



ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера СО РАН

В.В. Анциферов, Е.В. Иванов, Г.И. Смирнов

ПАРАМЕТРЫ СВОБОДНОЙ ГЕНЕРАЦИИ
ЛАЗЕРОВ НА ИОНАХ ХРОМА
В КРИСТАЛЛАХ АЛЕКСАНДРИТА И РЗГГ

ИЯФ 93-107



НОВОСИБИРСК

Параметры свободной генерации лазеров на ионах хрома
в кристаллах александрита и РЗГГ

В. В. Анциферов, Е. В. Иванов, Г. И. Смирнов

А Н Н О Т А Ц И Я

Впервые исследованы спектрально-временные параметры свободной генерации лазеров на ионах хрома в редкоземельных-галлиевых гранатах и получены новые экспериментальные результаты по динамике спектра генерации лазера на александрите. Показано, что в обычных условиях свободная генерация в исследованных средах с плоскими зеркалами происходит всегда в пиковом режиме даже при устранении влияния технических возмущений резонатора. В дисперсионном резонаторе получено сужение спектра и стабилизация длины волны волны генерации в пределах 0,8 нм и ее перестройка в пределах ширины линии усиления активных сред. Проведено сравнение энергетических характеристик излучения лазера на александрите с параметрами генерации лазера на рубине в идентичных экспериментальных условиях.

© Институт ядерной физики СО РАН

Введение

Генерация ионов хрома в редкоземельно-галлиевых гранатах (РЗГГ) была получена впервые на кристалле гадолиний-скандий-галлиевого граната (ГСГГ) при лазерной [1] и ламповой [2] накачках. Кристаллы РЗГГ [3-6] имеют удовлетворительные механические свойства и теплопроводность и не содержат токсичных компонент, как кристалл хризоберилла (BeAl_2O_4). Ионы хрома в кристаллах РЗГГ находятся в более слабом кристаллическом поле, чем в хризоберилле, поэтому они имеют меньшую величину энергетического зазора ΔE между метастабильным уровнем 2E и верхним рабочим уровнем 4T_2 , что приводит к более высокой населенности верхнего рабочего уровня, увеличению энергии генерации и снижению ее порога по сравнению с кристаллом хризоберилла. Так в кристалле Cr:ГСГГ величина ΔE близка к нулю, в Cr:ИСГГ $\Delta E = 280 \text{ см}^{-1}$ при комнатной температуре, у кристалла александрита ($\text{BeAl}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$) величина ΔE составляет 800 см^{-1} .

Генерация ионов хрома в кристаллах хризоберилла и РЗГГ происходит на электронно-колебательных переходах $^4T_2 \rightarrow ^4A_2$, что позволяет производить плавную перестройку длины волны генерации на этих средах в диапазоне спектра 700 - 900 нм. В настоящей работе исследованы спектрально-временные и энергетические параметры генерации лазеров Cr:РЗГГ и дополнительно исследованы спектральные и энергетические характеристики лазера на александрите на более совершенной серии кристаллов.

1. Лазеры на ионах хрома в редкоземельно-галлиевых гранатах (РЗГГ)

Динамика свободной генерации ионов хрома в кристаллах гадолиний-скандий-галлиевого граната (ГСГГ), иттрий-скандий-галлиевого граната (ИСГГ) и гадолиний-скандий-алюминиевого граната (ГСАГ) с размерами $\varnothing 4 \times 50$ мм исследовалась в резонаторе с плоскими зеркалами при исключении паразитной селекции продольных мод. Накачка кристаллов производилась в кварцевом посеребренном квантроне лампой ИСП-250 при длительности импульса накачки 250 мкс, при этом объемы активных сред, участвовавших в генерации, составляли $V_{\Gamma} = 0,5 \text{ см}^3$. Коротковолновое излучение накачки отсекалось жидкостным фильтром.

Регистрация спектра генерации производилась спектрографом СТЭ-1, а его временных разверток - высокоскоростной фотографической установкой ВФУ-1 со спектральной приставкой. Энергия генерации измерялась ИМО-2. Кинетика генерации исследовалась с помощью лавинного фотодиода ЛФД-2 и осциллографа С8-13.

1.1. Энергетические и спектральные характеристики

В исследованных кристаллах РЗГГ при небольших уровнях накачки, в отличие от кристалла александрита [19], не наблюдалось существенных изменений пороговой энергии накачки и энергии генерации с увеличением длины резонатора от 0,3 до 1,5 м. Этот факт свидетельствует о том, что в исследуемом диапазоне накачек в кристаллах РЗГГ не образуется такой короткофокусной линзы, как в кристалле александрита. Увеличение температуры кристалла ИСГГ до 90°C не приводило к каким-либо изменениям энергии генерации и ее порога. При энергии накачки 250 Дж была получена удельная энергия генерации E_{Γ}/V_{Γ} в лазерах на РЗГГ: 0,8 (ГСГГ), 0,6 (ИСГГ) и 0,35 Дж/см³ (ГСАГ).

В неселективном резонаторе ширина интегрального спектра генерации лазеров Cr:РЗГГ и положение его максимума имели сильную зависимость от энергии накачки и температуры кристаллов. На рис. 1 приведены спектрограммы излучения лазера Cr:ИСГГ при различных превышениях накачки над пороговой (а) и зависимости ширины спектра и положения его максимума λ_0 от энергии накачки (б). При изменении $E_{\text{н}}/E_{\text{п}}$ от 1,2 до 2,3 ширина интегрального спектра возрастала от 6 до 16 нм, при этом колебательная

структура в интегральном спектре полностью замывалась. С увеличением температуры кристалла ИСГГ максимум интегрального спектра смещался в длинноволновую область со средней скоростью 0,13 нм/град (рис. 2). При этом в диапазоне небольших температур эта скорость смещения спектра была меньше средней. С ростом температуры кристалла увеличивалась ширина интегрального спектра.

1.2. Спектрально-временные параметры генерации

Генерация ионов хрома в кристаллах РЗГГ в резонаторе с плоскими зеркалами в обычных условиях, но при устранении влияния технических возмущений резонатора, происходит всегда в режиме незатухающих пульсаций излучения, как и в исследованных ранее кристаллах рубина и александрита. На рис. 3 приведены типичные параметры генерации TEM_{mpq} мод для лазера Cr:ГСГГ. Из развертки спектра (3, в) видно, что в каждом пичке генерации четко наблюдается колебательная структура спектра. Однако, вследствие значительного красного смещения спектра в процессе генерации, которое обусловлено значительным нагреванием активного стержня из-за его низкой теплопроводности, колебательная структура в интегральном спектре замывается (рис. 1, а и 2, а). При этом смещение максимума спектра генерации за 200 мкс составило ~ 5 нм, это соответствует нагреванию кристалла ГСГГ за импульс накачки на 40°C .

Динамика спектра генерации других исследованных кристаллов РЗГГ (ИСГГ и ГСАГ) была аналогичной динамике спектра кристалла ГСГГ. В призмном дисперсионном резонаторе с угловой дисперсией 3 угл. мин/мм было получено сужение спектра генерации и его стабилизация в пределах 0,8 нм. Диапазоны перестройки длины волны генерации на исследованных средах составили: 710 - 790 нм (ИСГГ), 740 - 830 нм (ГСГГ) и 760 - 810 нм (ГСАГ).

Существенным недостатком кристаллов Cr³⁺:РЗГГ, затрудняющим их широкое практическое применение, является нестабильность их энергетических характеристик излучения при ламповой накачке, связанная с образованием стабильных центров окраски, которые имеют значительное поглощение на длине волны генерации. При этом стабильные центры окраски, в отличие от динамических, распадаются только при высокой температуре кристаллов, что требует регулярного отжига кристаллов в высокотемпературной печи.

2. Лазеры на ионах хрома в хризоберилле

Генерация ионов хрома на электронно-колебательных переходах ${}^4T_2 \rightarrow {}^4A_2$ в хризоберилле (BeAl_2O_4) была получена впервые в работе [7]. Спектроскопические и интегральные параметры свободной генерации лазера на александрите были исследованы в [8-18]. Динамика спектра свободной генерации впервые была исследована в [19]. Ионы хрома в хризоберилле работают по четырехуровневой схеме, имеют низкий порог возбуждения и достаточно большое время жизни на верхнем рабочем уровне (260 нс при $T=300$ К). Сечение перехода возрастает от $7 \cdot 10^{-21}$ см² при температуре 300 К до $20 \cdot 10^{-21}$ см² при $T = 470$ К. Измеренная скорость теплового дрейфа линии усиления в диапазоне температур 30 - 310°С составила 0,138 нм/град [15]. Непрерывная генерация с выходной мощностью 0,6 Вт была получена при накачке Кг-лазером мощностью 1,7 Вт и эффективностью ~30% [20]. Генерация с постоянной составляющей излучения наблюдалась с резонатором близким к концентрическому, т.е. при возбуждении большого числа вырожденных мод. Импульсы с энергией генерации 100 Дж были получены с длительностью импульса накачки 6 мс и эффективностью 0,7% [21]. В лазере с частотой повторения импульсов 250 Гц, длительностью импульса 2 нс и энергией 0,4 Дж была получена средняя мощность генерации ~100 Вт [22].

В настоящей работе были исследованы энергетические и спектрально-временные характеристики излучения кристаллов александрита высокой оптической однородности и различных размеров: $\varnothing 6 \times 50$ мм (A_1) с объемом $V_r=1,13$ см³, $\varnothing 5 \times 70$ мм (A_2) с объемом $V_r=0,78$ см³, со скошенными, непараллельными и непросветленными торцами; и $\varnothing 5,5 \times 80$ мм (A_3) с объемом $V_r=1,42$ см³ и торцами под углом Брюстера. Проведено сравнение энергетических характеристик излучения с параметрами генерации лазера на рубине в идентичных экспериментальных условиях.

2.1. Энергетические характеристики излучения

Максимальные энергетические характеристики излучения лазеров на александрите достигались при оптимизации параметров резонатора. С увеличением накачки наибольшее значение энергии генерации реализовалось при различных величинах коэффициентов T_2 (рис. 4). При энергии накачки ~ 0,5 кДж и $T_2^{\text{опт}}=25\%$ удельная энергия генерации с кристаллом A_3 составляла ~ 1,55 Дж/см³ при

температуре александрита 85°С (рис. 5 и 6). При постоянной энергии накачки энергия генерации возрастала в три раза с увеличением температуры александрита от 10 до 90°С (рис. 6). Аналогичный рост энергии генерации наблюдался при постоянной температуре александрита когда величина коэффициента T_2 увеличивалась с 5 до 25% (рис. 4). При небольших энергиях накачки энергия генерации линейно зависела от накачки (рис. 5). С ростом энергии накачки (>0,4 кДж) наблюдалось отклонение от линейности, связанное возрастанием доли энергии лампы накачки, излучаемой в УФ-области спектра, которая в эксперименте отсекалась жидкостным фильтром. В том случае, когда УФ-излучение накачки преобразовывалось в зеленую область спектра с помощью раствора красителя КН-120, которым одновременно охлаждался кристалл A_2 , зависимость энергии генерации от накачки была линейной и при больших ее энергиях (рис. 7). Падение энергии генерации с кристаллами A_1 и A_2 (рис. 7) обусловлено паразитными потерями на их торцах, которые были скошены, но не просветлены, и тем, что показания снимались не при оптимальных коэффициентах T_2 .

В лазере на рубине энергия генерации линейно зависела от накачки в широком диапазоне ее изменения (рис. 8), поскольку в этом случае не производилась отсека УВ-излучения накачки и потому более эффективно использовалась синяя полоса в спектре поглощения ионов хрома. Когда же часть синей полосы в спектре поглощения отсекалась при использовании квантрона К-301, имеющего осветитель с европием, линейная зависимость энергии генерации от накачки наблюдалась также только в области ее малых значений (рис. 9), при этом в два раза падала энергия генерации. Оптимальные значения коэффициентов T_2 лазера на рубине совпадали с подобными коэффициентами для лазера на александрите. Нагревание рубина от 20 до 60°С, в отличие от александрита, приводило к резкому падению (в 6 раз) энергии генерации лазера на рубине (рис. 11). Энергия генерации лазера на рубине уменьшалась в два раза при увеличении длины резонатора от 40 до 160 см (рис. 12). Следует отметить, что длина резонатора в 1,5 - 1,6 м является оптимальной для лазеров на ионах хрома с плоскими зеркалами при достижении квазистационарной генерации [23]. В том же интервале изменения длины резонатора энергия генерации лазера на александрите падала в 4 раза (рис. 13), это значительно усложняет достижение в нем квазистационарной генерации.

2.2. Спектральные характеристики излучения

В работе было исследовано влияние различных параметров лазера и накачки на спектральные характеристики излучения лазеров на alexandrite. При низких температурах кристаллов и невысоких уровнях накачки генерация лазеров на alexandrite происходит всегда в широком спектральном интервале с максимумом на длине волны 750 нм (рис. 14, а и 17, б). При этом наличие даже очень слабой паразитной селекции продольных мод (кристаллы A_1 и A_2) приводит к генерации линейчатого спектра с очень мелкой дискретной структурой (рис. 14, 15), как и в случае лазера на неодиме в стекле [24]. С увеличением уровня накачки спектр генерации уширяется, в основном, в коротковолновую область и наблюдается второй максимум концентрации энергии излучения на длине волны 745 нм. При дальнейшем росте энергии накачки появляется третий максимум на длине волны 734 нм. Порог появления генерации на длине волны 734 нм не зависел от температуры alexandrite и составлял $E_H/E_P = 6$ при температуре 15°C и $E_H/E_P = 7,5$ при температуре 45°C . Начиная с энергии накачки $E_H = 8 E_P$ спектр генерации лазеров на alexandrite охватывает весь спектральный диапазон шириной ~ 40 нм (рис. 14, б). С ростом температуры alexandrite постепенно исчезают коротковолновые компоненты спектра излучения и при $T \sim 70^\circ\text{C}$ генерация наблюдается только вблизи длины волны 750 нм (рис. 15). В случае слабой дискриминации мод максимум концентрации энергии излучения на этой длине волны не зависел от накачки (рис. 15, б). При различных температурах alexandrite спектр генерации с максимумом на длине волны 750 нм линейно зависел от энергии накачки (рис. 16).

При полном устранении паразитной селекции продольных мод, когда торцы кристалла A_3 были срезаны под углом Брюстера, мелкая дискретная структура спектра излучения исчезала и на фоне сплошного спектра наблюдалась колебательная структура спектра генерации alexandrite (рис. 17). Расстояние между соседними компонентами колебательной структуры составляло $\sim 1,5$ нм и не зависело от температуры alexandrite в исследуемом диапазоне. При высокой температуре alexandrite и отсутствии дискриминации мод максимум концентрации энергии генерации смещался в коротковолновую область спектра с ростом энергии накачки (рис. 17, а). В условиях низких температур характер поведения интегрального спектра генерации (рис. 17, б) был аналогичным

спектру генерации при наличии слабой дискриминации продольных мод (рис. 14, а).

С увеличением температуры alexandrite в интервале $10 - 50^\circ\text{C}$ смещение максимума спектра генерации на длине волны 750 нм и, соответственно, центра линии усиления очень слабо зависело от температуры (рис. 18). Средняя скорость теплового дрейфа линии усиления в этом интервале температур составила $0,01$ нм/град. При увеличении температуры alexandrite выше 50°C наблюдался нелинейный рост скорости теплового дрейфа линии усиления и в интервале $50 - 90^\circ\text{C}$ ее средняя скорость возрастала до $0,13$ нм/град.

2.3. Спектрально-временные параметры генерации

Генерация TEM_{00q} так и TEM_{mnp} мод в лазере на alexandrite с плоскими зеркалами в обычных условиях всегда происходит в режиме незатухающих пульсаций излучения даже при устранении влияния технических возмущений резонатора. Характер развития спектра генерации во времени (рис. 19, 20) существенно зависел от физического состояния кристаллов, их температуры и наличия дискриминации мод в резонаторе. При длительной работе alexandrite в условиях не полной отсечки УФ-излучения накачки монотонно возрастал порог генерации на длине волны 734 нм и постепенно генерация на этой частоте полностью исчезала даже при низких температурах alexandrite и высоких уровнях накачки (рис. 19, а). Генерация на длине волны 734 нм также не возникала и на свежем кристалле alexandrite при его высокой температуре (рис. 19, д).

При любых энергиях накачки и температурах alexandrite генерация всегда вначале возникает на длине волны 750 нм. В условиях низких температур кристаллов затем с задержкой во времени, которая зависела от накачки и температуры alexandrite, постепенно появляется генерация на длине волны 745 нм и потом на 734 нм. Порог генерации на длине волны 734 нм был в пять раз выше порога генерации на длине волны 750 нм. В зависимости от начального состояния alexandrite наблюдалась концентрация большей части энергии излучения как на длине волны 750 нм (рис. 19, б, г), так и на длине волны 734 нм (рис. 19, в).

При возбуждении только мод низкого поперечного индекса ($m, n < 10$) характер развития во времени спектра генерации был качественно другим (рис. 19, а). При полном устранении слабой

паразитной селекции продольных мод мелкая дискретная структура спектра исчезала и четко проявлялась колебательная структура спектра (рис. 20, в-д), и значительно возрастала длительность пиков свободной генерации (рис. 20, д).

Использование призмного дисперсионного резонатора с угловой дисперсией ~ 3 угл. мин/нм позволило сузить и стабилизировать спектр генерации в диапазоне 0,8 нм (рис. 19, е и 20, е). Была получена плавная перестройка длины волны излучения в спектральном интервале 706 - 800 нм, при этом энергия генерации в импульсе составляла 1,5 Дж.

Обсуждение

Исследования динамики свободной генерации лазеров на ионах хрома в корунде [23], хризоберилле и в редкоземельно-галлиевых гранатах на одной экспериментальной установке при устранении влияния технических возмущений резонатора позволяют сделать однозначный вывод о чисто физическом механизме возникновения режима незатухающих пульсаций излучения в этих лазерах. Ни один из предложенных ранее физических механизмов не дает адекватного объяснения причин возникновения такого режима. Сравнение характеристик излучения свободной генерации TEM_{00q} мод лазеров на ионах хрома и неодима в кристалле ГСГГ [25], то есть имеющих одну и ту же матрицу активной среды и, следовательно, одинаковые нелинейности, исключает физический механизм, связанный с пространственным взаимодействием мод в активной среде и, в частности, с влиянием параметрического рассеяния на кубической нелинейности активной среды [26]. Генерация ионов неодима, в отличие от ионов хрома, во всех исследованных средах происходит всегда в квазистационарном режиме в полном соответствии с балансной теорией. В [27] было рассмотрено влияние неоднородности электрического поля оптической накачки на характер свободной генерации и показано, что такая неоднородность может приводить к модуляции коэффициента усиления и, как следствие, к пиковой генерации. Эта гипотеза также не соответствует экспериментальным результатам, поскольку при использовании одного и того же осветителя характер генерации лазеров на ионах хрома качественно отличен от характера генерации лазеров на ионах неодима.

Такое качественное различие в динамике свободной генерации

2.2. Спектральные характеристики излучения

В работе было исследовано влияние различных параметров лазера и накачки на спектральные характеристики излучения лазеров на александрите. При низких температурах кристаллов и лазеров на ионах хрома и неодима связано, очевидно, со значительным различием в структуре рабочих уровней этих ионов. Если излучение ионов хрома определяется электронами 3d-оболочки, которая является внешней, то излучение ионов неодима обусловлено электронами 4f-оболочки, которая глубоко экранирована двумя электронными оболочками 5s и 5p. Поэтому возникающее электромагнитное поле лазерного излучения в активной среде будет воздействовать, в основном, только на ионы хрома, приводя к дополнительному расщеплению его рабочих уровней вследствие динамического эффекта Штарка. В условиях пространственно неоднородного поля в активной среде, создаваемого стоячей волной, пространственная структура которой изменяется в процессе генерации, динамический эффект Штарка приводит к модуляции коэффициента усиления активной среды во времени и незатухающим пульсациям интенсивности излучения. При сглаживании пространственной неоднородности поля в активной среде наведенная модуляция коэффициента усиления исчезает и достигается квазистационарная генерация [23].

ЛИТЕРАТУРА

1. Struve B., Huber G., Laptev V.V. et al. Appl. Phys., 1982, v.28, p.235-236.
2. Жариков Е.В., Ильичев Н.Н., Калинин С.П. и др. Квант. электрон., 1983, т.10, N 9, с.1916-1919.
3. Жариков Е.В., Лаврищев С.В., Лаптев В.В. и др. Препринт ФИАН, 1983, N 108, 17 с.
4. Жариков Е.В., Осико В.В., Прохоров А.М. и др. Изв. АН СССР, сер. физ., 1984, т.48, N 7, с.1330-1342.
5. Drube J., Struve B., Huber G. Optics Communs, 1984, v.50, N1, p.45-48.
6. Smirnov V.A., Scherbakov I.A. IEEE J.Quant. Electron., 1988, v.QE-24, N 6, p.949-959.
7. Букин Г.В., Волков С.Ю., Матросов В.Н. и др. Квант. электрон., 1978, т.5, N 5, с.1168-1169.
8. Walling J.C., Jenssen H.P., Morris R.C. et al. Optics Lett., 1979, v.4, p.182-183.
9. Walling J.C., Peterson O.G., Morris R.C. IEEE J.Quant. Electron., 1980, v.QE-16, N 1, p.120-121.

10. Walling J.C., Peterson O.G., Jenssen H.P. et al. IEEE J.Quant.Electron., 1980, v.QE-16, N 12, p.1302-1315.
11. Shand M.L., Walling J.C., Morris R.G. J.Appl. Phys., 1981, v.52, N 1, p.953-955.
12. Севастьянов Б.К., Ремигайло Ю.Л., Орехова В.П. и др. ДАН СССР, 1981, т.256, N 2, с.373-376.
13. Shand M.L., Walling J.C., Jenssen H.P. IEEE J.Quant. Electron., 1982, v.QE-18, N 1, p.167-169.
14. Shand M.L., Walling J.C. IEEE J.Quant. Electron., 1982, v.QE-18, p.1152-1155.
15. Guch S.J., Janes C.E. Opt. Lett., 1982, v.7, N12, p.608-610.
16. Shand M.L., Jenssen H.P. IEEE J.Quant. Electron., 1983, v.QE-19, p.480-484.
17. Shand M.L. J.Appl. Phys., 1983, v.54, p.2602-2604.
18. Севастьянов Б.К., Ремигайло Ю.Л. ДАН СССР, 1986, т.290, с.93-97.
19. Анциферов В.В., Калягин В.А. и др. Препринт СФТИ-89-1, Москва, ЦНИИатоминформ, 1989, 14 с.
20. Lai S.T., Shand M.L. J.Appl. Phys., 1983, v.54, N10, p.5642-5644.
21. Walling J.C. "Top. Meet. Tunable Solid State Lasers, Williasburg, 1987, " Washington D.C., 1987, p.72.
22. Sam R.C., Yeh J.J., Leslie K.R. IEEE J.Quant. Electron., 1988, v.QE-24, N 6, p.1151-1166.
23. Анциферов В.В. Атореферат канд. дисс., 1973, ИФП СО АН СССР.
24. Пахомычева Л.А., Свиреденков Э.А., Сучков А.Ф. и др. Письма в ЖЭТФ, 1970, т.12, N 2, с.60-63.
25. Анциферов В.В., Хабурзания Г.В., Шкадаревич А.П. Оптика и спектр., 1992, т.72, вып.1, с.191-195.
26. Гайнер А.В., Комаров К.П. Оптика и спектр., 1978, т.44, N4, с.766.
27. Forysiak W., Harrison R.G., Moloney J.V. Phys. Rev., 1989, v.39, N 1, p.421-423.

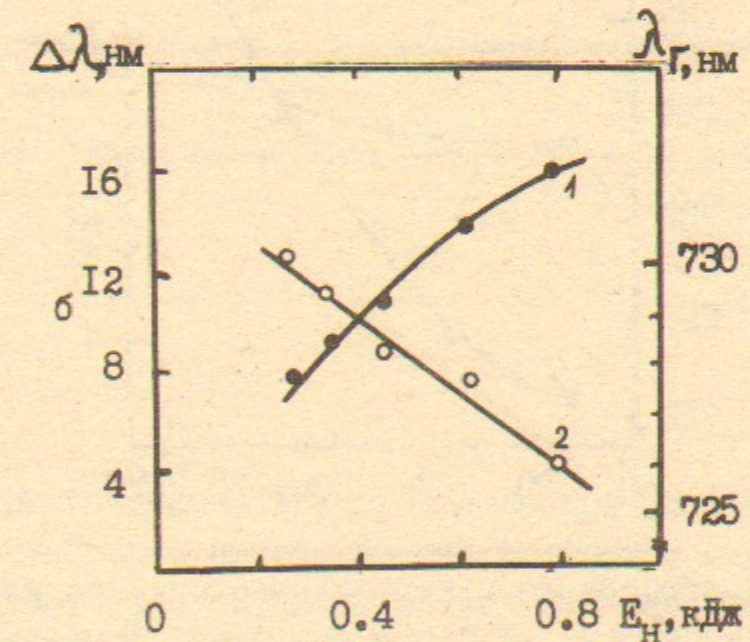
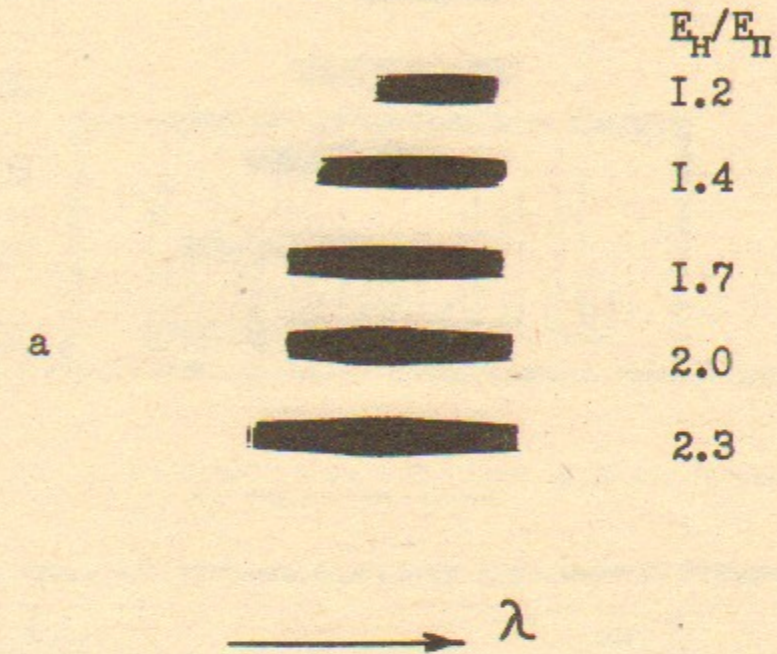


Рис. 1. а- спектрограммы интегрального спектра излучения кристалла $\text{YSGG}:\text{Cr}$ при различных энергиях накачки. $E_{\text{П}} = 160$ Дж.
 б- зависимости ширины интегрального спектра $\Delta\lambda$ и положения его максимума λ_0 от энергии накачки.

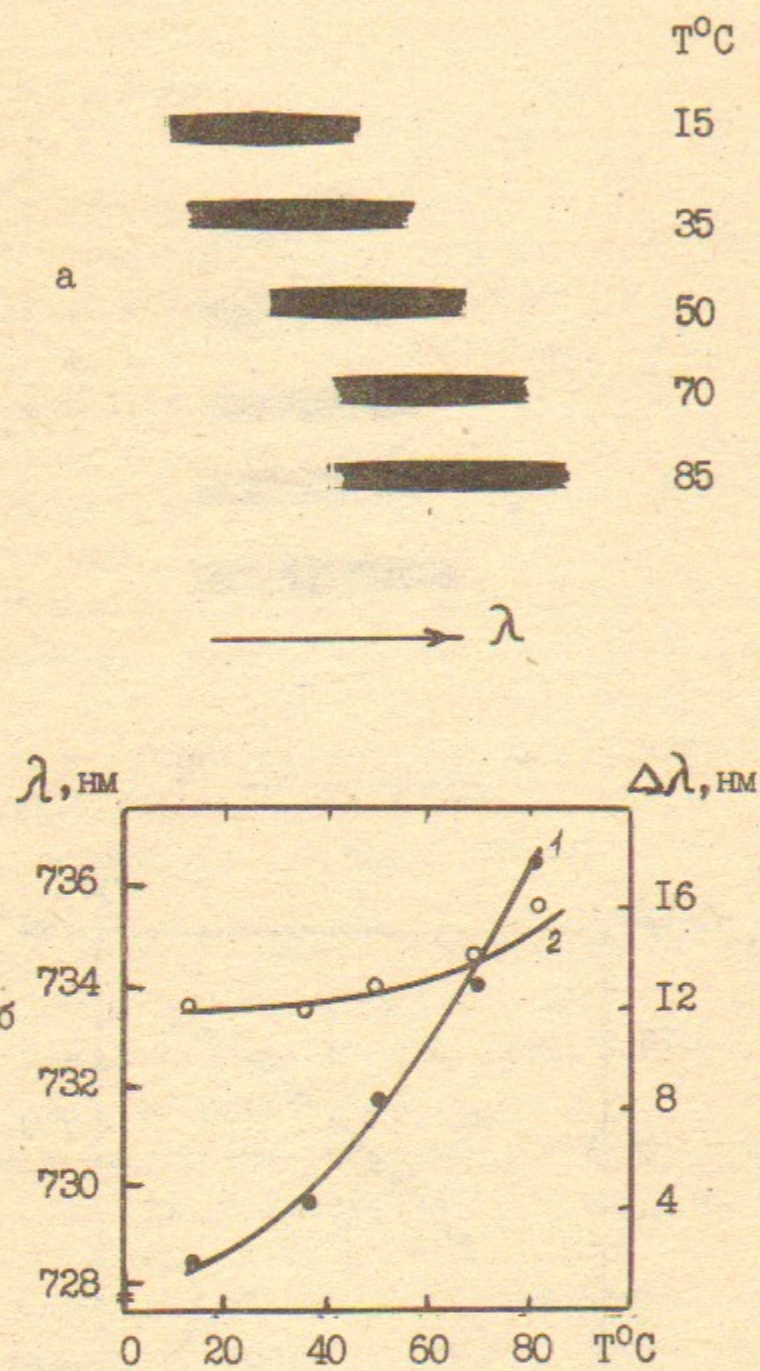


Рис. 2. а-спектрограммы интегрального спектра излучения лазера $\text{YSGG} : \text{Cr}$ при различных температурах кристалла. $E_{\text{H}}/E_{\text{П}} = 2$.
б-зависимости ширины интегрального спектра и положения λ_0 от температуры кристалла.

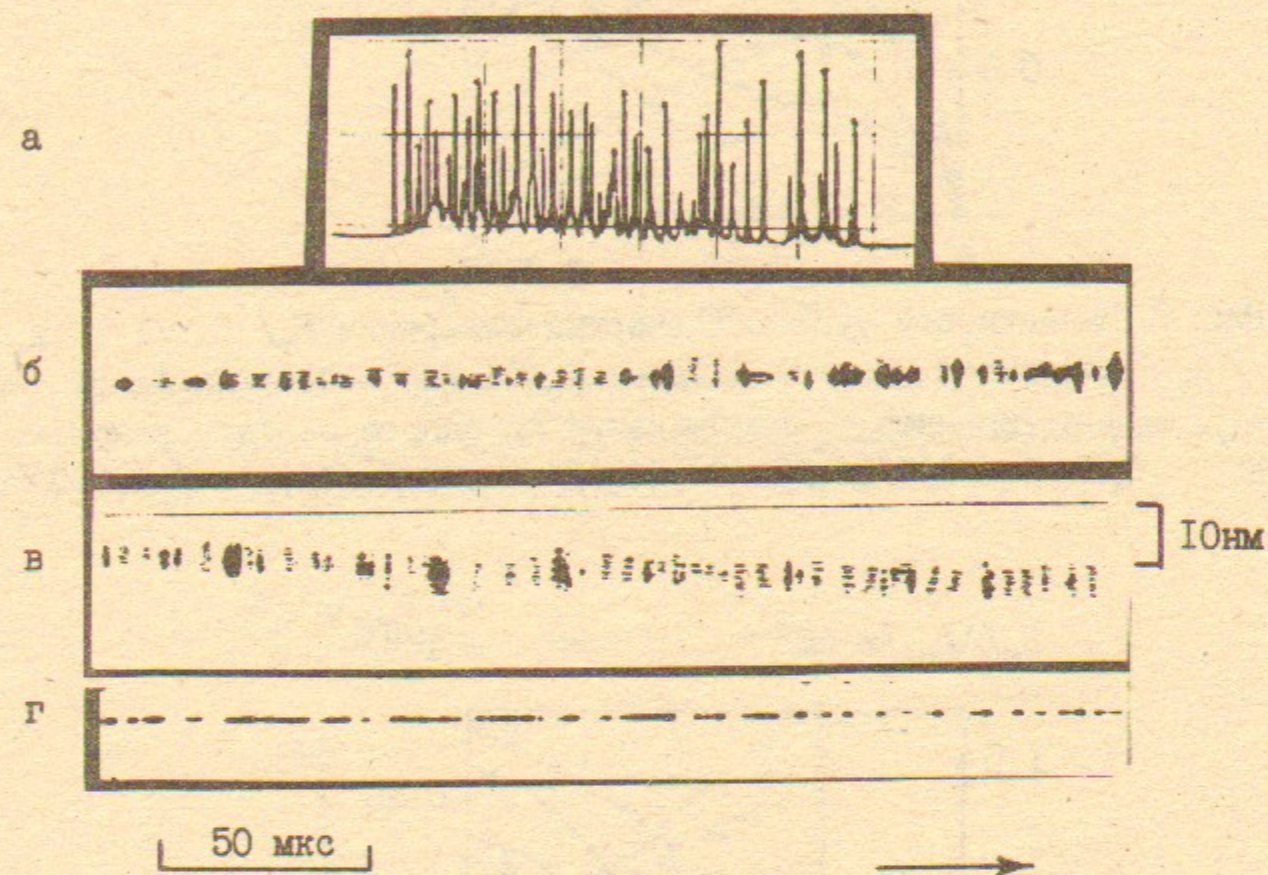


Рис. 3. Параметры генерации TEM_{mnq} мод лазера $\text{Cr} : \text{YSGG}$:
а- осциллограмма интенсивности излучения, масштаб 50 мкс/дел; б-развертка распределения интенсивности излучения в ближней зоне;
в, г-временные развертки спектра генерации безселекции мод /в/ и при их селекции /г/. $L = 130$ см, $E_{\text{H}}/E_{\text{П}} = 2$.

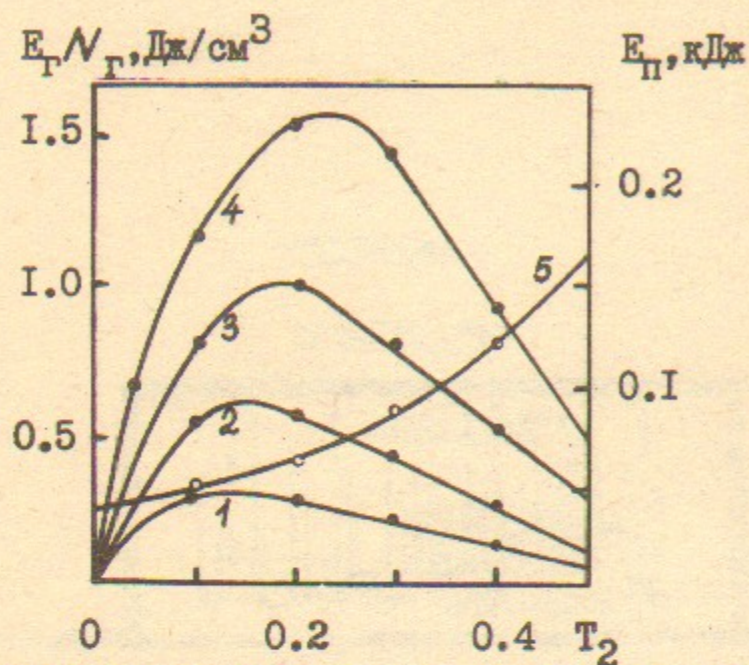


Рис. 4. Зависимости удельных энергий генерации E_T/V_T /1-4/ и пороговой энергии накачки $E_П$ /5/ для кристалла A_3 от коэффициента T_2 пропускания выходного зеркала резонатора. $E_H = 160/1/, 220/2/, 320/3/$ и 480 Дж/4/, $L = 40$ см, $T = 70^\circ\text{C}$.

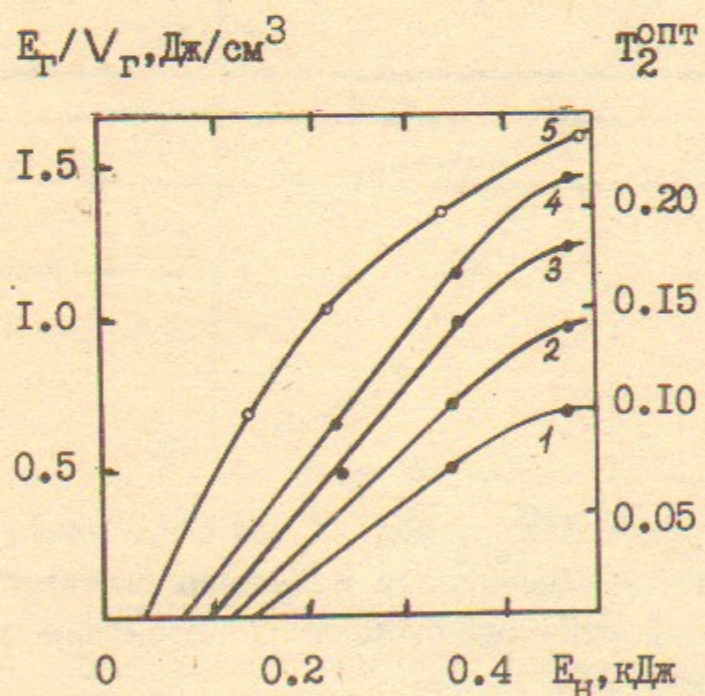


Рис. 5. Зависимости удельных энергий генерации E_T/V_T /1-4/ и $T_2^{\text{опт}}$ /5/ для кристалла A_3 от энергии накачки E_H при различных температурах кристалла $T = 15/1/, 45/2/, 60/3/$ и $85^\circ\text{C}/4/$. $T_2 = 0.25$, $L = 40$ см.

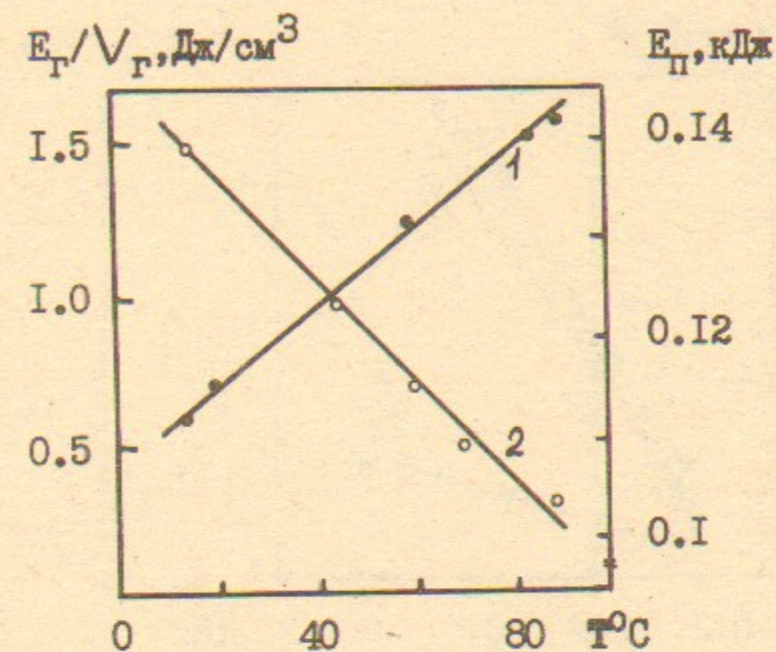


Рис. 6. Зависимости удельной энергии генерации E_T/V_T /1/ при $E_H = 0.48$ кДж и пороговой энергии накачки $E_П$ /2/ для кристалла A_3 от температуры кристалла T , $L = 40$ см, $T_2 = 0.25$.

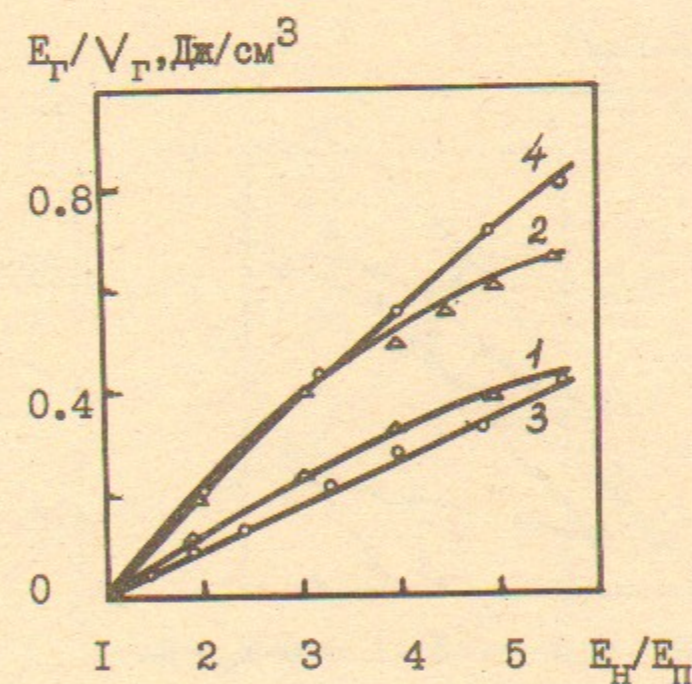


Рис. 7. Зависимости удельных энергий генерации E_T/V_T от энергии накачки для кристаллов A_1 /1, 2/ и A_2 /3, 4/ при различных температурах $T = 10/1, 3/$ и $80^\circ\text{C} /2, 4/$. $L = 40$ см, $T_2 = 0.1$. $E_П = 65$ Дж/ A_2 / и 75 Дж/ A_1 /. A_2 -охлаждался раствором кумарина КН-120.

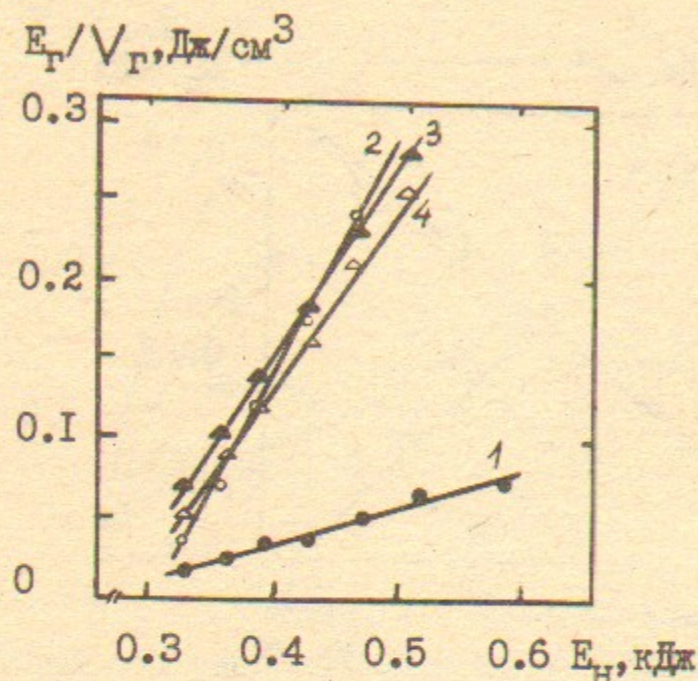


Рис. 8. Зависимости удельных энергий генерации E_g/V_g в лазере на рубине $\phi 5 \times 75$ мм / $V_g = 0.78$ см³ / от энергии накачки E_H при различных $T_2 = 0.05/1/, 0.25/2/, 0.47/3/, 0.20/4/$. $L = 40$ см, лампа ИСП-250, $T = 20^\circ\text{C}$.

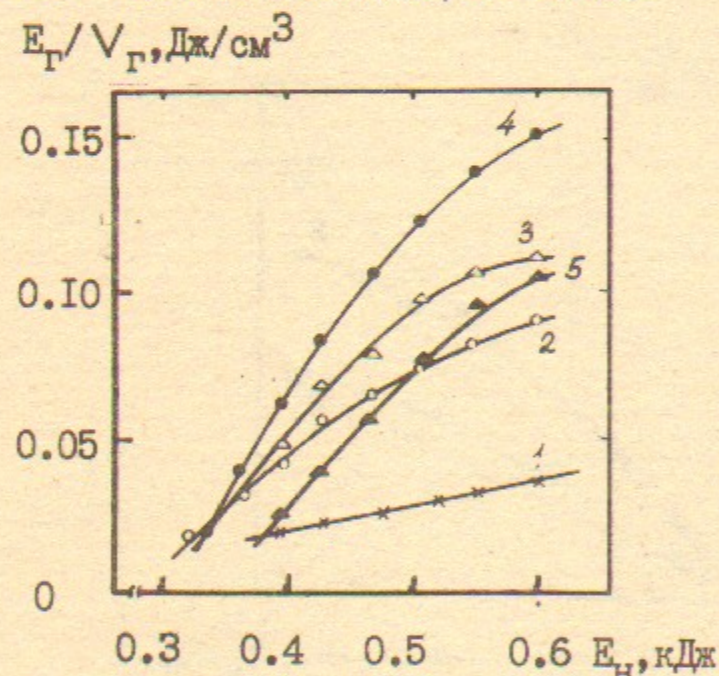


Рис. 9. Зависимости удельных энергий генерации E_g/V_g в лазере на рубине РЛ2Б $5 \times 75/135$ мм / $V_g = 1.47$ см³ / от энергии накачки E_H при различных $T_2 = 0.05/1/, 0.15/2/, 0.30/3/, 0.47/4/, 0.62/5/$ в квантлоне с европием. $L = 40$ см, лампа ИФП-800, $T = 20^\circ\text{C}$.

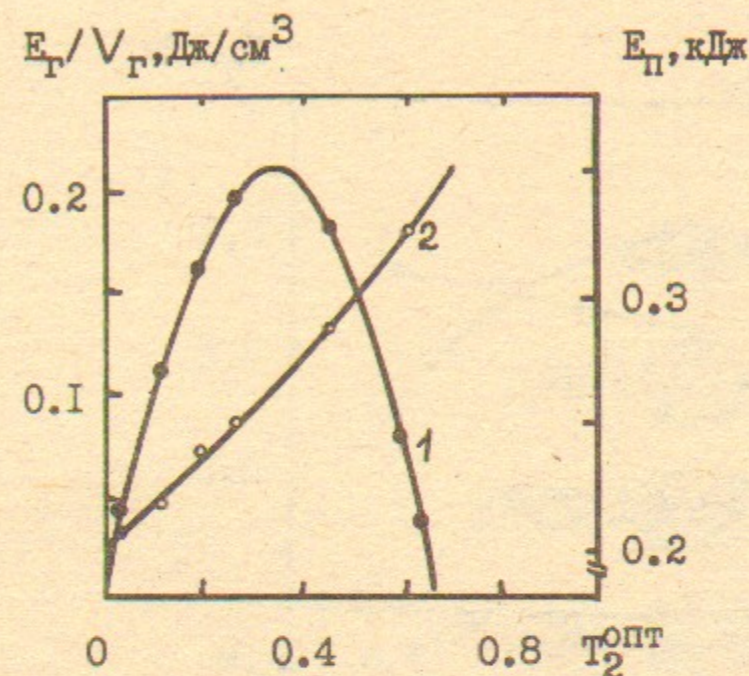


Рис. 10. Зависимости удельной энергии генерации $E_g/V_g/I/$ и пороговой энергии накачки $E_п/2/$ для рубина $\phi 5 \times 75$ мм от коэффициента T_2 . $E_H = 560$ Дж, $L = 40$ см, $T = 20^\circ\text{C}$.

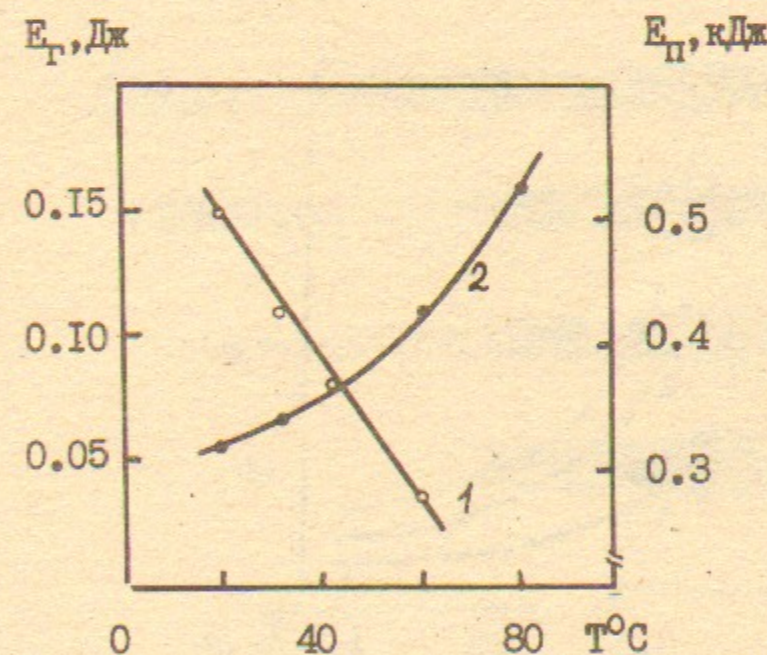


Рис. 11. Зависимости энергии генерации $E_g/I/$ и пороговой энергии накачки $E_п/2/$ от температуры кристалла рубина $\phi 5 \times 75$ мм. $L = 40$ см, $T_2 = 0.25$, $E_H = 560$ Дж.

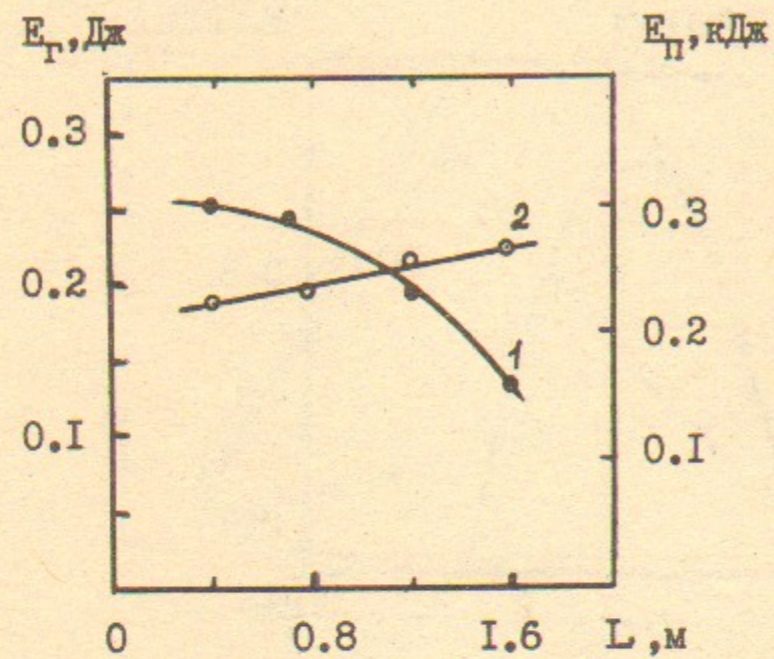


Рис. 12. Зависимости энергии генерации E_T/I и пороговой энергии накачки $E_П/2$ от длины резонатора L для лазера на рубине $\phi 5 \times 75$ мм. $E_H = 560$ Дж, $T_2 = 0.47$, $T = 20^\circ\text{C}$.

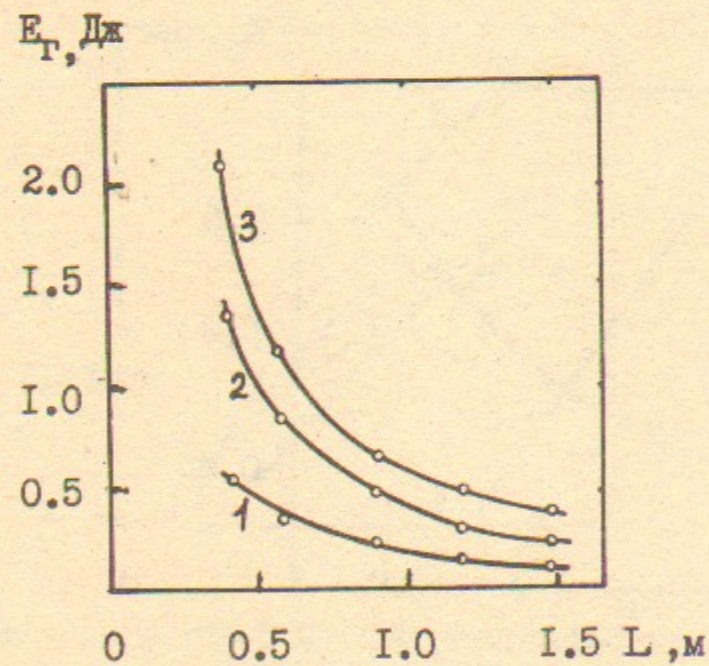


Рис. 13. Зависимости энергии генерации E_T от длины резонатора L для лазера на александрите A_3 при различных энергиях накачки $E_H = 190/1$, $310/2$ и 480 Дж/3/. $T_2 = 0.25$, $T = 70^\circ\text{C}$.

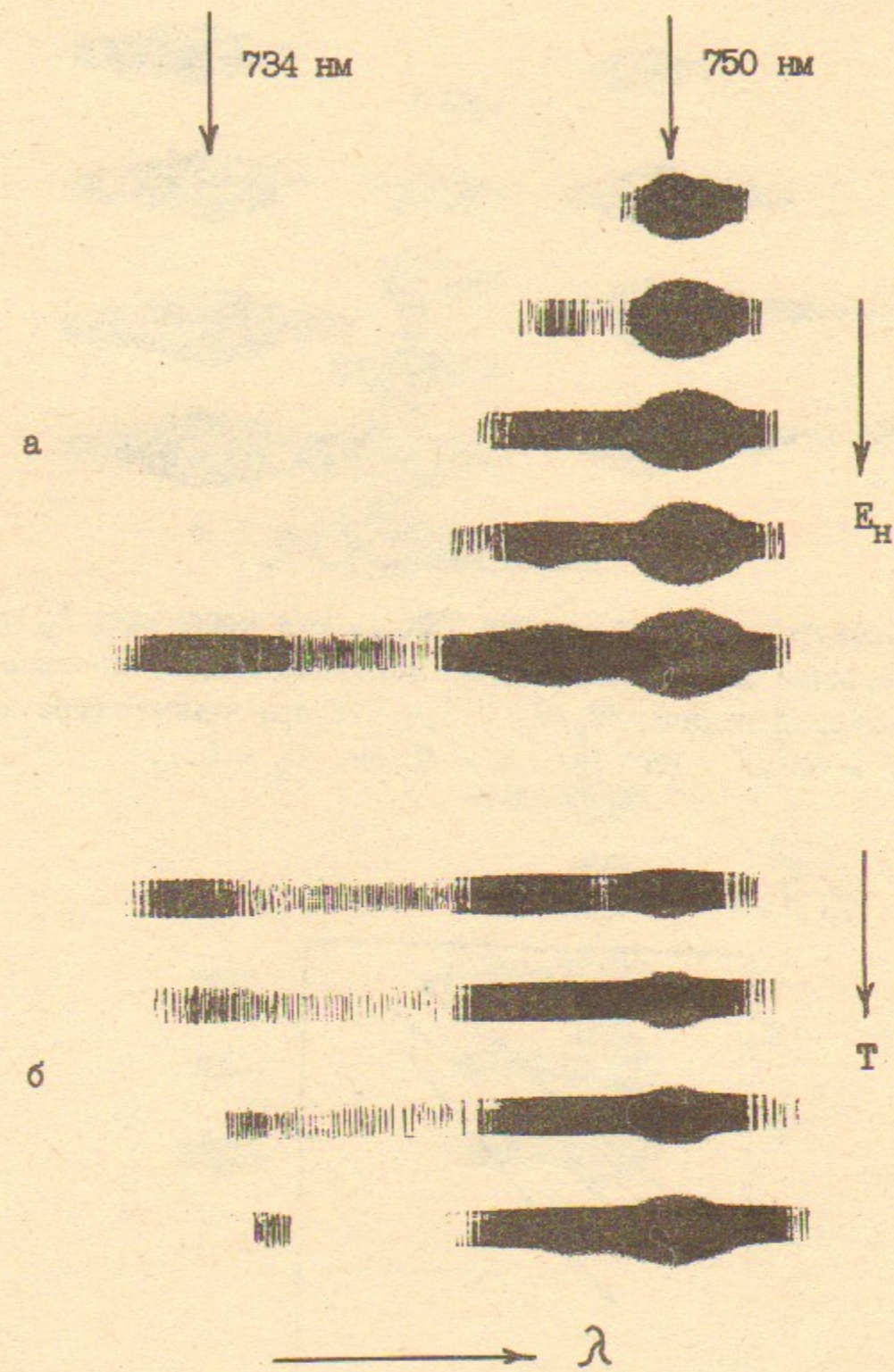


Рис. 14. Спектрограммы излучения TEM_{mnp} мод кристалла A_2 при наличии слабой паразитной дискриминации продольных мод, $L = 40$ см, $T_2 = 0.1$: а- температура кристалла $T = 10^\circ\text{C}$, $E_H/E_П = 2, 4, 5, 6, 7$; б- энергия накачки $E_H = 8E_П$, температура кристалла $T = 15, 25, 35$ и 45°C .

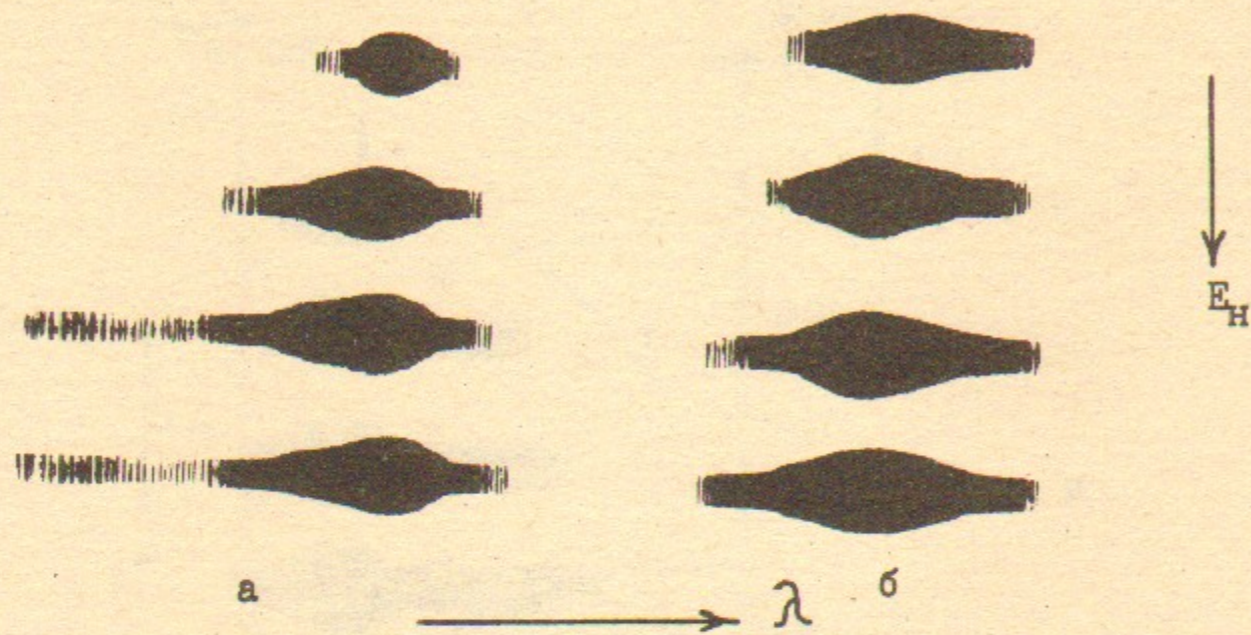


Рис. 15. Спектрограмма излучения TEM_{mnq} мод кристалла A_2 при наличии слабой паразитной селекции мод, в зависимости от энергии накачки $E_H/E_{П} = 3, 4, 6, 8$ при температуре кристалла $T = 60/а/$ и $85^{\circ}C/б/$. $L = 40$ см, $T_2 = 0.I.$

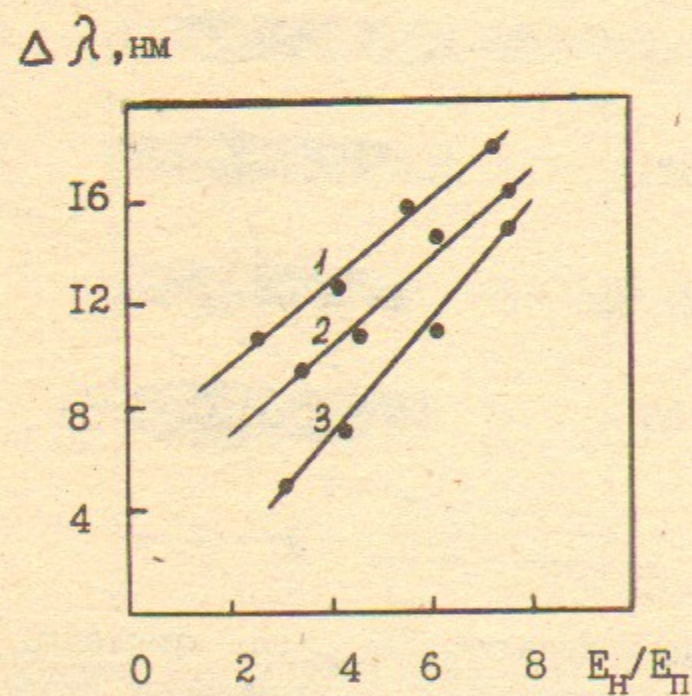


Рис. 16. Зависимости ширины интегральных спектров генерации на $\lambda = 750$ нм кристаллов A_2 /1,2/ и A_3 /3/ от превышения накачки над пороговой. $T = 85/1/, 45/2/$ и $70^{\circ}C/3/$.

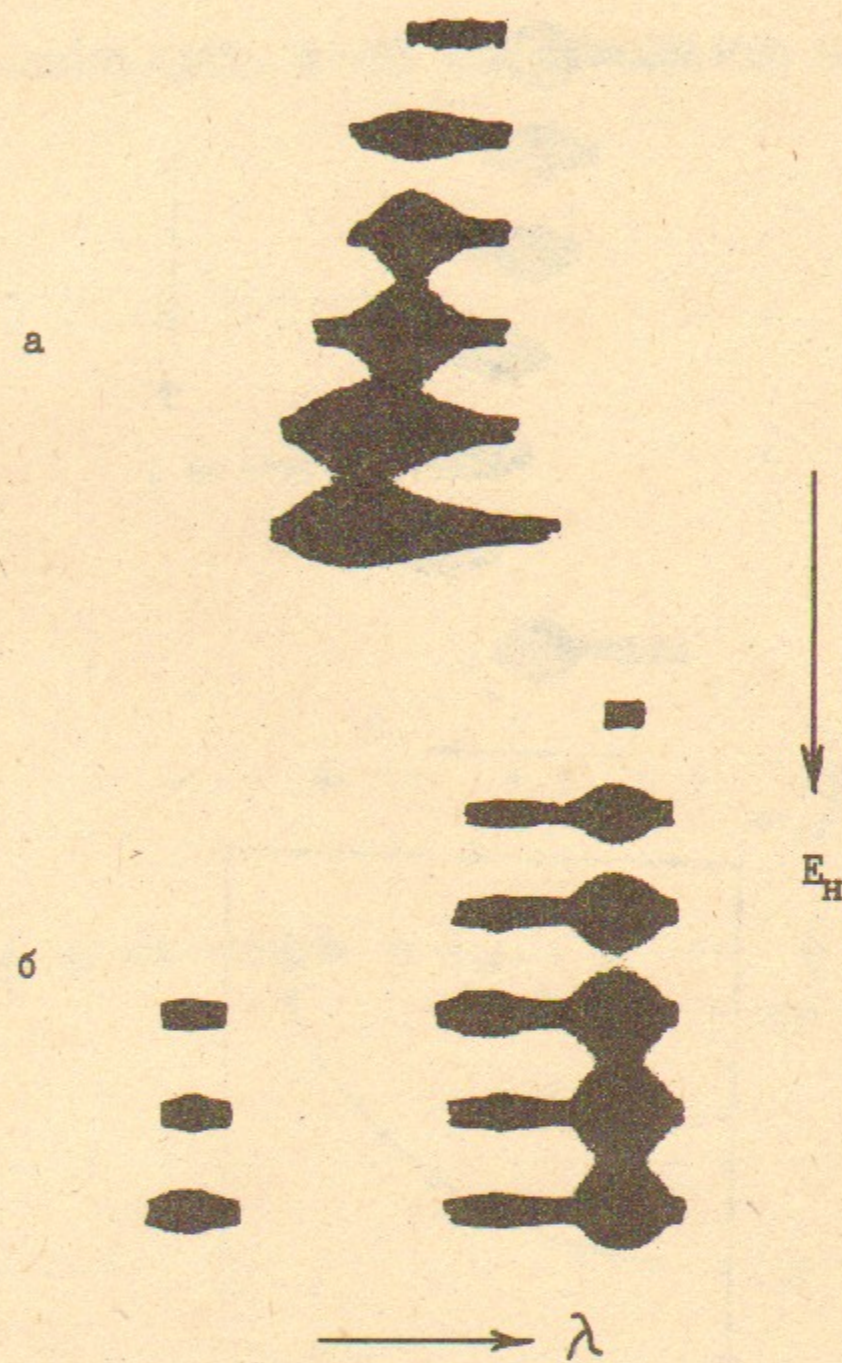


Рис. 17. Спектрограммы излучения TEM_{mnq} мод кристалла A_3 при полном исключении паразитной селекции мод, $L = 150$ см, $T_2 = 0.25$: а-температура кристалла $T = 70^{\circ}C, E_H/E_{П} = 3, 4, 5, 6, 7, 8$; б-температура кристалла $T = 10^{\circ}C, E_H/E_{П} = 2, 4, 5, 6, 7, 8$.

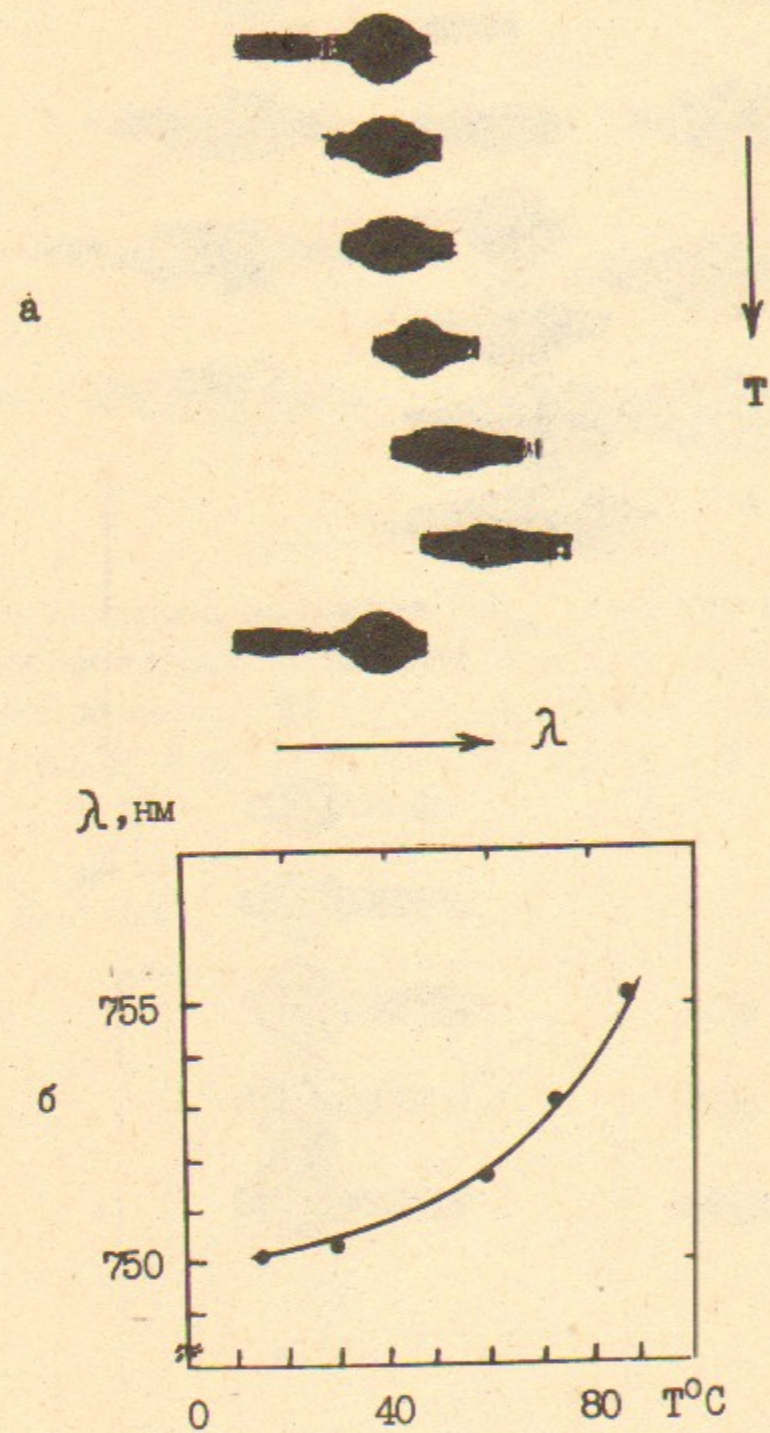


Рис. 18. а-спектрограммы излучения TEM_{mnp} мод кристалла A₃ при исключении паразитной селекции мод при различных температурах кристалла T = 15, 30, 45, 75, 85, 15°C, E_H/E_П = 3, L = 160 см, T₂ = 0.2; б-зависимость положения максимума спектра генерации на λ = 750 нм от температуры кристалла A₃.

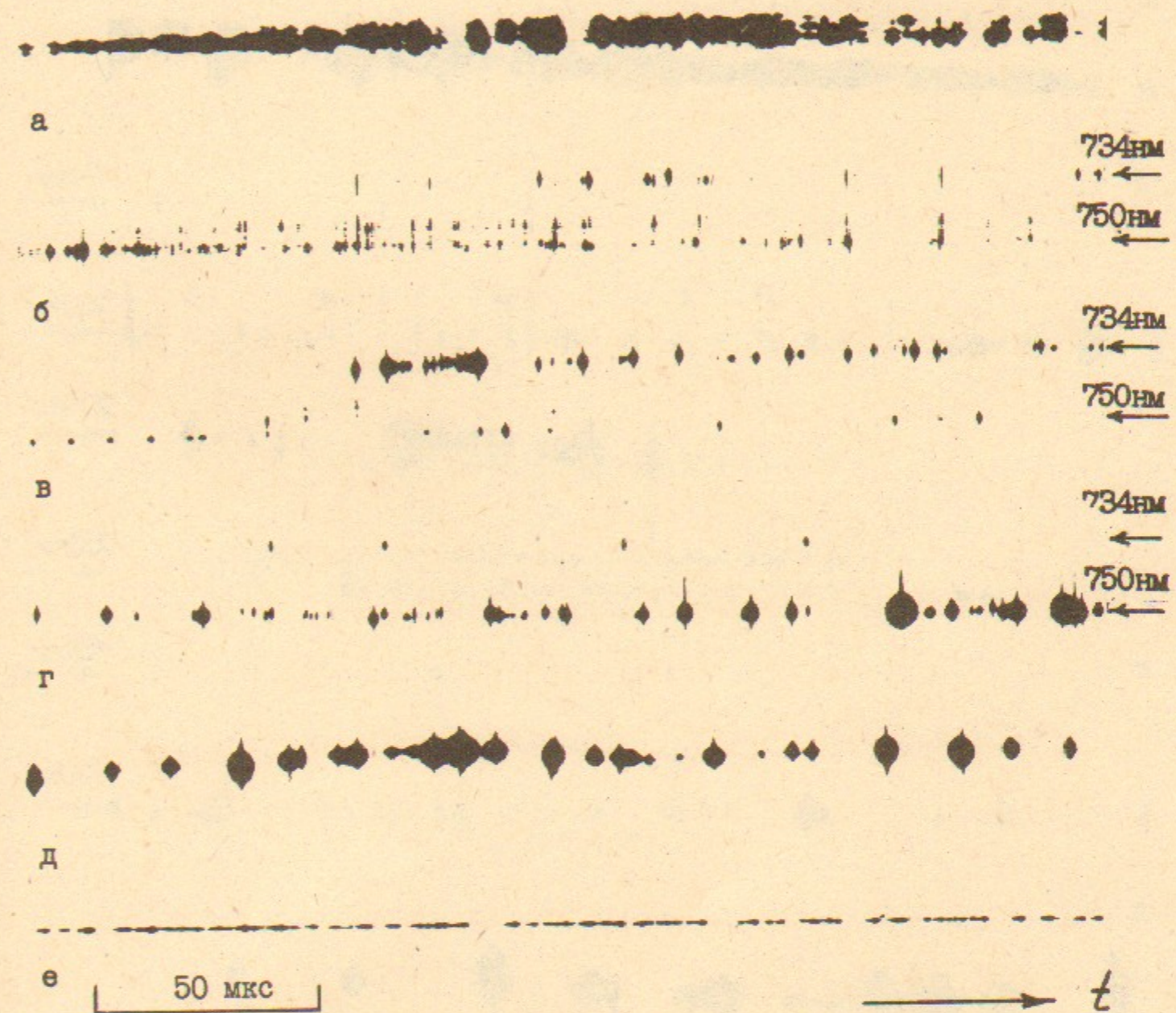


Рис. 19. Временные развертки спектра излучения TEM_{mnp} мод кристаллов александрита A₁/а/, A₂/б/ и A₃/в-д/ без принудительной селекции продольных мод /а-д/ и при их селекции /е/, в условиях слабой паразитной селекции мод /б/ и при ее отсутствии /а, в-д/. Температура кристаллов T = 10°C /а-г/ и 70°C /д, е/. L = 150 см, E_H = 8E_П.

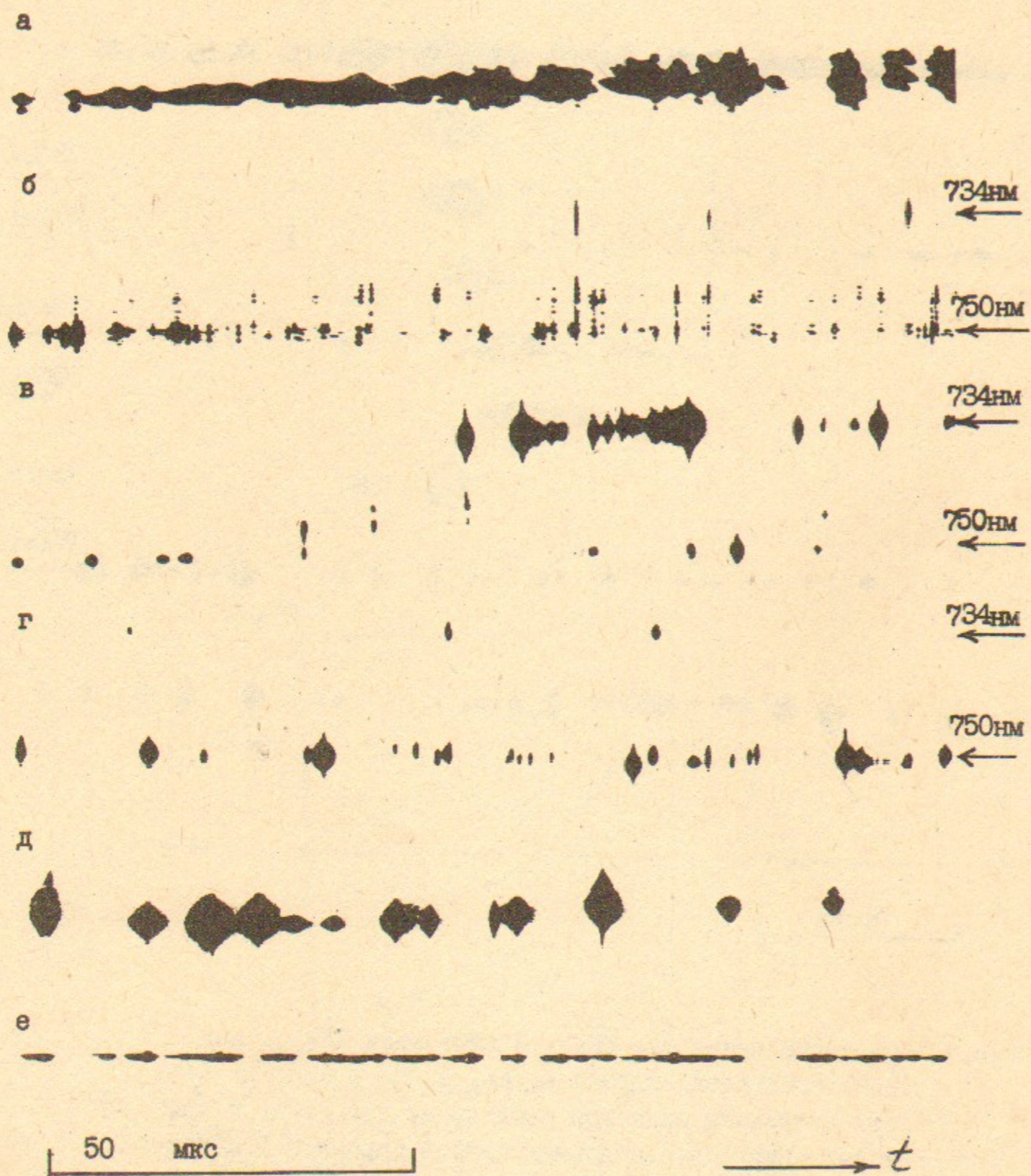


Рис. 20. Увеличенные фрагменты временных разверток спектра излучения TEM_{mnp} мод, соответствующие разверткам спектра на рис. 19.

В.В. Анциферов, Е.В. Иванов, Г.И. Смирнов

Параметры свободной генерации лазеров на ионах хрома в кристаллах alexandrita и РЗГГ

ИЯФ 93-107

Подписано в печать 26.11. 1993 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1,4 печ.л., 1,1 уч.-изд.л.

Тираж 150 экз. Бесплатно. Заказ № 107

Обработано на IBM PC и отпечатано на

ротапринтере ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН,

Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.