

УДК 621.378.325

Исследование возможности генерации и усиления лазерного излучения в образцах керамики $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$

Приведены результаты исследований лазерных параметров образцов керамики из активированного неодимом иттрий-алюминиевого граната ($\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$), произведенных в ИЭФ УрО РАН (г. Екатеринбург). Измерены такие параметры, как время релаксации, коэффициент поглощения на длине волны $\lambda = 806$ нм. На основе полученных данных собран квантрон с диодной накачкой и измерен коэффициент усиления активной среды. Проведенные исследования позволили создать лабораторный макет генератора на образцах керамики $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ производства ИЭФ УрО РАН.

Е. В. Поздняков, И. В. Тимонин

Введение

Исследование и создание твердотельных лазеров на основе лазерной керамики в последнее время занимает важное место в области лазерной техники. О создании первого лазера на $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ керамике сообщалось еще в 1973 году [1]. Энергетические характеристики такого лазера были сравнительно низкими. Их удалось существенно улучшить благодаря созданию высокопрозрачной $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ керамики в середине 1990-х годов [2, 3]. Лазер на этом материале практически не уступал лазеру на основе монокристалла YAG. Сегодня интенсивно ведутся исследования в области нанотехнологий. Одним из важных направлений на этом пути является улучшение методов получения высокопрозрачной керамики (ВПК) из $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ (иттрий-алюминиевый гранат, активированный неодимом), $\text{Nd}^{3+}:\text{Y}_2\text{O}_3$ (оксид иттрия, активированный неодимом) и из других оксидов – активных сред твердотельных лазеров, а также получение образцов с большей апертурой.

Керамика сочетает лучшие свойства лазерных кристаллов и лазерных стекол. Спектроскопические и генерационные свойства керамики близки к таковым для кристаллов того же состава, механические свойства лучше, чем у кристаллов. Оптические потери на поглощение в керамике могут быть сделаны малыми (близко к 10^{-3} см^{-1} на $\lambda = 1064$ мкм) благодаря использованию особо чистых химреактивов. Керамика, в отличие от монокристаллов, может быть получена в форме образцов достаточно больших размеров при обеспечении высокой оптической однородности и возможности введения повышенной концентрации активатора при его однородном или же заранее заданном распределении по объему. Также технологии позволяют создавать композитные структуры с разными активаторными ионами без «склейки». Цены на керамические активные элементы (КАЭ) близки к ценам на монокристаллы такого же состава, но возможность массового их производства позволит значительно снизить цену.

Основной производитель и разработчик в настоящее время – японская фирма Konoshima Chemical Co. Максимальный КАЭ на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом имеет размеры $100 \times 100 \times 20 \text{ мм}^3$.

Применение керамики в качестве активной среды для твердотельных лазеров позволит создавать лазеры с высокой средней мощностью (~100 кВт), лазеры-драйверы, работающие в частотном режиме, для ЛТС.

В настоящей работе представлены результаты исследования образцов лазерной керамики из $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$, которые выполнены в форме дисков, производства ИЭФ УрО РАН (г. Екатеринбург). На данный момент получено 5 элементов диаметром ~10 мм и толщиной ~1,5 мм.

Целью данной работы является измерение лазерных свойств образцов керамики, таких как время релаксации, коэффициент поглощения на длине волны $\lambda = 806 \text{ нм}$, коэффициент усиления; получение лазерной генерации и измерение ее параметров, таких как длительность генерации, энергия генерации, длина волны излучения.

1. Измерение лазерных параметров образцов керамики

1.1. Измерение времени релаксации

Методика измерения времени релаксации возбужденного состояния Nd^{3+} заключалась в следующем. Источником накачки активного элемента служил лазерный диод (схема экспериментального стенда представлена на рис. 1). Импульс накачки имел прямоугольную форму (рис. 2). Длина волны излучения составляла 806 нм и совпадала с полосой поглощения исследуемых сред (рис. 3).

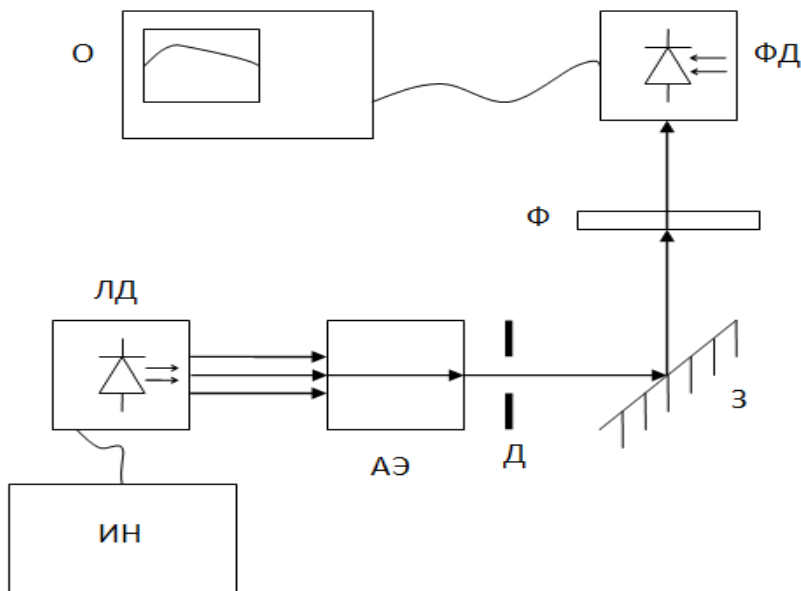


Рис. 1. Схема стенда для измерения времени релаксации возбужденного состояния Nd^{3+} в исследуемых образцах

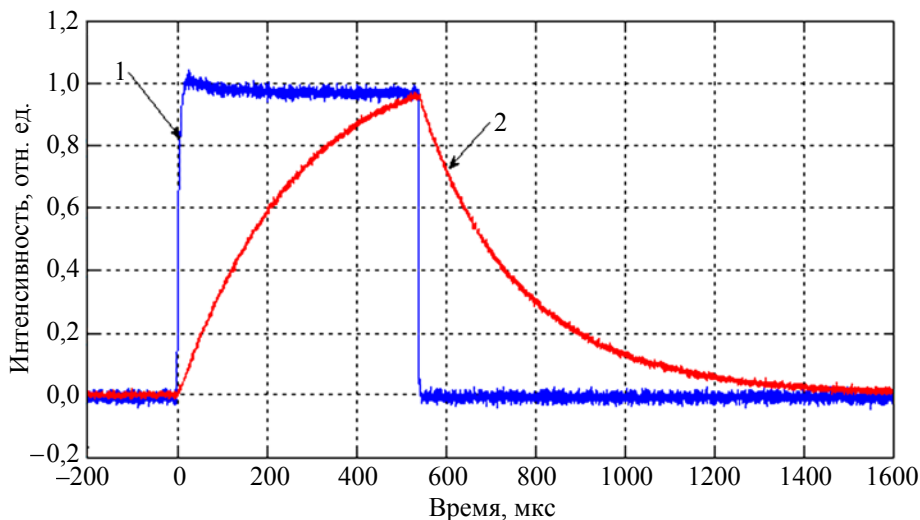


Рис. 2. Осциллограммы светового импульса накачки (1) и сигнала люминесценции исследуемого образца (2)

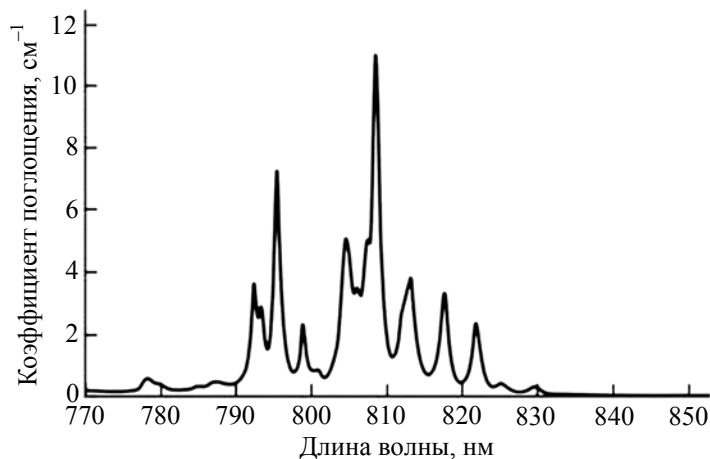


Рис. 3. Спектр поглощения керамики Nd³⁺:YAG [4]

На выходе исследуемого образца излучение люминесценции ограничивалось диафрагмой, селектировалось диэлектрическим зеркалом, фильтром ИКС-5 и направлялось на приемник излучения, фотодиод 9Э-111, работающий в режиме фотосопротивления. Сигнал фотодиода регистрировался осциллографом.

Перед тестированием образцов была проведена аттестация линейности отклика схемы регистрации в диапазоне изменения рабочего сигнала, который при измерении времен релаксации составлял 5–120 мВ.

При обработке осциллограмм время релаксации определялось по формуле

$$\tau = \frac{\Delta t}{\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right)}, \quad (1)$$

где Δt – интервал регистрации, A_1 , A_2 – уровень сигнала детектора на краях интервала регистрации. Вычисления проводились в интервале $\Delta t = 250$ мкс. Точность определения τ оценивается в 5 %.

Величина τ для исследуемых элементов была определена в 225 мкс. Разброс значений от элемента к элементу не превышал погрешности измерений.

1.2. Измерение коэффициента поглощения на длине волны накачки $\lambda = 0,806$ мкм

Схема стенда, предназначенного для измерения поглощения накачки активными элементами, представлена на рис. 4. Излучение лазерного диода (ЛД) с длиной волны 806 нм падает на боковую грань активного элемента под углами, близкими к нормали, что обеспечивается диафрагмой (Д). Прошедшее образец излучение селективируется светофильтрами (Ф) и регистрируется фотоприемником (ФД).

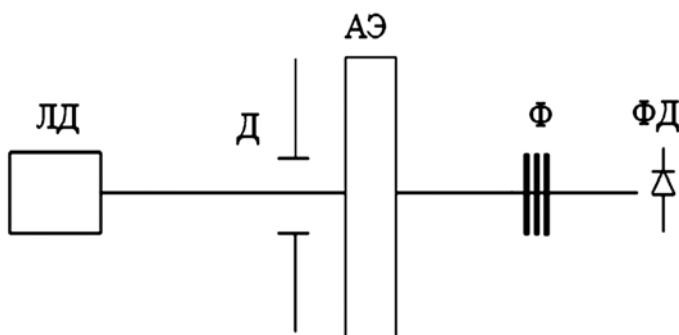


Рис. 4. Схема стенда для измерения коэффициента поглощения накачки

Осциллограммы отклика фотодиода ФД приведены на рис. 5. Прошедшая энергия излучения составила $\sim 50\%$ от падающей энергии. Коэффициент поглощения равен $0,32 \text{ мм}^{-1}$. Погрешность измерений – 10 %.

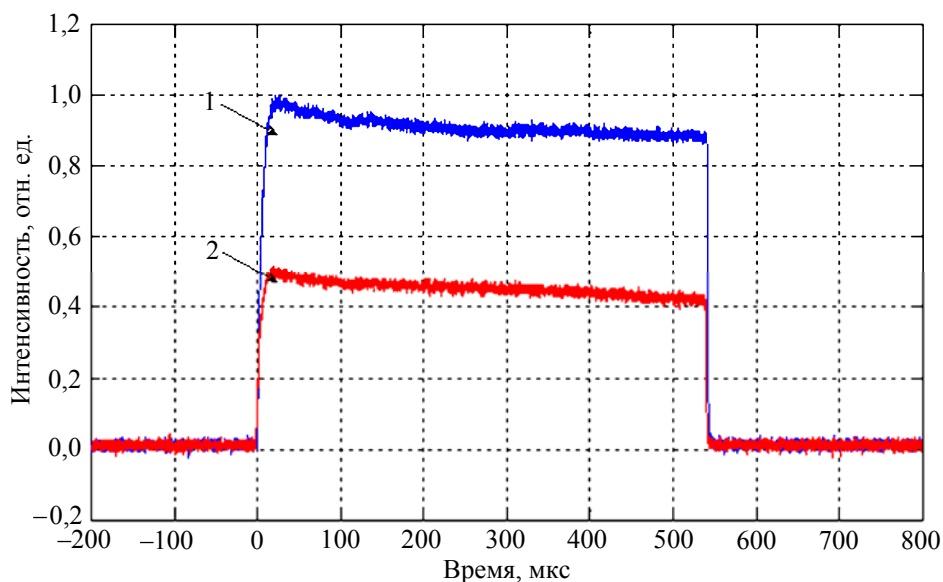


Рис. 5. Отклик фотодиода: 1 – без активного элемента; 2 – излучение, прошедшее через керамику

2. Экспериментальный стенд для измерения коэффициента усиления

Для проведения экспериментов по измерению коэффициента усиления излучения был изготовлен квантрон с диодной накачкой. Эскиз квантрона представлен на рис. 6.

Источником излучения накачки являлись сборки лазерных диодов СЛМ-7-4 (рис. 7) производства ОАО «НПП "ИНЖЕКТ"» (г. Саратов) со следующими характеристиками:

- поверхность свечения матрицы – 20×25 мм²;
- количество линеек – 4×50 шт.;
- длина волны излучения – 803–806 нм;
- длительность импульса – до 550 мкс;
- ток накачки – 2×70 А;
- энергия излучения – 2 Дж при 500 мкс;
- выходная пиковая мощность сборки – 4 кВт при КПД преобразования электрической энергии в световую 48 %.

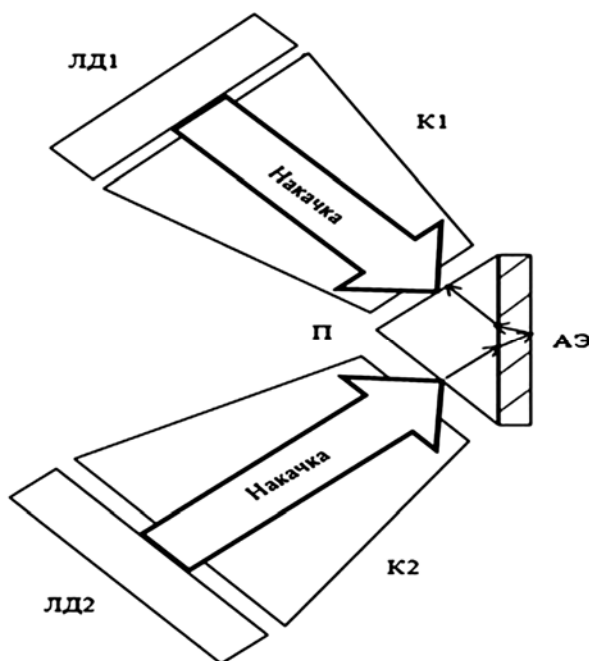


Рис. 6. Эскиз квантрона

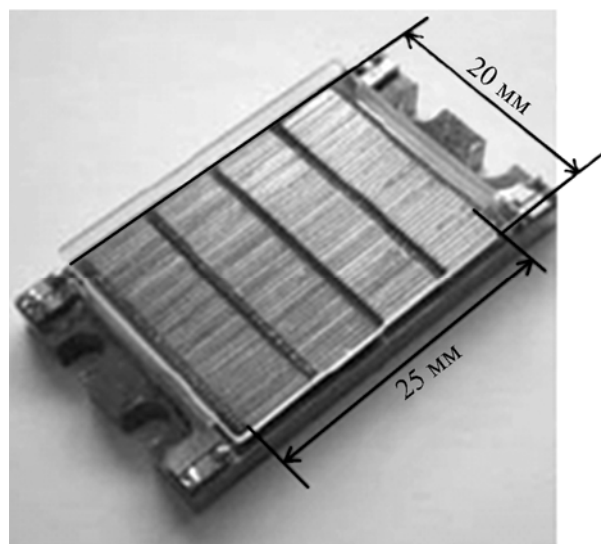


Рис. 7. Сборка лазерных диодов СЛМ-7-4

Для доставки излучения от лазерных диодов к активным элементам использовались концентраторы, которые предварительно были рассчитаны с учетом расходимости излучения диодов в направлении быстрой и медленной оси и геометрических размеров диодных матриц и самих образцов керамики. Сами концентраторы были изготовлены из фольги *mitgot*, аналогичной используемой в качестве отражателей ламповых кассет установки «Луч». Вся система накачки состояла из двух диодныхборок и двух концентраторов. Импульс накачки имел прямоугольную форму, длительность импульса составляла ~ 250 мкс. Суммарная энергия излучения лазерных диодов составила 2 Дж. Суммарная энергия на выходе с концентраторов составила ~ 700 мДж. Значение КПД передачи энергии накачки составило ~ 35 %.

Сложность ввода энергии накачки в элемент обуславливалась его геометрическими размерами (толщина $\sim 1,5$ мм, диаметр ~ 10 мм, массовая доля Nd^{3+} 1 %). Поэтому с целью увеличения запасенной энергии в схему была введена прямоугольная призма (рис. 6). Между гипотенузной гранью призмы и АЭ был создан оптический контакт. Ввод излучения накачки осуществлялся по двум направлениям через катетные грани. Это позволило удвоить энергию накачки без потери эффективности (увеличение входной апертуры концентратора привело бы к уменьшению пропускания). В то же время, поскольку на границе керамика – воздух выполняется условие полного внутреннего отражения, ввод накачки через катетные грани призмы обеспечил два прохода излучения по образцу, тем самым увеличив поглощенную энергию в нем. Для рабочего излучения призма служила уголковым отражателем. Использование призм имеет ряд преимуществ. Во-первых, призмные резонаторы менее требовательны к юстировке. Во-вторых, при неравномерном распределении усиления использование призм приводит к выравниванию интенсивности излучения. Также использование призм выгодно при наличии aberrаций (светорассеяния). В классических резонаторах излучение, пройдя через содержащую источники aberrаций среду, отражается от зеркала и проходит те же неоднородности повторно. В результате искажения увеличиваются. Замена зеркала на призму уничтожает корреляцию между структурой волны и расположением неоднородностей, и потери оказываются меньшими. Так как исследуемый нами образец имел не лучшее качество, эти достоинства призм могут оказаться полезными.

Измерение коэффициента усиления проводилось в двухпроходной схеме (рис. 8). Источником зондирующего излучения служил непрерывный твердотельный лазерный модуль с диодной накачкой с длиной волны $\lambda = 1,064$ мкм. Для регистрации рабочего излучения в схеме использовались диафрагмы, пространственный фильтр и оптические фильтры.

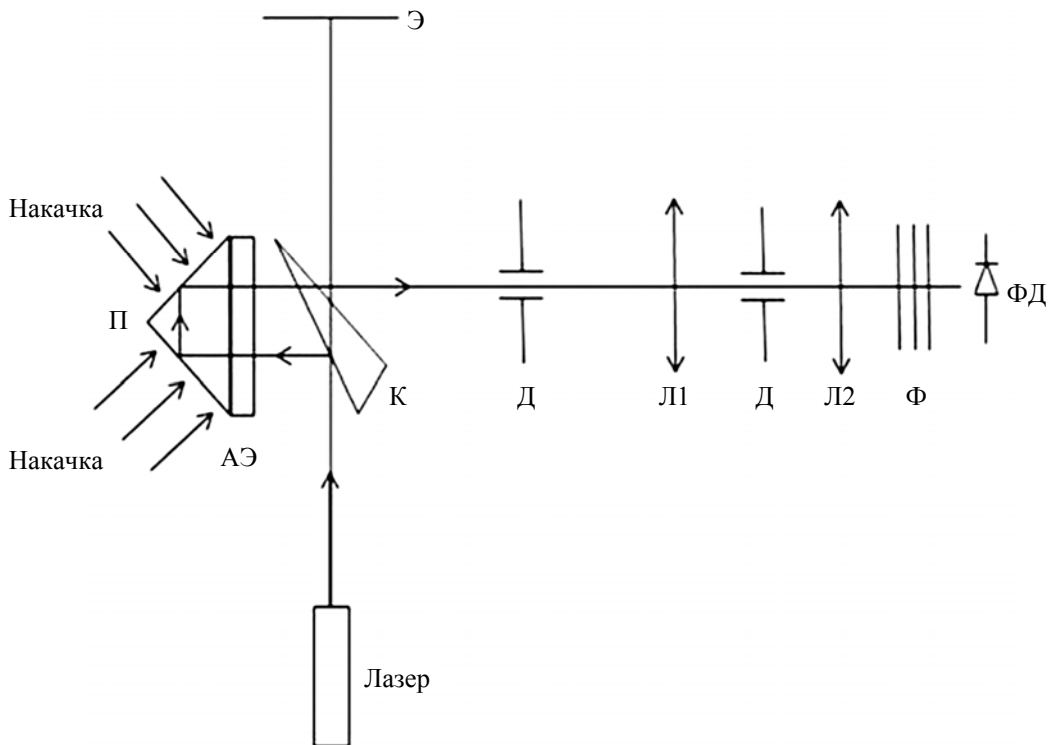


Рис. 8. Стенд измерения коэффициента усиления

Измерения проводились следующим образом. Во время работы лазерного модуля включалась система накачки, и сигнал регистрировался фотодиодом. Предварительно была проведена калибровка системы регистрации. Коэффициент усиления рассчитывался на один проход по элементу. Кривая зависимости коэффициента усиления от длительности накачки представлена на рис. 9. Анализ графика показывает, что максимальный коэффициент усиления в образце составил 1,3. Линейный коэффициент равен $1,75 \text{ см}^{-1}$.

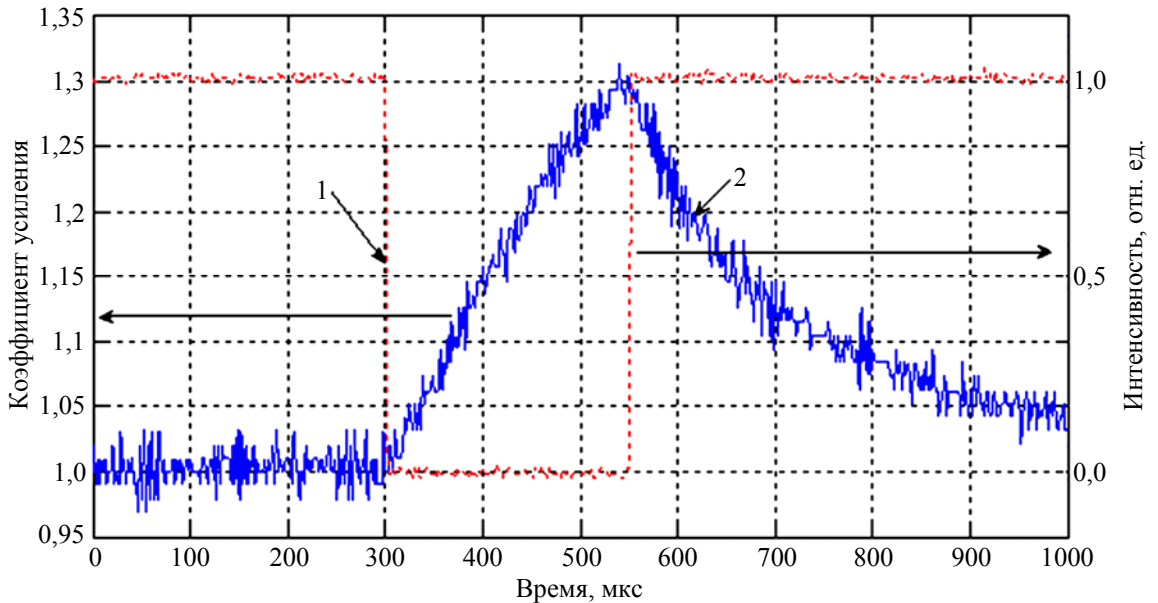


Рис. 9. Импульс накачки (1) и кривая усиленного зондирующего сигнала (2)

3. Получение и исследование генерации

Для исследования генерации усилитель был переделан в генератор путем добавления диэлектрического зеркала ($R = 90 \%$). Схема генератора представлена на рис. 10.

Резонатор состоял из призмы и выходного зеркала. В первых опытах по получению генерации на выходе была получена энергия ~ 2 мДж. Предположительно такая малая энергия получена из-за того, что в диаметральной направлении элемента, который намного больше поперечного, был преодолен порог генерации, где зеркалами служили ребра самого образца, и происходил сброс инверсии. В следующих опытах на ребра элемента был нанесен слой силиконового герметика, который послужил кладдингом, т. е. поглотителем излучения. После этого была получена генерация излучения с энергией на выходе ~ 20 мДж, измеренная с помощью калориметра. На рис. 11 приведены временные параметры генерации.

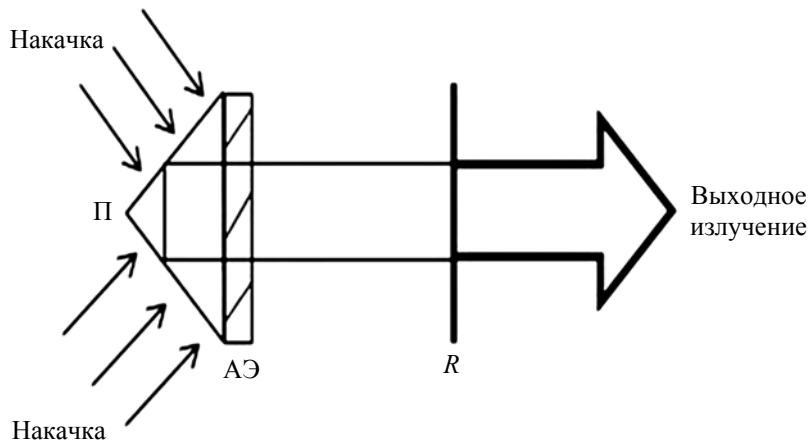


Рис. 10. Схема генератора

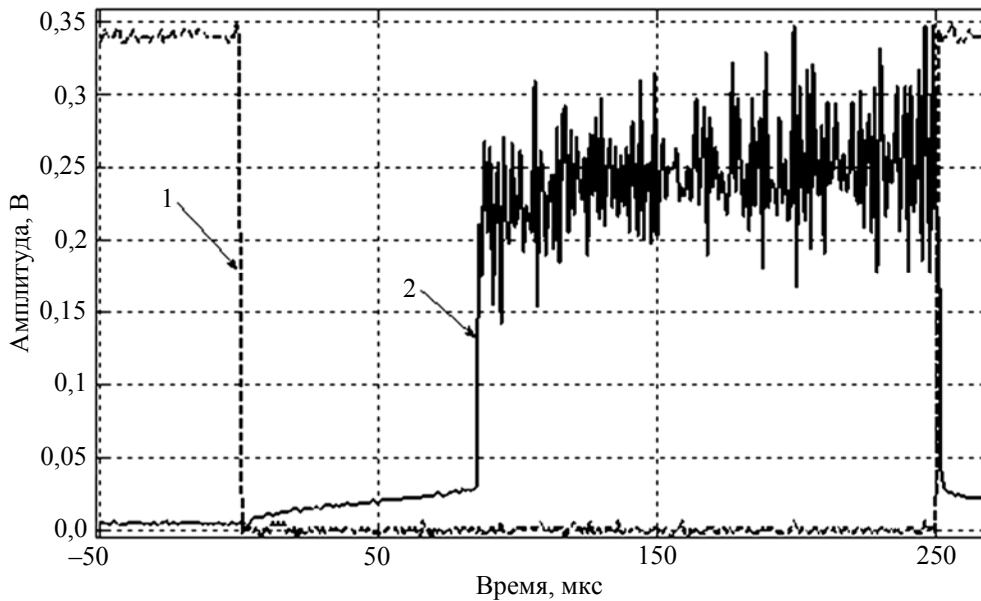


Рис. 11. Импульс накачки (1) и отклик фотодиода (2)

Данные экспериментов совпадают с расчетами. Расчетное значение коэффициента усиления к моменту времени начала генерации определялось по формуле

$$K = \frac{1}{T\sqrt{R}}, \quad (2)$$

где R – произведение коэффициентов отражения зеркал, T – произведение коэффициентов пропускания оптических элементов резонатора. Коэффициент усиления составил $\sim 1,15$.

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что начало генерации происходит на 90 мкс, когда преодолен пороговый коэффициент усиления 1,15. Длительность генерации – 160 мкс, энергия генерации – 20 мДж (мощность 125 Вт). Погрешность измерения энергии

генерации составила 10 %. Удельная запасенная энергия – 1,1 Дж/см³. Для всего накачиваемого объема активного элемента полная запасаемая энергия составила 170 мДж, КПД преобразования запасенной энергии в энергию генерации – 12 %.

4. Измерение длины волны лазерного излучения

Далее была измерена длина волны излучения в режиме свободной генерации при помощи спектрометра. Перед проведением эксперимента спектрометр калибровался с помощью He-Ne лазера. Полученные данные приведены на рис. 12.

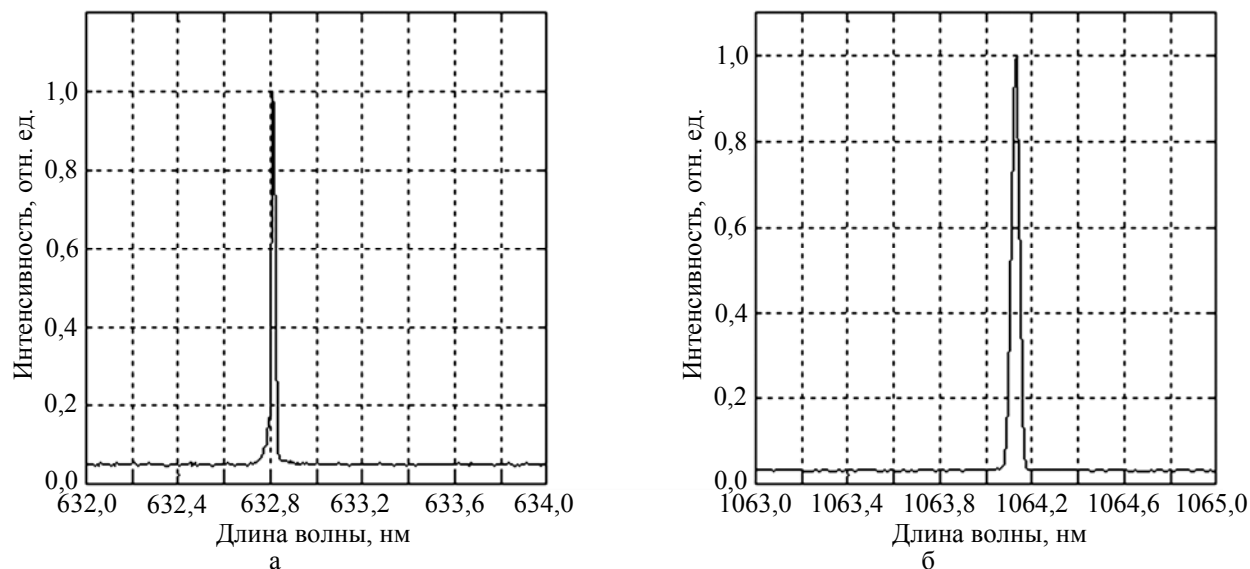


Рис. 12. Длина волны излучения He-Ne $\lambda = 632,81$ нм (калибровка) (а) и длина волны излучения керамики (б)

Данные показывают, что длина волны излучения образца керамики составила $\sim 1064,16$ нм. Точность определения положения линии равна 30 пм. Ширина линии составляет 0,02 нм по уровню 0,5, что является аппаратной функцией спектрометра.

Заключение

Проведены исследования полученных образцов лазерной керамики Nd³⁺:YAG. Измерено время релаксации, которое составило 225 мкс (погрешность измерений 5 %). Коэффициент поглощения на длине волны накачки равен 0,32 мм⁻¹ (погрешность измерений 10 %). Измерен коэффициент усиления среды, который составил 1,3 (линейный коэффициент усиления – 1,75 см⁻¹). Получена генерация длительностью 160 мкс с энергией 20 мДж (мощность – 125 Вт). КПД преобразования запасенной энергии в энергию генерации – 12 %. Длина волны излучения ~ 1064 нм.

Список литературы

1. Greskovich C., Chernoch J. P. // J. Appl. Phys, 1973. Vol. 44, N 10. P. 4599–4606.
2. Ikesue A. et al. // J. Am. Ceram. Soc., 1995. Vol. 78, N 1. P. 1033–1040.
3. Ikesue A. et al. // J. Am. Ceram. Soc., 1995. Vol. 78, N 1. P. 225–228.
4. Bisson J.-F., Ueda K. // Resent Res. Devel. Appl. Phys., 2004. Vol. 7. P. 475–496.

Possibility investigation of laser radiation oscillation and amplification in ceramic samples Nd³⁺:YAG

E. V. Pozdnyakov, I. V. Timonin

The results of investigations of laser parameters ceramic samples neodymium yttrium-aluminum garnet (Nd:YAG) produced by the Institute of Electrophysics, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg are given. Such parameters as a lifetime, absorption coefficient at a wavelength 806 nm are measured. Based on the data a diode-pumped laser head is created and a gain of the active medium is measured.

Studies have helped to create laboratory oscillator prototype based on ceramic samples Nd:YAG produced by the Institute of Electrophysics, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg.