

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.
ЧЕРНЫШЕВСКОГО»
(СГУ)

Кафедра физики полупроводников

**Модернизация лазерного излучателя ЛД – 15 – 590 для работы в широком
диапазоне температур**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 2 курса 202 группы

направления 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника»

факультета нано- и биомедицинских технологий

Харитоновa Тимура Викентьевича

Научный руководитель

ст. преподаватель

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

Соколов С. Н.

инициалы, фамилия

Консультант

инженер-технолог ООО

«НПП «Инжект»», к.ф.-

М.Н.

должность, уч. степень, уч. звание

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

Портнов С. А.

фамилия, инициалы

Михайлов А.И.

фамилия, инициалы

Саратов 2019

ВВЕДЕНИЕ

Общая характеристика работы.

Актуальность темы. В последние годы все больший интерес у потребителей приобретают линейки лазерных диодов (ЛЛД) или лазерные линейки (ЛЛ) – набор однотипных полосковых лазерных структур, созданных с помощью методов интегральной технологии на одном кристалле, разделенных друг от друга и не связанных между собой оптически, но имеющих общую базу и общие рабочие эпитаксиальные слои. Высокий спрос на ЛЛД возникает из-за ряда уникальных свойств, среди которых не последнее место занимает высокая мощность излучения при малых размерах. ЛЛД имеют широкий спектр практических применений, в том числе в медицине, в технологиях обработки материалов, в системах для анализа экологических загрязнений, в высокоскоростных линиях связи, в системах накачки твердотельных лазеров, системах оптической локации, навигации, слежения и наведения, в робототехнике, оборонной технике и во многих других областях науки и промышленности.

Основополагающим моментом, касающимся мощных ЛЛ, является поиск конструктивных решений, обоснование и формулировка технических требований к материалам, технологиям их обработки и параметрам техпроцессов, поиск и разработка методов контроля качества материалов, в том числе, кристаллов и комплектующих элементов. Особенно важным является обеспечение эффективного отвода тепла от активной области ЛЛ, что определяет предельную мощность генерации и общую надёжность работы полупроводникового прибора.

Проблема отвода тепла должна решаться в совокупности с проблемой термоупругих напряжений, возникающих в лазерной гетероструктуре при монтаже кристалла на теплоотводящие элементы из материалов с высокой теплопроводностью, имеющих коэффициент температурного расширения (КТР), сильно отличающийся от полупроводниковых лазерных гетероструктур.

Особенно усложняется задача монтажа лазерных линеек в случае, когда рабочая температура прибора значительно отличается от температуры, при которой происходит затвердевание припоя, используемого для соединения линейки с контактной пластиной — например, при работе её при глубоко отрицательных температурах (меньше -40°C).

Цель и задачи магистерской работы.

Целью данной работы являлось изготовление излучателей с одной лазерной линейкой, работающих при температурах от $+35$ до -100°C .

Для достижения этой цели были решены следующие задачи: подбор оптимальных параметров пайки линейки на теплоотвод, выбор материала прокладки между теплоотводом и кристаллом, проведены кратковременные ресурсные испытания излучателей.

Положение, выносимое на защиту. Наилучший тепловой и электрический контакт кристалла и подложки обеспечивается при использовании в качестве припоя сплава олово-свинец ПОС 61. Для обеспечения возможности работы линейки при температурах менее -100°C целесообразно в качестве материала, обеспечивающего механическую разгрузку линейки, использовать композитный сплав CuW, предварительно покрытый слоем никеля (химическим способом) для обеспечения адгезии сплава ПОС 61 к поверхности композитного сплава.

Структура магистерской работы. Кроме ВВЕДЕНИЯ, ЗАКЛЮЧЕНИЯ, СПИСКА ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ и ПРИЛОЖЕНИЙ работа включает 2 основных раздела:

1. Теоретическая часть;
2. Экспериментальная часть;

В разделе 1 представлены технологические этапы изготовления лазерных линеек. Описан процесс изготовления кристаллов, теплоотводов. Указаны разновидности пайки, припоя и флюсов. Приведены температурно-временные характеристики технологии монтажа.

В раздел 1.2 представлена технологическая операция разварки, перечисляются типы микросварки. Описывается разварка п-контакта ЛЛ с помощью установки ТРТ НВ 16.

В разделе 2.1 Среди всего многообразия вариантов конструкций приборов, содержащих диодные лазеры, было решено остановиться на варианте одиночной лазерной линейки, смонтированной на медной контактной пластине, поскольку такой вариант является классическим для мощных излучателей непрерывного действия. Поскольку рабочая температура линейки лежит значительно ниже точки росы воздуха нормальной влажности, при охлаждении образца в стандартной атмосфере на его поверхности будет конденсироваться влага, что, в свою очередь, приведёт к выходу из строя структуры излучателя.

Указываются способы борьбы с конденсатом, вакуумирования камеры с образцом, способы поддержания постоянной температуры.

Подачей жидкого азота в системе управляет измеритель-ПИД-регулятор ТРМ-10 производства фирмы «ОВЕН» (Россия). Схема блока термостабилизации приведена на рисунке 1.

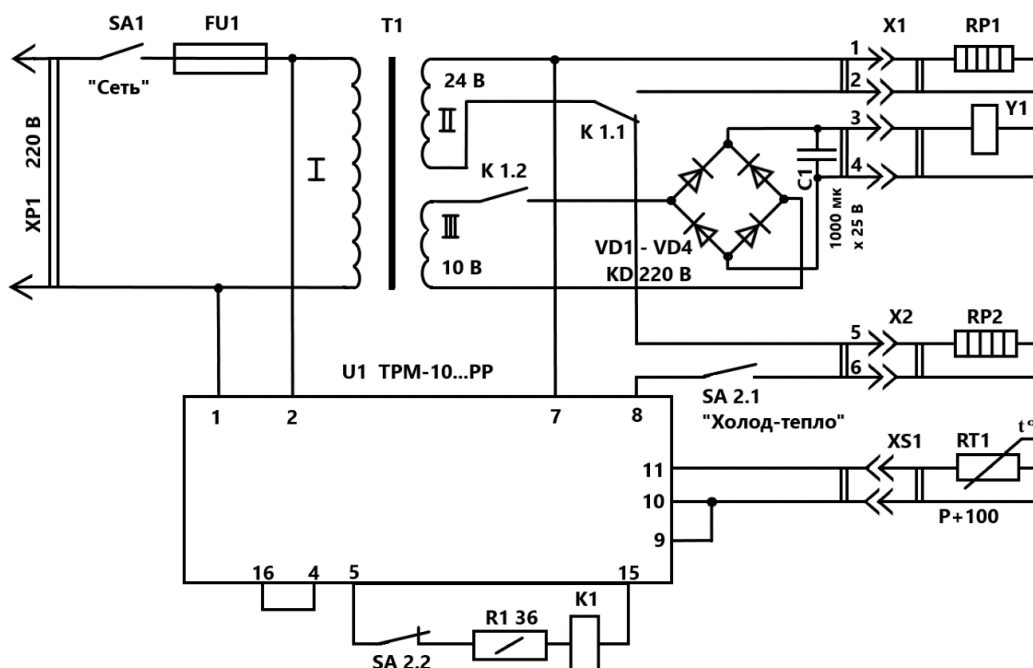


Рисунок 1 – Схема электрическая принципиальная блока управления температурой образца.

Поскольку электромагнитный клапан Y1 рассчитан на работу от постоянного напряжения 12 В, а нагреватель RP1 начинает испарять достаточное количество азота при напряжении питания 24 В, питаются они от разных обмоток трансформатора T1, причем питание на клапан подаётся через выпрямитель VD1-VD4 и фильтр C1 для исключения нагрева якоря электромагнита токами Фуко. Включением нагревателя и клапана управляет реле K1, получающее питание от встроенного в блок ТРМ-10 источника постоянного напряжения 24 В. Включением реле K1 управляют цепи выхода 1 блока U1 и переключатель режима работы SA2 «Холод–Тепло». На схеме показано состояние, в котором питание на клапан и нагреватель не подано, род работы – охлаждение. ПИД–регулятор запрограммирован на охлаждение образца до -100 °С. Температура контролируется платиновым термистором RT1 сопротивлением при 0 °С 100 Ом. При переключении тумблера SA2 в положение «Тепло» обмотка реле K1 отключается от цепей управления, питатель перестаёт нагревать азот, клапан Y1 открывается и стравливает избыточное давление в сосуде Дьюара в атмосферу. Контакты SA2.1 подают напряжение на нагреватель RP2, вмонтированный в держатель образца. Нагревом управляет логическое устройство блока ТРМ-10, соединённое с выходом 2 и отключающее нагреватель RP2 при температуре образца выше точки росы в нормальной атмосфере (программируется отдельно).

Схема испытательной камеры представлена на рисунке 2. Очищенный механическим фильтром жидкий азот поступает в теплообменник 4, частично или полностью там испаряется, забирая тепло от медной пластины, на которой укреплен испытываемый образец излучателя 1, после чего поступает в нагреватель, выполненный на основе керамической трубки 6, внутрь которой помещена нихромовая спираль 7. При прохождении через нагреватель не испарившийся жидкий азот испаряется, газообразная фаза нагревается и подаётся в камеру 3 с образцом, откуда она вытесняет влагу. Избыток азота выходит из камеры через неплотности.

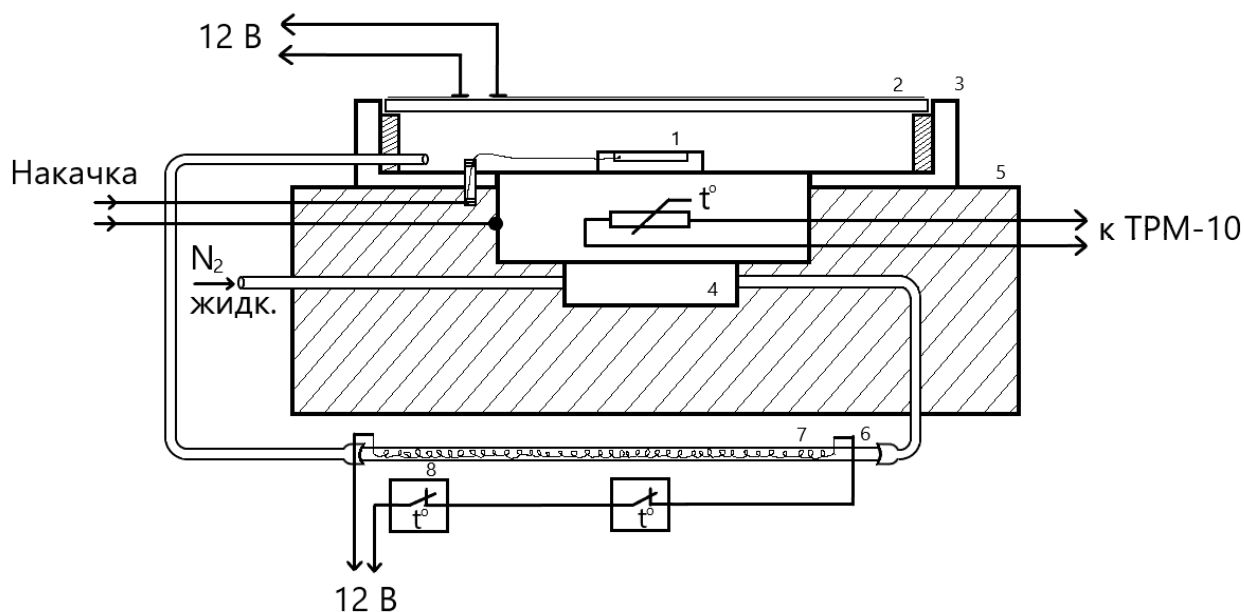


Рисунок 2 – Схема испытательной камеры.

В качестве верхней крышки 2 в камере использовано оконное стекло толщиной 2,5 мм, по периметру которого нанесено многослойное покрытие Ti/Ni, служащее резистивным нагревателем. В отсутствие нагрева стекло охлаждается и на его внешней поверхности выпадает роса. Нагреватель стекла и спираль подогревателя неиспарившегося жидкого азота питаются от общего источника напряжением 12 В.

Питание на спираль подогревателя азота подаётся через два последовательно включенных термостата-таблетки 8 на температуру +35 °С, прижатые к керамической трубке через прокладки из сплава Д16Т, имеющие полуцилиндрические пропилы для обеспечения большей площади соприкосновения термостата-таблетки с трубкой. Первый термостат расположен в середине трубки и служит для предотвращения её перегрева в отсутствие потока азота, второй — ближе к выходному концу, служит для предотвращения перегрева трубки при прохождении по ней азота. Эти меры позволяют сделать систему подогрева неиспользованного жидкого азота пожаробезопасной и автоматической.

В разделе 2.2 в экспериментах использована импульсная схема накачки, в которой лазерная линейка включена в последовательный RLC-контур, добротность которого модулируется внешним сигналом, поступающим на затвор

полевого транзистора, включенного последовательно со всеми элементами. Форма колебаний в контуре синусоидальная, длительность импульса составляет 120 нс, колебания затухают за 1-2 полупериода. Схема измерения напряжения на образце стандартна для блоков накачки (рисунок 3).

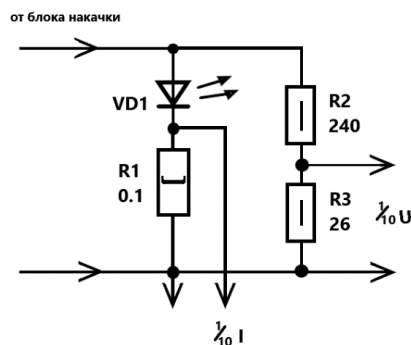


Рисунок 3 – Схема электрическая принципиальная измерительных цепей.

Цепь измерения напряжения подключена непосредственно к изучаемому образцу для повышения точности измерений (линия питания образца имеет ощутимо высокое реактивное сопротивление индуктивного характера). При измерениях следует обращать внимание на форму импульсов тока накачки и напряжения. Наличие шума вероятнее всего свидетельствует о плохом контакте в разъёмах, подключаемых к осциллографу.

Измерение мощности излучения проводят, поднося измеритель с интегрирующей сферой к линейке. Сигнал напряжения регистрируют с помощью осциллографа и пересчитывают в мощность, принимая во внимание сопротивление согласованной нагрузки — 50 Ом, на которой измеряется падение напряжения, вызванное фототоком детектора сферы.

В разделе 2.3 поскольку прибор должен работать при температурах порядка $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$, а его пайка происходит при температуре не ниже $180\text{ }^{\circ}\text{C}$, становится существенной роль разницы в температурных коэффициентах линейного расширения (ТКЛР) материалов контактной пластины и кристалла. Очевидно, основные механические напряжения должны возникать в месте пайки кристалла на контактную пластину. Частично разгрузить их можно, применив пластичный припой, например, чистый индий, и проложив между кристаллом и

контактной пластиной прокладку – спейсер, имеющую температурный коэффициент линейного расширения такой же, как у кристалла. Поскольку разварка второго, верхнего контакта может производиться различными способами — облуженной медной шиной, золотой проволокой или золотой лентой — т. е., материалами, ТКЛР которых отличается от ТКЛР материала кристалла, целесообразно смонтировать вторую прокладку – спейсер поверх кристалла и разваривать межсоединения к ней. Кроме того, покрытие верхнего спейсера можно варьировать для обеспечения лучшей паяемости или свариваемости с материалом верхнего контакта.

Таким образом, конструкция излучателя представляет собой контактную пластину с напылённым на неё слоем индия, к которой припаян блок спейсер – кристалл – спейсер, к которому приварены выводы из золотой проволоки диаметром 40 мкм. Индий на контактные пластины и спейсер наносили методом вакуумного испарения на установке УВН-2М. Толщина слоя подбиралась экспериментально по внешнему виду разобранных после электротермотренировки излучателей (Рисунок 4). Толщину увеличивали до исчезновения на линейке областей, не смоченных индием. Итоговая толщина покрытия составила величину около 1.8 мкм.

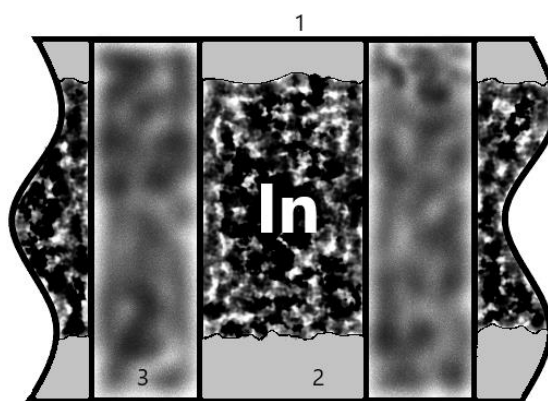


Рисунок 4 – Схематическое представление разобранных после электротермотренировки излучателей: 1 – переднее зеркало; 2 – чистый кристалл; 3 – меза.

Качество излучателей проверяли по времени, в течение которого мощность падает в 2 раза от начальной. Накачку производили импульсами тока

длительностью около 120 нс, следовавшими с частотой 5 кГц. При токе накачки 54 А мощность, отдаваемая линейкой, падала более, чем в 2 раза в течение 2-3 часов (тестирование на 6 образцах). При токе накачки 30,6 А за время более 5 часов существенных изменений мощности не наблюдали (статистика по 3 образцам). Таким образом, для линеек, собранных с использованием индиевого припоя, предельный ток накачки составил значения порядка 30 А.

Припой $Au_{80}Sn_{20}$ в связи с высокой стоимостью и высокой его жесткостью использовали только для припаивания спейсеров к линейке, поскольку недостаток площади пайки между контактной пластиной и нижним спейсером в импульсном режиме работы лазера может быть скомпенсирован растеканием тока в спейсере. Т.е., контакт «спейсер - линейка» в импульсном режиме работы более важен, чем контакт «спейсер - контактная пластина». Сборка излучателя проходила в два этапа. Сначала в отдельной кассете спаивали блоки «спейсер-линейка-спейсер». Пайка проходила в водородной печи при температуре около 320 °С. Затем блоки выгружали из кассет и монтировали на контактные пластины, покрытые индием, обычным образом.

Тренировку линеек проводили по изменённой относительно предыдущего случая методике. Фиксировали мощность, которую требовалось получить от линейки и постепенно увеличивали ток накачки. Переход на припой $Au_{80}Sn_{20}$ позволил увеличить начальную мощность, снимаемую с одной линейки, более, чем в 2 раза по сравнению с конструкцией, в которой применялся только индий. Кроме того, за 7 часов тренировки ток накачки приходилось увеличивать не более, чем на 25 % относительно начального (4 образца).

Хороший электрический и тепловой контакт между спейсером и линейкой наблюдаются главным образом в островках пайки, следовательно, адекватный теплоотвод происходит не по всей площади линейки. Кроме того, накачка активной области до состояния инверсной населённости, вероятно, также происходит главным образом в местах хорошего электрического контакта.

Основной причиной островкового характера пайки, по-видимому, является вид фазовой диаграммы системы «золото-олово» (рисунок 5). Линия ликвидуса

на ней имеет две точки эвтектики. В работе использовался состав, соответствующий большому содержанию золота — 80 % Au, 20 % Sn. Линия ликвидуса в этой точке имеет существенный наклон — если в точке эвтектики температура плавления составляет 278 °С, то увеличение количества золота всего на 10 % ведёт к скачку температуры плавления до значений более 700 °С. Такое увеличение количества золота в смеси неизбежно в виду двух обстоятельств. Во-первых, большинство используемых в технологии металлов хорошо растворимы в припое $\text{Au}_{80}\text{Sn}_{20}$. Во-вторых, планарный цикл полупроводниковых пластин предполагает нанесение на поверхность омических контактов, для которых по энергетическим параметрам как раз подходит золото. Т.е., в процессе пайки золотое покрытие, нанесённое на линейку, частично растворяется в припое (толщина его слоя не более 3 мкм), выводит его состав из эвтектики, что неизбежно увеличивает температуру плавления. По этой причине в нашей практике соединения на припой $\text{Au}_{80}\text{Sn}_{20}$ являются неразборными.

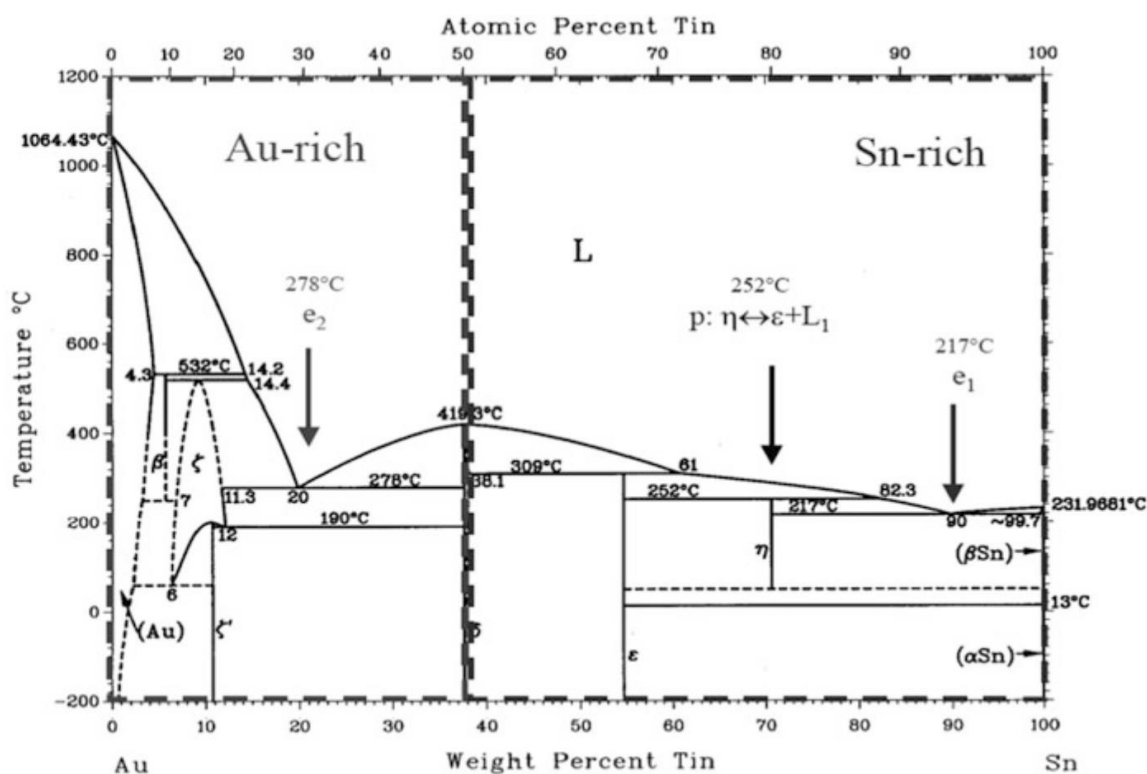


Рисунок 5 — Фазовая диаграмма системы «золото-олово» [17].

Для увеличения средней по времени мощности излучения (путём перехода в квазинепрерывный и непрерывный режимы) потребовалось в первую очередь

применить припой, обеспечивающий хорошую смачиваемость и отсутствие островковой пайки. В ранее опубликованных работах, выполненных на предприятии, такой припой был найден — это припой ПОС 61 — сплав олова и свинца в соотношении 61:39.

Для проверки правильности гипотезы о недостаточном тепловом контакте мы собрали несколько излучателей с одиночным кристаллом на контактной пластине C-mount без всякого спейсера, припаяв их припоем ПОС 61. Одиночный кристалл, очевидно, имеет меньшие, нежели линейка, габариты. Абсолютная величина изменения размеров у него также меньше, так что разумно было ожидать и меньших механических напряжений в нём. Дальнейшие эксперименты подтвердили принципиальную работоспособность такой конструкции: излучатель удалось вывести в непрерывный режим работы.

Для монтажа линейки необходимо было покрыть спейсер припоем ПОС 61. На предприятии имеется технология гальванического нанесения припоя на металлические детали. Поскольку особенности конструкции технологической установки для гальванического нанесения припоя не предусматривают работы с хрупкими и тонкими пластинами, а сам процесс нанесения происходит из растворов солей металлов, ПАВ и других компонентов, нанести припой ПОС 61 на поверхность пластины-спейсера из арсенида галлия не представлялось ни возможным, ни разумным. Поскольку от спейсера требуется в первую очередь равенство его температурного коэффициента линейного расширения таковому параметру линейки излучателя, в качестве спейсера нами был выбран композитный сплав CuW. Строго говоря, это не сплав, а скорее затвердевшая эмульсия, плохо смачиваемая оловянно-свинцовыми припоями.

Нанесение никелевого покрытия происходило восстановлением из соли — хлорида NiCl_2 — гипофосфитом натрия в присутствие буфера — уксусной кислоты и стабилизатора — тиомочевины. После выдержки пластины CuW размерами 10x5x0,5 мм в течение нескольких минут в растворе с температурой 75 °C получали плёнку никеля, полностью закрывающую поверхность

композитного сплава и неотличимую по внешнему виду от монокристаллического материала. Ожидаемая толщина покрытия составляла единицы мкм.

После никелирования пластины покрывали припоем ПОС 61 гальваническим способом по технологии, разработанной для медных контактных пластин. К пластине CuW с нерабочей стороны припаивали медную шину, покрытую припоем, после этого несколько пластин припаивали за шины к медной рамке, которую затем погружали в электролитическую ванну, где и наносили припой слоем толщиной около 2 мкм по отработанной для медных пластин технологии.

Монтаж излучателя проводили следующим образом. Линейку сначала припаивали к спейсеру из CuW в отдельной кассете, рассчитанной на тонкие контактные пластины, после чего спейсер с припаянной линейкой припаивали к контактной пластине в кассете, рассчитанной на финальную контактную пластину. Верхний спейсер из арсенида галлия исключили совсем, поскольку припаять его на припой ПОС 61 не представлялось возможным, второй контакт разваривали золотой проволокой на слой золота, которым была покрыта линейка.

Эффективность спейсера в роли демпфера механических напряжений проверяли термоциклированием в жёстких условиях. Излучатель охлаждали до температуры -140°C и сразу по достижении этой температуры включали нагреватель в камере, разогревая его до температуры $+30^{\circ}\text{C}$. Длительность фазы охлаждения в цикле составляла 10 минут, нагрева — 20 минут. После 10 циклов отдаваемая излучателем мощность не изменилась, визуальных изменений — трещин в кристалле — в оптический микроскоп при увеличении до $400\times$ не наблюдали ни в светлом, ни в тёмном поле.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В ходе модернизации излучателя ЛД-15-590 была достигнута рабочая температура -100°C . В качестве материала прокладки-спейсера был использован композитный сплав медь-вольфрам. Лучшие образцы излучателей по результатам кратковременных ресурсных испытаний при работе в непрерывном

режиме были получены при пайке кристаллов ЛД линейки на теплоотвод с помощью припоя ПОС 61.

При этом для обеспечения паяемости спейсера была модифицирована технология нанесения припоя ПОС 61, путём дополнительного нанесения адгезионного подслоя — никеля, осаждаемого химическим способом из раствора его соли (NiCl_2).

Припой $\text{Au}_{80}\text{Sn}_{20}$ при всех его преимуществах, как то нанесение в более чистой среде (по сравнению с припоем ПОС 61) - в вакууме - обнаружил тенденцию к образованию при пайке островков, что, вероятно, объясняется растворением в нём золота, которым покрыта линейка, выходом состава смеси золото-олово из точки эвтектики и, соответственно, существенным увеличением температуры пайки.

Чистый индий известен тенденцией к электромиграции, вызывающей образование «вискеров» — «усов» (нитевидных кристаллов), способных вызвать замыкание в излучателе. Кроме того, применение индиевого припоя показало приблизительно в три раза худшие результаты по сравнению с припоем $\text{Au}_{80}\text{Sn}_{20}$.

Таким образом, использование припоя ПОС 61 является оптимальным для работы излучателя в непрерывном режиме, с использованием композитного сплава меди и вольфрама в качестве материала спейсера.

Задачи, поставленные в настоящей работе, выполнены полностью.

Полученные результаты могут быть использованы для оценки качества контрольных партий и в производстве ЛД линеек при проведении дополнительных исследований.

Внедрение предложенного технологического процесса не требует модернизации оборудования.

Параметры ЛД линеек, изготовленных в предложенной конструкции и технологии, соответствуют уровню лучших образцов изделий, имеющих на рынке.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. High-Power Continuous-Wave Directly-Diode-Pumped Fiber Raman Lasers / Yao, Tianfu; Harish, Achar V.; Sahu, Jayanta K.; et al. APPLIED SCIENCES BASEL Том: 5 Выпуск: 4 Стр.: 1323-1336.
2. Both Sides Cooled Packages for High-Power Diode Laser Bars / Leers M., Westphalen T., Liermann E. 60th Electronic Components and Technology Conference Местоположение: Las Vegas, NV публ.: JUN 01-04, 2010 Стр.: 708-712.
3. Пихтин, Т. Н. Оптическая и квантовая электроника [Текст] / Т. Н. Пихтин. - М.: Высшая школа, 2001. - 573 с.
4. Тер-Мартirosян, А. Л. Мощные источники лазерного излучения на основе квантоворазмерных гетероструктур: автореф. дис. ... д. техн. наук 06.10.2014 / Александр Леонович Тер- Мартirosян; Санкт-Петербург, 2014. -33 с.
5. 150-ваттные квазинепрерывные диодные линейки на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs с длиной волны 808 нм и улучшенными тепловыми параметрами / А.Ю. Абазадзе [и др.] // Квантовая электроника. – 2001. – Т. 31, No 8. – С. 659–660.
6. Высокоточный монтаж лазерных чипов с помощью установки Fineplacer lambda-96: учебно-методическое пособие / М.В. Карзанова, Н.В. Дикарева, С.М. Некоркин. – Н. Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2014. – 83 с.
7. Кейси Х.С., Паниш М.Б. / Лазеры на гетероструктурах // М.: Мир, - 1981, - Т.1.
8. В. Ланин, Е. Телеш / Алмазные теплоотводы для изделий электроники повышенной мощности // Силовая электроника, - 2008, - вып.3, - С. 120.
9. Максимихин, Б.А. Технологические процессы пайки электромонтажных соединений / Б.А. Максимихин. – Л.: Энергия, 1980. – 80с.
10. Melton, C. How good are lead free solders / C. Melton // SMT. – 1995. – № 6. – Р. 32–36.
11. Чистяков, Ю.Д. Физико-химические пути повышения надежности соединений, паянных легкоплавкими припоями /Ю.Д. Чистяков, Г.А. Яковлев // 16 Обзоры по электронной технике. Сер. Технология, организация производства и оборудование. Вып. 2(625).– М.: ЦНИИ, «Электроника», 1979. – 41 с.

12. Лашко С. В. Пайка металлов [Текст]: учеб. пособие / С.В. Лашко, Н.Ф. Лашко. - М.: Машиностроение, 1988. - 376 с.
13. Справочник по пайке / И. Е. Петрунин и др.; под ред. И. Е. Петрунина. - 3-е изд., перераб. и доп. - М. : Машиностроение, 2003. - 480 с.
14. Микаелян Г. Т. Анализ тепловых режимов мощных полупроводниковых лазеров и наборных решеток / Г. Т. Микаелян // Квантовая электроника. - 2006. - №3. - С.222.
15. Режимы пайки оплавлением. – URL: http://www.elinform.ru/articles_2.htm (дата обращения: 05.03.2019)
16. Кудряшов. И. Технология микросварки проволочных выводов / И. Кудряшов // Производство электроники: технологии, оборудование, материалы. - 2007. - № 5. - С. 1-6.
17. Научный журнал «Вектор высоких технологий» - 2015. -№6 (19). - С. 22-28.