

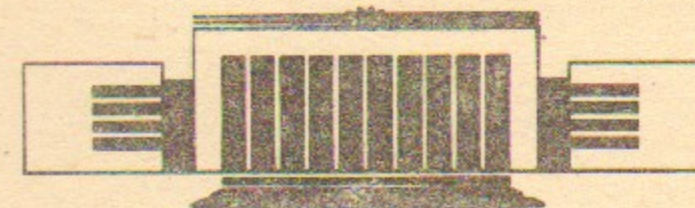


63  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
им. Г.И. Будкера СО РАН

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

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧЕНИЯ  
ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ  
НА ИОНАХ ХРОМА И НЕОДИМА

ИЯФ 93-112



НОВОСИБИРСК

# Оптимизация энергетических характеристик излучения твердотельных лазеров на ионах хрома и неодима

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

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера  
630090, Новосибирск, Россия

## АННОТАЦИЯ

Оптимизированы параметры лазеров и проведено сравнение энергии излучения в одинаковых экспериментальных условиях лазеров на ионах хрома в рубине, александрите и иттрий-скандий-галлиевом гранате и лазеров на ионах неодима в фосфатных стеклах ГЛС-22 и КНФС в режиме свободной генерации и лазеров на ионах неодима в кристаллах иттриево-алюминиевого граната (YAG), бериллата лантана (BLN) гадолиний-скандий-галлиевого граната с хромом GSGG:Cr и гексаалюмината лантана (LNA) в режимах свободной генерации и гигантского импульса. Максимальная энергия излучения с единицы объема активной среды достигалась в лазерах на александрите и Nd:Cr:GSGG.

© Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Энергетические характеристики излучения исследовались на одной экспериментальной установке, элементы которой были установлены на жестких и массивных столиках, имеющих механизмы точной юстировки. Были исследованы следующие активные среды: рубин  $\varnothing 5 \times 75$  мм, с объемом излучения  $V_r = 0,78 \text{ см}^3$ ; александрит  $\varnothing 5,5 \times 80$  мм с  $V_r = 1,42 \text{ см}^3$ ; Cr:YSGG  $\varnothing 4 \times 90$  мм с  $V_r = 0,5 \text{ см}^3$ ; Nd:YAG  $\varnothing 6,3 \times 100$  мм с  $V_r = 1,24 \text{ см}^3$ ; Nd:BLN  $\varnothing 4 \times 70$  мм с  $V_r = 0,56 \text{ см}^3$ ; Nd:Cr:GSGG  $\varnothing 4 \times 90$  мм с  $V_r = 0,5 \text{ см}^3$ ; Nd:LNA  $\varnothing 3 \times 50$  мм с  $V_r = 0,28 \text{ см}^3$ ; Nd:ГЛС-22  $\varnothing 6,3 \times 120$  мм с  $V_r = 2,5 \text{ см}^3$ ; Nd:КНФС  $\varnothing 6,3 \times 75$  мм с  $V_r = 2 \text{ см}^3$ . Накачка активных сред производилась серийными импульсными лампами ИСП-250, за исключением стекол и Nd:YAG, которые возбуждались лампами ИФП-800, в серийном моноблочном кварцевом осветителе. Энергетические характеристики излучения регистрировались при длительности импульса накачки равной 0,25 мс, при этом форма импульса была близка к прямоугольной. Охлаждение активных сред, кроме рубина (который охлаждался дистиллированной водой), осуществлялось жидкостным фильтром для отсеки УФ-излучения накачки, который прокачивался через термостат, поддерживающий температуру активной среды с точностью  $0,1^\circ\text{C}$ . Энергетические зависимости на графиках строились для энергий, излучаемых с единицы объема активных сред ( $E_r/V_r$ ).

Торцы всех элементов резонатора были срезаны либо под углом Брюстера, либо под углом  $\sim 1^\circ$  с просветляющими покрытиями, зеркала были напылены на подложках с клином  $\sim 2^\circ$ . Энергия генерации регистрировалась с помощью прибора ИМО-2. Форма импульса генерации контролировалась лавинным фотодиодом ЛФД-2 и коаксиальным фотоэлементом ФК-20.

## 2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВОБОДНОЙ ГЕНЕРАЦИИ ЛАЗЕРОВ НА ИОНАХ ХРОМА В РУБИНЕ, АЛЕКСАНДРИТЕ И ИТТРИЙ-СКАНДИЙ-ГАЛЛИЕВОМ ГРАНАТЕ

Энергетические характеристики свободной генерации лазеров на ионах хрома были исследованы нами в [1, 2] они достигали максимальных значений при оптимизации параметров лазера: температуры активной среды, длины резонатора  $L$  и коэффициента пропускания выходного зеркала  $T_2$ . С увеличением длины плоского резонатора до 1,5 м энергия генерации лазера на рубине уменьшалась в два раза, а лазера на alexandrite – в четыре (рис. 1,а). Это обусловлено образованием более короткофокусной тепловой линзы в кристалле alexandrite, которая преобразует плоский резонатор в эквивалентный сферический, имеющий минимальные потери только при выполнении условия устойчивости [3]. При увеличении энергии накачки  $E_H$  возрастали значения оптимальных коэффициентов пропускания выходного зеркала резонатора  $T_2^{OPT}$  при которых достигались наибольшие значения энергии генерации, и при  $E_H \sim 0,5$  кДж значения  $T_2^{OPT}$  выходили на насыщение и составили 0,25 для alexandrite, 0,3 – для Cr:YSGG и 0,35 – для лазера на рубине (рис. 1,б).

Нагревание кристаллов от 20 до 60°C приводило к падению энергии излучения лазера на рубине в шесть раз, в то же время энергия генерации лазера на alexandrite увеличивалась с ростом температуры кристалла и при 90°C ее значение возрастало в три раза (рис. 2,а). Такой значительный рост энергии излучения лазера на alexandrite с увеличением его температуры обусловлен резким возрастанием заселенности верхнего рабочего уровня  ${}^4T_2$  за счет его теплового возбуждения с метастабильного уровня  ${}^4A_2$ .

В исследованном диапазоне накачек энергия генерации лазеров линейно зависела от энергии накачки (рис. 2,б). При больших уровнях накачки ( $>0,5$  кДж) наблюдалось отклонение от линейной зависимости для лазеров на alexandrite и Cr:YSGG. Это связано с тем, что с увеличением энергии накачки возрастает доля энергии лампы, излучаемая в УФ-области спектра, которая отсекалась жидкостным фильтром. В том случае, когда УФ-излучение накачки преобразовывалось раствором красителя КН-120 в зеленую область спектра, зависимости энергии излучения от накачки сохраняли линейность и при больших ее уровнях. При оптимальных параметрах лазеров и энергии накачки 0,5 кДж были получены следующие удельные энергии генерации на исследованных средах:

1,5 (alexandrite), 0,6 (Cr:YSGG) и 0,34 Дж/см<sup>3</sup> (рубине).

## 3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВОБОДНОЙ ГЕНЕРАЦИИ ЛАЗЕРОВ НА ИОНАХ НЕОДИМА В СТЕКЛАХ ГЛС-22, КНФС и КРИСТАЛЛАХ YAG, GSGG:Cr, BLN и LNA

Энергетические характеристики свободной генерации лазеров на ионах неодима в различных средах были исследованы нами и описаны в работах [4–9]. При одной энергии накачки максимальная энергия генерации лазеров на ионах неодима достигалась также при оптимальных значениях коэффициентов  $T_2$  пропускания выходного зеркала резонатора (рис. 3,а). Причем только для Nd:YAG лазера имелся широкий интервал этих значений  $T_2 = 0,3 - 0,7$ . С увеличением энергии накачки значения коэффициентов  $T_2^{OPT}$  достигали насыщения для каждой среды при определенном уровне накачки, причем для Nd:Cr:GSGG лазера насыщение  $T_2^{OPT}$  происходило уже при энергиях накачки ( $\sim 50$  Дж (рис. 3,б). С увеличением длины резонатора до 2 м при постоянной накачке энергия генерации лазеров уменьшалась, за исключением Nd:YAG лазера, энергия излучения которого практически не изменялась (рис. 4,а). Энергия генерации Nd:YAG лазера оставалась также постоянной при нагревании активной среды от 10 до 90°C, в то время как энергия излучения других исследованных сред линейно уменьшалась с ростом температуры (рис. 4,б).

При небольших накачках энергия генерации линейно зависела от ее уровня (рис. 5,а). С ростом энергии накачки наблюдалось насыщение энергии генерации лазеров вследствие падения ее эффективности из-за возрастания доли УФ-излучения накачки. При энергии накачки 0,25 кДж были получены следующие удельные энергии генерации ( $E_G/V_G$ ) исследованных неодимовых лазеров: 4,0 (GSGG:Cr), 1,78 (BLN), 1,75 (YAG) 1,1 (КНФС), 0,9 (LNA) и 0,52 Дж/см<sup>3</sup> (ГЛС-22). В лазере на кристалле Nd:YAG, имеющем самые высокие однородность и теплопроводность из исследованных сред, была получена наименьшая расходимость лазерного излучения (рис. 5,б) и наибольшая яркость излучения ( $B_G/V_G$ ), с единицы объема активной среды.

#### 4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИГАНТСКИХ ИМПУЛЬСОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРОВ НА НЕОДИМЕ В КРИСТАЛЛАХ YAG, BLN, GSGG:Cr и LNA ПРИ ПАССИВНОЙ МОДУЛЯЦИИ ДОБРОТНОСТИ ЗАТВОРАМИ НА КРИСТАЛЛАХ LiF:F<sub>2</sub><sup>-</sup>

Широко используемые для пассивной модуляции добротности резонатора твердотельных лазеров жидкостные затворы на красителях обладают не очень высокой стабильностью и имеют существенные потери излучения на длине волны генерации. F<sub>2</sub><sup>-</sup> – центры окраски в кристалле фтористого лития (LiF:F<sub>2</sub><sup>-</sup>) стали широко применяться в последние годы в качестве фототропных затворов для модуляции добротности лазеров на ионах неодима [10] благодаря высокой лучевой стойкости, простоте их радиационного окрашивания, высокой теплопроводности и низким потерям на длине волны генерации. Несмотря на достаточно большое число работ с использованием этих фототропных затворов, обзор которых сделан в работе [11], не была произведена оптимизация параметров лазеров для достижения максимальных энергетических характеристик гигантских импульсов излучения.

Энергетические характеристики гигантских импульсов излучения лазеров на ионах неодима были исследованы нами в работах [4–6, 8, 9]. Максимальная энергия генерации гигантских импульсов излучения лазеров на ионах неодима в кристаллах YAG, BLN, LNA и GSGG:Cr достигалась экспериментально подбором начального коэффициента пропускания пассивного затвора ( $T_{ПЗ}$ ) и коэффициента пропускания выходного зеркала резонатора ( $T_2$ ) (рис. 6). Энергия излучения измерялась для одиночного гигантского импульса, до появления второго, порог генерации которого составлял  $\sim 1,2$  от порога генерации одиночного импульса. Зависимости энергии генерации гигантских импульсов от коэффициентов  $T_{ПЗ}$  и  $T_2$  имели четкие максимумы, кроме Nd:Cr:GSGG лазера, у которого таких максимумов не обнаруживалось даже при максимальных значениях коэффициентов пропускания ( $T_{ПЗ} = 0,04$  и  $T_2 = 0,96$ ). Вследствие очень низких значений энергии гигантских импульсов на графиках не приведены подобные энергетические зависимости для Nd:LNA лазера.

Максимальные энергетические характеристики гигантских импульсов излучения исследованных лазеров были получены с  $T_{ПЗ} = 0,04$  (YAG, GSGG:Cr) 0,08 (BLN) и 0,25 (LNA) и с  $T_2 = 0,35$  (YAG), 0,6 (LNA) и 0,96 (BLN, GSGG:Cr). С увеличением накачки линейно возрастало число гигантских импульсов и энергия генерации увеличивалась

пропорционально энергии излучения одиночного импульса и при больших накачках она была порядка энергии свободной генерации.

При увеличении длины резонатора от 0,4 до 2,0 м энергия гигантских импульсов излучения лазеров уменьшалась линейно в среднем на 20% (рис. 7,а), а длительность гигантского импульса, имеющего гладкую симметричную форму (рис. 7,б), возрастала от 10 до 15 нс. С оптимальными параметрами резонатора и  $T_{ПЗ}$  были получены следующие удельные мощности гигантских импульсов излучения: 18 (Nd:Cr:GSGG), 16 (Nd:BLN), 11 (Nd:YAG) и 0,5 МВт/см<sup>3</sup> (Nd:LNA). При использовании сложного дисперсионного резонатора была получена одночастотная генерация гигантских импульсов с перестройкой длины волны излучения в диапазонах: 0,2 нм (Nd:YAG) 0,3 нм (Nd:Cr:GSGG), 0,4 нм (Nd:BLN) и 0,5 нм (Nd:LNA).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Анциферов В.В., Алимписев А.И., Иванов Е.В. ЖТФ, 1992, т.62, вып.3, с.7-15.
2. Анциферов В.В., Иванов Е.В., Смирнов Г.И. Препринт ИЯФ СО РАН, 1993, N 93-107.
3. Анциферов В.В. Препринт СФТИ-88-1, Москва, ЦНИИатоминформ, 1988, 10 с.
4. Анциферов В.В., Калягин В.А., Шарнов А.В. Препринт СФТИ-90-15, Москва, ЦНИИатоминформ, 1990, 25 с.
5. Анциферов В.В., Алимписев А.И., Иванов Е.В. Электрон. техника, сер.11, вып.2(58), 1991, с. 6-9.
6. Анциферов В.В., Хабурзания Г.В. Электрон. техника, 1991, вып. 2(58), с.3-5.
7. Анциферов В.В., Хабурзания Г.В., Шкадаревич А.П. Оптика и спектр., 1992, т.72, вып.1, с. 191-195.
8. Анциферов В.В., Иванов Е.В., Смирнов Г.И. Препринт ИЯФ СО РАН, 1993, N 93-105, 20 с.
9. Анциферов В.В., Иванов Е.В., Смирнов Г.И. Препринт ИЯФ СО РАН, 1993, N 93-106, 21 с.
10. Майоров А.П., Макуха В.К., Смирнов В.А. ЖТФ, 1981, т.51, N 11, с.2391-2392.
11. Иванов Н.А., Парфианович И.А., Хулугуров В.М. Изв. АН СССР, сер. физ., 1982, т.46, N 10, с.1985-1991.

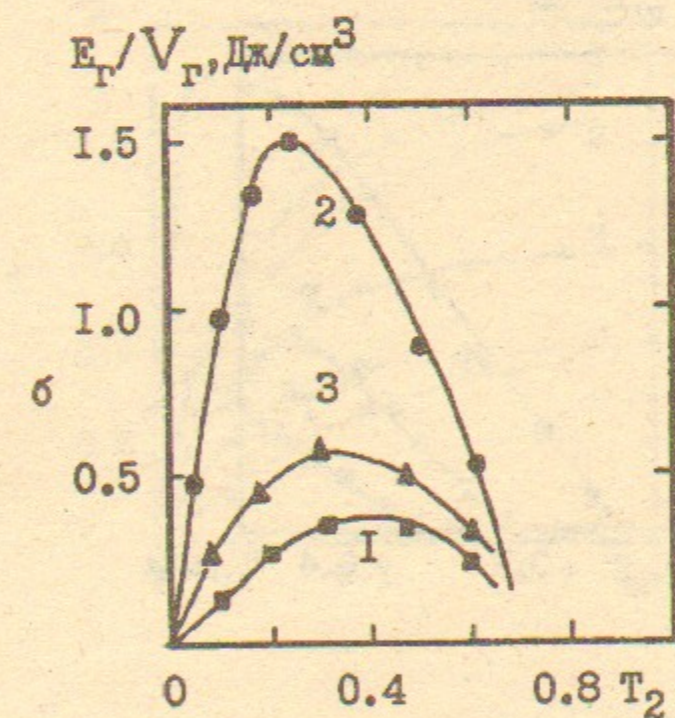
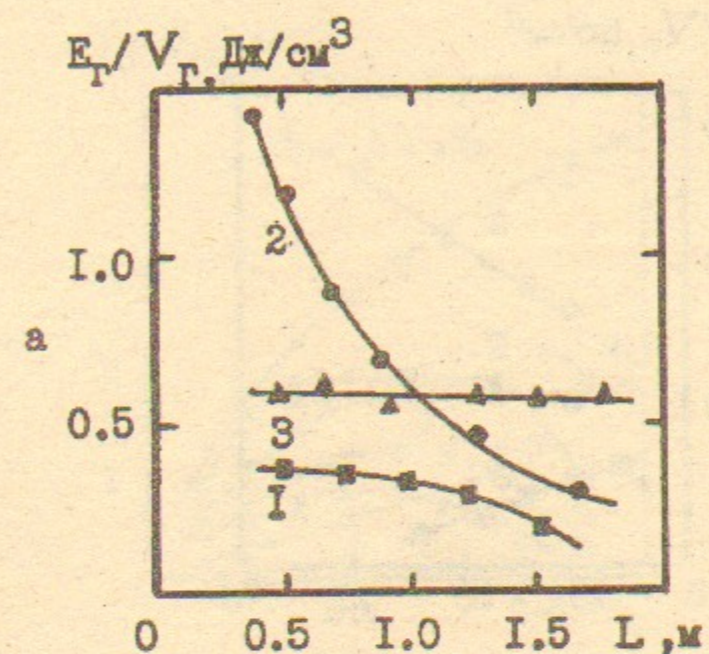


Рис. 1. Зависимости удельных энергий генерации  $E_g/V_g$  от длины резонатора  $L$  (а) и от коэффициента пропускания выходного зеркала  $T_2$  (б) для лазеров на рубине (1), александрите (2), Cr:YSGG (3);  $E_H = 0.5$  кДж.

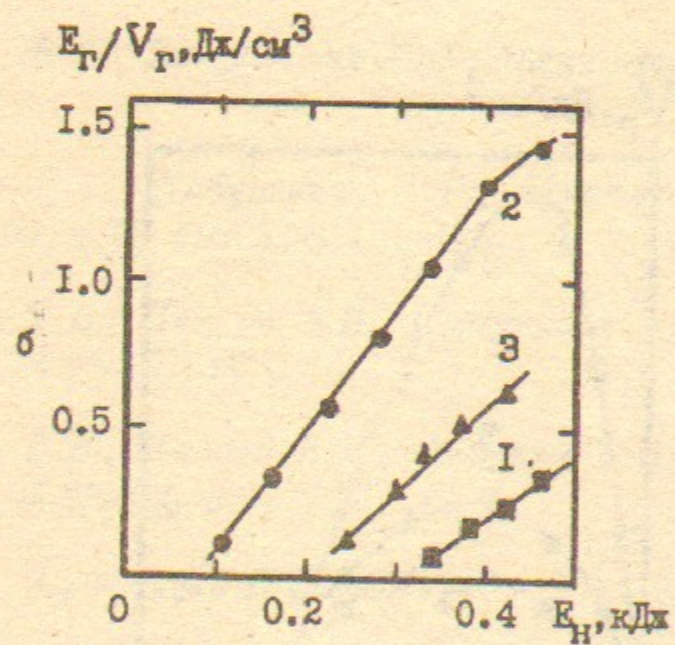
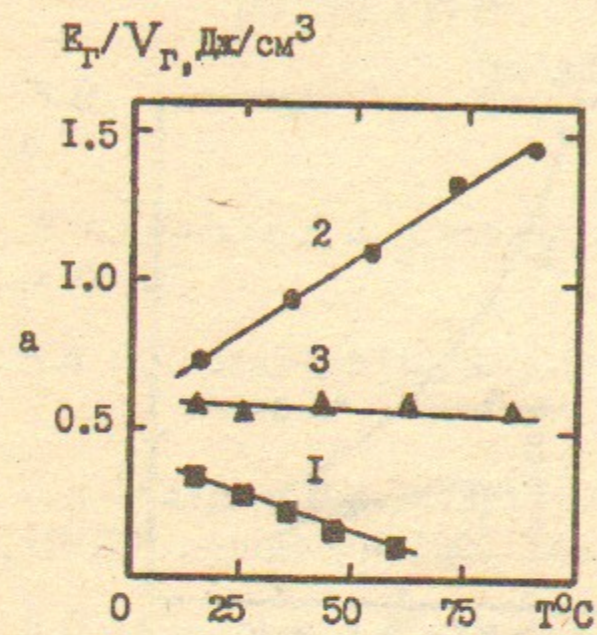


Рис. 2. Зависимости удельных энергий генерации  $E_g/V_g$  от температуры кристалла (а) при постоянной энергии накачки  $E_H = 0.5$  кДж и от энергии накачки  $E_H$  (б) для лазеров на рубине (1), александрите (2) и Cr:YSGG (3).

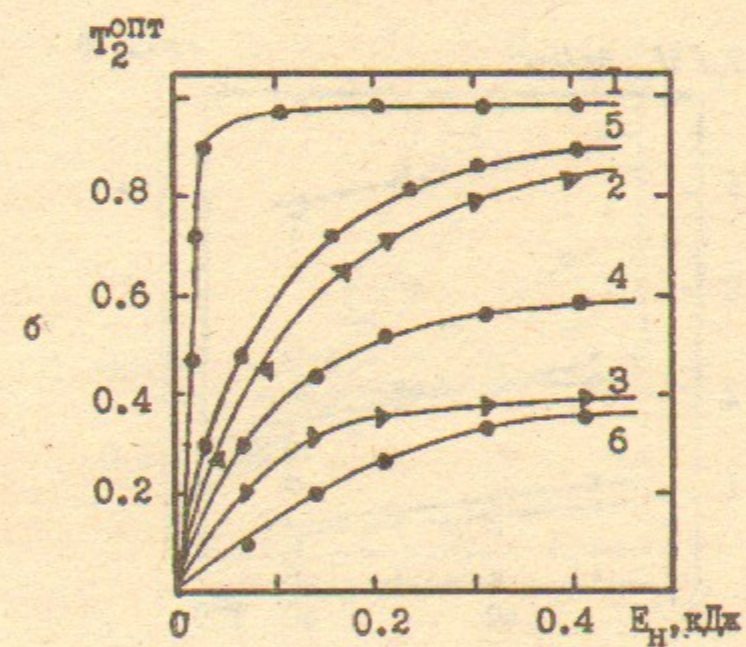
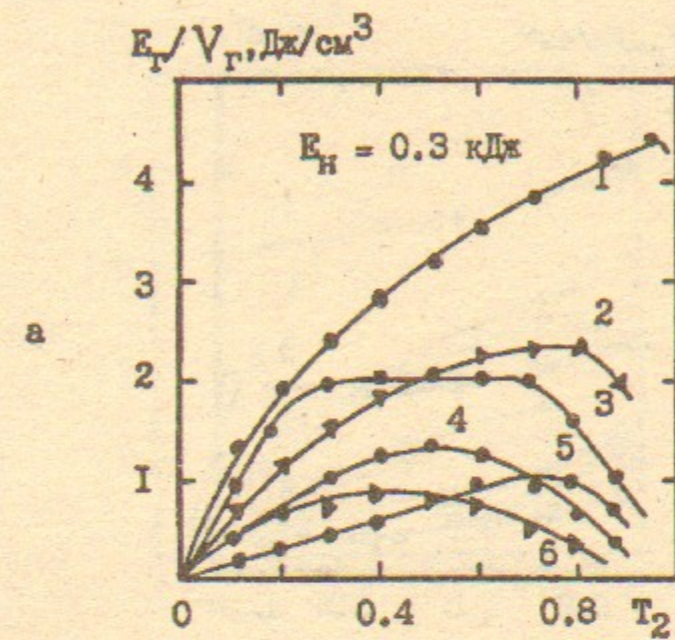


Рис. 3. Зависимости удельных энергий генерации от коэффициента пропускания выходного зеркала  $T_2$  (а) и оптимального коэффициента пропускания зеркала  $T_2^0$  от энергии накачки  $E_H$  для лазеров на Nd:Cr:GSGG (1), BLN:Nd (2), Nd:YAG (3), Nd:КНФС (4), Nd:LNA (5), Nd:ГЛС-22 (6).

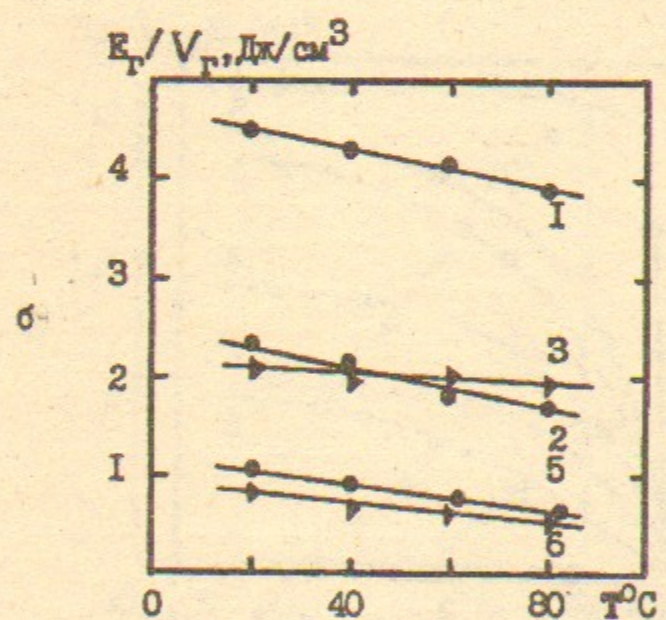
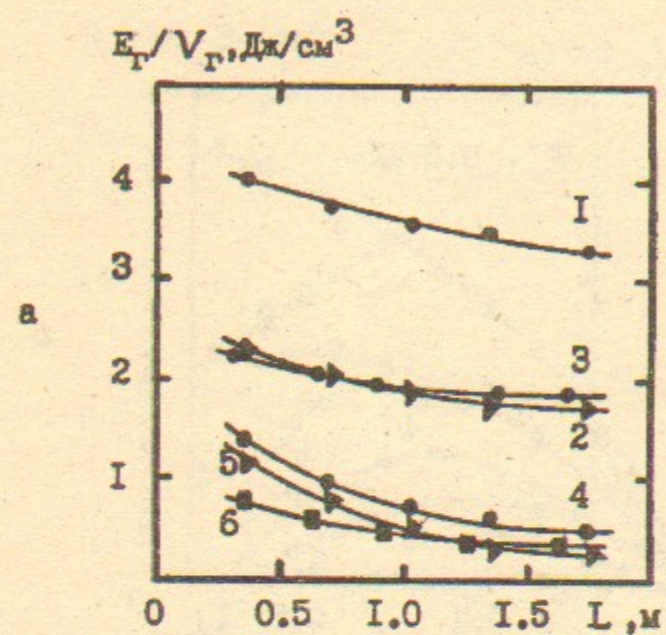


Рис. 4. Зависимости удельных энергий генерации  $E_G/V_G$  от длины резонатора  $L$  (а), от температуры кристалла  $T$  (б) при постоянной энергии накачки  $E_H = 300$  кДж для лазеров на Nd:Cr:GSGG (1), Nd:BLN (2), Nd:YAG (3), Nd:КНФС (4), Nd:LNA (5), Nd:ГЛС-22 (6).

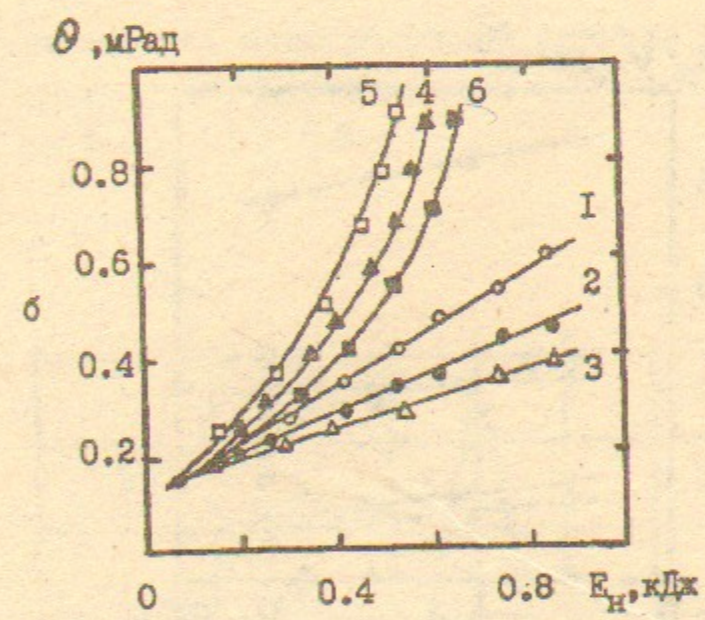
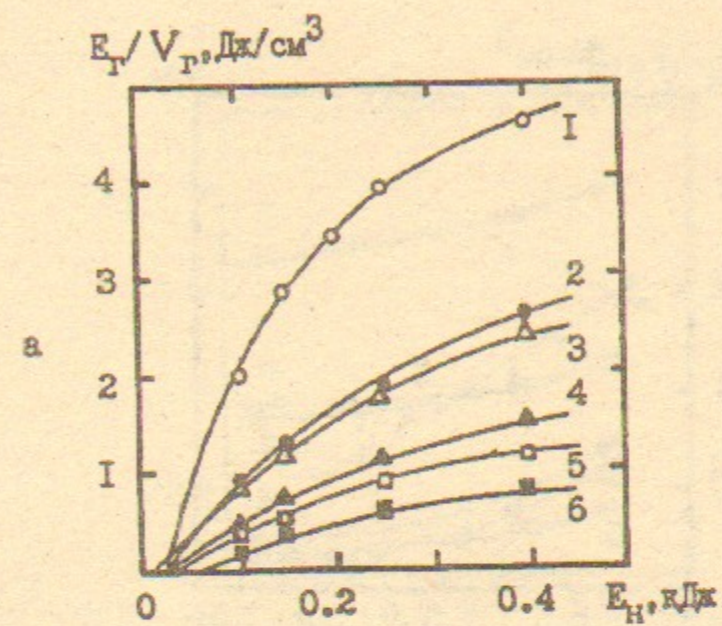


Рис. 5. Зависимости удельных энергий генерации  $E_G/V_G$  (а) и угла расходимости лазерного излучения  $\theta$  (б) от энергии накачки для лазеров на Nd:Cr:GSGG (1), Nd:BLN (2), Nd:YAG (3), Nd:КНФС (4), Nd:LNA (5), Nd:ГЛС-22 (6).  $L=2$  м.

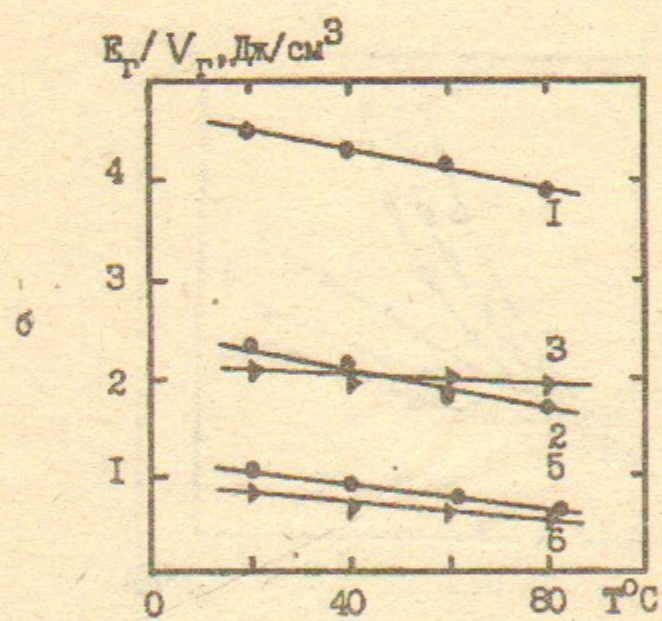
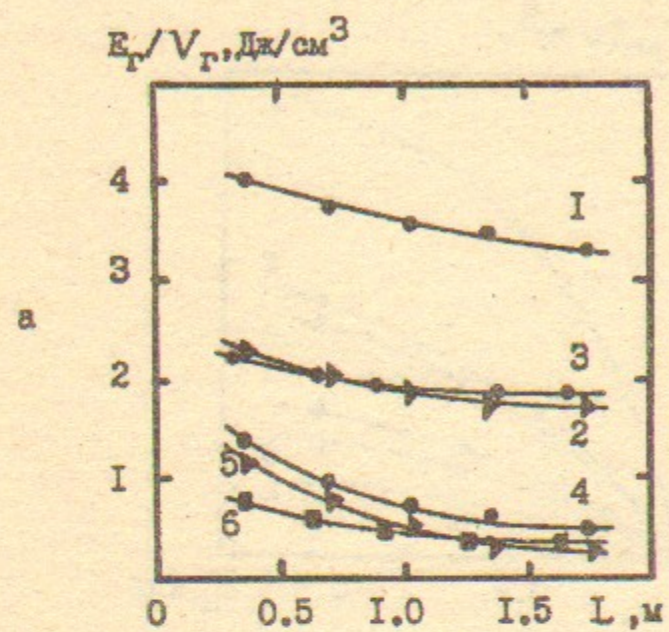


Рис. 6. Зависимости удельных энергий генерации  $E_G/V_G$  от коэффициентов пропускания пассивного затвора  $T_{ПЗ}$  (а) и выходного зеркала резонатора  $T_2$  (б) гигантских импульсов излучения лазеров на ионах неодима с оптимальными параметрами в кристаллах YAG (1), BLN (2), Cr:GSGG (3).  $L=40$  см,  $E_H = 1.2 E_{П}$ .

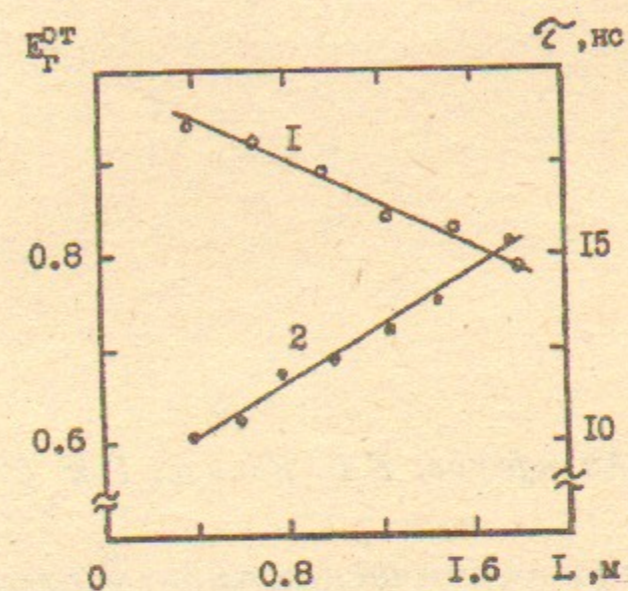


Рис. 7,а. Зависимости относительной энергии  $E_G^{OT}$  (1) гигантского импульса излучения и его длительности  $\tau$  (2) от длины резонатора  $L$ .  $E_H = 1.2 E_{П}$ ,  $T_{ПЗ} = 0.2$ ,  $T_2 = 0.5$ .

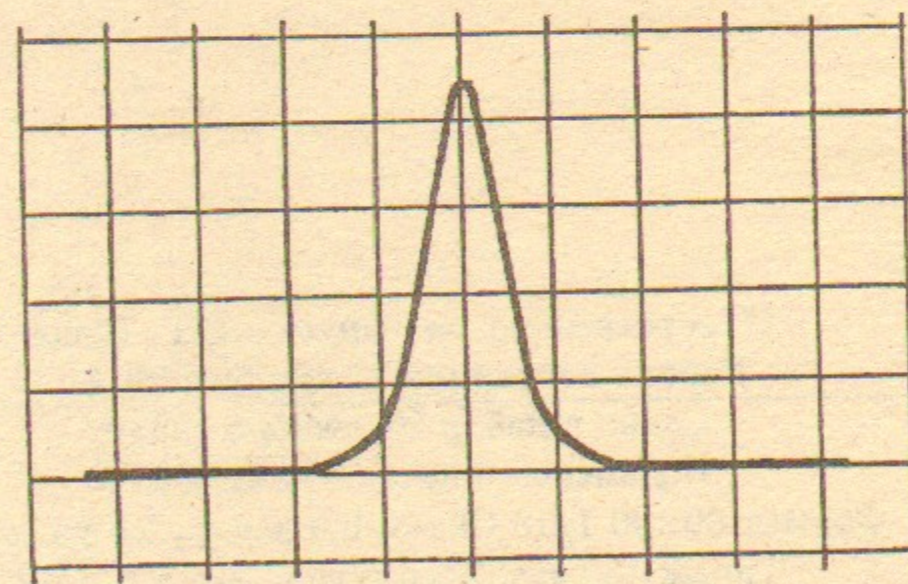


Рис. 7,б. Осциллограмма гигантского импульса излучения. Масштаб по временной оси 10 нс/дел.  $L=40$  см,  $E_H = 1.2 E_{П}$ .