

ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРА С ВЫСОКОЙ ДЕТАЛИЗАЦИЕЙ

С. В. Григорьев, М. А. Белов

По мере развития лазерной техники все большее значение приобретают исследования динамики процессов, определяющих физическую картину работы лазера в различных режимах. Это связано, прежде всего, с необходимостью создания лазеров с заданными значениями параметров излучения — энергии в импульсе, длительности импульса, средней и пиковой мощности, частоты следования импульсов и так далее.[1]

В классическом приближении динамика излучения лазера может быть описана на основе так называемых балансных уравнений. Система этих уравнений позволяет найти зависимость от времени для плотности инверсной населенности рабочих уровней и мощности генерируемого излучения.[1] На современном этапе исследования данного вопроса самой актуальной для изучения является система с пространственно-распределённой моделью резонатора. Система балансных уравнений для твердотельного лазера с пространственно-распределенной моделью резонатора для двухуровневого приближения трёхуровневой схемы имеет вид[1]:

$$\begin{cases} \frac{\partial S_1}{\partial z} + \frac{1}{v} \frac{\partial S_1}{\partial t} = [\sigma N(z, t) - \eta_1] S_1(z, t), \\ -\frac{\partial S_2}{\partial z} + \frac{1}{v} \frac{\partial S_2}{\partial t} = [\sigma N(z, t) - \eta_1] S_2(z, t), \\ \frac{\partial N}{\partial t} = -\left(\omega_n + \frac{2\sigma}{\hbar\omega} (S_1 + S_2) + \frac{1}{\tau} \right) N + n' \left(\omega_n - \frac{1}{\tau} \right) \end{cases} \quad (1)$$

где: $S_{1,2}$ — плотность светового потока, распространяющегося в направлении по и против направления оптической оси соответственно, N — плотность инверсной населённости рабочих уровней, v — скорость распространения светового потока в резонаторе, σ — сечение вынужденного перехода в канале генерации, τ — время жизни ионов активной среды в возбужденном состоянии, n' — параметр накачки, ω — вероятность вынужденных переходов в канале генерации, ω_n — вероятность вынужденных переходов, инициированных излучением накачки, η_1 — к-т вредных потерь [1].

Рассмотрение динамики излучения лазера, описываемого балансными уравнениями (1), связано со значительными трудностями из-за гораздо большей сложности математического описания и ее численной реализации по сравнению с системой с точечной моделью резонатора, а также

связанным с этим значительным увеличением времени вычислений. Первая из этих проблем не может быть решена обычным способом – уменьшением шага интегрирования – так как это приводит к очень быстрому накоплению погрешности вычислений. Эту сложность можно обойти с помощью правильного выбора безразмерных величин. Например, используя безразмерные величины, предложенные в [2], становится возможным изучение динамики излучения твердотельного лазера с высокой детализацией. Сравнение результатов моделирования системы (1) с использованием безразмерных величин из [2] с результатами, представленными в статье [3] представлены на рисунке 1.

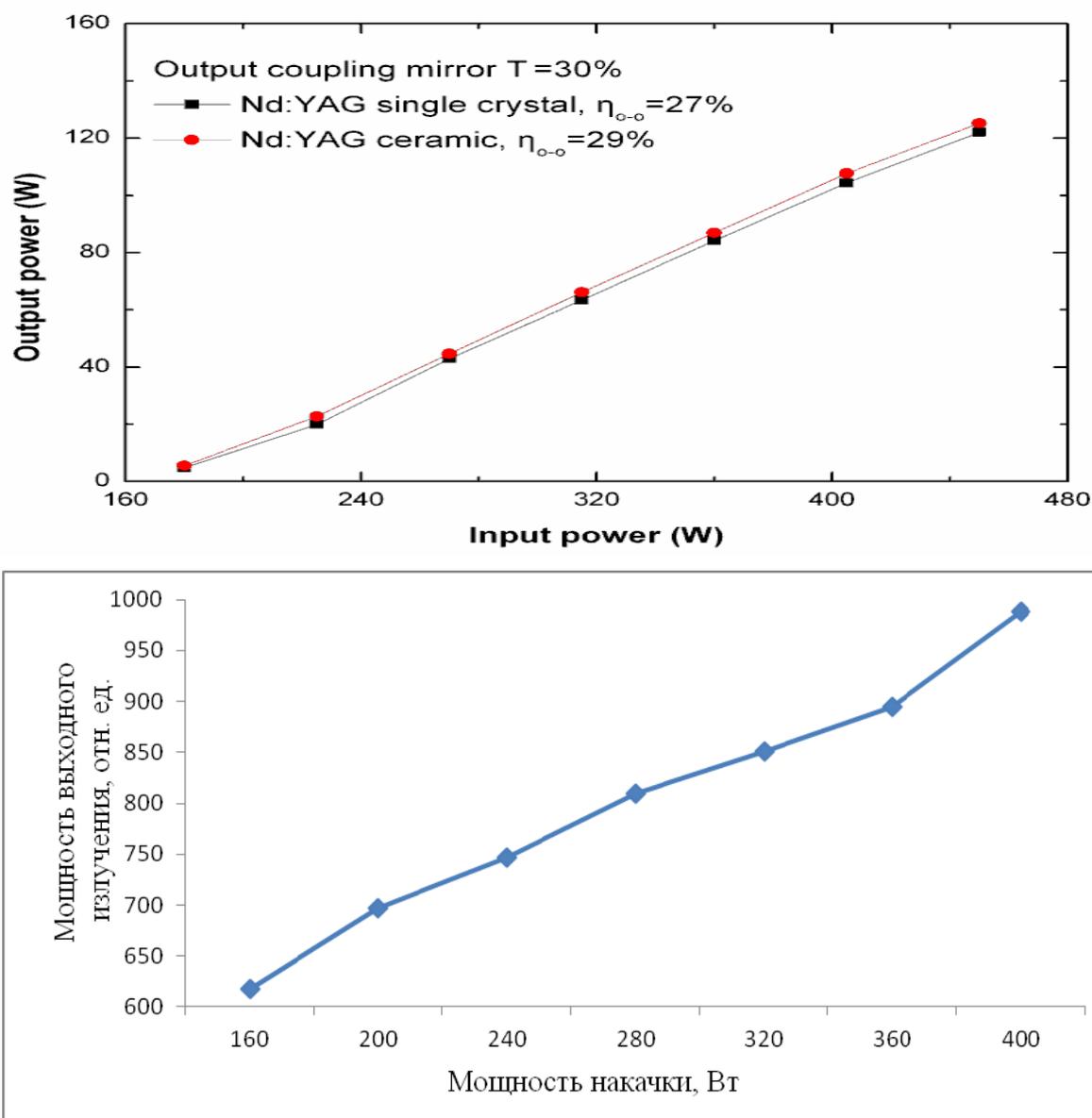


Рис. 1. Сравнение результатов моделирования зависимости выходного излучения от мощности накачки:
 сверху – результаты моделирования, представленные в статье [3];
 снизу – результаты непосредственно моделирования системы

Как видно из рисунка 1, результаты моделирования качественно совпадают с контрольными. Это означает правильность выбора и реализации численного метода моделирования.

Для решения второй из описанных выше трудностей – значительного увеличения времени вычислений из-за их высокой детализации – может быть использована технология параллельных вычислений. Увеличение скорости вычислений получается благодаря тому, что одна большая задача, разделяется на более мелкие подзадачи, которые вычисляются одновременно. При реализации технологии параллельных вычислений как оборудование было решено использовать видеоадаптер (видеокарту), как инструмент – язык реализации параллельных вычислений OpenCL.

Программа с использованием OpenCL состоит из двух частей – *host* и *kernel*. *Host*-часть программы взаимодействует с OpenCL API и отвечает за обнаружение и выбор устройств, поддерживающих технологию OpenCL, инициализацию, вызов, построение, инициализацию его входных и выходных параметров, постановку в очередь на выполнение необходимого *kernel*-а, а также за сбор результатов его работы. *Kernel*-часть программы представляет собой непосредственно код, который будет выполняться на устройстве. Именно в этой части программы и реализовывался численный метод для исследования описанной выше системы.

При постановке в очередь на выполнение *kernel*-части программы указывается количество *work-item*-ов – вычислительных ядер устройства), на которых одновременно будет выполнен код выбранной *kernel*-части программы. Идентификационный номер *work-item*-а, на котором выполняется *kernel*-часть программы, а также общее количество созданных *work-item*-ов может быть найдено в *kernel*-части с помощью методов `get_global_id(0)` и `get_global_size(0)` соответственно. Именно эти методы и позволяют сделать так, чтобы каждый *work-item* решал свою подзадачу вместо решения всей задачи в целом на каждом из них.

Из-за особенности задачи и численного метода ее реализации, подзадачи для каждого из вычислительных ядер не являются независимыми. Это приводит к тому, что прежде чем вычислять значение величины на $i + 1$ -ом шаге по времени, необходимо убедиться, что все вычислительные ядра закончили расчет подответственного им участка резонатора на том шаге. Эта операция называется **синхронизацией вычислительных потоков**. В данном исследовании для синхронизации потоков вычислений использовался метод `barrier(memory_type_to_fence)`, который не позволяет дальнейшие вычисления пока все *work-item*-ы не дойдут до этой строки в выполнении *kernel*-части программы. Параметр **mem-**

ory_type_to_fence показывает, какую область памяти требуется синхронизировать. Для оценки производительности параллельных вычислений используется график зависимости количества произведённых шагов по времени в секунду от количества активных ядер. Данная зависимость представлена на рисунке 2.

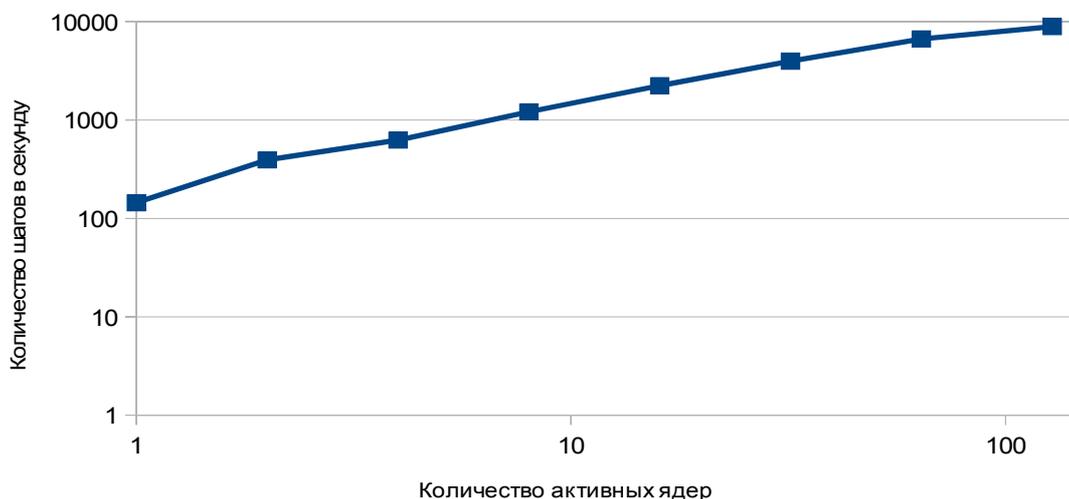


Рис. 2. График зависимости количества выполняемых шагов по времени в секунду от количества активных ядер при вычислении

Результаты исследования показали, что проблема быстрого накопления погрешности, а также значительное время вычисления в случае высокой детализации процесса при моделировании изучения динамики излучения твердотельного лазера с пространственно-распределенной моделью резонатора можно решить правильной заменой переменных и использованием параллельных вычислений. Использование параллельных вычислений позволяет значительно уменьшить время расчета.

Литература

1. *Тарасов Л. В* Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения / Л.В. Тарасов // Радио и связь. М. 1981 г. Гл.3 С. 183–217.
2. *Belov M. A.* Influence of the Cr⁴⁺:YAG Saturable Absorber Parameters on Output Characteristics of the Nd³⁺:LSB Laser in Q-Switched Regime / Maxim A. Belov, Leonid I. Burov, and Liubou G. Krylova // Nonlinear Phenomena in Complex Systems, vol. 18, no. 2 2015 P. 140–148.
3. *Lou Q.* Laser Applications of Transparent Polycrystalline Ceramic // Advances in Ceramics - Synthesis and Characterization, Processing and Specific Applications 2011 Ch. 20. P. 1–18.