

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (СГАУ)

Экспериментальная отработка воздействия факторов космической среды на материалы

Электронное методическое пособие к лабораторным и практическим работам

Работа выполнена по мероприятию блока 2 «Развитие и повышение эффективности научно-инновационной деятельности» и блока 3 «Развитие информационной научно-образовательной среды и инфраструктуры» Программы развития СГАУ на 2009 – 2018 годы по проекту «Разработка методического и программного обеспечения для эксплуатации экспериментального стенда испытания материалов и электронного оборудования космических аппаратов на влияние факторов космической среды (микрсометеориты, электронное и ультрафиолетовое излучение)»

Соглашение № 2/10 от 3 июня 2013 г.

САМАРА
2013

УДК 629.78(075)

ББК 39.6я7

Э 413

Авторы - составители: **Семкин Николай Данилович,
Калаев Михаил Павлович,
Телегин Алексей Михайлович**

Рецензент: Воронов К.Е., к.т.н., доцент кафедрой «Радитехника» .

Редакторская обработка: М. П. Калаев

Компьютерная верстка: А. М. Телегин

Экспериментальная отработка воздействия факторов космической среды на материалы [Электронный ресурс] : электрон. метод. пособие к лаб. и практ. работам/ М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); авт.-сост. Н. Д. Семкин, М.П.Калаев, А.М. Телегин. - Электрон. текстовые и граф. дан. (0,8 Мбайт). - Самара, 2013. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

В пособии приводятся краткие теоретические сведения, описание структурных схем и экспериментальной установки, порядок выполнения лабораторной работы с перечнем контрольных вопросов.

Методическое пособие предназначено для подготовки специалистов специальности 210302.65-1-О-П «Радиотехника» радиотехнического факультета, изучающих дисциплину «Моделирование воздействия космической среды на РЭА» в 10 семестре.

Разработано на кафедре КТЭСиУ.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2013

Содержание

Введение.....	4
1. Описание экспериментального стенда.....	5
2. Краткие теоретические сведения.....	8
2.1 Экспериментальная отработка воздействия факторов космической среды на солнечные батареи.....	8
2.2 Экспериментальная отработка воздействия факторов космической среды на оптические стёкла.....	11
2.3 Экспериментальная отработка воздействия факторов космической среды на тонкие плёнки.....	14
3. Порядок выполнения работы.....	17
Содержание отчета.....	19
Контрольные вопросы.....	19
Литература.....	20
Приложение 1.....	21

Введение

Важнейшую роль в обеспечении длительной безотказной работы КА играет стойкость их конструкционных материалов и элементов бортового оборудования к воздействию окружающей космической среды. На КА в полете воздействует обширный комплекс факторов космического пространства (ФКП): потоки электронов и ионов высокой энергии, холодная и горячая космическая плазма, солнечное электромагнитное излучение, метеорная материя, твердые частицы искусственного происхождения и другие факторы. В результате такого воздействия в материалах и элементах бортового оборудования КА протекают разнообразные физико-химические процессы, приводящие к ухудшению их эксплуатационных параметров. В зависимости от характера процессов, инициируемых воздействием космической среды, происходящие изменения свойств материалов и элементов оборудования могут иметь разный временной масштаб, быть обратимыми или необратимыми, представлять различную опасность для бортовых систем.

Особый интерес представляет в настоящее время воздействие ФКП на электронную элементную базу импортного и отечественного производства, деградация поверхностных оптических элементов КА при воздействии твёрдых пылевых частиц, а также унос массы новых (в том числе –нано) материалов на поверхности КА. Для этих целей проводится лабораторная отработка воздействия перечисленных выше факторов с использованием различных экспериментальных стендов.

1. Описание экспериментального стенда

Для экспериментальной отработки воздействия ФКП на материалы используются лабораторные экспериментальные стенды, как правило да основе различных ускорителей. Рассмотрим методику проведения эксперимента с использованием электростатического ускорителя микрометеоритных частиц, вакуумная камера которого имеет возможность ввода в пространство эксперимента различных воздействующих факторов.

В ходе каждого эксперимента в камере ускорителя располагался исследуемые образцы материалов, что позволяет производить оценку деградации материалов в процессе реального времени без развакуумирования камеры ускорителя. После эксперимента образцы вынимаются и исследуются с помощью лабораторных приборов – спектрофотометров, электронных микроскопов.

Источником частиц служит линейный ускоритель для моделирования микрометеоритов [35], тракт которого состоит из инжектора, линейного электростатического ускорителя (ЛЭСУ), линейного электродинамического ускорителя (ЛЭДУ), трех измерительных линеек и вакуумной камеры.

На рисунке 1 показана фотография ускорителя, на рисунке 2 – структурная схема ускорителя.

Технические характеристики ускорителя:

Диапазон ускоряемых частиц, мкм	0,1 – 10
Диапазон скоростей, км/с	1 – 12
Диапазон удельных зарядов частиц, Кл/кг	1 – 50
Точность измерения скорости частиц, не менее %	5
Точность измерения удельного заряда частиц, не менее %	10
Предельное остаточное давление в вакуумной системе, , мм.рт.ст.	10^{-5}
Потребляемая мощность, не более, кВт:	10

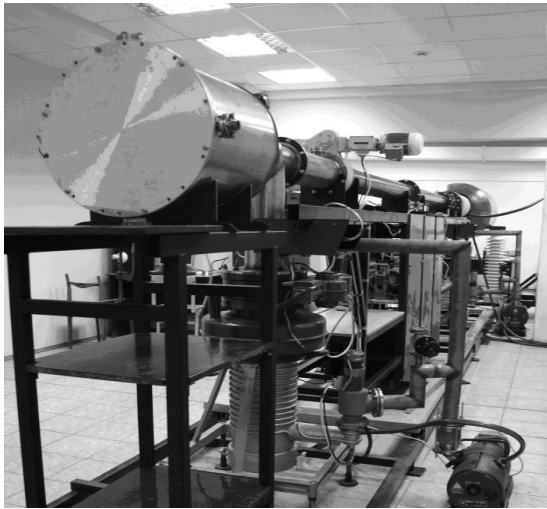


Рисунок 1 - Фотография ускорителя

Ускоритель работает следующим образом. После зарядки в инжекторе частицы последовательно проходят первую измерительную линейку, линейный электростатический ускоритель, вторую измерительную линейку, линейный электродинамический ускоритель и третью измерительную линейку. Сигналы с первой измерительной линейки после усиления поступают на блок формирователя интервала, который формирует на своем выходе импульс длительностью, обратно пропорциональной скорости частицы. Для связи блока формирователя интервала с блоком микроконтроллера служит блок лазерной развязки. Сигналы со второй и третьей измерительных линеек через соответствующие усилители поступают в блок микроконтроллера. По длительностям сигналов с первой и второй измеряющих линеек блок микроконтроллера формирует на своем выходе управляющие сигналы для блока высоковольтного усилителя. Блок высоковольтного усилителя формирует на своих выходах ускоряющие напряжения для четных и нечетных трубок дрейфа линейного электродинамического ускорителя. Вакуумная система состоит из вакуумной камеры и двух систем вакуумной откачки, каждая из которых состоит из форвакуумного насоса НВР-5,5, диффузионного высоковакуумного насоса АВДМ-160, двух клапанов-отсекателей КВЭ-25, проходного затвора 2ЗВЭ-100 и клапана-натекателя КН-2,5. Предельное остаточное давление в вакуумной камере составляет 10^{-5} мм.рт.ст.

2. Краткие теоретические сведения

2.1 Экспериментальная обработка воздействия факторов космического пространства на солнечные батареи

Воздействие ФКП приводит к ухудшению оптических характеристик, в частности коэффициента пропускания солнечного излучения ($\tau_{зп}$) защитных покрытий солнечной батареи. Снижение $\tau_{зп}$ приводит к уменьшению количества генерируемых носителей заряда и соответственно к уменьшению тока короткого замыкания. Для измерения характеристик солнечной батареи используется экспериментальная установка, показанная на рисунке 3. В вакуумной камере ускорителя установлены две солнечные батареи. Первая батарея ВАТ1 находится в зоне воздействия частиц, вторая ВАТ2 смещена в сторону. Выходы обеих солнечных батарей подключены ко входам дифференциального усилителя, а также к управляемым резисторам, задающим режим нагрузки. На некотором расстоянии от батарей расположена мощная галогеновая лампа, которая включается во время измерения тока и напряжения. Результат измерений передаётся в ЭВМ.

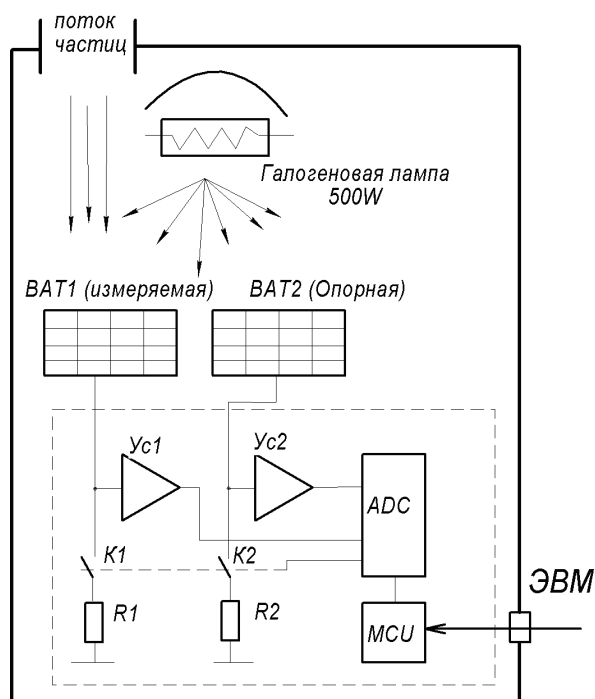


Рисунок 3 - экспериментальная установка для измерения характеристик солнечной батареи

Такая схема включения позволяет получить высокую точность измерения

и уменьшить влияние температуры, так как поверхность обеих солнечных батарей находится в одинаковых условиях.

Пример вольтамперной характеристика (ВАХ) солнечной батареи, до и после воздействия потока из 7000 частиц размером $0,5\div 3$ мкм и скоростями $1\div 8$ км/с показано на рисунке 4. На графике видно, что ток короткого замыкания подвержен гораздо большей деградации, чем напряжение холостого хода.

Пример вольтамперной характеристики (ВАХ) солнечной батареи, до и после воздействия потока частиц размером $0,5\div 3$ мкм и скоростями $1\div 8$ км/с показано на рисунке 4. На графике видно, что ток короткого замыкания подвержен гораздо большей деградации, чем напряжение холостого хода.

Изменение ВАХ происходит преимущественно в режиме больших токов. В режиме, близком к холостому ходу, изменения практически не происходит. Однако это верно только для случая, когда не имеет место пробой защитного покрытия солнечной батареи и закорачивания слоя полупроводника [71].

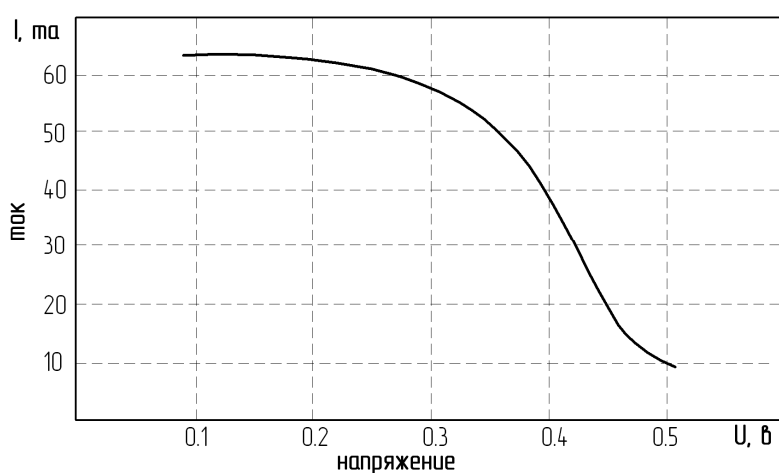


Рисунок 4 - ВАХ СБ после эксперимента.
Поток 5×10^4 частиц на площадь 8 см^2 .

На рисунке 5 показано изменение тока короткого замыкания (КЗ) и напряжения холостого хода (ХХ) в зависимости от количества частиц, попавших в образец.

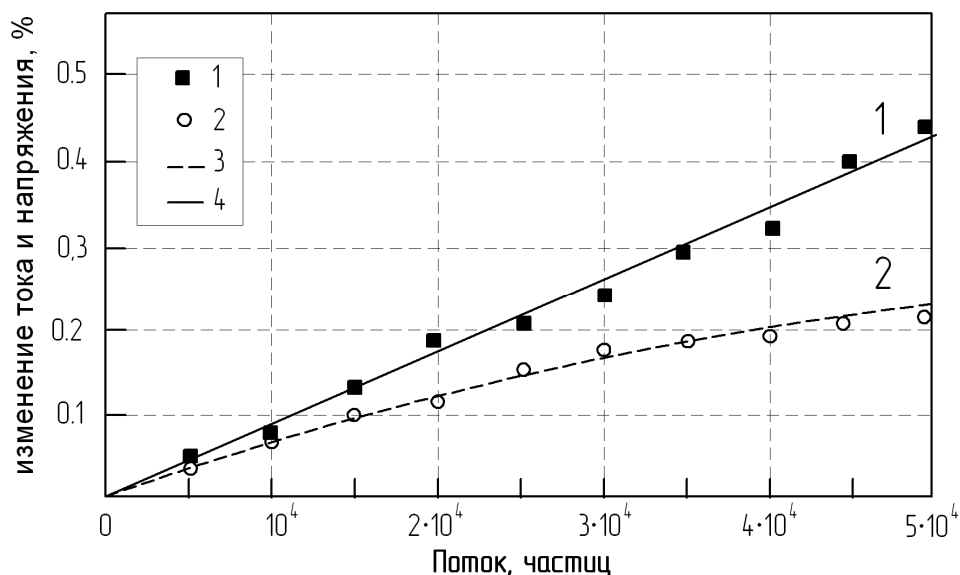


Рисунок 5 - изменение характеристик СБ в зависимости от количества частиц:

- 1 – зависимость изменения тока КЗ
- 2 – Зависимость изменения напряжения XX солнечной батареи от количества частиц

После эксперимента образцы СБ исследуются с помощью электронного микроскопа. Общая картина повреждений складывается из совокупности следующих дефектов: отпечаток от внедрения частицы соответствующей формы и размера, радиальные и концентрические трещины, образующие зону, в десятки раз превышающую по площади отпечаток, зоны механического разрушения, обрамляющий его в 4-5 раз больший по размеру, но подобный ему по форме отпечаток; отслоение желатиново-клеевой оболочки, образуемое от границы концентрических трещин и имеющее форму кольцевой «кляксы»; оголения желатиново-клеевой подложки за счёт уноса измельчённого, разрушенного покрытия. Каждый из этих эффектов оказывает различное влияние на изменение функциональных параметров СБ в большей или меньшей степени.

2.2 Экспериментальная отработка воздействия факторов космического пространства на оптические стёкла

При исследовании оптики невозможно создать единый сменный блок для исследования всех типов и материалов. Наиболее важной характеристикой является изменение коэффициента пропускания под действием ФКП. Коэффициент пропускания можно определить следующим выражением:

$$K_n = \frac{\Phi 1}{\Phi 2}$$

где $\Phi 1$ – световой поток, падающий на оптический элемент,

$\Phi 2$ – световой поток, прошедший оптический элемент. K_n имеет для каждого типа материала свое спектральное распределение, следовательно, необходимо определять K_n для нескольких значений длины волны в рабочем диапазоне материала.

При исследовании кварцевой оптики диапазон исследования должен быть от 0,3 мкм до 0,76 мкм, т.е. весь видимый и ультрафиолетовый участки спектра. При исследовании соляной и кремниевой оптики – инфракрасный диапазон. В случае если достаточно иметь 5-6 точек измерения, можно предложить схему фотометра на рисунке 6 где: $\Phi 1$ – кварцевая лампа или инфракрасный излучатель, 1 – светофильтры, 2 – фокусирующая оптика, 3 – исследуемый объект, 4 – фотоприемники.

Перед экспериментом снимается спектральная характеристика коэффициента пропускания, затем после эксперимента снимаются те же самые характеристики, таким образом можно компенсировать неравномерность спектра излучения $\Phi 1$. С помощью оптических фильтров можно получить разделение в диапазоне не более 30 дБ, с учетом неточности конструкции, фокусировки, спектра излучения $\Phi 1$, малогабаритного исполнения оптики погрешность измерения может достигать 60%.

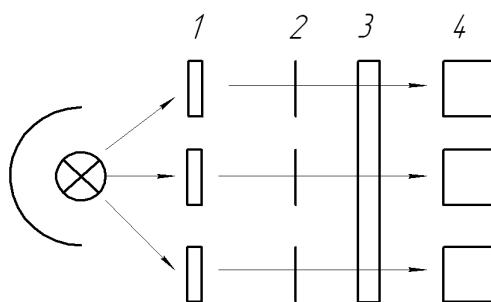


Рисунок 6 – Структурная схема оптического анализатора спектра.

На рисунке 7 показана реализация данного метода. Измеритель работает следующим образом. Частица попадает на поверхность образцов, расположенных в зоне экспонирования. После накопления на поверхности образцов необходимого количества кратеров от микрометеороидов, барабан поворачивается при помощи шагового двигателя. В это время один из образцов в барабане находится в зоне измерения оптических характеристик.

Оптические характеристики контролируются с помощью двух методов:

- Спектральный. Коэффициент направленного пропускания света с длиной волны $\lambda = 405, 525, 650$.

- Угловое рассеяние. Индикатриса рассеяния лазерного излучения 650нм, прошедшего через стекло с дефектами в диапазоне углов 6-38 градусов.

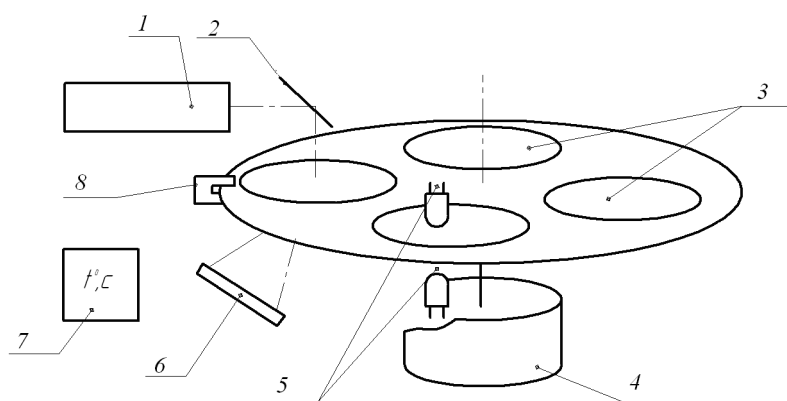


Рисунок 7 – оптическая схема измерителя ДЧ-ОПТИКА

1. Лазер
2. Зеркало
3. Исследуемые образцы
4. Шаговый двигатель
5. Измеритель прозрачности
6. Измеритель рассеяния
7. Термодатчик
8. Датчик положения диска

Изменение коэффициента пропускания определяется как [2]

$$\Delta T(\lambda_n) = \frac{T_k(\lambda_n)}{T_o(\lambda_n)} = 1 - \frac{I_k(\lambda_n)}{I_o(\lambda_n)},$$

где $I_k(\lambda_n)$ - интенсивность светового пучка, прошедшего через экспонируемый образец;

$I_o(\lambda_n)$ - интенсивность светового пучка, прошедшего через опорный образец.

На рисунке 8 показан пример функции ΔT , соответствующей кратерам со средним диаметром 4 мкм.

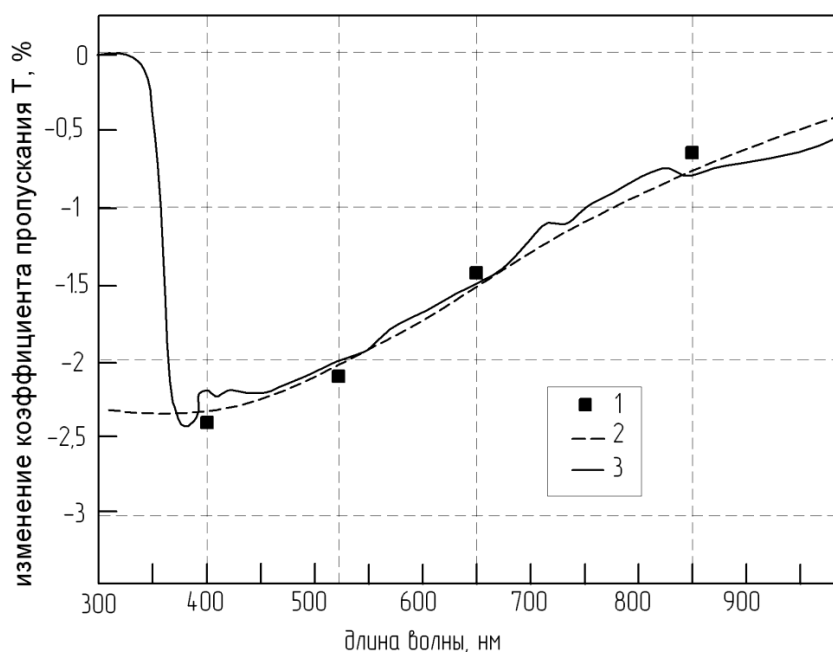


Рисунок 8 – изменение спектрального коэффициента пропускания стекла: 1 - эксперимент;

2 – расчетный.

3 – измерение с помощью спектрофотометра UV-1700;

Пропускание увеличивается при увеличении длины волны проходящего излучения. Рост пропускания образца с ростом длины волны обусловлен спецификой поглощения и рассеивания излучения частицами и дифракции излучения на их краях. Чем выше длина волны излучения, тем меньше влияние частиц и дефектов на изменение спектрального пропускания оптического элемента.

2.3 Экспериментальная отработка воздействия факторов

космического пространства на тонкие плёнки

В околоземном космическом пространстве на материалы внешней поверхности космических аппаратов (КА) действуют различные виды излучений, а также атомарный кислород, состав и плотность которых зависят от орбиты объекта. Терморегулирование КА с помощью керамических, композиционных и лакокрасочных покрытий осуществляется подбором соответствующих коэффициентов отражения и испускания излучения обращенных в космос поверхностей. При воздействии факторов космического пространства свойства поверхностных материалов должны оставаться неизменными, но воздействие излучений приводит к уменьшению массы защитных покрытий, что, в конечном счете, уменьшает срок нормального функционирования аппаратов. При экспериментальной отработке воздействия ФКП на покрытия контролируется унос массы их плёнок при воздействии потоков излучений

Для контроля уноса массы с поверхности используется универсальный частотный метод, отличающийся простотой устройства и эксплуатации преобразователя. В качестве преобразователя в этом методе используется кварцевый элемент, включенный в контур генератора частоты. Принцип действия кварцевого преобразователя основан на зависимости частоты генерируемых сигналов от изменения массы кварцевого элемента в процессе осаждения на его поверхность пыли. С увеличением массы элемента его резонансная частота падает. Для линейного участка зависимости частоты от массы справедливо соотношение:

$$|\Delta f| = f_0 \cdot \frac{\Delta m}{m_0},$$

где m_0 и f_0 - масса и резонансная частота кварцевого преобразователя соответственно до осаждения пыли;

Δm и Δf - изменение массы и резонансной частоты соответственно

вследствие осаждения пыли.

Таким образом, имеет место линейная зависимость между изменением частоты генератора и массой осажденной пыли. Чувствительность преобразователя в $\frac{gP}{см^2 \cdot Гц}$:

$$C_f = \frac{m_0}{f_0 \cdot S},$$

где m_0 и f_0 - масса и резонансная частота кварцевого преобразователя соответственно до осаждения пыли;

S – площадь кварцевого элемента.

Структурная схема кварцевых весов, удовлетворяющая этим условиям, приведена на рисунке 9.

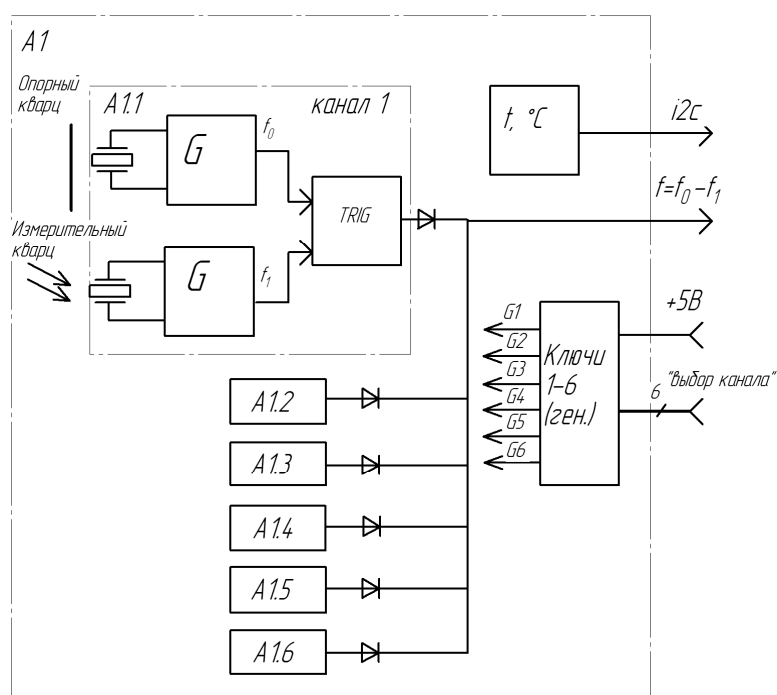


Рисунок 9 - Структурная схема измерителя уноса массы покрытий

Для минимизации температурных влияний пара кристаллов с одинаковыми температурными характеристиками, а также с практически одинаковыми частотами установлены на одной основе на малом расстоянии друг от друга, так что они находятся при одной и той же температуре. Регистрирующий кристалл РК принимает на себя поток пыли, в то время как контрольный кристалл КК - изолирован от окружающей среды. Каждый

кристалл имеет свой собственный генератор (генератор регистрирующего кристалла ГРК и генератор контрольного кристалла ГКК). С выходов генераторов сигналы поступают на смеситель СМ, на выходе которого образуется разностная частота. Т. к. контрольный кристалл изолирован от окружающей среды, изменение частоты сигнала на выходе смесителя может быть вызвано исключительно изменением массы на регистрирующем кристалле. Частота сигнала со смесителя лежит в килогерцовом диапазоне, ее легче передать, чем частоту кристаллов (10-25 МГц). Применение контрольного кристалла и смесителя минимизирует влияние температурных изменений. Дальнейшая минимизация температурных влияний возможна путем выбора генератора и смесителя, которые имеют также низкочастотные температурные коэффициенты в диапазоне рабочих температур. Разностная частота с выхода смесителя поступает на формирователь импульсов ФИ, преобразующий синусоидальный сигнал в последовательность импульсов той же частоты следования.

3. Порядок выполнения работы

К выполнению лабораторной работы допускаются студенты, изучившие правила эксплуатации экспериментальной установки и ускорителя пылевых частиц, а также прослушавшие инструктаж по мерам безопасности. Также рекомендуется изучить теорию высокоскоростного удара и рассеяния света в дисперсионной среде, которая изложена в лабораторных работах “исследование оптических характеристик терморегулирующих покрытий” и “моделирование влияния поверхностных дефектов при высокоскоростном ударе на оптические свойства прозрачных материалов”.

Выполнение лабораторной работы осуществляется только в присутствии и под руководством инженера или лаборанта, имеющего соответствующий опыт в обслуживании экспериментальной установки. В ходе эксперимента производится оценка воздействия ФКП на оптические стёкла. При исследовании других материалов методика работы с установкой аналогична.

3.1 Подготовка экспериментальной установки к работе.

Подготовка экспериментальной установки к работе проводится в соответствии с приложением 1 и рисунком 1П. Готовность установки к работе определяется показаниями измерителя степени разрежения (рисунок 1П). Давление в камере должно быть не хуже 10^{-4} мм рт.ст.

3.2 Проверка работоспособности инжектора частиц.

Включить источник питания инжектора ($U=20$ кВ). Зарядочувствительные усилители подключить ко входам запоминающего осциллографа, режим работы осциллографа – ждущий.

3.3 Регистрация скорости частиц.

Скорость частиц находится путем измерения времени полета их через два цилиндра, или времени пролета расстояния между нижним цилиндром и мишенью. При этом от положительного импульса заряда, наведенного

частицей в нижнем цилиндре, запускается осциллограф, второй импульс электронов с мишени (отрицательный) поступает также на вход осциллографа. Измеренное время соответствует скорости частицы.

3.4 Включение питания устройства сопряжения с ЭВМ

Включить ЭВМ и запустить рабочую программу для проведения эксперимента. В главном меню программы нажимаем кнопку "начать измерение", предварительно выбрав необходимое количество измерений для усреднения и режим работы.

Полученные данные свести в таблицу 1.

Таблица 1 - экспериментальные данные

λизм (мкм)	0,35 (уф)		0,47 (г)		0,57 (зел)		0,66 (кр)		0,85 (ик)		белый	
канал	U ₀ ,	U ₁	U ₀ ,	U ₁	U ₀ ,	U ₁	U ₀ ,	U ₁	U ₀ ,	U ₁	U ₀ ,	U ₁
n												

Использование опорного канала с фотодиодом позволяет свести к минимуму погрешность в измерительном канале, вызванную изменением свойств источников светового излучения. При этом существует аддитивной составляющая погрешности Аадд (темновой ток фотодиода) от которой можно избавиться по формуле:

$$U = U_0 - U_1.$$

Построить график зависимости мощности изменения коэффициента пропускания для данной длины волны от количества частиц

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Схема экспериментальной установки.
4. Краткие теоретические сведения.
5. Результаты измерений, осциллограммы, расчеты, графики, по полученным данным, погрешности измерений.
6. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какие факторы космической среды вызывают наибольшее влияние на материалы и элементы конструкции космических аппаратов?
2. Нарисуйте структурную схему экспериментальной установки и поясните принцип ее работы.
3. Как изменяются характеристики солнечных батарей при воздействии факторов космической среды?
4. Как изменяются характеристики оптических стёкол при воздействии факторов космической среды?
5. Каким образом получается зависимость оптических характеристик образца от длины волны излучения?
6. Поясните, каково техническое решение создания «опорных каналов» для прошедшего и отраженного сигналов при контроле характеристик оптических стёкол. Какую реализацию могли бы предложить Вы?
7. Нарисуйте структурную схему измерителя для котроля уноса массы тонких плёнок при воздействии факторов космической среды?

Литература

1. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами. – М.: Изд-во Иностранной литературы, 1961. – 536 с.
2. Дэйрмджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. – М.: Мир, 1971.
3. Иванов А. П., Лойко В. А., Дик В. П. Распространение света в плотно упакованных дисперсных средах. – Минск: Наука и техника, 1988. – 288 с.
4. Исмару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. – М.: Мир, 1981. – 356 с.
5. K. Edelstein. “Hypervelocity Impact Damage Tolerance of Fused Silica Glass.” 43rd International Astronautical Congress, IAF 92-0334, Washington D.C., August 28–September 5, 1992.
6. R.R. Burt, E.L. Christiansen. “Hypervelocity Impact Testing of Transparent Spacecraft Materials.” Int. J. Impact Eng., 29:153–166, 2003.
7. S. Ryan. Unpublished work, 2008.
8. Новиков Л. С. Воздействие твёрдых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты. Учебное пособие. М.: Университетская книга, 2009. – 104 с.
9. Семкин Н. Д. Экспериментальное моделирование воздействия частиц космического мусора и микрометеоритов на элементы конструкции космического аппарата [Текст] / М. П. Калаев Н. Д. Семкин, Л. С. Новиков // Физика и химия обработки материалов.-2012.-№1.-С.38-46
10. Семкин Н. Д., Калаев М. П. Деграция оптического стекла в условиях воздействия микрометеоритов и частиц космического мусора. Приборы и техника эксперимента № 1 2011.- С.136-140.
11. Семкин Н. Д., Телегин А. М., Изюмов М. В. Использование открытых элементов космического аппарата в качестве датчиков микрометеоритов и космического мусора. // Прикладная Физика, №4, 2010.- С. 131-136.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Правила эксплуатации вакуумного оборудования экспериментальной установки

Состав вакуумного оборудования. в состав вакуумной установки (рисунок 1П) входит:

1. Вакуумная камера.
2. Форвакуумный насос.
3. Паромасляный насос.
4. Клапан вакуумной камеры.
5. Клапан для откачки воздуха из паромасляного насоса.
6. Клапан паромасляного насоса.
7. Пусковые кнопки для обеспечения перемещения вакуумной камеры вверх и вниз.
8. Датчики давления (термопары и ионизационные лампы).
9. Измеритель давления в камере и системе откачки.
10. Нагреватель паромасляного насоса.

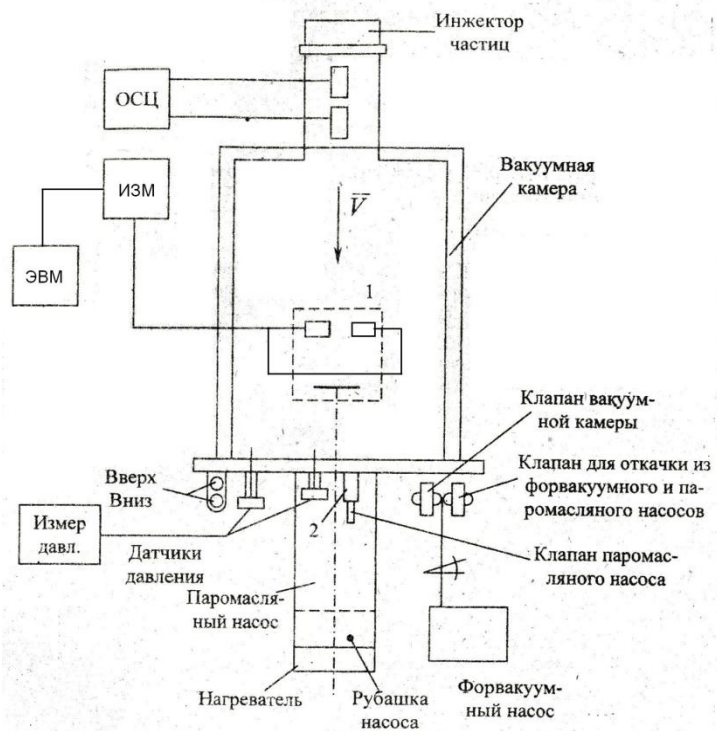


Рисунок 1П – Устройство экспериментальной установки

Порядок эксплуатации вакуумной системы

1. Включить форвакуумный насос. при этом через несколько минут клапан для откачки воздуха из паромасляного насоса необходимо открыть (повернуть на 90 градусов против часовой стрелки и потянуть до упора на себя). В этом случае производится откачка из паромасляного насоса.
2. Через несколько минут включить питание измерителя давления (касается только его терморного датчика). Включение ионизационного датчика на этом этапе не допускается.
3. Включить питание нагревателя паром насоса. Клапан паромасляного насоса должен находиться в положении рукояткой вниз, что соответствует изоляции вакуумной камеры от паромасляного насоса.

Примечание: категорически не допускается одновременно открывать клапаны вакуумной камеры и паромасляного насоса.

4. Произвести откачку воздуха из вакуумной камеры. Для этого необходимо закрыть клапан паромасляного насоса 1 и открыть клапан вакуумной камеры.
5. При достижении в вакуумной камере давления $\sim 10^{-1}$ мм рт.ст. и разогреве паромасляного насоса (время разогрева ~ 45 минут) закрыть клапан вакуумной камеры и открыть клапан откачки из паромасляного насоса 1, после чего открыть клапан паромасляного насоса 2 (ручку клапана поднять вверх). При этом дальнейшая откачка из вакуумной камеры производится с помощью паромасляного насоса.
6. При достижении степени вакуума менее 10^{-3} мм рт.ст. наблюдать по стрелке вакуумметра (она должна зашкалить), включить нагреватель ионизационного датчика и через 10 минут переключить на режим измерения. Экспериментальная установка готова к работе при остаточном давлении в камере $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. После этого допускается включения инжектора частиц.

Порядок выключения вакуумной установки

1. Проверить выключения инжектора частиц.
2. Выключить измеритель вакуума.
3. Закрыть клапан 2 поворотом ручки вниз.
4. Выключить нагреватель паромасляного насоса.
5. Проверить температуру рубашки паромасляного насоса – она должна быть не более 50 градусов.
6. Закрыть клапан 1.
7. Выключить форвакуумный насос.
8. Впустить воздух в систему форвакуумного насоса нажатием кнопки или зажать вакуумный шланг форвакуумного насоса.