

УДК 5.04.05:620.76/78.004

## ИЗМЕРЕНИЕ ПРОЗРАЧНОСТИ ЗАЩИТНЫХ СТЕКОЛ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НИХ УСКОРЕННЫХ ИОНОВ<sup>1</sup>

А.В. Гаврюшин, А.Б. Надирадзе

*В статье рассмотрена методика и некоторые результаты измерения прозрачности стеклянных покрытий при воздействии на них ускоренных ионов. В основе методики лежит принцип относительных измерений. Для измерения используется оптопара, в рабочее пространство которой помещается исследуемый образец. Величина прозрачности определяется как отношение двух сигналов, измеренных оптопарой – с образцом и без него. Показано, что такая схема измерения позволяет получить относительную погрешность измерений на уровне 0.01%. Это позволяет регистрировать небольшие изменения прозрачности, обусловленные очисткой поверхности стекла, образованием слоя адсорбированных частиц и другими физическими процессами на поверхности.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Среди всех промышленных стекол кварцевое стекло занимает особое положение. Обладая уникальным комплексом ценнейших свойств, оно оказывается в очень многих случаях в полном смысле этого слова незаменимым материалом. И хотя по валовому выпуску оно находится далеко позади ряда других типов стекол, по их значению для космических технологий оно, вероятно, не имеет себе равных.

Хорошо известно, что кварцевое стекло применяется на космических летательных аппаратах (КЛА) в качестве покровного стекла для солнечных батарей (СБ) [1,2]. Стекло защищает поверхность батареи от воздействия различных космических факторов. Тем самым стекло само подвержено множеству типов воздействия. В основном это воздействие плазменного потока электроракетного двигателя (ЭРД), радиационных поясов и метеорных частиц, а также различные температурные режимы работы солнечной батареи, собственная внешняя атмосфера аппарата и др. Результатом перечисленных воздействий является изменение оптических свойств стекла вследствие эрозии поверхности (хотя не исключены и другие механизмы), что напрямую сказывается на энергетических характеристиках батареи.

В связи с этим возникает задача прогнозирования изменения прозрачности стекол и экспериментального исследования зависимости прозрачности в различных условиях воздействия. При этом надо отметить тот факт, что при определенных условиях воздействие плазменного

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке в виде гранта Министерства образования Российской Федерации

потока на поверхность стекла является позитивным [3]. Причинами такого эффекта могут быть очистка поверхности или ее полировка ионами струи при малых углах падения частиц ( $\sim 10^\circ$ ).

Наиболее эффективным способом получения данных о влиянии ионной бомбардировки на стекло является лабораторный эксперимент. Однако существует ряд проблем, обусловленных условиями проведения вакуумного эксперимента. В частности, существует проблема осаждения на поверхности стекла паров масла и продуктов распыления стенок вакуумной камеры. Кроме того, относительно небольшие изменения прозрачности стекол требуют использования прецизионных методов измерения, позволяющих фиксировать изменения прозрачности стекол непосредственно во время эксперимента.

### ***МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПРОЗРАЧНОСТИ СТЕКЛА***

В общем случае существует несколько методов измерения прозрачности стекла. Как правило, измеряются значения световых потоков, проходящих через стекло или отраженных от его поверхности. Для проведения подобных измерений требуется сложное и дорогостоящее оборудование. Отсюда видно, что для таких методов оптимальным количеством измерений является два измерения, т.е. до воздействия плазменного потока и после воздействия. Однако на основании двух значений прозрачности стекла сложно и некорректно построить зависимость изменения прозрачности при воздействии плазменного потока. При этом получается недостаточно информации о динамике такого изменения. С другой стороны, возможно проведение нескольких измерений, но тогда потребуются проведение нескольких установок образца внутри вакуумной камеры с соответствующей подготовкой самой камеры (откачивание газа). В связи с этим за время измерений и откачивания газа резко увеличивается вероятность попадания посторонних частиц на поверхность образца. В этом случае будет сложно выявить истинную причину изменения прозрачности стекла.

Данная методика предлагает использовать принципиально другой подход к измерению прозрачности стекла при сохранении высокой точности измеряемых сигналов. При этом методика не требует изготовления высокотехнологичных экспериментальных модулей и организации сложной системы фиксации измеряемого сигнала. Такой подход заключается в относительном методе измерения прозрачности стекла. В основе предлагаемого метода лежит измерение не абсолютного сигнала, а относительного сигнала, т.е. фиксируется световой поток  $\Phi_{cm}$ ,

прошедший через стекло и световой поток при отсутствии стекла  $\Phi_0$ , тогда отношение этих потоков характеризует прозрачность  $T$ . Такое отношение записывается в следующем виде:

$$T = \frac{\Phi_{cm}}{\Phi_0} \quad (1)$$

При уменьшении светового потока через стекло  $\Phi_{cm}$  вследствие воздействия плазменного потока и образования микрорельефа на поверхности стекла, прозрачность также будет уменьшаться.

Для реализации этого метода измерения элементами измерительной системы должны являться источник и приемник света. В качестве приемника оптического излучения предлагается использовать фоточувствительный прибор, действие которого основано на преобразовании энергии излучения в электрический сигнал. В качестве сигнала может быть либо изменение напряжения на нагрузке приемника света, либо фототок. Тогда выражение прозрачности при использовании приемника света и регистрации на нем изменения напряжения можно переписать в следующем виде:

$$T = \frac{U_{cm}}{U_0} \quad (2)$$

где  $U_{cm}$  – напряжение фотосигнала в присутствии стекла между источником и приемником света и  $U_0$  – напряжение фотосигнала при попадании полного светового потока на приемник света при отсутствии стекла. Отсюда видно, что использование любого приемника оптического излучения значительно упрощает процесс измерения прозрачности стекла. Использование такого метода измерения прозрачности позволяет проводить измерения внутри вакуумной камеры, так как в этом случае не требуется очень сложное оборудование и его можно разместить внутри камеры. При этом одновременно решаются проблемы, связанные с влиянием внешних факторов: камера не разгерметизируется, происходит однократное откачивание газа из камеры и исключается попадание каких-либо частиц на стекло. Также еще одним преимуществом данного метода является то обстоятельство, что если и происходит небольшое изменение характеристик источника и приемника света, то это никак не влияет на значение измеряемого относительного сигнала.

В качестве источника света используется лампа накаливания, а в качестве приемника света – фотодиод типа ФД263-01. Такой выбор связан с тем, что спектральные характеристики фотодиода и лампы пересекаются в широком диапазоне длин волн, что обеспечивает процесс измерения как таковой. При этом такие источник и приемник света имеют стабильные

характеристики. Управление источником и приемником света не требует использования сложного оборудования.

Образцы стекла представляют собой промышленные стекла типа К208, которые используются на реальных КЛА. В качестве источника ионов в эксперименте используется штатный стационарный плазменный двигатель типа М-70.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ МЕТОДИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**

Время эксперимента составляет 12 часов. Измерения проводятся с интервалом  $\sim 2 \dots 3$  часа при выключенном двигателе. В результате эксперимента получена зависимость (рис. 1) прозрачности образца стекла от времени воздействия плазменного потока. В начальный момент времени прозрачность образца составляла 0,960, что соответствует справочному значению "идеального" стекла. После воздействия в течение 2 часов наблюдается небольшое увеличение ( $\sim 0,01$ ) прозрачности стекла, что, по-видимому, объясняется очисткой поверхности от налета, который не мог быть очищен при установке образца. При дальнейшей обработке наблюдается плавное уменьшение прозрачности стекла.

Рис. 1. Зависимость прозрачности стекла от времени воздействия.

Данная методика позволила получить результаты с относительной погрешностью  $\sim 0,05\%$ . Так как приводить полный протокол измерений смысла не имеет вследствие большого объема данных, то дальше показывается расчет точности на примере некоторой части измерений. Обработка измерений проводится по методу среднеквадратического отклонения.

В качестве примера возьмем значения прозрачности в момент времени  $\tau = 0$ . Найдем среднее значение прозрачности и границы доверительного интервала из этих измерений. Выберем произвольное число  $T_0$ , удобное для расчетов (пусть  $T_0 = 0,96$ ), вычислим разности  $T_i - T_0$  и квадраты этих разностей. Результаты приведены в следующей таблице:

$i$	$T_i$	$T_i - T_0$	$(T_i - T_0)^2$
1	0,9604	0,0004	1,524E-07
2	0,9601	0,0001	1,993E-08
3	0,9601	0,0001	9,116E-09
4	0,9602	0,0002	3,808E-08
5	0,9604	0,0004	1,956E-07
Сумма		0,0012	4,152E-07

Найдем среднее значение  $\bar{T}$  :

$$\bar{T} = T_0 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - T_0) = 0,96 + \frac{0,0012}{5} = 0,9603 \quad (3)$$

Средний квадрат отклонения серии из пяти измерений равен:

$$\Delta S_{\bar{T}}^2 = \frac{1}{n(n-1)} \left[ \sum_{i=1}^n (T_i - T_0)^2 - n(\bar{T} - T_0)^2 \right] = \frac{1}{5 \cdot 4} (4,152 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 0,9221) = 4,7688 \cdot 10^{-9} \quad (4)$$

Извлекая квадратный корень из  $\Delta S_{\bar{T}}^2$ , получаем:

$$\Delta S_{\bar{T}} = 6,906 \cdot 10^{-5}$$

Для вероятности  $\alpha = 0,95$  и  $n = 5$  значение коэффициента Стьюдента  $t_\alpha = 2,78$ , тогда абсолютная погрешность результата измерений составит:

$$\Delta T_{\bar{T}} = t_\alpha \cdot \Delta S_{\bar{T}} = 2,78 \cdot 6,906 \cdot 10^{-5} = 0,0001 \quad (5)$$

Тогда результат измерений можно представить в виде:

$$T = 0,9603 \pm 0,0001 .$$

Относительная погрешность:

$$\varepsilon_T = \pm \frac{0,0001}{0,9603} \cdot 100\% = 0,01\%$$

Измерения проводились ампервольтметром с абсолютной погрешностью 0,0005. В связи с этим получается, что приборная погрешность больше расчетной погрешности, поэтому окончательной принимается приборная погрешность 0,0005. Тогда относительная погрешность составит:

$$\varepsilon_T = \pm \frac{0,0005}{0,9603} \cdot 100\% = 0,05\% .$$

Представленный расчет говорит о том, что при правильном выборе методики измерений можно получать результаты с высокой точностью.

В заключение следует отметить следующие обстоятельства проведения эксперимента, которые необходимо учесть при проведении дальнейших подобных экспериментов. Несмотря на то, что расстояние от образца до двигателя подвергалось численным расчетам, происходил незначительный нагрев экспериментального модуля с образцом, что оказывало влияние на показания приемника света. В связи с этим рекомендуется осуществить термостабилизацию модуля, либо выдерживать некоторое время после выключения двигателя. Полученная зависимость показывает плавное уменьшение прозрачности стекла, однако желательно увеличить продолжительность воздействия для получения более значимого изменения прозрачности. В связи с большим массивом фиксируемых значений рекомендуется использовать в эксперименте автоматическую систему измерения типа аналого-цифрового преобразователя.

### ***СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ***

1. Летин В.А., Заявлин В.Р., Губанова И.А. Солнечные батареи. Вопросы деградации // Электротехн. пром-сть. Сер. 22, Источники тока: Обзор информ. – 1988. – Вып. 13.– с. 1-44.
2. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей.– М.: Энергоатомиздат, 1983.- 360 с.
3. Popov G., Kim V. Electric propulsion subsystem development and application in Russia. // ESA SP-465, Proceedings 3<sup>rd</sup> International Conference on Spacecraft Propulsion, Cannes, France, 10-13 October 2000. – pp. 21-26.