

# Квантроны твердотельных лазеров с поперечной полупроводниковой накачкой

С.Г.Гречин, П.П.Николаев

*Рассмотрены основные конфигурации квантронов твердотельных лазеров с поперечной полупроводниковой накачкой. Проведен сравнительный анализ достижимых характеристик излучения лазеров с такими квантронами.*

**Ключевые слова:** твердотельные лазеры, полупроводниковая накачка, квантрон, параметры излучения лазеров.

	Содержание
1. Введение. . . . .	1
2. Схемы накачки активных элементов. . . . .	2
3. Схемы поперечной накачки. . . . .	2
4. Схемы накачки цилиндрических элементов. . . . .	3
4.1. Схемы с прямым вводом излучения накачки	
4.2. Схемы с оптическими системами подвода излучения накачки	
5. Схемы накачки прямоугольных элементов. . . . .	11
5.1. Схемы с зигзагообразным распространением лазерного излучения	
5.2. Схемы со скользящим падением лазерного излучения	
5.3. Схемы с квазипродольной накачкой	
5.4. Другие схемы накачки «слэб» элементов	
6. Заключение. . . . .	16
7. Литература. . . . .	16

## 1. Введение

Твердотельные лазеры (ТТЛ) с полупроводниковой накачкой активно используются при решении различных задач науки и техники. Из общего объема продаж ТТЛ в 2006 году на долю таких лазеров приходится около 30 % [1], и эта доля продолжает расти. По сравнению со своими предшественниками, ТТЛ с ламповой накачкой, они обладают рядом важных преимуществ, одним из которых является на порядок больший коэффициент полезного действия, т. к. полупроводниковые диоды характеризуются высокой эффективностью преобразования мощности электрического питания в мощность оптического излучения, которая достигает 60 %. Кроме того, у этих диодов сравнительно узкий (шириной 2–5 нм) спектр излучения, который можно хорошо согласовать со спектром поглощения ионов активатора. За счет малой инерционности полупроводниковых излучателей легко обеспечивается стабилизация выходных параметров лазерного излучения. ТТЛ с полупроводниковой накачкой имеют высокую надежность и большой ресурс работы. У современных полупроводниковых диодов ресурс

работы превышает 10 тыс. часов, и уже появились источники с ресурсом работы 1 млн. часов. Отсутствие в спектре излучения полупроводниковых диодов УФ составляющей позволяет увеличить срок службы активных элементов за счет исключения радиационного окрашивания кристаллов и образования центров окраски, а также предотвратить химическое разложение хладагента в системе охлаждения квантрона. Применение полупроводниковой накачки позволяет получать значительно более высокие мощности выходного излучения за счет большой плотности мощности накачки. ТТЛ с полупроводниковой накачкой имеют малые размеры, требуют менее мощных и габаритных систем охлаждения, электропитания и управления. Однако при всех преимуществах у таких ТТЛ есть существенный недостаток – большая стоимость, определяемая большой стоимостью полупроводниковых диодов (около \$ 10 – \$ 20 за 1 Вт). Тем не менее их стоимость с каждым годом уменьшается и по прогнозам будет стремиться к \$ 1 за 1 Вт. Однако этот недостаток в значительной степени компенсируется невысокими эксплуатационными затратами.

В последние годы темпы разработок и исследований ТТЛ с полупроводниковой накачкой очень высоки. В связи с этим представляется важным анализ состояния данных исследований в настоящее время и дальнейших тенденций их развития. Основные направления развития ТТЛ с полупроводниковой накачкой были рассмотрены в работе [2]. Одним из ключевых вопросов при разра-

С.Г.Гречин, П.П.Николаев. НИИ радиоэлектронной техники МГТУ им. Н.Э.Баумана, Россия, 107005 Москва, 2-я Бауманская ул., 5; e-mail: gera@bmstu.ru

Поступил в редакцию 26 декабря 2007 г., после доработки – 5 мая 2008 г.

ботке таких ТТЛ является совершенствование конструкции квантронов, которое направлено на достижение максимальной эффективности поглощения излучения накачки в активном элементе при обеспечении необходимого профиля распределения инверсной населенности по его сечению. Общие принципы построения квантронов с ламповой и полупроводниковой накачкой были описаны в работе [3]. Разнообразие областей применения ТТЛ обуславливает различные, часто взаимоисключающие требования к выходным характеристикам таких лазеров. Для удовлетворения этих требований необходимо применение разных схем накачки ТТЛ. К настоящему времени предложено множество вариантов реализаций схем накачки. Они имеют как достоинства, так и недостатки (ограничения), которые определяют конкретные возможные области их применения. В настоящей работе с использованием опубликованных данных представлены основные варианты схем полупроводниковой поперечной накачки ТТЛ. Особое внимание уделяется квантронам лазеров со средними мощностями в десятки – сотни ватт, которые находят наибольшее практическое применение.

В большинстве работ, где рассматриваются новые схемы квантронов, главный акцент делается на анализе полученных генерационных параметров разработанных с их использованием лазеров и, как правило, не приводятся результаты исследований собственно квантронов. Именно по этой причине в настоящей работе квантроны характеризуются параметрами лазерного излучения. Необходимо также отметить, что основная часть работ посвящена квантронам, работающим в непрерывном и квазинепрерывном режимах, которые наиболее широко используются в практических разработках. Доля работ, посвященных квантронам импульсных лазеров, очень мала, и здесь отдельно они не рассматриваются.

## 2. Схемы накачки активных элементов

Существует два основных способа полупроводниковой накачки активной среды – продольная и поперечная накачка. К первому способу относятся схемы накачки ТТЛ, в которых излучение накачки вводится в активный элемент вдоль его оптической оси (направления распространения генерируемого излучения) или под небольшим углом к ней. Такая схема накачки позволяет создать ТТЛ с высоким КПД и обеспечить генерацию одномодового лазерного излучения и хорошую стабилизацию выходных параметров. Это связано с хорошим согласованием накачиваемого объема активного элемента и объема генерируемой моды, малой длиной резонатора и малым числом юстируемых элементов. Однако схема продольной накачки не позволяет накачать большой объем активной среды. Для этого используется специальная оптика и элементы для ввода излучения, что увеличивает стоимость устройств накачки и приводит к уменьшению эффективности. Кроме того, большую лучевую и тепловую нагрузку испытывает приторцевая область, через которую излучение накачки вводится в активный элемент. С учетом сказанного выше ТТЛ с продольной накачкой являются наиболее предпочтительными в качестве задающих генераторов и источников излучения со средними мощностями в единицы – десятки ватт.

Со времени появления полупроводниковых источников накачки схемы поперечной накачки находят наи-

большее применение в конструкциях ТТЛ, особенно в ТТЛ со средней и высокой мощностями. В схемах поперечной накачки излучение вводится в активный элемент через его образующую (боковую поверхность), что позволяет осуществлять накачку всего объема активной среды без использования сложных систем подвода излучения. Это обеспечивает простое и эффективное масштабирование выходной мощности ТТЛ, а также позволяет реализовать равномерное по объему активного элемента поглощение излучения накачки, что существенно уменьшает тепловую нагрузку на него. В данной работе рассматриваются квантроны с поперечной накачкой, для которых информация представлена наиболее полно.

## 3. Схемы поперечной накачки

В первую очередь стоит отметить, что конструкция квантрона с поперечной накачкой определяется главным образом подходом к реализации схемы накачки активного элемента. Существуют два подхода – накачка с малым числом проходов и многопроходная накачка, определяемые числом проходов излучения накачки через сечение цилиндрического активного элемента. В большинстве работ используется малое число проходов, причем большая часть излучения накачки поглощается преимущественно на первом проходе через активный элемент. Выбором геометрических размеров элементов квантрона, концентрации активатора активного элемента и параметров излучения накачки удается обеспечить формирование требуемого распределения инверсной населенности по сечению. В некоторых работах используется многопроходное распространение излучения накачки при небольшом поглощении излучения за один проход. Это позволяет повысить однородность распределения по сечению инверсной населенности, но выдвигает более жесткие требования к качеству используемых материалов и элементам конструкции.

Независимо от подхода к реализации схемы накачки в конструкции квантрона можно выделить следующие основные элементы и узлы: активный элемент, источник накачки, узел ввода излучения накачки, отражатель. Оптимальные параметры всех этих элементов тесно связаны между собой и требуют комплексного подхода к их рассмотрению. Отправными элементами при проектировании квантрона являются активный элемент и полупроводниковый источник накачки. При выборе активного элемента необходимо решить ряд традиционных вопросов: о материале и форме активного элемента, концентрации активатора, матировке боковой поверхности, способе охлаждения. Спектроскопические, теплофизические и механические свойства наиболее широко применяемых активных сред приведены в работе [4]. Выбор полупроводникового источника накачки сводится к выбору компоновки полупроводниковых излучательных структур. Большинство опубликованных статей посвящено исследованию квантронов для лазеров, работающих в непрерывном и квазинепрерывном режимах. В этих режимах широкое применение находят полупроводниковые линейки. Реже применяются полупроводниковые матрицы, позволяющие формировать излучение с более высокой плотностью мощности, что, однако, до конца не может быть использовано из-за высокой объемной мощности тепловыделения в них, неоднородного нагрева элементов в матрице и, как следствие, увеличения

ширины спектра излучения. Важными вопросами являются способ подвода излучения накачки к активному элементу, а также характеристики отражателя в квантроне. Эти два момента оказывают непосредственное влияние на общую эффективность квантрона. Одним из параметров, характеризующих эффективность квантрона в целом, является эффективность поглощения мощности накачки. При разработке квантрона, как правило, ставится задача получения максимальной эффективности. Другим важным параметром квантрона является распределение инверсной населенности по сечению активного элемента, которое определяется схемой подвода излучения накачки, образующей активного элемента и геометрическими параметрами самого квантрона.

В большинстве работ оптимизация квантрона направлена на формирование равномерного по сечению распределения мощности накачки. Это позволяет, с одной стороны, в полной мере использовать объем активного элемента, а с другой – реализовать параболическое распределение температуры по сечению активного элемента, что дает возможность эффективно компенсировать термооптические искажения традиционными методами линейной оптики. Обратной стороной являются снижение общей эффективности ТТЛ, особенно в одномодовом режиме, и увеличение порога генерации из-за того, что генерируемые моды сосредоточены в основном в приосевой области активного элемента.

#### 4. Схемы накачки цилиндрических элементов

В данных конструкциях цилиндрический активный элемент помещается в стеклянную трубку с хладагентом, по образующей которого на некотором расстоянии размещены полупроводниковые источники накачки. Вокруг трубки с активным элементом располагается диффузный или зеркальный отражатель, в котором имеются окна для подвода излучения накачки к активному элементу. Подвод излучения накачки осуществляется как с использованием вспомогательных оптических систем (цилиндрические линзы, оптические волокна, тонкие пластины, фокусаторы и др.), так и без них (прямой ввод). К достоинствам традиционной схемы следует отнести относительную простоту, низкую стоимость и компактность ее конструкции, а также ее хорошую масштабируемость по мощности. Эта схема обеспечивает получение высоких плотностей мощности накачки на единицу длины активного элемента.

При всех достоинствах традиционной схеме присущи и недостатки. Из возможных форм сечения активного элемента длина окружности имеет наименьшую величину при заданной площади поперечного сечения. Это не позволяет обеспечить эффективное охлаждение всего объема активного элемента, в связи с чем в цилиндрическом активном элементе в большой степени проявляются тепловые эффекты. Перейдем к более детальному рассмотрению экспериментально апробированных поперечных схем накачки.

##### 4.1. Схемы с прямым вводом излучения накачки

Простой и компактной, но, тем не менее, эффективной поперечной схемой накачки цилиндрического элемента является схема с цилиндрическим диффузным отражателем и непосредственным (прямым) подводом излучения [5–16] (рис.1). Отражатель собирается из не-

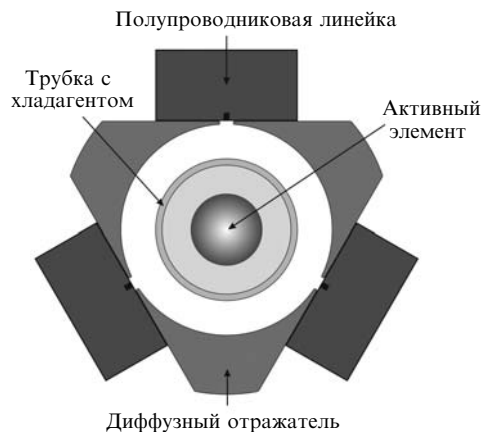


Рис.1. Схема квантрона с диффузным отражателем [5–16].

скольких сегментов диффузно рассеивающего материала (их число зависит от числа входных окон) и имеет диаметр внутренней отражающей поверхности 10–15 мм. Излучение накачки вводится в полость отражателя через узкие входные окна (обычно шириной 0.5–2.0 мм) без помощи какой-либо вспомогательной оптики. Входные окна представляют собой воздушные зазоры между частями диффузного отражателя. Излучающие сборки полупроводниковых диодов располагаются в непосредственной близости от входных окон. Их число вдоль образующей обычно равно трем (реже – пяти). Толщина диффузного отражателя в области входных окон составляет меньше миллиметра. Отсутствие вспомогательной оптики для подвода излучения позволяет избавиться от дополнительных потерь на отражение и поглощение. Внутри отражателя помещается цилиндрический активный элемент со стеклянной трубкой системы охлаждения, на которую нанесено просветляющее покрытие на длину волны накачки. В таком квантроне получено близкое к однородному распределение люминесценции [7] (рис.2).

Иногда диффузное отражающее покрытие наносится непосредственно на внешнюю образующую трубки системы охлаждения [9, 17]. Использование диффузного отражателя наряду с небольшой концентрацией активато-

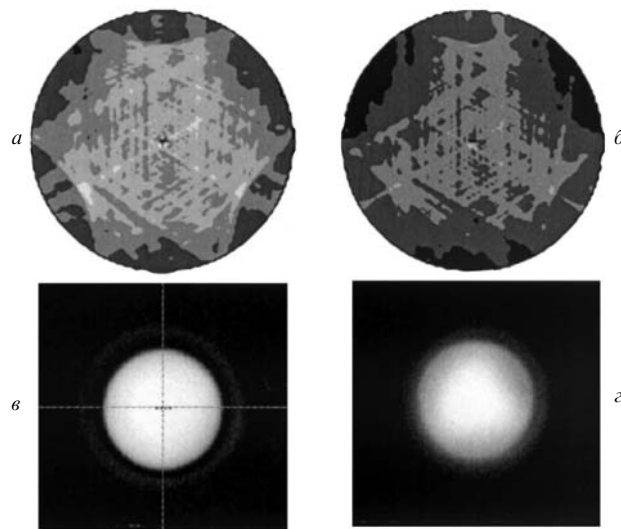


Рис.2. Рассчитанные распределения поглощенной энергии (а, б) и соответствующие им измеренные распределения люминесценции (в, г) по сечению активного элемента диаметром 5 (а, в) и 6 мм (б, г) [7].

Табл.1. Параметры излучения лазеров с квантронами, имеющими диффузный отражатель.

$d_{ac}$ (мм)	$C_a$ (%)	$D_r$ (мм)	$s_w$ (мм)	$N_p$	Матировка	$\eta_{sl}$ (%)	$\eta_{opt}$ (%)	$P_p$ (Вт)	$P_{out}$ (Вт)	Режим генерации	$P/L_p$ (Вт/см)	$M^2$	$F_{th}$ (D)	Литература
4	0.8	12	0.7	3	+	53.4	34.3	182.0	62.4	cw	49.2	45	2.9	[5]
3	0.6	13	1.2	3	+	49.0	29.4	335.0	98.3	cw	47.9	10	5.7	[6]
5	0.6	16	1.3	3	+	49.0	46.7	1070.0	500.0	cw	152.9	—	—	[7]
5	0.6	—	—	3	+	64.7	45.0	1720.0	776.0	cw	—	72	7.1	[8]
3	1.0	10	2.0	3	—	35.2	22.0	400.0	88.0	cw	—	—	—	[9]
4	0.6	12	1.5	3	+	42.1	34.5	400.0	138.0	cw	44.4	75	4.8	[11]
3.5	0.6	12	—	3	—	—	23.1	476.0	110.0	cw	103.5	17	2.5	[12]
7	0.7	—	—	5	—	—	35.9	150.0	53.8	qcw	—	40	4.5	[13]
3	0.6	—	—	3	—	—	16.5	135.0	22.3	qcw	—	1.3	—	[14]
3.5	0.6	12	1.3	3	+	55.1	48.8	434.0	211.6	cw	96.4	19	4.5	[16]

Примечания: активный элемент – YAG : Nd<sup>3+</sup> (1064 нм);  $d_{ac}$  – диаметр активного элемента;  $C_a$  – концентрация активатора;  $D_r$  – диаметр отражателя;  $s_w$  – ширина щели для ввода излучения накачки;  $N_p$  – число источников накачки;  $P_p$  – мощность излучения накачки;  $P_{out}$  – выходная мощность лазерного излучения;  $P/L_p$  – погонная плотность мощности излучения накачки;  $L_p$  – длина накачиваемой области;  $M^2$  – показатель качества пучка лазерного излучения;  $F_{th}$  – сила тепловой линзы активного элемента; cw и qcw – непрерывный и квазинепрерывный режимы генерации.

ра в активном элементе позволяет добиться высокой степени однородности профиля поглощенной мощности накачки за счет большего числа проходов излучения накачки через активный элемент. При использовании высококачественного диффузного отражателя (коэффициент отражения до 99 %) эффективность поглощения мощности накачки может составлять 90 % [5, 11]. Тем самым для лазеров на YAG : Nd<sup>3+</sup> достигаются дифференциальный КПД  $\eta_{sl} \leq 65\%$  [8] и полный КПД  $\eta_{opt} \leq 49\%$  [16] (табл.1).

Основной сложностью при реализации рассматриваемой схемы является точное совмещение излучающей апертуры полупроводниковых диодов накачки с входными окнами [5]. Вдобавок при больших мощностях накачки необходимо охлаждение диффузного отражателя из-за плотного расположения источников накачки и наличия поглощения в диффузно рассеивающем материале.

В работе [7] для схемы с диффузным отражателем теоретически и экспериментально исследовано влияние таких параметров, как диаметр активного элемента, диаметр отражателя и концентрация активатора на эффективность поглощения мощности накачки и профиль ее распределения по сечению активного элемента, и предложена оптимальная комбинация этих параметров. С ростом диаметра отражателя эффективность поглощения уменьшается, но при этом улучшается однородность распределения инверсной населенности по сечению активного элемента. Исходя из этого, авторы [7] выбрали ди-

аметр отражателя 16 мм для активного элемента диаметром 5 мм. В соответствии с этими параметрами определяется оптимальная концентрация активатора (0.6 %).

В работе [9] было проведено детальное исследование влияния размера (ширины) входных окон на эффективность поглощения мощности накачки в активном элементе. Показано, что существует оптимальная ширина окна. При небольшой ширине не все излучение накачки вводится в отражатель, а при большой заметная часть не поглощенного в активном элементе излучения выводится из отражателя. Для рассматриваемой авторами [9] геометрии оптимальная ширина окна составила 2 мм. В табл.1 и 2 приведены использованные в других работах ширины входного окна.

Здесь необходимо отметить, что активные элементы YAG : Nd<sup>3+</sup> с невысокой концентрацией активатора могут быть выращены по технологии горизонтальной направленной кристаллизации, отличной от технологии Чохральского. В этом случае удастся получить высокое оптическое качество активных элементов.

Использование зеркального отражателя вместо диффузного позволяет еще более повысить эффективность поглощения мощности накачки благодаря его более высокому коэффициенту отражения [17–24]. Однако применение зеркального отражателя заметно ухудшает однородность профиля поглощенной мощности накачки из-за сильной фокусировки излучения накачки (зеркальные отражатели в основном имеют цилиндрическую форму). В

Табл.2. Параметры излучения лазеров с квантронами, имеющими зеркальный отражатель.

$d_{ac}$ (мм)	$C_a$ (%)	$D_r$ (мм)	$s_w$ (мм)	$N_p$	$\eta_{sl}$ (%)	$\eta_{opt}$ (%)	$P_p$ (Вт)	$P_{out}$ (Вт)	$P/L_p$ (Вт/см)	$M^2$	$F_{th}$ (D)	Литература
4	0.8	12	1.5	3	35.3	26.0	400.0	104.0	44.4	—	4.8	[11]
2	1.0	—	—	3	21.8	17.0	100.0	17.0	—	—	—	[17]
3	1.0	—	—	3	29.5	24.5	100.0	24.5	—	—	—	[17]
4	1.0	—	—	5	21.0	18.5	542.0	100.0	—	73 × 82	9.1	[18]
6	0.8	12	—	4	36.9	33.3	2400.0	800.0	150.0	74	10.0	[19]
4	0.8	—	1.0	3	44.6	37.5	400.0	150.0	100.0	24	7.7	[20]
4	0.9	10	1.5	3	54.3	46.1	423.0	195.0	—	58	—	[21]
4	0.6	10	1.5	3	12.6	11.7	262.0	30.5	117.5	20	7.0	[22]
4	0.9	—	—	3	46.0	23.6	555.0	131.0	111.0	51	7.7	[23]
4	0.9	—	—	3	40.0	21.8	555.0	121.0	—	34 × 43	—	[24]

Примечания: активные элементы – YAP : Nd<sup>3+</sup> (1341 нм) [18, 24], YAG : Nd<sup>3+</sup> (вторая гармоника, 532 нм) [22], YAG : Nd<sup>3+</sup> (1319 и 1338 нм) [23] и YAG : Nd<sup>3+</sup> (1064 нм) в остальных работах; все лазеры работали в непрерывном режиме генерации; в случае гомоцентрических пучков вместо  $M^2$  указано произведение  $M_x^2 \times M_y^2$ ; обозначения те же, что и в табл.1.

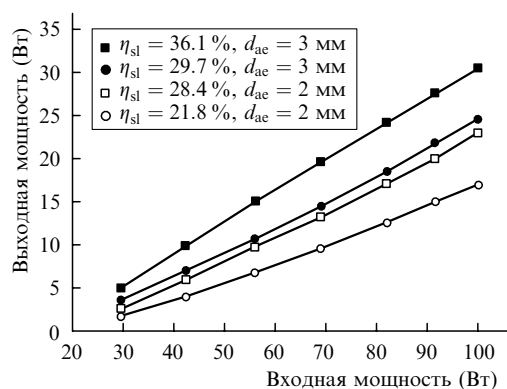


Рис.3. Генерационные характеристики лазера на  $\text{YAG:Nd}^{3+}$  с диффузным (квадраты) и зеркальным (кружки) отражателями [17].

работах [11, 17] приведен сравнительный анализ схем накачки с диффузным и зеркальным отражателями. На рис.3 показаны генерационные характеристики лазера на  $\text{YAG:Nd}^{3+}$  (концентрация неодима 1 %) при использовании разных типов отражателей и разных диаметров активного элемента [17]. Дифференциальный КПД ТТЛ с зеркальным отражателем на 5 % – 10 % ниже, что связано главным образом с худшей однородностью профиля поглощенной мощности накачки.

Для более однородного поглощения излучения накачки необходимо, чтобы пучок внутри активного элемента был коллимированным. Для этого выходную апертуру полупроводниковых диодов следует размещать в переднем фокусе оптической системы, образованной границающими поверхностями трубки, хладагента и активного элемента [11]. При использовании зеркального отражателя и непосредственном подводе излучения накачки к активному элементу эффективность поглощения мощности накачки составляет 94 % [21]. Тем самым для лазеров на  $\text{YAG:Nd}^{3+}$  достигаются дифференциальный КПД  $\eta_{sl} \leq 54\%$  и полный КПД  $\eta_{opt} \leq 46\%$  [21] (табл.2). В качестве материала для зеркального покрытия чаще всего выбирают золото [11, 19, 21, 25], серебро [20] или медь [22]. Из них самой хорошей адгезией обладают покрытия из меди, а наибольший коэффициент отражения имеют серебряные покрытия.

Зеркальное отражающее покрытие может наноситься как на внутреннюю поверхность корпуса цилиндрического отражателя [19] (рис.4,а), так и на внешнюю поверхность трубки системы охлаждения (рис.4,б). В первом случае отражатель состоит из нескольких частей, между которыми оставляются узкие воздушные промежутки для ввода излучения накачки в полость отражате-

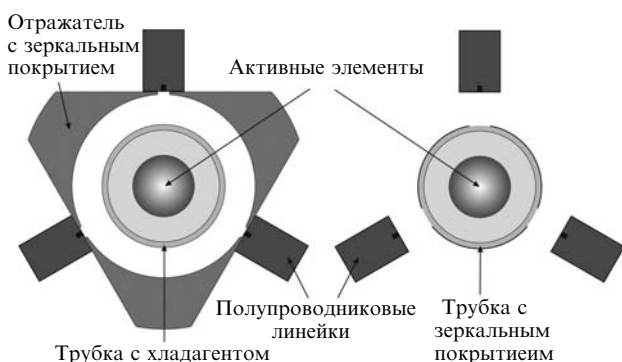


Рис.4. Различные способы реализации квантронов с зеркальными отражателями [17–24].

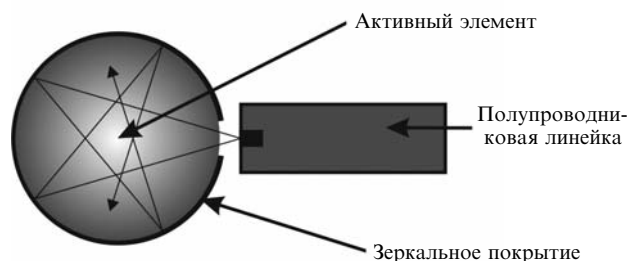


Рис.5. Схема накачки [26–28].

ля. Во втором случае на отражающем покрытии вырезаются узкие окна, через которые вводится излучение накачки. На входные окна обязательно наносится просветляющее покрытие на длину волны накачки.

В ряде работ [21, 22] показано, что можно обойтись и без просветления входных окон. Можно добиться малых потерь при отражении излучения от границы раздела сред, если полупроводниковый излучатель расположить под углом, равным углу Брюстера, к нормали цилиндрической поверхности трубки. При этом поляризация излучения накачки должна быть направлена вдоль оптической оси трубки ( $\pi$ -поляризация).

При относительно небольших мощностях накачки зеркальное покрытие может наноситься непосредственно на цилиндрическую образующую активного элемента [26–28] (рис.5). При этом так же, как и в предыдущем случае (с трубкой), на отражающем покрытии вырезаются узкие окна, которые просветляются на длину волны накачки. Эта схема позволяет получить высокую эффективность поглощения мощности накачки (свыше 90 %) при небольших диаметрах активного элемента (менее 2 мм) [26]. Также несомненными достоинствами данной схемы являются ее простота и воздушное охлаждение активного элемента (его обычно помещают в медный теплоотвод) [28]. Замкнутость системы накачки позволяет снизить чувствительность к точности установки длины волны (или температуры элементов) источников накачки. На рис.6 приведена зависимость эффективности поглощения за один проход через активный элемент (без отражающего покрытия) и за несколько проходов [26].

Как уже отмечалось, главным недостатком цилиндрического зеркального отражателя является сильная фокусировка излучения накачки, что негативным образом сказывается на однородности профиля поглощенной мощности накачки. Для устранения этого недостатка разработчики уходят от традиционной цилиндрической формы отражателя. В ряде работ в качестве отражающих покрытий было предложено использовать цилиндриче-

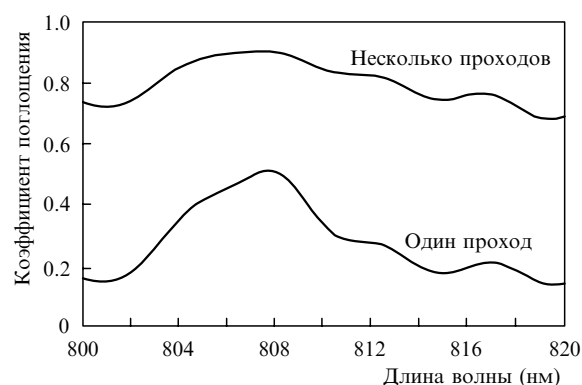


Рис.6. Спектральная зависимость эффективности поглощения [26].

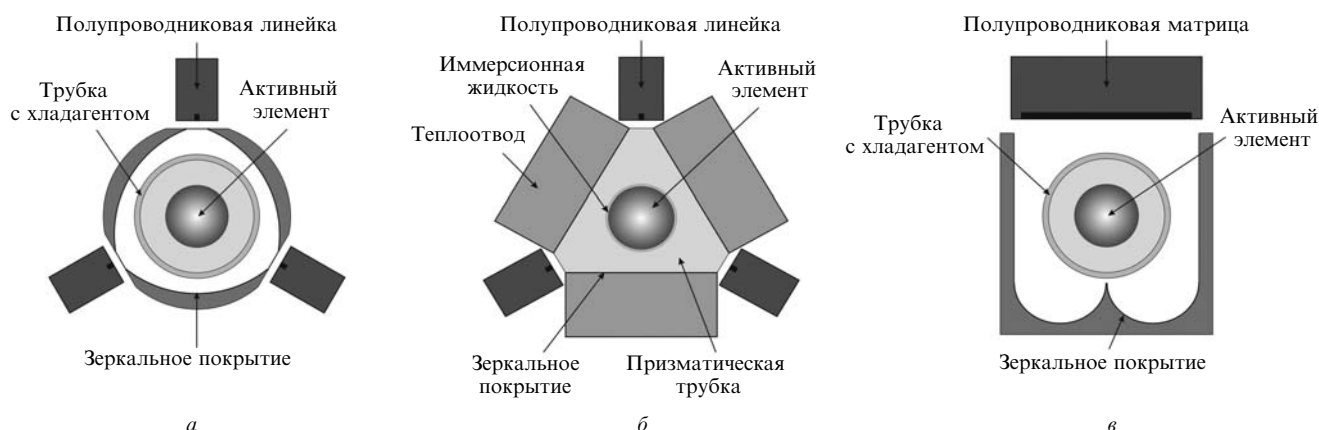


Рис. 7. Схемы квантронов, предложенные в работах [17] (а), [25] (б) и [29] (в).

ские поверхности с увеличенным радиусом [17] (рис. 7, а) или плоские поверхности [25] (рис. 7, б). В работе [29] предложена схема накачки с использованием отражателя оригинальной формы (cusp-shaped), заимствованная у лазерных систем с солнечной накачкой (рис. 7, в). В [30–33] детально исследованы различные модификации схем накачки с призматическими отражателями треугольного сечения (с точки зрения формирования распределения мощности накачки, тепловых полей и термоупругих напряжений в активном элементе).

Стоит уделить большее внимание схеме, приведенной на рис. 7, б [25]. В ней реализована идея боковой накачки цилиндрического активного элемента с «сухим» кондуктивным охлаждением. Треугольный призматический отражатель, изготовленный из  $\text{MgF}_2$  – материала с высокой теплопроводностью, является одновременно и частью системы теплоотвода. Активный элемент находится в оптическом и тепловом контакте с призматическим отражателем благодаря тонкому (толщиной  $\sim 100$  мкм) слою жидкости между ними. При использовании этой схемы накачки для активного элемента  $\text{YLF} : \text{Nd}^{3+}$  удалось получить в многомодовом режиме выходную мощность 72 Вт при дифференциальном КПД  $\eta_{\text{sl}} = 49\%$  и качестве пучка  $M^2 = 8$ . Одной из особенностей используемой конструкции квантрона является то, что наведенные термооптические искажения в активном элементе различаются почти в два раза в полной и центральной (75 % по площади сечения) апертурах активного элемента во всем диапазоне изменения мощностей накачки. Подобное различие характерно для многих квантронов с небольшим числом источников накачки при небольшом числе проходов излучения через активный элемент.

Наиболее простой (с точки зрения конструкции), но при этом наименее эффективной является поперечная схема накачки без внешнего отражателя [34–37]. В отсутствие отражателя излучение накачки должно поглощаться в активном элементе за один проход через него. По этой причине концентрация активатора должна быть достаточно высокой, что сопровождается ухудшением оптических свойств активного элемента. Эта схема неприменима для накачки активных элементов небольшого диаметра из-за малого поглощения за один проход. Однородный профиль поглощенной мощности накачки удастся получить при большом числе излучающих линеек, расположенных вокруг активного элемента (более пяти). Такая схема характеризуется небольшой эффективностью поглощения мощности накачки.

## 4.2. Схемы с оптическими системами подвода излучения накачки

Основным недостатком схем с прямым подводом излучения является невысокая плотность упаковки линеек лазерных диодов вокруг активного элемента, что обусловлено большими поперечными размерами источников накачки. Для получения хорошей эффективности поглощения мощности накачки диаметр диффузного отражателя не должен превышать 10–15 мм [7]. При таких геометрических размерах отражателя вокруг активного элемента в непосредственной близости от отражателя более трех-пяти линеек разместить не удастся. По этой причине невозможно получить высокие плотности мощности накачки на единицу длины активного элемента. Использование большего числа линеек требует их размещения на большем расстоянии от активного элемента, что приводит к необходимости использования оптических систем фокусировки и подвода излучения для согласования размеров накачиваемой области с размерами выходной апертуры. Поскольку любая оптическая система вносит потери, применение оптических систем подвода излучения снижает эффективность поглощения мощности накачки и заметно усложняет конструкцию квантрона, его сборку и юстировку. Кроме того, оптические системы подвода дают заметный вклад в стоимость квантрона.

Одним из вариантов подвода излучения накачки является использование тонких стеклянных пластин [38–44] (рис. 8). В непосредственной близости от одного из концов пластины располагается линейка полупроводниковых диодов, а другой ее конец вводится в полость диффузного отражателя. Торцевые поверхности обоих концов пластины просветляются на длину волны накачки. Излучение накачки распространяется по пластине за счет полного внутреннего отражения от ее боковых граней. Коэффициент передачи излучения накачки через такие пластины равен 97 %–98 % [38–41]. Суммарная эффективность поглощения мощности накачки составляет 89 % [39]. Тем самым для лазеров на  $\text{YAG} : \text{Nd}^{3+}$  достигаются  $\eta_{\text{sl}} \leq 53\%$  [39] и  $\eta_{\text{opt}} \leq 38\%$  [38] (табл. 3).

Использование матриц вместо линеек или поперечное размещение линеек относительно оси активного элемента позволяет получить еще более высокие плотности мощности накачки. При этом для подвода излучения накачки к активному элементу используются специальные фокусаторы (wedge lens, lens duct и др.). Распространяясь в них за счет полного внутреннего отражения, пучок излучения накачки сжимается в несколько раз (обычно в 8–

Табл.3. Параметры излучения лазеров с квантронами, в которых для подвода излучения накачки используются стеклянные пластины.

$d_{ac}$ (мм)	$C_a$ (%)	$N_p$	$\eta_{sl}$ (%)	$\eta_{opt}$ (%)	$P_p$ (Вт)	$P_{out}$ (Вт)	Режим генерации	$M^2$	$F_{th}$ (D)	Литература
4	—	4	41.3	37.8	352.0	133.0	cw	46	—	[38]
4	0.8	2	52.2	29.6	135.1	40.0	cw	80	—	[39]
4	0.6	2	34.3	27.7	140.8	39.0	cw	40	—	[40]
4	0.6	4	33.3	27.8	352.0	98.0	cw	45	3.9	[41]
4	0.6	4	38.4	36.0	322.0	116.0	cw	—	3.1	[42]
4	0.6	4	34.2	25.6	800.0	205.0	cw	11	—	[43]
4	0.6	4	45.8	37.2	296.0	110.0	qcw	17	—	[44]

Примечания: активный элемент – YAG : Nd<sup>3+</sup> (1064 нм); обозначения те же, что и в табл.1.

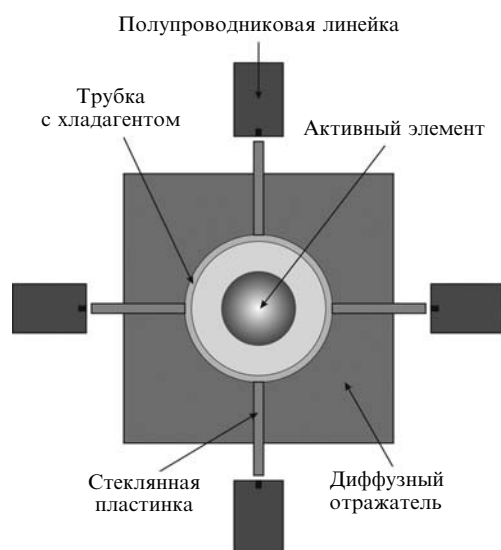


Рис.8. Схема квантрона, в которой для подвода излучения накачки используются стеклянные пластины [38–44].

10 раз) в направлении, перпендикулярном оптической оси активного элемента. Во столько же раз увеличивается расходимость пучка накачки, что обеспечивает более однородную прокачку активного элемента.

В работах [45, 46] представлена схема квантрона с подобным способом подвода излучения накачки при использовании диффузного отражателя (рис.9). Коэффициент передачи излучения фокусаторами достигает 95 %. В этом случае суммарная эффективность поглощения мощности накачки составляет  $\sim 80\%$  при хорошей однородности профиля поглощенной мощности по объему активного элемента. Тем самым для лазеров на YAG : Nd<sup>3+</sup> достигаются  $\eta_{sl} \leq 65\%$  и  $\eta_{opt} \leq 53\%$  [45].

В работе [47] рассматривается схема подвода излучения накачки от трех источников с помощью соединенных в моноблок трех стеклянных фокусаторов (transduct). При использовании этой схемы накачки разработчики получили высокую погонную плотность мощности накачки, равную 250 Вт/см (порог разрушения для кристалла YAG : Nd<sup>3+</sup> составляет около 600 Вт/см), при хорошей однородности распределения инверсной населенности в активном элементе. Из-за низкого коэффициента поглощения в активном элементе и отсутствия внешнего отражателя лазерный излучатель на основе этого квантрона имеет относительно невысокие дифференциальный и полный КПД – 35 % и 29 % соответственно.

Широкое применение в квантронах находят оптические системы подвода излучения на основе цилиндрических оптических элементов, позволяющие увеличить по-

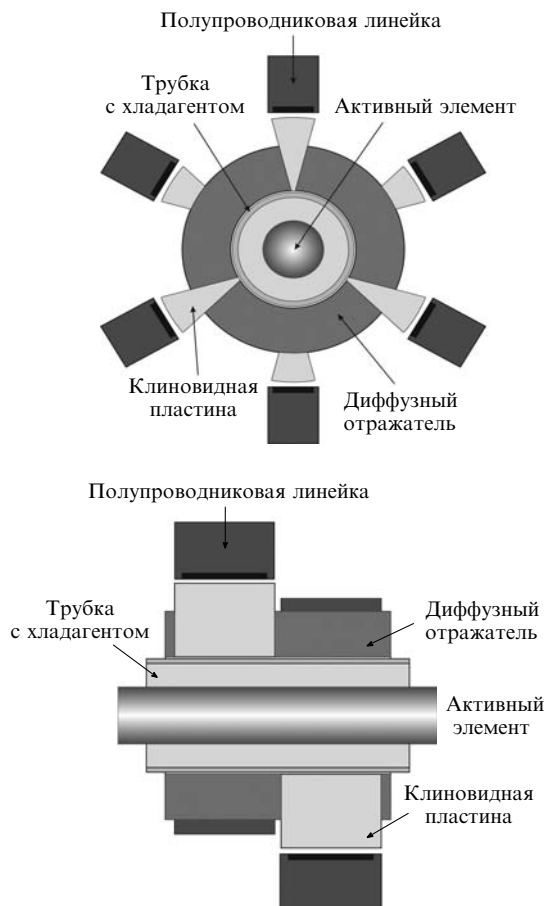


Рис.9. Схемы квантронов, в которых для подвода излучения накачки используются фокусаторы [45, 46].

гонную плотность мощности накачки. Чаще всего в таких системах используются цилиндрические микролинзы (диаметром до 3 мм), которые размещаются в непосредственной близости от полупроводникового излучателя и фокусируют излучение накачки на активный элемент через входные окна на поверхности отражателя [48–53] (рис.10). Указанные системы подвода излучения накачки вносят заметные потери при прохождении через них излучения. Это обусловлено рядом причин, основными из которых являются потери на отражение и поглощение в оптических элементах, а также на виньетирование излучения входными окнами отражателя. В результате эффективность поглощения мощности накачки составляет 60 % – 80 %. Кроме того, профиль поглощенной мощности накачки в активном элементе имеет ярко выраженный максимум на оси этого элемента. При использовании такого квантрона дифференциальный и полный КПД

Табл.4. Параметры излучения лазеров с квантронами, в которых для подвода излучения накачки используются цилиндрические микролинзы.

$d_{ac}$ (мм)	$C_a$ (%)	$N_p$	$\eta_{sl}$ (%)	$\eta_{opt}$ (%)	$P_p$ (Вт)	$P_{out}$ (Вт)	$P/L_p$ (Вт/см)	$M^2$	$F_{th}$ (D)	Литература
4	1.1	9	32.0	29.0	500.0	145.0	55.6	53	7.1	[48]
5	0.9	9	33.3	27.3	1100.0	300.0	61.1	89	6.7	[49]
4	1.1	9	—	31.8	550.0	175.0	61.1	—	4.5	[49]
2	1.0	3	—	23.0	300.0	69.0	—	—	6.7	[50]
2	1.0	3	16.9	12.0	1880.0	225.0	—	—	—	[51]
4	0.6	3	40.8	29.4	9000.0	2650.0	1500.0	—	8.1	[52]
4	—	3	27.7	22.8	850.0	194.0	—	54	13.5	[53]

Примечания: активные элементы – YAG:Yb<sup>3+</sup> (1030 нм) [50–52] и YAG:Nd<sup>3+</sup> (1064 нм) в остальных работах; все лазеры работали в непрерывном режиме генерации; обозначения те же, что и в табл.1.

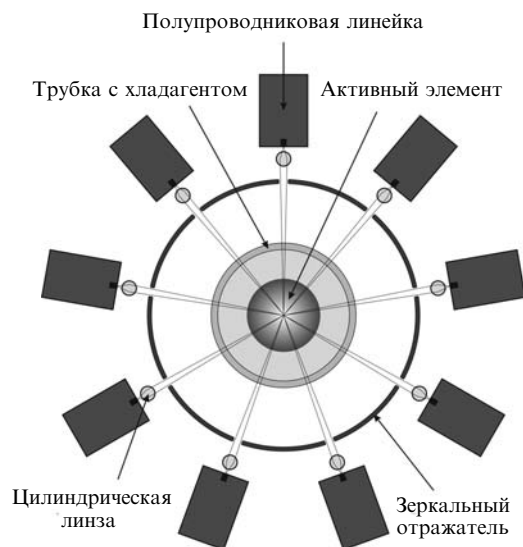


Рис.10. Схема квантрона, в которой для подвода излучения накачки используются цилиндрические микролинзы [48–53].

лазеров на YAG:Nd<sup>3+</sup> достигают 37 % и 32 % соответственно [49] (табл.4). В работах [54,55] рассмотрены аналогичные варианты построения квантронов, но без внешнего отражателя. Общая эффективность таких схем на 10 %–15 % ниже, чем схем с внешним отражателем.

Использование более сложных оптических систем подвода излучения позволяет достичь однородного профиля поглощенной мощности и эффективности поглощения мощности накачки свыше 80 %. При этом существенно возрастают сложность и стоимость конструкции квантрона. В [56,57] предложена схема подвода излучения, состоящая из набора цилиндрических линз и трапециевидных фокусаторов (рис.11). С помощью этой оптической системы излучение вводится внутрь полости диффузного отражателя. Эффективность поглощения мощности накачки составляет 82 %. Данная схема обеспечивает очень хорошую однородность распределения поглощенной энергии (рис.12). При использовании этой схемы накачки для лазеров на YAG:Nd<sup>3+</sup> были достигнуты  $\eta_{sl} \leq 41\%$  и  $\eta_{opt} \leq 32\%$  [57].

Большой эффективностью обладают волоконные системы подвода излучения (рис.13) [58]. Схема накачки с волоконным подводом излучения относительно компактна, конструктивно более проста и рациональна. Эта схема не требует размещения полупроводниковых излучателей вблизи активного элемента, что дает большую свободу выбора конструкции квантрона, позволяет уменьшить его массогабаритные параметры, а также получить большие плотности мощности накачки – свыше 200–300

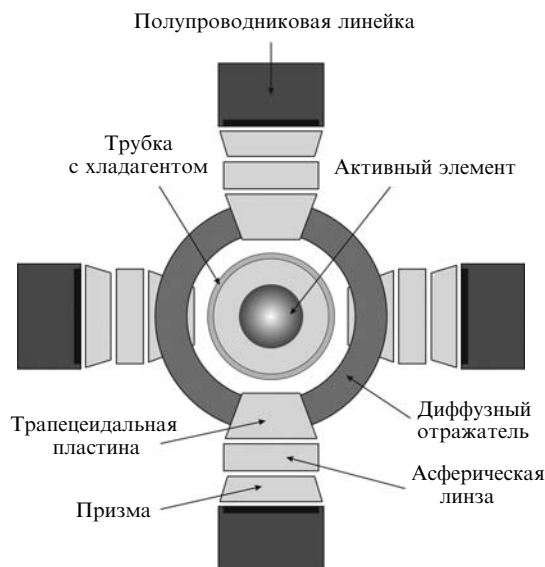


Рис.11. Схема квантрона, предложенная в работах [56,57].

Вт/см. Главным недостатком опять является большая стоимость и сложность такой системы подвода излучения (в первую очередь эффективной оптической системы ввода излучения в волокно). При использовании волоконного подвода излучения для лазеров на YAG:Nd<sup>3+</sup> были достигнуты  $\eta_{sl} \leq 46\%$  и  $\eta_{opt} \leq 43\%$  [58].

В работе [59] предложена оригинальная схема волоконного подвода излучения накачки к активному элементу (рис.14). Оптические волокна, по которым оно подводится, размещаются вплотную к образующей активного элемента вдоль его оптической оси. У оптического волокна в

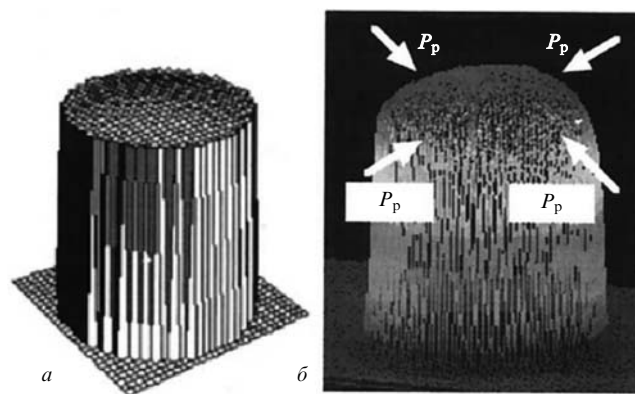


Рис.12. Рассчитанное распределение поглощенной энергии (а) и измеренное распределение люминесценции (б) по сечению активного элемента [56,57].



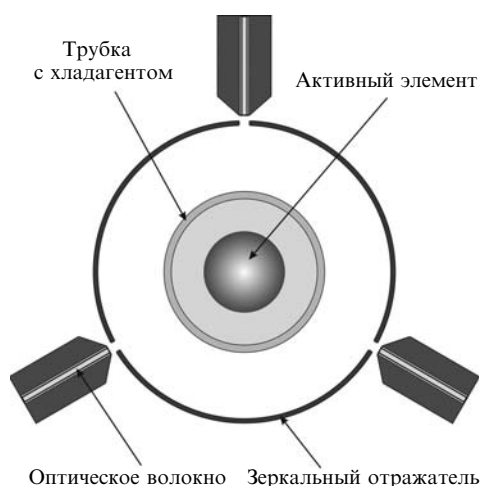


Рис.13. Схема квантрона с волоконной системой подвода излучения накачки [58].

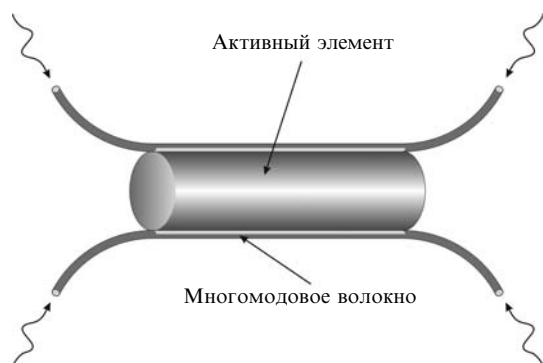


Рис.14. Схема волоконной накачки [59].

области контакта его с поверхностью активного элемента удаляется оболочка, и поскольку показатель преломления активного элемента больше, чем у центральной жилы волокна, излучение из волокна вводится в активный элемент. Эффективность поглощения излучения накачки в такой схеме достигает 90 %. При большом числе волокон вокруг образующей удается получить большую плотность мощности накачки и хорошую однородность профиля поглощенной мощности накачки.

Еще одним способом доставки излучения накачки к активному элементу является использование параболического концентратора [60]. Концентратор представляет собой конструкцию из двух соединенных параболических сегментов, фокусы которых лежат на противоположных сегментах (рис.15). Один конец концентратора заведен в полость диффузного отражателя, а у другого конца размещается сборка полупроводниковых диодов. Коэффициент сжатия пучка достигает 13, что дает большую расходимость излучения накачки и обеспечивает высокую однородность профиля поглощенной мощности накачки. Коэффициент передачи излучения такой системы равен ~90 %.

Практический интерес представляет схема накачки, предложенная в [61 – 67]. В этой схеме излучение накачки с помощью системы цилиндрических линз и поворотных зеркал фокусируется на активный элемент (рис.16). Всего в схеме находятся 32 подобных канала накачки, расположенные симметрично относительно боковой поверхности активного элемента. Распространение излучения на-

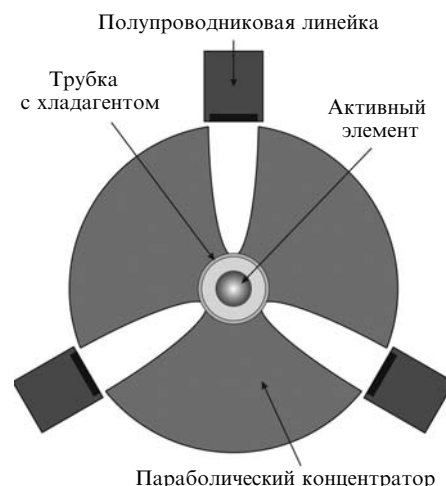


Рис.15. Схема квантрона с параболическим концентратором для подвода излучения накачки [60].

качки в полости зеркального отражателя с многократным прохождением его через активный элемент обеспечивает однородное поглощение. Поворотом зеркал поперек оптической оси излучение накачки фокусируется в нужную область внутри активного элемента, тем самым появляется возможность варьировать в широких пределах профиль поглощенной мощности накачки в активном элементе. Эта схема накачки позволяет сформировать гауссов профиль инверсной населенности, что обеспечивает эффективную генерацию низшей  $TEM_{00}$ -моды (табл.5). В одномодовом режиме дифференциальный КПД лазеров с такой схемой накачки достигает 56 % [61], а эффективность поглощения мощности накачки – 90 %. Рассчитанные распределения поглощенной энергии при различных углах поворота зеркал показаны на рис.17.

В [68 – 70] представлена схема подвода излучения накачки с помощью эллиптических зеркал, заимствованная из систем с ламповой накачкой. Эллиптические сегменты жестко соединены с корпусом полупроводникового излучателя. В одном из фокусов каждого эллиптического сегмента размещается активный элемент, а в другом – выходная апертура линейки полупроводниковых диодов (рис.18). Коэффициент передачи излучения накачки такой схемы составляет ~80 %. Из-за сильной фокусировки излучения эллиптическими отражателями профиль поглощенной мощности накачки имеет большую неоднородность.

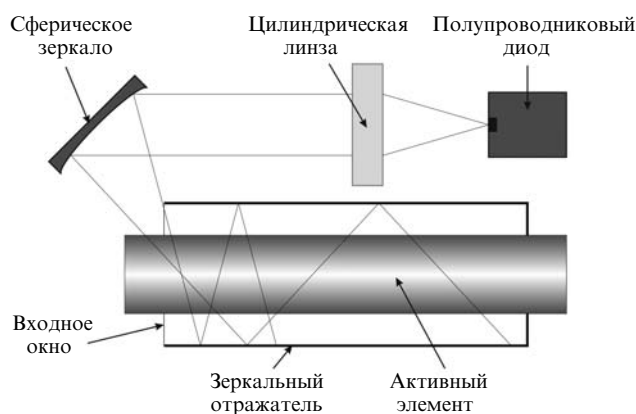


Рис.16. Схема квантрона, предложенная в работах [61 – 67].

Табл.5. Параметры излучения лазеров с квантроном, схема которого показана на рис.16.

$d_{ac}$ (мм)	$C_a$ (%)	$\eta_{sl}$ (%)	$\eta_{opt}$ (%)	$P_p$ (Вт)	$P_{out}$ (Вт)	$M^2$	$F_{th}(D)$	Литература
3	0.6	41.2/56.4	31.3/17.0	101.0/166.0	31.6/28.2	–/1.2	4.0	[61]
3	0.6	–/–	33.0/18.6	291.0/199.0	96.0/37.0	–/–	–	[62]
4	0.6	–/46.2	–/14.4	–/291.0	–/42.0	–/–	2.9	[63]
4	0.6	25.0/–	20.0/–	150.0/–	30.0/–	–/–	–	[64]
3	0.6	–/44.8	–/12.8	–/149.0	–/19.0	–/1.1	–	[65]
3	1.0	16.5/–	12.5/–	290.0/–	36.3/–	–/–	7.7	[66]
4	0.6	40.1/–	37.9/–	290.0/–	110.0/–	6/–	–	[67]

Примечания: активный элемент – YAG: Nd<sup>3+</sup> (1064 нм); все лазеры работали в непрерывном режиме генерации; слева от косой черты – значения для многомодового режима, справа – для одномодового; обозначения те же, что и в табл.1.

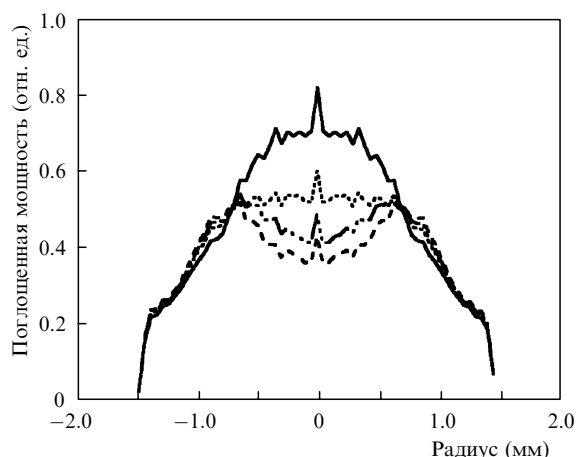


Рис.17. Рассчитанные распределения поглощенной мощности при различных положениях зеркала [61–67].

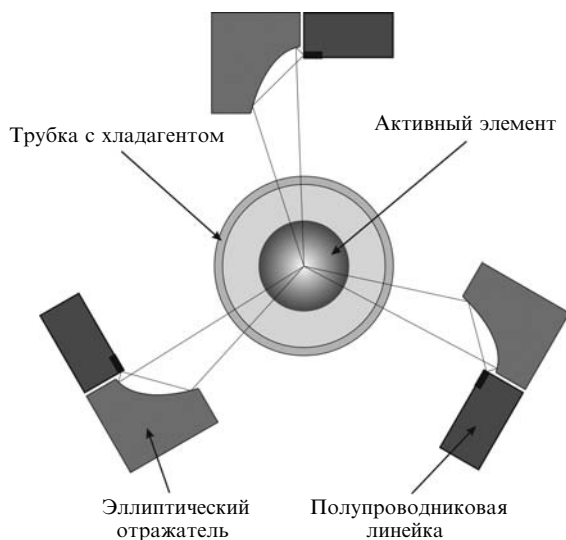


Рис.18. Схема квантрона, в которой для подвода излучения накачки используются эллиптические зеркала [68–70].

С исследовательской точки зрения стоит еще обратить внимание на работы [71–75], в которых подробно рассматривается вопрос об эффективности запасаения энергии накачки (отношение запасенной энергии к энергии накачки) при разных формах и материалах отражателя. На рис.19 изображены схемы поперечной накачки активного элемента с отражателями разной формы. В этих схемах цилиндрический активный элемент помещается внутри отражателя в твердую иммерсионную среду с близким показателем преломления. Это позволяет добиться более однородного профиля инверсной населенности. Отражающее покрытие может быть зеркальным и диффузным. Зависимости эффективности запасаения энергии накачки от оптической плотности среды для приведенных на рис.19 схем накачки при использовании зеркального отражателя показаны на рис.20.

Кроме того, в [71–75] анализируется влияние на эффективность запасаения энергии накачки таких параметров, как коэффициент отражения, ширина входных окон и расходимость излучения накачки.

Существует много альтернативных способов получения однородного профиля поглощенной мощности накачки по сечению активного элемента. Одним из них является матирование цилиндрической образующей активного элемента [5–8, 21, 50–52, 56, 57]. В матированных активных элементах, по сравнению с полированными, достигается более однородный профиль поглощенной мощности накачки за счет отсутствия фокусировки излучения накачки цилиндрическими поверхностями. Кроме того, матирование позволяет подавить паразитные осцилляции поля на границах активного элемента (моды шепчущей галереи) и при отражении от стенок отражателя. Это особенно важно при работе лазеров в режиме модуляции добротности, в котором неподавленные паразитные осцилляции существенно уменьшают накопленную инверсную населенность. Однако матирование приводит к появлению на образующих поверхностных микротрещин, которые приводят к существенному снижению термомеханического порога разрушения активного элемента. Возможно также матирование и внутрен-

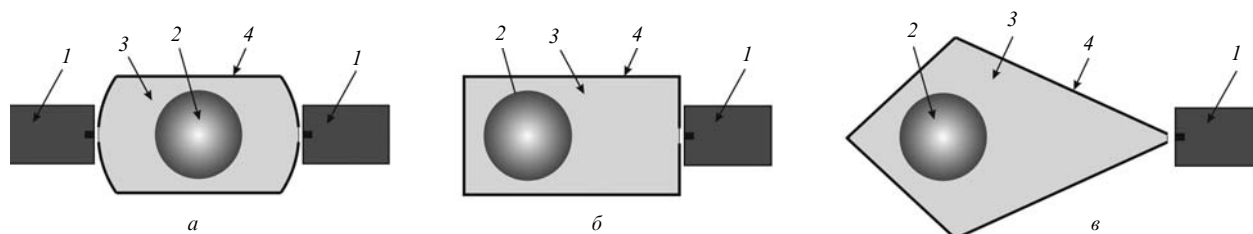


Рис.19. Схемы поперечной накачки с отражателями разной формы:

1 – полупроводниковый диод накачки; 2 – активный элемент; 3 – полость отражателя; 4 – отражающее покрытие [71–75].

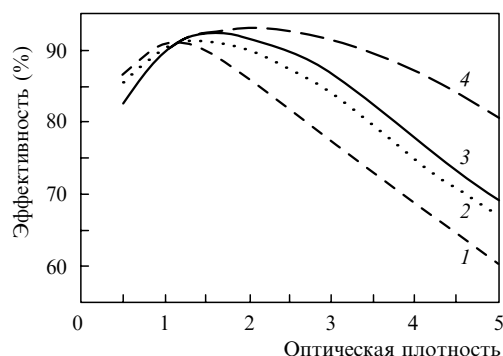


Рис. 20. Зависимости эффективности запасаения энергии накачки от оптической плотности для схем, приведенных на рис. 19, б (1), рис. 19, в (2) и 19, а (3), а также для схемы с 16-гранной призмой (4).

ней поверхности трубки охладителя [6], что еще больше повышает однородность профиля поглощенной мощности накачки.

Получить однородный профиль поглощенной мощности накачки можно и за счет температурной отстройки максимума длины волны излучения полупроводниковых диодов накачки от максимума спектра поглощения активного элемента на 2–4 нм [5, 39]. Отстройка позволяет уменьшить эффективный коэффициент поглощения излучения накачки, что обеспечивает более равномерное поглощение в объеме активного элемента, но уменьшает эффективность поглощения мощности накачки. Такой подход является альтернативой использованию активных элементов с меньшей концентрацией активатора.

Большие возможности получения необходимого профиля поглощенной мощности накачки открывает использование керамических активных элементов. Технология их производства позволяет изготавливать активные элементы с любым профилем легирования в его сечении. Использование керамического активного элемента с легированной центральной областью позволяет получить более однородный профиль поглощенной мощности накачки, чем использование аналогичного однородно легированного активного элемента. Например, активный элемент с легированной центральной областью, имеющей в сечении форму шестигранника, при прочих равных условиях имеет по сечению меньший градиент показателя преломления, что выражается в уменьшении параметра качества пучка  $M^2$  примерно в три раза [47].

Зачастую для решения многих задач не требуются большие плотности мощности накачки на единицу длины активного элемента и бывает достаточно размещения небольшого количества (двух-трех) линеек полупроводниковых диодов вдоль образующей. При этом сложно получить однородный профиль поглощенной мощности накачки, особенно при использовании зеркальных отражателей. В данной ситуации выходом является такое размещение групп линеек полупроводниковых диодов, при котором линейки развернуты вокруг оптической оси активного элемента относительно друг друга на некоторый угол [26–28, 39–44]. При этом интегральный профиль поглощенной мощности накачки по длине активного элемента становится близким к однородному.

## 5. Схемы накачки прямоугольных элементов

Цилиндрические активные элементы имеют один большой недостаток – сильное проявление тепловых эф-

фектов (тепловая фокусировка, термооптические аберрации, термонаведенное двулучепреломление) и, как следствие, невысокое качество пространственных характеристик выходного излучения, особенно при больших выходных мощностях. Этот недостаток в основном связан с невозможностью организовать эффективное охлаждение всего объема активного элемента, т. к. у цилиндрических элементов площадь боковой поверхности наименьшая из всех возможных элементов. Одной из альтернатив цилиндрическим элементам являются прямоугольные («слэб») активные элементы. Широкое исследование таких элементов началось еще в начале 80-х годов прошлого века. Результаты детальных исследований особенностей процесса распространения излучения, а также тепловых процессов в прямоугольных активных элементах приведены в работах [76–80].

Использование в лазерах «слэб» элементов позволило значительно ослабить влияние тепловых эффектов. С одной стороны, это достигается за счет увеличения площади боковой поверхности активного элемента и более равномерного охлаждения всего его объема. С другой стороны, наличие плоскопараллельных боковых граней может обеспечить волноводное зигзагообразное распространение генерируемого излучения в активном элементе, что позволяет усреднить по одной координате влияние тепловых неоднородностей на распространяющееся излучение. Прямоугольное сечение активного элемента также дает возможность почти полностью устранить термомеханические напряжения, ведущие к деполяризации лазерного излучения. Еще одним важным достоинством «слэб» элементов является хорошее перекрытие накачиваемой области с объемом, занимаемым генерируемыми модами, что определяет более высокий КПД этих схем, особенно в одномодовом режиме.

Наряду с этими достоинствами проявляются основные недостатки – асимметричность и астигматичность выходного излучения из-за разности температурных градиентов в ортогональных плоскостях. Кроме того, прямоугольное сечение активного элемента определяет прямоугольную форму генерируемого пучка, не всегда удобную для практических применений. К недостаткам стоит отнести и меньшую возможную плотность мощности накачки, большую сложность изготовления «слэб» элемента, а также сложность в сборке и юстировке всей конструкции квантрона. При высоких коэффициентах усиления большую негативную роль начинает играть усиленное спонтанное излучение. Ниже рассмотрены две группы квантронов – с зигзагообразным распространением и со скользящим падением лазерного излучения.

### 5.1. Схемы с зигзагообразным распространением лазерного излучения

Как отмечалось выше, одним из способов снижения влияния тепловых неоднородностей в активном элементе является организация зигзагообразного распространения генерируемого излучения в объеме активного элемента [80–95]. В таких схемах («зигзаг»-схемах) излучение накачки вводится в активный элемент через одну грань или две противоположные грани. Для подвода излучения часто используются оптические волокна или цилиндрические линзы, но встречаются схемы с непосредственным подводом излучения. В случае односторонней накачки у противоположной грани устанавливают зеркальный отражатель для увеличения эффективности

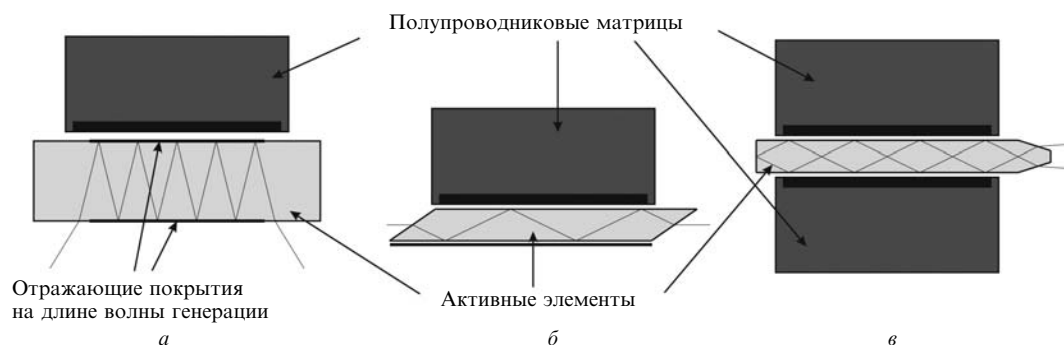


Рис.21. Варианты реализации волноводного распространения генерируемого излучения в активном элементе [80–95].

поглощения излучения накачки. В случае двусторонней накачки излучение должно почти полностью поглотиться за один проход, в связи с чем используются активные элементы с большой концентрацией активатора или большим сечением поглощения.

Для «слэб» элементов предпочтительным является жидкостное охлаждение, т.к. оно позволяет охладить грани, через которые осуществляется оптическая накачка. В случае «сухого» кондуктивного охлаждения тепло отводится от двух других граней элемента, через которые не осуществляется накачка. Интересной представляется схема охлаждения с использованием алмазной пластины [91]. В этой схеме накачка происходит через алмазную пластину, посаженную на оптический контакт на одну из боковых граней элемента. Ввиду очень большой теплопроводности алмаза, такая схема позволяет обеспечить эффективное охлаждение активного элемента. При выходной мощности 200 Вт оптическая сила возникающей в активном элементе тепловой линзы составляет всего лишь 0.04 D.

Обычно зигзагообразная траектория луча организуется в плоскости сечения элемента, вдоль которой осуществляется оптическая накачка и тепловые градиенты максимальны. Кроме того, в этом случае более эффективно снимается инверсная населенность в областях, где она максимальна. При использовании тонких «слэб» элемен-

тов, которые накачиваются через узкие грани, а охлаждаются через широкие, тепловые градиенты максимальны между широкими гранями [86, 88].

Волноводное распространение генерируемого излучения между двумя гранями осуществляется либо за счет его отражения от диэлектрических зеркальных покрытий (рис.21,а), хорошо пропускающих излучение на длине волны накачки и отражающих излучение на длине волны генерации, либо за счет его полного внутреннего отражения на гранях (рис.21,б).

Кроме хорошей компенсации тепловых неоднородностей «зигзаг»-схема обеспечивает достаточно хорошее перекрытие объема генерируемой моды с накачиваемым объемом активного элемента, что определяет высокую оптическую эффективность ТТЛ (табл.6). С этой точки зрения наибольшую эффективность имеют схемы с диэлектрическими зеркальными покрытиями на гранях за счет увеличения оптической длины пути лазерного излучения и соответственно более эффективного снятия инверсной населенности [80]. Подобным преимуществом обладают также двухпроходные схемы с полным внутренним отражением генерируемого пучка (рис.21,в) [82, 84, 87].

При использовании диэлектрических зеркальных покрытий на боковых гранях активного элемента между этими гранями возникают паразитные осцилляции поля, которые уменьшают инверсную населенность. Для их пода-

Табл.6. Параметры излучения лазеров с активными «слэб» элементами и зигзагообразным ходом луча.

$N_p$	$C_a$ (%)	$\eta_{sl}$ (%)	$\eta_{opt}$ (%)	$P_p$ (Вт)	$P_{out}$ (Вт)	Режим генерации	$M^2$	$F_{th}$ (D)	Литература
1	1.0	-46.3	-30.9	-9.4	-2.9	cw	-1.2	-	[80]
1	1.0	-43.6	-33.7	-9.2	-3.1	cw	-1.2	-	[80]
1	-	-15.9	-19.0	-50.4	-8.0	cw	-/-	-	[81]
1	-	57.0/-	35.0/24.6	18.3	6.4/4.5	cw	-1.2	-	[82]
2	-	36.0/22.0	30.6/18.9	235.0/212.0	72.0/40.0	cw	-1.3	1.0	[83]
1	1.1	57.0/-	35.0/25.7	18.3	6.4/4.7	cw	-1.2	-	[84]
1	-	-43.8	-13.5	-74.0	-10.0	qcw	-1.5 × 1.1	1.7 × 0.1	[85]
2	1.0	-/-	42.3/-	300.0/-	127.0/-	cw	-/-	2.4	[86]
2	-	37.0/-	32.0/20.0	100.0	32.0/20.0	cw	-1.4 × 1.2	-	[87]
2	1.0	57.0/22.0	42.3/16.0	300.0/175.0	127.0/28.0	cw	-1.5	2.4 × 2.1	[88]
2	0.9	-/-	13.9/-	2600.0/-	362.0/-	qcw	-/-	6.7	[90]
1	-	41.0/-	33.3/-	600.0/-	200.0/-	cw	35.0 × 7.0/-	0.04	[91]
2	1.0	18.5/-	12.0/-	1290.0	141.0/-	qcw	180.0 × 16.0/-	-	[92]
2	1.1	34.0/18.2	27.1/12.7	960.0/550.0	260.0/70.0	cw	-4.0 × 3.0	13.0 × 0.4	[93]
2	-	50.0/50.0	46.2/44.8	78.0/58.0	36.0/26.0	cw	-1.2 × 1.1	-	[94]
2	-	53.6/46.4	40.5/35.1	37.0	15.0/13.0	cw	-/-	-	[95]

Примечания: активные элементы – YLF: Nd<sup>3+</sup> (1047 нм) [80, 94], YVO<sub>4</sub>: Nd<sup>3+</sup> (1064 нм) [91, 95] и YAG: Nd<sup>3+</sup> (1064 нм) в остальных работах; слева от косой черты – значения для многомодового режима, справа – для одномодового; в случае негетероцентрических пучков вместо  $M^2$  указано произведение  $M_x^2 \times M_y^2$ , а вместо  $F_{th}$  – произведение  $F_{thx} \times F_{thy}$ ; обозначения те же, что и в табл.1.

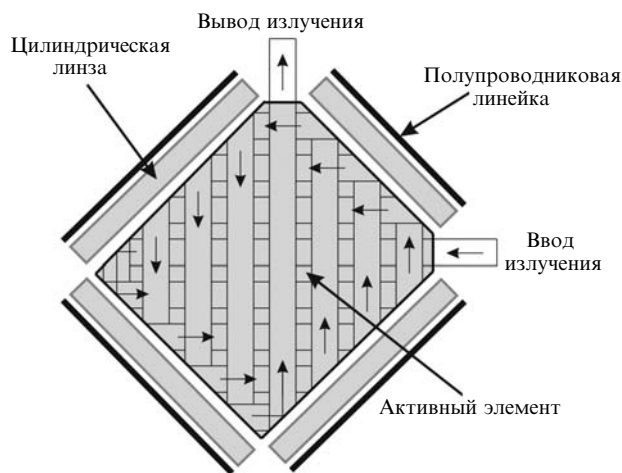


Рис.22. Схема усилителя с зигзагообразным ходом луча [96].

вления активному элементу придают небольшую клиновидность порядка 0.6 мрад [80].

Большой потенциал «зигзаг»-схема имеет в многопроходных усилителях лазерного излучения за счет более полного использования накачиваемого объема активного элемента. При этом достигается высокий энергосъем при высоком коэффициенте усиления. В работе [96] был описан многопроходный усилитель на «слаб» элементе, имеющий за восемь проходов коэффициент усиления  $G = 15$  и эффективность энергосъема 68.1 % (рис.22).

К основным недостаткам «зигзаг»-схемы следует отнести сложность изготовления активных элементов требуемых размеров, а также сложность юстировки резонатора и большую чувствительность схемы к разъюстировке зеркал. Кроме того, в случае применения жидкостного охлаждения турбулентный поток вызывает вибрации активного элемента, что негативно сказывается на стабильности выходного излучения.

## 5.2. Схемы со скользящим падением лазерного излучения

Одной из разновидностей «зигзаг»-схем является схема со скользящим падением лазерного излучения [97–

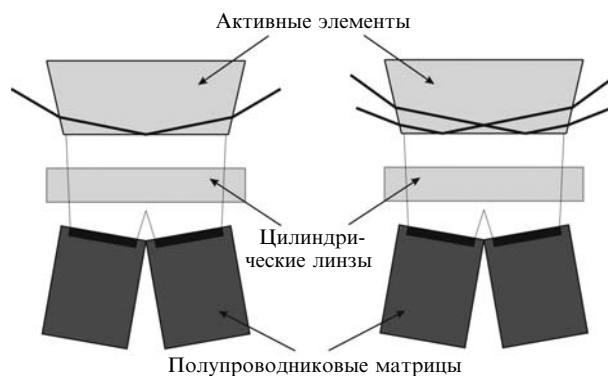


Рис.23. Схемы со скользящим падением лазерного излучения [97–110].

110]. В этой схеме генерируемое излучение распространяется под небольшим углом (обычно  $3^\circ - 10^\circ$ ) к одной из граней, через которую осуществляется накачка, и совершает на ней одно полное внутреннее отражение (рис.23,а). Излучение накачки линейки полупроводниковых диодов с помощью цилиндрических линз или фокусаторов [105] фокусируется в тонкую линию, толщиной 50–100 мкм. Поскольку лазерное излучение распространяется в основном в пограничной «со стороны источника накачки» области (до 500 мкм), то требуются активные элементы с высоким поглощением – большим сечением поглощения ( $\text{YVO}_4:\text{Nd}^{3+}$ ) или с большой концентрацией активатора (керамические  $\text{YAG}:\text{Nd}^{3+}$ ). Благодаря этому в пограничной области образуется небольшая зона с очень высоким коэффициентом усиления.

В резонаторе с обеих сторон от активного элемента обычно устанавливаются цилиндрические линзы для совмещения объема лазерной моды и накачиваемого объема активного элемента. Все это обеспечивает низкий порог генерации и высокие КПД (табл.7). Ломаная траектория распространения лазерного излучения позволяет усреднить влияние тепловых эффектов.

Рассматриваемая схема дает возможность получить дифференциальный и полный КПД, близкие к теоретическому пределу:  $\eta_{sl} = 75\%$ ,  $\eta_{opt} = 66\%$  для многомодово-

Табл.7. Параметры излучения лазеров с активными «слаб» элементами и со скользящим падением луча.

$C_a$ (%)	$\eta_{sl}$ (%)	$\eta_{opt}$ (%)	$P_p$ (Вт)	$P_{out}$ (Вт)	Режим генерации	$M^2$	Литература
1.1	72.0/69.0	64.3/39.4	35.0	22.5/13.8	qcw	$10.0 \times 1.0/1.4 \times 1.1$	[99]
1.1	–/–	35.3/–	17.0	6.0/–	cw	–/–	[100]
1.1	–/58.6	–/53.8	30.5	–/16.4	cw	–/1.3 $\times$ 1.2	[101]
1.1	44.0/32.0	38.2/25.3	17.0	6.5/4.3	cw	$12.0 \times 1.1/1.1$	[102]
1.1	–/40.0	–/29.4	17.0	–/5.0	cw	–/1.1	[102]
1.1	74.6/–	65.8/58.5	41.2/39.5	27.1/23.1	cw	$10.0 \times 1.8/1.3 \times 1.1$	[103]
1.1	38.0/26.0	33.4/24.4	41.0	13.7/10.0	cw	–/1.1	[104]
1.0	43.0/31.0	40.0/26.6	35.0	14.0/9.3	cw	$3.0 \times 2.5/1.3$	[105]
1.1	62.0/50.2	50.5/45.3	99.7/102.0	50.3/46.2	cw	–/–	[106]
1.1	–/56.2	–/44.1	93.0	–/41.0	cw	–/1.2	[106]
2.0	42.0/–	34.2/–	38.0	13.0/–	cw	$12.0 \times 1.3/–$	[107]
1.1	68.6/46.0	60.4/41.2	83.0/81.0	50.1/34.0	cw	–/1.1	[108]
2.0	31.7/21.8	28.5/17.1	158.0	45.0/27.0	cw	$50.0 \times 6/1.5$	[109]
4.0	14.0/–	10.3/–	11.6	1.2/–	cw	$4.1 \times 1.6/–$	[109]
2.0	49.0/42.0	45.6/38.6	101.0	46.1/39.0	cw	–/1.2	[110]

Примечания: активные элементы – керамический  $\text{YAG}:\text{Nd}^{3+}$  (1064 нм) [106, 108, 109],  $\text{GdVO}_4:\text{Nd}^{3+}$  (1064 нм) [107] и  $\text{YVO}_4:\text{Nd}^{3+}$  (1064 нм) в остальных работах; слева от косой черты – значения для многомодового режима, справа – для одномодового; в случае негомоцентрических пучков вместо  $M^2$  указано произведение  $M_x^2 \times M_y^2$ ; обозначения те же, что и в табл.1.

го режима и  $\eta_{sl} = 68\%$ ,  $\eta_{opt} = 58\%$  для одномодового [103]. Использование двухпроходной схемы (рис.23,б) существенно улучшает качество пучка выходного излучения и увеличивает степень перекрытия объема лазерной моды и накачиваемого объема [106].

### 5.3. Схемы с квазипродольной накачкой

В мощных ТТЛ необходимо эффективное охлаждение активного элемента. Из-за того что «слэб» элементы обычно имеют небольшую толщину, при жидкостном охлаждении турбулентный поток вызывает существенную вибрацию активного элемента. По этой причине обычно используют медные теплоотводы с микроканальным охлаждением. Для эффективного охлаждения активного элемента тепло отводится через грани, имеющие наибольшую площадь. В мощных системах, где требуются высокие плотности мощности накачки, накачку осуществляют тоже через самые большие грани. Выходом из сложившейся ситуации является схема с квазипродольной накачкой [111–116].

В одной из модификаций этой схемы торцы «слэб» элемента скошены под углом  $45^\circ$  и на них со стороны боковых граней с помощью оптической системы подается излучение накачки, которое, отразившись от торцов, далее распространяется и поглощается вдоль оптической оси (рис.24). Эффективность поглощения мощности накачки в такой схеме составляет не более 80 %. Эта схема позволяет организовать эффективное микроканальное охлаждение через большие грани «слэб» элемента. Генерируемое излучение распространяется внутри активного элемента по зигзагообразной траектории. При использовании в этой схеме активного элемента  $YAG:Yb^{3+}$  и мощности накачки 1400 Вт удалось получить выходную мощность 415 Вт в многомодовом режиме и 252 Вт – в одномодовом [111].

В другой модификации схемы, показанной на рис.25, торцы «слэб» элемента скошены под углом Брюстера [113–116]. Сам способ накачки остается тем же, но эффективность поглощения энергии накачки в такой модификации схемы уже составляет  $\sim 70\%$ . Генерируемое излучение распространяется внутри активного элемента линейно вдоль оптической оси.

Модификацией вышеприведенных схем является схема накачки, предложенная в работах [117–120], где на-

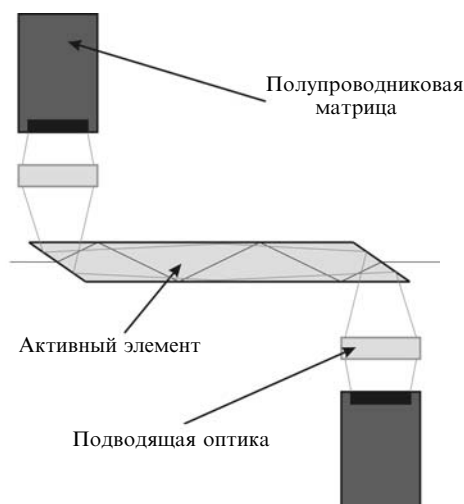


Рис.24. «Слэб» элемент с квазипродольной накачкой [111, 112].

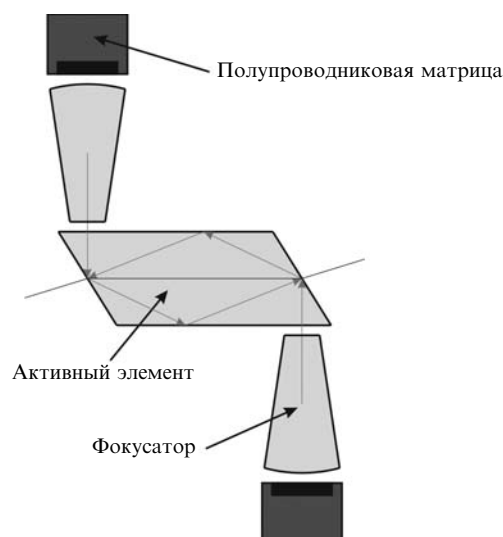


Рис.25. «Слэб» элемент с квазипродольной накачкой [113–116].

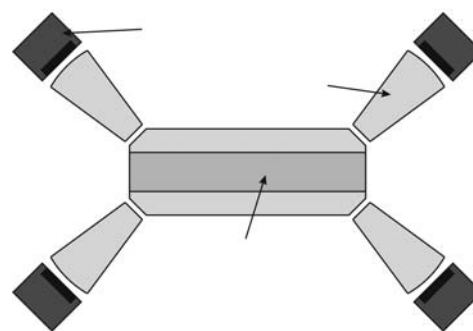


Рис.26. «Слэб» элемент с накачкой через скошенные углы [117–120].

качка активного элемента осуществляется через его скошенные грани при помощи фокусаторов (рис.26). Излучение накачки, распространяясь внутри активного элемента (с небольшой концентрацией активатора) за счет полных внутренних отражений, равномерно поглощается в нем. Кроме того, у активного элемента активирована только центральная часть, что дополнительно обеспечивает более равномерное поглощение излучения накачки. Поэтому отпадает необходимость в обеспечении зигзагообразной траектории генерируемого излучения внутри активного элемента. Эффективность поглощения мощности накачки составляет  $\sim 70\%$ . При использовании в этой схеме активного элемента  $YAG:Yb^{3+}$  и мощности накачки 2000 Вт удалось получить выходную мощность 520 Вт в многомодовом режиме [118].

### 5.4. Другие схемы накачки «слэб» элементов

В остальных схемах накачки «слэб» элементов разработки идут по пути использования тонких, толщиной порядка нескольких миллиметров, активных элементов с линейным распространением в них генерируемого излучения. В этом случае градиенты теплового поля в активном элементе достаточно малы и необходимость в зигзагообразном ходе луча отпадает. Кроме того, конструкция всей системы накачки заметно упрощается.

Широко используются многопроходные схемы накачки длинных «слэб» элементов с небольшой толщиной (порядка долей миллиметров). Конструкция квантрона с подобной схемой накачки изображена на рис.27

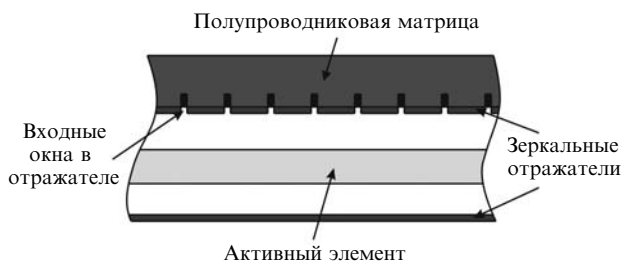


Рис.27. Многопроходная схема накачки тонкого «слэб» элемента [121].

[121]. Активный элемент помещается в прямоугольную полость отражателя. Накачка осуществляется через узкие входные окна в крышке отражателя. Зависимость эффективности поглощения энергии накачки от толщины активного элемента для описанной схемы накачки приведена на рис.28.

В [122] представлено дальнейшее развитие приведенной схемы накачки, в которой вместо тонкого активного элемента предлагается использовать планарный волновод с активированной сердцевиной толщиной 200 мкм. Волноводное распространение излучения по такому активному элементу позволяет компенсировать тепловые неоднородности и более эффективно снимать запасенную в активном элементе энергию.

Большой исследовательский интерес вызывает работа [123], в которой исследуется возможность использования зеркальных конденсоров различной формы в схеме накачки «слэб» элемента с точки зрения эффективности запасаения энергии накачки и однородности профиля инверсной населенности (рис.29). Количественные оценки, определенные путем численного моделирования, приведены в табл.8.

На рис.30 показаны генерационные характеристики лазера, полученные при использовании приведенных на рис.29 схем накачки и кристалла  $YAG:Nd^{3+}$  (концентрация неодима 1 %) в качестве активного элемента. Наиболее эффективной является схема накачки с клиновидным конденсором. В этом случае дифференциальный КПД достигает 51 %, что связано с наибольшей эффективностью запасаения энергии (табл.8). При этом наиболее однородный профиль получается при использовании плоскопараллельного конденсора.

В ряде работ предлагается поперечная схема для накачки «квазидисковых» активных «слэб» элементов

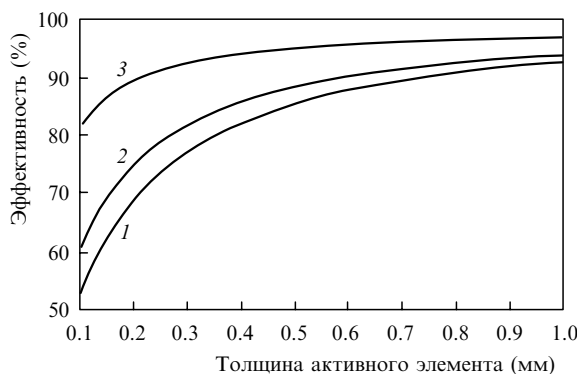


Рис.28. Зависимости эффективности запасаения энергии накачки от толщины активного элемента с золотым покрытием при ширине входных окон 280 (1) и 100 мкм (2), а также с диэлектрическим покрытием при ширине входных окон 100 мкм (3) [121].

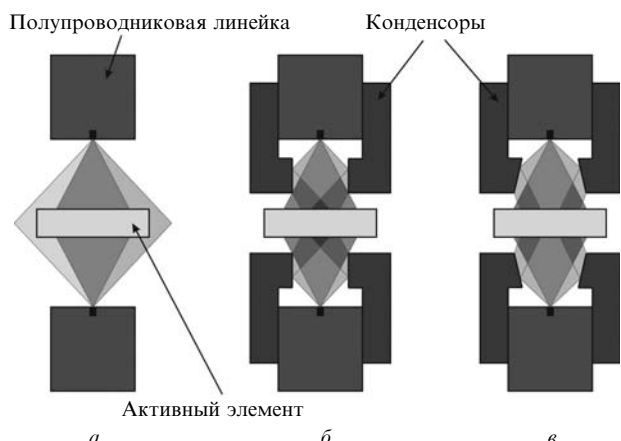


Рис.29. Схемы накачки «слэб» элемента без конденсора (а) и при использовании зеркальных плоскопараллельного (б) и клиновидного (в) конденсоров [123].

Табл.8. Оценка эффективности использования конденсоров при накачке «слэб» элементов.

Схема накачки	Эффективность запасаения энергии (%)	Степень однородности профиля инверсной населенности (%)
Без конденсора	70	31
С плоскопараллельным конденсором*	94	53
С клиновидным конденсором**	98	41

\* Диаметр конденсора 6 мм. \*\* Диаметр конденсора 5 мм, клиновидность 10°.

(рис.31). В этом случае используется тонкий активный элемент, одна из граней которого находится в плотном контакте с медным теплоотводом. Эта же грань является глухим зеркалом резонатора. На нее наносится высокоотражающее покрытие, к которому припаивается специальным образом медный теплоотвод. В частности, в [124] только центральная часть активного элемента легируется с большой концентрацией. В этой работе применялись два активных элемента  $YAG:Yb^{3+}$  с размерами  $2.0 \times 2.0 \times 0.8$  мм и  $1.2 \times 1.2 \times 0.8$  мм и концентрациями активатора 10 % и 15 % соответственно. При использовании полупроводниковых диодов накачки с волоконным выводом и оптической системы подвода излучения эффективность запасаения энергии для этих образ-

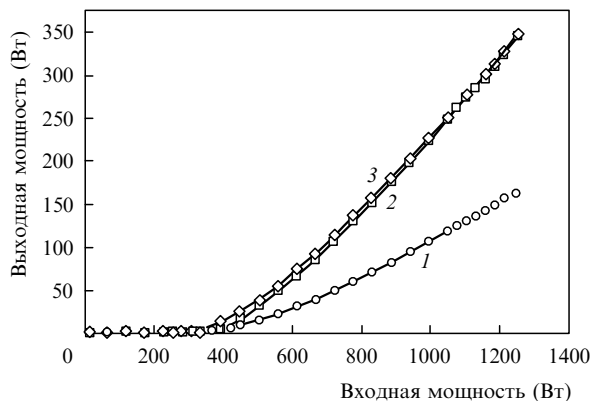


Рис.30. Генерационные характеристики лазера, полученные при использовании схем накачки, приведенных на рис.29,а (1), рис.29,б (2) и рис.29,в (3).

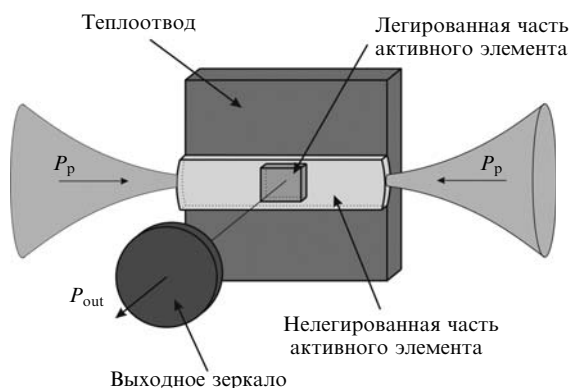


Рис.31. Схема накачки «квазидискового» элемента [124].

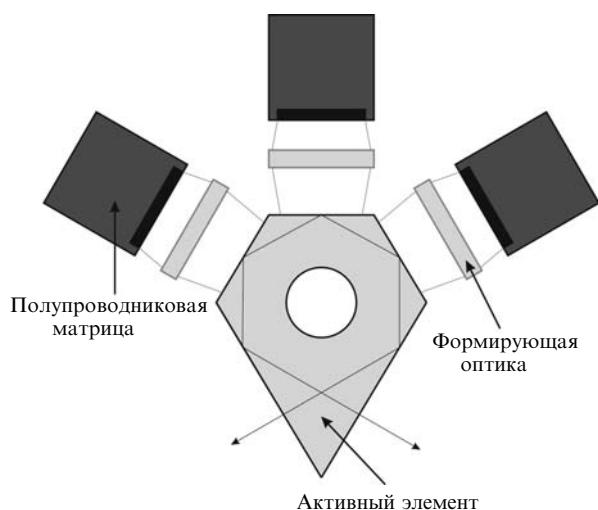


Рис.32. Схема накачки многогранного активного элемента [125].

цов составила 84 % и 79% соответственно. Для ее увеличения активный элемент с теплоотводом помещался в полость диффузного отражателя.

Наконец, следует упомянуть еще об одной схеме накачки. В ней используется многогранный активный элемент с отверстием в центре (рис.32) [125]. Накачка осуществляется через его боковые грани, как показано на рис.32, с использованием формирующей оптики. Эти же грани служат зеркалами резонатора. Через отверстие пропускается хладагент, что позволяет эффективно охлаждать активный элемент. Наряду с ломаной траекторией распространения генерируемого излучения это дает возможность существенно ослабить влияние тепловых неоднородностей.

## 6. Заключение

Разнообразие областей применения ТТЛ обуславливает различные требования к их выходным характеристикам. Поэтому не существует универсальной схемы поперечной накачки, позволяющей получать весь спектр требуемых выходных характеристик. Важной задачей разработки квантрона является поиск его оптимальной конструкции, с помощью которой можно получить требуемые выходные характеристики при наименьших экономических затратах.

Практически во всех работах представлены результаты исследования созданных квантронов (законченных

конструкций) с оптимальными параметрами. При проектировании квантронов с полупроводниковой накачкой, как правило, решается задача формирования однородного по сечению активного элемента распределения мощности накачки. По сравнению с ламповой накачкой полупроводниковая характеризуется значительно меньшей шириной спектра излучения и высокой пространственной когерентностью. Это дает возможность формировать распределения мощности накачки различного вида. Очевидно, что существуют инварианты, определяющие связь между параметрами элементов при масштабировании квантронов по мощности накачки и размерам активного элемента, но функциональные возможности квантронов с этой точки зрения в работах не рассматривались. Комплексное моделирование процессов полупроводниковой накачки, оптимизация параметров квантронов для разных целей – предмет отдельного рассмотрения.

Практически отсутствуют работы по квантронам на основе активных элементов с несколькими со-активаторами и ап-конверсионными активными средами, имеющими различные длины волн поглощения. Для разработки таких квантронов требуются комбинированные источники накачки. Очевидно, что решение всех этих вопросов еще впереди.

## 7. Литература

1. Kincade K., Anderson S. *Laser Focus World*, **43**, 82 (2007).
2. Кравцов Н.В. *Квантовая электроника*, **31**, 661 (2001).
3. Koechner W. *Solid-State Laser Engineering* (Berlin: Springer-Verlag, 1999).
4. Barnes N.P. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **13**, 435 (2007).
5. Moon H.-J., Yi J., Han J., Cha B., Lee J. *App. Opt.*, **38**, 1772 (1999).
6. Lee S., Yun M., Kim H.S., Cha B.H., Suk S. *Appl. Opt.*, **41**, 1082 (2002).
7. Lee S., Kim S.K., Yun M., Kim H.S., Cha B.H., Moon H.-J. *Appl. Opt.*, **41**, 1089 (2002).
8. Lee S., Yun M., Cha B.H., Kim C.J., Suk S., Kim H.S. *Appl. Opt.*, **41**, 5625 (2002).
9. Wang Y., Kan H. *Opt. Commun.*, **226**, 303 (2003).
10. Sun Z., Li R., Bi Y., Yang X., Bo Y., Zhang Y., Wang G., Zhao W., Zhang H., Hou W. *Opt. Commun.*, **241**, 167 (2004).
11. Yi J., Moon H.-J., Lee J. *Appl. Opt.*, **43**, 3732 (2004).
12. Lee S., Kim Y.G., Cha B.H., Kim Y.K. *Opt. Laser Technol.*, **36**, 265 (2004).
13. Sun Z., Li R., Bi Y., Hu C., Kong Y., Wang G., Zhang H., Xu Z. *Opt. Laser Technol.*, **37**, 163 (2005).
14. Yang X., Bo Y., Peng Q., Zhang H., Geng A., Cui Q., Sun Z., Cui D., Xu Z. *Opt. Commun.*, **266**, 39 (2006).
15. Peng H., Hou W., Chen Y., Cui D., Xu Z., Chen C., Fan F., Zhu Y. *Opt. Express*, **14**, 3961 (2006).
16. Lee S., Choi D., Kim C.-J., Zhou J. *Opt. Laser Technol.*, **39**, 705 (2007).
17. Du K., Zhang J., Quade M., Liao Y., Falter S., Baumann M., Loosen P., Poprawe R. *Appl. Opt.*, **37**, 2361 (1998).
18. Wu R., Phua P.B., Lai K.S. *Appl. Opt.*, **39**, 431 (2000).
19. Wang H., Huang W., Zhou Z., Cao H. *Chin. Opt. Lett.*, **1**, 541 (2003).
20. Wang H., Huang W., Zhou Z., Cao H. *Opt. Laser Technol.*, **36**, 69 (2004).
21. Kandasamy R., Raghavachari S., Misra P., Nathan S. *Appl. Opt.*, **43**, 5855 (2004).
22. Mukhopadhyay P.K. et al. *Opt. Commun.*, **259**, 805 (2006).
23. Haiyong Z., Ge Z., Chenghui H., Yong W., Lingxiong H., Weidong C., Zhenqiang C. *App. Opt.*, **46**, 384 (2007).
24. Haiyong Z., Chenghui H., Ge Z., Yong W., Jing C., Weidong C., Zhenqiang C. *Opt. Commun.*, **270**, 296 (2007).
25. Hirano Y., Yanagisawa T., Ueno S., Tajima T., Uchino O., Nagai T., Nagasawa C. *Opt. Lett.*, **25**, 1168 (2000).
26. Ajer H., Landro S., et al. *Opt. Lett.*, **17**, 1785 (1992).



27. Rustad G., Stenersen K. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **3**, 82 (1997).
28. Spuhler G.J., Paschotta R., Keller U., Dymott M.J.P., Kopf D., Meyer J., Weingarten K.J. *Opt. Lett.*, **24**, 528 (1999).
29. Brand T. *Opt. Lett.*, **20**, 1776 (1995).
30. Jackson S.D., Piper J.A. *Appl. Opt.*, **33**, 2273 (1994).
31. Jackson S.D., Piper J.A. *Appl. Opt.*, **34**, 2012 (1995).
32. Dawes J.M., Dekker P., Cai Y. *Opt. Commun.*, **115**, 617 (1995).
33. Jackson S.D., Piper J.A. *Appl. Opt.*, **35**, 1409 (1996).
34. Bowman S.R., Lynn J.G., et al. *Opt. Lett.*, **18**, 1724 (1993).
35. Jani M.G., Naranjo F.L., Barnes N.P., et al. *Opt. Lett.*, **20**, 872 (1995).
36. Le Garrec B.J., Raze G.J., et al. *Opt. Lett.*, **21**, 1990 (1996).
37. Qi Y., Zhu X., Lou Q., Ji J., et al. *Opt. Express*, **13**, 8725 (2005).
38. Fujikawa S. et al. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **3**, 40 (1997).
39. Kojima T., Yasui K. *Appl. Opt.*, **36**, 4981 (1997).
40. Konno S., Yasui K. *Appl. Opt.*, **37**, 551 (1998).
41. Konno S., Fujikawa S., Yasui K. *Appl. Opt.*, **37**, 6401 (1998).
42. Inoue Y., Fujikawa S. *IEEE J. Quantum Electron.*, **36**, 751 (2000).
43. Konno S., Kojima T., et al. *Opt. Lett.*, **25**, 105 (2000).
44. Konno S., Inoue Y., et al. *Appl. Opt.*, **40**, 4341 (2001).
45. Fujikawa S., Furuta K., Yasui K. *Opt. Lett.*, **26**, 602 (2001).
46. Furuta K., Kojima T., Fujikawa S., Nishimae J. *Appl. Opt.*, **44**, 4119 (2005).
47. Lucianetti A., Weber R., Hodel W., et al. *Appl. Opt.*, **38**, 1777 (1999).
48. Golla D., Knoke S., Schone W., Tunnermann A., Schmidt H. *Appl. Phys. B*, **58**, 389 (1994).
49. Golla D., Knoke S., Schone W., et al. *Opt. Lett.*, **20**, 1148 (1995).
50. Bruesselbach H.W., Sumida D.S. *Opt. Lett.*, **21**, 480 (1996).
51. Bruesselbach H.W., Sumida D.S., Reeder R.A., Byren R.W. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **3**, 105 (1997).
52. Bruesselbach H.W., Sumida D.S. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **11**, 600 (2005).
53. Roth M.S., Romano V., Feurer T., Graf T. *Opt. Express*, **14**, 2191 (2006).
54. Golla D., Freitag I., Zeilmer H., Schone W., Kropke I., Welling H. *Opt. Commun.*, **98**, 86 (1993).
55. Yu D.L., Tang D.Y. *Opt. Laser Technol.*, **35**, 37 (2003).
56. Hirano Y., Koyata Y., et al. *Opt. Lett.*, **24**, 679 (1999).
57. Pavel N., Hirano Y., Yamamoto S., Koyata Y., Tajime T. *Appl. Opt.*, **39**, 986 (2000).
58. Howerton P.H., Cordray D.M. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **28**, 1081 (1992).
59. Golla D., Bode M., Knoke S., Schone W., Tuennermann A. *Opt. Lett.*, **21**, 210 (1996).
60. Lai K.S., Phua P.B., Wu R.F., et al. *Opt. Lett.*, **25**, 1591 (2000).
61. Uehara N., Nakahara K., Ueda K. *Opt. Lett.*, **20**, 1707 (1995).
62. Song J., Liu A., Okino K., Ueda K. *Appl. Opt.*, **36**, 8051 (1997).
63. Song J., Liu A.P., Shen D.Y., Ueda K. *Appl. Phys. B*, **66**, 539 (1998).
64. Song J., Shen D., Liu A., et al. *Appl. Opt.*, **38**, 5158 (1999).
65. Song J., Li C., Kim N.S., Ueda K. *Appl. Opt.*, **39**, 4954 (2000).
66. Lu Jun., Lu Jian., Murai T., Takaichi K., Uematsu T., Xu J., Ueda K., Yagi H., Yanagitani T. *Opt. Lett.*, **27**, 1120 (2002).
67. Lu J., Yagi H., Takaichi K., et al. *Appl. Phys. B*, **79**, 25 (2004).
68. Greiner U.J., Klingenberg H.H., Walker D.R., Flood C.J., van Driel H.M. *Appl. Phys. B*, **58**, 393 (1994).
69. Walker D.R., Flood C.J., van Driel H.M., Greiner U.J., Klingenberg H.H. *Opt. Lett.*, **19**, 1055 (1994).
70. Greiner U.J., Klingenberg H.H. *Opt. Lett.*, **19**, 1207 (1994).
71. Yang H. *Opt. Commun.*, **204**, 263 (2002).
72. Geng A., Bo Y., Bi Y., Sun Z., Yang X., Peng Q., Li H., Li R., Cui D., Xu Z. *Opt. Lasers Eng.*, **44**, 589 (2006).
73. Boutchenkov V., Kuchma I., Levoshkin A., Mak A., Petrov A., Hollemann G. *Opt. Commun.*, **177**, 383 (2000).
74. Levoshkin A., Petrov A., Montagne J.E. *Opt. Commun.*, **185**, 399 (2000).
75. Мак А.А., Сомс Л.Н., Фромзель В.А., Яшин В.Е. *Лазеры на неодимовом стекле* (М.: Наука, 1990).
76. Мезенов А.В., Сомс Л.Н., Степанов А.И. *Термооптика твердотельных лазеров* (Л.: Машиностроение, 1986).
77. Kane T.J., Eckardt R.C., Byer R.L. *IEEE J. Quantum Electron.*, **19**, 1351 (1983).
78. Eggleston J.M., Kane T.J., Kunh K., Unternahrer J., Byer R.L. *IEEE J. Quantum Electron.*, **20**, 289 (1984).
79. Kane T.J., Eggleston J.M., Byer R.L. *IEEE J. Quantum Electron.*, **21**, 1195 (1985).
80. Baer T.M., Head D.F., Gooding P., Kintz G.J., Hutchison S. *IEEE J. Quantum Electron.*, **28**, 1131 (1992).
81. Farinas A.D., Gustafson E.K., Byer R.L. *Opt. Lett.*, **19**, 114 (1994).
82. Richards J., McInnes A. *Opt. Lett.*, **20**, 371 (1995).
83. Shine R.J. Jr., Alfrey A.J., Byer R.L. *Opt. Lett.*, **20**, 459 (1995).
84. McInnes A., Richards J. *IEEE J. Quantum Electron.*, **32**, 1243 (1996).
85. Armandillo E., Norrie C., Cosentino A., Laporta P., Wazen P., Maine P. *Opt. Lett.*, **22**, 1168 (1997).
86. Rutherford T.S., Tulloch W.M., Gustafson E.K., Byer R.L. *IEEE J. Quantum Electron.*, **36**, 205 (2000).
87. Mudge D., Ostermeyer M., Veitch P.J., Munch J., Ottaway D.J., Hamilton M.W. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **6**, 643 (2000).
88. Rutherford T.S., Tulloch W.M., Sinha S., Byer R.L. *Opt. Lett.*, **26**, 986 (2001).
89. Kiriya H., Yamakawa K., Nagai T. *Opt. Lett.*, **28**, 1671 (2003).
90. Malinin B.G., Mak A.A., Volynkin V.M., Gratsianov K.V., Eremenko A.S., Mit'kin V.M., Pankov V.G., Serebryakov V.A., Ustyugov V.I., Chizhov S.A., Yashin V.E. *J. Opt. Technol.*, **70**, 905 (2003).
91. Tzuk Y., Tal A., Goldring S., Glick Y., Lebiush E., Kaufman G., Lavi R. *IEEE J. Quantum Electron.*, **40**, 262 (2004).
92. Ciofini M., Lapucci A. *Appl. Opt.*, **43**, 6174 (2004).
93. Ranganathan K., Misra P., Nath A.K. *Appl. Phys. B*, **86**, 215 (2007).
94. <http://www.qpeak.com/Products/MPSCWLasers.htm>.
95. <http://www.qpeak.com/Products/MPVCWLasers.htm>.
96. Coyle D.B. *IEEE J. Quantum Electron.*, **27**, 2327 (1991).
97. Bernard J.E., Alcock A.J. *Opt. Lett.*, **18**, 968 (1993).
98. Bernard J.E., Alcock A.J. *Opt. Lett.*, **19**, 1861 (1994).
99. Damzen M.J., Trew M., Rosas E., Crofts G.J. *Opt. Commun.*, **196**, 237 (2001).
100. Garcia-Lopez J.H., Aboites V., Kir'yanov A.V., Holmgren S., Damzen M.J. *Opt. Commun.*, **201**, 425 (2002).
101. Garcia-Lopez J.H., Aboites V., Kir'yanov A.V., Damzen M.J., Minassian A. *Opt. Commun.*, **218**, 155 (2003).
102. Bermudez-Gutierrez J.C., Damzen M.J., Pinto-Robledo V.J., Kir'yanov A.V. *Appl. Phys. B*, **76**, 12 (2003).
103. Minassian A., Thompson B., Damzen M.J. *Appl. Phys. B*, **76**, 341 (2003).
104. Minassian A., Damzen M.J. *Opt. Commun.*, **230**, 191 (2004).
105. Zimer H., Albers K., Wittrock U. *Opt. Lett.*, **29**, 2761 (2004).
106. Minassian A., Thompson B., Damzen M.J. *Opt. Commun.*, **245**, 295 (2005).
107. Omatsu T., Isogami T., Minassian A., Damzen M.J. *Opt. Commun.*, **249**, 531 (2005).
108. Minassian A., Thompson B.A., Smith G., Damzen M.J. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **11**, 621 (2005).
109. Omatsu T., Ojima Y., Minassian A., Damzen M.J. *Opt. Express*, **13**, 7011 (2005).
110. Sauder D., Minassian A., Damzen M.J. *Opt. Express*, **14**, 1079 (2006).
111. Goodno G.D., Palese S., Harkenrider J., Injeyan H. *Opt. Lett.*, **26**, 1672 (2001).
112. Goodno G.D., Weiss S.B., Redmond S., Simpson R., Howland D., Weber M., Injeyan H. *Opt. Lett.*, **31**, 1247 (2006).
113. Sudesh V., Asai K., Shimamura K., Fukuda T. *Opt. Lett.*, **26**, 1675 (2001).
114. Sudesh V., Asai K., Shimamura K., Fukuda T. *IEEE J. Quantum Electron.*, **38**, 1102 (2002).
115. Sudesh V., Asai K. *J. Opt. Soc. Am. B*, **20**, 1829 (2003).
116. Sato A., Asai K., Mizutani K. *Opt. Lett.*, **29**, 836 (2004).
117. Gong M., Li C., Liu Q., Chen G., Gong W., Yan P. *Appl. Phys. B*, **79**, 265 (2004).
118. Liu Q., Gong M., Lu F., Gong W., Li C. *Opt. Lett.*, **30**, 726 (2005).
119. Gong M., Lu F., Liu Q., Gong W., Li C. *Appl. Opt.*, **45**, 3806 (2006).
120. Lu F., Gong M., Xue H., Liu Q., Gong W. *Opt. Laser Technol.*, **39**, 949 (2007).
121. Faulstich A., Baker H.J., Hall D.R. *Opt. Lett.*, **21**, 594 (1996).
122. Lee J.R., Baker H.J., Friel G.J., Hilton G.J., Hall D.R. *Opt. Lett.*, **27**, 524 (2002).
123. Lapucci A., Ciofini M. *Appl. Opt.*, **44**, 4388 (2005).
124. Dascalu T., Taira T., Pavel N. *Opt. Lett.*, **27**, 1791 (2002).
125. Ziolek C., Ernst H., Will G.F., Lubatschowski H., Welling H., Ertmer W. *Opt. Lett.*, **26**, 599 (2001).