

## LiSrAlF<sub>6</sub>:Cr лазер с решёткой Брэгга: перестройка и генерация двух длин волн

В. М. Петров<sup>1</sup>, Е. Э. Попов<sup>1, 2</sup>, А. П. Погода<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

Впервые продемонстрирована перестройка излучения лазера на основе кристалла LiSrAlF<sub>6</sub>:Cr и пропускающей решётки Брэгга в диапазоне 100 нм, а также режим одновременной генерации двух, не кратных между собой длин волн.

*Ключевые слова:* оптика, голография, дифракционные оптические элементы.

*Цитирование:* Петров, В. М. LiSrAlF<sub>6</sub>:Cr лазер с решёткой Брэгга: перестройка и генерация двух длин волн / В. М. Петров, Е. Э. Попов, А. П. Погода // HOLOEXPO 2021 : XVIII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. — С. 77–83.

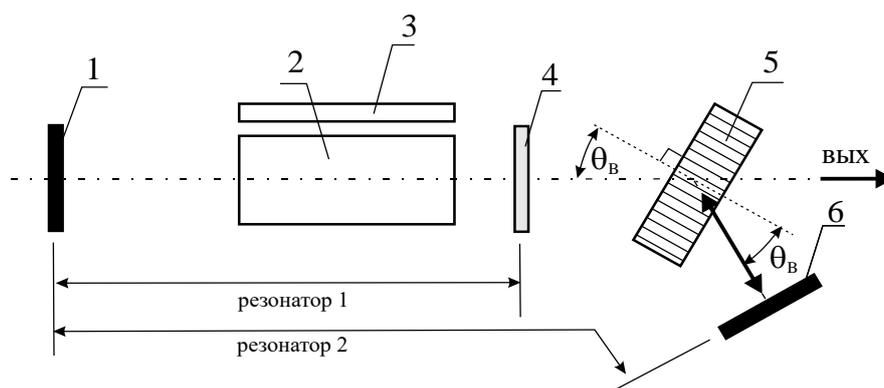
### Введение

Монокристаллический лития стронция алюминия фторид, допированный хромом LiSrAlF<sub>6</sub>:Cr, обладает необходимым набором свойств для создания лазеров с широким диапазоном перестройки генерируемой длины волны [1–3]. Длительное время жизни верхнего уровня допускает использование прямой ламповой или диодной накачки относительно небольшой мощности [4, 5]. Использование различных периодических структур позволяет эффективно управлять излучением такого лазера [6–8].

Дифракционные решётки Брэгга, выполненные в виде периодических вариаций показателя преломления в фото-терморепрактивных стёклах, обладают дифракционной эффективностью до 100%, и высочайшим оптическим качеством. С этой точки зрения они являются практически идеальными для задач перестройки длины волны лазера, работающего в импульсном режиме. Далее нами будут приведены результаты исследования работы LiSrAlF<sub>6</sub>:Cr лазера с использованием в качестве спектрально-селективного элемента в виде пропускающей решетки Брэгга, созданной в фото-термо-рефрактивном стекле [9].

### 1. Режим свободной генерации

Схема исследуемого лазера в режиме свободной генерации и перестройкой по длине волны показана на рис. 1. По сравнению с «обычной» схемой резонатора, в данном случае добавлены фазовая пропускающая решётка Брэгга 5 и глухое зеркало 6. Решётка Брэгга была установлена на вращающейся станине, позволяющей менять угол падения с точностью примерно 0,01°. Полупрозрачное зеркало 4 здесь и далее имело коэффициент отражения  $R$  примерно 50% в рабочей полосе длин волн.



1 — глухое зеркало, 2 — активный элемент, 3 — лампа накачки, 4 — полупрозрачное зеркало  $R = 50\%$ , 5 — фазовая решётка Брэгга, 6 — глухое зеркало

**Рис. 1.** Схема лазера в режиме свободной генерации и перестройке по длине волны

Как видно из представленного рисунка, в этом случае лазер имеет два резонатора. Первый резонатор образован двумя плоскими зеркалами 1 и 4. Второй резонатор образован зеркалами 1 и 6, длина этого резонатора составляет 75 см. Зеркало 6 расположено не параллельно зеркалу 1. Связь между зеркалами 1 и 6 осуществляется за счёт пропускающей фазовой решетки Брэгга 5. Решётка записана в фото-термо-рефрактивном стекле и имеет следующие параметры: средний показатель преломления  $n \approx 1,43$ , толщина решетки  $T = 0,7$  мм, пространственный период решётки  $\Lambda \approx 760$  мкм. При падении излучения на решётку слева направо происходила дифракция под углом  $\theta_B$ , равным углу падения. Длина волны падающего света  $\lambda_B$  и угол  $\theta_B$  связаны законом Брэгга

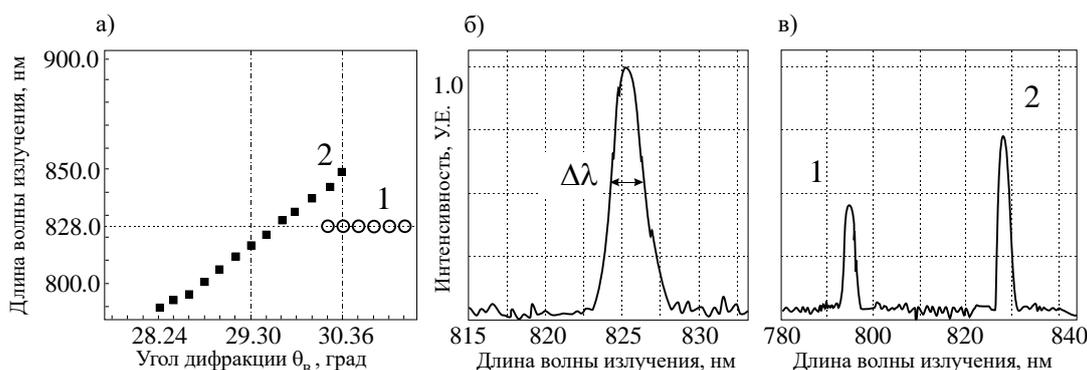
$$2\Lambda \sin \theta_B = \lambda_B. \quad (1)$$

При падении из резонатора на решётку даже нескольких длин волн, благодаря высокой угловой и спектральной селективности решётки, продифрагирует только та волна, длина которой удовлетворяет условию (1). Выражения (2) дают оценку, соответственно, относительных угловой, и спектральной селективностей решётки в пропускающей геометрии.

$$\frac{\delta\theta}{\theta} \approx \frac{\Lambda}{T}, \quad \frac{\delta\lambda}{\lambda} \approx \frac{\lambda}{T} \operatorname{ctg} \theta, \quad (2)$$

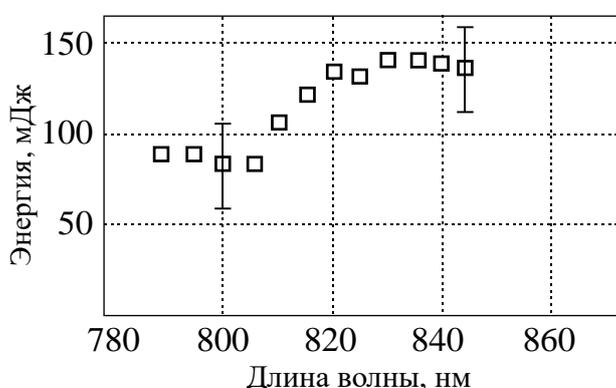
где  $\delta\theta$  — отклонение от угла падения  $\theta$ , при котором дифракционная эффективность решётки изменяется от своего максимального значения до нуля. Для параметров используемых нами решёток оценки (2) дают: угловая селективность  $\delta\theta/\theta \approx 1,1 \times 10^{-5}$ , спектральная селективность  $\delta\lambda/\lambda \approx 1,8 \times 10^{-5}$ . Для используемого в данной работе угла падения  $\theta \approx 33^\circ$ , абсолютная угловая селективность решётки составила  $\Delta\theta \approx 0,03^\circ$ . Величина спектральной селективности составила  $\delta\lambda \approx 1,5$  нм. Таким образом, решётка Брэгга 5 обеспечивает высокую спектральную и угловую селекцию генерируемого излучения во втором резонаторе.

На рис. 2 показаны результаты исследования диапазона перестройки длин волн лазерного излучения в режиме свободной генерации. Видно, что полный диапазон перестройки за счёт изменения угла Брэгга решётки составил 795–850 нм. Важно отметить, что при углах дифракции, больших, чем  $30,3^\circ$ , дополнительно наблюдается генерация излучения на длине



*a* — зависимость длин волн генерации от угла Брэгга  $\theta_B$ : 1 — излучение, генерируемое в резонаторе 1, 2 — в резонаторе 2; *б* — излучение на длине волны  $\approx 825$  нм, режим генерации одной длины волны, ширина спектра излучения  $\Delta\lambda \approx 2,4$  нм; *в* — излучение на длинах волн  $\approx 795$  нм, и 828 нм, режим генерации двух длин волн

**Рис. 2.** Характеристики в режиме свободной генерации с перестройкой длины волны



**Рис. 3.** Зависимость энергии импульса на выходе лазера от длины волны в режиме свободной генерации с перестройкой длины волны

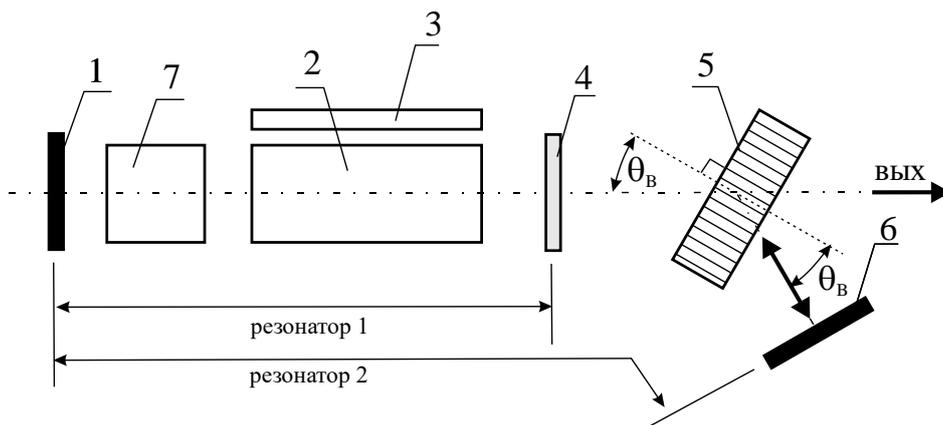
волны  $\lambda \approx 828$  нм. Таким образом, возникает режим генерации двух, не кратных между собой длин волн.

На рис. 3 показаны результаты измерения мощности свободной генерации от длины волны.

## 2. Режим пассивной модуляции добротности с перестройкой по длине волны

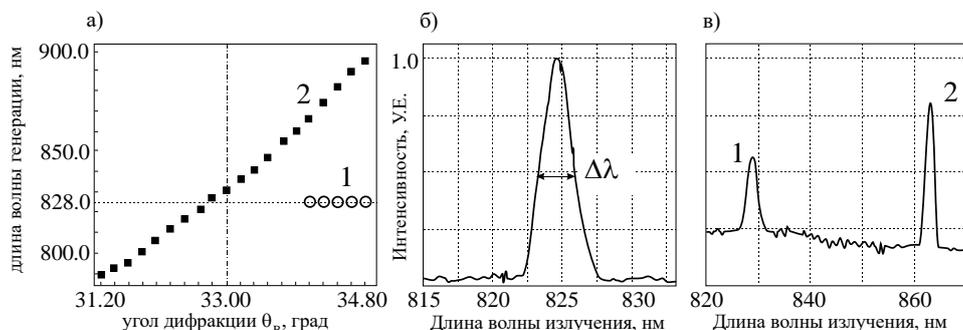
Схема исследуемого лазера в режиме пассивной модуляции добротности показана на рис. 4. По сравнению со схемой, показанной на рис. 1, в данном случае добавлен пассивный самопросветляющийся  $\text{LiF:F}^{-2}$  затвор 7 с начальным пропусканием  $60 \pm 5\%$ .

На рис. 5 показаны результаты исследования диапазона перестройки длин волн лазерного излучения в режиме пассивной модуляции добротности. Видно, что полный диапазон перестройки за счёт изменения угла Брэгга решётки составил 795–895 нм. Важно отметить, что при углах, более  $34^\circ$ , дополнительно наблюдается генерация излучения на длине волны  $\lambda \approx 828$  нм. Таким образом возникает режим генерации двух, не кратных между собой длин волн.



1 и 6 – «глухие» зеркала, 2 – активный элемент, 3 – лампа накачки, 4 – полупрозрачное зеркало, 5 – фазовая решётка Брэгга, 7 – самопросветляющийся затвор или электрооптический затвор для режима активной модуляции добротности

**Рис. 4.** Схема лазера с пассивной модуляцией добротности с перестройкой длины волны. Резонатор 1 образован зеркалами 1 и 4, резонатор 2 – зеркалами 1 и 6



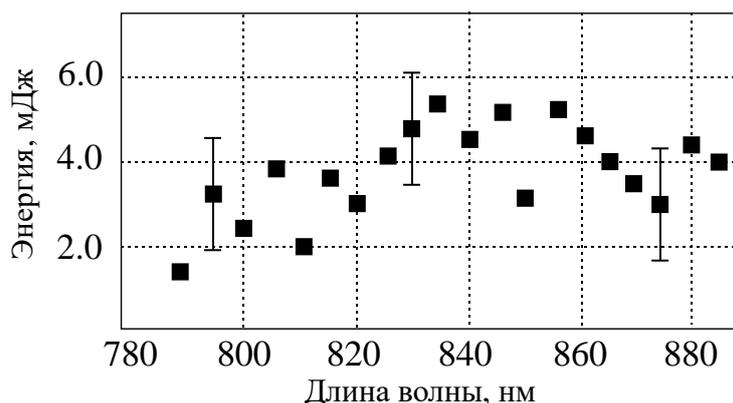
а – зависимость длин волн генерации от угла Брэгга  $\theta_B$ : 1 – излучение, генерируемое в резонаторе 1, 2 – в резонаторе 2; б – излучение на длине волны  $\approx 824,5$  нм, режим генерации одной длины волны, ширина спектра излучения  $\Delta\lambda \approx 2,4$  нм; в – излучение на длинах волн  $\approx 828$  нм (1), и 866 нм (2), режим генерации двух длин волн

**Рис. 5.** Характеристики в режиме пассивной модуляции добротности с перестройкой длины волны

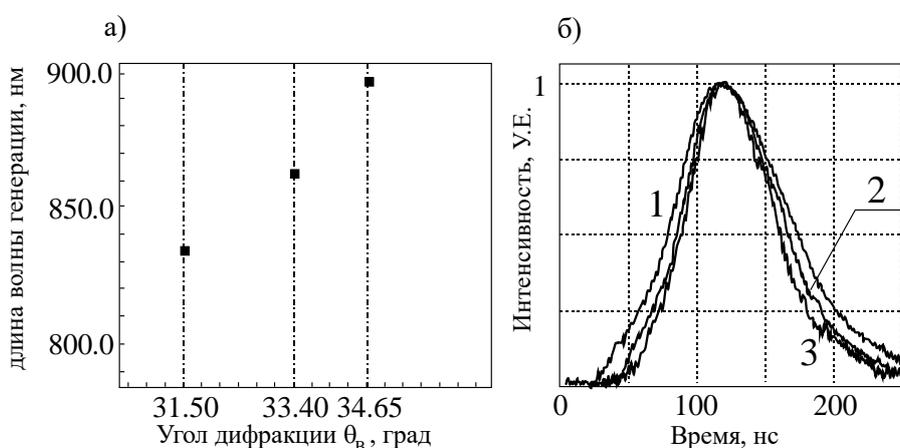
На рис. 6 показаны результаты измерения мощности генерации в режиме пассивной модуляции добротности от длины волны.

### 3. Режим активной модуляции добротности с перестройкой по длине волны

Схема исследуемого лазера в режиме активной модуляции добротности аналогична схеме, показанной на рис. 4. Однако, в случае активной модуляции добротности, вместо самопросветляющегося затвора 7 использовался электрооптический затвор, представляющий из себя ячейку Погкельса на основе кристалла бета-бората бария (ВВО) – РСВ4S-С, производства Eksma, время срабатывания которого определялось внешним управляющим сигналом.



**Рис. 6.** Зависимость энергии генерируемого импульса от длины волны в режиме пассивной модуляции добротности



*a* — зависимость длины волн генерации от угла Брэгга  $\theta_B$ ; *б* — осциллограммы генерируемых импульсов: 1 — на длине волны  $\lambda_1 = 835,4$  нм, длительность импульса  $\tau_1 \approx 101$  нс, 2 —  $\lambda_2 = 865,1$  нм,  $\tau_2 \approx 94$  нс, 3 —  $\lambda_3 = 897$  нм,  $\tau_3 \approx 84$  нс

**Рис. 7.** Характеристики в режиме активной модуляции добротности

На рис. 7 показаны результаты исследования диапазона перестройки длин волн лазерного излучения в режиме активной модуляции добротности. Видно, что полный диапазон перестройки за счёт изменения угла Брэгга решётки в данном случае составил 835,4–897,6 нм. Как видно из представленного графика, в этом режиме нами получены только три экспериментальные точки для зависимости длины волны дифракции от угла дифракции. Это связано с необходимостью каждый раз проводить дополнительную юстировку затвора при изменении угла дифракции, что вызывало определённые технические трудности. Генерации двух длин волн в этом режиме нами не наблюдалось.

#### 4. Обсуждение результатов

Лазеры с управляемыми в установленном диапазоне спектральными свойствами востребованы в различных областях техники: системы дистанционного зондирования атмосферы, спектроскопия, системы передачи информации, и т. д. [10]. Как правило, источником излучения в таких системах является лазеры на активном элементе Ti:Sapphire. Однако использова-

ние этих сред имеет следующие недостатки. Во-первых, короткое время жизни верхнего возбужденного состояния Ti:Sapphire (3,2 мкс) [11] приводит к необходимости использования накачки достаточно пиковой высокой мощности. Во-вторых, как правило, продольная накачка осуществляется второй гармоникой излучения Nd:YAG-лазера. Сложность, низкая эффективность, габаритные размеры и высокая стоимость лазерной накачки Ti:Sapphire-системы ограничивают область ее применения. Недостаточно высокая энергия при значительных габаритных размерах исключает возможность использования системы для космических задач (дистанционное зондирование атмосферы системами космического базирования). Альтернативой Ti:Sapphire можно рассматривать кристалл лития стронция алюминия фторид, допированный хромом. Как уже было отмечено, эта среда имеет широкий спектр излучения (750–950 нм), сопоставимый со спектром Ti:sapphire, и достаточно большое время жизни верхнего лазерного уровня (67 мкс), что допускает использование прямой ламповой или диодной накачки относительно меньшей мощности. Ключевым преимуществом при создании системы накачки является наличие лазерных диодов с полосой излучения 650–680 нм. Это позволяет создавать компактную систему с поперечной накачкой линейками лазерных диодов относительно малого веса.

По сравнению с ближайшим зарубежным аналогом, в качестве перестраиваемого спектрально-селективного элемента, мы использовали решётку Брэгга, созданную в фото-термо-рефрактивном стекле. Эта решётка обладает дифракционной эффективностью, заметно превышающей 90%, высоким оптическим качеством и предельно-низкими оптическими потерями в рабочем диапазоне длин волн. Размещение такого элемента в лазере приводило к минимальным вносимым потерям. Мы полагаем, что именно этот факт позволил достичь диапазона перестройки 795–895 нм, против диапазона 840–882 нм, достигнутого в работе [8] с использованием решётки Липпмана.

### Заключение

Мы считаем необходимым отметить, что в данной работе мы приводим результаты исследования лазера, все основные элементы которого созданы в России. Активный элемент лазера — кристалл  $\text{LiSrAlF}_6:\text{Cr}$  был выращен в Казанском (Приволжском) федеральном университете, Решётка Брэгга, обеспечивающая плавную перестройку генерируемой длины волны — изготовлена в Университете ИТМО в Санкт-Петербурге. Квантрон был изготовлен в Балтийском государственном техническом университете «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова.

По нашим данным, исследования такого лазера проведены впервые в нашей стране. Экспериментально продемонстрированный диапазон перестройки составил 795–895 нм, что выше, чем у ближайшего зарубежного аналога.

### Список источников

- [1] **Beaud, P.** [Gain properties of  \$\text{LiSrAlF}\_6:\text{Cr}^{3+}\$](#)  / P. Beaud, Y.-E. Chen, B. H. T. Chai, M. C. Richardson // Optics Letters. — 1992. — Vol. 17. — № 15. — P. 1064–1066.

- [2] **Payne, S. A.** [Properties of Cr:LiSrAlF<sub>6</sub> crystals for laser operation](#) / S. A. Payne, L. K. Smith, R. J. Beach, B. H. T. Chai, J. H. Tassano, L. D. DeLoach, W. L. Kway, R. W. Solarz, W. F. Krupke // Applied Optics. — 1994. — Vol. 33. — № 24. — P. 5526–5536.
- [3] **Payne, S. A.** [Laser performance of LiSrAlF<sub>6</sub>:Cr<sup>3+</sup>](#) / S. A. Payne, L. L. Chase, L. K. Smith, W. L. Kway, H. W. Newkirk // Journal of Applied Physics. — 1989. — Vol. 66. — № 3. — P. 1051–1056.
- [4] **Scheps, R.** [Diode-pumped LiSrAlF<sub>6</sub>:Cr<sup>3+</sup> laser](#) / R. Scheps, J. F. Myers, H. B. Serreze, A. Rosenberg, R. C. Morris, M. Long // Optics letters. — 1991. — Vol. 16. — № 11. — P. 820–822.
- [5] **Demirbas, U.** [Diode-pumped continuous-wave and femtosecond Cr:LiCAF lasers with high average power in the near infrared, visible and near ultraviolet](#) / U. Demirbas, I. Baaly, D. A. E. Acar, A. Leitenstofer // Optics Express. — 2011. — Vol. 23. — № 7. — P. 20444–20461.
- [6] **Chung, T.** [Solid-state spectral narrowing using a volumetric photothermal refractive Bragg grating cavity mirror](#) / T. Chung, A. Rapaport, V. Smirnov, L. B. Glebov, M. C. Richardson, M. Bass // Optics letters. — 2006. — 31. — № 2. — P. 229–231.
- [7] **Патент № 6586141 B1 US.** Process for production of high efficiency volume diffractive elements in photo-thermo-refractive glass / O. M. Efimov, L. B. Glebov, V. I. Smirnov, L. N. Glebova. — Оpubл. 01.07.2003.
- [8] **Kunpeng, L.** [High-efficiency tunable dual-wavelength Cr:LiSAF laser with external grating feedback](#) / L. Kunpeng, S. Yanlong, Y. Li // Optics Communications. — 2017. — Vol. 405. — P. 233–237.
- [9] **Никоноров, Н. В.** Голографические оптические компоненты на основе фоторефрактивных кристаллов и стекол: сравнительный анализ и перспективы развития / Н. В. Никоноров, В. М. Петров // Оптика и спектроскопия. — 2021. — Том 129. — № 4. — С. 385–392.
- [10] **Bruce, E.** [Tunable Lasers](#) / E. Bruce // IEEE Spectrum. — 2002. — Vol. 39. — № 9. — P. 35–39.
- [11] **Eggleston, J. M.** [Characteristics and kinetics of laser-pumped Ti:sapphire oscillators](#) / J. M. Egglestone, L. G. DeShazer, K. W. Kangas // IEEE journal of quantum electronics. — 1988. — Vol. 24. — № 6. — P. 1009–1015.