

Высокоэффективный мини-лазер с импульсной поперечной полупроводниковой накачкой для безопасной лазерной дальнометрии

А.Ю.Абазадзе, В.Н.Быков, Г.М.Зверев, А.А.Плешков, В.А.Симаков

Исследованы генерационные характеристики мини-лазера на хром-иттербий-эрбиевом стекле с поперечной импульсной накачкой излучением линейки лазерных диодов. В режиме модуляции добротности при электрической энергии импульса накачки 0.5 Дж получена генерация моноимпульса с энергией 3 мДж, длительностью 35 нс и расходимостью 4 мрад.

Ключевые слова: полупроводниковая накачка, хром-иттербий-эрбиевое стекло, мини-лазер, лазерная дальнометрия.

1. Введение

Несмотря на значительный прогресс в области разработки и производства линеек лазерных диодов (ЛЛД) для импульсной поперечной накачки твердотельных лазеров [1], основные позиции на мировом рынке продолжают занимать импульсные твердотельные лазеры с ламповой накачкой [2]. Причиной этого являются проблемы, сопровождающие, как правило, использование ЛЛД в конкретных лазерных устройствах. Малое время жизни возбужденного состояния (менее 1 мс) традиционно используемых лазерных сред (необходимое для достижения достаточной инверсии населенностей в активной среде) вынуждает либо эксплуатировать ЛЛД в предельно допустимых для них режимах [3], что отрицательно сказывается на их долговечности, либо увеличивать общее число линеек (до 10 и более), что существенно повышает стоимость изделия. Термостабилизация ЛЛД с помощью холодильников на эффекте Пельтье, применяемая для поддержания работоспособности линеек, приводит не только к усложнению конструкции, но и к снижению полного КПД лазера. Тем не менее имеется область лазерной техники, где применение ЛЛД для импульсной поперечной накачки оказывается целесообразным со всех перечисленных точек зрения, – это твердотельные лазеры на основе иттербий-эрбиевых стекол для лазерных дальномеров с безопасной для зрения длиной волны излучения.

Для работы лазерного дальномера характерна частота следования импульсов, не превышающая 0.3 Гц, что не требует принятия специальных мер для охлаждения ЛЛД, связанных с дополнительными энергозатратами. Для обеспечения работоспособности линейки достаточно осуществить тепловой контакт ее с корпусом лазера. Для ЛЛД, излучающей при $+20^\circ\text{C}$ на длине волны 940 нм, изменение температуры окружающей среды в диапазоне от -40 до $+50^\circ\text{C}$ вызовет (при $\Delta\lambda/\Delta T = 0.33 \text{ нм}/^\circ\text{C}$ [4]) изменение длины волны излучения в диапазоне 920 –

950 нм. Это позволяет осуществлять эффективную накачку иттербий-эрбиевого стекла во всем указанном температурном диапазоне, т.к. поглощение иттербия (являющегося сенсibilизатором) относительно слабо меняется в диапазоне длин волн 915–965 нм. Время жизни возбужденного состояния эрбия в стекле, составляющее 7–8 мс, позволяет обеспечить требуемую инверсию населенностей в активной среде, управляя не только током накачки, но и длительностью цикла накачки, что дает возможность оптимизировать режим работы как для ЛЛД, так и для активной среды.

Экспериментальному исследованию конструктивно простого высокоэффективного мини-лазера с полупроводниковой поперечной импульсной накачкой для безопасной дальнометрии и посвящена настоящая работа.

2. Линейка лазерных диодов

В качестве источника накачки использовалась ЛЛД, изготовленная в НИИ «Полус» им. М.Ф.Стельмаха. Активная среда была выращена методом МОС-гидридной эпитаксии и имела двойную гетероструктуру на основе InGaAs/AlGaAs/GaAs с раздельным ограничением носителей и одной квантовой ямой шириной 120 Å. Планарная конструкция линейки общей длиной 1 см содержит 50 полосковых лазеров, разделенных канавками с протравленным до n -эмиттера активным слоем. Такая конструкция обеспечивает подавление усиленного спонтанного излучения в поперечном к оси резонатора направлении. Резонатор длиной 750 мкм выполнен путем скола граней гетероструктуры с последующим нанесением на них зеркальных диэлектрических покрытий.

Ватт-амперная характеристика используемой в экспериментах ЛЛД представлена на рис.1. Видно, что при токах накачки 120 А линейка излучала импульсы мощностью примерно 100 Вт. При этом полный КПД при токе накачки 100 А достигал 50%. Следует отметить, что в конструкцию лазерной линейки не входили дополнительные оптические элементы для формирования пространственных характеристик излучения. Диаграмма направленности излучения представляла собой пучок с расходимостью 45° в плоскости, перпендикулярной плоскости $p - n$ -перехода, и 10° в плоскости $p - n$ -перехода.

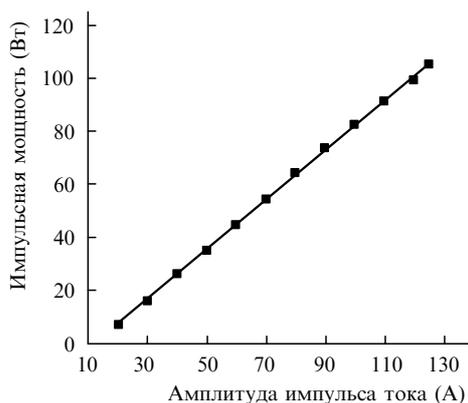


Рис.1. Ватт-амперная характеристика ЛЛД при длительности импульсов тока накачки 1 мс.

3. Активная среда

В работе применялись хром-иттербий-эрбиевые стекла, разработанные в ИПЭ РАН для ламповой накачки [5, 6]. Для более полного использования излучения лампы в их состав помимо основного сенсбилизатора Yb^{3+} введен дополнительный сенсбилизатор Cr^{3+} . Следует отметить, что если при ламповой накачке наличие ионов хрома в стекле позволяет повысить КПД лазера, то при селективной накачке в полосу поглощения иттербия оно нежелательно. Это связано с тем, что наряду с прямой передачей возбуждения от ионов-доноров (Cr^{3+}) к ионам-акцепторам (Yb^{3+}) существует и обратный процесс переноса энергии. В случае ламповой накачки, когда хром и иттербий возбуждены, прямой перенос энергии превалирует над обратным, что и позволяет получить положительный эффект от сенсбилизации хромом.

При накачке излучением лазерных диодов в полосу поглощения иттербия ситуация меняется на противоположную и невозбужденный хром становится акцептором, забирая себе часть энергии возбужденного иттербия. При этом скорость обратного переноса энергии в паре $\text{Cr} - \text{Yb}$ растет с увеличением концентрации как ионов хрома, так и ионов иттербия [6].

Ометим, что при увеличении концентрации ионов иттербия вплоть до $2.5 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$ растет и скорость переноса энергии возбуждения от иттербия к эрбию, являющемуся ионом, на переходах которого осуществляется лазерная генерация. Кроме того, концентрация ионов иттербия определяет поглощение излучения накачки активной средой, что с учетом высокой неоднородности накачки, свойственной поперечной схеме, является одним из факторов, определяющих не только энергетические, но и пространственные характеристики выходного излучения.

В силу того что лазер на эрбиевом стекле работает по трехуровневой схеме генерации, концентрация ионов эрбия для минимизации пороговой энергии накачки должна быть как можно ниже. Однако для обеспечения высокого коэффициента преобразования энергии накачки в энергию лазерного излучения концентрацию ионов эрбия следует повышать. Из приведенных рассуждений видно, что вопрос о концентрации активаторов в лазерных эрбиевых стеклах, используемых в качестве активного элемента (АЭ) в лазере с поперечной схемой накачки, требует отдельного рассмотрения. Для экспериментального изучения характера зависимости энергетических

Табл.1. Концентрация ионов-активаторов для использованных в работе стекол.

Стекло	$[\text{Er}^{3+}] (\text{см}^{-3})$	$[\text{Yb}^{3+}] (\text{см}^{-3})$	$[\text{Cr}^{3+}] (\text{см}^{-3})$
ЛГС-ХМ	1.2×10^{19}	2.3×10^{21}	2.2×10^{19}
ЛГС-Х	1.6×10^{19}	1.6×10^{21}	4.0×10^{19}
ЛГС-ХК	1.6×10^{19}	2.0×10^{21}	3.0×10^{19}

характеристик лазера от состава стекла в настоящей работе были использованы три разновидности хром-иттербий-эрбиевого стекла, концентрации ионов-активаторов в которых приведены в табл.1.

4. Условия проведения экспериментов и обсуждение их результатов

АЭ размером $\varnothing 2.5 \times 10$ мм были специально доработаны для формирования в них оптимального пространственного распределения излучения накачки, позволяющего получить генерацию с удовлетворительными пространственными характеристиками без использования дополнительных оптических элементов между ЛЛД и АЭ (фокусник, цилиндрическая линза и т. д.). Это было вызвано тем, что астигматизм излучения ЛЛД при прохождении через цилиндрическую поверхность АЭ увеличивается. Для оптимизации накачки боковая поверхность цилиндрических АЭ была сошлифована, и через полученную плоскую грань осуществлялась накачка. Противоположная часть боковой поверхности АЭ была покрыта слоем герметика КЛТ-30А, совмещавшего функции отражателя для излучения ЛЛД, не поглощенного на первом проходе в активной среде, и элемента конструкции, используемого для крепления АЭ к корпусу лазера. ЛЛД располагалась параллельно оси АЭ на расстоянии 0.2–1.5 мм от его боковой поверхности для получения приемлемых качества пучка и энергии лазерного излучения.

Оптический резонатор длиной 50 мм был образован плоским выходным зеркалом с коэффициентом отражения $R = 89\%$ на длине волны генерации и вогнутым сферическим глухим зеркалом с радиусом кривизны 816 мм. АЭ размещался у выходного зеркала. Для реализации режима модуляции добротности в резонатор между АЭ и глухим зеркалом, помещался затвор с нарушением полного внутреннего отражения.

Энергия выходного излучения измерялась калориметрическим измерителем ИМО-2Н. Форма импульса излучения контролировалась с помощью фотоприемника ЛФД-2 и осциллографа TDS 220 Tektronix. Блок питания ЛЛД допускал независимые вариации амплитуды и длительности импульса тока накачки. Эксперименты, проведенные при работе лазера в режиме свободной генерации, показали, что при изменении тока накачки в диапазоне 70–110 А и изменении длительности в диапазоне 1.2–4.5 мс выходная энергия лазера практически линейно зависит от оптической энергии накачки. Поэтому дальнейшие эксперименты проводились при фиксированной амплитуде импульса тока накачки ЛЛД, равной 100 А, при которой импульсная мощность излучения ЛЛД составляла 80 Вт при энергетическом КПД 50%.

Вариация энергии импульса накачки в ходе эксперимента осуществлялась изменением длительности импульса накачки. На рис.2 представлены выходные харак-

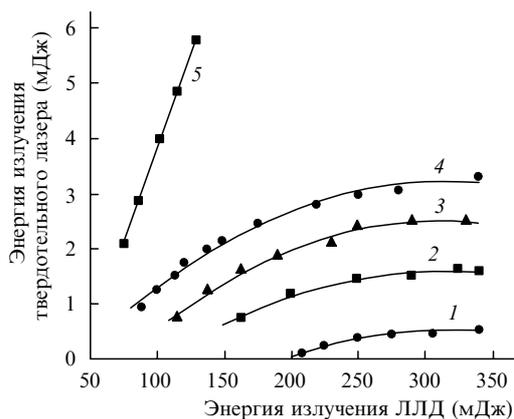


Рис.2. Выходные характеристики лазера с АЭ из хром-иттербий-эрбиевых стекол ЛГС-ХМ (1), ЛГС-Х (2) и ЛГС-ХК (3, 4) в режиме модуляции добротности и стекла ЛГС-ХК (5) в режиме свободной генерации при $R = 89$ (1–3) и 96 % (4, 5).

теристика лазера с АЭ из хром-иттербий-эрбиевых стекол различного состава. Видно, что независимо от состава стекла при работе лазера в режиме модуляции добротности выходные характеристики (кривые 1–4) ведут себя идентично. По мере увеличения энергии импульса накачки рост энергии моноимпульса замедляется, стремясь к насыщению. Это объясняется недостаточным содержанием ионов Er^{3+} в используемых стеклах, приводящим к тому, что начиная с некоторой энергии накачки все рабочие ионы в области концентрации поля накачки оказываются инвертированными и дальнейшего прироста энергии не наблюдается. Небольшой прирост выходной энергии при увеличении энергии накачки возможен только за счет некоторого расширения надпороговой области в неоднородно прокачанной зоне АЭ. Повышение концентрации эрбия в стекле приводит к увеличению уровня насыщения выходной характеристики лазера, позволяя достичь более высокой энергии моноимпульса (кривые 2–4).

Лучшие энергетические характеристики были получены при использовании АЭ из стекла ЛГС-ХК (кривые 3, 4). Это можно объяснить более удачным сочетанием концентраций активаторов в указанном стекле (см. табл.1), обеспечившим в большем объеме активной среды выполнение условия надпороговой инверсии. Использование в оптическом резонаторе лазера более оптимального (из-за низкого усиления активной среды) выходного зеркала с коэффициентом отражения 96 % вместо 89 % дополнительно улучшило энергетическую характеристику лазера (кривая 4). Однако видно, что и в этом случае наблюдается насыщение энергетической

характеристики лазера, отсутствующее при работе в режиме свободной генерации (прямая 5).

При энергии импульса излучения ЛЛД 250 мДж (что с учетом КПД линейки 50 % соответствует электрической энергии накачки 0.5 Дж) в режиме модуляции добротности была получена энергия моноимпульса 3 мДж при длительности по полувысоте 35 нс, размере пятна излучения на выходном зеркале 0.6 мм и расходимости излучения 4 мрад. В таком режиме лазер был способен функционировать при частоте следования импульсов накачки до 0.5 Гц. Отметим, что указанные энергетические параметры были получены при работе лазера вблизи насыщения его энергетической характеристики, обусловленного, как отмечалось выше, недостаточной концентрацией ионов эрбия в стекле. Максимальный же КПД соответствовал энергии выходного излучения 2.1 мДж при электрической энергии импульса накачки 0.3 Дж.

Несмотря на то что состав использованных в настоящей работе стекол не был оптимален для условий поперечной полупроводниковой накачки, достигнутые параметры несомненно представляют практический интерес, а описанный мини-лазер может рассматриваться в качестве прототипа лазерного передатчика для микролазерного дальномера [7] с дальностью действия до 3 км. Полученные результаты позволяют прогнозировать существенное увеличение (в несколько раз) достигнутых энергетических параметров при оптимизации состава лазерного стекла. На основе использованной оптической схемы возможна дальнейшая модернизация конструкции лазера уже в микромодульном исполнении, когда АЭ представляет собой призму с полным внутренним отражением излучения на одной из граней и модуляция добротности осуществляется пьезоэлементом, расположенным на этой грани.

В заключение авторы выражают благодарность сотруднику ИРЭ РАН П.И.Садовскому за консультации по составу лазерных стекол, использованных в работе.

1. Кравцов Н.В. *Квантовая электроника*, **31**, 661 (2001).
2. *Laser Focus World. The Byers Guide* (2001).
3. Гагарский С.В., Галаган Б.И., Денкер Б.И., Корчагин А.А., Осико В.В., Приходько К.В., Сверчков С.Е. *Квантовая электроника*, **30**, 10 (2000).
4. Daiminger F., Dorsch F., Lorenzen D. *Proc. SPIE Int. Soc. Eng.*, **3862**, 25 (1999).
5. Гапонцев В.П., Громов А.К., Изынеев А.А., Садовский П.И., Ставров А.А., Типенко Ю.С., Шкадаревич А.П. *Квантовая электроника*, **16**, 684 (1989).
6. Изынеев А.А., Садовский П.И. *Квантовая электроника*, **24**, 791 (1997).
7. Nettleton J.E., Schilling B.W., Barr D.N., Lei J.S. *Appl. Opt.*, **39**, 2428 (2000).