов) при высокой скорости роста (обычно 0,1 мкм/мин), однако метод не обладает высокой точностью задания толщины слоев в силу инерционности подачи газов в систему. Также важно учесть, что следствием использования металлорганических соединений является загрязнение формируемого полупроводникового слоя углеродом [2].

Применение МОГФЭ с пониженным давлением в эпитаксиальном реакторе имеет ряд преимуществ. При выращивании соединений A^3B^5 за счет снижения давления газовой смеси в реакторе возможно эффективно управлять градиентом концентрации примесей и градиентом состава основных компонентов твердого раствора за счет увеличения скорости потока газовой смеси. Как результат, применение данной технологии позволяет формировать гетероструктуры для оптоэлектроники, включающие последовательность слоев нанометровой толщины. Также за счет снижения давления в реакторе возможно увеличивать скорость газового потока в реакторе без охлаждения подложки, что приводит к улучшению однородности растущих слоев.

Данная технология успешно применяется для создания:

- гетероструктур GaAs/AlGaAs и полевых транзисторов на их основе,
- гетероструктур GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами,
- гетероструктур GaInAs/InP с набором квантовых ям и др.,

– гетероструктур содержащих слои GaN, InGaN, GaP.

МПЭ является одним из основных методов для формирования тонких (менее 1 нм) монокристаллических слоев полупроводниковых материалов за счет возможности осуществлять прецизионно точный контроль состава, типа и степени легирования слоев. Основными преимуществами метода являются малая и контролируемая скорость осаждения (~ 1 монослой в секунду), более низкие в сравнении с МОГФЭ температуры эпитаксиального роста (300–700 °С), возможность контроля состояния поверхности в режиме реального времени за счет анализа дифракции быстрых электронов, полная автоматизация ростового процесса.

Источниками элементов третьей группы в установке МПЭ являются эффузионные ячейки, каждая из которых представляет собой тигель из пиролитического нитрида бора, окруженный нагревательным элементом. Комбинация открытых заслонок ряда эффузионных ячеек наряду с возможностью прецизионного изменения их температуры (точность задания температуры источника составляет менее 0,2 °С) позволяет изменять состав и легирования выращиваемых полупроводниковых слоев. Высокая скорость открытия заслонок эффузионных ячеек обеспечивает толщину переходного слоя не более одного монослоя атомов (примерно 3 Å), что позволяет формировать резкие гетерограницы многослойных полупроводниковых гетероструктур в сравнении с методом МОГФЭ. При этом точность задания и поддержания элементного состава и легирования слоев во время эпитаксиального процесса составляет порядка 1 % [3].

Стоит отметить, что при использовании технологии МПЭ низкое остаточное давление паров газов в эпитаксиальной камере, а также высокая степень очистки элементов третьей и пятой группы являются принципиальным моментом для формирования гетероструктур, демонстрирующих высокое структурное качество и соответствие параметрам выращиваемых слоев, заданных в ростовом описании.

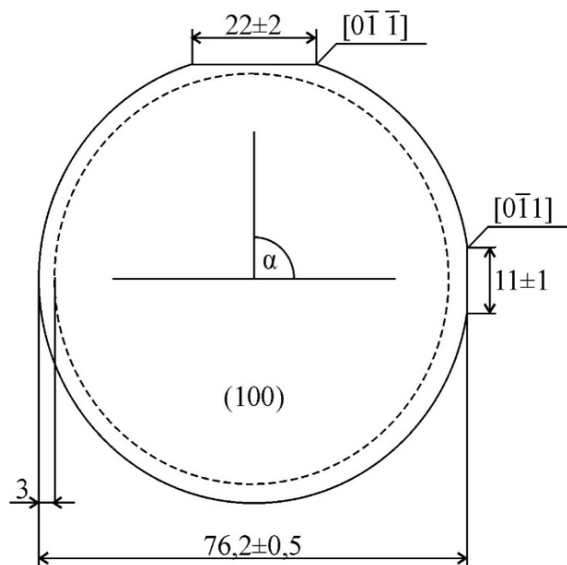
2.2. Полупроводниковые подложки

Создание (выращивание) полупроводниковых гетероструктур осуществляется на монокристаллических подложках, которые должны обладать высоким структурным совершенством и степенью чистоты материала. Основными подложками, используемыми при эпитаксии, являются: кремниевые Si, на основе арсенида галлия GaAs, фосфида галлия GaP, арсенида индия InAs, антимонида индия InP, антимонида галлия GaSb. Подложки разделяются на два типа: непроводящие (диэлектрические) и проводящие (*n*- или *p*-типа проводимости). В таблице 1.1 представлены стандарты основных размеров подложек для применения в области полупроводниковой электроники.

Из слитков полупроводниковых материалов диаметром от 2 дюймов и более осуществляется распиловка подложек (пластин) перпендикулярно их продольной оси. Типичная толщина подложек составляет менее 1 мм и определяется их диаметром. После распиловки проводится шлифовка пластин до

Таблица 1.1 – Размеры пластин

Диаметр, мм		Толщина, мкм		Длина основного среза, мм	Длина вспомогательного среза, мм
Номинальный	Предельное отклонение	Номинальный	Предельное отклонение		
51	±0.5	275	±20	От 16 до 20	От 6 до 11
60		300		От 18 до 22	От 8 до 10
76		380		От 19 до 27	От 9 до 15
100	±0.8	500	±25	От 30 до 35	От 16 до 20
125	±1.0	600		От 35 до 45	От 20 до 30
150		650		От 47 до 53	От 24 до 30

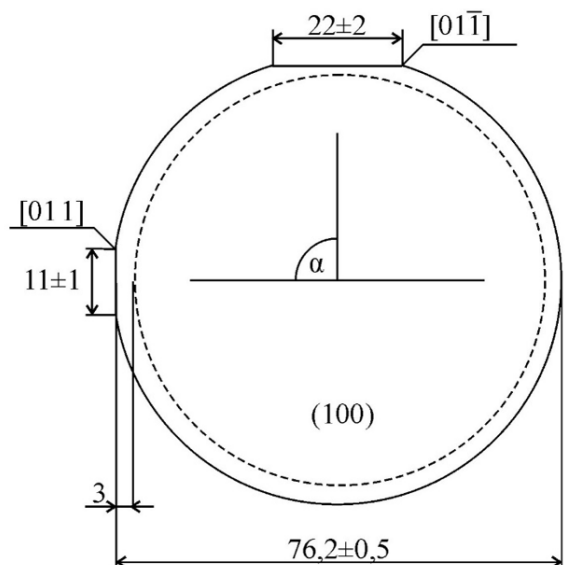


Направление по часовой стрелке

$\alpha=0^\circ$ – базовый срез в плоскости $[0\bar{1}\bar{1}]$
 $\alpha=90^\circ$ – вспомогательный (короткий) срез в плоскости $[0\bar{1}1]$

(100) – направление кристаллографической ориентации рабочей поверхности подложки
 3 мм – отступ от края подложки при определении рабочей площади
 (22±2) мм – размер базового среза
 (11±1) мм – размер вспомогательного (короткого) среза
 (76,2±0,5) мм – диаметр подложки

Рисунок 1.1 – Расположение базового и вспомогательного срезов на подложке с опцией SEMI-E/J



Направление против часовой стрелки

$\alpha=0^\circ$ – базовый срез в плоскости $[01\bar{1}]$
 $\alpha=90^\circ$ – вспомогательный (короткий) срез в плоскости $[011]$

(100) - направление кристаллографической ориентации рабочей поверхности подложки
 3 мм – отступ от края подложки при определении рабочей площади
 (22±2) мм – размер базового среза
 (11±1) мм – размер вспомогательного (короткого) среза
 (76,2±0,5) мм – диаметр подложки

Рисунок 1.2 – Расположение базового и вспомогательного срезов на подложке с опцией SEMI-US

устранения неровностей и нарушенного слоя и последующая их полировка механическим, химическим, химико-механическим, электрохимическим или

плазмо-химическим способом. Качество и состояние поверхности пластин имеют ключевое значение, поскольку последующие слои полупроводниковых гетероструктур выращиваются на буферном слое, формируемом на ее поверхности. Финальным этапом подготовки подложки является удаление загрязнений, остатков оксидов и обезжиривание за счет химической обработки.

Подробнее о технологическом маршруте изготовления готового прибора и методах обработки поверхности будет рассказано в Лабораторной работе №3 «Технологический маршрут изготовления кристалла».

3. Практическая часть

3.1. Знакомство с САПР «Klayout»

САПР «Klayout» позволяет просматривать, создавать и редактировать файлы формата GDS и OASIS, содержащие информацию об интегральных схемах на этапах её производства. GDS (Graphic Database System) и OASIS (Open Artwork System Interchange Standard) являются наиболее распространёнными форматами файлов баз данных для обмена данными по интегральным схемам и их топологиям. Такие форматы описывают плоские геометрические формы, текстовые метки и иную информацию в иерархической форме. Данные могут использоваться для обмена между различными САПР и для создания фотошаблонов.

Цель САПР в рамках данной дисциплины состоит в проектировании фотошаблонов, а именно определении того, какие области будут экспонированы во время этапа литографии, а какие останутся неэкспонированными, для создания массива кристаллов светодиодов на заданной подложке.

Основная идея проектирования строится на слоях и ячейках, определяемых самим пользователем. Рассмотрим идею проектирования гетероструктуры светодиода на примере светодиода с максимумом люминесценции вблизи 470 нм. Гетероструктура такого светодиода представлена на рисунке 1.3.

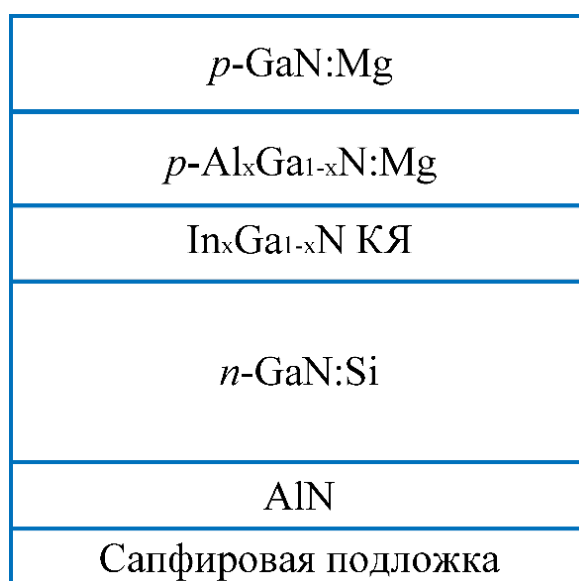


Рисунок 1.3 – Гетероструктура светодиода InGaN–AlGaIn–GaN на основе квантовых ям (КЯ)

Структура светодиода выращена на сапфировой подложке, на ней расположены буферный слой AlN (~ 30 нм), слой *n*-GaN:Si (~ 4 мкм), активная область на основе пяти In_xGa_{1-x}N КЯ толщиной 3–4 нм, разделенных GaN барьерами толщиной 4–5 нм, барьерный слой *p*-Al_{0,1}Ga_{0,9}N:Mg (~ 100 нм) для инжекции дырок и согласования с решеткой верхнего слоя *p*-GaN:Mg (~ 0,5 мкм). Излучение КЯ на основе In_xGa_{1-x}N находится в диапазоне от 450 до 580 нм. Создание светодиода с максимумом люминесценции вблизи 470 нм требует использования КЯ с долей индия порядка 23% [4].

4. Порядок выполнения работы

Получить вариант задания на выполнение лабораторной работы у преподавателя. Для того, чтобы описать структуру в программе «Klayout», необходимо выполнить следующие действия:

4.1. Открыть программу «Klayout» (Editor) на компьютере.

4.2. В верхнем левом углу открыть вкладку «File» → «New layout». Откроется окно настройки, в котором можно задать название ячейки, которая будет соответствовать вашей пластине «Wafer». Вводим название и нажимаем «ОК» (Рисунок 1.4).

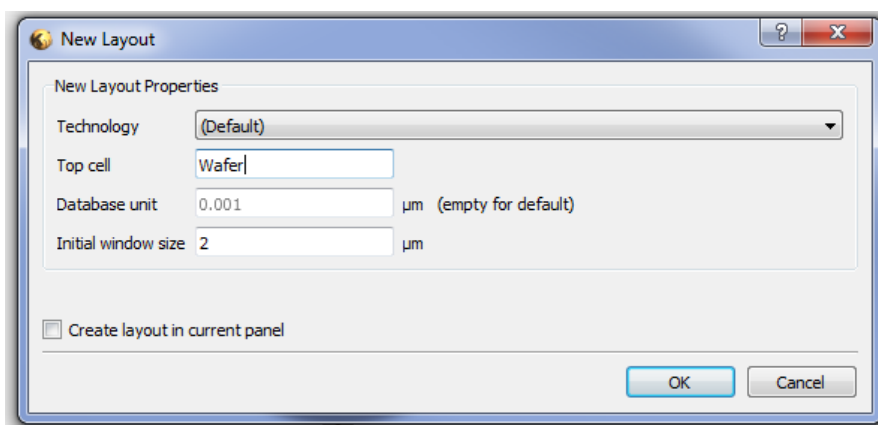


Рисунок 1.4 – Создание документа

4.3. Далее необходимо задать новую ячейку, в которой будет проектироваться непосредственно кристалл светодиода. Для этого в верхнем левом углу переходим во вкладку «Edit» → «Cell» → «New cell». Вводим название данной ячейки и нажимаем «ОК» (Рисунок 1.5).

Чтобы отобразить определенную ячейку, выберите ячейку в иерархии ячеек в браузере иерархий слева. Затем щелкните правой кнопкой мыши в дереве ячеек, чтобы вызвать контекстное меню, и выберите пункт «Показать как верх» или просто выберите ячейку средней кнопкой мыши. Таким образом при необходимости вы сможете выбирать проектирование между общим размещением кристаллов на пластине и непосредственно проектированием самого кристалла.

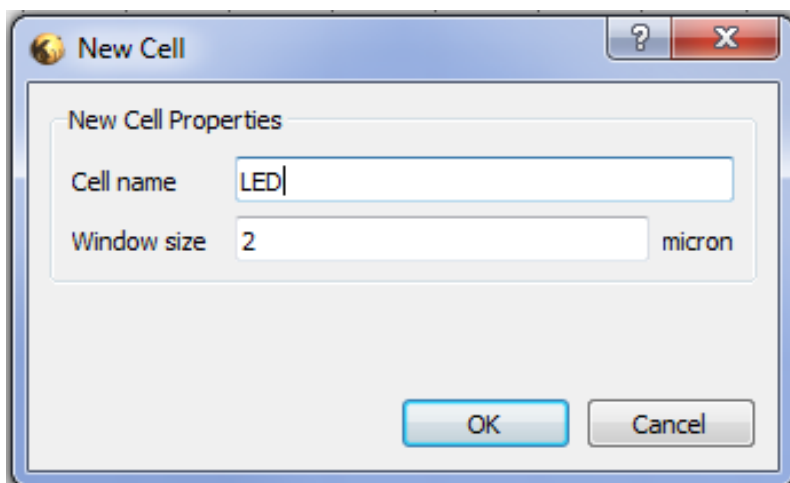


Рисунок 1.5 – Создание ячейки «Cell»

4.4. Переходим в ячейку «LED» нажатием средней кнопки мыши на данную ячейку в иерархии ячеек. Выбранная ячейка выделится жирным шрифтом (Рисунок 1.6).

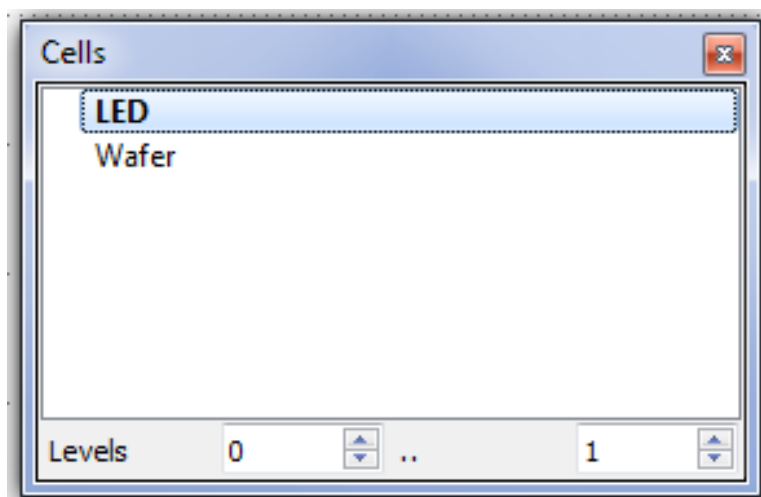


Рисунок 1.6 – Выбор ячейки

4.5. Далее переходим непосредственно к описанию каждого слоя (Layer) гетероструктуры кристалла светодиода. Для создания нового слоя в верхнем левом углу переходим во вкладку «Edit» → «Layer» → «New Layer». Вводим название слоя и нажимаем «ОК». Таким образом в названии можно (и нужно) указать не только название слоя, но и материал и толщину слоя. При этом при создании каждого последующего слоя необходимо в графе «Layer» увеличивать значение на 1 от предыдущего слоя (Рисунок 1.7).

4.6. Описываем все слои гетероструктуры светодиода с информацией о функции слоя, его материале и толщине. Для активной области достаточно описания одной гетеропары, поскольку фотошаблоны данных областей будут повторяться. В результате в библиотеке слоев будет полное описание гетероструктуры светодиода для последующей с ними работы. Отображение слоев серым цветом означает, что данные слои пока пусты (Рисунок 1.8).

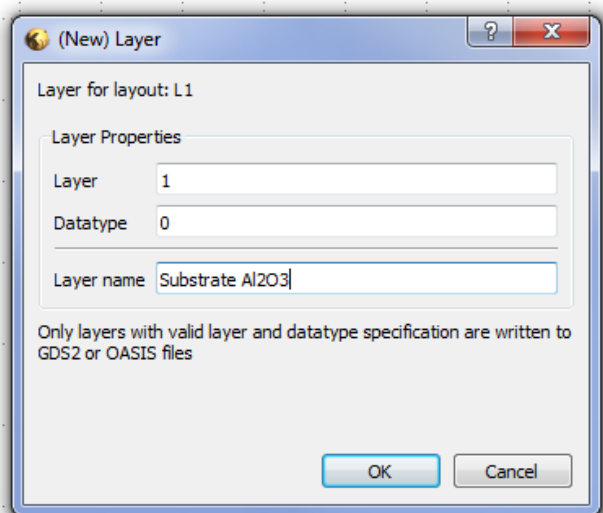


Рисунок 1.7 – Создание слоя

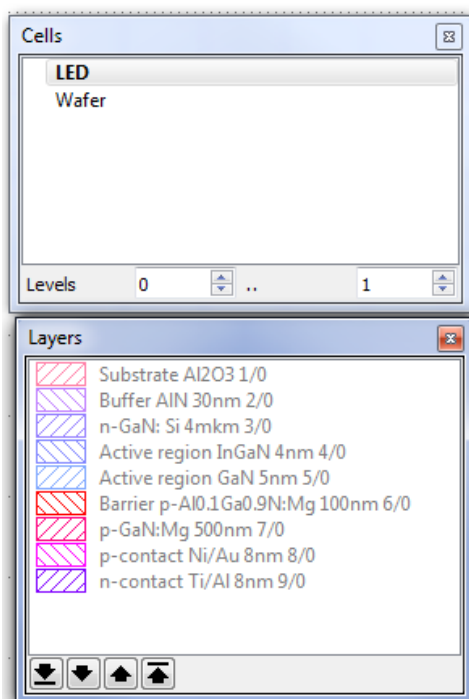


Рисунок 1.8 – Пример готового описания структуры в программе «Klayout»

4.7. Для сохранения работы в верхнем левом углу во вкладке выбираем «File» → «Save as» и сохраняем свою работу в формате: Surname_№group_Lab1. Тип файла All layout files.

5. Задание на лабораторную работу

По аналогии с перечисленными выше действиями составить описание в программе Klayout гетероструктуры оптоэлектронного устройства. Варианты устройств с описанием основных физических свойств описаны в таблице Б.1 Приложения Б. В отчете должно быть представлено описание каждого слоя гетероструктуры с обоснованием его физического значения в конкретной гетероструктуре.

6. Содержание отчета

Форма отчета должна соответствовать предъявляемым в Приложении А требованиям к отчету.

7. Контрольные вопросы

- 7.1.** Полупроводниковый светодиод. Определение.
- 7.2.** Принцип работы полупроводникового светодиода.
- 7.3.** Основные слои в гетероструктуре светодиода.
- 7.4.** Молекулярно-пучковая эпитаксия.
- 7.5.** Металлорганическая газофазная эпитаксия.

Лабораторная работа № 2 «Расчет параметров кристалла оптоэлектронного прибора»

1. Цель

Практическое применение знаний об основных электрофизических параметрах полупроводникового кристалла оптоэлектронного прибора.

2. Теоретические сведения

2.1. Светодиод

В светодиодных структурах на проводящих подложках ток направлен по нормали к плоскости подложки, а в структурах на диэлектрических подложках – параллельно плоскости подложки, что обусловлено направлением инжекции носителей заряда в активную область в зависимости от топологии металлических омических контактов. Важно учитывать, что не только положение контактов, но и их размеры и форма влияют на вывод излучения из светодиода. В рамках данной лабораторной работы будут рассмотрены варианты геометрической формы и схем расположения контактов на кристалле светодиода для разных типов подложек.

Для гетероструктур, изготовленных на проводящей подложке, поперечный разрез светодиода и его токового растекания в зависимости от геометрии контактов представлены на рисунке 2.1. Структуры на проводящей подложке имеют слой для растекания тока, расположенный выше p - n перехода.

В данных структурах точки под верхним металлическим контактом обладают одинаковыми потенциалами и плотностями тока J_0 , а плотность тока за пределами контакта определяется выражением:

$$J(x) = \frac{2J_0}{\left[\frac{x - r_c}{L_s} + \sqrt{2}\right]^2} \text{ при } x \geq r_c, \quad (2.1)$$

где L_s – длина растекания тока:

$$L_s = \sqrt{\frac{t \cdot n_{ideal} \cdot kT}{\rho \cdot J_0 \cdot e}}. \quad (2.2)$$

Здесь ρ – удельное сопротивление слоя растекания тока, t – толщина слоя растекания тока, n_{ideal} – коэффициент неидеальности вольт-амперной характеристики (обычно $1,05 < n_{ideal} < 1,35$). Для геометрии полоскового контакта толщина слоя растекания тока имеет вид:

$$t = \rho \cdot L_s^2 \cdot J_0 \cdot \frac{e}{n_{ideal} \cdot kT}. \quad (2.3)$$

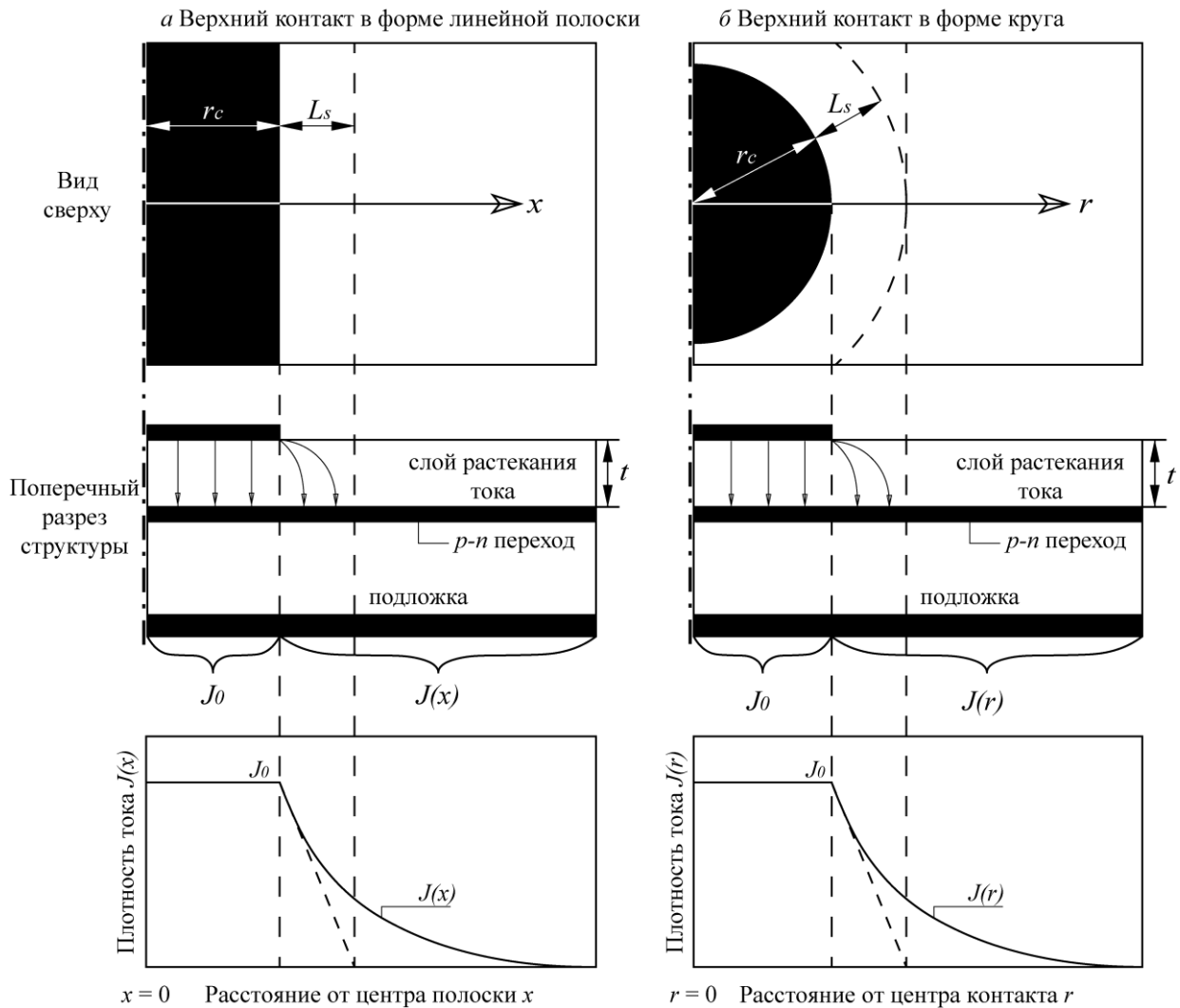


Рисунок 2.1 – Схема структуры светодиода на проводящей подложке с полосковым (а) и с круглым (б) контактами (адаптировано с [4])

Для геометрии круглого контакта толщина слоя растекания принимает вид:

$$t = \rho \cdot L_s \left(r_c + \frac{L_s}{2} \right) \ln \left(1 + \frac{L_s}{r_c} \right) \cdot \left(J_0 \cdot \frac{e}{n_{ideal} \cdot kT} \right). \quad (2.4)$$

Для гетероструктур выращенных на диэлектрической подложке, обладающих мезовой топологией для инжекции активной области, характерно явление ограничения тока. На рисунке 2.2 представлена схема распределения тока в структуре на диэлектрической подложке и эквивалентная электрическая схема данной структуры.

В структурах с латеральной схемой накачки ток течет в горизонтальном направлении через слои обкладок волновода. При этом, в идеальном случае, контакты не мешают выводу излучения, поскольку излучательная рекомбинация происходит между контактами областями. В силу меньшей подвижности носителей заряда в p -легированном слое проводимость слоя n -типа проводимости выше проводимости слоя p -типа проводимости. В силу меньшей подвижности носителей заряда в p -легированном слое проводимость слоя n -типа

проводимости выше проводимости слоя p -типа проводимости. Как результат, будет наблюдаться преимущественно латеральный транспорт носителей заряда по слою с n -типом проводимости до области вблизи p -контакта. В свою очередь, вертикальный транспорт носителей заряда через область p - n перехода соответствует области вблизи p -контакта. При приближении к области p -контакта будет наблюдаться повышение плотности тока.

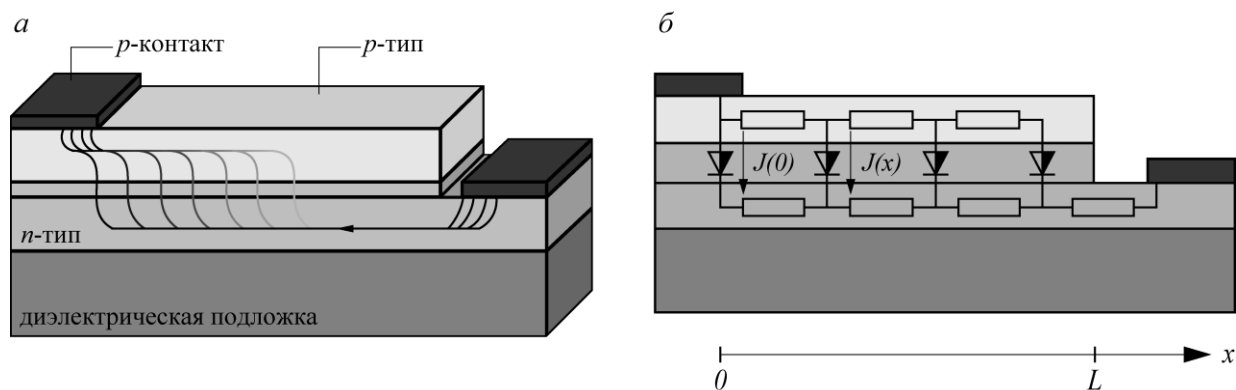


Рисунок 2.2 – Схема структуры светодиода на диэлектрической подложке: а) токовое распределение, б) эквивалентная электрическая схема (адаптировано с [4])

Эквивалентная электрическая схема на рисунке 2.2 предполагает, что на крае контакта p -типа плотность тока через p - n -переход равна $J(0)$. Аналитическое решение эквивалентной электрической схемы имеет следующий вид:

$$J(x) = J(0) \cdot \exp(-x/L_s), \quad (2.5)$$

где

$$L_s = \sqrt{\frac{2V_a}{J(0) \cdot [(\rho_p/t_p) + (\rho_n/t_n)]}}. \quad (2.6)$$

Здесь $J(x = 0) = J(0)$ – плотность тока на краю контакта. Показано, что V_a – напряжение активации, величина которого составляет несколько kT/e , например 50–75 мВ. С целью обеспечения равномерного свечения между контактными областями необходимо увеличивать величину L_s , характеризующую экспоненциальный спад тока. Как следует из выражения 2.6, рост величины L_s возможен как за счет повышения степени легирования ограничительных слоев, так и за счет увеличения их толщин.

2.1.1. Задание на лабораторную работу

В зависимости от типа гетероструктуры светодиода (Таблица Б.1 Приложения Б) разработать геометрическую форму и расположение контактов

на гетероструктуре светодиода. Рассчитать величину растекания тока, на основании которой дать пояснение геометрическим размерам контактов. На основе полученных данных выбрать геометрические размеры кристалла и дать их обоснование.

2.2. Фотодиод

Для определения топологических размеров кристаллов быстродействующих *p-i-n* фотодиодов необходимо учитывать электрофизические свойства эпитаксиальных гетероструктур и их конструкционные исполнения, оказывающие существенное влияние на быстродействие. Фотоприемники на основе таких гетероструктур должны обеспечивать работу в широком диапазоне частот, обладать малыми токами утечки, иметь минимальную инерционность, принимать достаточно мощные импульсы излучения и обеспечивать высокую квантовую эффективность [5].

В рабочем режиме фотодиод можно представить в виде эквивалентной электрической схемы, представленной на рисунке 2.3.

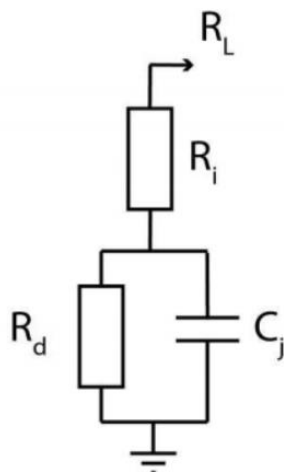


Рисунок 2.3 – Малосигнальная эквивалентная электрическая схема фотодиода

C_j представляет собой емкость *p-n*-перехода, R_i – сопротивление омических контактов, R_L – сопротивление нагрузки, R_d – сопротивление фотодиода при обратном включении, типичное значение которого составляет 1 МОм.

Одним из наиболее важных параметров кристалла фотодиода является полоса пропускания. Для оценки полосы пропускания на основе рассмотренной эквивалентной электрической схемы используется выражение:

$$f_c = \frac{1}{2\pi C_j (R_j + R_L)}. \quad (2.7)$$

В случае, когда фотоприемник работает в стандартном сверхвысокочастотном (СВЧ) тракте, сопротивление нагрузки считается равным 50 Ом. Емкость *p-n*-перехода C_j в эквивалентной схеме зависит от площади

фоточувствительной области S и толщины слоя собственной проводимости (i -слоя) W и может быть вычислена по формуле:

$$C_j = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{W}, \quad (2.8)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость слоя собственной проводимости, ε_0 – электрическая постоянная, W – толщина i -слоя. Для того, чтобы оценить площадь фоточувствительной области, в индивидуальном задании будет дано значение предельной рабочей частоты фотоприемного устройства.

Фотодиоды с барьерами Шоттки являются аналогом p - i - n фотодиода в случае, когда все излучение поглощается в области пространственного заряда [6,7]. В условиях данной лабораторной работы все измерения для представленных в Приложении Б (Таблица Б.1 «Фотодиоды») вариантов индивидуального задания проводятся по описанной в разделе методике.

2.2.1. Задание на лабораторную работу

Исходя из полученного варианта задания (Таблица Б.1 Приложения Б) найти площадь и диаметр фоточувствительной области, принимая во внимание, что фоточувствительная область имеет форму круга. Дать пояснение по расположению контактов, их геометрической форме и количеству на кристалле. На основе полученных данных выбрать геометрические размеры кристалла и дать их обоснование.

2.3. Лазер

Для изготовления полоскового лазера (Рисунок 2.4) на эпитаксиальную пластину наносятся нижний металлический контакт, покрывающий нижнюю часть подложки, и верхний металлический контакт (~ от 20 до 200 нм) в форме металлической полосы вдоль оптической оси резонатора.

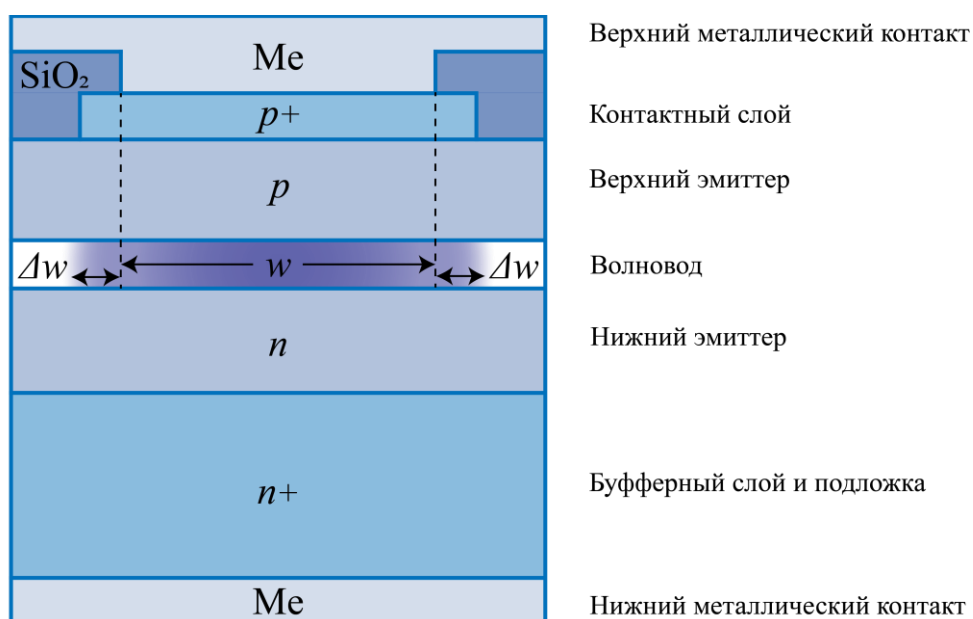


Рисунок 2.4 – Сечение полоскового лазера

Латеральное растекание тока по легированным слоям лазерной структуры приводит к избыточной концентрации носителей заряда как в пределах верхнего металлического контакта (контактного полоска), так и вне данной области. В свою очередь, генерация излучения возникает при достижении под полосковым контактом порогового значения концентрации носителей заряда, а растекание носителей заряда вне области полоска не вносит вклада в излучение и увеличивает пороговый ток лазера. Частичного подавления растекания тока можно добиться за счет удаления вне области полоска части контактного слоя и верхнего эмиттерного слоя (Рисунок 2.4).

Вследствие растекания тока вне области токовой накачки шириной w профиль концентрации носителей заряда увеличивается на величину Δw в обе стороны, за счет чего пороговая плотность тока j_{th} достигается в области $w + 2\Delta w$, увеличивая величину порогового тока I_{th} . Абсолютное значение порогового тока полоскового лазера с учетом растекания определяется как:

$$I_{th} = (w + 2\Delta w)Lj_{th}. \quad (2.9)$$

где, L – длина полоскового контакта.

Латеральное растекание тока приводит к увеличению порогового тока на $2\Delta wLj_{th}$, сравнительно с подавленным латеральным растеканием [8].

2.3.1. Задание на лабораторную работу

Согласно исходным данным индивидуального задания (Таблица Б.1 Приложения Б) определить ширину верхнего контакта полоскового лазера. Дать пояснение, как изменится величина порогового тока при изменении геометрических размеров верхнего контакта в продольном или поперечном направлениях. На основе полученных данных выбрать геометрические размеры кристалла и дать их обоснование.

3. Содержание отчета

Форма отчета должна соответствовать предъявляемым в Приложении А требованиям к отчету.

4. Контрольные вопросы

- 4.1.** Токовое растекание в полупроводниковых гетероструктурах.
- 4.2.** Фотодиод и его основные параметры.
- 4.3.** Полосковый лазерный диод и его основные параметры.
- 4.4.** Светодиод и его основные параметры.

Лабораторная работа № 3 «Технологический маршрут изготовления кристалла»

1. Цель

Получение и применение знаний о технологических процессах изготовления гетероструктур и кристаллов оптоэлектронных устройств.

2. Теоретические сведения

Кристалл (в микроэлектронике) – монокристалл или часть диэлектрической или полупроводниковой пластины прямоугольной формы, на которых сформированы элементы интегральной схемы или отдельный электронный прибор, а также межэлементные соединения и контактные площадки. В общем виде технологическую схему процесса производства полупроводниковых кристаллов можно разделить на:

- подготовительные процессы. Включают в себя изготовление комплекта фотолитографических масок (фотошаблонов) и подготовительные операции. Формирование структуры кристалла происходит за счет создания элементов кристалла путем проведения постростовых операций в эпитаксиальных слоях гетероструктуры. При этом постростовые операции могут проводиться на одной или нескольких эпитаксиальных пластинах одновременно, что преимущественно определяется спецификацией оборудования для проведения постростовых операций,

- заключительные процессы. Включают в себя совокупность индивидуальных обработок кристалла, таких как контроль функциональных параметров, разбраковка, разделение пластин на отдельные кристаллы, выходной контроль, механические и климатические испытания.

Рассмотрим основные технологические процессы маршрута изготовления полупроводникового кристалла.

2.1. Фотолитография

Включает в себя нанесение тонкой пленки фоточувствительного материала (фоторезиста), физико-химические свойства которого меняются в результате засветки в спектральном диапазоне чувствительности фоторезиста [9]. Существуют два основных вида фоторезиста (Рисунок 3.1):

- позитивный – при облучении происходит распад молекул полимера и уменьшение молекулярного веса, при последующем травлении облученные участки удаляются быстрее, чем не облученные;

- негативный – при облучении происходит «сшивка» соседних полимерных молекул и возрастание молекулярного веса, при последующем травлении на поверхности гетероструктуры остаются только облученные участки.

Следующим этапом фотолитографии является экспонирование фоторезиста через фотошаблон – пластина с непрозрачным рисунком топологии формируемого слоя. Большинство фоторезистов демонстрируют чувствительность в спектральном диапазоне от ближнего ультрафиолета

(>320 нм) до 460 нм. Также существуют специальные фоторезисты среднего ультрафиолетового диапазона и глубокого ультрафиолета, но область их применения ограничена преимущественно кремниевой микроэлектроникой. При выполнении первой фотолитографии фотошаблон должен быть ориентирован относительно подложки так, чтобы все его модули были параллельны базовому срезу на эпитаксиальной пластине, сделанному до этого в выбранном кристаллографическом направлении. Последующие операции требуют точного совмещения рисунка фотошаблона с фотолитографическим рисунком предыдущей операции, что обеспечивается заранее предусмотренными метками совмещения для каждого топологического слоя.

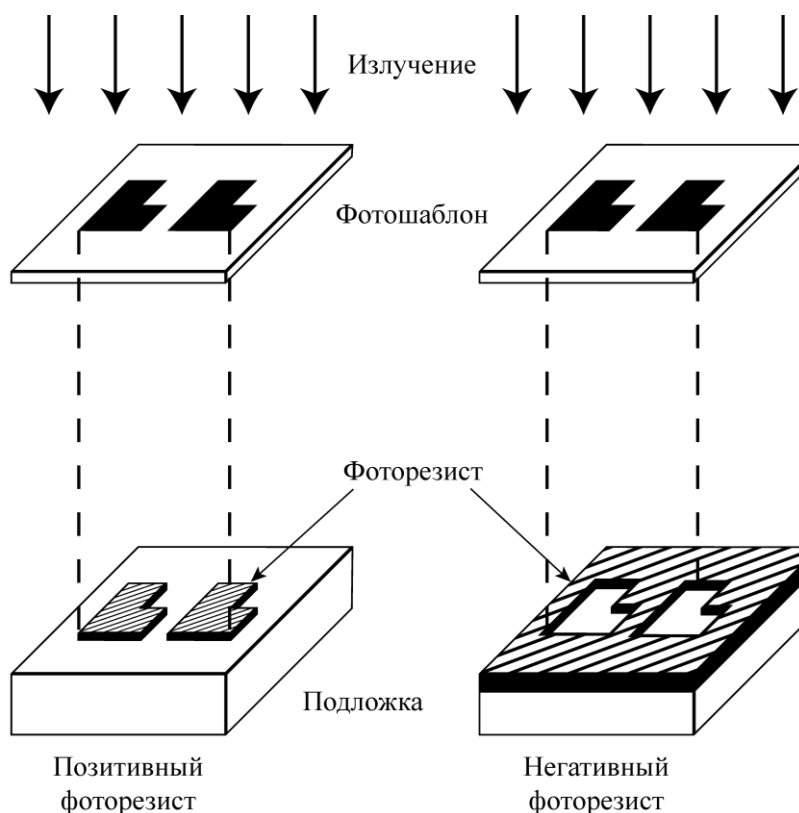


Рисунок 3.1 – Позитивный и негативный фоторезисты

Следующим этапом является проявление фоторезиста, представляющего собой удаление негативного/позитивного фоторезиста с неэкспонированных/экспонированных участков эпитаксиальной пластины, соответственно.

Подробнее процессы фотолитографии и изготовления фотолитографических шаблонов описаны в Лабораторной работе №4 «Фотолитография».

2.2. Осаждение диэлектрических слоев

Плазмохимическое осаждение диэлектриков (PECVD) является видом газофазного осаждения, где под воздействием плазмы осуществляется осаждение из газовых прекурсоров оксидов/нитридов на поверхность эпитаксиальной пластины. Преимуществом технологии является более низкие

температуры осаждения в сравнении с CVD. Результатом является контролируемое образование пленки нужной толщины на подложке. В общем виде процесс осаждения содержит:

- газофазное разложение,
- направление потока осаждаемых частиц к подложке,
- концентрирование осаждаемых частиц у подложки,
- диффундирование вдоль поверхности подложки,
- осаждение на поверхность подложки,
- удаление побочных продуктов из реактора.

Плазменное осаждение применяется для создания диэлектрических слоев SiO_2 , Si_3N_4 , SiO_x , SiN_y , SiO_xN_y . Данный метод основан на емкостном высокочастотном разряде, возникающем между параллельными электродами, где один из электродов – подогреваемый, на нем располагается подложка, а второй электрод применяется для подачи прекурсоров, которые реагируют с подложкой, образуя аморфный или поликристаллический слой.

Для ускорения скорости реакции прекурсоров друг с другом в плазменном осаждении также участвует газоразрядная плазма. Процесс осуществляется при относительно низкой температуре ($\sim 80\text{--}350\text{ }^\circ\text{C}$), причем с использованием индуктивно-связанной плазмы (ICPCVD) можно достичь комнатной температуры. В методе ICPCVD плазма образуется за счет высокочастотного переменного магнитного поля и используется для нанесения на подложку диэлектриков на основе кремния (SiO_2 , SiN_x), аморфного и поликристаллического кремния, карбида кремния.

Атомно-слоевое осаждение (ALD) – это усовершенствованный метод осаждения материалов, в том числе диэлектрических, который позволяет точно контролировать нанесение ультратонких пленок толщиной в несколько нанометров. Данный метод не только обеспечивает превосходный контроль толщины и однородность, но и позволяет покрывать 3D-структуры (структуры с высоким соотношением сторон) конформным покрытием. Метод ALD наиболее часто применяется для изготовления различной продукции в сфере наноразмерных технологий, где присутствует необходимость нанесения исключительно беспористых, совершенно равномерных покрытий с высокой точностью по всей толщине на полупроводниковые пластины сложных форм, либо на изделия, отличающиеся высоким аспектным соотношением.

2.3. Травление

В процессе изготовления кристалла осуществляется перенос рисунка (топологии), нанесенного на обрабатываемую полупроводниковую структуру резиста, в соответствующие полупроводниковые слои. Если для данной структуры требуется изменить рельеф полупроводникового слоя, задача решается при помощи травления участков эпитаксиальной пластины в областях без фоторезиста или другой маски. Травление может проводиться как в жидких реагентах, так и без их использования, а именно при помощи методов сухого травления. В современном производстве методы жидкостного травления практически не используются, так как не обеспечивают получение

субмикронных размеров элементов и необходимую чистоту процесса. В подавляющем большинстве случаев рельеф структуры формируется методами сухого травления.

Различают три основных вида взаимодействия частиц плазмы с поверхностью материала.

1. Ионное травление, в процессе которого слой материала удаляется только в результате физического распыления высокоэнергетическими ионами газа без химического взаимодействия между ними. Обычно такими ионами являются ионы инертного газа аргона (Ar^+).

2. Плазмохимическое травление, напротив, происходит только в результате химического взаимодействия между активными частицами реакционного газа и поверхностными атомами материала. Причем, если обрабатываемый материал находится в области плазмы разряда, то химические реакции активируются бомбардировкой низкоэнергетическими электронами, ионами, фотонами. Если же плазма отделена от обрабатываемого материала, идет лишь химическое взаимодействие с атомами и радикалами.

3. Ионно-химическое, или реактивное ионное травление, является как бы суммарным воздействием первых двух. Поверхностные слои материала удаляются как под действием распыления, так и в результате протекающих химических реакций. В этом случае трудно выделить вклад физического или химического механизмов травления. Можно принять, что при энергии ионов $E < 100$ эВ будут преобладать плазмохимические процессы, тогда как с ростом $E > 100$ эВ возможно преобладание ионно-химических явлений.

2.4. Напыление металлов

Для напыления металлов широко используются плазменные технологии, работающие по принципу вакуумного напыления, т.е. нанесения пленок/слоев на поверхность в условиях вакуума. В основе процесса лежит формирование направленного потока частиц (атомов, молекул или кластеров) наносимого материала на поверхность изделий и конденсации наносимых частиц [10]. В общем виде вакуумное напыление можно разделить следующим образом:

– термическое напыление. Метод основан на использовании электрической энергии для нагрева материала мишени до уровня температуры, при которой атомы вещества испаряются с поверхности. Особенность данного метода – в высоком вакууме (до 10^{-8} Па), который гарантирует короткий свободный пробег атомов, и как следствие – высокую чистоту осаждаемого материала,

– напыление с использованием электронно-лучевого испарения мишени материала. Пучок электронов с помощью линз подводится к тиглю с материалом мишени, бомбардирует поверхность, нагревает ее и заставляет материал испаряться. Затем происходит осаждение испаряемого вещества на подложку,

– ионно-лучевая обработка материалов. В рамках процесса ускоренные ионы взаимодействуют с поверхностью обрабатываемого объекта, вызывая либо распыление материала, либо осаждение материала,

– магнетронное напыление. В рамках процесса происходит осаждение пленок широкого спектра материалов с возможностью изменения толщины пленок от десятков нанометров до нескольких микрон.

Напыление металлов широко используется для создания контактов и контактных площадок кристалла. Однако при нанесении контактных площадок требуется их усиление (утолщение) с помощью гальванической технологии. Данный процесс представляет собой покрытие усиленным слоем металла металлических слоев кристалла под воздействием электролиза. Наиболее распространенным является гальваническое покрытие золотом с использованием электролита (солей золота), в который погружают образец.

2.5 Вжигание контактов

Главными требованиями к омическим контактам являются их низкое контактное сопротивление к контактным слоям гетероструктуры. Для улучшения характеристик формируемых контактов производится их термообработка (вжигание), во время которой атомы металла диффундируют в слои полупроводниковой гетероструктуры. Для проведения процесса вжигания контактов, как правило, используются специальные печи, в которых нагрев происходит с помощью резистивных нагревателей. Температура процесса определяется током, протекающим через нагревательный элемент, и контролируется термопарой, расположенной рядом с нагревательным элементом. Вжигание контактов производится в вакууме, атмосфере инертного газа (азота) или формиנג-газа (смеси водорода и инертного газа) для исключения взаимодействия кислорода с целью предотвращения окисления металлизации. После проведения процесса вжигания полупроводниковая пластина охлаждается в камере печи до комнатной температуры.

3. Практическая часть

Рассмотрим технологический маршрут изготовления кристалла на примере *p-i-n* фотодиода спектрального диапазона 1550 нм на основе гетероструктуры InP/InGaAs. Гетероструктура данного фотоприемника представлена на рисунке 3.2, а основные параметры слоев представлены в таблице 3.1.

Для детектирования излучения в спектральной области около 1550 нм наиболее подходящим материалом для создания фотоприемников излучения является InGaAs, который относится к прямозонным материалам и при содержании индия 53% оказывается согласованным с подложкой InP по постоянной кристаллической решетки. В качестве материала поглощающего слоя разрабатываемых *p-i-n* фотодиодов используется In_{0.53}Ga_{0.47}As. Для реализации в качестве базовой конструкции предлагается использовать конструкцию полупроводникового кристалла, изображенную на рисунке 3.3. Применение в данной конструкции технологии меза-структуры позволяет увеличить полосу пропускания фотоприемника, а также снизить его токи утечки. Более того использование фосфида индия в качестве нижнего контактного слоя *n*-типа обеспечивает увеличение полосы пропускания гармонического

оптического сигнала по сравнению с контактным слоем n -InGaAs за счет уменьшения диффузионной компоненты тока.

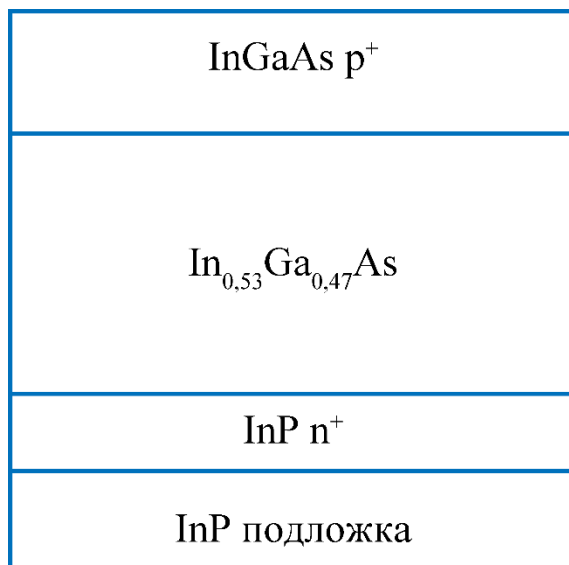


Рисунок 3.2 – Гетероструктура p - i - n фотоприемника

Таблица 3.1 – Описание гетероструктуры p - i - n фотоприемника

Материал слоя	Толщина слоя, нм	Легирование
In _{0,53} Ga _{0,47} As	100	p -тип $> 5 \cdot 10^{19}$
In _{0,53} Ga _{0,47} As	2000	–
InP	1000	n -тип $5 \cdot 10^{17}$
InP	Подложка	Нелегированная

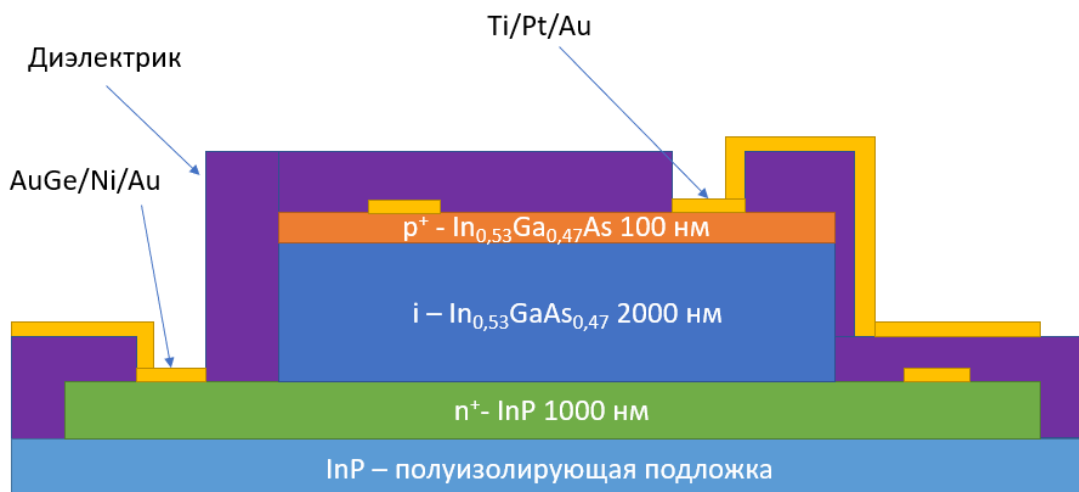


Рисунок 3.3 – Схематическое изображение поперечного сечения кристалла p - i - n фотодиода

Технологический маршрут изготовления кристалла p - i - n фотоприемника состоит из последовательности основных технологических операций. Ниже представлен маршрут изготовления кристаллов фотоприемника в порядке выполнения фотолитографических процессов:

3.1. Фотолитография под омический контакт к p -слою InGaAs. Создание формы будущего p -контакта:

- нанесение фоторезиста (ФР),
- поместить пластину в центрифугу, установить количество оборотов, с помощью пипетки нанести ФР,
- сушка ФР – поместить пластины в камеру установки сушки, включить заданный режим сушки, время сушки контролировать по секундомеру,
- экспонирование – поместить пластину в держатель установки совмещения и экспонирования, провести совмещение по меткам совмещения, провести экспонирование,
- проявление – загрузить пластины в кассету, опустить кассету в чашку с проявителем, выдержать заданное время, осуществить контроль проявления,
- термообработка ФР – загрузить пластины в установку, выбрать необходимое время, провести сушку пластин,
- удаление остатков ФР – поместить пластины в установку плазменной обработки, задать время обработки, провести удаление остатков ФР.

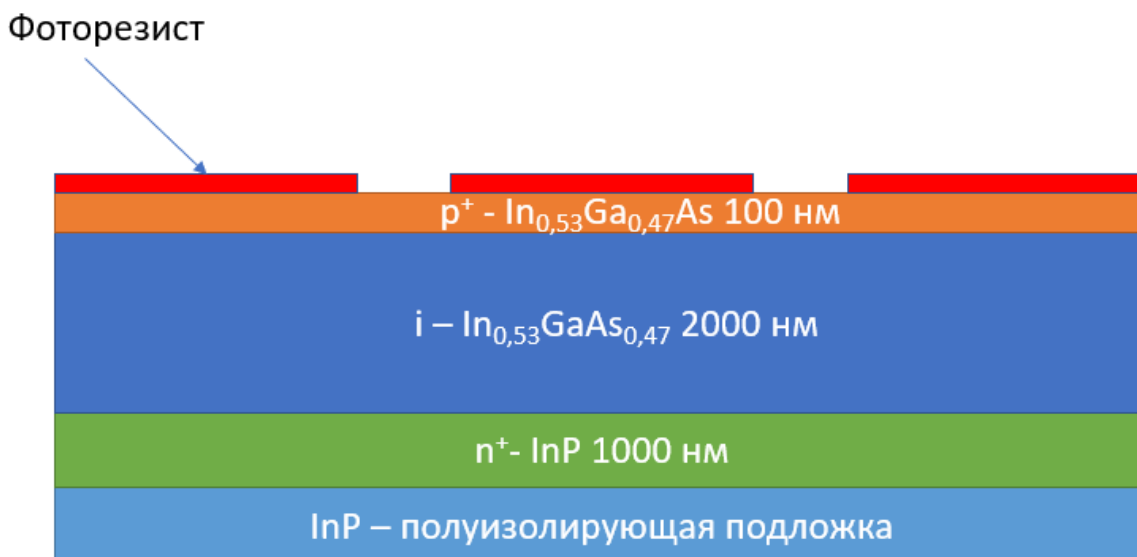


Рисунок 3.4 – Поперечное сечение гетероструктуры после фотолитографии для формирования p -контакта

3.2. Напыление металлов Ti/Pt/Au к p -слою InGaAs по Фотошаблону (ФС):

- напыление – провести загрузку навесок в установку, загрузить пластины в камеру, провести подготовку установки к процессу, провести напыление металлов толщиной $h = 0,25 \pm 0,03$ мкм,
- удаление ФР – поместить пластины в кассету, опустить кассету в чашку с раствором, выдержать заданное время, провести контроль удаления ФР, при необходимости провести дополнительную плазмохимическую очистку кислородом.

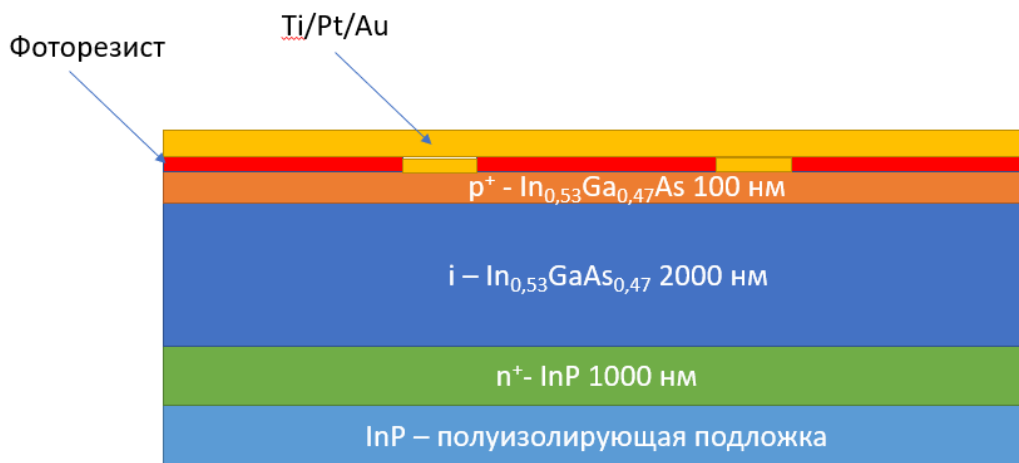


Рисунок 3.5 – Поперечное сечение гетероструктуры после напыления металлов

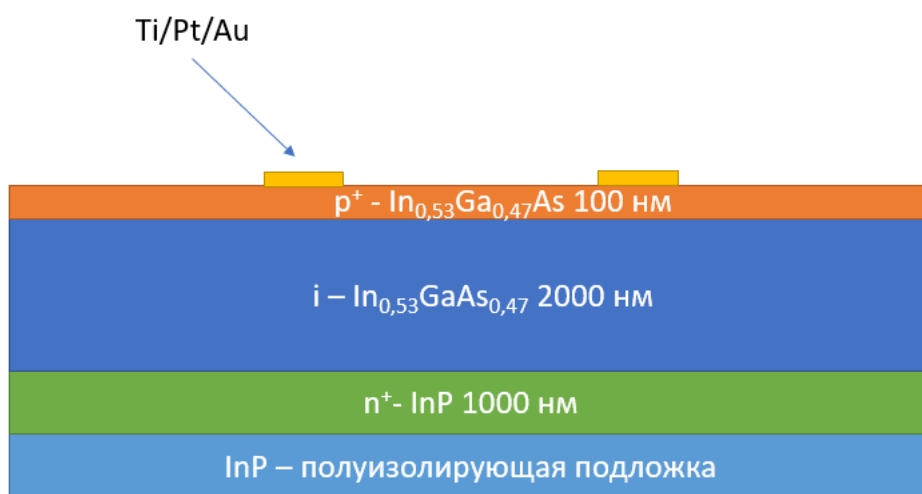


Рисунок 3.6 – Поперечное сечение гетероструктуры после удаления ФР

3.3. Фотолитография под плазмохимическое травление гетероструктуры до *n*-слоя InP. Формирование первой узкой меза-структуры.

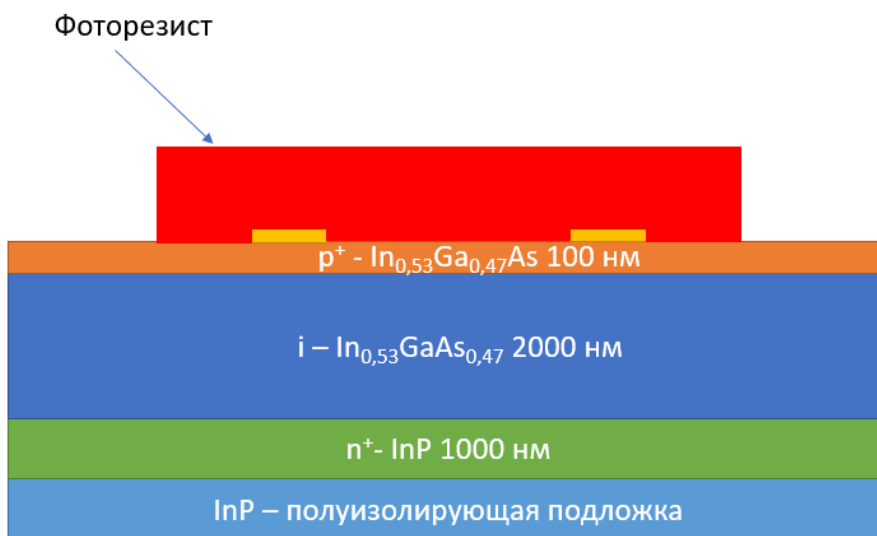


Рисунок 3.7 – Поперечное сечение гетероструктуры после фотолитографии под плазмохимическое травление до *n*-слоя InP

3.4. Плазмохимическое травление гетероструктуры (создание узкой меза-структуры):

- поместить пластины в рабочую камеру установки, выбрать режим травления, провести травление эпитаксиальных структур на заданную глубину,

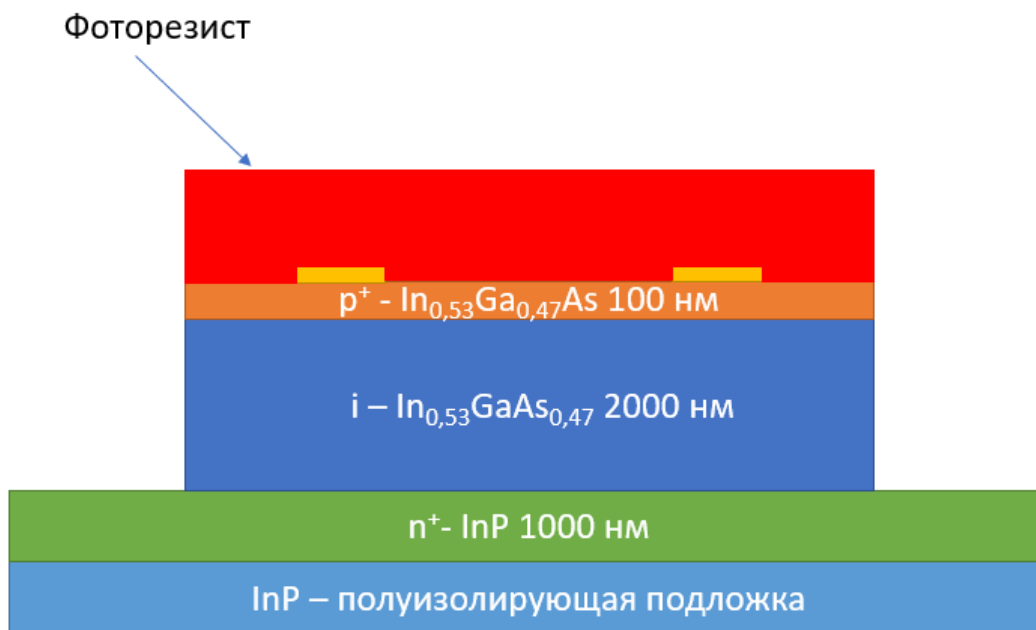


Рисунок 3.8 – Поперечное сечение гетероструктуры после операции плазмохимического травления до *n*-слоя InP

- произвести контроль глубины травления мезы на профилометре,
- удаление остатков ФР – поместить пластины в установку плазменной обработки, задать время обработки, провести удаление остатков ФР, при необходимости провести дополнительную плазмохимическую очистку кислородом.

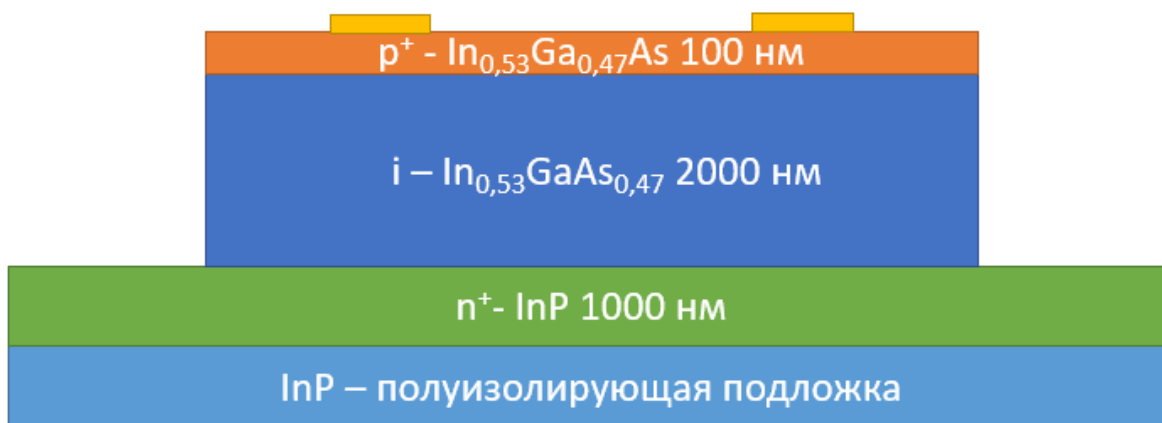


Рисунок 3.9 – Поперечное сечение гетероструктуры после удаления остатков ФР

3.5. Фотолитография под омический контакт к *n*-слою InP. Формирование будущей формы *n*-контакта.

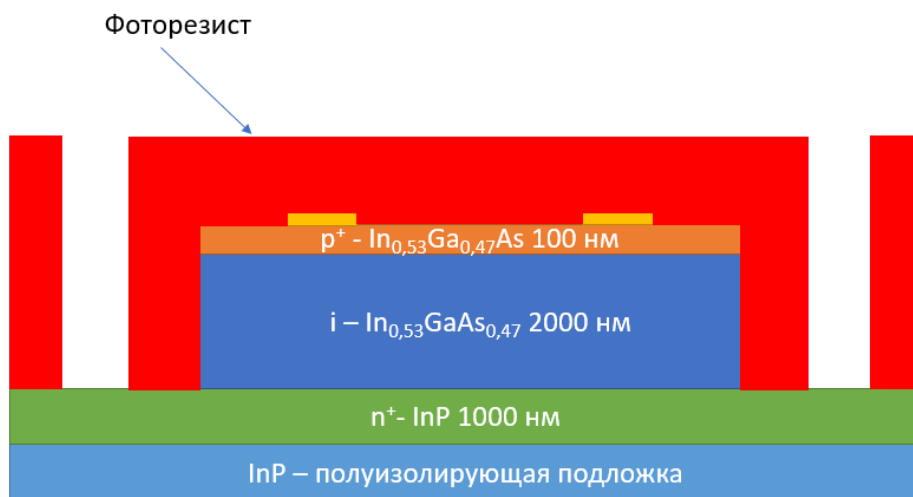


Рисунок 3.10 – Поперечное сечение гетероструктуры после фотолитографии под *n*-контакт

3.6. Напыление металлов Au/Ge/Ni/Au к *n*-слою InP по ФШ.

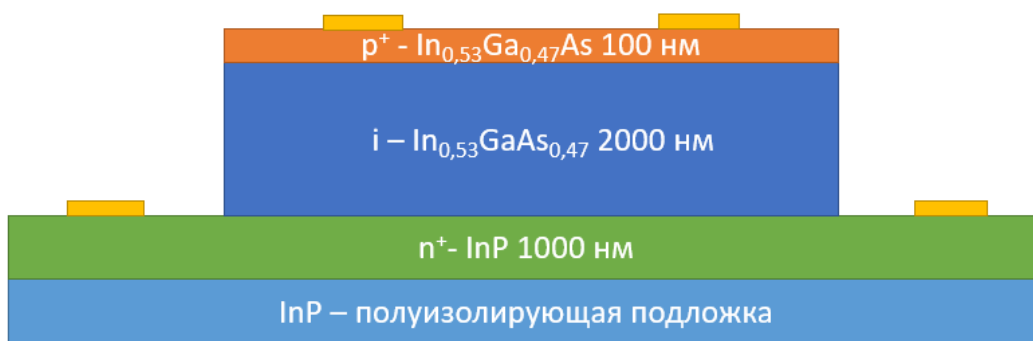


Рисунок 3.11 – Поперечное сечение гетероструктуры после напыления металлов под *n*-контакт

3.7. Фотолитография под плазмохимическое травление гетероструктуры до подложки InP. Формирование широкой меза-структуры.

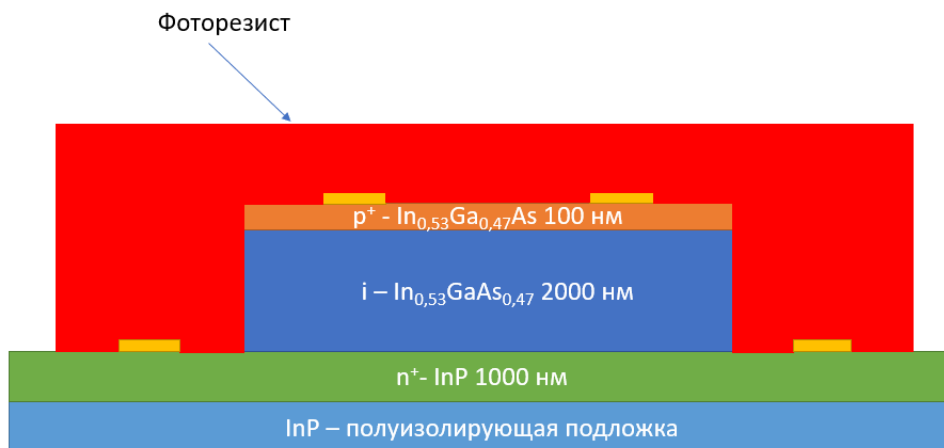


Рисунок 3.12 – Поперечное сечение гетероструктуры после фотолитографии под плазмохимическое травление до подложки InP

3.8. Плазмохимическое травление гетероструктуры (создание широкой меза-структуры).

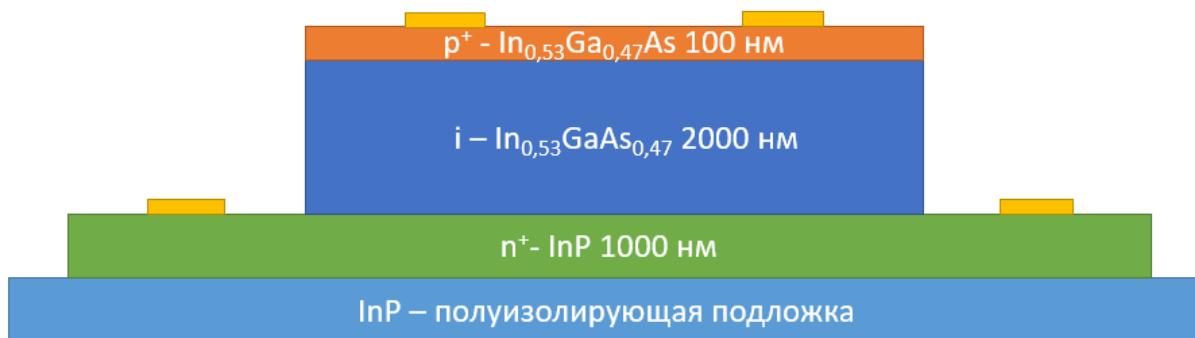


Рисунок 3.13 – Поперечное сечение гетероструктуры после плазмохимического травления

3.9. Осаждение диэлектрика SiN_x, выполняющего роль защиты и просветляющего покрытия:

- загрузить пластины в рабочую камеру установки,
- выбрать режим осаждения,
- провести процесс осаждения.

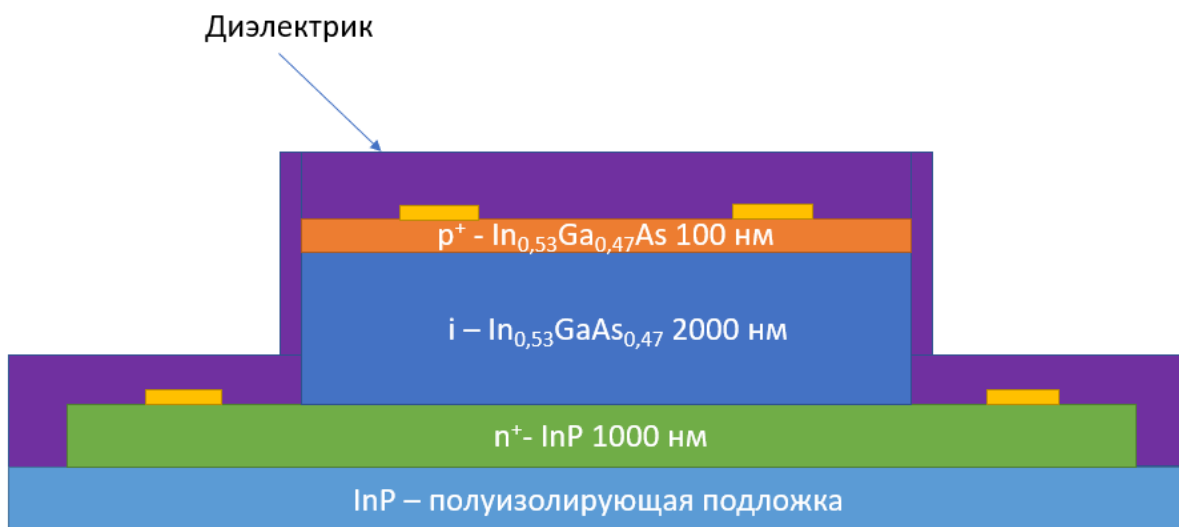


Рисунок 3.14 – Поперечное сечение гетероструктуры после осаждения диэлектрика SiN_x

3.10. Фотолитография под формирование защитной маски под травление диэлектрика SiN_x.

3.11. Плазмохимическое травление диэлектрика SiN_x.

3.12. Фотолитография под металлизацию контактных площадок.

3.13. Напыление металлов Au/Ge/Ni/Au к подложке для формирования контактных площадок методом вакуумного термического испарения.

3.14.

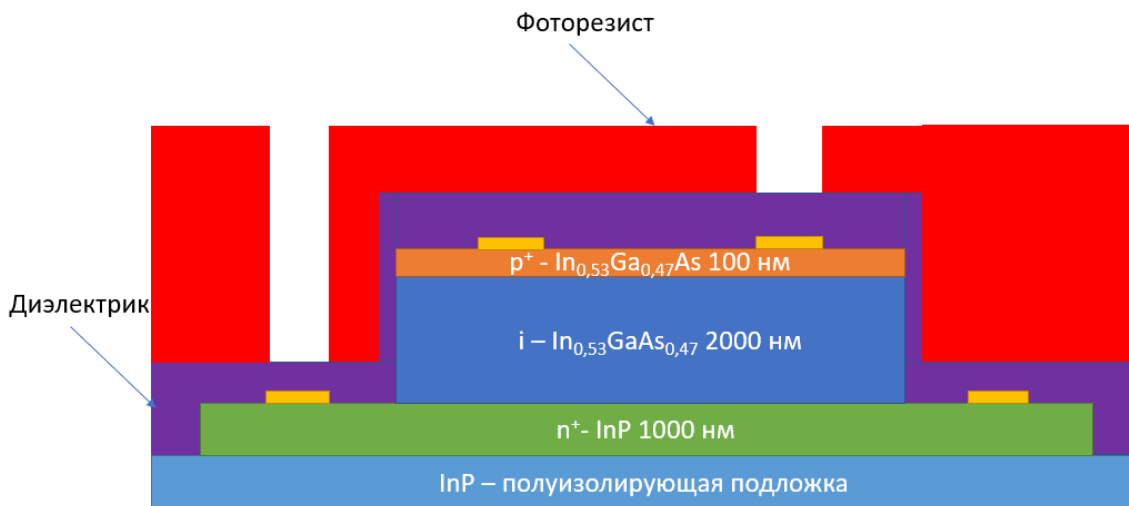


Рисунок 3.15 – Поперечное сечение гетероструктуры после фотолитографии под формирование защитной маски

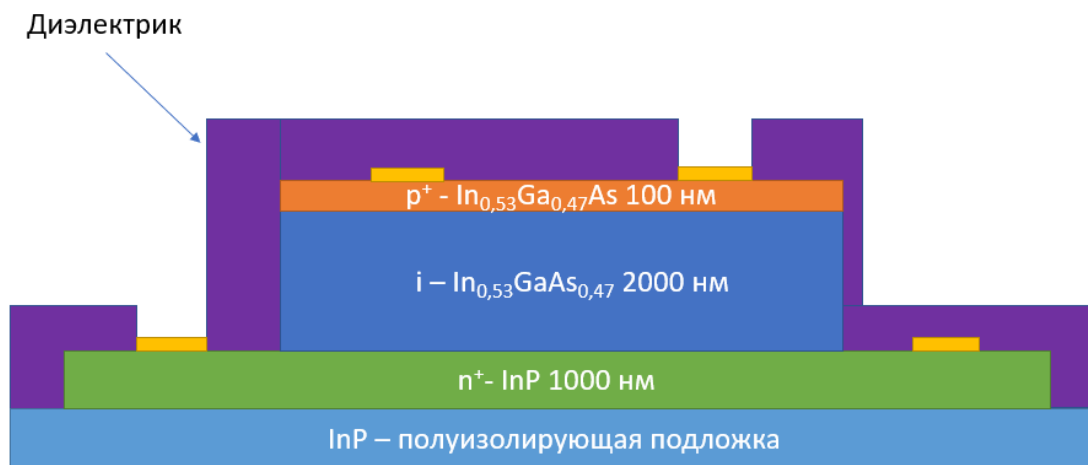


Рисунок 3.16 – Поперечное сечение гетероструктуры после травления диэлектрика SiN_x

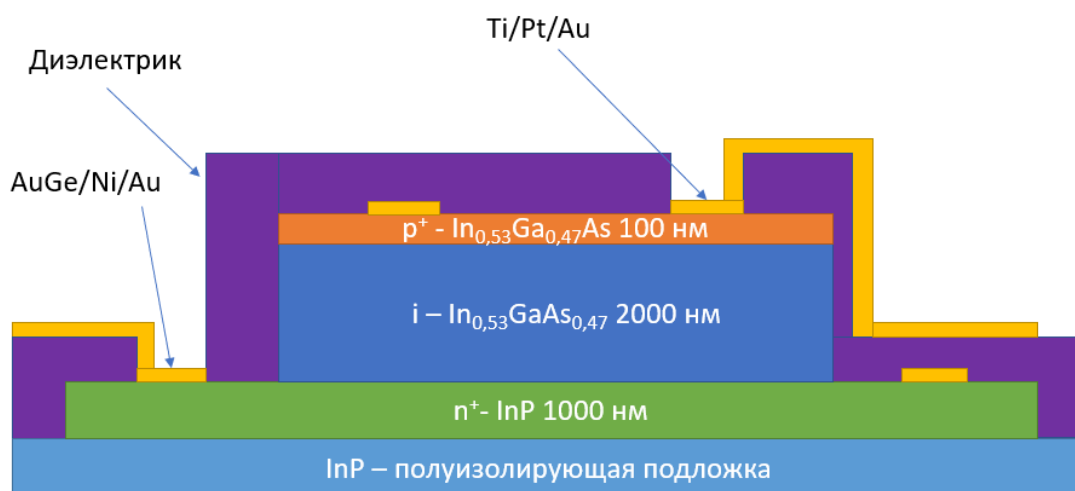


Рисунок 3.17 – Поперечное сечение гетероструктуры после напыления металлов для формирования контактных площадок

3.15. Гальваническое осаждение золота на контактные площадки по ФШ:

- гальваническое осаждение золота – закрепить пластину на электроде, опустить в раствор электролита и подать напряжение смещения на электроды,

- удаление ФР – поместить пластины в установку плазменной обработки, задать время обработки, провести удаление остатков ФР.

3.16. Утонение подложки InP и резка пластин на кристаллы с помощью установки дисковой резки.

3.17. Выборочный контроль ВАХ кристаллов. Проведение электрофизических измерений на зондовой станции.

4. Задание на лабораторную работу

Согласно номеру своего индивидуального задания (Таблица Б.1 Приложения Б) и расчетам формы и параметров контактов, проведенным в Лабораторной работе №2 «Расчет параметров кристалла оптоэлектронного прибора», проанализировать и определить конструкцию кристалла. На основании выбранных конструктивных решений описать технологический маршрут изготовления кристалла оптоэлектронного прибора. В отчете должно быть представлено поэтапное описание технологического маршрута с приведенными схематическими изображениями кристалла после каждого этапа.

5. Содержание отчета

Форма отчета должна соответствовать предъявляемым в Приложении А требованиям к отчету.

6. Контрольные вопросы

6.1. Процесс производства кристаллов в общем виде

6.2. Фоторезист и основные этапы фотолитографии

6.3. Виды травления

6.4. Процесс осаждения диэлектрических слоев

6.5. Технологии нанесения металлизации

6.6. Последовательность основных технологических операций

Лабораторная работа № 4 «Фотолитография»

1. Цель

Получение и применение знаний о процессе фотолитографии и формированию фотолитографических шаблонов в зависимости от геометрических параметров кристалла оптоэлектронного компонента с использованием САПР «Klayout».

2. Теоретические сведения

Литография в зависимости от длины волны подразделяется на:

- оптическую (фотолитографию),
- рентгеновскую (0,1–10 нм),
- электронную (0,1 нм),
- ионную литографию (0,1–0,5 нм).

В свою очередь, фотолитографию можно разделить на:

- ближнее ультрафиолетовое излучение (360–450 нм),
- среднее ультрафиолетовое излучение (300–360 нм),
- дальнее ультрафиолетовое излучение (100–300 нм),
- экстремальное ультрафиолетовое излучение (< 100 нм, типичное значение 13,5 нм).

В свою очередь, фотолитографию можно разделить на:

В зависимости от длины волны возможно получение элементов топологии в размерах от 0,045 мкм (для дальнего УФ) до 0,5 мкм (для ближнего УФ). На рисунке 4.1 представлена схема процесса фотолитографии и травления слоя диэлектрика по маске из фоторезиста, аналогично которой может проводиться травление слоев гетероструктуры.

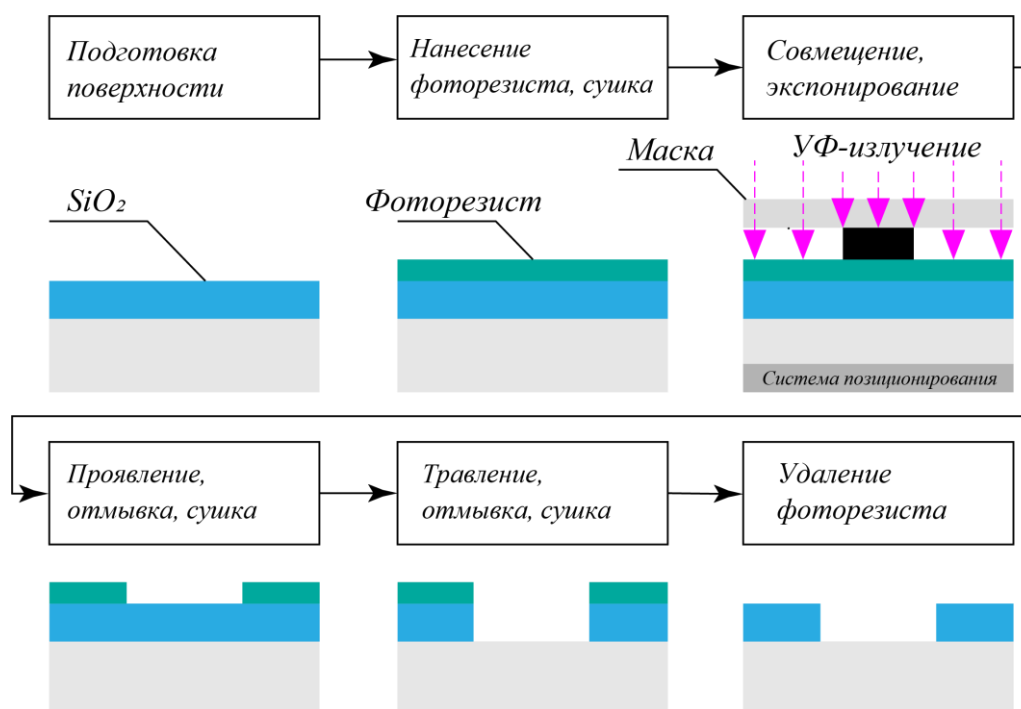


Рисунок 4.1 – Технологический процесс фотолитографии и травления диэлектрика (адаптировано с [11])

Рассмотрим основные термины, связанные с технологическим процессом фотолитографии:

- фотолитография – формирование конфигурации заданных элементов на поверхности подложки с помощью покрытий, чувствительных к УФ излучению,
- топология – чертеж расположенных элементов с указанием их размеров,
- фотошаблон – пластина/пленка с элементами топологии из материала, не пропускающего актиничное излучение,
- рабочий фотошаблон – фотошаблон для экспонирования фоторезиста с подложки,
- эталонный фотошаблон – фотошаблон для экспонирования фоторезиста с рабочего фотошаблона (при его создании),
- негативный фотошаблон – фотошаблон с темными элементами топологии в виде светлых элементов, светлыми элементами топологии в виде темных элементов,
- позитивный фотошаблон – фотошаблон с темными элементами топологии в виде темных элементов, светлыми элементами топологии в виде светлых элементов,
- подложка – деталь, на которой формируется топология,
- фоторезист – светочувствительный материал, свойства которого зависят от актиничного излучения,
- актиничное излучение – излучение, вызывающее протекание фотохимических реакций и изменение растворимости облученных участков,
- экспонирование – облучение актиничным излучением через фотошаблон фоторезиста на подложке,
- проявление фоторезиста – удаление облученных/необлученных участков фоторезиста для создания рельефного изображения обрабатываемого материала,
- травление – удаление слоев материала подложки/материала покрытия на подложке на участках без фоторезиста.

Создание топологии для фотошаблонов и последующей фотолитографии осуществляется с использованием САПР «Klayout».

2.1. Основные инструменты программы

Инструмент «Polygon»: позволяет создавать замкнутые многоугольники. Вершины привязываются к узлам сетки. При каждом нажатии левой кнопки мыши происходит фиксация очередной вершины. Чтобы закончить полигон, необходимо замкнуть контур и дважды нажать левой кнопкой мыши по начальной точке. Дважды нажав левой кнопкой мыши на получившуюся фигуру, вызывается окно параметров со всеми точками данного полигона и их координатами, которые можно отредактировать.

Инструмент «Box»: позволяет создавать прямоугольники произвольных размеров. Вершины привязываются к узлам сетки. Выбрав этот инструмент,

необходимо указать вершину прямоугольника, после, перемещая курсор, указать диагональную вершину. Дважды нажав левой кнопкой мыши на получившийся четырехугольник, вызывается окно параметров, в котором можно точно задать необходимые размеры сторон, а также координаты центра четырехугольника, или полностью построить его по координатам всех углов.

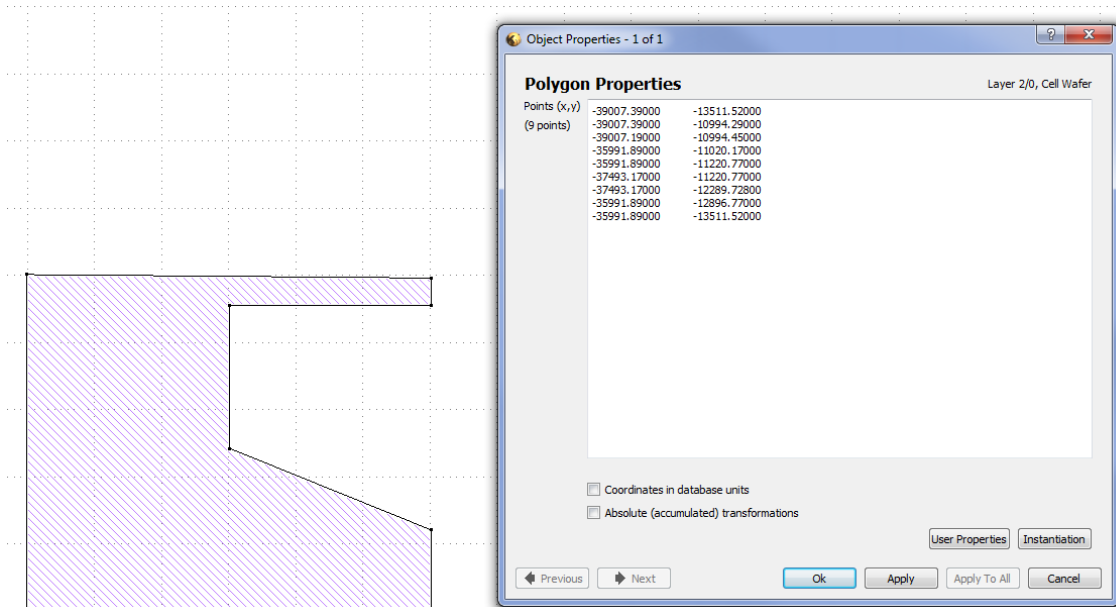


Рисунок 4.2 – Пример использования инструмента «Polygon» и окно параметров

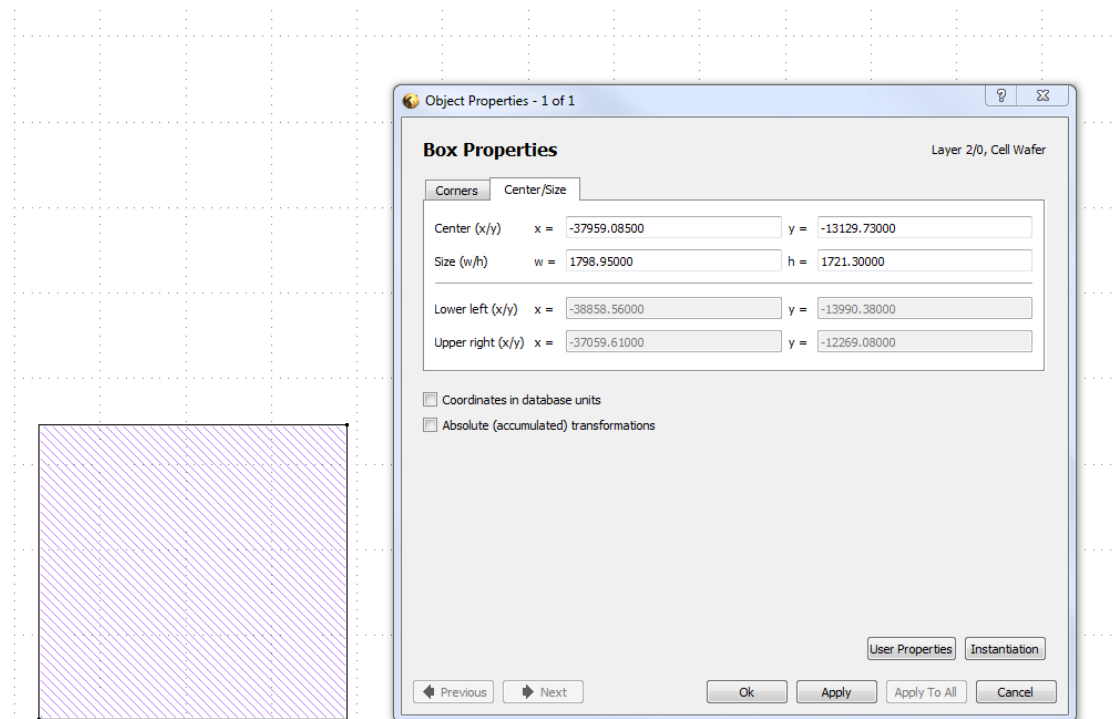


Рисунок 4.3 – Пример использования инструмента «Box» и окно параметров

Инструмент «Text»: выбрав «Text» на панели инструментов, открывается диалоговое окно параметров редактора, которое дополнительно запросит

текстовую строку. Чтобы нарисовать текст, необходимо переместить указатель мыши в нужное место и щёлкнуть левой кнопкой мыши, чтобы поместить его на чертеж топологии. Чтобы повернуть текст во время его размещения, нужно щёлкнуть правой кнопкой мыши. Это повернет текст на 90 градусов против часовой стрелки. Элемент «Text» не отображается на топологии, а используется для пояснений и заметок. Чтобы вывести текст непосредственно в топологию, необходимо создать отдельную ячейку, в ней создать элемент «Text» с необходимым содержанием и конвертировать эту ячейку в ячейку типа «Text».

Инструмент «Path»: позволяет создавать шины. Требуется ввода ширины шины и выбора типа концов (квадратный или скруглённый). Геометрия шины задаётся курсором на рабочем поле. Также в дальнейшем возможно воспользоваться функцией скругления углов шины, чтобы избавиться от острых углов на топологии. При использовании инструмента вызывается диалоговое окно, в котором задаются его параметры, а именно толщина шины и ее тип. Аналогично инструменту «Polygon» при двойном нажатии на шину все построенные точки можно отредактировать по координатам.

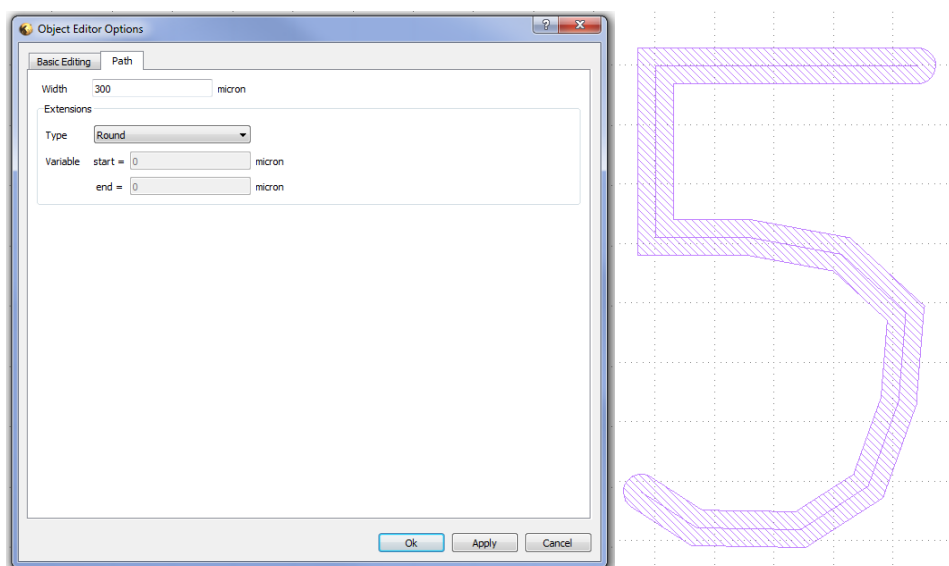


Рисунок 4.4 – Пример использования инструмента «Path» и окно параметров

Инструмент «Instance»: при выборе режима «Instance» на панели инструментов откроется диалоговое окно параметров редактора, которое дополнительно предложит некоторые параметры экземпляра. Самой важной, конечно же, является ячейка, которая должна быть размещена. Геометрически можно указать угол поворота, можно установить параметр зеркала, и экземпляр может быть указан как обычный массив. В качестве массива экземпляр представляет собой несколько мест размещения ячейки, расположенных в регулярной сетке, которая задаётся двумя векторами оси и количеством экземпляров в каждом направлении. В рамках выполнения лабораторной работы данный инструмент удобен для оптимального размещения массива однообразных кристаллов светодиодов на подложке с определенным размером ширины реза между кристаллами.

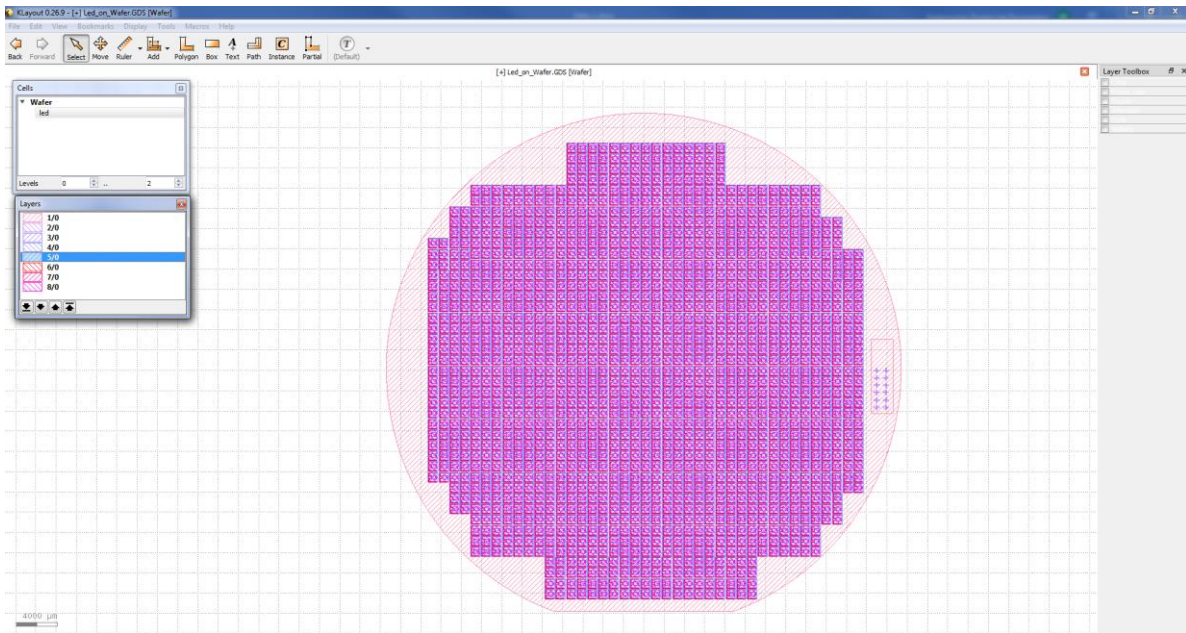


Рисунок 4.5 – Пример использования инструмента «Instance» для размещения матрицы кристаллов светодиодов на подложке

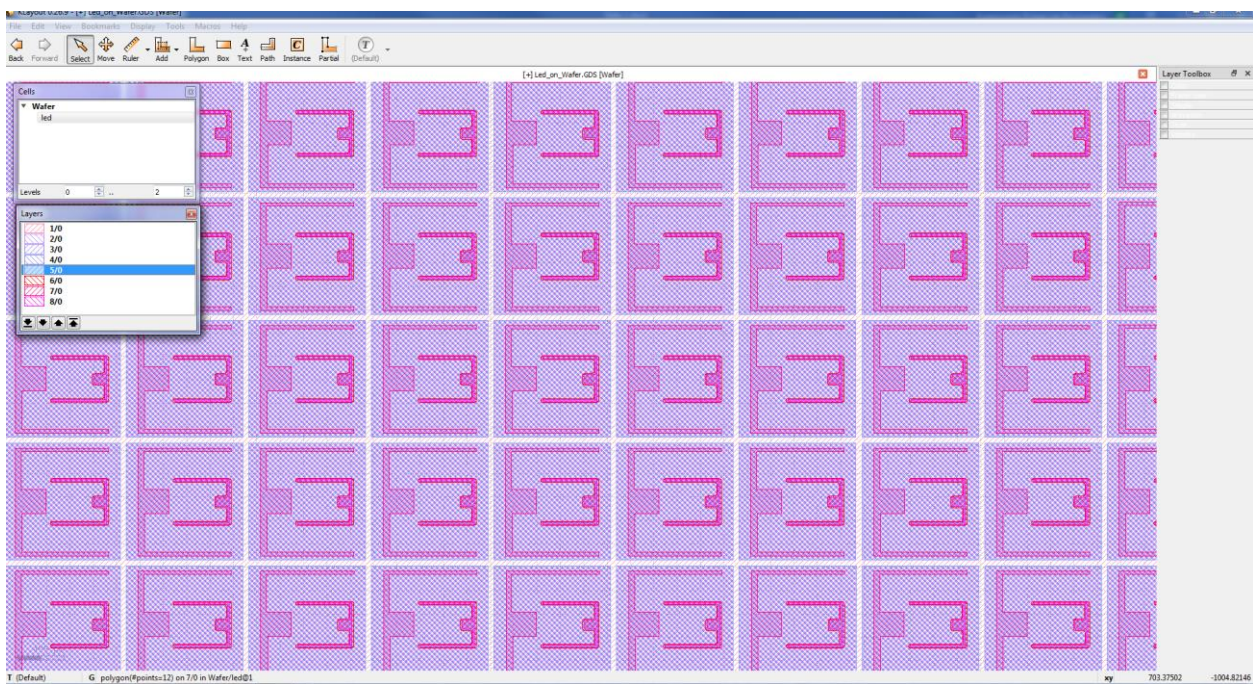


Рисунок 4.6 – Пример использования инструмента «Instance» для размещения матрицы кристаллов светодиодов на подложке (приближенный вид)

3. Практическая часть

Необходимо построить массив кристаллов, включающий в себя метки совмещения для формирования оригинала. Оригинал – рисунок ячейки фотошаблона, изготавливаемый на прозрачной подложке для многократного переноса в процессе фотолитографии на пластину. Оригинал изготавливается на прозрачной подложке (стекле или полимерной пленке) способом подрезки эмалевого или другого покрытия резцом. Участки покрытия, прорезанные резцом по контуру, удаляются механическим способом. Для изготовления

оригинала применяют установки – координатографы, позволяющие обеспечить высокую точность вырезания. Оригинал фотографическим методом уменьшается до размера, в десять раз превышающего размер стеклянной заготовки. Окончательный шаблон изготавливают из десятикратно увеличенной заготовки с использованием системы фоторедуцирования, которая уменьшает изображение до масштаба 1:1. С помощью этой системы происходит экспонирование элементов на последнем фоточувствительном стеклянном шаблоне, механическое удаление соседних полос с неоднократным повторением операций. Каждый элемент содержит полную топологию схемы, соответствующую уровню шаблона. Как все идентичные кристаллы расположены на шаблоне, так они будут воспроизведены и на полупроводниковой или диэлектрической пластине.

В данной лабораторной работе будем считать, что массив, необходимый для оригинала, включает в себя набор кристаллов с конфигурацией 6 x 6 и метки совмещения. Пример такого массива изображен на рисунке 4.7. Необходимо обратить внимание, что в таком массиве обязательно должны быть кристаллы одного вида.

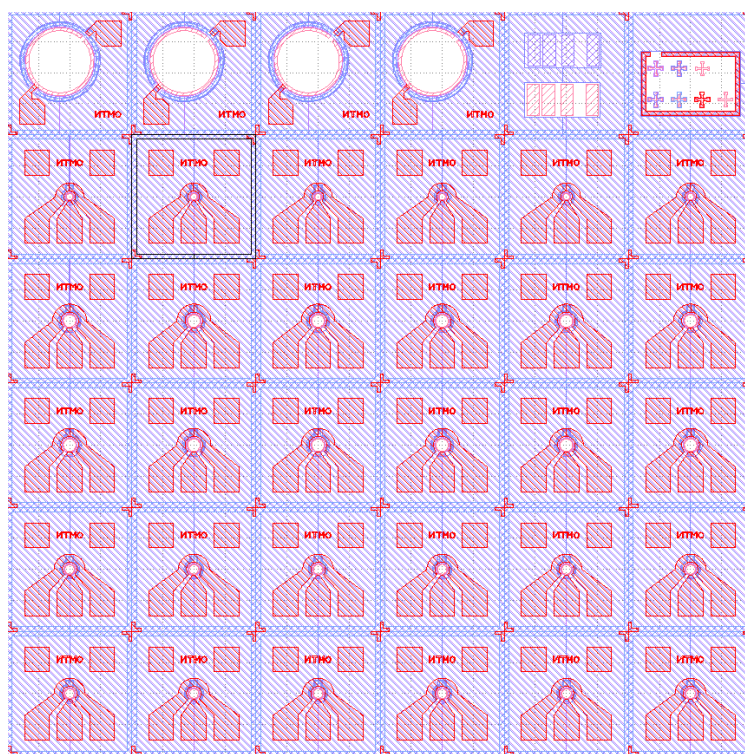


Рисунок 4.7 – Массив кристаллов фотодиодов, необходимый для оригинала

4. Порядок выполнения работы

Для того, чтобы спроектировать образ массива для оригинала в программе «Klayout», необходимо выполнить следующие действия:

- 4.1. Открыть программу «Klayout» (Editor) на вашем компьютере.
- 4.2. Открыть файл проделанной Лабораторной работы № 1. Для этого в левом верхнем углу во вкладке «File» щелкнуть левой кнопкой мыши на вкладку «Open» и из директории выбрать файл Surname_№group_Lab1.

4.3. Сохранить данный файл под новым названием Surname_№group_Lab3. Тип файла All layout files.

4.4. Переходим к работе с ячейкой LED (название ячейки можно изменить в зависимости от оптоэлектронного прибора, указанного в индивидуальном задании) нажатием на нее в окне «Cells» средней кнопкой мыши. При этом если вкладка «Cells» не отображается, ее можно открыть при помощи вкладки «View» → «Cells». После этого во вкладке «View» появится знак «v», означающий, что окно ячеек активно и находится на главном экране программы.

4.5. По данным геометрических размеров кристалла необходимо построить первый слой гетероструктуры, соответствующий слою, приходящемуся на всю поверхность кристалла светодиода. В большинстве случаев для этого шага используется буферный слой. Из индивидуального задания выбираем слой, который послужит такой основой. Из списка в окне Layers выбираем данный слой нажатием на него левой кнопкой мыши, после чего на верхней панели инструментов выбираем инструмент «Box».

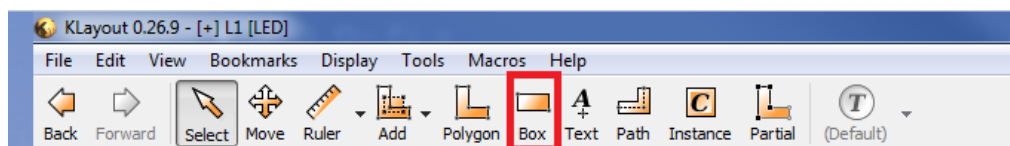


Рисунок 4.8 – Панель инструментов

На рабочей поверхности в любой точке пространства кликаем левой кнопкой мыши. Если потянуть курсор в любую сторону, за курсором будет тянуться образ будущего прямоугольника данного слоя. Для удобства работы проще всего сделать прямоугольник произвольной формы дынным инструментом. Для этого, потянув курсор в любую сторону, нажать левую кнопку мыши еще раз. В результате появится фигура прямоугольника, соответствующая данному слою.

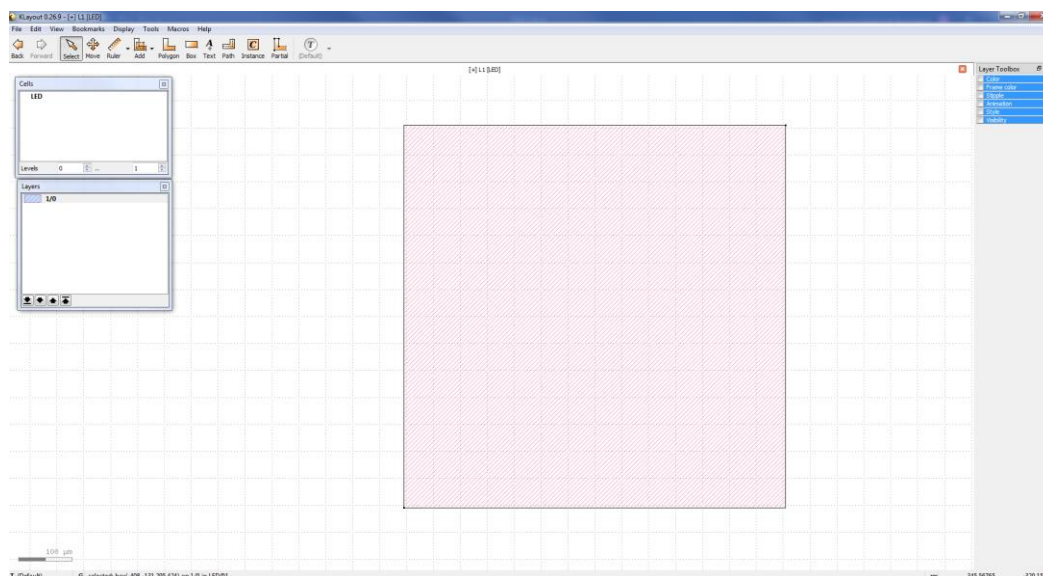


Рисунок 4.9 – Фигура прямоугольника, полученная инструментом «Box»

4.6. Переключившись на инструмент «Select» и дважды нажав левой кнопкой мыши на данный прямоугольник, вызываем всплывающее окно «Object properties». В окне мы можем настроить полученную фигуру под необходимые параметры. По умолчанию размеры в САПР «KLayout» задаются в микронах. Для настройки построенного прямоугольника под параметры 0,71 x 0,71 мм выбираем вкладку «Center/Size» в окне «Object properties». В параметрах «Center» задаем $x = 0$, $y = 0$. Это означает, что центр объекта находится в координатах рабочей области (0;0). Размеры ширины и длины слоя задаем в параметрах «Size»: $w = 710$, $h = 710$. Нажав кнопку «Apply», можно посмотреть, как изменился прямоугольник после введения новых данных и, при необходимости, скорректировать значения. Если все верно, нажимаем кнопку «ОК».

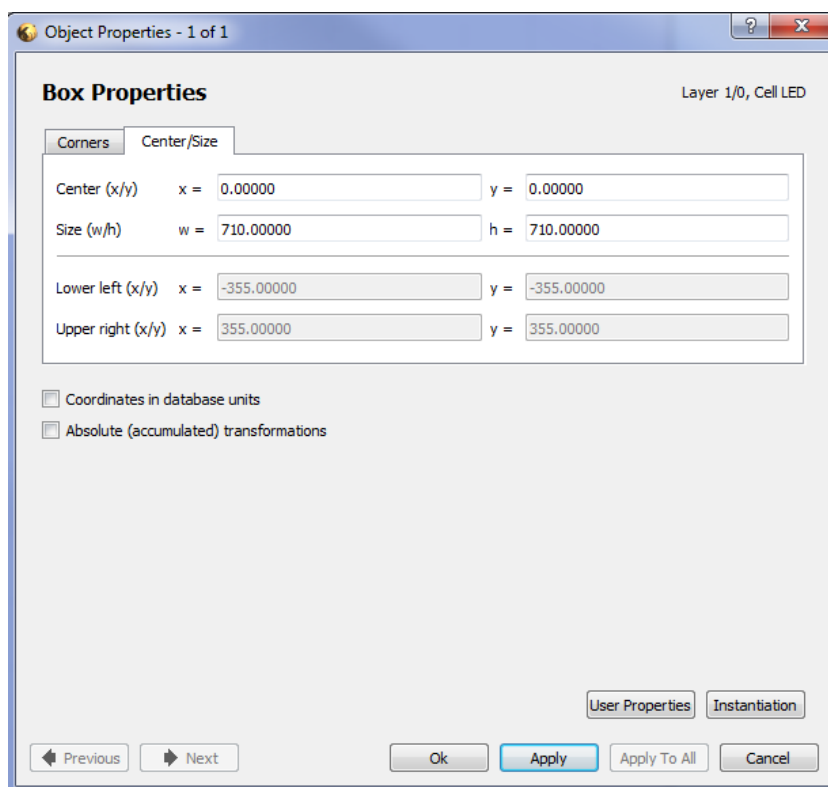


Рисунок 4.10 – Окно настройки полученной фигуры инструментом «Box»

4.7. На следующем шаге необходимо воспользоваться инструментом «Instance». Данный инструмент служит для создания массива кристаллов светодиода. Возьмем идею формирования массива кристаллов 6 на 5 с метками совмещения в своем составе (пример: рисунок 4.7). Для получения данного массива необходимо перейти в ячейку «Simple Cell», нажав на нее средней кнопкой мыши. Далее в окне инструментов находим инструмент «Instance» и нажимаем на него левой кнопкой мыши. В появившемся окне «Object editor options» происходит настройка массива, который будет получен в данной ячейке и связан с ячейкой «LED» таким образом, что все изменения, происходящие с ячейкой «LED», также будут отражаться на каждом элементе в ячейке «Simple

Cell». На данном этапе необходимо сохранить все проделанные шаги «File» → «Save».

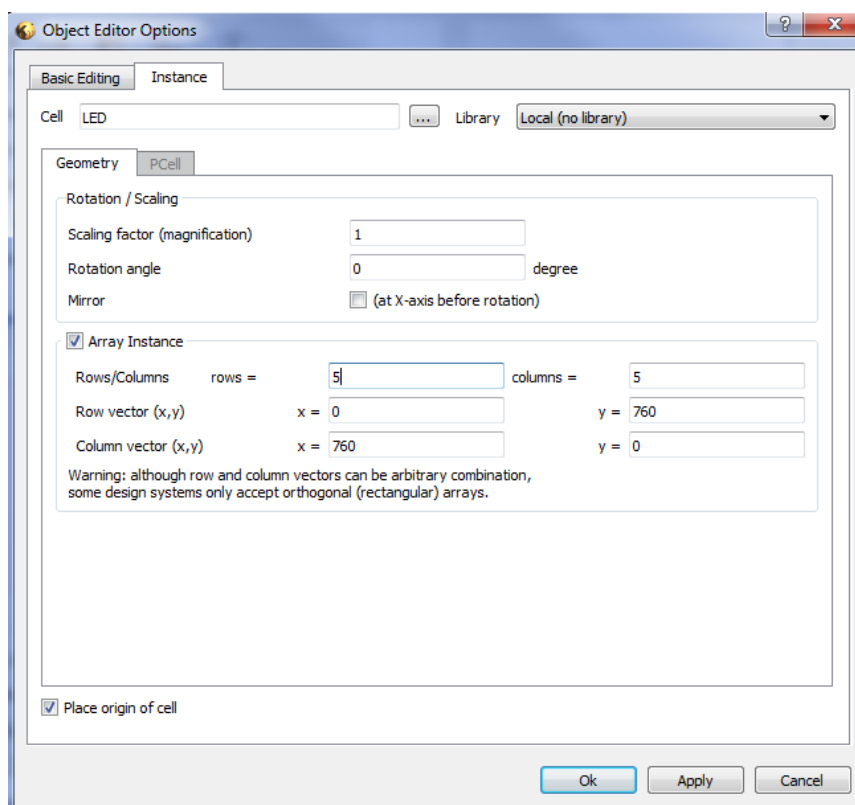


Рисунок 4.11 – Окно настройки массива с помощью инструмента «Instance»

Настройка массива происходит следующим образом:

а) во вкладке «Cell» выбираем ячейку LED, которую будем превращать в массив в ячейке «Simple Cell»,

б) во вкладке «Rows/Columns» настраиваем количество строк и столбцов массива соответственно. В данном случае для начала требуется сделать массив 5 x 5,

в) во вкладках «Row vector» и «Column vector» настраиваются размеры, по которым будет строиться массив. Необходимо для вектора строк по оси «X» задать 0, а по оси «Y» величину: $a + 50$ мкм, где a – величина стороны кристалла, полученная при выполнении лабораторной работы 2. Величина 50 мкм закладывается на величину дорожек реза, по которым кристалл в будущем будет нарезан для последующего корпусирования;

г) если все сделано верно нажимаем кнопку ОК и на экране при движении мышкой за ней будет тянуться образ будущего массива. Нажимаем левой кнопкой мыши на пустое рабочее пространство и получаем необходимый массив 5 x 5 (Рисунок 4.12).

4.8. Необходимо проделать операции, описанные в пункте 4.7, для получения массива 1 x 4, чтобы оставить место для одного кристалла, на котором будут размещены метки совмещения для процесса фотолитографии (Рисунок 4.13).

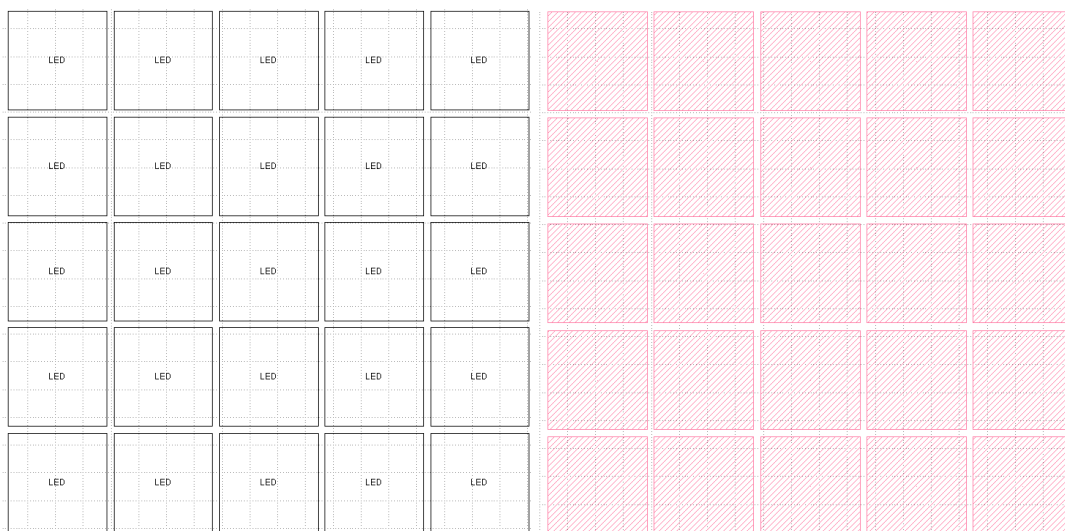


Рисунок 4.12 – Массив ячеек LED 5 на 5 в формате скрытых слоев (слева) и послойном (справа)

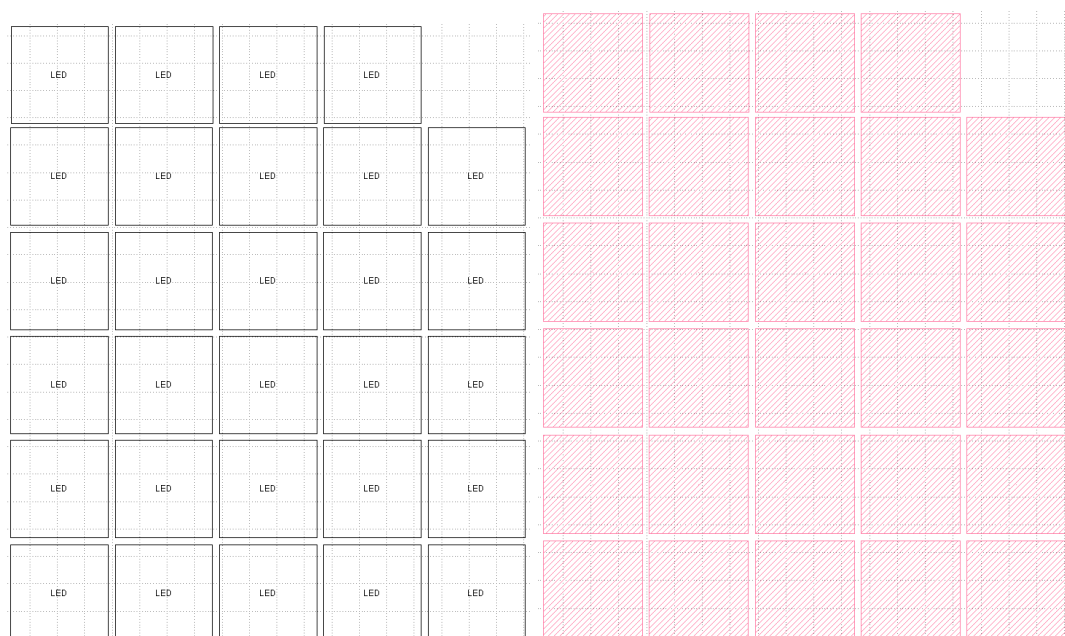


Рисунок 4.13 – Массив ячеек LED 5 на 5 и 1 на 4 в формате скрытых слоев (слева) и послойном (справа)

4.9. Поскольку после проведения манипуляций с инструментом «Instance» ячейки становятся связаны, при удалении элементов в любой ячейке они также удалятся и в исходной. Поэтому в случае, если были сделаны какие-либо ошибки при проведении пункта 4.7 или 4.8, проще всего загрузить версию лабораторной работы, которая была сохранена в начале пункта 4.7, и проделать пункты 4.7 и 4.8 заново.

4.10. На следующем шаге необходимо сделать метки совмещения. Для этого создаем новую ячейку с названием «Marks». Создаем по аналогии слой, такой же как в ячейке LED. Выбираем любой другой слой, по которому будем делать метку совмещения на буферном слое, нажатием на этот слой в окне «Layers» левой кнопкой мыши.

4.11. В данной работе будем считать, что метка имеет форму креста с размерами 1/10 от стороны кристалла. Ее можно создать двумя способами:

а) с помощью инструмента «Polygon» построить примерный массив точек, чтобы получилась нужная форма, а после в параметрах фигуры по размерам и координатам подстроить каждую точку таким образом, чтобы получить необходимую по размерам фигуру в нужном месте;

б) построить крест в виде двух прямоугольников с помощью инструмента «Box». В параметрах выставить центры фигур в одной точке. Зажав кнопку «Shift», выделить два прямоугольника и перенести их в пустую рабочую область на белый фон. Далее, зажав левую кнопку мыши, снова выделить два прямоугольника, потянув мышь так, чтобы они оказались внутри выделенной области. В окне «Edit» выбираем «Selection» → «Separate – First into Inside/Outside others». В результате получаем фигуру, аналогичную методу а).

Можно потренироваться с шестью прямоугольниками, чтобы получить более сложную метку, которая используется в реальных работах (Рисунок 4.14).

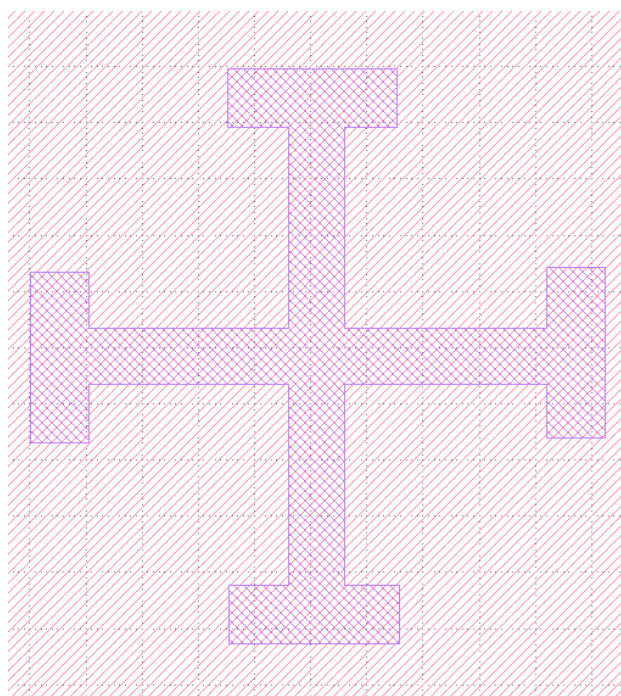


Рисунок 4.14 – Спроектированная метка совмещения

4.12. Переносим полученную метку на необходимую область кристалла (в данной лабораторной работе это любая область на поверхности кристалла).

4.13. Проводим моделирование данного кристалла с меткой на оставшееся место в элементарной ячейке инструментом «Instance», аналогично пункту 4.7, с условием того, что в массиве один элемент (одна строка, один столбец). В результате получаем образ необходимого массива кристаллов в элементарной ячейке (Рисунок 4.15).

4.14. Повторяем пункты 4.11–4.13 для создания необходимого количества меток совмещения в зависимости от количества слоев гетероструктуры оптоэлектронного прибора в индивидуальном задании.

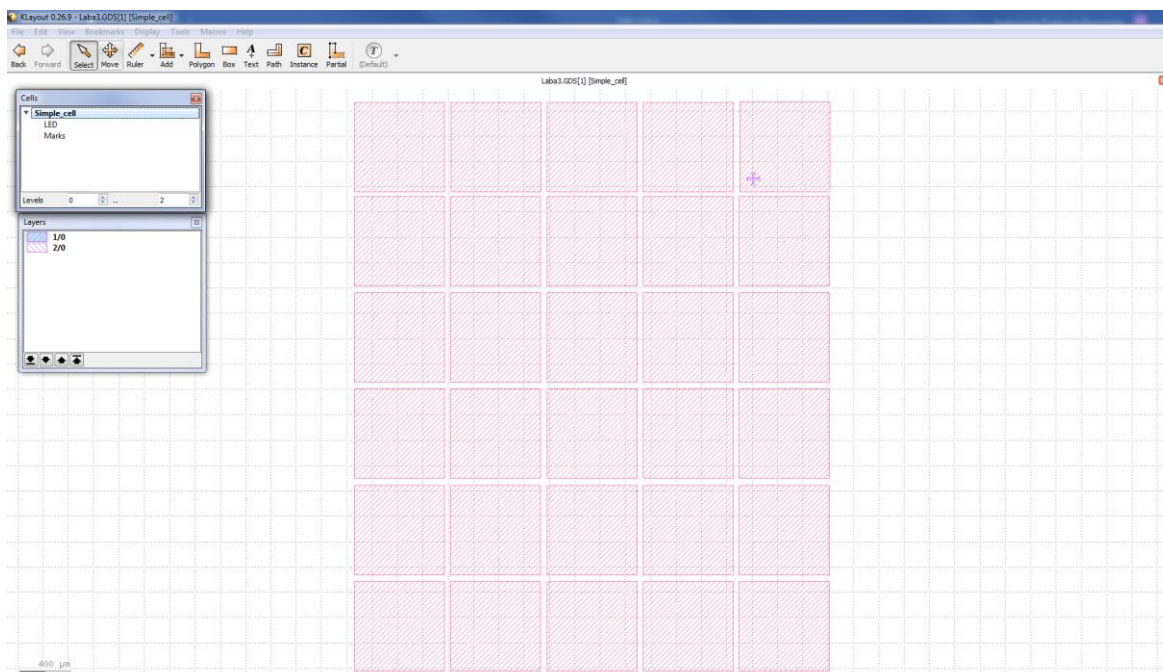


Рисунок 4.15 – Результат построения массива кристаллов в элементарной ячейке с меткой совмещения и дорожками реза кристаллов

4.15. Переходим на режим работы с ячейкой «LED» и для каждого из описанных слоев гетероструктуры оптоэлектронного прибора, используя набор инструментов САПР «Klayout», проектируем необходимые фотолитографические шаблоны для каждого технологического этапа операции фотолитографии. При этом необходимо не забывать в ячейке Marks на метках совмещения для буферного слоя (изначальные метки) создавать метки совмещения каждого последующего слоя на отдельной буферной метке, с которыми они будут совмещаться во время изготовления кристаллов (Рисунок 4.16). Как правило, геометрические размеры меток совмещения каждого формируемого слоя больше изначальных меток на 1–2 мкм.

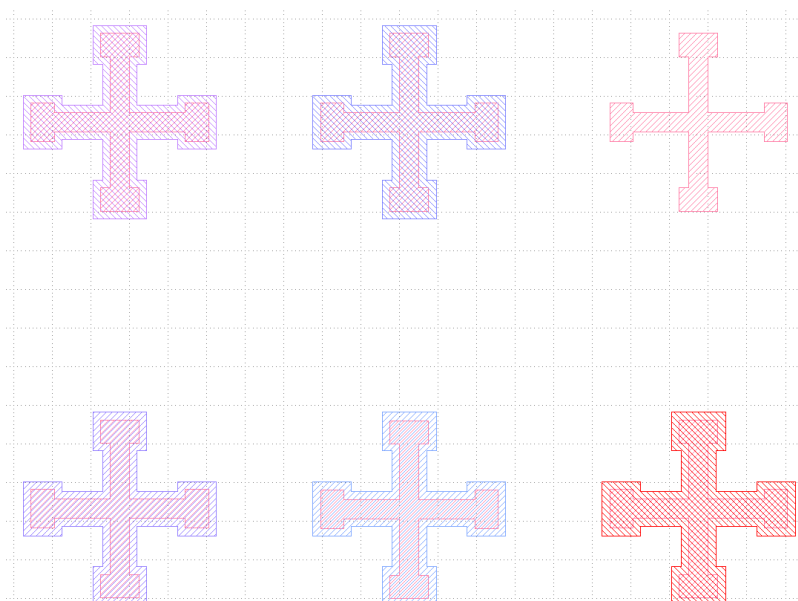


Рисунок 4.16 – Результат построения меток совмещения в элементарной ячейке

5. Задание на лабораторную работу

При помощи САПР «Klayout» необходимо спроектировать комплект фотолитографических шаблонов для описанного в Лабораторной работе №3 «Технологический маршрут изготовления кристалла» технологического маршрута оптоэлектронного прибора по вариантам. В отчете необходимо представить фотолитографический шаблон для каждой операции, а также общий вид оригинала и единичного кристалла оптоэлектронного прибора согласно индивидуальному заданию (Таблица Б.1 Приложения Б).

6. Содержание отчета

Форма отчета должна соответствовать предъявляемым в Приложении А требованиям к отчету.

7. Контрольные вопросы

- 7.1.** Фотолитография как технологический процесс.
- 7.2.** Виды фотолитографии.
- 7.3.** Основные понятия операции фотолитографии.
- 7.4.** Виды фоторезистов.
- 7.5.** Метки совмещения.

Лабораторная работа № 5 «Оптоэлектронный модуль»

1. Цель

Практическое применение полученных знаний по выбору конструктивных решений оптоэлектронного компонента для кристалла с заданными характеристиками.

2. Теоретические сведения

Корпусирование кристалла является одним из завершающих стадий производства оптоэлектронного модуля, по итогам которого кристалл устанавливается в корпус – конструкцию, часто герметичную, предназначенную как для защиты кристалла от внешних воздействий, так и для соединения (разварки) кристалла с электрическими выводами внешней цепи. Выбор типа корпуса зависит от назначения оптоэлектронного модуля и характеристик кристалла. Корпусирование в общем виде состоит из следующих последовательных шагов:

- крепление кристалла в корпусе,
- соединение контактных площадок кристалла и электрических выводов корпуса,
- герметизация корпуса.

2.1. Светодиод

Для светодиодов выбор корпуса, помимо защиты кристалла, связан с обеспечением постоянной яркости свечения, учитывая электрические и оптические параметры модуля, сферы применения и способов рассеивания тепла. Рассмотрим основные типы корпусов светодиодов (Рисунок 5.1) [12]:

- Lamp-LED представляет собой кристалл, совмещенный с двумя выводами, герметизированный за счет помещения в жидкую эпоксидную смолу с последующей сушкой (Рисунок 5.1а),
- SMD-LED представляет собой сверхъяркий светодиод, закрепленный на поверхности печатной платы за счет технологии поверхностного монтажа, верхние контакты которого развариваются посредством пайки. Данный корпус имеет отражатель, не связан с использованием тяжелой углеродистой стали, требует меньшего количества эпоксидной смолы и обладает меньшим весом, сравнительно с Lamp-LED (Рисунок 5.1б),
- Side-LED представляет собой корпус светодиода для обеспечения бокового свечения аналогичной интенсивности свечению на поверхности, что находит применение в жидкокристаллических дисплеях (Рисунок 5.1в),
- Flip Chip-LED представляет собой корпус с отверстиями в базовой плате, в каждом из которых имеется проводящий материал. Кристалл размещается на плате без корпуса, контактные площадки кристалла совмещаются с проводящим материалом посредством пайки, после чего

кристалл, либо массив кристаллов, закрепляется прозрачным клеем и покрывается люминофором (Рисунок 5.1г).

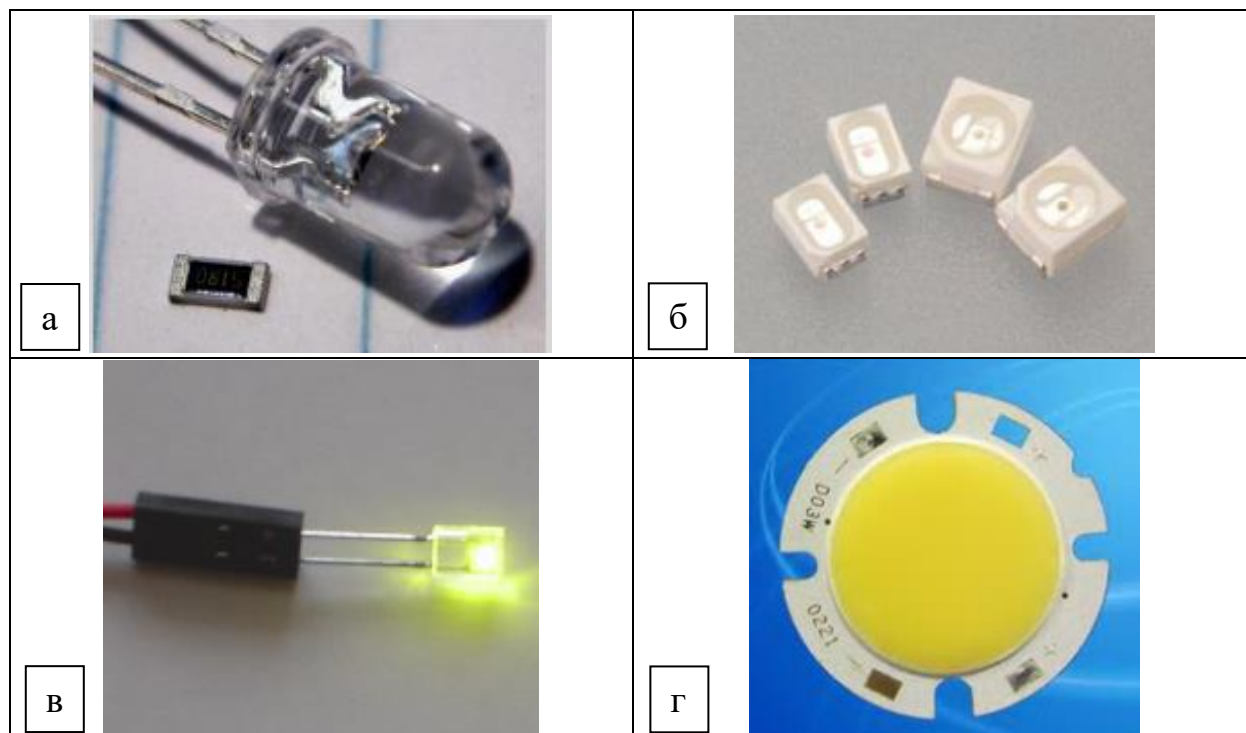


Рисунок 5.1 – Корпуса светодиодов: а) Lamp-LED светодиод, б) Сверхъяркие светодиоды SMD, в) Side-LED, г) Flip Chip светодиод

2.1.1. Задание на лабораторную работу

Согласно исходным данным индивидуального задания (Таблица Б.1 Приложения Б) в зависимости от типа кристалла светодиода и его параметров описать область применения итогового модуля. На основе сделанных выводов о применении выбрать тип корпуса и дать его обоснование. Сделать чертеж общего вида с описанием всех геометрических размеров. Пример чертежа представлен в Приложении В.

2.2. Лазер

Для создания кристаллов лазеров применяются хрупкие материалы (например, фосфид индия), сильно подверженные температурным воздействиям, в связи с чем корпуса лазеров должны обеспечивать защиту от механических и термических воздействий, предотвращать попадание загрязнений и эффективно отводить тепло от кристалла, образующееся в результате работы. Эффективность рабочих характеристик лазеров существенно зависит от температуры поскольку до 90% электрической мощности накачки преобразуется в тепло.

Кристалл монтируется на площадку из материала с аналогичным коэффициентом теплового расширения (КТР), которая служит распределителем тепла и совмещена с термоэлектрическим охладителем для быстрой и эффективной его передачи. Сборка может размещаться на радиаторе из чистой

меди или сплава меди и вольфрама. Рассмотрим основные типы корпусов лазеров (Рисунок 5.2):

- корпус типа C-mount предназначен для лазеров и лазерных систем, лазерных измерений и контроля, прецизионной оптики. Кристалл припаян к медно-вольфрамовому радиатору, который играет роль *p*-контакта, другая сторона резонатора диода соединена проволокой с металлическим контактом, который является катодом и играет роль *n*-контакта. Отверстие в середине используется для монтажа. Количество контактов: до 6 или 8. Номинальная выходная мощность лазеров спектрального диапазона 680 до 980 нм при монтаже в C-mount корпус достигает 7 Вт (Рисунок 5.2а),

- корпус типа TO, корпус широкого назначения для оптических систем. В зависимости от типа корпуса могут иметь разный полезный объём, содержать не только чип лазерного диода, но и фотодиод обратной связи и различную управляющую электронику. Данные корпуса могут быть оснащены различными типами ввода/вывода: с плоским полированным окном (с покрытиями и без), различными формами линз, а также с оптическим волокном. Количество контактов: от 2 до 12. Материал основания – холоднокатаная сталь или CuW (Рисунок 5.2б),

- корпус типа «Butterfly» применяется в оптических телекоммуникационных и научно-исследовательских применениях, является одним из стандартных форматов корпусирования лазерных кристаллов. Типичный корпус содержит 14 контактов (14-pin), кристалл установлен на подставку из AlN, подставка монтируется на термоэлектрический охладитель на опорной плите из CuW. Возможны вариации распиновки и набора внутренних компонент в зависимости от задач, в том числе с наличием СВЧ-коннектора (Рисунок 5.2в),

- корпус mini-DIL применяется для телекоммуникационных модулей в качестве источника накачки легированных волокон, имеет от 6 до 8 контактов. Как правило, корпус не имеет термоэлектрического охлаждения, что обусловлено малыми размерами, за счет чего требует эффективного внешнего радиатора и системы охлаждения. Основа может быть разной: CuW, холоднокатаная сталь или оксид алюминия (Рисунок 5.2г),

- корпуса типа TOSA/ROSA предназначены для использования с приёмопередатчиками для целей передачи данных в телекоммуникациях. В качестве вывода могут устанавливаться различные сокет, совместимые со стандартными волоконно-оптическими коннекторами типа LC и имеющие интегрированный оптический изолятор для поглощения обратных отражений света (Рисунок 5.2д).

2.2.1. Задание на лабораторную работу

Согласно исходным данным индивидуального задания (Таблица Б.1 Приложения Б) в зависимости от типа кристалла лазера и его параметров описать область применения итогового модуля. На основе сделанных выводов о применении выбрать тип корпуса и дать его обоснование. Сделать чертеж

общего вида с описанием всех геометрических размеров. Пример чертежа представлен в Приложении В.

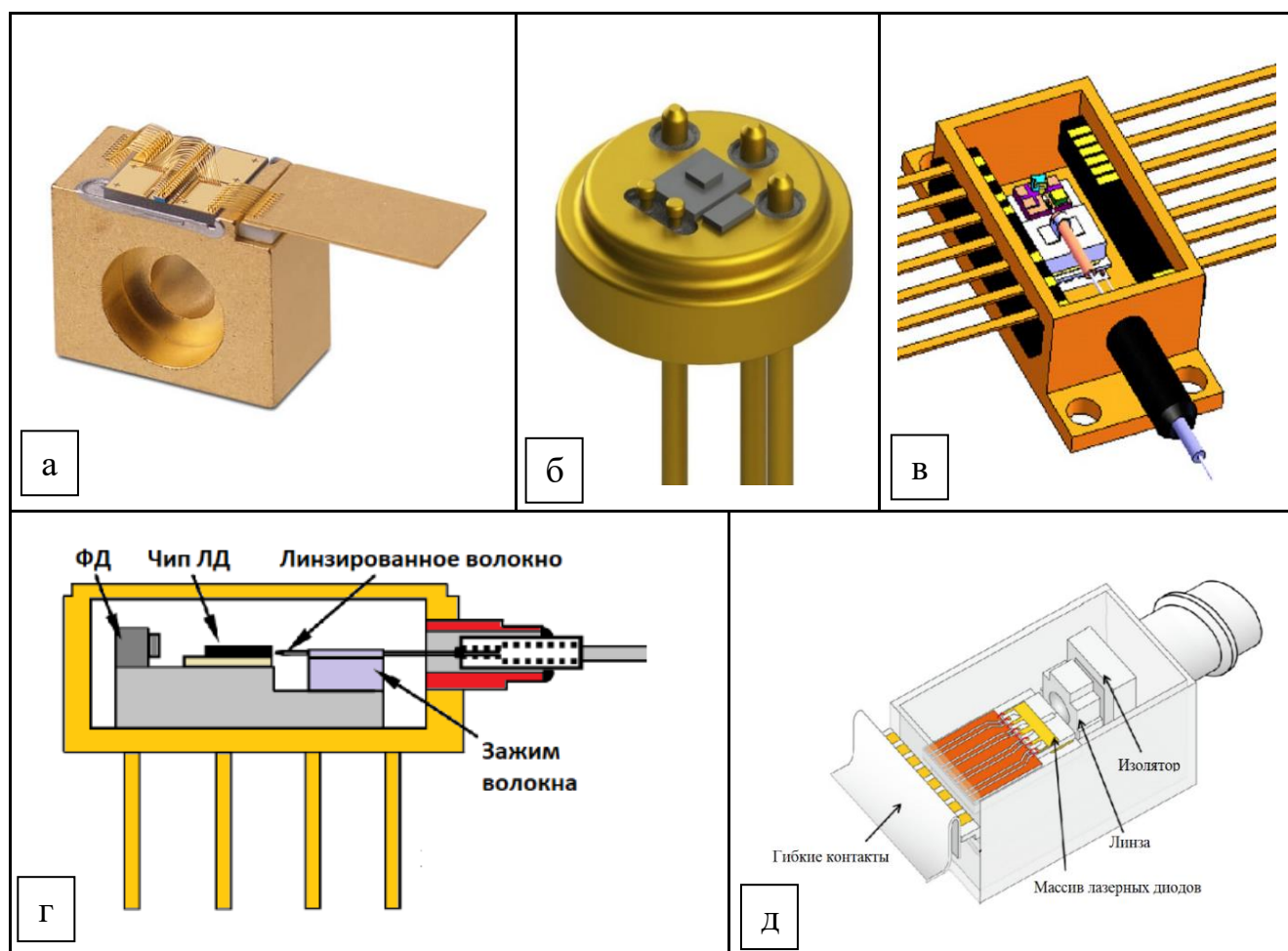


Рисунок 5.2 – Корпуса лазеров: а) спрощенный кристалл лазера в корпусе C-mount, б) спрощенный кристалл лазера в корпусе TO, в) спрощенный кристалл лазера в корпусе Butterfly, г) внутреннее устройство корпуса mini-DIL, д) спрощенный массив лазеров в корпусе TOSA/ROSA [13]

2.3. Фотодиод

Фотодиоды обычно помещаются в металлический или пластиковый корпус с прозрачным окном. Для фотодиодов наиболее характерно использование TO корпуса и корпуса типа Butterfly за счет простоты, надежности и дешевизны технологии изготовления. Более подробно данные типы корпусов описаны в главе «Лазеры» данной Лабораторной работы.

2.3.1. Задание на лабораторную работу

Согласно исходным данным индивидуального задания (Таблица Б.1 Приложения Б) в зависимости от типа кристалла фотодиода и его параметров описать область применения итогового модуля. На основе сделанных выводов о применении выбрать тип корпуса и дать его обоснование. Сделать чертеж общего вида с описанием всех геометрических размеров. Пример чертежа представлен в Приложении В.

3. Содержание отчета

Форма отчета должна соответствовать предъявляемым в Приложении А требованиям к отчету.

4. Контрольные вопросы

4.1. Корпус и корпусирование. Определения.

4.2. Основные типы корпуса для светодиодного кристалла. Преимущества и недостатки.

4.3. Основные типы корпуса для фотодиодного кристалла. Преимущества и недостатки.

4.4. Основные типы корпуса для лазерного кристалла. Преимущества и недостатки.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Пример оформления отчета

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования**

«Национальный исследовательский университет ИТМО»

ОТЧЕТ

О ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ №1

«Название лабораторной работы согласно методическому пособию»

Выполнили:

А.А. Иванов _____

А.Б. Иванов _____

А.Г. Иванов _____

Проверил:

А.В. Иванов _____

Санкт-Петербург

2023

1. Цель

В соответствии с методическими указаниями

2. Задачи

2.1. Изучить материалы гетероструктур полупроводниковых лазеров

2.2. Ознакомиться с конструкцией полупроводникового лазера

2.3. ...

Задачи необходимо ставить в соответствии с ожидаемыми результатами выполнения лабораторной работы. Задачи могут быть поставлены как теоретические (изучить, ознакомиться...), так и практические (получить, исследовать, рассчитать ...). Каждая поставленная задача должна быть выполнена, а процесс выполнения должен быть описан в разделе «Ход работы».

3. Обзор литературы

3.1. Материалы гетероструктур полупроводниковых лазеров

Описание устройства...

3.2. Конструкция полупроводникового лазера

Описание конструкции...

3.3. ...

В пунктах раздела «Обзор литературы» должны содержаться все пункты из раздела «Задачи», содержащие слова «изучить, ознакомиться...», однако приветствуется включение в раздел «Обзор литературы» дополнительных пунктов.

4. Ход работы

4.1. Материалы гетероструктур полупроводниковых лазеров

Результаты выполнения данной задачи изложены в пункте 3.1 раздела «Обзор литературы».

4.2. Конструкция полупроводникового лазера

4.3. ...

Пункты раздела «Ход работы» должны быть строго согласованы с поставленными задачами. Для теоретически изученных задач, описание которых вошло в раздел «Обзор литературы», в тексте соответствующего пункта раздела «Ход работы» можно ссылаться на пункт «Обзора литературы» БЕЗ необходимости дублирования информации

5. Заключение

В разделе «Заключение» не следует использовать рисунки и формулы, при необходимости на них нужно ссылаться в соответствующих пунктах раздела «Ход работы». Раздел «Заключение» должен содержать краткое описание всех результатов работы с авторскими комментариями для каждого результата. Объем данного раздела должен составлять ориентировочно 500 слов.

6. Список использованных источников

На каждый источник должна быть приведена ссылка в разделе «Обзор литературы». НЕ следует ссылаться на источники в других разделах.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Задания на выполнение лабораторной работы

Таблица Б.1 – Задания для выполнения лабораторной работы

Светодиоды											
	Длина волны излучения, нм	Напряжение активации, мВ	Коэффициент неидеальности ВАХ	Ссылка							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="text-align: center;">p-GaN</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">p-Al_{0,15}Ga_{0,85}N</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">InGaN</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">n-Al_{0,1}Ga_{0,9}N</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">n-GaN</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">GaN буферный слой</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Сапфировая подложка</td></tr> </table>	p -GaN	p -Al _{0,15} Ga _{0,85} N	InGaN	n -Al _{0,1} Ga _{0,9} N	n -GaN	GaN буферный слой	Сапфировая подложка	370	74	1,25	[4]
p -GaN											
p -Al _{0,15} Ga _{0,85} N											
InGaN											
n -Al _{0,1} Ga _{0,9} N											
n -GaN											
GaN буферный слой											
Сапфировая подложка											
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="text-align: center;">ITO</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">p-GaN</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">InGaN/GaN КЯ</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">n-GaN</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">GaN буферный слой</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Сапфировая подложка</td></tr> </table>	ITO	p -GaN	InGaN/GaN КЯ	n -GaN	GaN буферный слой	Сапфировая подложка	740	50	1,14	[14]	
ITO											
p -GaN											
InGaN/GaN КЯ											
n -GaN											
GaN буферный слой											
Сапфировая подложка											
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="text-align: center;">p-Al_xIn_{1-x}P слой растекания тока</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">p-Al_xIn_{1-x}P</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Al_xIn_{1-x}P активная область</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">n-Al_xIn_{1-x}P</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">n-InGaAs буферный слой</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">n-GaAs подложка</td></tr> </table>	p -Al _x In _{1-x} P слой растекания тока	p -Al _x In _{1-x} P	Al _x In _{1-x} P активная область	n -Al _x In _{1-x} P	n -InGaAs буферный слой	n -GaAs подложка	565	56	1,1	[15]	
p -Al _x In _{1-x} P слой растекания тока											
p -Al _x In _{1-x} P											
Al _x In _{1-x} P активная область											
n -Al _x In _{1-x} P											
n -InGaAs буферный слой											
n -GaAs подложка											
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="text-align: center;">p-GaN</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">p-AlGaN</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">InGaN:Zn активная область</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">n-AlGaN</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">n-GaN</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">GaN буферный слой</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">n-GaAs подложка</td></tr> </table>	p -GaN	p -AlGaN	InGaN:Zn активная область	n -AlGaN	n -GaN	GaN буферный слой	n -GaAs подложка	450	65	1,15	[16]
p -GaN											
p -AlGaN											
InGaN:Zn активная область											
n -AlGaN											
n -GaN											
GaN буферный слой											
n -GaAs подложка											

Продолжение таблицы Б.1

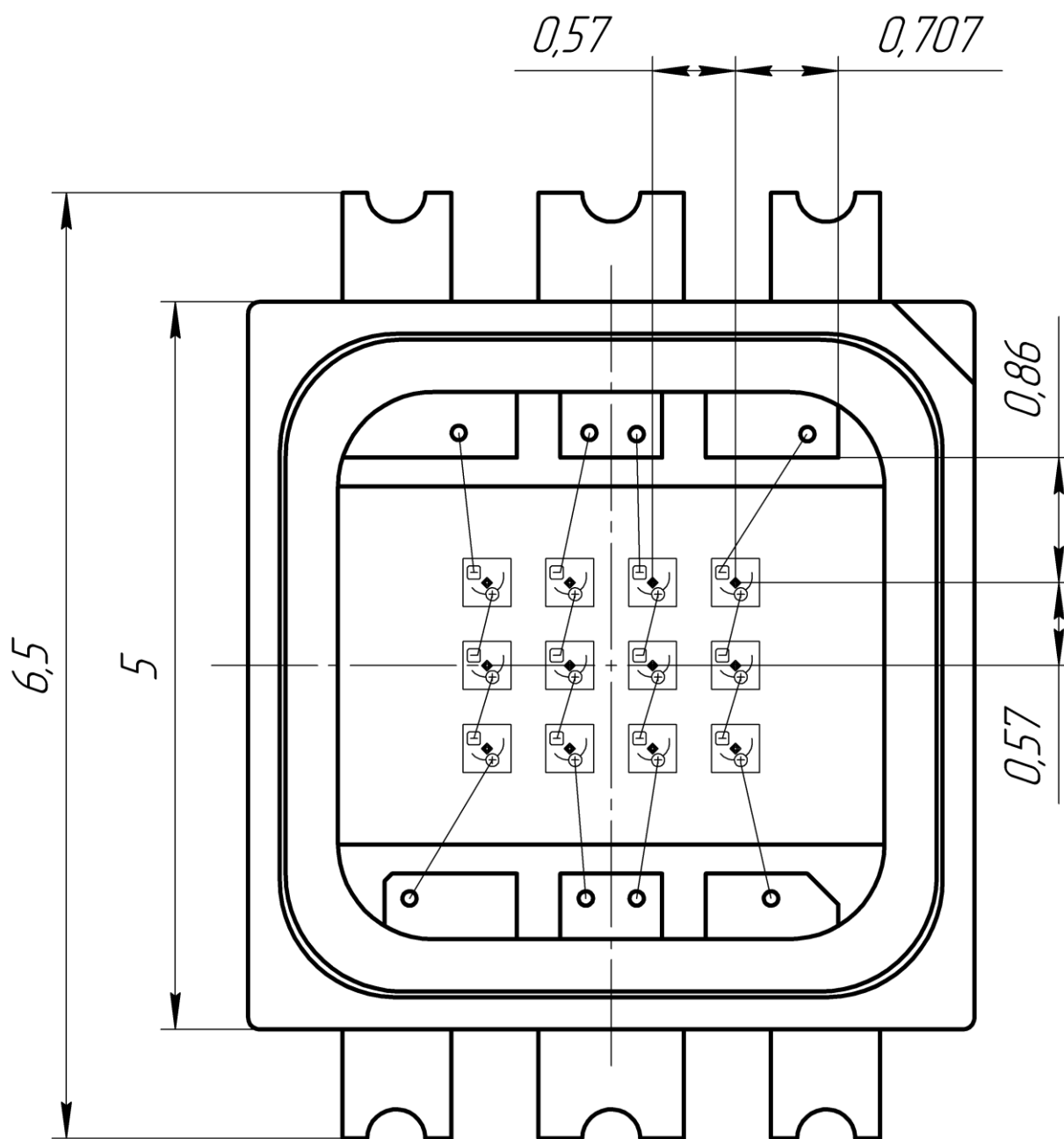
Фотодиоды												
Гетероструктура	Длина волны, нм	Предельная рабочая частота, ГГц	Сопротивление омических контактов, Ом	Сопротивление нагрузки, Ом	Ссылка							
<table border="1"> <tr><td>InGaAs окно</td></tr> <tr><td>InAlAs барьерный слой</td></tr> <tr><td>InGaAlAs градиент</td></tr> <tr><td>InGaAs поглощающий слой</td></tr> <tr><td>InGaAs:Si поглощающий слой</td></tr> <tr><td>InAlAs:Si контактный слой</td></tr> <tr><td>InP подложка</td></tr> </table>	InGaAs окно	InAlAs барьерный слой	InGaAlAs градиент	InGaAs поглощающий слой	InGaAs:Si поглощающий слой	InAlAs:Si контактный слой	InP подложка	1250-1650	30	0,5	50	[6]
InGaAs окно												
InAlAs барьерный слой												
InGaAlAs градиент												
InGaAs поглощающий слой												
InGaAs:Si поглощающий слой												
InAlAs:Si контактный слой												
InP подложка												
<table border="1"> <tr><td>InGaAs окно</td></tr> <tr><td>InAlAs барьерный слой</td></tr> <tr><td>InGaAlAs градиент</td></tr> <tr><td>InGaAs поглощающий слой</td></tr> <tr><td>InGaAs:Si поглощающий слой</td></tr> <tr><td>InAlAs:Si контактный слой</td></tr> <tr><td>InP подложка</td></tr> </table>	InGaAs окно	InAlAs барьерный слой	InGaAlAs градиент	InGaAs поглощающий слой	InGaAs:Si поглощающий слой	InAlAs:Si контактный слой	InP подложка	1250-1650	28	0,7	50	[7]
InGaAs окно												
InAlAs барьерный слой												
InGaAlAs градиент												
InGaAs поглощающий слой												
InGaAs:Si поглощающий слой												
InAlAs:Si контактный слой												
InP подложка												
<table border="1"> <tr><td>InGaP</td></tr> <tr><td>GaAs</td></tr> <tr><td>n^+-GaAs</td></tr> <tr><td>GaAs подложка</td></tr> </table>	InGaP	GaAs	n^+ -GaAs	GaAs подложка	850	27	2,6	50	[17]			
InGaP												
GaAs												
n^+ -GaAs												
GaAs подложка												
<table border="1"> <tr><td>p^+-InGaAs</td></tr> <tr><td>$\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$</td></tr> <tr><td>$n^+$-InP</td></tr> <tr><td>InP подложка</td></tr> </table>	p^+ -InGaAs	$\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$	n^+ -InP	InP подложка	1000-1700	10	2,8	50	[18]			
p^+ -InGaAs												
$\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$												
n^+ -InP												
InP подложка												

Продолжение таблицы Б.1

Лазеры													
Гетероструктура	Пороговый ток, А	Длина полоска, мкм	Плотность порогового тока, А/см ²	Ширина растекания тока, мкм	Ссылка								
<table border="1"> <tr><td>GaAs:Zn контактный слой</td></tr> <tr><td>Al_{0,5}Ga_{0,5}As:Zn p-эмиттер</td></tr> <tr><td>Al_{0,33}Ga_{0,67}As волновод</td></tr> <tr><td>AlGaAs КЯ</td></tr> <tr><td>Al_{0,33}Ga_{0,67}As волновод</td></tr> <tr><td>Al_{0,5}Ga_{0,5}As:Si n-эмиттер</td></tr> <tr><td>GaAs:Si буферный слой</td></tr> <tr><td>n-GaAs подложка</td></tr> </table>	GaAs:Zn контактный слой	Al _{0,5} Ga _{0,5} As:Zn p-эмиттер	Al _{0,33} Ga _{0,67} As волновод	AlGaAs КЯ	Al _{0,33} Ga _{0,67} As волновод	Al _{0,5} Ga _{0,5} As:Si n-эмиттер	GaAs:Si буферный слой	n-GaAs подложка	0,18	970	160	8	[19]
GaAs:Zn контактный слой													
Al _{0,5} Ga _{0,5} As:Zn p-эмиттер													
Al _{0,33} Ga _{0,67} As волновод													
AlGaAs КЯ													
Al _{0,33} Ga _{0,67} As волновод													
Al _{0,5} Ga _{0,5} As:Si n-эмиттер													
GaAs:Si буферный слой													
n-GaAs подложка													
<table border="1"> <tr><td>p-GaAs</td></tr> <tr><td>p-Al_{0,3}Ga_{0,7}As</td></tr> <tr><td>Al_{0,05}Ga_{0,95}As активная область</td></tr> <tr><td>n-Al_{0,3}Ga_{0,7}As</td></tr> <tr><td>n-GaAs подложка</td></tr> </table>	p-GaAs	p-Al _{0,3} Ga _{0,7} As	Al _{0,05} Ga _{0,95} As активная область	n-Al _{0,3} Ga _{0,7} As	n-GaAs подложка	0,05	208	2000	1	[20]			
p-GaAs													
p-Al _{0,3} Ga _{0,7} As													
Al _{0,05} Ga _{0,95} As активная область													
n-Al _{0,3} Ga _{0,7} As													
n-GaAs подложка													
<table border="1"> <tr><td>InP</td></tr> <tr><td>InAlAs</td></tr> <tr><td>InGaAs активная область</td></tr> <tr><td>InAlAs</td></tr> <tr><td>InP буферный слой</td></tr> <tr><td>InP подложка</td></tr> </table>	InP	InAlAs	InGaAs активная область	InAlAs	InP буферный слой	InP подложка	0,3	2000	120	0,12	[21]		
InP													
InAlAs													
InGaAs активная область													
InAlAs													
InP буферный слой													
InP подложка													
<table border="1"> <tr><td>InP</td></tr> <tr><td>InAlAs</td></tr> <tr><td>InGaAs активная область</td></tr> <tr><td>InAlAs</td></tr> <tr><td>InP буферный слой</td></tr> <tr><td>InP подложка</td></tr> </table>	InP	InAlAs	InGaAs активная область	InAlAs	InP буферный слой	InP подложка	0.25	2500	100	0,45	[22]		
InP													
InAlAs													
InGaAs активная область													
InAlAs													
InP буферный слой													
InP подложка													

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Чертеж общего вида светодиодного модуля



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Klayout Layout Viewer and Editor [Электронный ресурс], <https://www.klayout.de/>.
2. Влияние параметров процесса МОГФЭ на свойства эпитаксиальных пленок GaInAsN / Данильцев В.М. [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2005. – Т. 39. – №. 1. – С. 13-16.
3. Лойко Н.Н. Введение в молекулярно-лучевую эпитаксию / Н.Н. Лойко. – М.: МИФИ, 2000. 48 с.
4. Шуберт Ф. Светодиоды / Ф. Шуберт ; Пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича. – 2-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – С. 280-283.
5. Schoenherr D. [и др.]. Characterization of THz emitter based on a high-speed pin photodiode // 2007 Joint 32nd International Conference on Infrared and Millimeter Waves and the 15th International Conference on Terahertz Electronics. – Кардифф, 2007. – С. 1002–1003.
6. Мощный СВЧ-фотодиод Шоттки на основе двойной гетероструктуры InAlAs/InGaAs / Чиж А.Л. [и др.]. // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2018. – Т. 1. – С. 120-124.
7. Журавлев К.С. [и др.]. Характеристики мощных СВЧ-фотодиодов с барьером Шоттки на основе InAlAs/InGaAs/InP гетероструктур // 28-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь, 2018. – С. 826-830.
8. Жуков А.Е. Современные инжекционные лазеры / А.Е. Жуков, М.В. Максимов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 276 с.
9. Кручинин Д.Ю. Фотолитографические технологии в производстве оптических деталей: учебное пособие / Д.Ю. Кручинин, Е.П. Фарафонтowa ; [науч. ред. В.А. Дерябин]. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 51 с
10. Барвинок В.А. Физические основы и математическое моделирование процессов вакуумного ионно-плазменного напыления / В.А. Барвинок, В.И. Богданович. – М.: Машиностроение, 1999. – 309 с.
11. Россоленко А.Н. Литографии в микроэлектронике: метод. пособие / А.Н. Россоленко, Т.Е. Голикова, В.Н. Зверев. – М.: Наука, 2012. – 54 с.
12. Бугров В.Е. Оптоэлектроника светодиодов: учебное пособие / В.Е. Бугров, К.А. Виноградова. – СПб.: НИУ ИТМО, 2013 – 174 с.
13. Блог акционерного общества «ЛЛС». Типы корпусов для лазерных диодов. – Режим доступа: <https://lenlasers.ru/novosti-i-stati/tipy-korpusov-dlya-lazernykh-diodov/> (Дата обращения 17.07.2023).
14. 740-nm emission from InGaN-based LEDs on c-plane sapphire substrates by MOVPE / К. Ohkawa [и др.] // Journal of crystal growth. – 2012. – Т. 343, № 1. – С. 13-16.
15. Amber-green light-emitting diodes using order-disorder $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ heterostructures / Т.М. Christian [и др.] // Journal of Applied Physics. – 2013. – Т. 114, № 7. – С. 074505.

16. Nakamura S. Candela-class high-brightness InGaN/AlGaN double-heterostructure blue-light-emitting diodes / S. Nakamura, T. Mukai, M. Senoh // Applied Physics Letters. – 1994. – Т. 64, № 13. – С. 1687-1689.
17. Wu M.C. High-speed InGaP/GaAs pin Photodiodes with wide spectral range / M.C. Wu, Y.H. Huang, C.L. Ho // IEEE Electron Device Letters. – 2007. – Т. 28, № 9. – С. 797-799.
18. Детекторы коротковолнового ИК-диапазона на основе InGaAs (обзор) / И.Д. Бурлаков [и др.] // Успехи прикладной физики. – 2014. – Т. 2, № 2. – С. 131-162.
19. Мощные лазеры ($\lambda = 808$ нм) на основе гетероструктур раздельного ограничения AlGaAs / А.Ю. Андреев [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2009. – Т. 43, № 4. – С.543-547.
20. Звелто О. Принципы лазеров / О. Звелто ; Пер. с англ. И.Т. Сорокина, Е.В. Сорокин, К.Ф. Шипилов. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Мир, 1990. – С. 414.
21. Полупроводниковые лазеры на основе гетероструктур AlGaInAs/InP со сверхузким волноводом и повышенным электронным барьером / Светогоров В.Н. [и др.] // Квантовая электроника. – 2020. – Т. 50. – №. 12. – С. 1123-1125.
22. Полупроводниковые лазеры на основе AlGaInAs/InP с повышенным электронным барьером / А.А. Мармалюк [и др.] // Квантовая электроника. – 2019. – Т. 49. – №. 6. – С. 519-521.

Владислав Васильевич Андриюшкин
Леонид Яковлевич Карачинский
Евгений Сергеевич Колодезный
Павел Евгеньевич Копытов
Иннокентий Игоревич Новиков
Станислав Станиславович Рочас

ПЛАНАРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОПТОЭЛЕКТРОНИКЕ

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, литер А