

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ КВАНТРОНА С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ И $Yb^{3+}:YAG$ АКТИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

*В. А. Островский, А. В. Демьянов, К. Н. Макаров, И. С. Макогон, М. В. Путилин  
и М. И. Пергамент*

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» г. Москва, г. Троицк

## Введение

Современный тренд создания импульсно-периодического драйвера лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) основан на использовании диодной накачки и газового (криогенного) охлаждения активных элементов. По целому ряду соображений активной средой таких лазерных систем чаще всего выбирается  $Yb:YAG$ . Иттрий-алюминиевый гранат, легированный иттербием ( $Yb:YAG$ ), считается одним из наиболее подходящих материалов для активной среды импульсных лазеров с высокой средней мощностью, поскольку обладает совокупностью важных свойств: относительно большим временем жизни возбуждённого состояния (1 мс), значительной теплопроводностью, малым квантовым дефектом, оптимальным значением сечения вынужденного излучения. Типичный представитель такого подхода лазерная система DiPOLE [1], разработанная в Резерфордской лаборатории, Дидкот, Великобритания. Как известно, эта лазерная система состоит из ряда предусилителей и силового блока с криогенным охлаждением. Для того чтобы достичь энергии насыщения, то есть иметь возможность извлечь всю энергию, запасённую в инверсной населённости, на вход силового блока необходимо подавать импульс по крайней мере с энергией 100 мДж, чтобы достичь в импульсно-периодическом режиме хотя бы 10 Дж выходной энергии каждого импульса.

Однако, энергия импульсов задающих генераторов, реализующих требования на пространственно-временную форму ЛТС драйвера, как правило, не превышает нескольких микроджоулей. Это значит, что стоит вопрос об их усилении на несколько порядков величины. В этой связи заметим, что существует серийный выпуск усилительных устройств (квантронов) – систем предусиления, выпускаемых на производствах НПП «Инжент» и ООО «Лассард». Серийные квантроны работают на длине волны 1064 нм с диодной накачкой активных элементов  $Nd:YAG$ . Нами была рассмотрена возможность использования квантронов, изготавливаемых серийно, но с изменением длины волны накачки (940 нм) и заменой активных элементов из  $Nd:YAG$  на  $Yb:YAG$ . Эти квантроны были изготовлены согласно нашему техническому заданию.

Изучение их физико-технических характеристик и создание на этой основе импульсно-периодических усилителей есть тема настоящего доклада.

## Аппаратура и методы измерения

Исследуемый стержневой усилитель (квантрон) представляет собой компактное устройство с активным элементом (АЭ) из кристалла  $Yb:YAG$  с концентрацией иттербия 1,1 %, диаметром 5 мм и длиной 105 мм. АЭ помещен в кварцевую трубку диаметром 1 см – водяной канал охлаждения. Вокруг располагаются 5 диодных матриц накачки, излучающих на длине волны  $\lambda = 940$  нм, с суммарной мощностью излучения ~25 кВт. Расчеты показывают, что эта мощность близка к оптимальной для накачки кристалла  $Yb^{3+}:YAG$  с концентрацией легирования иттербием 1,1 %. Внешний вид и схематичное изображение квантрона показано на рис. 1.

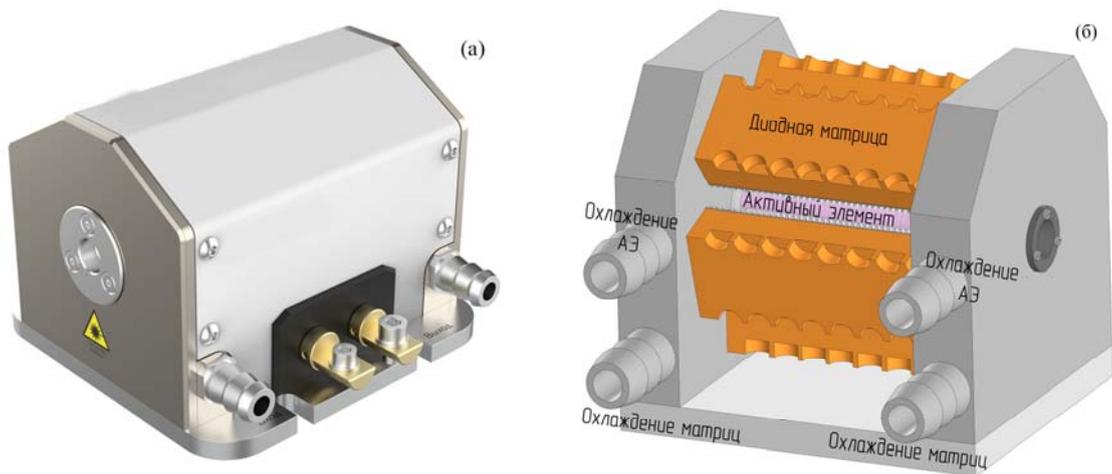


Рис. 1. Внешний вид квантрона (а) и схематичное изображение квантрона со снятой крышки (б)

Питание матриц осуществлялось с помощью источника *SF315* компании *FEDAL*, а охлаждение чиллером *HRS050* компании *SMC* с мощностью охлаждения 5 кВт, поддерживающего температуру с точностью 0,2°C. Измерения спектральных характеристик диодных матриц и излучения люминесценции проводилось с помощью спектрометра *Колибри – 2* (спектральный диапазон в пределах от 920 до 1040 нм). Распределение люминесценции на торце активного элемента, обуславливающее пространственные искажения усиливаемого луча измерялось путем перестроения изображения торца активного элемента в CCD-камеру *BC106N-VIS/M* компании *ThorLabs*. И, наконец, измерение коэффициента усиления по слабому сигналу. Эта характеристика является одной из важнейших, поскольку обуславливает потенциал усилительного устройства. Для измерения использовались 2 калориметра *PE50-DIF-C* и портативные измерители энергии *Nova II* компании *Ophir*.

### Экспериментальные результаты

Исследование характеристик излучения диодных матриц и люминесценции активных элементов проводилось при различных токах накачки, разных температурах воды, охлаждающей матрицы и активные элементы, и разной частоте повторения импульсов.

Зарегистрированные, с помощью спектрометра *Колибри – 2* данные представлены на рис. 2 и 3.

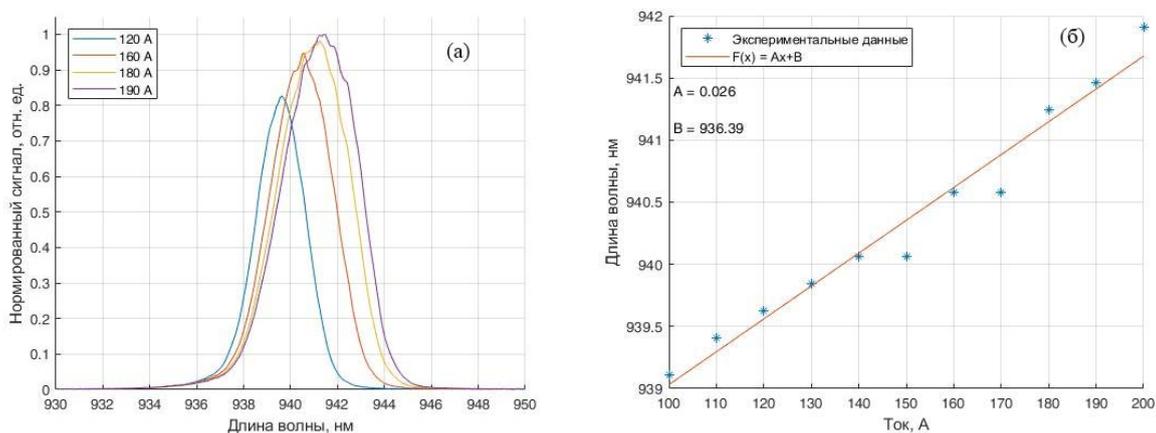


Рис. 2. Спектр излучения диодных матриц при разных токах (а) и зависимость длины волны излучения диодной матрицы в максимуме интенсивности от тока накачки (б)

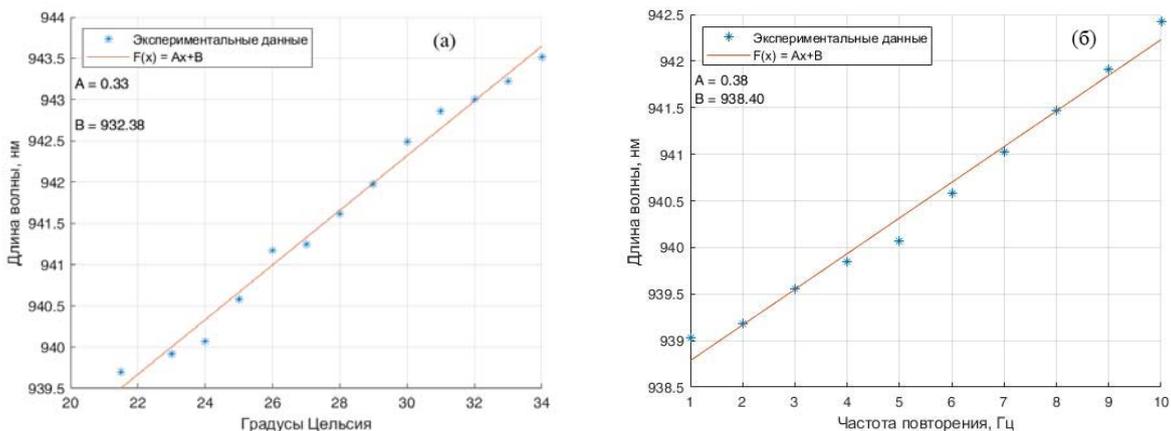


Рис. 3. Зависимость длины волны в максимуме интенсивности спектра излучения диодной матрицы от ее температуры (а) и от частоты повторения импульсов (б)

Как видно из рисунков смещение длины волны в максимуме интенсивности излучения диодных матриц линейно зависит от каждого из перечисленных выше параметров. Аппроксимации этих зависимостей:  $\lambda_{\max} = 0,026 \cdot I + 936,39$ ;  $\lambda_{\max} = 0,33 \cdot T + 932,38$ ;  $\lambda_{\max} = 0,38 \cdot fn + 938,4$ , где  $I$  – ток накачки матрицы,  $T$  – ее температура,  $fn$  – частота повторения импульсов.

Из приведенных выше данных следует, что изменение тока накачки, увеличивающее или уменьшающее интенсивность излучения матрицы или изменение частоты повторения импульсов, приводит к сдвигу спектра со значения 940 нм. Изменение спектра должно быть скомпенсировано температурой воды, охлаждающей диодную матрицу.

Полученный в результате эксперимента спектр люминесценции активного элемента представлен на рис. 4.

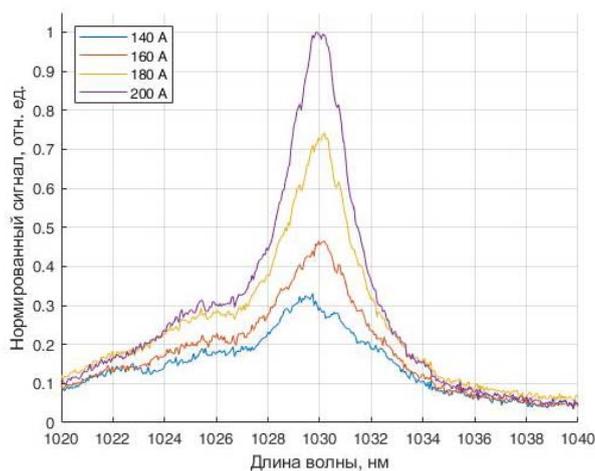


Рис. 4. Спектр люминесценции

Как видно из рис. 4 спектр люминесценции активного элемента не зависит от тока накачки.

На рис. 5 представлена форма импульса люминесценции во времени, зарегистрированная с помощью фотодиода ФД-24К. Как следует из рисунка, люминесценция линейно растет на протяжении длительности импульса накачки и экспоненциально падает при ее прекращении. Из рисунка следует также, что длительность процесса накачки могла бы быть увеличена – просто длительность генерации используемого нами источника тока (SF315) ограничена значением 1,5 мс.

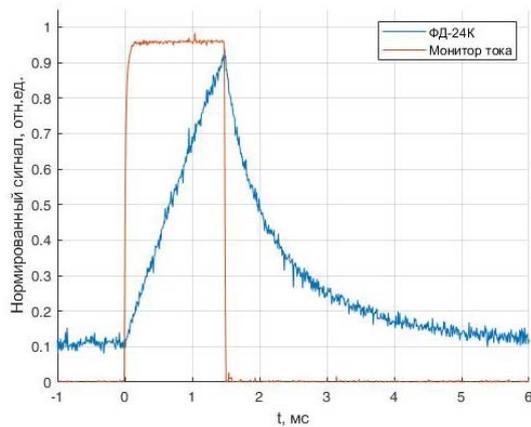


Рис. 5. Формы импульса люминесценции во времени

Измерение пространственного распределения люминесценции проводилось с помощью камеры *BC106N-VIS/M* компании *ThorLabs*. На рис. 6 представлены результаты измерений.

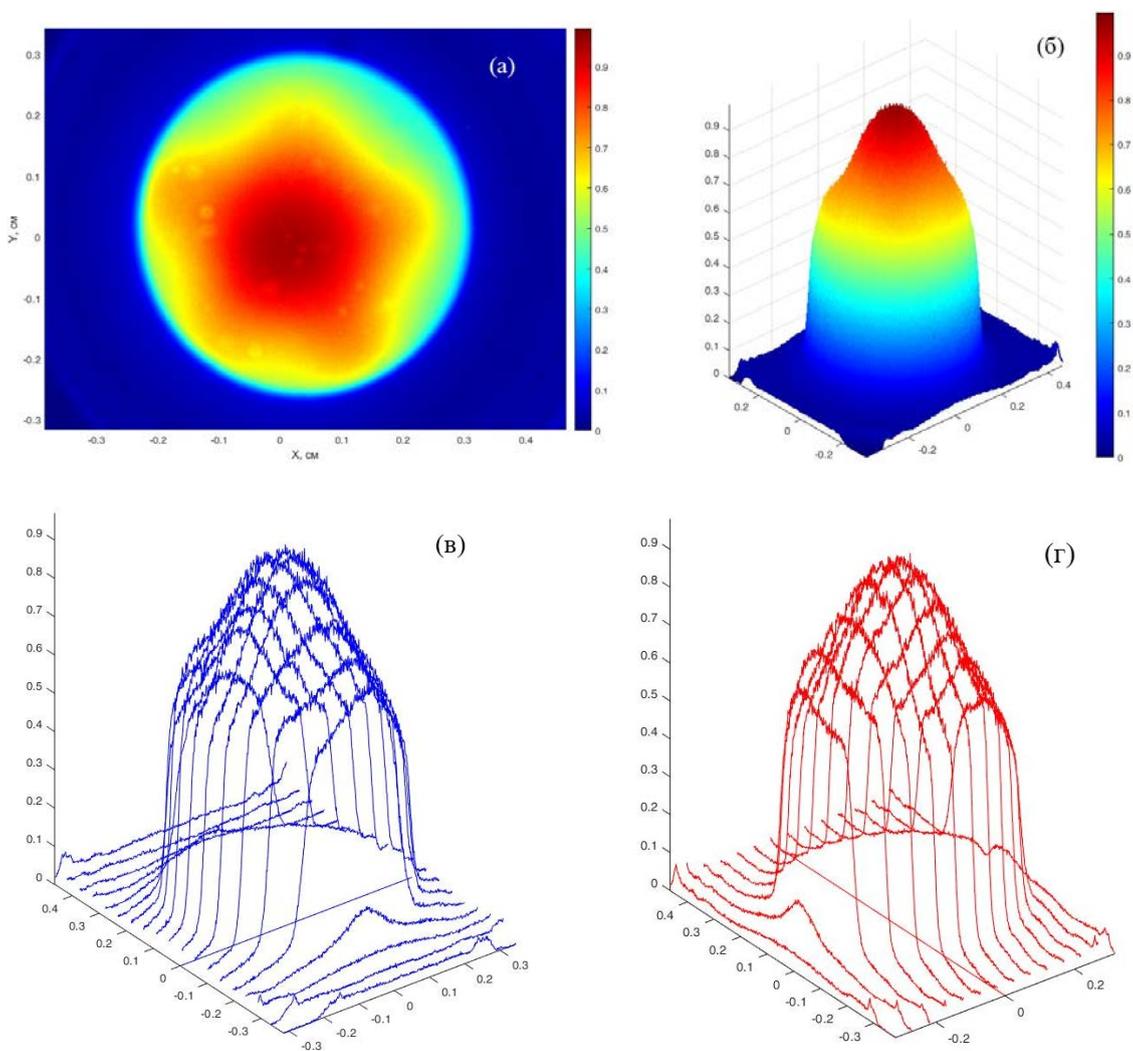


Рис. 6. Пространственное распределение люминесценции (а), трехмерное распределение люминесценции (б), сечения пучка по оси Y (в) и по оси X (г)

Измерения коэффициента усиления по слабому сигналу проводились при различных длительностях импульса накачки. Как уже говорилось, эта характеристика является одной из важнейших, поскольку задает основной потенциал лазерного усилительного устройства. Результаты измерений представлены в таблице 1. Необходимо отметить, что при выключенной накачке и энергии входящего сигнала  $0,48 \text{ мДж} \pm 0,03 \text{ мДж}$ , энергия выходного сигнала составляла  $0,1 \text{ мДж} \pm 0,02 \text{ мДж}$ , что говорит о сильном поглощении излучения с длиной волны 1030 нм активной средой. Отметим также, что длина стержня равна 10,5 см и весь объем стержня легирован, а длина накачиваемой области составляет лишь 8,1 см. Торцевые участки стержней общей длиной 2,4 см не накачиваются. Поэтому для измеренного ( $\sigma_a^L = 0,098 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$ ) и рассчитанного ( $\sigma_a^L = 0,13 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$ ) значения сечения поглощения учитывалось поглощение излучения на длине волны 1030 нм в не накачиваемых торцах стержня. На рис. 7 представлены экспериментальные данные и результаты расчетов зависимости коэффициента усиления по слабому сигналу от длительности импульса накачки. Заметим, что расчетные и экспериментальные данные наилучшим образом совпадают, когда в расчетах принимается, что коэффициент отражения излучения накачки от внутренней поверхности активного элемента равен 60 %.

Таблица 1

### Результаты измерений

| Длительность импульса накачки, мс | Энергия после усиления, мДж | Коэффициент усиления за один проход |
|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| 1,5                               | 13,7                        | 28,5                                |
| 1,4                               | 13,5                        | 28,1                                |
| 1,3                               | 12,8                        | 26,7                                |
| 1,2                               | 12,1                        | 25,0                                |
| 1,1                               | 10,7                        | 22,2                                |
| 1                                 | 8,7                         | 18,0                                |
| 0,9                               | 6,6                         | 13,8                                |
| 0,8                               | 4,8                         | 10,1                                |
| 0,7                               | 3,1                         | 6,6                                 |
| 0,6                               | 1,8                         | 3,7                                 |
| 0,5                               | 1,0                         | 2,1                                 |

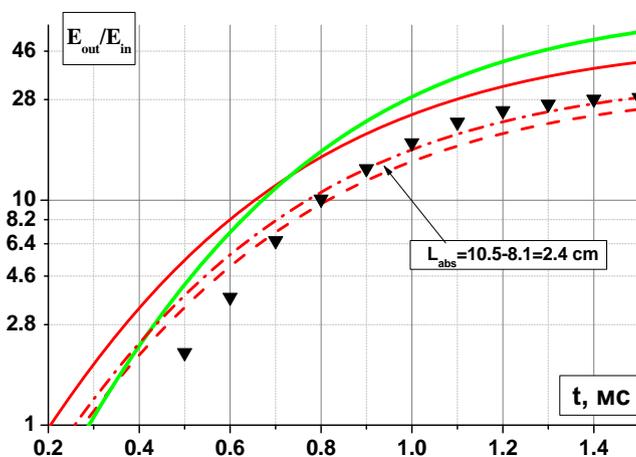


Рис. 7. Эволюция усиления слабого сигнала

Треугольники – экспериментальные точки (мощность накачки ~25 кВт), линии – расчет с использованием численной модели; сплошные линии – коэффициенты усиления для активных элементов, в которых концы АЭ не легированы иттербием (красного цвета – концентрация иттербия  $C_{Yb} = 1,1\%$ , зеленого цвета –  $C_{Yb} = 1,83\%$ ); штрихпунктирная и штриховая получены с учетом поглощения в концах стержня для  $\sigma_a^L = 0,098 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$  и  $\sigma_a^L = 0,13 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$ , соответственно

Как следует из расчетов коэффициент усиления слабого сигнала максимален при коэффициенте отражения от внутренней поверхности стержня 60 % и равен 56 при оптимальной концентрации 1,83 % ионов иттербия в стержне, в котором, к тому же, концы не легированы. С легированными торцами усиление уменьшается до 39 для 1,9 % и 28 для 1,1 % содержания иттербия, соответственно.

### Заключение

- Проведено подробное исследование физико-технических характеристик серийно выпускаемых на производствах НПП «Инжент» и ООО «Лассард» усилительных устройств (квантронов). Представлены результаты измерений коэффициентов поглощения и усиления кристаллов  $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ , работающих при комнатной температуре, спектральных свойств излучения накачки и люминесценции.

- Показано, что зависимости длины волны излучения накачки от тока, протекающего через диодный излучатель, его температуры и частоты повторения импульсов – линейны. Приводятся аппроксимирующее соотношения.

- Создана численная модель квантрона. Верификация показала хорошее совпадение расчетных параметров квантронов с экспериментально измеренными данными.

- Показано, что при оптимальном выборе концентрации ионов иттербия максимальный коэффициент усиления слабого сигнала достигает 56. Применение таких оптимальных активных элементов в квантроне позволит, например, в двухпроходной схеме достичь усиления превышающего три с половиной порядка величины.

Авторы выражают свою благодарность Д. В. Высоцкому и Р. В. Смирнову за плодотворные обсуждения.

### Список литературы

1. Bayramian A., Aceves S., Anklam T. et al, «A Compact Line Replaceable Unit Laser Driver for Laser Inertial Fusion Energy», CLEO Technical Digest, paper JTh3I.5 (2012).
2. Krupke W. F., «Ytterbium Solid-State Lasers – The First Decade», IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 6(6) 1287 (2000).
3. Jambunathan V., Körner J., Sikocinski P. et al, «Spectroscopic characterization of various Yb<sup>3+</sup>-doped laser materials at cryogenic temperatures for the development of high energy class diode pumped solid state lasers», Proc. of SPIE 8780, 87800G-1 (2013).
4. Körner J., Jambunathan V., Hein J. et al. «Spectroscopic characterization of Yb<sup>3+</sup>-doped laser materials at cryogenic temperatures», Appl. Phys. B 116, 75–81 (2014).
5. Siebold M., Loeser M., Schramm U., Koerner J., Wolf M., Hellwing M., Hein J., and Ertel K., «High-efficiency, room-temperature nanosecond Yb:YAG laser», Opt. Express 17, 19887-19893 (2009).
6. Koerner J., Vorholt C., Liebetrau H., Kahle M., Kloepfel D., Seifert R., Hein J., and Kaluza M.C., «Measurement of temperature-dependent absorption and emission spectra of Yb:YAG, Yb:LuAG, and Yb:CaF<sub>2</sub> between 20 °C and 200 °C and predictions on their influence on laser performance», J. Opt. Soc. Am. B 29, 2493-2502 (2012)
7. Peterson P., Gavrielides A., Newell T. C., Vretenar N., and Latham W. P., «ASE in thin disk lasers: theory and experiment» Optics Express. 19 25672-25684 (2011).