

07

Исследование отражательной способности алюминиевой пленки при одновременном воздействии на нее импульсов тока и лазерного излучения

© В.В. Осипов, А.Н. Орлов, В.В. Лисенков

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург
E-mail: osipov@ier.uran.ru, lisenkov@ier.uran.ru

Поступило в Редакцию 29 июля 2003 г.

Экспериментально обнаружен эффект увеличения отражательной способности алюминия на длине волны 308 nm во время прохождения электрического тока плотностью до 100 MA/cm². Эффект имеет обратимый характер. Предположительно, он объясняется частичным отражением падающего излучения свободными электронами, попадающими в зону проводимости оксидной пленки на поверхности металла во время протекания импульса тока.

Широкое применение лазерных комплексов в научных исследованиях, медицине и различных отраслях промышленности во многом обусловлено возможностью управления длительностью импульса лазерного излучения. Это достигается в основном использованием метода модуляции добротности резонатора с помощью различных преобразователей типа ячеек Керра, Поккельса и других. Однако применяемые в преобразователях оптические материалы прозрачны только в определенном оптическом диапазоне, поэтому каждый модулятор применим в довольно узкой части спектра электромагнитных волн. Имеется достаточное количество материалов для преобразователей в средней, ближней инфракрасной и видимой частях спектра. Несколько хуже дело обстоит в ультрафиолетовой области спектра, и особенно в области вакуумного ультрафиолета, для которой сложно найти оптически прозрачные материалы с необходимыми для модуляторов свойствами.

В связи с этим неплохой альтернативой может стать способ модулирования путем изменения коэффициента отражения одного из зеркал резонатора. Проведенные нами ранее эксперименты [1] показали, что

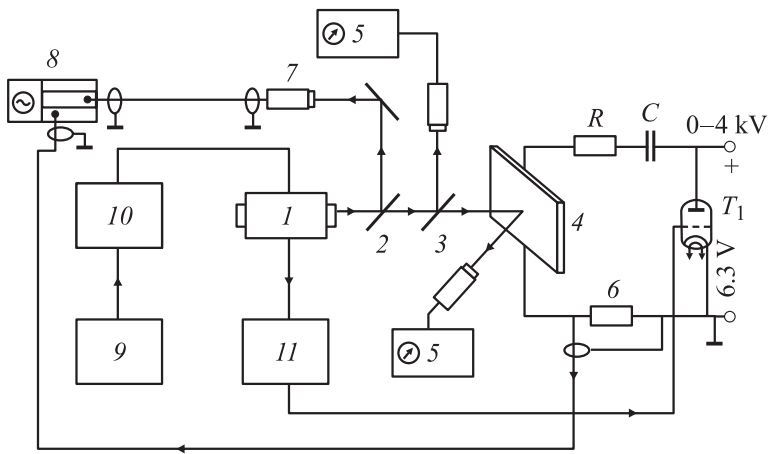


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

в результате воздействия наносекундных импульсов тока происходят необратимые изменения оптических свойств алюминиевой пленки. Показано, в частности, что отражательная способность алюминиевой пленки увеличилась на 13% после 9–10 импульсов тока. Дальнейшее воздействие импульсами тока не приводило к увеличению отражательной способности.

Однако для решения задачи по созданию резонатора с модулированной добротностью необходимо исследовать изменения коэффициента отражения алюминиевой пленки во время протекания через нее импульса тока.

С этой целью были проведены экспериментальные исследования на установке, блок-схема которой показана на рис. 1.

Импульсное излучение ХеСl-лазера на длине волны $\lambda = 308 \text{ nm}$ (1), пройдя через светоделительные пластины (2) и (3), отражалось металлической пленкой толщиной $200\text{--}1000 \text{ \AA}$ (4) и регистрировалось измерителем мощности и энергии ИМО-2Н (5) при пропускании и без пропускания через нее мощных импульсов тока. Длительность и энергия импульса излучения в среднем составляли 30 ns на полувысоте и $20\text{--}40 \text{ mJ}$ соответственно. Так как энергия от импульса к импульсу менялась до 10–15%, то в качестве опорного сигнала использовалась часть энергии импульса излучения, отраженная от светоделительной

Энергия лазерного импульса, мJ	28	29	31.4	33.8
Коэффициент отражения при пропускании электрического тока, %	89	87.6	85	83
Коэффициент отражения без пропускания электрического тока, %	88	86	82	79

пластины (3) с коэффициентом отражения 30%, которая измерялась вторым измерителем мощности и энергии ИМО-2Н (5). Импульс тока до 1000 А и более в максимуме и длительностью 30–120 ns пропускался через тонкую алюминиевую пленку при разряде емкости C через токоограничивающее сопротивление R . Формы импульсов тока (с помощью шунта (6)) и излучения (с помощью ФЭК-22 СПУ-М (7)) регистрировались двухлучевым осциллографом С8-14 (8).

Газовый тиратрон T типа ТГИ1-500/16 коммутировал заряд, накопленный конденсатором C , на исследуемый образец при подаче на сетку блока питания лазера (10) импульса положительной полярности от высоковольтного генератора импульсов (9) ХеС1 лазера через линию задержки (11), которая позволяла контролировать время задержки включения тиратрона T с шагом до 10 ns.

Изменение коэффициента отражения фиксировалось при одновременной регистрации интенсивностей двух пучков (опорного и отраженного от поверхности пленки) излучения с помощью двух измерителей энергии и мощности ИМО-2Н.

В процессе экспериментов было обнаружено, что в результате воздействия импульсов тока до 100 МА/см² происходит обратимое увеличение отражательной способности металлической пленки.

Результаты экспериментов представлены в таблице.

Мы предполагаем, что данный эффект обусловлен отражением лазерного излучения от оксидной пленки, всегда присутствующей на поверхности алюминия в атмосфере. Механизм отражения от пленки описан в [2] на примере оксидной пленки V₂O₅. Он заключается в том, что лазерное излучение может отражаться свободными электронами, попадающими тем или иным способом в зону проводимости оксидной пленки. При условии $\omega_{las} \sim \omega_p$ (ω_{las} — частота лазерного излучения, ω_p — частота плазменных колебаний свободных электронов) отражение от пленки становится преобладающим.

Нами были проделаны расчеты суммарного коэффициента отражения системы металл–пленка (СМП). В расчетах предполагалось посто-

якнство коэффициента отражения металла R_m . Коэффициент отражения оксидной пленки вычисляется по известной формуле:

$$R_f = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2}, \quad (1)$$

где n и k — показатели преломления и поглощения оксидной пленки. Они вычисляются с помощью численного решения стандартной системы уравнений:

$$n^2 - k^2 = n_0 - \frac{\omega_p^2 \tau^2}{1 + \omega_{las}^2 \tau^2}, \quad (2)$$

$$nk = \frac{\omega_p^2 \tau}{2\omega_{las}(1 + \omega_p^2 \tau^2)}, \quad (3)$$

где $n_0 = 1.57$ — показатель преломления Al_2O_3 в нормальных условиях, т.е. при практически полном отсутствии свободных электронов в зоне проводимости, τ — среднее время релаксации электронов, которое было взято таким же, как у чистого Al, и вычислено на основе данных [2].

Результаты, представленные на рис. 2, показывают рост коэффициента отражения СМП при увеличении концентрации свободных электронов, т.е. отношения ω_p/ω_{las} . Причем это увеличение становится более значительным (кривые 2, 3) с уменьшением коэффициента отражения металла, которое может быть вызвано нагревом металла лазерным излучением, т.е. при увеличении энергии импульса лазерного излучения эффект должен быть заметнее, что и наблюдается в эксперименте.

Мы не можем с уверенностью назвать причину появления свободных электронов в зоне проводимости оксидной пленки. По нашему мнению, это может быть обусловлено следующими причинами. Нагрев алюминия токовым импульсом может вызвать изменения стехиометрического и фазового состава оксидной пленки, т.е. образования фаз с малой шириной запрещенной зоны. Уменьшение запрещенной зоны способствует проникновению электронов в зону проводимости непосредственно из металла, поскольку, как известно, уровень Ферми металла находится посередине запрещенной зоны диэлектрической пленки, покрывающей его поверхность. Кроме того, резкое расширение металла, нагретого коротким импульсом тока, может вызвать деформацию оксидной пленки, по интенсивности сходную с прохождением ударной волны, которая, как известно (см. [3] и цитируемую там литературу), вызывает смещение энергетических зон в диэлектрике.

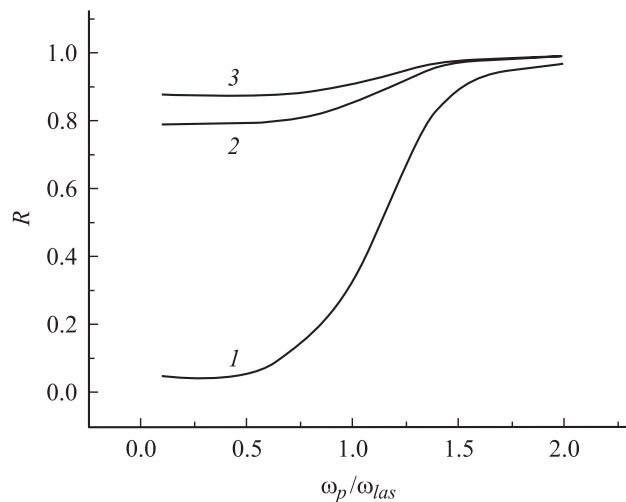


Рис. 2. Зависимость коэффициентов отражения оксидной пленки (1) и системы металл–пленка (2,3) от параметра ω_p/ω_{las} при различных коэффициентах отражения металла: 2 — 79%, 3 — 88%.

Уменьшение ширины запрещенной зоны существенно увеличивает вероятность кратковременного перекрытия валентной зоны с зоной проводимости и переброски туда электронов.

Таким образом, в результате проведенных экспериментов обнаружен эффект обратимого увеличения коэффициента отражения алюминия при пропускании тока высокой плотности и предложено качественное объяснение этого явления. Обнаруженный эффект может найти применение в резонаторах с модулированной добротностью и других оптических системах, связанных с модуляцией излучения.

Список литературы

- [1] Орлов А.Н., Царапкин В.В., Гвоздиков А.Н. // ФХОМ. 1998. № 3. С. 26–29.
- [2] Прохоров А.М., Конов В.И., Урсу И., Михэилеску И.Н. Взаимодействие лазерного излучения с металлами. М.: Наука, 1988. 537 с.
- [3] Вершинин Ю.Н. Электронно-тепловые и детонационные процессы при электрическом пробое твердых диэлектриков. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 258 с.