

Твердотельные zigzag лазеры с диодной накачкой

М. С. Леоненя, И. С. Манак

Белорусский государственный университет, Минск

Проанализированы преимущества диодной накачки твердотельных лазеров на высокоэффективных активных средах. Рассмотрены конструктивные особенности твердотельных zigzag лазеров на основе плоской усеченной призмы. Установлены диапазоны углов, при которых реализуется конструкция лазера с небольшим поперечным размером пучка выходного излучения, что позволяет заметно увеличить плотность выходной мощности. Показано, что система диодной накачки хорошо сочетается с планарной геометрией твердотельного zigzag лазера на основе плоской усеченной призмы.

Ключевые слова: диодная накачка, активная среда, твердотельный лазер, zigzag лазер, трехзеркальный резонатор.

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 часто используются кристаллы или стекла, легированные редкоземельными ионами (Nd^{3+} , Er^{3+} , Ho^{3+} , Ce^{3+} , Tm^{3+} , Pr^{3+} , Gd^{3+} , Eu^{3+} , Yb^{3+} , Sm^{2+} , Dy^{3+} , Tm^{2+}) [1, 2]. Инверсная населенность в твердотельных лазерах создается оптической накачкой лампами вспышками, дуговыми лампами и полупроводниковыми источниками накачки [1]. Повышения компактности, эффективности и качества пучка выходного излучения твердотельных лазеров можно добиться использованием высокоэффективных активных сред, совершенствованием системы накачки и конструкции лазерного резонатора.

1. Твердотельные zigzag лазеры в форме плоской усеченной призмы

Решение задач достижения компактности и повышения эффективности твердотельных лазерных систем может быть реализовано в лазерах с активным элементом (АЭ) в форме плоской усеченной призмы и зигзагообразным ходом луча в трехзеркальном оптическом резонаторе (zigzag лазеры) (рис. 1) [3].

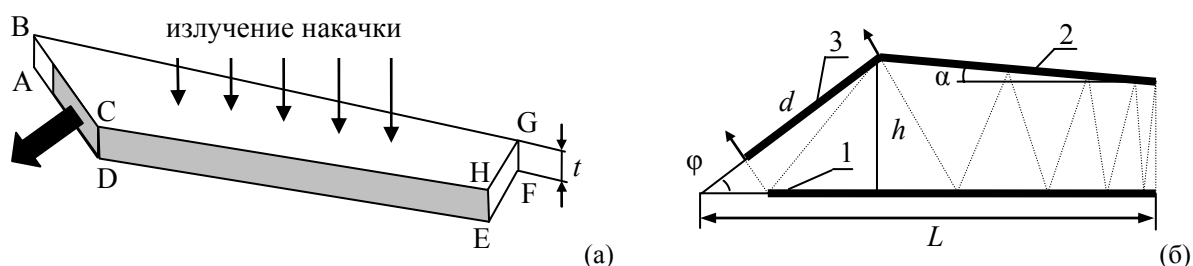


Рис. 1. Лазер с активным элементом в форме плоской усеченной призмы (а) и оптическая схема трёхзеркального резонатора лазера (б): 1 и 2 – высокоотражающие зеркала, 3 – выходное зеркало.

Zigzag лазеры с активным элементом в форме плоской усеченной призмы высокотехнологичны. АЭ вырезается из кристалла или стекла и соответствующим образом обрабатывается. Грань $BCHG$ активного элемента используется для накачки активного вещества (рис. 1 а), а на грань $ADEF$ наносится высокоотражающее

покрытие на длине волны излучения накачки от линеек или матриц лазерных диодов, что обеспечивает более однородную по всему объему накачку и повышает ее эффективность [4].

Оптический трехзеркальный резонатор zigzag лазера на основе плоской усеченной призмы образован зеркалами 1, 2 и 3, частично или полностью нанесенными на грани $ABGF$, $CDEH$ и $ABCD$ соответственно (рис. 1 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 1 угол φ . Излучение, распространяющееся в АЭ 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 [5].

Число возможных отражений оптического луча в такой системе определяется как $N = 1 + \varphi/\alpha$. Отсюда легко получить требование, налагаемое на углы α и φ плоской усеченной призмы: $\varphi \geq \alpha$ и $\varphi/\alpha = n$, где n – целое число. 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 АЭ. 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 $0,1^\circ \leq \varphi \leq 45^\circ$. Таким образом, при значениях углов $0,1^\circ \leq \varphi \leq 30^\circ$, $0,1^\circ \leq \alpha \leq 5^\circ$ конструкция лазера характеризуется высоким отношением l/L , небольшой апертурой пучка выходного излучения и компактными размерами.

2. Диодная накачка твердотельных лазеров

Наиболее эффективными источниками накачки твердотельных лазеров являются светодиоды или лазерные диоды [1, 2]. Полупроводниковые лазерные диоды обладают с практической точки зрения рядом достоинств: экономичностью, малой инерционностью, компактностью, простотой устройства, высокой надежностью и позволяют легко перестраивать длину волны излучения путем изменения компонентного состава полупроводника. Лазерные диоды генерируют выходные мощности до значений порядка 10 Вт, однако они не могут равномерно возбудить протяженный объем АЭ. Для увеличения выходной мощности полупроводниковые лазеры или светодиоды группируются в одномерные массивы – линейки, или двухмерные массивы – матрицы. В результате выходная мощность непрерывного излучения с одного сантиметра длины линейки лазерных диодов достигает 50 Вт/см с эффективностью порядка 40 – 50 % (рис. 2) [2].

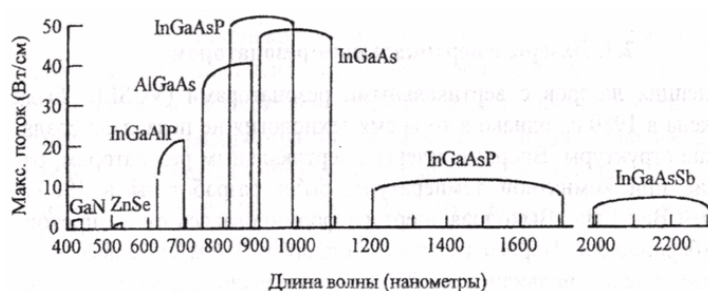


Рис. 2. Спектральные диапазоны работы лазерных диодов на полупроводниках типа A^3B^5 и соответствующие максимальные мощности.

Отметим, что система накачки в виде линеек или матриц полупроводниковых источников излучения хорошо сочетается с планарной геометрией zigzag лазера на основе плоской усеченной призмы.

Твердотельные лазеры с диодной накачкой обладают большими преимуществами по сравнению с твердотельными лазерами с ламповой накачкой. Прежде всего, это связано с высокой направленностью и малыми размерами излучающей области диода по сравнению с ламповыми источниками накачки, что позволяет создавать компактные лазерные системы. Кроме того, увеличивается эффективность накачки, так как по сравнению с лампами-вспышками полупроводниковые источники имеют узкую спектральную полосу излучения, что позволяет обеспечить практически идеальное согласование их спектров излучения с узкими полосами поглощения активного вещества. Полное соответствие спектров поглощения активной среды и излучения светодиодов и лазерных диодов позволяет минимизировать подводимую энергию, расходуемую на нагрев, и тем самым уменьшить влияние термооптических эффектов на качество пучка выходного излучения [1]. Срок службы и надежность твердотельных лазеров с диодной накачкой значительно выше, чем у систем с ламповой накачкой, так как матрицы лазерных диодов обладают временем жизни порядка 10^4 ч в непрерывном режиме и генерируют порядка 10^9 импульсов излучения, а лампы-вспышки могут воспроизводить 10^8 импульсов и работать непрерывно в течение 500 ч [1]. Таким образом, твердотельные лазеры с диодной накачкой характеризуются высоким коэффициентом полезного действия ($> 10\%$), длительным сроком службы и лучшей стабильностью излучения.

3. Лазерные активные среды

Большинство твердотельных лазеров излучает в спектральном диапазоне от 400 нм до 3 мкм [1]. В качестве активного элемента твердотельных лазеров наиболее эффективными являются кристаллы или стекла, активированные ионами редких земель, например Nd^{3+} , Er^{3+} , Yb^{3+} .

Наиболее распространенным классическим лазером, излучающим в ближней инфракрасной области спектра (1,064 мкм), является лазер на алюмоиттриевом гранате с неодимом Nd^{3+} : $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (Nd: YAG). В спектре поглощения Nd^{3+} имеется широкая полоса на длине волны $\sim 0,8$ мкм и возможно идеальное согласование спектра поглощения ионов Nd^{3+} и излучения $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ -матрицы (рис. 2). Кристаллы YAG прозрачны в очень широкой спектральной области (0,2–5 мкм), механически прочны, обладают высокой теплопроводностью. Высокоэффективными активными средами, легированными ионами неодима, представляются кристаллы Nd^{3+} : YVO_4 и Nd^{3+} : LiYF_4 [1, 6]. Кристалл ванадата иттрия с неодимом Nd^{3+} : YVO_4 (Nd: YVO) обладает в 6 раз более широкой полосой поглощения в области 808 нм по сравнению с Nd: YAG, что уменьшает требования к стабильности спектра излучения накачки, и коэффициентом поглощения примерно в 4 раза выше, чем в Nd: YAG при той же концентрации неодима. Кристалл литий-иттриевого фторида с неодимом Nd^{3+} : LiYF_4 (Nd: YLF) имеет преимущества по сравнению с алюмоиттриевым гранатом при реализации диодной накачки, так как у него время жизни возбужденного лазерного уровня в два раза больше чем у Nd: YAG [1, 6].

Твердотельные лазеры на ионах Er^{3+} представляют большой интерес благодаря генерации в безопасных для зрения областях спектра (1,54 мкм и 2,9 мкм) [1]. Спектр поглощения ионов Er^{3+} лежит в области $\sim 0,97$ мкм. Кристаллы YAG, высоколегированные ионами Er^{3+} (до 50 %), генерируют в области 2,9 мкм с эффективностью при диодной накачке в 4–5 %. В фосфатных стеклах с Er^{3+} , генерирующих на длине волны 1,54 мкм, используется канал сенсibilизации (ионы

Yb³⁺) для повышения эффективности до 2,7 % при диодной накачке [1].

Лазеры на основе Yb: YAG генерируют по трехуровневой схеме генерации на 1,03 мкм [1]. Ионы Yb³⁺ имеют единственную, но сильную полосу поглощения в области 0,9 – 1,02 мкм. Интенсивные линии поглощения Yb³⁺ можно эффективно использовать для лазерной диодной накачки вблизи 0,98 мкм излучением InGaAs-матрицы (рис. 2).

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. Использование диодной накачки позволяет повысить коэффициент полезного действия, стабильность и надежность лазерной системы. Нанесение высокоотражающего покрытия на грань, противоположную той, через которую осуществляется накачка от матрицы лазерных диодов, обеспечивает более однородную по всему объему накачку и повышает ее эффективность. В качестве активных сред могут быть использованы кристаллы или стекла, активированные редкоземельными ионами Nd³⁺, Er³⁺, Yb³⁺ генерирующие на длинах волн, широко применяемых в различных приложениях.

Литература

1. W. Koechner. Solid-State Laser Engineering. 6 ed. Springer. 2006. 766 p.
2. А. Н. Дрозд, И. С. Манак. Твердотельные лазеры с диодной накачкой. Полупроводниковые лазеры: Сб. науч. статей. Вып. 2. Мн.: БГУ. 2003. С. 96–160.
3. Патент РБ №6244, 30.06.2004. Твердотельный лазер / Л. Н. Орлов, Я. И. Некрашевич, Г. И. Желтов, В. В. Жуковский.
4. Заявка на полезную модель и20110051 Респ. Беларусь. 27.01.11. Твердотельный источник лазерного излучения / В. В. Жуковский, И. С. Манак, М. С. Леоненя.
5. I. S. Manak, W. Wojcik, V. V. Zukowski, M. S. Leanenia Разработка твердотельных slab-лазеров. Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review). 2010. No. 7. P. 261–263.
6. Н. В. Кулешов, А. С. Ясюкевич. Активные среды твердотельных лазеров: уч.-метод. пособие по дисциплинам «Твердотельные лазерные системы» и «Теория и расчет лазеров». Мн.: БНТУ. 2010. 134 с.

Diode-pumped solid-state zigzag lasers

M. S. Leanenia, I. S. Manak

Belarusian State University, Minsk, Belarus

Considered the advantages of diode pumping of solid-state lasers with high-performance active medium. Described the design features of solid-state zigzag lasers based on a flat truncated prism. Identified the range of the angles under which zigzag laser with small output beam transverse size can be obtained that significantly increases the output power density. Shown that the diode pumping system well combines with the zigzag geometry of the solid laser based on the flat truncated prism.

Keywords: diode pumping, active medium, solid-state laser, zigzag laser, three-mirror resonator.