

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Высокоточный монтаж лазерных чипов с помощью установки Fineplacer lambda-96

Электронное учебно-методическое пособие

Рекомендовано методической комиссией физического факультета
для студентов и магистров ННГУ, обучающихся по направлению подготовки
210600 - "Нанотехнология", а также аспирантов обучающихся по программам: 01.04.10
– физика полупроводников, 05.27.01 - Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро - и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Нижегород

2014

УДК 621.382
ББК 32

В932 Высокоточный монтаж лазерных чипов с помощью установки Fineplacer lambda-96 / Сост. М.В. Карзанова, Н.В. Дикарева, С.М. Некоркин. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2014. – 83 с.

Рецензент: кандидат физ.-мат.наук, в.н.с. НИФТИ ННГУ Звонков Б.Н.

Данная учебно-методическая разработка посвящена изучению физических и технологических принципов монтажа лазерных чипов на токопроводящую поверхность, технологии изготовления полупроводниковых лазеров, их характеристик, устройства и правил эксплуатации установки сверхточного монтажа Fineplacer Lambda-96. Также рассмотрено влияние варьирования параметров технологического процесса пайки на изменение электрофизических характеристик лазерного диода.

Электронное учебно-методическое пособие предназначено для студентов и магистров ННГУ, обучающихся по направлению подготовки 210600 - "Нанотехнология", а также аспирантов, обучающихся по программам: 01.04.10 Физика полупроводников, 05.27.01 - Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро - и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах, изучающих курс Физика лазеров, Нанопотоника,

УДК 621.382
ББК 32

© Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского, 2014

Оглавление

Введение	5
Глава 1 Принцип работы и основные характеристики полупроводниковых лазеров.	6
1.1 Общие сведения о лазерах.....	6
1.2. Принцип работы полупроводниковых лазеров	10
1.3. Основные характеристики и методики контроля параметров лазерных диодов	13
1.3.1. Электрофизические параметры полупроводниковых лазерных диодов	13
1.3.2. Спектральные и пространственные характеристики полупроводниковых лазерных диодов	15
1.3.3. Методики контроля параметров лазерных диодов.....	18
Глава 2 Технология изготовления полупроводниковых лазеров	21
2.1 Технологические этапы изготовления полупроводниковых лазеров.....	21
2.2 Формирование геометрии активной области лазерного диода.....	23
2.3 Создание омических контактов на лазерной гетероструктуре	25
2.4 Разделение лазерной структуры на чипы	26
2.5 Монтаж лазерных чипов на теплоотвод	27
Глава 3 Процесс пайки, ее разновидности, особенности подбора припоев для различных материалов.....	28
3.1 Классификация видов пайки.	28
3.2 Припой и флюсы.....	37
Глава 4 Особенности технологического процесса монтажа лазерных кристаллов.....	46
4.1 Выбор материала теплоотвода.....	46
4.2 Температурно-временные характеристики технологии монтажа.....	53
Глава 5 Методы прецизионного монтажа лазерных чипов на установке Fineplacer lambda-96	61
5.1 Система сверхточного монтажа.....	61
5.2 Термокомпрессионный монтаж	63
5.3 Ультразвуковая сварка	64
5.4 Технология С4	65

5.5 Пайка AuSn и In-содержащими припоями	66
5.6 Адгезионные технологии	67
5.6.1 Теплопроводный клей	67
5.6.2 Изотропные и анизотропные токопроводящие клеи.....	67
5.6.3 Оптические клеи	70
5.7 Работа с установкой Fineplacer lambda-96	71
Приложение 1	76
Приложение 2	77
Приложение 3	78
Приложение 4	79
Приложение 5	80
Приложение 6	81
Приложение 7	82
Список литературы:	83

Введение

В конце XX века интенсивное развитие получили лазеры на гетероструктурах с квантово-размерной активной областью – наиболее важная разновидность полупроводниковых инжекционных лазеров, привлекающая все большее внимание благодаря перспективам их широкого применения в системах волоконно-оптической связи, в вычислительной технике, голографии, лазерной дальнометрии, медицине, и ряде других областей.

Процесс создания полупроводникового лазера включает в себя такие основные этапы как: эпитаксиальный рост лазерной гетероструктуры, формирование геометрии активной области в плоскости р-п перехода (например, полосковой), напыление омических контактов, разделение гетероструктуры на чипы (лазерные кристаллы) и монтаж лазерных чипов на теплоотвод.

Лазерный кристалл с омическими контактами можно назвать лазером только после монтажа на теплоотвод, поскольку повышение температуры лазерного кристалла приводит к ухудшению его характеристик, а так же к снижению надежности и долговечности изготавливаемого прибора.

При разработке технологических процессов изготовления полупроводниковых лазеров необходимо учитывать требования, предъявляемые к материалам, форме, размерам и состоянию поверхностей теплоотводов.

Нужно обеспечить выбор надежных и долговечных материалов припоев, подходящих для монтажа лазерного кристалла на теплоотвод, материалов для омических контактов кристалла, способов, режимов, условий монтажа. Технологический режим монтажа кристалла на теплоотвод должен отвечать условиям, при которых механические напряжения либо не возникают, либо они минимизированы. Решение указанных задач требует проведения, как теоретических расчетов, так и глубоких экспериментально-технологических исследований с учетом имеющихся на сегодняшний день обширных данных, накопленных при промышленном выпуске полупроводниковых лазеров различными предприятиями.

Операции монтажа лазерных кристаллов являются весьма сложными и дорогостоящими и определяют выходные параметры готовых приборов (мощность излучения, полный КПД, спектральные параметры излучения, надежность и срок службы). Операции монтажа должны обеспечить не только заданный тепловой режим работы лазерного кристалла, но и контроль в допустимых пределах термоупругих напряжений для его надежной и долговременной работы.

Глава 1.

Принцип работы и основные характеристики полупроводниковых лазеров

1.1 Общие сведения о лазерах.

Согласно ГОСТ 15093-90 лазеры (оптические квантовые генераторы - ОКГ) - генератор когерентного электромагнитного излучения в оптическом диапазоне, основанный на использовании индуцированных переходов. При этом под оптическим диапазоном понимается диапазон длин волн от 10^{-9} до 10^{-3} м.

Позволим себе несколько дополнить данное определение. Лазеры - это устройства, преобразующие энергию накачки (световую, электрическую, и.т.п.) в энергию когерентного, монохроматического, поляризованного и узконаправленного потока излучения. [1]

В основе работы лазеров заложены три фундаментальных явления, происходящих при взаимодействии электромагнитных волн с веществом, а именно процессы спонтанного и вынужденного излучения и процесс поглощения.

Чтобы понять принцип работы лазера, нужно более внимательно изучить процессы поглощения и излучения атомами/электронами квантов света. Атом может находиться в различных энергетических состояниях. В теории Бора эти состояния называются стабильными. На самом деле стабильным состоянием, в котором атом/электрон в отсутствие внешних возмущений может находиться бесконечно долго, является только состояние с наименьшей энергией. Это состояние называют основным. Все другие состояния нестабильны. Возбужденный атом/электрон может пребывать в этих состояниях лишь очень короткое время, порядка 10^{-8} с, после этого он самопроизвольно переходит в одно из низших состояний, испуская квант света, частоту которого можно определить из второго постулата Бора. Излучение, испускаемое при самопроизвольном переходе атома/электрона из одного состояния в другое, называют *спонтанным*. На некоторых энергетических уровнях атом может пребывать значительно большее время, порядка 10^{-3} с. Такие уровни называются *метастабильными*.

Переход атома/электрона в более высокое энергетическое состояние может происходить при резонансном поглощении фотона, энергия которого равна разности энергий атома/электрона в конечном и начальном состояниях.

Переходы между энергетическими уровнями атома/электрона не обязательно связаны с поглощением или испусканием фотонов. Атом/электрон может приобрести или отдать часть своей энергии и перейти в другое квантовое состояние в результате взаимодействия с

другими атомами или столкновений с электронами. Такие переходы называются **безызлучательными**.

В 1916 году А. Эйнштейн предсказал, что переход электрона в атоме с верхнего энергетического уровня на нижний может происходить под влиянием внешнего электромагнитного поля, частота которого равна собственной частоте перехода. Возникающее при этом излучение называют **вынужденным** или **индуцированным**. Вынужденное излучение обладает удивительным свойством. Оно резко отличается от спонтанного излучения. В результате взаимодействия возбужденного атома с фотоном атом испускает еще один фотон той же самой частоты, распространяющийся в том же направлении. На языке волновой теории это означает, что атом излучает электромагнитную волну, у которой частота, фаза, поляризация и направление распространения точно такие же, как и у первоначальной волны. В результате вынужденного испускания фотонов амплитуда волны, распространяющейся в среде, возрастает. С точки зрения квантовой теории, в результате взаимодействия возбужденного атома с фотоном, частота которого равна частоте перехода, появляются два совершенно одинаковых фотона-близнеца. Именно индуцированное излучение является физической основой работы лазеров. [2]

Однако единичного излучательного перехода еще не достаточно для создания ОКГ. Чтобы проходящая через слой вещества волна усиливалась, нужно искусственно создать условия, при которых число атомов/электронов, способных испустить фотон, на возбужденных уровнях превысит число таковых на основном – низкоэнергетическом уровне ($n_2 > n_1$), т. е. создать **инверсную населенность уровней**. Кроме того, необходимо обеспечить **обратную связь** для взаимодействия лазерного излучения с активным элементом.

Любой оптический квантовый генератор состоит из четырех основных элементов:

- активная (рабочая) среда, в которой достигается инверсная населенность под действием энергии накачки и способная порождать серию излучательных переходов;
- резонатор - элемент лазерной конструкции, позволяющий осуществлять обратную связь;
- волновод – канал, используемый для переноса излучения внутри себя посредством эффекта полного внутреннего отражения;
- система накачки.

Все лазерные системы можно разделить на группы в зависимости от типа используемой активной среды:

- Полупроводниковые лазеры. Формально также являются твердотельными, но традиционно выделяются в отдельную группу, поскольку имеют иной механизм накачки (инжекция избыточных носителей заряда через p-n переход или гетеропереход, электрический пробой в сильном поле, бомбардировка быстрыми электронами), а квантовые переходы происходят между разрешёнными энергетическими зонами, а не между дискретными уровнями энергии. К полупроводниковым лазерам относят широко распространённые лазерные диоды, вертикально-излучающие лазеры (VCSEL), квантово-каскадные лазеры, и. т. п.
- Лазеры на красителях. Тип лазеров, использующий в качестве активной среды раствор флюоресцирующих с образованием широких спектров органических красителей. Лазерные переходы осуществляются между различными колебательными подуровнями первого возбуждённого и основного синглетных электронных состояний. Накачка оптическая, могут работать в непрерывном и импульсном режимах.
- Газовые лазеры - лазеры, активной средой которых является смесь газов и паров. В зависимости от системы накачки газовые лазеры разделяют на газоразрядные лазеры, газовые лазеры с оптическим возбуждением и возбуждением заряженными частицами (например, лазеры с ядерной накачкой, в начале 80-х проводились испытания систем противоракетной обороны на их основе, однако, без особого успеха), газодинамические и химические лазеры. По типу лазерных переходов различают газовые лазеры на атомных переходах, ионные лазеры, молекулярные лазеры на электронных, колебательных и вращательных переходах молекул и эксимерные лазеры.
- Газодинамические лазеры — газовые лазеры с тепловой накачкой, инверсия населённостей в которых создаётся между возбуждёнными колебательно-вращательными уровнями гетероядерных молекул путём адиабатического расширения движущейся с высокой скоростью газовой смеси (чаще N_2+CO_2+He или $N_2+CO_2+H_2O$, рабочее вещество - CO_2).
- Эксимерные лазеры — разновидность газовых лазеров, работающих на энергетических переходах эксимерных молекул (димерах благородных газов, а

также их моногалогенидов), способных существовать лишь некоторое время в возбуждённом состоянии. Накачка осуществляется пропусканием через газовую смесь пучка электронов, под действием которых атомы переходят в возбуждённое состояние с образованием эксимеров, фактически представляющих собой среду с инверсией населённостей.

- Химические лазеры - разновидность лазеров, источником энергии для которых служат химические реакции между компонентами рабочей среды (смеси газов). Лазерные переходы происходят между возбуждёнными колебательно-вращательными и основными уровнями составных молекул продуктов реакции. Для осуществления химических реакций в среде необходимо постоянное присутствие свободных радикалов, для чего используются различные способы воздействия на молекулы для их диссоциации.
- Лазеры на свободных электронах - лазеры, активной средой которых является поток свободных электронов, колеблющихся во внешнем электромагнитном поле (за счёт чего осуществляется излучение) и распространяющихся с релятивистской скоростью в направлении излучения. Основной особенностью является возможность плавной широкодиапазонной перестройки частоты генерации. Различают убитроны и скаттроны, накачка первых осуществляется в пространственно-периодическом статическом поле ондулятора, вторых - мощным полем электромагнитной волны. Существуют также мазеры на циклотронном резонансе и строботроны, основанные на тормозном излучении электронов, а также флиматроны, использующие эффект черенковского и переходного излучений. Поскольку каждый электрон излучает до 10^8 фотонов, лазеры на свободных электронах являются, по сути, классическими приборами и описываются законами классической электродинамики.
- Волоконный лазер - лазер, резонатор которого построен на базе оптического волокна, внутри которого полностью или частично генерируется излучение. При полностью волоконной реализации такой лазер называется цельноволокненным, при комбинированном использовании волоконных и других элементов в конструкции лазера он называется волоконно-дискретным или гибридным. [1].

Существует достаточно большое количество литературы, для подробного ознакомления с каждой из этих систем, мы остановимся лишь на рассмотрении одной разновидности лазеров – полупроводниковом инжекционном лазерном диоде, поскольку

понимание устройства и принципов работы этого прибора необходимо для корректного восприятия материала данного учебно-методического пособия.

1.2. Принцип работы полупроводниковых лазеров

Полупроводниковые лазеры – это лазеры с усиливающей средой на основе полупроводников, где генерация происходит, как правило, за счет вынужденного излучения фотонов при межзонных переходах электронов в условиях высокой концентрации носителей в зоне проводимости.

Схематически процесс возникновения усиления в полупроводниках (для обычных случаев межзонных переходов) показан на рис. 1.1, где *Conduction band* - зона проводимости, *valence band* - валентная зона, *pumping* - накачка, *light emission* - излучение света.

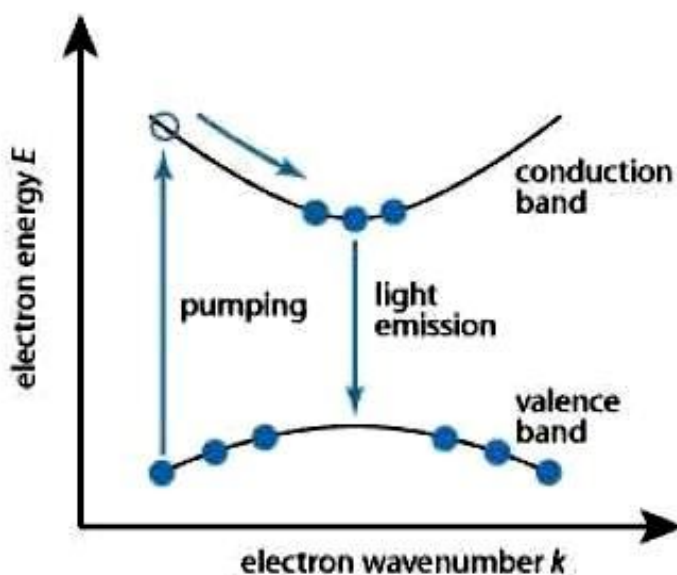


Рис.1.1 Схематически процесс возникновения усиления в полупроводниках [3].

Без накачки большинство электронов находится в валентной зоне. Пучок накачки с фотонами с энергией немного больше ширины запрещенной зоны возбуждает электроны и переводит их в более высокоэнергетическое состояние в зоне проводимости, откуда они быстро релаксируют в состояние вблизи дна зоны проводимости. В то же время, дырки, генерируемые в валентной зоне, перемещаются в ее верхнюю часть. Электроны из зоны проводимости рекомбинируют с этими дырками, испуская фотоны с энергией, приблизительно равной ширине запрещенной зоны. Этот процесс может также стимулироваться входящими фотонами с подходящей энергией. Количественное описание основывается на распределении Ферми-Дирака для электронов в обеих зонах.

Большинство полупроводниковых лазеров являются лазерными диодами с накачкой электрическим током, и с контактом между *p*-легированными и *n*-легированными полупроводниковыми материалами. Существуют также полупроводниковые лазеры с оптической накачкой, где носители генерируются за счет поглощения возбуждающего их света, и квантово каскадные лазеры, где используются внутризонные переходы.

В данном учебно-методическом пособии речь пойдет *о полупроводниковых лазерных диодах*. Принцип работы, которых основан на возникновении инверсии населённости в области *p-n* перехода при инжекции носителей заряда.

При подаче на анод обычного диода положительного потенциала, диод смещается в прямом направлении. При этом дырки из *p*-области инжектируются в *n*-область *p-n* перехода, а электроны из *n*-области инжектируются в *p*-область полупроводника. Если электрон и дырка оказываются «вблизи» (на расстоянии, когда возможно туннелирование), то они могут рекомбинировать с выделением энергии в виде фотона определённой длины волны (в силу сохранения энергии) и фонона (в силу сохранения импульса, потому что фотон уносит импульс). Такой процесс называется спонтанным излучением и является основным источником излучения в светодиодах.

Если в этот момент через эту область пространства пройдёт фотон нужной (резонансной) частоты, он может вызвать вынужденную рекомбинацию с выделением второго фотона, причём его направление, вектор поляризации и фаза будут в точности совпадать с теми же характеристиками первого фотона.

В лазерном диоде полупроводниковый кристалл изготавливают в виде очень тонкой прямоугольной пластинки. Такая пластинка, по сути, является оптическим волноводом, где излучение ограничено в относительно небольшом пространстве. Верхний слой кристалла легируется для создания *n*-области, а в нижнем слое создают *p*-область. В результате получается плоский *p-n* - переход большой площади. Две боковые стороны (торцы) кристалла полируются для образования гладких параллельных плоскостей, которые образуют оптический резонатор, называемый резонатором Фабри-Перо.

Случайный фотон спонтанного излучения, испущенный перпендикулярно этим плоскостям, пройдёт через весь оптический волновод и несколько раз отразится от торцов, прежде чем выйдет наружу. Проходя вдоль резонатора, он будет вызывать вынужденную рекомбинацию, создавая новые и новые фотоны с теми же параметрами, и излучение будет усиливаться (механизм вынужденного излучения). Как только усиление превысит потери, начнётся лазерная генерация [3].

В настоящее время широкое распространение получили лазерные диоды на основе гетероструктур с квантово-размерной активной областью (квантовой ямой). Такие лазеры

часто называют гетеролазерами с квантовой ямой. Уменьшение толщины активного слоя гетеролазера, представляющего собой потенциальную яму, до величины, сравнимой с длиной волны де Бройля ($\lambda = h/p \approx 10\text{нм}$) приводит к двумерному квантованию и возникновению дискретных энергетических уровней [4]. Ширина квантовой ямы и её состав определяет количество уровней в ее пределах и соответствующие энергии, определяя таким образом длину волны излучения. На рис.1.2 схематично показана InGaAs/GaAs/InGaP лазерная гетероструктура с квантовой ямой и ее зонная диаграмма.

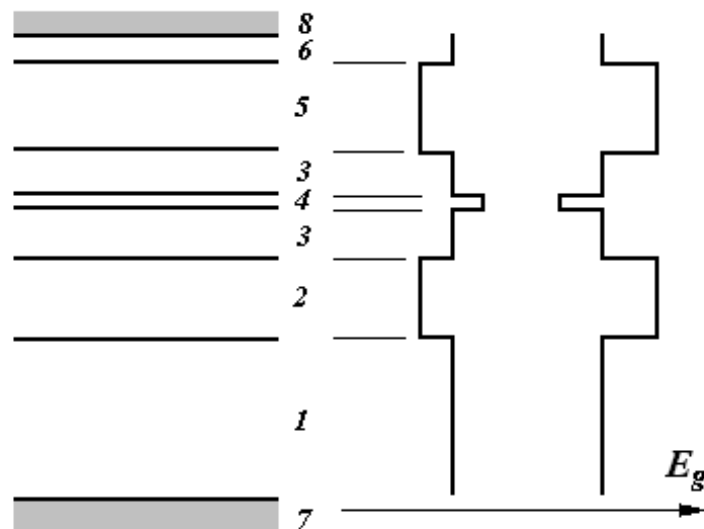


Рис.1.2 Лазерная гетероструктура с квантовой ямой и ее зонная диаграмма: 1 – подложка n^+ -GaAs; 2 – ограничивающий слой n -InGaP; 3 – волноводный слой GaAs; 4 – активная область InGaAs; 5 – ограничивающий слой p -InGaP; 6 – контактный слой p^+ -GaAs; 7, 8 – омические контакты.

Если обеспечить непрерывный приток электронов в C -зону и их отток из V -зоны, то электроны из зоны проводимости будут непрерывно рекомбинировать с дырками из валентной зоны, излучая кванты света с энергией $\hbar\omega$, которая равна расстоянию между задействованными в рекомбинации уровнями (рис. 1.3). В структурах с квантовыми ямами функция плотности состояний имеет ступенчатый вид.

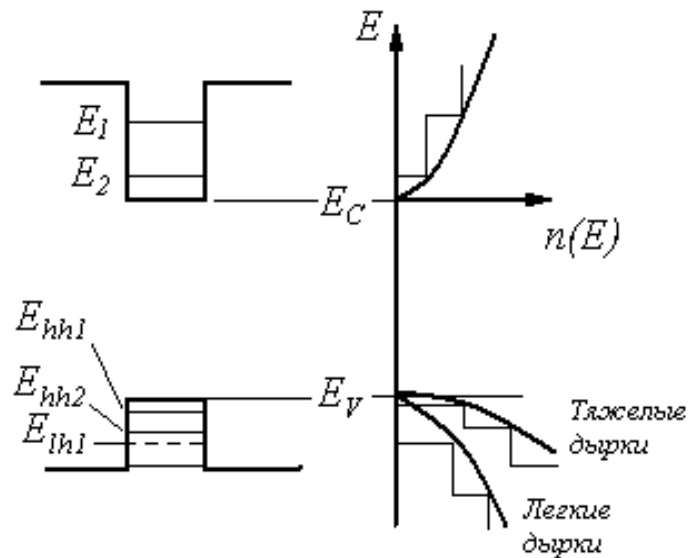


Рис. 1.3 Зонная диаграмма и диаграмма плотности состояний в гетеролазере с квантовой ямой: E_{hh1} , E_{hh2} - уровни тяжелых дырок, E_{lh1} - уровень легких дырок.

Преимущество гетеролазеров с квантовыми ямами состоит в высокой квантовой эффективности, низком пороговом токе и слабой чувствительности к изменениям температуры.

1.3. Основные характеристики и методики контроля параметров лазерных диодов

1.3.1. Электрофизические параметры полупроводниковых лазерных диодов

О возникновении генерации можно судить из ватт-амперной характеристики. По отсечке на оси токов, получаемой экстраполяцией послепороговой части $P(I)$ зависимости от пересечения с осью I определяется пороговый ток I_p . По наклону ватт-амперной характеристики в послепороговой области определяется эффективность $\eta_{ex} = dP/dI$. По прямой ветви вольт-амперной характеристики по величине напряжения отсечки $U_{отс}$, получаемой экстраполяцией прямолинейного участка вольт-амперной характеристики в области больших токов до пересечения с осью напряжений U , можно определить контактную разность потенциалов ϕ_k . Сопротивление R_p определяется по наклону этого прямолинейного участка вольт-амперной характеристики.

Эффективность преобразования мощности (т. е. коэффициент полезного действия – КПД) η_c определяется как отношение выходной оптической мощности P_{out} к подводимой электрической мощности:

$$\eta_c = P_{\text{out}} / (IU) \quad (1.1),$$

где U – прямое напряжение, приложенное к лазерному диоду. КПД обобщает в себе электрическую (вольт-амперную) характеристику диода и оптическую (ватт-амперную) характеристику лазера.

Пример ВАХ, ВтАХ и результирующей зависимости КПД лазера от тока накачки приведен на рис. 1.4. В качестве примера рассмотрен лазер на квантовой яме InGaAs спектрального диапазона 990 нм, изготовленный в НИФТИ ННГУ.

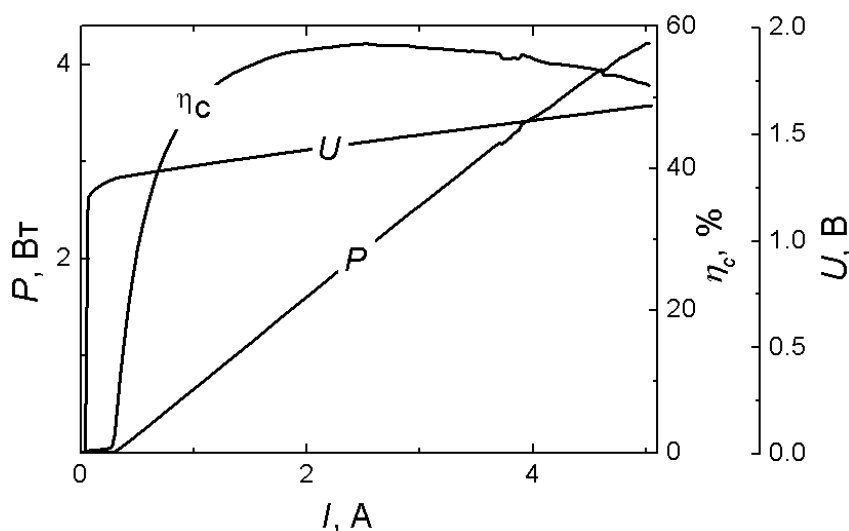


Рис.1.4 Зависимости мощности (P), напряжения (U) и эффективности преобразования (η_c) полупроводникового лазера от тока накачки.[5]

Непосредственно из анализа ватт- и вольт-амперных характеристик можно получить следующие электрофизические параметры лазерного диода:

$I_{\text{п}}$ – пороговый ток, η_{ex} – внешнюю эффективность, β – коэффициент нелинейности, $R_{\text{п}}$ – последовательное сопротивление, $R_{\text{д}}$ – дифференциальное сопротивление в области порога, $R_{\text{ост}}$ – остаточное дифференциальное сопротивление (вводится для оценки степени отклонения от идеальной модели лазерного диода), n – коэффициент идеальности ВАХ, $\phi_{\text{к}}$ – контактная разность потенциалов, $U_{\text{проб}}$ – напряжение пробоя, $U_{\text{нас}}$ – напряжение насыщения на p - n переходе. В результате расчета могут быть определены такие параметры, как: η_{in} – внутренняя эффективность, α коэффициент внутренних потерь, f – величина функции выхода, S – фактор спонтанной эмиссии [5].

1.3.2. Спектральные и пространственные характеристики полупроводниковых лазерных диодов

В зависимости от тока накачки спектр излучения полупроводникового лазерного диода существенно изменяет форму и интенсивность. При малом токе накачки спектральная ширина достаточно велика, что соответствует спонтанному излучению. При возрастании тока до значений, которые лежат непосредственно перед пороговым током, возникает суперлюминесценция (усиленное спонтанное излучение) и спектр сужается. В этом случае уже имеет место модуляция спектра, обусловленная наличием резонатора Фабри-Перо, т.е. существованием продольных мод. Лазерная генерация начинается при токе накачки выше порогового значения. Спектр представляет собой кривую с несколькими узкими линиями (продольными модами). Однако если разрешение монохроматора не позволяет различить межмодовый интервал, то мы наблюдаем только огибающую линию. Пример эволюции спектра излучения многомодового лазера приведен на рис. 1.5.

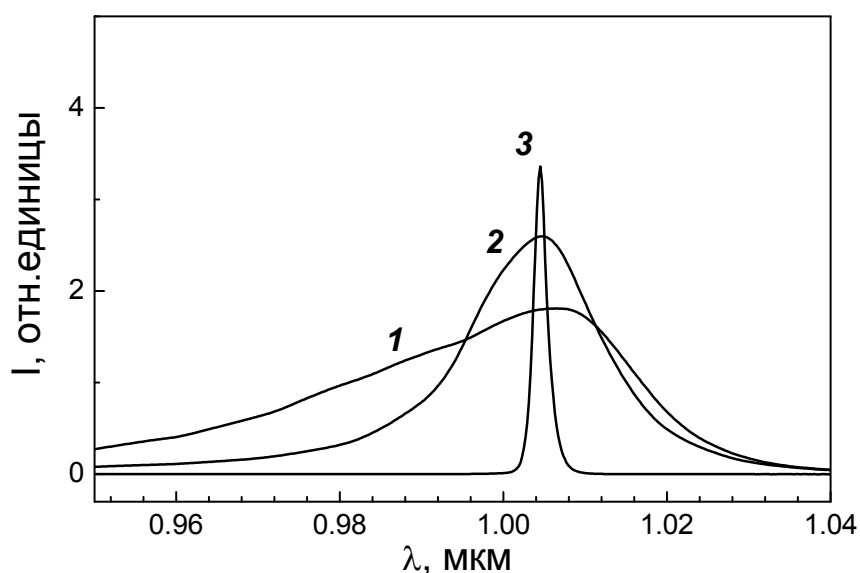


Рис.1.5. Спектральные зависимости излучения многомодового InGaAs/GaAs/InGaP гетеролазера при разных токах постоянной накачки. 1 – спонтанное излучение; 2 – усиленное спонтанное излучение; 3 – вынужденное излучение.

На рис. 1.6 показан спектр генерации многомодового лазерного диода, снятый с лучшим разрешением.

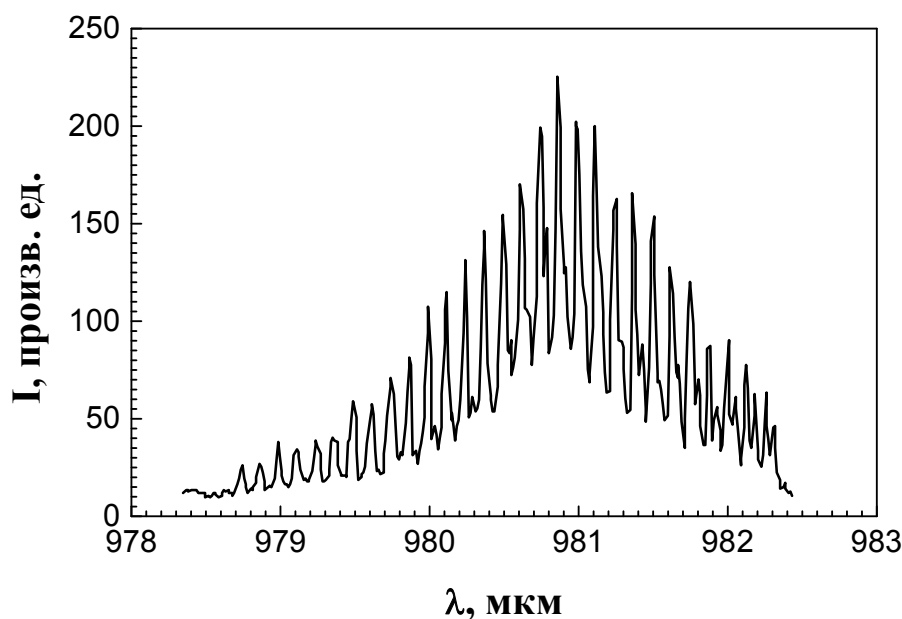


Рис.1.6 Спектральная характеристика полоскового лазерного диода. Ширина полоска – 100 мкм. Длина резонатора – 1мм.

Для многих практических применений важным оказывается угловой характер распределения интенсивности лазерного излучения полупроводникового лазера. В большинстве случаев вызывает интерес область, которая удалена от выходной грани лазера, так что лазер можно приближенно рассматривать как точечный источник излучения, характеризующийся некоторой диаграммой направленности. Такая область называется *дальним полем*, а соответствующие угловые профили интенсивности излучения – *картинами дальнего поля*.

Различают картины дальнего поля (диаграммы направленности), полученные при сканировании в плоскости p - n -перехода лазера или перпендикулярно плоскости p - n -перехода. Пример диаграммы направленности приведен на рис.1.7

Установлено, что картина излучения в дальнем поле определяется видом распределения интенсивности оптической моды в ближнем поле вдоль соответствующего направления. Более того, по картинам дальнего поля можно судить о модовом характере излучения лазера (рис.1.8).

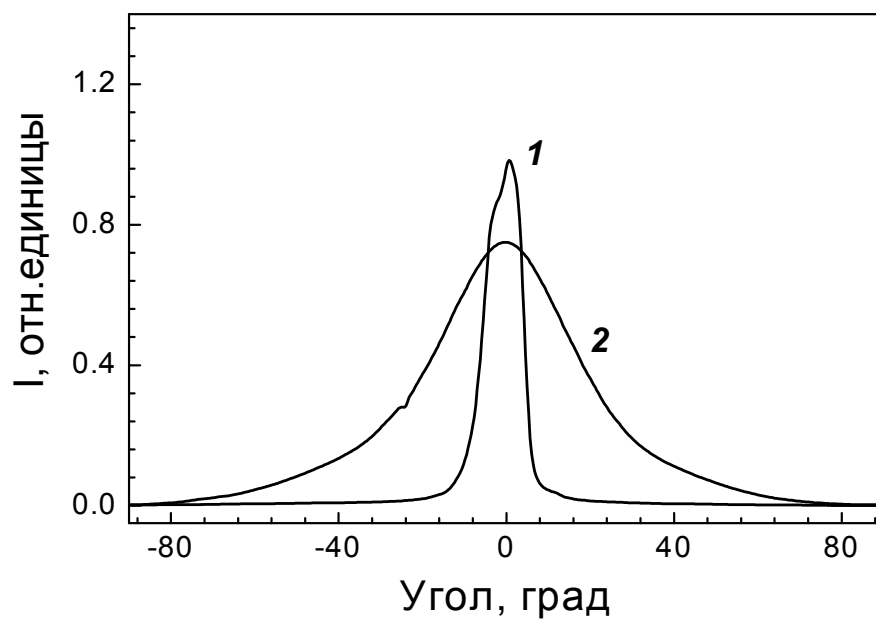


Рис. 1.7 Диаграммы направленности полупроводникового лазера в плоскости, параллельной (1) и перпендикулярной (2) p - n -переходу.

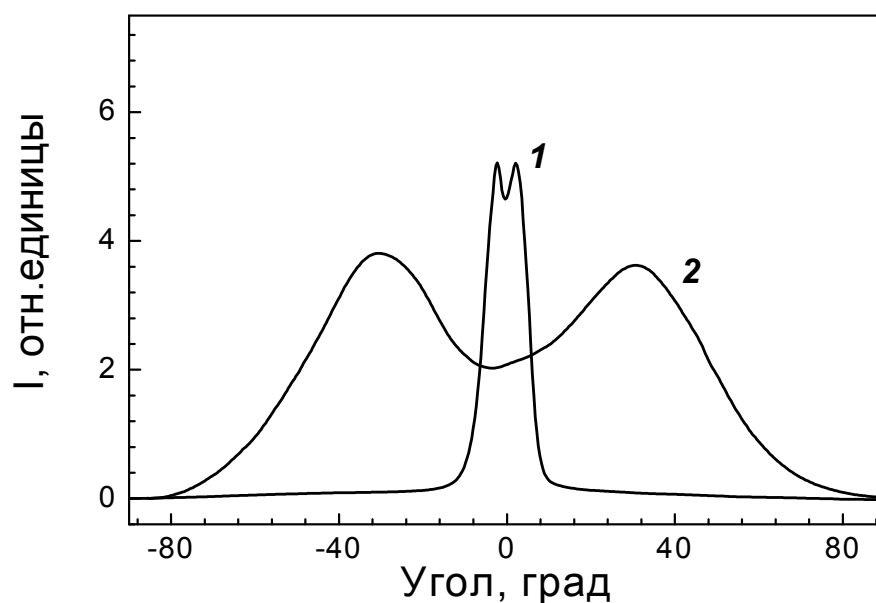


Рис.1.8 Диаграмма направленности полупроводникового лазера в плоскости, параллельной (1) и перпендикулярной (2) p - n -переходу. Полупроводниковый лазер предназначен для генерации моды 1-го порядка в плоскости, перпендикулярной p - n -переходу.

1.3.3. Методики контроля параметров лазерных диодов

Контроль основных параметров лазерных диодов сводится к измерению их характеристик апробированными методами исследования, прежде всего, снятие вольт-амперных и ватт-амперных характеристик лазеров, измерение спектра, определение его диаграммы направленности, поляризации и т.д.

Возможная схема измерения спектральных характеристик полупроводниковых гетеролазеров приведена на рис. 9.

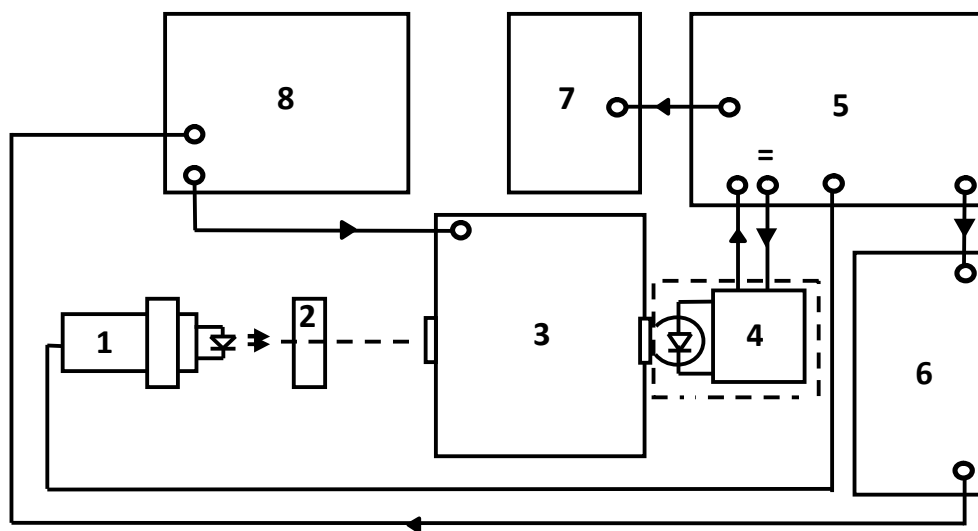


Рис.1.9 Блок-схема измерительной установки: 1 – полупроводниковый лазер на держателе с элементом Пельтье, 2 – фокусирующая линза, 3 – монохроматор МДР-23, 4 – фотодиод германиевый с предварительным усилителем, 5 – универсальный блок измерительной установки, 6 – персональный компьютер с платой ЦАП-АЦП, 7 – вольтметр универсальный цифровой В7-23, 8 – блок управления двигателем монохроматора

Излучение полупроводникового лазера, закрепленного на держателе с элементом Пельтье (1), фокусируется линзой (2) на входную щель монохроматора (3). Из выходной щели монохроматора излучение попадает на вход фотоприемника (4). Фотоприемник (германиевый фотодиод) помещен в корпус, в котором одновременно смонтирован предварительный усилитель. С предварительного усилителя фотоприемника сигнал через плату сопряжения универсального блока измерительной установки (5) подается на персональный компьютер с платой ЦАП-АЦП (6). Универсальный блок измерительной установки кроме платы сопряжения включает в себя синхронный детектор, источник питания предварительного усилителя фотоприемника, источники тока

полупроводникового лазера и элемента Пельтье с необходимыми элементами управления и коммутации. Контроль величины тока накачки, интенсивности излучения, температуры теплоотвода полупроводникового лазера осуществляется универсальным цифровым вольтметром В7-23 (7).

Программное обеспечение позволяет в автоматическом режиме сканировать выбранный спектральный диапазон с определённым шагом, учитывая уровень шума, тип фотоприемника и выбранную реплику.

Блок-схема автоматизированной измерительной установки, предназначенной для исследования диаграмм направленности полупроводниковых гетеролазеров приведена на рис. 10.

Полупроводниковый лазер, закрепленный на держателе с элементом Пельтье (1), может поворачиваться вокруг горизонтальной оси благодаря поворотному устройству (2). Излучение лазера при повороте попадает на фотоприемник (фотодиод) (3). Сигнал с фотоприемника через плату сопряжения универсального блока измерительной установки (4) подается на персональный компьютер с платой ЦАП-АЦП (7). Универсальный блок измерительной установки кроме платы сопряжения включает в себя источники тока полупроводникового лазера и элемента Пельтье с необходимыми элементами управления и коммутации.

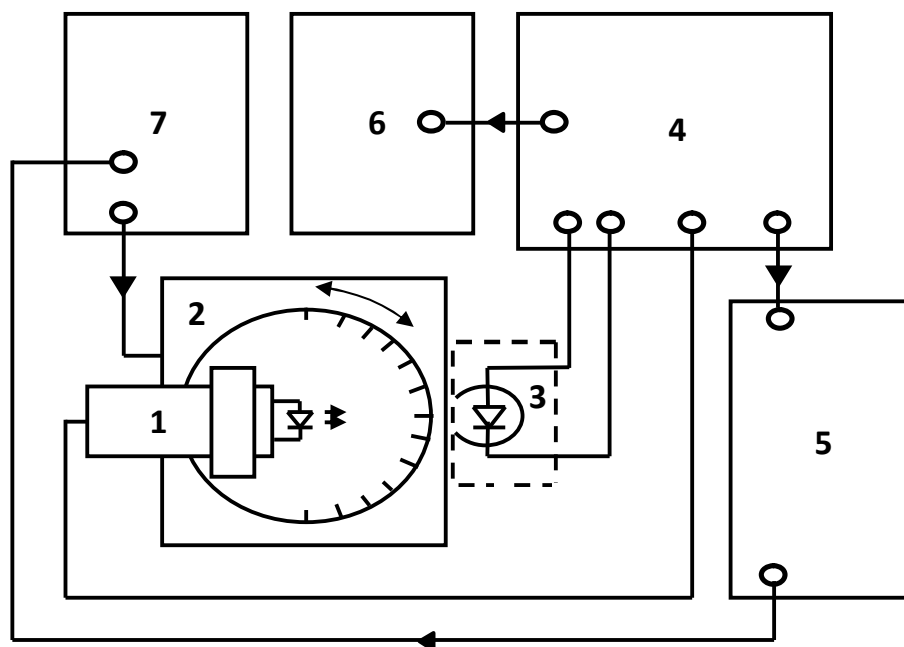


Рис. 1.10. Блок-схема измерительной установки: 1 – полупроводниковый лазер на держателе с элементом Пельтье, 2 – поворотное устройство с фотоприемником (3), 4 – универсальный блок измерительной установки, 5 – персональный компьютер с платой ЦАП-АЦП, 6 – вольтметр универсальный цифровой В7-23, 7 – блок управления шаговым двигателем.

Контроль величины тока накачки, интенсивности излучения, температуры теплоотвода полупроводникового лазера осуществляется универсальным цифровым вольтметром В7-23 (5). Программное обеспечение позволяет в автоматическом режиме осуществлять поворот полупроводникового лазера вокруг своей оси в определенном секторе с определённым шагом, учитывая уровень шума.

Для получения вольт - и ватт - амперных характеристик можно использовать установку, схема которой показана на рис. 11.

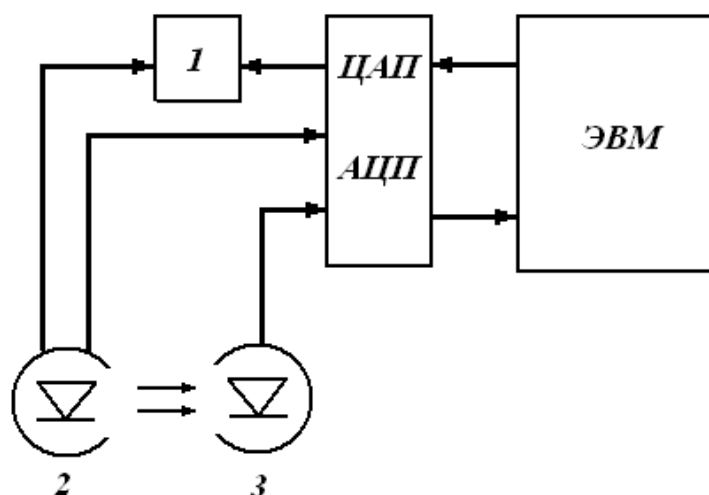


Рис.1.11. Схема установки для получения вольт - и ватт – амперных характеристик лазеров: 1 – источник тока, 2 – исследуемый лазер, 3 – калиброванный диод.

Аналого-цифровой и цифро-аналоговый преобразователи размещены на одной плате (L-card). Сигнал с ЭВМ подается на источник тока, выставяющий заданное значение тока, подающегося на исследуемый лазер. Напряжение с лазера и калиброванного кремниевого фотодиода (пропорциональное излучаемой мощности) через АЦП подается на ЭВМ. Во избежание потерь излучения лазер и диод помещаются в светонепроницаемую медную трубку. Программное обеспечение позволяет рассчитывать пороговый ток и внешнюю эффективность.

Глава 2

Технология изготовления полупроводниковых лазеров

2.1 Технологические этапы изготовления полупроводниковых лазеров

Для роста лазерных структур применяются различные эпитаксиальные методы. Исторически первым был метод жидкофазной эпитаксии (выращивания полупроводниковой структуры из расплава), с его помощью были синтезированы первые полупроводниковые гетероструктуры, в том числе первые гетеролазеры. На сегодняшний день наиболее пригодными для формирования полупроводниковых наногетероструктур являются методы молекулярно пучковой эпитаксии (МПЭ) и эпитаксии из металлоорганических соединений (МОС ГФЭ).

Молекулярно-пучковая эпитаксия представляет собой процесс эпитаксиального роста в результате взаимодействия одного или нескольких атомарных или молекулярных пучков с нагретой кристаллической подложкой в условиях сверхвысокого вакуума.

Существует несколько разновидностей молекулярно-пучковой эпитаксии. Наиболее распространенная – с твердотельными источниками – молекулярные пучки образуются в результате испарения вещества, загруженного в эффузионные ячейки, изготовленные из термически стойкого материала. Поток поступающих к подложке частиц пропорционален давлению паров в ячейке, регулируемому температурой. Плавное изменение состава, легирования и скорости роста производится изменением температуры ячейки, а резкая смена выращиваемого материала осуществляется закрытием заслонок соответствующих ячеек. В других разновидностях метода все или некоторые вещества могут подаваться в газообразном виде. Например, мышьяк вводится в систему в виде арсина (AsH_3), разлагаемого на мышьяк и водород.

Молекулярно-пучковая эпитаксия позволяет решать следующие задачи:

1. Получение кристаллических пленок высокой чистоты – за счет сверхвысокого вакуума и чистоты исходных материалов.
2. Получение резких профилей состава и легирования – вследствие малого времени срабатывания заслонок и относительно низких температур роста, препятствующих диффузии.
3. Получение сверхтонких слоев контролируемой толщины при типичных скоростях роста, составляющих несколько ангстрем в секунду.[5]

В настоящее время широко в производстве гетероструктур широко применяется метод газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОСГФЭ). Этот метод считается более производительным и не требует дорогостоящего оборудования.

В МОС ГФЭ для подвода вещества (прекурсора) к растущему слою используются летучие металлоорганические соединения. Для эпитаксии полупроводников A_3B_5 применяются такие соединения как триметилгаллий (TMGa), триметилиндий (TMIn), триметилалюминий (TMAI). Элементы пятой группы подаются в виде гидридов: арсин (AsH_3) и фосфин (PH_3).

Процесс эпитаксиального роста методом МОСГФЭ включает перенос вещества-прекурсора с помощью газа-переносчика (водород) к горячей зоне реактора возле подложки (реактор может быть горизонтальным или вертикальным), где прекурсоры разлагаются или вступают в химические реакции, в результате которых происходит эпитаксиальное наращивание кристаллической пленки на подложку. При МОСГФЭ имеют место поверхностные явления такие как адсорбция, десорбция молекул вещества-прекурсора, поверхностная диффузия, рост кристалла, десорбция продуктов реакции.

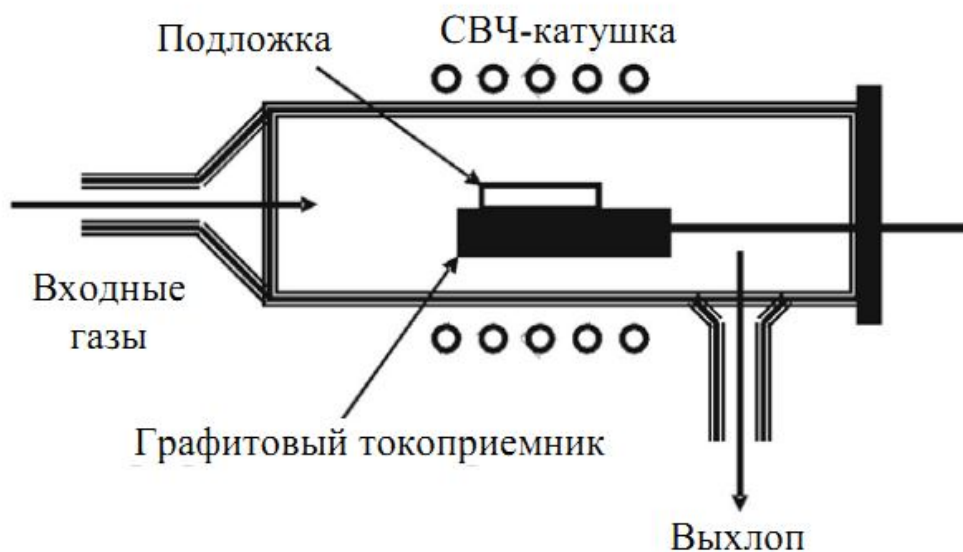


Рис.2.1 Установка МОСГФЭ с горизонтальным реактором [5].

Метод газофазной эпитаксии относится к методам с ограниченным массопереносом. В первом приближении скорость роста и химический состав по элементам III группы определяется парциальными давлениями металлоорганических реагентов в реакторе. Поскольку химические вещества, содержащие атомы V группы, являются сильно летучими, встраивание атомов V группы самоограниченно. Процесс проводится в условиях избытка атомов V группы (отношение составляет от 50 до 100), парциальное

давление атомов V группы весьма слабо влияет на скорость роста, а их избыток не встраивается в растущий слой.

Скорость роста и химический состав растущего слоя (по элементам III группы) относительно нечувствительны к температуре осаждения. Таким образом, скорости роста, а также составы тройных или четверных соединений задаются парциальными давлениями металлоорганических реагентов, а точность, с которой эти парциальные давления могут контролироваться, определяет в значительной степени воспроизводимость эпитаксиального процесса.[5]

2.2 Формирование геометрии активной области лазерного диода

Структуры, в которых существует ограничение для носителей и излучения только в направлении, перпендикулярном $p-n$ – переходу, называются лазерами с широким контактом. Но большая часть лазеров имеет **полосковую геометрию** активной области, в которой область протекания тока ограничена также и по плоскости $p-n$ – переход. Ширина полосок обычно равна 5 – 200 мкм.

С помощью создания полосковой геометрии достигается латеральная локализация энергии электромагнитного излучения за счет того, что только под полоском концентрация носителей заряда оказывается достаточно высокой для преодоления оптических потерь. Таким образом, чтобы латерально ограничить световую волну необходимо подавить боковые утечки тока. Растекание тока приводит к тому, что определенная концентрация неравновесных носителей существует не только в пределах контактного полоска, но и вне этой области. На рис. 2.2б показано схематическое изображение путей протекания тока (сплошные линии) и концентрации носителей в активной области (заштрихованная область) в лазере полосковой конструкции.[5]

На рис.2.2 представлены различные конструкции полосковых лазеров. Все они имеют свои преимущества и недостатки. Наиболее простой случай – лазер с широким полоском. Для его изготовления на пластину наносятся металлические контакты, причем верхний контакт представляет собой металлический полосок, расположенный перпендикулярно граням лазера.

Отличие конструкции полоскового лазера изображенного на рис. 2.2в состоит в том, что сильнолегированный контактный полупроводниковый слой удален в области вне металлического полоска. Это приводит к снижению латерального растекания. Иногда также удаляется часть верхнего эмиттерного слоя. Однако, в этом случае латеральное

ограничение световой волны осуществляется за счет пространственно-неоднородного оптического усиления.

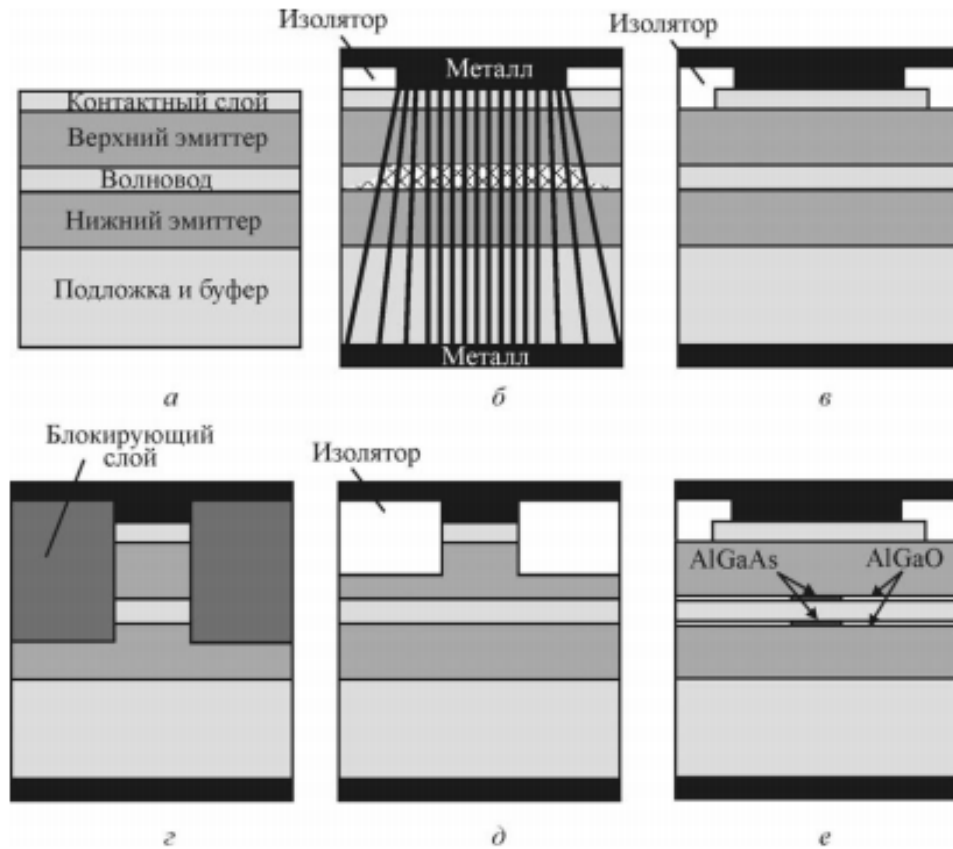


Рис.2.2 Варианты конструкции полосковых лазеров: исходная структура (а), лазеры с широким полоском (б,в), лазер с зарощенной структурой (г); лазер с гребешковым волноводом (д); лазер с селективным оксидированием (е).[5]

Наилучшее подавление растекания и наилучшее латеральное ограничение световой волны достигается в так называемой зарощенной или захороненной структуре (рис.2.2.г). Подобные структуры могут быть сформированы травлением глубоких мез – сквозь волновод и активную область лазера с последующим зарощиванием образовавшихся пустот полупроводниковым материалом с меньшим показателем преломления и большей шириной запрещенной зоны.

Конструкция с использованием глубокой мезы обычно неприемлема для лазерных структур, содержащих алюминий (AlGaAs). Вследствие высокой химической активности атомов зачастую возникают проблемы с непреднамеренным оксидированием вскрытой поверхности и интерфейсной рекомбинацией на гетерогранице зарощивания. Для таких лазеров разработана конструкция гребешкового волновода (рис. 2.2д). Такой лазер формируется травлением мелкой мезы. Здесь фронт травления не достигает волноводного

слоя и активной области, так что происходит лишь заглубливание в слой верхнего эмиттера. Поскольку не происходит вскрытия активной области, чаще всего не возникает проблем с поверхностной рекомбинацией на боковых стенках. Боковые стенки защищаются диэлектрическими слоями, которые служат для ограничения световой волны в латеральном направлении. Следует сказать, что степень растекания в гребешковом волноводе ниже, чем в зарощенной структуре.

Лазеры с селективным оксидированием (рис.2.2 е) представляют собой конструкции, в которых как для ограничения латерального растекания носителей, так и для ограничения световой волны используются тонкие оксидные слои, захороненные в толще полупроводниковой структуры. При эпитаксиальном росте лазерной структуры, в дополнение к другим слоям, выращивают один или два слоя AlGaAs с высоким содержанием Al (98%). Эти слои располагаются с одной или двух сторон активной области. Будучи помещенными в атмосферу, содержащую пары воды, быстро оксидируются, так что исходный полупроводниковый слой AlGaAs преобразуется в диэлектрический слой AlGaO.[5]

2.3 Создание омических контактов на лазерной гетероструктуре

Важным этапом в изготовлении лазерного диода является формирование омического контакта. Как известно, сопротивление таких контактов не должны зависеть от величины и направления тока. Другими словами эти контакты должны обладать практически линейной вольт-амперной характеристикой. При этом сопротивление контактов должно мало, так как последовательное сопротивление структуры в целом влияет на основные характеристики и деградационные свойства лазера. Например, изменение пороговой плотности тока в существенной степени зависит от последовательного сопротивления структуры. При малых значениях пороговой плотности тока значение приведенного КПД стремится к единице вне зависимости от значения удельного сопротивления (рис. 2.3). С другой стороны, когда значение удельного сопротивления мало (например, 10^{-6} Ом·см², что является практически недостижимым уровнем технологии), значение приведенного КПД остается приемлемо высоким в весьма широком диапазоне пороговой плотности тока. При удельном последовательном сопротивлении на уровне 10^{-4} Ом·см², соответствующем типичным экспериментальным значениям для многих полупроводниковых лазеров, для возможности достижения высоких значений КПД пороговая плотность тока не должна превышать примерно 1 кА/см².

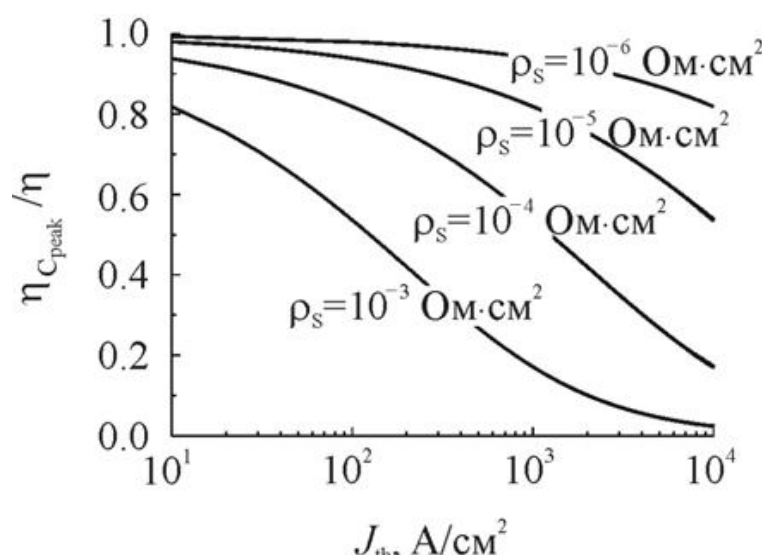


Рис.2.3. Зависимость максимального КПД лазера от пороговой плотности тока при различных значениях удельного последовательного сопротивления структуры [5].

Существует большое количество методов получения низкоомных контактов на лазерных гетероструктурах. Например, для обеспечения омичности контакта часто используется верхний слой p^+ - GaAs. Для обеспечения низкоомного контакта p^+ - поверхности с тонким слоем металла проводится диффузия Zn из обогащенного по As источника при повышенной температуре. Контакт к подложке n^+ - GaAs можно получить путем последовательного напыления слоев золота, германия и никеля с последующим отжигом в атмосфере азота или водорода при повышенной температуре. Подобный контакт дает малое контактное сопротивление за счет того, что при диффузии Ge в GaAs под контактом образуется сильнолегированная вырожденная область полупроводника. Это способствует появлению туннельной проводимости носителей заряда и, соответственно, омическому поведению контакта.

2.4 Разделение лазерной структуры на чипы

Завершающим этапом серии постростовой обработки, является разделение лазерной структуры на бруски и чипы. Операции разделения структуры можно производить как непосредственно с помощью ручного скальвателя, так и с помощью алмазного скрайбера и алмазной пилы. Во втором случае лазерная структура приклеивается воском на гибкую пластинку. У одного из краев пластины алмазным скрайбером процарапываются небольшие углубления. Легкий изгиб приводит к раскалыванию структуры вдоль плоскостей (110), перпендикулярных поверхности пластины. Для изготовления лазерных чипов, полученные в результате скалывания бруски, распиливаются затем перпендикулярно зеркалам алмазной

или проволочной пилой. На рис.2.4 представлен внешний вид бруска лазерной гетероструктуры.

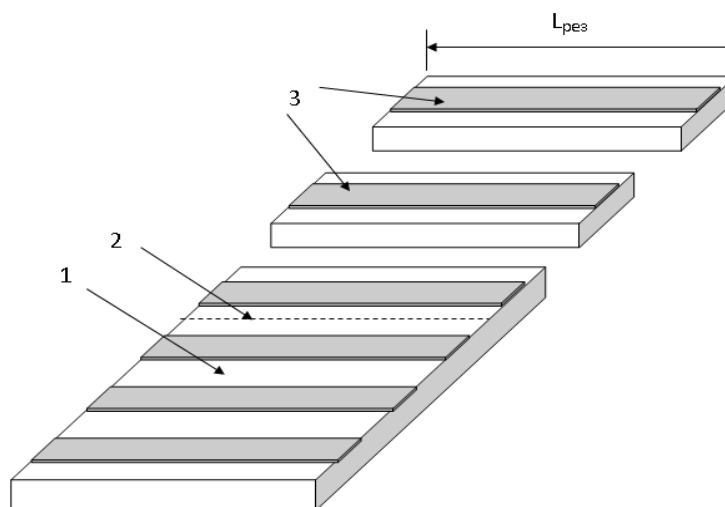


Рис.2.4 Внешний вид бруска лазерной структуры. 1 – до процесса разделения на отдельные чипы; 2 – линия раскалывания; 3 – после процесса разделения на отдельные чипы с одной активной полоской; $L_{рез}$ – длина резонатора.

2.5 Монтаж лазерных чипов на теплоотвод

Прошедшая серию постростовых этапов обработки и расколота на чипы, структура припаивается к теплоотводу. Теплоотвод в свою очередь выполняет также функцию одного из электрических контактов. Второй электрический контакт формируется с помощью металлической перемычки посредством ультразвуковой сварки или индиевого припоя через контактную площадку, установленную на теплоотвод.

Контроль качества изготовленных лазеров осуществляется с помощью измерения их электрофизических свойств: вольт-амперных характеристик, ватт-амперных характеристик, измерения КПД в зависимости от тока накачки, спектральных характеристик.

Измерение электрофизических и спектральных характеристик лазеров позволяет определить правильность соблюдения технологического процесса эпитаксиального роста структур, а также постростовых этапов подготовки.

Важной в этом плане является экспресс диагностика, которая применяется для только что выращенной структуры. Здесь измеряются вольт-амперные и спектральные характеристики. Исходя из полученных данных, принимается решение о годности структуры. Экспресс-диагностика позволяет значительно снизить брак готовых лазерных кристаллов.

Глава 3.

Процесс пайки, ее разновидности, особенности подбора припоев для различных материалов

Существуют различные способы монтажа в технологии микроэлектроники и оптоэлектроники:

- Пайка
- Сварка
- Технология С4
- Адгезионные технологии

При изготовлении полупроводниковых лазерных диодов широко распространена технология монтажа лазерных чипов на теплоотводящий элемент посредством пайки. Поэтому на понятии “пайка” мы остановимся подробнее.

3.1 Классификация видов пайки.

Вначале введем понятие процесса пайки. **Пайка** – это образование неразъемного соединения с межатомными связями путем нагрева соединяемых материалов ниже температуры их плавления, их смачивания припоем, затекания припоя в зазор и последующей его кристаллизации (ГОСТ 17325-79).

Согласно ГОСТ 17349-79 классификация способов пайки осуществляется по следующим признакам:

- удалению оксидной пленки;
- получению припоя;
- заполнению зазора припоем;
- кристаллизации паяного шва;
- источнику нагрева;
- наличию давления на паяемые детали;
- одновременности выполнения паяных соединений.

Припой может быть изготовлен заранее (готовый припой), а может образоваться в результате контактно-реактивного плавления (контактно-реактивный припой), в процессе диспергирования соединяемых металлов под действием расплава (композиционный припой), в результате высаживания жидкого металла из компонентов флюса (реактивно-флюсовый припой).

По характеру затекания припоя в зазор различают капиллярную (ширина зазора < 0.5 мм) и некапиллярную (ширина зазора ≥ 0.5 мм) пайку. При капиллярной - припой

заполняет зазор самопроизвольно под действием капиллярных сил. При некапиллярной пайке используется возможность поднятия жидкого припоя в зазорах под действием гравитации, отрицательно давления в некапиллярном зазоре (при откачке воздуха из зазора), магнитных, электромагнитных и других внешне приложенных сил.

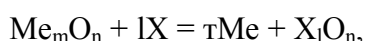
После заполнения зазора припоем паяный шов затвердевает в процессе охлаждения изделия (кристаллизация при охлаждении). При температуре выше температуры солидуса припоя (температура, при которой плавиться самый легкоплавкий компонент припоя) процесс кристаллизации шва может происходить и в результате отвода депрессата и легкоплавкой составляющей припоя из шва (диффузионная пайка).

Жидкий припой смачивает только чистую поверхность паяемого металла. В связи с этим при формировании паяного соединения необходимы условия, обеспечивающие физический контакт паяемого материала и жидкого припоя при температуре пайки. Осуществление такого контакта возможно в местах удаления с поверхности металла оксидных пленок. Удалить оксидные пленки при пайке можно с применением паяльных флюсов (флюсовая пайка), или без них [6].

К методам пайки без флюса относятся [7]:

1) пайка в активной газовой среде;

Возможность пайки в активной газовой среде (восстановительной) основана на реакциях между твердыми оксидами на поверхности паяемого изделия и окружающим его активным газом, в результате которых из оксидов восстанавливается металл, а образующийся новый продукт окисления удаляется. Такую реакцию в общем виде можно записать следующим образом:



где X — восстановитель.

Мерой способности реакции к развитию при заданных давлении p и температуре T , является величина изменения ее свободной энергии.

Положительное значение изменения свободной энергии AF_T реакции свидетельствует о том, что термодинамически реакция невозможна и протекает в направлении, обратном выбранному, т. е. данный процесс может быть реализован только при соответствующем изменении температуры T и давлении p . Отрицательное значение изменения свободной энергии AF_T реакции означает, что последняя возможна и ее завершение при заданных p и T наиболее вероятно, если изменение свободной энергии AF_T будет большой отрицательной величиной. При этом изменение свободной энергии образования входящих в реакцию элементов принимается равным нулю.

Однако пригодность активного газа для пайки металлов определяется не только термодинамическими условиями протекания реакции его взаимодействия с оксидами в сторону их восстановления, но и состоянием продуктов реакции. Если продукты реакции находятся в твердом состоянии, то они препятствуют смачиванию и растеканию жидкого припоя по паяемому материалу и активная газовая среда, несмотря на благоприятные термодинамические условия восстановления оксидов, может оказаться не пригодной для пайки.

При восстановлении оксидов под действием активных газов действует принцип Байкова, согласно которому такой процесс идет ступенчато, путем отщепления кислорода от высшего оксида к низшему или от низшего к высшему. Активные газы через поры и трещины проникают в пленку оксида и взаимодействуют с ним по всей толщине пленки. В результате этого зерно оксида может оказаться многослойным: в центральной его части зерно может состоять из высшего оксида, на границе — из восстановленного металла, а между ними — из промежуточных оксидов.

На поверхности сложнолегированных сплавов образуются, как правило, не оксиды чистых металлов, а их твердые растворы (шпинели). Теплота образования оксидов металлов может быть большей или меньшей, чем теплота образования оксидов сплавов на основе этих металлов. Соответственно этому пайка сплавов может быть труднее или легче, чем пайка чистых металлов.

2) пайка нейтральной газовой среде;

Пайку выполняют преимущественно в контейнерах, в отдельных случаях — в печах со специальным муфелем, заполняемым, инертным газом, например, аргоном. Обычно используют жесткие или мягкие контейнеры, герметизированные обваркой или резиновым уплотнением водоохлаждаемой крышки.

При введении аргона под некоторым давлением в контейнер часть кислорода вместе с воздухом вытесняется и парциальное давление кислорода в контейнере становится меньше, чем в окружающей воздушной среде.

Загрязнение проточного аргона влагой, адсорбированной на внутренних поверхностях контейнера, паяемого металла и припоя, существенно зависит от режима нагрева и способа предварительного удаления воздуха из контейнера. Наименее эффективна предварительная продувка контейнера аргоном при нормальной температуре. Нагрев контейнера без предварительной продувки аргоном с изотермической выдержкой при температуре 200— 300 °С или предварительное удаление воздуха путем вакуумирования контейнера позволяют резко сократить расход нейтрального газа при продувке контейнера и улучшить условия защиты паяемого изделия от окисления.

Пайка в инертных газах в печах со специальными муфелями отличается безопасностью, меньшим числом дефектов в изделиях, например, в среде проточного аргона, чем пайка с флюсом. Однако в условиях производства такой способ связан с большими затратами на подготовку контейнеров (продувка аргоном, вакууммирование с последующей герметизацией), высокой стоимостью чистого аргона. При этом не исключается образование в изделиях сложной конструкции «воздушных мешков» при пайке в глухие отверстия.

При диссоциации оксидов в герметизированной от воздуха нейтральной газовой среде парциальное давление кислорода около поверхности, где происходит разложение оксидов, повышается и может вызвать прекращение процесса их диссоциации несмотря на благоприятное среднее парциальное давление кислорода. Поэтому в процессе пайки в таких условиях среднее содержание кислорода будет также увеличиваться. Удаление скопившегося кислорода из мест интенсивной диссоциации оксидов при пайке в проточной нейтральной газовой среде способствует сохранению низкого парциального давления кислорода в контейнере и, следовательно, непрерывному самопроизвольному распаду оксидов.

При пайке в печах замер температуры только атмосферы печи или в контейнере недостаточен. Термопара должна плотно контактировать с паяемым изделием. Паяемые изделия в контейнерах в проточном нейтральном газе могут быть прижаты механическими прижимами и за счет разности коэффициентов линейного расширения соединяемых металлов, например, в телескопических соединениях, а также пневматическими прижимами.

Сухой чистый азот может быть использован в качестве нейтральной газовой среды для пайки обычной меди. Оксид меди (I) разлагается на воздухе только при температуре 2000 °С. В потоке сухого азота оксиды меди восстанавливаются при температуре 740—750 °С, при которой можно осуществлять пайку без опасности охрупчивания меди.

Многие сплавы и стали, легированные хромом и алюминием, можно паять при парциальных давлениях кислорода, более высоких, чем следует из теоретического рассмотрения условий равновесия для чистых металлов; это можно объяснить тремя причинами:

1. окисление сплавов в некоторых случаях протекает очень медленно, в результате чего при кратковременном процессе пайки пленка оксидов не успевает образоваться или образуется незначительной по толщине, не оказывающей заметного влияния на взаимодействие металла с жидким припоем;

2. сплошность оксидных пленок на паяемом металле существенно зависит от химического состава и структуры паяемого сплава. Поэтому окисление сплавов — более сложный процесс и полностью не отражается теорией окисления, разработанной для чистых металлов;

3. пленки оксидов на сплавах в вакууме и инертной среде не образуют сплошного слоя; через несплошности и трещины может проникать жидкий припой, смачивать паяемый металл, подплавлять его под пленкой и диспергировать ее.

3) пайка в вакууме;

Даже в объеме 1 м^3 с разрежением $1,33 \cdot 10^{-25}$ Па находятся сотни молекул газов.

Различают пайку в высоком и среднем вакууме или пайку в комбинированной атмосфере низкого вакуума (форвакуума) и паров легкоиспаряющихся металлов, обладающих большим химическим сродством к кислороду, чем компоненты паяемого сплава и припоя.

В вакууме $p = 1,33 \cdot 10^{-2}$ Па, особенно при температуре $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, большинство металлов заметно испаряется. В случае испарения в вакууме элементов из сплавов считают справедливым закон Рауля, применимый к разбавленным растворам, из которого следует, что давление пара элемента из раствора ниже давления пара чистого элемента на величину, пропорциональную концентрации растворенного вещества.

Отмечается легкая испаряемость цинка, кадмия, лития, марганца, серебра, алюминия, хрома, магния, фосфора — компонентов многих припоев для высокотемпературной пайки (рис. 32). При вакуумной пайке такими припоями для предотвращения испарения подобных компонентов используют напуск в вакуумированное пространство инертных газов, что позволяет вести процесс пайки при температуре выше $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ без опасного изменения состава припоя. С этой целью возможен также напуск в вакуумированную камеру активных газов или паров легкоиспаряющихся металлов, облегчающих процесс вакуумной пайки.

Некоторые оксиды металлов также имеют достаточно большое давление пара в вакууме. Так, в вакууме с остаточным давлением $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па оксиды CaO, SrO, BaO, V_2O_5 и MoO_2 испаряются при температуре $1000\text{—}1200 \text{ }^\circ\text{C}$, Cr_2O_3 — при температуре $> 1000 \text{ }^\circ\text{C}$, MoO_3 — при температуре $600 \text{ }^\circ\text{C}$ и W_2O_7 — при температуре $800 \text{ }^\circ\text{C}$. Оксид Al_2O_3 в этом отношении чрезвычайно устойчив. Давление пара настолько мало, что заметное испарение этого оксида происходит только при температуре, близкой к температуре его плавления ($2050 \text{ }^\circ\text{C}$). Оксиды таких элементов, как Be, Si, Mg, Zr, Cr, в вакууме с разрежением $1,33 \cdot 10^{-1}$ — $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па, начинают заметно испаряться только при температуре около $1600\text{—}2000 \text{ }^\circ\text{C}$.

Пайка металлов в вакууме с нагревом в печах может быть выполнена по одной из следующих схем.

1. Пайка в печи (например, с молибденовыми нагревателями), вакуумированное пространство в которой создается внутри камеры нагрева (фиксированный нагреватель). Преимущество печей с фиксированным нагревателем — возможность обеспечения высокого и устойчивого вакуума с остаточным давлением $1,33 \cdot 10^{-2}$ — $1,33 \cdot 10^{-1}$ Па. Недостаток таких печей — чрезвычайно медленное охлаждение паемого изделия (в течение от одного до нескольких часов) из-за низкой теплопроводности вакуумного пространства рабочей камеры печи.

2. Пайка в вакууме при независимом действии вакуумной камеры (контейнера или внутренней части изделия) и нагревателя. Этот способ позволяет быстро охлаждать изделия после пайки путем удаления их (или контейнера) из печи.

В вакууме при давлении $p = 1,33 \cdot 10^{-3}$ – $6,65$ Па можно паять медь и никель, в вакууме с $p = 1,33 \cdot 10^{-1}$ – 10^{-2} Па — титановые сплавы, высоколегированные стали и никелевые жаропрочные стали. В сплавах, содержащих значительные количества хрома, алюминия и т. п., при пайке в низком и среднем вакууме на изделие наносят тонкий слой флюса. Для этого собранное перед пайкой изделие кипятят в насыщенном растворе флюса в течение 15—25 мин. После высушивания при температуре 100—120 °С в течение 20—30 мин изделие паяют в вакууме. Флюс может быть также нанесен с помощью кисти в виде тонкого слоя жидкой пасты, уложен в неглубокие специальные пазы и т. п. При высокотемпературной пайке в вакууме значительная часть флюса испаряется.

Пары легкоиспаряющихся металлов в вакууме могут существенно влиять на процессы пайки: они могут восстанавливать оксиды на паемом металле (сплаве), связывать остатки кислорода и влаги в атмосфере, окружающей паемое изделие, предотвращать или снижать испарение одноименного металла из жидкого припоя, насыщать жидкий припой, участвовать в контактном твердожидком плавлении.

К таким металлам относятся магний, висмут, кадмий, цинк, литий, вводимые в рабочее пространство вакуумной печи при пайке алюминия; марганец, цинк, литий — при пайке сталей медью; магний — при контактно-твердогазовой пайке алюминия силумином. Пары висмута, магния, лития, цинка, кадмия способны связывать остатки кислорода, а пары лития, магния, цинка — также и воду.

В качестве защитной среды при пайке с парами металлов используют вакуум ($p = 1,33 \cdot 10^{-1}$ – 10^{-3} Па). Это тормозит рост оксидной пленки при нагреве до температуры пайки. При таком способе пайки на качество паяных соединений существенно влияют концентрация паров активных металлов, а при сложной конструкции изделий —

равномерность распределения паров. Выравнивание паров в камере пайки протекает тем быстрее, чем выше вакуум. Однако, начиная с некоторой степени разрежения, концентрация введенного пара металла может оказаться неравномерной из-за непрерывной работы вакуумного насоса и распространения молекул по законам геометрической оптики. Все это может привести к непроям в отдельных участках паяных соединений.

Равномерное распределение паров металлов, обеспечивающее высокое качество пайки и снижение расхода паров металла, возможно лишь при откачке газов из камеры нагрева до температуры выравнивания давления насыщенных паров металла с давлением газов в вакуумной камере печи. Это исключает разность давлений и перетекание паров металла. При достижении равенства между давлением паров металла и общего давления в камере пайки последняя отключается от вакуумного насоса. В результате возникают условия равномерного распределения в камере паров металла. Применение такого приема обеспечивает стабильность процесса и высокое качество пайки и экономию расхода паров металла.

Существенное значение при пайке в вакууме и инертных газах имеет величина изолированного объема вокруг паяемого изделия и присутствие оксидов на поверхности металлической паяльной оснастки: чем меньше такой объем и меньше оксидов на металлической оснастке, тем меньшее количество кислорода содержится в атмосфере вокруг паяемого изделия и, следовательно, менее развита оксидная пленка на поверхности паяемого металла. Для уменьшения изолированного объема вокруг паяемого изделия перед загрузкой в вакуумную печь или контейнер с проточным аргоном изделие помещают в специальную коробку или под колпак из коррозионно-стойкой стали. Во многих случаях без этих мер трудно обеспечить высокое качество паяных соединений из высокоактивных металлов или сплавов. При нанесении на паяемые поверхности гальванических и, особенно, термовакуумных покрытий последние лишь в известной степени изолируют паяемый металл от контакта с внешней газовой средой.

Пайка в вакууме имеет ряд преимуществ. Она обеспечивает образование более плотных и прочных швов, чем пайка в инертных и активных газовых средах, в результате дегазации жидкого припоя, исключает образование в конструкционно сложных изделиях из коррозионно-стойких сталей «воздушных мешков». При пайке сталей в вакууме исключено образование на их поверхности гидридов и нитридов и обезуглероживание. Кроме того, считают, что эксплуатационные затраты на создание вакуума (например, при электронно-лучевой пайке) в 35 раз ниже, чем при использовании инертных газов или активных газовых сред [7].

3) ультразвуковая пайка;

Принцип УЗ пайки состоит в возбуждении путем приложения механических колебаний УЗ частоты 18–70 кГц в ванне с припоем, нагретом на 20 – 50⁰С выше температуры ликвидуса, ультразвуковой кавитации. В этом случае до той же температуры от внешнего источника или непосредственно в ванне нагревают спаиваемую деталь или узел. В случае проведения операции ультразвуковой пайки в больших ваннах с расплавленным металлом, как это имеет место при УЗ пайке проволоки, нагревание самого изделия и УЗ излучателя осуществляется теплотой расплава, когда автоматически устанавливается равенство между температурой припаиваемого изделия или жидкого сплава.

При интенсивностях ультразвука более 10⁵ Вт/м² кинетическая энергия захлопывающихся пузырьков, сконцентрированная в ничтожно малом объеме, трансформируется частично в силовой импульс и частично в тепловую энергию. Из центра захлопнувшегося пузырька распространяется ударная сферическая волна, давление в которой достигает 100–150 МПа, а температура по расчетным данным – 1000⁰С и выше [8]. Кавитационные явления и микропотоки в расплавленном припое приводят к разрушению оксидных пленок на поверхности металла. Давление звукового излучения, а также акустические течения в форме микро- и макропотоков способствуют ускорению процесса смачивания поверхностей припоем [9, 10].

4) ультразвуковая сварка;

Стоит различать процесс ультразвуковой пайки и процесс УЗ сварки. Эти процессы имеют разные физико-технологические основы формирования соединений, однако из-за довольно близкого сходства наименования часто происходит подмена понятий.

Ультразвуковая сварка (УЗ сварка) – способ соединения различных материалов в твердом состоянии с помощью ультразвуковых колебаний. Соединяемые элементы следует располагать близко друг к другу, причем один из них должен быть надежно закреплен. После этого сварочный аппарат создает механическое давление на второй, подвижный контакт и формирует поток ультразвуковой энергии. Колебательные движения соединяемых деталей приводят к удалению неоднородностей и оксидных пленок с их поверхностей. Поверхности раздела кристаллов сближаются на атомное расстояние, что приводит к сильному притяжению поверхностных атомов и созданию сварного соединения без нагрева металлов до температуры плавления [11]. При этом не требуется применения расходных материалов, таких как припой или соединительные проводники. Исключается также технологический этап покрытия или очистки

поверхности, таким образом УЗ-сварка является одним из самых экологически чистых способов соединения.

К способам пайки по источнику нагрева относят нагрев паяльником, горелкой, электросопротивлением, в печи, погружением в расплавы флюса или припоя, индукционным нагревом, электролитом, лазером, потоком ионов в тлеющем разряде, инфракрасным излучением, волной припоя, теплотой конденсирования паров и др. Подробно мы не будем останавливаться на каждом из способов нагрева, так как далеко не все из них приемлемы для монтажа лазерных диодов.

Различают низко- и высокотемпературную пайку. За граничную температуру этих способов принята температура 450°C . Целесообразность такого деления обусловлена существенным отличием материалов и оснащения для низко- и высокотемпературной пайки. [6]

С целью обеспечения заданной величины паяльного зазора в процессе пайки может отсутствовать или быть приложено давление на паяемые детали (прессовая пайка).

Еще одним классификационным признаком пайки служит одновременность и неодновременность выполнения паяных соединений изделия.

На рис. 3.1 представлена классификация способов пайки по указанным признакам (ГОСТ 17349-79).

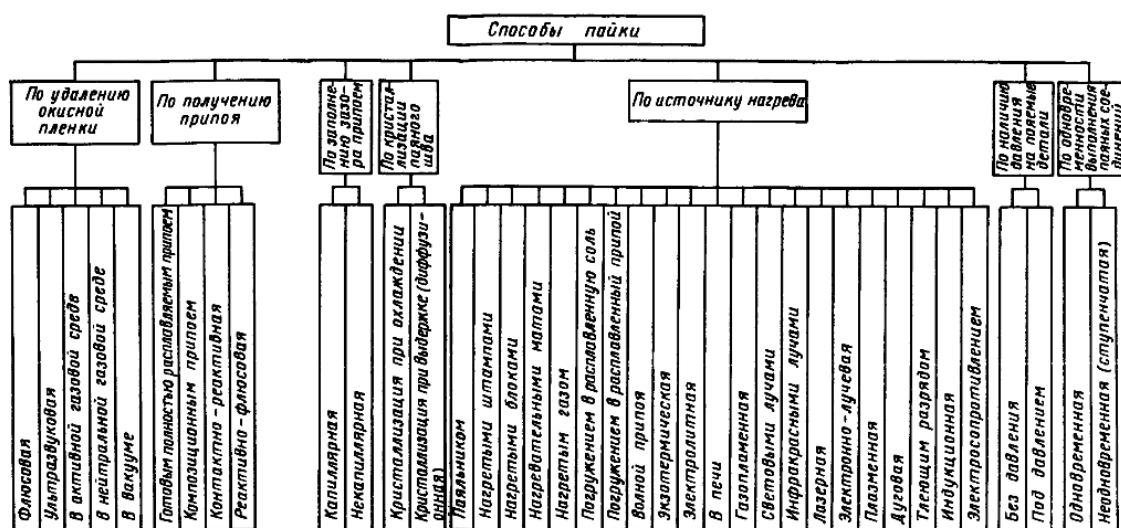


Рис. 3.1 Классификация видов пайки [12].

Образование паяного соединения сопровождается спаем между припоем и паяным материалом.

Спай - переходный слой, образовавшийся в результате смачивания при температуре пайки и последующего взаимодействия на границе "основной металл припой".

Классификация спаев:

1. Бездиффузионный - когда атомы не переходят через границу контакта.
2. Растворно-диффузионный - когда основной металл растворяется в припое и растворяет элементы припоя.
3. Контактно-реакционный - возникает без припоя за счет контактного расплавления основного металла.
4. Диспергированный - образуется между металлами не дающими между собой химического соединения, не растворимых друг в друге за счет сильного снижения поверхностного натяжения под действием припоя и дисперсированных твердых частиц.

3.2 Припои и флюсы

Одним из ключевых моментов на этапе монтажа не только лазерных чипов, но и любого другого элемента микро- и нанoeлектроники является корректный подбор присадочных материалов (припоев) и флюсов.

Как уже говорилось ранее, пайка представляет собой соединение твердых металлов при помощи расплавленного припоя, имеющего температуру плавления меньшую, чем температура плавления основного металла.

По ГОСТ 17325—79 припоем называют материал для пайки и лужения с температурой плавления ниже температуры плавления паяемых материалов.

Под флюсами понимаются химические вещества, необходимые для удаления окислов и загрязнений с поверхности спаиваемого металла, защиты его от окисления и лучшего смачивания припоем.

При выборе присадочных материалов необходимо помнить, что они должны удовлетворять следующим требованиям: высокая механическая прочность в заданных условиях эксплуатации, высокая электропроводность и теплопроводность, герметичность, стойкость против коррозии, текучесть при температуре пайки, хорошее смачивание основного металла, малая величина температурного интервала кристаллизации.

В данном учебно-методическом пособии мы ограничимся рассмотрением припоев и флюсов, применимых для пайки изделий электро- и радиоаппаратуры.

Температурный интервал плавления припоя — важнейший классификационный признак. Такой интервал ограничен температурой начала (солидус) и конца (ликвидус) плавления припоя. Согласно ГОСТ 17349-71 по температуре плавления припои подразделяются на следующие группы:

1. осололеглоплавкие $T_{пл} \leq 145^{\circ}\text{C}$,
2. легкоплавкие $145^{\circ}\text{C} < T_{пл} \leq 450^{\circ}\text{C}$,

3. среднеплавкие $450^{\circ}\text{C} < T_{\text{пл}} \leq 1100^{\circ}\text{C}$,
4. высокоплавкие $T_{\text{пл}} > 1100^{\circ}\text{C}$.

Основную группу легкоплавких присадочных материалов составляют оловянно-свинцовые припои системы Sn/Pb. Наименьшей температурой плавления (183°C) обладает эвтектический сплав (61% Sn, 39% Pb). При концентрации Sn в расплаве от 0 до 20% образуется богатый свинцом α -твердый раствор, при 97,5% – богатый оловом β -твердый раствор. В таблице 3.1 приведены примеры оловянно-свинцовых припоев.

Таблица 3.1. Примеры оловянно-свинцовых припоев [13].

Марка припоя	Состав, % Sn Свинец – ост.	Температура плавления, $^{\circ}\text{C}$
ПОС 30	олово 29-30, сурьма 1,5-2,0	183-256
ПОС 40	олово 39-40, сурьма 1,5-2,0	183-235
ПОС 61	олово 59-61, сурьма до 0,8	183
ПОС 61М	олово 59-61, сурьма до 0,8, медь 1,5-2,0.	183-185
ПОС 63	олово $63 \pm 0,5$, примеси 0,15	183-185
ПОС 90	олово 90	183-222

Недостатками припоев системы Sn/Pb является их разупрочнение и ползучесть при температурах выше $100\text{-}150^{\circ}\text{C}$. Припои ПОС 30, ПОС 40 имеют широкие температурные интервалы кристаллизации, что снижает производительность процессов пайки.

Путем введения дополнительных легирующих добавок в систему Sn/Pb получают припои с повышенной механической прочностью (Sb), пониженной температурой плавления (Bi, Cd, In), повышенной электропроводностью (Ag), пригодностью к УЗ пайке и металлизации (Zn), пайке полупроводниковых приборов (In, Au, Ga) и др. (таблица 3.2)

Наиболее распространенным припоем для монтажной пайки является оловянно-свинцовый припой ПОС 61, который отличается низкой температурой плавления, узким интервалом кристаллизации, хорошей жидкотекучестью и низким электрическим сопротивлением.

Обогащенный медью припой ПОС 61М предназначен, в основном, для ручной пайки, так как он замедляет эрозию паяльного жала. При монтаже штепсельных, высокочастотных и коаксиальных разъемов, кабелей, требующих повышенного нагрева, используют малооловянистые припои ПОС 40, ПОС 30. Пайку и лужение термочувствительных элементов ведут особолегкоплавкими припоями ПОСК 50, ПОСВ 50, ПОСВ 33. Пайку деталей с покрытиями, содержащими серебро, золото, индий, палладий проводят припоями, в состав которых входят эти элементы [13].

Таблица 3.2 Примеры специальных припоев [13]

Марка припоя	Состав, % Sn Свинец – ост.	Температура плавления, °С
ПОССу 10-2	олово 8-10, сурьма 2-3	268-285
ПОСК 50-18	олово 50, кадмий 18	142-145
ПОСВ 33	олово 33, висмут 33	120-130
ПОСВ 50 (сплав Розе)	олово 25, висмут 50	90-92
ПОСВ 50К (сплав Вуда)	олово 12,5, кадмий 12,5, висмут 50	66-70
ПОИН 50	олово 50, индий 50	117
ПСр 45	серебро 45, медь 30, цинк 25	660-725
ПСр 2,5	олово 5, серебро 2,5	295-305
ПСр 1,5	олово 15, серебро 1,5	265-270
ПОССр 2	олово 60, серебро 2	169-173
П150А	олово 40, цинк 3,5	150-165

ПОЦ 10 (П200А)	олово 90, цинк 10	199-210
ПОЦ 20 (П250А)	олово 80, цинк 20	200-250
П300А	кадмий 40, цинк 60	266-310
ПОС 3л3	олово 60, золото 3.0	180-215
ПГлМ 65	галлий 65, медь 34-36	50

Замена традиционных типов припоев на материалы, не содержащие свинца, является не только веянием времени, но и требованием международных комиссий по экологии. Среди термических, механических, усталостных и других свойств припоев одним из самых важных является температура плавления. В таблице 3.3 представлены некоторые из широко известных типов бессвинцовых припоев.

Таблица 3.3 Примеры некоторых бессвинцовых припоев [14].

Состав припоя	Тпл, °С	Свойства
48 Sn/52 In	118	Низкие температура плавления и прочность, высокая стоимость
42 Sn/58 Bi	138	Стандартный состав, доступность зависит от доступности висмута
91 Sn/9 Zn	199	Высокая степень шлакообразования
93,5 Sn/3 Sb/2 Bi/1,5 Cu	218	Высокая прочность
95,5 Sn/3,5 Ag/1 Zn	218-221	Высокая прочность и устойчивость к термической усталости
99,3 Sn/0,7 Cu	227	Высокая прочность и высокая температура плавления
95 Sn/5 Sb	232-240	Высокое сопротивление сдвигу, термоустойчивость

65 Sn/2,5Ag/10 Sb	233	Высокая температура плавления
97Sn/2Cu/0,8 Sb/0,2 Ag	226-228	Высокая температура плавления
96,5 Sn/3,5 Ag	221	Высокая прочность

Для низкотемпературных применений определённое признание получили припой, содержащие индий, предельно допустимая температура которых не превышает 150 — 250⁰С. Так, многими компаниями используется припой, содержащий 52% In и 48% Sn, поскольку он обеспечивает лучшие характеристики при повторной пайке в процессе ремонта или переделки. Поскольку температура плавления этого припоя составляет 118⁰С, повторная пайка при более низкой температуре может производиться многократно без риска теплового повреждения. Если платы покрыты золотом в качестве антиоксиданта, то использование припоя с индием предотвращает выщелачивание золота [14]. Однако Недостатками припоев с высоким содержанием индия является низкая температура плавления (120— 156⁰С), низкая прочность индия, повышенная химическая активность к большинству металлов анизотропия теплового расширения индия.

Тепловое расширение олова и индия, имеющих тетрагональную кристаллическую структуру, крайне анизотропно: температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) вдоль главной оси кристалла примерно в 2 раза больше ТКЛР в направлении, перпендикулярном главной оси. Механические напряжения, обусловленные анизотропией ТКЛР зерен олова и изменением температуры, довольно велики.

В настоящий момент не существует бессвинцовых припоев, полностью заменяющих свинцовосодержащие, хотя некоторые производители описывают свои припои как «почти идентичные». Даже в этом случае для повторной пайки требуется температура нагрева ~ 400⁰С. Для некоторых применений эта температура может оказаться слишком высокой и вызвать тепловое повреждение.

В технологии пайки элементов полупроводниковой электроники наибольшее распространение получили оловянно-свинцовые припои (ПОС). Они обладают хорошим смачиванием некоторых металлов (меди, никеля, золота, серебра) и невысокой температуре пайки (190—250⁰С). Существенным недостатком этих припоев является их активное физико-химическое взаимодействие как в расплавленном состоянии, так и в твердой фазе с рядом металлов, применяемых как в компактном виде (пластинки, проволочки) так и в виде тонких покрытий из Au, Ag, Pd, Pt, Cu, Ni, наносимых на конструкционный материал от 1 до 10 мкм. Продукты взаимодействия припоев с этими

металлами, т.е. интерметаллические соединения (особенно в виде сплошной прослойки толщиной более 3—5 мкм), могут значительно снизить прочность межсоединений [15].

Для успешного проведения операции пайки применяют флюсы, которые должны удовлетворять следующим требованиям:

- иметь температуру плавления ниже температуры плавления припоя;
- полностью растворять окислы основного металла, но не образовывать с ним трудноудаляемых химических соединений;
- остатки флюса должны легко удаляться с поверхности основного металла после пайки и не вызывать коррозии паяного соединения;
- флюс и продукты его разложения при выполнении пайки не должны выделять удушливых или вредных газов, т.е. флюс должен быть термически стабилен в заданном интервале температур.

По воздействию на материал, подвергающийся пайке, флюсы подразделяют на несколько групп.

1) химически активные, растворяющие пленки окиси, а часто и сам металл;

Химически активные флюсы (кислотные)— это флюсы, имеющие в большинстве случаев в своем составе свободную соляную кислоту. Существенным недостатком кислотных флюсов является интенсивное образование коррозии паяных швов.

К химически активным флюсам относятся собственно активные и активированные флюсы:

- **Активные**, или **кислотные**, флюсы готовят на основе активных веществ — соляной кислоты, хлористых и фтористых металлов и т. д. Эти флюсы интенсивно растворяют окисные пленки на поверхности металла, благодаря чему обеспечивается хорошая адгезия, а, следовательно, высокая механическая прочность соединения. Остаток флюса после пайки вызывает интенсивную коррозию соединения и основного металла. Применяют эти флюсы только в том случае, когда возможна тщательная промывка и полное удаление их остатков. При монтажной пайке электрорадиоприборов применение активных флюсов категорически запрещено.

- **Активированные** флюсы готовят на основе канифоли с добавкой активизаторов — небольших количеств солянокислого или фосфорнокислого анилина, салициловой кислоты, солянокислого диэтиламина и т. п. Высокая активность некоторых активированных флюсов позволяет производить пайку без предварительного удаления окислов после обезжиривания.

2) химически пассивные, защищающие лишь спаиваемые поверхности от окисления.

Химически пассивные флюсы - это бескислотные флюсы, в большинстве случаев не вызывающие коррозии паянного соединения и не требующие обязательно смывания. Исключением является пайка изделий оптоэлектроники (полупроводниковых лазерных чипов и светоизлучающих диодов), где остатки флюса могут вызвать загрязнение излучающих граней прибора.

К химически пассивным флюсам относятся бескислотные и антикоррозийные флюсы:

- **Бескислотными** флюсами и называют канифоль и флюсы, приготовляемые на ее основе с добавлением неактивных веществ (спирта, глицерина).

- **Антикоррозийные** флюсы получают на основе фосфорной кислоты с добавлением различных органических соединений и растворителей, а также на основе органических кислот. Остатки флюсов не вызывают коррозии [16].

В зависимости от температурного интервала активности флюсы подразделяются на низко- и высокотемпературные. В таблице 3.3 приведены некоторые примеры флюсов для пайки на основе канифоли. Достоинством таких флюсов является нетоксичность, отсутствие коррозионного действия, длительная сохраняемость. Недостатки: малая активность, трудность удаления смолистых остатков, пары канифоли необходимо удалять с рабочего места при помощи местной вытяжной вентиляции.

Таблица 3.3 Примеры паяльных флюсов [17].

Марка флюса	Химический состав, %	Область применения
ФКСп	Канифоль сосновая 10-40, Спирт этил. - ост.	Некоррозионные смоло-содержащие флюсы для пайки и лужения $\Delta T_{\text{ф}} = 200-300^{\circ}\text{C}$
ФКТ	Канифоль сосновая 10-40, Тетрабромид-дипентен 0,1 Спирт этил. – ост.	
ФКТС	Канифоль сосновая 15-30, Салициловая кислота 3-3,5, Триэтаноламин 1-1,5 Спирт этил. - ост.	Смолосодержащий флюс для монтажной пайки при условии полного удаления остатков флюса
ЛТИ 120	Канифоль сосновая 20-25, Диэтиламин солянокислый 3-5, Триэтаноламин 1-2, Спирт-ост.	Пайка и лужение с полным удалением остатков

ФТБ	Бензойная кислота 4-4,5, Триэаноламин 1-1,5 Спирт этил. - ост.	Водорастворимый флюс для механизированной пайки изделий
ФТС	Кислота салициловая 4-4,5, Триэаноламин 1-1,5 Спирт этил. - ост.	Пайка печатных и многослойных плат $\Delta T_{\text{ф}} = 225 - 325^{\circ}\text{C}$
ФГСп	Гидразин солянокислый 2-4, Глицерин 25-30, Спирт этиловый ост.	Пайка и лужение деталей бытовых ИЭ
ФСкПс	Семикарбазид гидрохлорид 3- 5,Полиокс- 100 27-37, Глицерин ост.	Лужение печатных плат и выводов элементов с удалением остатков флюса
ФДФс	Диэтиламин солянокислый 20- 25, Кислота ортофосфорная 20, Этиленгликоль - ост.	Пайка деталей из черных и цветных металлов с удалением остатков.
34 А	Хлористый калий - 50 Хлористый литий - 32 Фтористый натрий -10 Хлористый цинк - 8	Пайка алюминиевых и титановых сплавов $\Delta T_{\text{ф}} = 415 - 35^{\circ}\text{C}$
Ф370А	Калий хлористый 51-46 Литий хлористый 36-39 Натрий фтористый 4-5 Кадмий хлористый 9-10	Пайка алюминиевых и титановых сплавов $\Delta T_{\text{ф}} = 360 - 380^{\circ}\text{C}$
ФТБф	Кадмий борфтористый 9-11 Цинк борфтористый 2,5-3,5 Аммоний борфтористый 4,5-5,5 Триэаноламин ост.	Пайка деталей из алюминиевых сплавов $\Delta T_{\text{ф}} = 270 - 350^{\circ}\text{C}$

Для повышения активности флюсов в их состав вводят активирующие добавки, которыми являются: анилин $\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$, гидразин, триэаноламин $\text{N}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH})_3$, солянокислый диэтиламин $(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{NHCl}$, а также органические кислоты: салициловая, адипиновая, щавелевая, лимонная, молочная и др. При введении активаторов стремятся к тому, чтобы в температурном интервале пайки добавки со щелочными свойствами

(триэтаноламин) нейтрализовали остатки веществ, имеющих кислотные свойства (салициловая кислота, солянокислый диэтиламин и др.).

Для высокотемпературной пайки используют буру – обезвоженный тетраборнокислый натрий $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$. Наиболее низкие температуры плавления среди боратных флюсов имеют системы $\text{B}_2\text{O}_3 - \text{N}_2\text{O} (\text{B}_2\text{O}_3)_2$, содержащие 15–20% борного ангидрида ($570\text{--}650^\circ\text{C}$). Для пайки алюминиевых и магниевых сплавов применяется легкоплавкая эвтектика солей $\text{KCl}:\text{LiCl}:\text{NaCl}$, которая обеспечивает хорошую жидкотекучесть при низких температурах ($450\text{--}500^\circ\text{C}$). Такие флюсы обладают высокой химической активностью, поэтому их остатки после пайки должны удаляться особенно тщательно [17].

Вообще же подбор или создание того или иного флюса зависит от выбора присадочного материала, материала основания и паяемого элемента, а также особенностей технологического режима пайки и часто является «ноу хау» предприятия, изготавливающего прибор.

Глава 4.

Особенности технологического процесса монтажа лазерных кристаллов

4.1 Выбор материала теплоотвода

Несмотря на достаточно высокий коэффициент преобразования электрической энергии в световую (более 50%), серьезной проблемой в технологии изготовления полупроводниковых лазеров остается создание условий обеспечения эффективного отвода тепла из активной области лазерного кристалла. Тепловая энергия в кристалле выделяется вследствие безызлучательной рекомбинации инжектированных в активную область носителей, их термализации и поглощения излучения в пассивных областях кристалла, а также за счет джоулевых потерь при протекании тока накачки по объему полупроводника и токопроводящим контактам [18, 19].

В реальных полупроводниковых лазерах КПД составляет около 50% - 60%, поэтому примерно 40% - 50% подводимой к полупроводниковому кристаллу электрической энергии тем или иным способом превращается в тепловую энергию, в результате чего происходит разогрев активной области лазерного кристалла. Повышение температуры активного слоя в свою очередь приводит к снижению внутренней квантовой эффективности, уменьшению усиления, повышению порогового тока, снижению мощности излучения и сдвигу длины волны. Кроме того, с повышением рабочей температуры активной области лазерного кристалла снижаются надежность и долговечность лазера.

При рассмотрении отвода тепла из лазерного кристалла в окружающую среду учитываются особенности задачи, состоящие в том, что область, в которой выделяется достаточно большая тепловая энергия, мала по сравнению с теплоотводящими элементами. Поэтому при разработке технологических процессов изготовления полупроводниковых лазеров необходимо учитывать требования, предъявляемые к материалам, форме, размерам и состоянию поверхности теплоотводов.

Необходимо также обеспечить выбор надежных и долговечных материалов припоев, подходящих для монтажа лазерного кристалла на теплоотвод, а также режимов и условий монтажа. Технологический режим монтажа кристалла на теплоотвод должен отвечать условиям, при которых механические напряжения либо не возникают, либо сведены к минимуму (минимальная разница ТКЛР используемых материалов). [20]

Помимо минимального различия ТКЛР по отношению к материалу паяемого элемента корректный выбор материалов теплоотвода и припоя заключается в наличии высокой

электро- и теплопроводности, а также низкой токсичности и стоимости используемых материалов. В таблице 4.1 приведены примеры основных конструкционных материалов применяемых в изделиях электроники и оптоэлектроники.

Таблица 4.1. Основные материалы электроники и оптоэлектроники.

Материалы	Температура плавления, °С	ТКЛР, $\cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Теплопроводность при 20°С, кал/см•с•град
Диэлектрики			
Поликор	2 050	6,9	0,055
А-995	2 050	6,2	0,04
Брокерит	2 570	--	0,4
Окись бериллия	2 570	6,2	0,55
Сапфир	2 050	6,05–7,08	0,082
Ситалл СТ-36	> 1 200	5,7	0,008
Кварцевое стекло	1 500	0,51	0,0028
Монокристаллический кварц	1 500	6,0–7,0	0,0035
Феррит 10СЧ6	--	4,9—6,1	0,009
Полиимид	600	30	--
Полупроводники			
Кремний	1 412	3,0	0,2—0,26
Германий	936	6,2	1,14
Арсенид галлия	1 238	6,2	0,1
Металлы и сплавы			
Алюминий	660	24,3	0,538
Медь	1 083	17,3	0,94
МД15НП		6,2	
Молибден	2 630	5,4	0,382
Вольфрам	3 380	4,6	0,4
Никель	1 453	13,4	0,22
Ковар 29НК	1 450	5,4	0,046
Фени-43Н	1 440	6,4	0,036

Из таблицы видно, что монокристаллический кремний целесообразнее паять с вольфрамом, хотя ТКЛР последнего не полностью соответствует ТКЛР кремния и с понижением температуры до -100°C разница ТКЛР возрастает до $2,8 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$. Германий обычно паяют с коваром. Однако ТКЛР германия и арсенида галлия лучше согласован с ТКЛР сплава МД15НП, поэтому последний применяют для соединения с полупроводниками.

Металлизированная бериллиевая керамика также используется в полупроводниковых устройствах, в частности, она может служить в качестве теплоотводящего основания для полупроводниковых лазеров и корпуса для мощных транзисторов. Преимуществом бериллиевой керамики перед другими керамиками является ее высокая теплопроводность. Кроме того, она имеет ТКЛР, равный ТКЛР германия и арсенида галлия и незначительно отличающийся от ТКЛР кремния. Однако бериллиевая керамика используется ограничено из-за высокой стоимости и большой токсичности в процессе обработки. Если для германия и арсенида галлия существуют металлы и диэлектрики, ТКЛР которых хорошо согласован с ТКЛР этих полупроводников, то для кремния таких материалов еще не создано.

Несмотря на заметное различие между ТКЛР меди и полупроводникового лазерного чипа наиболее часто используются медные теплоотводы, представляющие собой медный параллелепипед с отверстиями для крепления (рис. 4.1). Теплоотводы из меди обычно в несколько раз превосходят по размерам охлаждаемый элемент. Применение таких теплоотводящих элементов позволяет достичь эффективного охлаждения, однако в случае микроминиатюрных полупроводниковых приборов площадь контакта теплового экрана оказывается настолько малой, что рассеяние тепла теплоотводами из такого материала иногда оказывается недостаточным.

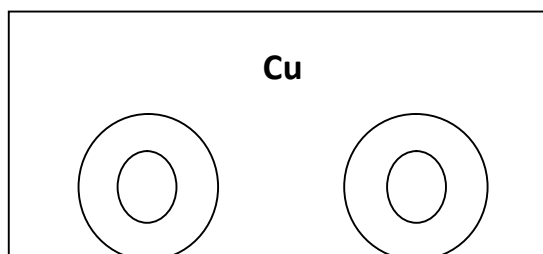


Рис. 4.1 Конструкция медного теплоотвода

В последнее время все более широкое применение находят алмазные теплоотводы, основанные на высокой теплопроводности алмаза [21]. Тепловая проводимость алмаза в

зависимости от его разновидностей в 2–5 раз превосходит этот параметр для меди (таблица 4.2)

Таблица 4.2. Теплопроводность алмазов и других материалов. [21]

Материал	Температура, °С	Теплопроводность, Вт/(мК)
Алмаз	20	2000
Медь	20	384
Алюминий	20	209
Сталь	20	47
Карбид кремния	40	21,5
Окись алюминия	100	6,9

Основным несущим слоем алмазного теплоотвода (рис. 1) является медный хладопровод, адгезионными слоями являются карбид титана или титан, диэлектрическим слоем служит алмазоподобная пленка (АПП), а токопроводящим слоем является никель или монель (NiCu — 18%). Использование монеля обусловлено тем, что никель обладает магнитными свойствами, поэтому его нельзя использовать в установках магнетронного напыления, а добавление 18% меди позволяет использовать монель в установках магнетронного напыления, не ухудшая характеристик никеля.

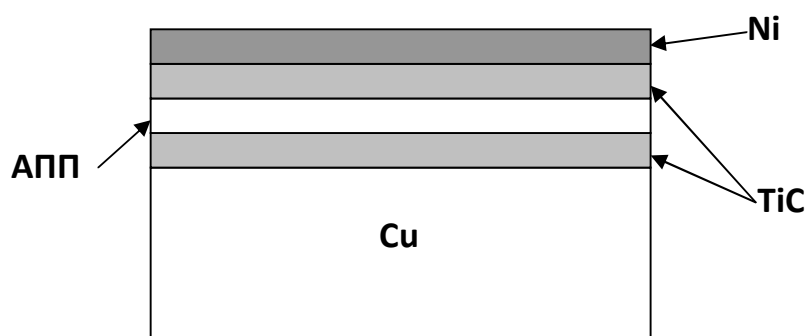


Рис.4.2. Конструкция алмазного теплоотвода.

Как показали данные работы [22] применение алмазных теплоотводов позволяет значительно увеличить мощностные характеристики лазерных диодов (рис.4.2)

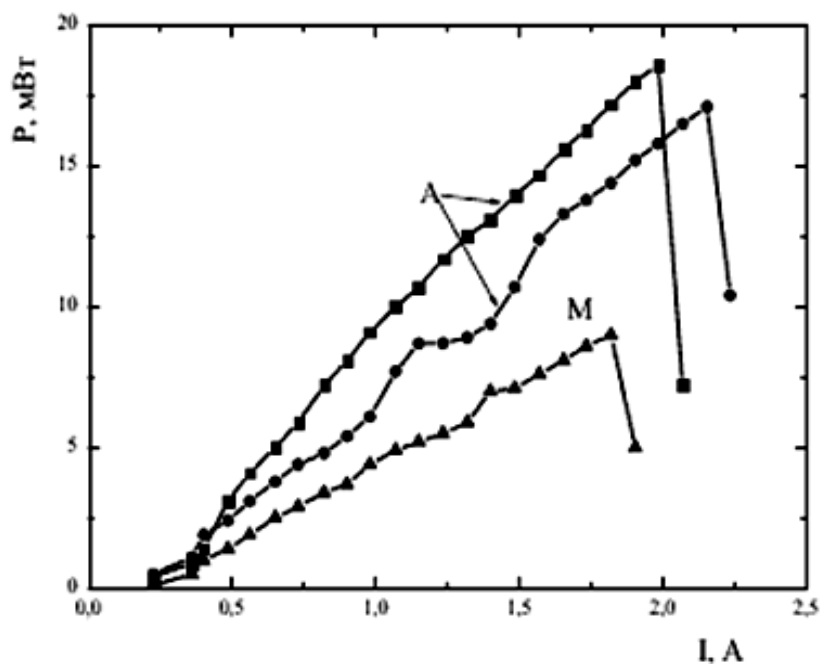


Рис.4.3. Ватт-амперные характеристики лазерных диодов, собранных на алмазных основаниях (А) и медных хладопроводах (М) [22].

К сожалению, несмотря на очевидные преимущества алмазных теплоотводов, они все еще проигрывают медным ввиду высокой стоимости и сложности предварительной подготовки, необходимой для монтажа полупроводникового кристалла, из-за низкого коэффициента теплового расширения алмаза и возникновения значительных механических напряжений в кристалле.

Как уже было сказано, наиболее распространенным теплоотводом является медный. Кроме функции передачи тепла из лазерного кристалла в окружающую среду теплоотвод выполняет функцию токоподводящего контакта. Второй токоподводящий контакт к лазерному кристаллу представляет собой проволочный вывод припаянный или приваренный к обеспечивающей омический контакт металлизированной грани кристалла. Поскольку размеры самого лазерного кристалла и площадь выделения тепла малы, то теплоотвод позволяет эффективно выводить тепло от активной области лазера в окружающую среду. Для каждой конкретной конструкции полупроводникового лазера предъявляются требования к материалам, форме, размерам и состоянию поверхности теплоотвода. Также определяется способ отвода тепла: конвективный, кондуктивный или смешанный. Определяются необходимые свойства теплоносителей в случае активного конвективного охлаждения.

В работе [20] проводятся расчеты, которые позволяют определить параметры теплоотводов разных конструкций.

Для решения такой теплофизической задачи необходимо решить уравнение теплопроводности:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(k \nabla T) = Q \quad (4.1)$$

ρ – плотность, C -теплоемкость, k -теплопроводность материалов, Q -плотность выделяемой тепловой энергии. Граничные условия для каждого случая выбираются в соответствии с требованиями передачи тепла в окружающую среду. В случае кондуктивного теплообмена рассматриваются граничные условия первого и второго рода. Когда необходимо поддерживать постоянную температуру на одной грани кристалла применяется граничное условие первого рода: $T_b = \text{const}$. Если известно распределение плотности теплового потока на границе, то применяется граничное условие второго рода. В других случаях, когда охлаждение задается за счет конвекции, используется граничное условие третьего рода.

$$-k \nabla T = g \quad (4.2)$$

где $g = \alpha_t (T_w - T_{liq})$ -тепловой поток на границе, α_t - коэффициент теплопередачи[23].

Для теплоотводов с принудительным охлаждением жидкостным теплоносителем скорость движения в микроканале определяется уравнением Навье-Стокса для несжимаемой жидкости [23,24]:

$$\tilde{\rho} \frac{dU}{dt} = \eta \nabla^2 u - \nabla P \quad (4.3), \text{ где}$$

η – динамическая вязкость жидкости, P -перепад давлений на входе и выходе микроканала, $\tilde{\rho}$ - плотность теплоносителя. Учет переноса тепла жидкостью осуществляется конвективным-кондуктивным способом осуществляется решением уравнения баланса тепловой энергии [23,24] совместно с уравнением (4.2).

$$k \nabla^2 T = \tilde{\rho} \tilde{C} (u \nabla) T \quad (4.4),$$

где \tilde{C} – теплоемкость жидкости .

Микроканал движения теплоносителя считается симметричным относительно центральной оси (или плоскости), а зависимость скорости движения на входе этого микроканала от поперечной координаты параболической:

$$U = U_0 \frac{y}{d_m} \left(1 - \frac{y}{d_m}\right) \quad (4.5),$$

d_m - ширина микроканала; $U_0 = \text{const}$.

На входе микроканала задается постоянное значение температуры теплоносителя:

$T=T_{in}$. На выходе канала используются граничные условия бесприпятственного движения жидкости и считается, что конвективный теплообмен гораздо больше кондуктивного:

$$P=0, ut=0, n\nabla T=0,$$

n и t – нормальный и тангенциальный единичные векторы по отношению к плоскости сечения на выходе микроканала.

Решение уравнений (4.3) и (4.4) с указанными граничными условиями позволяют определить коэффициент теплосъема на границах микроканала при заданных параметрах теплоносителя. Подставив найденные значения коэффициента теплосъема в граничные условия при решении уравнений теплопроводности (4.1) определяют тепловые характеристики теплоотводов в каждом конкретном случае применения лазеров.

Напряжения, возникающие при монтаже из-за несогласованных коэффициентов термического расширения теплоотвода и лазерного кристалла, являются определяющими факторами, влияющими на надежность и долговечность полупроводникового лазера.

Решение задачи механического согласования полупроводниковых лазерных кристаллов с металлическими теплоотводами позволяет определить требования к технологическим процессам и материалам, а также к конкретной конструкции лазерного диода.

Сотношение между тензором напряжений и тензором деформаций с учетом тепловых эффектов имеет следующий вид [25,26]:

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{(1+\nu)} (\varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} \delta_{ik}) - \frac{E\alpha\Delta T}{3(1-\nu)} \delta_{ij} \quad (4.6)$$

где

$$\delta_{ij} = \begin{pmatrix} \delta_{xx} & \delta_{xy} \\ \delta_{yx} & \delta_{yy} \end{pmatrix}$$

-компоненты тензора напряжений на плоскости;

$$\varepsilon_{ij} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} \end{pmatrix}$$

-компоненты тензора деформаций, связанные для двумерного случая с компонентами

вектора смещения u_x, u_y соотношениями:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \quad \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)$$

($\varepsilon_{ii} = \varepsilon_{xx}$ при $i=j=1$; $\varepsilon_{ii} = \varepsilon_{yy}$ при $i=j=2$)

E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона, $\Delta T = T_{melt} - T$; δ_{ij} – символ Кронекера.

Уравнение равновесия с учетом напряжений за счет тепловых эффектов имеет вид [25,26]:

$$\frac{\partial \delta_{ij}}{\partial x_i} - \frac{E}{3(1-2\nu)} \frac{\partial(\alpha \Delta T)}{\partial x_i} = 0 \quad (4.7)$$

Значения напряжений и деформаций в окрестности каждой точки в поперечном сечении конструкции лазера (кристалл, припой, теплоотвод) задаются решениями уравнений (4.6) и (4.7) совместно с условием совместимости деформаций (условие Сен-Венана) [26]

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{ij}}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{ij}}{\partial x_j^2} = \frac{\partial^2 \varepsilon_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (4.8)$$

и условием отсутствия внешних нагрузок.

Таким образом, для известных параметров материалов и заданной конструкции лазера можно рассчитать возникающие при его охлаждении (после присоединения кристалла к теплоотводу) напряжения и деформации [20].

4.2 Температурно-временные характеристики технологии монтажа

Наиболее распространенным низкотемпературным припоем для осуществления монтажа лазерного чипа к медному теплоотводу является мягкий индий. Основным недостатком индия является прорастание «вискеров» вдоль силовых линий, приводящее к закорачиванию р-п перехода в высокотемпературных деградационных тестах. Несмотря на все известные недостатки, больше половины фирм производителей используют индий в качестве припоя для монтажа, как одиночных лазерных кристаллов, так и лазерных линеек.

Также в качестве присадочных материалов могут использоваться другие мягкие припои (PbSn, SnAg и др.), которые позволяют минимизировать сжатие кристалла после пайки при снижении температуры до комнатной и ниже, если это требуется по условиям применений. Однако, используя легкоплавкие присадочные материалы необходимо учитывать рабочую температуру изготавливаемого прибора. Если температура плавления припоя окажется ниже рабочей температуры прибора, то в процессе эксплуатации велика вероятность разрушения паяного соединения. Если температура припоя существенно выше рабочей температуры паяемого элемента, то высока вероятность перегрева изготавливаемого прибора в процессе пайки и, соответственно, его преждевременной деградации.

Нахождение температурно-временных режимов процесса монтажа в каждой конкретной конструкции лазера является ключевым технологическим фактором, влияющим как на параметры, так и на надежность лазерного диода. Напряжения, возникающие при монтаже из-за несогласованных коэффициентов термического расширения теплоотвода и лазерного кристалла, являются определяющими факторами, влияющими на надежность и долговечность полупроводникового лазера [20].

Температурный профиль представляет собой зависимость температуры, воздействию зависимость изменения температуры от времени при пайке оплавлением [27]. В типичном профиле оплавления выделяют четыре этапа (рис.4.4) [28]:

- предварительного нагрева;
- выдержки/активации флюса;
- оплавления;
- охлаждения.

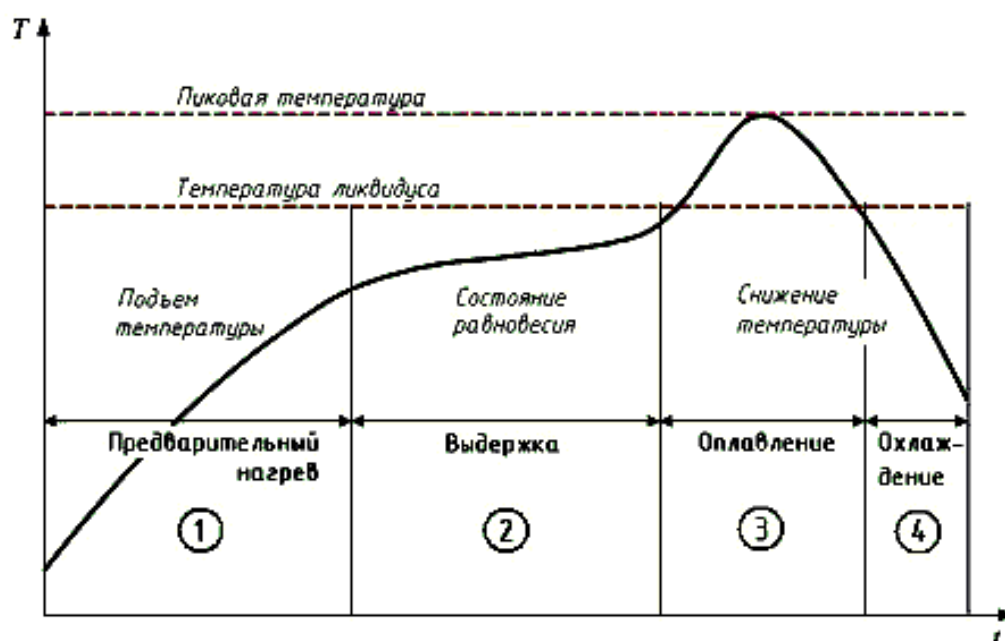


Рис. 4.4 . Типичный профиль оплавления и его деление на этапы [28].

По определению пайки, ее температура T , должна быть ниже температуры солидуса паяемого металла, но выше температуры солидуса или ликвидуса (температуры, при которой плавиться самый тугоплавкий компонент припоя), припоя [29].

Температурный режим пайки определяется характеристическими температурами: минимальной температурой, максимальной температурой, рабочей температурой, при которой происходит изотермическая выдержка при пайке, а также температурным интервалом, в котором обеспечивается получение качественного паяного соединения.

К числу важных характеристических температур паяного соединения относится температура его распайки. Во всех случаях температура эксплуатации паяного изделия T_3 должна быть ниже температуры распайки соединения ($T_{рсп}$), а последняя ниже температуры солидуса паяемого металла ($T_{см}$).

Равенство $T_{рсп} = T_{см}$ может быть достигнуто, как правило, только после диффузионной пайки. Если паяемый металл паять припоем, слабо с ним взаимодействующим, то $T_{рсп} > T_{сп}$. Если компоненты паяемого металла и припоя образуют диаграммы состояния с непрерывным рядом твердых растворов с повышающейся температурой солидуса, то $T_{рсп} > T_{сп}$.

Если выбранная температура ниже необходимой - «холодная пайка», то высока вероятность возникновения зон непропая, в этом случае поверхность паяного соединения характеризуется матовым цветом и наличием микротрещин, что отрицательно сказывается на рабочих характеристиках изготавливаемого прибора.

Качество паяного изделия также существенно зависит не только от свойств самих соединений, но и от того, как изменяются свойства основного материала под действием нагрева при пайке и материала деталей собранного изделия, не подвергаемых непосредственно пайке, но нагреваемых в процессе ее выполнения. Ухудшение свойств конструкционного материала, прежде всего механических и коррозионных, под действием нагрева в процессе пайки связано с его структурными изменениями, происходящими при этом: ростом зерна и изменением состояния сплава по границам зерен, старением, пережогом и др.

Изменение состояния металлов и сплавов по границам зерен может быть следствием перегрева или пережога. При перегреве в металлах и сплавах образуется крупнокристаллическая структура, в результате чего ухудшаются их механические, особенно динамические свойства.

Пережог сплавов независимо от их исходного состояния наступает вследствие оплавления или окисления границ зерен при нагреве их вблизи температуры солидуса, что существенно снижает их пределы прочности, усталости, пластичность и вязкость.

Температурный интервал пайки $\Delta T_{п}$ должен находиться вне интервалов запрещенных температур для паяемого металла ($T_{з.п}$) и припоя ΔT_3 ; $\Delta T_{п} < \Delta T_{з.п}$; $\Delta T_{п} > \Delta T_{з.п}$.

К запрещенным относятся и температурные интервалы (при достаточно длительном нагреве или медленном охлаждении), в которых паяемый металл претерпевает структурные или фазовые изменения, недопустимо ухудшающие свойства паяного соединения или изделия в целом (механические, коррозионные и др.).

Кроме того, температурный интервал пайки должен находиться вне температурных интервалов развития диффузионной пористости ($\Delta T_{\text{пор}}$), охрупчивания паяемого металла в контакте с жидким припоем ($\Delta T_{\text{охр}}$) и ниже температуры начала недопустимого развития химической эрозии ($T_{\text{х.э}}$), роста прослоек химических соединений ($T_{\text{х.с}}$): $\Delta T_{\text{п}} \ll \Delta T_{\text{пор}}$; $\Delta T_{\text{п}} \ll \Delta T_{\text{охр}}$; $\Delta T_{\text{п}} < \Delta T_{\text{х.э}}$; $\Delta T_{\text{п}} < \Delta T_{\text{х.с}}$. Вследствие того что развитие физико-химических процессов взаимодействия паяемого металла с припоем, флюсом, средой происходит во времени, температурный интервал пайки зависит от длительности контакта конструкционного материала $M_{\text{к}}$ и припоя $M_{\text{п}}$: при малой длительности контакта этот интервал может смещаться в область более высоких температур, а при увеличении времени контакта — в область более низких температур. Следовательно, температурный интервал пайки в известной степени зависит от времени пайки [29].

На качество паяного соединения существенно влияет скорость нагрева изделия и припоя до рабочей температуры пайки. Слишком медленный нагрев паяемого металла может способствовать недопустимому изменению его структуры и свойств. Слишком медленный нагрев припоя может привести к изменению его состава в результате, например, испарения, окисления компонентов или расплавления и вытекания из него легкоплавких составляющих, а, следовательно, и к изменению температурного интервала плавления припоя и свойств соединения. При слишком быстром нагреве появляется опасность возникновения недопустимых термических деформаций в паяемых, особенно тонкостенных деталях.

Скорость охлаждения после пайки может существенно влиять на пластичность и прочность металла паяного шва. Высокая скорость охлаждения способна вызвать релаксацию напряжений обусловленной различием ТКЛР материала основания, припоя и паяемого элемента и, как следствие, появление микротрещин в паяном соединении.

В случае монтажа лазерных кристаллов некорректно выбранный температурно-временной профиль помимо выше перечисленных негативных последствий на качество паяного соединения способен очень сильно сказываться как на структуре самого чипа, так и на его рабочих параметрах.

В случае перегрева лазерного чипа происходит его преждевременная деградация, что приводит к значительному ухудшению светоизлучающих и электрофизических характеристик лазера.

Еще одним важным моментом процесса монтажа лазерного кристалла является точность подбора силы прижима чипа. В случае недостаточного прижима, как и в случае с недостаточной температурой получается некачественный контакт лазерного чипа и теплоотвода. Если прижим слишком сильный в лазерной структуре могут возникнуть

дополнительные дефекты (сколы и микротрещины), которые способны развиваться и прорасти в активную область лазерного диода в процессе его эксплуатации, ухудшая при этом спектральные, мощностные и электрофизические характеристики лазера.

При подборе температурно-временного режима пайки необходимо помнить основные параметры (температуру плавления и ТКЛР) используемого присадочного материала, а также рабочую температуру применяемого при этом флюса.

Нахождение температурно-временных режимов монтажа для каждой конкретной конструкции лазера является ключевым технологическим фактором, влияющим на параметры и надежность лазера [20]. Существует методика моделирования состояний механических напряженностей с учетом тепловых процессов для определения необходимых технологических режимов, при использовании которых остаточные (после монтажа) напряжения минимизированы и не влияют на свойства диодных лазеров и линеек. Выбор режимов монтажа, минимизирующих остаточные напряжения при использовании мягких припоев, можно осуществить, рассчитав напряжения и времена релаксации в используемых припоях. Для этого необходимо решить уравнения (4.6) и (4.7) при заданных параметрах теплоотвода, припоя и кристалла [20].

Если рассматривать процесс охлаждения теплоотвода с установленным кристаллом после отвердевания припоя, можно определить необходимую скорость снижения температуры от температуры плавления до комнатной. Условием выбора служит отсутствие напряжений, превышающих разрывные напряжения в материале припоя.

Величины напряжения σ , приложенного к одной из поверхностей припоя, находящегося между кристаллом и теплоотводом, и разности скоростей сдвига двух противоположных поверхностей этого материала связаны соотношением [25, 30]:

$$\sigma = \eta \frac{v_2 - v_1}{\omega} \quad (4.9),$$

где η - вязкость вещества; ω - толщина припоя; v_1 и v_2 - скорости сдвига поверхностей припоя, присоединенных к кристаллу и теплоотводу соответственно. Для упрощения расчетов одну из этих поверхностей (припой-кристалл) будем считать неподвижной ($v_1 = 0$).

Тогда $\Delta v = v_2 \equiv v$. При этом скорость сдвига поверхности относительно теплоотвода

$$v = \frac{\Delta l}{\Delta t}, \text{ где}$$

$$\Delta l = \Delta \alpha \Delta T l_0 \quad (4.10),$$

– разность длин теплоотода и кристалла, уменьшившихся при снижении температуры от температуры плавления припоя до комнатной (ΔT); l_0 - линейный размер кристалла; Δt - время, за которое происходит это уменьшение; $\Delta \alpha$ - разность температурных коэффициентов линейного расширения материалов теплоотода и кристалла.

Теперь выражение (4.9) примет следующий вид:

$$\sigma = \eta \frac{\Delta l}{\omega \Delta t} \quad (4.11)$$

Используя, (4.10) и (4.11) можно определить время релаксации, за которое под действием напряжения $\sigma(\Delta T)$ происходит относительный сдвиг противоположных поверхностей припоя (пластическая деформация):

$$\Delta t_{rel} = \frac{\eta l_0 \Delta \alpha \Delta T}{\omega \sigma(\Delta T)} \quad (4.12)$$

Для скорости изменения температуры из (4.10) и (4.11) имеем

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{\omega \sigma}{\eta l_0 \Delta \alpha} \quad (4.13)$$

В этом выражении все величины, кроме σ , для заданной конструкции лазера известны. Напряжения σ , возникающие в материале припоя при уменьшении температуры на определенную величину, для заданных размеров и материалов лазерного кристалла, теплоотода и припоя рассчитываются с помощью уравнений (4.4) и (4.5).

В процессе монтажа лазерного кристалла нельзя допускать возникновения в припое напряжений, превышающих разрывное напряжение σ_{fs} для данного материала, то есть σ_{max} должно быть меньше σ_{fs} . Учитывая это, с помощью (4.10) получим условие для скорости спада температуры:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} < \frac{\omega \sigma_{fs}}{\eta l_0 \Delta \alpha} \quad (4.14)$$

Таким образом, время спада температуры Δt_{tech} на заданную величину ΔT должно быть больше времени релаксации напряжений Δt_{rel} , возникающих при уменьшении температуры на ΔT : $\Delta t_{tech} > \Delta t_{rel}$. Результаты расчетов напряжений в In-припое для лазерного кристалла длиной $l_0=1$ мм, припаянного к медному теплоотводу представлены на рис.

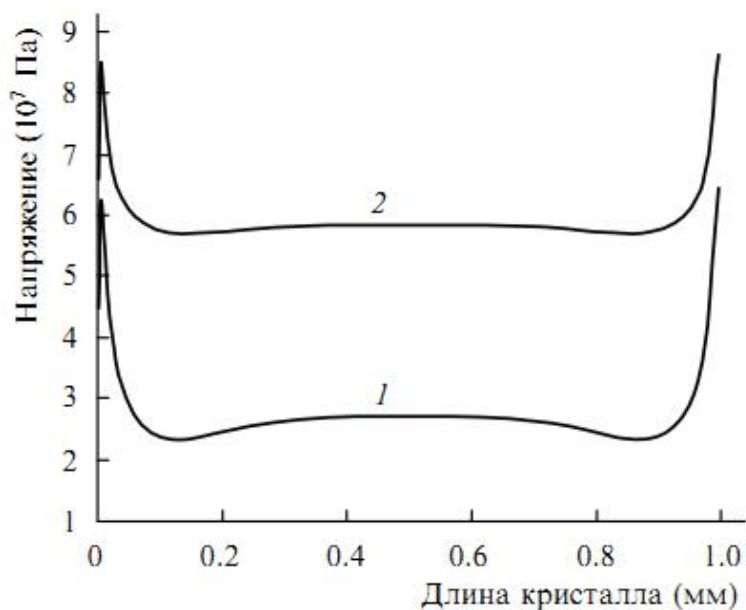


Рис.4.5 Распределение напряжений в центральной плоскости внутри припоя толщиной 3 мкм по длине лазерного кристалла ($l_0=1$ мм), припаянного к теплоотводу с помощью индия (1) и PbSn (2), при уменьшении температуры на 130°C – от температуры плавления до комнатной.[20]

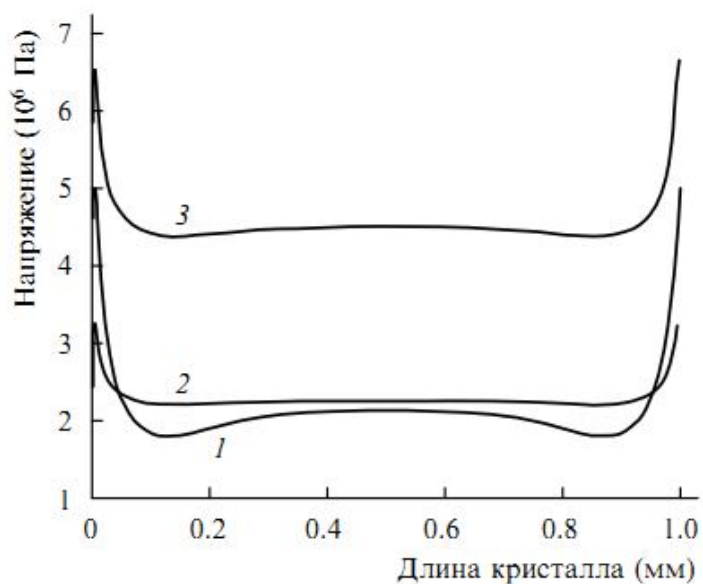


Рис.4.6 Распределение напряжений в центральной плоскости внутри припоя толщиной 3 мкм по длине лазерного кристалла ($l_0=1$ мм), припаянного к медному теплоотводу с помощью индия (при уменьшении температуры на $\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$ (1)) и PbSn (при $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$ (2) и 10°C (3)) [20]

Из графиков видно, что напряжения на краях кристалла значительно превышают напряжения в его центре (в 1,5-2 раза). Поэтому при сравнении напряжений с разрывным напряжением σ_{fs} следует использовать напряжения на краях кристалла.[20]

Описанный метод численного моделирования позволяет определить параметры технологического режима монтажа для каждой конкретной конструкции лазерного кристалла и теплоотвода, а также для различных припоев. Также этот метод дает возможность определять условия, при которых минимизированы механические напряжения, возникающие при монтаже.

Глава 5

Методы прецизионного монтажа лазерных чипов на установке Fineplacer lambda-96

5.1 Система сверхточного монтажа

Аппарат lambda предназначен для позиционирования устройств с мелким шагом выводов, например перевернутых кристаллов (Flip Chips) и сборок Flip Chip, оптоэлектронных компонентов, микроэлектромеханических систем (MEMS), датчиков, микроскопических оптических приборов, компонентов на ленточном носителе, бескорпусных кристаллов других устройств поверхностного монтажа (SMD) с большим числом выводов.

Термин “перевернутый кристалл” (Flip Chip) относится к электронному компоненту или полупроводниковому устройству, который может быть смонтирован непосредственно на подложку, плату или носитель в “перевернутом” состоянии. Электрическое соединение обеспечивается посредством проводящих выступов на поверхности чипов, в связи с чем процесс монтажа осуществляется “перевернутым” способом. Во время монтажа кристалл переворачивается обратной стороной на подложку, печатную плату или носитель (отсюда и название “перевернутый кристалл”), причем выступы точно располагаются в требуемых местах. Так как перевернутые кристаллы не требуют термокомпрессионных проволочных соединений, их размер существенно меньше их традиционных аналогов.

Система Fineplacer основана на уникальном принципе размещения согласно типу и размерам различных компонентов. С помощью высокоточной системы (vision alignment system – система визуального совмещения) аппарат Fineplacer позволяет точно устанавливать компонент с первой попытки. Погрешность позиционирования составляет 1 мкм, что позволяет устанавливать компоненты с высокой точностью и однородностью шага. Аппарат состоит из функциональных модулей. Перед началом работы необходимо изучить назначение всех модулей и приспособлений аппарата и способ управления ими.

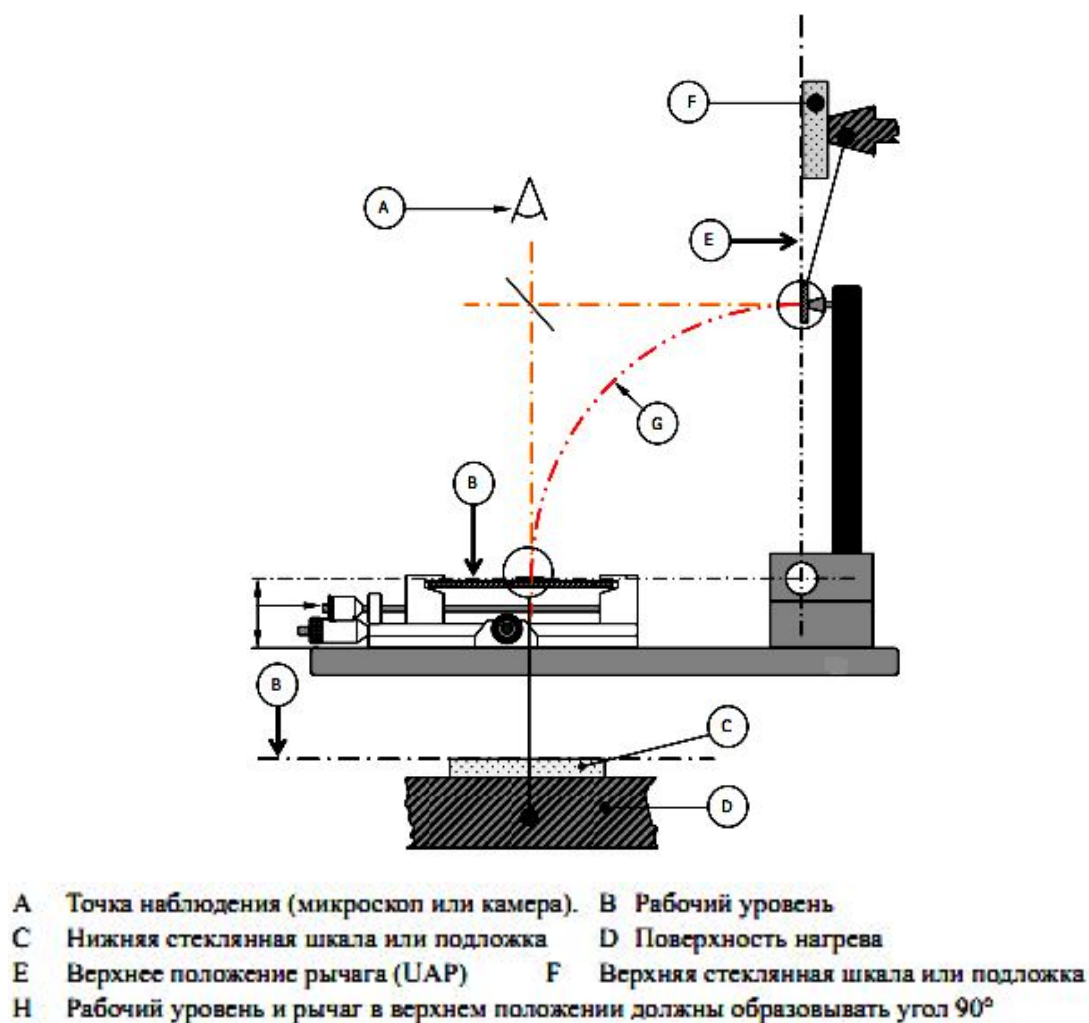


Рис.5.1 Принципиальная схема установки сверхточного монтажа Fineplacer lambda-96.

Установка Fineplacer-lambda-96 разработана для различных сфер применения и характеризуется простотой эксплуатации и обслуживания.

Важными преимуществами данного аппарата являются:

1. Автоматическое, независимое от пользователя, позиционирование и выравнивание компонентов
2. Высокоточное позиционирование, непосредственная готовность к эксплуатации, без длительных настроек
3. Синхронизированное управление всеми необходимыми процессными параметрами: мощностью, температурой, временем, производительностью, процессной средой, освещением, наблюдением за процессами
4. Непосредственная визуальная обратная связь укорачивает время развития процесса
5. Быстрое и простое развитие процессов, система документирования и записи процесса - гарант надёжных результатов.

Данная установка может быть применима для термокомпрессионного монтажа, термозвукового монтажа, ультразвуковой сварки, пайки, адгезионных технологий, механического монтажа.[31] Далее описываются вышеуказанные технологии.

5.2 Термокомпрессионный монтаж

Суть метода заключается в следующем: монтируемый элемент и подложка нагреваются до установленной температуры, далее с определенной силой прижимаются друг к другу и удерживаются в данном положении не менее 0,5 с. В ходе этого процесса полученное соединение, образуется по принципу диффузионной сварки. Оно готово к эксплуатации, непосредственно после завершения операции. Термокомпрессионная сварка используется для соединения проволочных выводов и в монтаже перевёрнутых кристаллов (Flip Chip). Для этого необходимо использование ковких материалов (например, золота для столбиковых выводов), которые наносятся на подложку или на сам компонент. Затем следует монтаж: выводы прижимаются к контактными площадкам (состоящих, преимущественно, из того же материала). Такой метод сварки не требует плавления контактных материалов. Путём термокомпрессии создаётся неразъёмная достаточно прочная, стабильная связь и надёжная электропроводность. Этот процесс пользуется широким спросом в сфере «Flip Chip» - монтажа, так как улучшает радиочастотные свойства соединения.

В таком методе монтажа необходимо обеспечить:

1. Одновременное воздействие силы прижима и тепла на компонент
2. Жесткий нагреватель подложки для предотвращения деформации
3. Противодействие тепловой деформации обогреваемой площади на большом интервале температур (требует четко продуманную систему фиксации в сочетании с термокомпенсационными материалами).
4. Термостабильный и механически устойчивый нагреватель компонента.
5. Стабильное, высокочувствительное управление силой прижима, необходимое в работе с предельно тонкими и хрупкими материалами, а также, при монтаже крупных компонентов с большим количеством шариковых выводов.
6. Достижение микронной компланарности компонента и подложки (требует специально приспособленные инструменты, датчики и активаторы для вычисления и компенсации малейших отклонений).[20]

Типичные параметры процесса термокомпрессии, рекомендуемые производителем (компания Finetech):

Золото (Au)

$T=200 \dots 320^{\circ}\text{C}$

$F=0.1 \dots 0.7 \text{ Н/Шариковый вывод}$

Индий (In)

$T>60^{\circ}\text{C}$

$F=0.02\text{Н/Шариковый вывод [31]}$

5.3 Ультразвуковая сварка

Ультразвуковая сварка – это метод, не нуждающийся в проволочных соединениях. Прежде всего, он используется при монтаже перевёрнутых кристаллов – «Flip Chip», так как создаёт надёжную электропроводность и связь со всеми контактами одновременно.

В отличие от термокомпрессионной сварки, этот метод основан на трении (фрикционная сварка). Во время монтажного процесса шариковые выступы чипа аккуратно прижимаются на подкладки и одновременно трутся о поверхность. Таким образом чип и подложка не подвергаются большой термической нагрузке, что делает метод ультразвуковой сварки предпочтительным для работы с чувствительными материалами. Низкая сила прижима при этом щадит материал. Эта особенность - преимущество в работе с предельно хрупкими компонентами.

При ультразвуковой сварке компонент сперва нагревается до температуры в пределах $100^{\circ}\text{C} - 150^{\circ}\text{C}$, а затем аккуратно позиционируется на подложку. После этой операции издается ультразвуковой импульс, образующий трение поверхностей (фрикционная сварка). Таким образом, создается надёжная связь, готовая к эксплуатации непосредственно после процесса.[31]

Есть возможность дополнительного подогрева подложки, тогда мы будем иметь дело с “ультразвуковой сваркой с подогревом” или “термозвуковой сваркой”. В данном методе соединение образуется в результате нагрева, компрессии и воздействия ультразвуковой энергии на паяемые детали.[32]

Ультра-/Термозвуковая сварка – сложный процесс, проходящий в четырехмерном пространстве, под влиянием множества внешних факторов.

При монтажном процессе, технология ставит высокие требования устройствам захвата компонентов и подложек (в то время, когда подложке необходимо оставаться неподвижной,

компонент должен реагировать на малейшие вибрационные импульсы захвата). По этой причине необходимо наличие прочного захвата подложек и специально приспособленного дизайна инструментов.

Необходима синхронизация нижнего нагрева, ультразвукового импульса (Burst) и четкая регулировка времени воздействия импульса: при слишком коротком воздействии связь может не образоваться, а при слишком долгом есть возможность повреждения соприкасающихся поверхностей.

Чтобы направить достаточно энергии в точку связи, вся колебательная система (ультразвуковой измерительный преобразователь, захват, компонент), независимо от размера компонента и коэффициента трения соприкасающихся поверхностей, должна поддерживаться в частоте резонанса. Для этого необходимо компенсировать разные степени колебания ультразвукового генератора при помощи электронных схем.

Для осуществления монтажа тонких и предельно хрупких материалов, а также больших компонентов с большим количеством шариковых выступов, крайне важно поддерживать на высоком уровне такие параметры, как: мощность, температура, производительность и время импульса даже при самых сложных условиях.[31]

5.4 Технология C4

Технология “flip-chip”, названная Controlled Collapse Chip Connection (монтаж кристалла методом контролируемого сплющивания) или C4, была разработана фирмой IBM в 1960 году, когда компания начала использовать их для своих базовых вычислительных устройств.

С тех пор множество компаний используют перевернутые кристаллы в тысячах различных устройств, используя преимущества небольших размеров и снижения затрат, предлагаемых данным методом сборки. Одновременно с этим перевернутые кристаллы устранили проблему работоспособности, связанную с индукцией и емкостным сопротивлением, ассоциируемые с проволочными соединениями.

Микроэлектронная сборка перевернутого кристалла представляет собой процесс прямого электрического соединения электронных элементов лицевой стороной вниз (отсюда название “перевернутый”) с подложками, печатными платами или носителями при помощи проводящих столбиковых выводов на контактных площадках чипа. Напротив, при проводном соединении, более старой технологии, которую вытесняют перевернутые кристаллы, чипы устанавливаются лицевой стороной вверх и соединяются с каждой контактной площадкой проводниками.

Элементы перевернутого кристалла в большинстве своем являются полупроводниковыми устройствами; однако в последнее время в перевернутых кристаллах стали применяться другие компоненты, такие как пассивные фильтры, детекторные решетки и микроэлектромеханические системы (МЭМС).

Перевернутый кристалл также называется Direct Chip Attach (DCA) (прямой монтаж чипа), более точный термин, так как чип устанавливается непосредственно на подложку, плату или носитель при помощи проводящих столбиковых выводов.

Как уже было сказано, компания IBM использует эту технологию с начала шестидесятых годов. Компания Delco Electronics стала использовать перевернутые кристаллы в автомобилях в семидесятых. В настоящее время компания Delphi Delco ежедневно помещает 300 000 перевернутых кристаллов в автомобильные устройства. Большинство электронных часов, а также все больше сотовых телефонов, пейджеров и высокоскоростных микропроцессоров собираются с перевернутыми кристаллами.[33]

5.5 Пайка AuSn и In-содержащими припоями

В ряде приложений, например, в оптоэлектронике используется пайка с помощью сплава AuSn (80% Au и 20% Sn) без использования флюса. Слой или столбик AuSn припой наносится на кристалл и подложку, после чего выполняется пайка с помощью температуры и прилагаемой силы. Наиболее популярной технологией монтажа лазерных источников является пайка с использованием AuSn припоя. Нижняя сторона кристалла и поверхность подложки должна быть предварительно покрыта слоем припоя. Затем под действием температуры и прилагаемой силы происходит процесс пайки.

Для монтажа лазерного излучающего элемента на теплоотвод используются различные технологии. Однако одним из лучших результатов демонстрирует пайка индием. Одними из важных факторов здесь являются ограниченное тепловое воздействие на кристалл и пониженное образование оксидной пленки.[31] Эта технология достаточно проста. Припой помещается на поверхность теплоотвода, расплавляется (если это пайка с флюсом, то добавляется флюс для предотвращения образования окисла), далее монтируется излучающий элемент.

Есть возможность делать монтаж чипов в инертном газе. Поток инертного газа предотвращает образование пленки окисла на поверхности припоя (бесфлюсовая пайка). Для этого предусмотрена специальная камера, которая устанавливается на поверхность нагревательной плиты. Поток инертного газа, подается из баллона, который подключается к установке. Можно менять поток газа путём поворота ручки на манометре.

5.6 Адгезионные технологии

Здесь соединение двух поверхностей (например: чипа и подложки) может осуществляться клеящими веществами, которые наносятся разными способами: дозировкой, печатью через шаблон, через выводы или в виде промежуточной плёнки. Применяются следующие клеящие вещества: теплопроводный клей, изотропные и анизотропные токопроводящие клеи, оптические клеи, соединение столбиковыми выводами.

5.6.1 Теплопроводный клей

Теплопроводный клей используется для соединения чипа с печатной платой, кристалла с подложкой или подложки с теплоотводом. Электрическое соединение, при этом, осуществляется проволочными выводами. Нужный объем клея, в соответствии с размером площади, наносится методом трафаретной печати, штамповки, прямого нанесения клея на компонент или дозировки за счет тонкой полый иглы. После нанесения на компонент, клей вулканизируется за считанные секунды специальным нагреваемым инструментом, зажимом или в печи.

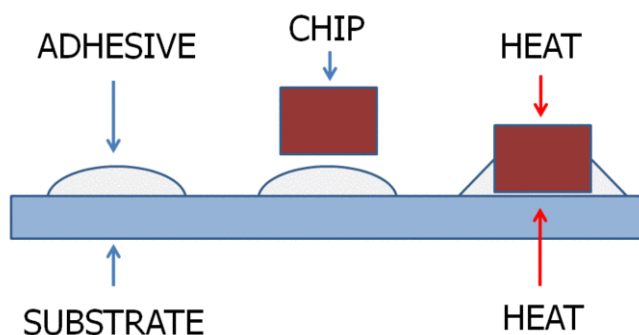


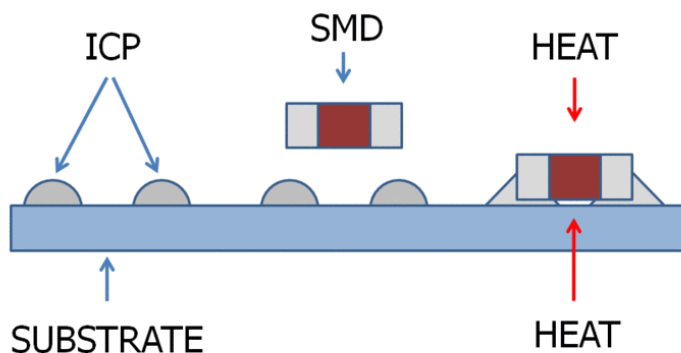
Рис. 5.2 Соединение теплопроводным клеем [31]

5.6.2 Изотропные и анизотропные токопроводящие клеи

Изотропные токопроводящие клеи используются при поверхностном монтаже, когда в качестве электропровода должен служить сам клей, а не припой. В таком случае, в клей добавляются проводящие частицы, а нанесение его осуществляется дозатором. Самый распространенный тип «ИСА» - это изотропная токопроводящая паста (ICP).

В обращении этот клей схож с теплопроводным клеем (смотри выше). Таким образом, реализуется электропроводность без особой термической нагрузки, которая характерна при

пайке. Это качество необходимо для работы с термочувствительными материалами. Чаще всего «ICA» используется при монтаже светодиодов, обычных «SMD» - компонентов и даже перевернутых кристаллов (Flip Chip) с большим шагом шариков на единицу площади.



5.3 Соединение изотропным токопроводящим клеем [31]

Анизотропный токопроводящий клей (ACA) так же насыщен проводящими частицами, но сам по себе не является электропроводом. При отверждении, он осуществляет электрический контакт только в направлении оси «Z» (перпендикулярно соединяемым поверхностям). Этот клей доступен в виде пасты (ACP) или пленки (ACF) и является идеальным соединителем, так как гарантирует надежную связь, тепло-, и электропроводность, что значительно облегчает процесс монтажа «Flip Chip» - компонентов.

Отдельное внимание стоит уделить сравнительно низкой температуре в процессе монтажа. Быстрое отверждение клея происходит под воздействием давления, верхнего и дополнительного нижнего нагрева. Единственным недостатком в использовании «ACA» является повышенная сила прижима, необходимая для обеспечения электрического контакта. Помимо этого, требуется сочетание четкого выравнивания компонента и воспроизводимости силы прижима, гарантирующее надежную связь поверхностей.

Хороший пример применения «ACF» в сочетании с технологией «Chip-on-Glass» - монтаж ЖК-драйверов на ЖК-панели. «Chip on Glass» - это технология прямого монтажа перевернутых кристаллов (электрических схем) на стеклянные подложки при помощи анизотропной токопроводящей пленки (ACF). В отличие от других соединительных методов, соединения анизотропной токопроводящей пленкой поддаются ремонту. Для этого удаляется дефектный компонент, а стеклянная панель очищается. В заключении новые «ACF» устанавливаются при помощи специального модуля или пинцетом в ручную.

Для использования «ACF», следует учесть следующие шаги:

- Предварительное соединение «ACF» с подложкой после удаления защитного слоя пленки.
- Выравнивание чипа по подложке.
- Позиционирование чипа на пленку.
- Монтаж при воздействии силы и нагрева [31]

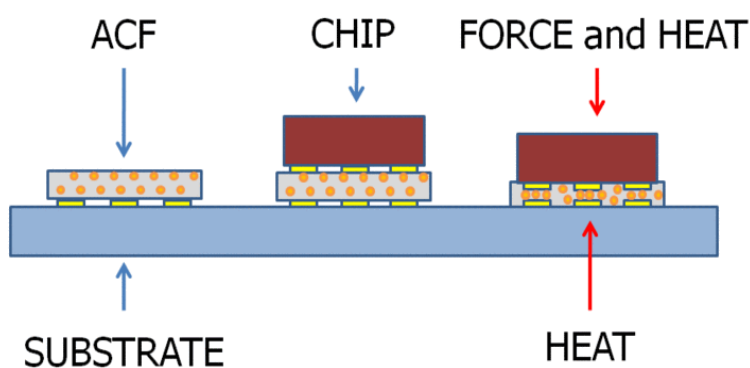


Рис.5.4 Соединение анизотропной токопроводящей пленкой [31]

Анизотропные токопроводящие пасты (ACP) используются, к примеру для фиксации чипов «RFID» (устройство радиочастотной идентификации) и антенн на пленку. При этом чипы имеют лишь малое количество контактных площадок, на которые необходимо нанести шариковые выводы (Bumps). В ходе монтажного процесса, электропроводные частицы пасты, под воздействием давления прижимаются к контактным поверхностям. Затем следует резкое нагревание пасты специальным инструментом или зажимом и, в последствии ее отверждение. Для внедрения соединительного процесса «ACP» в микромонтажную систему, требуется лишь модуль дозатора.[31]

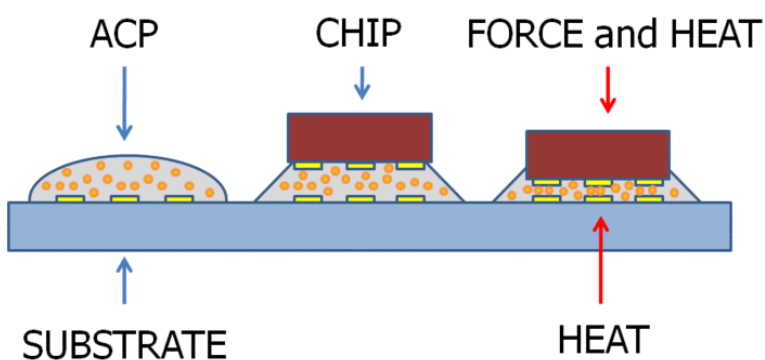


Рис. 5.5 Соединение анизотропной токопроводящей пастой [31]

Еще один метод установления электрической связи двух контактов – использование непроводящего клея (NCA: Non-Conducive-Adhesive) и столбиковых выводов (Stud Bumps). В этом случае, проводящий материал (например, золото) наносится в виде столбиков на контактные площадки чипа, после чего, в полость между чипом и подложкой, добавляется клей. Заключительный шаг – прижим соединяемых материалов, вследствие чего, «золотые столбики» вытесняют клей, устанавливая электрическую связь и прочное устойчивое соединение.

Эта технология установления электрической связи требует тщательно подготовленных перевернутых кристаллов с «золотыми столбиками». Столбиковые выводы, при этом, укрепляются на чип установками для микросварки проволочных выводов (Wire Bonder) или установками шариковой термокомпрессии (Ball Bonder), прежде настроенных на нужный режим работы. Процесс завершается монтажом кристалла. После позиционирования чипа на подложку необходима, во-первых, его фиксация специальным инструментом, а, во-вторых, вулканизация клея нагревом или воздействием УФ-лучей.[31]

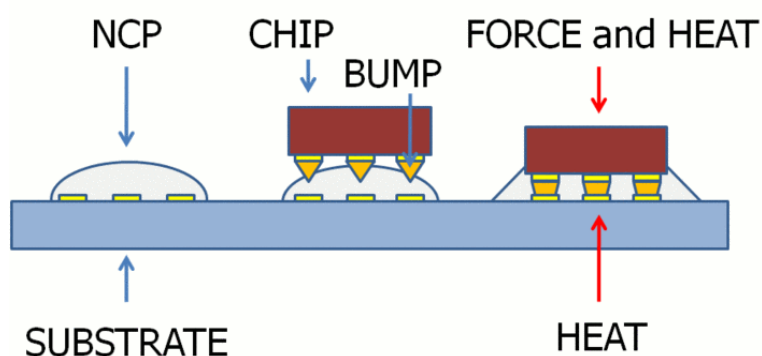


Рис. 5.5 Соединение столбиковыми выводами [31]

5.6.3 Оптические клеи

Для оптических приборов крайне важно использовать специальные клейкие вещества, удовлетворяющие разные требования (например, фактор преломления света).

Перед позиционированием клея на основную ось оптической системы, следует убедиться в его пригодности для следующей операции, так как он напрямую может повлиять на качества самой оптики. После нанесения клея и монтажа следует вулканизация УФ-лучами.

Использование оптического клея необходимо при монтаже стеклянных покрытий, креплении линз или для муфт стекловолоконных чипов. [31]

5.7 Работа с установкой *Fineplacer lambda-96*.

Контроль технологического процесса монтажа осуществляется с помощью программы WinFlipChip. При начале работы (при загрузке программы) в зависимости от различных задач в диалоговом окне выбираются различные модули установки, используемые в работе:

1. Модуль прижима
2. Модуль нагрева компонента
3. Модуль захвата кристаллов
4. Модуль дозатора (для флюса и термоклея)
5. Модуль оптической перемены

Установка оснащена двумя камерами, в зависимости от положения рычага позиционирования сигнал на экран монитора поступает либо с боковой камеры, либо с расположенной над нагревательной плитой.

6. Модуль подключения инертного газа
7. Модуль нагрева подложки/платы
8. Модуль визуального контроля над процессами
9. Ультразвуковой модуль

В программе пользователем задаются требуемые параметры процесса: термопрофиль пайки, сила и время прижима чипа к теплоотводу, и так далее. Они зависят от конкретной задачи: тип припоя, размеры чипа, тип теплоотвода. Можно менять скорость нагрева и остывания (от 0 до 20 К/с), температуру пайки (максимальная 400⁰С), также время нагрева и остывания, время самого процесса пайки (как правило, не более 20 секунд). Силу прижатия можно менять от 0 до 10 Н.

Удобство данной системы, прежде всего, заключается в том, что ход самого процесса монтажа отображается на экране компьютера (рис.5). Более того, в программное обеспечение входит постоянно растущая библиотека профилей, для любого типа процессов, и перечень функций регистрации данных, что позволяет проводить статистический контроль над процессами. При необходимости можно делать видео и фотосъёмку монтажа (за это отвечают кнопки на панели инструментов в окне программы).

Итак, перейдем к описанию работы на установке *Fineplacer lambda-96*. Здесь описывается монтаж лазерного чипа на теплоотвод посредством пайки In-содержащим припоем.

1. Включить компрессор, подающий сжатый воздух к установке (давление 0,4 бар).
Компрессор находится в подвале здания НИФТИ ННГУ.

2. Открыть шаровой кран.
3. Включить компьютер.
4. Включить модули установки кнопкой LINE ON, находящейся на передней панели блока управления устройством позиционирования.
5. Открыть программу Win Flip Chip. Можно работать в двух режимах: режиме протокола и режиме модификации (см. инструкцию по программному обеспечению). Для того, чтобы можно было менять параметры процесса в ходе работы, необходимо выбрать режим модификации. Пароль доступа к программе: FINETECH. Далее откроется диалоговое окно, где нужно выбрать модули, используемые при работе. В зависимости от различных задач выбираются различные модули (см. руководство по программному обеспечению). Затем откроется окно создания нового профиля. Здесь задаём имя файла. Можно не создавать новый файл, а открыть уже существующий с сохранёнными параметрами процесса.
6. Протереть поверхность нагревательной плиты батистовой тканью, смоченной спиртом.
7. Установить вакуумную головку на рычаг позиционирования. Перед этим проверить высоту головки. Для этого вставить головку в специальное устройство для измерения. Измерить общую высоту головки и устройства штанген-циркулем. Общая высота должна быть 47 мм, при этом высота головки составляет 22 мм.
8. Установить теплоотвод на поверхность нагревательной плиты. Положение столика грубо регулируется нажатием педали, подающей разрежение, обеспечивающее подъём позиционирующего столика, таким образом можно перемещать столик, поддерживаемый воздушной подушкой, также можно перемещать столик без нажатия педали, простым перемещением, за счёт того, что он удерживается магнитом. Точное перемещение осуществляется с помощью микрометрических винтов.
9. Включить вакуумную присоску на плите. Включение присосок производится включением кнопок, находящихся с левой стороны в окне программы. Верхняя кнопка включает вакуумную присоску на плите, две нижние включают присоски, удерживающие упаковки лазерных чипов “гель-пак”.
10. Проверить устойчивость теплоотвода. Если теплоотвод не прикрепился к нагревательному столику, выключить присоску и взять другой теплоотвод. Важно выбирать наиболее ровные теплоотводы для лучшей их устойчивости.
11. Инициализировать процесс нажатием правой крайней кнопки на верхней панели в окне программы. При этом произойдёт перемещение камеры в крайнюю правую

позицию, затем опустится рычаг. Далее в открывшемся диалоговом окне нажать Continue, тогда поднимется рычаг, и камера переместится в исходное положение. После завершения процесса инициализации должны погаснуть красные лампочки ERROR 1 и ERROR 2 на модуле, отвечающем за позиционирование (LOW BONDING, FORCE SENSOR).

12. Измерить длину теплоотвода с помощью перемещения камеры, определить середину (место монтажа чипа). Положение камеры регулируется на вкладке Camera Shifting (см. руководство по программному обеспечению).
13. Установить лазерный диод на поверхность теплоотвода. Необходимо так отрегулировать положение столика, чтобы на экране компьютера было видно изображение диода. Далее поворотом ручки, находящейся с правой стороны позиционирующего столика максимально увеличить изображение, чтобы поверхность теплоотвода была видна максимально чётко.
14. Переключить камеру, чтобы на экране компьютера были видны одновременно лазерный диод и вакуумная головка. Это делается поворотом ручки, находящейся с правой стороны микроскопа. Если не видно вакуумную головку, нужно переместить камеру в положение оптической оси. Нужно обеспечить совмещение изображений перемещением позиционирующего столика.
15. Перед монтажом необходимо откалибровать уровень вакуума. Это делается на вкладке Placer Control Box. Нужно нажать кнопку Calibrated Tool. Откроется диалоговое окно, где будет показан текущий уровень вакуума. Необходимо указать находится ли чип на вакуумной головке (with Component) или нет (without Component). А также применять ли эту калибровку к текущему процессу (apply to current profile) или ко всем процессам (apply to all profiles). Сначала необходимо выбрать “without Component”, а также “apply to current profile”. Затем нажать Apply (применить).
16. Далее опустить рычаг позиционирования и захватить диод на головку нажатием правой крайней кнопки на панели инструментов, находящейся вверху окна программы.
17. После того, как чип оказался на головке, необходимо ещё раз откалибровать уровень вакуума. Делаем всё также, но теперь указываем “with Component”, в конце нажимаем ОК.
18. Отрегулировать положение столика так, чтобы на экране было точно видно место, куда должен быть произведён монтаж диода.

19. Выставить параметры монтажа (скорость, температура нагрева, сила, время прижатия). Термопрофиль (скорость, температура нагрева) устанавливается на вкладке Heating Plate. Параметры силы выставляются на вкладке Swivel Module. Все параметры видны на вкладке Diagram. Параметры монтажа зависят от конкретной задачи: тип припоя, размеры чипа, тип теплоотвода. Можно менять скорость нагрева и остывания (от 0 до 20 K/s) , температуру пайки (максимальная 400⁰C), также время нагрева и остывания, время самого процесса пайки (как правило не более 20 секунд). Силу прижатия можно менять от 0 до 10 Н.
20. Далее начать монтаж. Чтобы начать монтаж нужно нажать кнопку Start Profile (зелёный треугольник) в окне программы. Начнётся выполнение программы монтажа. Можно следить за параметрами монтажа и процессом позиционирования на вкладке Diagram. Дождаться завершения программы. Когда припой расплавится капнуть флюс из капилляра.
21. После того, когда остынет поверхность нагревательной плиты (температура показывается в окне программы), проверить насколько крепко припаян диод (для этого использовать иглу). Если диод не припаялся, повторить монтаж.
22. При необходимости можно сохранить параметры процесса, для этого нужно просто сохранить файл. При дальнейшей работе можно открыть этот файл и работать с имеющимися параметрами процесса.
23. После окончания работы на установке выключить вакуумную присоску на плите, убрать теплоотвод с нагревательной плиты.
24. Снять вакуумную головку с рычага позиционирования, промыть в спирте.
25. Закрывать программу, выключить модули установки нажатием кнопки LINE ON, выключить компьютер.
26. Обязательно протереть рабочую поверхность нагревательной плиты батистовой тканью.
27. Накрыть установку антистатическим чехлом.
28. Выключить компрессор.
29. Закрывать шаровой кран.
30. Необходимо записывать количество часов работы в рабочий журнал. Каждые 100 часов работы меняется фильтр подачи сжатого воздуха.
31. Есть возможность делать монтаж чипов в инертном газе. Для этого предусмотрена специальная камера, которая устанавливается на поверхность нагревательной плиты. Поток инертного газа, подаётся из баллона, который подключается к установке. Можно устанавливать поток газа путём поворота ручки на манометре.

32. При необходимости можно делать видео и фотосъемку монтажа (за это отвечают кнопки на панели инструментов в окне программы).

Установка не позволяет сделать верхний контакт на лазерном кристалле. Это можно сделать на установке ультразвуковой сварки или вручную специальным паяльником с тонким жалом. Теперь полученное изделие можно назвать лазерным диодом. После этого осуществляется контроль качества готовых полупроводниковых лазеров посредством измерения их электрофизических характеристик.

В заключение следует сказать, что ручная субмикронная монтажная станция **Fineplacer lambda-96** компании Finetech, предназначена для работы с самыми сложными технологиями, где необходимо прецизионное позиционирование и монтаж кристаллов. Установка отличается высокой гибкостью благодаря модульной конструкции, она может быть легко сконфигурирована в соответствии с задачами пользователя, что делает её незаменимой для выполнения НИОКР в университетах и лабораториях. [31]

Приложение 1

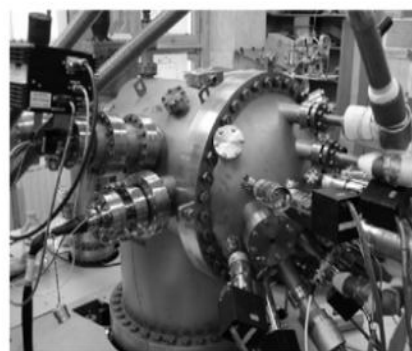
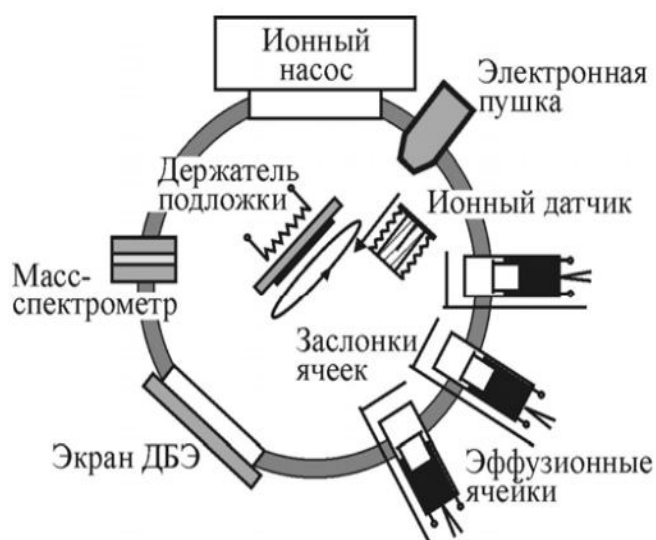
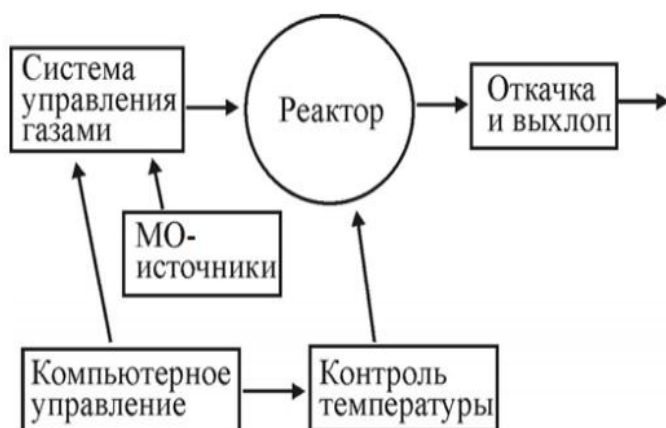


Схема установки молекулярно-пучковой эпитаксии (а) и фотография установки Riber 32P (б)



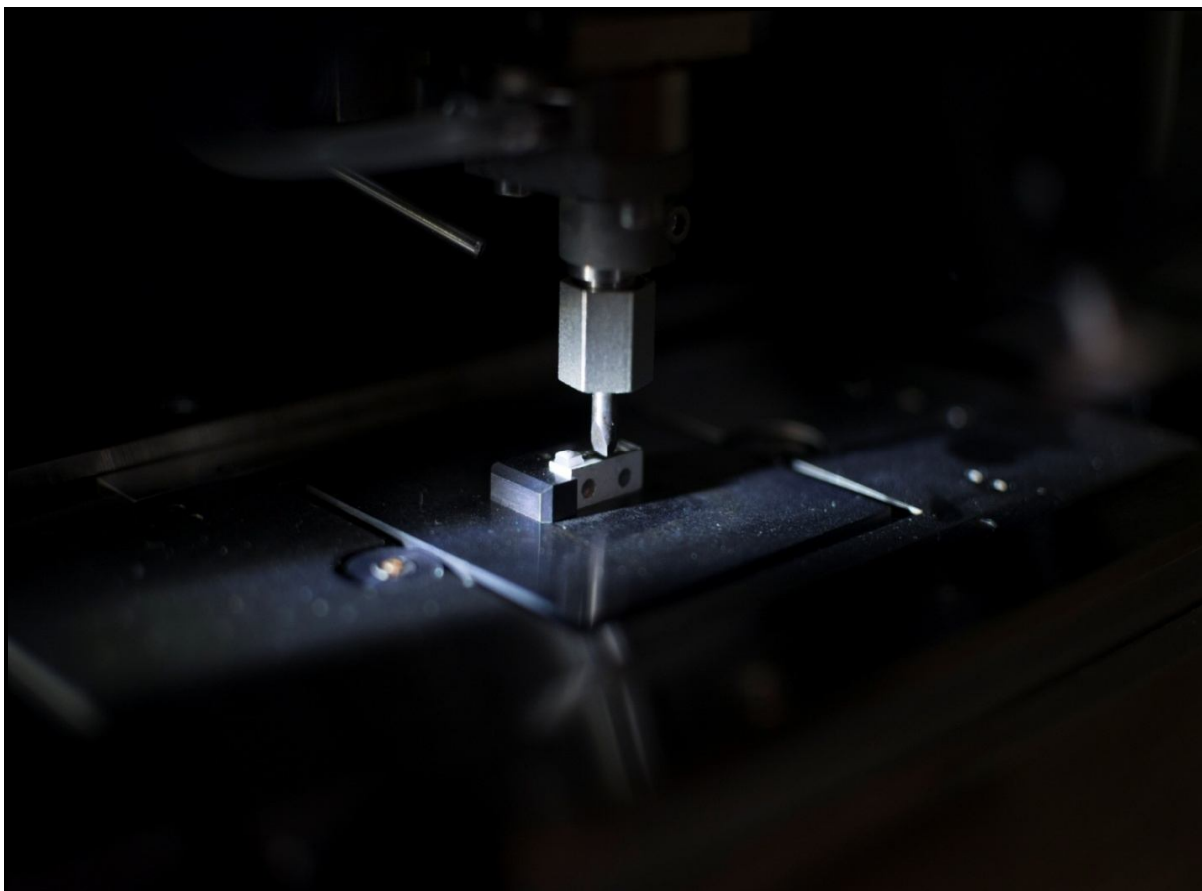
Упрощенная блок-схема установки МОСГФЭ (а), общий вид установки AIXTRON AIX 200/HT (б)

Приложение 2



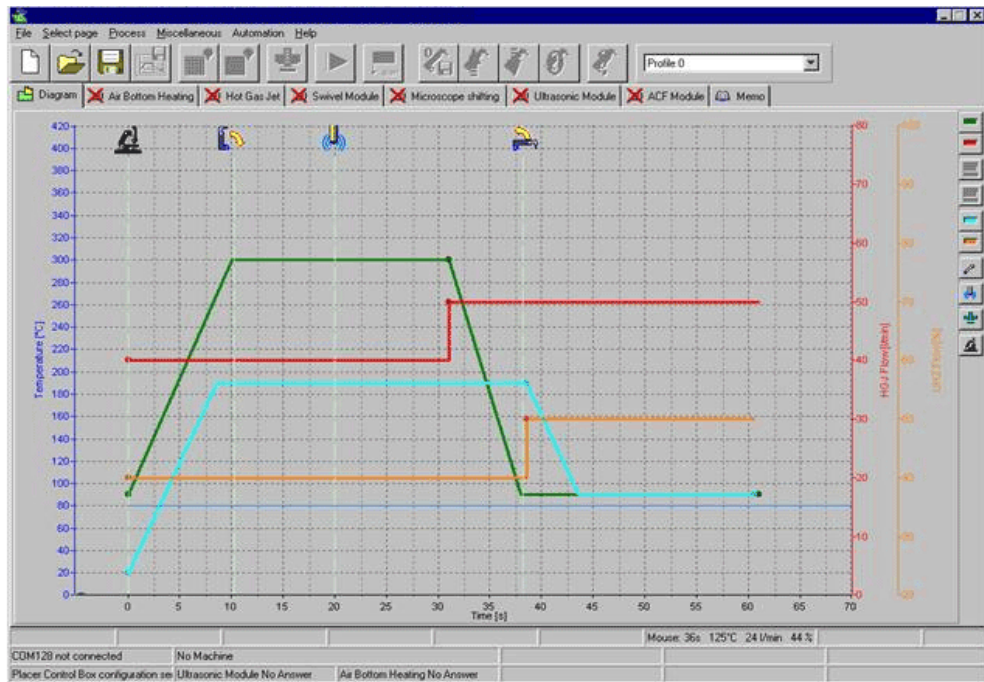
Установка сверхточного монтажа Fineplacer lambda-96

Приложение 3

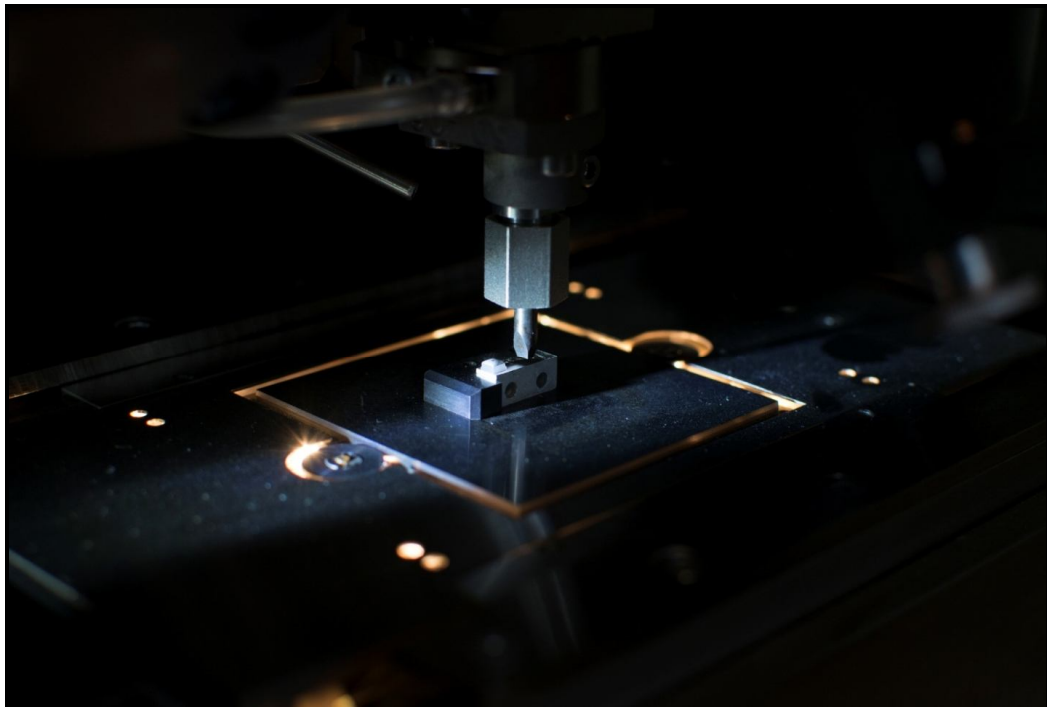


Захват лазерного чипа позиционирующей головкой

Приложение 4

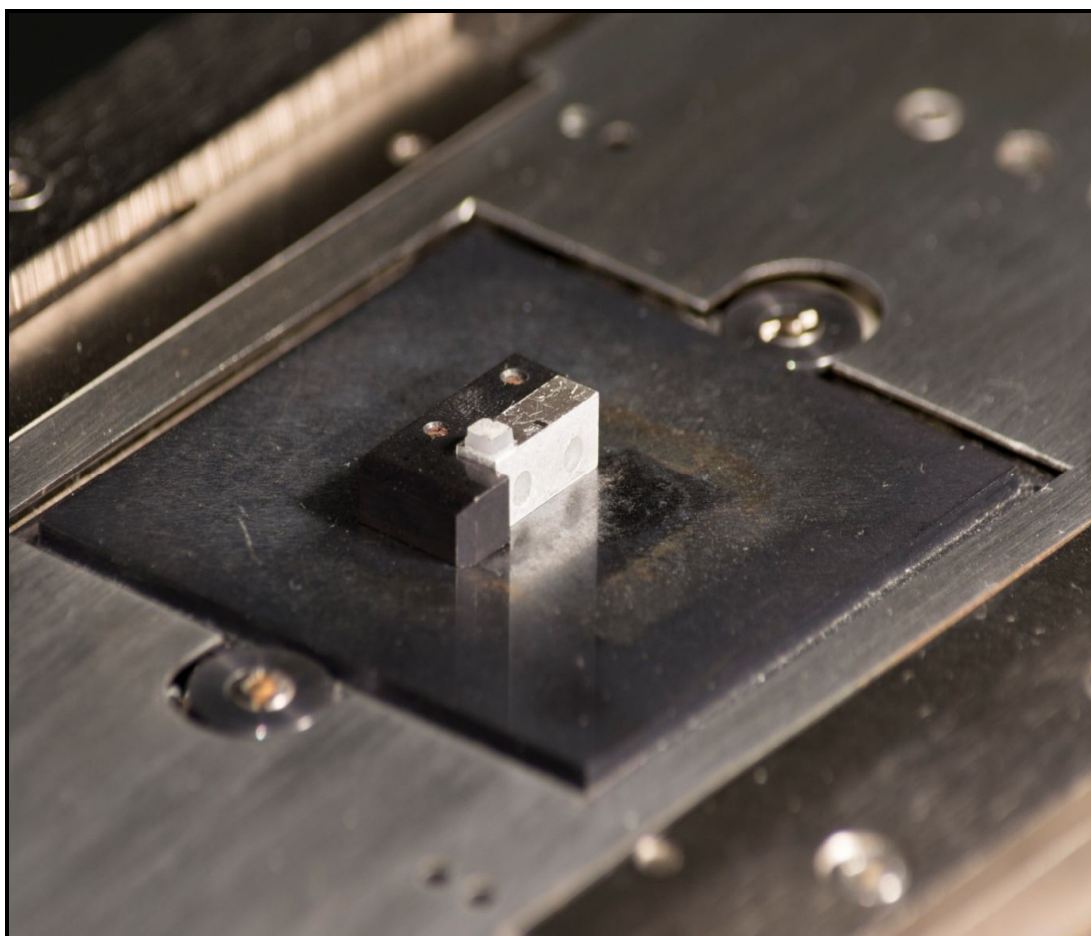


Технологический процесс монтажа лазерного кристалла, отображаемый в программе WinFlipChip [26]



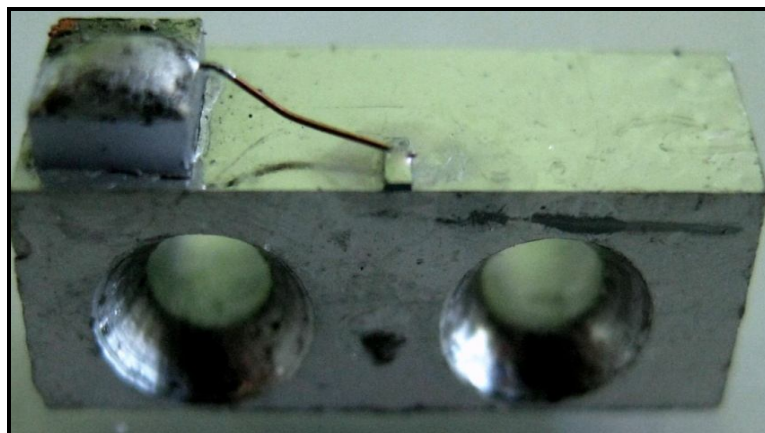
Процесс припаивания лазерного чипа к теплоотводу

Приложение 5

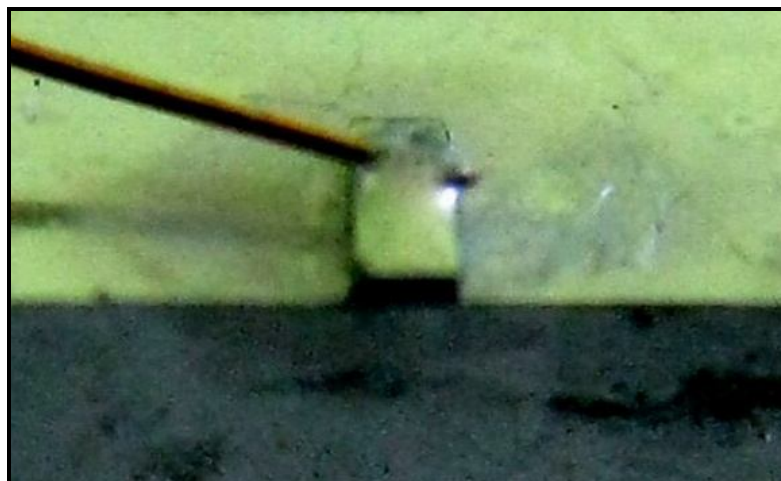


**Припаянный к теплоотводу лазерный кристалл на нагревательной плите установки
Fineplacer lambda-96**

Приложение 6



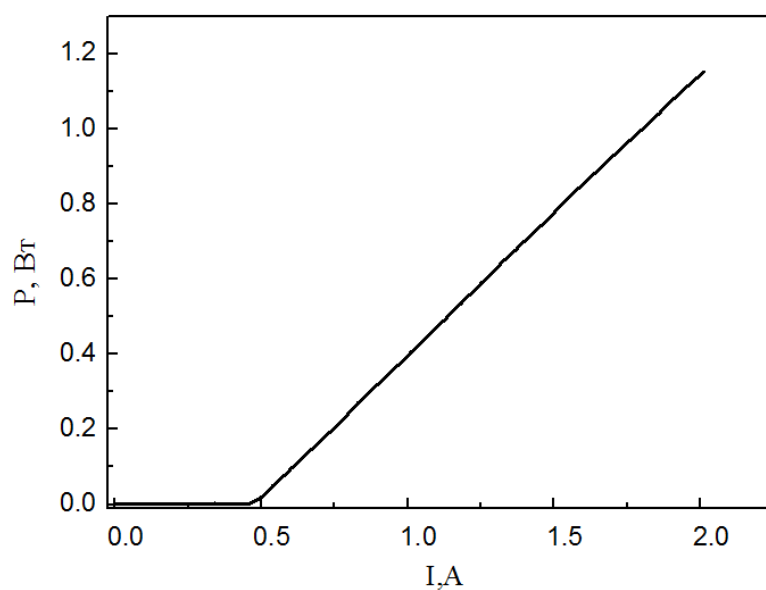
а)



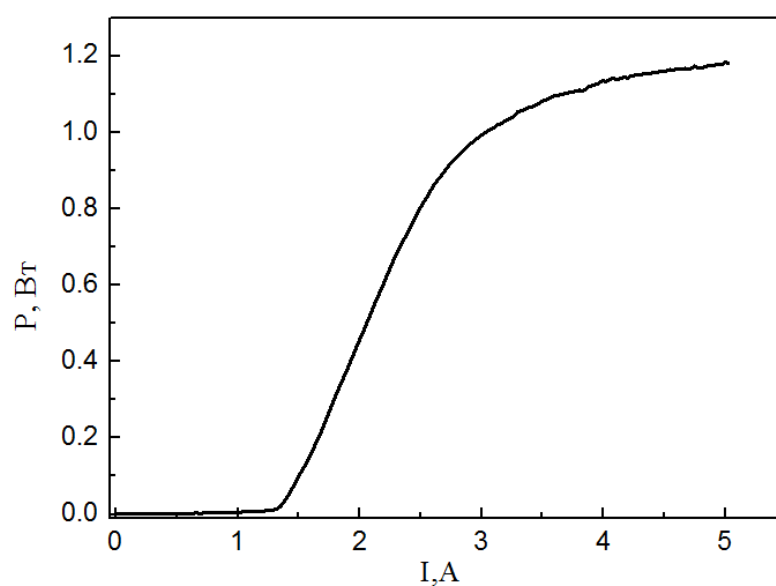
б)

Изображение лазерного диода, изготовленного в лаборатории эпитаксиальной технологии НИФТИ ННГУ (а) и лазерного чипа на теплоотводе (б)

Приложение 7



а)



б)

Ватт-амперные характеристики лазерных диодов, изготовленных с помощью установки сверхточного монтажа Fineplacer lambda-96 при различных пиковых температурах термопрофиля: а) $T_{\max} = 190^{\circ}\text{C}$, б) $T_{\max} = 270^{\circ}\text{C}$

Список литературы:

1. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Лазеры>
2. <http://www.physics.ru/courses/op25part2/content/chapter6/section/paragraph4/theory.html>
3. https://mail.rambler.ru/m/folder/INBOX/583.2/download/id/typy_lazernykh_diodov.pdf
4. Quantum-Well Heterostructure Lasers / N. Jr. Holonyak, et al. // IEEE J. Quantum Electron. – 1980 – QE-16. – P.170.
5. Жуков А.Е. / Лазеры на основе полупроводниковых наноструктур// С.-Петербург, издательство “Элмор”, 2007.
6. С.В. Лашко, Н.Ф. Лашко /пайка металлов//москва: «машиностроение», 1988.
7. http://metallichekiy-portal.ru/articles/svarka/paika/besflysovaa_paika
8. Маргулис, М.А. Звухохимические реакции и сонолюминесценция / М.А. Маргулис. – М.: Химия, 1986. – 288 с.
9. Сиротюк, М.Г. Экспериментальное исследование ультразвуковой кавитации / М.Г. Сиротюк // В кн. : Мощные ультразвуковые поля.– М.: Наука, 1968. – С. 167–220.
10. Агранат, Б.А. Ультразвук в порошковой металлургии / Б.А. Агранат, А.П. Гудович, Л.Б. Неженко. – М.: Металлургия, 1986. – 168 с.
11. <http://www.amtechultrasonic.com>
12. Справочник по пайке/ Под ред. Петрунина И.Е.. 3-е изд., перераб. И доп. М.: Машиностроение, 2003.
13. Максимихин, Б.А. Технологические процессы пайки электромонтажных соединений / Б.А. Максимихин. – Л.: Энергия, 1980. – 80с.
14. Melton, C. How good are lead free solders / C. Melton // SMT. – 1995. – № 6. – P. 32–36.
15. Чистяков, Ю.Д. Физико-химические пути повышения надежности соединений, паянных легкоплавкими припоями /Ю.Д. Чистяков, Г.А. Яковлев // Обзоры по электронной технике. Сер. Технология, организация производства и оборудование. Вып. 2(625).– М.: ЦНИИ, «Электроника», 1979. – 41 с.
16. Егоров В.Н. / Сплавы и соединения для электронной техники: Учебное пособие// Иваново, 2003.

17. В. Л. Ланин, А. П. Достанко, Е. В. Телеш / Формирование токопроводящих контактных соединений в изделиях электроники // Минск, “Издательский центр БГУ” , - 2007.
18. Кейси Х.С., Паниш М.Б. / Лазеры на гетероструктурах // М.: Мир, - 1981, - Т.1.
19. Mroziewicz B., Bugajcky M., Nakwaski W. / Physics of Semiconductor Lasers // Warszawa: Polish Scientific Publishers, - 1991.
20. Микаэлян Г.Т. / Анализ тепловых режимов мощных полупроводниковых лазеров и наборных решеток // Квантовая электроника, - 2006, - Т.36, - вып.3, - С.222.
21. В. Ланин, Е. Телеш / Алмазные теплоотводы для изделий электроники повышенной мощности // Силовая электроника, - 2008, - вып.3, - С. 120.
22. В.В. Паращук /Оптимизация тепловых режимов диодных лазеров // А.К. Беяева, В.В. Баранов, Е.В. Телеш, Vu Doan Mien, Vu Van Luc, Pham Van Truong / Известия ТПУ, - 2009, - №4.
23. Юдаев Б.Н. Теплопередача. М:Высшая школа, 1973
- 24.Ландау Л.Д., Лфшиц Е.М. Гидродинамика. М: Наука,1988.
25. Ландау Л.Д., Лфшиц Е.М. Теория упругости. М: Наука,1987.
26. Новиков И.И., Ермишкин В.И. Физическая механика реальных материалов (М.:Наука, 2004).
27. http://www.pk-altonika.ru/dictionary_42.htm
28. http://www.elinform.ru/articles_2.htm
29. http://metallicheckiy-portal.ru/articles/svarka/paika/osnovnie_ponatia_paiki/5#4
30. Илюшин А.А. Механика сплошных сред. (М.: изд-во МГУ, 1978).
31. <http://www.fineplacer.ru/micro-assembly/applications/laser-bar-bonding.html>
32. Шмаков М., Паршин В., Теплякова В. /Технологии в электронной промышленности, №7, 2007, С.70-72.
33. <http://expoelectronica.primexpo.ru/ru/archive/2012/fineline>

Высокоточный монтаж лазерных чипов с помощью установки Fineplacer lambda-96

Составители: Мария Вадимовна Карзанова, Наталья Васильевна Дикарева,
Сергей Михайлович Некоркин

Учебно-методическое пособие

Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского».

603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.

Подписано в печать 10.02.2014