

ПРОГРАММА ПРИЗМА-СВЕТ, РАСЧЕТ ПЕРЕНОСА СВЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

К. Е. Хатунцев, Д. В. Хмельницкий

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», г. Снежинск Челябинской обл.

Введение

В настоящее время широкое распространение находят твердотельные лазеры (ТТЛ) с полупроводниковой накачкой. Одним из важных вопросов при разработке ТТЛ с полупроводниковой накачкой является совершенствование их конструкции, направленное на достижение максимальной эффективности поглощения излучения накачки в активном элементе при обеспечении необходимого профиля распределения инверсной населенности по его сечению. Добиться этого можно путем оптимизации геометрических параметров системы и схемы подвода излучения накачки: числа и пространственного расположения источников первичного излучения – лазерных диодов, а также используемых при этом отражателей и их характеристик.

Для решения данной задачи необходимо иметь вычислительные средства, позволяющие рассчитывать распространение светового излучения накачки по объему активного элемента и в окружающем его пространстве. Математическую основу алгоритма расчета такой задачи в точной постановке составляют уравнения Максвелла макроскопической электродинамики для трехмерной неоднородной по составу среды, решения которых представляют большие вычислительные трудности.

Однако, учитывая особенности рассматриваемой системы, а именно линейный характер взаимодействия излучения с веществом и малость длины излучения по сравнению с любыми характерными размерами задачи (линейными размерами самой системы, ее составных частей, волнового фронта и радиуса его кривизны, характерными размерами изменения характеристик среды и самого излучения), можно существенно упростить постановку данной задачи до уровня приближений геометрической оптики и для ее решения использовать метод статистических испытаний – метод Монте-Карло.

Целью данной работы является создание на базе имеющейся в институте программы ПРИЗМА, предназначенной для расчета методом Монте-Карло переноса ионизирующего излучения в неоднородной трехмерной среде, вычислительного инструмента численного моделирования процесса распространения светового излучения и расчета поглощенной энергии в активном элементе твердотельного лазера.

Далее изложены основные положения модели, составляющие физическую основу программы ПРИЗМА-СВЕТ, описания возможностей программы по моделированию геометрии и материального со-

става рассчитываемых систем, источников светового излучения, результатов расчетов – рассчитываемых функционалов. В качестве демонстрации возможностей созданной программы представлены результаты расчетов поглощенной энергии излучения лазерных диодов для двух систем, моделирующих ТТЛ с активным элементом из кристалла YAG:Nd в виде цилиндра и из стекол ГЛС-1 и КГСС-0102 в форме параллелепипеда.

Физическая модель

Физическая модель процесса распространения светового излучения в среде основана на следующих приближениях [1]:

1. влияние нелинейных эффектов не учитывается в силу малой интенсивности излучения;
2. изменение амплитуды электромагнитного поля на длине световой волны много меньше величины самой амплитуды;
3. изменение показателя преломления на длине волны много меньше его абсолютной величины;
4. линейные размеры волнового фронта световой волны и его радиус кривизны много больше длины волны.

Использование этих приближений [2] позволяет рассматривать распространение излучения в пределе геометрической оптики: энергия электромагнитного излучения распространяется в направлении, нормальном к поверхности фронта волны, в виде лучей, которые представляют собой бесконечные совокупности цилиндров малого радиуса (по сравнению с линейными размерами областей системы). При этом лучи распространяются прямолинейно в пределах каждой однородной области прозрачной ($\text{Im}(\epsilon) \ll \text{Re}(\epsilon)$, ϵ - диэлектрическая проницаемость) среды, не учитываются процессы рассеяния, как изменения волнового вектора. На границе областей происходит преломление и отражение лучей в соответствии с принципом Ферма и законами Френеля [2], а также рассеяние светового излучения (без изменения энергии его квантов), вид законов которого (доля рассеянного излучения и его угловая индикатриса) определяется состоянием поверхности.

На данном этапе развития программы не учитываются процессы рассеяния излучения на границе областей с разными оптическими характеристиками, также как и на зеркальных поверхностях. Также не учитывается направление поляризации светового излучения.

Статистическое моделирование. Программа ПРИЗМА-СВЕТ

Процесс распространения лучей света можно моделировать как перенос частиц с энергией

$$E[\text{эВ}] = \frac{ch}{n\lambda} \approx \frac{1,242 \cdot 10^3}{n\lambda_{[\text{нм}]}}$$

где h – постоянная Планка, c – скорость света в вакууме, в чисто поглощающей среде (среде без рассеяния и размножения) с макроскопическим сечением поглощения $\alpha(\lambda)$ или $\alpha(E)$. Разыграв достаточно большое число частиц и проследив их истории, можно статистически оценить различные характеристики светового излучения, и в том числе энергию, поглощенную в объеме области.

Геометрия, состав системы и источник

Для описания геометрии [3] рассчитываемой системы используется понятие блока – часть системы, которую удобнее описывать в собственной (относительной) системе координат. Предусмотрены одномерные, двумерные и трехмерные блоки. Одномерные блоки (плоский, сферический, цилиндрический) характеризуются изменением одной координаты. Двумерные блоки позволяют описывать тела, обладающие осевой или цилиндрической симметрией. В общем случае блок состоит из произвольного числа областей, каждая из которых характеризуется постоянством химического состава. Полное описание области двумерного блока дает описание сечения области в плоскости симметрии; внешний контур сечения может состоять из произвольного набора отрезков прямых, окружностей и эллипсов. Для описания областей трехмерных блоков используется комбинаторный подход.

Согласно физической модели, для описания переноса светового излучения достаточно указать для вещества каждой области значение коэффициента поглощения и значение показателя преломления. В программе ПРИЗМА-СВЕТ для каждой области задается вещество. В настоящее время имеются данные о пяти веществах (см. таблицу).

Список веществ

Обозначения в программе	Вещество
«Н»	Вода
«SI»	Стекло К8
«ND»	Кристалл YAG:Nd
«S»	Силикатное стекло ГЛС-1
«P»	Фосфатное стекло КГСС-0102

Источник может быть точечным, линейным, поверхностным или объемным [4]. Источник может иметь равномерное распределение по объему произвольной геометрической области и площади геометрических поверхностей. Также предусмотрен широкий набор примитивов для автономного описания геометрии источника, в том числе с неравномерным распределением по пространству. Для описания энерго-углового распределения источника предусмотрен широкий набор одномерных распределений. Основным источником первичного излучения света, используемый в лазерных системах, – лазерный диод. Для моделирования лазерного диода в программе ПРИЗМА-СВЕТ разработаны специальные опции.

Рассчитываемые результаты

В программе ПРИЗМА-СВЕТ производится стандартный расчет результатов, реализованный в программе ПРИЗМА. Основное внимание в программе уделено результату – распределение поглощенной энергии излучения в области.

Входные и выходные данные

Входные и выходные данные программы ПРИЗМА-СВЕТ с некоторыми исключениями идентичны данным программы ПРИЗМА и представляют собой текстовые файлы определенных форматов. Далее с результатами расчета можно работать с помощью программ Matlab, TreePriz, ViziPrizma.

Результаты демонстрационных расчетов поглощенной энергии лазерного излучения

Для демонстрации возможностей программы ПРИЗМА-СВЕТ были проведены расчеты пространственного распределения поглощенной энергии излучения накачки лазерных диодов в активном элементе ТТЛ для двух систем.

Система № 1

Осе-симметричная система (см. рис. 1) находится в вакууме (показатель преломления вакуума $n = 1$) и состоит из активного элемента (АЭ, область 1) – кристалл YAG:Nd, охлаждаемого водой (область 2) и окруженного рубашкой (область 3) из оптического стекла К8 (см. табл.).

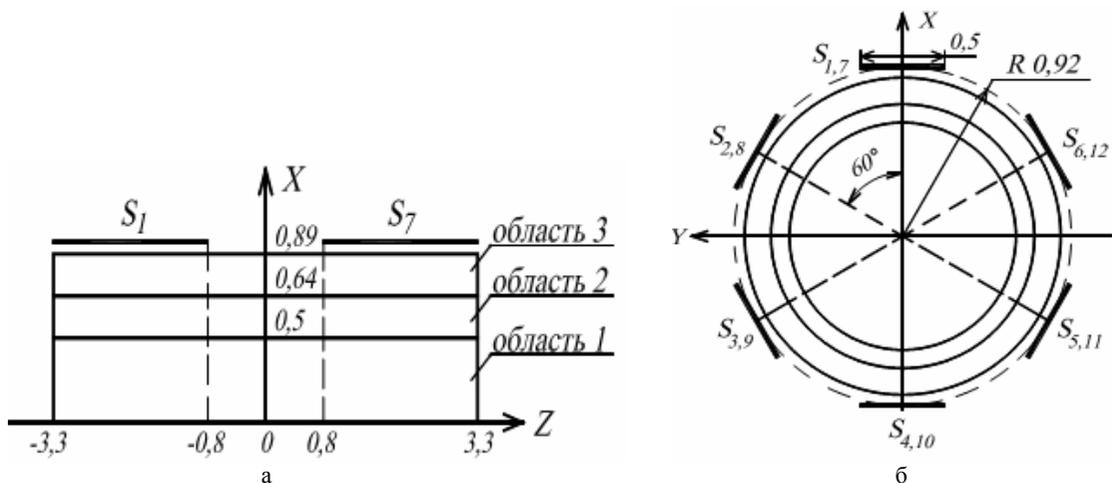


Рис. 1. Расчетная схема системы № 1 (размеры в см)

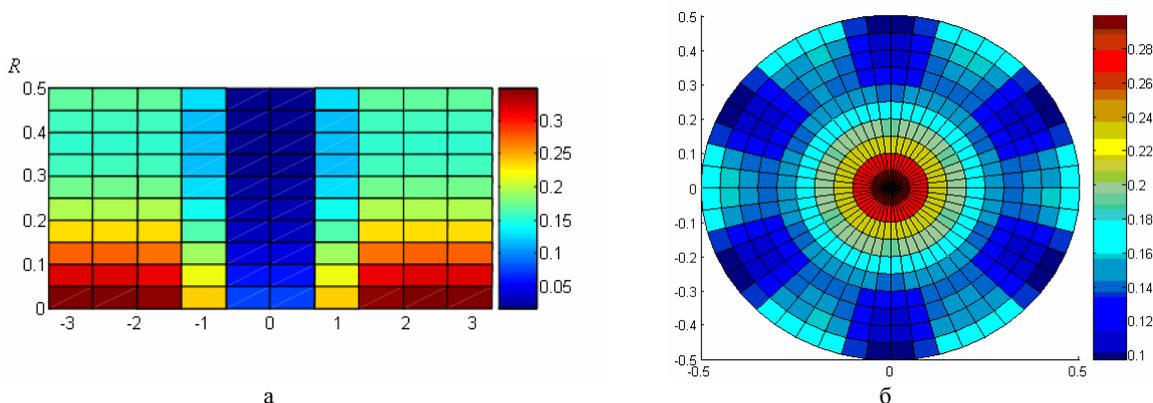


Рис. 2. Распределение плотности поглощенной энергии, усредненное по углу φ (а), график и по оси z (б) и нормированной на полную энергию излучения лазерных диодов, по сечению активного элемента. Характеристики источника $\lambda_0 = 809$ нм, $\sigma\lambda = 5$ нм (размеры в см)

Вокруг системы расположены 12 одинаковых источников светового излучения – лазерных диодов длиной $a = 2,5$ см, шириной $b = 0,5$ см, с количеством излучающих линий $M = 40$. Спектральный состав излучения задается распределением Гаусса с параметрами $\sigma\lambda, \lambda_0$. Угловое распределение источника в форме Гаусса с параметрами $\sigma_x = 390, \sigma_y = 120$.

Для расчета распределения поглощенной энергии светового излучения область активного элемента (области 1) разбивалась на $N = 10 \times 4 \times 48 = 1920$ областей одинакового объема ($V_i = 2,70 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3$) с разбиением: по оси Z равномерно с шагом $\Delta z = 0,66$ см; по радиусу $R_i = 0 - 0,25 - 0,354 - 0,433 - 0,5$ см; по углу φ равномерно с шагом $\Delta\varphi = \pi/24$.

Результаты расчетов представлены на рис. 2.

Система № 2

Система изображена на рис. 3: Активный элемент - параллелепипед размерами $6,0 \times 6,0 \times 3,0 \text{ см}^3$, центр нижней грани которого совпадает с началом системы координат. Используемый материал: силикатное стекло ГЛС-1 или фосфатное стекло КГСС-0102 (см. табл.).

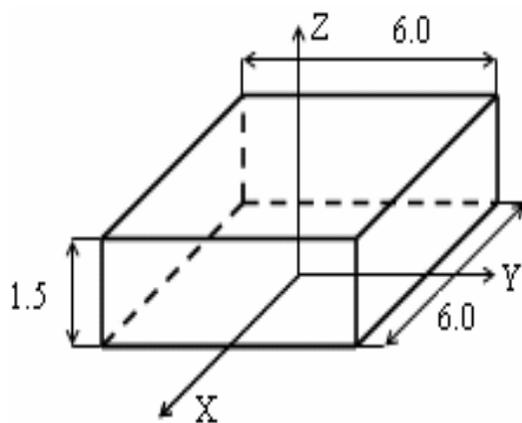


Рис. 3. Расчетная схема системы № 2 (размеры в см)

Рассматривались два вида источников, спектральный состав излучения которых задается распределением Гаусса с параметрами $\sigma\lambda, \lambda_0$. Угловое распределение источника излучения такое же, как для системы № 1 ($\sigma_x = 390, \sigma_y = 120$).

При проведении расчетов объем АЭ разбивался на области: по оси Z равномерно с шагом $\Delta z = 0,2$ см; по осям X и Y равномерно с шагом $\Delta x = \Delta y = 0,1$ см.

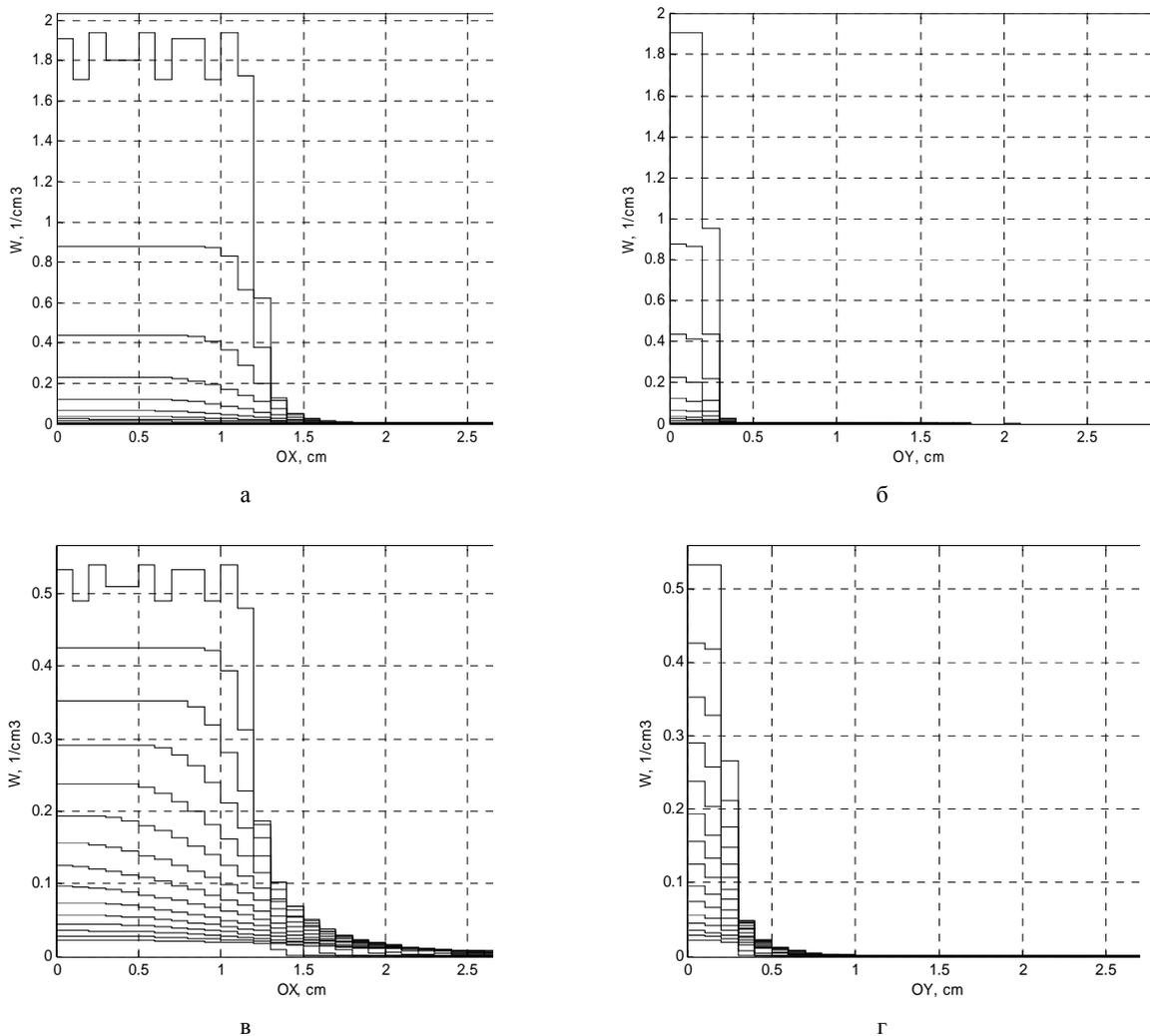


Рис. 4. Нормированное распределение плотности поглощенной энергии светового излучения в активном элементе (а, б – стекло КГСС-0102; в, г – стекло ГЛС-1). Области по оси X (см) при фиксированной координате $0 < y$ (см) $< 0,1$; области по оси Y (см) при $0 < x$ (см) $< 0,1$. Кривые соответствуют областям с разными значениями координаты z (см): $0 - 0,2 - 0,6 - 0,8 - 1,0 - 1,2 - 1,4 - 1,6 - 1,8 - 2,0 - 2,2 - 2,4 - 2,6 - 2,8 - 3,0$ (порядок расположения соответствующих кривых сверху вниз)

Результаты расчетов приведены на рис. 4. В силу имеющейся симметрии графики показаны для части АЭ с $X, Y \geq 0$.

Заключение

Оптимизация конструкции ТТЛ с полупроводниковой накачкой путем повышения эффективности поглощения излучения лазерных диодов в активном элементе возможна с использованием программы численного моделирования распространения светового излучения в среде ПРИЗМА-СВЕТ, которая является модификацией программы ПРИЗМА, предназначенной для расчета методом Монте-Карло переноса ионизирующего излучения.

Учитывая основные особенности процесса распространения излучения накачки в ТТЛ: линейный характер взаимодействия излучения с веществом,

малую длину излучения по сравнению с любыми характерными размерами системы, в данной программе в рамках приближения геометрической оптики распространение излучения рассматривается как перенос частиц в чисто поглощающей среде, на границах областей которой происходит отражения и преломления света в соответствии с принципом Ферма и законами Френеля.

Возможности программы продемонстрированы на примере расчета распределения поглощенной энергии излучения лазерных диодов для двух систем с активным элементом в виде цилиндра из кристалла $YAG:Nd$ и параллелепипеда из стекол ГЛС-1 и КГСС-0102.

В данной версии программы не учитываются процессы рассеяния света на границе областей, дифракции и интерференция, а также поляризация излучения накачки. Поэтому остается вопрос, связанный с корректностью используемой физической модели и полученных результатов. Для ответа на него

необходима верификация созданной программы ПРИЗМА-СВЕТ путем сравнения результатов расчетов по этой программе либо с экспериментальными данными, либо с расчетами по другим программам, например, ZEMAX[6].

Литература

1. Королев Ф. А. Теоретическая оптика. М.: Высшая школа, 1966.

2. Гречин С. Г., Николаев П. П. Квантроны твердотельных лазеров с поперечной полупроводниковой накачкой. Квантовая электроника, 39, № 1 (2009). С. 1–17.

3. Адеев А. В., Адеева А. В., Павлова Н. П. О геометрическом обеспечении расчетов Монте-Карло в РФЯЦ-ВНИИТФ. Препринт № 160, РФЯЦ-ВНИИТФ, 1999.

4. Кандиев Я. З., Кашаева Е. А., Малышкин Г. Н. Описание источников излучений при решении задач переноса методом Монте-Карло в РФЯЦ-ВНИИТФ. Препринт № 176, РФЯЦ-ВНИИТФ, 2002.

5. Соболев И. М. Численные методы Монте-Карло. «Наука», 1973. С. 73.

6. John Tesar Latest Zemax creates and evaluates designs, Laser Focus World 33 (3), 1997.