

60



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

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

ПАРАМЕТРЫ ГЕНЕРАЦИИ ЛАЗЕРОВ
НА ИОНАХ НЕОДИМА В КРИСТАЛЛЕ LNA
И СТЕКЛАХ КНФС

ИЯФ 93-106



НОВОСИБИРСК

Параметры генерации лазеров на ионах неодима
в кристалле LNA и стеклах КНФС

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

А Н Н О Т А Ц И Я

Исследованы спектрально-временные и энергетические параметры генерации Li-Nd-La-фосфатных стекол (КНФС) с концентрацией ионов неодима 4 и $8 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ в режиме свободной генерации и проведено их сравнение с параметрами генерации фосфатных стекол ГЛС-22 в идентичных экспериментальных условиях. Показано, что характер развития спектра квазистационарной генерации КНФС подобен динамике спектра фосфатного стекла ГЛС-24, имеющего также высокую концентрацию ионов неодима. Получена одночастотная квазистационарная генерация TEM_{00q} мод в КНФС с перестройкой длины волны излучения в диапазоне 27 нм. Исследованы спектральные и энергетические характеристики излучения лазера на кристалле гексаалюмината лантана-магния с неодимом в режимах свободной генерации и гигантского импульса при пассивной модуляции добротности затворами на кристаллах LiF:F_2^- .

© Институт ядерной физики СО РАН

Введение

Генерация ионов неодима в стекле, имеющего состав ультрафосфата и высокую концентрацию ионов неодима $\sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$ при слабом концентрационном тушении люминесценции (КТЛ) была получена впервые в [1]. В работе [2] было синтезировано Li-Nd-La-фосфатное стекло (КНФС) с концентрацией ионов неодима до $3 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$, при этом время жизни верхнего рабочего уровня составляло 80 нс, а сечение перехода $3,8 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$. В ряде работ, обзор которых сделан в [3], исследованы параметры генерации КНФС в различных режимах и, в основном, при малых уровнях накачки. В [4] были измерены энергетические характеристики излучения в режиме свободной генерации и была получена энергия генерации $1,5$ Дж при энергии накачки 200 Дж и длительности импульса 175 нс, при этом удельная мощность генерации составила $P_{\Gamma}/V_{\Gamma} = 10^5 \text{ Вт/см}^3$. Однако ни в одной работе не были исследованы спектрально-временные параметры генерации КНФС.

Кристаллы гексаалюмината лантана-магния с неодимом $(\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{MgAl}_{11}\text{O}_{19})$ -Nd:LNA [5] могут также иметь достаточно высокую концентрацию ионов неодима (до $7 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$) при слабом КТЛ. Они имеют большое сечение перехода на длине волны 1055 нм равное $3,2 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2$, большое время жизни верхнего рабочего уровня ~ 320 нс и относительно широкую неоднородную линию усиления ~ 3 нм. На кристаллах Nd:LNA была получена непрерывная генерация при лазерной накачке [6,7] и ламповой накачке [8]. Спектральные характеристики свободной генерации и режим гигантского импульса не были исследованы.

В настоящей работе исследованы спектрально-временные и

энергетические характеристики свободной генерации лазеров на неодиме в КНФС и LNA и режим пассивной модуляции добротности резонатора затворами на кристаллах LiF:F_2^- в лазере Nd:LNA.

1. Экспериментальная установка

Исследовались Li-Nd-La-фосфатные стекла (КНФС) $\varnothing 6,3 \times 75$ мм с концентрацией ионов неодима $4 \cdot 10^{20}$ (КНФС-1) и $8 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ (КНФС-2) со скошенными и просветленными торцами в резонаторе с плоскими зеркалами при полном отсутствии паразитной селекции продольных мод. Накачка производилась лампой ИФП-800 в кварцевом осветителе, легированном европием, при длительности импульса накачки 250 мкс. Дополнительная отсечка УФ-излучения накачки осуществлялась жидкостным фильтром. Сравнение энергетических характеристик излучения проводилось с серийным фосфатным стеклом ГЛС-22 (с концентрацией ионов неодима $2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$) $\varnothing 6,3 \times 110$ мм в идентичных экспериментальных условиях. При этом объемы активных сред, участвовавших в генерации, составляли: $V_r = 2 \text{ см}^3$ (КНФС) и $2,5 \text{ см}^3$ (ГЛС-22).

Накачка кристаллов Nd:LNA $\varnothing 3 \times 50$ мм с просветленными торцами производилась лампой ИСП-250, при этом объем излучения составлял $V_r = 0,28 \text{ см}^3$.

Исследование спектра генерации осуществлялось с помощью высокоскоростной фотографической установки ВФУ-1 со спектральной приставкой с дифракционной решеткой 1200 штр/мм и интерферометра Фабри-Перо. Кинетика генерации регистрировалась с помощью лавинного фотодиода ЛФД-2 и осциллографа. Энергия излучения измерялась прибором ИМО-2.

2. Лазер Nd:КНФС

2.1. Энергетические и угловые характеристики излучения

Максимальные энергетические характеристики излучения лазеров на КНФС достигались экспериментально при оптимизации параметров плоского резонатора: его длины L и коэффициента T_2 пропускания выходного зеркала. При больших уровнях накачки в активной среде возникает наведенная тепловая линза с фокусом f_T и плоский резонатор преобразуется в сферический с эквивалентными параметрами [9]:

$$R_3 = 2f_T(1 - L/4f_T), \quad L_3 = L(1 - L/4f_T).$$

Поэтому для каждого уровня накачки существует оптимальная длина эквивалентного сферического резонатора, для которой выполняется условие устойчивости.

С увеличением длины резонатора наблюдалось линейное уменьшение энергии генерации лазеров, причем падение энергии излучения лазера на КНФС происходило, более быстро, чем лазера на ГЛС-22 (рис. 1). В исследованном диапазоне изменения длины резонатора порог генерации лазера на ГЛС-22 практически не изменялся. Для каждого уровня накачки существует оптимальный коэффициент пропускания выходного зеркала резонатора ($T_2^{\text{опт}}$), при котором достигается максимальная энергия генерации (рис. 2). При увеличении энергии накачки (в интервале небольших ее значений) происходил нелинейный рост значений коэффициентов $T_2^{\text{опт}}$ и, начиная с $E_H \sim 600$ Дж, наблюдалось их насыщение для лазера на КНФС. Для лазера на ГЛС-22 такого насыщения не происходило (рис. 3), и значения коэффициентов $T_2^{\text{опт}}$ при одинаковых уровнях накачки лежат в области меньших значений (рис. 4). При малых уровнях накачки отношение энергий генерации лазеров на КНФС и ГЛС-22 составляло ~ 2 , что соответствовало, примерно, отношению их концентраций ионов неодима, с ростом уровня накачки это отношение уменьшалось и при $E_H \sim 600$ Дж оно было $\sim 1,3$ (рис. 5). Значительное уменьшение эффективности генерации КНФС по сравнению с ГЛС-22 при высоких уровнях накачки (рис. 6) связано с более низкими термооптическими характеристиками КНФС. Повышение температуры активной среды приводило к уменьшению энергии генерации лазера на ГЛС-22 $\sim 1,2$ раза (рис. 7). Для лазера на КНФС такие зависимости энергии генерации от температуры получить не удалось, поскольку при нагревании стекла КНФС в нем появлялись микротрещины, которые при больших энергиях накачки приводили к разрушению стержней. При малых уровнях накачки расходимости излучения двух лазеров были практически одинаковыми, однако с ростом энергии накачки расходимость излучения лазера на КНФС возрастала более резко (рис. 8).

2.2. Спектрально-временные параметры генерации

Спектрально-временные параметры генерации лазера на КНФС были исследованы в квазистационарном режиме. Устойчивая квази-

стационарная генерация TEM_{00q} мод в лазерах на ионах неодима в фосфатных и силикатных стеклах [10,11] и иттриево-алюминиевом гранате [11,12] достаточно просто достигается в обычных условиях с оптимальными параметрами резонатора ($L = 2$ м и диафрагме диаметром 2 мм), при которых ослабляется влияние технических возмущений резонатора. В лазере на КНФС не удается реализовать оптимальные для неодима параметры резонатора, так как вследствие значительных термооптических деформаций КНФС существенно возрастают потери излучения с увеличением длины резонатора.

Квазистационарная генерация в лазере на КНФС была получена только для TEM_{00q} мод (рис. 9), как и для лазеров на силикатных и фосфатных стеклах, в резонаторе длиной 1,6 м и диафрагмой 1,6 мм. При таких параметрах резонатора квазистационарная генерация была очень чувствительна к слабым возмущениям резонатора, что требовало тщательной его юстировки, и устойчивый квазистационарный режим наблюдался только при определенном уровне накачки, когда конфигурация эквивалентного сферического резонатора не выходила за границы устойчивости.

При небольших уровнях накачки ($E_n < 2E_{п}$) возбуждалась всегда одна узкая ($\sim 0,02$ нм) спектральная компонента (рис. 9, в). С увеличением накачки до трехкратного превышения возникала вторая спектральная компонента, отстоящая на $\sim 0,1$ нм от первой (рис. 9, г). При дальнейшем увеличении накачки возрастало число спектральных компонент, однако спектральный интервал между ними практически не изменялся (рис. 9, д), и они четко наблюдались в интегральном спектре (рис. 10), что свидетельствует о незначительном тепловом дрейфе спектра генерации. Аналогичное развитие спектра генерации во времени наблюдалось у лазера на фосфатном стекле ГЛС-24, имеющего высокую концентрацию ионов неодима, сравнимую с КНФС-2.

Селекция и перестройка длины волны излучения проводилась при использовании сложного дисперсионного резонатора, состоящего из дисперсионных призм с угловой дисперсией ~ 3 угл. мин/нм и селектора-эталоны Фабри-Перо с областью дисперсии 0,56 нм и коэффициентами пропускания зеркал 0,25. В квазистационарном режиме была получена одночастотная генерация (рис. 9, е), с шириной интегрального спектра $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ нм (рис. 11, а) и перестройкой длины волны генерации в диапазоне ~ 27 нм (рис. 11, б).

3. Лазер на неодиме в гексаалюминате лантана-магния (Nd:LNA)

3.1. Параметры свободной генерации

Оптимизация энергетических характеристик излучения Nd:LNA-лазера достигалась экспериментально подбором основных параметров резонатора. При постоянной накачке увеличение длины резонатора от 0,4 до 1,6 м приводило к падению энергии генерации в три раза (рис. 12). В то же время при неизменной длине резонатора равномерное нагревание кристалла LNA от 10 до 80 °С приводило к уменьшению энергии генерации всего в 1,5 раза (рис. 13). Следовательно, значительное падение энергии генерации с ростом длины резонатора обусловлено значительными термооптическими деформациями кристалла LNA, которые преобразуют плоский резонатор лазера в неустойчивый сферический с высокими потерями.

При больших энергиях накачки (>300 Дж) максимальная энергия генерации лазера достигалась при коэффициенте пропускания T_2 выходного зеркала $\sim 96\%$, то есть когда в качестве последнего была использована стеклянная подложка с клином (рис. 14). С ростом накачки увеличивались значения оптимального коэффициента пропускания выходного зеркала в сторону увеличения и при энергии накачки ~ 300 Дж происходило их насыщение (рис. 15). В области небольших энергий накачки энергия генерации лазера линейно нарастала, а при более высоких накачках скорость роста энергии падала, что связано с тепловыми деформациями резонатора.

Наведенные значительные тепловые деформации кристалла LNA, приводящие к образованию неустойчивого резонатора, не позволяют реализовать оптимальные для ионов неодима в LNA параметры резонатора, с которыми достаточно просто достигается устойчивая квазистационарная генерация. Для достижения оптимальных параметров резонатора лазера на неодиме в LNA необходимо вводить дополнительные элементы, компенсирующие влияние тепловой отрицательной линзы, наведенной в кристалле LNA. Вследствие этого в лазере Nd:LNA с плоскими зеркалами не удалось реализовать квазистационарную генерацию TEM_{00q} мод, которая была получена авторами ранее на всех исследованных неодимовых средах.

При небольших превышениях накачки над пороговой в пиковом режиме генерации наблюдалось хаотическое чередование спектральных компонент во времени с интегральной шириной спектра

~ 0,35 нм (рис. 16). В отсутствие паразитной селекции продольных мод при увеличении энергии накачки до $2E_{\text{п}}$ ширина интегрального спектра излучения возрастала до ~ 1,0 нм и достигала насыщения. Такое значительное увеличение спектра генерации обусловлено неоднородным характером уширения линии усиления кристалла LNA. Введение в резонатор лазера селектора-эталона Фабри-Перо с областью дисперсии 5,56 нм приводило к сужению спектра генерации до 0,05 нм и позволило получить перестройку длины волны излучения на 3,5 нм с центром на $\lambda_0 = 1055$ нм (рис. 17). Получить генерацию и перестройку вблизи длины волны 1082 нм не удалось вследствие больших потерь в резонаторе лазера и несколько меньшего усиления на этой длине волны.

3.2. Режим гигантского импульса

Пассивная модуляция добротности резонатора лазера Nd:LNA с плоскими зеркалами производилась при использовании фототропных затворов на кристаллах LiF:F_2^- . Оптимизация энергетических характеристик излучения гигантских импульсов проводилась экспериментально подбором оптимальных коэффициентов пропускания пассивного затвора ($T_{\text{пз}}$) и выходного зеркала резонатора (T_2). Максимальная энергия генерации гигантских импульсов достигалась при оптимальных коэффициентах $T_{\text{пз}} = 0,25$ (рис. 18) и $T_2 = 0,6$ (рис. 19), с которыми была получена энергия излучения в гигантском импульсе ~ 4 мДж, что в 20 раз меньше энергии излучения гигантских импульсов лазера Nd:BLN [13]. Длительность гигантского импульса составляла при этом 20 нс (рис. 20, а). При использовании селектора-эталона Фабри-Перо с областью дисперсии 5,56 нм и резонансного отражателя в качестве выходного зеркала удалось получить одночастотную генерацию гигантского импульса (рис. 20, б) и произвести перестройку длины волны излучения в диапазоне 0,5 нм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Weber H.P., Damen T.C., Danielmeyer H.G. et al. Appl. Phys. Lett., 1973, v.22, N 10, p.534-536.
2. Батыгов С.Х., Воронько Ю.К., Денкер Б.И. и др. Квант. электрон., 1976, т. 3, N 10, с. 2243-2246.
3. Денкер Б.И., Осико В.В., Пашинин П.П. и др. Квант. электрон., 1981, т. 8, N 3, с. 469-483.
4. Водопьянов К.Л., Денкер Б.И., Максимова Г.В. и др. Квант. электрон., 1978, т. 5, N 3, с. 686-689.
5. Багдасаров Х.С., Дорожкин Л.М., Ермакова Л.А. и др. Квант. электрон., 1983, т. 10, N 8, с. 1645-1651.
6. Багдасаров Х.С., Дорожкин Л.М., Кеворков А.М. и др. Квант. электрон., 1983, т. 10, N 5, с. 1014-1016.
7. Fan T.Y., Konta M.R. IEEE J. Quant. Electron, 1989, v.25, N 8, p.1845.
8. Aminoff C.G., Larot C., Leduc C. Rev. Phys. appl., 1989, v.24, N8, p.827-831.
9. Анциферов В.В. Препринт СФТИ-88-1, Москва, ЦНИИатоминформ, 1988.
10. Antsiferov V.V., Ghiner A.V., Derjy N.M. et al. Optics Commun., 1975, v.14, N 4, p.388-391.
11. Анциферов В.В. Препринт СФТИ-4, Сухуми, 1980, 33с.
12. Анциферов В.В., Голяев Ю.В. Оптика и спектр, 1982, т. 52, N4, с. 706-712.
13. Анциферов В.В., Алимпиев А.И., Иванов Е.В. Электрон. техника., сер. 11, 1991, вып. 2(58), с. 6-9.

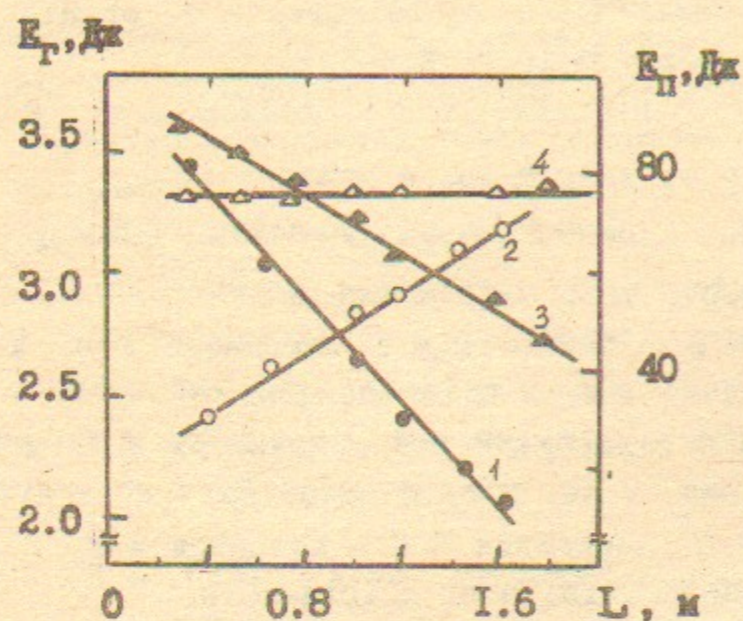


Рис. 1. Зависимости энергии генерации E_g /1,3/ и пороговой энергии накачки E_p /2,4/ от длины резонатора L для КНФС-2/1,2/ и ГЛС-22/3,4/. $E_H = 300$ Дж, $T = 300$ °К.

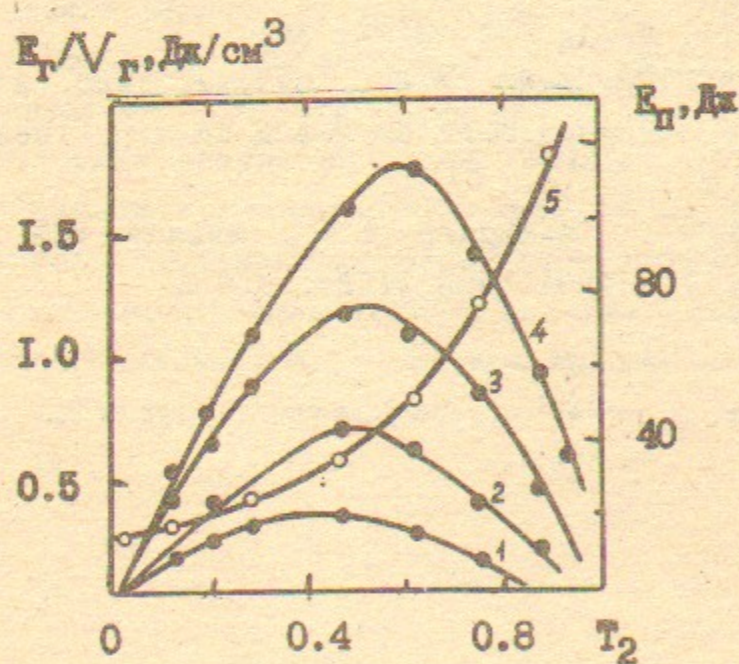


Рис. 2. Зависимости удельной энергии генерации E_g/V_g /1-4/ и пороговой энергии накачки E_p /5/ для КНФС I от коэффициента T_2 пропускания выходного зеркала для различных $E_H = 100$ /1/, 150/2/, 350/3/ и 650 Дж/4/. $L = 50$ см, $T = 300$ °К.

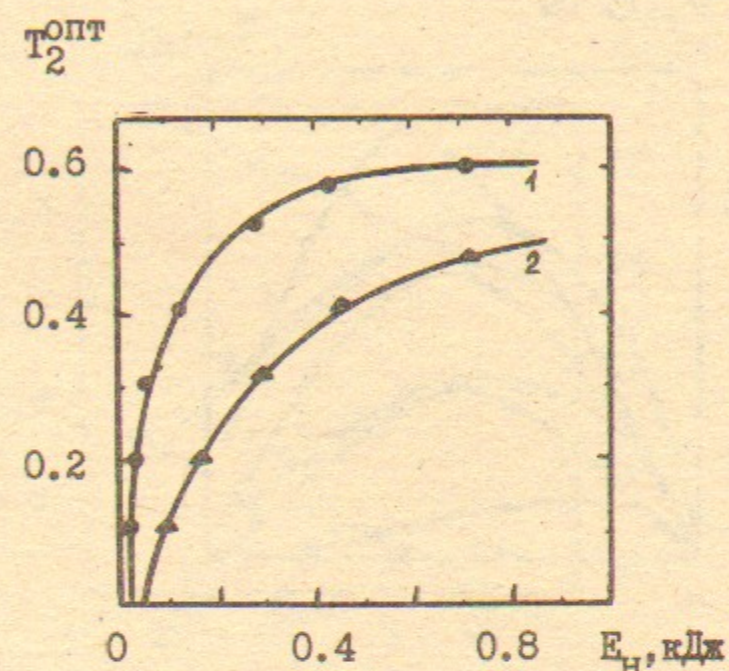


Рис. 3. Зависимости оптимального коэффициента пропускания выходного зеркала T_2^{opt} от энергии накачки E_H для КНФС I /1/ и ГЛС-22 /2/. $L = 50$ см, $T = 300$ °К.

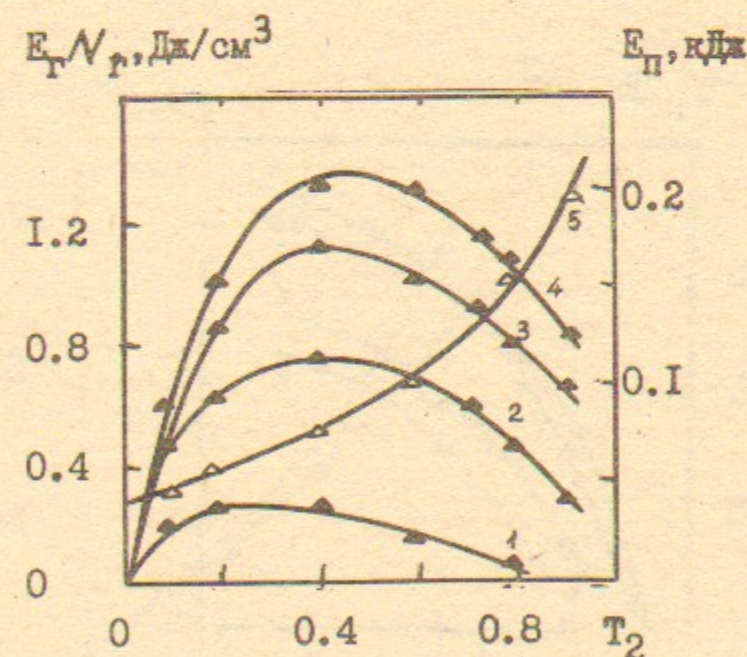


Рис. 4. Зависимости удельной энергии генерации E_g/V_g /1-4/ и пороговой энергии накачки E_p /5/ для ГЛС-22 от коэффициента T_2 для различных $E_H = 150$ /1/, 300/2/, 500/3/ и 650 Дж/4/. $L = 50$ см, $T = 300$ °К.

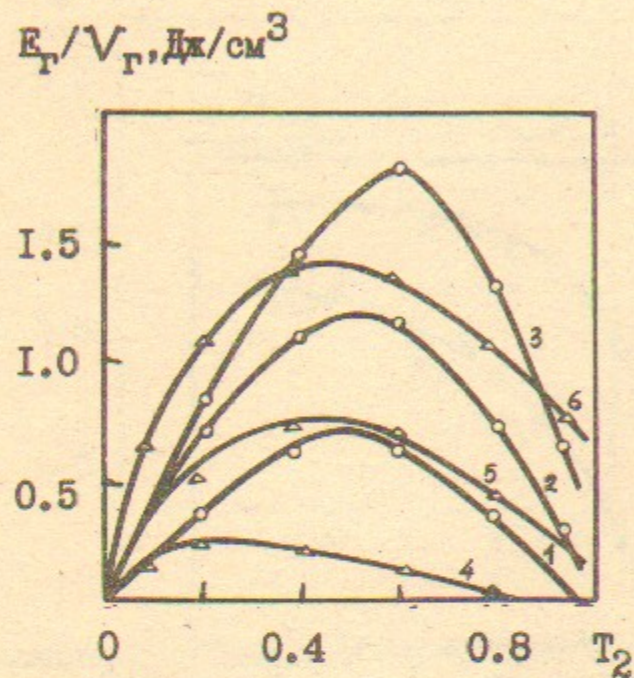


Рис. 5. Зависимости удельных энергий генерации E_T/V_T для КНЭС I /1-3/ и ГЛС-22 /4-6/ от коэффициента T_2 для различных $E_H = 150$ /1,4/, 300 /2,5/ и 650 Дж/3,6/. $L = 50$ см.

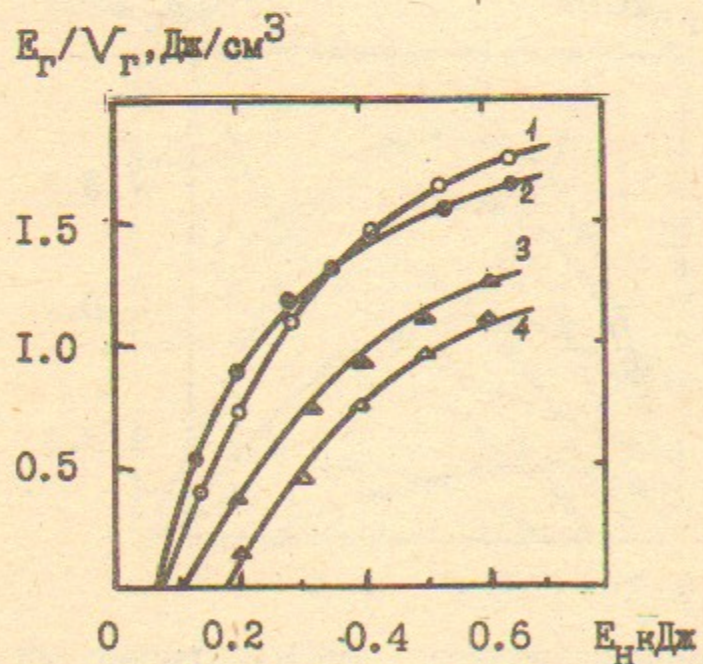


Рис. 6. Зависимости удельных энергий генерации E_T/V_T КНЭС I /1,2/ и ГЛС-22 /3,4/ от энергии накачки E_H при $T_2 = 0.6$ /1/, 0.5 /2,3/, 0.8 /4/. $L = 50$ см.

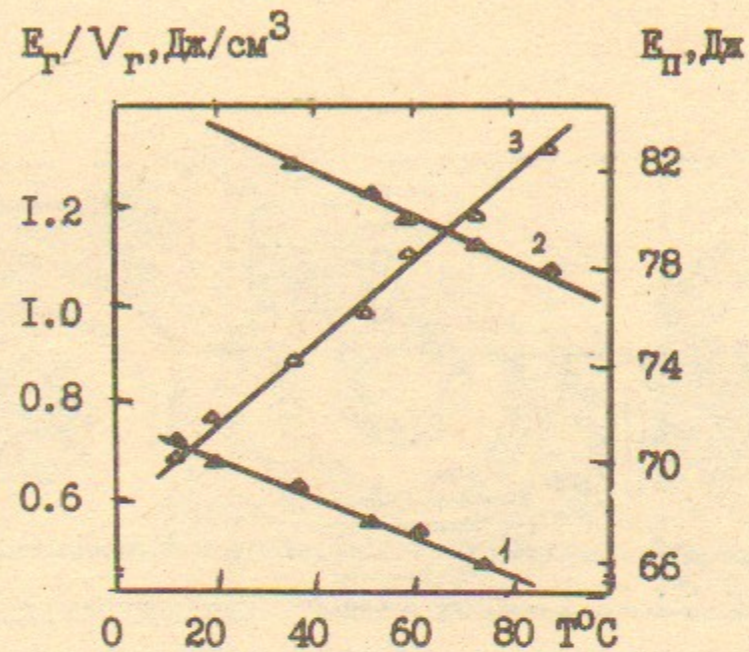


Рис. 7. Зависимости удельной энергии генерации E_T/V_T /1,2/ и пороговой энергии накачки E_H /3/ для ГЛС-22 от температуры активной среды T . $L = 50$ см, $E_H = 250$ /1/, 550 Дж/2/, $T_2 = 0.5$.

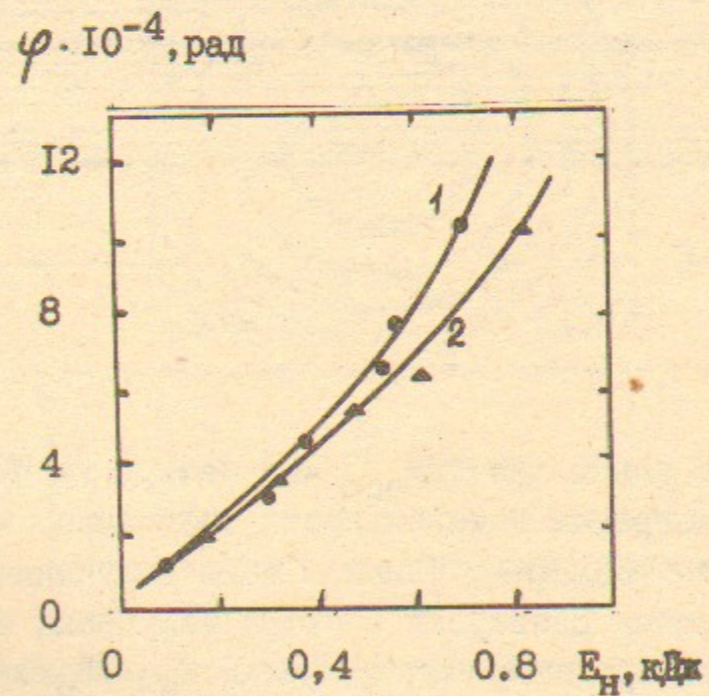


Рис. 8. Зависимости угла расходимости излучения φ от энергии накачки E_H для КНЭС /1/ и ГЛС-22 /2/ $L = 160$ /1/ и 200 см /2/. $T = 300$ К.

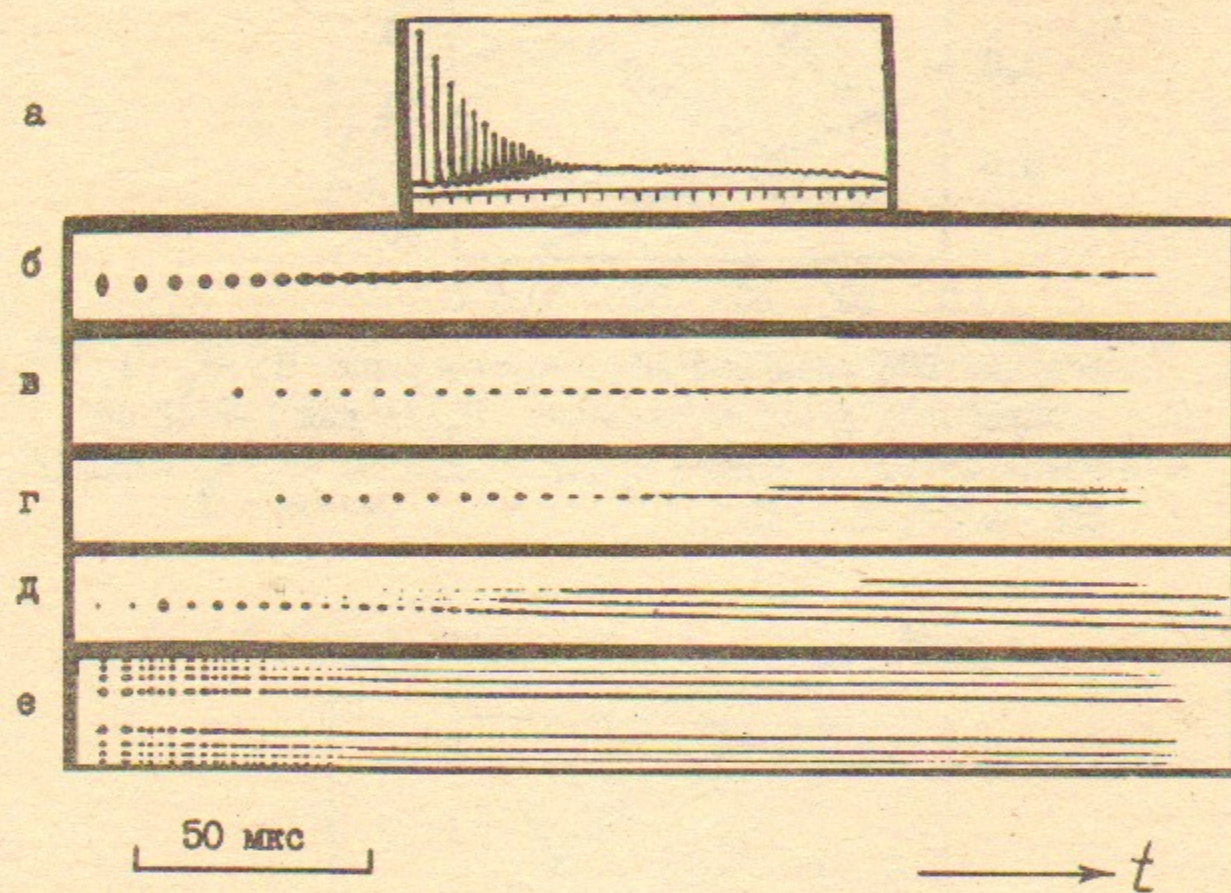


Рис. 9. Параметры генерации TEM_{000} мод лазера на КНФС 2 : а- осциллограмма интенсивности излучения, метки- 10 мкс; б- развертка ближней зоны излучения ; в-д -временые развертки спектра излучения без селекции мод при энергиях накачки $E_H = 2E_{II}/в/$, $3E_{II}/г/$, $5E_{II}/д/$; е-развертка спектра генерации в сложном дисперсионном резонаторе, область дисперсии эталона Фабри-Перо-0.018 нм, $E_H = 5E_{II}$.

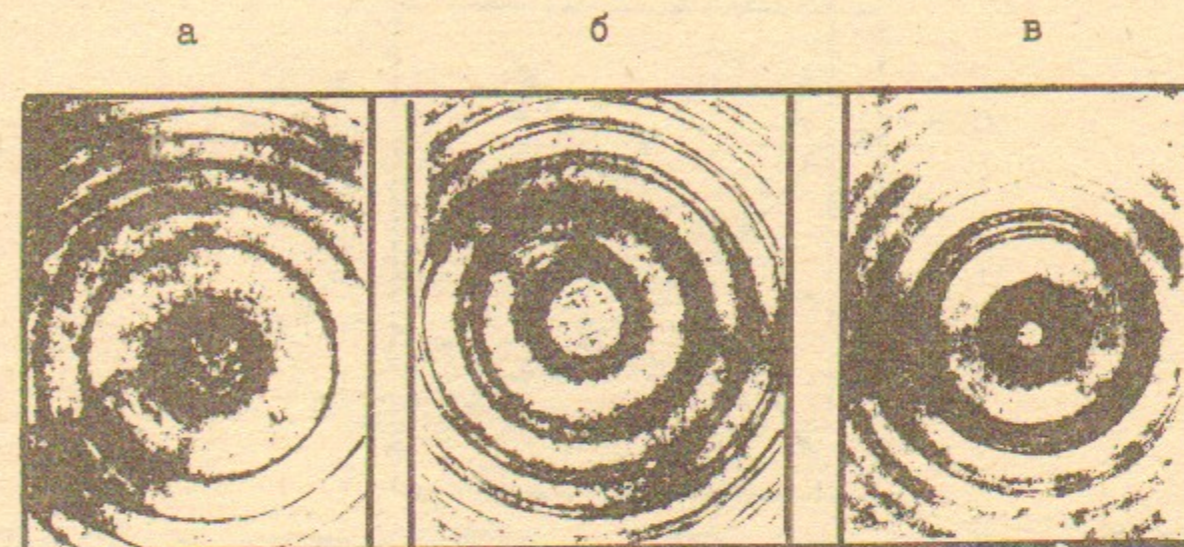


Рис. 10. Интерферограммы интегрального спектра излучения КНФС2 без селекции продольных мод при $E_H = 2E_{II}/а/$ и $3E_{II}/б/$, $5E_{II}/в/$. Область дисперсии интерферометра Фабри-Перо-0.56 нм.

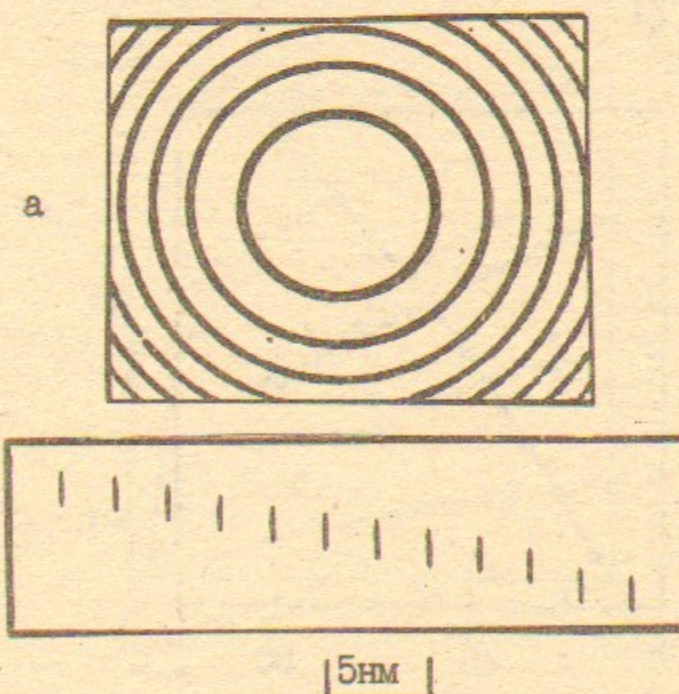


Рис. 11. а-интерферограмма интегрального спектра излучения КНФС2 с селекцией мод; б-последовательность 12 спектрограмм излучения, иллюстрирующая диапазон перестройки длины волны генерации.

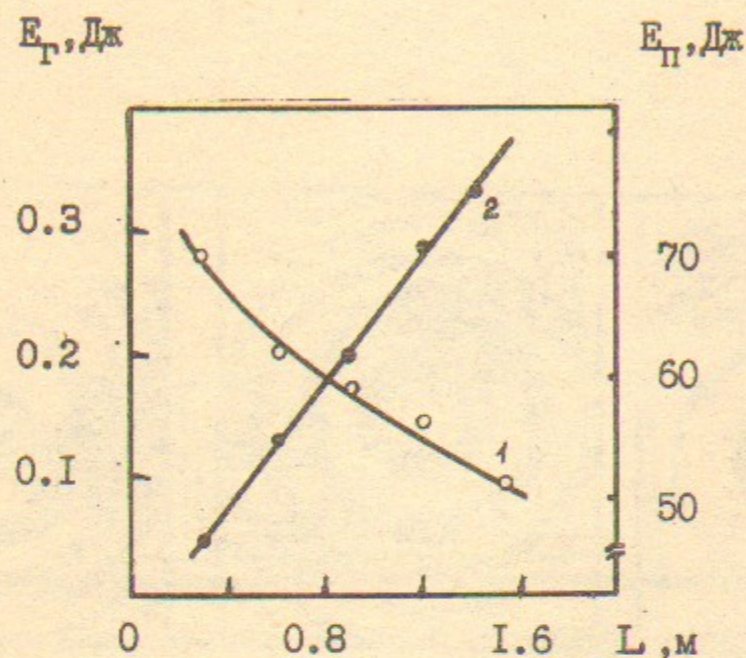


Рис. 12. Зависимости энергии генерации $E_T/1/$ и пороговой энергии накачки $E_{П}/2/$ кристалла LNA от длины резонатора L . $E_H = 350$ Дж, $T_2 = 0.7$, $T = 15^\circ\text{C}$.

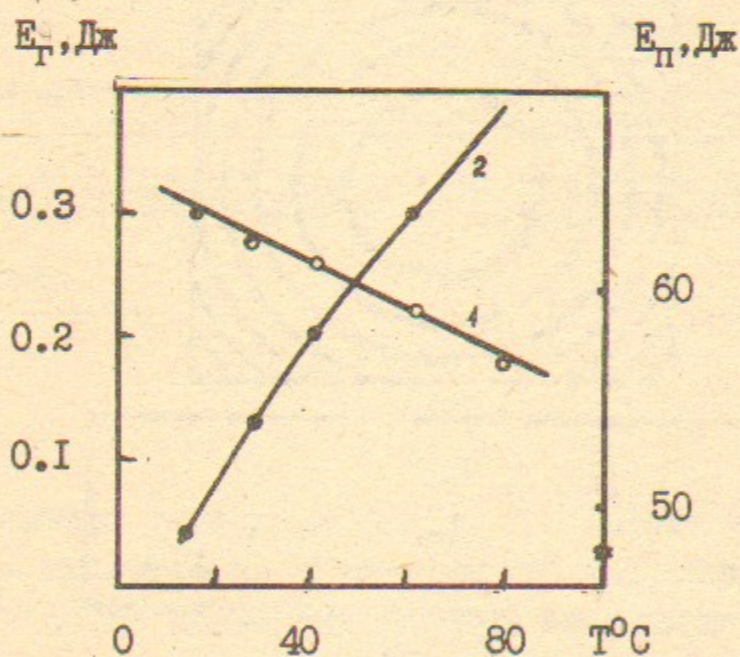


Рис. 13. Зависимости энергии генерации $E_T/1/$ и пороговой энергии накачки $E_{П}/2/$ кристалла LNA от температуры T . $E_H = 350$ Дж, $L = 30$ см, $T_2 = 0.8$.

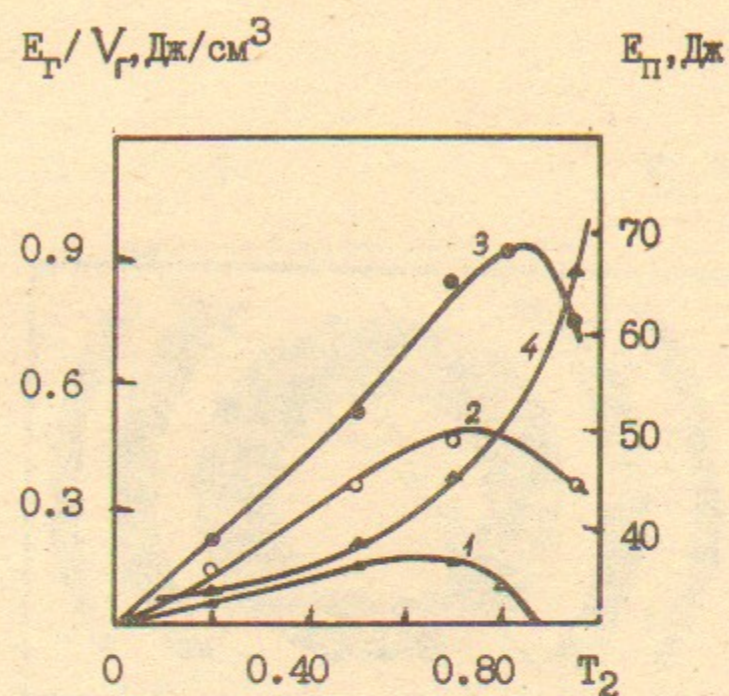


Рис. 14. Зависимости удельной энергии генерации $E_T/V_T/1-3/$ и пороговой энергии накачки $E_{П}/4/$ кристалла Nd: LNA от коэффициента T_2 пропускания выходного зеркала при различных $E_H = 100/1/$, $150/2/$ и 350 Дж/ $3/$. $L = 30$ см, $T = 15^\circ\text{C}$.

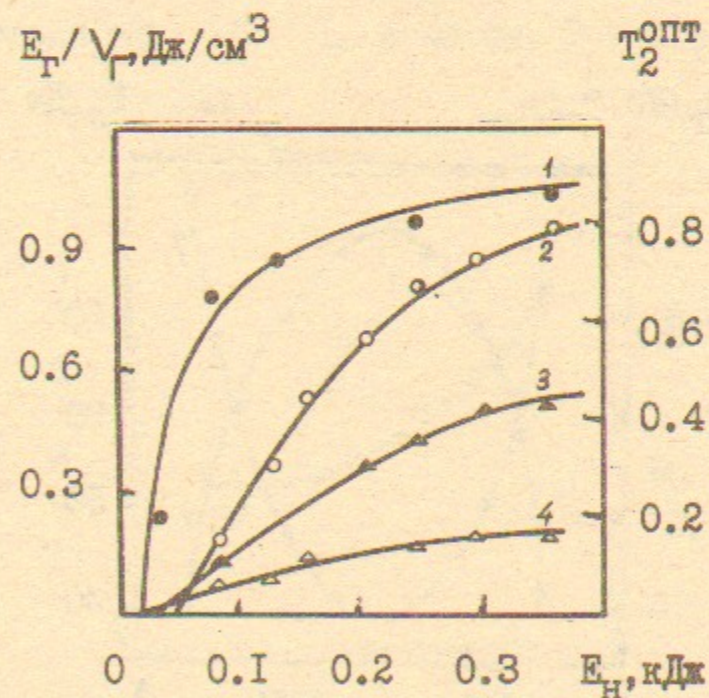


Рис. 15. Зависимости оптимального коэффициента пропускания $T_2^{\text{OPT}}/1/$ и удельной энергии генерации $E_T/V_T/2-4/$ кристалла Nd: LNA от энергии накачки. $T_2 = 0.8/2/$, $0.5/3/$, $0.2/4/$, $L = 30$ см. $T = 15^\circ\text{C}$.

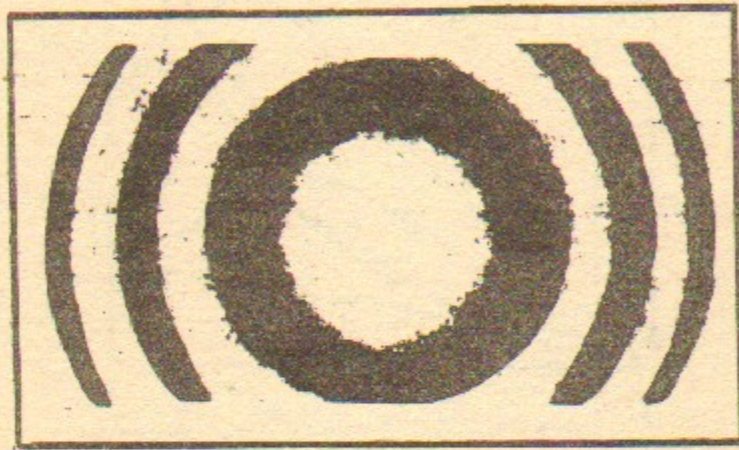


Рис. 16. Интерферограмма интегрального спектра генерации Nd : LNA в отсутствии паразитной селекции мод при $E_H/E_{II} = 1.5$. Область дисперсии интерферометра Фабри-Перо ~ 0.56 нм, $L = 45$ см.

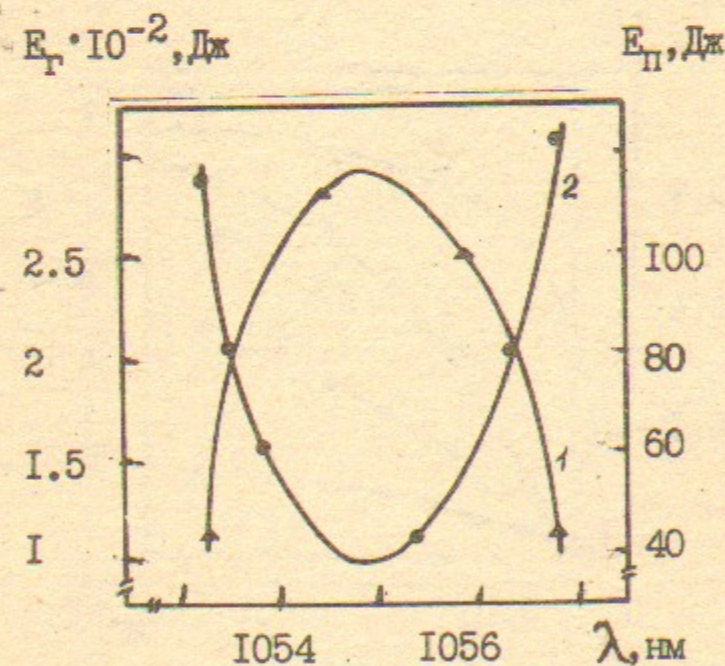


Рис. 17. Зависимости энергии генерации $E_T/I/$ и пороговой энергии накачки $E_{II}/2/$ от длины волны в дисперсионном резонаторе. Область дисперсии селектора -эта - лона Фабри - Перо ~ 5.56 нм, $L = 45$ см, $E_H = 250$ Дж, $T_2 = 0.2$.

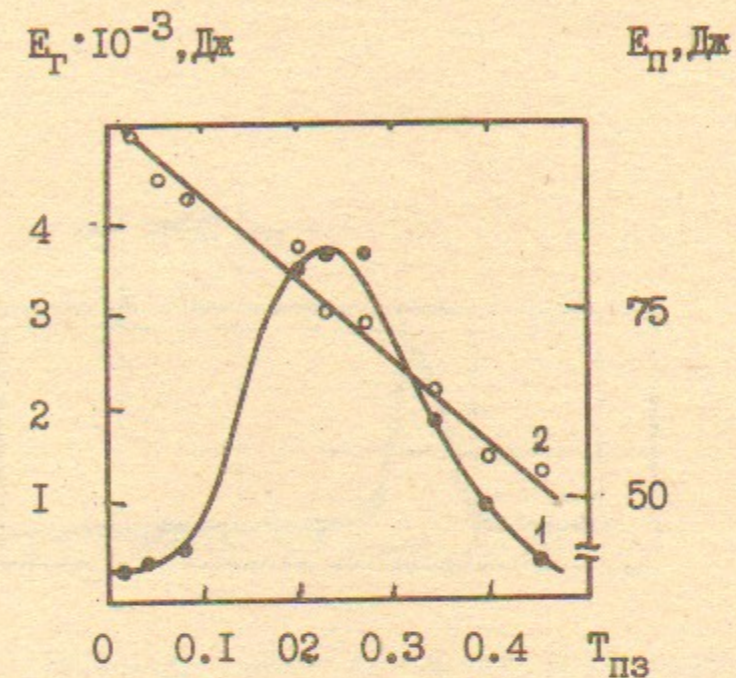


Рис. 18. Зависимости энергии генерации $E_T/I/$ и пороговой энергии накачки $E_{II}/2/$ от коэффициента $T_{ПЗ}$ пропускания пассивного затвора в режиме гигантского импульса Nd : LNA. $L = 40$ см, $T = 0.5$.

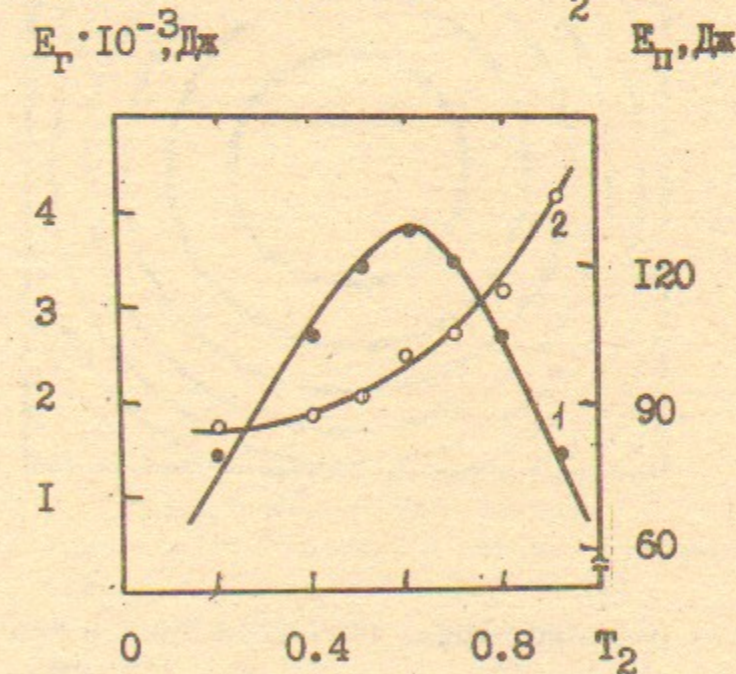
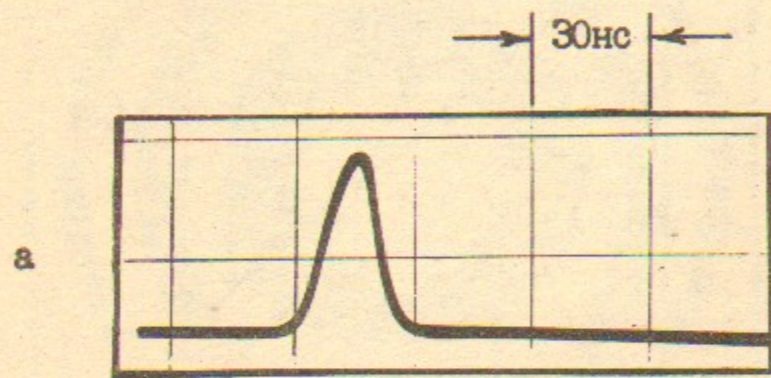
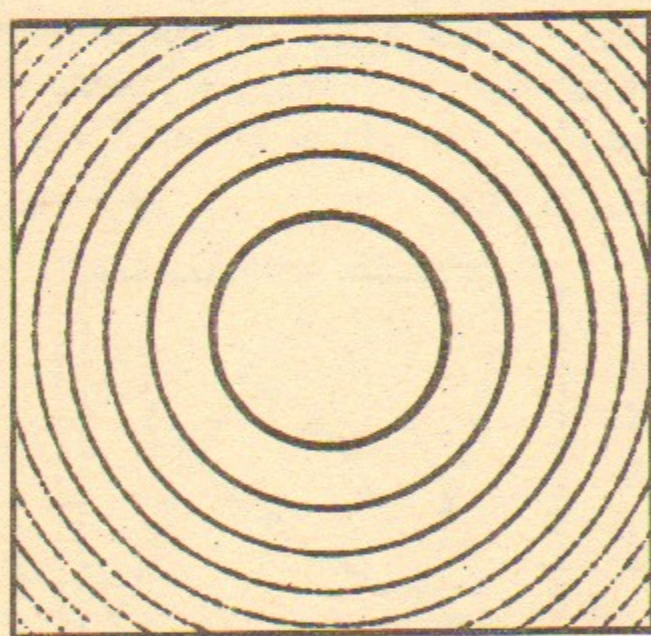


Рис. 19. Зависимости энергии генерации $E_T/I/$ и пороговой энергии накачки $E_{II}/2/$ от коэффициента T_2 пропускания выходного зеркала в режиме гигантского импульса Nd : LNA. $L = 40$ см, $T_{ПЗ} = 0.2$.



а



б

Рис. 20. а-- осциллограмма гигантского импульса $Nd : LNA$.
 $L = 40$ см , $T_2 = 0.6$, $T_{пз} = 0.25$;
 б-- интерферограмма спектра гигантского импульса
 с селекцией мод, область дисперсии интерферометра
 Фабри- Перо -- 0.018 нм

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

Параметры генерации лазеров на ионах неодима в кристалле
 LNA и стеклах КНФС

ИЯФ 93-106

Подписано в печать 26.11. 1993 г.

Формат бумаги 60x90 1/16 Объем 0,9 печ.л., 0,8 уч.-изд.л.

Тираж 150 экз. Бесплатно. Заказ № 106

Обработано на IBM PC и отпечатано на
 ротапринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН,

Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.