

©БГУ

РАЗРАБОТКА МАЛОГАБАРИТНЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ZIGZAG ЛАЗЕРОВ НА ОСНОВЕ ПЛОСКОЙ УСЕЧЕННОЙ ПРИЗМЫ

М. С. ЛЕОНЕНЯ, И. С. МАНАК

Described the design features of solid-state zigzag lasers based on a flat truncated prism. Identified the range of the cavity construction angles under which the whole volume of zigzag laser take part in generating output power. Refined the values of the harmful losses of the zigzag laser three-mirror optical resonator, in which apart from material losses on absorption and scattering in the matrix of the active media are included losses on the radiation transferring through the non-ideal reflecting mirrors that provide a zigzag course of the beam in the cavity. Analyzed the dependences of the losses coefficient and output power for Nd:Glass laser from the design parameters of the three-mirror zigzag laser resonator

Ключевые слова: zigzag лазер, трехзеркальный резонатор, энергетические потери, выходная мощность

ВВЕДЕНИЕ

Твердотельные лазеры представляются наиболее универсальными источниками когерентного излучения среди всех лазерных систем благодаря возможности варьирования в широких пределах выходных энергетических характеристик, таких как средняя и пиковая мощность, длительность и частота повторения импульсов, длина волны излучения [1]. В качестве активных сред твердотельных лазеров наиболее эффективными являются кристаллы или стекла, активированные ионами редких земель, например Nd^{3+} , Er^{3+} , Yb^{3+} [1–3]. Инверсная населенность в твердотельных лазерах создается оптической накачкой лампами вспышками, дуговыми лампами и полупроводниковыми источниками накачки [1]. Одним из возможных путей повышения компактности, эффективности и качества пучка выходного излучения твердотельных лазеров является разработка конструкций, в которых достигается эффективное взаимодействие активных частиц и излучения в резонаторе. К таким относятся лазеры с активным элементом в форме плоской призмы (slab-лазеры) и зигзагообразным ходом луча (zigzag лазеры) в оптическом трехзеркальном резонаторе [4]

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТРЕХЗЕРКАЛЬНОГО РЕЗОНАТОРА ZIGZAG ЛАЗЕРА В ФОРМЕ ПЛОСКОЙ УСЕЧЕННОЙ ПРИЗМЫ

Твердотельные zigzag лазеры с активным элементом в форме плоской усеченной призмы высокотехнологичны. Активный элемент (АЭ) вырезается из кристалла или стекла и соответствующим образом обрабатывается [5]. Грань $bchg$ активного элемента используется для накачки активного вещества (рис. 1а), а на грань $adef$ наносится высокоотражающее покрытие на длине волны излучения накачки от линеек или матриц лазерных диодов [3].

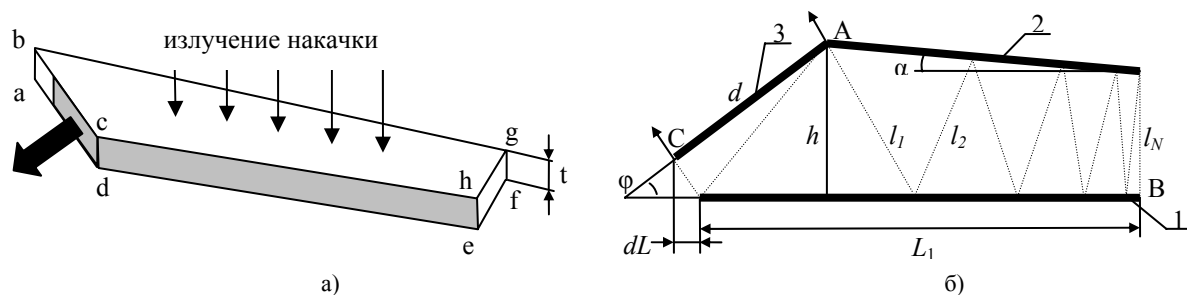


Рис.1. Схематическое изображение твердотельного лазерного активного элемента в форме плоской усеченной призмы (а) и трехзеркального резонатора (б) (зеркала обозначены жирными линиями): 1 и 2 – высокоотражающие зеркала, 3 – выходное зеркало

Часть не поглотившегося в активном элементе излучения накачки отражается от зеркала на грани $adeh$ для последующего поглощения при распространении в обратном направлении, что позволяет уменьшить неоднородность распределения поглощенной в АЭ мощности и увеличить эффективность поглощения излучения накачки в активном элементе [3, 6, 7].

Оптический трехзеркальный резонатор zigzag лазера на основе плоской усеченной призмы (рис.1а) образован зеркалами 1, 2 и 3, частично или полностью нанесенными на грани $abgf$, $cdeh$ и $abcd$ АЭ (рис.1б). Высокоотражающие зеркала 1 и 2 образуют между собой угол α и обеспечивают зигзагообразный ход излучения в резонаторе [4, 5]. Выходное полупрозрачное зеркало 3 образует с зеркалом 2 угол φ [4, 5]. Излучение, распространяющееся в активном элементе перпендикулярно зеркалу 3, поочередно отражается от зеркал 1 и 2 до тех пор, пока угол падения на одно из зеркал не становится равным нулю. В этот момент происходит отражение излучения, и самовоспроизведение пути его распространения к зеркалу 3 в обратном направлении вплоть до выхода части излучения через это зеркало [4, 5]. По мере распространения в активном элементе пучок параллельных лучей, распространяющихся зигзагообразно, сохраняет свою форму и при определенных значениях параметров конструкции лазера длина однократного прохода излучения в резонаторе значительно превосходит поперечные или продольные размеры последнего. Число возможных отражений оптического луча в такой системе рассчитывается по формуле [5]:

$$N = 1 + \varphi / \alpha. \quad (1)$$

Отсюда легко получить требование, налагаемое на углы α и φ плоской усеченной призмы: $\varphi \geq \alpha$ и $\varphi / \alpha = n$, где n – целое число. Максимальное значение угла φ обусловлено тем, что весь объем между зеркалами 1, 2 и 3 должен участвовать в генерации выходного излучения [6]. При значении $\varphi > 45^\circ$ (рис. 2а) между зеркалами 1, 2 и 3 появляются области, через которые не проходит излучение, распространяющееся зигзагообразно в лазере и участвующее в генерации выходного сигнала; при $\varphi = 45^\circ$ (рис. 2б) весь объем активного элемента заполнен излучением; при $\varphi < 45^\circ$ (рис. 2в) у левого края активного элемента появляется область не участвующая в генерации выходного излучения, ввиду чего размер зеркал 1, 2 и 3 не совпадает с размером граней.

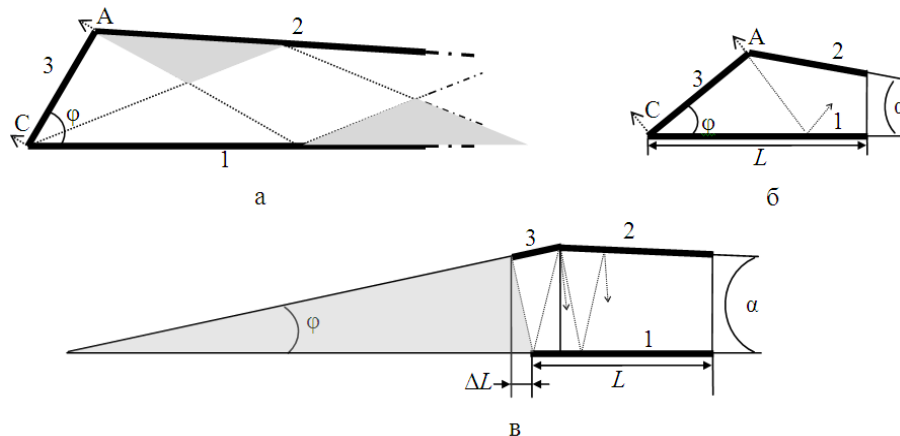


Рис.2. Конструкция активного элемента и резонатора zigzag лазера со значением угла $\varphi > 45^\circ$ и $\alpha = 5^\circ$ (а), $\varphi = 45^\circ$ и $\alpha = 15^\circ$ (б), $\varphi < 45^\circ$ и $\alpha = 5^\circ$ (в) (закрашены области активного элемента, не участвующие в генерации выходного сигнала): 1 и 2 – высокоотражающие зеркала, 3 – выходное зеркало

Следовательно, максимальное значение угла φ конструкции zigzag лазера на основе плоской усеченной призмы ограничено 45° [6]. Минимальное значение в $0,1^\circ$ выбрано из соображений практической реализуемости. Кроме того, из условия $\varphi \geq \alpha$ следует, что $\alpha \leq 45^\circ$. Таким образом, углы φ и α принимают значения от $0,1^\circ$ до 45° [6].

Соотношение для длины L_1 зеркала 1, при которой обеспечивается повторение траектории распространения излучения при обратном ходе, имеет следующий вид [3,5,6]:

$$L_1 = h[\operatorname{ctg} \alpha - \cos(\varphi + \alpha) / \sin \alpha], \quad (2)$$

где h – максимальный размер активной среды между гранями 1 и 2.

Хотя высота призмы меняется с расстоянием L_1 , однако, ввиду малости угла α , в первом приближении можно считать, что высота призмы равна h .

При значении $\varphi = 45^\circ$ длина L_1 зеркала 1 совпадает с длиной активного элемента (рис. 2б). При $\varphi < 45^\circ$ у левого края активного элемента появляется область не участвующая в генерации выходного излучения, как показано на рис. 2в. Вся закрашенная область активного элемента, представленная на рис. 2в, или ее часть может быть срезана из соображений компактности лазера. Тогда длина активного элемента определяется суммой $L = \Delta L + L_1$ и выражается по формуле [6]:

$$L = h[\operatorname{tg} \varphi \cdot \cos 2\varphi + \operatorname{ctg} \alpha - \cos(\varphi + \alpha) / \sin \alpha]. \quad (3)$$

Величина апертуры выходного излучения определяется размером прямоугольного зеркала 3 (рис. 1б). Одна из сторон зеркала 3 равна толщине t активного элемента. Другая сторона определяется длиной отрезка AC и составляет:

$$d = 2h \sin \varphi. \quad (4)$$

Положение точки C определяется местом нормального падения краевого луча на зеркало 3, который, поочередно отразившись от зеркал 3 и 1, падает на зеркало 2 в точке A и затем распространяется по зигзагообразной траектории (рис. 1б).

Ввиду того, что толщина t является независимым параметром конструкции активного элемента лазера, а ширина выходного зеркала d зависит от высоты h и угла φ , можно считать, что размер апертуры выходного излучения определяется шириной d при заданной толщине t .

Все лучи параллельного оптического пучка, зигзагообразно распространяющиеся в резонаторе от точки нормального отражения от зеркала 3 до нормального падения на зеркало 1, имеют практически одинаковую длину l . Выражение, связывающее длину траектории l , по которой распространяется излучение в активной среде за один проход от точки A на зеркале 3 до точки B на зеркале 1, с углами α и φ и высотой h , имеет вид [4-7]:

$$l = h \left\{ \frac{1}{\cos \varphi} + \cos(\alpha + \varphi) \sum_{k=1}^{\varphi/\alpha} \{ \cos[\varphi - (k-1)\alpha] \cdot \cos(\varphi - k\alpha) \}^{-1} \right\}. \quad (5)$$

Значение длины l определяется суммой отрезков $l_1, l_2, \dots, l_N$ между зеркалами 1 и 2 (рис. 1б). Каждый такой отрезок в первом приближении равен высоте h активного элемента при $0,1^\circ \leq \alpha < 5^\circ$ и $0,1^\circ \leq \varphi < 25^\circ$. Так как число таких отрезков N , то длину траектории l можно вычислять по более простой зависимости [6]:

$$l \approx N \cdot h. \quad (6)$$

Значение эффективной длины прохода пучка излучения в активной среде можно вычислять по формуле (6) со сравнительно небольшой относительной погрешностью $\delta < 5\%$ в области значений углов $0,1^\circ \leq \alpha < 5^\circ$ и $0,1^\circ \leq \varphi < 25^\circ$.

Эффективный объем V активного элемента, заполненный излучением, которое распространяется в лазере по зигзагообразной траектории, вычисляется по формуле [6,8]:

$$V = t \cdot h^2 \left[\frac{\cos^2 \alpha - \cos^2(\varphi + \alpha)}{\sin 2\alpha} + \frac{\cos^2 \varphi - \cos^2 2\varphi}{\sin 2\varphi} \right]. \quad (7)$$

Выражение (7) для эффективного объема V активного элемента определено при $\varphi \leq 45^\circ$, когда вся область между зеркалами 1, 2 и 3 участвует в генерации выходного излучения.

Наиболее перспективными с точки зрения компактности представляются конструкции с длиной активного элемента приблизительно равной высоте, или незначительно больше ее. Данные значения L реализуются для различных комбинаций углов α и φ из области от $0,1^\circ$ до 45° при заданной высоте h . При значениях угла $0,1^\circ \leq \varphi \leq 30^\circ$ ширина выходного зеркала, а следовательно и ширина пучка вы-

ходного излучения d меньше поперечных (высота h) и продольных (длина L) размеров активного элемента [6].

При распространении лазерного луча практически ортогонально оси кристалла можно получить длину траектории l одного прохода излучения по такому резонатору, намного превышающую длину L . Это достигается при высоких значениях числа отражений N , реализуемых при $0,1^\circ \leq \alpha \leq 5^\circ$ и $0,1^\circ \leq \varphi \leq 45^\circ$. Конструкция лазера с высоким отношением l/L , небольшим поперечным размером пучка выходного излучения и компактными размерами реализуется при значении углов $0,1^\circ \leq \varphi \leq 30^\circ$, $0,1^\circ \leq \alpha \leq 5^\circ$ [6].

ЗАВИСИМОСТЬ ВЫХОДНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ZIGZAG ЛАЗЕРОВ ОТ ФОРМЫ АКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА

В zigzag лазерах с активным элементом в форме плоской усеченной призмы (рис. 1) помимо вредных потерь на поглощение и рассеяние в матрице активного вещества ρ и полезных потерь генерируемого излучения через выходное зеркало 3, появляются дополнительные вредные потери при отражении пучка излучения от зеркал 1 и 2 с одинаковыми неизменными коэффициентами отражения r . В этом случае суммарный коэффициент вредных потерь определяется формулой [6, 9]:

$$\rho^* = \frac{2N-1}{2l} \ln \frac{1}{r} + \rho. \quad (8)$$

С учетом выражения (8) и в приближении постоянства коэффициента усиления k по всему объему активного вещества выходная мощность излучения zigzag лазера с эффективным объемом активного вещества V , вычисляется по формуле [6, 8, 9]:

$$S_{\text{опт}}^{\text{уд}} = \nu k_r^{\text{опт}} (k - \rho^* - k_r^{\text{опт}}) (\rho^* + k_r^{\text{опт}})^{-1} \beta^{-1}, \quad (9)$$

где $k_r^{\text{опт}} = \frac{1}{2l} \ln \frac{1}{r_3^{\text{опт}}}$, – коэффициент полезных потерь, характеризующий потери энергии на выход излучения из резонатора через выходное зеркало с оптимальным коэффициентом отражения

$$r_3^{\text{опт}} = \exp[-2l(\sqrt{k\rho^*} - \rho^*)] \quad [9].$$

Для активной среды на стекле, легированном ионами Nd^{3+} , характеризуемой параметрами $\beta = 0,1 \cdot 10^7 \text{ см}^3/\text{с} \cdot \text{Дж}$, $k = 0,15 \text{ см}^{-1}$, $\rho = 0,01 \text{ см}^{-1}$, при высоте активного элемента $h = 1 \text{ см}$ и коэффициенте отражения зеркал 1 и 2 резонатора $r = 0,998$ в зависимости от формы активного элемента, определяемой углами α и φ , удельная выходная мощность излучения $S_{\text{опт}}^{\text{уд}}$, рассчитанная по формуле (9) с коэффициентом ρ^* в соответствии с (8), меняется в незначительных пределах для конструкций лазерного резонатора с разными углами α и φ , как показано на рис. 3.

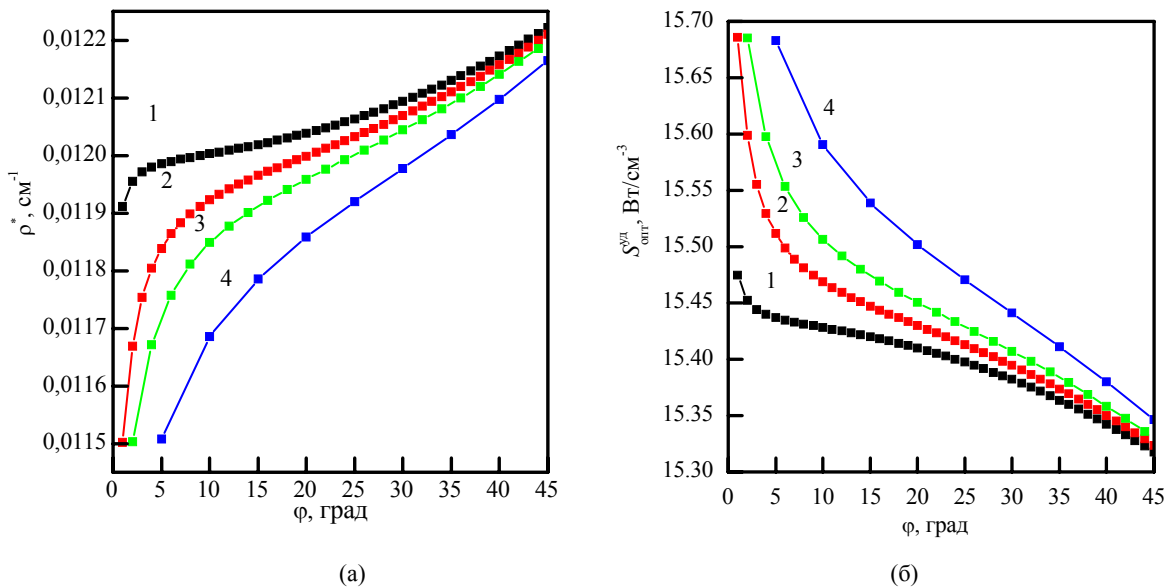


Рис.3. Зависимость коэффициента вредных потерь ρ^* (а) и удельной выходной мощности $S_{\text{опт}}^{\text{уд}}$ (б) от угла φ при $h = 1 \text{ см}$ и $r = 0,998$ и вариации значений угла α : 1 – $\alpha = 0,1^\circ$; 2 – $\alpha = 1^\circ$; 3 – $\alpha = 2^\circ$; 4 – $\alpha = 5^\circ$

Удельная выходная мощность $S_{\text{опт}}^{\text{уд}}$, оптимизированная по коэффициенту r_3 , убывает с ростом значения φ при некотором α , так как растет число отражений N , и соответственно увеличиваются вредные потери ρ^* . Максимальные значения $S_{\text{опт}}^{\text{уд}} \approx 15,69 \text{ Вт/см}^3$ соответствуют значениям $N=2$, когда значение ρ^* минимально и составляет $\rho^* \approx 0,0115 \text{ см}^{-1}$ (рис. 3). Однако уменьшение $S_{\text{опт}}^{\text{уд}}$ с ростом φ незначительно и составляет всего 2,5% по отношению к максимальному значению при $h = 1 \text{ см}$ и коэффициенте отражения зеркал 1 и 2 резонатора $r = 0,998$. Значения удельной выходной мощности $S_{\text{опт}}^{\text{уд}}$ значительно падают при уменьшении коэффициента отражения r , что обусловлено ростом потерь излучения на прохождение через зеркала 1 и 2. Таким образом при изготовлении zigzag лазеров необходимо использовать зеркала 1 и 2 с максимально высоким коэффициентом отражения $r \approx 0,998$ для получения максимальных энергетических характеристик при заданных углах φ и α и высоте h активного элемента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Твердотельные zigzag лазеры на основе плоской усеченной призмы с диодной накачкой представляют практический интерес благодаря возможности повышения компактности и эффективности преобразования подводимой энергии в излучение. В zigzag лазере в форме плоской усеченной призмы использование оригинальной конструкции многопроходного трехзеркального резонатора высокое отношение длины траектории зигзагообразного распространения излучения к длине резонатора l/L , небольшим поперечным размером пучка выходного излучения и компактными размерами реализуется при значении углов $0,1^\circ \leq \varphi \leq 30^\circ$, $0,1 \leq \alpha \leq 5^\circ$. Анализ энергетических характеристик показал, что для получения максимальных значений выходных мощностей лазерного излучения необходимо использовать зеркала, между которыми реализуется зигзагообразный ход излучения в резонаторе с максимально возможным коэффициентом отражения, ввиду роста при малых r коэффициента вредных потерь.

Литература

1. Koechner W. Solid-State Laser Engineering. 6 ed. Springer. 2006. 766 p.
2. Дрозд А. Н., Манак И. С. Твердотельные лазеры с диодной накачкой. Полупроводниковые лазеры: Сб. науч. статей. Вып. 2. Мн.: БГУ. 2003. С. 96–160.
3. Леоненя М.С., Манак И.С. Твердотельные zigzag лазеры с диодной накачкой // 8-й Белорусско-Российский семинар «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе»: Сб. науч. статей. Мн.: Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси. 2011. С. 217–220.
4. Патент РБ №6244, 30.06.2004. Твердотельный лазер / Орлов Л.Н., Некрашевич Я.И., Желтов Г.И., Жуковский В.В.
5. Жуковский В.В., Леоненя М.С., Манак И.С. Малогабаритные твердотельные лазеры с зигзагообразным ходом излучения в активном элементе // Электроника инфо. 2008. №7. С. 55 – 58.
6. Леоненя М.С., Манак И.С. Физические основы миниатюризации лазерных источников излучения // Квантовая электроника: перспективные направления: монография; под ред. канд. физ.-мат. наук, доцента И.С. Манака. Мн.: Акад. упр. при Президенте Респ. Беларусь, 2012. С. 7–46.
7. Патент на полезную модель РБ №7515, 27.01.11. Твердотельный источник лазерного излучения / В.В. Жуковский, И.С. Манак, М.С. Леоненя // Белорусский государственный университет / Афіцыйны бюлетэнь. 2011. №4(81). С. 225.
8. Manak I.S., Zukowski V.V., Leanenia M.S. Optimizing energy performance of zigzag slab lasers in form of flat truncated prisms // Caol 2010 International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, Sevastopol, Ukraine. Conference Proceedings. 2010. P. 152-154.
9. Манак И.С., Леоненя М.С. Оптимальные параметры и энергетические характеристики zigzag лазеров на основе плоской усеченной призмы // Вестник БГУ. 2011. Сер.1. №1. С. 41-45.