

П.Н. Назаренко, Н.В. Окладников, Г.Л. Скрипко, А.А. Ставров

УЗКОПОЛОСНЫЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ БЛИЖНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА С ОПЕРАТИВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ПАРАМЕТРАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Представлены результаты исследований генерационных характеристик высокочастотных лазеров на основе кристаллов $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$. Описан высокочастотный (до 50 кГц) узкополосный лазер, перестраиваемый в диапазоне 680–960 нм и 350–460 нм с регулировкой спектральных, временных и энергетических характеристик.

Решение ряда задач по зондированию атмосферы и локации требует создания высокочастотных перестраиваемых твердотельных лазерных источников, генерирующих излучение с частотой повторения импульсов до 100 кГц. Существующие разработки высокочастотных перестраиваемых лазеров на основе красителей и кристаллов с центрами окраски (ЦО) не получили широкого распространения в практике из-за низких эксплуатационных характеристик использовавшихся активных сред. Среди других активных сред на основе активированных кристаллов наибольший интерес в настоящее время представляют кристаллы $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ [1, 2], что обусловлено как комплексом их оптико-физических и генерационных характеристик, так и значительными успехами в разработке и освоении потенциальных источников накачки: лазеров на парах меди и промышленных неодимовых лазеров с удвоением частоты и акустооптической модуляцией добротности.

Уже первые результаты по реализации высокочастотного режима генерации лазера на $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ при использовании в качестве источника накачки промышленного лазера ЛТИ-702 со средней мощностью до 2,6 Вт и частотой повторения импульсов до 25 кГц продемонстрировали высокую надежность данных активных сред [3]. При этом ресурс работы активных сред превышает 10^{11} импульсов. Несколько позже появились сообщения о реализации данного режима работы при накачке излучением лазеров на парах меди [4]. Использование указанных лазерных источников накачки имело свою специфику, связанную с малым диаметром перетяжки активной области (≈ 100 мкм), при которых реализовывались необходимые для эффективной генерации плотности энергии возбуждающего излучения, что накладывало ряд требований к конструкции и параметрам используемых резонаторов.

В предлагаемой статье представлены результаты исследований особенностей генерационных характеристик высокочастотных перестраиваемых лазеров на основе $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$, направленных на создание узкополосных перестраиваемых источников с оперативным управлением параметрами. Основной цикл исследований выполнен при использовании в качестве источника накачки промышленного неодимового лазера ЛТИ-701 со средней мощностью в одномодовом режиме до 4 Вт и длительностью импульсов более 100 нс при частоте их повторения до 50 кГц (с внешним генератором). В экспериментах использовались кристаллы $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$, выращенные методами Вернейля и Чохральского, с концентрацией активатора до 0,2 вес. % и длиной 6–10 мм.

Специфика генерации лазеров на $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ с когерентной накачкой

Использование лазерных источников накачки имеет свою специфику, связанную с зависимостями геометрии резонатора и распределения инверсии в активном объеме от интенсивности возбуждающего излучения. Данные зависимости обусловлены абсорбционными процессами и фазовыми возмущениями в активной среде под действием излучения накачки. Характерной особенностью динамики фазовых искажений является относительно большое время их затухания (термоискажений ~ 20 –80 мкс, населенностей ~ 4 мкс), на порядок и больше превышающее длительности процессов накачки и генерации. Степень влияния фазовых искажений на формирование геометрии активного канала и резонатора помимо плотности энергии накачки определяется концентрацией активатора и становится существенной при концентрациях Ti^{3+} более 0,1 вес. % и плотностях накачки более 1 Дж/см². Эксперименты по зондированию активного объема в кристаллах $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ свидетельствуют о преобладающем влиянии термоискажений по сравнению с инверсными как в процессе накачки, так и генерации.

Из-за указанных процессов, а также из-за больших дифракционных потерь при размерах перетяжки активного канала менее 0,1 мм и при энергиях накачки менее 1,0 мДж наиболее целесообразно использование схем резонаторов, аналогичных схемам непрерывных перестраиваемых лазеров, в частности, двух- и трехзеркальных с внутрирезонаторным телескопом, один из компонентов которого используется для фокусировки излучения накачки. В качестве второго элемента телескопа может использоваться линза или сферическое зеркало, предназначенные для коллимации генерируемого излучения в селективном плече резонатора. При этом фокусное расстояние данного коллимирующего элемента выбирается равным радиусу кривизны волнового фронта пучка, задаваемого поперечным размером активной области в кри-

стале $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$, что дает возможность получить в плоскости второго элемента телескопа перетяжку нужного размера, которой соответствует пучок заданной расходимости. Следует отметить, что малые размеры перетяжек активной области в кристаллах $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ (менее 100 мкм) позволяют использовать оптические компоненты с небольшими фокусными расстояниями (до 0,3 м). Конкретная схема одного из вариантов данного резонатора будет рассмотрена ниже.

Применение данных квазиконцентрических резонаторов с внутрирезонаторным телескопом позволяет, наряду с уменьшением дифракционных потерь и повышением устойчивости к динамическим фазовым искажениям, существенно уменьшить лучевую нагрузку на зеркала резонатора и селективирующие элементы и значительно сузить спектральную ширину линии генерации в селективном резонаторе (почти на порядок по сравнению с плоскопараллельным резонатором), повысить устойчивость к разъюстировке зеркал (до 12 мрад) и уменьшить расходимость излучения до значений менее 0,3 мрад, значительно увеличить ширину спектра генерации в неселективном резонаторе (до 60–70 нм) и реализовать возможность варьирования в широких пределах (до 3–4 м и более) длины резонатора без заметного снижения эффективности генерации, а также осуществить ряд режимов генерации: модуляции добротности и синхронизации мод.

На рис. 1 представлены характерные зависимости кпд преобразования η от коэффициента отражения R выходного зеркала резонатора с линзовым телескопом (кривые 1–4) и от внутрирезонаторных потерь Π для случая, когда роль выходного зеркала играет торец активного элемента (кривые 1'–3') при различных уровнях плотности энергии накачки. Из сравнения данных зависимостей видно, что при плотностях энергии более 2 Дж/см² оптимальной является схема резонатора, в которой в качестве выходного зеркала используются торцы активного элемента. Использование такой схемы позволяет также избежать технологических трудностей изготовления широкополосных зеркал. В случае селективного резонатора следует учитывать тот факт, что повышение эффективности преобразования в максимуме перестроенной кривой за счет увеличения полезных потерь при фиксированной плотности энергии накачки приводит к сужению диапазона перестройки. На рис. 2 для сравнения приведены зависимости кпд преобразования от длины волны, полученные в селективном резонаторе.

Концентрация активатора и, соответственно, оптическая плотность кристалла $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ также влияют на эффективность преобразования, что связано, в частности, с наличием поглощения в области генерации [3]. Так, характерной особенностью зависимостей энергии генерации от энергии накачки для кристаллов с концентрацией Ti^{3+} более 0,15 вес. % и ненасыщенным поглощением более 80% является наличие в них ряда участков с аномально низким кпд генерации. Исследования параметров прошедшего через активный элемент излучения накачки с гауссовым профилем интенсивности свидетельствуют о неравномерном по сечению распределении инверсии в активном объеме и изменении его конфигурации при варьировании плотности энергии накачки. В надпороговом режиме, особенно в резонаторах с низкой добротностью, периферийные участки сечения пучка накачки практически не дают вклада в генерацию, что обуславливает более низкие значения дифференциального кпд по сравнению с общим режимом. Повышение плотности энергии накачки приводит к более полному использованию энергии периферийной части пучка возбуждающего излучения и, как следствие, к увеличению дифференциального кпд генерации. Оптимальным с точки зрения уменьшения неоднородности инверсии и, соответственно, увеличения кпд генерации является использование активных элементов с коэффициентом ненасыщенного поглощения 60–80%, а также принятие специальных мер по повышению однородности плотности энергии накачки в возбуждаемом объеме, в частности, за счет применения двухсторонней накачки или соответствующего распределения активатора в кристаллах $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$.

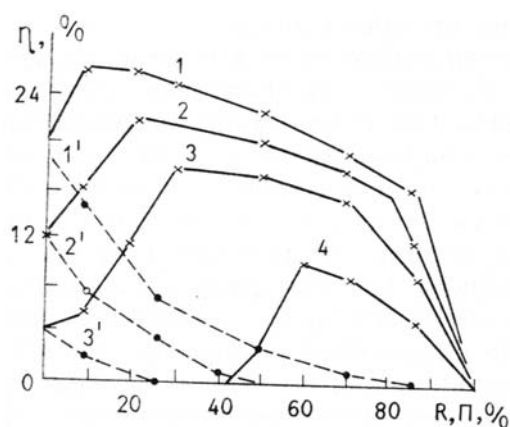


Рис. 1. Зависимость эффективности генерации от полезных (кривые 1–4) и паразитных (кривые 1'–3') потерь при различных плотностях энергии накачки, Дж/см²: 1, 1'–2,0; 2, 2'–1,8; 3, 3'–1,6; 4–1,2

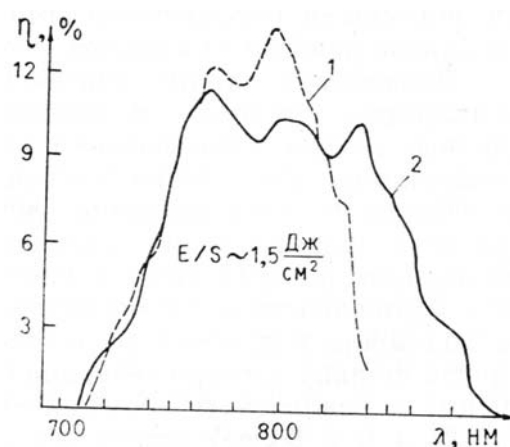


Рис. 2. Зависимость эффективности генерации от длины волны при использовании в качестве выходного зеркала торца активного кристалла (1) и выходного зеркала с $R = 70\%$ (2)

Особенности кинетики развития генерации накладывают ряд существенных ограничений на максимальные значения плотности энергии накачки и, соответственно, кпд преобразования. Так, в надпороговом режиме наблюдается генерация одиночного импульса с задержкой относительно импульса накачки, достигающей значений ~ 1 мкс. Повышение плотности энергии накачки приводит к уменьшению длительности и задержки и увеличению амплитуды генерируемых импульсов. При снижении задержки относительно максимума импульса накачки до значений, меньших длительности его заднего фронта, наряду со стабилизацией временных и энергетических параметров генерируемого пика, которой соответствует понижение дифференциального кпд генерации, происходит генерация второго, а при дальнейшем повышении уровня накачки и последующих пиков. Участок зависимости энергии генерации от плотности энергии накачки, соответствующий данному процессу, приобретает «ступенчатый» характер, где каждой последующей «ступеньке» соответствует генерация нового пика. Для кристаллов с концентрацией активатора менее 0,1 вес. % характер развития пиковой генерации в целом описывается в рамках режима релаксационных колебаний и слабо отражается в энергетических зависимостях. В случае более высококонцентрированных кристаллов абсорбционные процессы и динамические фазовые искажения приводят к существенному изменению геометрии активного канала в процессе накачки и генерации и, как следствие, к развитию режима «автомодуляции», характеризующегося более слабой зависимостью временных и энергетических параметров отдельных пиков генерации от энергетического уровня накачки. Соответствующие данному случаю энергетические зависимости имеют явно выраженный «ступенчатый» вид (рис. 3).

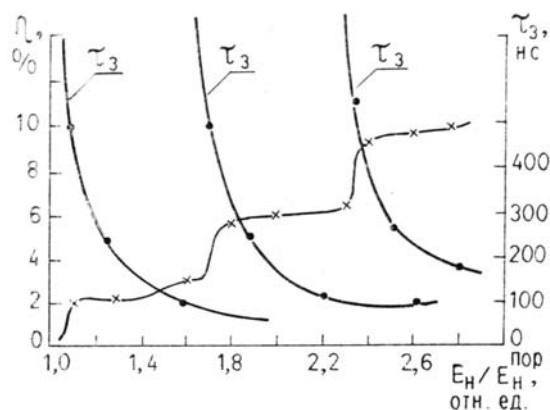


Рис. 3. Зависимость эффективности и задержки пиков генерации от уровня превышения порога

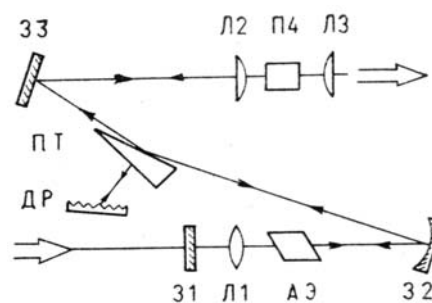


Рис. 4. Оптическая схема лазерного преобразователя на $\text{Al}_2\text{O}_3: \text{Ti}^{3+}$

Энергетическая граница развития пикового режима варьируется в зависимости от длительности импульсов накачки. С учетом лучевой прочности активных кристаллов оптимальный диапазон длительностей импульсов накачки для реализации моноимпульсного режима генерации, соответствующий более чем трехкратному превышению порога, составляет для резонаторов с типичными параметрами (суммарными потерями $\sim 40\%$, базой ~ 300 мм) 20–100 нс. Расширение границ указанного диапазона осуществляется путем использования кристаллов с более высокой лучевой прочностью, а также за счет снижения внутрирезонаторных потерь и увеличения длины резонатора.

| Параметр | Тип селектора | | | | |
|------------------|--------------------|---------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| | Блок из трех призм | Фильтр Лно 4-компонентный | Решётка | | АК-решётка и интерферометр Фабри-Перо |
| | | | скользящего падения | автоколлимационная (АК) | |
| КПД, % | 25–30 | 30 | 5–10 | 20–25 | 15–20 |
| Ширина линии, нм | 0,2 | 1,0 | 0,05 | 0,15 | 0,015 |

В результате оптимизации параметров резонатора, активного элемента и условий накачки с учетом особенностей генерации, рассмотренных выше, в неселективном резонаторе, построенном по квазиконцентрической схеме с внутрирезонаторным телескопом, реализованы: дифференциальный кпд $\sim 50\%$, полный — $\sim 40\%$. Типичные значения кпд генерации в селективном резонаторе и ширины линии в максимуме перестроенной кривой для ряда селекторов представлены в таблице. Спектральный диапазон перестройки при использовании данных селекторов 660–980 нм.

Узкополосный перестраиваемый лазерный преобразователь на $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$

Как уже было отмечено, требования к ширине диапазона перестройки и эффективности генерации при фиксированном уровне накачки являются противоречивыми, так как повышение эффективности генерации за счет увеличения полезных потерь сопровождается сужением диапазона перестройки. Совместить эти, на первый взгляд, противоречивые требования, а также осуществить стабилизацию ширины линии и длительности импульса генерации при перестройке длины волны позволила схема резонатора с регулируемым в процессе перестройки коэффициентом связи с внешним пространством, приведенная на рис. 4. Излучение накачки направлялось через «глухое» плоское зеркало резонатора $Z1$ и фокусировалось линзой $L1$ на переднюю рабочую грань активного элемента АЭ, расположенного под углом Брюстера к оси резонатора. В качестве второго компонента внутррезонаторного телескопа использовалось сферическое зеркало $Z2$, осуществлявшее коллимацию генерируемого пучка диаметром 3,5 мм. Дальнейшее снижение расходимости за счет увеличения поперечных размеров пучка осуществлялось однокомпонентным призмным телескопом $ПТ$, после которого излучение попадало на автоколлимационную дифракционную решетку $ДР$ с 1200 штрих/мм. Вывод излучения из резонатора производился от рабочей поверхности клина с углом при вершине 20° . Полезные потери регулировались в процессе перестройки в диапазоне 20–80% за счет варьирования угла падения излучения на рабочую поверхность клина в пределах $70–85^\circ$. Излучение генерации направлялось зеркалом $Z3$ на линзу $L2$ и фокусировалось последней на преобразователь частоты $ПЧ$ на основе кристалла LiJO_3 . Коллимация прошедшего через $ПЧ$ излучения основной и второй гармоник производилась линзовым компонентом $L3$. Механизм перестройки длины волны генерации обеспечивал синхронную подстройку на фазовый синхронизм нелинейного кристалла.

На основе рассмотренной схемы создан действующий макет узкополосного перестраиваемого лазера на $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ с удвоением частоты при использовании в качестве источника накачки промышленного лазера ЛТИ-701. С целью устранения пикового режима генерации база резонатора лазерного преобразователя была увеличена до 1,2 м, что позволило реализовать высокочастотный режим генерации единичных импульсов с эффективностью генерации по поглощенной энергии накачки (1,5 Вт) до 10–12%. Дальнейшее увеличение кпд генерации за счет увеличения мощности накачки сопровождалось генерацией второго и последующих пиков при единичном импульсе возбуждаемого излучения. Приведем параметры излучения макета лазерного преобразователя на $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$.

| | |
|---|---------|
| Средняя мощность генерации при частоте повторения импульсов | 8 кГц |
| в максимуме перестроечной кривой, мВт: | |
| по основной гармонике | 180 |
| по второй гармонике | 20 |
| Частота повторения импульсов, кГц | 5–50 |
| Диапазон перестройки, нм: | |
| основной гармонике | 680–900 |
| второй гармонике | 350–450 |
| Длительность импульсов генерации по полуширине, нс | 12–40 |
| Спектральная ширина линии генерации | |
| в максимуме перестроечной кривой, | менее 5 |

Оперативное управление параметрами перестраиваемого излучения высокочастотного лазера на $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$

Относительно большие длительности импульсов излучения неодимовых лазеров накачки (более 100 нс) приводят, как было отмечено, к развитию пикового режима генерации лазера на $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$. Широкий диапазон перестройки, высокие коэффициенты усиления, реализуемые при импульсной накачке, а также большие частоты повторения импульсов накладывают существенные ограничения на использование традиционных модуляторов добротности для реализации моноимпульсного режима генерации. С точки зрения перечисленных особенностей рассматриваемого режима работы наибольший интерес представляют электрооптические модуляторы (ЭОМ). Однако высокие рабочие напряжения (более 1 кВ), используемые в промышленных ЭОМ, обуславливают трудности их применения при частотах повторения импульсов более 100 Гц.

Более перспективен для реализации моноимпульсного режима генерации низковольтный электрооптический затвор, предложенный в [5]. Благодаря низким управляющим напряжениям (менее 1 кВ), возможна его работа с частотой следования управляющих импульсов до десятков килогерц. Использование такого затвора позволило осуществить оперативное управление временными параметрами генерируемого излучения во всем спектральном диапазоне 680–960 нм при энергетической эффективности генерации, сопоставимой с эффективностью свободного режима, и частотах повторения импульсов до 50 кГц. Затвор размещался в схеме, приведенной на рис. 4, между коллимирующим элементом $Z2$ и призмным телескопом $ПТ$.

Длительность и задержка импульса генерации относительно момента включения добротности ре-

зонатора, как и в случае свободной генерации, зависели от уровня превышения накачки над пороговой и базы резонатора. В резонаторе длиной 0,5 м они варьировались в пределах 5–50 и 10–100 нс соответственно. Регулировка момента включения добротности резонатора относительно максимума импульса накачки позволила также варьировать задержку между импульсами накачки и генерации в широких пределах (примерно до единиц микросекунд), что сравнимо с временем жизни возбужденного состояния Ti^{3+} (~4 мкс). В процессе перестройки длины волны генерации осуществлялась также подстройка статического напряжения в диапазоне 400–600 В.

В дополнение к проведенным исследованиям был выполнен также цикл экспериментов по использованию акустооптических устройств для управления параметрами генерируемого излучения. Как и предполагалось, относительно большие времена включения добротности акустооптического затвора (~100 нс), превышающие характерные длительности разгорания генерации, не позволили реализовать эффективный моноимпульсный режим работы высокочастотного лазера на $Al_2O_3:Ti^{3+}$. Однако применение акустооптического дефлектора (АОД), работающего на минус первом порядке дифракции, для управления спектральными характеристиками обеспечило существенное увеличение скорости сканирования (или перестройки) длины волны лазерного излучения по сравнению с импульсными (до 100 Гц) источниками, благодаря сочетанию высокой скорости перестройки периода акустической решетки, ограниченной лишь временем заполнения АОД акустической волной, с высокой частотой повторения импульсов излучения. Так, при замене дифракционной решетки в рассмотренной выше схеме (рис. 4) на АОД с расположенным за ним плоским «глухим» зеркалом реализована перестройка длины волны в пределах диапазона 730–870 нм за время между импульсами при частоте их повторения до 25 кГц (время перестройки АОД ~ 30 мкс). Характерной особенностью кинетики генерации являлась модуляция формы импульсов перестраиваемого излучения, причем глубина модуляции увеличивалась при сужении спектральной ширины и при значениях последней менее 40 пм достигала более 90%. Период модуляции соответствовал частоте возбуждаемой в АОД акустической волны, при согласовании которой с аксиальным периодом резонатора развивался режим генерации сверхкоротких импульсов с длительностью пиков в цуге менее 300 пс (предел разрешающей способности регистрирующей аппаратуры).

Заключение

Проведенные исследования высокочастотной генерации перестраиваемого лазера на $Al_2O_3:Ti^{3+}$ продемонстрировали его высокую надежность и простоту эксплуатации. Высокие значения коэффициентов усиления, реализуемые в процессе импульсной накачки, позволяют использовать резонаторы с высокими допустимыми суммарными потерями (до 90%), что обуславливает возможность применения практически всех существующих в настоящее время спектральных селекторов и их комбинаций. Наилучшие результаты получены в резонаторах квазиконцентрической конфигурации, построенных по двух- или трехзеркальной схеме с внутррезонаторным фокусирующим элементом.

На основании результатов исследований специфики перестраиваемой генерации разработан действующий макет высокочастотного узкополосного перестраиваемого лазера на $Al_2O_3:Ti^{3+}$ с регулируемым в процессе перестройки коэффициентом связи с внешним пространством. В конструкции макета предусмотрена возможность установки электрооптического затвора и акустооптических устройств, обеспечивающих оперативное управление временными и спектральными параметрами генерации за время между импульсами при частоте их повторения $\sim 10^4$ – 10^5 Гц в режимах активной модуляции добротности и синхронизации мод. Широкий диапазон перестройки, сочетание высокой частоты повторения импульсов с возможностью высокоскоростной перестройки длины волны и задержки между импульсами накачки и генерации описанного лазерного преобразователя на $Al_2O_3:Ti^{3+}$ позволяют существенно повысить быстродействие систем, в составе которых он может использоваться.

1. Белоногова Е. К., Исаенко Ю. Ж., Шавкунов С. В. Корунд с титаном — высокоэффективный материал для перестраиваемых твердотельных лазеров: Обзоры по электронной технике. Сер. II. Лазерная техника и оптоэлектроника. М.: ЦНИИ «Электроника», 1988. Вып. 1 (1344). 40 с.
2. Tunable Solid-State Lasers II/Edited by A.V. Budgor, L. Esterowits. L.G. De Shaser: Springer-Verlag, 1986. V. 52. 367 p.
3. Круглик С. Г., Скрипко Г. А., Шкадаревич А. П. и др. //ЖПС. 1986. Т. 45. № 4. С. 567–573.
4. Бартошевич С. Г., Зуев В. В., Мирза С. Ю. и др. //Квантовая электроника. 1989. Т. 16. № 2. С. 212–216.
5. Конойко А. И., Поляков В. И., Ставров А. А. //III Всесоюз. конф. «Применение лазеров в технологии и в системах передачи и обработки информации». (Тезисы докл.). Таллин, 1987. Т. 3. С. 139–140.

P.N. Nazarenko, N.V. Okladnikov, G.A. Skripko, A.A. Stavrov. **Narrow-Band, High Repetition Rate Tunable Sources of Near IR Radiation with Operatively Controllable Parameters of the Emission.**

The paper presents some results of the investigation into the emission characteristics of the high repetition rate $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ lasers. A narrow-band high repetition rate (up to 50 kHz) tunable (in the ranges 680 to 960 nm and 350 to 460 nm) laser is described in the paper. Monitoring of the spectral, temporal and energy parameters of the output emission is available.