

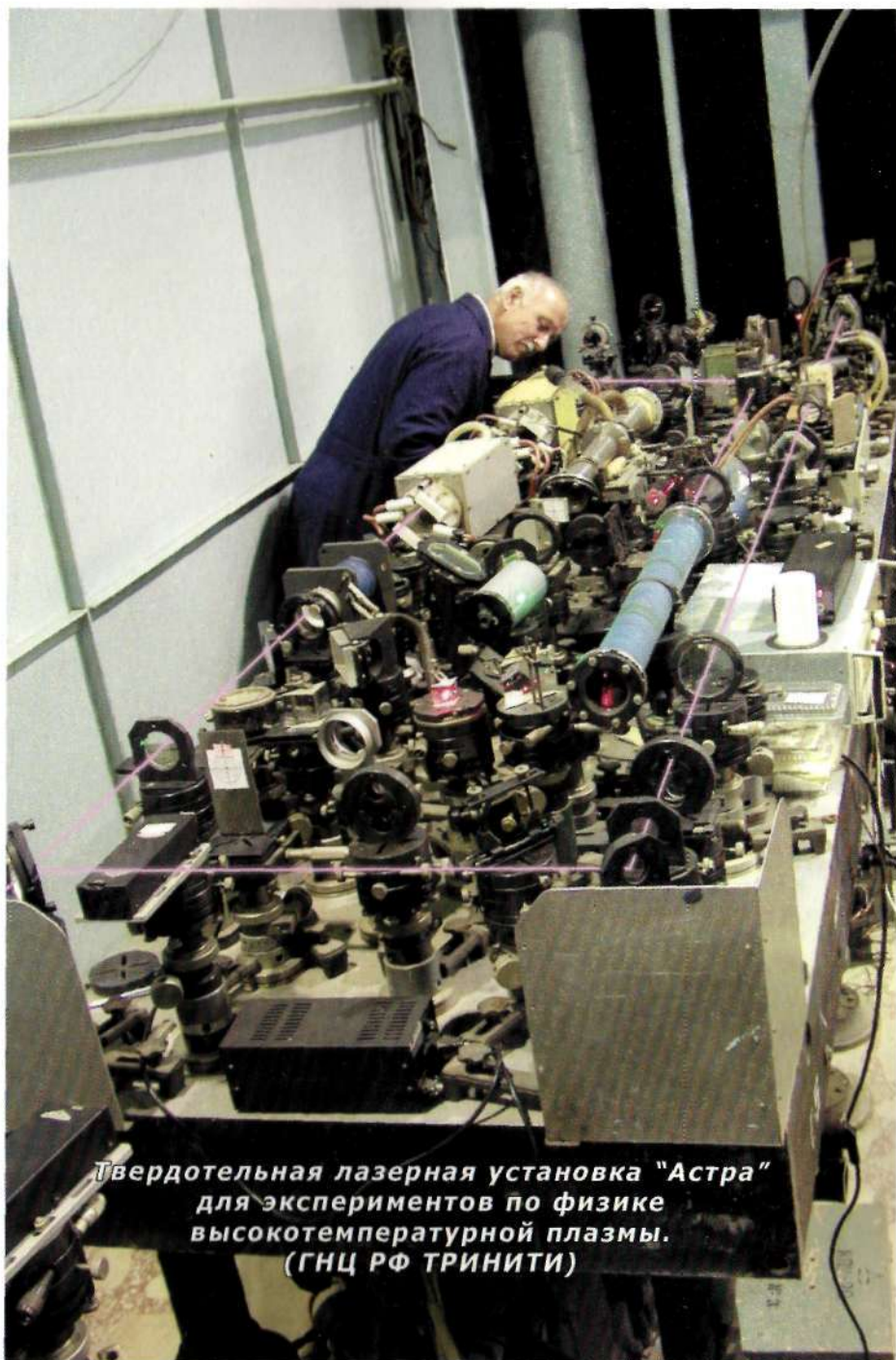


Учебная книга по диагностике плазмы

В. Е. Черковец, С. А. Казаков, В. Г. Наумов

**ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА
ДЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И
ПРАКТИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ**

Москва 2006



*Твердотельная лазерная установка "Астра"
для экспериментов по физике
высокотемпературной плазмы.
(ГНЦ РФ ТРИНИТИ)*

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Учебная книга по диагностике плазмы

В. Е. Черковец, С. А. Казаков, В. Г. Наумов

**ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА
ДЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
И ПРАКТИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ**

*Рекомендовано УМО «Ядерные физика и технологии»
в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений*

Москва 2006

Черковец В. Е., Казаков С. А., Наумов В. Г. **ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА ДЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРАКТИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ:**

Учебное пособие. М.: МИФИ. 2006. – с. 56 (Серия «Учебная книга по диагностике плазмы»).

Рассмотрены физические принципы, конструктивные схемы и достигнутый уровень основных параметров лазеров. В концентрированном наглядном и систематизированном виде дана информация о различных типах лазерной техники и ее применении в научных исследованиях и технологиях. Приведены примеры созданной техники, общая таблица и лазерный глоссарий.

Предназначено для студентов, аспирантов и специалистов, работающих в области физики плазмы, лазерно-плазменных технологий и диагностики плазмы.

Рецензент доктор физ.-мат. наук, профессор А. С. Савелов

Серия основана в 2003 году

Редактор серии В. А. Курнаев

ISBN 5-7262-0726-2

© Черковец В. Е., Казаков С. А., Наумов В. Г., 2006

© Московский инженерно-физический институт
(государственный университет), 2006

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие редактора серии	4
Введение	5
1. Непрерывные газоразрядные лазеры	8
2. Импульсные газоразрядные лазеры	11
3. Волноводные газоразрядные лазеры	14
4. Щелевые лазеры	15
5. Молекулярные лазеры с когерентной оптической накачкой	16
6. Газодинамические лазеры	18
7. Эксимерные лазеры	20
8. Химические лазеры	22
9. Жидкостные лазеры	24
10. Твердотельные лазеры	26
11. Лазеры с диодной накачкой	28
12. Оптоволоконные лазеры	30
13. Лазеры на свободных электронах	34
14. Лазеры с ядерной накачкой	35
15. Лазеры с ядерной накачкой	36
16. Полупроводниковые лазеры	38
17. Фемтосекундные лазеры	41
18. Рентгеновские и гамма-лазеры	44
19. Все остальные типы лазеров (которые придумают мифисты)	45
Заключение	46
Лазерная азбука	49
Список литературы	54

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА СЕРИИ

Данное учебное пособие продолжает уже сложившуюся серию «Учебная книга по диагностике плазмы». До этого издано несколько книг. В том числе книги В. С. Стрелкова, М. И. Пергамента, Ю. А. Лебедева и других признанных ученых и специалистов в области физики плазмы и методов ее диагностики. Что касается данной книги, то ее основу составило учебное пособие В. Е. Черковца и С. А. Казакова «Введение в практикум по методам генерации лазерного излучения и его применению», которое было издано МИФИ в 1995 году, т. е. ещё до начала серии по диагностике плазмы. Удачная форма и достаточная полнота материала о лазерах, используемых в научных исследованиях, привела к тому, что это пособие быстро разошлось среди студентов и специалистов. Предлагаемая книга содержит много новой информации, касающейся как лазеров, уже описанных ранее, так и новых типов, в т. ч. фемтосекундных, оптоволоконных, щелевых, дисковых и др.

Стиль изложения материала делает это издание также замечательным справочным пособием для широкого круга инженеров и специалистов.

Авторы книги являются сотрудниками Государственного научного центра Российской Федерации Троицкого института инновационных и термоядерных исследований (ГНЦ РФ ТРИНИТИ), широко известного своими работами в области УТС и лазерной физики. Научные исследования ведутся в институте на уникальной экспериментально-стендовой базе. В нее входят одна из двух крупнейших в мире электрофизических термоядерных установок «Ангара-5», комплекс токамаков ТСП и Т11М, импульсные плазменные ускорители МК-200 с рекордным энергосодержанием и др. Основу института составляет большой лазерный комплекс, в том числе включающий газоразрядные, твердотельные, оптоволоконные и другие типы лазеров, которые описаны в данном пособии. На всех этих установках студенты МИФИ проходят практику и выполняют научно-исследовательскую работу совместно с учеными института.

В институте более 20 лет успешно действует филиал кафедры «Физика плазмы» МИФИ. В. Е. Черковец и В. Г. Наумов являются выпускниками МИФИ, профессорами кафедры, С. А. Казаков – заместитель директора института, он окончил МГУ им. М. В. Ломоносова.

*Заведующий кафедрой «Физика плазмы»,
профессор В. А. Курнаев*

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует обширная литература, в том числе монографии и подробные курсы лекций, посвященные различным типам лазеров [6—11, 15, 16, 22, 23, 24—33]. В них нашли также отражение вопросы взаимодействия лазерного излучения с веществом и его использования в экспериментальных исследованиях, диагностике и технологических процессах.

Данное учебное пособие носит методический характер. В нем в достаточно сжатой форме суммирована и систематизирована информация о современном уровне разработок, а также иллюстрированы принципиальные и энергетические схемы лазеров. Основное внимание уделено лазерам, рабочей средой которых является плазма или газы в термодинамически неравновесном состоянии. Пособие предназначено для студентов старших курсов, начинающих научно-производственную практику по специальностям, связанным с исследованиями по физике плазмы, управляемому термоядерному синтезу (УТС), преобразованию энергии, в которых используется лазерная техника. Информация, изложенная здесь, представляет собой только необходимый минимум для успешного ориентирования в многообразии тематики, интенсивно развивающейся начиная с 50-х годов 20-го века.

Исторически, вначале появились термины «молекулярный усилитель и генератор» и «мазер» («maser» – аббревиатура английского названия: microwave amplification by stimulated emission of radiation), введенные в 1954 году, соответственно, Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым [1] в России и J. P. Gordon, H. J. Zeiger and C. H. Townes [2] в США.

Лазер («laser», оптический квантовый генератор) – термин образован от начальных букв английского выражения, означающего в переводе – усиление света с помощью эффекта индуцированного испускания излучения [3].

Основными элементами лазеров являются активная среда и резонатор. В активной среде за счет энергии, поступающей от внешнего источника, происходит возбуждение частиц на верхний лазерный уровень. Когда скорость возбуждения превышает определенный порог, количество возбужденных частиц на верхнем лазерном уровне становится больше, чем количество частиц на нижнем лазерном уровне.

В данной среде возникает инверсия (обращение) заселенностей уровней, и среда из поглощающей превращается в усиливающую. Существуют различные методы создания инверсии: когерентная и некогерентная оптическая накачка, инжекция носителей (электрический ток), электрические разряды, газодинамический способ, химические реакции, фотодиссоциация, ионизация среды пучком быстрых электронов или продуктами ядерных реакций.

Для того, чтобы добиться генерации когерентных (согласованных) волн в данной среде необходимо наличие положительной обратной связи, в результате которой электромагнитная волна, испущенная частицами инвертированной среды, многократно вызывает в этой среде новые акты вынужденного испускания точно таких же волн. Роль положительной обратной связи в лазере играет оптический резонатор, который образуют зеркала, окружающие активную среду. В лазерах используются оптические резонаторы различных типов – с плоскими зеркалами, сферическими, комбинациями плоских и сферических и др. Например, одно из зеркал может быть полностью отражающим с коэффициентом отражения близким к единице, а другое – полупрозрачным, через которое происходит вывод излучения.

Существуют также резонаторы, в которых оба зеркала являются полностью отражающими, но имеют различный радиус кривизны и (или) различную площадь поверхности.

В оптических резонаторах, обеспечивающих обратную связь в лазере, могут возбуждаться только некоторые определенные типы колебаний электромагнитного поля, которые называются собственными колебаниями или модами резонатора.

Резонатор в лазере не только обеспечивает обратную связь за счет возврата отраженного от зеркал излучения в активное вещество, но и определяет спектр излучения, его энергетические характеристики, направленность излучения.

В зависимости от свойств активной среды и способа создания в ней инверсии существуют различные временные режимы работы лазеров: непрерывный режим, режим одиночного импульса (импульсный) и импульсно-периодический (импульсы генерации следуют с частотой от единиц до нескольких тысяч герц).

Лазеры характеризуются следующими параметрами:

- длиной волны излучения;

- мощностью излучения (при работе лазера в непрерывном режиме);

- энергией импульса или пиковой мощностью (при работе лазера в импульсном режиме);

- средней мощностью излучения (при работе лазера в импульсно-периодическом режиме), определяемой как произведение энергии в отдельном импульсе на частоту следования импульсов;

- расходимостью излучения (характеризуется телесным углом, внутри которого заключено лазерное излучение);

- коэффициентом полезного действия.

В зависимости от вида активной среды все существующие типы лазеров делятся на 2 большие группы – лазеры на основе конденсированных сред (твердотельные, полупроводниковые и жидкостные) и газовые лазеры. Кроме того, в последнее время интенсивно ведутся работы по созданию лазеров на свободных электронах, рентгеновских и гамма-лазеров.

Естественным следствием чрезвычайно большого разнообразия и широты лазерной темы является то, что авторы при написании учебного пособия неоднократно обсуждали конкретные вопросы со своими коллегами по работе в ГНЦ РФ ТРИНИТИ. Среди них доктора физ.-мат. наук А. П. Напартович, А. Ю. Гольцов, А. Ф. Глова, кандидаты физ.-мат. наук В. С. Межевов, В. М. Черняк и многие другие, которым авторы выражают самую глубокую признательность.

Наглядность представления материала, рисунки, полиграфическая подготовка издания и другие важные для восприятия элементы были выполнены сотрудниками ОНТИ института В. И. Борисовым, А. П. Беляевым, Т. Г. Юшковой и П. В. Кадлубинским.

Авторы благодарны заведующему кафедрой «Физика плазмы» МИФИ профессору В. А. Курнаеву и профессору А. С. Савелову, без доброжелательной настойчивости которых книга вряд ли увидела бы свет.

И, наконец, следует подчеркнуть еще раз, что данное пособие снабжает интересующихся лишь самыми начальными сведениями по лазерной физике и технике. Для более полного и систематического ознакомления с предметом следует рекомендовать использовать книги и оригинальные статьи, приведенные в списке специальной литературы, например, энциклопедии [32, 33].

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

В лазерах этого типа возбуждение активной среды осуществляется за счет электрического разряда в газах [7, 10, 21]. Можно выделить атомарные, ионные и молекулярные лазеры, отличающиеся друг от друга, как механизмом образования инверсии, так и диапазоном генерируемых длин волн.

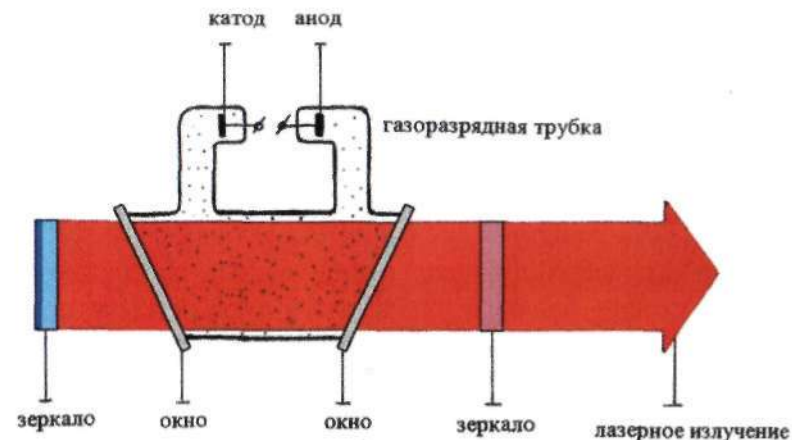
В АТОМАРНЫХ ЛАЗЕРАХ генерация в видимом и ИК-диапазоне обусловлена переходами между электронными энергетическими уровнями нейтральных атомов. В наиболее известном гелий-неоновом лазере верхний лазерный уровень атома неона возбуждается метастабильными атомами гелия, получившими в свою очередь энергию в результате столкновений с электронами тлеющего газового разряда. Нижний лазерный уровень атома неона опустошается за счет столкновительных процессов, в том числе со стенками.

В ИОННЫХ ЛАЗЕРАХ генерация излучения происходит в видимом диапазоне за счет переходов между энергетическими уровнями ионизированных атомов рабочего газа. В аргоновом лазере верхний возбужденный уровень иона аргона заселяется в результате столкновений с электронами в капиллярном разряде. Низкая заселенность нижнего лазерного уровня обеспечивается излучательными переходами.

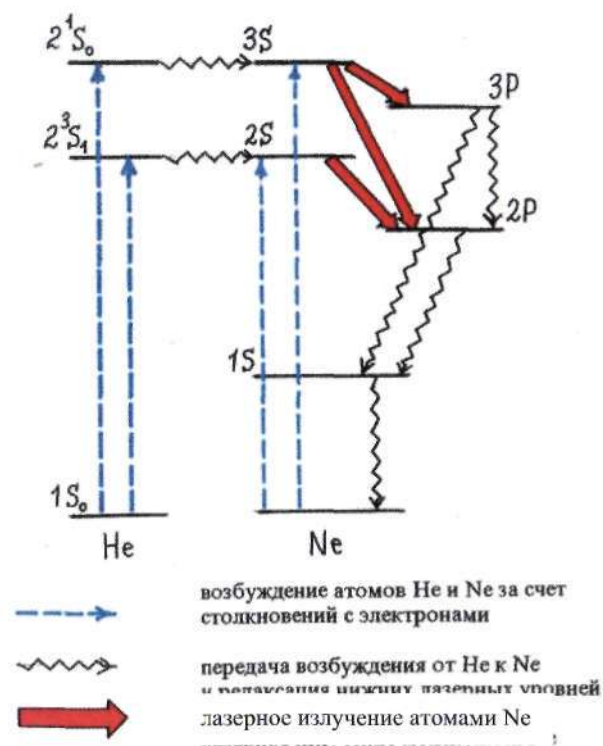
В лазерах на парах металлов, например, гелий-кадмиевом ионном лазере верхний рабочий уровень иона кадмия возбуждается в результате пеннинговой ионизации атомами гелия, возбужденными в разряде. Нижний уровень рассеивается за счет излучения.

Генерация в МОЛЕКУЛЯРНЫХ ЛАЗЕРАХ возникает на колебательно-вращательных переходах в молекулах рабочего газа. Излучение этих лазеров находится в широком спектральном диапазоне от УФ до дальней ИК области. Наиболее распространенными лазерами этого типа являются CO_2 - и CO -лазеры. В обычно используемой рабочей смеси CO_2 -лазера с концентрациями компонент, зависящих от типа лазера $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : (1-6) : 5$, молекулы азота накапливают энергию и передают ее молекулам CO_2 . Роль гелия заключается в понижении заселенности нижних уровней молекул углекислого газа и охлаждении смеси. CO_2 - и CO -лазеры наряду с химическими лазерами обладают наибольшей выходной мощностью в непрерывном режиме излучения и высокими КПД.

СХЕМА НЕПРЕРЫВНОГО ГАЗОРАЗРЯДНОГО ЛАЗЕРА



ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УРОВНИ He-Ne-ЛАЗЕРА



ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

В импульсном режиме работают лазеры на нейтральных и ионизированных атомах, парах металлов и молекулах [6, 20, 21, 22]. В зависимости от вида активной среды, механизма образования инверсии и требуемой мощности излучения применяют системы с продольным (относительно направления лазерного излучения) и поперечным возбуждением активной среды. Энергия излучения и длительность импульса газоразрядных лазеров в значительной мере определяются давлением и составом газовой среды, а также энергией, рассеиваемой в газе, которая, в свою очередь, зависит от параметров электронного пучка, характеристик рабочего газового объема и напряженности поля в нем. В мощных молекулярных лазерах, работающих при повышенных давлениях рабочей смеси ($p > 0,1$ атм), обычно применяют поперечное возбуждение.

Условия формирования объемного разряда значительно упрощаются при наличии предварительной ионизации газа. В лазерах атмосферного давления широко используются УФ предыонизация рабочего объема различного рода искровыми разрядниками, помещаемыми непосредственно в лазерную камеру.

Для накачки больших объемов активной среды лазеров более высокого давления ($p \geq 1$ атм) широкое распространение получили системы с несамостоятельным разрядом. Применение пучка заряженных частиц (протонов, электронов) для ионизации газовой среды позволяет осуществить эффективное возбуждение ее колебательных уровней и поддерживать однородность разряда при значительных энерговкладах 300 Дж/л.атм. Для обеспечения эффективного теплоотвода при работе лазеров в импульсно-периодическом режиме применяют прокачку рабочего газа и теплообменники.

Важным направлением работ в области лазерной техники стало создание крупномасштабных генераторно-усилительных систем для проведения исследований по возможности применения CO_2 -лазеров для инициирования управляемой термоядерной реакции. За короткое время были разработаны такие системы, как ТИР-1, ЛЕККО, «Гелиос», «Антарис», способные излучать в наносекундном импульсе энергию 0,1—40 кДж.

Достижение рекордных параметров стало возможным при переходе от традиционной схемы газового лазера с длинными газоразрядными трубками, в которой электрический разряд, направление течения газа и оптическая ось резонатора совпадают с осью трубки, к схеме с поперечным разрядом. В этом случае все три направления лазерной конструкции развязаны: по оси X протекает разрядный ток, возбуждающий активную среду; по оси Y осуществляется прокачка для охлаждения газовой смеси, по оси Z распространяется лазерное излучение.

Для обеспечения однородности горения самостоятельного тлеющего разряда в большом объеме используются многосекционные электроды, а для работы при повышенных давлениях, вплоть до атмосферного, используется несамостоятельный разряд, в котором ионизация газа происходит, например, пучком быстрых электронов, а основной разряд обеспечивает возбуждение молекул активной среды при оптимальных соотношениях напряженности электрического поля и давления ($E/p \sim 3$ кВ/(сматм)).

ХАРАКТЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Тип лазера	Активная среда	Длина волны излучения (мкм)	Мощность излучения (Вт)	Расходимость (мрад)	КПД (%)
Лазеры на нейтральных атомах	He-Ne	0,63	$5 \cdot 10^{-2}$	0,1—1	10^{-2} — 10^{-3}
Ионный лазер	Ar	0,514; 0,488	10^2	0,5—5	0,2—0,3
	He-Cd	0,44; 0,32	0,25	0,1—5	0,5
Молекулярные лазеры	CO	5—6,5	10^5	1—10	30—60
	CO ₂	9,1—11,2	10^6	1—5	10—30

ПРИМЕНЕНИЕ

Атомарные лазеры	Системы связи, интерферометрия, метеорология, спектроскопия, медицина
Ионные лазеры	Диагностика плазмы, технология, медицина
Молекулярные лазеры	Исследования атмосферы, технология, локация, медицина, системы связи, спектроскопия атомов и молекул

ХАРАКТЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Тип лазера	Актив-ная среда	Длина волны генерации (мкм)	Энергия в импульсе (Дж)	Частота следования импульсов (Гц)	Средняя мощность излучения (Вт)	Расходимость (мрад)	КПД (%)
Лазеры на нейтральн. атомах	Ne Xe	0,54 1,73—3,65	1 650	— —	— —	10 0,05	1 3
Лазеры на парах металлов	Cu	0,51 0,578	10^{-2}	10^5	100	0,3—5	1—10
	Pb	0,723	10^{-3}	10^5	2	0,3—5	0,1—1
Ионные лазеры	Ar	0,514 0,488	10^{-1}	10^5	80	1—5	0,3
Молекулярные лазеры	N ₂	0,337	10^{-2}	10^4	10	2—5	1
	CO (*)	5,6—6,5	$8 \cdot 10^2$	100	10^4	0,5—2	50
	CO ₂ (*)	9,1—11,2	10^3	200	10^4	1—5	15
	CO ₂ (**)	9,1—11,2	$10—10^2$	10^2	10^4	1—5	10—15
	CO ₂ (***)	9,1—11,2	$4 \cdot 10^4$	—	—	1	10

(*) – несамостоятельный разряд;

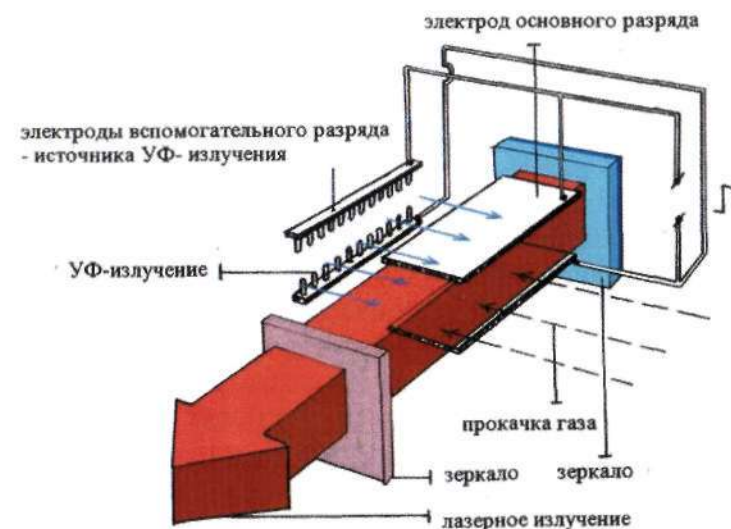
(**) – самостоятельный разряд с УФ-предыонизацией;

(***) – схема задающий генератор-усилитель, длительность импульса 1 нс.

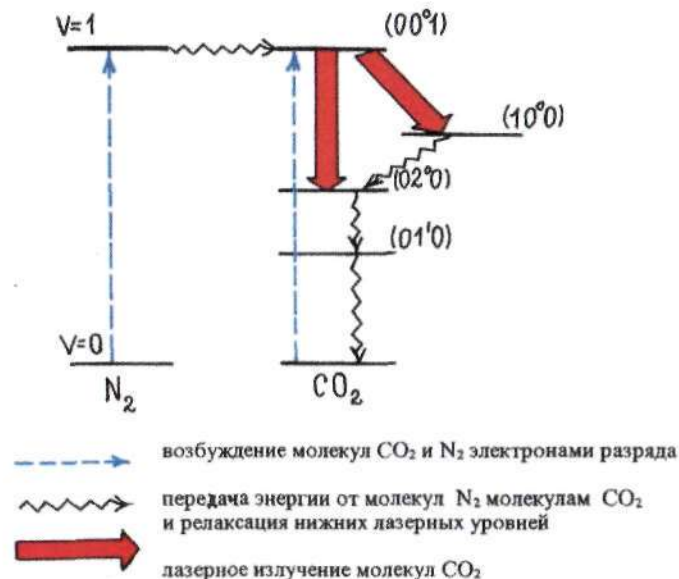
ПРИМЕНЕНИЕ

Лазеры на нейтральных и ионизированных атомах	Спектроскопия, медицина, технология
Лазеры на парах металлов	Цветное телевидение, связь, накачка лазеров на красителях
Молекулярные лазеры	Технология, локация, лазерная химия и разделение изотопов, лазерный термоядерный синтез

СХЕМА ИМПУЛЬСНОГО CO₂-ЛАЗЕРА С УФ-ПРЕДЫОНИЗАЦИЕЙ



ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УРОВНИ CO₂-ЛАЗЕРА



3 ВОЛНОВОДНЫЕ ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ЛАЗЕРЫ

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

В качестве разрядных каналов в волноводных CO_2 -лазерах используются полые диэлектрические или металлодиэлектрические волноводы круглого или прямоугольного сечения с характерным поперечным размером 1—5 мм. В зависимости от материала, продольных и поперечных размеров волновода, давления рабочего газа для возбуждения рабочей смеси волноводных CO_2 -лазеров применяют продольный разряд постоянного тока, продольный емкостной разряд переменного тока частотой $\sim 10^4$ — 10^5 Гц и поперечный высокочастотный (ВЧ) разряд ($\sim 10^6$ — 10^8 Гц) α - или γ -типа с диэлектрическими или металлическими электродами. Выбор нормального или аномального тлеющего разряда определяется величиной протекающего тока.

Волновод является составной частью резонатора и влияет на потери излучения и его модовый состав. Волноводные потери увеличиваются при увеличении порядка моды, и это является одним из механизмов подавления поперечных мод высшего порядка в лазере с достаточно длинным волноводом.

Благодаря столь малым поперечным размерам, из-за теплопроводности происходит эффективное охлаждение газа, и поэтому такие лазеры могут работать при повышенных давлениях рабочей смеси (более 100 мм. рт. ст.) и уровнях вкладываемой в разряд электрической мощности (50—100 Вт/см³). Это позволяет создавать мощные компактные лазеры с диапазоном плавной перестройки частоты генерации в пределах нескольких ГГц. Одним из способов увеличения мощности излучения волноводных CO_2 -лазеров является построение многолучевых лазеров, представляющих собой параллельный набор волноводов, помещенных между двумя общими плоскими зеркалами [25, 26].

Схема лазера и энергетические уровни такие же, как в разделе 1.

ХАРАКТЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Мощность излучения (Вт)	10^3
Режим работы	непрерывный, импульсно-периодический
Расходимость (мрад)	1—2

ПРИМЕНЕНИЕ

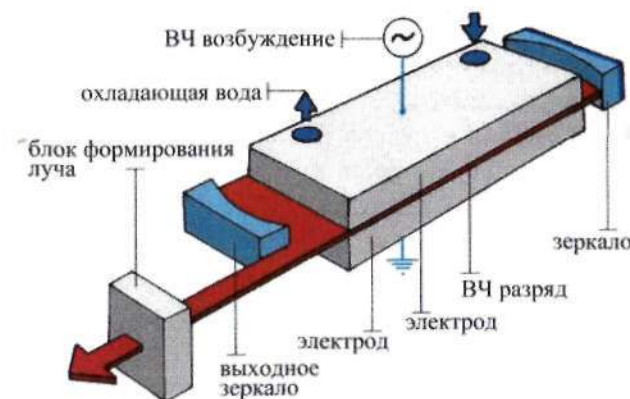
Прецизионная резка различных материалов, сварка, связь, локация, молекулярная спектроскопия, медицина.

4 ЩЕЛЕВЫЕ ЛАЗЕРЫ

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Одной из основных тенденций развития мощных лазеров является стремление к их компактизации при сохранении мощности, оптического качества излучения и надежности. В связи с этим последние годы интенсивно разрабатываются щелевые (slabb) CO_2 лазеры [27]. Из-за малого расстояния между электродами (1—3 мм.) для накачки таких лазеров, как правило, применяется ВЧ разряд с частотой более 100 МГц, что позволяет ввести высокие плотности мощности в разряд при высокой однородности и устойчивости его горения. Малое расстояние между электродами обеспечивает диффузионное охлаждение рабочего газа. Это избавляет от необходимости иметь громоздкие и дорогие газодинамические контура для охлаждения рабочего газа, насосы и теплообменники. Щелевые CO_2 лазеры с ВЧ-накачкой отличаются хорошей, близкой к дифракционному пределу расходимостью излучения. Схема энергетических уровней обсуждена в разделе 2.

СХЕМА ЩЕЛЕВОГО ЛАЗЕРА



ХАРАКТЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Мощность излучения (Вт)	10^2 — 10^4
Режим работы	непрерывный, импульсно-периодический
Расходимость (мрад)	1—2

ПРИМЕНЕНИЕ

Высокоточная бесконтактная обработка материалов – сварка, резка, скоростное сверление и перфорация, маркировка, пайка.

5 МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ЛАЗЕРЫ С КОГЕРЕНТНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

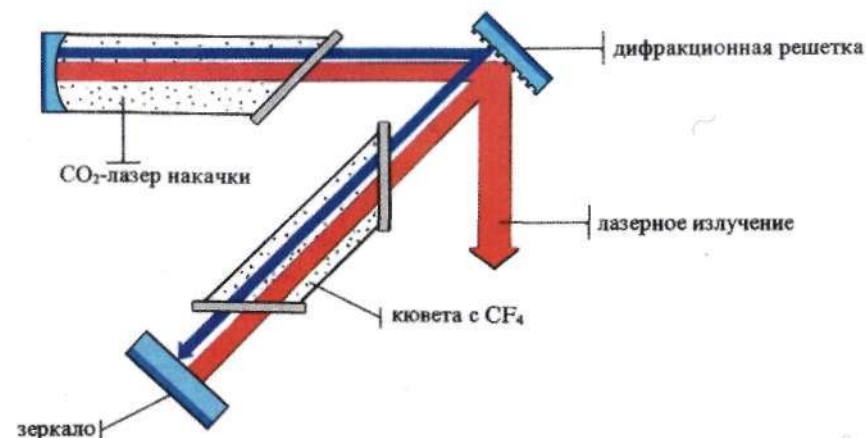
Для получения генерации в дальнем ИК-диапазоне (от 10 – 2000 мкм) применяют лазеры с газовой активной средой, накачиваемой лазерами. Имеется целый ряд молекулярных газов (HF , CH_3F , CH_3CN , CD_3CL , NH_3 , $^{15}\text{NH}_3$, CH_2CF_2 , O_3 , D_2O , CH_3OH и др.), генерирующих излучение в дальней ИК-области при накачке их CO_2 -лазером. При накачке газа излучением мощного импульсного CO_2 -лазера, когда частота поглощающего перехода в газе достаточна близка к частоте накачки, возможен режим так называемого «сверхизлучения». В этом режиме излучение накачки поглощается за один проход в кювете длиной 1—5 м и диаметром до 10 см, генерация излучения дальнего ИК-диапазона происходит без применения зеркал, а вывод генерируемого излучения осуществляется с помощью фильтра в конце кюветы, не пропускающего излучение накачки.

Лазеры состоят из двух каскадов. Первый – лазерный источник, который создает инверсию заселенностей между колебательно-вращательными переходами многоатомных молекул, составляющих второй каскад – активную среду. Пространственная разделенность источника накачки и активной среды позволяет возбуждать ее несколькими одновременно и независимо работающими лазерами. При этом энергия нескольких лазерных пучков может быть объединена в одном пространственно когерентном пучке. Это позволяет увеличивать интенсивность, удельный энергосъем при одновременном уменьшении расходимости излучения. Наиболее распространенными являются CF_4 и NH_3 лазеры, накачиваемые CO_2 -лазером. Основным интерес связан с возможностью расширения диапазона лазерного излучения в область субмиллиметровых длин волн и фактически получения в этой области генераторов с перестраиваемой частотой.

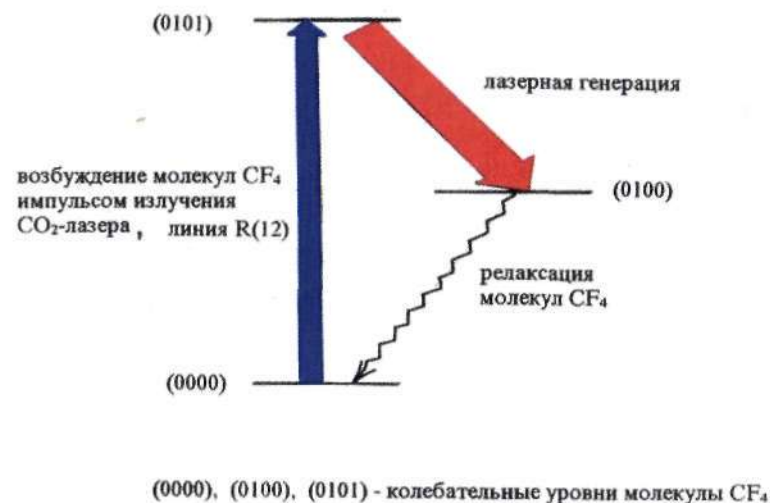
ХАРАКТЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Длина волны излучения (мкм)	10—1000
Энергия генерации (Дж)	10^{-3} —1
КПД преобразования энергии накачки в энергию излучения (%)	0,1—20
Режим работы	импульсный и импульсно-периодический

СХЕМА CF_4 -ЛАЗЕРА С КОГЕРЕНТНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ



ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УРОВНИ ЛАЗЕРА НА CF_4



ПРИМЕНЕНИЕ

Спектроскопия, диагностика плазмы, стимулирование химических реакций, разделение изотопов.

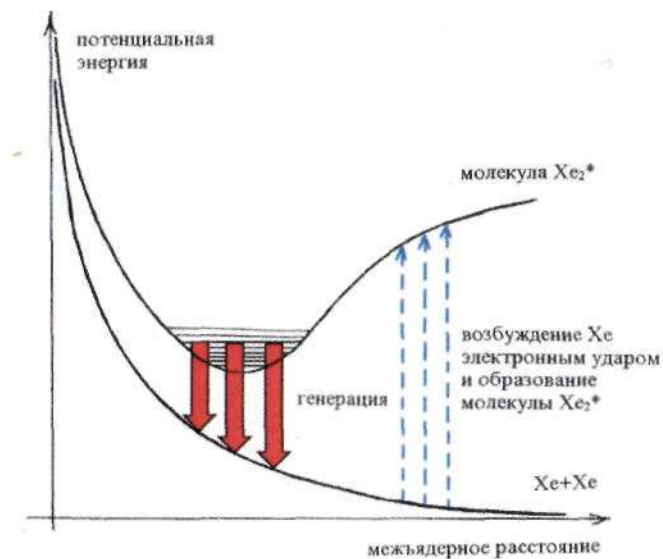
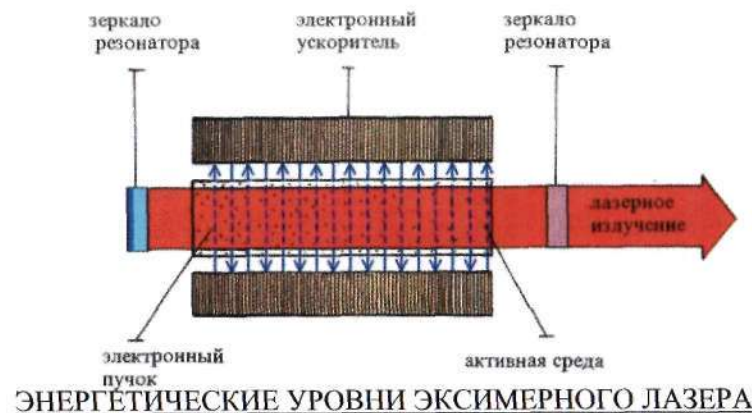
ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Основу активной среды данных лазеров составляют молекулы – димеры, существующие устойчиво только в возбужденном электронном состоянии и поэтому называемые эксимерами (excited dimer). Основное состояние данных димеров соответствует взаимному отталкиванию атомов, т. е. они не существуют в связанном состоянии. Поэтому возникновение эксимерных молекул эквивалентно появлению инверсии. Особенностью является отсутствие возбужденных молекул на нижнем лазерном уровне. Эксимерные молекулы создаются под действием пучка быстрых электронов или в условиях газового разряда. Генерация на переходах с устойчивого верхнего в отталкивательное нижнее состояние получена на димерах и галоидах благородных газов (Xe_2 ; Ar_2 ; Kr_2 ; XeCl ; XeF ; KrCl и т. д.) в видимом и УФ-диапазонах. Лазеры на димерах благородных газов работают только при высоком давлении ($p > 10$ атм). Заселение верхнего лазерного уровня, т. е. образование молекулы-димера благородных газов, например, Xe_2^* , происходит под действием электронного пучка в результате ионизации, возбуждения атомов и их столкновений между собой. Галоиды благородных газов образуются при меньших давлениях. Заселение верхнего лазерного уровня эксимеров галоидов инертных газов возможно не только электронным пучком, но и в газовом разряде [22, 24].

ХАРАКТЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Длина волны генерации (мкм)	0,126 (Ar_2); 0,145 (Kr_2); 0,172 (Xe_2); 0,192 (ArF); 0,222 (KrCl); 0,249 (KrF); 0,308 (XeCl); 0,352 (XeF).
Энергия в импульсе (Дж)	0,2—1
- возбуждение в несамостоятельном разряде	
- возбуждение в самостоятельном разряде или пучком электронов	$10—10^4$
Режим работы	импульсный, импульсно-периодический (с частотой до 100 Гц)
Длительность импульса (с)	$10^{-7}—10^{-8}$
Расходимость (мрад)	1—10
КПД (%)	1—20

СХЕМА ЭКСИМЕРНОГО ЛАЗЕРА, НАКАЧИВАЕМОГО ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ



ПРИМЕНЕНИЕ

Технология, лазерная химия и разделение изотопов, локация, лазерный термоядерный синтез.

8 ХИМИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРЫ

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

К этому типу относятся лазеры, в которых инверсия активной среды создается при протекании химических реакций компонентов этой среды [12, 13]. В химических лазерах реакция обычно происходит между газообразными элементами. Химические лазеры могут использовать только экзотермические реакции. В этом случае большая часть энергии реакции высвобождается в виде колебательной энергии молекул. Поэтому лазерные переходы являются колебательно-вращательными, а соответствующие им длины волн лежат в ИК диапазоне.

Различают два вида химических лазеров: с инициированием химической реакции и «чисто химические» – без внешнего инициирования.

В первом случае для обеспечения условий, необходимых для возникновения протекания реакции, требуется предварительное возбуждение (фотодиссоциация, нагревание, диссоциация) тех или иных реагентов, что приводит к необходимости использования дополнительных устройств (лампы-вспышки, электрические разрядники, нагревательные камеры и т. д.). С целью снижения доли энергии, необходимой для начала реакции, используются цепные самоподдерживающиеся реакции типа $A + BC \rightarrow AB^* + C$, например: $F + H_2 \rightarrow HF^* + H$; $F + H \rightarrow HF^*$; $\dots HF^* \rightarrow HF + h\nu$

Во втором случае химическая реакция происходит самопроизвольно при смешивании компонент. Работа чисто химического лазера без инициирования основана на соединении в сопловом блоке взаимно нестабильных реагентов и быстром удалении через сопло продуктов реакции. Возможно подмешивание CO_2 на выходе, что дает следующую цепочку: $NO + F_2 \rightarrow NOF + F$; $F + D_2 \rightarrow DF^* + D$; $D + F_2 \rightarrow DF^* + F$; $\dots DF^* + CO_2 \rightarrow CO_2^* + DF \rightarrow CO_2 + DF + h\nu$ и возможность непрерывного излучения на длине 10,6 мкм. В химических лазерах фактически происходит преобразование химической энергии в лазерную.

ХАРАКТЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Длина волны генерации (мкм)	1,3—10,6
Энергия в импульсе (Дж) (импульсный)	10^2 — $2,5 \cdot 10^3$
Длительность импульса (с)	10^{-8} — 10^{-7}
Мощность излучения (Вт) (непрерывный)	10^6
КПД (%)	10—20
Режим работы	импульсный, непрерывный

СХЕМА ФОТОДИССОЦИОННОГО ЛАЗЕРА

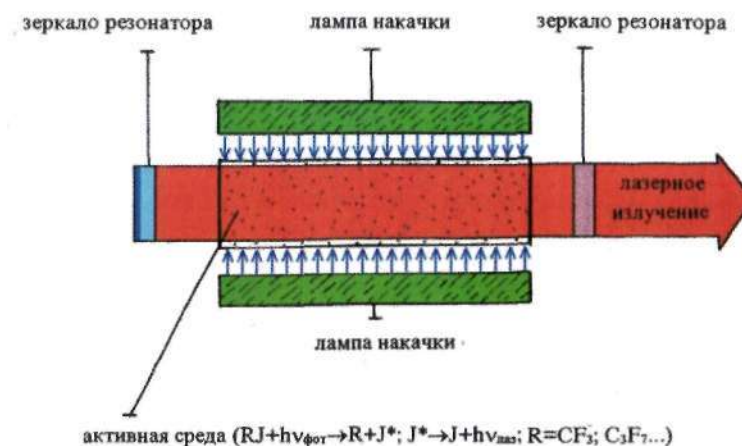
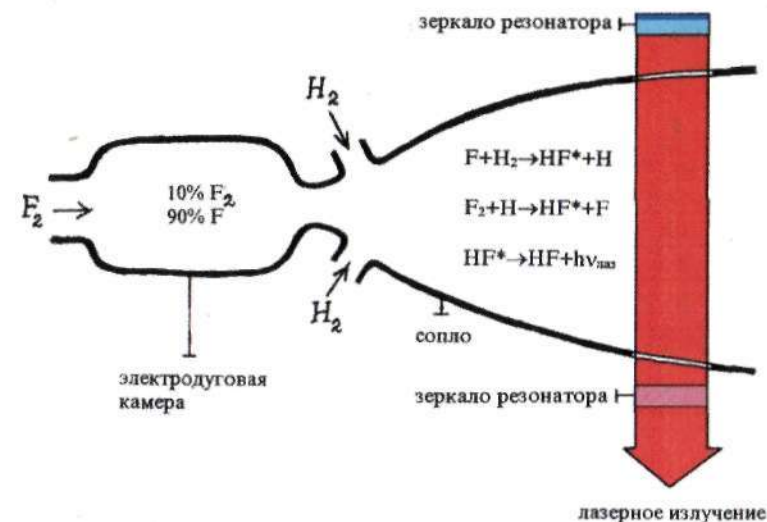


СХЕМА HF(DF)-ЛАЗЕРА



ПРИМЕНЕНИЕ

Лазерный термоядерный синтез, дальняя связь, спектроскопия.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Данные лазеры характеризуются использованием в качестве активного лазерного вещества жидких сред – растворов неорганических соединений редкоземельных элементов, в основном неодима, или растворов органических красителей (родамина, оксазина, кумарина, нафталина и т. д.)

Жидкостные лазеры на основе неорганических сред работают только в импульсном режиме. В качестве источника возбуждения применяются импульсные лампы накачки. Жидкостные лазеры на основе органических соединений работают как в импульсном, так и в непрерывном режимах. Для накачки органических красителей применяют импульсные лампы, а также твердотельные и газовые лазеры (азотные, аргоновые, на парах металлов и эксимерные). Импульсный режим работы обеспечивается при некогерентной (ламповой) накачке и при лазерной. Непрерывный – только при лазерной.

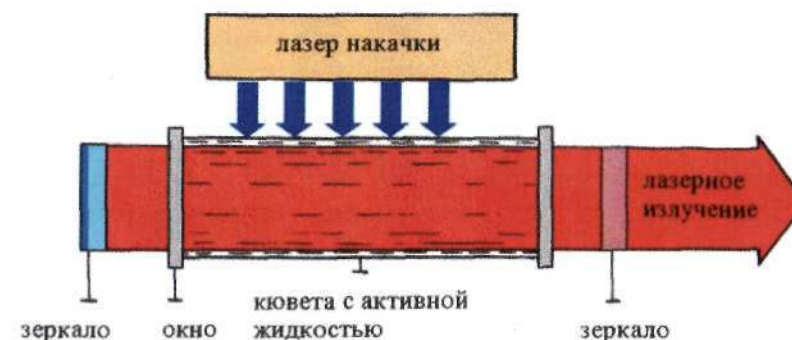
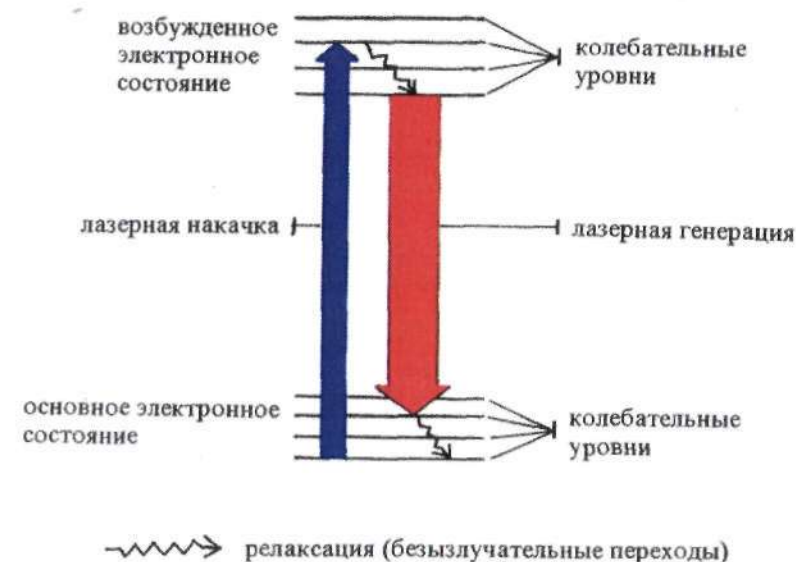
Длину волны жидкостных лазеров можно менять, изменяя концентрацию красителя в растворе, с помощью дифракционных решеток и внутрирезонаторного электрооптического фильтра.

ХАРАКТЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Длина волны (мкм)	0,34—11,75
Длительность импульса (с)	10^{-8} — 10^{-9}
Энергия в импульсе (Дж)	0,1—2
Мощность в непрерывном режиме (Вт)	200
Расходимость (мрад)	2—5
К П Д (%)	1—3 при ламповой накачке 10—20 при лазерной накачке
Режим работы	непрерывный, импульсный, импульсно-периодический

ПРИМЕНЕНИЕ

Метеорология, спектроскопия, лазерное разделение изотопов.

СХЕМА ЛАЗЕРА НА КРАСИТЕЛЕ С ПОПЕРЕЧНОЙ ЛАЗЕРНОЙ НАКАЧКОЙЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УРОВНИ ЛАЗЕРА НА КРАСИТЕЛЯХ

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

В лазерах этого типа используются переходы между энергетическими уровнями примесных ионов редкоземельных элементов, металлов и актиноидов, вводимых в небольших количествах в кристаллы и аморфные тела (корунд, стекло и др.). Из большого количества твердых тел, обладающих способностью к излучению различных длин волн, наибольшее практическое применение нашли рубин, стекло, активированное неодимом (Nd^{3+}) и иттрий-алюминиевый гранат (YAG), активированный неодимом. Лазеры на этих материалах имеют наибольшие энергии излучения в импульсе по сравнению с другими типами твердотельных квантовых генераторов и обладают достаточно хорошими техническими и эксплуатационными характеристиками.

Лазеры на указанных средах работают с оптической накачкой, в качестве которой используется световая энергия импульсных или непрерывных ламп со спектром излучения, перекрывающим спектр поглощения активных элементов, или излучение полупроводниковых лазеров.

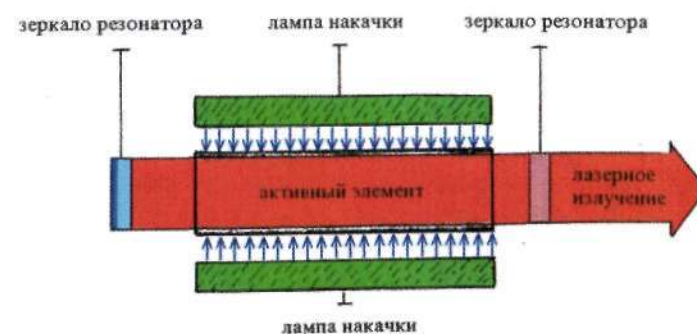
ХАРАКТЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Активная среда, длина волны, мкм	см. таблицу на стр. 29
Длительность импульса в импульсном режиме (с)	$10^{-3} - 10^{-11}$
Энергия в импульсе (Дж)	10^2
Энергия в импульсе по схеме генератор-усилитель (Дж)	10^5
Мощность в непрерывном режиме (Вт)	200
Средняя мощность в импульсно-периодическом режиме (Вт)	10^3
Расходимость (мрад)	0,1—10
КПД (%)	0,2—50
Режим работы	импульсный, импульсно-периодический, непрерывный (YAG, активированный Nd)

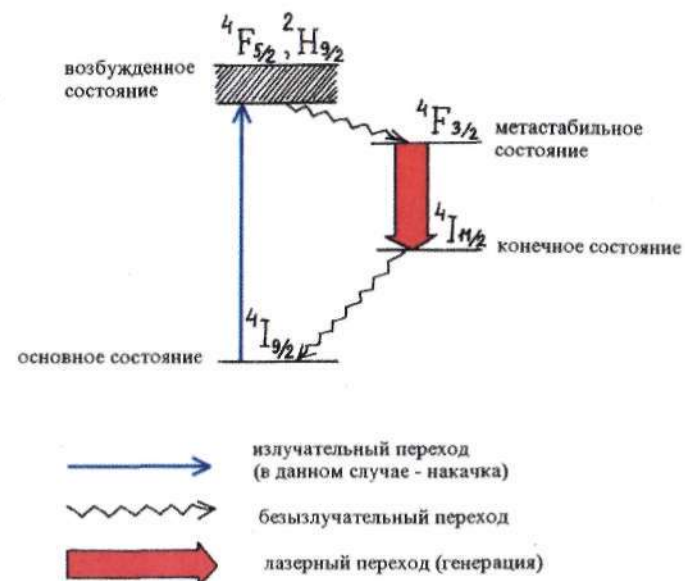
ПРИМЕНЕНИЕ

Технология, локация, дальнометрия, системы наведения, лазерный термоядерный синтез, физика плазмы.

СХЕМА ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРА С ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ



ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УРОВНИ ЛАЗЕРА НА Nd^{3+}



ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

В качестве накачки активной среды твердотельного лазера может использоваться излучение другого лазера [30]. При этом длина волны источника накачки может быть подобрана так, чтобы возбуждение передавалось непосредственно на верхний лазерный уровень твердотельной среды. Тем самым существенно снижаются тепловые потери энергии. Особенно ярко эти преимущества проявляются при использовании полупроводниковых диодных лазеров. Это связано с высокой (до 85 %) эффективностью преобразования электрической энергии в лазерное излучение диодов.

При использовании лазерного диода для накачки активного элемента твердотельного лазера могут быть реализованы два способа: торцевая и боковая накачка. В первом случае излучение диода с помощью системы линз фокусируется на торец активной зоны, во втором – на ее боковую поверхность. С точки зрения повышения мощности стимулированного излучения боковая накачка имеет преимущество перед торцевой накачкой. Активный элемент и лазерные диоды должны быть обеспечены охлаждением, но уже менее интенсивным, чем при ламповой накачке твердотельных лазеров.

В последнее время все большее внимание привлекает использование в качестве активной среды поликристаллической керамики из Nd : YAG, Yb : Y₂O₃ и других кубических кристаллов. Такой интерес обусловлен существенными преимуществами керамики по сравнению с монокристаллами: хорошее оптическое качество, большая апертура и высокая концентрация ионов неодима и иттербия. Кроме того, использование активных керамических сред уменьшает проблему их охлаждения. Энергетические уровни лазера см. в разделе 10.

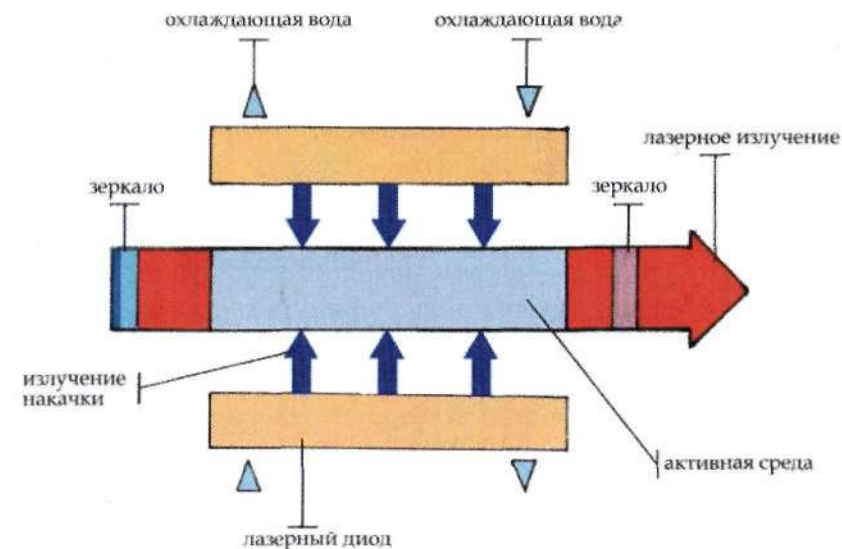
ХАРАКТЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Активная среда	Nd : YAG; Nd : YVO ₄	Nd : YSGG; Nd : GdVO ₄	Nd : YAB, Nd : LSB
Длина волны излучения (мкм)	1,06		
Режим работы	непрерывный, импульсно-периодический		
Мощность в непрерывном режиме (Вт)	10 ³		
Частота следования импульсов (Гц)	10 ⁴		
КПД (%)	20÷50		
Расходимость (мрад)	2—5		

ПРИМЕНЕНИЕ

Металлообработка, локация, медицина, биология, ювелирное дело.

СХЕМА ЛАЗЕРА С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ



НАИБОЛЕЕ РАСПРОСТРАНЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ

Материал активной среды	Матрица	Активатор	Длина волны, мкм
Рубин	Al ₂ O ₃	Cr ³⁺	0,694
Иттрийалюминиевый гранат с неодимом	Y ₃ Al ₅ O ₁₂	Nd ³⁺	1,06
Иттрийалюминиевый гранат с иттербием	Y ₃ Al ₅ O ₁₂	Yb ³⁺	1,03
Стекло с неодимом	Стекло	Nd ³⁺	1,06
Стекло с иттербием	Фосфатное стекло	Er ³⁺	1,54
Алюминат иттрия с неодимом	YAlO ₃	Nd ³⁺	1,06
Натрий-лантан-молибдат с неодимом	NaLa(MoO ₄) ₂	Nd ³⁺	1,06
Флюорит кальция с диспрозием	CaF ₂	Dy ²⁺	2,36
Гадолиний-скандий-галлиевый гранат с хромом	Gd ₃ Sc ₂ Ga ₃ O ₁₂	Cr ³⁺	0,7—0,9
Гадолиний-скандий-галлиевый гранат с неодимом	Gd ₃ Sc ₂ Ga ₃ O ₁₂	Nd ³⁺	1,06

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

В лазерах этого типа в качестве активного лазерного вещества используется активированное волокно, которое накачивается излучением диодных полупроводниковых лазеров [31]. Оптическое волокно состоит из двух концентрических слоев: активированной световедущей жилы (ядра) и оптической оболочки, при этом показатель преломления материала ядра больше чем у материала отражающей оболочки. В целях предохранения от внешних воздействий вокруг отражающей оболочки наносится защитная оболочка – слой полимера (акрилата). Волокно может быть изготовлено из стекла или пластика. Длина волоконных кабелей может достигать 200 м и более при диаметре в несколько мм. Внутри защитной оболочки может быть размещено несколько оптоволокон. При этом мощность излучения суммируется.

Оптический резонатор образован брэгговскими решетками-отражателями сформированными внутри световода. Существует широкий набор элементов активирования ядра, что позволяет получать лазерное излучение в широком спектральном диапазоне.

Энергетические уровни см. в разделе 10. Наибольшие уровни мощности достигнуты в лазерах на оптоволокне активированном иттербием.

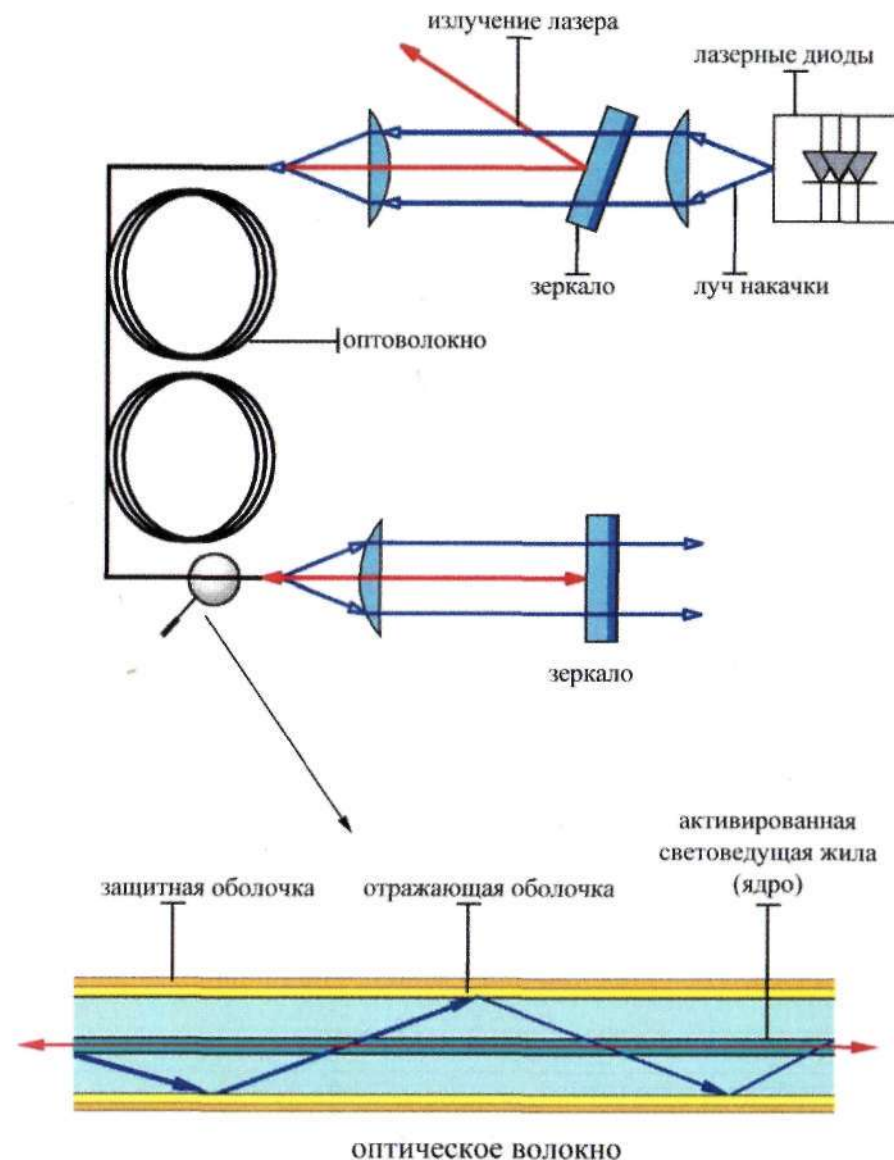
ХАРАКТЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Длина волн (мкм)	1,03 (Yb), 1,3 (Pr), 1,54 (Er), 1,9 (Tm)
Мощность в непрерывном режиме (одномодовый режим) (Вт)	≥ 400
Мощность в непрерывном режиме (многомодовый режим) (кВт)	≥ 10
Качество излучения (мм · рад)	5—7
КПД (%)	28—30

ПРИМЕНЕНИЕ

Лазерная технология, системы оптоволоконной связи, медицина, запись и считывание информации, системы наведения и охранной сигнализации, накачка твердотельных лазеров.

СХЕМА ОПТОВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ



ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

В данных лазерах излучение возникает при прохождении ускоренного электронного пучка вдоль оси ондулятора – магнита, поле которого постоянно во времени и периодически переменное в пространстве [8, 15]. В ондуляторе знако-переменные магнитные поля периодически отклоняют пучок то в одну, то в другую сторону. В результате траектория электронов приобретает вид «змейки». На криволинейных участках траектории электроны испускают синхротронное излучение, имеющее узкую диаграмму направленности. Зеркала резонатора, в который помещен ондулятор, удерживают это излучение до прихода следующего электронного пакета, после чего происходит усиление излучения. Многократное повторение этого процесса приводит к импульсной генерации. Длина волны λ излучения лазера определяется периодом ондулятора Λ и релятивистским фактором γ :

$$\lambda \cong \frac{\Lambda}{2\gamma^2}, \quad \gamma = \left(1 - \frac{V^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}},$$

где V – скорость электронов.

В реальных конструкциях энергии электрона (25–50) МэВ соответствует излучение в средней части ИК диапазона. Характерным для данных лазеров является непрерывность спектра возможных частот и легкость перестройки длины волны излучения, определяемой энергией электронов в пучке. Основные усилия исследователей направлены на продвижение в область коротких длин волн (УФ и далее). Спектр излучения определяется структурой электронного тока ускорителей представляющего собой пакеты по 10^3 пиков длительностью $(10-10^2)$ пс каждый. Причем сами пакеты имеют длительность $(1-10^2)$ мкс и частоту следования порядка нескольких герц. В результате при пиковой мощности 1–10 МВт средняя по пакету мощность – 10 кВт, а средняя за все время излучения – 10 Вт. Мощность излучения растет с повышением тока электронного пучка.

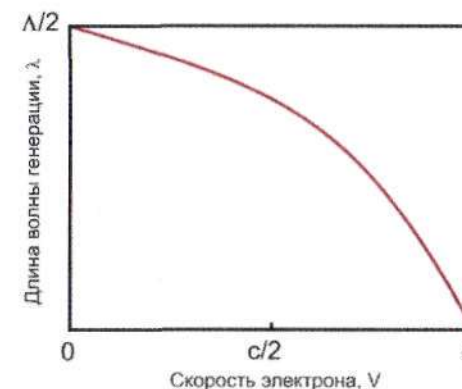
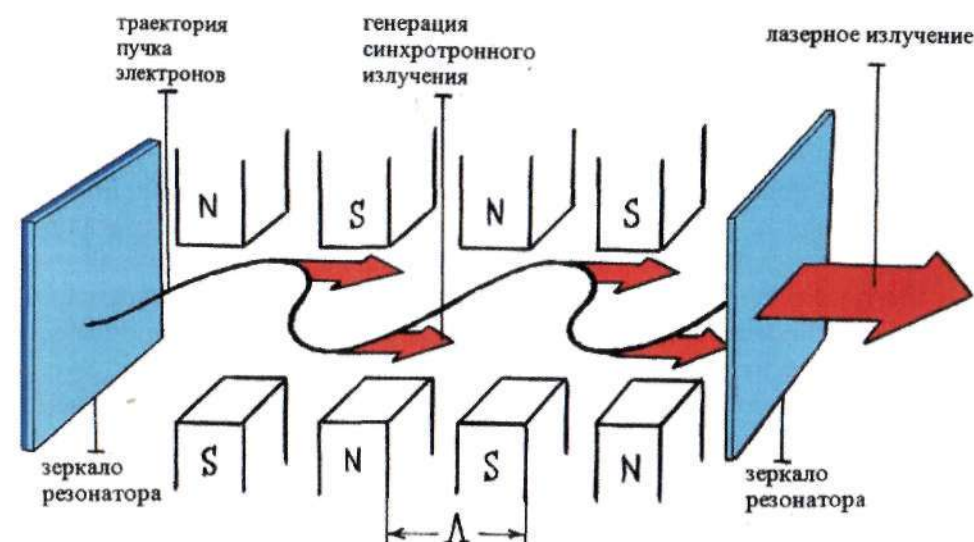
ХАРАКТЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Длина волны генерации (мкм)	0,3—10 ³
Пиковая мощность (Вт)	10 ⁶
КПД преобразования энергии электронного пучка в лазерное излучение (%)	1—10

ПРИМЕНЕНИЕ

Спектроскопия, диагностика плазмы, лазерный термоядерный синтез.

УСТРОЙСТВО ЛАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ



ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

В лазерах этого типа [19], называемых также диодными лазерами, активным элементом является полупроводниковый диод, возбуждаемый либо инжекцией носителей через переход (электрическим током), либо пучком электронов высокой энергии и представляющий собой сложную многослойную конструкцию. Металлические слои служат анодом и катодом. Между ними располагаются слои из полупроводниковых материалов. Нижний слой кристалла легируется для создания n-области, а в верхнем слое создают p-область. Между ними расположен активный слой. Две боковые стороны (торцы) кристалла полируются для образования гладких параллельных плоскостей, которые образуют оптический резонатор, называемый резонатором Фабри-Перро.

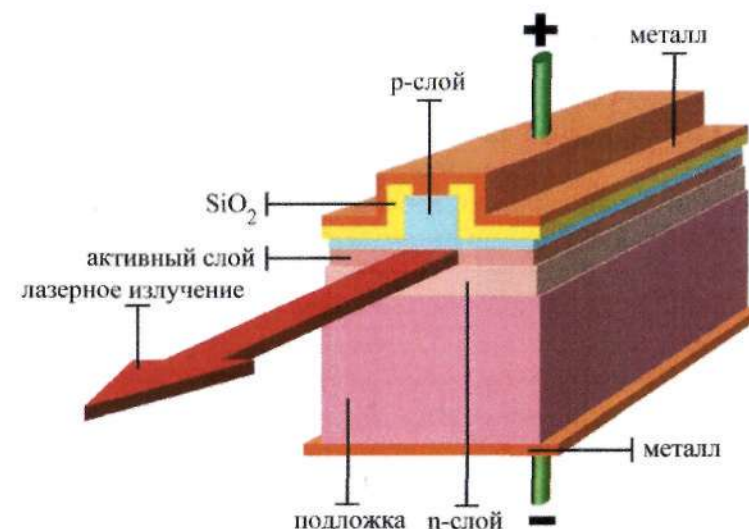
Инверсия в полупроводниковых лазерах осуществляется на переходах в электронных энергетических зонах полупроводникового кристалла. За счет внешнего воздействия создаются избыточные по отношению к равновесным электроны в зоне проводимости и дырки в валентной зоне. Возвращение к равновесию, т. е. рекомбинация избыточных электронов и дырок, осуществляется излучением на оптическом переходе зона-зона.

Длина волны излучения лазерного диода зависит от ширины запрещенной зоны между энергетическими уровнями p- и n-областей полупроводника.

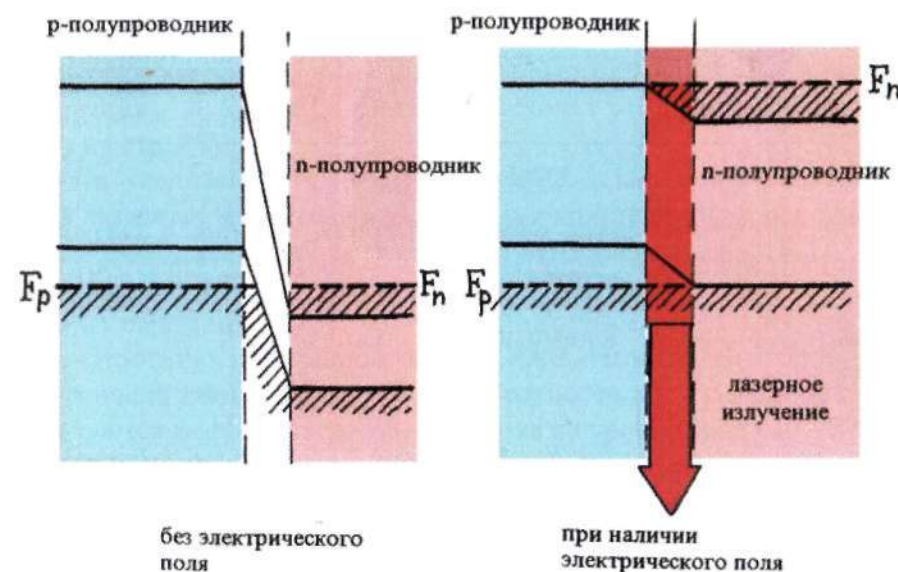
Предельная величина мощности лазерного излучения диодов определяется стойкостью их излучающей поверхности к воздействию собственного излучения. В тех случаях, когда требуется получить большую мощность, отдельные лазерные диоды собирают в диодные матрицы. Плавная перестройка частоты излучения полупроводникового лазера возможна изменением температуры кристалла, его всесторонним сжатием, магнитным полем и др.

В 2000 г. российский ученый академик Ж. И. Алферов был удостоен Нобелевской премии по физике за создание полупроводниковых лазеров на гетероструктурах.

СХЕМА ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА С p-n-ПЕРЕХОДОМ



ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЗОНЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА С p-n-ПЕРЕХОДОМ



F_p и F_n – уровни Ферми

ХАРАКТЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Длина волны излучения (мкм)	GaN / InGaN– 0.40; InGaAs / AlGaAs/InP– 1.55; GaAs / AlGaAs– 0.86; InGaSb / InAs/GaSb – 3—4; InGaAs / GaAs– 0.9
Длительность импульса в импульсном режиме (с)	10^{-8} — 10^{-9}
Энергия в импульсе (Дж)	10^{-2}
Мощность в непрерывном режиме (Вт)	
от отдельного диода	10—20
от набора диодов	10^3
Расходимость (мрад)	10—100
КПД (%)	
возбуждение электрическим током	до 80
возбуждение пучком электронов	10
Режим работы	импульсный, импульсно-периодический, непрерывный

ПРИМЕНЕНИЕ

Дальнометрия, связь, системы ночного видения и сигнализации, голографические запоминающие устройства, спектроскопия, накачка твердотельных лазеров для инерционного УТС, диагностика плазмы, аудио-, видео- и компьютерная техника.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

В настоящее время большой прогресс отмечается в области создания сверхмощных лазерных систем, генерирующих импульсы, длительность которых может достигать единиц фемтосекунд ($1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ с}$) [29]. Лазерная система, генерирующая мощные ультракороткие импульсы (УКИ) построена по принципу трансформации спектрально-временной структуры и последующего усиления импульсов задающего генератора (ЗГ). В качестве активной среды используются среды с большой спектральной шириной полосы усиления, достигающей в ряде случаев нескольких десятков нанометров (титанат сапфира, хром-форстерит, неодимовое стекло и др.).

Генерация импульсов ультракороткой длительности осуществляется за счет активной (акусто- или электрооптическая модуляция) или пассивной (эффект Керра в активном элементе ЗГ) синхронизации большого количества продольных мод в резонаторе Фабри-Перо, который образует резонатор ЗГ.

Типичный генератор УКИ вырабатывает непрерывную последовательность импульсов, период которых равен времени обхода светом резонатора ($T = 2L/c$, L – длина резонатора, c – скорость света), а длительность – от десятков до нескольких сотен фс. Как правило, энергия отдельного импульса составляет от 1 до 10 нДж, а частота следования – 70—80 МГц. Далее происходит усиление импульса (см. схему на стр. 37).

На усилителях, использующих эффект параметрического усиления лазерных импульсов в нелинейных кристаллах (дигидрофосфат калия – KDP, дейтерированный дигидрофосфат калия – DKDP, триборат лития – LBO, бетаборат бария – BBO и др.), достигнуты рекордные параметры УКИ: до 30 Дж в импульсе длительностью 20—30 фс (Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород). При фокусировке таких импульсов на поверхности облучаемых мишеней реализуются плотности светового потока на уровне более 10^{21} Вт/см^2 .

В настоящее время обсуждаются возможные способы генерации аттосекундных импульсов (10^{-18} с) на быстро ионизуемых атомах в полях сверхкоротких оптических импульсов.

ХАРАКТЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Длина волны излучения (мкм)	Ti-сапфир – 0,78; Cr: LiSAF – 0,846; C : LiSGaAF – 0,835; Cr : форстерит – 1,240; Nd : стекло (фосфатное) – 1,055; Yb : стекло – 1,040
Длительность импульса излучения (фс)	5—100
Средняя мощность излучения (МВт)	100—500
Частота следования импульсов (МГц)	50—100

ПРИМЕНЕНИЕ

- наука (нелинейная оптика, исследования сверхбыстрых явлений, спектроскопия, фемтохимия, лазерная плазма, ускорение электронов, фотоядерные реакции, генерация импульсов ВУФ и рентгеновского излучения);

- техника (оптоэлектроника, микроэлектроника, волоконно-оптическая связь, прецизионная обработка материалов, системы изображения на терагерцовых частотах, разделение изотопов);

- медицина (томография, хирургия, кардиология, двухфотонная фотодинамическая терапия).

СХЕМА ЗАДАЮЩЕГО ГЕНЕРАТОРА С ПАССИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД

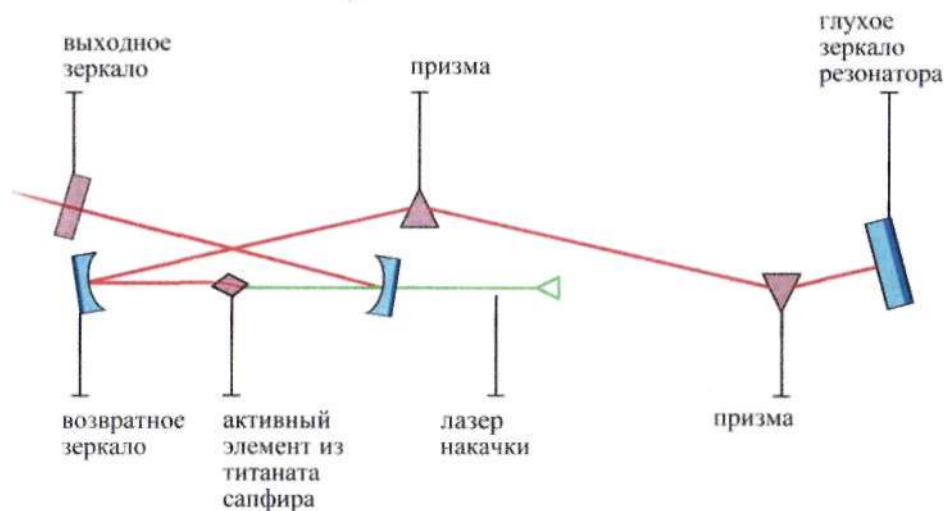
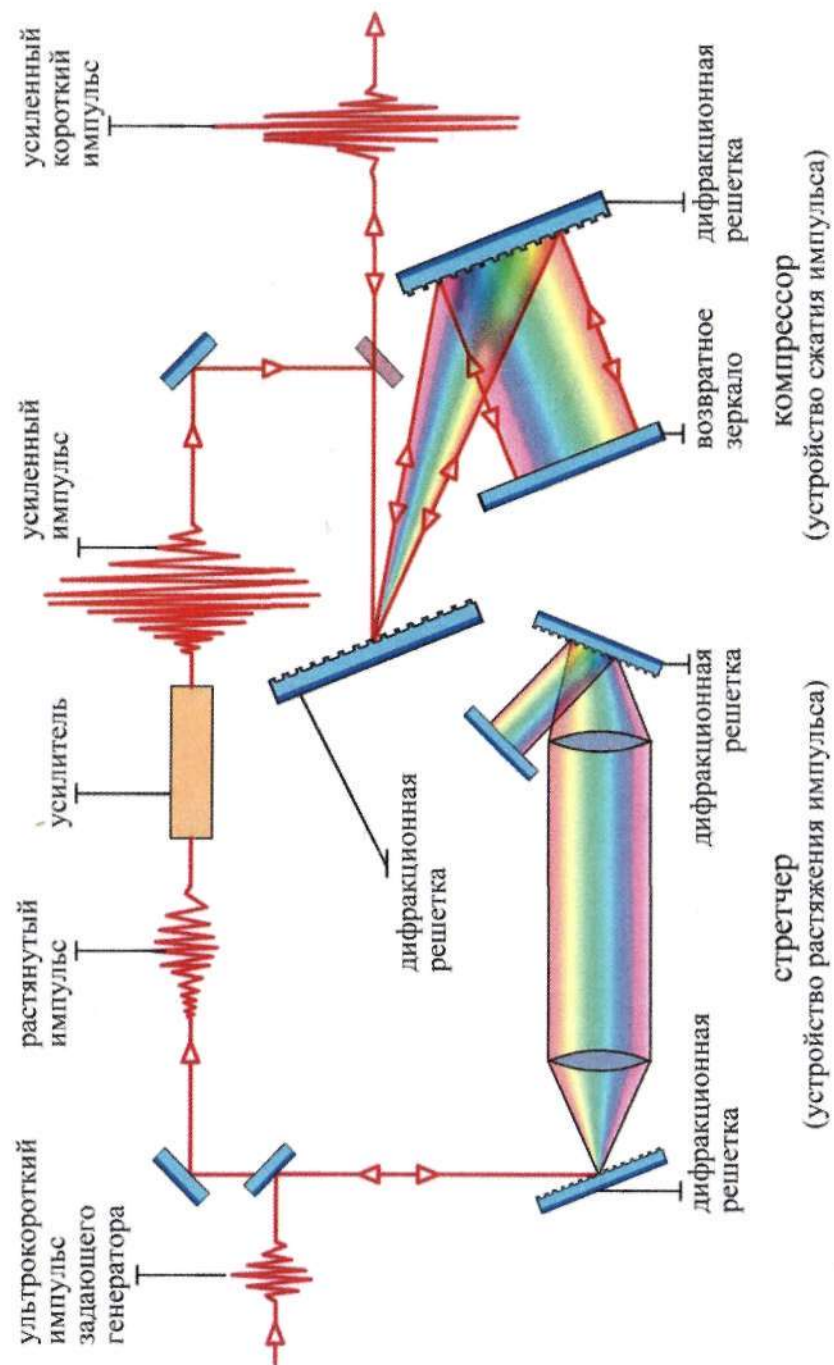


СХЕМА СВЕРХМОЩНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЫ УЛЬТРАКОРОТКОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ



ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

В рентгеновских лазерах предполагается использовать эффект перехода электронов на внутренних оболочках атомов или ионов. Основная трудность создания таких лазеров связана с тем, что по мере продвижения в область все более коротковолнового диапазона коэффициент усиления лазерного излучения резко падает. В связи с этим возникает необходимость значительного увеличения интенсивности накачки и, соответственно, больших энергозатрат для создания инверсии в данных лазерах. Для накачки активных сред рентгеновских лазеров можно использовать энергию мощных ($> 10^{12}$ Вт) лазерных установок или энергию, освобождающуюся после ядерного взрыва. В связи с трудностями создания резонатора, эффективно работающего в области длин волн генерации рентгеновских лазеров (10^{-4} — 10^{-3} мкм) на современном этапе исследования ограничиваются вопросами достижения инверсной заселенности, приводящей к сильной сверхсветимости. Поэтому все рассматриваемые к настоящему времени варианты рентгеновских лазеров являются не генераторами излучения, а усилителями.

Один из вариантов рентгеновского лазера, исследовавшихся в США, представляет собой набор тонких металлических проволок, окружающих ядерный заряд, каждая из которых может быть наведена на какую-либо цель. Инверсия возникает за счет мощной ударной волны, создающей вакансии на внутренних электронных оболочках атомов. Предполагаемая мощность излучения 10^{14} Вт, длительность импульса 10^{-9} с, длина волны 0,0014 мкм. Лазерное излучение происходит в момент ядерного взрыва при расширении проволок, пока не уничтожается сама конструкция.

Работы в области создания гамма лазеров находятся в поисковой стадии [18].

В настоящее время существуют в основном теоретические предложения по созданию гамма-лазеров, энергия квантов излучения в которых составляет сотни кэВ (соответственно $\lambda \sim 10^{-6}$ мкм). Однако экспериментальных результатов, однозначно подтверждающих тот или иной вариант пока нет.

В гамма-лазерах предлагается запастись энергией в длительных изомерических состояниях ядер. Если всего 1 % ядер твердого тела

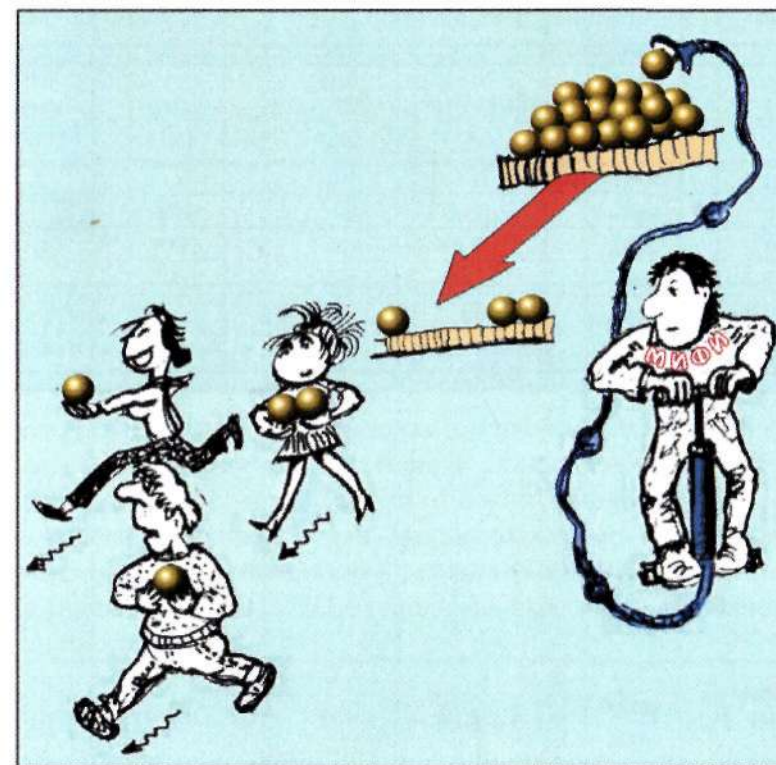
возбудить до уровня 100 кэВ, то общий запас энергии в 1 литре будет 1 ГДж.

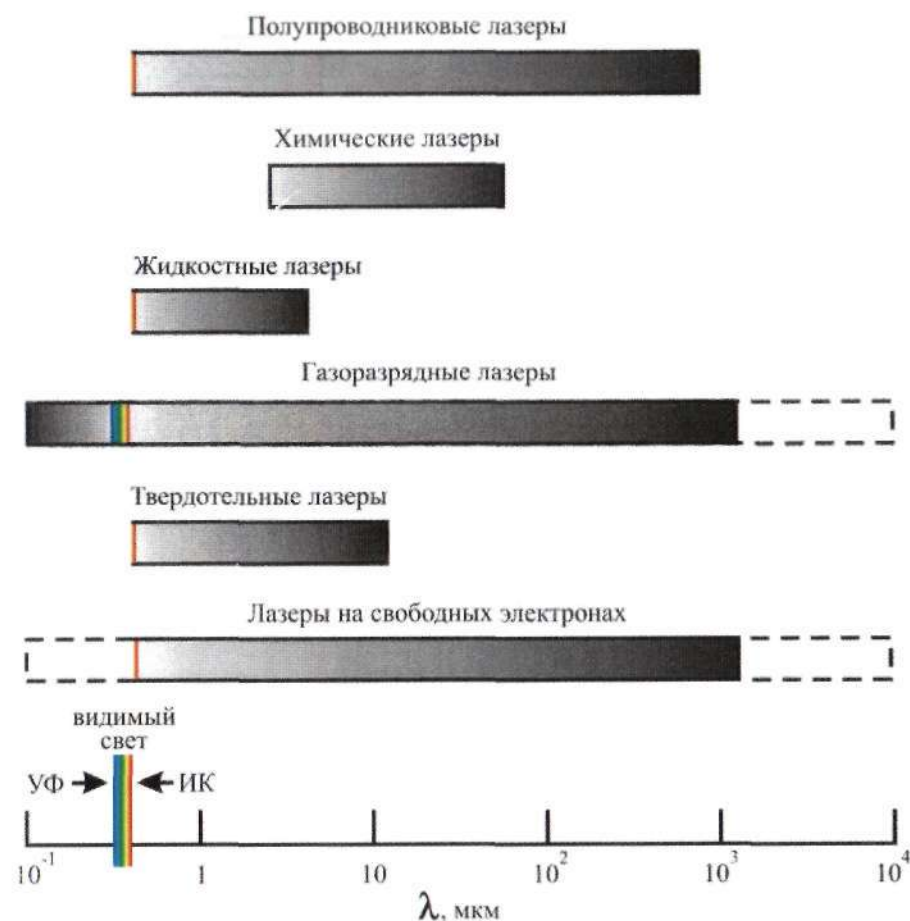
Лишь немногие элементы обладают необходимой структурой уровней, состоящей из долгоживущих изомеров. Накачка должна осуществляться очень быстро, так как верхний уровень имеет малое время жизни. И, наконец, так же как и в случае рентгеновского лазера выход энергии должен осуществиться быстрее, чем разрушится кристаллическая решетка.

ПРИМЕНЕНИЕ

Оптическая и ядерная спектроскопия, физика твердого тела, нейтронная физика, технология.

19 ВСЕ ОСТАЛЬНЫЕ ТИПЫ ЛАЗЕРОВ (КОТОРЫЕ ПРИДУМАЮТ МИФИСТЫ)





Как видно, этот диапазон длин волн достаточно широк (0,1—10³ мкм). Помимо длины волны в широких диапазонах могут меняться и другие параметры: мощность — от милливаттного до мегаваттного уровня; длительность лазерного импульса — от миллисекунд (в импульсных твердотельных лазерах) до фемтосекунд (в лазерах с синхронизацией мод). Большое разнообразие типов лазеров и их выходных параметров приводит к огромному полю их современных применений.

ЛАЗЕРНАЯ АЗБУКА

А	Активная среда	основной элемент усилителя или генератора когерентного излучения, в котором осуществляется инверсия населенностей энергетических уровней.
Б	Безызлучательный переход	переход квантовой системы (атома, молекулы, иона и др.) с одного уровня энергии на другой, не сопровождающийся испусканием, поглощением фотона.
В	Возбуждение	процесс, переводящий систему (атом, молекулу и др.) из состояния с меньшей энергией в состояние с большей энергией
	Волновой фронт	геометрическая поверхность, на которой фаза волны одинакова.
	Время жизни	средняя продолжительность пребывания атома, молекулы и др. квантовой системы в состоянии с определенной энергией.
	Вынужденное излучение	излучение атомов или молекул под действием внешнего электромагнитного поля (излучения).
Г	Газовый лазер	лазер, в котором активной средой является газ или смесь газов
	Газодинамический лазер	газовый лазер, в котором инверсия населенностей в предварительно нагретом газе реализуется в результате быстрого расширения и охлаждения в сверхзвуковом сопле.
	Газоразрядный лазер	газовый лазер, в котором инверсия населенностей уровней создается за счет возбуждения атомов или молекул газа при соударениях с электронами, образующимися в электрическом разряде.
	Генерация	вынужденное излучение когерентных электромагнитных волн в среде с инверсной населенностью.

Д	Диффузор	устройство в виде сходяще-расходящегося канала устанавливаемое непосредственно за резонатором и предназначенное для плавного преобразования динамического давления отработанного рабочего газа в статическое давление с минимальными потерями.
	Дифракционная расходимость	отношение длины волны лазерного излучения к линейному размеру сечения лазерного пучка.
	Диффузионный распад плазмы	уменьшение концентрации заряженных частиц в разрядном объеме, происходящее вследствие их диффузии на стенки, ограничивающие данный объем.
Е	Естественная ширина	ширина спектральной линии определяемая временем жизни частицы на возбужденном уровне при отсутствии на нее внешних воздействий
Ж	Жидкостный лазер	устройство, в котором генерация света осуществляется за счет возбуждения жидкой рабочей среды излучением лазеров или ламп накачки.
З	Запрещенный переход	излучательный переход атома, молекулы или другой квантовой системы с одного уровня на другой, вероятность которого равна нулю, либо очень мала в соответствии с квантовомеханическими правилами отбора.
И	Импульсный лазер	лазер, генерирующий одиночный импульс или последовательность импульсов излучения.
	Инверсная населенность	неравновесное распределение населенностей энергетических уровней атомов или молекул вещества, при котором число частиц на верхнем уровне из пары данных уровней больше, чем на нижнем.
К	Когерентность	согласованное протекание во времени нескольких колебательных или волновых процессов.
	Коэффициент полезного действия лазера	отношение энергии (мощности) лазерного излучения к энергии (мощности), затраченной

		на возбуждение рабочей среды лазера.
Л	Лазер	источник когерентного излучения
М	МИФИ	один из ведущих государственных университетов Российской Федерации, готовящих специалистов по физике плазмы и лазеров
	Метастабильный уровень	возбужденный уровень энергии атома, молекулы и другой квантовой системы, с большим временем жизни.
	Многолучевой волноводный лазер	лазерное устройство, представляющее собой набор отдельных лазеров с индивидуальными резонаторами или общим резонатором, выходящее излучение которого состоит из отдельных пучков.
	Модуляция добротности лазера	управляемое изменение коэффициента потерь в резонаторе лазера с целью генерации коротких импульсов излучения большой мощности.
Н	Накачка	процесс создания инверсного распределения частиц по уровням энергии под действием внешнего источника энергии.
	Населенность энергетического уровня	число частиц квантовой системы, находящихся на данном энергетическом уровне.
	Неодимовое стекло	силикатное или фосфатное стекло с добавками активных ионов неодима Nd^{3+} .
О	Основной уровень	энергетический уровень атома, молекулы и другой квантовой системы с минимальным значением энергии.
	Основная волноводная мода	тип колебаний электромагнитного поля в волноводном резонаторе, соответствующий распространению волн вдоль его оптической оси.
П	Полупроводниковый лазер	лазер, в котором вынужденное излучение представляет собой рекомбинационное излучение в p-n переходе полупроводникового материала.

Р	Рабочий переход	излучательный квантовый переход между энергетическими уровнями системы на частоте усиления или генерации.
	Резонатор	система с положительной обратной связью для накопления энергии колебаний (в случае оптического резонатора – система зеркал).
С	Синхронизация излучения	осуществление совместной генерации отдельных лазеров в наборе котором фазы их световых полей жестко связаны друг с другом.
Т	ТРИНИТИ	один из основных научных центров Российской Федерации в области физики и техники лазеров.
	Тепловая линза	линза, возникающая в активной среде твердотельных лазеров из-за неоднородного температурного поля, которое приводит к термоупругим напряжениям, вызывающим оптические искажения.
У	УФ-предыонизация	предварительная подсветка активной лазерной среды ультрафиолетовым излучением, для обеспечения однородного распределения тока в объеме самостоятельного разряда.
Ф	Фотон	квант электромагнитного излучения.
Х	Химический лазер	газовый лазер, в котором основным процессом, приводящим к инверсии населенностей в рабочем веществе и к генерации света является химическая реакция, в результате которой образуются атомы, молекулы или химические радикалы в возбужденном состоянии.
Ц	Цуг	часть волны, ограниченная скачкообразным изменением фазы. Длина цуга зависит от когерентности излучения источника.
Ч	Частота перехода	частота излучения, определяемая разностью энергии двух уровней, между которыми совершается квантовый переход, деленной на

		постоянную Планка.
Ш	Штарка эффект	расщепление спектральных линий в электрических полях.
Щ	Щелевой лазер	газовый лазер с диффузионным охлаждением, у которого один из линейных размеров сечения активной среды много меньше другого
Э	Экимерные молекулы	класс молекул, существующих только в возбужденных состояниях. Лазерный переход в экимерных молекулах происходит между верхним электронным состоянием, имеющим потенциальный минимум, и нижним отталкивательным или слабосвязанным состоянием.
	Электрооптический затвор	устройство, в котором между поляризатором и анализатором со взаимно перпендикулярными осями размещена ячейка с двоякопреломляющей средой, проворачивающей плоскость поляризации проходящего излучения на 90° при приложении электрического напряжения.
Ю	Юстировка резонатора	взаимная ориентация оптических отражателей для повышения добротности резонатора (достижения минимальных дифракционных потерь излучения)
Я	Яркость излучения	величина мощности, излучаемой с единицы площади в единичный телесный угол

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Н. Г. Басов, А. М. Прохоров//ЖЭТФ.-1954.-Том 27.-С. 431. //УФН.-1955.-57.-С. 485.
2. J. P. Gordon, H. J. Zeiger and C. H. Townes//Phys. Rev.-1954.-v. 95.-p. 282.
3. A. L. Schawlow and C. H. Townes//Phys. Rev.-1958.-v. 112.-p. 1940.
4. Н. Г. Басов, О. Н. Крохин, Ю. М. Попов. Генерация, усиление и индикация инфракрасного и оптического излучений с помощью квантовых систем//УФН.-1960.-Том 72.-С. 166.
5. Ч. Таунс. Получение когерентного излучения с помощью атомов и молекул//УФН.-1966.- Том 88.-С. 461.
6. Импульсные CO₂-лазеры и их применения для разделения изотопов-Е. П. Велихов, В. Ю. Баранов, В. С. Летохов и др.: М., Наука, 1983.
7. Справочник по лазерной технике/Под ред. проф. А. П. Напартовича. М.: Энергоатомиздат, 1991.
8. Генераторы когерентного излучения на свободных электронах: Сб. статей/под ред. А. А. Рухадзе. М.: Мир, 1983.
9. Исследования по теории лазеров: Сб. статей/под ред. А. Н. Ораевского. М.: Наука, 1986.
10. В. С. Голубев, Ф. В. Лебедев. Физические основы технологических лазеров.-М.: Высшая школа, 1987.
11. Н. В. Карлов. Лекции по квантовой электронике.-М.: Наука, 1988.
12. М. С. Джиджоев, В. Т. Платоненко, Р. В. Хохлов. Химические лазеры//УФН.-1970.- Том 100.-С. 641.
13. А. Н. Ораевский//ЖЭТФ.-1963.- Том 45.-С. 177; //ЖЭТФ.-1968.- Том 5.-С. 1423.
14. Твердотельные лазеры с накачкой лазерными диодами – перспективные источники когерентного излучения.-М.: ЦНИИ «Электроника», 1989.
15. Ондюляторные излучения, лазеры на свободных электронах: Сб. статей/под ред. П. А. Черенкова (Труды ФИАН, гл. редактор Н. Г. Басов), М.: Наука, 1993.
16. Л. П. Гудзенко, С. И. Яковленко. Плазменные лазеры.-М.: Атомиздат, 1978.
17. О возрастании мощности генерации лазера на CO₂ под воздействием пучка быстрых протонов. М. Андрияхин, Е. П. Велихов, С. А. Голубев, С. С. Красильников, А. М. Прохоров, В. Д. Письменный, А. Т. Рахимов//Письма ЖЭТФ.-1968.- Том 8.-С. 346.
18. В. И. Высоцкий, Р. Н. Кузьмин. Гамма-лазеры.-М.: изд-во МИУ, 1989.
19. О. В. Богданкевич. Полупроводниковые лазеры с накачкой электронным пучком//Квантовая электроника.-1994.- Том 21.-С. 1113.
20. Мощные ИК-лазеры на переходах атома Хе/О. В. Середа, В. Ф. Тарасенко, А. В. Феденеев, С. И. Яковленко//Квантовая электроника.-1993.-т. 20, № 6.
21. А. А. Ионин. Отечественные разработки мощных лазеров на моноокиси углерода//Квантовая электроника.-1993.- Том 20.-С. 113.
22. Г. А. Месяц, В. В. Осипов, В. Ф. Тарасенко. Импульсные газовые лазеры.-М.: Наука, 1991.
23. О. Звелто. Принципы лазеров.-М.: Мир, 1990.
24. В. Ю. Баранов, В. М. Борисов, Ю. Ю. Степанов. Электро-разрядные эксимерные лазеры на галогенидах инертных газов.-М.: Энергоатомиздат, 1988.
25. A. F. Glova//Laser Physics.-2000.-v. 10.-pp. 975—993.
26. А. Ф. Глова. Синхронизации излучения лазеров с оптической связью//Квантовая электроника.-2003.-Том 33.-С. 283—306.
27. Экспериментальные исследования и численное моделирование щелевого волноводного CO₂-лазера с высокочастотной накачкой/А. И. Дутов, И. Ю. Евстратов, В. Н. Иванова и др.//Квантовая электроника.-1996.-Том 23.-С. 288.
28. К. Контаг, М. Каршевский, К. Стивен. Теоретическое моделирование и экспериментальное исследование ИАГ: Уб-лазера на тонком диске с диодной накачкой//Квантовая электроника.-1999.-Том 28.-С. 139.
29. П. Г. Крюков. Лазеры ультракоротких импульсов//Квантовая электроника.-2001.-Том 31.-С. 95—119.
30. В. И. Чижиков. Твердотельные лазеры с диодной накачкой//Саровский образовательный журнал.-2001.-Том 7.-С. 103—107.
31. V. Gapontsev, W. Krupke. Fiber lasers grow in power//Laser Focus World.-2002.-Aug.-pp. 83—87.
32. Квантовая электроника. Маленькая энциклопедия/отв. ред. М. Е. Жаботинский.-М.: Советская энциклопедия, 1969.
33. Машиностроение. Энциклопедия/Под ред. К. В. Фролова. Том 25, Книга 2, раздел 7, глава 7.2. «Лазерная техника».-М.: Машиностроение, 2005.

Учебное издание

Серия

Учебная книга по диагностике плазмы

**Владимир Евгеньевич Черковец, Станислав Александрович Казаков,
Валерий Григорьевич Наумов**

**ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА ДЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
И ПРАКТИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ**

Редактор В. И. Борисов

Оригинал-макет изготовлен Т. Г. Юшковой

Подписано в печать 15.12.06 Формат 60x84 1/16

Печ. л. 3,5. Уч.-изд. л. 3,5. Тираж 300 экз.

Изд. № 073-1

Заказ № 1219-5

**Московский инженерно-физический институт
(государственный университет)
Москва, Каширское ш., 31**

**Типография издательства «ТРОВАНТ»,
142191, г. Троицк Московской обл., м/р В, д. 52**

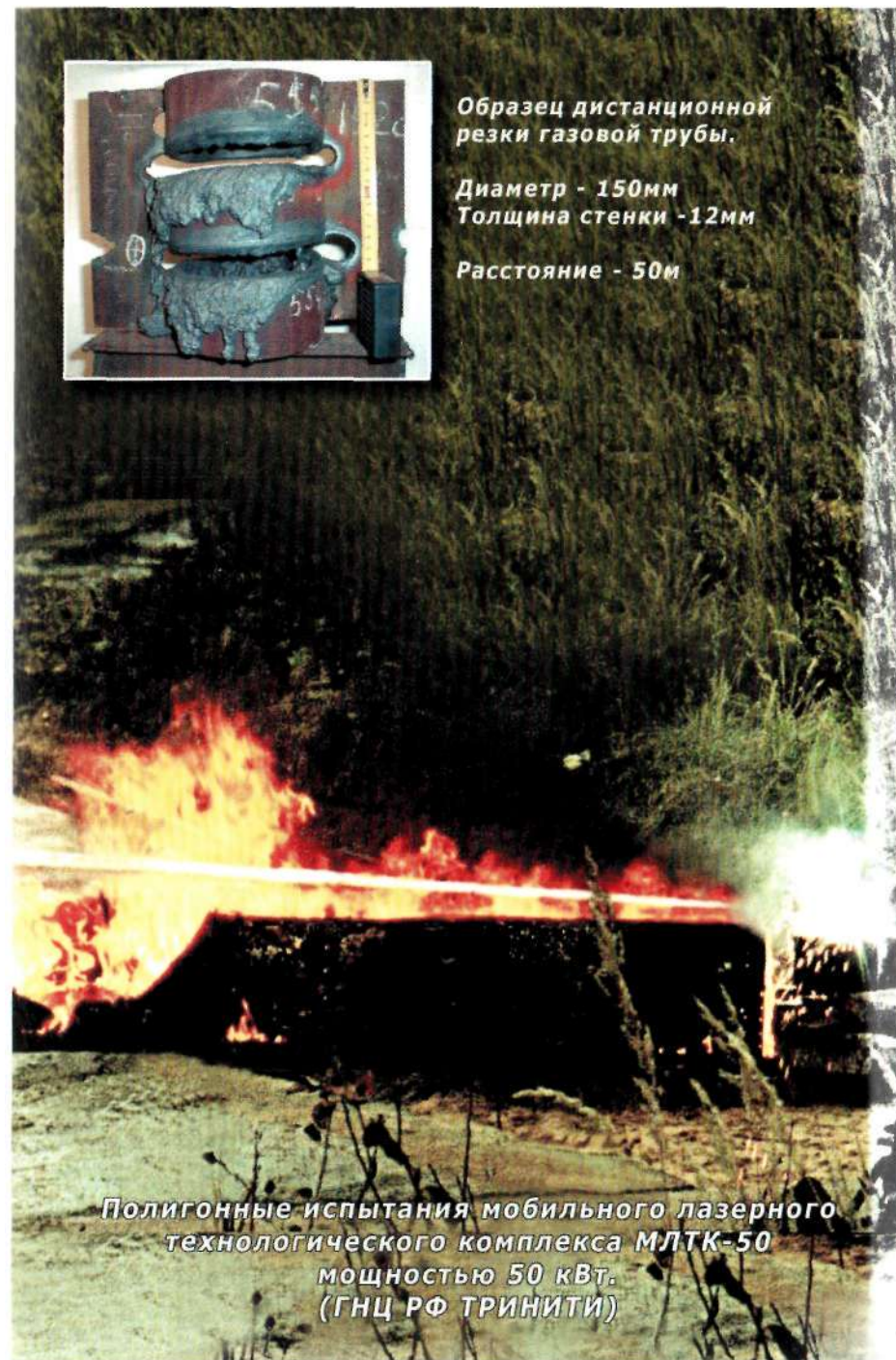


**Образец дистанционной
резки газовой трубы.**

Диаметр - 150мм

Толщина стенки - 12мм

Расстояние - 50м



**Полигонные испытания мобильного лазерного
технологического комплекса МЛТК-50
мощностью 50 кВт.
(ГНЦ РФ ТРИНИТИ)**