

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)

Институт прикладной математики и информатики био- и нанотехнологий
Кафедра физики и прикладной математики

Герке Мирон Николаевич
Кучерик Алексей Олегович

Методические указания для самостоятельной работы
по дисциплине **«Системы лазерной полупроводниковой накачки»**
для студентов ВлГУ, обучающихся по направлениям
200500.62 (12.03.05) «Лазерная техника и лазерные технологии»,
200500.68 (12.04.05) «Лазерная техника и лазерные технологии»
200400.68 (12.04.02) «Опtotехника»

Владимир-2015 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ТЕМА 1. Оптическая накачка – основной тип накачки твердотельных лазерных сред	5
ТЕМА 2. Физические основы функционирования полупроводниковых лазеров	6
ТЕМА 3. Конструкции мощных лазерных диодов	7
ТЕМА 4. Многоэлементные полупроводниковые излучатели – линейки и матрицы ЛД.....	8
Теоретическая часть, не вошедшая в материал лекций по темам 1–4.....	9
ТЕМА 5. Торцевая и поперечная типы накачки твердотельных активных элементов	22
ТЕМА 6. Продольная (торцевая) схема накачки	23
ТЕМА 7 Поперечная схема накачки	24
Теоретическая часть, не вошедшая в материал лекций по темам 5–7.....	25
ТЕМА 8. Схемотехника источников электропитания (драйверов) мощных ЛД и сборок ЛД.....	30
ТЕМА 9. Измерение параметров мощных ЛД и сборок ЛД.....	31
Теоретическая часть, не вошедшая в материал лекций по темам 8–9.....	32
Вопросы для самоконтроля по теоретическому материалу.....	49
Список литературы:	50
Приложение	51

ВВЕДЕНИЕ

Самостоятельная работа студентов (СРС) общепризнанно считается эффективным видом обучения, основанным на самостоятельном формировании студентом знаний, умений, навыков и компетенций. СРС направлена на реализацию принципов самообучения, связанных с саморазвитием личности в процессе обучения, формированием активных методов и технологий познавательной деятельности. Максимальная учебная нагрузка студентов очной формы обучения в соответствии с ФГОС ВПО составляет 54 часа в неделю. При этом планируемый объем СРС занимает значительную часть (примерно 55%) учебной нагрузки студентов университета. Поэтому требуется особенно внимательно относиться к планированию СРС и её управлению.

Активизация СРС связана с четким планированием содержания и объема самостоятельной работы, организацией и контролем ее проведения, необходимым учебно-методическим и материально-техническим обеспечением, внедрением новых технологий обучения, переосмыслением и изменением содержания и технологий проведения аудиторных занятий.

На преподавателей возлагается управление, включающее планирование работы, консультирование студентов, текущий контроль и анализ результатов учебной работы.

Методические рекомендации по самостоятельному изучению дисциплины представляют собой комплекс рекомендаций и разъяснений, позволяющий студенту оптимальным образом организовать процесс изучения данной дисциплины. При разработке рекомендаций учитывался тот факт, что часть материалов курса, согласно учебному плану направления, изучается студентом самостоятельно.

Основными видами самостоятельной работы студентов без участия преподавателей (внеаудиторная СРС) при освоении данного курса являются:

формирование и изучение содержания конспекта лекций на базе рекомендованной лектором учебной литературы, включая информационные образовательные ресурсы;

подготовка к лабораторным работам, их оформление;

выполнение домашних заданий в виде решения отдельных задач;

текущий самоконтроль и контроль успеваемости.

Основными видами самостоятельной работы студентов с участием преподавателей (аудиторная СРС) в учебном процессе являются:

текущие консультации и контроль по формированию и освоению теоретического содержания дисциплин;

прием и защита лабораторных работ;

консультирование по результатам текущего контроля знаний;

Методические рекомендации по изучению теоретического материала дисциплины «Активные среды твердотельных лазеров» дифференцировано по каждой теме курса.

ТЕМА 1. Оптическая накачка – основной тип накачки твердотельных лазерных сред

Основные вопросы темы: оптическая накачка – единственный способ возбуждения активных центров (ионов) твердотельных лазерных сред. Некогерентная (ламповая) и когерентная (лазерная) накачка. Сравнительные характеристики рассматриваемых типов накачки. Квантрон – устройство, обеспечивающее эффективную передачу энергии возбуждения активной среде, равномерное её распределение по объёму активной среды и съём тепла, выделяющегося в активном элементе.

Цель и задачи изучения темы состоит в ознакомлении студента с механизмом оптической накачки: поглощением излучения накачки активной средой и переходом активных центров на верхний лазерный уровень; практической реализации физических принципов при ламповой и лазерной накачке в конструкции конкретного устройства - квантрона.

Основной понятийно-терминологический аппарат: активная среда, оптическая накачка, когерентная/некогерентная накачка, эффективность накачки, полосы поглощения активной среды, квантрон, лазерный диод (ЛД).

Требования к уровню подготовленности студента - студент должен ориентироваться в основных вопросах/понятиях темы, понимать логические связи между ними, быть готовым дать сравнительную оценку двух различных способов оптической накачки – ламповой и при помощи ЛД., представлять преимущества и недостатки каждого из рассмотренных способов.

ТЕМА 2. Физические основы функционирования полупроводниковых лазеров

Основные вопросы темы: Излучательная рекомбинация на прямозонных переходах в полупроводниках. Условие достижения инверсии в полупроводнике (в терминах фермиевских уровней). Инверсия при инжекции носителей в *p-n* переход вырожденного полупроводника. Идея гетероструктуры. Квантоворазмерные лазерные диоды.

Цель и задачи изучения темы состоит в теоретическом ознакомлении студента с зонной структурой полупроводников, механизмами релаксации возбуждения в полупроводниках, методами получения инверсной населённости (лазерного эффекта), схемой гетероперехода.

Основной понятийно-терминологический аппарат: полупроводник, зонная структура, уровень Ферми, излучательная рекомбинация на межзонных переходах, гетероструктура.

Требования к уровню подготовленности студента - студент должен ориентироваться в основных вопросах/понятиях темы, понимать логические связи между ними, представлять физические механизмы излучательной рекомбинации в полупроводниках, формулировать условия достижения инверсной населённости в полупроводнике в терминах уровня Ферми, понимать важность перехода от классического резкого *p-n* перехода к гетеропереходам.

ТЕМА 3. Конструкции мощных лазерных диодов

Основные вопросы темы: типичная гетероструктура мощного лазерного диода, назначение отдельных элементов гетероструктуры, варианты технологического исполнения ЛД, направленные на повышение удельных характеристик полупроводниковых лазеров, основные системы полупроводников, используемых при изготовлении мощных ЛД, и достижимые диапазоны генерации.

Цель и задачи изучения темы состоит в ознакомлении студента с технологиями изготовления ЛД (эпитаксиальный процесс), конструкцией ЛД, назначением отдельных элементов структуры гетероперехода, а также достигнутыми в современных технологиях предельными параметрами и перспективами развития технологий ЛД.

Основной понятийно-терминологический аппарат: эпитаксиальный процесс, элементы гетероструктуры, системы полупроводников для изготовления гетероструктур, достижимые диапазоны генерации.

Требования к уровню подготовленности студента - студент должен ориентироваться в основных вопросах/понятиях темы, понимать логические связи между ними, представлять основы эпитаксиальной технологии, методы получения диодных гетероструктур, также знать назначение основных элементов таких структур, знать основные системы полупроводников, используемых при изготовлении мощных ЛД.

ТЕМА 4. Многоэлементные полупроводниковые излучатели – линейки и матрицы ЛД

Основные вопросы темы: Факторы, ограничивающие мощностные характеристики одиночных ЛД. Агрегатирование одиночных ЛД в многоэлементные излучающие структуры (линейки и матрицы) – оптимальный способ наращивания выходной мощности полупроводниковых излучателей. Технологические приёмы выполнения линеек и матриц ЛД. Трудности, связанные с отводом тепла. Сборки с выводом излучения в свободное пространство и в оптическое волокно.

Цель и задачи изучения темы состоит в ознакомлении студента с современными подходами в конструировании мощных (сотни-тысячи Вт выходной оптической мощности) сборок ЛД. Проблема охлаждения мощныхборок.

Основной понятийно-терминологический аппарат: одиночный лазерный диод – линейка ЛД – матрица ЛД. Технология пайки линеек ЛД. Сборка матриц ЛД. Ввод излучения ЛД в оптическое волокно.

Требования к уровню подготовленности студента - студент должен ориентироваться в основных вопросах/понятиях темы, понимать логические связи между ними, знать технологию агрегатирования ЛД в многоэлементные излучатели.

Системы термостатирования полупроводниковых лазеров.

*Если на семинаре хочется что-то спросить,
а ты ничего не понимаешь в теме доклада,
то спроси у докладчика:
«А как это зависит от температуры»?
Ибо от температуры в природе зависит ВСЁ.
Ю.П. Райзер, устный научный фольклор*

Как следует из datasheet'ов, приведенных в Приложении, для коммерчески доступных образцов ЛД коэффициент полезного действия составляет 40÷50% по параметру «ток-свет». Для лазерных систем данный результат является превосходным. Однако же не менее 50% подводимой электрической мощности диссипирует в тепло, которое отводится системой охлаждения (СО). Эта система должна не только обеспечить требуемый теплосъём, но и поддерживать заданную температуру ЛД с высокой (иногда до 0.1⁰С) точностью, если предполагается использование полупроводниковых лазеров для накачки твердотельных активных сред.

Рассмотрим эту проблему подробнее. Параметры выходного излучения сильно зависят от температуры. Характер такой зависимости иллюстрируется на рис.1.

Приведенный график показывает, что центральная длина волны даже маломощного полупроводникового лазера дрейфует с температурой. Характерный коэффициент пропорциональности для лазеров ближнего ИК диапазона составляет величину 0.25÷0.30 нм/⁰С. С мощными приборами ситуация в некотором смысле ещё хуже, ибо не только смещается спектр, он сильно уширяется с ростом тока накачки (рис.2).

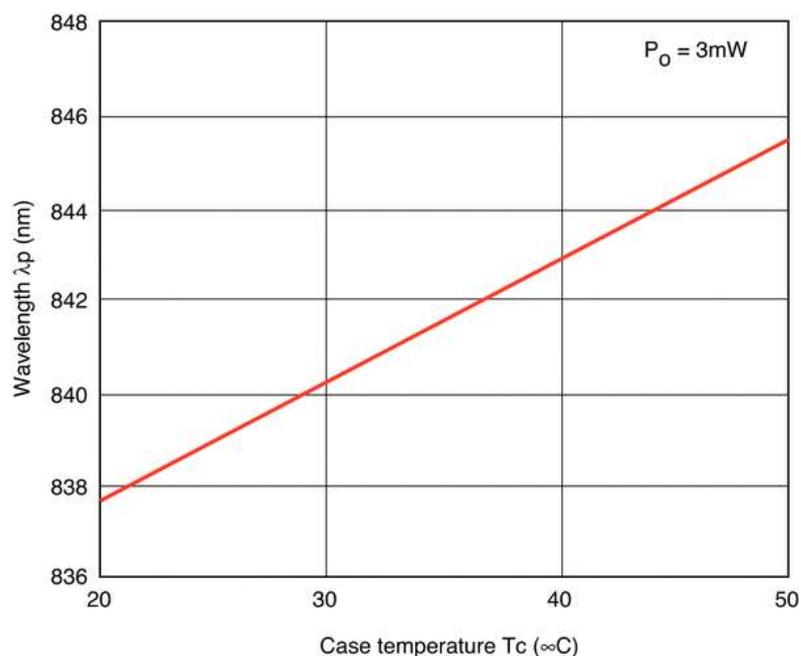


Рис. 1. Зависимость центральной длины волны в спектре излучения ЛД от температуры (по материалам

<http://www.newport.com/Laser-Diode-Technology/852182/1033/content.aspx>).

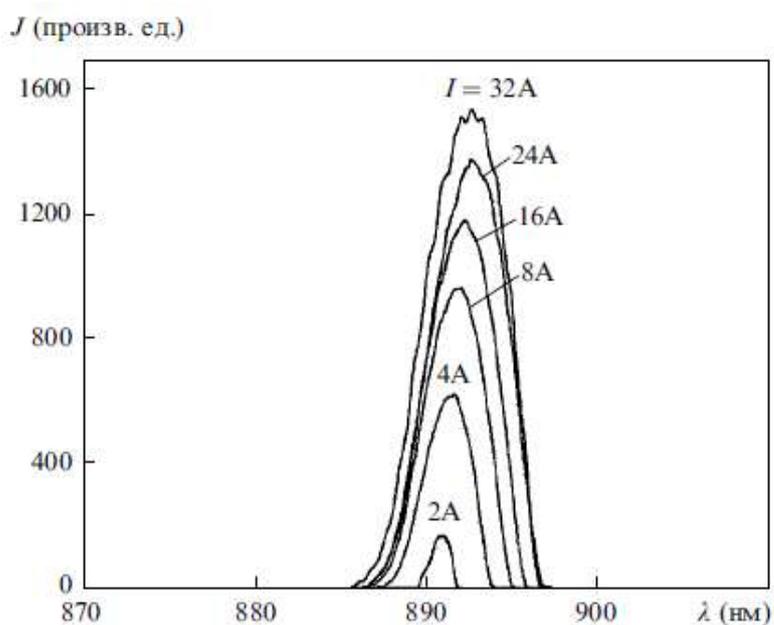


Рис. 2. Вид спектра излучения мощного ЛД в зависимости от тока накачки.

Максимальная мощность $P_{\max} = 60$ Вт. (по материалам «Квантовая электроника», 39, №8, стр. 723, 2009).

Если «холодный» лазер имеет спектр излучения, хорошо согласованный с полосой поглощения активного иона в твердотельной матрице, то без термостабилизации это согласование будет нарушено. Вот почему приходится решать все обозначенные ранее технические задачи по поддержанию температуры ЛД на нужном уровне и с необходимой точностью. Методы и подходы зависят в конечном итоге от мощности охлаждаемых ЛД.

Для относительно маломощных, единичных полупроводниковых лазеров самым распространённым вариантом является охлаждение/термостабилизация с помощью термобатарей. В физике давно известен эффект Пельтье, состоящий в поглощении или выделении тепла при протекании тока через контакт (*термоспай*) двух разнородных проводников. Количественно количество поглощённой/выделившейся теплоты Q описывается следующим выражением: $Q = \Pi It$, где

I - ток, протекающий через спай,

t - время протекания тока,

Π - постоянная, характеризующая материалы термоспая, называемая коэффициентом Пельтье.

Типичная конструкция термобатареи приведена на рис.3.

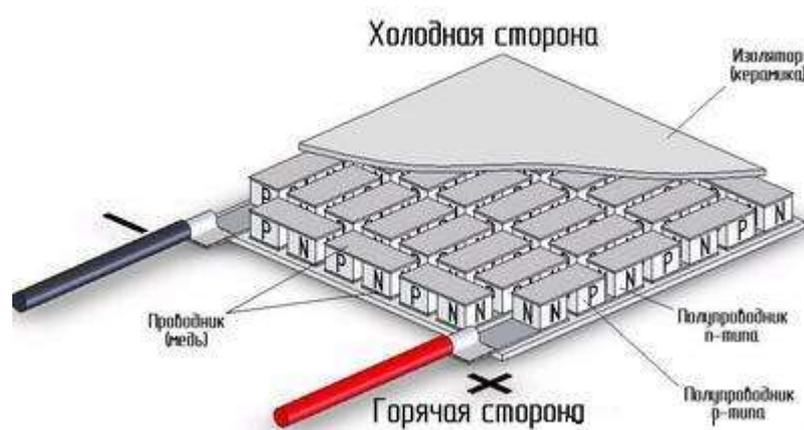


Рис.3. Схема термобатареи (модуля) Пельтье.

В качестве материалов для изготовления модуля берут полупроводники n и p типа на основе соединений висмута, теллура, ибо для них достигается максимальный коэффициент П. Пакетирование в одной конструкции большого количества (десятки и сотни штук) отдельных термостолбиков позволяет получить значительную холодопроизводительность, до десятков Вт, чего вполне достаточно для одиночного ЛД. Разумеется, для нормальной работы термобатареи тепло с горячей стороны должно отводиться во внешнюю среду. Для чего горячую сторону монтируют на массивный металлический радиатор с обдувом.

Термоэлектрический модуль имеет ряд неоспоримых преимуществ: отсутствие движущихся частей и, следовательно, каких либо вибраций, возможность прецизионного (с упомянутой точностью в 0.1°C) регулирования температуры, возможность реверса (может как охлаждать, так и подогревать статлируемый объект). Всё это обуславливает самое широкое применение данной технологии для охлаждения ЛД. К сожалению, возможности масштабирования по отводимой тепловой мощности довольно ограничены, реально достижимый КПД (примерно 30%) заставляет желать лучшего. Относительно маломощные диоды (это особенно характерно для приборов с волоконным выходом) имеют интегрированный в корпус типа «баттерфляй» охладитель. Фото показано на рис.4.

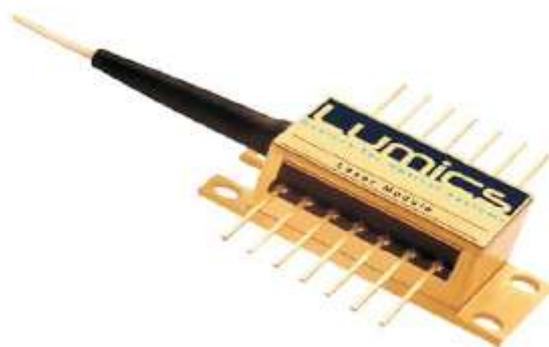


Рис. 4. ЛД с интегрированным охладителем и термодатчиком в корпусе «баттерфляй».

За массивное основание такой корпус 4-мя винтами притягивается к радиатору. Для улучшения теплового контакта обычно на сопрягаемые поверхности наносится термопаста. Подвод напряжения к самому ЛД, термобатарее, датчику температуры осуществляется через выводы на боковых стенках.

Следует иметь в виду, что для функционирования охладитель Пельтье должен включаться в контур соответствующей системы управления, которая измеряет сигнал рассогласования между фактической температурой корпуса и заданной, вырабатывает соответствующий ток, протекающий по термоспаям. Схемотехника подобных устройств – тема отдельного разговора, здесь этот вопрос рассматриваться не будет. Отметим лишь, что многие ведущие производители (Analog Devices, MAXIM, Linear technology и др.) выпускают законченные решения, выполненные в виде специализированных чипов.

Выходная мощность DPSS лазеров давно перешагнула киловаттный рубеж. Задача отвода тепла от источника подобной мощности решается традиционной системой водяного охлаждения. Основная трудность же состоит в том, в отличие от классической водяной СО для охлаждения твердотельных лазеров с ламповой накачкой, температура хладагента должна стабилизироваться с высокой точностью.

Один из возможных вариантов выполнения модулей полупроводниковой накачки с водяным охлаждением описан в работах [1,2]. Сборочной единицей являются в данном случае диодные линейки *Silver Bullet* американской компании NG Cutting Edge Optonics. В Приложении приведены характеристики более современной модификации *Golden Bullet*. Для получения требуемой выходной мощности линейки устанавливаются на теплоотводы в количестве 5, 7 и 19 шт. методом пайки. Данные таких модулей приведены в таблице 1.

Технические характеристики модулей диодной накачки

Тип модуля	Мощность излучения, Вт	Длина волны в максимуме спектра, нм	Напряжение питания, В	Номинальный ток накачки, А
КЛ4-100	100	805±2	10	25
КЛ4-280	280		25	
КЛ4-760	760		70	

Чтобы обеспечить требуемый температурный режим диодов, необходимо иметь эффективные теплообменники с низким термическим сопротивлением, которое в основном определяется интенсивностью теплообмена на границе „стенка-вода“. Для достижения максимальной эффективности теплообмена щелевой канал выполняется в виде медной микроканальной структуры со специфическим оребрением.

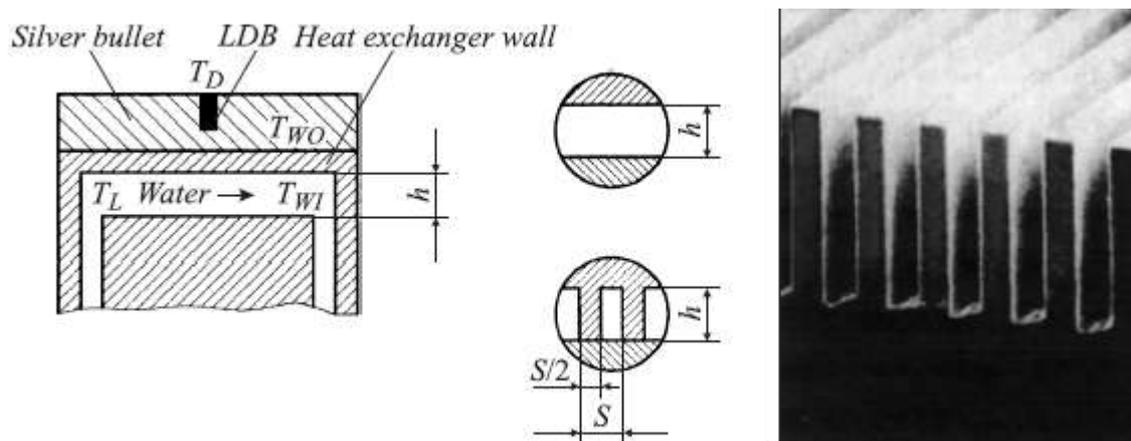


Рис. 5. Структура теплообменников с микроорбренем.

(Слева – эскиз, справа - микрофотография). $h=1$ мм, $s=0.2$ мм.

Для охлаждения всей системы использовался чиллер RRS-0250-AC Bay VoltexCorp., обеспечивающий прокачку хладагента с расходом 20 л/мин и

стабилизирующий его температуру с точностью $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$. В подобных чиллерах, гарантирующих отвод тепловой мощности в единицы кВт, для поддержания температуры хладагента используется система компрессионного типа, совсем как в домашнем холодильнике. Только мощность её соответствующая.

В самых современных вариантах выполнения сборок мощных ЛД производитель интегрирует теплообменник в единую конструкцию излучающего модуля. Типичный пример показан на рис.6.

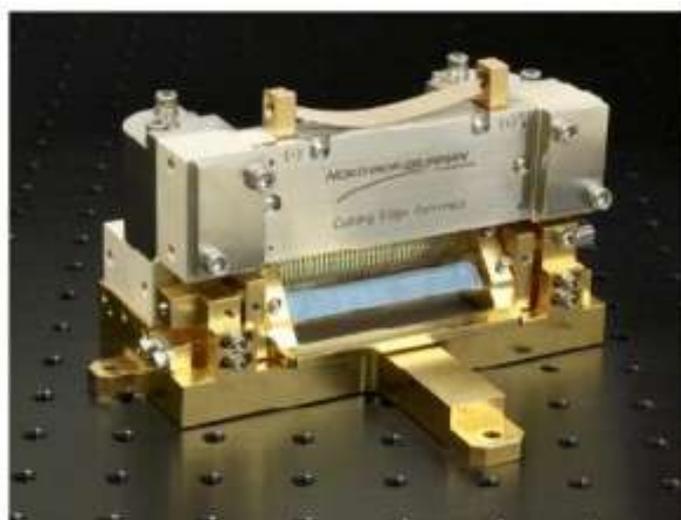


Рис. 6. Лазерная диодная сборка с двумя 36-линейными стеками с микроканальным охлаждением упоминавшейся ранее фирмы NGCEO.

Методы сужения спектра излучения мощных ЛД и сборок таких ЛД

В работе [3] В.Ф. Крупке предложил использовать лазерные диоды для накачки атомов щелочных металлов. Термин DPAL (diode pumped alkali laser), ныне широко используемый в англоязычной литературе, был предложен именно им. Это тот редчайший случай, когда оптическая накачка применима для лазерных активных сред, находящихся в газовой фазе. В данном случае лазерные диоды приносят все те же преимущества, что и в рассмотренном ранее варианте их использования для накачки твердотельных

лазерных систем. Но их применение имеет ряд специфических черт, а именно:

1. центральная длина волны в спектре генерации ЛД должна точно совпадать с длиной волны соответствующего D_2 перехода атома щелочного металла;
2. ширина спектра ЛД должна согласовываться с относительно узкой линией D_2 перехода. Это требование существенно жёстче, чем требование на ширину спектра ЛД для накачки твердотельных активных элементов;
3. наконец, обладать яркостью, достаточной для достижения необходимой инверсии на лазерном переходе.

Что касается первого требования, то приведенный ниже рисунок 7 наглядно демонстрирует ситуацию, имеющую место на сегодняшний день.

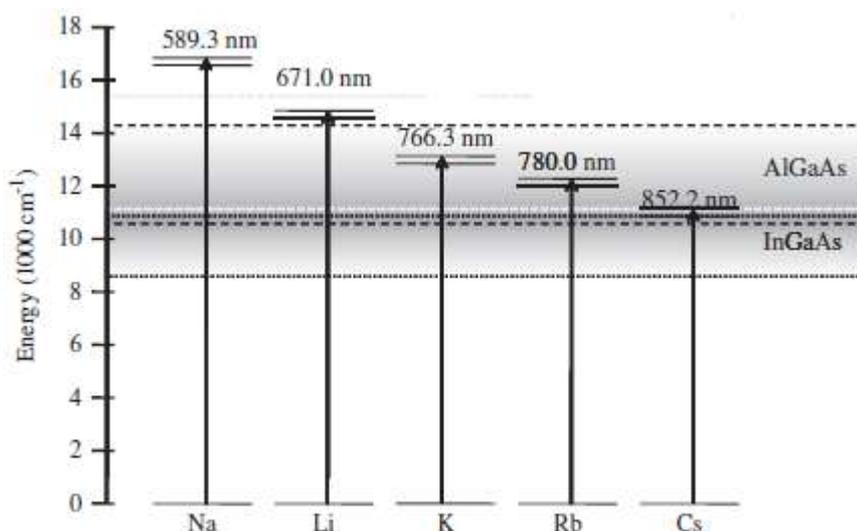


Рис. 7. Энергии фотонов/ длины волн, необходимые для накачки атомов щелочных металлов и спектральные области излучения основных типов полупроводниковых лазеров.

Очевидно, что длины волн, излучаемые самыми распространёнными и технологически отработанными ЛД на AlGaAs и InGaAs, обеспечивают возбуждение K, Rb и Cs. AlGaAs диоды накачивают Nd^{3+} содержащие среды,

InGaAs – Yb³⁺. Для «экзотических» Li и Na потребуются дополнительные разработки.

Выполнение же п.2 требований, предъявляемых к ЛД, пригодных для оптического возбуждения щелочных атомов сопряжено со значительными трудностями. Если взять любой мощный ЛД/линейку/ матрицу на AlGaAs (соответствующие данные приведены в Приложении), то окажется, что типичная ширина спектра излучения таких источников составляет 2÷3 нм. Такое значение будет не всегда удовлетворительным даже в случае твердотельных активных сред с их широкими полосами поглощения излучения накачки. Один из классических примеров такого рода показан на рис. 8, где приведен спектр поглощения Nd: YAG в диапазоне длин волн 780-900 нм. Наиболее распространенной длиной волны накачки для Nd: YAG лазеров является 808 нм. Существует также соседний пик примерно на 805 нм, что вместе с первым создает эффективную полосу поглощения шириной 5.5 нм, и это идеально подходит для накачки стандартными сборками лазерных диодов. Однако есть технические преимущества, связанные с накачкой Nd: YAG на более длинных волнах. В частности, малый квантовый дефект при накачке на таких волнах приводит к слабой тепловой линзе и меньшим потерям из-за деполяризации. В результате, накачка Nd: YAG на 869 или 885 нм является привлекательной альтернативой во многих конструкциях лазера. К сожалению, ширина пиков поглощения на этих длинах волн значительно уже (~ 1 нм и ~ 3 нм, соответственно), и поэтому для накачки требуются диоды с узким спектром излучения.

И понятно, что большая (~ 3 нм) ширина спектра накачки совершенно не подходит для узкой линии D₂. В рассматриваемом случае приходится принудительно суживать спектр мощных ЛД. Стандартом de facto стало использование внешних элементов для фиксации длины волны для созданияборок лазерных диодов с узким спектром длин волн. Наибольшую популярность получил подход, основанный на применении объемных

брэгговских решеток (VBG-Volume Bragg Grating) в составе сборок ЛД. Не вдаваясь в подробности: VBG по существу представляет объёмную голограмму, работающую по схеме Ю.П. Денисюка и осуществляющую спектральную селекцию падающего на неё излучения. Удаётся достичь спектральной ширины излучения около 0,5 нм (FWHM) при выходной мощности от десятков Вт до единиц кВт. Применительно к решёткам ЛД, выпускаемым фирмой [Northrop Grumman Cutting Edge Optonics](#) (NGCEO), основная идея выглядит следующим образом (рис.9).

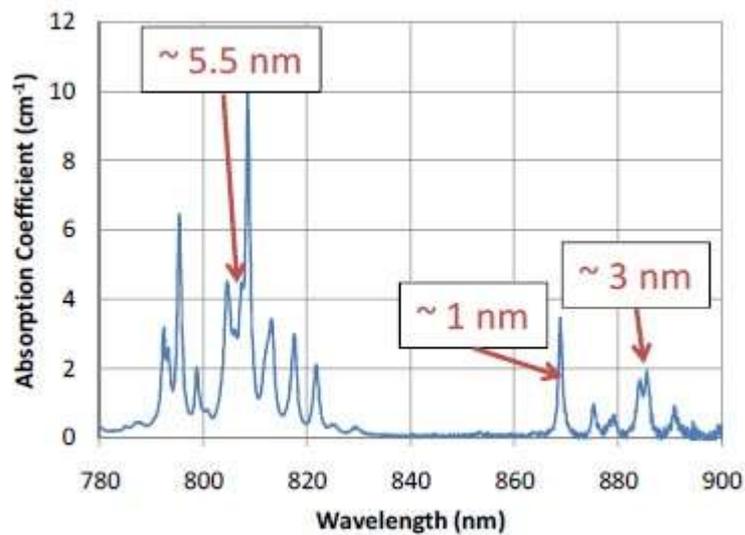


Рис 8. Кривая поглощения для для Nd:YAG (примерные ширины полос поглощения приведены для справки).

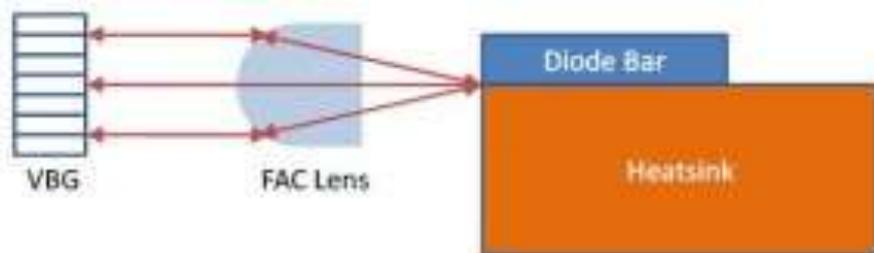


Рис 9. Схема решения, используемого NGCEO при производстве сборок со стабилизированной длиной волны излучения (не в масштабе!).

Сначала мощная лазерная диодная линейка припаивается к микроканальному радиатору охлаждения. Данная подборка проходит предварительное тестирование для проверки надлежащей работы и проверку надежности припайки и качества зеркал. Необходимое количество этих подборок (с $N = 1$ до 56, в зависимости от пожелания заказчика) затем спаиваются в мощную сборку. Затем к каждому радиатору прикрепляется коллимирующая по быстрой оси (FAC) линза. Наконец, небольшая VBG индивидуально юстируется относительно каждой пары линейка / линза и крепится к раме сборки. Когда устройство работает, свет, излучаемый диодной линейкой, коллимируется линзой и попадает на решетку. Решетка селективно отражает свет с определенной длиной волны (определяется шагом решетки) обратно через линзу в оптический резонатор диодной линейки. Этот метод обратной связи заставляет диоды генерировать свет с определенной (заданной решеткой) длиной волны при вариации рабочих параметров (температуры, тока и пр.).

Полученный с помощью VBG результат демонстрируется на рис.10.

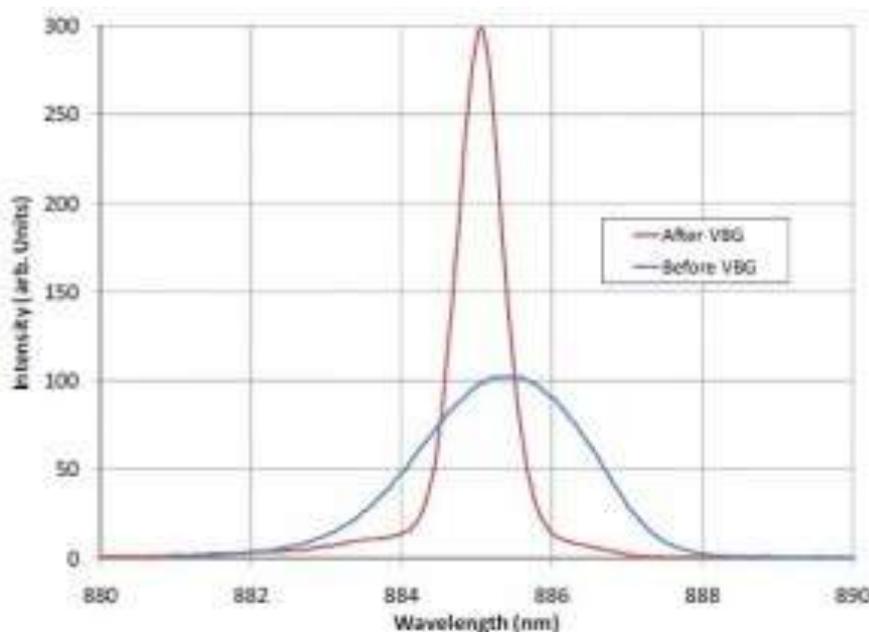


Рис 10. Спектры излучения 36-линейчатого стека до и после добавления VBG.

Показанный выигрыш от применения брегговских решёток может сводиться к минимуму, если добавление VBG приводит к чрезмерно негативному влиянию на выходную мощность сборок. Однако эксперимент показал, что для рассмотренного 36-линейечного стека добавление спектральной селекции снизило мощность примерно на 8% при токе накачки 80 А. Но при этом резко возросла доля мощности накачки, попадающей в полосы поглощения АЭ. В результате общее снижения мощности сборки составляет эффект второго порядка малости.

Применительно к случаю диодной накачки щелочных атомов наибольших успехов достигла компания DILAS Diode Laser Inc. (www.dilas.com/) (см. рис.11).

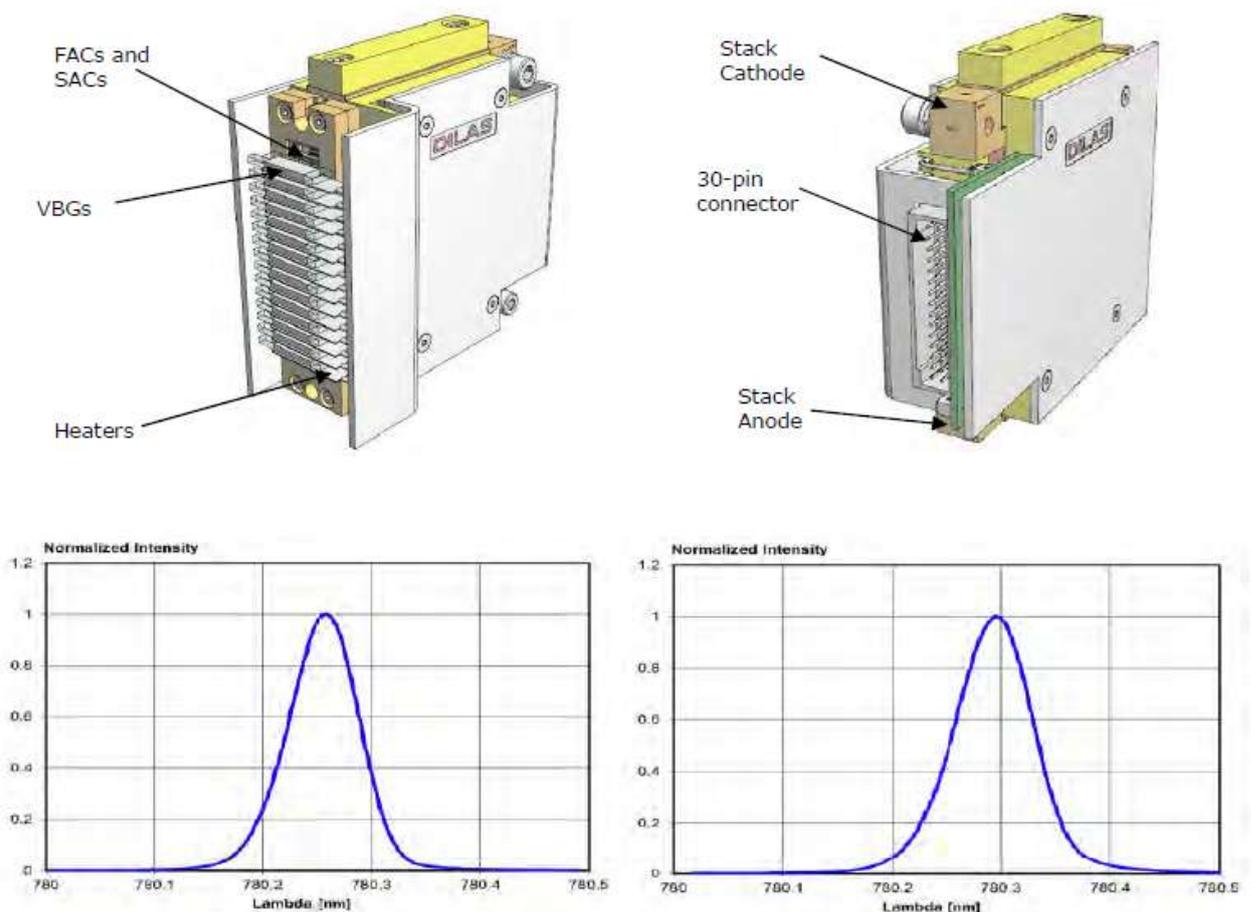


Рис.11. Сборка из 15 линеек (вверху) и спектр излучения (внизу). Ток накачки/ выходная мощность: 50 А/ 600 Вт (слева)и 80 А/ 1030 Вт справа.

Таким образом, ширина спектра излучения мощной (1 кВт) сборки может быть сужена до величины ~ 0.1 нм, что является превосходным результатом.

ТЕМА 5. Торцевая и поперечная типы накачки твердотельных активных элементов

Основные вопросы темы: Продольная и поперечная схемы накачки активной среды твердотельных лазеров. Накачиваемый объём при различных типах накачки. Неоднородность распределения плотности мощности накачки по объёму АЭ и способы улучшения этого параметра.

Цель и задачи изучения темы состоит в ознакомлении студента с двумя различными схемами накачки: продольной и поперечной, выяснении специфических областей применения, методах улучшения характеристик каждой из схем.

Основной понятийно-терминологический аппарат: продольная схема накачки АЭ, поперечная схема накачки АЭ, неоднородность распределения плотности мощности накачки по объёму АЭ.

Требования к уровню подготовленности студента - студент должен ориентироваться в основных вопросах/понятиях темы, понимать логические связи между ними, представлять преимущественные области использования продольной и поперечной схем накачки, а также методы преодоления недостатков, присущих каждой из них.

ТЕМА 6. Продольная (торцевая) схема накачки

Основные вопросы темы: Продольная схема накачки. Варианты продольной схемы, направленные на улучшение характеристик выходного излучения лазера. Конструкции квантронов, реализующих продольную схему накачки. Предельно достижимые параметры.

Цель и задачи изучения темы состоит в ознакомлении студента с общей схемой продольной накачки и её основных вариантов, конкретными техническими решениями, применяемыми в конструкциях квантронов маломощных твердотельных лазеров.

Основной понятийно-терминологический аппарат: продольная схема накачки, согласование объёма мод резонатора и накачиваемого объёма, квантрон.

Требования к уровню подготовленности студента - студент должен ориентироваться в основных вопросах/понятиях темы, понимать наивысшую эффективность продольной схемы накачки, присущие её ограничения, методы снижения влияния вредных факторов на характеристики выходного излучения, а также область применения данной схемы (относительно маломощные лазеры с выходной мощностью ~ 10 Вт).

ТЕМА 7 Поперечная схема накачки

Основные вопросы темы: Поперечная схема накачки. Варианты поперечной схемы с прямым вводом излучения накачки и с оптическими системами подвода излучения накачки. Конструкции квантронов, реализующих поперечную схему накачки. Предельно достижимые параметры.

Цель и задачи изучения темы состоит в ознакомлении студента с общей схемой поперечной накачки и её основных вариантов (с прямым и опосредованным вводом излучения накачки в активную среду), конкретными техническими решениями, применяемыми в конструкциях квантронов мощных твердотельных лазеров.

Основной понятийно-терминологический аппарат: поперечная схема накачки, схема с прямым вводом излучения накачки в активную среду, схема с оптическими системами подвода излучения накачки, квантрон.

Требования к уровню подготовленности студента - студент должен ориентироваться в основных вопросах/понятиях темы, понимать необходимость перехода к поперечной схеме накачки для масштабирования выходной мощности твердотельных лазеров до киловаттного уровня.

Лазеры с активным элементом в виде диска (Thin Disk Laser)

Подавляющее число квантронов твердотельных лазеров киловаттного уровня выходной мощности строится по традиционной схеме: активный элемент имеет цилиндрическую форму с характерным отношением диаметра к длине $\sim 1:10$. При необходимости увеличения выходной мощности до десятков кВт разработчик сталкивается с рядом непреодолимых трудностей, носящих фундаментальный характер. Один из них – критическое ухудшение качества лазерного пучка из-за тепловой линзы, возникающей вследствие объёмного выделения тепла в АЭ.

Для уменьшения влияния термооптических искажений в активной среде твердотельных лазеров была предложена конструкция, получившая название «дисковый лазер». Принцип работы такого лазера основан на использовании охлаждаемого АЭ в форме диска. Высокая эффективность охлаждения лазерной среды обеспечивается за счет большой площади поверхности диска в сравнении с его объемом. Поэтому средняя мощность излучения в пучке достигает высоких значений. На рис.12 показано, как за счет охлаждения в пределах дискового лазера не возникает эффект тепловой линзы и генерируется осевой поток тепла. Этот же рисунок демонстрирует эволюционный процесс перехода от стержневой конструкции к концепции дискового лазера. Из-за того, что стержневой лазер охлаждается через цилиндрическую поверхность кристалла, через нее распространяется двухмерный поток тепла, формирующий параболический профиль температурного искажения. Зависимость показателя преломления от температуры приводит к возникновению эффекта тепловой линзы. Такая линза ухудшает качество выходящего луча и ограничивает его выходную мощность. Тонкий диск, напротив, охлаждается через покрытие с обратной стороны кристалла с высокими отражающими свойствами, при этом

генерируется одномерный поток тепла. Как следствие, температурный градиент распределяется параллельно лазерному лучу и не приводит к появлению эффекта тепловой линзы.

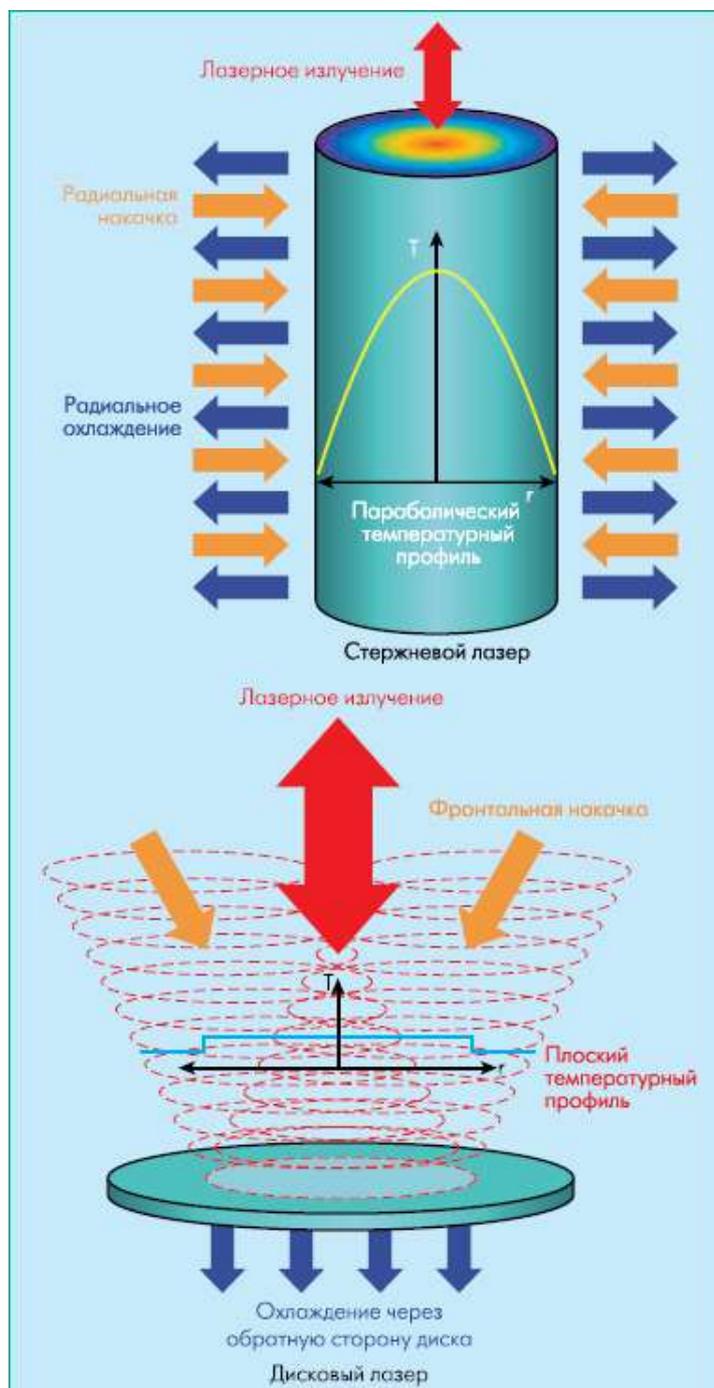


Рис. 12. Температурный градиент в активном элементе для традиционной стержневой и дисковой геометрии активного элемента

На практике тонкий лазерный кристалл в дисковых лазерах с высокой мощностью либо соединен с теплоотводящим элементом, либо охлаждается

принудительно. В обоих случаях нежелательное воздействие эффекта тепловых линз устраняется оптимальной компоновкой элементов конструкции дискового лазера. Коэффициент теплопроводности охлаждающего радиатора кристалла непосредственно зависит от площади зоны накачки. При постоянной температуре кристалла достигаемая средняя выходная мощность прямо пропорциональна площади зоны накачки и, соответственно, площади поверхности лазерного луча на диске. Это является уникальной особенностью дисковых лазеров и позволяет масштабировать среднюю мощность при постоянной энергии луча на диске. Данное свойство важно для мультикиловаттных источников, потому что оно позволяет регулировать мощность, не изменяя при этом параметры, оказывающие влияние на надежность системы.

На первый взгляд, определенную проблему ставит выбор толщины кристалла, необходимой для эффективного отвода тепла. Потому что данная схема предполагает низкую способность поглощения энергии накачки. Однако геометрическая схема накачки дискового лазера позволяет найти изящное решение этой проблемы. Процесс накачки можно представить в виде многоканальной конфигурации, состоящей из параболического зеркала и системы отклонения. На рис.13 показана типовая оптическая схема резонатора для лазерных устройств с высокой средней мощностью.

Параболическое зеркало фокусирует коллимированный пучок накачки, который поступает в резонатор лазерного кристалла. После частичного поглощения оставшаяся часть пучка отражается от зеркала, имеющего высокий коэффициент отражения, на тыльной стороне диска. В результате многократного отклонения через призмы и параболического зеркала получается в общей сложности до 20 поглощений при прохождении через диск. Этим достигается высокая эффективность поглощения световой энергии пучка накачки. Оптическая схема таких резонаторов допускает не строгие ограничения яркости для источника накачки. Как правило, для

накачки дискового лазера с высокой средней мощностью требуются пучок, качество которого определяется величиной $500 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$.

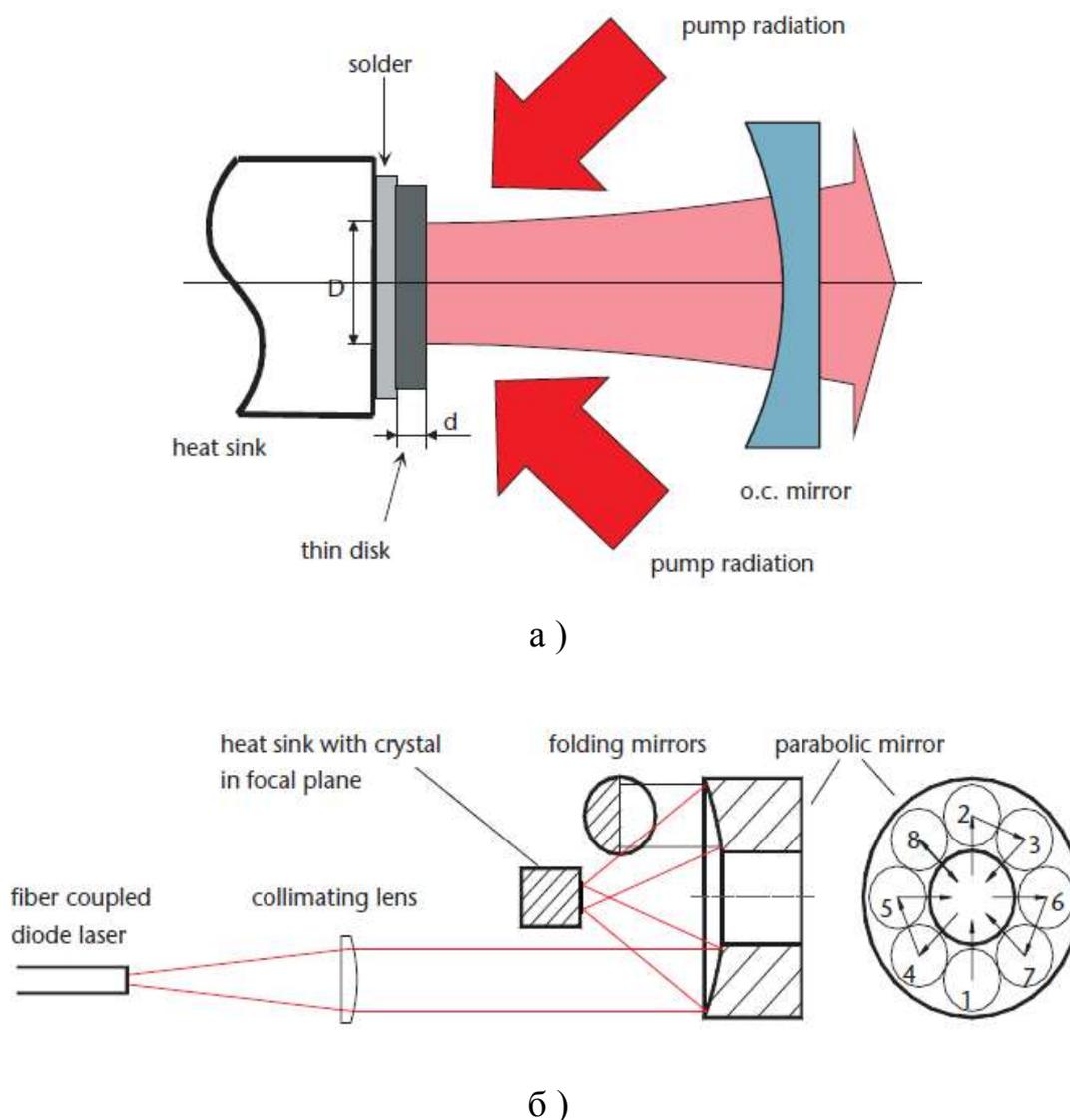


Рис. 13. Оптическая схема для дисковых лазерных устройств с высокой средней мощностью. а) – собственно резонатор, б) – схема многопроходовой накачки.

Именно поэтому допускается применение как волоконных лазерных диодов, так и лазерных диодных схем с равномерным распределением интенсивности. С точки зрения практического использования лазерные диоды с равномерным распределением интенсивности более

предпочтительны ввиду заметно меньших затрат, приходящихся на один ватт мощности накачки.

Ниже на эскизе (рис.14) представлен усилительный модуль на основе дисковой геометрии активной среды с максимальной мощностью накачки 30 кВт, разработанный German Aerospace Center совместно с фирмой TRUMF.



Рис. 14. Мощный усилительный модуль с дисковым активным элементом.

Мощность накачки ~ 30кВт.

ТЕМА 8. Схемотехника источников электропитания (драйверов) мощных ЛД и сборок ЛД

Основные вопросы темы: вольт-амперные характеристики (ВАХ) прямосмещённого гетероперехода. Необходимость питания ЛД от источника тока. Линейный токовый драйвер на операционном усилителе (ОУ). Схемотехника мощных импульсных драйверов с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ).

Цель и задачи изучения темы состоит в ознакомлении студента со схемотехникой источников накачки (драйверов) мощных ЛД, линеек и матриц ЛД.

Основной понятийно-терминологический аппарат: операционный усилитель (ОУ), схема линейного источника тока, широтно-импульсная модуляция (ШИМ), импульсное питание сборок ЛД.

Требования к уровню подготовленности студента - студент должен ориентироваться в основных вопросах/понятиях темы, понимать логические связи между ними, понимать основные параметры мощных ЛД как электрической нагрузки, формулировать преимущества и недостатки схемотехники линейных и импульсных источников питания (драйверов) ЛД и их сборок.

ТЕМА 9. Измерение параметров мощных ЛД и сборок ЛД

Основные вопросы темы: Основные параметры и характеристики лазерного излучения: энергетические, пространственно-временные. Методы измерения основных характеристик излучения ЛД. Измерительная аппаратура.

Цель и задачи изучения темы состоит в ознакомлении студента с методами и аппаратурой для измерения основных характеристик излучения мощных ЛД и сборок таких ЛД.

Основной понятийно-терминологический аппарат: выходная мощность ЛД, ВАХ ЛД, угловая расходимость излучения, методы измерения.

Требования к уровню подготовленности студента - студент должен ориентироваться в основных вопросах/понятиях темы, понимать логические связи между ними, быть готовым объяснить методы измерения параметров излучения ЛД.

Характеристики спектральных приборов с одномерной дисперсией

Так как в теоретической части курса и лабораторном практикуме приходится постоянно оперировать понятием «ширина спектра излучения лазерного диода», измерять этот параметр экспериментально, исследовать поведение спектра в зависимости от режимов работы полупроводникового лазера, то следует дать студентам хотя бы минимальные представления о классических спектральных приборах с одномерной дисперсией. Изложенный ниже конспект вводит основные понятия и определения, а также позволяет понять основную схему классических спектрографов, используемых в лабораторных работах.

Образование спектра.

На рис. 15. приведена схема спектрального прибора (для определённости призмного) с одномерной дисперсией.

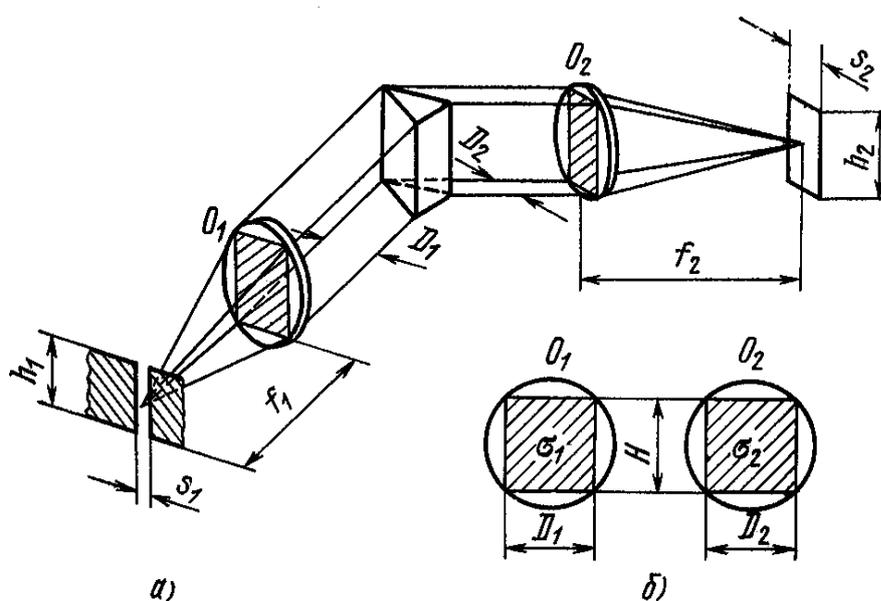


Рис. 15. Схема спектрального прибора с одномерной дисперсией. Показанные лучи соответствуют построению изображения центральной точки щели.

Параметры, относящиеся к частям оптической схемы до диспергирующей системы, имеют индекс 1, а после неё - 2. Оптические оси коллиматора и камеры лежат в одной плоскости, ортогональной преломляющему ребру призмы (или штрихам решётки). Эта плоскость именуется *главной* и является плоскостью дисперсии. В фокальной плоскости объектива O_1 располагается узкая щель, узкая сторона которой параллельна главной плоскости, а широкая – перпендикулярна ей. При её освещении исследуемым излучением саму щель можно рассматривать, как несамосветящийся источник, изображение которого строится коллиматорным O_1 и камерным O_2 объективом в фокальной плоскости последнего.

Положим, что щель освещается монохроматическим излучением, а вся оптика прибора – идеальна. Введём понятие *углового увеличения диспергирующей системы* Γ . Согласно рис 16. $\Gamma = d\varphi/d\psi$.

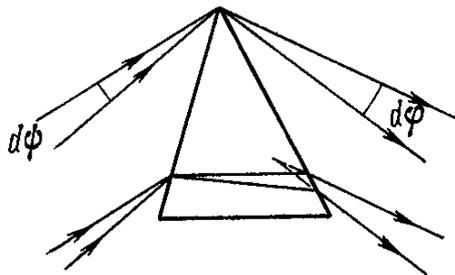


Рис. 16. К понятию углового увеличения диспергирующей системы (призмы).

При построении изображения щели следует учесть дифракционные эффекты, так как из приведенных выше двух рисунков видно, что это изображение строится световыми пучками, ограниченными по поперечному сечению. Однако на первом этапе нашего рассмотрения ограничимся геометрическим подходом, который справедлив при достаточно широкой входной щели. Выполненное построение представлено на рис. 17:

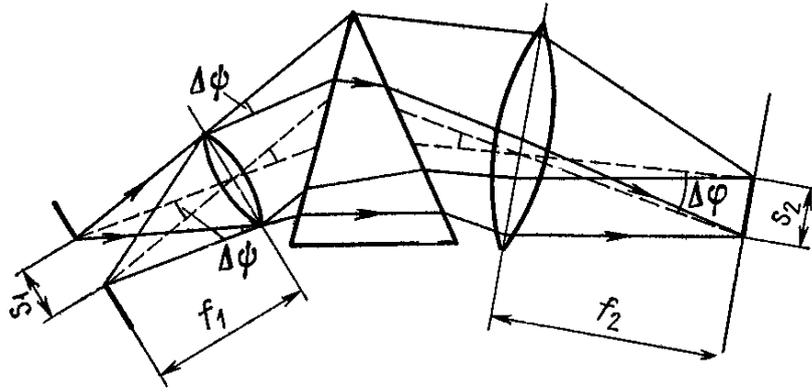


Рис. 17. Образование изображения щели в приближении геометрической оптики.

Если ширина входной щели равна s_1 , то параллельные пучки, выходящие из коллиматорного объектива O_1 образуют между собой угол $\Delta\psi$ (для противоположных крайних точек щели), причём $\Delta\psi = s_1/f_1$. На выходе из-за углового увеличения угол схождения лучей $\Delta\varphi = \Gamma\Delta\psi$. На выходе камерного объектива пучки сходятся в его фокальной плоскости, причём расстояние между точками, соответствующими краям щели, равно $s_2 = \Delta\varphi f_2$. Комбинируя, легко получить связь поперечного размера щели с размером её изображения:

$s_2 = s_1 \frac{f_2}{f_1} \Gamma$. Рассуждая аналогично, получим выражение, связывающее высоту

изображения щели с её реальным размером: $h_2 = h_1 \frac{f_2}{f_1}$. Следует отметить, что

далеко не всегда фокальная поверхность камерного объектива (обычно – плоскость, так как фокусировать изображение спектра на плоскость проще всего) ортогональна его оптической оси, а наклонена на угол ε относительно оси (см. рис. 20). Это происходит из-за того, что очень часто объектив камеры не *ахроматизирован*, то есть фокальный отрезок зависит от длины волны. В этом

случае $s_2^* = \frac{s_2}{\sin \varepsilon} = s_1 \frac{f_2}{f_1} \frac{\Gamma}{\sin \varepsilon}$. Таким образом, в общем случае ширина s_2^* есть

величина, зависящая от длины волны.

Получим некоторые простые выражения, связывающие характеристики щели и её изображения. Для этого рассмотрим ход лучей в плоскости дисперсии, а также в плоскости, ей ортогональной (рис.18).

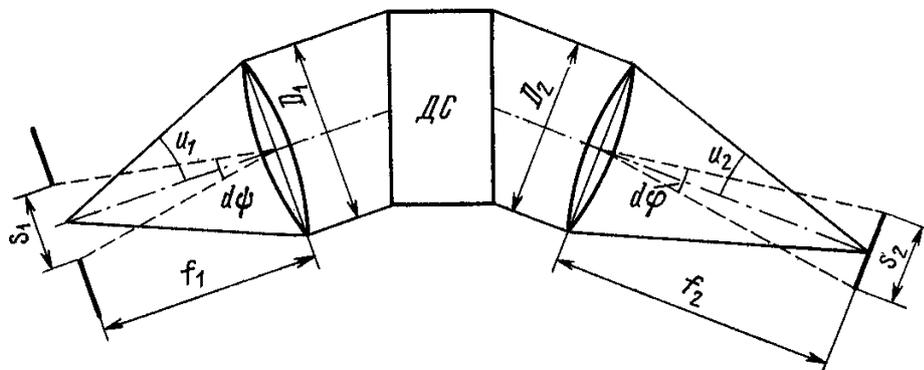


Рис. 18. Ход лучей в плоскости дисперсии.

Для простоты положим $\varepsilon = \pi/2$, а также примем, что оптическая схема прибора целиком находится в воздухе/ вакууме (что практически всегда соответствует действительности). Тогда согласно теореме Лагранжа – Гельмгольца можно записать

$$s_1 tgu_1 = s_2 tgu_2 \text{ где } tgu_1 = \frac{D_1}{2f_1} \text{ и } tgu_2 = \frac{D_2}{2f_2}$$

Отсюда имеем формулу $s_2 = s_1 \frac{f_2}{f_1} \frac{D_1}{D_2}$ или в симметричном виде $\frac{s_1}{f_1} D_1 = \frac{s_2}{f_2} D_2$

Сравнивая с формулой для углового увеличения диспергирующей системы, для Γ получаем следующее:

$$\Gamma = d\varphi/d\psi = D_1/D_2$$

Применив вновь уравнение Лагранжа – Гельмгольца, получим

$$h_1 tgu'_1 = h_2 tgu'_2$$

Так как

$$tgu'_1 = \frac{H}{2f_1} \text{ и } tgu'_2 = \frac{H'}{2f_2}, \text{ то}$$

$$h_2 = h_1 \frac{f_2}{f_1} \frac{H}{H'} = h_1 \frac{f_2}{f_1} \text{ или же в симметричном виде } \frac{h_1}{f_1} H = \frac{h_2}{f_2} H$$

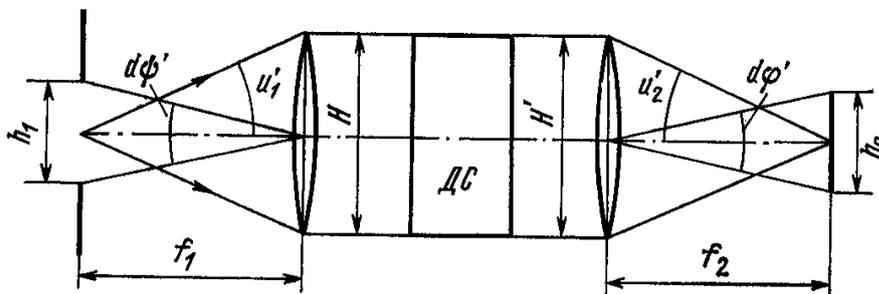


Рис. 19. Ход лучей в плоскости, в которой лежат длинные стороны щели и её изображения.

Теперь, перемножив почленно симметричные выражения, связывающие размеры щели с размерами её изображений, получим

$$s_1 h_1 \frac{D_1 H}{f_1^2} = s_2 h_2 \frac{D_2 H}{f_2^2} \text{ или с использованием обозначений рис. 17. } s_1 h_1 \Omega_1 = s_2 h_2 \Omega_2,$$

где Ω_i - соответствующие телесные углы, охватывающие входной и выходной пучки.

Основные характеристики спектральных приборов и связь между ними.

Линейная дисперсия.

Рассмотрим упрощённую схему спектрографа с *одномерной дисперсией* (рис.20).

Пусть во входном излучении присутствуют две близких длины волны λ и $\lambda + d\lambda$. Тогда в фокальной плоскости образуются пара близкорасположенных изображений входной щели шириной s_2^* . Очевидно,

что $dl = f_2 d\varphi$ и $dl^* = \frac{dl}{\sin \varepsilon} = \frac{f_2}{\sin \varepsilon} d\varphi$. Можно ввести в рассмотрение следующую

величину $\frac{dl^*}{d\lambda} = \frac{f_2}{\sin \varepsilon} \frac{d\varphi}{d\lambda}$

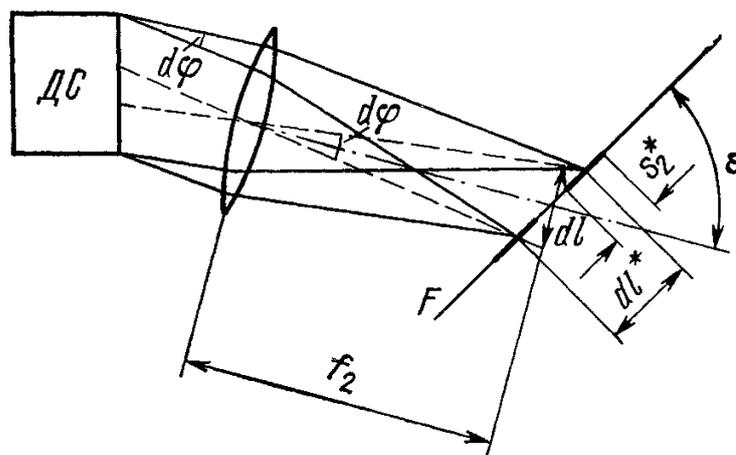


Рис. 20. К выводу выражения для линейной дисперсии.

Она называется *линейной дисперсией* спектрального прибора. Величина $\frac{d\varphi}{d\lambda}$ - *угловая дисперсия* диспергирующей системы.

На практике, однако, чаще пользуются понятием *обратной линейной дисперсии* $d\lambda/dl^*$, выражая её в *нм/мм* или *А/мм*. Понятно, что чем меньше данный параметр, тем на большее расстояние разнесены центры изображений соседних линий, и тем больше деталей можно разглядеть в спектре (рис.21).

Очевидно, что $\Delta l = (\lambda_1 - \lambda_2) \frac{dl}{d\lambda}$. Также очевидно, что только в случае $s_2 < \Delta l$ изображения щелей не перекрываются. Поэтому напрашивается вывод о том, что надо работать как можно с более узкими щелями. Проведём простой эксперимент, а именно, будем, начиная с широких щелей, измерять ширину её изображения в монохроматическом свете, постепенно уменьшая такую ширину. Результат изобразится в виде графика на рис.22.

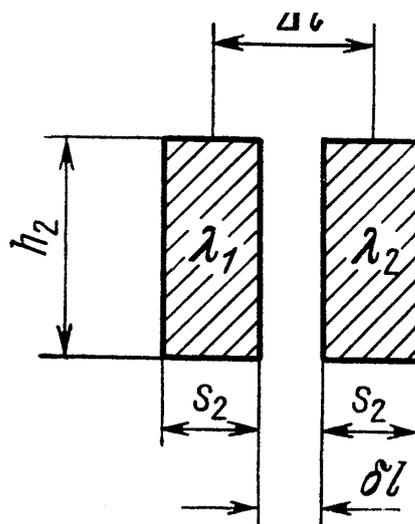


Рис. 21. Изображение щели в свете двух близких длин волн λ_1 и λ_2 .

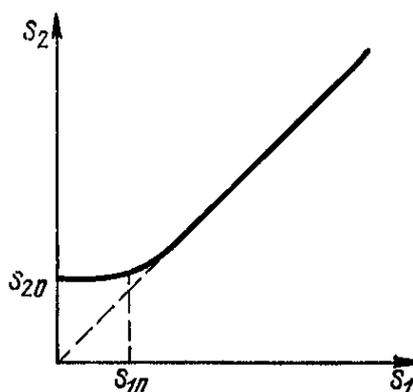


Рис. 22. Зависимость ширины изображения щели от её истинной ширины.

При уменьшении ширины входной щели $s_1 < s_{10}$ ширина её изображения $s_2 \cong s_{20} = const$ не меняется. Изменяется лишь распределение освещённости в изображении: оно перестаёт быть равномерным и сама освещённость стремится к нулю. Причиной такого отступления от законов геометрической оптики являются дифракционные эффекты на апертурной диафрагме спектрального прибора. Ширина щели s_{10} , при которой перестаёт быть справедливым геометрический подход, называется *нормальной шириной входной щели*. Её значение определяется параметрами

спектрального прибора и может быть вычислено только в приближении волновой оптики.

Разрешающая сила спектрального прибора. Понятие аппаратной функции.

Как и для прочих оптических приборов, решающую роль в способности спектрального прибора изобразить отдельно близлежащие линии, играет дифракция. Рассмотрим подробно ограничение световых пучков в таком приборе. Согласно рис. 15, основной диафрагмой, ограничивающей апертуру пучков, дающих изображение входной щели, служит диспергирующая система.

Для начала рассмотрим случай бесконечно узкой щели ($s_1 \ll s_{10}$), освещенной монохроматическим излучением. Для нахождения распределения интенсивности в плоскости дисперсии следует решить задачу о дифракции Фраунгофера плоской монохроматической волны на перпендикулярной пучку диафрагме шириной D_1 (рис.23).

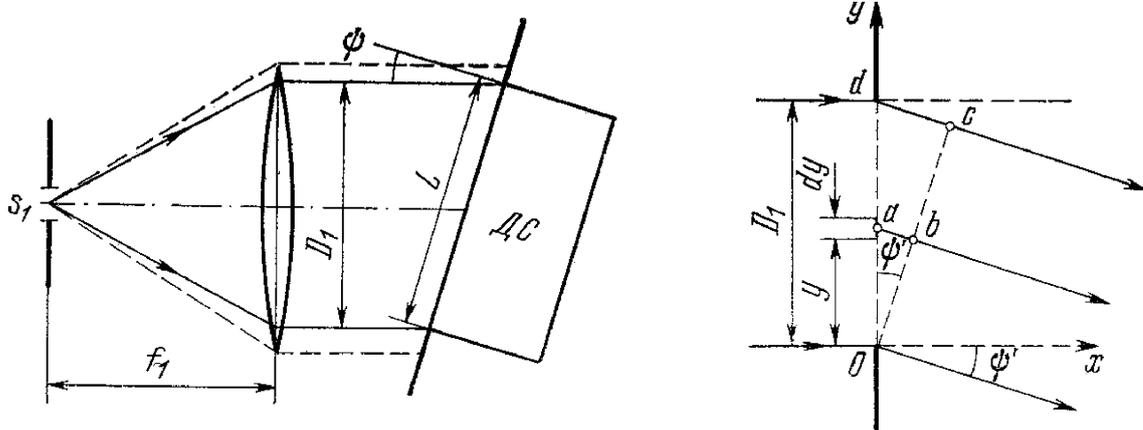


Рис. 23. К дифракции пучка на диспергирующей системе.

Выпишем результат, известный из волновой оптики:

$$I(\varphi) = I_0 \left(\frac{\sin u}{u} \right)^2 \quad \text{где } u = \frac{k\Delta}{2} = \frac{\pi}{\lambda} \Delta = \frac{\pi}{\lambda} D_1 \sin \psi'$$

Соответствующее распределение изображено на рис 24.

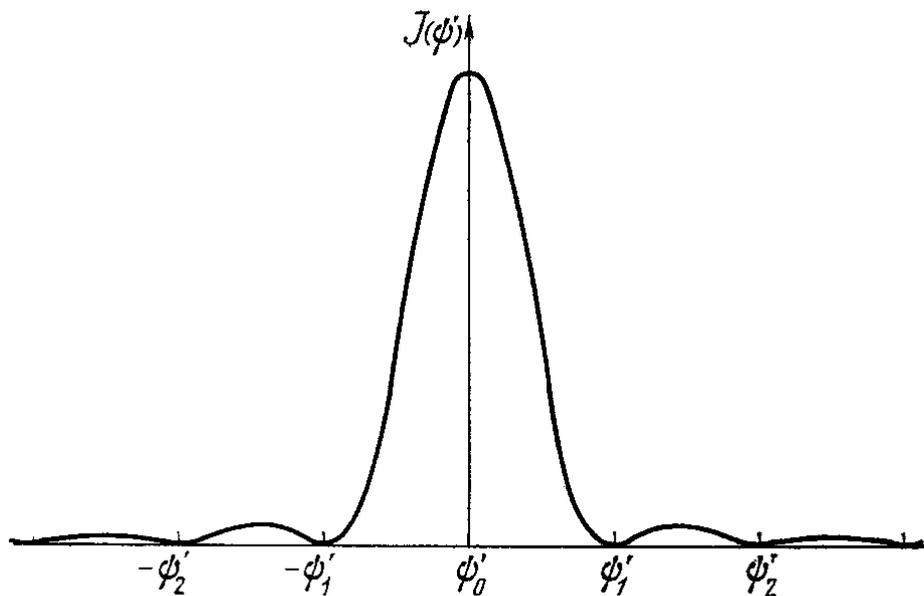


Рис. 24. График дифракционного распределения.

С учетом углового увеличения можем получить выражения для угловой/линейной ширины дифракционного распределения в фокальной плоскости

камерного объектива: $\Delta\varphi_1 = \Delta\psi \Gamma = \lambda/D_2$ $\Delta l_1 = f_2 \Delta\varphi_1 = f_2 \frac{\lambda}{D_2}$.

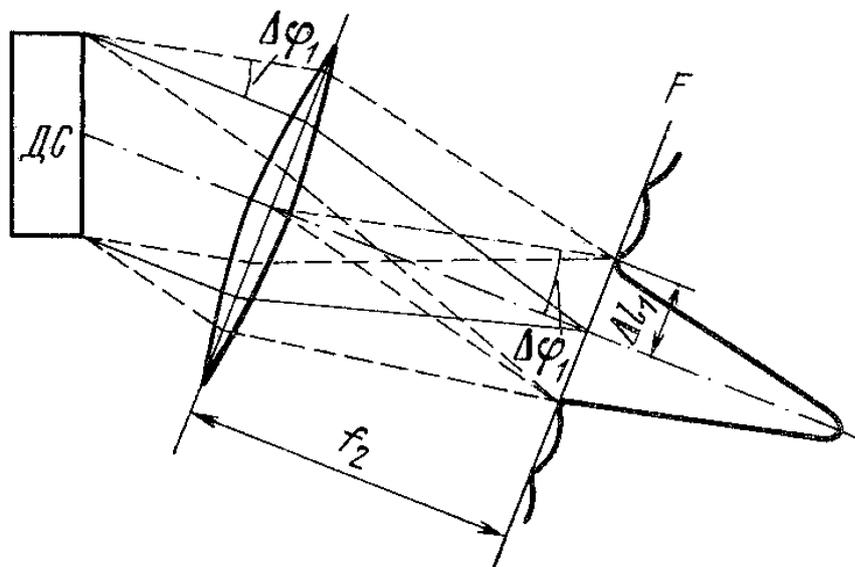


Рис. 25. Дифракционная картина в фокальной плоскости камерного объектива.

Рассмотрим случай реальной ширины входной щели ($s_1 \geq s_{10}$). В этом случае при некогерентном её освещении в фокальной плоскости камеры произойдёт суммирование интенсивностей от участков, составляющих широкую щель (рис.26).

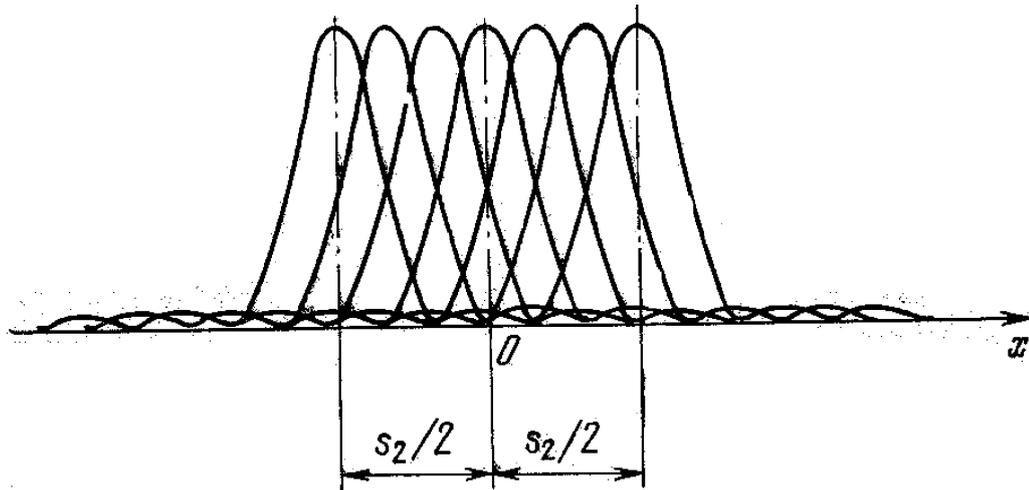


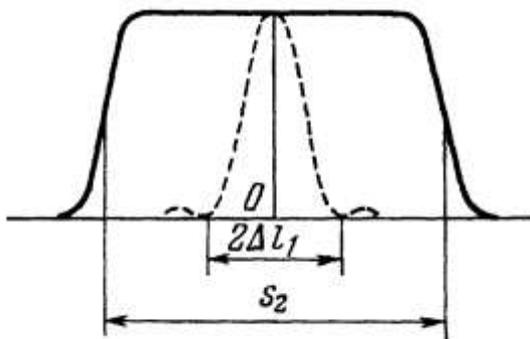
Рис. 26. Наложение распределений интенсивности в фокальной плоскости камеры.

Здесь принято, что линия дисперсии направлена вдоль оси абсцисс, а начало координат расположено в центре геометрического изображения щели.

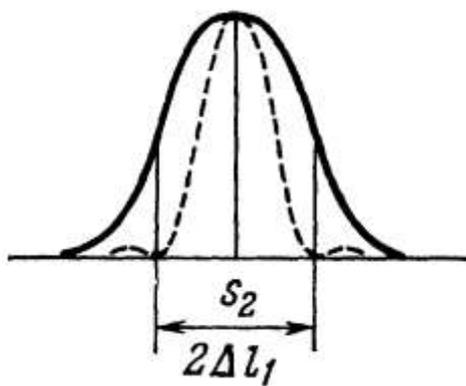
Для нахождения результирующего распределения интенсивности вдоль выходной щели просуммируем интенсивности всех бесконечно узких составляющих в пределах геометрического изображения щели. Опуская промежуточные вычисления, приведём соответствующие распределения для различных значений параметра $s_2/\Delta l_1$ (рис.27).

При $s_2/\Delta l_1 \approx 1$ распределение отличается от геометрического и близко к дифракционному с полушириной $\alpha_0 = 0.886\Delta l_1$. Теперь нормальную ширину щели можно определить из условия равенства геометрической

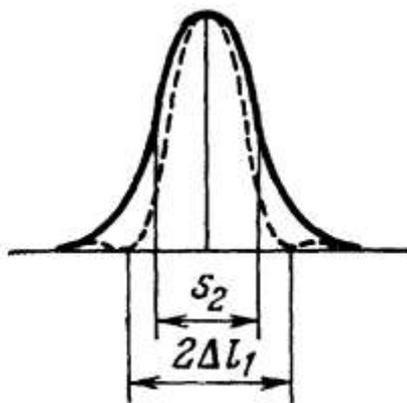
ширины изображения входной щели s_{20} ширине главного дифракционного максимума α_0 : $s_{20} = s_{10} \frac{\Gamma f_2}{f_1} = \alpha_0$.



а). $s_2 \gg \Delta l_1$



б). $s_2 = 2\Delta l_1$



в). $s_2 \geq 1.25\Delta l_1$

Рис. 27. Распределение интенсивности по ширине выходной щели.

Обычно пренебрегают множителем 0.866 и полагают $\alpha_0 \cong \Delta l_1 = f_2 \lambda / D_2$:

$$\text{Тогда } s_{10} = f_1 \frac{\lambda}{D_2} \frac{1}{\Gamma} = f_1 \frac{\lambda}{D_1}$$

Рассмотрены дифракционные явления в главной плоскости спектрального прибора в направлении дисперсии. Аналогично можно рассмотреть дифракцию в плоскости, перпендикулярной плоскости дисперсии. Так как величина высоты щели h_2 составляет миллиметры/десяток мм, что много больше ширины соответствующего дифракционного максимума, то дифракционными эффектами в данном случае можно пренебречь и пользоваться геометрической оптикой.

Однако, по аналогии с теорией дифракционной решётки, знания одной только дисперсии недостаточно, чтобы однозначно решить вопрос о том, будут ли две близкорасположенные линии наблюдаться отдельно. Необходимо ввести новую величину – *разрешающую силу прибора*. По определению $R = \lambda / \delta \lambda$.

В спектроскопических исследованиях требуется не только разрешать близкорасположенные линии, но также определять их форму, ширину, относительную интенсивность и прочие параметры. То есть необходимо знать, в какой степени наблюдаемые/измеряемые параметры в регистрируемых спектрах соответствуют истинным характеристикам излучения, подаваемого на входную щель. Проведенное рассмотрение показывает, что реальный спектральный прибор всегда вносит искажения в регистрируемый спектр, в результате чего последний всегда отличается от истинного спектра. Аппаратные искажения носят систематический характер и определяются (в широком смысле слова) конструкцией применяемого прибора. Однако в регистрируемый спектр вносят вклад и случайные погрешности, вызванные шумами измерительного тракта.

Рассмотрим сначала систематическую составляющую этой погрешности. Даже если в оптическом тракте прибора aberrации пренебрежимо малы, то даже в этом случае прибор не является *идеальным*: из-за дифракционных эффектов изображение бесконечно узкой входной щели в строго монохроматическом свете имеет конечную (дифракционную) ширину α_0 . В присутствии aberrаций ситуация существенно усложняется. Не останавливаясь на этом вопросе по существу, отметим лишь, что ширина результирующего распределения больше дифракционного α_0 и может существенно отличаться от последнего по форме. Наконец, при $s_1 \gg s_{10}$, распределение интенсивности на выходе спектрального прибора близко к прямоугольному с шириной s_2 , определяемой из геометрической оптики. Таким образом, при монохроматическом освещении входной щели в общем случае её изображение всегда будет иметь *конечную ширину* и некоторое сложное распределение интенсивности вдоль дисперсии. Такое распределение монохроматической спектральной линии в фокальной плоскости камерного объектива получило название *аппаратной функции* (далее *А.Ф.*)/ *инструментального контура* спектрального прибора (рис.28).

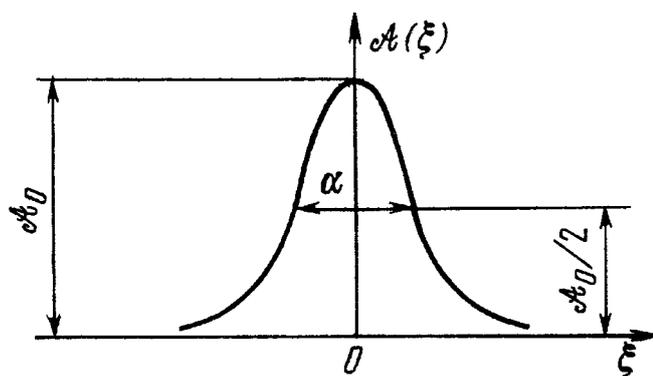


Рис. 28. Вид аппаратной функции спектрального прибора.

Для аппаратной функции обычно вводится координата ξ , отсчитываемая от точки, где $A(\xi) = A(0) = A_0$ имеет максимум. Также вводится понятие ширины А.Ф. α , равной расстоянию между точками, для которых $A(\xi) = A_0/2 = A(\alpha/2)$.

Конечная ширина А.Ф. реальных приборов приводит к тому, что две близкие линии с длинами волн λ и $\lambda + \delta\lambda$ могут наблюдаться отдельно/ разрешаться (рис. 29а) или сливаться в одну неразрешённую линию (рис. 29б) в зависимости от соотношения между α и $d\lambda$.

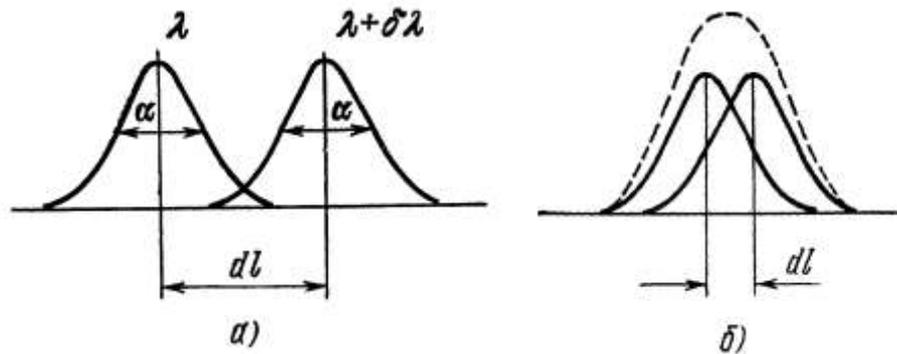


Рис. 29. Наложение аппаратных функций для линий с длинами волн λ и $\lambda + \delta\lambda$ при $d\lambda > \alpha$ (а) и $d\lambda < \alpha$ (б).

Таким образом, задача о разрешающей силе спектрального прибора сводится к задаче о разрешении двух близкорасположенных А.Ф. Существует множество критериев разрешения. Мы будем считать, что две монохроматические линии λ и $\lambda + \delta\lambda$ одинаковой интенсивности разрешены, если $d\lambda = \alpha$, то есть расстояние между центрами соответствующих А.Ф. равно их ширине (рис.30).

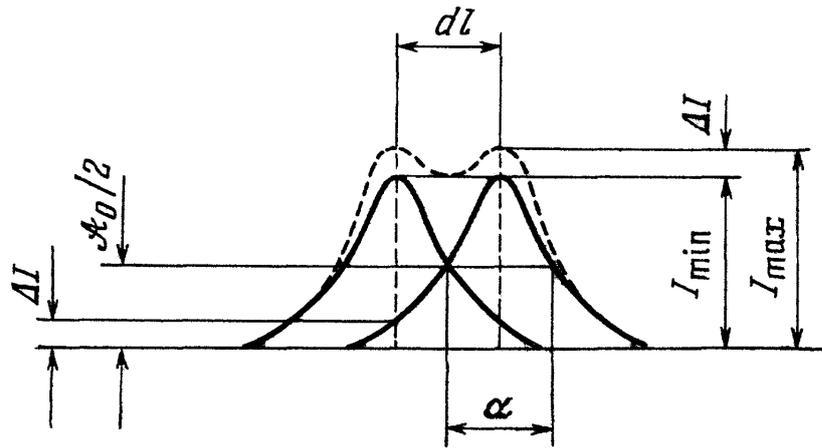


Рис. 30. Наложение аппаратных функций для линий с длинами волн λ и $\lambda + \delta\lambda$ при $dl = \alpha$.

При таком определении легко записать:

$$I_{\min} = A_0/2 + A_0/2 = A_0 \qquad I_{\max} = A_0 + \Delta I \qquad \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}} = \frac{\Delta I}{I_{\max}}$$

Где величина провала в распределении интенсивности ΔI определяется конкретным видом А.Ф. При определении минимально обнаружимой величины провала и, следовательно, о разрешении налагающихся А.Ф., надо принимать во внимание наличие случайных ошибок измерения, что продемонстрировано на рис.31.

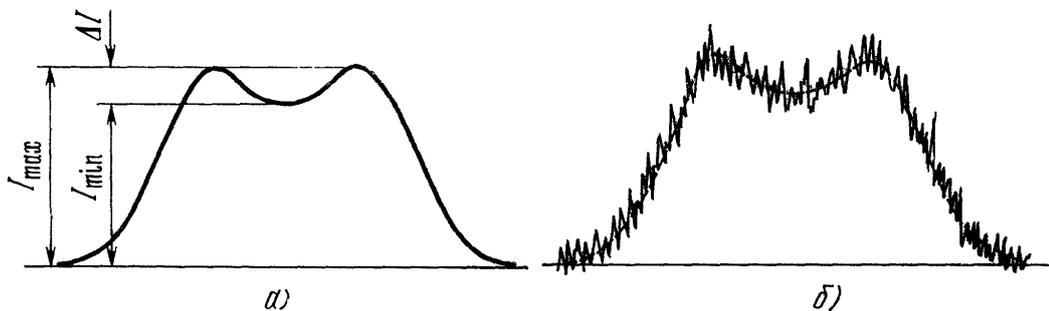


Рис. 31. Разрешение наложенных А.Ф. в идеальном случае (а) и при наличии шумов измерительного тракта (б).

Очевидно, что если в случае (а) налицо уверенное разрешение, то во втором случае наличие двух близких линий маскируется шумами.

Так как любой вид аппаратных искажений (абберации, шумы измерений и т.п.) только увеличивает результирующую ширину А.Ф. по сравнению с дифракционной А.Ф., то любой прибор имеет при дифракционной аппаратной функции максимальную достижимую разрешающую способность, именуемую *теоретической/ предельной/ дифракционной*.

Каждой точке линии дисперсии можно приписать определенную длину волны/ частоту. Поэтому линейную ширину А.Ф. α можно выразить в спектральных единицах, хотя, всем точкам контура А.Ф. соответствует одна и та же длина волны λ . Если обратная линейная дисперсия в той части фокальной поверхности камерного объектива, где мы наблюдаем излучение, равна $d\lambda/dl$, то интервал длин волн $\delta\lambda$, на участке, равном ширине А.Ф. α , будет $\delta\lambda = \alpha \frac{d\lambda}{dl}$ и называется *спектральной шириной аппаратной функции*.

Из принятого критерия разрешения А.Ф. следует, что разрешающая способность спектрального прибора есть

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{\lambda}{\alpha} \frac{dl}{d\lambda}$$

То есть, величина R определяется шириной А.Ф. и линейной дисперсией. В зависимости от типа спектрального прибора, раскрытия входной щели величины α и $dl/d\lambda$ могут быть как независимыми, так и взаимосвязанными.

Если перейти в выражении для R к угловым величинам, то получим следующую формулу:

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{\lambda}{\alpha} \frac{dl}{d\lambda} = \frac{\lambda}{\alpha} f_2 \frac{d\varphi}{d\lambda}$$

Если теперь учесть, что для дифракционной А.Ф. $\alpha = \Delta l_1 = f_{2\lambda} / D_2$, то для теоретической разрешающей способности получим: $R_0 = D_2 \frac{d\varphi}{d\lambda}$

В последнее выражение входят только параметры диспергирующего элемента.

Вопросы для самоконтроля по теоретическому материалу

1. Физические принципы оптической накачки твердотельных лазерных сред;
2. Техническая реализация некогерентной (ламповой) накачки;
3. Техническая реализация когерентной (полупроводниковой) накачки;
4. Основные принципы конструирования квантронов;
5. Сравнительные характеристики ламповой и полупроводниковой накачки.
6. Физические механизмы генерации света в полупроводниках;
7. Гетероструктуры – основной тип лазерных диодов;
8. Квантоворазмерные ЛД. Их преимущества;
9. Схемы типичных полупроводниковых гетероструктур;
10. Линейки и матрицы ЛД – способ наращивания выходной мощности
11. Продольная (торцевая) схема накачки;
12. Поперечная схема накачки;
13. Возможные области применения продольной и поперечной схем;
14. Варианты схем квантронов для продольной накачки (конструктивные)
15. Варианты схем квантронов для поперечной накачки (конструктивные)
16. Накачка активных элементов нетрадиционной формы (тонкий слэб, диск);
17. ЛД как нагрузка источника питания. Необходимость токового питания ЛД;
18. Схема линейного токового драйвера на операционном усилителе;
19. Методы построения мощных драйверов для питания ЛЛД/ МЛД;
20. Измерение спектральных характеристик излучения полупроводниковых
21. Расходимость излучения мощных ЛД.

Список литературы:

1. И.В. Глухих, С.С. Поликарпов, С.В. Фролов, А.С. Волков, В.В. Привезенцев «Охлаждение лазерных диодных сборок конструкции Silver Bullet», *Журнал технической физики*, 2010, **80**, № 6, стр. 101-105
2. И.В. Глухих, С.А. Димаков, Р.Ф. Курунов, С.С. Поликарпов, С.В. Фролов «Мощные твердотельные лазеры на Nd:YAG с поперечной накачкой и улучшенным качеством излучения», *Журнал технической физики*, 2011, **81**, № 8, стр. 70-75
3. W.F. Krupke *Diode Pumped Alkali Laser*, U.S. Patent № 6643311 B2 (2003).
4. S. Jacobs, G. Gould, P. Rabinowitz, *Physical Review Letters* 7 (11) (1961) 415.
5. P. Rabinowitz, S. Jacobs, G. Gould, *Applied Optics* 1 (4) (1962) 513.
6. Б.А. Глушко, М.Е. Мовсесян, Т.О. Овакимян *Оптика и спектроскопия*, **52**, 458, 1982.
7. С.Н. Атутов, А.И. Плеханов, А.М. Шалагин *Оптика и спектроскопия*, **56**, 134, 1984.
8. А.М. Шалагин *Мощные лазеры на парах щелочных металлов с диодной накачкой*, УФН, 181, №9, 1011-1016, 2011.
9. J. Zweibak, V. Krupke, A. Komashko, *Proceeding of SPIE* 687413 (2008).
10. Raymond J. Beach, William F. Krupke, V. Keith Kanz, Stephen A. Payne, Mark A. Dubinskii, Larry D. Merkle, *End-pumped continuous-wave alkali vapor lasers: experiment, model, and power scaling*, J.O.S.A. B, **21**, №12, 2004.
11. А.В. Богачев, С.Г. Гаранин, А.М. Дудов, В.А. Ерошенко, С.М. Куликов, Г.Т. Микаелян, В.А. Панарин, В.О. Паутов, А.В. Рус, С.А. Сухарев, *Лазер на парах цезия с диодной накачкой и прокачкой лазерной среды по замкнутому циклу*, «Квантовая электроника», **42**, № 2 (2012), стр. 95-98.

Приложение

В приложении представлена информация о технических характеристиках одиночных мощных лазерных диодов, линейки лазерных диодов и матрицы лазерных диодов. Все данные процитированы с веб-сайтов производителей.

Компания «Полупроводниковые приборы».

Сайт: <http://www.atcsd.ru/rus/cont.php>



ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

Спецификация на лазерные диоды

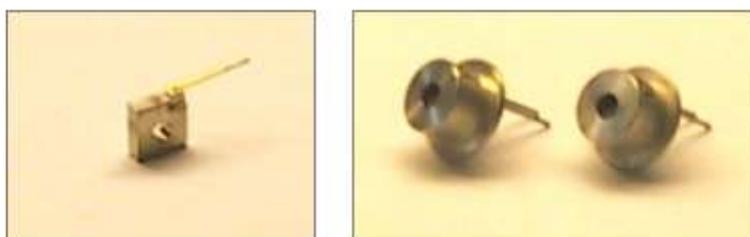
<u>АТС-С500-200</u>	<u>АТС-С1000-380</u>	<u>АТС-С1000-100</u>	<u>АТС-С2000-200</u>	<u>АТС-С2000-100</u>	<u>АТС-С4000-200</u>	<u>АТС-С5000-200</u>
Выходная оптическая мощность в непрерывном режиме (мВт)						
500	1000	1000	2000	2000	4000	5000
Размеры излучающей площадки WxH(мкм)						
200x1	380x1	100x1	200x1	100x1	200x1	200x1
Возможные длины волн (нм)						
660-670		795-815 или 940-980				
Пороговый ток (А)						
0.7	1.3	0.25	0.5	0.6	0.5	0.5
Типичный рабочий ток (А)						
1.35	3.0	1.3	2.5	2.3	4.3	5.3
Максимальный рабочий ток (А)						
1.5	3.2	1.5	3.0	2.5	5.0	6.0
Максимальное рабочее напряжение (В)						
2.0		2.2	2.4	2.2	2.4	2.2
Возможный тип корпуса C-mount, АТС, ТО-3						
<u>АТС-С8000-200</u>		<u>АТС-С10000-200</u>		<u>АТС-С15000-400</u>		
Выходная оптическая мощность в непрерывном режиме (мВт)						
8000		10000		15000		
Размеры излучающей площадки WxH(мкм)						
200x1				400x1		
Возможные длины волн (нм)						

805-811		
Пороговый ток (А)		
0.85	1.9	2.4
Типичный рабочий ток (А)		
8.5	12.0	16.0
Максимальный рабочий ток (А)		
9.0	14.0	17.0
Максимальное рабочее напряжение (В)		
2.1	2.2	
Возможный тип корпуса C-mount , ATC , TO-3		



ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

Лазерные диоды модели АТС-С4000-200



Спецификация

Параметр ($T_{op}=25^{\circ}C$)	Обозначение	Величина			Ед. измерения
		Мин.	Норм.	Макс.	
Выходная мощность (непрерывный режим) ¹⁾	P_{cw}	---	4,0	---	Вт
Длина волны излучения ²⁾	λ	804	807	810	нм
Ширина спектра (FWHM) ²⁾	$\Delta\lambda$	---	3	---	нм
Дифф. квантовая эффективность	η_D	0.9	1.05	1.2	Вт/А
Размер тела свечения	$W \times H$	---	200 x 1.0	---	мкм
Пороговый ток	I_{TH}	0.8	1.0	1.2	А
Рабочий ток ¹⁾²⁾	I_{OP}	---	4.5	5.2	А
Рабочее напряжение ¹⁾²⁾	U_{OP}	---	1.9	2.1	В
Дифф. сопротивление	R_S	---	0.05	0.10	Ом
Расходимость (FWHM)	$\Theta_{ } \times \Theta_{\perp}$	---	6x35	10x40	Град.
Темп коэффициент порогового тока ³⁾	T_0	---	220	---	К
Темп. коэффициент рабочего тока	$I_{OP2}/I_{OP1}T$	---	0.2	---	%/К
Темп. коэффициент длины волны излучения	$\Delta\lambda/\Delta T$	---	0.27	0.3	нм/К
Термическое сопротивление	R_T	---	6	---	К/Вт

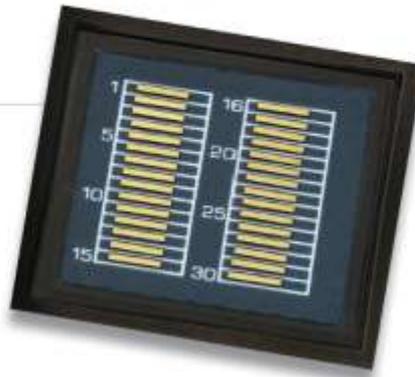
Максимальные значения

Выходная мощность (непрерывный режим) ¹⁾	P_{CW}	---	---	4,8	Вт
Обратное напряжение	U_R	---	---	2	В
Рабочая температура (для герметизированного корпуса)	T_{OP}	- 10	---	+ 50	°C
Температура хранения (для герметизированного корпуса)	T_{ST}	- 40	---	+ 60	°C
Температура пайки выводов (время пайки 5 сек)	T_S	---	---	250	°C

¹⁾ сбор излучения осуществляется оптической системой с числовой апертурой 0.75

²⁾ Указанное значение соответствует выходной мощности 4 Вт в непрерывном режиме

³⁾ Темп коэффициент порогового тока может быть вычислен по формуле: $I_{TH2}=I_{TH1}\exp[(T_2-T_1)/T0]$



PART NUMBER: UMB700P200
LASER DIODE BAR

FEATURES AND BENEFITS

- Excellent Solderability
- Available With Any Golden Bullet® Configuration
- Lot Tested
- Available Wavelengths (790-980nm)

OPTICAL CHARACTERISTICS

Parameter	Conditions	Min	Typ	Units
QCW Power Output	180A at 25°C Heat Sink	200	—	W
Operating Current	200W at 25°C Heat Sink	—	180	A
Threshold Current	25°C Heat Sink	—	15	A
Slope Efficiency	25°C Heat Sink	—	1.2	W/A
Efficiency	200W at 25°C Heat Sink	—	55	%
Number of Emitters	—	—	52	
Emitter Size	—	—	150x1	µm
Emitter Pitch	—	—	180	µm
Center Wavelength	200W at 25°C Heat Sink	—	808	nm
Wavelength Tolerance	200W at 25°C Heat Sink	—	+3	nm
Spectral Width	200W at 25°C Heat Sink	—	2.5	nm
Wavelength Shift	—	—	0.25	nm/°C
Beam Divergence FWHM	—	—	40x10	°x
Polarization	—	—	TE	

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Parameter	Conditions	Min	Typ	Units
Series Resistance	25°C Heat Sink	—	0.002	ohms
Operating Voltage	25°C Heat Sink, 200W	—	2.0	V

MECHANICAL CHARACTERISTICS

Parameter	Typical
Bar Width	9.6 mm
Bar Thickness	135 µm
Bar Cavity Length	1000 µm

NOTES

- (1) These specifications apply for operation at 808nm. Other wavelengths available upon request.
- (2) A dry nitrogen environment should be provided by the user when storing and operating at temperatures below ambient dew point.

200W QCW

NORTHROP GRUMMAN

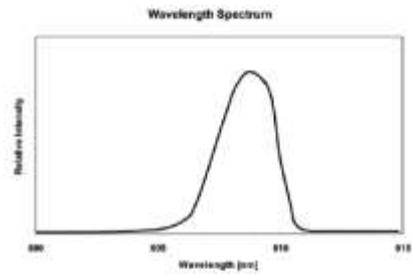
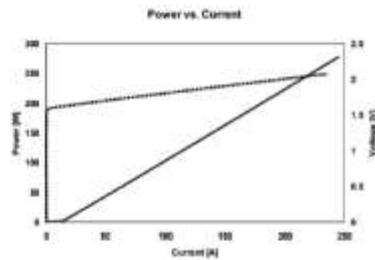
ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Parameter	Conditions
Reverse Current	0 A
Reverse Voltage	0 V
Operating Temperature Range	-40°C to 70°C
Storage Temperature Range	-40°C to 85°C

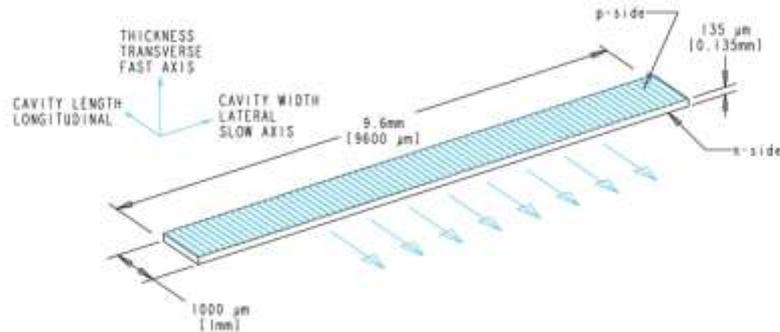
SOLDERING CHARACTERISTICS

Parameter	Conditions
Metalization	1000 Å Au over Pt barrier

OPTICAL CHARACTERISTICS (TYPICAL)



MECHANICAL CHARACTERISTICS



Copyright © 2008 Northrop Grumman Cutting Edge Optonics All Rights Reserved. Northrop Grumman Cutting Edge Optonics reserves the right to change product design and specifications at any time without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patents or patent rights of Northrop Grumman Cutting Edge Optonics or others. No responsibility is assumed for the use of these products, nor for any infringement on the rights of others resulting from the use of these products. Information contained herein is believed to be reliable and accurate. Laser diode product components are intended for use in a user-defined end system. However, these products are capable of emitting Class IV radiation. Extreme care must be exercised during their operation. Only persons familiar with the appropriate safety precautions should operate a laser product. Directly viewing the laser beam or exposure to specular reflections must be avoided. Serious injury may result if any part of the body is exposed to the beam. The eye is extremely sensitive to the infrared radiation and therefore, proper eyewear must be worn at all times. Use of optical instruments with these products may increase eye hazard. Always wear proper eye protection when operating. This Product is covered by one or more of the following Patents: 5,886,211 | 5,865,184 | 5,912,108 | 6,210,300 | Other US and Foreign Patents Pending. Notes (1) These specifications apply for operation at 905nm. Other wavelengths available upon request. (2) A dry nitrogen environment should be provided by the user when storing and operating at temperatures below ambient dew point.



PART NUMBER: ASM232C040
GOLDEN BULLET SUBMODULE

> FEATURES AND BENEFITS



- Proprietary Hard Solder Technology
- Long Pulse and/or High Duty Cycle
- Expansion Matched Materials
- Available Wavelengths (790-980nm)

> OPTICAL CHARACTERISTICS

Parameter	Conditions	Min	Typ	Units
CW Power Output	50A at 25°C Heat Sink	40	—	W
Operating Current	40W at 25°C Heat Sink	—	50	A
Threshold Current	25°C Heat Sink	—	13	A
Center Wavelength	40W at 25°C Heat Sink	—	808	nm
Wavelength Tolerance	40W at 25°C Heat Sink	—	+/-3	nm
Spectral Width	40W at 25°C Heat Sink	—	1.6	nm
Wavelength Shift	—	—	0.25	nm/°C
Beam Divergence FWHM	—	—	40x10	°

> ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Parameter	Conditions	Min	Typ	Units
Series Resistance	25°C Heat Sink	—	0.002	ohms
Operating Voltage	25°C Heat Sink, 40W	—	1.8	V

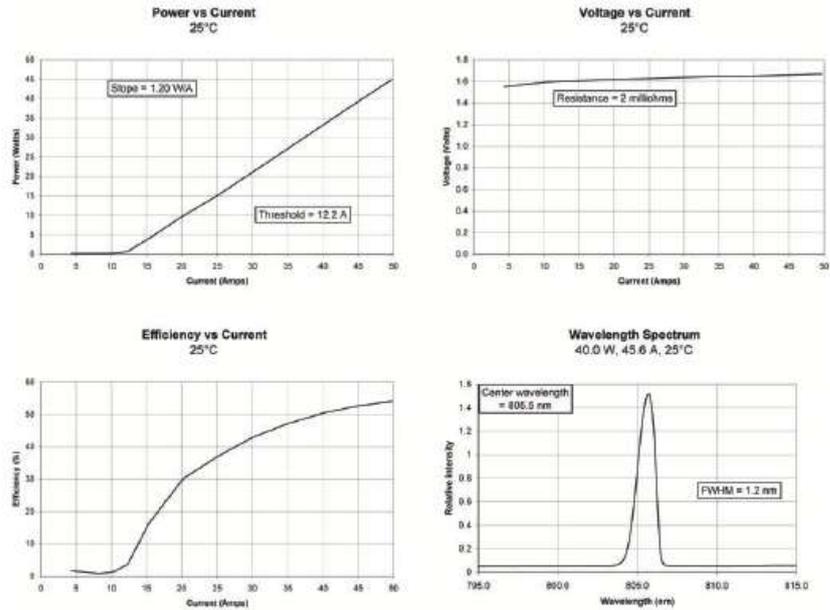
> ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Parameter	Conditions
Reverse Current	0 A
Reverse Voltage	0 V
Operating Temperature Range	-40°C to 70°C
Storage Temperature Range	-40°C to 85°C

> NOTES

- (1) These specifications apply for operation at 808nm. Other wavelengths available upon request.
- (2) A dry nitrogen environment should be provided by the user when storing and operating at temperatures below ambient dew point.

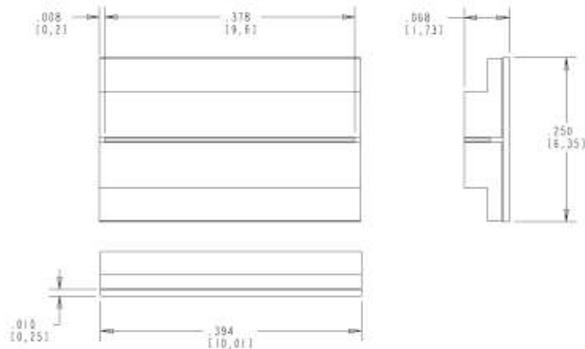
OPTICAL CHARACTERISTICS (TYPICAL)



MECHANICAL CHARACTERISTICS



Photonic Solutions
 Unit A, 40 Captains Road
 Edinburgh, EH17 8QF, UK
 Tel: +44(0)131 664 8122
 Fax: +44 (0)131 664 8144
 Email: sales@photronicsolutions.co.uk
 Web: www.photronicsolutions.co.uk



Copyright © 2008 Northrop Grumman Cutting Edge Optronics All Rights Reserved. Northrop Grumman Cutting Edge Optronics reserves the right to change product design and specifications at any time without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patents or patent rights of Northrop Grumman Cutting Edge Optronics or others. No responsibility is assumed for the use of these products, nor for any infringement on the rights of others resulting from the use of these products. Information contained herein is believed to be reliable and accurate. Laser diode product components are intended for use in a user-devised end system. However, these products are capable of emitting Class IV radiation. Extreme care must be exercised during their operation. Only persons familiar with the appropriate safety precautions should operate a laser product. Directly viewing the laser beam or exposure to specular reflections must be avoided. Serious injury may result if any part of the body is exposed to the beam. The eye is extremely sensitive to the infrared radiation and therefore, proper eyewear must be worn at all times. Use of optical instruments with these products may increase eye hazard. Always wear proper eye protection when operating. This Product is covered by one or more of the following Patents: 5,808,211 | 5,085,634 | 5,913,108 | 6,310,900 | Other US and Foreign Patents Pending. Notes (1) These specifications apply for operation at 808nm. Other wavelengths available upon request. (2) A dry nitrogen environment should be provided by the user when storing and operating at temperatures below ambient dew point.





**Наборные решетки лазерных диодов квазинепрерывного режима работы
тип 32ДЛ-503**



Свойства:

- Плотность оптической выходной мощности до 1300Вт/см^2
- Энергия импульса лазерного излучения до 100мДж
- Монолитная многослойная двухмерная наборная решетка
- Встроенный термистор и термоэлектрический охладитель

Области применения:

- Эффективная оптическая накачка лазерных стержней или пластин высоко-мощных твердотельных лазеров
- Лазерные системы для технологических применений
- ИК лазерные осветители с высокой оптической выходной мощностью
- Лазерные медицинские системы

Параметр	Значения	Единицы
Выходная мощность излучения	250	Вт
Длина волны излучения	от 808 ± 3	нм
Ширина огибающей спектра лазерного излучения по уровню 0,5 от максимума	$<4,0$	нм
Длительность оптического импульса до	0,4	мс
Частота повторения импульсов до	20	Гц
Размер излучающей области	$2\times 9,5$	мм^2
Количество линеек в одной матрице	19	шт
Расстояние между линейками ЛД	0,5	мм
Расходимость излучения (ширина полосы по уровню 0,5 от максимума относительно плоскости р-п перехода)	$\theta_{\text{парал}} < 10$ $\theta_{\text{перп}} < 35$	град
Падение напряжения, не более	60	В
Ток накачки, не более	16	А
Сопротивление термистора при 20°C	10 (20%)	кОм
Температурный коэффициент сопротивления термистора	$-3,6\dots-4,0$	$\%/^\circ\text{C}$
Рабочий ресурс	10^9	импульс
Внешние габариты	$12(\text{Ш})\times 12(\text{Д})\times 10(\text{В})$	мм