

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД ВЫЧИСЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛА СТРЕТОННА–ЧУ В ЗАДАЧАХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

АВТОРЫ: д.ф.-м.н., с.н.с. Жуков В.П., д.ф.-м.н., академик Федорук М.П.

Для создания ультрарелятивистских электронных пучков, модификации прозрачных сред, микрохирургии и многих других приложений используются сильно сфокусированные лазерные импульсы. При математическом моделировании взаимодействия лазерных импульсов с веществом возникает необходимость вычисления электромагнитного поля импульса на расстоянии ≤ 100 мкм от фокуса. Ввиду необходимости сильной фокусировки (большой апертуры) часто используемое параксиальное приближение неприменимо. В этом случае, строго говоря, необходимо рассчитывать конкретную оптическую систему, решая линейные уравнения Максвелла в областях размером порядка сантиметра, учитывая масштабы порядка длины волны. Решение этой задачи, например, конечно-разностными методами практически невозможно.

Однако, когда в качестве фокусирующей системы выступает параболическое зеркало, что часто имеет место на практике, искомые поля могут быть представлены в виде интеграла Стрэттона-Чу (ИСЧ). ИСЧ является интегралом от быстро осциллирующей функции и его вычисление является сложной задачей. В некоторых случаях вычислить ИСЧ для желаемых параметров не удастся [Popov K.I., Bychenkov V.Yu., Rozmus W., Sydora R.D. Electron vacuum acceleration by tightly focused laser pulse // Phys. of Plasmas, 2008. Vol. 15. 013108 (9 p.)].

В ФИЦ ИВТ разработан высокоэффективный метод вычисления ИСЧ для нужд моделирования взаимодействия сильно сфокусированных фемтосекундных лазерных импульсов (ССФЛИ) с веществом, позволяющий проводить эти вычисления даже на маломощных компьютерах. ИСЧ имеет структуру

$$\mathbf{E}(t, \mathbf{r}_p) = \iint \mathbf{A}(x, y, g) e^{-i(\tau - g/(c\tau_L))^2} \exp(-ik_0 g) dx dy, \quad g = g(x, y, \mathbf{r}_p)$$

Здесь k_0 – волновой вектор (большая величина), t – время, \mathbf{r}_p – точка наблюдения. Суть метода заключается в переходе от переменных интегрирования x и y к переменной g и некоторой угловой переменной θ . Сокращение вычислительных ресурсов происходит за счет следующих обстоятельств.

1. Подынтегральная функция в интеграле по θ является плавной. Поэтому этот интеграл для своего вычисления требует мало ресурсов.
2. Интегралы по θ не зависят от времени и вычисляются один раз для всех t .
3. Для вычисления быстро осциллирующего одномерного интеграла по g используется эффективный метод, использующий линейризацию g на шаге интегрирования.

С помощью этого метода решен ряд задач о взаимодействии ССФЛИ со стеклом в режиме объемной модификации. Показаны существенные отличия решения задачи, использующей задание ССФЛИ соответствующее отражению импульса от параболического зеркала и решения, в котором ССФЛИ описывается в параксиальном приближении.

Описанные результаты могут быть использованы при моделировании и оптимизации многочисленных приложений, связанным с микрообработкой материалов, взаимодействия ССФЛИ с веществом.

ПУБЛИКАЦИИ

1. Жуков В.П., Федорук М.П. Высокоэффективный метод вычисления интеграла Стрэттона–Чу в задачах взаимодействия лазерного излучения с веществом // Вычислительные технологии, 2021, том 26, N 3, с. 42–60.