

06; 07

© 1990 г.

УПРАВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫХ ЛАЗЕРОВ НА $Al_2O_3 : Ti^{3+}$ С ПОМОЩЬЮ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРОВ

*Г. С. Круглик, Г. А. Скрипко, А. А. Стазров, В. Н. Поляков,
М. В. Бондаренко, А. И. Конойко, П. Н. Назаренко,
Н. В. Окладников, В. С. Урбанович*

Проведены исследования кинетики генерации лазеров на кристаллах сапфира, активированного трехвалентными ионами титана, в свободном режиме и с модуляцией добротности резонатора. Применение для модуляции добротности низковольтных электрооптических затворов позволило решить задачу оперативного управления временными параметрами перестраиваемых лазеров на основе $Al_2O_3 : Ti^{3+}$ с частотой повторения импульсов до 50 кГц и получения моноимпульсной генерации при использовании «длинных» (более 100 нс) импульсов накачки.

Управление временными и энергетическими характеристиками перестраиваемых лазеров на кристаллах, активированных ионами переходных элементов, осложнено из-за широкого диапазона потенциально возможных длин волн генерации, а также из-за малого времени жизни верхнего лазерного уровня или низкого сечения генерационного перехода. Указанные обстоятельства предопределяют повышенные требования к электрооптическим затворам и не позволяют при использовании пассивных модуляторов обеспечить работу во всем возможном спектральном диапазоне. В первую очередь это относится к такой активной среде, как $Al_2O_3 : Ti^{3+}$, обладающей экстремально широким диапазоном длин волн.

Кроме того, оптико-физические свойства $Al_2O_3 : Ti^{3+}$ таковы, что для реализации оптимальных условий накачки требуется использовать импульсы длительностью сотни наносекунд и даже единицы микросекунд. В этом случае развивается типичный пиковый режим генерации [1].

В работах [2, 3] сообщалось о создании высокочастотного (до 25 кГц) перестраиваемого в диапазоне 675—950 нм лазера на $Al_2O_3 : Ti^{3+}$, в котором в качестве источника накачки использовался квазинепрерывный неодимовый лазер с внутррезонаторным удвоением частоты типа ЛТИ-701 (702). Длительность отдельного пика лазера накачки составляла 400 нс и позволяла достичь оптимальных условий возбуждения активного элемента на $Al_2O_3 : Ti^{3+}$. С другой стороны, такая длительность импульса накачки обуславливала развитие пикового режима уже при уровнях накачки, на 30 % превышающих пороговый, что в свою очередь ограничивает функциональные возможности лазерных преобразователей на $Al_2O_3 : Ti^{3+}$. Генерация моноимпульсов в таких условиях возможна при использовании модуляторов добротности. Впервые о генерации лазера на $Al_2O_3 : Ti^{3+}$ в режиме модулированной добротности сообщено в работах [1, 4], где для этой цели использован пассивный затвор на основе кристалла LiF с F_3^- -центрами. В этих работах реализованы условия, при которых в режиме одиночного импульса длительностью 2—5 нс излучалось ~30 % энергии от энергии, излучаемой в режиме пиковой генерации при накачке импульсом длительностью 4 мкс.

В настоящей работе с целью улучшения энергетических характеристик моноимпульсной генерации во всем спектральном рабочем диапазоне лазерной среды $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Ti}^{3+}$ исследованы активные методы управления добротностью резонатора с помощью низковольтных электрооптических модуляторов.

В экспериментах использовались кристаллы $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Ti}^{3+}$ с концентрацией активатора 0.15—0.2 вес. % длиной до 10 мм, выращенные методами Вернейля и Чохральского. Активные элементы располагались в перетяжке внутрирезонаторного телескопа, один из компонентов которого использовался для фокусировки излучения накачки. Схема эксперимента приведена на рис. 1. Диаметр перетяжки активного канала варьировался в пределах 50...80 мкм. Диаметр генерируемого пучка за вторым элементом телескопа составлял 2.5 мм, что обеспечивало в селективном резонаторе с дифракционной решеткой, установленной в автоколлимационной схеме, ширину спектра генерации 0.3—0.5 см^{-1} .

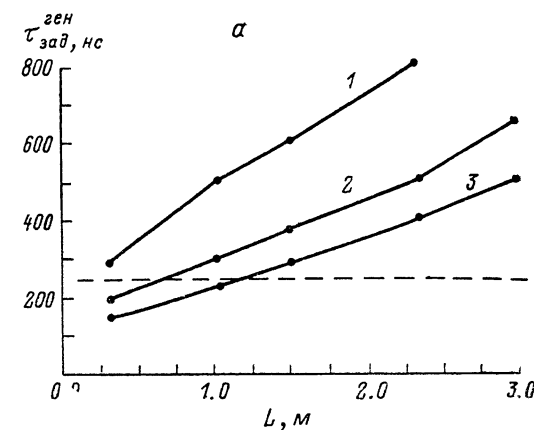
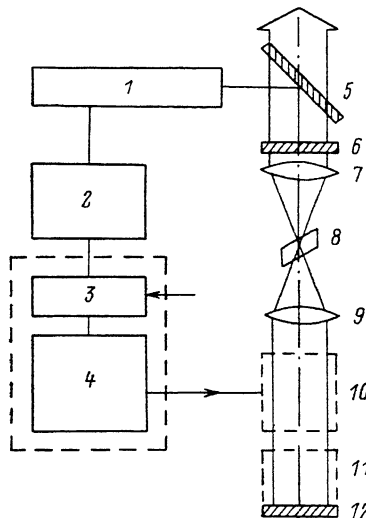


Рис. 1. Схема моноимпульсного квазинепрерывного лазера на $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Ti}^{3+}$.

1 — лазер накачки; 2 — блок питания; 3 — пульт управления; 4 — блок управления электрооптическим затвором; 5 — спектроделитель; 6, 12 — зеркала; 7, 9 — линзы; 8 — активный элемент; 10 — затвор; 11 — селектор.

Рис. 2. Зависимости задержки первого пика генерации от базы резонатора для различных уровней превышения порога.

x: 1 — ~1.2, 2 — ~1.5, 3 — ~1.8; 1—3 — моноимпульсный режим, штриховая линия — пиковый

Излучение накачки направлялось спектроделителем 5 через плоское выходное зеркало 6 и фокусировалось линзой 7 на активный элемент. Затворы, использовавшиеся в экспериментах, располагались между вторым компонентом телескопа 9 и селектором или «глухим» зеркалом резонатора. В качестве лазера накачки использовался промышленный лазер ЛТИ-701. Роль внутрирезонаторного поляризатора выполнял активный элемент с брукстеровкой ориентацией рабочих граней.

В первой серии экспериментов изучено влияние на временные и энергетические характеристики генерации условий накачки и размеров резонатора. В надпороговом режиме для каждого импульса накачки с задержкой относительно него генерировался одиночный импульс. Величина задержки зависела от превышения энергии накачки над пороговой и базы резонатора. Увеличение накачки приводило к уменьшению задержки, когда она становилась меньше половины длительности импульса накачки, развивался пиковый режим генерации. При увеличении длины резонатора задержка возрастала, что позволяло повысить порог развития пикового режима. Так, при длительности импульсов накачки ~250 нс в резонаторах длиной 1.5 м начало развития пикового режима соответствовало трехкратному превышению энергии накачки над пороговой. Аналогичные зависимости наблюдались и для длительности импульса ге-

перации: она сокращалась при увеличении энергии накачки и уменьшении длины резонатора. На рис. 2 представлены зависимости задержки первого пика генерации от базы резонатора для различных уровней превышения накачки над пороговой. Полученные результаты находятся в хорошем согласии с оценками, выполненными с использованием известных выражений для длительности импульса генерации и его задержки в случае мгновенного включения добротности [5],

$$\tau_n = \tau_c \frac{N_i - N_f}{N_i} \frac{X}{(X - \ln X - 1)}, \quad (1)$$

$$\tau_s = \frac{\tau_c}{x-1} \ln \left[\frac{VN_t}{40} (X - \ln X - 1) \right], \quad (2)$$

где τ_n , τ_s — длительность и задержка импульса генерации; τ_c — время жизни фотонов в резонаторе; V — активный объем; N_i , N_f , N_t — начальная, конечная и пороговая инверсии населенностей; X — превышение начальной инверсии пороговой.

Следует отметить, что основным недостатком рассмотренного способа реализации беспичкового режима, помимо значительных габаритов резонатора, являлось одновременное с увеличением задержки увеличение длительности импульсов генерации до значений, сопоставимых с длительностью возбуждающих импульсов.

Во второй серии экспериментов изучена работа лазера на $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Ti}^{3+}$ в режиме модуляции добротности резонатора с использованием пассивных затворов на основе кристаллов LiF с F_2^- -центрами, а также акустооптических затворов. Наши эксперименты, как и результаты работы [6], показали невозможность реализации во всем спектральном рабочем диапазоне активной среды $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Ti}^{3+}$ режима моноимпульсной генерации при использовании пассивных затворов. В случае же использования акустооптических затворов большие времена переключения добротности резонатора (~ 100 нс) при высоких скоростях накачки активной среды также приводили к возникновению пикового режима.

Для реализации модуляции добротности в течение коротких интервалов времени ($\sim 10^{-9}$ с) более перспективны электрооптические затворы. Впервые электрооптический модулятор добротности в лазере на кристалле $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Ti}^{3+}$ был использован в работе [7]. Однако в этой работе временные характеристики импульсов генерации в основном определялись модуляцией усиления за счет больших скоростей накачки. Необходимо и возможность управления кинетикой генерацией путем модуляции потерь появляется при длительностях импульсов накачки 10^{-7} — 10^{-6} с, более благоприятных для работы лазера.

Для излучения генерации высокочастотного лазера на $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Ti}^{3+}$ в режиме модулированной добротности в настоящей работе был использован низковольтный электрооптический затвор, предложенный в работе [8]. Благодаря низким управляющим напряжениям возможна его работа с частотой следования управляющих импульсов до десятков кГц. Затвор представляет собой многоэлементный электрооптический фазовый модулятор, состоящий из четырех идентичных электрооптических кристаллов ДКДР. На торцевых (рабочих) поверхностях каждого кристалла z -среза размером $20 \times 20 \times 16$ мм выполнены врезные кольцеобразные металлические электроды с внутренним диаметром 8 мм. Отдельные кристаллы ориентированы и закреплены в едином блоке так, чтобы обеспечить компенсацию паразитной анизотропии, вызванной изменением электрооптических коэффициентов. Однородность управляющего электрического поля в апертуре модулятора составляет 98 %. Коэффициент пропускания излучения для длины волны 0.78 мкм при отсутствии статического напряжения равен 97 %, а с приложенным напряжением ~ 0.6 %. Электрическая емкость модулятора не превышает 30 пФ, рабочий частотный диапазон достигает 200 МГц. Статическое напряжение, подаваемое на затвор, варьировалось в эксперименте в пределах 400...600 В. Схема блока питания и управления затвором обеспечивает частоту следования управляющих импульсов до 50 кГц при длительности фронта импульса не более 5 нс. При необходимости частота следования импульсов может быть увеличена.

Использование такого затвора позволяет осуществлять оперативное управление временными параметрами генерируемого излучения во всем рабочем спектральном диапазоне лазера на $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Ti}^{3+}$ при энергетической эффективности генерации, сопоставимой с эффективностью свободного режима.

На рис. 3, а приведены зависимости средней мощности генерируемого излучения от задержки импульса генерации относительно максимума накачки ($\tau_{г.э}$) в режимах свободной генерации (кривая 1) и модулированной добротности (моноимпульсном) при различных уровнях превышения порога генерации (кривые 2—5). Задержка в режиме модулированной добротности варьировалась путем изменения задержки управляющего импульса, подаваемого на затвор, относительно импульса накачки ($\tau_{э.г}$). Из представленных графиков видно, что при увеличении времени задержки ($\tau_{г.э}$) эффективность генерации вначале возрастает на 10...15% относительно исходной. Наличие данного участка обусловлено более оптимальной подстройкой времени включения затвора к максимуму инверсной населенности активной среды.

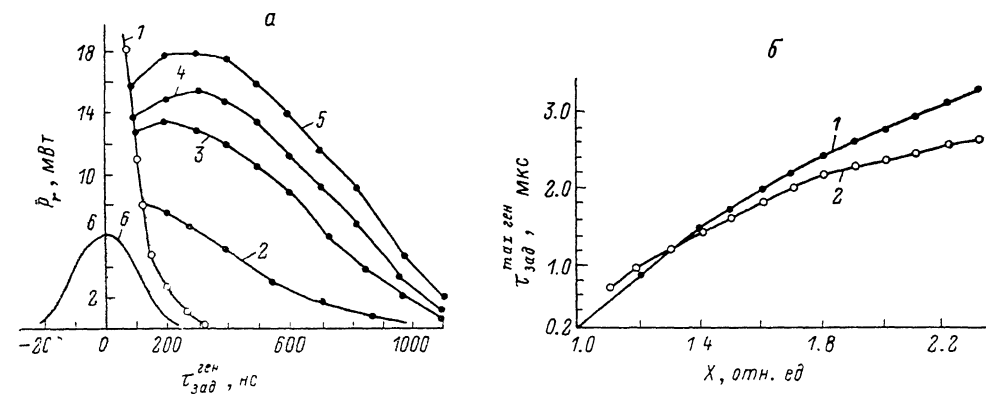


Рис. 3. Зависимости средней мощности генерации от задержки (а) и максимальной задержки в режиме модулированной добротности от уровня превышения порога (б).

а: 1 — режим свободной генерации; 2—5 — режим модулированной добротности (превышение над порогом 1.2 (2), 1.3 (3), 1.33 (4), 1.4 (5)); б: 1 — расчетная зависимость, 2 — экспериментальная.

При увеличении времени задержки включения затвора характер зависимости становится аналогичным наблюдавшемуся в работе [7] при накачке лазера на $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Ti}^{3+}$ короткими импульсами (~ 10 нс). Снижение мощности генерации при увеличении задержки связано с релаксацией энергии, запасенной на верхнем лазерном уровне.

Важным практическим результатом этих экспериментов является то, что при генерации в моноимпульсном режиме удается получить такую же энергию (среднюю мощность), как и в случае реализации пикового режима. При этом осуществление такого режима возможно в достаточно широком диапазоне задержек (рис. 3, а). Максимальные значения задержки $\tau_{г.э}^{\text{max}}$ определялись уровнем превышения накачки над порогом генерации X и при $X \geq 1.3$ значительно превосходили характерные времена длительности импульсов накачки и генерации, достигая единиц мкс, как это видно из графика на рис. 3, б.

Длительность и задержка импульса генерации относительно момента включения добротности резонатора, как и в случае свободной генерации, также зависят от уровня превышения надпороговой энергии и базы резонатора. В резонаторе длиной 0.5 м они варьировались в пределах 5...50 и 10...100 нс соответственно. Типичные осциллограммы импульсов накачки и генерации, импульса управления затвором, а также зависимости задержки импульса генерации от задержки включения добротности резонатора представлены на рис. 4.

Таким образом, в ходе проведенных исследований определены условия и методы реализации высокоэффективной генерации лазера на $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Ti}^{3+}$, перестраиваемого в широком спектральном диапазоне 660...1000 нм. Применение для модуляции добротности резонатора низковольтных электрооптических затворов с высокой степенью контрастности позволило решить задачу оператив-

ного управления временными параметрами квазипрерывного лазера на $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Ti}^{3+}$ с частотой повторения импульсов до 50 кГц и одновременно продемонстрировало их перспективность для случая использования «длинных» (более 200 нс) импульсов накачки, в том числе и для ламповой. Реализованные спектральный и частотный диапазоны моноимпульсной генерации свидетельствуют о перспективности использования низковольтных электрооптических

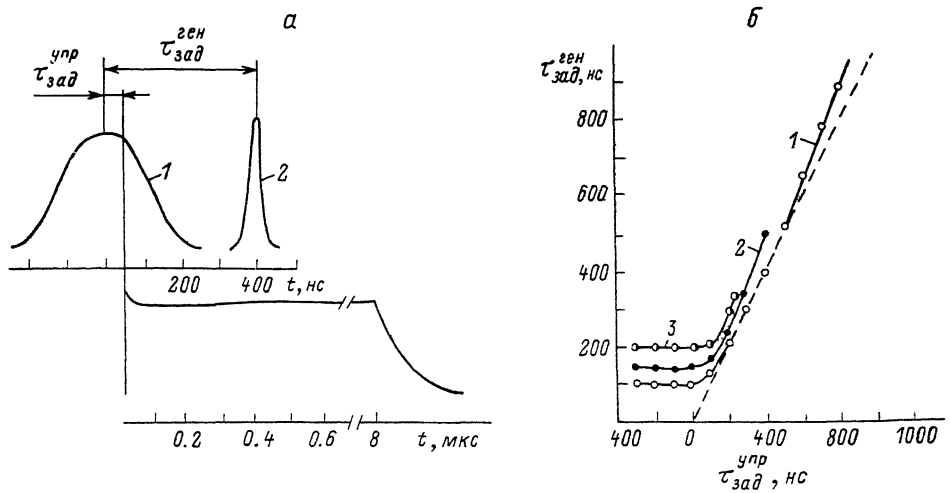


Рис. 4.

а — осциллограммы импульсов накачки (1), генерации (2) и импульса включения затвора (3); б — зависимости задержки импульса генерации от задержки включения добротности резонатора относительно максимума импульса накачки; превышение над порогом 1.4 (1), 2.1 (2).

затворов и для других высокочастотных лазерных источников, в частности для модуляции добротности неодимовых лазеров типа ЛТИ-701 (702). Малые остаточные потери использованного модулятора $\sim 0.6\%$ позволили при оптимизации времени его включения достичь такой же энергетической эффективности, как и в случае свободной генерации.

Подобные затворы целесообразно использовать для модуляции добротности во всех перестраиваемых лазерах на кристаллах, активированных переходными металлами, в первую очередь в тех, где невозможна накачка моноимпульсом.

Список литературы

- [1] Круглик Г. С., Скрипко Г. А., Шкадаревич А. П. и др. // ЖПС. 1985. Т. 42. № 1. С. 126—128.
- [2] Круглик Г. С., Скрипко Г. А., Шкадаревич А. П. и др. // ЖПС. 1986. Т. 45. № 4. С. 567—573.
- [3] Круглик Г. С., Скрипко Г. А., Шкадаревич А. П. и др. // Тез. докл. Всесоюз. конф. «Оптика лазеров» // Л., 1986. С. 14.
- [4] Круглик Г. С., Скрипко Г. А., Шкадаревич А. П. // Перестраиваемые лазеры на активированных кристаллах. Минск, 1984. С. 33.
- [5] Звелто О. Принципы лазеров. М.: Мир, 1984. 400 с.
- [6] Багдасаров Х. С., Данилов В. П., Колеров А. Н. и др. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 4. С. 342—344.
- [7] Barnes N. P., Williams J. A., Barnes J. C., Lockard G. // IEEE J. Quant. Electronics. 1988. Vol. 24. N 6. P. 1021—1028.
- [8] Конойко А. И., Поляков В. И., Ставров А. А. // Тез. докл. III Всесоюз. конф. «Применение лазеров в технологии и в системах передачи и обработки информации». Таллин, 1987. Т. 3. С. 139—140.

Межотраслевой институт
повышения квалификации кадров
по новым направлениям развития
техники и технологии
при Белорусском
политехническом институте

Поступило в Редакцию
13 февраля 1989 г.
В окончательной редакции
2 августа 1989 г.