

РАСЧЕТ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ОТ НАНОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В МЕТАЛЛИЧЕСКУЮ МИШЕНЬ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ПЛАЗМЫ

Д.В. Беденко, О.Б. Ковалев

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теоретической и прикладной механики им. Христиановича СО РАН
630090, г. Новосибирск, Россия*

В результате воздействия мощного лазерного излучения на металлические мишени происходит их активный нагрев и испарение. Вследствие низких потенциалов ионизации металлических паров создаются условия для оптического пробоя в газе и появления плазмы, которая, в свою очередь, начинает активно поглощать падающее лазерное излучение и экранировать мишень. Величина поглощения может быть значительной и приближаться к 100%, однако, сама плазма излучает накопленную в ней энергию в виде теплового равновесного излучения в окружающее пространство. Его часть будет поглощаться подложкой в зависимости от степени черноты поверхности, которая может приближаться к единице, т.е. вплоть до полного поглощения. С другой стороны, для инфракрасного излучения CO₂-лазера для многих металлов коэффициент поглощения невелик и составляет порядка 10-20% при нормальном угле падения. Это создает условия, в которых передача энергии от лазерного луча к плазме, а затем от нее в мишень может быть эффективней, чем напрямую. В данной работе исследуется процесс образования приповерхностной плазмы, индуцированной наносекундными CO₂-лазерными импульсами, и ее влияние на степень нагрева плоской металлической мишени.

Режим развитого испарения мишени под воздействием коротких мощных лазерных импульсов с пиковой интенсивностью в луче около 10⁸ Вт/см² начинается очень быстро. Однако пока концентрация металлических паров над мишенью невелика, количество свободных электронов недостаточно для пробоя. При последовательном воздействии серии импульсов происходит накопление паров у поверхности, и создаются условия, приводящие к образованию плазмы. Параметры плазмы, как и время ее появления, зависят преимущественно от материала мишени и интенсивности излучения. В нашем случае мы рассмотрели процесс зажигания плазмы над железной мишенью при мощности излучения 5 кВт.

За время одного импульса, когда происходит испарение мишени и возможна активная ионизация, пары железа не успевают отлететь достаточно далеко (до 1 мм) от поверхности. Учитывая диаметр пучка в 1 мм можно решать поставленную задачу в квази-одномерном приближении. Данное допущение также не ограничивает возможность сканирования луча по подложке при скоростях около 1 м/с и частоте 100 кГц, т.к. на один диаметр луча приходится 100 импульсов. Для моделирования эффекта испарения используется приближение Кнудсеновского слоя и аналитическая аппроксимация зависимости между скоростью испарения, температурой стенки и давлением насыщенных паров [1]. В результате решения системы, состоящей из этих соотношений, дополненных законами сохранения, и нелинейного теплового граничного условия определяются параметры пара, истекающего в рассматриваемый объем. В газовой фазе на основе классического метода Годунова о распаде произвольного разрыва [2] решаются дифференциальные уравнения для сжимаемого невязкого газа (постановка Эйлера). Одновременно в сопряженной постановке для определения потока тепла в мишень решается уравнение теплопроводности. Для расчета теплопереноса в плазме решается уравнение переноса излучения в многогрупповом диффузионном приближении [3].

В работе исследовалось тепловое состояние мишени, структура газодинамических течений пара, образование и тепловое расширение плазмы под воздействием серии импульсов длительностью 300 нс. Проведено сравнение двух ключевых режимов: без образования плазмы и с ее наличием. В результате воздействия лазерных импульсов происходит испарение материала мишени, и концентрация паров над поверхностью возрастает. Увеличивается количество свободных электронов, которые отвечают за поглощение лазерного излучения. С началом очередного импульса происходит оптический пробой: за очень короткое время температура газа возрастает до 12000 К и происходит резкое расширение плазменного облака. Если с началом развитого испарения в окружающее пространство пары мишени поступали со скоростью до 600 м/с, то при образовании плазмы их скорость возросла до 1500 м/с. Формирующаяся в окружающем газе ударная волна значительно усиливается, так что давление за ее фронтом составляет порядка 50 атмосфер. С окончанием лазерного импульса испарение сразу прекращается в обоих режимах, а температура паров или плазмы начинает быстро падать. За время между импульсами плазма успевает исчезнуть. Однако, со следующим импульсом ситуация полностью повторяется.

При наличии плазмы поглощение равновесного теплового излучения значительно выше, чем напрямую CO_2 -лазерного излучения, которое для железа равно 0.12. В результате количество энергии, поступающее к мишени, возрастает. Кроме того, мишень продолжает нагреваться и после окончания импульса от горячих паров, температура которых заметно выше в плазменном режиме. Сравнение температуры поверхности мишени в обоих режимах в зависимости от времени представлено на рис. 1.

Полученные результаты показывают, что количество энергии аккумулируемой мишенью при появлении плазмы увеличивается на 20%. Расчеты были выполнены для степени черноты поверхности 0.35, однако она может быть и больше, вплоть до 1. В таком случае эффект увеличения нагрева мишени значительно усилится.

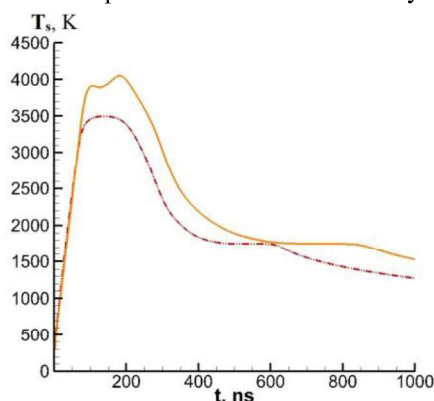


Рис. 1. Сравнение температуры поверхности мишени в режимах без образования плазмы (штрихованная линия) и с ее наличием (сплошная линия).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Gusarov A.V., Smurov I.** Thermal model of nanosecond pulsed laser ablation: Analysis of energy and mass transfer // J. of Appl.Phys. 2005. Vol. 97. 014307-13
2. **Годунов С.К., Забродин А.В., Прокопов Г.П.** Разностная схема для двумерных нестационарных задач газовой динамики и расчет обтекания с отошедшей ударной волной // ЖВММФ. 1961. Т. 1, №6. С. 1020–1050.
3. **Четверушкин Б.Н.** Математическое моделирование задач динамики излучающего газа. Москва: Наука. 1985. 304 с.