

ЛАЗЕРЫ С ОДНОВРЕМЕННО ВЫСОКОЙ ПИКОВОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТЬЮ: ОГРАНИЧИВАЮЩИЕ ФАКТОРЫ И СПОСОБЫ БОРЬБЫ С НИМИ

О. В. Палашов

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН)

Создание лазеров с одновременно высокой пиковой и средней по времени мощностью является одним из наиболее значимых направлений квантовой электроники. Одной из главных фундаментальных научных проблем, ограничивающих среднюю мощность лазеров (вне зависимости от режима работы, т. е. работающих как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режимах), является неизбежное тепловыделение в лазерных элементах (как активных – в квантовых усилителях, так и магнитоактивных – в оптических изоляторах). Тепловыделение влечет за собой увеличение температуры и/или появление ее градиента внутри элементов. Возникающее неравномерное распределение температуры по объему элемента может приводить к появлению целого ряда негативных эффектов: тепловой линзе (из-за фазовых искажений волнового фронта); термонаведенной деполяризации (из-за механических напряжений, приводящих к линейному двулучепреломлению) [1]; деформациям оптических элементов (вплоть до их разрушения) и др. Увеличение средней по объему температуры также может приводить к ухудшению потребительских качеств лазерных элементов, таких как расширение и смещение линий поглощения, уменьшение сечения переходов [2] и т. п.

Наиболее сильным источником тепла в активных элементах (АЭ) твердотельных лазеров является излучение накачки. Начало XXI века, благодаря бурному развитию диодной накачки, ознаменовано существенным прогрессом в области средней мощности лазеров с одновременно высокой средней по времени и пиковой мощностью. Тем не менее, в лазерах на ионе неодима мощность тепловыделения относительно высокая и составляет десятки процентов [3] из-за большого дефекта кванта накачки и паразитных процессов (поглощение в возбужденном состоянии, кросс-релаксация и т. п. [4]). Поэтому в качестве активного иона широко используется сегодня ион иттербия, характеризующийся небольшим дефектом кванта [5], большим временем жизни инверсии (верхнего уровня) и отсутствием поглощения из возбужденного состояния [2].

Кардинальным методом подавления паразитных тепловых эффектов является охлаждение АЭ, например, до температуры жидкого азота [6]. При этом, для иттербий содержащих сред, увеличивается теплопроводность, уменьшается коэффициент теплового расширения и температурный градиент изменения показателя преломления [7], увеличивается сечение поглощения на рабочем переходе и переходе накачки, и практически полностью опустошается нижний рабочий уровень (среда становится четырехуровневой) [2]. Использование криогенной техники в настоящее время находит все более широкое применение в самых различных областях лазерной физики, а криогенному охлаждению подвергаются не только активные лазерные элементы, но и магнитоактивные элементы оптических изоляторов, элементы электрооптических затворов и даже лазерные диоды оптической накачки. Например, реализация криогенного охлаждения изоляторов выполненных на базе парамагнитной среды приводит к увеличению константы Верде, что позволяет значительно (в несколько раз) уменьшить длину магнитоактивного элемента, а значит существенно уменьшить термонаведенные искажения проходящего излучения. Этот эффект позволяет использовать новые магнитооптические материалы, обладающие лучшими термооптическими свойствами. Криогенное охлаждение ячейки Поккельса (устройство, являющееся основой быстрых оптических затворов и электрооптических модуляторов излучения) позволяет существенно (в несколько раз) снизить значение продольного рабочего напряжения и т. д.

Появление высокоэффективной диодной накачки открыло большие возможности по созданию квантовых усилителей различной геометрии. В предлагаемой лекции подробно излагается соответствующий метод борьбы с тепловыми эффектами – при помощи придания лазерным элементам новых форм/геометрий. Это очень значимый параметр. Действительно, появление в конце прошлого века новой геометрии АЭ – «волокна» (аспектное соотношение – отношение длины к диаметру $A > 1000$), в считанные годы сделала волоконные лазеры лидером по средней мощности (десятки киловатт!) при высоком качестве лазерного излучения и надежности самих устройств. Однако, из-за особенностей геометрии лазерной среды (главным образом, протяженности) импульсные волоконные лазеры существенно ограничены по пиковой мощности нелинейными эффектами и, как правило, их средняя мощность при сравнительно коротких длительностях импульсов (< 1 пс) ограничена на уровне десятка ватт. Энергия в импульсе одномодовых волоконных лазеров ограничена долями мДж и, поэтому, для достижения энергии даже джоульного уровня необходимо когерентное сложение тысяч таких каналов излучения (что представляет собой чрезвычайно сложную задачу, которая, тем не менее, рассматривается в ряде крупных проектов, например, проекте XCAN – Coherent Amplification Network [8]). Предлагаемая лекция содержит богатый иллюстративный материал, посвященный лазерным элементам в геометрии «тонкий стержень» (включая конусный), «тонкий слэб» и «тонкий диск» (включая композитные варианты «сэндвич» и «кладдинг»). Эти три геометрии выглядят сегодня наиболее перспективно для лазеров с одновременно высокой пиковой и средней по времени мощностью и могут быть использованы как для квантронов задающих генераторов и усилителей волоконных лазеров, так и для оптических изоляторов и т. п.

Геометрия «тонкий стержень» [9] по аспектному соотношению занимает промежуточное положение между волокном ($A > 1000$) и традиционными стержнями ($A \sim 10$) и составляет ~ 100 . Характерные размеры: диаметр до 1 мм при длине 3...4 см. Благодаря существенно меньшему, чем у стержневого АЭ диаметру (~ 1 см), тонкостержневые АЭ позволяют работать при более высоких средних мощностях, а благодаря существенно большему, чем у волокна диаметру (< 100 мкм), тонкостержневые АЭ позволяют работать при более высоких энергиях в импульсе. Особенностью такой геометрии является волноводное распространение излучения накачки и, одновременно, свободное распространение лазерного излучения в АЭ. Энергия в наносекундном импульсе на выходе «тонкого стержня» может достигать нескольких мДж, а коэффициент усиления по слабому сигналу > 100 , что делает перспективным использование такого квантрона в качестве разгонного усилителя в гибридном лазере. Геометрию «тонкий слэб» [10] можно рассматривать как одномерный случай «тонкого стержня». «Тонкий слэб» представляет собой тонкую (< 1 мм) пластину из активной среды с двумя полированными торцами для прохождения излучения накачки и сигнала аналогично геометрии «тонкий стержень». Ширина пластины на порядок больше (~ 1 см), что позволяет получать энергию в импульсе также более чем на порядок относительно «тонкого стержня», при этом не усложняя принципиально оптическую схему лазера. Старшей по возрасту и наиболее популярной из перечисленных геометрий является геометрия «тонкий диск» [11]. Такая геометрия существенно уменьшает тепловые искажения излучения благодаря торцевому теплоотводу, при котором градиент температуры направлен вдоль, а не поперек распространения излучения. Кроме того, дополнительным преимуществом такой геометрии является малая длина/толщина АЭ (200...300 мкм), которая позволяет усиливать мощные короткие импульсы, не опасаясь эффекта самофокусировки. Внедрение в индустрию мощного лазеростроения новых перспективных геометрий лазерных элементов должно позволить создать новый класс компактных и надежных импульсных лазеров со средней по времени мощностью в единицы и десятки киловатт. Такие лазеры уже сегодня востребованы на потребительском рынке для решения разного рода задач.

В последние годы появляется большое количество перспективных лазерных сред, например, активно развивается технология получения лазерной керамики, которая по сравнению с технологией выращивания монокристаллов позволяет получать элементы быстрее, большего размера, с большей концентрацией и однородностью активного иона, различных составов, в том числе, и таких, из которых монокристаллы технологически вырастить невозможно, а по сравнению со стеклом имеющей лучшие теплофизические свойства [12]. Перечисленные преимущества лазерной керамики и прогресс в технологии ее изготовления делают данный материал основным кандидатом на роль оптического материала для лазеров с высокой средней мощностью в будущем, а создание

перспективных лазерных материалов можно рассматривать как еще один метод борьбы с ограничивающими факторами в лазерах с одновременно высокой пиковой и средней мощностью.

Список литературы

1. Мезенов А. В., Сомс Л. Н., Степанов А. И. Термооптика твердотельных лазеров. Машиностроение, 1986. С. 199.
2. Dong J., Bass M., Mao Y., Deng P., Gan F. Dependence of the Yb^{3+} emission cross section and lifetime on temperature and concentration in yttrium aluminum garnet // Journal of the Optical Society of America B, 2003. 20, 1975.
3. Krupke W. Ytterbium solid-state lasers – the first decade, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2000. 6, 1287.
4. Brown D. C. Heat, fluorescence, and stimulated-emission power densities and fractions in Nd:YAG, IEEE Journal of Quantum Electronics, 1998. 34, 560.
5. Fan T. Y. Heat generation in Nd:YAG and Yb:YAG, IEEE Journal of Quantum Electronics, 1993. 29, 1457.
6. Schulz P. A., Henion S. R. Liquid-nitrogen-cooled $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ laser, IEEE Journal of Quantum Electronics, 1991. 27, 1039.
7. Brown D. C. The promise of cryogenic solid-state lasers, IEEE Journal of Selected Topic In Quantum Electronics, 2005. 11, 587.
8. Mourou G. et al. The future is fibre accelerators // Nature Photonics, 2013. Vol. 7. P. 258–261.
9. Kuznetsov I. I., Mukhin I. B., Vadimova O. L., Palashov O. V., Ueda K. I. Thermal effects in Yb:YAG single-crystal thin-rod amplifier // Applied Optics, 2015. Vol. 54, N. 25.
10. Russbuehdt P. et al. Innoslab Amplifiers // in IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2015. Vol. 21, N 1. P. 447–463.
11. Brown D. C., Bowman R., Kuper J., Lee K. K., Menders J. High average power active-mirror amplifier // Applied Optics, 1986. 25, 612.
12. Takaichi K., Yagi H., Lu J., Shirakawa A., Ueda K., Yanagitani T., Kaminskii A. Yb^{3+} -doped $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ceramics – a new solid-state laser material // Physical Status Solidi (a), 2003. Vol. 200(1). R5-R7.