

Крупников, А.А. Маклецов//Модель Космоса. - Восьмое издание. - Том 2. - Москва. - 2007.

2 Брагин В.В. Расчет собственной емкости плоских элементов конструкции космического аппарата [Текст]/ В.В. Брагин, Р.А. Помельников, Н.Д. Сёмкин// Физика волновых процессов и радиотехнические системы. - 2014. - Т. 17. - № 4. - С. 81-85.

УДК 520.6.07

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ В КОСМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Д.М.Рязанов, М.П. Калаев

г. Самара, «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)»

Необходимость исследования характеристик и параметров новых наноматериалов обусловлена жесткими условиями космоса: перепады температур, электромагнитное излучение, радиация. Помимо естественных условий существует и целый пласт факторов, порожденных человеком: продукты работы маршевых и маневровых двигателей, газовыделение конструкций и материалов космических аппаратов, технологические и экспериментальные работы на борту, связанные с инъекцией вещества в околоземном космическом пространстве. Методы измерения параметров наноматериалов основываются на тех же принципах, что и в тонкопленочной технологии.

### 1.Емкостной метод

Принцип действия емкостного метода основан на том, что с изменением контролируемого параметра изменяется емкость конденсатора. В качестве контролируемого параметра может выступать как скорость испарения материала, так и толщина пленки [1]. Емкостной датчик может быть представлен как две параллельные проводящие пластины большой площади. Если отбросить краевой эффект, то емкость  $C$  пластин площадью  $A$  может быть представлена следующим уравнением:

$$C = \frac{\epsilon A}{d}, \quad (1)$$

где  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость пластины,  $d$  – толщина пленки [2].

При уносе массы с поверхности емкость уменьшается из-за изменения диэлектрической проницаемости:

$$C = C_0 - \Delta C \quad \Delta C = f(\sigma) \lambda, \quad (2)$$

где  $C_0$  – начальная емкость конденсатора.

Достоинствами данного метода является высокий порог чувствительности –  $10^{-14}$ м, но крайне чувствителен к температурным колебаниям, изменению влажности [1].

## 2. Резистивный метод

Резистивный метод применяется для прямого определения удельного поверхностного сопротивления тонких проводящих пленок. В основе метода лежит зависимость между толщиной пленки металла или сплава и величиной ее электрического сопротивления постоянному току – при воздействии на нее внешними факторами сопротивление будет увеличиваться [3].

Толщина металлической пленки в данном случае определяется по формуле:

$$h = \frac{\rho \gamma \alpha}{R_{\square} b}, \quad (3)$$

где  $\rho \gamma$  – удельное сопротивление, а и b – длина и ширина пленки,  $R_{\square}$  – сопротивление квадрата пленки.

Погрешность, при данном методе, составляет от 2 до 4%. Недостатком данного метода является сильная подверженность различным тепловым режимам [1].

## 3. Метод кварцевого резонатора.

Заключается в измерении частоты колебаний кварцевой пластины при уносе вещества с нее под воздействием внешних факторов. Кварцевые весы состоят из тонких пьезоэлектрических пластин с электродами, припаянными к обеим сторонам. Из-за пьезоэффекта переменное напряжение на электродах вызывает деформацию сдвига и наоборот. Толщина пленки определяется соотношением:

$$h = -\frac{m_0}{f_0 F} \cdot \frac{1}{\gamma} \Delta f, \quad (4)$$

где  $m_0$  – масса кварцевой пластины,  $f_0$  – резонансная частота кварца, F – площадь кварцевой пластины, покрытая материалом,  $\gamma$  – плотность пленки материал,  $\Delta f$  – сдвиг резонансной частоты.

Поскольку  $f_0 \gg \Delta f$ , а площадь пластины и плотность пленки практически не изменяется, то толщина пленки будет являться функцией сдвига резонансной частоты [1]:

$$h = -\varphi(\Delta f), \quad (5)$$

Однако, в большинстве случаев используется формула Заурбрея [4]:

$$\Delta f = -\frac{2f_0^2}{\sqrt{\rho_q \mu_q}} \Delta m, \quad (6)$$

где  $\Delta m$  – изменение массы,  $\rho_q$  – плотность кварца ( $2,648 \text{ г/см}^3$ ),  $\mu_q$  – модуль сдвига.

Эта формула верна только при условии равномерного распределения массы и отношения  $\frac{\Delta f}{f} < 0.02$  [5].

К достоинствам метода можно отнести точность измерения и чувствительность, малую инерционность. К недостаткам можно отнести паразитный уход частоты, вызванный нестабильностью температуры [1].

#### 4. Оптический метод

Суть оптического метода заключается в том, что на образец с исследуемым материалом направляют луч монохроматического света и измеряют интенсивность отраженного или прошедшего через образец света [1].

Авторы патента [6] используют интенсивность прошедшего света. Это обусловлено более простой схемой реализации процесса, а так же толщиной пленки – для толстых пленок, всё же, подходит метод, основанный на измерении интенсивности отраженного света. По словам самих авторов, недостатком такого устройства и метода является низкая точность измерений (относительное изменение оптических характеристик стекла соизмеримо с порогом чувствительности прибора), а также необходимость извлечения образца из вакуумной камеры ускорителя – при проведении наземных испытаний - что неизбежно сопряжено с его дополнительным загрязнением пылью из атмосферы.

#### Заключение

Из-за описанных выше недостатков методов целесообразным решением будет их комбинирование с целью уменьшения ошибки. Самым оптимальным является соединение кварцевого и оптического методов.

#### Список использованных источников.

1 Истомин, А.С. Повышение эффективности автоматизированного контроля процесса осаждения тонких пленок на основе емкостного метода [Текст]: дисс. канд. техн. наук: 05.13.06. защищена 2006; утв. 2006/ Истомин Алексей Сергеевич. – Рыбинск, 2006. – 129 с.

2 Акишин, А.И. Космическое материаловедение [Текст]/А.И. Акишин.- М.: МГУ, 2007.

3 Семенов, Э.И. Создание методов и устройств автоматического контроля технологического процесса термовакуумного нанесения защитных покрытий и тонких пленок в авиационном моторостроении и приборостроении [Текст]: дисс. докт. техн. наук: 05.07.05 – защищена 1999; утв. 1999/Эрнст Иванович Семенов. – Рыбинск, 1999. – 298 с.

4 G. Sauerbrey, Z. Phys. 155 (1959) 206.

5 Srivastava, A.K. Quartz-crystal microbalance study for characterizing atomic oxygen in plasma ash tools [Текст]/ A. K. Srivastava, P. Sakthivel//J. Vac. Sci. Technol. – 2001

6 Пат. №2011127029 Российская Федерация, МПК G01T 1/34. Устройство измерения оптических характеристик ударносжатых материалов конструкции космического аппарата [Текст]/Семкин Н.Д., Калаев М.П.; заявитель и патентообладатель Самарский Аэрокосмический Государственный Университет. - № 2011127029/28. Заявл. 30.06.2011; опубл. 10.01.2013. Бюл. №1. – 4 с.

УДК 621.384.663

## **ДАТЧИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТЫ ПРОЛЁТА ЧАСТИЦЫ В ТРАКТЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ**

А. С. Дорофеев

г. Самара, «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)»

При проектировании ускорителей пылевых частиц возникает задача построения физико-математической модели движения частиц в тракте ускорителя. Все существующие модели либо учитывают лишь осевое движение частиц, либо детерминированное движение частиц с учетом осевой и радиальной составляющих. Однако, как показала практика, данные модели не могут в целом описать вероятность прохождения частиц через тракт ускорителя. Таким образом, возникает задача построения вероятностной модели движения частиц в тракте электродинамического ускорителя. Для проверки такой модели на адекватность необходимо экспериментальное измерение углового и радиального распределения частиц в тракте электродинамического ускорителя. Одним из способов регистрации места удара частицы является метод разделения заряда. Для осуществления метода разделения заряда предполагается использовать модифицированный цилиндр Фарадея (рис. 1а).

Модифицированный цилиндр Фарадея состоит из экранирующего цилиндра, внутри которого расположены 3 электрода, которые вместе образуют внутренний цилиндр. Пролетая внутри такого датчика, заряженная частица наводит на участки внутреннего цилиндра различные потенциалы. Если заряженная частица летит по оси датчика, то потенциалы на всех трех внутренних поверхностях будут идентичны. Функция координаты частицы будет связана с различием потенциалов между собой.