

ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ZIGZAG-ЛАЗЕРОВ НА ОСНОВЕ ПЛОСКОЙ УСЕЧЕННОЙ ПРИЗМЫ

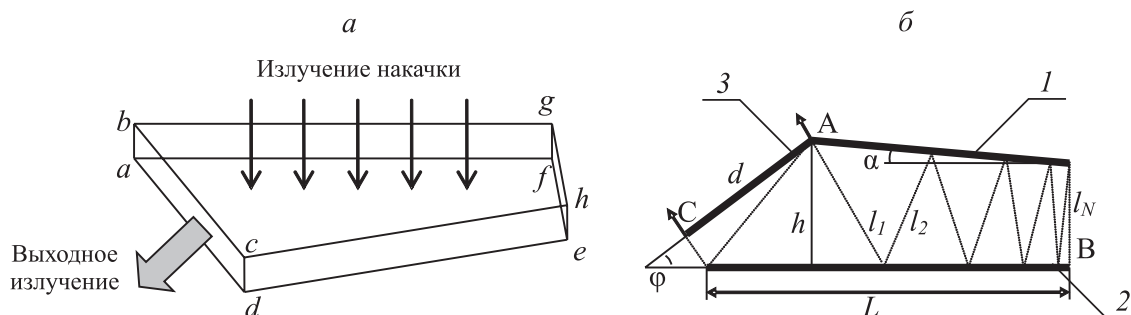
The design features of a neodymium zigzag laser active element diode pumped by a GaAlAs-matrix through one of the plane-parallel faces of a truncated prism, and an additional mirror on the opposite face to improve the efficiency and uniformity of the pump are described; the energy loss in a three-mirror resonator including the additional loss of radiation on the reflecting mirrors that provide a zigzag course of the beam in the cavity is considered; the analytical expressions for the optimal resonator parameters and output power characteristics of the laser in the form of zigzag plane of the truncated prism are derived.

Твердотельные лазеры, генерирующие излучение высокой мощности как в импульсном, так и в непрерывном режимах, представляют большой практический интерес в различных приложениях, к которым относятся прежде всего лазерная обработка материалов, беспроводная оптическая связь, дальнометрия, мониторинг окружающей среды.

Уменьшения габаритов твердотельных лазерных источников излучения и повышения эффективности преобразования энергии накачки в излучение можно добиться путем совершенствования конструкции активного элемента. Поставленные задачи могут быть успешно решены в лазерах с активным элементом в виде плоской усеченной призмы с зигзагообразным ходом луча (zigzag-лазеры) в оптическом резонаторе [1]. Однако многие характеристики этого типа лазеров требуют дополнительных исследований. В данной работе описаны конструктивные особенности твердотельного zigzag-лазера на основе плоской усеченной призмы, рассмотрены потери энергии в трехзеркальном резонаторе, получены аналитические выражения для оптимальных параметров резонатора и выходных энергетических характеристик.

Конструктивные особенности активного элемента

Особенности конструкции активного элемента (рисунок) рассмотрены на примере неодимового лазера, активный элемент которого вырезается, например, из кристалла алюмо-иттриевого граната или стекла, активированных ионами Nd^{3+} , и соответствующим образом обрабатывается.



Активный элемент zigzag-лазера в форме плоской усеченной призмы (а) и оптическая схема трехзеркального резонатора лазера и ход луча в нем (б) (зеркала обозначены жирными линиями)

Грань $bchg$ используется для накачки активного вещества (рис. а). Особенно перспективны в этом случае лазерные диодные или светодиодные матрицы на основе GaAlAs, спектром которых можно эффективно управлять путем изменения компонентного состава полупроводника. Идеальное согласование спектров поглощения активного вещества и спектров излучения матриц достигается варьированием температуры тепловода последних. В спектре поглощения ионов неодима, например, в матрице алюмо-иттриевого граната, имеется широкая полоса на длине волны $\sim 0,8$ мкм, поэтому возможно идеальное согласование спектров поглощения ионов Nd^{3+} и излучения $Ga_{1-x}Al_xAs$ -матрицы, диапазон работы которой лежит в области $0,75 \div 0,88$ мкм. Нанесенное на грань $adef$ активного элемента высокоотражающее покрытие на длине волны излучения $Ga_{1-x}Al_xAs$ -матрицы обеспечивает более однородную по всему объему накачку и повышает ее эффективность [2].

Грани $dche$, $abgf$ и $abcd$ с зеркальными покрытиями 1, 2 и 3 соответственно образуют трехзеркальный оптический резонатор, представленный на рис. б. Высокоотражающие зеркала 1 и 2 образуют между собой угол α и обеспечивают зигзагообразный ход излучения в резонаторе. Выходное полупрозрачное зеркало 3 образует с зеркалом 2 угол ϕ .

Излучение, распространяющееся в активном элементе перпендикулярно зеркалу 3, поочередно отражается от зеркал 2 и 1 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.

Число возможных отражений оптического луча в такой системе рассчитывается по формуле $N = 1 + \phi / \alpha$ [3]. Отсюда легко получить требование, налагаемое на углы α и ϕ плоской усеченной призмы: $\phi \geq \alpha$ и $\phi / \alpha = n$, где n – целое число.

Соотношение для длины L зеркала 2, при которой обеспечивается повторение траектории луча при обратном ходе, имеет следующий вид [3]:

$$L = h[\text{ctg } \alpha - \cos(\phi + \alpha) / \sin \alpha], \quad (1)$$

где h – максимальное расстояние между зеркалами 1 и 2 (см. рис. б). Хотя высота призмы меняется с расстоянием L , однако при малых углах α в первом приближении можно считать, что высота призмы по всей длине L остается практически неизменной.

Все лучи параллельного оптического пучка, зигзагообразно распространяющиеся в резонаторе от точки нормального отражения от зеркала 3 до нормального падения на зеркало 2, имеют практически

одинаковую длину l . Выражение, связывающее длину траектории l , по которой распространяется излучение в активной среде за один проход от точки А на зеркале 3 до точки В на зеркале 2, с углами α и φ и высотой h , имеет вид [3]

$$l = h \left\{ \frac{1}{\cos \varphi} + \cos(\alpha + \varphi) \sum_{k=1}^{\varphi/\alpha} \{ \cos[\varphi - (k-1)\alpha] \cdot \cos(\varphi - k\alpha) \}^{-1} \right\}. \quad (2)$$

Значение длины l определяется суммой отрезков l_1, l_2, \dots, l_N между зеркалами 1 и 2 (см. рис. б). В области значений углов $0,1^\circ \leq \varphi \leq 15^\circ$ и $0,1^\circ \leq \alpha \leq 2^\circ$ каждый такой отрезок в первом приближении равен высоте h активного элемента. Так как число таких отрезков N , то длину траектории l с небольшой относительной погрешностью $\delta < 5\%$ можно вычислять по более простой зависимости:

$$l \approx N \cdot h. \quad (3)$$

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

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

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

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 .

Эффективный объем V активного элемента, заполненный излучением, которое распространяется в лазере по зигзагообразной траектории, вычисляется по формуле

$$V = t \cdot h^2 \left[\frac{\cos^2 \alpha - \cos^2(\varphi + \alpha)}{\sin 2\alpha} + \frac{\cos^2 \varphi - \cos^2 2\varphi}{\sin 2\varphi} \right]. \quad (5)$$

Таким образом, исходя из зависимостей (1) – (5), варьируя углы α и φ плоской усеченной призмы в пределах от $0,1$ до 45° , можно изменять соотношение между длиной и высотой активного элемента, длину оптического пути l , размер апертуры выходного зеркала d и эффективный объем активного элемента V в широких пределах. При значениях угла $0,1^\circ \leq \varphi \leq 30^\circ$ ширина выходного зеркала, а следовательно и ширина пучка выходного излучения d меньше поперечных (высота h) и продольных (длина L) размеров активного элемента. При распространении лазерного луча практически ортогонально оси кристалла можно получить эффективную длину l пути одного прохода излучения по такому резонатору, намного превышающую длину L . При углах $0,1^\circ \leq \varphi \leq 5^\circ$ и $0,1^\circ \leq \alpha \leq 0,5^\circ$ отношение длины прохода луча в резонаторе к длине активной среды $l/L > 15$.

Потери энергии в трехзеркальном резонаторе

В zigzag-лазерах с активным элементом в форме плоской усеченной призмы (см. рисунок) по сравнению с лазерами с резонатором Фабри-Перо помимо вредных потерь на поглощение и рассеяние в матрице активного вещества ρ и полезных потерь генерируемого излучения через выходное зеркало 3 с коэффициентом отражения r_3 , характеризующихся величиной $k_r = \frac{1}{2l} \ln \frac{1}{r_3}$, появляются до-

полнительные 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 [3]

$$\rho^* = \frac{2N-1}{2l} \ln \frac{1}{r} + \rho. \quad (6')$$

Воспользовавшись приближенной формулой для расчета длины l одного прохода луча в резонаторе $l \approx N \cdot h$, зависимость (6') преобразуем к виду

$$\rho^* = \frac{2N-1}{2Nh} \ln \frac{1}{r} + \rho. \quad (6'')$$

При $N \gg 1$ формула (6'') упрощается до вида

$$\rho^* = \frac{1}{h} \ln \frac{1}{r} + \rho. \quad (6''')$$

При малых значениях угла α можно считать, что зеркала 1 и 2 в первом приближении параллельны друг другу и образуют резонатор Фабри-Перо, коэффициент потерь на зеркалах которого определяется в точности с формулой (6'').

Уменьшить значение коэффициента вредных потерь ρ^* можно увеличением высоты активного элемента, однако в этом случае возрастают габариты лазера. Анализ выражения (6'') показывает, что для уменьшения значения коэффициента вредных потерь ρ^* в резонаторе необходимо использовать зеркала 1 и 2 с высоким значением коэффициента отражения r . Однако даже при использовании высокоотражающих покрытий максимально возможный коэффициент отражения составляет $r \approx 0,998$, что предъявляет высокие требования к качеству изготавливаемой конструкции.

Выходные энергетические характеристики

Для лазера с резонатором Фабри-Перо мощность излучения на выходе лазера объемом V вычисляется по формуле [4]

$$S = vhtL \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{r_3' r_4'} (k - \rho - \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{r_3' r_4'}) (\rho + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{r_3' r_4'})^{-1} \beta^{-1}, \quad (7)$$

где v – скорость света в активной среде; h, t, L – высота, толщина, длина активного элемента соответственно; k – коэффициент усиления; β (см³/Дж) – параметр нелинейности; $k_r = \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{r_3' r_4'}$ – коэффициент полезных потерь, характеризующий потери энергии на выход излучения из резонатора длиной L через зеркала с коэффициентами отражения r_3' и r_4' ; ρ – коэффициент, учитывающий потери на поглощение и рассеяние в матрице.

Для zigzag-лазера, представленного на рисунке, формула (7) модифицируется с учетом того, что появляются вредные потери при отражении излучения на зеркалах 1 и 2 с одинаковыми коэффициентами отражения r , определяемые по формуле (6'').

С учетом выражения (6'') и в приближении постоянства коэффициента усиления по всему объему активного вещества выходная мощность излучения zigzag-лазера с эффективным объемом активного вещества V вычисляется по формуле

$$S = vV \frac{1}{2l} \ln \frac{1}{r_3} (k - \rho^* - \frac{1}{2l} \ln \frac{1}{r_3}) (\rho^* + \frac{1}{2l} \ln \frac{1}{r_3})^{-1} \beta^{-1},$$

где $k_r = \frac{1}{2l} \ln \frac{1}{r_3}$ – коэффициент полезных потерь, характеризующий потери энергии на выход излучения из резонатора через выходное зеркало с коэффициентом отражения r_3 ; l – длина траектории, по которой распространяется излучение за один проход в резонаторе; V – эффективный объем активного элемента zigzag-лазера, занимаемый пучком зигзагообразно распространяющегося в резонаторе излучения.

Удельная выходная мощность излучения zigzag-лазера, определяемая как выходная мощность, нормированная на единицу объема активного вещества, вычисляется по формуле

$$S^{уд} = v \frac{1}{2l} \ln \frac{1}{r_3} (k - \rho^* - \frac{1}{2l} \ln \frac{1}{r_3}) (\rho^* + \frac{1}{2l} \ln \frac{1}{r_3})^{-1} \beta^{-1}.$$

Оптимальные параметры

Дифференцируя удельную выходную мощность $S^{уд}$ zigzag-лазера по коэффициенту полезных потерь $\frac{1}{2l} \ln \frac{1}{r_3}$ и приравняв производную к нулю, получим

$$\left(\frac{1}{2l} \ln \frac{1}{r_3} \right)_{\text{опт}} = \sqrt{k\rho^*} - \rho^*.$$

Это выражение позволяет определить оптимальное значение коэффициента полезных потерь и оптимальное значение r_3 при заданных k, ρ и l , обеспечивающих максимальную мощность излучения zigzag-лазера:

$$k_r^{\text{опт}} = \frac{1}{2l} \ln \frac{1}{r_3^{\text{опт}}},$$

$$r_3^{\text{опт}} = \exp[-2l(\sqrt{k\rho^*} - \rho^*)]. \quad (8)$$

Оптимизированное по коэффициенту отражения выходного зеркала $r_3^{\text{опт}}$ выражение для расчета удельной выходной мощности $S_{\text{опт}}^{\text{уд}}$ излучения zigzag-лазера определяется формулой

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

Учитывая (8), оптимизированная по $r_3^{\text{опт}}$ выходная мощность излучения zigzag-лазера с эффективным объемом активного вещества вычисляется по формуле

$$S_{\text{опт}} = \nu V k_r^{\text{опт}} (k - \rho^* - k_r^{\text{опт}})(\rho^* + k_r^{\text{опт}})^{-1} \beta^{-1}.$$

Таким образом, получены выражения оптимальных параметров трехзеркального резонатора и выходных энергетических характеристик zigzag-лазеров с активным элементом в форме плоской усеченной призмы.

* * *

Конструктивные особенности активного элемента неодимового zigzag-лазера с диодной накачкой излучением GaAlAs-матриц через одну из плоскопараллельных граней усеченной призмы и дополнительным зеркалом на противоположной грани позволяют повысить эффективность и однородность накачки. Кроме потерь на поглощение и рассеяние в матрице активного вещества учтены дополнительные потери через отражающие зеркала, обеспечивающие зигзагообразный ход луча в резонаторе, на основании чего уточнено выражение для коэффициента вредных потерь. С учетом возникновения дополнительных потерь в резонаторе zigzag-лазера получены аналитические выражения, определяющие оптимальный коэффициент отражения выходного зеркала и оптимальное значение коэффициента полезных потерь, для получения максимальных выходных мощностей.

1. Твердотельный лазер: Пат. 6244 Респ. Беларусь, МПК Н 01S 3/00 / Орлов Л.Н., Некрашевич Я.И., Желтов Г.И., Жуковский В.В. / Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Респ. Беларусь; опубл. 30.06.04 // Афіцыйны бюл. 2004. № 2 (41). С. 236.

2. Твердотельный лазер: Пат. на полезную модель 7029 Респ. Беларусь, МПК Н 01S 3/00 / Жуковский В.В., Манак И.С., Леоненя М.С. / БГУ. № 20100600; опубл. 02.07.10.

3. Жуковский В.В., Леоненя М.С., Манак И.С. // Электроника-инфо. 2008. № 7. С. 55.

4. Методы расчета ОКГ / Под ред. Б.И. Степанова: в 2 т. Мн., 1967. Т. 1. С. 111.

Поступила в редакцию 22.12.10.

Иван Степанович Манак – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник кафедры квантовой радиофизики и оптоэлектроники.

Максим Сергеевич Леоненя – магистрант кафедры квантовой радиофизики и оптоэлектроники.