

УДК 681.586.711

КОНТРОЛЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ПОКРЫТИЯ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Артем Павлович Федюнин

*Магистр 1 года,
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: В.Т. Рябов,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»*

Введение

В настоящее время все большее применение в народном хозяйстве находят пленки, состоящие из островковых наноразмерных структур. Такие покрытия обычно получают методами эллионных технологий при сниженных скоростях осаждения с остановкой технологического процесса по достижении требуемой толщины пленки.

Методы определения толщины покрытий во время их нанесения весьма разнообразны. Гравиметрические методы (микровзвешивание, метод кварцевого резонатора) основаны на измерении масс тонкопленочных покрытий, по которым затем рассчитываются толщины. Оптические методы основаны на интерференции, поскольку толщины пленок по порядку величины близки к длинам волн оптического излучения.

В случае формирования островковых наноструктурированных пленок из проводящего материала на диэлектрическом основании более надежным критерием окончания процесса является достижение пленкой необходимого электрического импеданса. Поэтому в промышленности применяют и электрические методы контроля, например, контроль сопротивления таких пленок [1].

Существующие методы контроля

Метод микровзвешивания

Метод микровзвешивания, в основном используемый в производстве гибридных интегральных микросхем, состоит в определении приращения массы подложки после нанесения на нее пленки.

Этот метод несложен, но требует, чтобы форма подложки была простой, а ее поверхность должна быть в хорошем состоянии. Кроме того, на точность измерений влияет удельная масса нанесенного материала, которая может изменяться в зависимости от условий технологических режимов (остаточного давления в рабочей камере, степени чистоты подаваемого в камеру рабочего газа и др.). При измерении толщины пленки взвешиванием считается, что плотность нанесенного вещества равна плотности массивного [2].

Резонансно-частотный метод

Широко распространен контроль скорости нанесения пленок резонансно-частотным методом. В качестве датчика в этом методе используют включенный в контур генератора частоты кварцевый элемент [2].

Принцип действия кварцевого датчика основан на зависимости частоты генерируемых сигналов от изменения массы кварцевого элемента при нанесении на его поверхность пленки [2]. Монитор для измерения толщины тонких пленок проводит расчеты, исходя из предположения, что изменение резонансной частоты происходит только из-за изменения массы вещества, осаждаемого на кварцевом кристалле [3].

С увеличением массы кварцевого элемента его резонансная частота падает. Таким образом, по изменению скорости (сдвига) резонансной частоты, фиксируемому измерительным прибором, определяют скорость роста пленки.

Точность измерения толщины тонких металлических и диэлектрических пленок в интервале от 10 нм до 5 мкм составляет $\pm 10\%$. Существенным недостатком метода является то, что помимо градуировки по осаждаемому материалу необходима также периодическая чистка кварцевых элементов от осажденной пленки [2].

Метод эллипсометрии

Метод эллипсометрии основан на изменении поляризации света при отражении от тонкой прозрачной поверхности. При освещении подложки линейно-поляризованным светом составляющие излучения отражаются по-разному, в результате чего свет получается эллиптически поляризованным (рисунок 1). После измерения эллиптичности отражённой волны можно определить свойства плёнки [1].



Рисунок 1 - Взаимодействие поляризованного света с образцом

Основное уравнение эллипсометрии, связывающее между собой эллипсометрические параметры дельта (Δ) и пси (Ψ) и комплексные значения коэффициентов отражения по амплитуде R_p и R_s для p- и s-поляризованного света, записывается в виде:

$$\rho = \frac{R_p}{R_s} = \text{tg}(\Psi \cdot e^{i\Delta}) \quad (1)$$

Как видно из уравнения (1), в процессе измерения определяются не абсолютные, а относительные величины, что является важным достоинством метода. По измеренным величинам Δ и Ψ при решении обратной задачи эллипсометрии на основе выбранной модели рассчитываются оптические параметры поверхности образца [4].

Проведенные в работе [4] экспериментальные измерения нанесенных ионно-лучевым напылением тонких пленок показали, что эллипсометрические измерения параметров тонких пленок являются точным и надежным методом контроля

технологического процесса изготовления сложных композиционных покрытий, включая и прецизионные покрытия высокоотражающих лазерных зеркал [4].

Метод резистивного и емкостного контроля

Напрямую измерение электрического сопротивления пленок проводят резистивным датчиком с внешним измерительным прибором. Этот метод основан на том, что по мере утолщения пленки в процессе роста ее сопротивление уменьшается. Это позволяет контролировать сопротивление пленки непосредственно при ее нанесении.

При измерениях (рисунок 2) предварительно изготавливают контрольную подложку (свидетель) 1 из изоляционного материала, на которую наносят плоские контактные площадки 2 из материала высокой проводимости. Затем эту подложку-свидетель устанавливают в рабочую камеру как можно ближе к рабочей подложке 3, чтобы обе подложки при нанесении пленки находились в одинаковых условиях. Пленку наносят на контрольную и рабочую подложки одновременно.

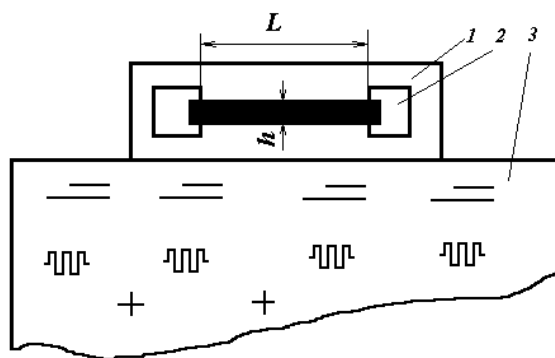


Рисунок 2 - Схема измерения резистивным методом

По мере роста пленки сопротивление уменьшается, и соответственно уменьшается сопротивление резистора-свидетеля. При достижении заданного сопротивления наносимой пленки на свидетеле по цепи обратной связи поступает сигнал, которым закрывается заслонка.

Погрешность измерения сопротивления при контроле этим методом составляет примерно $\pm 10\%$ и определяется неравномерностью толщины пленки по поверхности, а также погрешностями средств измерения.

Чувствительность метода составляет от 1 до 5 нм, а предельная толщина измеряемых пленок - около 1 мкм [2].

Недостатком метода является отсутствие точных данных об удельном сопротивлении плёнки, которое может значительно отличаться от удельного сопротивления объёмного образца. Поэтому этот метод удобно использовать в тонкоплёночной технологии, когда необходимо измерять не толщину плёнки, а её удельное сопротивление [1].

Для этого метода в работе предложена система измерения и методика проведения эксперимента, согласно которой проведены пробные технологические циклы по фиксированию сопротивления покрытия в процессе ее нанесения.

Проведенный эксперимент

Конструкция установки УВН-1М

Эксперименты по определению сопротивления тонкой пленки в процессе ее нанесения проводились на базе кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана на установке вакуумного нанесения тонких пленок УВН-1М.

Система автоматического управления установкой в каждом технологическом цикле создает файл истории, куда каждую секунду записывается информация, поступающая с промышленного контроллера на управляющий компьютер. Эта информация описывает текущее состояние ключевых элементов технологической установки, например, частоту вращения вала турбомолекулярного насоса, показания вакууметров и сопротивление пленки.

В настоящее время установка проходит модернизацию, конечной целью которой является повышенная степень автоматизации установки при нанесении островковых наноструктурированных покрытий.

Технологическая оснастка установки

Рабочая камера установки имеет цилиндрическую форму и с торцов закрыта фланцами. Нижний фланец представляет собой технологический модуль, определяющий метод формирования покрытия. Верхний фланец сочетает функции закрепления подложки, ее нагрева и защиты от окислов, выделяющихся с мишени при выходе на режим.

Конструкция подложкодержателя (рисунок 3) включает в себя систему, позволяющую фиксировать текущее сопротивление наносимой пленки и тем самым контролировать ее толщину. Элементы конструкции электрически изолированы друг от друга посредством диэлектрических элементов.

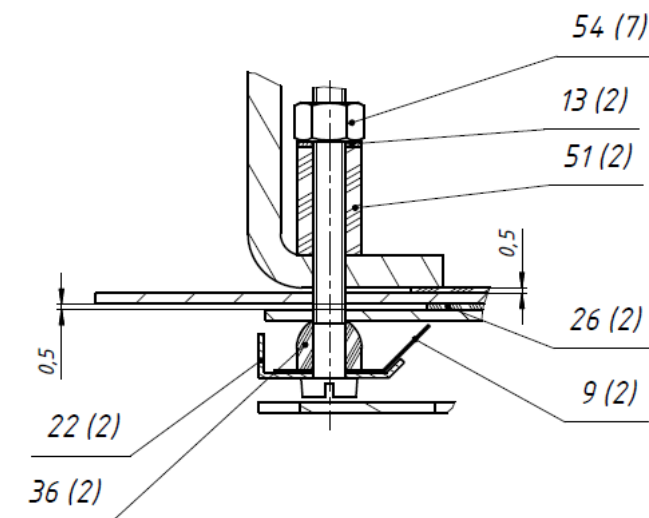


Рисунок 3 - Эскиз подложкодержателя

Кроме того, на подложкодержателе сконструированы два держателя из бериллиевой бронзы, позволяющие наносить пленку на пластину диаметром до 40 мм и осуществляющие прижим подложки к подложкодержателю.

Измерительная схема

При проведении технологического процесса по нанесению тонких пленок в вакуумной камере могут возникнуть мощные потоки заряженных частиц, которые при попадании на бериллиевые щупы подложкодержателя неизбежно вызовут резкое возрастание силы тока в измерительной цепи. Такие мощные наведенные заряды приведут к выходу из строя аттестованных дорогостоящих средств измерения, вследствие чего для предварительных работ принято решение использовать примитивную, но недорогую систему измерения.

Схема, с помощью которой производились измерения сопротивления пленки, предусматривает использование аналого-цифрового преобразователя (АЦП) промышленного контроллера ADAM5510. АЦП необходим для формирования дискретного сигнала, пропорционального напряжению через формируемую пленку, и передачи его в систему управления. Погрешность такого преобразования составляет $\pm 1,5$ дискреты АЦП.

Используемая схема (рисунок 4) представляет собой последовательно подключенные к формируемой пленке резисторы R1 и R2.

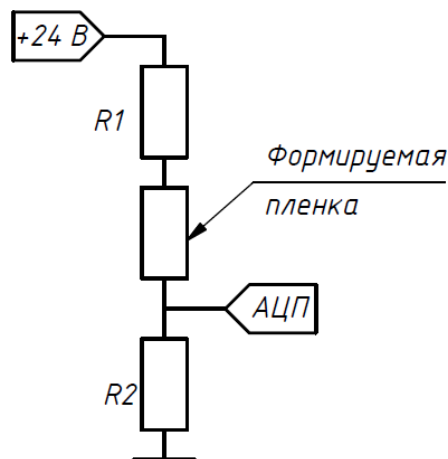


Рисунок 4 – Измерительная схема

При используемой комбинации номиналов резисторов зависимость выходного напряжения цепи от сопротивления формируемой пленки $U_{out}(R_f)$ имеет вид:

$$U_{out}(R_f) = \frac{U_{in}R_2}{R_1 + R_2 + R_f}, \quad (2)$$

где U_{in} – входное напряжение цепи, $U_{in} = 24$ В;

R_1 – сопротивление первого резистора, $R_1 = 50$ кОм;

R_2 – сопротивление второго резистора, $R_2 = 30$ кОм.

Шаг квантования по напряжению является постоянной величиной и определяется по формуле (3):

$$h = \frac{U_{ref}}{2^{n-1}} = 2,44 \text{ мВ}, \quad (3)$$

где U_{ref} – опорное напряжение АЦП, $U_{ref} = 10$ В;

n – количество разрядов АЦП, $n = 12$.

В указанной схеме сила тока $I(R_f)$, протекающего через формируемое покрытие согласно закону Ома, будет определяться следующим образом:

$$I(R_f) = \frac{U_{in}}{R_1 + R_2 + R_f} \quad (4)$$

Шаг квантования напрямую влияет на точность контроля технологического процесса - чем он меньше, тем точнее снимаются параметры наносимого покрытия. При данном подключении резисторов зависимость шага квантования по сопротивлению от сопротивления пленки $h_R(R_f)$ примет вид:

$$h_R(R_f) = \frac{h}{I(R_f)} \tag{5}$$

На основании полученной зависимости (5) построены графики (рисунок 5) в диапазонах от 1 до 10 МОм (соответствует формированию островкового покрытия) и от 1 до 100 Ом, при котором происходит образование сплошного покрытия.

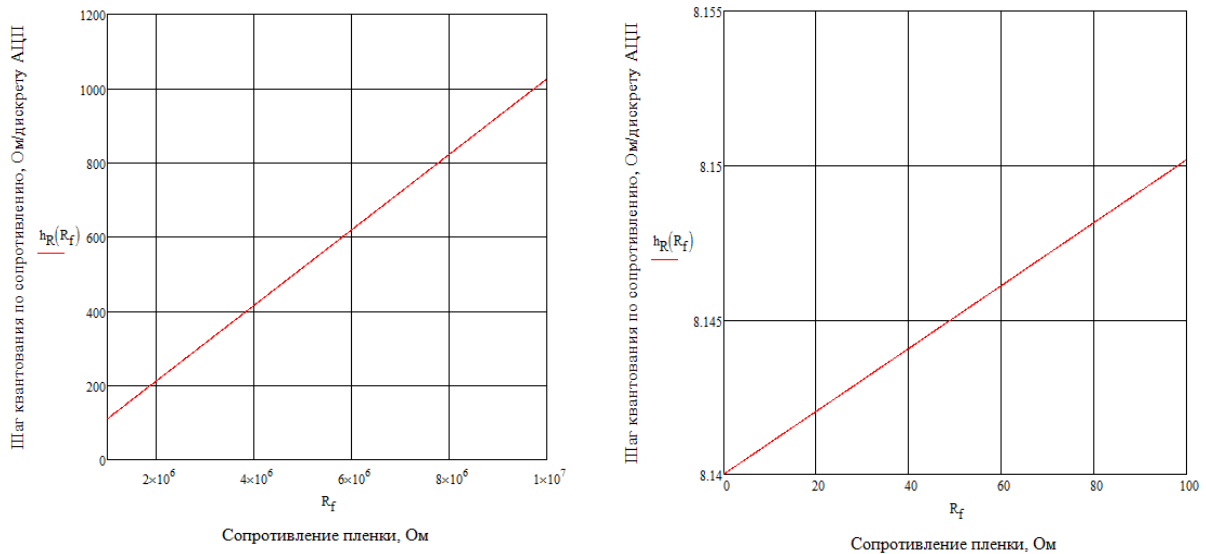


Рисунок 5 – Зависимость шага квантования сопротивления от сопротивления пленки

Как видно из графической иллюстрации выражения (5) шаг квантования по сопротивлению составляет для моментов: образования островковых структур – порядка 1026 Ом/дискрету АЦП, образования сплошной пленки – порядка 8,14 Ом/дискрету.

Методика эксперимента

На основании анализа ранее проведенных экспериментов были выявлены наиболее существенные факторы, которые влияют на точность измерения сопротивления пленки в течение технологического процесса:

- попадание заряженных частиц, возникающих при магнетронном распылении, на бериллиевые щупы подложкодержателя, что вызывает увеличение силы тока в измерительной цепи;
- образование «теневой» зоны (рисунок 6), где отсутствует контакт между наносимой пленкой и щупами измерительного устройства.

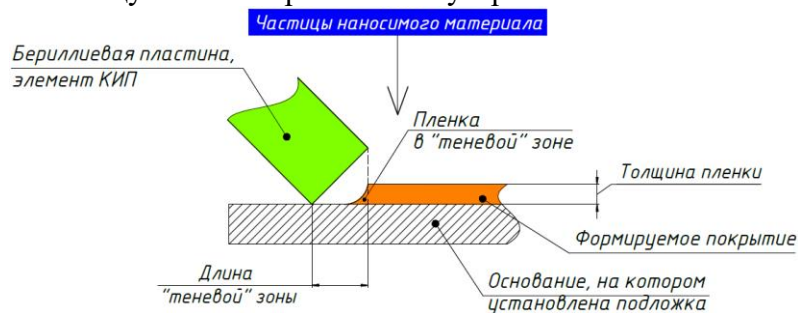


Рисунок 6 - Образование «теневой» зоны

С целью исключения первого фактора на узел подложкодержателя был смонтирован медный экран. Для устранения «теневой» зоны использовались подложки с предварительно сформированными медными контактными площадками. При

использовании таких подложек щупы измерительного устройства попадают на контактные площадки без образования разрывов в цепи.

Контактные площадки нанесены методом термического испарения на стеклянную подложку. Эскиз опытного образца представлен на рисунке 7.

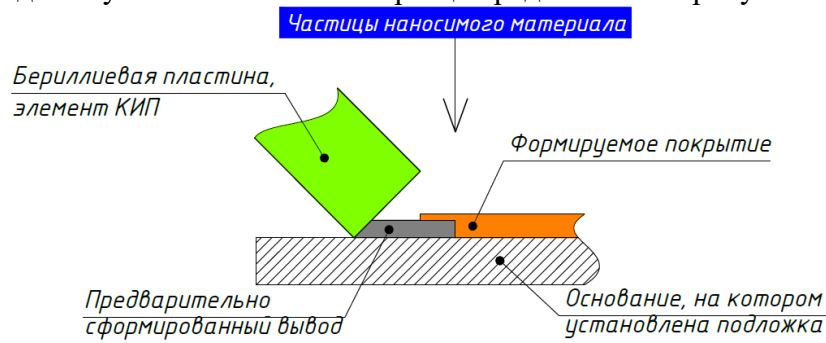


Рисунок 7 - Эскиз опытного образца

Внешний вид полученных образцов показан на рисунке 8.

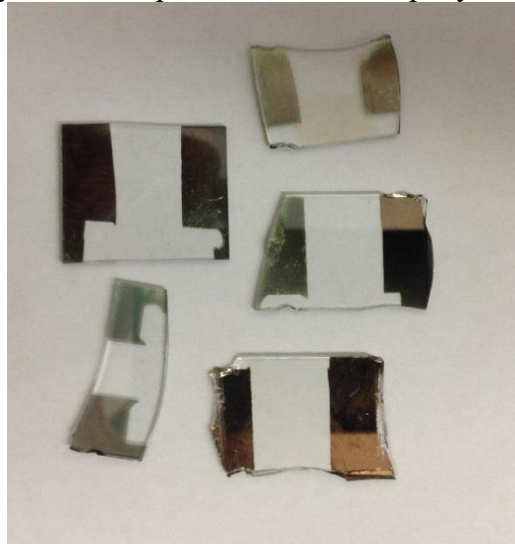


Рисунок 8 - Внешний вид образцов

С помощью программы дешифровки файла истории было получено количество дискрет аналого-цифрового преобразования D , в котором зашифровано сопротивление пленки. Формула (6) позволила пересчитать эти значения в сопротивление пленки R_f .

$$R_f(D) = \frac{U_{in} \cdot R_2}{D \cdot h} - (R_1 - R_2) \quad (6)$$

Рассчитанные значения сопротивления пленки должны сравниваться со значениями, полученными поверенным измерителем иммитанса GW Instek LCR-816.

Результат эксперимента и обсуждение

По указанной методике были сформированы два сплошных проводящих покрытия. Дешифровка файлов истории экспериментов с учетом погрешности аналого-цифрового преобразования позволила сопоставить значения сопротивления пленки, полученные измерительной системой установки и измерителем иммитанса. Режимы проведения термического испарения и магнетронного распыления указаны в таблице 1 и 2 соответственно.

Таблица 1 - Режим проведения термического испарения

Давление, Па	10^{-2}
Ток, А	9
Продолжительность, с	1200

Таблица 2 - Режим проведения магнетронного распыления

Давление, Па	10^{-1}
Ток, мА	30
Напряжение, В	1000
Продолжительность, с	300

Результаты измерения покрытий, полученных магнетронным распылением и термическим испарением, приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Результаты измерения сопротивления тонкой пленки

Метод	Сопротивление, полученное	
	измерителем иммитанса, Ом	измерительной системой установки, Ом
Термическое испарение	10^7	$3,14 \times 10^5 - 3,16 \times 10^5$
Магнетронное распыление	270	$3,79 \times 10^4 - 3,81 \times 10^4$

Из таблицы 3 видно, что сопротивления, измеренные описанными способами, достаточно сильно различаются. Это может быть связано с:

- невысокой эффективностью экрана, защищающего элементы измерительного устройства от заряженных частиц;
- неэффективностью электрической изоляции в технологической оснастке установки, вследствие чего вносимые шумы слишком велики.

Выводы и результаты

Проведенные эксперименты по определению сопротивления тонкопленочного проводящего покрытия показали несоответствие результатов, выдаваемых разработанной системой измерения и поверенным измерителем иммитанса.

Исходя из ранее изложенных причин, при продолжении работ по модернизации системы измерения сопротивления пленки в процессе ее нанесения требуется придерживаться следующих принципов:

- для контроля сопротивления пленки в процессе ее нанесения следует применять аттестованные прецизионные приборы;
- усовершенствовать защитный экран, полностью исключив возможность частиц попадать на чувствительные элементы и щупы контрольно-измерительной системы узла подложкодержателя путем увеличения площади защитного экрана;
- применять кратковременное нанесение пленки (импульсное нанесение), то есть программно задать временной интервал, в течение которого в камере будет работать магнетрон;
- для получения наиболее близкого к действительности итогового сопротивления пленки следует применять методы, более точные, чем использование мультиметра, например, четырехзондовый метод измерения сопротивления, подробно описанный в [5].

Литература

1. Булан Д.И. Сравнительный анализ и методы измерения толщины оптического покрытия в процессе нанесения // Материалы X Республиканской научно-практической конференции молодых ученых и студентов БНТУ. – Минск. – 2014. – [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader.
2. Справочник Шпрингера по нанотехнологиям (в 3-х томах). Под ред. Б. Бхушана: Том I / М.: Техносфера, 2010.
3. Информационный бюллетень «Измерительное оборудование для напылительных технологий». – 2016. – [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.actan.ru/evrprcrstrc.html> (дата обращения: 3.03.2017).
4. Азарова В.В., Фокин В.В. Эллипсометрический контроль тонких диэлектрических пленок SiO₂ и Ta₂O₅ при изготовлении прецизионных лазерных зеркал. – 2009. – [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. - URL: http://nuclphys.sinp.msu.ru/school/s10/10_29.pdf (дата обращения: 3.03.2017).
5. Паршин А.С. Методические указания к выполнению лабораторной работы по курсу «Твердотельная электроника». – 2003. – [Электронный ресурс]. – URL: <http://sibsauktf.ru/courses/vpe-te/metod/lab8.htm> (дата обращения: 10.06.2016).