

Г.С. Круглик, П.Н. Назаренко, Н.В. Окладников, Г.А. Скрипко, А.А. Ставров

**АВТОНОМНЫЙ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ПОЛИХРОМАТИЧЕСКИЙ ЛАЗЕР БЛИЖНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА**

Представлены результаты комплексных исследований, направленных на создание высокоэффективного лазера на основе кристаллов  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$  с лазерной накачкой, обеспечивающих одновременную генерацию на нескольких частотах излучения и перестройку в спектральной области 680–960 нм. Исследованы селективные свойства самих активных элементов и возможность их использования для реализации полихроматического режима работы лазера. Получена многочастотная генерация с интервалами между спектральными составляющими от 0,7 до 120 нм. Для накачки преобразователей на  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$  разработан ряд вариантов автономного лазера на ГСГГ:  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$ , обеспечивающего энергию генерации до 70 мДж в импульсе при частоте следования импульсов до 25 Гц.

Решение ряда задач по зондированию атмосферы требует создания многочастотных лазерных источников, генерирующих две и более спектральные компоненты. Так, в лидарных системах, работающих по методу дифференциального поглощения, применение многочастотных источников позволяет осуществить одновременное измерение поглощения в различных участках спектра и тем самым значительно повысить точность идентификации [1]. Немаловажное значение имеет использование многочастотных источников в лидарах, работающих по методу обратного комбинационного рассеяния и лазерной флуоресценции.

Традиционные источники широкополосного излучения на основе органических красителей и кристаллов с центрами окраски не обладают достаточной фото- и термостабильностью, а потому с практической точки зрения более пригодны лазеры на кристаллах, активированных ионами переходной группы. Самым перспективным из них в настоящее время является излучатель на кристаллах  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ , обладающий экстремально широким спектральным диапазоном генерации (660–1200 нм), незначительными размерами, стабильностью работы и высокой долговечностью.

В настоящей статье представлены результаты исследований физических механизмов, обуславливающих многочастотную генерацию, рассмотрены основные принципы построения автономных полихроматических перестраиваемых излучателей на кристаллах  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ . Функционально данные излучатели состоят из трех основных частей: автономного лазера накачки на основе кристаллов, активированных неодимом, каскада удвоения основной частоты излучения накачки и полихроматического преобразователя.

**1. Специфика реализации полихроматического режима генерации**

Несмотря на то, что кристаллы  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$  характеризуются однородным уширением, нестационарный режим работы дает возможность реализовать многочастотную генерацию за счет применения селективных резонаторов со спектрально разнесенными максимумами добротности.

Особый интерес для реализации многочастотной генерации в лазере на  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$  представляет использование селективных свойств самих активных элементов. В общем случае спектры генерации на  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$  в недисперсионном резонаторе обладают довольно сложной спектральной структурой, характер которой обусловлен как продольной и поперечной оптической неоднородностью и собственной анизотропией активных кристаллов, так и интерференционными процессами на торцах активного элемента.

Фазовая анизотропия ( $\Delta n = 8 \cdot 10^{-3}$ ) и дихроизм усиления ( $\sigma_e^{\parallel} = 3,7 \times 10^{-19} \text{ см}^2$ ;  $\sigma_e^{\perp} = 1,8 \times 10^{-19} \text{ см}^2$ ) кристаллов  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$  приводят при рассогласовании поляризационных характеристик активного элемента и резонатора к возникновению спектральной структуры с расстоянием между соседними спектральными компонентами, определяемым длиной активного кристалла ( $l$ ) и углом между осью резонатора и оптической осью активного элемента ( $\Omega$ ), в соответствии с известным выражением для интерференционно-поляризационного фильтра (ИПФ) [2]:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2(n_e - n_o) l \sin^2 \Omega}. \quad (1)$$

В общем случае оценка условий появления рассматриваемой спектральной структуры с использованием метода матриц Джонса представляет довольно сложную задачу. Прямые исследования показали, что достаточным условием появления спектральной структуры данного вида является рассогласование главной плоскости активного элемента на углы более 5...10° относительно как осей полного или частичного поляризатора, роль которого выполняли сами активные кристаллы, расположенные под углом Брюстера к оси резонатора, так и главных плоскостей дополнительных внутррезонаторных анизотропных фазовых элементов.

Управление положением спектральных компонент и спектральным расстоянием между ними достигается как путем варьирования разности фаз между обыкновенной и необыкновенной компонентами излучения в активном кристалле ( $l$  и  $\Omega$ ), так и введением дополнительных фазовых элементов (перестройка спектральных компонент). Следует отметить, что использование в качестве дополнительного фазового элемента электрооптической ячейки с регулируемым под действием приложенного напряжения наведенным двулучепреломлением (волновой разностью  $o$ - и  $e$ -компонентами излучения в пределах  $0 \dots \lambda$ ) обеспечивает, как показали экспериментальные исследования, реализацию оперативной перестройки спектральных компонент в пределах  $\Delta\lambda$ , за время между соседними импульсами при частоте их повторения до 10 кГц.

Особенностью данного полихроматического режима является возможность генерации более чем двух спектральных компонент в недисперсионном резонаторе лишь в спектральном диапазоне 760...840 нм, что связано с относительно слабым характером изменения кривой усиления в данном диапазоне длин волн. На рис. 1 в качестве примера приведена кривая зависимости порога генерации от длины волны, получаемая в случае селективного резонатора с суммарными потерями  $\sim 40\%$ . Для расширения границ указанного диапазона необходимо использовать дополнительные дисперсионные элементы, тип которых определяется конкретными требованиями к ширине спектра генерации.

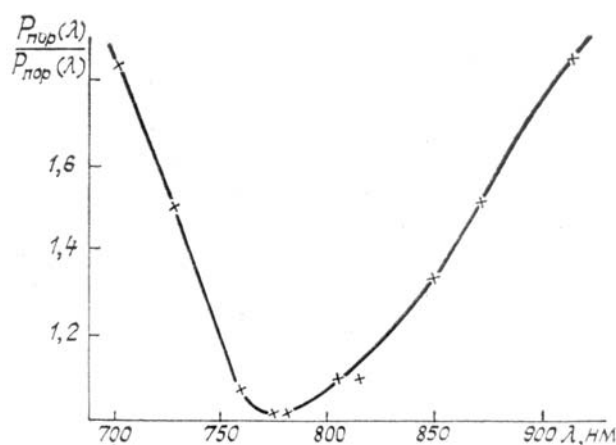


Рис. 1. Зависимость порога генерации от длины волны лазера на  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$

Спектральная ширина отдельных линий многочастотной генерации, так же как и период между ними, увеличивается при уменьшении длины активного кристалла, достигая значений более 3 нм при  $l$  6 мм (период более 12 нм). Для сужения спектральных линий необходимо использовать многокомпонентные ИПФ. Так, применение трехкомпонентного активного элемента  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$  с отношением толщин пластин 1:2:4 позволило реализовать многочастотную генерацию с периодом 40 нм при ширине отдельных линий  $\sim 1$  нм.

Следует отметить, что расстояние между соседними спектральными линиями определяется толщиной наиболее тонкой анизотропной активной пластины. При спектральном расстоянии между соседними линиями более 40 нм ( $l < 1$  мм) становится целесообразным использовать комбинированные, состоящие из активных и пассивных компонентов, или пассивные ИПФ, что связано с относительно невысокими коэффициентами усиления, реализуемыми в кристаллах  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$  (до  $1 \dots 5 \text{ см}^{-1}$ ).

Использование ИПФ представляет интерес и в двух частотных источниках на основе  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$  в более широком диапазоне, чем указанный выше. Это обусловлено значительно меньшими потерями, вносимыми в резонатор ИПФ по сравнению с другими типами селекторов. Так, применение четырехкомпонентного фильтра Лию с областью свободной дисперсии  $\sim 110$  нм позволило реализовать эффективную двухчастотную генерацию на линиях 740 и 850 нм, при ширине каждой менее 1 нм, характеризующихся одинаковым превышением порога генерации, как это видно из рис. 1, и, как следствие, практически равной интенсивностью. Синхронная перестройка линий сопровождалась изменением соотношения их интенсивностей, а также различным характером изменения длительности и задержки импульсов, соответствующих каждой из спектральных линий. При этом диапазон перестройки коротковолновой компоненты составил 730...770 нм, длинноволновой — 840...880 нм.

Полученные результаты представляют интерес также и с точки зрения решения целого ряда задач, где отсутствует необходимость строгой спектральной привязки компонент двухчастотной генерации, а основные требования предъявляются к спектральному расстоянию между ними. Так, практически любой коротковолновой спектральной линии в спектральном диапазоне генерации соответствует длинноволновая компонента с равным коэффициентом усиления. Основные ограничения к максимально возможному спектральному расстоянию между парой данных линий связаны с шириной спектрального диапазона генерации (660...980 нм) и областью свободной дисперсии ИПФ.

Для реализации многочастотной генерации с периодом менее 1 нм при частотно-поляризационной модуляции спектра излучения возникает необходимость применения анизотропных пластин (активных или пассивных) длиной более 50 мм. Кроме того, для регулировки спектрального периода требуется варьировать в значительных пределах толщину активных кристаллов или пассивных пластин, что является нежелательным в большинстве случаев. С этой точки зрения представляют интерес результаты исследований влияния поперечных фазовых неоднородностей элементов резонатора на формирование спектральной субструктуры с характерным периодом от сотен пикометров до единиц нанометров. Так, использование в резонаторе тонкой плоскопараллельной пластинки с показателем преломления  $n$  и толщиной  $d$ , частично перекрывающей периферийную часть сечения генерируемого пучка, позволяет получить дискретные эквидистантные спектры генерации с периодом [2]:

$$\Delta\lambda_2 = \lambda^2 \cos \beta / (n - 1) d, \quad (2)$$

где  $\lambda$  — длина волны генерации;  $\beta$  — угол преломления.

Управление положением элементов данной структуры и ее периодом осуществляется путем варьирования разности фаз, вносимой пластинкой, за счет наклона пластинки или варьирования ее толщины. В экспериментах при использовании тонких плоскопараллельных пластинок из стекла К8 и кварца толщиной от 100 до 300 мкм реализована многочастотная генерация с периодом 0,6...5 нм. При этом достигнуто повышение эффективности генерации по сравнению с эталоном Фабри-Перо более чем на 30%.

Следует отметить также возможность создания полихроматических преобразователей на  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ , генерирующих дискретный набор спектральных линий с периодом того же порядка, что и в предыдущем случае, формирование которых связано с интерференционными процессами на торцах плоскопараллельного активного элемента апертурно-ограниченных пучков. При этом характерной особенностью данной субструктуры является спектральное расстояние между ее элементами, более чем на порядок превышающее область свободной дисперсии интерферометра, в качестве которого выступает активный кристалл [3, 4]. Перестройка спектральных линий осуществляется за счет варьирования оптической толщины активных кристаллов. Так, использование активных элементов с небольшой клиновидностью торцов (до 1...3 мрад) позволило реализовать синхронную перестройку как при их перемещении перпендикулярно оси резонатора, так и при варьировании рабочей температуры. При этом изменению оптической толщины на величину  $\sim \lambda/2$  соответствует перестройка элементов структуры на ее период. Коэффициент температурной перестройки для кристаллов  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$  длиной 6 мм составил 3 нм/град. На рис. 2 в качестве примера представлены спектрограммы для данных кристаллов при брестеровской (а) и нормальной ориентации (б) рабочих граней, полученные в квазиконцентрическом линзовом резонаторе.

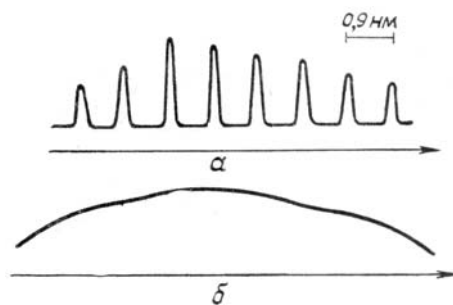


Рис. 2. Спектры генерации при брестеровской (а) и нормальной ориентации (б) торцов активного элемента

## 2. Автономные перестраиваемые лазеры на основе кристаллов $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$

Высокие оптико-физические и генерационные характеристики кристаллов  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$  определяют относительную простоту конструкции источников на основе данных сред по сравнению с другими типами перестраиваемых лазеров, а также их удобство и надежность при эксплуатации в различных климатических условиях. Возможность работы при температуре до 300°C позволяет использовать данные источники в «сухом» исполнении. Ресурс активных элементов превышает  $10^{11} \dots 10^{12}$  импульсов.

Специфика разработки высокоэффективных перестраиваемых лазеров на основе  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$  связана как с оптимизацией параметров самого преобразователя на основе данных кристаллов, так и с усовершенствованием источников накачки на основе неодимовых лазеров и каскадов преобразования их излучения во вторую гармонику.

Оптимизация новых высокоэффективных лазеров накачки на основе ГСГГ (ИСГГ, ГСАГ):  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$  в автономном исполнении позволяет решить задачу создания широкодиапазонных перестраиваемых лазеров ближнего ИК-диапазона, пригодных для зондирования атмосферы в полевых условиях. В настоящее время для накачки преобразователей на  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$  нами разработан ряд вариантов авто-

номного лазера на ГСГГ:  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$  с улучшенными массогабаритными характеристиками, обеспечивающего энергию генерации до 70 мДж в импульсе при частоте следования импульсов до 25 кГц. В данных разработках предусмотрена возможность питания от аккумуляторной батареи и других источников бортовой сети, а также использована система охлаждения комбинированного типа (жидкостная одноконтурная с принудительно-воздушной вентиляцией). Масса всей системы не превышает 10 кг. При необходимости лазер накачки может быть снабжен каскадами усиления. Применение кристаллов ИСГГ и ГСАГ позволяет обеспечить дальнейшее повышение частоты следования импульсов генерации.

Полный кпд системы «лазер накачки — преобразователь на  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ » в значительной степени определяется эффективностью преобразования излучения накачки ( $\lambda \sim 1,06$  мкм во вторую гармонику ПВГ). Для создания мощного перестраиваемого лазера нами выбрана схема последовательного ПВГ и раздельного возбуждения задающего генератора и усилительных каскадов на основе  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$  (рис. 3). Это дает возможность реализовать кпд генерации по основной гармонике излучения накачки  $\sim 10\text{...}15\%$  (при 50% по второй гармонике) и тем самым существенно увеличить кпд лазерной системы в целом.

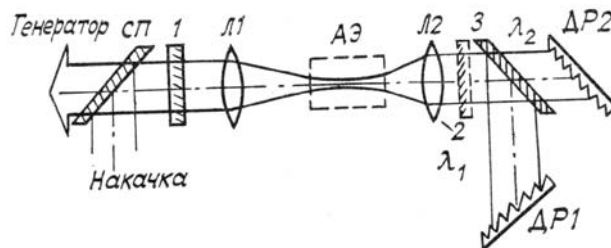


Рис. 3. Оптическая схема полихроматического лазера на  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ : СП — пектрорделитель; 1, 2 — зеркала резонатора; АЭ — активный элемент; Л1, Л2 — линзы; 3 — светоделитель; ΔР1, ΔР2 — автоколлимационные решетки; АЭ — активный элемент

Задающий генератор лазерного преобразователя выполнен по схеме с внутррезонаторным зеркально-линзовым телескопом, приведенной на рис. 4. Активный элемент состоит из двух компонентов и при определенной ориентации их оптических осей друг относительно друга совмещает функцию частотно-поляризационного селектора осуществляющего выделение спектральных компонент многочастотной генерации и их перестройку со спектральным периодом, варьируемым в диапазоне 0,7...70 нм путем изменения разности фаз между  $o$  и  $e$ -компонентами генерируемого излучения. Для сужения спектральной ширины каждой из генерируемых линий в конструкции резонатора предусмотрена возможность использования дополнительных анизотропных элементов, параметры которых определяются конкретными требованиями к спектральным характеристикам излучения генерации. Совмещение функций селектора в активном элементе позволяет снизить внутррезонаторные потери и тем самым повысить эффективность преобразования до 40...50% (по поглощенной энергии накачки). Кроме того, в данной схеме возможно использование и ряда других механизмов спектральной самоселекции генерируемого излучения, рассмотренных в предыдущем разделе настоящей статьи.

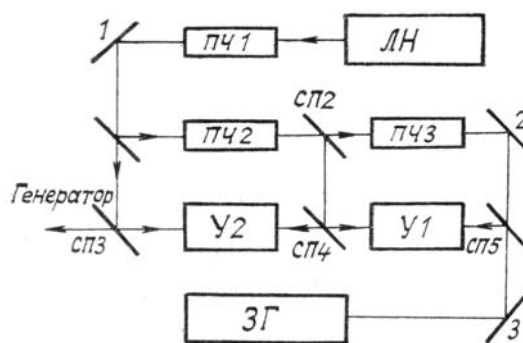


Рис. 4. Блок-схема полихроматического лазера: ЛН — лазер накачки; ПЧ1—ПЧ3 — удвоители частоты; 1, 2, 3 — зеркала; СП1—СП5 — спектрорделители; У1, У2 — усилители на  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ ; ЗГ — задающий генератор на  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$

Традиционный режим двухчастотной генерации с независимой перестройкой спектральных линий реализуется путем согласования оптических осей компонентов активного элемента и заменой «глухого» зеркала 1 двухплечевым дисперсионным элементом со спектрально разнесенными максимумами добротности. Изменение соотношения интенсивностей генерируемых спектральных линий в данном случае осуществляется путем варьирования добротности одного из связанных резонаторов. Ширина спектральных линий и эффективность преобразования излучения накачки определяются параметрами используемых селекторов, выбор которых осуществлялся в зависимости от требований к параметрам

генерируемого излучения. Типичные значения кпд генерации и ширины линии в максимуме перестроенной кривой, реализованные в данном резонаторе при одночастотной генерации для ряда селекторов, представлены в таблице. Спектральный диапазон независимой перестройки каждой из линий при использовании данных селекторов составил 660...980 нм.

Селектор	Блок из 3-х призм	Фильтр Лيو 4-х компонентов	Автоколлимационная решетка (АКР)	АКР и интерферометр Фабри-Перо	АКР и призмный телескоп
Кпд, %	25...30	30	20...25	15...20	10...15
Ширина линии, нм	0,2	1,0	0,15	0,02	0,003

Характерной особенностью кинетики данного двухчастотного режима являлась генерация двух пиков с различными длительностями и задержками, соответствовавших каждой из спектральных линий генерируемого излучения при отличающихся для них уровнях превышения порога. В процессе перестройки длительность импульсов каждой из линий варьировалась в пределах 20...150 нс при соответствующем изменении задержки относительно максимума импульса накачки ( $\tau = 50$  нс) от 30 до 400 нс.

### 3. Заключение

Таким образом, в процессе выполненных исследований продемонстрирована перспективность использования кристаллов  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$  в качестве активных сред полихроматических перестраиваемых излучателей ближнего ИК-диапазона. Широкий спектральный диапазон усиления кристаллов  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$  позволяет реализовать различные режимы многочастотной генерации как в известных двухплечевых резонаторах с независимой перестройкой каждой из линий, так и при использовании ИПФ. Фазовая анизотропия и дихроизм усиления кристаллов  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$  дает возможность создания на их основе активных или комбинированных (из пассивных и активных компонент) селекторов, совмещающих функции дисперсионных и активных элементов резонатора.

Проведены эксперименты по формированию дискретной спектральной структуры с периодом субнано-нанометрового диапазона, обусловленной интерференционными процессами, связанными с поперечной оптической неоднородностью и апертурным ограничением генерируемого пучка.

Разработка малогабаритных высокоэффективных неодимовых лазеров накачки в автономном исполнении позволила решить задачу создания широкодиапазонных перестраиваемых, в том числе полихроматических лазеров ближнего ИК-диапазона, пригодных для зондирования атмосферы в полевых условиях. Для повышения кпд системы «лазер накачки – преобразователь на  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ » предложена схема последовательного ПВГ и отдельного возбуждения задающего генератора и усилительных каскадов на кристаллах  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ , что дало возможность увеличить кпд генерации по основной гармонике излучения лазера накачки до 10...15%.

1. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
2. Ландсберг Г. С. Оптика. М.: Наука, 1976. 928 с.
3. Johnson L.F., Guggenheim H.S., Thomas R.A. //Phys. Rev. 1966. V. 149. №. 1. P. 179–185.
4. Drube J., Struve B., Huber G. //Optics Comms. 1984. V. 50. № 1. P. 45–48.

Межотраслевой институт повышения квалификации  
при Белорусском политехническом институте, Минск

Поступила в редакцию  
6 января 1989 г.

G.S. Kruglik, P.N. Nazarenko, N.V. Okladnikov, G.A. Skripko,  
A.A. Starova. **Autonomous Tuned Polychromatic Near Infrared Laser.**

The results of complex investigations aimed at the creation of a laser-pumped high-efficient  $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$  laser, generating simultaneously at several frequencies and tunable in the 080–960 nm spectrum range are presented. The selecting properties of the active elements themselves and the possibility of using them for polychromatic lasing have been investigated. Multifrequency generation with the spectrum component intervals ranging from 0,7 to 120 nm has been achieved. Several variants of an autonomous  $\text{Cr}^{3+}:\text{Nd}^{3+}:\text{GSGG}$  laser with the 70 mJ pulse energy at a repetition rate of 25 Hz have been developed to pump  $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$  converters.