

# Анализ хода лучей накачки в слэб-лазерах с угловой схемой накачки\*

Чен Ли, Кианг Лиу, Мали Гонг, Ганг Чен, Пинг Ян

*Рассмотрено распространение излучения накачки внутри активных слэб-элементов. Получены условия полного внутреннего отражения излучения накачки внутри слэба, на основе которых построена серия графических иллюстраций отражательных характеристик различных активных элементов.*

**Ключевые слова:** слэб-лазер, накачка, полное внутреннее отражение.

## 1. Введение

Существуют несколько типовых схем накачки твердотельных слэб-лазеров: поверхностная [1], боковая [2], торцевая [3] и угловая [4–8]. Для квазитрехуровневых сред поверхностная накачка не вполне приемлема, поскольку при такой схеме поглощение излучения происходит в направлении минимального размера активного элемента. В этом случае из-за относительно невысокого коэффициента поглощения материала накачка малоэффективна. Благодаря гораздо большей длине поглощения накачки три другие схемы намного эффективнее, что было подтверждено экспериментами: для наиболее известного квазитрехуровневого материала Yb:YAG в непрерывном режиме работы была получена выходная лазерная мощность киловаттного уровня [2–8].

Ранее в работах [4–8] было показано, что угловая схема является надежным и эффективным способом создания накачки в квазитрехуровневых средах. При такой схеме накачки вместо граней или торцов для ввода излучения используются угловые фаски. Излучение накачки направляется на плоскость среза фаски при помощи фокусирующего элемента и удерживается внутри слэба за счет полного внутреннего отражения (ПВО). Благодаря этому излучение накачки многократно проходит через активную среду, что повышает её эффективность и улучшает равномерность распределения инверсионной населенности. Наиболее важным достоинством угловой схемы накачки перед другими схемами является значительное увеличение длины поглощения в результате многократных отражений. Как следствие, возникает вопрос о требованиях к пучку накачки и материалу активного элемента для обеспечения ПВО. Решение этой задачи позволит правильно подбирать параметры излучения накачки и материал активного элемента с целью повышения эффективности поглощения. Ниже определяются условия удержа-

ния излучения накачки внутри слэба и анализируются полученные соотношения.

## 2. Упрощенная модель слэба прямоугольной формы

Для простоты рассмотрим сначала распространение излучения накачки в простом слэбе прямоугольной формы. Как показано на рис.1, излучение накачки попадает внутрь слэба через боковую поверхность 1, а затем, после преломления, отражается от поверхности 2, перпендикулярной поверхности 1. Обозначим угол преломления на поверхности 1 через  $\theta_1$ , а угол падения на поверхность 2 – через  $\theta_2$ . Очевидно, что

$$\theta_1 + \theta_2 = 90^\circ. \quad (1)$$

Таким образом, в свете дальнейших рассуждений лазерные материалы делятся по величине показателя преломления на две группы. В материале с показателем преломления, равным или большим  $\sqrt{2}$ , предельный угол  $\theta_c$  падения на поверхность 2 равен или меньше  $45^\circ$ , откуда следует соотношение

$$\theta_2 = 90^\circ - \theta_1 > 90^\circ - \theta_c \geq \theta_c. \quad (2)$$

В данном случае это означает, что если луч накачки входит в слэб через некоторую поверхность, он не может покинуть элемент через перпендикулярную ей поверхность.

К другой группе относятся материалы с показателем преломления, меньшим  $\sqrt{2}$ . Для этих материалов предельный угол  $\theta_c$  превышает  $45^\circ$ . Таким образом, для луча с большим углом падения на поверхность 1 условие ПВО на поверхности 2 может не выполняться, и луч покинет слэб. Однако у большинства популярных матриц, таких как YAG, YLF и YVO<sub>4</sub>, показатель преломления больше  $\sqrt{2}$  [9], поэтому при распространении излучения накачки

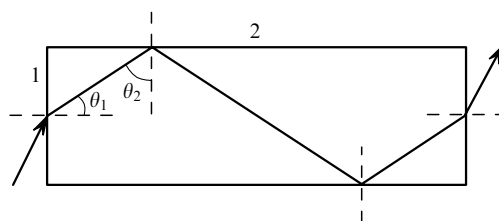


Рис.1. Отражение излучения накачки в прямоугольном слэбе.

\*Перевод с англ. В.В.Кошечкиной.

Chen Li, Qiang Liu, Mali Gong, Gang Chen, Ping Yan. Center for Photonics and Electronics, State Key Laboratory of Tribology, Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, P. R. China; e-mail: c.li@mail.tsinghua.edu.cn

Поступила в редакцию 13 сентября 2006 г., после доработки – 30 октября 2006 г.

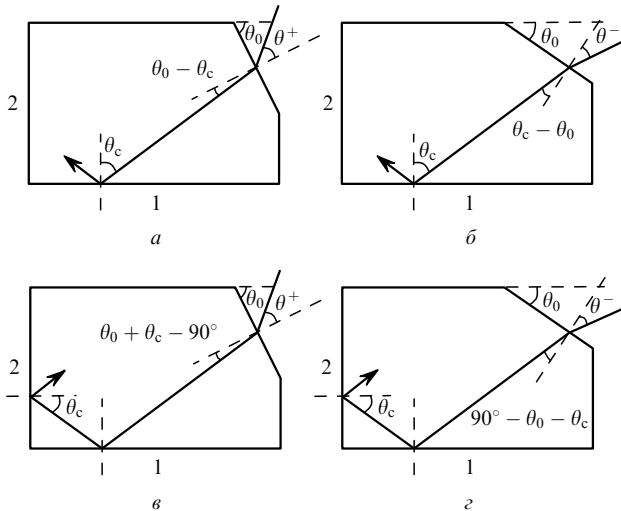


Рис.2. Ход луча накачки внутри слэба при угловой схеме накачки.

внутри активного элемента длина поглощения может быть равна длине слэба (торцевая накачка) или его ширине (боковая накачка).

### 3. Анализ угловой накачки слэба

Используемые на практике слэбы отличаются от упрощенной модели прямоугольной формы наличием фасок, через которые вводится излучение накачки. Пример такого элемента приведен на рис.2, где для простоты показана только одна фаска. В этом случае путь луча внутри элемента более сложен. В зависимости от соотношений между углом фаски  $\theta_0$  и предельным углом  $\theta_c$  задачу можно разделить на четыре части. В приведенных ниже формулах угол падения, отсчитываемый против часовой стрелки от нормали к плоскости фаски, обозначается через  $\theta^+$  (рис.2,а и в), а угол, отсчитываемый по часовой стрелке, – через  $\theta^-$  (рис.2,б и г);  $n$  – показатель преломления. Для наглядности рассматривался предельный случай, когда угол падения пучка накачки на поверхность 1 или 2 равен предельному углу  $\theta_c$ .

#### 3.1. Отражение от плоскости 1

Если  $\theta_0 \geq \theta_c$ , то согласно рис.2,а получаем

$$\theta^+ = \arcsin[n \sin(\theta_0 - \theta_c)]. \tag{3}$$

Таким образом, условие ПВО для падающего на поверхность 1 излучения имеет вид

$$0 \leq \theta^+ \leq \arcsin[n \sin(\theta_0 - \theta_c)], \tag{4}$$

$$0 \leq \theta^- \leq 90^\circ.$$

Если  $\theta_0 < \theta_c$ , то согласно рис.2,б получаем

$$\theta^- = \arcsin[n \sin(\theta_c - \theta_0)], \tag{5}$$

и условие ПВО имеет вид

$$\theta^+ \in \Phi, \tag{6}$$

$$\arcsin[n \sin(\theta_c - \theta_0)] \leq \theta^- \leq 90^\circ.$$

Здесь и далее  $\Phi$  – пустое множество.

#### 3.2. Отражение от плоскости 2

Если  $\theta_0 + \theta_c \geq 90^\circ$ , то согласно рис.2,в получаем

$$\theta^+ = \arcsin[n \sin(\theta_0 + \theta_c - 90^\circ)]. \tag{7}$$

Таким образом, условие ПВО имеет вид

$$\arcsin[n \sin(\theta_0 + \theta_c - 90^\circ)] \leq \theta^+ \leq 90^\circ, \tag{8}$$

$$\theta^- \in \Phi.$$

Если  $\theta_0 + \theta_c < 90^\circ$ , то согласно рис.2,г получаем

$$\theta^- = \arcsin[n \sin(\theta_c - \theta_0)], \tag{9}$$

и условие ПВО имеет вид

$$0 \leq \theta^+ \leq 90^\circ, \tag{10}$$

$$0 \leq \theta^- \leq \arcsin[n \cos(\theta_0 + \theta_c)].$$

Анализ всех рассмотренных выше случаев дает диапазон углов падения пучка накачки, в пределах которого свет будет испытывать полное внутренне отражение как от поверхности 1, так и от поверхности 2. Обобщая, можно записать следующее.

1. При  $\theta_0 \geq \theta_c$  и  $\theta_0 + \theta_c \geq 90^\circ$

$$\arcsin[n \sin(\theta_0 + \theta_c - 90^\circ)] \leq \theta^+ \leq \arcsin[n \sin(\theta_0 - \theta_c)], \tag{11}$$

$$\theta^- \in \Phi.$$

2. При  $\theta_0 \geq \theta_c$  и  $\theta_0 + \theta_c < 90^\circ$

$$0 \leq \theta^+ \leq \arcsin[n \sin(\theta_0 - \theta_c)], \tag{12}$$

$$0 \leq \theta^- \leq \arcsin[n \cos(\theta_0 + \theta_c)].$$

3. При  $\theta_0 < \theta_c$  и  $\theta_0 + \theta_c \geq 90^\circ$

$$\theta^+ \in \Phi, \quad \theta^- \in \Phi. \tag{13}$$

4. При  $\theta_0 < \theta_c$  и  $\theta_0 + \theta_c < 90^\circ$

$$\theta^+ \in \Phi, \tag{14}$$

$$\arcsin[n \sin(\theta_c - \theta_0)] \leq \theta^- \leq \arcsin[n \cos(\theta_0 + \theta_c)].$$

Следует отметить, что при полном внутреннем отражении пучка накачки от поверхностей 1 и 2 это условие выполняется и для других граней слэба. Таким образом, если луч падает на одну из фасок под углом, удовлетворяющим условиям (11), (12), (14) он будет оставаться внутри слэба вплоть до момента достижения других фасок. В данном случае мы пренебрегаем возможной непараллельностью противоположных граней, связанной с погрешностями изготовления или особенностями профиля в случае подавления шума [2]. Таким образом, для уменьшения возможных потерь излучения накачки площадь среза фасок должна быть довольно небольшой.

Еще раз напомним, что в зависимости от величины показателя преломления мы подразделяем лазерные материалы на две группы: одна с  $n \geq \sqrt{2}$  ( $\theta_c \leq 45^\circ$ ), другая с  $n < \sqrt{2}$  ( $\theta_c > 45^\circ$ ).

Для первой группы материалов выражения (11), (12) и (14) можно упростить до следующего вида.

1. При  $\theta_0 \geq 90^\circ - \theta_c$

$$\arcsin[n \sin(\theta_0 + \theta_c - 90^\circ)] \leq \theta^+ \leq \arcsin[n \sin(\theta_0 - \theta_c)], \tag{15}$$

$$\theta^- \in \Phi.$$

$$\begin{aligned}
 &2. \text{ При } \theta_c \leq \theta_0 < 90^\circ - \theta_c \\
 &0 \leq \theta^+ \leq \arcsin[n \sin(\theta_0 - \theta_c)], \\
 &0 \leq \theta^- \leq \arcsin[n \cos(\theta_0 + \theta_c)].
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

$$\begin{aligned}
 &3. \text{ При } \theta_0 < \theta_c \\
 &\theta^+ \in \Phi, \\
 &\arcsin[n \sin(\theta_c - \theta_0)] \leq \theta^- \leq \arcsin[n \cos(\theta_0 + \theta_c)].
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

Путем несложного анализа можно показать, что для второй группы материалов не существует углов падения излучения накачки, при которых пучок испытывал бы ПВО одновременно от поверхностей 1 и 2.

Из выражений (16) очевидно, что при  $\theta_0 = 45^\circ$  углы  $\theta^+$  и  $\theta^-$  имеют одинаковые предельные значения для ПВО. На рис.3 показаны предельные значения  $\theta^+$  и  $\theta^-$  в зависимости от величины показателя преломления  $n$  при  $\theta_0 = 45^\circ$  и  $n \geq \sqrt{2}$ . Вначале зависимость практически линейна, но по мере увеличения показателя преломления ее кривизна возрастает. В случае  $n > 2.613$  предельные значения  $\theta^+$  и  $\theta^-$  достигают  $90^\circ$ , откуда следует, что при любом угле падения излучение накачки будет испытывать ПВО внутри слэба и будет заперто в активном элементе. При наличии фасок излучение накачки может покинуть элемент только через них. Из рис.3 также следует, что для увеличения эффективности поглощения накачки в случае угловой схемы необходимо, чтобы материал слэба имел большие показатели преломления. По этой причине матрицы YAG и YVO<sub>4</sub> предпочтительнее матрицы YLF.

Дальнейшее рассмотрение проведем на примере активного элемента Yb:YAG. Поскольку показатель преломления Yb:YAG составляет приблизительно 1.82, предельный угол для этого материала  $\theta_c = 33.3^\circ$ . На рис.4 для разных углов фаски  $\theta_0$  показаны рассчитанные диапазоны углов падения, при которых излучение накачки будет испытывать полное внутренне отражение на обеих поверхностях. Для того чтобы условию ПВО удовлетворяла как можно большая часть пучка накачки, угол фаски следует выбирать из диапазона  $33.3^\circ \leq \theta_0 \leq 56.7^\circ$ . При изменении  $\theta_0$  от  $33.3^\circ$  до  $56.7^\circ$  предельное значение  $\theta^+$  изменяется от 0 до  $46.3^\circ$ , в то время как предельное значение  $\theta^-$  – от  $46.3^\circ$  до 0. В случае  $\theta_0 = 45^\circ$  предельные значения  $\theta^+$  и  $\theta^-$  равны и составляют  $21.7^\circ$ .

На практике излучение накачки обычно доставляется к активному элементу через фокусирующий элемент, например волоконный (fiber bundle) [2] или линзовый (lens-

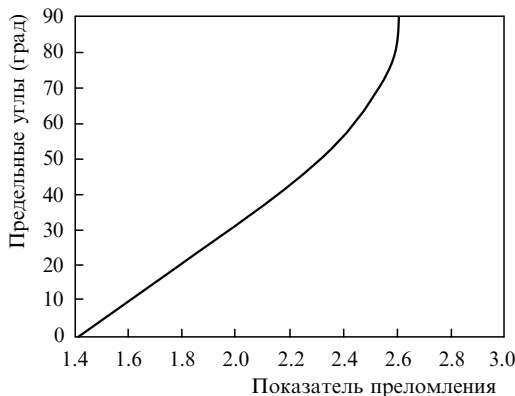


Рис.3. Предельные значения углов  $\theta^+$  и  $\theta^-$  при угловой схеме накачки в зависимости от показателя преломления.

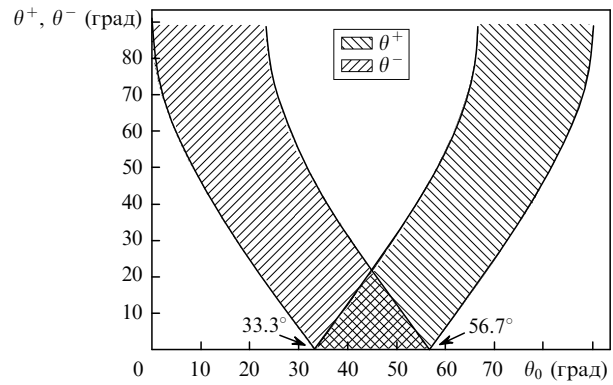


Рис.4. Диапазон допустимых углов падения  $\theta^+$  и  $\theta^-$  в зависимости от угла фаски  $\theta_0$ ;  $n = 1.82$ .

duct) [3–6]. При таких способах подвода излучения накачки его интенсивность обычно максимальна в центре пространственного распределения и спадает к краю. В таком случае для использования большей части излучения накачки угол фаски  $\theta_0$  должен составлять  $45^\circ$ . Кроме того, если учесть экспоненциальный закон поглощения накачки, то согласно выражению (4) очевидно, что угол  $\theta_0$  должен немного превышать  $45^\circ$ . При этом условии большая часть накачки будет испытывать ПВО на поверхности 1 и поглощаться в слэбе.

Мы рассмотрели отражение излучения накачки от боковых поверхностей слэба. Стоит более подробно остановиться на отражении от поверхностей фасок. Из проведенного выше анализа следует, что в случае угловой накачки слэба угол между боковой стороной и плоскостью фаски должен быть как можно ближе к  $45^\circ$ . После нескольких отражений от боковых сторон и поглощения ионами активатора затухающее излучение накачки может, в конце концов, попасть на плоскость фаски под углом, близким к  $90^\circ$ . В таком случае очевидно наличие френелевских потерь на плоскости фаски, однако они незначительны. При соответствующем профиле слэба и конструкции фокусирующей оптики возможно уменьшение площади среза фаски и соответственно дальнейшее сокращение указанного вида потерь.

#### 4. Экспериментальные результаты

Сотрудниками нашего подразделения была опубликована серия экспериментальных результатов для лазера на композитном слэбе Yb:YAG/YAG с угловой схемой накачки [4–8]. Активный элемент был получен путем диффузионного сращивания слэба Yb:YAG толщиной 1 мм, шириной 4 мм и длиной 42 мм с двумя неактивированными YAG-слэбами с размерами  $1 \times 2 \times 42$  мм. Три слэба были сращены по поверхности  $1 \times 42$  мм в виде «сэндвича» (рис.5). Для обеспечения ввода накачки после сращивания у слэба были срезаны фаски, в результате чего образовались плоскости с размерами  $1 \times 2.8$  мм. Согласно проведенному выше анализу, для эффективного поглощения накачки и удобства изготовления угол фасок составил  $45^\circ$ . При угловой схеме накачки на этом композитном активном элементе была получена средняя выходная мощность 1050 Вт при дифференциальном КПД 42.8 % и оптической эффективности 33.6 % [8]. Достаточно высокая эффективность свидетельствует о хорошем поглощении излучения накачки активным элементом.

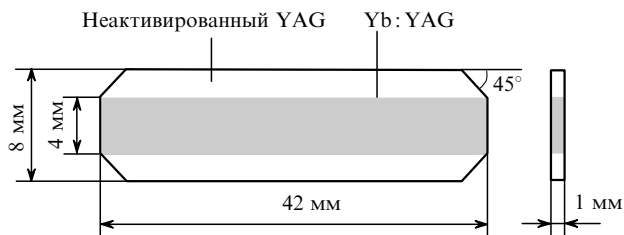


Рис.5. Композитный слэб Yb:YAG/YAG с фасками, срезанными под углом  $45^\circ$  [4–8].

Был проведен расчет хода лучей при различных углах фасок  $\theta_0$ . Полученные значения эффективности приведены в табл.1. Видно, что эффективность поглощения максимальна для композитного слэба с фасками под углом  $\theta_0 = 50^\circ$ , что хорошо согласуется с данными разд.3.

В настоящее время ведется работа по дальнейшему повышению эффективности накачки. Для этого, несмотря на достаточно большие технологические сложности, готовятся композитные слэбы с углами среза фасок, немного превышающими  $45^\circ$ . В ближайшем будущем планируется провести сравнительный анализ генерационных свойств этих элементов.

Табл.1. Эффективность поглощения накачки композитным слэбом (рис.5) при различных углах фасок  $\theta_0$  (атомная концентрация активатора в элементе Yb:YAG равна 0.5%, длина волны накачки – 940 нм).

$\theta_0$ (град)	$\eta_{\text{abs}}$ (%)
45	81.38
50	86.69
55	86.02

## 5. Заключение

Представлены результаты исследования распространения пучка накачки в слэбе при угловой схеме накачки. Выведены условия полного внутреннего отражения накачки внутри слэба. Полученные выражения представляют большой интерес для повышения эффективности поглощения накачки при разработке слэб-лазеров. Слоб, изготовленный из материала с показателем преломления менее  $\sqrt{2}$ , не может удерживать внутри излучение накачки. При показателе преломления, превышающем  $\sqrt{2}$ , существует диапазон углов падения пучка накачки, в пределах которого излучение будет испытывать полное внутреннее отражение на всех гранях слэба, оставаясь, таким образом, внутри активного элемента. Показано также, что для повышения эффективности поглощения излучения накачки угол фасок слэба должен быть близок к  $45^\circ$ .

1. Martin W.S., Chernoch J.P. U.S. Patent 3633126, 1972.
2. Rutherford T.S., Tulloch W.M., Sinha S., Byer R.L. *Opt. Lett.*, **26**, 986 (2001).
3. Goodno G.D., Palese S., Harkenrider J., Injeyan H. *Opt. Lett.*, **26**, 1672 (2001).
4. Gong M., Li C., Liu Q., Chen G., Gong W., Yan P. *Appl. Phys. B: Lasers and Optics*, **79**, 265 (2004).
5. Liu Qiang, Gong Mali, Li Chen, Wupeng Gong, Fuyuan Lu, Chen Gang. *Acta Phys. Sinica*, **54**, 721 (2005).
6. Liu Qiang, Gong Mali, Lu Fuyuan, Gong Wupeng, Li Chen. *Opt. Lett.*, **30**, 726 (2005).
7. Gong Mali, Lu Fuyuan, Liu Qiang, Gong Wupeng, Li Chen. *Appl. Opt.*, **45**, 3806 (2006).
8. Liu Qiang, Gong Mali, Lu Fuyuan, Gong Wupeng, Li Chen, Ma Dongdong. *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 101113 (2006).
9. Kaminskii A.A. *Laser Crystals: Their Physics and Properties* (New York: Springer-Verlag, 1990).