

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

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

Методические рекомендации по курсовому проектированию  
по дисциплине «Системы лазерной полупроводниковой накачки»

для студентов ВлГУ, обучающихся по направлению  
200500.62 (12.03.05) «Лазерная техника и лазерные технологии»,

Составители:  
Герке М.Н.  
Кучерик А.О.

Владимир 2015

## Оглавление

Введение .....	2
Цель работы .....	3
Задание.....	3
Порядок выполнения.....	3
Рекомендации по выполнению расчётной части работы .....	4
Вывод основных расчётных соотношений.....	4
Случай радиально-симметричной накачки .....	9
Случай эллиптического пучка накачки .....	12
Применение разработанной модели для оптимизации выходных параметров DPSS лазера.....	16
Состав пояснительной записки .....	18
Защита курсовой работы.....	18
Варианты задания .....	19
Список рекомендованной литературы .....	21
Приложение.....	22

## Введение

Успехи в развитии технологии мощных лазерных диодов (далее ЛД) привели в последнее десятилетие к тому, что традиционная ламповая накачка твердотельных активных сред (далее АС) во многих случаях вытеснена накачкой полупроводниковой. В технической литературе прочно утвердилась аббревиатура DPSS (Diode Pumped Solid State Laser). К настоящему времени разработана и выпускается серийно широкая номенклатура подобных устройств. По ряду причин (высокая энергетическая эффективность, техническая простота, относительно низкая стоимость, надёжность etc.) наибольшую популярность приобрели DPSS лазеры с продольной (торцевой) накачкой.

При разработке подобных лазеров ключевым моментом, определяющим как КПД, так и выходную мощность лазера является пространственное перекрытие пучка накачки и моды резонатора в АС. Данная проблема теоретически рассматривалась многими авторами. Основной вывод подобных исследований состоит в том, что совпадение поперечных размеров пучка накачки и лазерной моды, как правило, играет существенно более важную роль, нежели распределение накачки по поперечному сечению пучка. Было показано, что если в качестве критерия, по которому производится оптимизация параметров лазера, выбрать отношение тангенциальной эффективности (slope efficiency) к пороговой мощности накачки, то наилучший результат достигается при условии, что поперечный размер моды резонатора  $w \sim r$  – радиусу однородного распределения пятна накачки. В случае гауссова распределения интенсивности по пучку накачки результат аналогичен. Т.е. полученные выводы достаточно тривиальны. Однако применительно к рассматриваемому случаю полупроводниковой накачки следует принять во внимание сильную асимметрию пучков, генерируемых мощными ЛД, что и будет сделано далее.

Умение грамотно и эффективно использовать математический аппарат является неотъемлемой частью навыков любого инженера. При этом в современных прикладных исследованиях особое значение приобретает математическое моделирование - построение и анализ моделей в той или иной предметной области, позволяющих описать проектируемую или исследуемую систему без изготовления опытных образцов и проведения натурных экспериментов. Качественно выполненное моделирование позволяет заранее определить особенности различных режимов работы проектируемого прибора (устройства), выявить возможные недочёты проектирования, что значительно сокращает расходы (временные, финансовые и др.) на разработку или исследования. Сказанное в полной мере относится и к направлению подготовки 12.03.05 «лазерная техника и технологии». Специалист в данной области должен знать и понимать те

широкие возможности, которые предоставляет ему для такого моделирования современные программные комплексы.

Данные методические указания призваны, прежде всего, помочь студентам практически освоить общий методологический подход, используемый в моделировании, на примере решения конкретной прикладной задачи. Предлагаемые в данном пособии задания предполагают расчёт конкретного варианта полупроводниковой накачки твердотельного лазера. Выполнение работы должно способствовать развитию навыков исследовательской работы, а также закреплению теоретических знаний, полученных в рамках лекционного курса и в ходе выполнения лабораторных работ. Работа выполняется с использованием системы математических и инженерных расчетов MATLAB, поэтому еще одним закрепляемым навыком является умение алгоритмизировать метод решения поставленной задачи.

## Цель работы

Получение практических навыков математического и численного моделирования DPSS лазера с торцевой накачкой.

## Задание

На основе численной модели самостоятельно рассчитать оптимальную конфигурацию резонатора твердотельного лазера с диодной накачкой, обеспечивающего получение максимальной выходной мощности.

## Порядок выполнения

1. Получить у преподавателя вариант задания на курсовую работу.
2. Изучить базовую теоретическую модель, изложенную ниже в разделе «**Вывод основных расчётных соотношений**».
3. На основании данных своего варианта определить основные параметры активной среды, необходимые для последующего расчёта.
4. Перейти к безразмерным параметрам, участвующим в расчёте.
5. Вычислить возможный радиус и параметр эллиптичности пучка накачки;
6. Найти оптимальное значение радиуса моды резонатора (нормированное и выраженное в абсолютных единицах).
7. Определить параметры оптимального резонатора (радиус кривизны выходного зеркала).

8. Подготовить пояснительную записку по работе. В пояснительную записку необходимо включить обобщённые результаты численного моделирования.
9. Защитить курсовую работу.

## Рекомендации по выполнению расчётной части работы

### Вывод основных расчётных соотношений

Прежде чем приступить к решению задачи оптимизации характеристик DPSS лазера, рассмотрим подробнее его схему, показанную на рис. 1. Излучение накачки, сформированное согласующей оптикой, слева вводится в активный элемент. Для простоты в дальнейшем полагается стержневая геометрия АС, что соответствует наиболее распространённому на практике случаю. Глухое зеркало считаем плоским (опять же самый распространённый вариант) просветлено на длине волны накачки 808 нм и имеет высокий (~99%) коэффициент отражения на рабочей длине волны 1064 нм. Выходное зеркало имеет заданное пропускание на рабочей длине волны и выполнено на сферической подложке. В частном случае глухое зеркало, как самостоятельный оптический элемент, может отсутствовать. Все покрытия, формирующие спектральные характеристики пропускания/ отражения наносятся на плоский торец АЭ. В этом случае  $l_0 = 0$ . Выходной пучок выводится вправо через полупрозрачное зеркало.

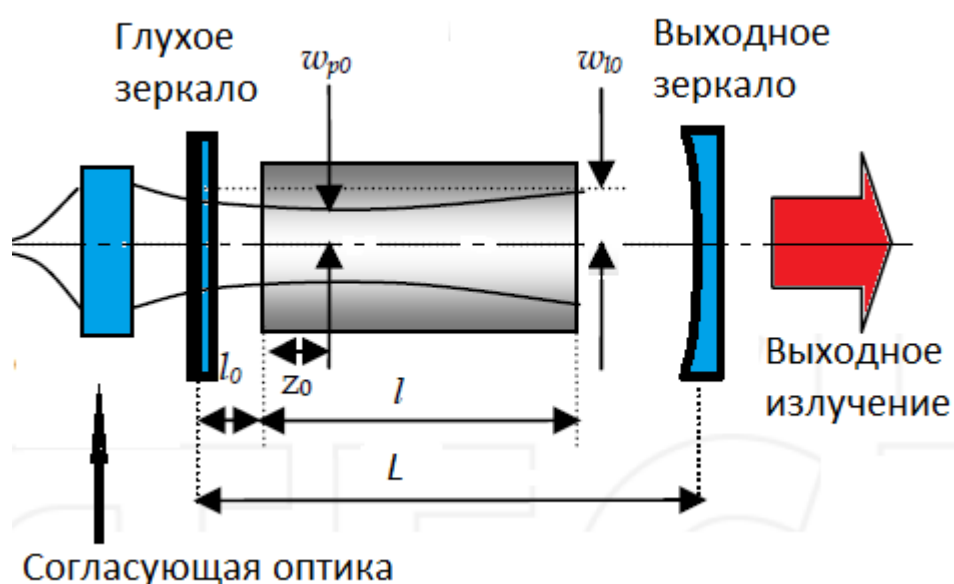


Рис.1. Схема DPSS лазера с торцевой накачкой. Смысл обозначений, приведенных на рисунке, дан в тексте ниже.

Для получения основных расчётных соотношений применим подход, основанный на хорошо известных скоростных уравнениях [2, 3]. При этом будем полагать координатную зависимость как излучения накачки, так и поля в резонаторе. Также предположим, что среда является классической четырёхуровневой (совершенно правильное предположение в случае  $\text{Nd}^{3+}$  лазерных кристаллов) и резонатор возбуждается на основной поперечной моде  $\text{TEM}_{00q}$ . Тогда можно записать:

$$\frac{dN(x, y, z)}{dt} = G(x, y, z) - \sigma \frac{\nu(x, y, z)}{h\nu} N(x, y, z) - \frac{N(x, y, z)}{\tau} \quad (1)$$

$$\frac{dq}{dt} = \sigma c \int \frac{\rho(x, y, z)}{h\nu} N(x, y, z) dV - \frac{q}{\tau_c} \quad (2)$$

где введены следующие обозначения:

$N(x, y, z)$  - населённость верхнего лазерного уровня;

$G(x, y, z)$  - скорость накачки, отнесённая к единице объёма;

$\rho(x, y, z)$  - плотность энергии в резонаторе;

$\sigma$  - сечение лазерного перехода;

$h\nu$  - энергия лазерного фотона;

$q$  - общее число фотонов в резонаторе;

$\tau$  - время жизни верхнего лазерного уровня;

$\tau_c$  - время жизни фотона в резонаторе;

$c$  - скорость света в среде активного элемента.

В выражении (2) интеграл берётся по всему объёму АС. Также предполагается, что превышение порога генерации сравнительно невелико, и внутри резонатора интенсивность слабо зависит от координаты  $z$ . Такое допущение совершенно справедливо для непрерывных лазеров. Для импульсных лазеров с модуляцией добротности такой подход будет, вообще говоря, неверным.

Скорость накачки может быть выражена следующим образом:

$$\int G(x, y, z) dV = \eta_i \eta_a \frac{P_{in}}{h\nu_p} \quad (3)$$

где введены следующие обозначения:

$P_{in}$  - мощность накачки;

$\eta_t$  - оптический КПД накачки;

$\eta_a$  - эффективность поглощения накачки;

$h\nu_p$  - энергия фотона накачки.

Для получения замкнутых расчётных соотношений введём следующие обозначения для нормализованной скорости накачки в АС:

$$g(x, y, z) = G(x, y, z)/G_0 \quad (4)$$

где  $\int g(x, y, z)dV = 1$  а  $G_0$  - даёт общее количество фотонов, поглощённых в активном элементе в единицу времени.

Также определим безразмерный коэффициент

$$\varepsilon(x, y, z) = \rho(x, y, z)/\rho_0 \quad (5)$$

где  $\rho_0$  - максимальное значение плотности энергии, отнесённое к вакууму. Принимая во внимание тот факт, что в среде с показателем преломления  $n$  значение данного параметра будет в  $n$  раз больше, следует записать выражение для эффективного объёма моды резонатора:

$$V = \int_1 n\varepsilon(x, y, z)dV + \int_2 \varepsilon(x, y, z)dV \quad (6)$$

где первый интеграл вычисляется только по объёму АС, а второй – по оставшейся части объёма резонатора.

Тогда, используя (5) и (6), для общего числа фотонов в резонаторе можно записать следующую формулу:

$$q = \int_{1+2} \frac{\rho}{h\nu} dV = \frac{\rho_0}{h\nu} V \quad (7)$$

Теперь, комбинируя, (4)-(7), можно получить

$$\frac{V}{\tau_c} = \sigma_0 \tau G_0 \int \frac{\varepsilon(x, y, z)g(x, y, z)}{(\sigma\tau/h\nu)c_0\rho_0\varepsilon(x, y, z) + 1} dV \quad (8)$$

где

$c_0$  - скорость света в вакууме.

Данное выражение может быть представлено в более привычном виде, если переформулировать его, явно используя величину входной мощности  $P_{in}$ . Выразим время жизни фотона в резонаторе следующим образом:  $\tau_c = L_e / \gamma c_0$ , где  $L_e = L + (n-1)l$  - эффективная длина резонатора,  $\gamma$  - логарифм потерь на обход резонатора. Смысл параметров  $L$  и  $l$  ясен из рис. 1. Это геометрическая длина резонатора и АС соответственно. Глухое зеркало нанесено на торец активного элемента,  $l_0 = 0$ . Если теперь в приближении плоских волн положить  $c_0 \rho_0 = 2I$ , где  $I$  - интенсивность одной из двух волн, циркулирующих в резонаторе и определить эффективную площадь моды как  $A_e = V/L_e$ , то из (8) получается следующее выражение:

$$P_{in} = \frac{A_e \mathcal{M}_{sat}}{\eta_p} \left[ \int \frac{\varepsilon(x, y, z) g(x, y, z)}{(2P_{out}/TA_e I_{sat}) \varepsilon(x, y, z) + 1} dV \right]^{-1} \quad (9)$$

где

$I_{sat} = h\nu/\sigma\tau$  - интенсивность насыщения;

$T$  - коэффициент пропускания (по интенсивности!) выходного зеркала резонатора;

$\eta_p = \eta_i \eta_a (\nu/\nu_p)$  - общая эффективность накачки;

$P_{out} = TP A_e$  - выходная мощность лазера.

Из последнего выражения напрямую получить значения выходных параметров лазера невозможно. Однако с его помощью можно получить следующий небезыңтересный результат: в пределе  $P_{out} \rightarrow 0$  сразу получим пороговую мощность накачки

$$P_{th} = \frac{A_e \mathcal{M}_{sat}}{\eta_p \int \varepsilon g dV} \quad (10)$$

Непосредственное компьютерное моделирование на основании выражения (9) хотя и возможно для произвольных распределений по пространству как накачки, так и лазерной моды, но на первоначальном этапе целесообразно лианеризовать эту формулу вблизи порога генерации. Для большинства случаев, имеющих место на практике, такой подход даёт результаты, достаточно точные и над порогом. При этом физическая



сущность рассматриваемых процессов будет более наглядной. Для  $P_{out} = I_{sat} T A_e$  (т.е. для  $I \ll I_{sat}$ ) подинтегральное выражение в (9) может быть упрощено следующим образом:

$$\frac{\varepsilon g}{(2P_{out}/T A_e I_{sat})\varepsilon + 1} \cong \varepsilon g \left( 1 - \frac{2P_{out}}{T A_e I_{sat}} \varepsilon \right) \quad (11)$$

При подстановке (11) в (9) и удержании только членов первого порядка по  $P_{th}$  получим

$$P_{out} = \frac{T}{2\gamma} \frac{J_1^2}{J_2} \eta_p (P_{in} - P_{th}) \quad (12)$$

где  $J_1 = \int \varepsilon g dV$ ,  $J_2 = \int \varepsilon^2 g dV$ .

Теперь тангенциальная эффективность  $\eta_s$  может быть определена, как учёт вкладов эффективности накачки  $\eta_p$ , эффективности связи резонатора с внешней средой  $\eta_c = T/2\gamma$  и геометрического фактора  $J_1^2/J_2$ , учитывающего эффективность перекрытия пучков накачки и генерируемого излучения.

Для продолжения выкладок придётся сделать некоторые дополнительные предположения относительно профилей интенсивностей лазерного пучка и пучка накачки. В дальнейшем будем считать, что основная поперечная мода  $TEM_{00q}$  характеризуется радиусом пучка  $w$  и этот радиус постоянен по всей длине АС. Действительно, в рассматриваемом случае при типичных значениях  $w \approx 100$  мкм и более для коротких ( $\sim$  ед. мм) кристаллов расходимость можно пренебречь. Для пучка накачки ситуация более сложная: пучок, излучаемый ЛД, имеет сильно ассиметричную форму и различную расходимость по быстрой и медленной осям. Поэтому для получения реалистичной модели следует принять пучок накачки гауссовым эллиптическим, интенсивность которого по латеральным координатам задаётся выражением

$$\exp \left[ -2 \left( \frac{x^2}{w_{px}^2(z)} + \frac{y^2}{w_{py}^2(z)} \right) \right] \quad (13)$$

причём  $w_{px} \neq w_{py}$ .

Для простоты также будем считать, что внутри АС может применяться модель, в которой углы расходимости накачки  $\theta_{px}$  и  $\theta_{py}$  линейно зависят от продольной координаты. Т.е.

для радиусов пучка может быть записано следующее выражение  $w_{px}(z) = w_{p0x} + \theta_{px}|z - z_0|$ , где  $z = z_0$  соответствует координате перетяжки пучка накачки в АС. Для  $y$  координаты получается аналогичное выражение  $w_{py}(z) = w_{p0y} + \theta_{py}|z - z_0|$ . Опыт показывает, что такие простые формулы тем не менее адекватно описывают пучки, генерируемые ЛД. Для случая  $w_{px} = w_{py} = w_p$  имеем классический гауссов пучок с радиальной симметрией.

Далее для получения решения следует привести расходящийся пучок накачки к эквивалентному нерасходящемуся пучку, как это было сделано для моды резонатора.

### Случай радиально-симметричной накачки

Среднее значение поперечного размера пучка накачки в активной среде может быть представлено следующим выражением:

$$\bar{w}_p = \left( \frac{1}{l'} \int_0^{l'} w_p^2(z) dz \right)^{1/2} \quad (14)$$

где  $l' = \min\{l, l^*\}$ , а параметр  $l^*$  в свою очередь некая эффективная длина, определяемая характерной длиной поглощения накачки  $1/a$  и углом расходимости  $\theta_p$  пучка накачки в активном элементе. Предположение о том, что  $l = l'$ , принятое в ряде работе, вообще говоря, не является вполне корректным. Более правильным подходом будет применение эмпирической формулы  $l^* = (-2.3\theta_p + 1.8)/a$ , сконструированной на основе численного моделирования (см. [1]) и справедливой при  $\theta_p \leq 0.2$ .

Нормализованное распределение накачки теперь может быть представлено в виде

$$g_c(x, y, z) = K_c \exp \left[ -2 \left( \frac{x^2 + y^2}{\bar{w}_p^2} \right) - az \right] \quad (15)$$

где  $K_c = 2a / [\pi \bar{w}_p^2 (1 - \exp(-al))]$ , а  $\bar{w}_p$  задаётся выражением (14).

Если ввести безразмерный параметр  $\alpha = (w/\bar{w}_p)^2$ , то выражения (12) и (10) могут быть переписаны следующим образом

$$P_{out} = \frac{T}{2\gamma} \eta_p \frac{\alpha(\alpha + 2)}{(1 + \alpha)^2} [P_{in} - P_{th}(\alpha)] \quad (16)$$

$$P_{th} = \frac{\pi \gamma I_{sat} \bar{w}_p^2}{2\eta_p} (1 + \alpha) \quad (17)$$

Из предыдущего рассмотрения следует, что самый низкий порог генерации и наивысшая тангенциальная эффективность достигаются при  $w_p \rightarrow 0$ . Поэтому в дальнейшем будем предполагать, что  $\bar{w}_p$  будет мало настолько, насколько это достижимо при заданной накачке. Выражение (17) показывает, что порог генерации пропорционален как площади поперечного сечения как пучка накачки, так и площади моды резонатора. При этом предел порога снизу даётся формулой (в идеальном случае, когда поперечным размером моды можно пренебречь):

$$P_{th0} = \frac{\pi \gamma I_{sat} \bar{w}_p^2}{2\eta_p} \quad (18)$$

Следует также отметить, что значение  $P_{th0}$ , получаемого для заданного  $\bar{w}_p$ , определяется спектроскопическими характеристиками лазерного кристалла, общими потерями в резонаторе и эффективностью накачки. Из (16) также сразу следует, что при  $\alpha \rightarrow 0$  тангенциальная эффективность также обращается в нуль. В другом предельном случае  $\alpha \rightarrow \infty$ , данный параметр достигает максимального значения, равного  $\eta_{s0} = \eta_p (T/2\gamma)$ . Поэтому должен существовать максимум выходной мощности как функции параметра  $\alpha$ , зависящий от входной мощности  $P_{in}$ . Определим новые безразмерные величины  $\xi = P_{in}/P_{th0}$  для случая, когда порог превышен и  $f = P_{th}/P_{th0} = 1 + \alpha$  - отношение реального порога к порогу предельному. Для нахождения условия достижения наибольшей выходной мощности подставим (17) в (16) и запишем условие экстремума (в данном случае максимума), приравняв нулю соответствующую производную:

$$\frac{d}{d\alpha} \left\{ \frac{\alpha(\alpha+2)}{(1+\alpha)^2} [\xi - (1+\alpha)] \right\} = 0 \quad (19)$$

Действительный корень уравнения даёт оптимальное значение  $\alpha$ :

$$\alpha_{opt} = \left[ \frac{\sqrt{3}\sqrt{27\xi^2+1}}{9} + \xi \right]^{1/3} - \left[ \frac{\sqrt{3}\sqrt{27\xi^2+1}}{9} - \xi \right]^{1/3} - 1 \quad (20)$$

Данная зависимость выражается следующим графиком:

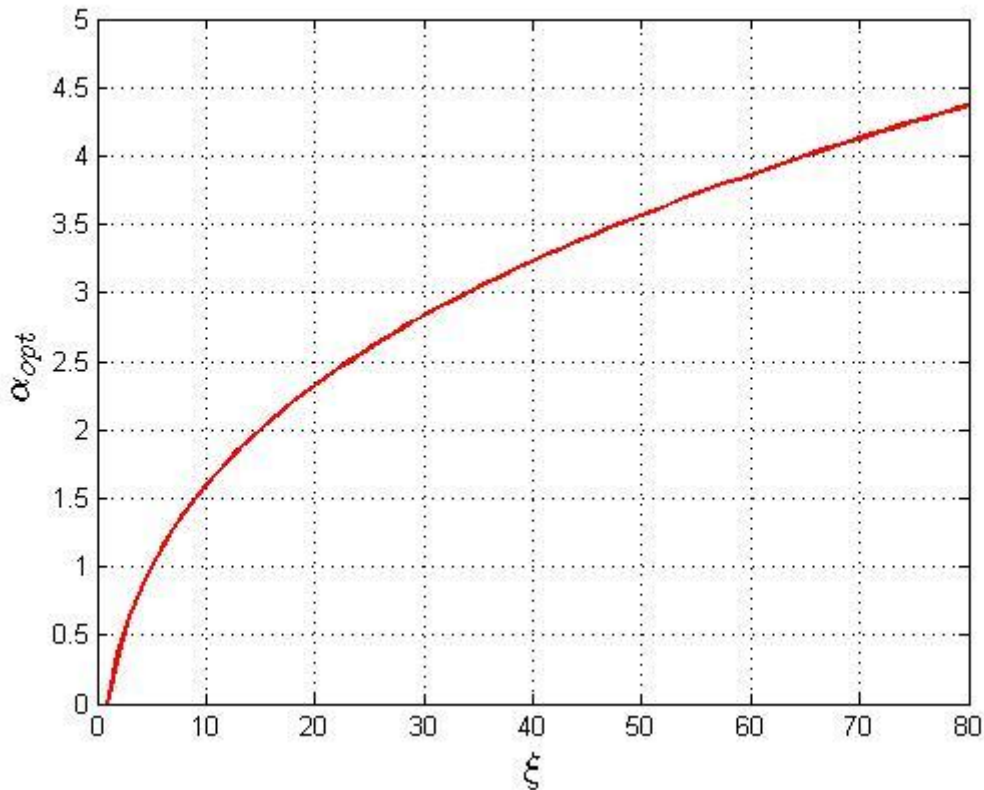


Рис. 2. Зависимость параметра  $\alpha_{opt}$  от нормализованной мощности накачки  $\xi = P_{in}/P_{th0}$ .

Важнейший результат проведенного рассмотрения состоит в том, что при выполнении оговоренных допущений (применимость скоростных уравнений, предположения относительно распределения излучения лазерной моды и накачки по поперечному сечению), во-первых, существует оптимальное значение параметра  $\alpha_{opt}$ , а во-вторых, данное значение монотонно возрастает с ростом мощности накачки. Однако для  $\xi \geq 60$ , что соответствует  $\alpha_{opt} \geq 4$  в реальности этот рост нивелируется и  $\alpha_{opt}$  перестаёт зависеть от  $\xi$ . Этот эффект будет рассмотрен подробно в следующем параграфе.

Полученный график может использоваться как способ удобной оценки параметра  $w$  и последующего проектирования резонатора лазера. На первом этапе для получения максимально возможной выходной мощности следует добиться минимально возможного размера пучка накачки в лазерном кристалле. После того, как в результате расчёта формирующей оптической системы достигнуто минимальное значение  $\bar{w}_p$ , минимальный порог  $P_{th0}$  и легко вычисляется при условии, что задан тип активной среды, конфигурация накачки и потери в резонаторе. Если задано значение максимальной входной мощности  $P_{in}$ , то определяется параметр  $\xi = P_{in}/P_{th0}$ . С помощью рис. 2 находится соответствующее

значение  $\alpha_{opt}$  и, следовательно, и оптимальный радиус моды резонатора  $w$ . Этого достаточно для определения конфигурации резонатора.

### Случай эллиптического пучка накачки

В этом случае пучок накачки описывается двумя параметрами  $\bar{w}_{px}$  и  $\bar{w}_{py}$ , каждый из которых вычисляется с использованием (14). Определим эллиптический гауссов пучок, используя минимальный средний размер пятна в активной среде  $\bar{w}_{pl} = \min\{\bar{w}_{px}, \bar{w}_{py}\}$  и параметр  $\beta$  ( $0 < \beta \leq 1$ ) – отношение малой и большой осей эллипса пучка накачки. Нормализованное распределение накачки может быть представлено выражением, аналогичным (15)

$$g_c(x, y, z) = K_c \exp\left[-2\left(\frac{x^2 + \beta y^2}{\bar{w}_{pl}^2}\right) - az\right] \quad (21)$$

где  $K_c = 2\alpha\beta / [\pi\bar{w}_{pl}^2(1 - \exp(-al))]$  и  $\alpha = (w/\bar{w}_{pl})^2$ .

Интегралы  $J_1$  и  $J_2$  могут быть вычислены, а выражение для выходной мощности приобретает следующий вид:

$$P_{out} = \frac{T}{2\gamma} \eta_p P_{th0} f_1(\alpha, \beta) [\xi - f_0(\alpha, \beta)] \quad (22)$$

где  $P_{th0}$  определяется по формуле (18), а  $f_0 = [(\alpha + 1)(\alpha\beta^2 + 1)]^{1/2} / \beta$  и  $f_1 = \alpha\beta [(\alpha\beta^2 + 2)(\alpha + 2)]^{1/2} / [(\alpha + 1)(\alpha\beta^2 + 1)]$

Графики на рис. 3.a и рис. 3.b иллюстрируют поведение нормализованного порога  $f_0$  и нормализованной же эффективности перекрытия  $f_1$  как функции  $\alpha$  для различной эллиптичности пучка  $\beta$ . Порог растёт практически линейно с ростом  $\alpha$ . Для  $\beta = 1$ , что соответствует осесимметричному пучку, эта зависимость является точно линейной. Тангенциальная эффективность зависит от  $\beta$  крайне слабо. Для заданного  $\alpha$ ,  $f_0$  растёт с увеличением эллиптичности, ибо растёт эффективная площадь сечения пучка накачки.

Эффективность перекрытия  $f_1$  первоначально является быстрорастущей функцией  $\alpha$ , но по мере приближения  $f_1$  к единице, скорость роста сильно падает. Эффект объясняется постепенным пространственным изменением как поля моды, так и пучка накачки. Как только радиус моды возрастает, интенсивность излучения в резонаторе

растёт, что приводит к более эффективному съёму инверсии и, как следствие, росту тангенциальной эффективности. Однако, когда радиус моды становится намного больше радиуса пучка накачки, интенсивность насыщения практически постоянна по всему поперечному сечению накачки, что приводит к тому, что тангенциальная эффективность перестаёт зависеть от таких параметров как радиус моды  $w$ , а также мощности накачки и выходной мощности.

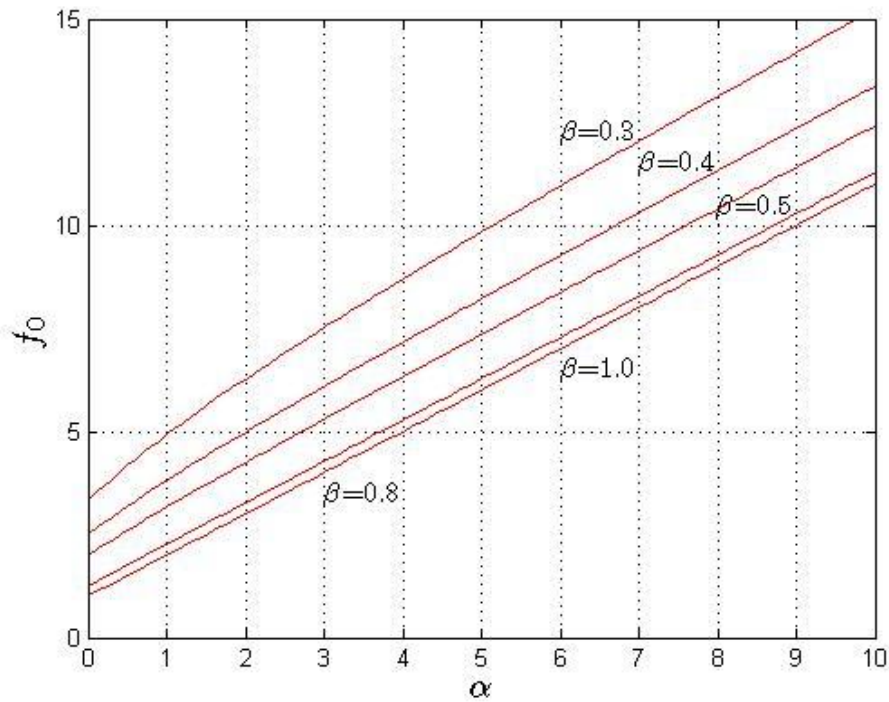


Рис. 3.а. Нормализованный порог  $f_0$  как функция  $\alpha$  для различной эллиптичности пучка  $\beta$ .

Эффективность перекрытия может быть увеличена за счёт расширения сечения моды с целью перехвата большей части эллиптического пучка накачки, но это возможно только ценой увеличения порога. На рис. 4 приведены семейства кривых, задающих нормированную выходную мощность лазера, как функцию  $\alpha$  при различных  $\xi$  и  $\beta$ . Для оптимизации выходной мощности лазера в случае роста входной мощности неизбежно приходится увеличивать радиус моды. Также из графиков следует, что в определённом диапазоне значений параметров накачки кривые уплощаются, и значительные вариации параметра  $\alpha$  относительно его оптимального значения слабо влияют на выходную мощность.

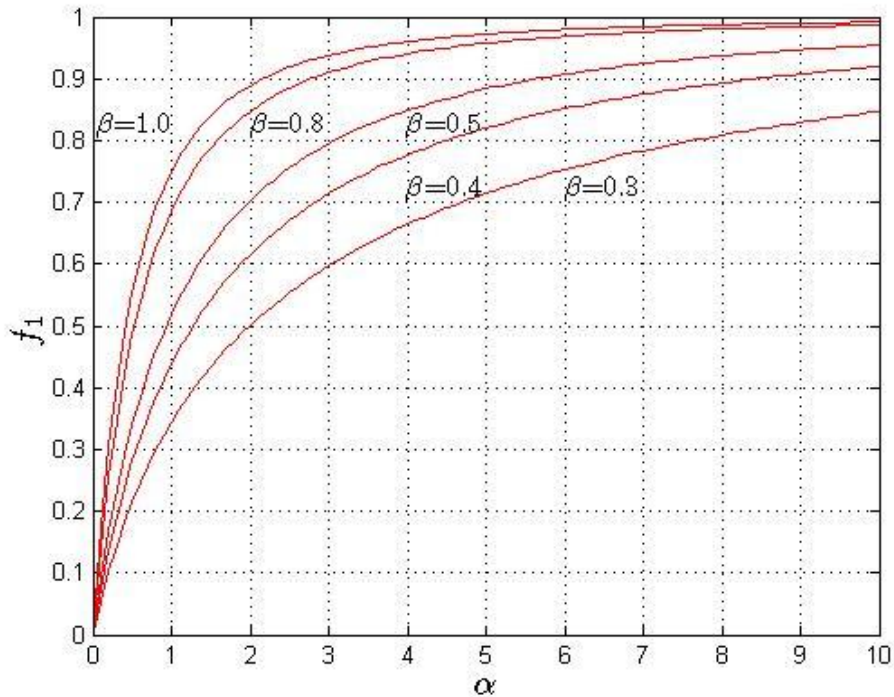


Рис. 3.б. Нормализованная эффективность перекрытия  $f_1$  как функция  $\alpha$  для различной эллиптичности пучка  $\beta$ .

На основании рассуждений и проведенных расчётов, следует построить кривые, аналогичные кривой зависимости  $\alpha_{opt}$  от нормализованной мощности накачки  $\xi$ , показанной на рис. 2. Разница состоит в том, что в отличие для уже рассмотренного случая осесимметричного пучка накачки, где была единственная кривая, получим семейство кривых для различной эллиптичности пучка накачки  $\beta$ . В данной КР строится 5 кривых для  $\beta = 0.3, 0.4, 0.5, 0.8, 1.0$  точно так же, как это было сделано на рис. 3 и рис. 4. Данное построение следует выполнить самостоятельно, в качестве упражнения на понимание прочитанного материала.

Процедура оптимизации радиуса основной поперечной моды резонатора производится абсолютно аналогично тому, как это было сделано в предыдущем параграфе с использованием рис. 2: сначала определяется оптимальный радиус моды, а затем с помощью рис 3.а и рис 3.б находится пороговая мощность накачки и тангенциальная эффективность. Выходная мощность может быть получена из графиков, приведенных на рис. 5.

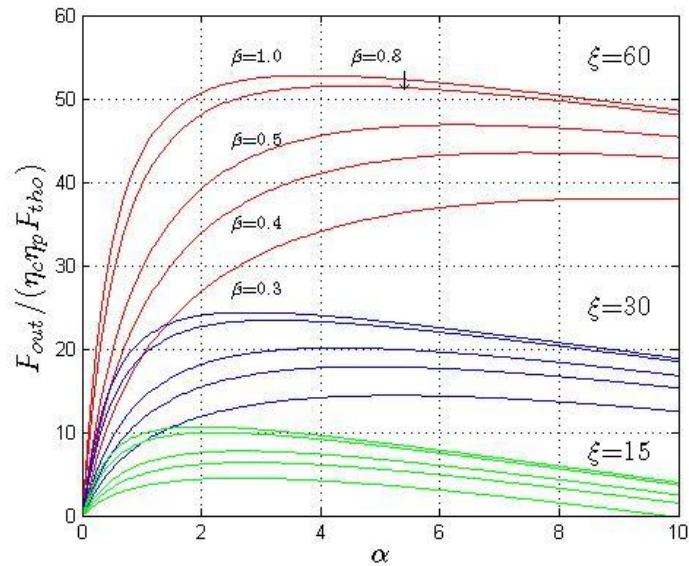


Рис. 4. Нормализованная выходная мощность как функция параметра  $\alpha$  для различных эллиптичностей пучка накачки  $\beta$ . Группы кривых, выделенные цветом, соответствуют различной нормализованной мощности накачки  $\xi$ . Параметр эллиптичности  $\beta$  повторяет свои значения для нормализованной мощности накачки  $\xi = 30$  и  $\xi = 15$ .

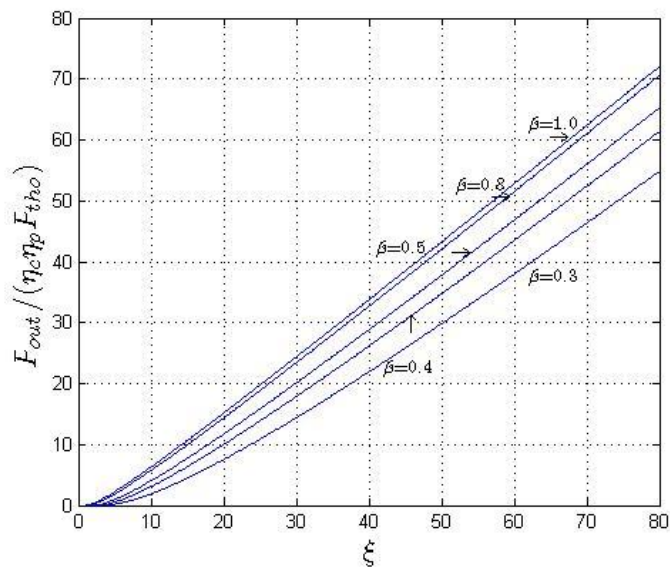


Рис. 5. Зависимость выходной мощности (нормализованной) лазера от входной (нормализованной) мощности для оптимизированного значения параметра  $\alpha = \alpha_{opt}$ .

Ход кривых свидетельствует о том, что система накачки с эллиптическим пучком уступает таковой с осесимметричным пучком для которого  $\bar{w}_p = \bar{w}_{pl}$ .



## Применение разработанной модели для оптимизации выходных параметров DPSS лазера.

Для проверки того, насколько хорошо рассмотренная модель описывает реальную ситуацию, рассмотрим типичный пример проектирования и экспериментального испытания сравнительно маломощного непрерывного DPSS лазера с торцевой накачкой. Конфигурация резонатора соответствует изображённой на рис. 1 с  $l_0 = 0$ .

Активной средой является кристалл Nd:YAG размером  $\varnothing 3 \times 5$ . Левый торец стержня просветлён на длине волны накачки 808 нм и имеет высокий (~99%) коэффициент отражения на рабочей длине волны 1064 нм. Таким образом, это поверхность является одновременно и плоским глухим зеркалом резонатора. Правый торец стержня просветлён на рабочей длине волны. Характерная длина поглощения составляет для данного кристалла  $1/a = 1.66$  мм. Выходное полупрозрачное зеркало имеет коэффициент пропускания  $T=6\%$  на рабочей длине волны. Радиус кривизны  $R$  данного зеркала может дискретно меняться в широком диапазоне (20-1000 мм), что обеспечивает перестройку радиуса моды резонатора от 60 до 300 мкм.

Источником излучения накачки является ЛД с размером светящейся области  $1 \times 100$  мкм. Расходимость составляет  $40^\circ$  по быстрой и  $10^\circ$  по медленной оси соответственно. Далее излучение накачки фокусировалось в объём АС с помощью различных оптических систем. Их характеристики представлены в табл. 1.

Табл. 1.

№ п/п	Тип оптической системы	Числовая апертура NA	Увеличение M	Краткое описание системы	$\bar{w}_{pl}$ , мкм	$\beta$
А	градиентный (GRIN lens)	0.46	2.2		117	0.92
В	коллиматор - фокусирующий объектив	0.61 для коллимирующей оптики	3.8	коллиматор $f' = 6.5$ мм фокусирующая оптика $f = 25$ мм	82	0.4
С	коллиматор - анаморфотный телескоп - фокусирующий объектив	0.61 для коллимирующей оптики	3.8 по быстрой оси ~1.0 по медленной оси	коллиматор $f' = 6.5$ мм призмный телескоп с кратностью $4^x$ фокусирующая оптика $f = 25$ мм	82	0.85

Для определения оптимального радиуса моды резонатора вычислим  $P_{th0}$  по формуле (18), полагая в ней  $I_{sat} = 2.32 \times 10^3 \text{ Вм} / \text{см}^2$   $\eta_p = 0.61$   $\gamma = 0.0335$ . Результирующее значение для  $P_{th0}$  составит соответственно 27.4 мВт для варианта А и 13.7 мВт для В и С. Если предположить, что на выходе формирующей оптической системы из-за неизбежных потерь мощность составит 0.92 от мощности ЛД (эмпирический коэффициент, адекватно описывающий экспериментальные реалии), то получим результаты, представленные в табл. 2.

Табл. 2.

№ п/п	$P_{th0}$ , мВт	$\xi$	$\alpha_{opt}$	$w$ , мкм	$P_{th}$ , мВт	$P_{out}$ , мВт
А	27.4	16.8	2.2	172	90	180
В	13.7	33.6	5.1	185	115	152
С	13.7	33.6	3.2	148	61	192

Подводя итог, следует сказать, что, несмотря на простоту, данная математическая модель описывает экспериментальную ситуацию достаточно хорошо. Результаты, приведенные в работе [1], наглядно это демонстрируют (см. рис.6).

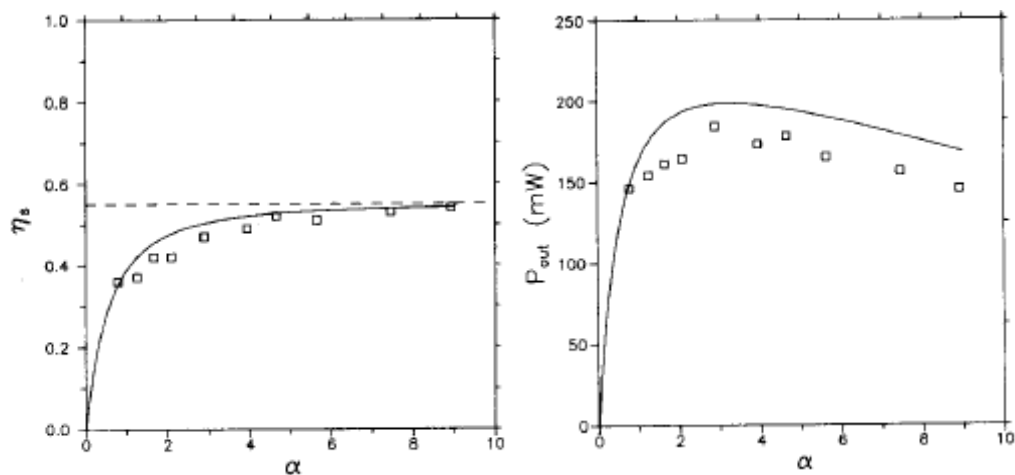


Рис. 6. Тангенциальная эффективность (слева) и выходная мощность (справа) DPSS лазера с торцевой накачкой, выполненного по варианту С. Сплошная линия – теоретическая кривая, точки – экспериментальные данные. Пунктирная горизонтальная прямая на графике эффективности соответствует максимальной теоретически достижимой эффективности в 54% [1].

## Состав пояснительной записки

Пояснительная записка по курсовой работе должен содержать следующие элементы:

1. Титульный лист.
2. Формулировку задания на курсовую работу, включающую информацию о параметрах выданного варианта задания.
3. Описание процесса расчёта оптимального резонатора DPSS лазера с торцевой накачкой
  - 3.1. Определение параметров характерной длины поглощения  $1/a$  и интенсивности насыщения  $I_{sat}$  по заданным характеристикам активной среды лазера;
  - 3.2. Определение достижимого радиуса пучка накачки и эллиптичности пучка накачки  $\beta$  (если это необходимо по варианту задания);
  - 3.3. Определение пороговой накачки  $P_{th0}$  и далее выбор  $\alpha_{opt}$  в зависимости от нормализованной мощности накачки  $\xi = P_{in}/P_{th0}$ . Для случая  $\beta \neq 1$  следует самостоятельно построить кривые зависимости  $\alpha_{opt}$  от нормализованной мощности накачки  $\xi$ .
  - 3.4. Вычисление радиуса моды резонатора и соответствующего радиуса кривизны выходного зеркала.
  - 3.5. Вычисление выходной мощности лазера.
4. При выполнении п. 3.2. следует выполнить расчёт формирующей оптической системы для пучка накачки.
5. Результаты численных экспериментов (текстовое описание с графическими иллюстрациями).
6. Вывод по курсовой работе с предложениями о достижимых выходных параметрах спроектированного лазера на основе полученных результатов.

## Защита курсовой работы

Для успешной защиты курсовой работы необходимо провести расчёт DPSS лазера с торцевой накачкой и обосновано выбрать оптимальные параметры резонатора. Также представить отчёт по курсовой работе и ответить на вопросы. Примерная тематика вопросов:

1. Как определяется параметр характерной длины поглощения  $1/a$  по заданным характеристикам активной среды лазера?

2. Как определяется параметр интенсивности насыщения  $I_{sat}$  по заданным характеристикам активной среды лазера?
3. Обосновать выбор изображающей оптики в случае накачки от ЛД с волоконным выводом излучения.
4. Объяснить смысл применения анаморфотного призмного телескопа в случае накачки от ЛД с выводом пучка в свободное пространство.
5. Предложить альтернативу призмному телескопу из п. 4.
6. Предложить альтернативу оптической схеме, изображённой на рис. 8 и обсудить преимущества и недостатки предложенного варианта.
7. Рассмотреть эффекты, влияющие на выходные параметры DPSS лазера, но не учтённые в теоретической модели.

### Варианты задания

В табл. 3 приведены варианты задания на курсовую работу. Во всех случаях предполагается, что активным ионом является  $Nd^{3+}$ , а режим накачки и излучения непрерывный. В этом случае справедливы допущения, сделанные при выводе расчётных соотношений. Указаны тип кристаллической матрицы активного элемента, тип лазерного диода (вывод волоконный или в свободное пространство) размер пучка накачки.

Таблица 3

№ варианта	Тип кристаллической матрицы	Концентрация активатора, %	Тип вывода излучения накачки	Длина волны генерации, нм	Размер пучка накачки, мкм
1	YAG ( $Y_3Al_5O_{12}$ )	0.6	волокно	1064	Ø100
2		0.8	волокно	1319	Ø100
3		1.0	волокно	1064	Ø200
4		1.2	волокно	1319	Ø200
5	YVO <sub>4</sub>	0.8	волокно	1064	Ø100
6		1.0	волокно	1064	Ø200
7		1.2	волокно	1064	Ø100
8		1.4	волокно	1064	Ø200
9	GdVO <sub>4</sub>	0.6	волокно	1064	Ø100
10		0.8	волокно	1064	
11		1.0	волокно	1064	
12		1.2	волокно	1064	
13	YAG ( $Y_3Al_5O_{12}$ )	0.6	свободное пространство	1064	1x100
14		0.8	свободное пространство	1319	1x100

15		1.0	свободное пространство	1319	1x100
16		1.2	свободное пространство	1064	1x100
17	YVO <sub>4</sub>	0.8	свободное пространство	1064	1x100
18		1.0	свободное пространство	1064	1x100
19		1.2	свободное пространство	1064	1x100
20		1.4	свободное пространство	1064	1x100

Получив задание, студент должен определить следующие параметры, необходимые далее для расчёта:

8. Характерную длину поглощения  $1/a$ , мм;
9. Интенсивность насыщения  $I_{sat}$ , Вт/см<sup>2</sup>;
10. коэффициент пропускания выходного зеркала принять  $T=6\%$  на рабочей длине волны, если преподавателем не задано иное значение;
11. принять  $\eta_p = 0.61$ , если преподавателем не задано иное значение.

Для варианта волоконного вывода излучения накачки принять равномерное распределение интенсивности по торцу волокна и рассчитать необходимый параметр, приняв оптическую схему осветителя аналогичной [4]:

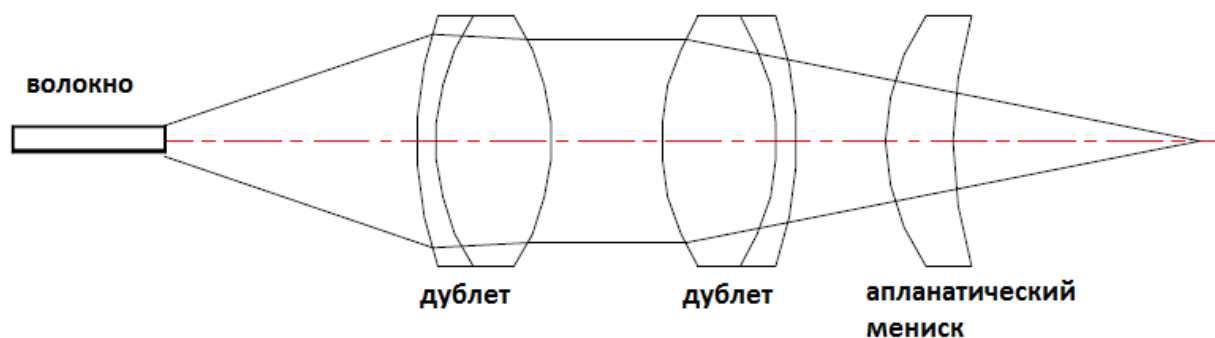


Рис. 8. Система ввода излучения накачки для ЛД с выходным волокном.

Для варианта, когда излучение ЛД никак не коллимируется, рассчитать призмный анаморфотный телескоп, как это сделано в [2] (стр. 249. 6.3.2.1 ПРОДОЛЬНАЯ НАКАЧКА).

Далее определить оптимальный размер моды резонатора и соответствующий радиус выходного зеркала. При выполнении данного завершающего пункта работы следует руководствоваться любым подходящим пособием. Например, [2] (глава 5 «ПАССИВНЫЕ

ОПТИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ», стр. 187, особо раздел 5.5. «УСТОЙЧИВЫЕ РЕЗОНАТОРЫ») или [5].

Для лучшего понимания вычисления параметров и построения кривых, приведенных на рис. 2, 3 (а,б), 4, 6 написаны соответствующие m-файлы. Все они находятся в приложении 1.

### Список рекомендованной литературы

1. Paolo Laporta, Marcel Brussard, “Design Criteria for Mode Size Optimization in Diode-Pumped Solid-State Lasers”, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 27, №10, October 1991.
2. О. Звелто, *Принципы лазеров*, изд. 4-е, С-Пб., М., Краснодар, 2008, ISBN 978-5-8114-3.
3. З. Карлов Н.В. *Лекции по квантовой электронике*, М., Наука, 1988, ISBN 5-02-013855-X.
4. Yihong Chen ; Zhengjun Xiong ; Gnian Cher Lim ; HongYu Zheng ; Xiaoyuan Peng *High-efficiency Nd:YVO4 laser end-pumped with a diode laser bar*, Proc. SPIE 3898, Photonic Systems and Applications in Defense and Manufacturing, 148 (November 4, 1999); doi:10.1117/12.368470.
5. В.Ю. Храмов *Расчёт элементов лазерных систем для информационных и технологических комплексов Учебно-методическое пособие*, изд. ИТМО, С-Пб., 2008.

## Приложение

Примеры программного кода на языке MATLAB для получения приведённых в методических указаниях графиков

### Для рис. 2:

```
clear all;
clc;
ksi=0:1:80;
alpha_opt=(sqrt(3.0)*sqrt(27.0*ksi.^2+1.0)/9.0+ksi).^(1/3)-
(sqrt(3.0)*sqrt(27.0*ksi.^2+1.0)/9.0-ksi).^(1/3)-1;
plot(ksi, alpha_opt, '-r', 'LineWidth',2);
axis([0 80 0 5]);
xlabel('$$\xi$$', 'interpreter','latex','fontsize',16,'rotation',0)
ylabel('$$\alpha_{opt}$$', 'interpreter','latex','fontsize',16,'rotation',90)
grid on;
```

### Для рис. 3.а:

```
clear all;
clc;

beta=0.3;
alpha=0:0.1:10;
f_0=sqrt((alpha+1.0).*(alpha*beta*beta+1.0))/beta;
plot(alpha, f_0, '-r', 'LineWidth',1);
axis([0 10 0 15]);
xlabel('$$\alpha$$', 'interpreter','latex','fontsize',16,'rotation',0);
ylabel('$$f_0$$', 'interpreter','latex','fontsize',16,'rotation',90);
text(6.0,12.25, '$$\beta=0.3$$', 'interpreter','latex','fontsize',12,'rotation',0);
hold on;

beta=0.4;
alpha=0:0.1:10;
f_0=sqrt((alpha+1.0).*(alpha*beta*beta+1.0))/beta;
plot(alpha, f_0, '-r', 'LineWidth',1);
text(7.0,11.5, '$$\beta=0.4$$', 'interpreter','latex','fontsize',12,'rotation',0);

beta=0.5;
alpha=0:0.1:10;
f_0=sqrt((alpha+1.0).*(alpha*beta*beta+1.0))/beta;
plot(alpha, f_0, '-r', 'LineWidth',1);
text(8.0,10.5, '$$\beta=0.5$$', 'interpreter','latex','fontsize',12,'rotation',0);

beta=0.8;
alpha=0:0.1:10;
f_0=sqrt((alpha+1.0).*(alpha*beta*beta+1.0))/beta;
plot(alpha, f_0, '-r', 'LineWidth',1);
text(3.0,3.5, '$$\beta=0.8$$', 'interpreter','latex','fontsize',12,'rotation',0);

beta=1.0;
alpha=0:0.1:10;
f_0=sqrt((alpha+1.0).*(alpha*beta*beta+1.0))/beta;
plot(alpha, f_0, '-r', 'LineWidth',1);
text(6.0,6.5, '$$\beta=1.0$$', 'interpreter','latex','fontsize',12,'rotation',0);
```

```
grid on;
hold on;
```

**Для рис. 3.б:**

```
clear all;
clc;

beta=0.3;
alpha=0:0.1:10;
f_1=beta*alpha.*sqrt((alpha+2.0).*(alpha*beta*beta+2.0))./((alpha+1.0).*(alpha*beta*beta+1.0));
plot(alpha, f_1, '-r', 'LineWidth',1);
text(6.0,0.725,'$$\beta=0.3','interpreter','latex','fontsize',12,'rotation',0);
hold on;

beta=0.4;
alpha=0:0.1:10;
f_1=beta*alpha.*sqrt((alpha+2.0).*(alpha*beta*beta+2.0))./((alpha+1.0).*(alpha*beta*beta+1.0));
plot(alpha, f_1, '-r', 'LineWidth',1);
text(4.0,0.725,'$$\beta=0.4','interpreter','latex','fontsize',12,'rotation',0);

beta=0.5;
alpha=0:0.1:10;
f_1=beta*alpha.*sqrt((alpha+2.0).*(alpha*beta*beta+2.0))./((alpha+1.0).*(alpha*beta*beta+1.0));
plot(alpha, f_1, '-r', 'LineWidth',1);
text(4.0,0.825,'$$\beta=0.5','interpreter','latex','fontsize',12,'rotation',0);

beta=0.8;
alpha=0:0.1:10;
f_1=beta*alpha.*sqrt((alpha+2.0).*(alpha*beta*beta+2.0))./((alpha+1.0).*(alpha*beta*beta+1.0));
plot(alpha, f_1, '-r', 'LineWidth',1);
text(2.0,0.825,'$$\beta=0.8','interpreter','latex','fontsize',12,'rotation',0);

beta=1.0;
alpha=0:0.1:10;
f_1=beta*alpha.*sqrt((alpha+2.0).*(alpha*beta*beta+2.0))./((alpha+1.0).*(alpha*beta*beta+1.0));
plot(alpha, f_1, '-r', 'LineWidth',1);
text(0.05,0.825,'$$\beta=1.0','interpreter','latex','fontsize',12,'rotation',0);
hold on;

axis([0 10 0 1]);
xlabel('$$\alpha$$','interpreter','latex','fontsize',16,'rotation',0);
ylabel('$$f_1$$','interpreter','latex','fontsize',16,'rotation',90);
grid on;
```

**Для рис. 4:**

```
clear all;
clc;

ksi=60.0;
for beta=[0.3, 0.4, 0.5, 0.8, 1.0]
    alpha=0:0.05:10;
```



```

f_0=sqrt((alpha+1.0).*(alpha*beta*beta+1.0))/beta;

f_1=beta*alpha.*sqrt((alpha+2.0).*(alpha*beta*beta+2.0))./((alpha+1.0).*(alpha*beta*beta+1.0));
P_out_norm=f_1.*(ksi-f_0);
plot (alpha, P_out_norm, '-r', 'LineWidth',1);
hold on;
end;
text(8.5,55.0,'$$\xi$$=60','interpreter','latex','fontsize',14,'rotation',0);
text(2.5,55.0,'$$\beta$$=1.0','interpreter','latex','fontsize',10,'rotation',0);
text(4.5,55.0,'$$\beta$$=0.8','interpreter','latex','fontsize',10,'rotation',0);
text(5.3,52.0,'\downarrow');
text(2.5,45.0,'$$\beta$$=0.5','interpreter','latex','fontsize',10,'rotation',0);
text(2.5,35.0,'$$\beta$$=0.4','interpreter','latex','fontsize',10,'rotation',0);
text(2.5,27.0,'$$\beta$$=0.3','interpreter','latex','fontsize',10,'rotation',0);

ksi=30.0;
for beta=[0.3, 0.4, 0.5, 0.8, 1.0]
alpha=0:0.05:10;
f_0=sqrt((alpha+1.0).*(alpha*beta*beta+1.0))/beta;

f_1=beta*alpha.*sqrt((alpha+2.0).*(alpha*beta*beta+2.0))./((alpha+1.0).*(alpha*beta*beta+1.0));
P_out_norm=f_1.*(ksi-f_0);
plot (alpha, P_out_norm, '-b', 'LineWidth',1);
hold on;
end;
text(8.5,25.0,'$$\xi$$=30','interpreter','latex','fontsize',14,'rotation',0);

ksi=15.0;
for beta=[0.3, 0.4, 0.5, 0.8, 1.0]
alpha=0:0.05:10;
f_0=sqrt((alpha+1.0).*(alpha*beta*beta+1.0))/beta;

f_1=beta*alpha.*sqrt((alpha+2.0).*(alpha*beta*beta+2.0))./((alpha+1.0).*(alpha*beta*beta+1.0));
P_out_norm=f_1.*(ksi-f_0);
plot (alpha, P_out_norm, '-g', 'LineWidth',1);
hold on;
end;
text(8.5,7.5,'$$\xi$$=15','interpreter','latex','fontsize',14,'rotation',0);

grid on;
axis([0 10 0 60]);
xlabel('$$\alpha$$','interpreter','latex','fontsize',16,'rotation',0);
ylabel('$$P_{out}/(\beta_c\beta_p)P_{th}$$','interpreter','latex','fontsize',16,'rotation',90);

```

### Для рис. 5:

```

lear all;
clc;

num=500;
ksi_start=0.0;
ksi_fin=80.0;
ksi_step=(ksi_fin-ksi_start)/num;

```

```

ksi=zeros(1, num);
alpha_opt=zeros(1, num);

for beta=[0.3, 0.4, 0.5, 0.8, 1.0]

    for k=1:1:num
        ksi(k)=ksi_step*(k-1);
        alpha=0:0.05:10;
        f_0=sqrt((alpha+1.0).*(alpha*beta*beta+1.0))/beta;

f_1=beta*alpha.*sqrt((alpha+2.0).*(alpha*beta*beta+2.0))./((alpha+1.0).*(alpha*beta*beta+1.0));
        P_out_norm=f_1.*(ksi(k)-f_0);
        [P_out_max, max_num]=max(P_out_norm);
        alpha_opt(k)=alpha(max_num);
    end

        f_0=sqrt((alpha_opt+1.0).*(alpha_opt*beta*beta+1.0))/beta;

f_1=beta*alpha_opt.*sqrt((alpha_opt+2.0).*(alpha_opt*beta*beta+2.0))./((alpha_opt+1.0).*(alpha_opt*beta*beta+1.0));
        P_out_norm=f_1.*(ksi-f_0);

        plot(ksi, P_out_norm, '-b', 'LineWidth',1);
        hold on;
end;

axis([0 80 0 80]);
grid on;
xlabel('$$\xi$$','interpreter','latex','fontsize',16,'rotation',0);
ylabel('$P_{out}/(\eta_c)\eta_p P_{th})$', 'interpreter','latex','fontsize',16,'rotation',90);
text(62.0,62.5,'$$\beta=1.0$$','interpreter','latex','fontsize',10,'rotation',0);
text(65.0,61.0,'\rightarrow');
text(52.0,52.5,'$$\beta=0.8$$','interpreter','latex','fontsize',10,'rotation',0);
text(57.0,51.0,'\rightarrow');
text(41.0,42.0,'$$\beta=0.5$$','interpreter','latex','fontsize',10,'rotation',0);
text(51.5,42.0,'\rightarrow');
text(42.0,22.5,'$$\beta=0.4$$','interpreter','latex','fontsize',10,'rotation',0);
text(45.0,29.5,'\uparrow');
text(62.0,37.5,'$$\beta=0.3$$','interpreter','latex','fontsize',10,'rotation',0);

```