

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

## Отражательная способность алюминиевой пленки при воздействии импульсов тока и лазерного излучения

Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург

Поступила в редакцию 26.11.2003 г.

Исследован эффект увеличения отражательной способности алюминия в диапазоне длин волн 280–317 нм в результате воздействия электрического тока плотностью до  $100 \text{ MA}/\text{cm}^2$  и излучения ХеСl-лазера интенсивностью  $\approx 2 \text{ MВт}/\text{cm}^2$ . Эффект может иметь как обратимый, так и необратимый характер. Предположительно, обратимый эффект объясняется частичным отражением падающего излучения свободными электронами, попадающими в зону проводимости оксидной пленки на поверхности металла во время протекания импульса тока и воздействия лазерного излучения.

В настоящее время широкое применение лазерных комплексов в медицине, научных исследованиях, различных отраслях промышленности во многом обусловлено возможностью автоматического управления параметрами лазерного излучения прежде всего благодаря использованию в них разных типов быстродействующих модуляторов, в качестве которых обычно используются ячейки Керра, Покеельса и другие оптоакустические преобразователи. Важным элементом подобных устройств являются оптически прозрачные твердые или жидкие среды, через которые пропускаются излучения разных длин волн. Как известно, имеющиеся 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. Дело обстоит несколько хуже в ультрафиолетовой области спектра, а особенно в вакуумно-ультрафиолетовой, для которой сложно найти оптически прозрачные материалы с необходимыми для модуляторов свойствами.

Эта проблема может быть решена при создании новых электрооптических материалов, прозрачных для излучений коротких длин волн. Трудности, возникающие при попытке управления интенсивностью излучения в этой области спектра, также можно преодолеть, если свет модулировать не при прохождении его через материал, а при его отражении от поверхности. Теоретические исследования И.В. Ивлева, М.А. Яковлева по влиянию пикосекундных импульсов на оптические параметры проводников в принципе подтверждают возможность подобной модуляции излучения [1,2]. Эксперименты, проведенные авторами настоящей работы, также указывают на возможность изменения отражательной способности поверхности проводника за время действия импульса тока. Однако в ходе исследований выяснилось, что импульсы тока плотностью до  $100 \text{ MA}/\text{cm}^2$  и потоки

излучения большой интенсивности приводят также и к необратимым изменениям величин оптических параметров пленок. Сведения об изменениях, в частности об улучшении отражательной способности алюминиевых пленок, приведены в работе [3]. Объект подвергали ультрафиолетовому облучению от ртутной кварцевой лампы в течение 5 ч. В наших же экспериментах подобные изменения происходили значительно быстрее, т.е. за несколько секунд.

Установление закономерностей необратимых и обратимых изменений в оптических параметрах алюминиевой пленки в результате одновременных действий наносекундных импульсов тока и излучения, а также отдельных действий импульсов излучения большой интенсивности и является целью данной работы.

### 1. Описание экспериментальной установки

Для выяснения условий изменения отражательной способности пленок была проведена экспериментальная работа на установке, блок-схема которой показана на рис. 1.

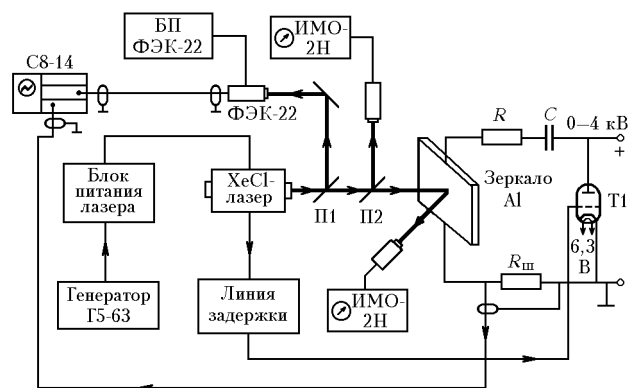


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки

Импульсное излучение ХеСl-лазера на длине волны  $\lambda = 308$  нм, пройдя через светоделительные пластины П1 и П2, отражалось алюминиевой пленкой толщиной 200–1000 Å и регистрировалось измерителем мощности и энергии ИМО-2Н при и без пропуска через нее мощных импульсов тока. Длительность и энергия импульса излучения в среднем составляли 30 нс на полувысоте и 40 мДж соответственно. Более подробно характеристики лазера приведены в работе [4]. Так как энергия от импульса к импульсу менялась до 10–15%, то в качестве опорного сигнала использовалась часть энергии импульса излучения, отраженная от светоделительной пластины П2 с коэффициентом отражения  $r = 30\%$ , которая измерялась вторым измерителем мощности и энергии ИМО-2Н. Импульс тока до 1000 А и более в максимуме и длительностью 50–120 нс пропускался через тонкую алюминиевую пленку при разряде емкости  $C$  через токоограничивающее сопротивление  $R$ . Формы импульсов тока и излучения регистрировались двухлучевым осциллографом С8-14. Шунтирующее сопротивление, служившее для определения величины тока, было набрано из малоиндуктивных сопротивлений типа ТВО.

Блок запуска высоковольтного генератора импульсов ХеСl-лазера, в зависимости от условий эксперимента, срабатывал при поступлении на вход сигнала либо от генератора импульсов в блоке питания лазера в режиме одиночного импульса, либо от генератора импульсов Г5/63.

Газовый тиратрон Т типа ТГИ1-500/16 коммутировал заряд, накопленный конденсатором  $C$  на исследуемый образец, при подаче на сетку импульса положительной полярности от высоковольтного генератора импульсов ХеСl-лазера через линию задержки (ЛЗ), которая позволяла контролировать время задержки включения тиратрона Т с шагом до 10 нс. Благодаря использованию ЛЗ начала импульсов излучения и тока могли быть сдвинуты друг относительно друга на заданный интервал времени в пределах от 0 до 500 нс.

Фотоэлемент коаксиальный ФЭК-22 СПУ-М с временным разрешением до 100 пс служил для преобразования импульса излучения, отраженного от кварцевой пластины П1, в электрический сигнал. Для снижения уровня мощности светового импульса применялся ослабитель, составленный из соответствующим образом расположенных кварцевых пластин типа КУ1.

Коэффициенты отражения в зависимости от длины волны были сняты на спектрофотометре ВЕСМАН UV 5270. Измерение сопротивлений тонких пленок осуществлялось миллиомметром Е6-181.

В качестве подложек использовались пластины из стекла К 108 и кварца КУ-1, подготовленные методом глубокой шлифовки-полировки. Перед напылением поверхности пластин обрабатывались тлеющим разрядом. Напыление проводилось на вакуумной установке ВУ-1А методом резистивного испарения.

## 2. Необратимые изменения отражательной способности алюминиевой пленки в результате действий импульсов тока и излучения

Как уже отмечалось, отражательная способность  $r$  металлической пленки изменяется от воздействия на нее импульсов тока и излучения. На рис. 2 приведена зависимость  $R$  от количества импульсов.

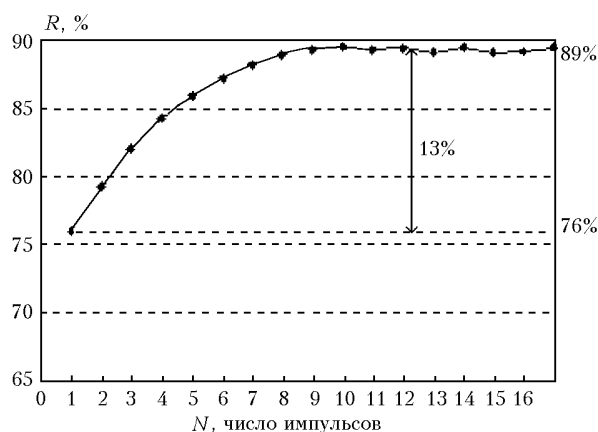


Рис. 2. Изменение отражательной способности алюминиевой пленки в зависимости от числа импульсов. Средняя плотность мощности  $I = 2$  МВт/см<sup>2</sup>

Видно, что вначале  $R$  растет довольно быстро, но после 9–10 импульсов тока и излучения коэффициент отражения  $r$  остается постоянным и не зависит от дальнейшего воздействия на пленку. Увеличение отражательной способности данного образца на длине волны 308 нм составило 13%. В ходе эксперимента обеспечивался синхронный запуск импульсов тока и излучения.

При использовании технологии вакуумного напыления оптические параметры пленок, при прочих равных условиях, сильно зависят от степени достигнутого разряда и времени напыления. Например, коэффициент отражения алюминиевой пленки на длине волны  $\lambda = 308$  нм может иметь значения от 22 до 92% [5]. Если же учесть, что при хранении и эксплуатации зеркала еще и загрязняются, то их отражательная способность может существенно уменьшиться.

Как показали исследования, у пленок, имеющих коэффициент отражения, близкий 92%, после облучения отражательная способность практически не улучшается. В то же время образцы с низким коэффициентом отражения после взаимодействия стали отражать на 20–25% больше падающий на них поток излучения. Это хорошо видно на рис. 3, где представлены зависимости коэффициента отражения  $r$  трех образцов от длины волны в интервале 280–317 нм.

При воздействии на зеркало только импульсов тока увеличение отражательной способности было незначительно (~ 2%), что позволяет сделать вывод о том, что улучшение отражательной способности

зависит в основном от воздействия импульсов излучения или их совместного влияния.

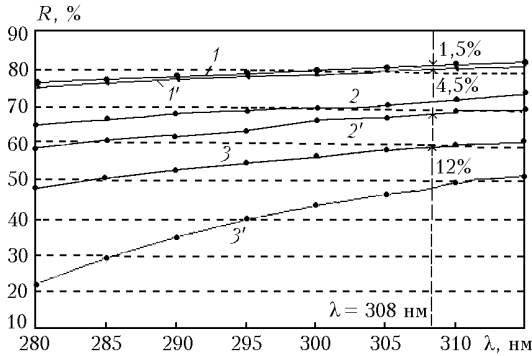


Рис. 3. Зависимость отражательной способности алюминиевой пленки от длины волны до (кривые 1', 2', 3') и после (1, 2, 3) взаимодействия с излучением; плотность мощности излучения  $I = 2 \text{ МВт/см}^2$

Следует отметить, что превышение определенного значения как плотности тока ( $> 100 \text{ МА/см}^2$ ), так и плотности мощности излучения ( $> 10 \text{ МВт/см}^2$ ) приводило к частичному разрушению образцов, следовательно, и к уменьшению их отражательной способности.

Что же касается причин изменений коэффициента отражения  $r$ , то они зависят от способа воздействия на материалы. Интенсивное излучение очищает поверхность от оксидного слоя [6, 7], загрязнений, что даже наблюдается визуально. Мощный наносекундный импульс тока, как показали наши измерения, приводит к уменьшению омического сопротивления пленок на 10–15%. По-видимому, при пропускании тока плотностью  $j \sim 100 \text{ МА/см}^2$  через алюминиевые пленки в них происходят изменения, улучшающие электропроводимость. А как известно, электрические свойства металлов тесно связаны с их оптическими свойствами [8].

На основе данных исследований разработан способ очистки поверхностей оптических элементов [9].

### 3. Обратимые изменения отражательной способности алюминиевой пленки за время действия импульсов тока и излучения

В процессе экспериментов было обнаружено, что в результате воздействия импульсов тока до  $100 \text{ МА/см}^2$  происходит обратимое увеличение отражательной способности алюминиевой пленки.

Результаты экспериментов представлены в таблице.

Энергия лазерного импульса, мДж	28	29	31,4	33,8
Коэффициент отражения, % при пропускании электрического тока	89	87,6	85	83
без пропускания электрического тока	88	86	82	79

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 [10] на примере оксидной пленки  $\text{V}_2\text{O}_5$ . Он заключается в том, что лазерное излучение может отражаться свободными электронами, попадающими тем или иным способом в зону проводимости оксидной пленки. При условии  $\omega_{las} \sim \omega_p$  ( $\omega_{las}$  – частота лазерного излучения,  $\omega_p$  – частота плазменных колебаний свободных электронов) отражение от пленки становится преобладающим.

Нами были проделаны расчеты суммарного коэффициента отражения системы «металл–пленка» (СМП). В расчетах предполагалось постоянство коэффициента отражения металла  $r_m$ . Коэффициент отражения оксидной пленки вычислялся 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  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в нормальных условиях, т.е. при практически полном отсутствии свободных электронов в зоне проводимости;  $\tau$  – среднее время релаксации электронов, которое было взято таким же, как у чистого  $\text{Al}$ , и вычислено на основе данных [10].

Результаты, представленные на рис. 4, показывают рост коэффициента отражения СМП при увеличении концентрации свободных электронов, т.е. отношения  $\omega_p/\omega_{las}$ . Причем это увеличение становится более значительным (кривые 2, 3) с уменьшением коэффициента отражения металла, которое может

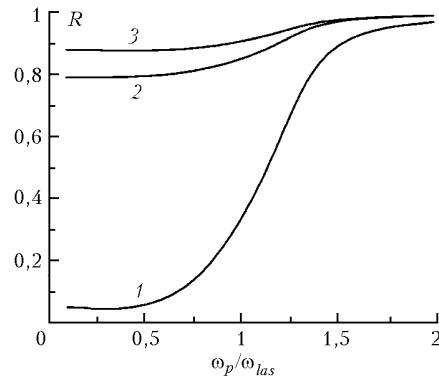


Рис. 4. Зависимость коэффициентов отражения оксидной пленки (1) и системы «металл–пленка» (2, 3) от параметра  $\omega_p/\omega_{las}$  при различных коэффициентах отражения металла: 2 – 79%, 3 – 88%

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. [11] и цитируемую там литературу), вызывает смещение энергетических зон в диэлектрике. Уменьшение ширины запрещенной зоны существенно увеличивает вероятность кратковременного перекрытия валентной зоны с зоной проводимости и переброску туда электронов.

### Заключение

Результаты исследований, приведенные в настоящей статье, демонстрируют возможности улучшения отражательной способности  $r$  алюминиевой пленки как одновременным воздействием импульсами лазерного излучения и тока, так и отдельно излучением. Степень взаимодействия не была полностью оптимизирована, и можно предположить, что при соответствующем выборе параметров импульсов тока и излучения увеличение  $r$  будет значительнее.

#### *V. V. Osipov, A. N. Orlov, V. V. Lisenkov. Aluminum film reflectivity under exposure to current pulses and laser radiation.*

The increase of aluminum reflectivity ( $\lambda = 280\text{--}317$  nm) caused by electric current ( $j \sim 100$  MA/cm<sup>2</sup>) and XeCl laser radiation ( $I \approx 2$  MW/cm<sup>2</sup>) is investigated. The effect can be both reversible and irreversible. We suppose that this effect can be explained by radiation reflection from free electrons falling into the conduction zone of aluminum oxide film on the metal surface during electric current and laser radiation pulses.

В ходе проведенных экспериментов обнаружен эффект обратимого увеличения коэффициента отражения алюминия до 4% при пропускании тока высокой плотности и предложено качественное объяснение этого явления.

1. *Ивлев И.В., Яковлев М.А.* Взаимодействие импульсного лазерного излучения с приповерхностным слоем электронов эмиссии в присутствии магнитного поля // Ж. техн. физ. 1995. Т. 65. Вып. 4. С. 142–149.
2. *Ивлев И.В., Павлов К.Б., Яковлев М.А.* Взаимодействие излучения с приповерхностным слоем термоэлектронов и эффект отрицательной электропроводности // Ж. техн. физ. 1994. Т. 64. Вып. 9. С. 50–59.
3. *Физика тонких пленок* / Под ред. Г. Хааса и Туна: Пер. с англ. Т. 2. М.: Мир, 1967. С. 304–306.
4. *Кропанев А.Ю., Орлов А.Н., Осипов В.В.* Характеристики импульсно-периодического ХеСl-лазера с системой регенерации газовой смеси // Квант. электрон. 1996. Т. 23. № 3. С. 225–228.
5. *Haas G., Waylons J.E.* Optical constants and reflectance and transmittance of evaporated aluminum in the visible and ultraviolet // J. Opt. Soc. Amer. 1961. V. 51. № 7. P. 719–722.
6. *Бонч-Бруевич А.М., Имас Я.А., Романов Г.С., Либенсон М.Н., Мальцев Л.Н.* Изменение отражательной способности металлов за время действия импульсов ОКГ // Ж. техн. физ. 1968. Т. 38. Вып. 5. С. 851–855.
7. *Розенберг Г.В.* Оптика тонкослойных покрытий. М.: Физматгиз, 1958. 570 с.
8. *Соколов.* Оптические свойства металлов. М.: Физматгиз, 1961. 464 с.
9. *Осипов В.В., Орлов А.Н., Царанкин В.В.* Способ очистки оптических поверхностей. Пат. РФ № 2119217. Зарегистрирован 16.10.98 г.
10. *Прохоров А.М., Конов В.И., Урсу И., Михэилеску И.Н.* Взаимодействие лазерного излучения с металлами. М.: Наука, 1988. 537 с.
11. *Вершинин Ю.Н.* Электронно-тепловые и детонационные процессы при электрическом пробое твердых диэлектриков. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2000. 258 с.