

А. С. ИСТОМИН, д. т. н. Э. И. СЕМЕНОВ

Россия, Рыбинская гос. авиационная технологическая академия
им. П. А. Соловьева
Email: root@rgata.ru

Дата поступления в редакцию
13.07.2005 г.

Оппонент к. ф.-м. н. Н. О. КОВАЛЕНКО
(Ин-т монокристаллов, г. Харьков)

ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЙ В ПРОЦЕССЕ ИХ НАНЕСЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЕМКОСТНОГО ДАТЧИКА

Предложена автоматизированная компьютерная система контроля толщины покрытий, реализованная на основе емкостного датчика новой конструкции.

Емкостные датчики обладают рядом существенных достоинств, таких как высокая чувствительность, простота устройства, малые габариты и масса, малая инерционность, весьма небольшие усилия электрического взаимодействия между обкладками датчика.

Принцип действия емкостной измерительной системы основан на том, что с изменением контролируемого параметра изменяется емкость конденсатора.

Существует контактный метод неразрушающего контроля толщины покрытия после его нанесения, описанный в [1]. Его суть состоит в том, что электрический конденсатор образуется металлом подложки, непроводящим покрытием (который в этом случае является диэлектриком) и электродом, прикладываемым к детали (рис. 1).

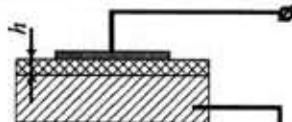


Рис. 1. Контактный метод измерения толщины покрытия h

Такие накладные датчики характеризуются большой неоднородностью создаваемого ими электростатического поля — напряженность поля максимальна (а следовательно, максимальна и чувствительность) непосредственно у поверхности электродов и быстро затухает по мере его удаления от электродов. В связи с этим использование накладных датчиков требует осуществления мер по компенсации влияния контактных условий (шероховатость поверхности, ее загрязнение и прочее).

Для определения толщины диэлектрической пленки в процессе ее нанесения на подложку применяется метод планарного измерительного конденсатора [2, с. 298], обкладки которого расположены в одной плоскости. В качестве проводящих обкладок используются алюминиевые пленки, протравленные методом обычной фоторезистивной техники, в виде узких полосок, разделенных глубокими каналами. При малой толщине диэлектрического слоя (в пределах нескольких микрон) изменение емкости в зависимости от толщины имеет линейный характер. Поэтому во время напыления очень тонких пленок должна обеспечиваться возможность измерения очень

малых изменений емкости — при том, что величина начальной емкости такой системы весьма сильно зависит от состояния поверхности подложки.

Недостатком данного способа является необходимость калибровки прибора по осаждаемому материалу и периодическая очистка от осаждаемого на нем слоя. Также этот метод не учитывает зависимости емкости от температуры, а также зависимости свойств диэлектрической пленки от параметров процесса осаждения, и позволяет контролировать толщину только диэлектрических слоев.

Существует также метод контроля скорости нанесения покрытий в вакууме, основанный на измерениях крайних малых изменений электрической емкости [2, с. 300]. На рис. 2 приведена схема системы контроля скорости испарения.

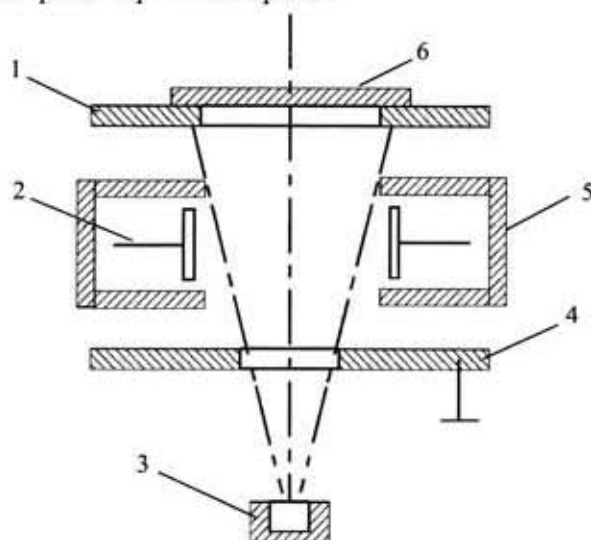


Рис. 2. Система контроля скорости испарения:
1 — маска с опорной деталью; 2 — емкостный датчик; 3 — испаритель; 4 — тепловой экран; 5 — камера датчика; 6 — подложка

В данной системе поток испаряемого вещества проходит через пространство между двумя плоскопараллельными электродами, расположенными внутри вакуумной камеры. Эти электроды при отсутствии потока паров образуют вакуумный конденсатор. Если в зазор между пластинками попадают пары какого-либо вещества, то эффективная диэлектрическая проницаемость среды изменяется, вызывая соответствующее изменение емкости конденсатора, которое мож-

но измерить. Изменение емкости конденсатора пропорционально скорости осаждения слоя.

Недостатком данного способа является необходимость достаточно плотного потока напыляемого вещества для его регистрации, а также необходимость тщательного экранирования датчика для исключения влияния помех.

Указанных недостатков можно избежать с помощью емкостного датчика, выполненного с применением сетки (или перфорации) [3].

Предлагаемый метод позволяет контролировать толщину покрытий при нанесении в вакууме разными методами и при разных давлениях рабочего объема (например, аэрозольным, детонационным напылением). Диэлектриком конденсатора служит рабочая среда установки (вакуум, воздух, газы). Осаждаемым материалом может быть металл или диэлектрик.

На рис. 3 приведена схема емкостного датчика для измерения толщины покрытия в вакууме. Суть предлагаемого метода заключается в следующем. Поток паров осаждаемого материала проходит через сетчатую обкладку конденсатора и осаждается на сплошной, при этом расстояние h между обкладками изменяется, и соответственно изменяется емкость конденсатора.

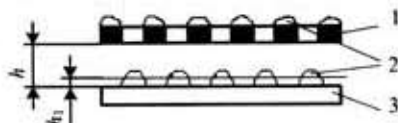


Рис. 3. Структура емкостного датчика:
1 — сетка; 2 — нанесенный материал; 3 — сплошная обкладка конденсатора

Изменение емкости в зависимости от толщины наносимого на сплошную обкладку материала h_1 имеет нелинейный характер и вычисляется по формуле [4, с. 153]

$$\Delta C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon L}{\ln \frac{L}{2a\Delta h_1} + D}, \quad (1)$$

где ϵ_0 — диэлектрическая постоянная;

ϵ — диэлектрическая проницаемость среды;

L — суммарная длина всех проводов, образующих решетку;

a — диаметр провода решетки;

Δh_1 — приращение толщины нанесенного покрытия;

D — коэффициент, зависящий от соотношения размера решетки и числа ее ячеек [4, с. 147].

При осаждении диэлектрической пленки

$$\epsilon = \epsilon_{\text{ср}} = \frac{\epsilon_1(h-h_1) + \epsilon_2(h+h_1)}{h}, \quad (2)$$

где $\epsilon_{\text{ср}}$ — средняя диэлектрическая проницаемость двух слоев диэлектрика (в нашем случае — наносимого диэлектрического материала и рабочей среды вакуумной камеры).

Величина емкости конденсатора зависит от его температуры вследствие линейного расширения металла обкладок и диэлектрика, а также вследствие зависимости диэлектрической проницаемости от температуры. Зависимость емкости от температуры, как правило, отличается от линейной и нередко принимает довольно сложный вид [5, с. 16]. Чтобы избежать влияния температуры, предлагается использовать дифференциальный емкостный датчик, содержащий два

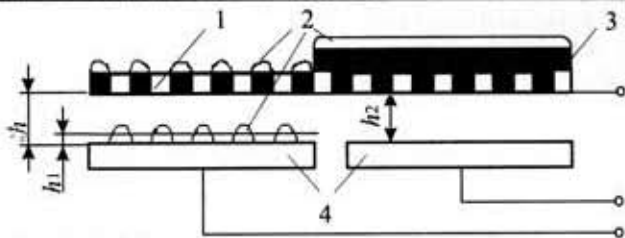


Рис. 4. Дифференциальный емкостный датчик с компенсационным конденсатором:

1 — общая обкладка из сетки; 2 — нанесенный материал; 3 — экран; 4 — сплошные обкладки

конденсатора — сетчатый и компенсационный, которые имеют общую верхнюю обкладку (рис. 4).

Суммарное приращение емкости для данной схемы вычисляется по формуле

$$\Delta C_{\Sigma} = \Delta C_1 + \Delta C_{11} - \Delta C_{12}, \quad (2)$$

где ΔC_1 — приращение емкости сетчатого конденсатора вследствие осаждения материала;

$\Delta C_{11}, \Delta C_{12}$ — температурное изменение емкости сетчатого и компенсационного конденсаторов, соответственно.

Так как изменение температуры такого датчика приведет к приращению емкостей обоих конденсаторов, то изменения ΔC_{11} компенсируется изменением ΔC_{12} . Таким образом, устраняется зависимость суммарного приращения емкости ΔC_{Σ} от температуры.

Изменение емкости сетчатого конденсатора ΔC_1 вычисляется по формуле (1).

Температурное изменение емкости сетчатого конденсатора:

$$\Delta C_{11} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon\Delta L}{\ln \frac{L}{2a\Delta h_1} + D}, \quad (3)$$

где ΔL — температурное изменение суммарной длины всех проводов, образующих решетку конденсатора.

Температурное изменение емкости компенсационного конденсатора:

$$\Delta C_{12} = \frac{\epsilon\epsilon_0\Delta S}{\Delta h_2}, \quad (4)$$

где ΔS — температурное изменение суммарной длины всех проводов, образующих решетку конденсатора;

Δh_2 — температурное изменение расстояния между обкладками сетчатого конденсатора.

Из формулы (1) можно выразить толщину нанесенной металлической пленки:

$$\Delta h_1 = \frac{L^2}{2a} \left(e^{\frac{2\pi\epsilon_0\epsilon L}{\Delta C}} - D \right)^{-1}. \quad (5)$$

Конструкция емкостного датчика, содержащего компенсационный конденсатор, представлена на рис. 5.

Основой датчика является керамическая подложка 1, на которую наносятся медные обкладки конденсаторов 2 и 3. В качестве изолятора 4 между обкладками емкостей и сеткой используется керамическая пластина. Сетка 5 натягивается под действием упругих сил F , чтобы избежать деформации во время эксплуатации датчика. В датчике предусмотрен экран 6,

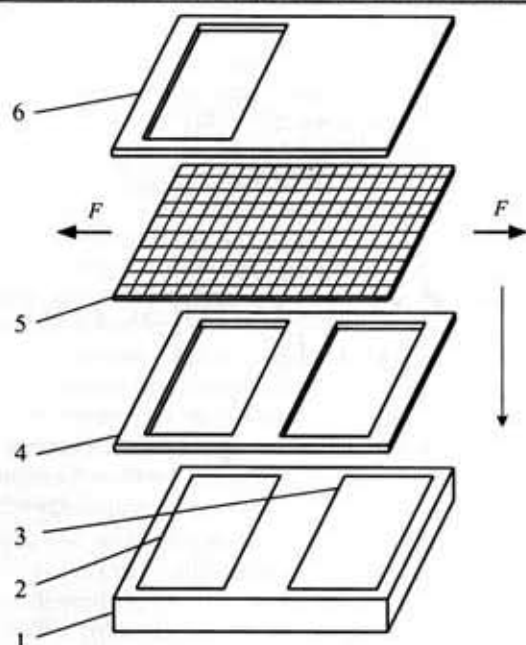


Рис. 5. Конструкция дифференциального емкостного датчика:

1 — керамическая подложка; 2, 3 — медные обкладки конденсаторов; 4 — керамическая пластина; 5 — сетка; 6 — экран который предотвращает загрязнение краев изолятора 4, а также защищает обкладку 3 компенсационного конденсатора от попадания напыляемого материала.

На рис. 6 и 7 представлены экспериментальные данные, полученные при нанесении меди на датчик с величиной зазора между обкладками 0,5 мм.

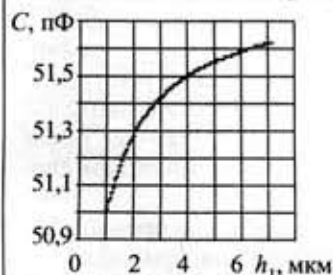


Рис. 6. Зависимость емкости сетчатого конденсатора от толщины наносимого покрытия

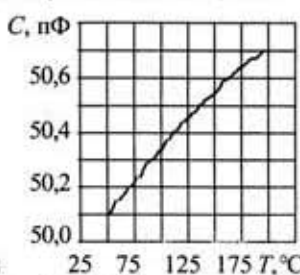


Рис. 7. Температурная погрешность компенсационного конденсатора

Для увеличения чувствительности датчика необходимо по возможности уменьшать расстояние между его электродами, однако с другой стороны, это приводит к уменьшению его ресурса.

Для измерения емкости был выбран прибор АМ-3003 фирмы АКТАКОМ, представляющий собой компактное устройство с возможностью получения информации об измерениях с персонального компьютера (ПК) по интерфейсу RS-232C. Его применение позволило создать автоматизированную систему контроля толщины покрытий (рис. 8).

Автоматизированная система содержит коммутатор, позволяющий производить переключения между измеряемыми конденсаторами. Это обусловлено тем, что прибор АМ-3003 позволяет производить измерения емкости только одного конденсатора. Управление коммутатором происходит с помощью ПК, по-



Рис. 8. Автоматизированная система контроля толщины покрытий

этому известно, какой именно конденсатор используется в качестве измерительного.

Для этой автоматизированной системы разработана программа, которая позволяет задавать параметры датчика для расчета толщины наносимых покрытий, снимать показания с датчика в режиме реального времени и преобразовывать эти данные в отчет для последующего анализа процесса нанесения покрытий.

Использование описанной автоматизированной системы позволяет повысить точность контроля толщины покрытий (погрешность датчика составляет 5% при величине зазора между обкладками 1 мм) и уменьшить минимально контролируемую толщину до величины менее 1 мкм.

Данная автоматизированная система относится к средствам наблюдения за процессом нанесения покрытий и может быть использована в приборостроении, электронной промышленности и машиностроении для контроля толщины покрытий при их нанесении, например на лопатки газотурбинных двигателей.

Применение емкостного метода в приборостроении для контроля толщины материалов, наносимых на микросхемы, позволит контролировать толщину пленки как из диэлектрических, так и из металлических материалов с достаточно высокой точностью. Существенным преимуществом емкостного датчика является его дешевизна при изготовлении.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Матис И. Т. Емкостные преобразователи для неразрушающего контроля. — Рига: Зинатне, 1977.
2. Холлэнд Л. Пленочная микронизация. — М.: Мир, 1968.
3. Пат. 2261416 России. Емкостный способ контроля толщины покрытий, наносимых в вакууме / Козка В. К., Семенов Э. И., Истомина А. С. — 27.09.2005.
4. Иосель Ю. Я., Кочанов Э. С., Струнский М. Г. Расчет электрической емкости. — Л.: Энергоиздат, 1981.
5. Гусев В. Н., Смирнов В. Ф. Электрические конденсаторы постоянной емкости. — М.: Сов. радио, 1968.