

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В АКТИВНОЙ СРЕДЕ CuBr-ЛАЗЕРА

Кулагин А.Е.¹, Торгаев С.Н.^{1,2}

Научный руководитель: Евтушенко Г.С., д.ф.м.н., профессор

¹Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

²Институт оптики атмосферы СО РАН, 634055, Россия, г. Томск, Зуева площадь, 1

E-mail: torgaev@tpu.ru

Лазеры на парах металлов, в частности, CuBr-лазеры, благодаря ряду уникальных свойств применяются достаточно широко для решения большого круга научных и практических задач [1]. Одним из наиболее перспективных применений лазеров такого типа является применение их в качестве усилителей яркости в активных оптических системах (лазерный проекционный микроскоп и лазерный монитор) [2]. Однако данная задача требует улучшения некоторых выходных параметров данного типа лазеров, например, увеличение частоты следования и длительности импульсов генерации. Одним из эффективных методов решения таких задач является математическое моделирование процессов в плазме лазера, в частности, в работе [3] рассматривается подробное моделирование CuBr-лазера. Однако модель, представленная в данной работе, имеет ряд недостатков, в том числе, учитывается экспериментальная форма тока, т.е. в модели отсутствует расчет электрической схемы накачки. Соответственно, целью нашей работы является разработка упрощенной математической модели CuBr-лазера с возможностью расчета схем накачки.

В основу данной работы положена нуль-мерная модель активной среды, то есть использующая усреднение по объему основных характеристик плазмы. Кинетическая модель включает в себя дифференциальные уравнения, описывающие изменения концентраций реагентов, входящих в состав плазмы, и заселенностей различных энергетических уровней атомов. Эти уравнения имеют вид

$$\frac{dN_k}{dt} = \sum_{m...n} q_k^{m...n} N_m \dots N_n - \sum_{m...n} q_n^{k...m} N_k \dots N_m, \quad (1)$$

где $q_k^{m...n}$ – скорости реакций, приводящих к увеличению концентрации реагентов k в результате взаимодействия реагентов m, \dots, n , а N_k – концентрация реагента k . Расчет скоростей реакций с использованием максвелловской функции распределения и обоснование его справедливости для лазеров на парах металлов приведены в работах [1,2]. Уравнение вида (1) записывается и для плотности свободных электронов и имеет в своей правой части слагаемые, отвечающие за процессы ионизации атомов и рекомбинации электронов.

Также уравнения (1) для нижних и верхних рабочих уровней включают в себя слагаемые вида

$\pm B \cdot \Delta N \cdot F$, где F – плотность фотонов (излучения), B – скорость вынужденного излучения, а инверсия населенности

$\Delta N = N_2 - \frac{g_2}{g_1} N_1$, где N_2 и N_1 – соответственно

заселенности верхнего и нижнего рабочих уровней, g_2 и g_1 – их статистические веса. Сама плотность фотонов описывается уравнением

$$\frac{dF}{dt} = \left(B \cdot \Delta N \cdot \frac{l_d}{l_c} - \gamma \right) F + \alpha \cdot A_{21} \cdot N_2. \quad (2)$$

В формуле (2) l_d и l_c – длины активной зоны и резонатора соответственно, коэффициент γ учитывает потери в резонаторе, A_{21} – вероятность спонтанного излучения, а α – вероятность спонтанного излучения вызвать вынужденное излучение и сформировать лазерный луч.

Изменение температуры электронов со временем описывается уравнением теплового баланса

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{R \cdot I_R^2}{V \cdot N_e} - \frac{Q_p}{N_e}, \quad (3)$$

где первое слагаемое отвечает за тепловое действие тока, текущего через плазму, а второе за мощность, затрачиваемую на ионизацию и возбуждение атомов, входящих в состав плазмы.

Здесь обозначено R – сопротивление плазмы, I_R – ток через плазму, V – объем активной среды, N_e – плотность электронов, Q_p – плотность мощности, затрачиваемой на ионизацию и возбуждение атомов. Стоит отметить, что основной вклад в изменение температуры электронов вносят именно реакции возбуждения атомов из основного состояния и реакции ионизации атомов, так как энергии переходов для этих реакций значительно больше, чем у других, а также реакции опустошения и заселения верхнего рабочего уровня ввиду их большой интенсивности. В общем виде для i -ой реакции $Q_{p(i)}$ имеет вид

$$Q_{p(i)} = q_{k(i)}^{m...n} N_m \dots N_n \cdot E_{(i)},$$

где $E_{(i)}$ – энергетический вклад i -ой реакции в температуру электронов. Для реакции ионизации атома $E_{(i)}$ полагается равным температуре электронов, а для реакций сопровождающихся переходом с одного энергетического уровня на

другой, $E_{(i)}$ пропорционален разности энергий этих уровней.

Отдельный блок уравнений посвящен расчету электрической схемы накачки лазера. Расчет схем проводится стандартным образом. Эти уравнения связаны с физико-химическими параметрами активной среды только через сопротивление плазмы, что позволяет легко видоизменять этот блок уравнений, проводя, соответственно, расчет для разных схем накачки.

Отдельное внимание уделено расчету сопротивления плазмы. В основу этого расчета были положены результаты работы [4]. Формула для сопротивления имеет вид

$$R = 1,244 \cdot 10^{11} \cdot \frac{T_e^2}{N_e \cdot J},$$

где R – сопротивление в Ом, T_e – температура электронов в эВ, N_e – плотность свободных электронов в см^{-3} , а J – интеграл, имеющий вид

$$J = \int_0^{10T_e} \frac{E^{2.5}}{K_1 + K_2} \exp\left(-\frac{E}{T_e}\right) dE.$$

Здесь интегрирование идет по энергии электронов. K_1 отвечает за кулоновское рассеяние электронов на ионах и является сложной функцией концентраций ионов и температуры электронов, а K_2 отвечает за рассеяние на нейтральных частицах и также зависит от основных параметров плазмы (см. [3]).

Уравнения, входящие в построенную математическую модель, имеют нелинейный характер, поэтому их возможно решить только численно. Для данной задачи использовался математический пакет Wolfram Mathematica. Он включает в себя мощные алгоритмы численного решения систем дифференциальных уравнений. В нашем случае скорость решения уравнений являлась одним из основных требований к используемому математическому пакету, так как при работе с моделью нужно было смотреть, как изменение различных параметров влияет на выходные результаты, т.е. многократно проводить перерасчет большого количества дифференциальных уравнений. Также в этом пакете есть средства визуализации полученных зависимостей.

Построенная модель позволяет исследовать влияние различных параметров на процессы в плазме и выходное излучение. В том числе возможно прогнозировать форму, длительность и мощность импульса излучения. Расчеты по построенной модели производились для разных конфигураций схемы накачки и газового состава плазмы. Также модель позволила оценить, какие физико-химические процессы в плазме являются определяющими для лазера, а влияние каких несущественно. Это позволяет упростить

математическую модель плазмы и обратить внимание на ключевые характеристики лазера при его конструировании. Например, модель хорошо подходит для оценки эффективности различных схем накачки лазера. Таким образом, модель помогает при разработке лазера подобрать оптимальные параметры активной среды и режим работы. Полученные результаты согласуются с экспериментальными данными (например, с данными из статьи [5]).

На рис. 1 представлены, полученные при моделировании, временные зависимости тока через газоразрядную трубку (ГРТ), напряжения на ГРТ и сопротивления активной среды лазера в период действия импульса накачки.

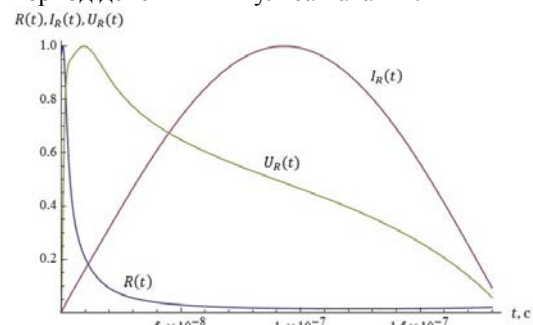


Рис. 1. – Временные зависимости напряжения на ГРТ, тока ГРТ и сопротивления активного элемента.

В дальнейшем планируется оптимизация разработанной модели с целью получения возможности оценки усилительных характеристик и радиального профиля пучка излучения. Данные параметры излучения являются весьма важными при разработке активных оптических систем.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, Госзадание №5.1307.2014.

Литература

1. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов – 2. В 2 т. Т.1 / Под ред. В.М. Батенина. – Физматлит, 2009. – 544 с.
2. Тригуб М. В., Евтушенко Г. С., Губарев Ф. А., Торгаев С. Н. Лазерный монитор с возможностью кадровой регистрации изображений // Контроль. Диагностика. - 2011, Вып. Специальный - С. 140-143
3. Торгаев С.Н. Кинетика активной среды CuBr-лазера с добавками H_2 и HBr : Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук/ – Томск, 2013. – 164 с.
4. Vuchkov N.K., Astadjov D.N., Sabotinov N.V. Parametric Study of the CuBr Laser with Hydrogen Additives // IEEE Journal of quantum electronics. – 1988. – Vol. 24. – № 9. – С. 1927–1935.
5. Vuchkov N.K., Astadjov D.N., Sabotinov N.V. Influence of the Excitation Circuits on the CuBr Laser Performance // IEEE Journal of quantum electronics. – 1994. – Vol. 30. – № 3. – С. 750–758.