

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

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

Физико-технический факультет

Кафедра оптоэлектроники

КУРСОВАЯ РАБОТА

РЕЖИМЫ ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКИ ЛАЗЕРОВ

Работу выполнил _____ Астафуров Руслан Алексеевич

Курс 2

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 2016

РЕФЕРАТ

Курсовая работа: 38 с., 24 рис., 8 источников.

АКТИВНАЯ СРЕДА, ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ЛАЗЕРЫ, ОПТИЧЕСКАЯ НАКАЧКА

Объектом рассмотрения данной курсовой работы является процесс перекачки энергии внешнего источника в рабочую среду лазера – накачка лазера.

Целью работы является рассмотрение режимов оптической накачки лазеров в ходе проведения литературного обзора. В результате выполнения курсовой работы были рассмотрены различные методы оптической накачки лазера.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Твердотельные лазеры	5
2 Оптическое усиление и обратная связь	11
3 Условия лазерной генерации	13
4 Выходные характеристики лазера	16
5 Процессы и источники накачки	20
6 Оптическая накачка	25
Заключение	37
Список используемых источников	38

ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрение режимов оптической накачки лазеров связано с рассмотрением устройства лазера и принципа его действия. 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. Для наиболее эффективного использования энергии излучения, лампа и активная среда находятся в полости с зеркальной поверхностью, которая направляет большую часть света лампы на рабочую среду.

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.

Целью данной работы является исследование отличия различных режимов оптической накачки лазеров.

При этом существенно важным является решение следующих задач:

- провести литературный обзор по современным типам лазеров с оптической накачкой;
- исследовать применимость различных режимов оптической накачки.

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.

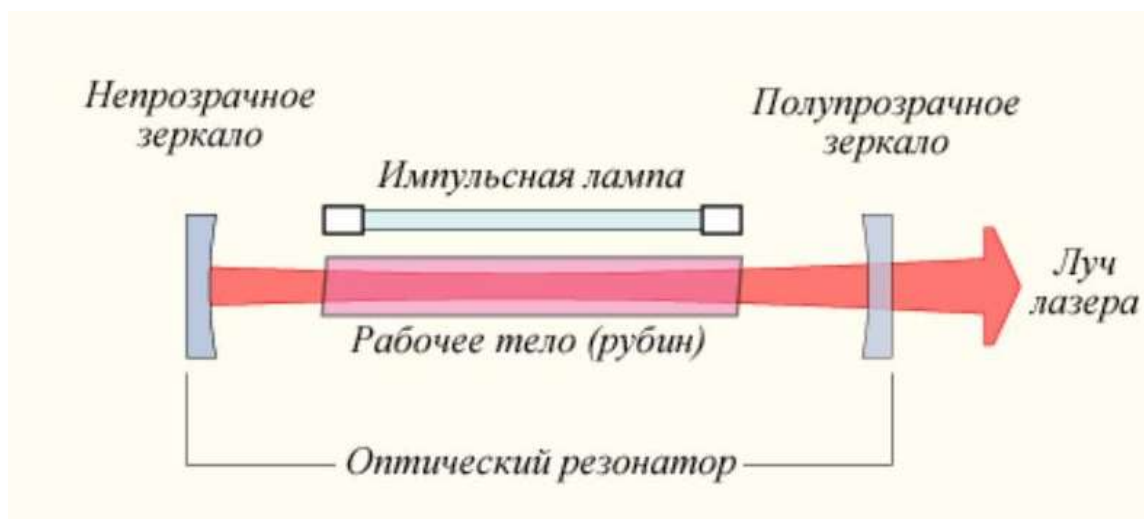


Рисунок 1 – Схема устройства твердотельного лазера с ламповой накачкой на примере рубинового лазера

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.

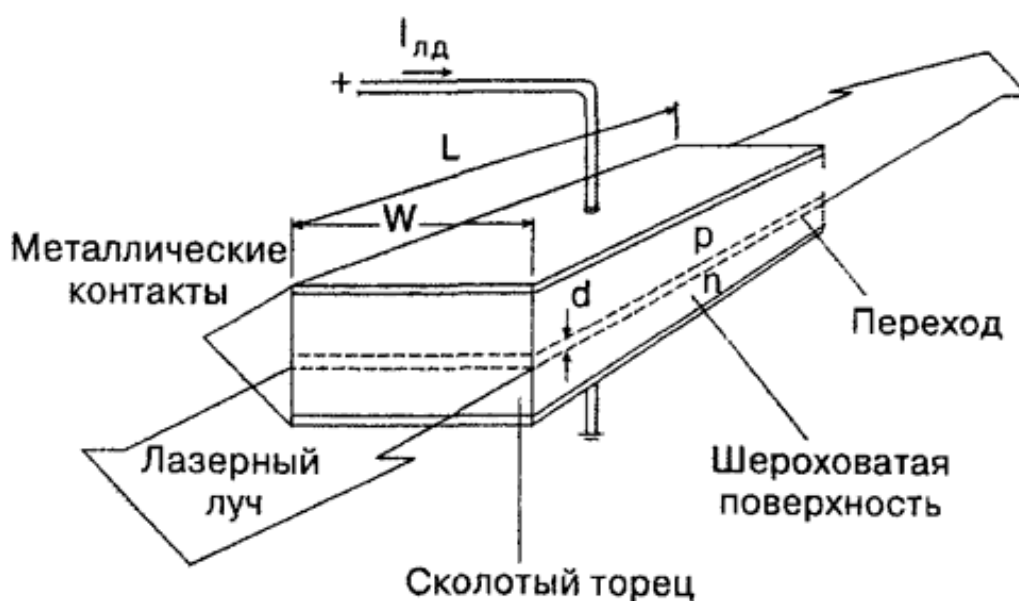


Рисунок 2 – Схема устройства полупроводникового лазера

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.

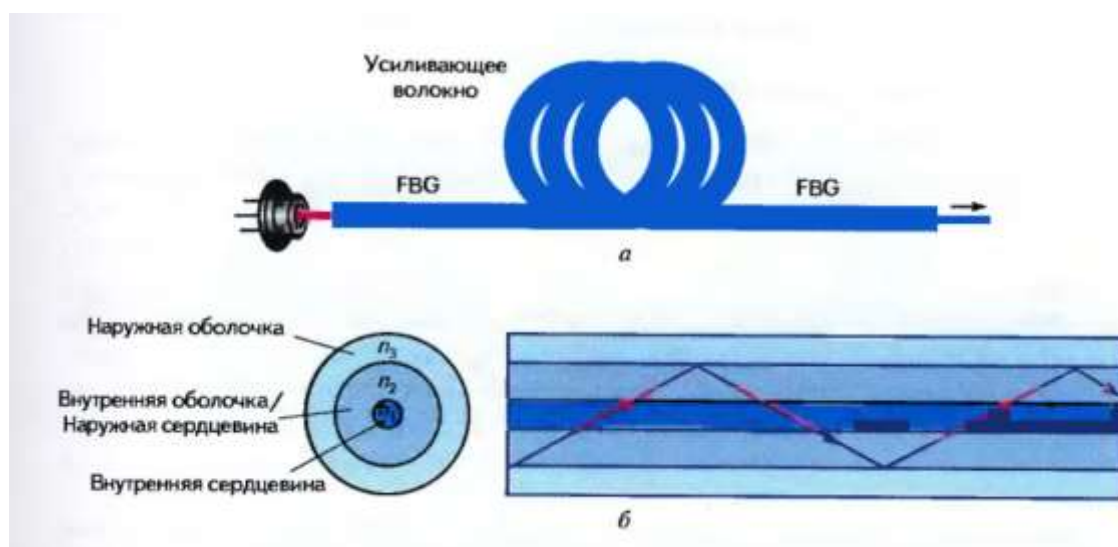
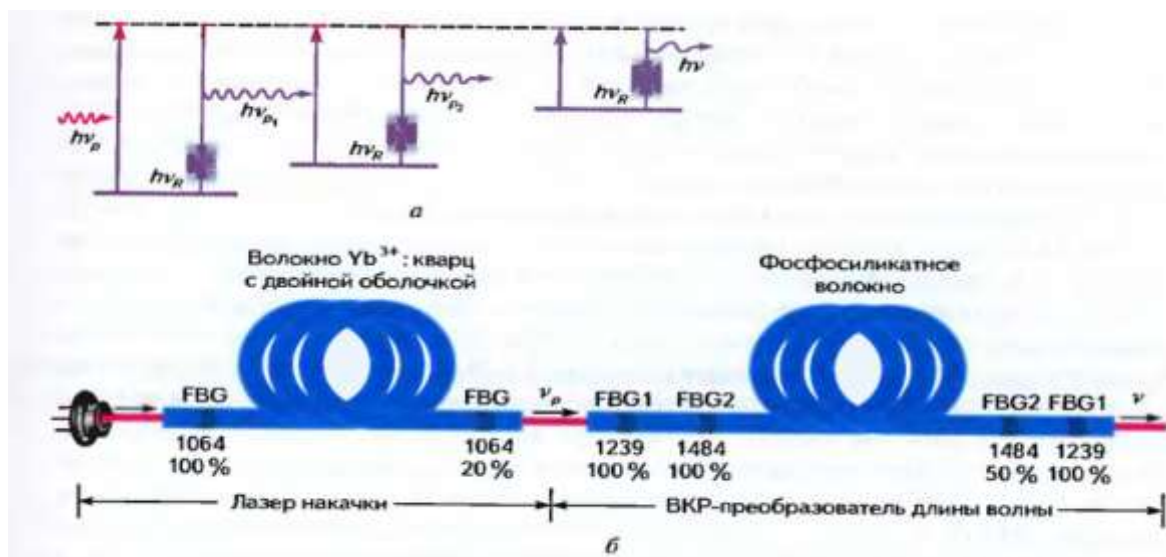


Рисунок 3 – Схема волоконного лазера с накачкой от диодного лазера и с волоконными решетками Брэгга

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.

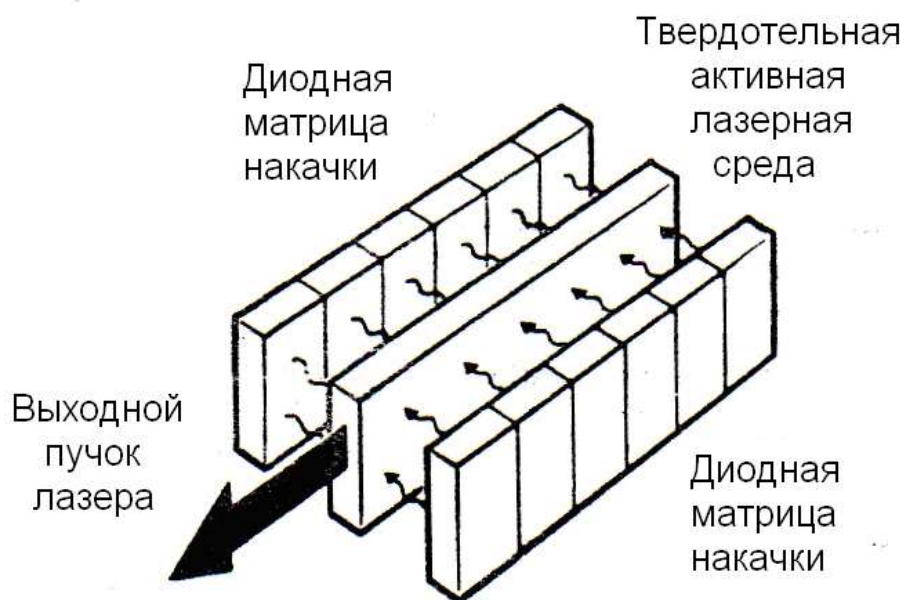


Рисунок 5 – Схема устройства твердотельного лазера с диодной накачкой

2 Оптическое усиление и обратная связь

Лазерный усилитель – узкополосный когерентный усилитель света. Усиление достигается посредством вынужденного излучения света атомной или молекулярной системой с инверсией заселенностей в одном из переходов (заселенность верхнего энергетического уровня больше, чем нижнего). Ширина полосы усиления определяется шириной линии атомного перехода либо одним из механизмов неоднородного уширения, таким как эффект Доплера в газовых лазерах.

Лазерный усилитель – устройство с распределенным усилением, которое локально характеризуется коэффициентом усиления, то есть усилением на единицу длины (рисунок 6). Этот коэффициент определяет, насколько быстро нарастает плотность потока фотонов (или оптическая интенсивность).

При малых плотностях потока фотонов коэффициент усиления выражается как:

$$\gamma_0(\nu) = N_0 \sigma(\nu) = N_0 \frac{\lambda^2}{8\pi c n} g(\nu), \quad (1)$$

где N_0 - равновесная разность плотностей заселенности;

$\sigma(\nu)$ - сечение перехода.

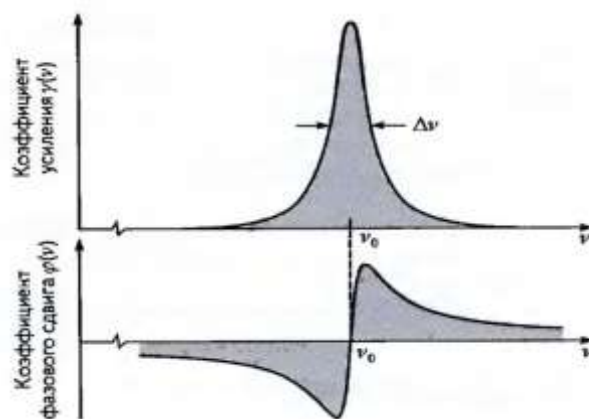


Рисунок 6 – Спектральная зависимость коэффициентов усиления и фазового сдвига для лазерного усилителя с лоренцевой функцией формы линии

Оптическая обратная связь достигается помещением активной среды в оптический резонатор. Резонатор Фабри – Перо, состоящий из двух зеркал, разделенных расстоянием d , содержит среду с показателем преломления n , в которой находятся активные атомы усилителя. Прохождение единицы длины среды вносит фазовый сдвиг, равный волновому числу.

Резонатор также вносит потери в систему. Поглощение и рассеяние света в среде вносят распределенные потери, характеризуемые коэффициентом ослабления (потери на единицу длины).

Время жизни фотона равно:

$$\tau_{\phi} = \frac{1}{c\alpha_r}, \quad (2)$$

где $c\alpha_r$ - потери числа фотонов в секунду.

Резонатор поддерживает только те частоты, которым соответствует сдвиг фазы, кратный 2π , за полный обход резонатора (рисунок 7).

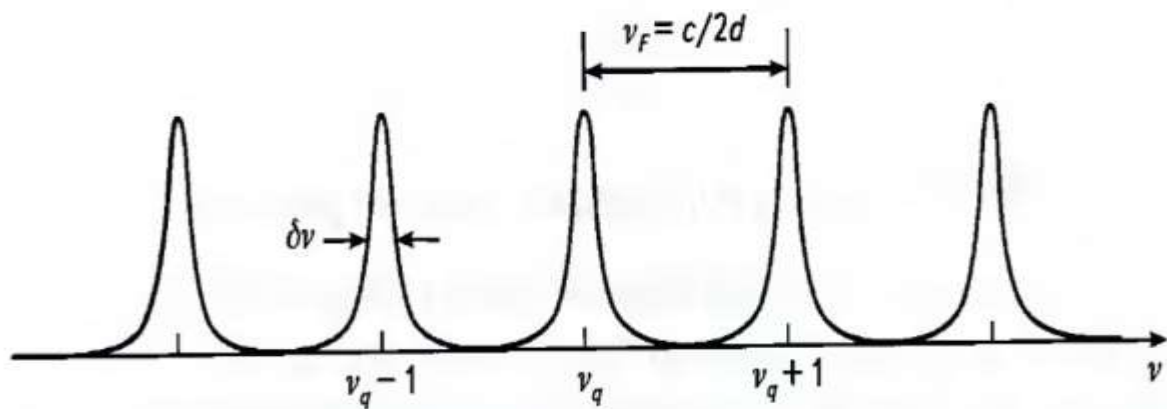


Рисунок 7 – Моды резонатора разделены частотным интервалом и имеют ширину равную $1/2\pi$

3 Условия лазерной генерации

Два условия необходимо выполнить, чтобы лазер мог генерировать. Условие усиления определяет минимальную разность заселенностей и, следовательно, пороговое значение накачки, необходимое для генерации. Фазовое условие определяет частоту (или частоты), на которых происходит генерация.

Условие усиления: для того чтобы инициировать лазерную генерацию, необходимо, чтобы коэффициент усиления слабого сигнала превышал коэффициент потерь:

$$\gamma_0(\nu) = \alpha_r, \quad (3)$$

где α_r - полные потери энергии (или числа фотонов)

Это равносильно тому, что усиление должно превышать потери. Коэффициент усиления слабого сигнала $\gamma_0(\nu)$ пропорционален равновесной разности населенностей N_0 , которая, в свою очередь, увеличивается с ростом скорости накачки. Поэтому пороговое условие усиления можно преобразовать:

$$N_0 = \frac{\gamma_0(\nu)}{\sigma(\nu)} > \frac{\alpha_r}{\sigma(\nu)}. \quad (4)$$

Итак,

$$N_0 > N_n. \quad (5)$$

Пороговая разность заселенностей:

$$N_n = \frac{\alpha_r}{\sigma(\nu)}, \quad (6)$$

где α_r - полные потери энергии (или числа фотонов);

$\sigma(\nu)$ - сечение перехода.

Величина N_n , пропорциональная α_r , определяет минимальную скорость накачки R_n , достаточную для возбуждения лазерной генерации.

Величину α_r можно выразить через время жизни фотона:

$$\alpha_r = \frac{1}{c\tau_\phi}. \quad (7)$$

Тогда пороговая разность населенностей принимает вид:

$$N_n = \frac{1}{c\tau_\phi\sigma(\nu)}. \quad (8)$$

Следовательно, пороговая плотность разности заселенностей прямо пропорциональна α_r и обратно пропорциональна τ_ϕ . Большие потери (более короткие времена жизни фотона) требуют более сильной накачки для достижения генерации.

Наконец, использование стандартной формулы для сечения перехода приводит к еще одному выражению для пороговой разности заселенностей:

$$N_n = \frac{8\pi}{\lambda^2} \frac{t_{cn}}{c\tau_\phi} \frac{1}{g(\nu)}. \quad (9)$$

Из которого ясно, что N_n - функция частоты ν . Порог самый низкий и, следовательно, лазерный эффект легче всего достигается на той частоте, где функция формы линии наибольшая, т.е. на центральной частоте линии $\nu = \nu_0$.

Если уширение перехода обусловлено временем жизни t_{cn} , то $\Delta\nu$ принимает значение $\frac{1}{2\pi t_{cn}}$, в результате чего:

$$N_n = \frac{2\pi}{\lambda^2 c \tau_\phi} = \frac{2\pi\alpha_r}{\lambda^2}. \quad (10)$$

Эта формула показывает, что минимальная пороговая разность заселенностей, требуемая для достижения генерации, является простой функцией длины волны λ и времени жизни фотона τ_ϕ . Ясно, что лазерная генерация труднее достигается при уменьшении длины волны.

Фазовое условие: требует, чтобы сдвиг фазы, приобретаемый светом за полный обход резонатора, был целым кратным 2π .

4 Выходные характеристики лазера

Внутренняя плотность потока фотонов: лазер, накачиваемый с превышением порога, имеет коэффициент усиления слабого сигнала, который больше коэффициента потерь. С ростом плотности потока фотонов внутри резонатора коэффициент усиления начинает убывать для сред с однородным уширением. До тех пор, пока коэффициент усиления продолжает оставаться больше коэффициента потерь, поток фотонов продолжает расти.

В итоге, когда насыщенный коэффициент усиления становится равным коэффициенту потерь, поток фотонов прекращает свой рост и генерация достигает стационарного режима. Происходит фиксация усиления на уровне потерь. Стационарная плотность потока фотонов внутри лазера определяется приравниванием коэффициента усиления сильного сигнала (с насыщением) к коэффициенту потерь.



Рисунок 8 – Определение стационарного значения плотности потока фотонов.

Стационарная плотность потока фотонов, возникающую при лазерной генерации это среднее число фотонов, пересекающих в секунду единичную площадь в обоих направлениях, поскольку фотоны, распространяющиеся в обоих направлениях, вносят вклад в процесс насыщения. Следовательно, плот-

ность потока фотонов в одном направлении равна $\phi/2$. Ниже порога лазерная плотность потока фотонов равна нулю.

Любое увеличение скорости накачки проявляется в увеличении потока спонтанно испущенных фотонов, но генерация не возникает. Выше порога стационарная внутренняя плотность потока фотонов прямо пропорциональна начальной разности заселенностей и, следовательно, растет с увеличением скорости накачки.

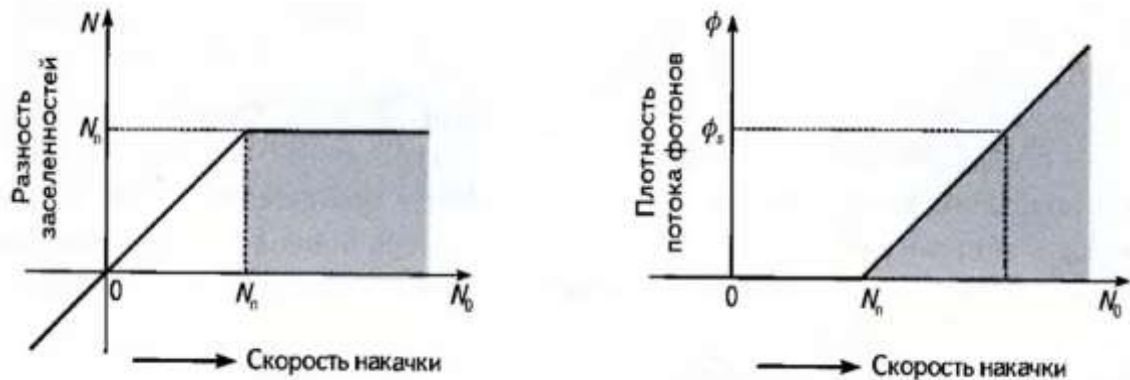


Рисунок 9 – Стационарные значения разности заселенностей и плотности потока фотонов внутри лазера как функции.

Только часть стационарной внутренней плотности потока фотонов покидает резонатор в виде полезного света. Выходная плотность потока фотонов – это та часть внутренней плотности потока фотонов, которая проходит через зеркало 1. Она равна следующему выражению:

$$\phi_0 = \frac{\Gamma_\phi}{2}, \quad (11)$$

где Γ_ϕ - коэффициент пропускания зеркала.

Соответствующая оптическая интенсивность на выходе лазера:

$$I_0 = \frac{h\nu\Gamma_\phi}{2}. \quad (12)$$

Оптимизация выходной плотности потока фотонов: полезная плотность потока фотонов на выходе лазера уменьшает внутреннюю плотность потока фотонов и, следовательно, вносит вклад в потери лазерного генератора. Любая попытка увеличить долю фотонов, которым позволено покинуть резонатор (в ожидании увеличения полезного выхода света) приводит к увеличению потерь, так что стационарная плотность потока фотонов внутри резонатора уменьшается. Итоговый результат может быть отрицательным: выходная мощность лазера не вырастет, а упадет.

Оптимальный коэффициент пропускания:

$$T_{opt} = \sqrt{g_0 L} - L, \quad (13)$$

где L - толщина пластинки в направлении пучка.

Внутренняя плотность числа фотонов: стационарное число фотонов на единицу объема внутри резонатора связано со стационарной плотностью потока фотонов (для фотонов, распространяющихся в обоих направлениях) простым соотношением:

$$n = \frac{\phi}{c}, \quad (14)$$

где ϕ - стационарная плотность потока фотонов;

c - скорость света в среде.

Выходной поток фотонов имеет вид:

$$\Phi_0 = \eta_{эфф} (R - R_n) V, \quad (15)$$

где $\eta_{эфф}$ - эффективность вывода.

Эффективность вывода определяется выражением:

$$\eta_{эфф} \approx \frac{\tau_{\phi}}{T_F} T, \quad (16)$$

где τ_{ϕ} - время жизни фотона.

Потери вносятся такими источниками, как например неэффективность процесса накачки. Дополнительные функции, такие как охлаждение и мониторинг, также потребляют энергию. Коэффициент преобразования мощности или коэффициент полезного действия всей установки определяется как отношение выходной оптической мощности к мощности, затрачиваемой на накачку:

$$\eta_c = \frac{P_0}{P_p}, \quad (17)$$

где P_0 - выходная оптическая мощность;

P_p - мощность, затрачиваемая на накачку.

Поскольку выходная мощность лазера линейно растет с увеличением превышения мощности накачки над порогом, еще одной часто используемой мерой эффективности преобразования является дифференциальный коэффициент преобразования мощности:

$$\eta_s = \frac{dP_0}{dP_p}. \quad (18)$$

В общем случае η_s больше коэффициента полезного действия η_c .

5 Процессы и источники накачки

Известным фактом является то, что физической основой работы лазера служит квантово-механическое явление вынужденного излучения (рисунок 10). В рабочем теле лазера путём накачки создаётся избыточное количество атомов в верхнем энергетическом состоянии. Рабочее тело лазера находится в резонаторе (в простейшем случае — пара зеркал), создающем условия для накапливания фотонов с определённым направлением импульса. Первоначальные фотоны возникают за счёт спонтанного излучения, затем их поток лавинообразно усиливается благодаря вынужденному излучению.

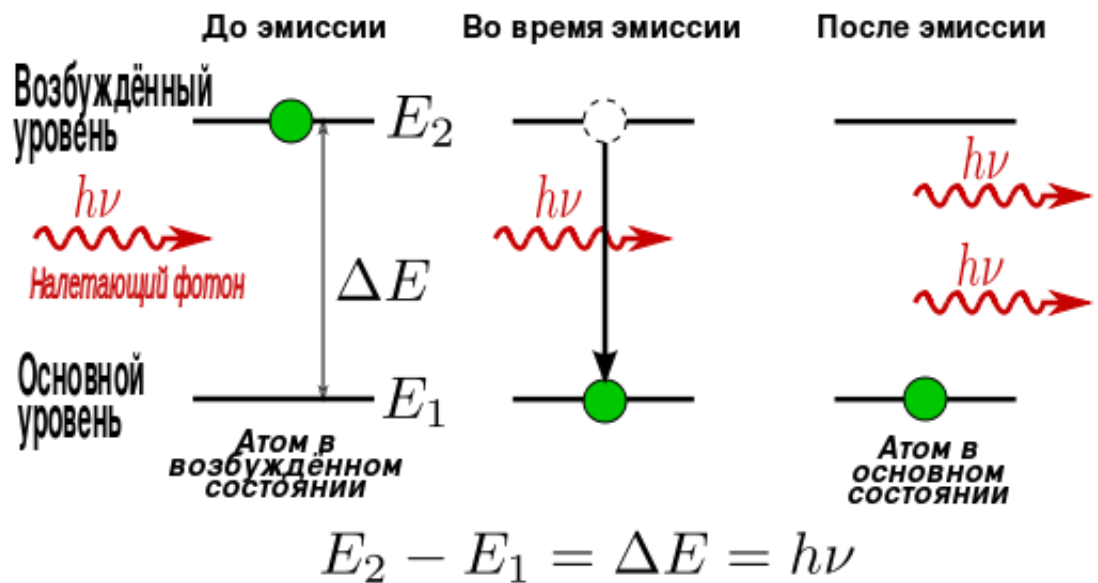


Рисунок 10 – Вынужденное излучение фотона

В случае оптической накачки свет от мощной некогерентной лампы с помощью соответствующей оптической системы передается активной среде. Ниже представлены три наиболее употребительные схемы накачки (рисунок 11). Во всех трех случаях активная среда имеет вид цилиндрического стержня, как это обычно встречается на практике. Его диаметр может быть от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров, а длина — от нескольких сантиметров до нескольких десятков сантиметров. Лазер, очевидно, может работать

в импульсном или в непрерывном режиме, в зависимости от того, является лампа накачки импульсной или непрерывной.

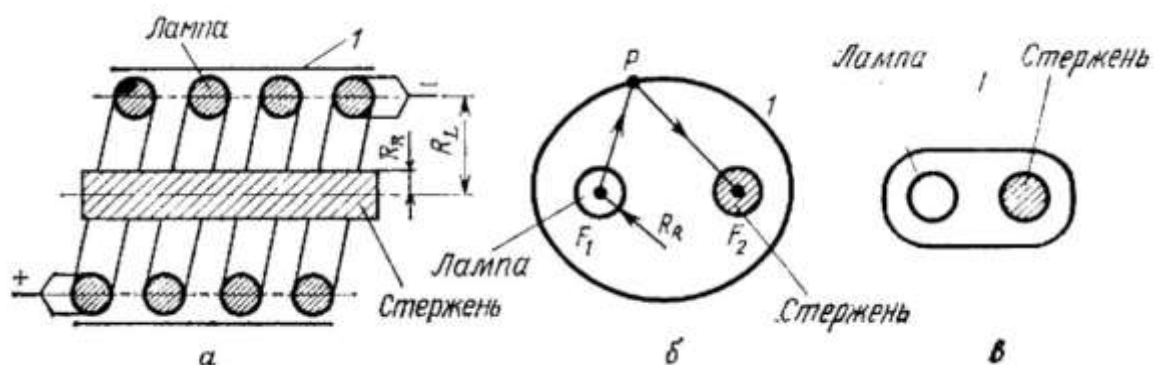
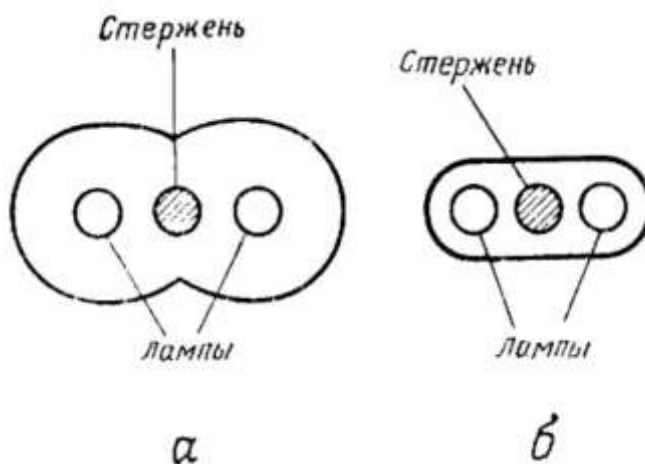


Рисунок 11 – Наиболее широко используемые системы оптической накачки

Изображенная на рисунке 11, *а* лампа имеет форму спирали; при этом свет попадает в активную среду либо непосредственно, либо после отражения от зеркальной цилиндрической поверхности (указанной на рисунке цифрой 1). Такая конфигурация использовалась при создании первого рубинового лазера и до сих пор иногда применяется для импульсных лазеров. На рисунке 12 *б* лампа имеет форму цилиндра (линейная лампа), радиус и длина которого приблизительно те же, что и у активного стержня. Лампа размещается вдоль одной из фокальных осей F_1 зеркально отражающего эллиптического цилиндра (отмеченного на рисунке 11, *б* цифрой 1), а лазерный стержень располагаются вдоль другой фокальной оси F_2 . Это означает, что большая часть света, излучаемого лампой, благодаря отражению от эллиптического цилиндра попадает в лазерный стержень. На рисунке 11, *в* изображен пример так называемой конфигурации с плотной упаковкой. Лазерный стержень и линейная лампа располагаются как можно ближе друг к другу и плотно окружаются цилиндрическим отражателем (указан на рисунке цифрой 1). Эффективность конфигурации с плотной упаковкой обычно не намного ниже, чем в случае эллиптического цилиндра. Заметим, что часто вместо зеркально отражающих рефлекторов в схемах на рисунках 11, *а* и *в* применяют цилиндры, изготовленные из диффузно

отражающих материалов (например: белая керамика). Заметим также, что применяются и сложные типы осветителей, в конструкции которых использованы более чем один эллиптический цилиндр или несколько ламп в конфигурации с плотной упаковкой.



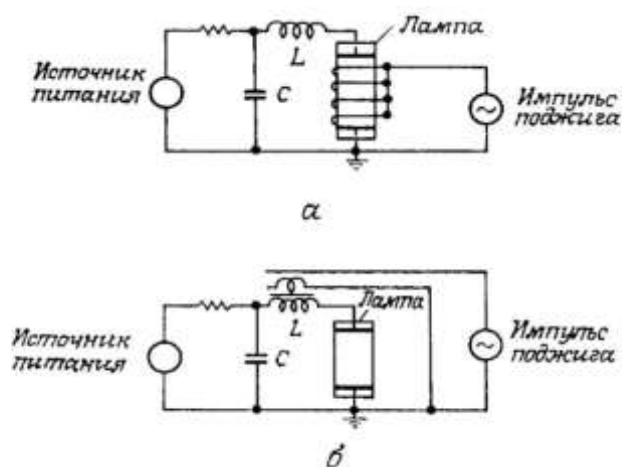
а – двухэллипсная конфигурация;
б – конфигурация с плотной упаковкой

Рисунок 12 – Схемы ламповой накачки

Выше представлены два возможных примера такой конфигурации (рисунок 12). Осветители с несколькими лампами дают более низкий КПД, чем соответствующие конфигурации с одной лампой, показанные на рисунке 11, б и в. Тем не менее их нередко применяют в системах высокой мощности (или высокой энергии). В импульсных лазерах используют ксеноновые и криптоновые импульсные лампы при давлениях от среднего до высоких значений (450 – 1500 мм. рт. ст.). Световой импульс в этом случае создается разрядом через лампу электрической энергии, запасенной в батарее конденсаторов (рисунок 13).

В электрическом контуре для уменьшения времени нарастания тока часто используется последовательно включенная катушка индуктивности. Разряд может возбуждаться при ионизации газа, заполняющего лампу, путем подачи

высоковольтного импульса поджига на вспомогательный электрод вокруг лампы (параллельный поджиг).



a – внешняя система поджига;

б – система с последовательным включением поджига

Рисунок 13 – Электрическое возбуждение импульсной лампы

В другом способе предварительная ионизация может быть создана с помощью высоковольтного импульса, приложенного непосредственно к двум основным электродам лампы (последовательный поджиг). Как только газ ионизован, происходит интенсивная вспышка света, длительность которой определяется емкостью и индуктивностью контура (обычно длительность вспышки варьируется от нескольких микросекунд до нескольких миллисекунд).

Питание постоянным током осуществляется от источника через подходящее балластное сопротивление (рисунок 14).

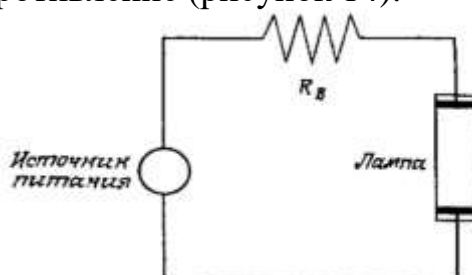
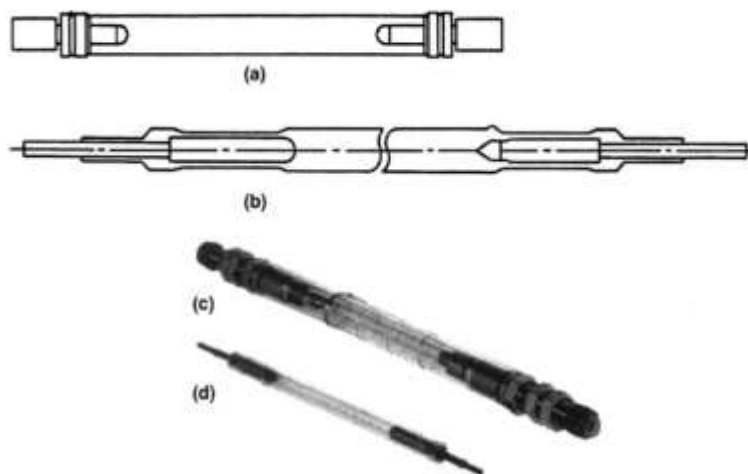


Рисунок 14 – Электрическое возбуждение непрерывной лампы

В этом случае для создания необходимой начальной степени ионизации к схеме должен быть подведен электрический импульс поджига, как правило, от последовательно включенного поджигающего устройства. Ряд различных источников излучения были использованы в течение многих лет для накачки твердотельных лазеров [2].

Сегодня только импульсные лампы, дуговые лампы, и лазерные диоды представляют практический интерес (рисунок 15). В прошлом, вольфрам-галогенные лампы были очень распространенным источником для многих лазеров из-за их низкой стоимости и простой конструкции электропитания. Однако из-за низкой эффективности, этот источник накачки был заменен на CW дуговые лампы или лазерные диоды. Кстати солнце, рассматривалось в качестве источника накачки для космических систем. Светодиоды являются прекурсорами для лазерно-диодной накачки. Если мы сравним спектральные характеристики различных источников накачки, мы заметим, что с одной стороны мы имеем монохроматический источник накачки, таких как лазерные диоды, а с другой экстремальное излучение абсолютно черных тел, таких как лампы накаливания [3].



- a) – импульсная лампа; b) – криптоновая дуговая лампа;
- c) – дуговая лампа с рубашкой охлаждения;
- d) – дуговая лампа без рубашки охлаждения

Рисунок 15 – Источники излучения для накачки твердотельных лазеров

6 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 [4].

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).

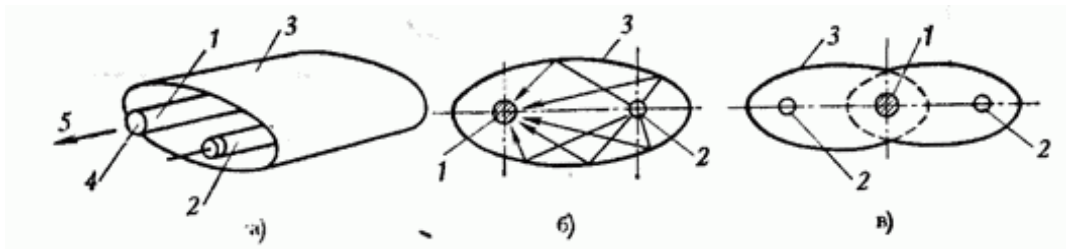


Рисунок 16 – Оптическая накачка твердотельного лазера

На рис. 16, 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. 16, 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. 16, 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 17).

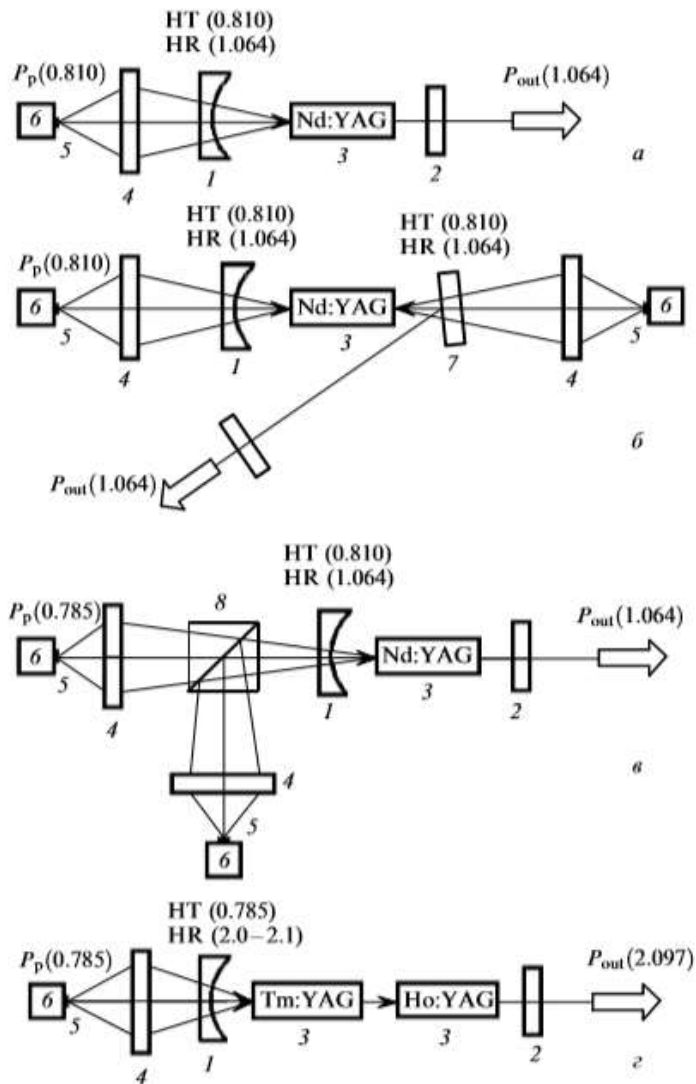


Рисунок 17 – Основные схемы продольной накачки

На рис. 17 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 18).

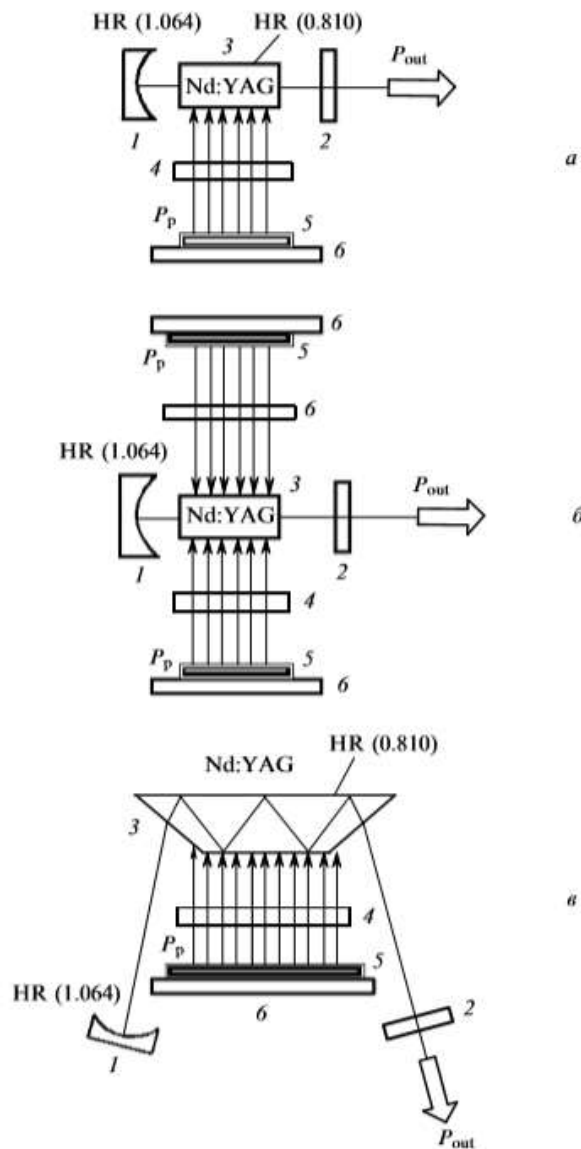


Рисунок 18 – Основные схемы поперечной накачки

На рис. 18 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 [5].

Накачка электронным пучком может быть поперечной или продольной. При поперечной накачке две противоположные грани полупроводникового кристалла отполированы и играют роль зеркал оптического резонатора (рисунок 19). В случае продольной накачки применяются внешние зеркала (рисунок 20). 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%.

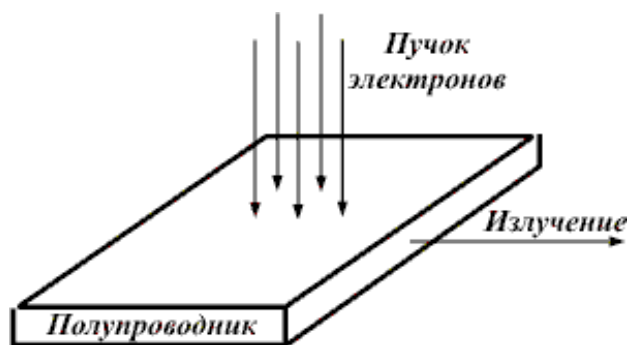


Рисунок 19 – Поперечная накачка электронным пучком



Рисунок 20 – 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 [6].

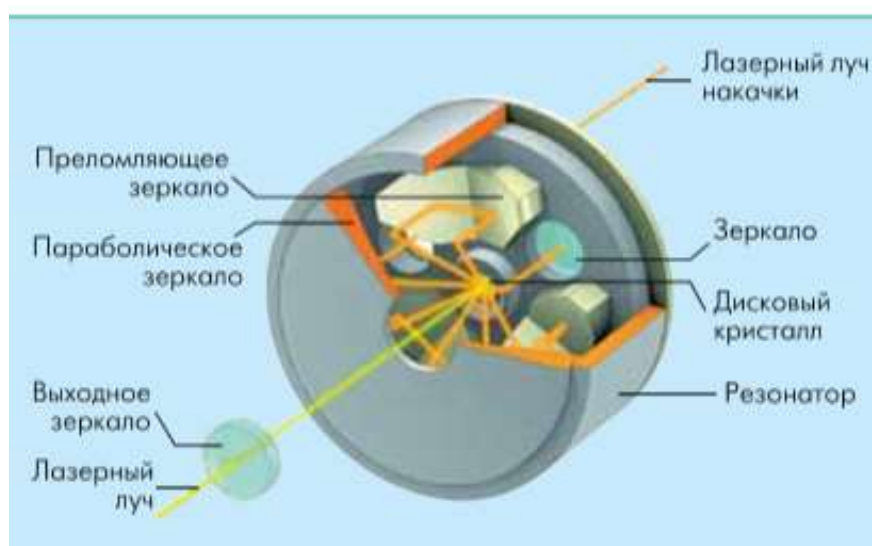


Рисунок 21 – Дисковый резонатор

Принцип работы дискового лазера основан на использовании охлаждаемого кристалла в форме диска (рисунок 21). 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 22).

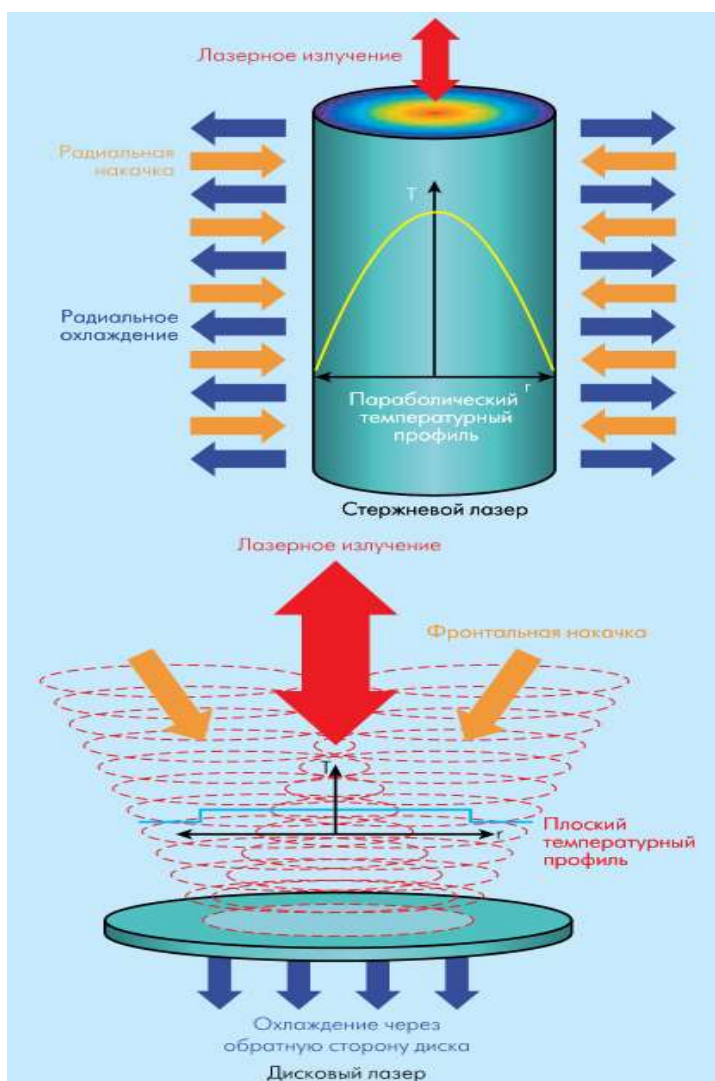


Рисунок 22 – Зависимость температурного градиента от различных схем накачки в стержневом и дисковом лазерах

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 [7].

В твердотельных лазерах с диодной накачкой существует две конфигурации накачки: продольная и поперечная. Рассмотрим схему твердотельного лазера (рисунок 23).

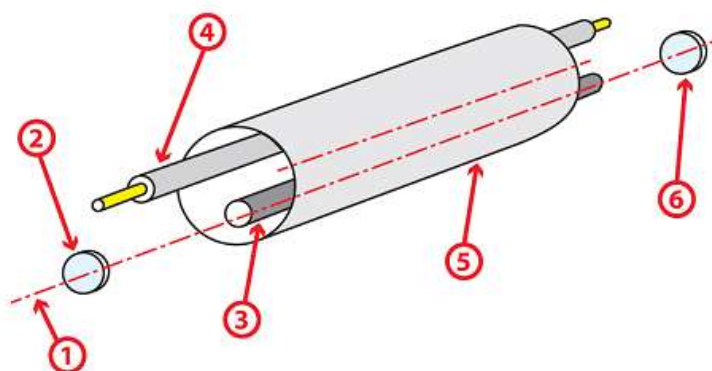


Схема твердотельного лазера:

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

Рисунок 23 – 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 [8].

На рисунке 24 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.

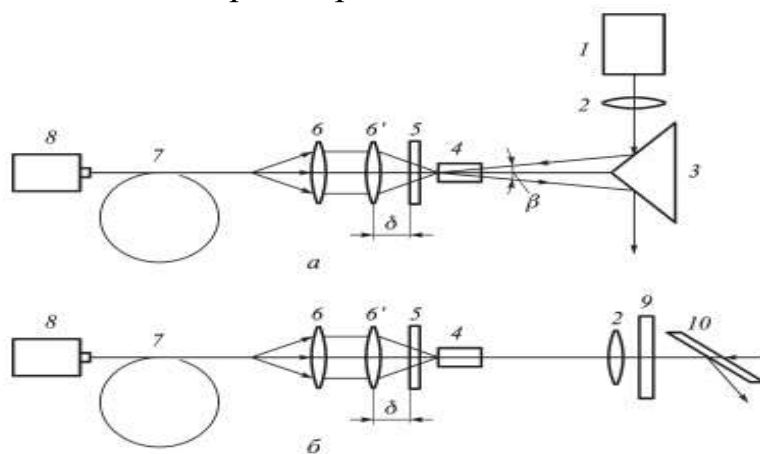


Рисунок 24 – Оптические схемы усилителей с продольной накачкой

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты курсовой работы состоят в следующем:

1 Проведен литературный обзор по современным типам лазеров с оптической накачкой. Были рассмотрены процессы и источники накачки, а также наиболее широко используемые системы оптической накачки.

2 Исследована применимость различных режимов оптической накачки. Наибольшее применение лазеры с данными режимами накачки находят в областях связи, измерительной техники и медицины.

3 Была проанализирована поперечная и продольная оптическая накачка лазеров на примере схем накачки твердотельного лазера Nd:YAG.

При исследовании различных режимов оптической накачки был рассмотрен наиболее старый метод ламповой накачки, а также более современные полупроводниковый и волоконный режимы накачки лазера. Кроме того, была рассмотрена диодная накачка, которая характеризуется высокой компактностью и эффективностью по сравнению с другими режимами накачки. Разновидность твердотельных лазеров с диодной накачкой получила широкое распространение в виде лазерных указок разнообразных цветов. Преимущество лазеров с диодной накачкой связано с тем, что излучение лазерных диодов спектрально согласуется с полосами поглощения активаторных ионов в генерирующем кристалле.

Материалы курсовой работы 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 Звелто О. Принципы лазеров / О. Звелто. – М.: Лань, 2008. – 560 с.
- 3 Koechner W. Solid – State Laser Engineering / W. Koechner. – М.: Springer, 2006. – p.747
- 4 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.
- 5 Кравцов Н.В. Основные тенденции развития твердотельных лазеров с полупроводниковой накачкой / Н.В. Кравцов // Квантовая электроника. – 2001. – Т.31. – № 8. – С. 661–677.
- 6 Ларионов М., Даузингер Ф. Лазеры на тонких дисках / М. Ларионов, Ф. Даузингер // Фотоника. – 2009. – № 3. – С. 3–7.
- 7 Вайлер С. Дисковые лазеры для промышленности / С. Вайлер // Фотоника. – 2009. – № 3. – С. 10–13.
- 8 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.