

Обратнотормозной нагрев и ионизация больших металлических кластеров полем интенсивного фемтосекундного лазерного импульса

Костенко О.Ф., Андреев Н.Е.

Институт теплофизики экстремальных состояний ОИВТ РАН, г. Москва, Россия

Обратнотормозной механизм поглощения интенсивного лазерного излучения веществом хорошо известен, однако его роль при воздействии фемтосекундного лазерного поля на большие кластеры, радиус которых превышает глубину скин-слоя, до настоящего времени оставалась невыясненной. Одни авторы считают, что при достижении температуры электронов 0.5 – 1 кэВ столкновительное поглощение становится неэффективным и им нельзя объяснить наблюдаемые характерные температуры порядка нескольких килоэлектрон-вольт [1]. В других работах рассчитаны $T_e > 150$ кэВ, обусловленные этим механизмом, при воздействии на большие ксеноновые кластеры (10^8 атомов) лазерным импульсом длительностью $\tau = 100$ фс при интенсивности 10^{18} Вт/см² [2]. Анализ пространственной структуры поля и сечений поглощения позволил нам выделить область параметров лазерного импульса и больших металлических кластеров, при которых происходит их эффективный обратнотормозной нагрев и ударная ионизация [3]. Получены простые аналитические выражения для структуры поля внутри и вне однородного кластера, а также сечений поглощения и рассеяния в предельных случаях, когда глубина скин-слоя δ много больше и много меньше радиуса кластера R . Показано, что обычно используемое квазистатическое выражение для электрического поля внутри кластера [4] и соответствующее сечение поглощения Q_0 справедливы только в нулевом порядке по параметру $\rho = 2\pi R/\lambda$ при условии $\delta \gg R$. Даже если $\delta \gg R$ существенный вклад в нагрев кластера может вносить индукционное электрическое поле в первом порядке по ρ , если модуль диэлектрической проницаемости $|\varepsilon|$ становится достаточно большим, как в случае металлических кластеров. Использование Q_0 при $\delta \ll R$ с ростом $|\varepsilon|$ в процессе ионизации приводит к значительному занижению сечения поглощения Q_a . С другой стороны, утверждение, что сечение поглощения совпадает с геометрическим сечением кластера при $\delta < R$ [2] приводит к значительному завышению Q_a .

Расчеты проведены при параметрах, соответствующих фемтосекундному ИК лазерному комплексу ИТЭС. Определено, что оптимальный для нагрева радиус кластера железа составляет 20 – 25 нм. При таком радиусе температура электронов существенно зависит от интенсивности $T_e \sim I^{3/4}$ и возрастает до 3 кэВ при $I \approx 10^{18}$ Вт/см² ($\tau = 100$ фс). Тепловые электроны производят значительную ионизацию L-оболочки железа вплоть до образования Li- и Be- подобных ионов. Сравнение с экспериментом может проводиться по выходу тормозного рентгеновского излучения в диапазоне 1 – 2 кэВ.

Обсуждаются критерии применимости модели. Внешней ионизацией кластера и влиянием электронов, вылетающих из ионного остова, на нагрев и внутреннюю ионизацию кластера можно пренебречь, если $0.5 \gg R/r_E \gg 9\omega^2/\omega_p^2$, где r_E – амплитуда осцилляций электрона в лазерном поле, ω_p – плазменная частота электронов внутри кластера.

[1] *Mulser P., Kanapathipillai M.* // Phys. Rev. A. 2005. V. 71. P. 063201.

[2] *Smirnov M.B., Becker W.* // Phys. Rev. A. 2006. V. 74. P. 013201.

[3] *Костенко О.Ф., Андреев Н.Е.* (направлено в журнал «Физика плазмы»).

[4] *Ditmire T., Donnelly T., Rubenchik A.M., et al.* // Phys. Rev. A. 1996. V. 53. P. 3379.