

Лазер на изумруде в режиме свободной генерации

© В.В. Анциферов

Институт ядерной физики СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
E-mail: vita@stu.ru

(Поступило в Редакцию 20 июля 1999 г.)

Исследованы спектральные и энергетические параметры генерации лазера на кристалле изумруда. Проведено сравнение параметров генерации исследованного лазера с параметрами генерации лазера на кристалле александрита. Показано, что свободная генерация ионов хрома в кристалле изумруда в обычных условиях происходит в режиме незатухающих пульсаций интенсивности излучения, как и на других средах с ионами хрома.

Введение

Впервые генерация трехвалентных ионов хрома в кристалле изумруда на электронно-колебательных переходах ${}^4T_2 \rightarrow {}^4A_2$ была получена в работе [1]. Перестраиваемая генерация лазера на изумруде на переходе ${}^4T_2 \rightarrow {}^4A_4$ при лазерной накачке исследована в работах [2–4], а на R -линиях ионов хрома — в работах [4,5]. Энергетические характеристики генерации лазера на кристалле изумруда, выращенного флюсовым методом, при ламповой накачке исследовались в работе [6].

Кристалл изумруда (хромовый берилл, $\text{Cr}^{3+}:\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_6$), одноосный, отрицательный, имеет показатели преломления $n_0 = 1.58$ и $n_e = 1.575$; с концентрацией ионов хрома 0.01–1% он обладает зеленым цветом. Его температура плавления составляет 1470°C , что на 400° ниже температуры плавления кристалла александрита. Теплопроводность кристалла изумруда почти в шесть раз меньше теплопроводности александрита и составляет $0.04 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{grad}^{-1}$. Кристаллы изумруда выращиваются двумя методами: гидротермальным и флюсовым. Флюсовые изумруды имеют лучшее оптическое качество, меньше содержат посторонних примесей. Неселективные потери изумрудов, выращенных гидротермальным методом, составляют порядка 0.1 cm^{-1} .

Генерация на электронно-колебательных переходах ${}^4T_2 \rightarrow {}^4A_2$ в кристалле изумруда происходит в диапазоне длин волн 700–850 нм. Энергетический зазор между уровнями 4T_2 и 2E ионов хрома в кристалле изумруда составляет 400 cm^{-1} , что в два раза меньше, чем в кристалле александрита. При комнатной температуре время жизни возбужденного состояния ионов хрома в кристалле берилла составляет $65 \mu\text{s}$, а сечение перехода $\sigma = 3.3 \cdot 10^{-20} \text{ cm}^2$.

Спектры оптического поглощения кристалла изумруда (рис. 1) типичны для матриц, содержащих ионы Cr^{3+} в октаэдрическом окружении ионов кислорода. Широкие полосы в синей и красной областях (Y, U) спектра принадлежат разрешенным переходам ${}^4A_2 \rightarrow {}^4T_1, {}^4T_2$ соответственно. Триpletные уровни в изумруде расще-

пляются тригональной составляющей кристаллического поля, приводя к различиям π - и σ -компонент в поглощении. Узкие линии поглощения при 681 и 684 нм связаны с запрещенными по спину переходами ${}^4A_2 \rightarrow {}^2E$ (R_1 - и R_2 -линии). Тонкая структура U полосы обусловлена электронфононным взаимодействием. Кристалл изумруда характеризуется более сложной структурой и, как следует из положения U -полосы, более слабым кристаллическим полем $D_q = 1600 \text{ cm}^{-1}$ (для александрита $D_q = 1740 \text{ cm}^{-1}$).

В кристаллах изумруда сильное УФ поглощение начинается при более коротких длинах волн, чем для александрита, в диапазоне 300 нм для флюсовых кристаллов и 360 нм для гидротермальных; в последнем случае присутствуют дополнительные полосы в области 380–450 нм. Коротковолновое поглощение изумруда обусловлено в основном посторонними примесями, пре-

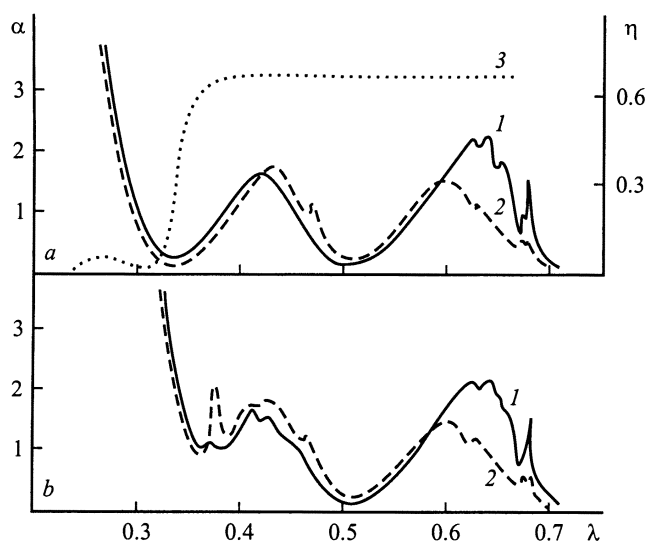


Рис. 1. Зависимости коэффициентов поглощения α (cm^{-1}) (1, 2) и квантового выхода люминесценции η (3) от длины волны λ (μm) для флюсового (а) и гидротермального (б) изумрудов при $T = 300 \text{ K}$; 1 — $E \parallel C$, 2 — $E \perp C$.

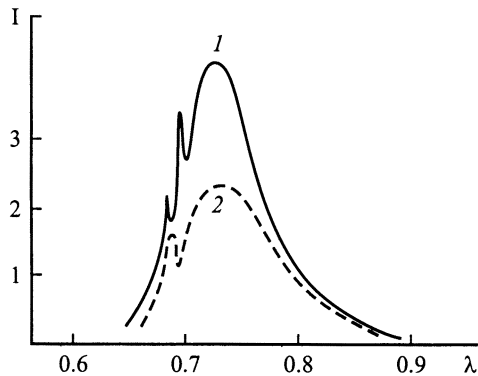


Рис. 2. Зависимости интенсивностей люминесценции I (a.u.) кристалла изумруда от длины волны λ (μm) при $T = 300\text{ K}$; $1 - E \parallel C$, $2 - E \perp C$.

где всего железа, концентрация которого составляет 0.001 mass% во флюсовых образцах и 0.1 mass% в гидротермальных.

В спектрах люминесценции ионов хрома в кристалле изумруда (рис. 2) доминирует широкая полоса с максимумом на длине волны 770 nm, соответствующая переходу ${}^4T_2 \rightarrow {}^4A_2$. Линии R_1 и R_2 в изумруде выражены слабее, что связано с меньшим энергетическим зазором ΔE между уровнями 2E и 4T_2 . В изумруде уже при комнатной температуре эти уровни находятся практически вблизи теплового равновесия ($kT = 208\text{ cm}^{-1}$) и метастабильный уровень 2E эффективно опустошается через короткоживущий уровень 4T_2 . В александрите из-за более высокого значения $\Delta E = 800\text{ cm}^{-1}$ это имеет место при более высоких температурах.

Абсолютный квантовый выход люминесценции ионов хрома в кристалле изумруда составляет 0.7 для флюсового и порядка 0.01 для гидротермального. Постоянство квантового выхода в области поглощения ионов хрома и его уменьшение в области короче 380 nm показывает, что наблюдаемое в кристаллах коротковолновое поглощение связано с ионами хрома.

Трудности получения кристаллов изумруда со стандартными для лазеров размерами, связанные с очень медленной скоростью роста кристаллов, которая на порядок меньше скорости роста кристаллов александрита, и токсичность компонента бериллия препятствует широкому применению лазеров на кристаллах изумруда.

Экспериментальная установка

В настоящей работе исследовался кристалл изумруда размером $3 \times 35\text{ mm}$ [7] с объемом, дающим вклад в энергию генерации $V_g = 0.21\text{ cm}^{-3}$, выращенный флюсовым методом, с концентрацией ионов хрома 0.7 mass%. Торцы кристалла были скошены на один градус и просветлены. Накачка производилась лампой ИСП-250 в кварцевом моноблочном осветлителе. Отсечка ультра-

фиолетового излучения накачки осуществлялась жидкостным фильтром. Сравнение энергетических характеристик излучения лазера на изумруде проводилось с параметрами лазера на александрите, исследованными в работах [8–10], в аналогичных экспериментальных условиях.

Кинетика генерации лазеров исследовалась с помощью фотодиода и осциллографа, спектр генерации регистрировался при использовании спектрографа СТЭ-1, а энергия излучения измерялась прибором ИМО-2.

Энергетические и спектральные характеристики излучения

На рис. 3 приведены полученные зависимости плотности энергии генерации E_g/V_g ($\text{J} \cdot \text{cm}^{-3}$) лазеров на изумруде (кривая 1) и александрите (кривая 2) от температуры кристаллов (а) и длины резонаторов (б). В отличие от лазера на александрите в лазере на изумруде не наблюдалось такой резкой зависимости энергии генерации от температуры активной среды (рис. 3, а). Это обусловлено тем, что энергетический зазор между метастабильным уровнем 2E и верхним рабочим уровнем 4T_2 ионов хрома в лазере на изумруде значительно меньше и его эффективное заселение происходит уже

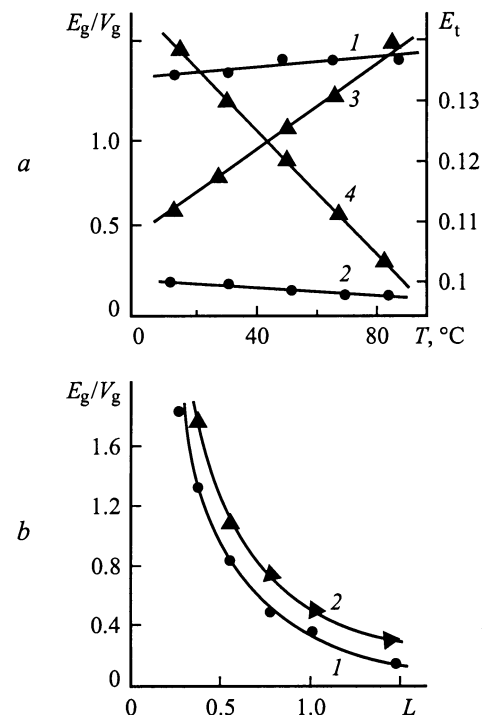


Рис. 3. а — зависимости плотности энергии генерации E_g/V_g ($\text{J} \cdot \text{cm}^{-3}$) (1, 3) и пороговой энергии накачки E_t (kJ) (2, 4) лазеров на изумруде (1, 2) и александрите (3, 4) от температуры кристалла T °C, $E_p = 0.4\text{ kJ}$, $L = 0.4\text{ m}$; б — зависимости плотности энергии генерации E_g/V_g ($\text{J} \cdot \text{cm}^{-3}$) лазеров на изумруде (1) и александрите (2) от длины резонатора L (m), $E_p = 0.4\text{ kJ}$, $T = 70^\circ\text{C}$.

при комнатной температуре. Теплопроводность кристалла изумруда значительно меньше теплопроводности кристалла alexandrita, это приводит к более резкой зависимости энергии генерации лазера от длины резонатора (рис. 3, *b*). При ламповой накачке в активных средах твердотельных лазеров возникает положительная сферическая тепловая линза, фокус которой значительно меньше в кристалле изумруда. Возникающая тепловая линза преобразует плоский резонатор лазера в сферический с эквивалентными параметрами. С увеличением длины эквивалентный сферический резонатор лазера на изумруде, имеющий более короткофокусную тепловую линзу, быстрее переходит через границу устойчивости, что приводит к более значительному и быстрому падению энергии генерации лазера на изумруде по сравнению с лазером на alexandrite.

Были проведены исследования зависимости энергии генерации от изменения величины коэффициента пропускания T_2 выходного зеркала резонатора при одном уровне энергии накачки, равной 0.4 кДж (рис. 4, *a*). В лазере на изумруде максимальная энергия генерации достигалась при более высоких значениях коэффициента T_2 , чем в лазере на alexandrite. Пороговая энергия накачки в лазере на изумруде была значительно ниже, чем в лазере на alexandrite во всем диапазоне изменения

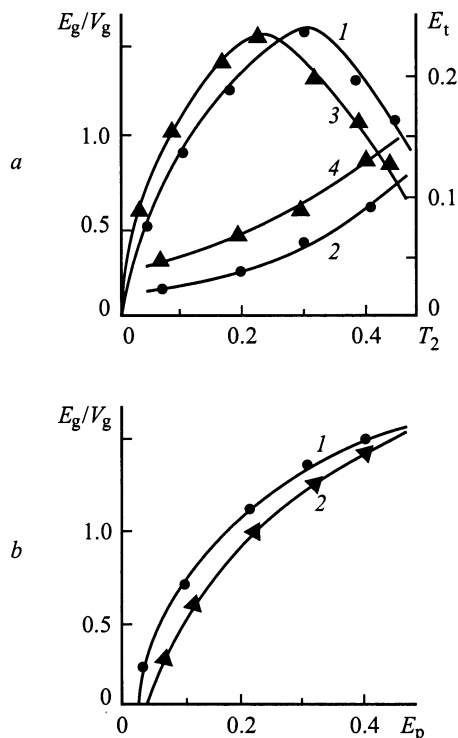


Рис. 4. *a* — зависимости плотности энергии генерации E_g/V_g ($J \cdot cm^{-3}$) (1, 3) и пороговой энергии накачки E_t (2, 4) лазеров на изумруде (1, 2) и alexandrite (3, 4) от коэффициента пропускания выходного зеркала резонатора T_2 , $E_p = 0.4$ кДж, $L = 0.4$ м, $T = 70^\circ C$; *b* — зависимости плотности энергии генерации E_g/V_g ($J \cdot cm^{-3}$) лазеров на изумруде (1) и alexandrite (2) от энергии накачки E_p (кДж), $L = 0.4$ м, $T = 70^\circ C$.

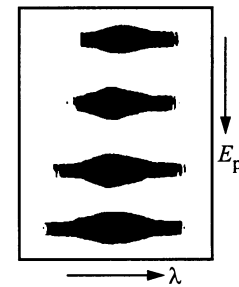


Рис. 5. Спектрограммы излучения TEM_{mnq} -мод лазера на изумруде при $T = 20^\circ C$ в зависимости от энергии накачки $E_p = 3, 4, 6, 8 E_t$ (сверху вниз).

коэффициентов T_2 . При оптимальных коэффициентах пропускания выходных зеркал с увеличением энергии накачки рост энергии генерации исследованных лазеров, за исключением малых энергий накачки, происходил нелинейно (рис. 4, *b*). Причем энергия генерации лазера на изумруде нарастала при небольших энергиях накачки более резко, а при более высоких энергиях накачки происходило более быстрое ее насыщение, чем в лазере на alexandrite, так что при энергии накачки, равной 0.5 кДж, удельные энергии генерации обоих лазеров были практически одинаковыми. Это обусловлено более значительными деформациями кристалла в лазере на изумруде.

Спектры генерации TEM_{mnq} лазера на изумруде (рис. 5) практически не отличались от подобных спектров генерации лазера на alexandrite [9]. При наличии даже очень слабой паразитной селекции продольных мод, вносимой скошенными на небольшой угол и просветленными торцами кристалла, спектры генерации лазера на изумруде, как и лазера на alexandrite, имели мелкую дискретную структуру. При комнатной температуре и невысоких уровнях накачки генерация лазера на изумруде происходит в широком спектральном интервале с максимумом на длине волны 770 нм. С увеличением энергии накачки спектр генерации уширяется в основном в коротковолновую область, и при восьмикратном превышении энергии накачки над пороговой ширина спектра генерации лазера на изумруде составляла порядка 20 нм. Ширина спектра генерации практически линейно зависела от энергии накачки.

Перестройка длины волны генерации лазера на изумруде осуществлялась в дисперсионном резонаторе с помощью трех дисперсионных призм из стекла ГФ-5 с общей угловой дисперсией порядка 3 angular min/nm. Была получена перестройка длины волны генерации в диапазоне 710–830 нм со стабилизацией длины волны излучения в пределах ~ 1 нм.

Экспериментально было установлено, что генерация TEM_{00q} - и TEM_{mnq} -мод в лазере на изумруде, как и на остальных активных средах с ионами хрома, происходит всегда в режиме незатухающих пульсаций интенсивности излучения. Характер развития спектра генерации во

времени лазера на изумруде так же, как и лазера на александрите, зависел от физического состояния кристаллов изумруда и наличия паразитной дискриминации продольных мод в резонаторе лазера. В условиях не полной отсежки ультрафиолетового излучения накачки характер развития спектра генерации лазера на изумруде во времени существенно изменялся.

Список литературы

- [1] *Shand M.L., Walling J.C.* // IEEE J. Quant. Electron. 1982. Vol. 18. N 11. P. 1829–1830.
- [2] *Buchert J., Alfano R.R.* // Laser Focus. 1983. N 9. P. 117–123.
- [3] *Shand M.L., Lai S.T.* // IEEE J. Quant. Electron. 1984. Vol. 20. N 2. P. 105–108.
- [4] *Buchert J., Katz A., Alfano R.R.* // IEEE J. Quant. Electron. 1963. Vol. 19. N 10. P. 1477–1478.
- [5] *Hasan Z., Keany S.T., Manson N.B.* // J. Physic C. 1986. N 19. P. 6381–6387.
- [6] *Гулев В.С., Елисеев А.П., Солнцев В.П.* и др. // Квантовая электрон. 1987. Т. 14. № 10. С. 1990–1992.
- [7] *Анциферов В.В., Смирнов Г.И.* // Препринт ИЯФ СО РАН. Новосибирск, 1998. № 98-97.
- [8] *Анциферов В.В., Калягин В.А., Хабурзания Г.В., Шарпов А.В.* // Препринт СФТИ. М.: ЦНИИАтоминформ, 1989. № 89-1.
- [9] *Анциферов В.В., Алимтиев А.И., Иванов Е.В., Хабурзания Г.В.* //ЖТФ. 1992. Т. 62. Вып. 3. С. 9–17.
- [10] *Анциферов В.В., Иванов Е.В., Смирнов Г.И.* // Препринт ИЯФ СО РАН. Новосибирск, 1993. № 93-107.