

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

(ФГБОУ ВО «КубГУ»)

Физико-технический факультет

Кафедра оптоэлектроники

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО И НЕПРЕРЫВНОГО РЕЖИМА
ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКИ ЛАЗЕРОВ**

Работу выполнил _____ Астафуров Руслан Алексеевич

Курс 3

Направление 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи

Научный руководитель

канд. физ.-мат. наук, доцент _____ В. В. Галуцкий

Нормоконтролер преподаватель _____ В. Е. Лысенко

Краснодар 2017

РЕФЕРАТ

Курсовой проект 49 с., 25 рис., 11 источников.

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ЛАЗЕРЫ, ОПТИЧЕСКАЯ НАКАЧКА,
ИМПУЛЬСНЫЙ РЕЖИМ, НЕПРЕРЫВНЫЙ РЕЖИМ

Объектом рассмотрения данного курсового проекта является лазер с непрерывной и импульсной накачкой.

Целью проекта является рассмотрение импульсного и непрерывного режимов оптической накачки лазеров в ходе проведения литературного обзора. В результате выполнения курсового проекта была проведена оценка эффективности различных режимов накачки активированных лазерных кристаллов.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Твердотельные лазеры	5
2 Оптическая накачка	11
3 Импульсный режим оптической накачки лазеров	23
4 Непрерывный режим оптической накачки лазеров	28
5 Моделирование режимов импульсной и непрерывной накачки	32
Заключение	47
Список используемых источников	49

ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрение режимов оптической накачки лазеров связано с рассмотрением устройства лазера и принципа его действия. При накачке лазера, поглощенная энергия переводит атомы рабочей среды в возбужденное состояние. Когда число атомов в возбужденном состоянии превышает количество атомов в основном состоянии, возникает инверсия населенности. В этом состоянии начинает действовать механизм вынужденного излучения и происходит излучение лазера или же оптическое усиление. Оптическая накачка чаще всего производится в твердотельных лазерах. Мощность накачки должна превышать порог генерации лазера. Поэтому для практики представляют большой интерес различные режимы оптической накачки лазеров.

Для создания инверсной населённости среды лазера используются различные методы накачки. Накачка лазера может осуществляться как непрерывно, так и импульсно. При длительном (непрерывном) режиме вводимая в активную среду мощность накачки ограничена перегревом активной среды и связанными с ним явлениями. В режиме одиночных импульсов возможно введение в активную среду значительно большей энергии, чем за то же время в непрерывном режиме. Это обуславливает большую мощность одиночного импульса.

Целью данного проекта является исследование импульсного и непрерывного режимов оптической накачки лазеров.

При этом существенно важным является решение следующих задач:

- провести литературный анализ режимов оптической накачки лазеров (их конструктивных особенностей);
- оценить эффективность различных режимов накачки активированных лазерных кристаллов.

1 Твердотельные лазеры

Существует много разновидностей твердотельных лазеров, поскольку десятки прозрачных сред используются в качестве базовых веществ для введения различных активных примесных ионов. Кристаллические базовые вещества включают окислы, гранаты, фториды и ванадаты; наиболее типичными примерами являются сапфир, иттрий-алюминиевый гранат, гадолиний-галлиевый гранат, иттрий-литиевый фторид и ванадат иттрия, также известный как ортованадат иттрия. В качестве базовых веществ широко используется также множество видов стекла, включающее композиции на основе силикатов (например, плавленый кварц) и фосфатов, которые предпочтительны для приложений в импульсных лазерах высокой мощности [1].

Среди огромного множества комбинаций наиболее часто встречающиеся твердотельные лазеры – это титан-сапфировый и на кварцевом волокне. Многие другие важные твердотельные лазерные среды также относятся к семейству диэлектриков, легированных редкоземельными ионами. Они включают оптическое волокно, легированное тулием.

Самым первым твердотельным лазером и одновременно первым работающим лазером в мире был излучатель на рубине, накачка которого осуществлялась излучением импульсной газоразрядной лампы (рисунок 1). Этот лазер был создан в 1960 году Майманом. Несмотря на то, что рубин был первым материалом для лазера, сейчас он используется крайне редко. Твердотельный лазер с ламповой накачкой устроен так: активный элемент (АЭ) размещен внутри резонатора, состоящего в самом простом случае из 2х плоских параллельных зеркал. Одно из зеркал отражает более 99% другое 10-80% (именно из этого зеркала и вырывается лазерный луч). Сам по себе АЭ генерировать, конечно же, не будет. К нему нужно подвести энергию (этот процесс называется «накачка»). Причем существует некое пороговое значение энергии, при котором начинается генерация лазерного излучения. Накачка обычно осуществляется специальной лампой. Зачастую лампу и АЭ размещают в отдельном моду-

ле, который называется «квантрон». В нем кроме лампы и АЭ содержится отражатель, который спроектирован так, чтобы передать максимальную энергию от лампы к АЭ. Также в квантроне зачастую имеются специальные каналы, через которые прокачивается вода для охлаждения элементов лазера.

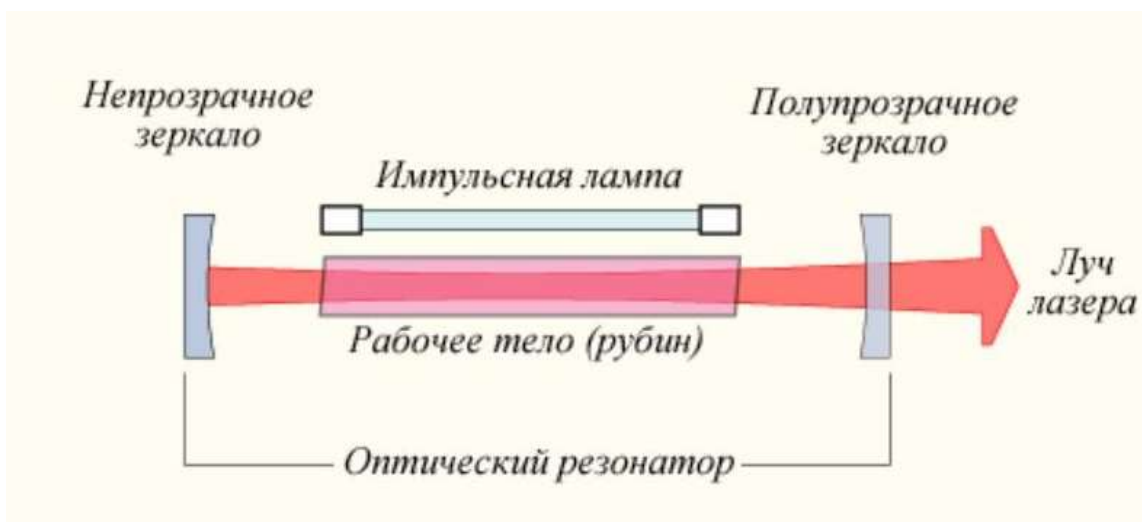


Рисунок 1 – Схема устройства твердотельного лазера с ламповой накачкой на примере рубинового лазера

Полупроводниковый лазер — твердотельный лазер, в котором в качестве рабочего вещества используется полупроводник (рисунок 2). В таком лазере, в отличие от лазеров других типов (в том числе и других твердотельных), используются излучательные переходы не между изолированными уровнями энергии атомов, молекул и ионов, а между разрешенными энергетическими зонами или подзонами кристалла. В полупроводниковом лазере накачка осуществляется:

- 1) непосредственно электрическим током (прямая накачка);
- 2) электронным пучком;
- 3) электромагнитным излучением.

Под именем полупроводниковых часто встречается гибридный лазер из мощного светодиода накачки и наклеенного на него твердотельного активного элемента. Плюс таких лазеров в том, что светодиодную структуру накачки можно сделать довольно протяженной и, соответственно, мощной. Механиче-

ские деформации от нагрева меньше сказываются на активном элементе. «Полупроводниковые» лазеры с мощностями единицы-десятки ватт делают в основном именно по такой технологии. Визуально отличить гибридный лазер от полупроводникового довольно сложно. Поскольку в полупроводниковом лазере возбуждаются и излучают коллективно атомы, составляющие кристаллическую решётку, сам лазер может обладать очень малыми размерами. Другими особенностями полупроводниковых лазеров являются высокий КПД, малая инерционность, простота конструкции. Типичным представителем полупроводниковых лазеров является лазерный диод — лазер, в котором рабочей областью является полупроводниковый p-n переход. В таком лазере излучение происходит за счет рекомбинации электронов и дырок.

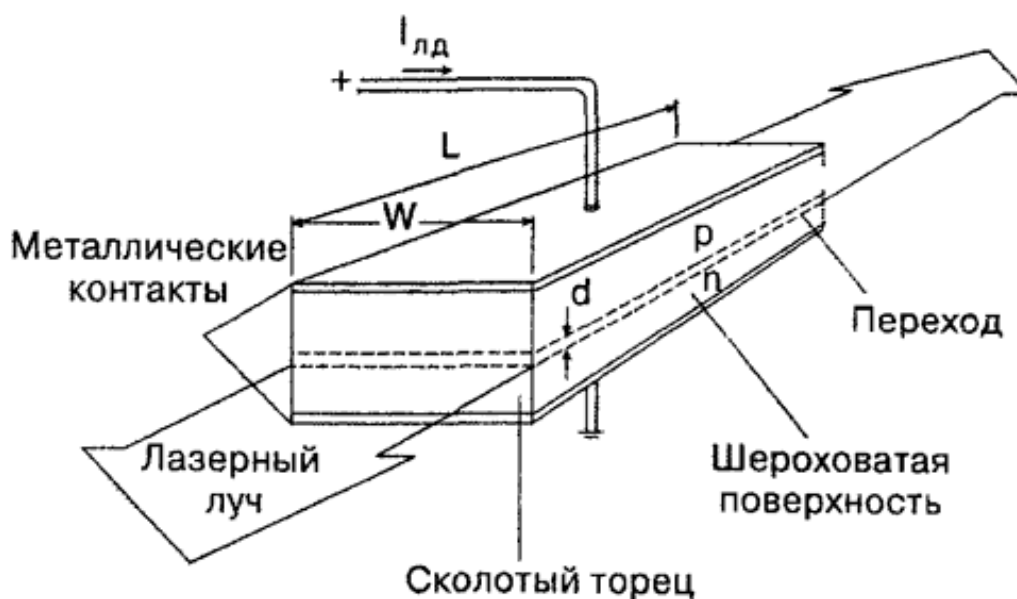


Рисунок 2 – Схема устройства полупроводникового лазера

Волоконный лазер — твердотельный лазер, активная среда и, возможно, резонатор которого являются элементами оптического волокна (рисунок 3). При полностью волоконной реализации такой лазер называется цельноволоконным, при комбинированном использовании волоконных и других элементов в конструкции лазера он называется волоконно-дискретным или гибридным. Волоконные лазеры применяются в промышленности для резки металлов

и маркировки продукции, сварке и микрообработке металлов, линиях волоконно-оптической связи. Их основными преимуществами являются высокое оптическое качество излучения, небольшие габариты и возможность встраивания в волоконные линии. Существует большое разнообразие конструкций волоконных лазеров, обусловленное спецификой их применения. Для их изготовления широко применяются как резонаторы типа Фабри — Перо, так и кольцевые резонаторы. Во всех волоконных лазерах применяются специальные типы оптических волокон, в которые встроены один или несколько волноводов для осуществления оптической накачки. Волоконные лазеры при наличии подходящей обратной связи волокна, легированные редкоземельными ионами, действуют как высокоэффективные волоконные лазеры в диапазоне от видимого до среднего инфракрасного. Особенно хорошими характеристиками обладают лазеры на основе кварцевого волокна с многослойной оболочкой, легированного иттербием. Накачка от лазерного диода вводится в активную среду через многомодовые волокна, сращенные с бухтой волокна с многослойной оболочкой. Обратная связь обеспечивается волоконными решетками Брэгга.

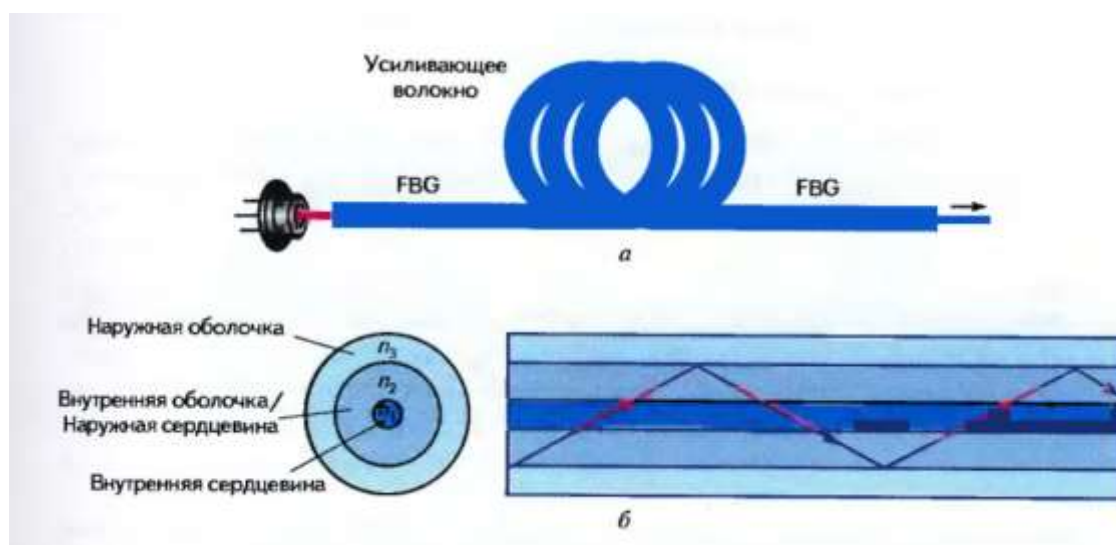
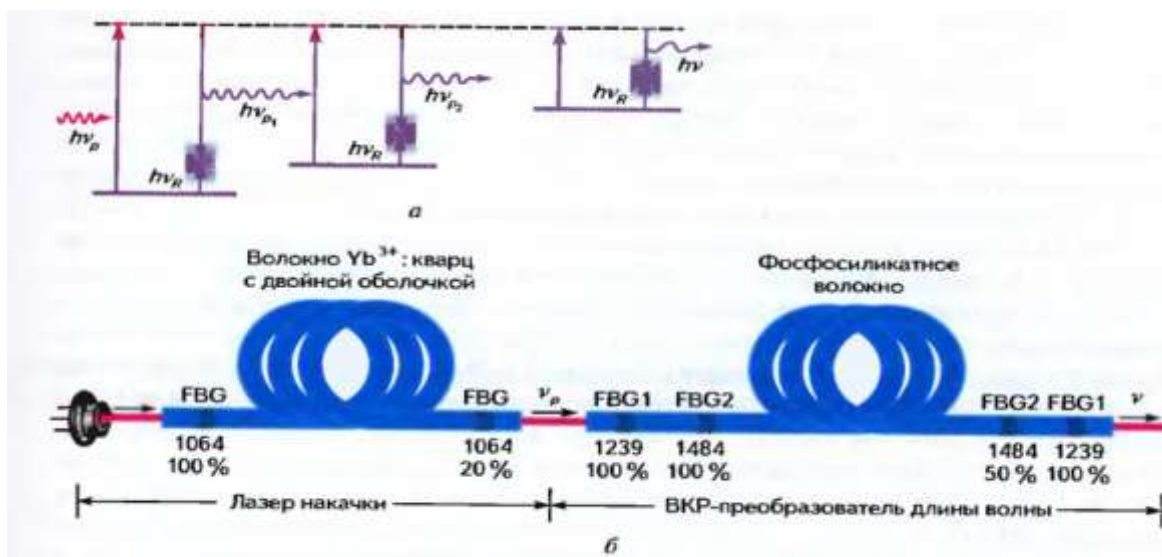


Рисунок 3 – Схема волоконного лазера с накачкой от диодного лазера и с волоконными решетками Брэгга

На рисунке 3 изображена упрощенная схема волоконного лазера с накачкой от диодного лазера и с волоконными решетками Брэгга в качестве отражателей (а), концентрическая конфигурация волокна с двойной оболочкой обозначена (б). Волоконные ВКР-лазеры: они работают на основе вынужденного комбинационного рассеяния (рисунок 4).



Каскад стоксовых сдвигов (а),
схема ВКР-лазера на фосфосиликатном волокне (б)

Рисунок 4 – Схема устройства волоконного лазера

Лазер с диодной накачкой – разновидность твердотельного лазера, в которой в качестве источника оптической накачки используется лазерный диод (рисунок 5). DPSS-лазеры характеризуются высокой эффективностью и компактностью по сравнению с газовыми и другими твердотельными лазерами. В последние годы DPSS-лазеры приобрели особую популярность как источники излучения в лазерных указках зеленого, желтого и некоторых других цветов. Диодная накачка позволяет получить высокую эффективность генерации, качество излучения при относительной простоте реализации и компактности. Преимущество лазеров с диодной накачкой связано с тем, что излучение лазерных диодов спектрально согласуется с полосами поглощения активаторных

ионов в генерирующем кристалле. Из-за относительно высокой дифракционной расходимости излучения полупроводниковых лазеров основные ее преимущества могут быть эффективно реализованы в лазерах с малой (порядка одного миллиметра) длиной активного элемента. Повышение эффективности твердотельных лазеров с диодной накачкой может быть достигнуто за счет оптимизации резонатора, согласующей оптики и источника накачки. Лазеры на твердом теле с оптической накачкой от лазерных диодов преобразуют сравнительно широкополосное многомодовое излучение лазерных диодов в узкополосное одномодовое выходное излучение твердотельного лазера. Они компактны, высокоэффективны и позволяют получать множество различных длин волн. Нелинейное увеличение частоты в два, три или четыре раза часто используется для преобразования излучения в видимый или ультрафиолетовый свет с еще большим разнообразием длин волн. Лазеры на твердом теле находят широкое применение в промышленности, медицине и науке [2].

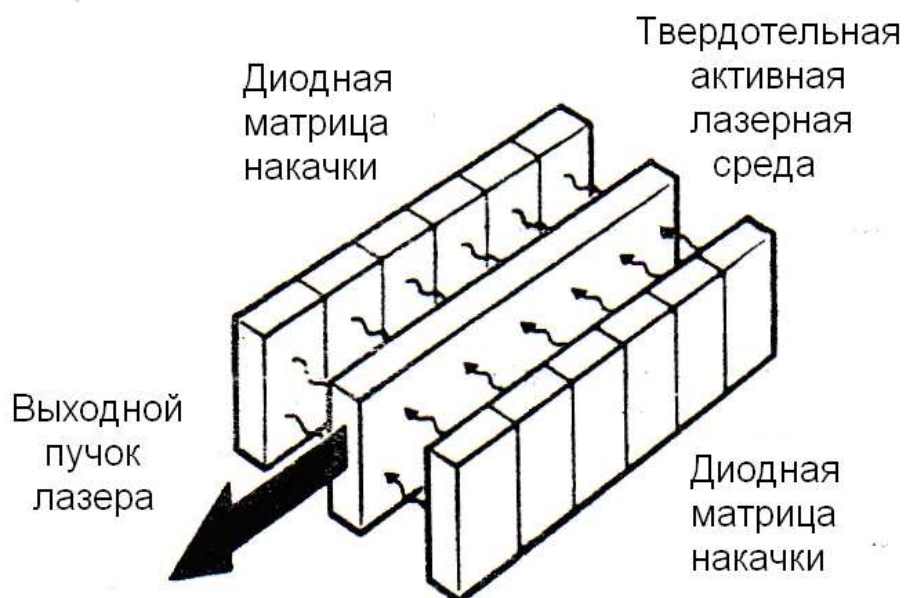


Рисунок 5 – Схема устройства твердотельного лазера с диодной накачкой

2 Оптическая накачка

Оптическая накачка предполагает возбуждение активных центров при поглощении активной средой излучения от некоторого специального источника света. Метод оптической накачки широко применяется в различных типах твердотельных и жидкостных лазеров; он используется также в газовых лазерах.

Оптическая накачка лазера подразумевает наличие источника света, оптической системы для концентрации этого света на рабочем теле лазера и собственно рабочего тела лазера. Тип лампы и рабочее тело лазера должны подходить друг другу по спектрам излучения и поглощения соответственно. В качестве источника света обычно применяют: электролампы с высоким КПД (дуговые, газоразрядные), полупроводниковые источники света (светодиоды и другие лазеры), солнечный свет.

Оптическая накачка лазера, как правило, производится с боковой стороны рабочей среды лазера. Лазеры чаще всего твердотельные (представлены в виде стержня из кристалла или активированного примесями стекла) или лазеры на красителях (в виде жидкого раствора красителя в стеклянной трубке или струи раствора красителя («поперечная прокачка»)). Для более эффективного использования энергии, лампа и активная среда находятся в полости с зеркальной поверхностью. В качестве потенциальных активных сред с оптической накачкой могут быть использованы, например, редкоземельные элементы и актиноиды, которые имеют богатую систему низколежащих энергетических уровней, в том числе и резонансных. Последние можно эффективно возбуждать (накачивать) с помощью светодиодных источников [3].

Накачка лазера излучением другого лазера применяется, когда спектр или мощность излучения требуемого лазера не совпадает с доступными лазерами. В таком случае подбирается пара из доступного лазера и рабочего тела. Лазер освещает рабочее тело в своем спектре излучения, а рабочее тело излучает в требуемом спектре. Мощность излучения увеличивают, облучая рабочее

тело несколькими маломощными лазерами. Разновидность таких лазеров (твердотельный лазер с диодной накачкой, англ. *DPSS*) получила широкое распространение в виде лазерных указок разнообразных цветов. Накачка лазером (а не обычным светодиодом) упрощает систему фокусировки излучения накачки на рабочем теле, уменьшая габариты и увеличивая КПД конструкции. В промышленности распространены мощные волоконные лазеры на аналогичном принципе.

Различают некогерентную и когерентную оптические накачки. При некогерентной накачке используется некогерентное накачивающее излучение; его источником могут служить газоразрядные импульсные лампы, лампы непрерывного горения (газоразрядные и накаливания), искровые разрядники, пламя и т. д. При когерентной накачке источником накачивающего излучения служит вспомогательный лазер.

Для оптической накачки характерна возможность осуществления исключительно высокой селективности возбуждения. Излучение накачки со специально подобранным спектром частот позволяет возбуждать определенную группу уровней или даже отдельный уровень. При когерентной накачке можно «накачивать энергию» в конкретную линию в спектре поглощения активного центра. Для усиления избирательности возбуждения при некогерентной накачке можно использовать также тот факт, что оптическая накачка осуществляется только на оптически разрешенных переходах.

Применение оптической накачки расширяет функциональные возможности лазера. Так, при когерентной накачке лазер может функционировать как усилитель когерентного излучения или как преобразователь оптических частот.

Наконец, специфика оптической накачки проявляется и в том, что она всегда инициирует в канале возбуждения (на переходе между основным уровнем и уровнем возбуждения) обратный процесс, имеющий примерно такую же вероятность, что и прямой процесс, связанный с поглощением излучения. Наряду с поглощением происходит обратный процесс — индуцированное ис-

пускание, инициированное излучением накачки. Существование двух встречных процессов, запрещает совмещать при оптической накачке каналы возбуждения и генерации. Отсюда, в частности, следует, что минимально необходимое число уровней активного центра при оптической накачке равно трем. Рассмотрим оптическую накачку твердотельного лазера (рисунок 16).

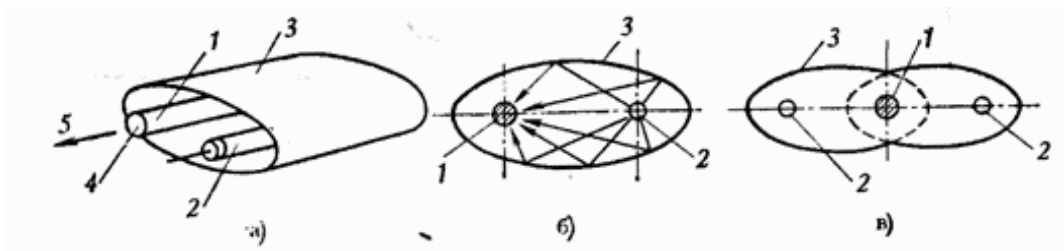


Рисунок 6 – Оптическая накачка твердотельного лазера

На рис. 6, а - показано схематически, как можно реализовать оптическую накачку твердотельного лазера. Здесь 1 — активный элемент, 2 — источник излучения накачки (например, газоразрядная лампа-вспышка), 3 — отражатель для фокусировки излучения накачки на активный элемент, 4 — зеркало оптического резонатора, 5 — лазерное излучение. На рис. 6, б - показано поперечное сечение лазера; поверхность отражателя является в сечении эллипсом, в фокусах которого находятся активный элемент и источник накачки. На практике могут использоваться отражатели различной формы и конструкции. Так, используется двухламповый отражатель, показанный в поперечном сечении на рис. 6, в. Такой отражатель позволяет повысить выходную мощность излучения. В твердотельном активном элементе различают матрицу (основу) и введенный в матрицу в виде примеси активатор (активный центр). Используются как кристаллические, так и аморфные (стеклянные) матрицы. В настоящее время эффект индуцированного испускания обнаружен более чем у 250 диэлектрических кристаллов, активированных примесями ионов переходных групп. Эффективность оптической накачки определяется двумя основными факторами. Во-первых, излучение накачки должно эффективно поглощаться активными центрами и в то же время практически совсем не поглощаться в

матрице. Во-вторых, должна быть высокой квантовая эффективность накачки: практически все активные центры, переведенные накачкой на уровень возбуждения, должны перейти затем на верхний рабочий уровень. Кроме того, желательно, чтобы были минимальными потери энергии на вспомогательных переходах, например на переходе с уровня возбуждения на верхний рабочий уровень. Для повышения эффективности оптической накачки стараются использовать в качестве «уровня возбуждения» достаточно широкую энергетическую полосу или группу уровней и обеспечить при этом соответствие частоты перехода (частот переходов) в канале возбуждения максимуму в спектре излучения лампы накачки. Применяют также метод сенсбилизации, заключающийся в добавлении в матрицу наряду с основными (генерирующими) ионами ионов другого типа — ионов-сенсбилизаторов. Ионы-сенсбилизаторы достаточно эффективно поглощают излучение накачки и затем передают поглощенную энергию ионам-активаторам. Другой метод повышения эффективности твердотельных лазеров предполагает использование в качестве кристалла-матрицы не простых соединений, а смешанных разупорядоченных систем (твердых растворов), что приводит к существенному уширению спектра поглощения. Оптическая накачка твердотельных лазеров требует применения источников оптического излучения, способных создать свет нужного спектрального состава и достаточно высокой интенсивности. Наилучшим образом для этих целей подходят газоразрядные лампы, наполненные ксеноном или криптоном, или их смесью при достаточно высоком давлении газа. Лазерная система накачки кроме лампы (или ламп) включает также осветитель, в котором размещаются как лампы, так и активный стержень. Мощные твердотельные лазеры работают в импульсном или частотно- импульсном режимах. Система накачки должна функционировать в таких же режимах, поэтому применяют импульсные газоразрядные лампы.

Излучение большинства лазеров содержит несколько дискретных оптических частот, которые могут быть связаны с различными режимами оптического резонатора. Каждый режим определяется вариацией электромагнитного

поля перпендикулярно и вдоль оси резонатора. Принято различать два типа резонаторных режима: «продольные» режимы отличаются друг от друга только в их частоте колебаний, «поперечные» режимы отличаются друг от друга не только в их частоте колебаний, но и в распределении поля в плоскости, перпендикулярном направлению распространения. Ниже представлены основные схемы продольной накачки (рисунок 7).

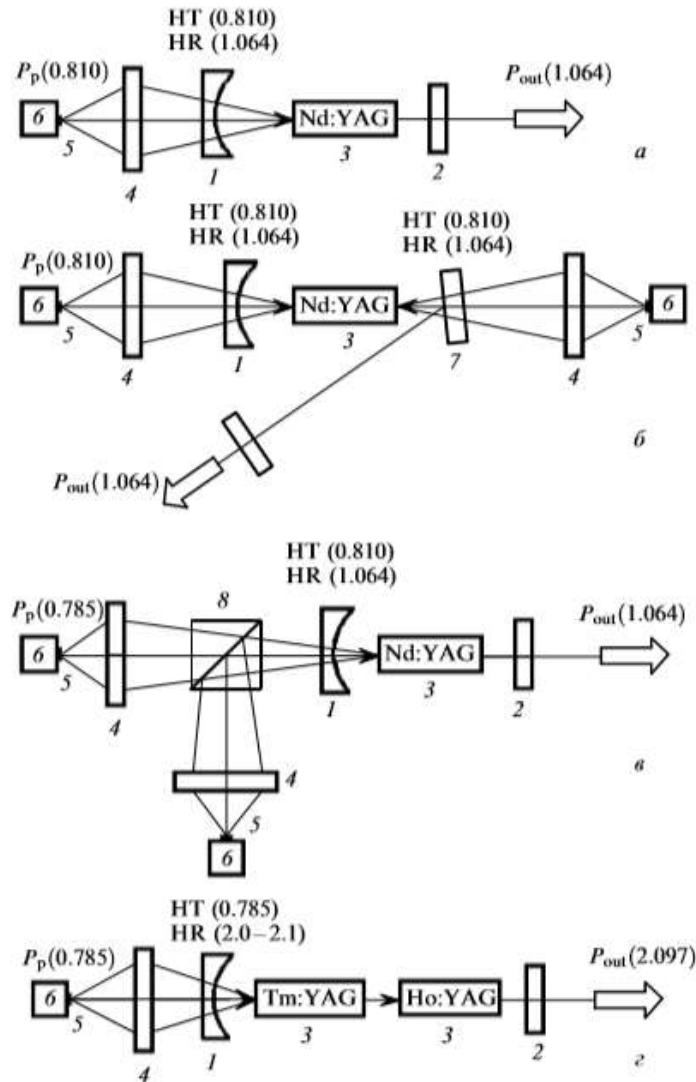


Рисунок 7 – Основные схемы продольной накачки

На рис. 7 изображены «классическая» схема торцевой накачки (а), двухсторонняя схема накачки (б), торцевая схема, использующая два полупроводниковых лазера (в), и схема с внутрирезонаторным преобразованием длины волны накачки (г): 1-глухое зеркало резонатора (часто наносится непосред-

ственно на торец активного элемента); 2-выходное зеркало резонатора; 3-активный элемент; 4-микрообъектив; 5-лазерный диод; 6-термостабилизатор; 7-дополнительное селективное зеркало; 8-смесительный поляризационный кубик; здесь и далее HR и НТ-высокие коэффициенты отражения и пропускания диэлектрических покрытий некоторых элементов лазеров (в скобках указаны длины волн в микрометрах). Ниже представлены основные схемы поперечной накачки (рисунок 8).

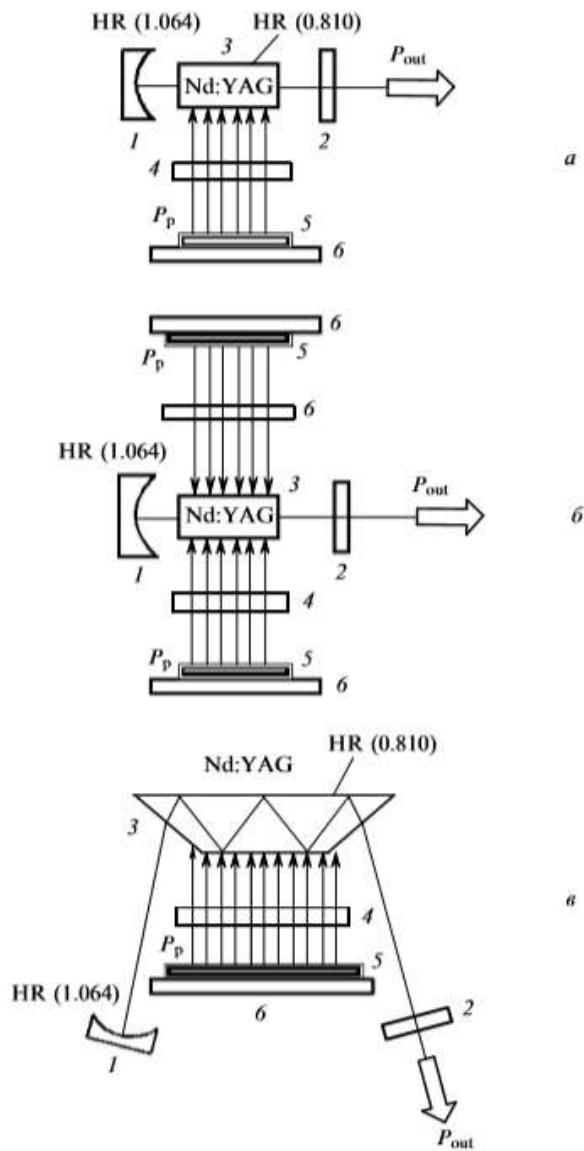


Рисунок 8 – Основные схемы поперечной накачки

На рис. 8 изображены односторонняя схема накачки (а), двусторонняя схема накачки (б) и схема возбуждения слэб-элемента (в): 1 и 2 - глухое и вы-

ходное зеркала резонатора; 3 - активный элемент; 4 - цилиндрическая линза; 5 - полупроводниковая матрица; 6 – термостабилизатор [4].

Накачка электронным пучком может быть поперечной или продольной. При поперечной накачке две противоположные грани полупроводникового кристалла отполированы и играют роль зеркал оптического резонатора (рисунок 9). В случае продольной накачки применяются внешние зеркала (рисунок 10). При продольной накачке значительно улучшается охлаждение полупроводника. Пример такого лазера - лазер на сульфиде кадмия, генерирующий излучение с длиной волны 0,49 микрон и имеющий КПД около 25%.

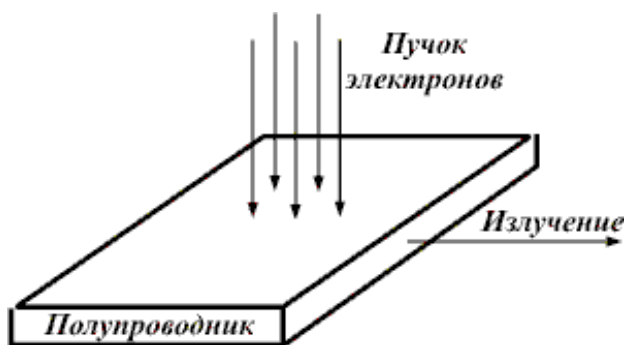


Рисунок 9 – Поперечная накачка электронным пучком



Рисунок 10 – Продольная накачка электронным пучком

Лазеры на тонких дисках разрабатываются в Штутгарте начиная с 1992 года в группе под руководством доктора Гизена. Эта технология уже прошла путь от лаборатории до промышленного использования в некоторых компаниях. Большинство из них находятся в Германии. Понятие «лазер на тонких дис-

ках», как и английское «thin disk laser», отражает цилиндрическую симметрию лазера и является переводом немецкого слова «Scheibenlaser». Конечно же, активный материал может иметь и прямоугольную форму. Отличительной особенностью такого лазера является толщина активной среды, которая во много раз меньше поперечного размера накачиваемой активной области. Диаметр активной области варьируется от 1 мм для лазеров с низкой выходной мощностью до 10 мм и более для получения лазеров с выходной мощностью в десятки киловатт. Толщина активной среды меняется обычно от 100 мкм до 300 мкм. Малая толщина активного материала позволяет эффективно охлаждать и отводить большой тепловой поток без значительного повышения температуры. Поэтому лазеры на тонких дисках способны генерировать излучение высочайшей мощности.

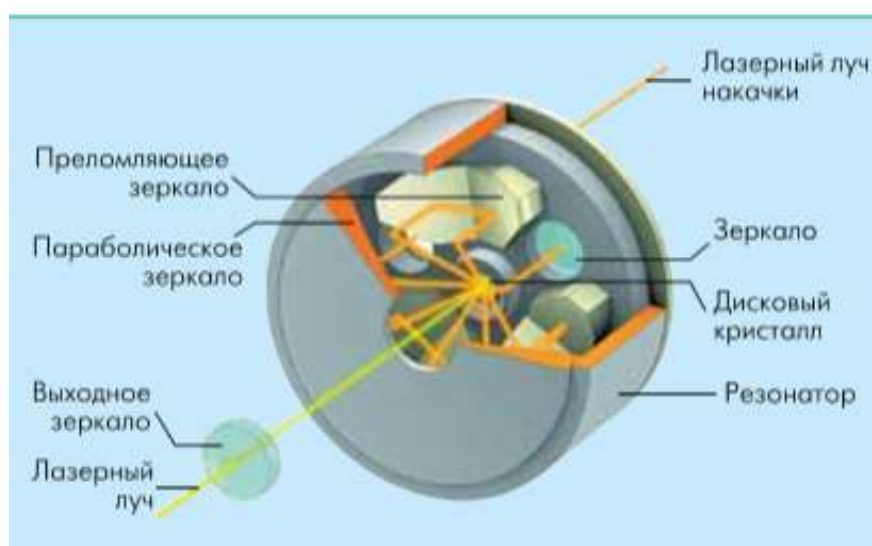


Рисунок 11 – Дисковый резонатор

Принцип работы дискового лазера основан на использовании охлаждаемого кристалла в форме диска (рисунок 11). 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. 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 (рисунок 12).

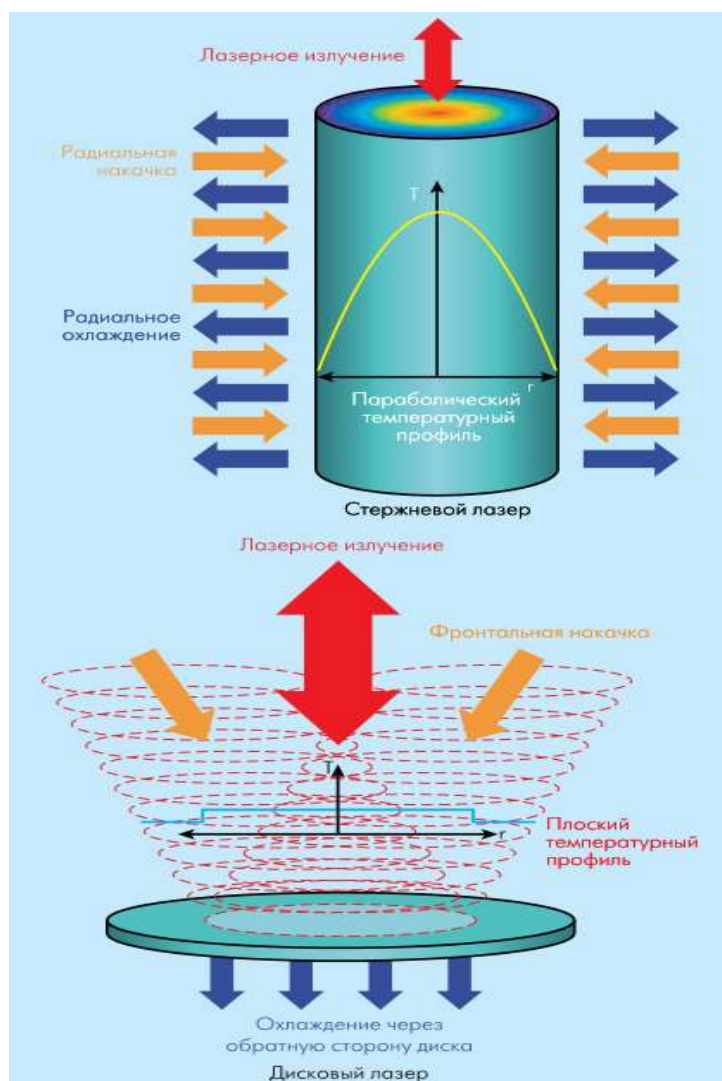


Рисунок 12 – Зависимость температурного градиента от различных схем накачки в стержневом и дисковом лазерах

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. Параболическое зеркало фокусирует 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. С точки зрения практического использования лазерные диоды с равномерным распределением интенсивности более предпочтительны ввиду заметно меньших затрат, приходящихся на один ватт мощности накачки [5].

В твердотельных лазерах с диодной накачкой существует две конфигурации накачки: продольная и поперечная. Рассмотрим схему твердотельного лазера (рисунок 13).

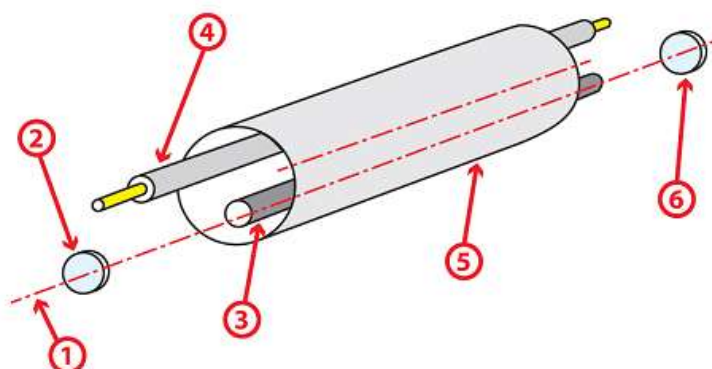


Схема твердотельного лазера:

- | | |
|----------------------------------|---------------------------|
| 1 – луч лазера, | 4 – лампа накачки, |
| 2 – частично прозрачное зеркало, | 5 – осветительная камера, |
| 3 – активное тело, | 6 – отражающее зеркало |

Рисунок 13 – Схема твердотельного лазера

Продольная прокачка (от торца активного элемента) дает возможность получить больше длины поглощения части излучения, которое ослабляет требование на прокачку длины волны, т.е. степень контроля температуры лазерного диода. Однако продольная накачка требует более мощных диодов с малой расходимостью излучения.

Применение поперечной накачки в твердотельных лазерах позволяет использовать большее количество диодных решеток. Эти решетки расположены параллельно оси активного элемента и перпендикулярно направлению распространения лазерного излучения в резонаторе. В большинстве случаев, диаметр активного элемента должна быть небольшой. Это ограничение приводит к малой длине поглощения излучения накачки и снижению КПД по сравнению с продольной накачкой. Таким образом, для получения соответствующего уровня выходной мощности твердотельного лазера с поперечной накачкой, необходимо использовать значительно большее количество лазерных диодов по сравнению с лазером с продольной накачкой. Несмотря на эти недостатки, попе-

речная накачка позволяет увеличить мощность излучения твердотельных лазеров.

Продольная диодная накачка активных сред твердотельных лазеров широко используется при создании высокоэффективных одномодовых мини-лазеров малой мощности излучения. Высокая плотность излучения накачки в объеме активной среды позволяет достигать высоких коэффициентов преобразования его в лазерное излучение в усилительных и генераторных схемах и при модуляции добротности в последних достаточно просто осуществлять генерацию наносекундных импульсов излучения даже при непрерывной накачке. Но малая средняя мощность излучения таких лазеров была обусловлена малой мощностью используемых диодных источников накачки. С повышением степени интеграции конструкций лазерных диодов возросла и мощность их излучения. В настоящее время на лазерном рынке достаточно широко представлены модули на основе диодных линеек и решеток. Мощность линеек при непрерывной генерации составляет десятки ватт. Обычно для транспортировки излучения таких диодных источников и придания ему удовлетворительных пространственных характеристик используется оптическое волокно [6].

На рисунке 14 показаны оптические схемы усилителей с продольной накачкой, где: 1 — задающий генератор; 2 — линза; 3 — призма с отражающими покрытиями; 4 — активный элемент; 5 — плоское зеркало; 6 — двухлинзовая оптическая система; 7 — световолокно; 8 — диодный модуль; 9 — $\lambda/4$ - пластина; 10 — поляризатор.

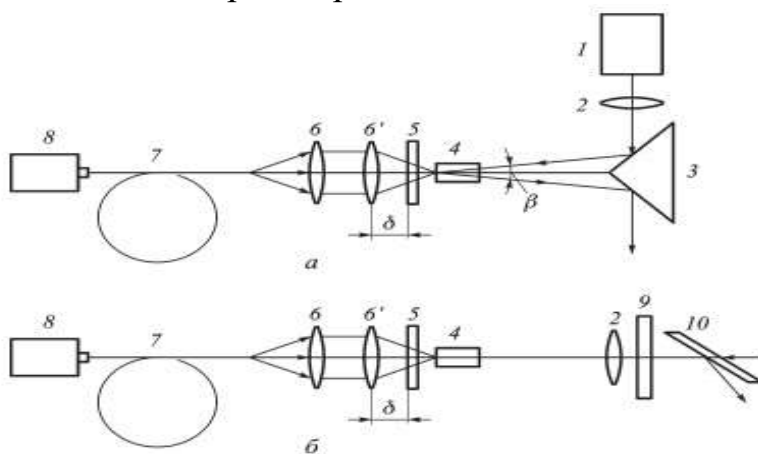


Рисунок 14 – Оптические схемы усилителей с продольной накачкой

3 Импульсный режим оптической накачки лазеров

Большинство лазеров работают в импульсно-периодическом (нестационарном) режиме. Изучение нестационарного режима работы четырехуровневого и трехуровневого лазеров приводит к решению скоростных уравнений. Совместное решение этих двух уравнений осуществимо только численно и представляется в виде нелинейной временной зависимости инверсий населенностей $N(t)$ и числа фотонов $q(t)$ при заданных начальных условиях $W(t)$. Решение такого уравнения имеет вид:

$$q = \frac{1}{2} \left[N_c \ln \frac{N}{N_0} - (N - N_0) \right] \quad (1)$$

где N_0 – инверсия населенностей в начальный момент времени.

Согласно уравнению (19) и с учетом условия равновесия населенностей, работа лазера возможна в импульсном режиме, если длительность импульса накачки короче времени жизни верхнего уровня или сравнима с ним:

$$\tau_1 \geq \tau_{21} \quad (2)$$

Для достижения такого условия на практике помимо импульсного источника накачки пользуются методом модуляции добротности резонатора, предложенным в 1961 г. Х. Хелуортом. Такой метод позволяет получить лазерную генерацию в виде коротких импульсов ($\leq 10^{-8} c$) с высокой пиковой мощностью ($\geq 108 Bm$). В этом режиме в резонатор лазера помещается затвор, перекрывающий оптический путь между зеркалами. В процессе накачки на верхнем лазерном уровне накапливается энергия, которая не излучается индуцированно, так что инверсия населенностей может стать очень большой. В некоторый момент времени затвор быстро открывается и накопленная на верхнем уровне энергия излучается в виде гигантского импульса. При этом происходит изменение добротности резонатора от низких до высоких значений. Такой метод называют модуляцией добротности. Применение метода модуляции добротности воз-

можно только в том случае, когда время жизни верхнего лазерного уровня достаточно велико (от 10^{-5} до 10^{-3} с).

Для осуществления модуляции добротности предполагается:

1) Время верхнего лазерного состояния должно быть достаточно большим, чтобы инверсия населенностей могла достичь больших значений, т. е. длительность импульса накачки должна быть меньше времени релаксации верхнего состояния или сравнима с ним по величине;

2) Включение добротности резонатора должно происходить мгновенно. В противном случае большая часть энергии накачки будет теряться вследствие спонтанной релаксации и могут возникать многократные импульсы.

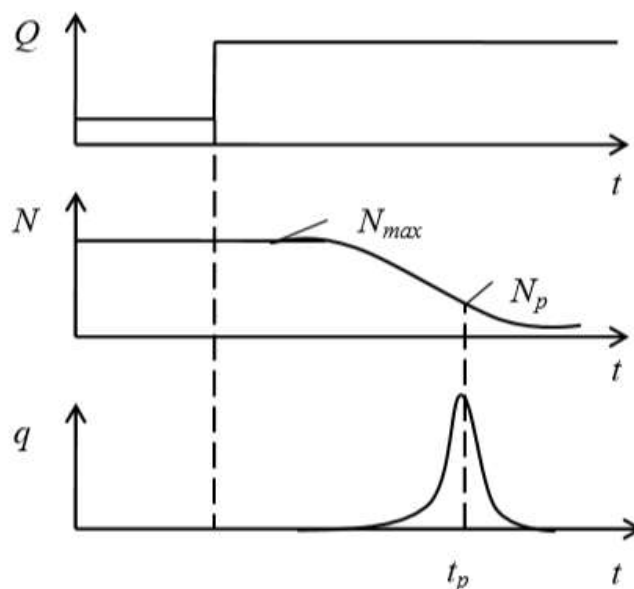


Рисунок 15 – Временная зависимость добротности резонатора Q , инверсной населенности N и числа фотонов q в импульсном лазере

На рис. 15 показывается, что когда затвор открывается, усиление лазера значительно превосходит потери резонатора и число фотонов $q(t)$ резко увеличивается от начального значения до устанавливаемого спонтанным излучением. В результате увеличения $q(t)$ инверсия населенностей $N(t)$ будет уменьшаться от ее максимального N_{max} значения до величины пороговой инверсии населенностей N_p . Это означает, что за время t_p световой импульс будет иметь

максимальную мощность. При $t > t_p$ в лазере вместо усиления будут увеличиваться потери и, как следствие, мощность импульса уменьшится до нуля.

В импульсном режиме накачка носит импульсный характер (длительность импульса накачки может варьироваться от десятков микросекунд до сотен миллисекунд), лазер генерирует вблизи порога, а генерация представляет собой гребенку достаточно нерегулярных по амплитуде и частоте следования пиков, появляющихся в результате конкуренции роста инверсии за счет накачки и уменьшения ее за счет высвечивания фотонов. Характерная длительность пика в гребенке - единицы микросекунд, интервал между пиками - десятки микросекунд). Этот режим в основном применяется в технологии толстолистовых материалов, сварке, резке с большими глубинами проплавления. Отдельно следует выделить режимы генерации повторяющихся импульсов:

1) Импульсно-периодический (ИП). Он подразумевает генерацию импульсов в режимах свободной генерации либо модуляции добротности с частотами повторения 5 – 100000 Гц.

2) Квазинепрерывный режим. В этом режиме частота повторения достигает десятков ГГц. Характерным отличием от ИП режима является то, что средняя мощность квазинепрерывной генерации сопоставима с пиковой мощностью составляющих импульсов. Он используется в локациях, связи, различных технологических процессах.

При импульсной накачке, когда инверсия реализуется лишь в течение некоторых промежутков времени, быстрое очищение нижнего рабочего уровня может оказаться несущественным. Предположим, что при включении импульса возбуждения скорость заселения верхнего рабочего уровня оказывается выше скорости заселения нижнего уровня. В этом случае лазер может работать за счет инверсии, возникающей в начале импульса возбуждения. В режиме импульсной накачки возможно получение генерации в большем числе сред и на большем числе переходов в данной среде, нежели при стационарной накачке. В частности, реализуется генерация на так называемых самоограниченных переходах.

Самоограниченными называют переходы, где верхним рабочим уровнем служит первый резонансный уровень активного центра, а нижним является метастабильный уровень. Метастабильность нижнего уровня, исключая возможность его радиационного очищения, не позволяет реализовать стационарную инверсию на таких переходах несмотря на то, что первый резонансный уровень обладает, как правило, наибольшим сечением электронного возбуждения в разряде. Однако на указанных переходах возможна импульсная генерация; она может происходить в начале импульса возбуждения, когда скорость релаксации нижнего уровня незначительна, а существенно отношение скоростей заселения рабочих уровней. Поскольку длительность генерации ограничена в рассматриваемом случае свойствами самого перехода, такие переходы получили название самоограниченных. Отношение скоростей заселения рабочих уровней в случае самоограниченных переходов особенно благоприятно, причем именно вследствие метастабильности нижнего рабочего уровня. Дело в том, что сечения возбуждения электронами по оптически запрещенным переходам, как правило, много меньше, чем по разрешенным. В результате вероятность электронного возбуждения первого резонансного (верхнего рабочего) уровня оказывается существенно более высокой, чем вероятность возбуждения метастабильного (нижнего рабочего) уровня. Именно поэтому лазеры, работающие на основе самоограниченных переходов, отличаются весьма высокими значениями коэффициента усиления.

Говоря о преимуществах импульсной накачки, надо отметить также тот факт, что ее легче реализовать с технической точки зрения, нежели непрерывную накачку. Непрерывный достаточно стабильный подвод энергии к активной среде, как правило, технически сложнее, чем импульсный. Кроме того, при импульсной накачке обычно нет необходимости в принудительном охлаждении нагревающейся активной среды. Импульсная накачка позволяет реализовать различные импульсные режимы генерации. При этом удастся осуществлять исключительно сильную концентрацию во времени и пространстве излучаемой световой энергии.

В практике применения лазеров импульсные режимы генерации встречаются заметно чаще, чем непрерывные. Твердотельные и жидкостные лазеры работают обычно в импульсных режимах; при этом используется как импульсная, так и непрерывная накачка. Непрерывная генерация характерна для газовых лазеров; однако и тут наблюдается повышение интереса к импульсной генерации. В твердотельных лазерах накачка осуществляется за счёт облучения мощными газоразрядными лампами-вспышками, сфокусированным солнечным излучением (так называемая оптическая накачка) и излучением других лазеров. При этом возможна работа только в импульсном режиме, поскольку требуются очень большие плотности энергии накачки, вызывающие при длительном воздействии сильный разогрев и разрушение стержня рабочего вещества. В газовых и жидкостных лазерах используется накачка электрическим разрядом. Такие лазеры работают в непрерывном режиме. Накачка химических лазеров происходит посредством протекания в их активной среде химических реакций. При этом инверсия населённости возникает либо непосредственно у продуктов реакции, либо у специально введённых примесей с подходящей структурой энергетических уровней. Накачка полупроводниковых лазеров происходит под действием сильного прямого тока через р-п переход, а также пучком электронов. Существуют и другие методы накачки (газодинамические, заключающиеся в резком охлаждении предварительно нагретых газов; фотодиссоциация, частный случай химической накачки и др.).

4 Непрерывный режим оптической накачки лазеров

Стационарная накачка приводит к стационарному режиму генерации, что можно рассматривать как непрерывный режим работы лазера. Для изучения непрерывного режима работы лазера следует анализировать скоростные уравнения четырехуровневого и трехуровневого лазеров. Из этих уравнений следует, что:

$$N_1 / \tau_1 = N_2 / \tau_{21} \quad (3)$$

где N_1 и N_2 – населенность основного и возбужденного уровней соответственно;

τ_{21} – время жизни перехода $2 \rightarrow 1$;

τ_1 – время жизни частиц на первом уровне.

Генерация лазера осуществляется при условии, когда выполняется неравенство $N_2 > N_1$. Из уравнения (3) следует, что выполняется неравенство $\tau_1 < \tau_{21}$, это означает, что работа лазера осуществляется в непрерывном режиме [7]. Если энергия источника накачки постоянна и велика, а также выполняется условие $\tau_1 < \tau_{21}$, то будет обеспечиваться условие стационарного режима работы лазера. Анализ скоростных уравнений показывает, что при неравенстве $\tau_1 < \tau_{21}$ генерация возникает в том случае, когда инверсия населенностей N достигает некоторого критического значения N_c . При этом критическая скорость накачки достигает такого значения, когда полная скорость накачки уровней уравнивает скорость спонтанного перехода с уровня 2 на уровень 1. Физический смысл этого процесса заключается в том, что критическое значение населенности возбужденного уровня должно быть достаточно большим, чтобы усиление компенсировало полные потери в лазере. Если скорость накачки больше скорости спонтанного перехода, то число фотонов будет возрастать от исходного значения, определяемого спонтанным излучением, и если скорость накачки не

зависит от времени, тогда число вынуждено испущенных фотонов достигнет некоторого постоянного значения, которое определяется как:

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dt} &= 0 \\ \frac{dq}{dt} &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Следовательно, для непрерывного режима работы лазера значение инверсии и число фотонов вычисляются как:

$$\begin{aligned} N_0 &= 1/V_a B \tau = N_c \\ q_0 &= (A\gamma / \sigma)(\tau_c / \tau)(P_p / P_{nop} - 1) \end{aligned} \quad (5)$$

где P_{nop} и P_p – пороговая мощность и мощности накачки соответственно.

Из этих выражений следует, что число фотонов q_0 линейно возрастает с ростом скорости накачки, в то время как инверсия населенностей N_0 остается постоянной и равной критической N_c . Это означает, что когда скорость накачки выше критической, в резонаторе лазера увеличивается число фотонов, а не инверсия населенностей. Также следует, что незначительное увеличение мощности накачки относительно порогового значения приводит к резкому увеличению числа фотонов в резонаторе [8].

В непрерывном режиме лазер генерирует при пороговой инверсии населенности. Выходное излучение имеет вид неупорядоченных пиков длительностью порядка единиц микросекунд. Часто интенсивность излучения между пиками также имеет ненулевую величину. Достоинством непрерывного режима является то, что в этом режиме наиболее полно реализуются такие свойства лазеров, как монохроматичность, когерентность, направленность и низкий уровень шумов излучения.

На практике часто требуется иметь управляемую регулярную последовательность световых импульсов, следующих друг за другом с достаточно высо-

кой частотой. Для этого используются режимы генерации импульсов при непрерывной накачке.

Интенсивно исследуются непрерывно накачиваемые лазеры на гранате с неодимом. Они имеют среднюю мощность выходного излучения порядка 1—10 Вт. Максимальное значение средней выходной мощности может достигать нескольких сотен ватт. Для генерации импульсов в непрерывно накачиваемых лазерах первоначально использовалась активная модуляция добротности резонатора. Сначала был применен оптико-механический модулятор в виде вращающегося зеркала. Однако такой метод модуляции оказался малоинтересным при непрерывной накачке из-за плохой стабильности амплитуды от импульса к импульсу (что связано с плохой воспроизводимостью положения отражающей плоскости вращающегося зеркала). Широкое признание получили появившиеся позднее акустооптические модуляторы. Они позволили достичь предельно высоких частот следования импульсов. При уменьшении частоты происходит падение КПД лазера. Частоты ограничены сверху значением примерно 50 кГц. Наличие верхней частотной границы связано с существованием длительного этапа линейного развития выходного импульса. Чтобы получить последовательность импульсов с частотой следования выше 50 кГц, надо обеспечить более быстрое нарастание интенсивности импульса. Для этого можно «оборвать» генерируемый импульс на участке спада интенсивности и тем самым сохранить внутри резонатора достаточно высокую плотность излучения (а также относительно высокую плотность инверсной заселенности рабочих уровней). В этом случае генерация будет развиваться уже не от уровня шумов, а от уровня излучения, сохраненного в резонаторе благодаря «обрыву» импульса. Такой метод позволяет поднять частоту примерно до 100 кГц.

Другой путь увеличения состоит в использовании режима разгрузки резонатора. Частоты реализуемые в этом режиме, ограничены сверху фактически лишь скоростью накопления излучения в резонаторе (время накопления соответствует времени нескольких проходов излучения по резонатору). Выше отмечалось, что при средней выходной мощности, равной максимальной мощно-

сти непрерывной генерации, имеет место ограничение частот снизу. Дело в том, что требование сохранения средней выходной мощности при низких частотах следования импульсов приводит к необходимости вывода из резонатора чрезмерно большого числа фотонов в импульсе, в результате инверсная заселенность рабочих уровней может оказаться ниже порога генерации. С другой стороны, как отмечалось, «обрыв» импульса может привести к устойчивости в рассматриваемой области режима модуляции добротности. Непрерывные лазеры имеют широчайший диапазон применения. Можно выделить датчики контроля технологических процессов, связь, лазерную технологию, в частности резку и сварку с большими глубинами проплавления.

5 Моделирование режимов импульсной и непрерывной накачки

Более высокая интенсивность накачки может быть достигнута использованием лазерных диодов вместо ламповых источников как эффективных источников накачки твердотельных лазеров благодаря своей более высокой яркости. Скоростные уравнения моделей этих квазитрехуровневых лазерных переходов показывают, что лазерный эффект следует ожидать и при непрерывной накачке, и при накачке с модуляцией добротности. В ходе практической работы была рассмотрена геометрия и структура энергетических уровней широко распространённого лазерного иона Yb^{3+} . Активная среда такого лазера представляет собой волоконный световод с двойной оболочкой, сердцевина которого легирована ионами Yb^{3+} [9]. Скоростные уравнения, которыми описывается процесс накачки можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial I^+(z,t)}{\partial z} &= -(f_a' N_0 - f_b' N_1) \sigma_a I^+(z,t) \\ \frac{\partial I^-(z,t)}{\partial z} &= (f_a' N_0 - f_b' N_1) \sigma_a I^-(z,t) \\ \frac{\partial N_1(z,t)}{\partial t} &= \sigma_a (f_a' N_0 - f_b' N_1) \frac{I^+(z,t) + I^-(z,t)}{h\nu_p} - \frac{N_1(z,t)}{\tau_f} \\ N(z) &= N_0(z,t) + N_1(z,t) \end{aligned} \quad (6)$$

где I^+ и I^- – интенсивности прямой и обратной волны накачки;

σ_a – сечение поглощения ионов Yb^{3+} в ниобате лития на длине волны накачки λ_p ;

$h\nu_p$ – квант накачки, соответствующий длине волны накачки λ_p ;

τ_f – люминесцентное время жизни верхнего уровня;

N_0 и N_1 – населённости основного и возбуждённого уровней энергии которые в сумме равны полной концентрации N иона активатора Yb^{3+} в лазерном элементе.

В данном случае мы рассматриваем значение N как функцию координаты [10]. Такие лазерные кристаллы можно получить способом кристаллизации по Чохральскому с жидкостной подпиткой.

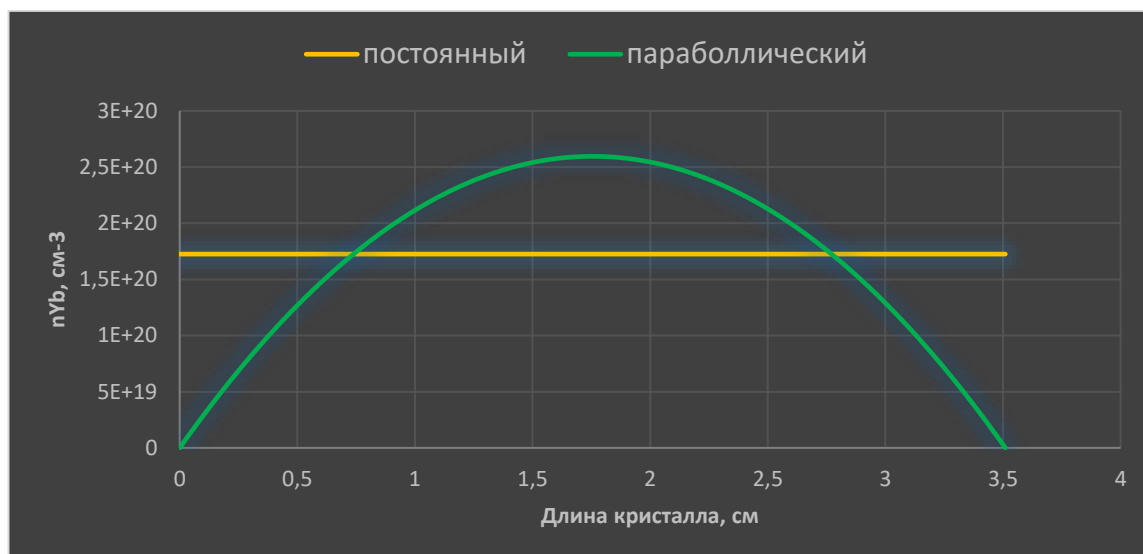


Рисунок 16 – Концентрационные профили ионов Yb^{3+} в ниобате лития

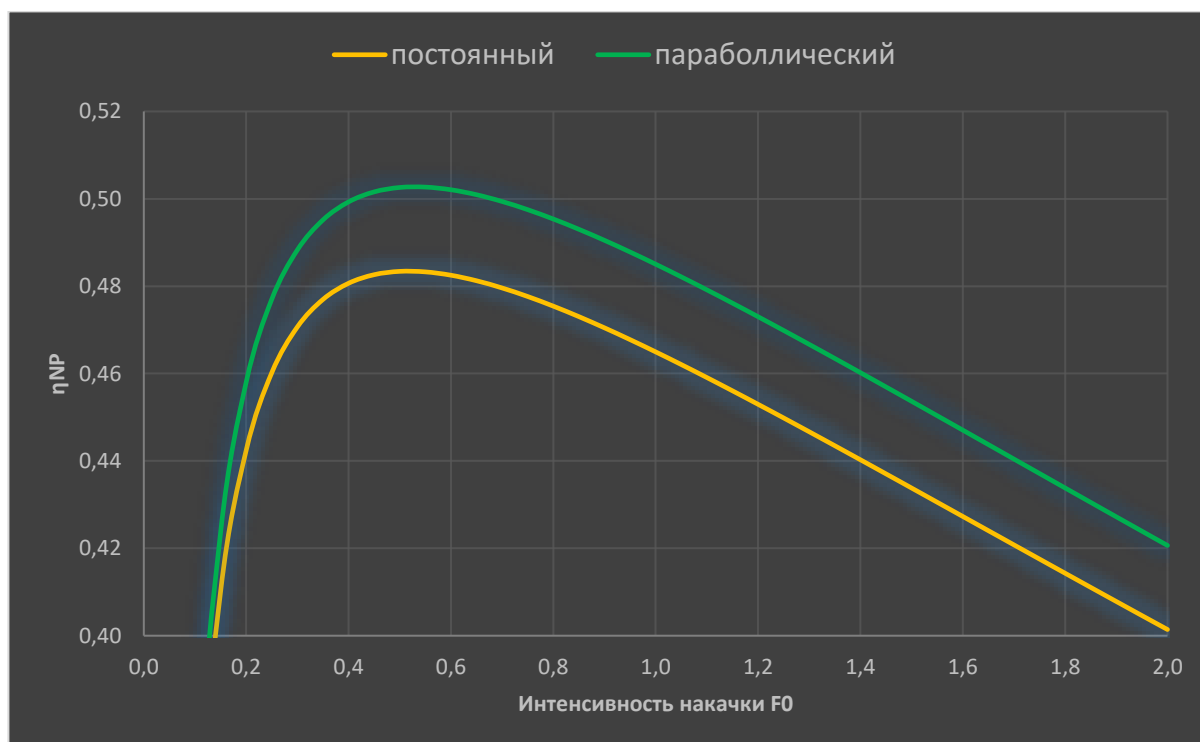


Рисунок 17 – Зависимость квантовой эффективности накачки от интенсивности накачки лазерных элементов $Yb:LiNbO_3$

На рис. 17 по оси Y располагается значение концентрации активаторов, а по оси X расположена интенсивность накачки ($F_0=I_0/I_s$). Нам известно, что интенсивность – это скалярная физическая величина, количественно характеризующая мощность, переносимую волной в направлении распространения. Численно интенсивность равна усреднённой за период колебаний волны мощности излучения, проходящей через единичную площадку, расположенную перпендикулярно направлению распространения энергии. Можно сделать вывод, что наибольшую квантовую эффективность можно получить при непрерывной накачке лазера, так как именно в этом режиме незначительное увеличение мощности накачки относительно порогового значения приводит к резкому увеличению числа фотонов, что и показывается на рис. 17.

Также из графиков видно, что при использовании параболического концентрационного профиля (рисунок 16) квантовая эффективность накачки выше, чем при использовании постоянного уровня допирования (рисунок 17), равному среднему значению концентрации активаторов при параболическом градиенте.

Во время практической работы была проведена полировальная обработка ниобат-литиевых кристаллов, в последующем использующихся в лазерных преобразователях. Ниобат лития (LiNbO_3) — химическое соединение, смешанный оксид ниобия лития, бесцветные кристаллы с ромбоэдрической структурой (рисунок 18). LiNbO_3 один из наиболее привлекательных материалов для оптоэлектроники. Его уникальные электрооптические, фотоупругие, пьезоэлектрические и нелинейные свойства в комбинации с хорошими механическими свойствами, химической стабильностью и широким диапазоном пропускания послужили основой для создания целого ряда приборов.

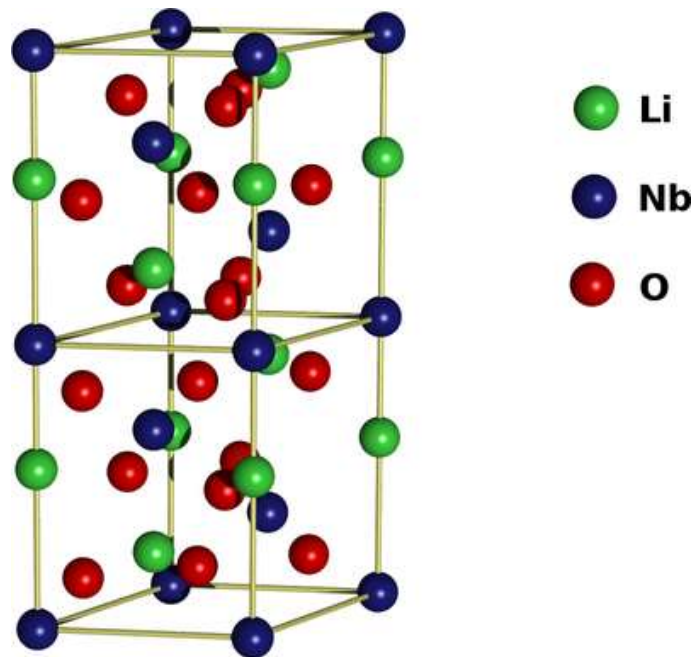


Рисунок 18 – Кристаллическая решетка ниобата лития

Ниобат лития не растворяется в воде, не разлагается при высоких температурах, отличается высокой механической прочностью. По электрическим свойствам он представляет собой сегнетоэлектрик с температурой Кюри около 1200 градусов Цельсия. Благодаря своим высоким пьезоэлектрическим и механическим свойствам, в том числе и высокой добротности, ниобат лития является перспективным материалом для изготовления преобразователей различного назначения. Монокристаллы применяются в соответствии с их способностью изменять (увеличивать) длину волн видимого и инфракрасного излучения. Среди свойств, зависящих непосредственно от состава кристалла, следует отметить эффект фоторефракции - фотоиндуцированное изменение показателей преломления, возникающее в освещенной области кристалла. В зависимости от области применения монокристалла ниобата лития фоторефрактивный эффект стараются либо усилить (например, для осуществления голографической записи) путем легирования фоторефрактивными примесями, либо подавить (для использования в оптоэлектронике) путем легирования нефоторефрактивными примесями. Электрооптические модуляторы основаны на электрооптическом эффекте, обычно на эффекте Поккельса. Ячейка Поккельса представляет собой нели-

нейный кристалл (например, кристалл ниобата лития, КДР, ДКДР и др.), показатель преломления которого изменяется под действием внешнего электрического поля.

Во время проведения собственной обработки ниобат-литиевых кристаллов, мы использовали алмазные пасты для полировки плоскостей и граней данных кристаллов. Алмазные пасты оказывают на обрабатываемую поверхность химическое и механическое воздействие. Они образуют тонкодисперсные эмульсии, способствующие более равномерному распределению алмаза в рабочей зоне. В состав паст входят поверхностно-активные вещества, которые облегчают промывку деталей и выводят из зоны обработки легко воспламеняющиеся жидкости и образовавшиеся в процессе обработки шлаки и стружку. Это повышает производительность труда за счет повышения абразивной способности и улучшает качество обрабатываемой поверхности. Ручную обработку плоскости кристалла начинали с пасты имеющей большую зернистость, после приступали к полировке пастой меньшей зернистости. Таким образом мы последовательно использовали пасты АСМ 40/28, АСМ 28/20, АСМ 20/14, АСМ 14/10, АСМ 10/7, АСМ 7/5, АСМ 5/3, АСМ 3/2, АСМ 2/1 для улучшения эффекта полировки. Результаты работы можно увидеть на рисунках 19 и 20.



Рисунок 19 – Плоскость ниобат-литиевого кристалла после полировки



Рисунок 20 – Ниобат-литиевые кристаллы после обработки плоскостей и границей

Далее рассмотрим генерацию второй гармоники в нелинейном кристалле с учетом тепловых взаимодействий. Генерация второй гармоники — явление рождения вторичных электромагнитных волн удвоенной частоты в результате нелинейного взаимодействия электромагнитной волны с веществом.

В процессе генерации второй гармоники в нелинейном кристалле происходит некоторое поглощение энергии основного излучения и второй гармоники. До сих пор мы отмечали этот факт лишь посредством введения в укороченные уравнения слагаемых, пропорциональных коэффициентам линейного поглощения δ_1 и δ_2 . Во многих случаях эти коэффициенты не учитывались, поскольку при значениях $\delta \approx 10^{-2} - 10^{-3} \text{ см}^{-1}$, характерных для прозрачных кристаллов, можно принять $\exp(-\delta l) \approx 1$. Однако нельзя не учитывать того факта, что при поглощении излучения происходит нагрев нелинейного кристалла. Он играет существенную роль при относительно больших (больше 1 Вт) средних мощностях излучения, реализуемых в импульсных лазерах периодического действия (частота повторения импульсов $f \approx 10 - 10^{-3} \text{ кГц}$), квазинепрерывных ($f \approx 10 - 10^{-3} \text{ кГц}$) и непрерывных лазерах. Нагрев кристалла излучением, как правило, пространственно неоднороден, что затрудняет, а зачастую и принципи-

ально не позволяет скомпенсировать тепловые эффекты. Поэтому необходимо более подробно рассмотреть влияние тепловых эффектов на процесс генерации второй гармоники. В стационарном тепловом режиме световой пучок распространяется в слабопоглощающей среде самосогласованно. Это означает, что характеристики среды в известной мере определяются самим пучком, так что можно говорить о самовоздействии светового пучка. В связи с этим используется термин «тепловые самовоздействия». В основе тепловых самовоздействий лежит возникновение неоднородного температурного поля в нелинейном кристалле вследствие поглощения излучения. Неоднородный нагрев кристалла приводит, в свою очередь, к изменению показателей преломления волн основного излучения и второй гармоники.

Полное приращение Δn для каждого показателя преломления складывается из двух членов:

$$\Delta n = \Delta n_T + \Delta n' \quad (7)$$

где Δn_T - приращение, связанное со свободным равномерным нагревом кристалла;

$\Delta n'$ - приращение, обусловленное термоупругими напряжениями, возникающими из-за неоднородного характера нагрева.

Пространственно-неоднородное распределение значений показателей преломления обуславливает два побочных нелинейных эффекта, влияющих на эффективность генерации второй гармоники. Во-первых, возникает пространственно-неоднородное дисперсионное двулучепреломление B , а следовательно, и неоднородная по сечению пучка фазовая расстройка Δk , что существенно ограничивает эффективность преобразования. Во вторых, наблюдается эффект нелинейной рефракции (преломления). Иначе говоря, в кристалле возникает тепловая линза, приводящая к тепловой самофокусировке или самодефокусировке излучения.

Первый из указанных эффектов (возникновение нелинейной тепловой расстройки) проявляется заметно раньше второго. При рассмотрении тепловых самовоздействий вводят радиус тепловой самофокусировки $R_{нел}$ который можно интерпретировать как фокусное расстояние тепловой линзы. При $R_{нел} \gg l$ эффект нелинейной рефракции на длине l кристалла не проявляется. При этом, однако, необходимо учитывать возникновение нелинейной тепловой расстройки.

Фактически указанные эффекты имеют общее происхождение. В результате возникновения неоднородного температурного поля (с учетом вклада термоупругих напряжений) фазовый фронт световой волны искривляется. Если на длине кристалла амплитудный профиль волны не успевает претерпеть заметных изменений (неизбежно возникающих вслед за искривлением фронта), то наблюдается только тепловая расстройка. В этом случае фокальная точка для искривленного фронта лежит далеко за пределами кристалла ($R_{нел} \gg l$ и нелинейной рефракцией можно пренебречь. Говорят, что в рассматриваемом случае имеет место внешняя тепловая самофокусировка. Если же $R_{нел} \leq l$, то фокальная точка попадает внутрь кристалла (случай внутренней тепловой самофокусировки), амплитудный профиль успевает заметно измениться на длине кристалла, что приводит к необходимости учета как тепловой расстройки, так и нелинейной рефракции. В дальнейшем ограничимся рассмотрением случая внешней самофокусировки и, следовательно, будем пренебрегать нелинейной рефракцией.

Будем рассматривать аксиально-симметричную задачу. Предположим, что нелинейный кристалл представляет собой цилиндр длины l и радиуса r_0 (при этом $r_0 \ll l$), а усредненная по времени плотность мощности основного излучения на входе кристалла имеет вид:

$$S_1(r,0) = S_{10} \exp\left(-\frac{2r^2}{\rho_0^2}\right) \quad (8)$$

Тепловую картину в кристалле условимся полагать стационарной (будем использовать стационарное уравнение теплопроводности). Для непрерывных лазеров это условие не вызывает возражений. В случае же импульсных лазеров периодического действия достаточно потребовать, чтобы выполнялось неравенство:

$$f \gg \frac{1}{\tau_T} \quad (9)$$

где τ_T — характерное время установления теплового режима.

Так, при $\rho_0 = 0,1$ см можно принять $\tau_T \sim 1$ с; в этом случае тепловую картину можно полагать стационарной при $f > 10$ Гц.

Будем считать, что теплообмен кристалла с окружающей средой (термостатом) осуществляется только через боковую поверхность. При $r_0 \ll l$ можно, очевидно, пренебречь краевыми тепловыми эффектами в сечениях $z = 0$ и $z = l$. Наконец, будем пренебрегать дифракцией, апертурными (диафрагменным и угловым) эффектами и термоупругими напряжениями, а также влиянием способа крепления нелинейного кристалла в лазере с преобразованием частоты.

Следует отметить, что от способа крепления кристалла (прижим или приклейка к нижней опорной поверхности, крепление через торцы и т.п.) может существенно зависеть поведение преобразователя частоты в диапазоне внешних температур или при изменении средней мощности основного излучения. Особенно сильно проявляется этот эффект в случае наличия анизотропии коэффициента теплового расширения, что, в частности, характерно для таких высокоэффективных нелинейных кристаллов, как КТР, ЛВО и др. При изменении температуры в таких преобразователях (в зависимости от способа крепления) может происходить, например, поворот граней кристалла, что, в свою очередь, ведет к уходу угла синхронизма и необходимости компенсации этого ухода. С одной стороны, очевидно, что при инженерных расчетах генераторов второй гармоники этот эффект должен обязательно учитываться. С другой стороны, этот эффект может быть использован для компенсации температурного ухода угла синхронизма, если выбрать такой срез кристалла, при котором зна-

чения ухода угла синхронизма, связанные с членом Δn_T и механическими искажениями кристалла из-за анизотропии линейного расширения, различны по знаку и равны по величине. На этом пути могут быть реализованы температурно-некритичные (в определенном диапазоне температур) преобразователи частоты.

Температуру $T(r, z)$ в некоторой точке (r, z) кристалла представим в виде:

$$T(r, z) = T(r_0, z) + \Delta T(r, z) \quad (10)$$

где $T(r_0, z)$ - температура боковой поверхности кристалла;

$\Delta T(r, z)$ - пространственно-неоднородная «добавка», обусловленная поглощением излучения в кристалле.

Благодаря внутренним источникам тепловыделения температура внутри кристалла тем выше, чем меньше r . Обратим внимание на наличие скачка температуры при переходе через боковую поверхность кристалла. В результате возникает тепловой поток в направлении от кристалла к термостату. В отсутствие этого потока (при $T(r_0, z) \equiv T_0$) говорят об идеальном тепловом контакте на границе кристалл-термостат.

Введем критическую мощность тепловой самофокусировки:

$$P_{кр} = \frac{\zeta \lambda_1}{(dB/dT)_{T=T_c}} \quad (11)$$

где ζ - коэффициент теплопроводности.

Если средняя входная мощность основного излучения больше $P_{кр}$ фазовый фронт волны существенно искажается вследствие тепловых самовоздействий.

Напомним, что мы пренебрегаем вкладом от термоупругих напряжений. Запишем уравнение теплопроводности в виде:

$$\zeta \nabla_r^2 \Delta T(r, z) + 2 \sum_{i=1}^2 \delta_i S_i(r, z) = 0 \quad (12)$$

где $S_1(r, z)$ - усредненная по времени плотность мощности основного излучения;

$S_2(r, z)$ - усредненная по времени плотность мощности второй гармоники.

При рассмотрении уравнения теплопроводности используют граничные условия разного типа. Граничные условия первого рода предполагают задание определенных значений температуры на поверхности тела. Граничные условия второго рода задают на поверхности тела производную от температуры по нормали к поверхности (иначе говоря, задают плотность теплового потока через поверхность). Граничные условия третьего рода предполагают, что тепловой поток через поверхность тела пропорционален разности температур поверхности и термостата.

Безразмерный параметр Bi (так называемый параметр Био) характеризует степень теплового контакта на границе кристалл-термостат. При $Bi \rightarrow \infty$ тепловой контакт приближается к идеальному, что адекватно отсутствию теплового потока через боковую поверхность кристалла.

$$Bi = \frac{\alpha r_0}{\zeta} \quad (13)$$

Рассмотрим систему уравнений для генерации второй гармоники с учетом тепловых самовоздействий:

$$\begin{aligned} \frac{du_1}{d\xi} &= -u_1 u_2 \sin \Psi - \delta'_1 u_1, \\ \frac{du_2}{d\xi} &= u_1^2 \sin \Psi - \delta'_2 u_2, \\ \frac{d\Psi}{d\xi} &= 2(\Delta k'_0 + \Delta k'_{m.c}) + \frac{1}{u_2} \cos \Psi (u_1^2 - 2u_2^2), \\ -\nabla_{\rho}^2 \Delta k'_{m.c}(\rho, \xi) &= \frac{c \rho_0^2 a_{10}^2}{2P_{KP}} \sum_{i=1}^2 \delta'_i n_i \langle u_i^2(\rho, \xi) \rangle. \end{aligned} \quad (14)$$

Первые три уравнения — укороченные уравнения для вещественных амплитуд и обобщенной фазы, четвертое — уравнение теплопроводности. Поскольку на практике применяются слабопоглощающие нелинейные кристаллы, то в укороченных уравнениях в системе можно пренебречь потерями на по-

глощение излучения. Этого, однако, принципиально нельзя делать в уравнении теплопроводности [11].

Так как кристалл обеспечивает определенную длину волны излучения, то нам нужен ПИД-регулятор, для того чтобы регулировать рабочую температуру (устанавливать ее на определенный уровень), так как при изменении температуры будет меняться и длина волны, что нарушит работу лазера. Поэтому для более полной характеристики рассматриваемого вопроса были проведены опыты с пропорционально-интегрально-дифференцирующим регулятором ТРМ101 с универсальным входом и интерфейсом RS-485. Пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор — устройство в управляющем контуре с обратной связью. Используется в системах автоматического управления для формирования управляющего сигнала с целью получения необходимых точности и качества переходного процесса. ПИД-регулятор формирует управляющий сигнал, являющийся суммой трёх слагаемых, первое из которых пропорционально разности входного сигнала и сигнала обратной связи (сигнал рассогласования), второе — интеграл сигнала рассогласования, третье — производная сигнала рассогласования.

В данном исследовании мы применяли хромель-копелевую термопару. Хромель-копелевые термопары (ТХК) обладают наибольшей дифференциальной чувствительностью из всех промышленно выпускаемых термопар. ТХК применяются для более точных измерений температур, а также для измерений малых величин разности температур. Они обладают очень высокой термоэлектрической стабильностью в диапазоне до 600°C. Это объясняют тем, что изменения термоЭДС хромелевого и копелевого термоэлектродов компенсируют друг друга, так как направлены в одну и ту же сторону. Такая термопара может стабильно работать несколько десятков тысяч часов. К недостаткам ТХК относят достаточно высокую по сравнению с другими термопарами чувствительность к деформации. В ходе исследований были проведены пять опытов с различными значениями пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих, начальной температуре 25 °С и температуре уставки 40 °С.

Опыт 1: пропорциональная составляющая – 30, интегральная составляющая – 100, дифференциальная составляющая – 20 (заводские установки).

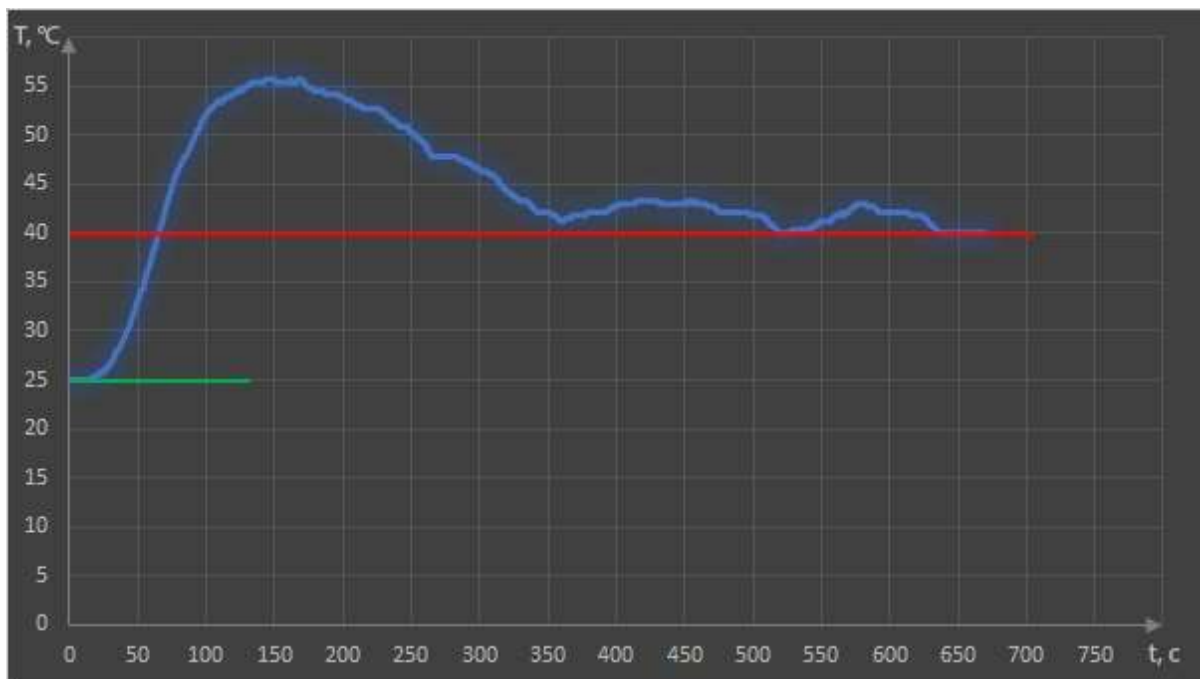


Рисунок 21 — Опыт 1

Опыт 2: пропорциональная составляющая – 20, интегральная составляющая – 125, дифференциальная составляющая – 15.

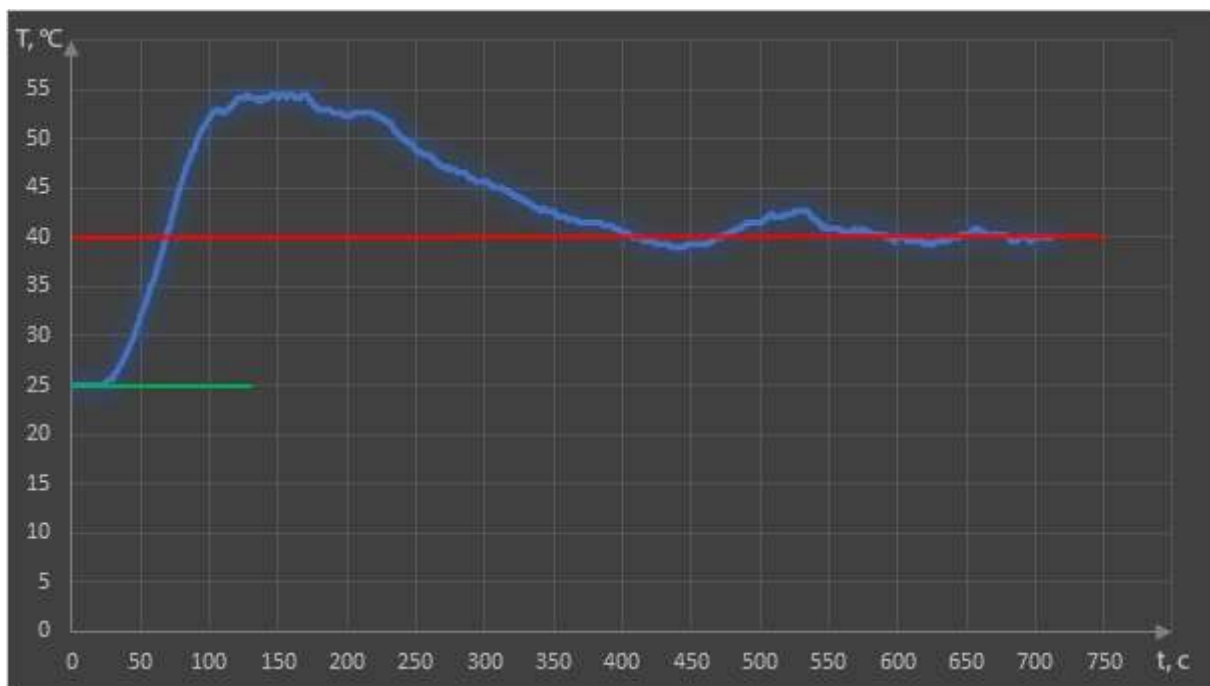


Рисунок 22 — Опыт 2

Опыт 3: пропорциональная составляющая – 10, интегральная составляющая – 135, дифференциальная составляющая – 5.

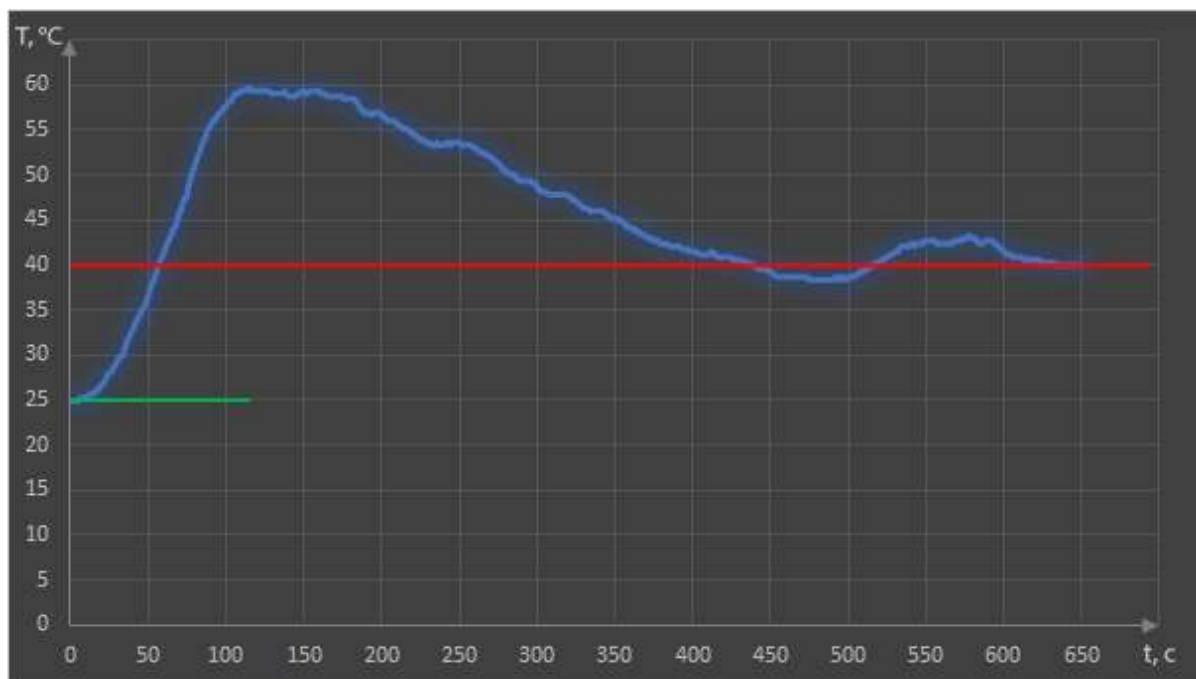


Рисунок 23 — Опыт 3

Опыт 4: пропорциональная составляющая – 40, интегральная составляющая – 75, дифференциальная составляющая – 25.

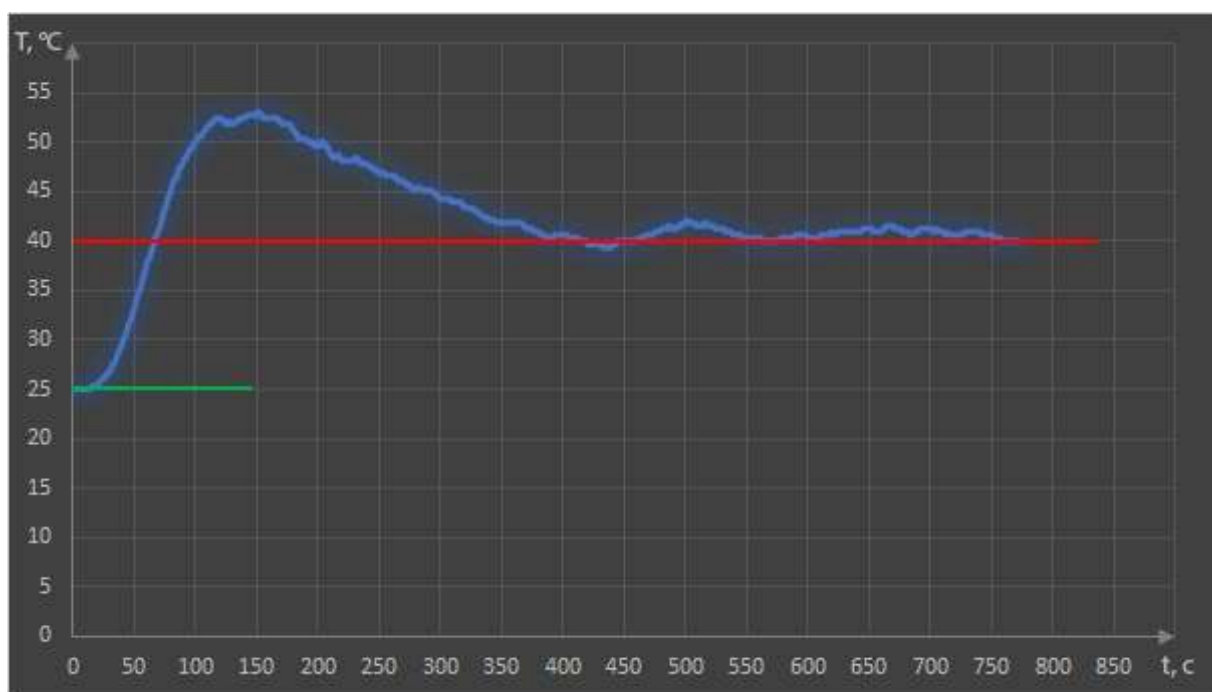


Рисунок 24 — Опыт 4

Опыт 5: пропорциональная составляющая – 50, интегральная составляющая – 65, дифференциальная составляющая – 35.

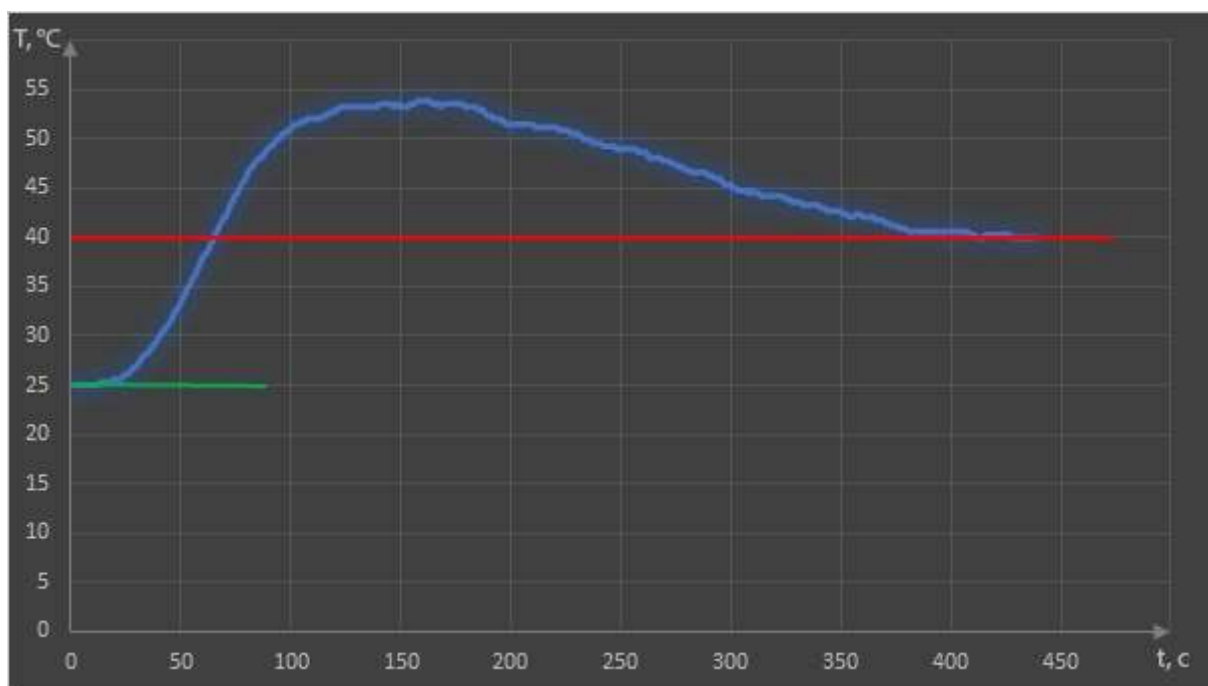


Рисунок 25 — Опыт 5

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты курсового проекта состоят в следующем:

Проведен литературный обзор режимов накачки лазеров (их конструктивных особенностей). При рассмотрении твердотельных лазеров с ламповой накачкой было выявлено, что несмотря на высокий КПД (от 30 до 60 %), из общего количества излучаемой энергии не более 25–30% имеет спектральный состав, соответствующий полосам поглощения активной среды. Остальная энергия не просто теряется, а переходит в тепло, приводя к паразитному нагреву активного элемента и элементов конструкции лазера. Особенности полупроводниковых лазеров является высокий КПД (до 50 %), малая инерционность ($\sim 10^{-9}$ с.), простота конструкции. Основными преимуществами волоконных лазеров являются высокое оптическое качество излучения и возможность встраивания в волоконные линии. Лазеры с диодной накачкой характеризуются высокой эффективностью генерации и малой длиной активного элемента ($\sim 10^{-3}$ м.). Высокая эффективность генерации связана с тем, что излучение лазерных диодов спектрально согласуется с полосами поглощения активаторных ионов в генерирующем кристалле. В последнее время именно лазеры с диодной накачкой приобрели особую популярность как источники излучения.

На основании ранее полученных экспериментальных данных было проведено моделирование импульсного и непрерывного режима оптической накачки с помощью лазера, активная среда которого представляет собой световод с двойной оболочкой, сердцевина которого легирована ионами Yb^{3+} . Согласно проведенному моделированию было получено, что при непрерывном режиме накачки квантовая эффективность на 5% выше, чем при импульсном режиме накачки. В следствие чего был сделан вывод, что наибольшую квантовую эффективность можно получить при непрерывной накачке лазера, так как именно в этом режиме незначительное увеличение интенсивности накачки относительно порогового значения приводит к резкому увеличению числа ионов

на возбужденном уровне. Таким образом была оценена эффективность различных режимов накачки активированных лазерных кристаллов.

Также во время практической работы была проведена подготовка оптических образцов для дальнейших опытов. Подготовка заключалась в полировке алмазными пастами разной зернистости (начиная с пасты с зернистостью алмазного порошка в 40 микрон, и заканчивая пастой с зернистостью алмазного порошка в 2 микрона) плоскостей и граней кристаллов ниобата лития.

Далее были подобраны коэффициенты ПИД режима для регулирования температуры оптических лазерных элементов. Был проведен ряд опытов с различными значениями пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих, начальной температуре 25 °С и температуре уставки 40 °С. Наименьший интервал времени становления температуры уставки (380 с.) и ее наибольшая стабильность были получены при следующих значениях параметров управления: пропорциональной составляющей – 50, интегральной составляющей – 65, дифференциальной составляющей – 35.

Материалы курсового проекта могут быть использованы при выполнении квалификационной работы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Салех Б., Тейх М. Оптика и фотоника. Принципы и применения / Б. Салех, М. Тейх. – М.: Интеллект, 2012. – Т.2. – 784 с.
- 2 Koechner W. Solid – State Laser Engineering / W. Koechner. – М.: Springer, 2010. – p.747.
- 3 Солдатов А.Н., Прокопьев В.Е., Логинов С.С. Перспективы развития столкновительных лазеров на парах металлов с оптической накачкой / А.Н. Солдатов, В.Е. Прокопьев, С.С. Логинов // Физика. – 2013. – Т.56. – № 11. – С. 19–31.
- 4 Кравцов Н.В. Основные тенденции развития твердотельных лазеров с полупроводниковой накачкой / Н.В. Кравцов // Квантовая электроника. – 2001. – Т.31. – № 8. – С. 661–677.
- 5 Вайлер С. Дисковые лазеры для промышленности / С. Вайлер // Фотоника. – 2015. – № 3. – С. 10–13.
- 6 Некоторые вопросы построения твердотельных лазеров с продольной диодной накачкой / В. А. Десяцков, Л. В. Десяцкова, А. В. Степанов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2009. – № 4. – С. 12–23.
- 7 Звелто О. Принципы лазеров / О. Звелто. – М.: Лань, 2008. – 560 с.
- 8 Айрапетян В.С., Ушаков О.К. Физика лазеров / В.С. Айрапетян, О.К. Ушаков. – Новосибирск: СГГА, 2012. – 134 с.
- 9 Донцова Е.И., Каблуков С.И., Бабин С.А. Волоконный иттербиевый лазер с перестройкой длины волны / Е.И. Донцова, С.И. Каблуков, С.А. Бабин // Квантовая электроника. – 2013. – Т.43. – № 5. – С. 467–471.
- 10 Fan T.Y. Optimizing the efficiency and stored energy in quasi-three-level lasers / IEEE Journal of quantum electronics – 1992. – v.28. – №12. – p.2692–2697.
- 11 Дмитриев В.Г., Тарасов Л.В. Прикладная нелинейная оптика / В.Г. Дмитриев, Л.В. Тарасов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 512 с.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

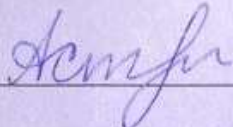
«КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «КубГУ»)

Физико-технический факультет

Кафедра оптоэлектроники


КУРСОВОЙ ПРОЕКТ


ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО И НЕПРЕРЫВНОГО РЕЖИМА
ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКИ ЛАЗЕРОВ

Работу выполнил  Астафуров Руслан Алексеевич
Курс 3

Направление 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи

Научный руководитель

канд. физ.-мат. наук, доцент  В. В. Галуцкий

Нормоконтролер преподаватель  В. Е. Лысенко

Краснодар 2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Кубанский государственный университет»
Физико-технический факультет
Кафедра оптоэлектроники

«УТВЕРЖДАЮ»

Зав. кафедрой _____ Н. А. Яковенко

«__» _____ 2016 г.

ЗАДАНИЕ

на курсовой проект

Студенту 3 курса ОФО Астафурову Руслану Алексеевичу 8 918 67 14 419
(фамилия, имя, отчество, телефон)

Направления подготовки 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи
(код) (название)

Тема курсового проекта:

Исследование импульсного и непрерывного режима оптической накачки
лазеров

Научный руководитель Галуцкий В.В., к.ф.-м.н., доцент кафедры оптоэлектроники
(фамилия, инициалы, ученая степень, должность)

1. Цель проекта

Исследовать импульсный и непрерывный режим оптической накачки лазеров

2. Перечень задач (этапов) для достижения поставленной цели

Сроки выполнения

1. Провести литературный обзор режимов накачки лазеров (их
конструкционных особенностей)

к 01.12.2016

2. Оценить эффективность различных режимов накачки
активированных лазерных кристаллов

к 01.03.2017

3. Оформить законченный вариант работы

к 15.05.2017

3. Перечень исходных источников (материалов), рекомендуемых руководителем к использованию:

1. High – Energy diode – pumped solid – state laser for high – repetition – rate Petawatt Laser Systems / A.J. Bayramian, 2016, P. 468
2. Koechner, W. Solid – State Laser Engineering, 2010, P. 765
3. Донцова Е.И. Квантовая электроника № 43, 2013, С. 467

4. Дополнительное поле задач

5. Срок представления КП к защите: 15 мая 2017 г.

Название темы, цель курсового проекта соответствуют ФГОС ВО по направлению подготовки 11.03.02

Задание выдано « 06 » октября 2016 г.

(подпись научного руководителя)

Задание принято к исполнению « 06 » октября 2016 г.

(подпись студента)

6. **О соблюдении профессиональной этики**

За все сведения, изложенные в КП, использование фактического материала и другой вспомогательной информации, обоснованность (достоверность) выводов и защищаемых положений автор КП несет профессиональную, нравственную и юридическую ответственность.

Ознакомлен « 06 » октября 2016 г.

(подпись студента)

Примечания

1. Настоящее задание заполняется в двух экземплярах.

2. Настоящее задание прилагается к законченному КП.

<http://www.kubsa.ru/sites/default/files/docs/p8.pdf>

Научный руководитель КП контролирует все стадии подготовки и написания работы. В обязанности научного руководителя КП входит: помощь студенту в выборе (формулировании) темы КП и разработке плана его выполнения; консультирование по подбору литературы и фактического материала; контроль за выполнением КП в соответствии с индивидуальным планом; оценка качества выполнения КП в соответствии с предъявляемыми к нему требованиями (отзыв научного руководителя с оценкой представленного студентом КП).

ОТЗЫВ

на курсовой проект

«Исследование импульсного и непрерывного режима оптической накачки лазеров»

студента 3 курса Физико-технического факультета

Астафурова Руслана Алексеевича

Целью проекта являлось рассмотрение импульсного и непрерывного режимов оптической накачки лазеров. Для достижения поставленной цели студенту необходимо было решить следующие задачи:

1. Провести литературный обзор по методам накачки лазеров
2. Построить и исследовать модель непрерывной и импульсной накачки лазеров на основе иттербиевых материалов
3. Подготовить оптические образцы для дальнейших опытов
4. Подобрать коэффициенты ПИД режима регулирования температуры оптических лазерных элементов.

С поставленными задачами студент успешно справился. При выполнении курсовой работы Астафуров Р.А. ознакомился с основными параметрами лазеров и различными схемами их оптической накачки. Использованные литературные источники при выполнении курсовой работы современные и опубликованы в профессиональных тематических изданиях и электронных ресурсах. Уровень подготовки оптических образцов и подбор коэффициентов ПИД регулирования говорит о высоком приобретённом профессионализме в решении поставленных задач.

В процессе подготовки курсовой работы Астафуров Р.А. успешно достиг поставленной цели проекта. Считаю, что курсовая работа «Исследование импульсного и непрерывного режима оптической накачки лазеров» студента Астафурова Р.А. заслуживает оценки «отлично».

Научный руководитель
доцент кафедры оптоэлектроники,
к. ф.- м. н.



В.В. Галуцкий