

УДК 681.586.711

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ НАНОСИМОЙ ПЛЕНКИ

Артем Павлович Федюнин

Студент 4 курса

Кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: В.Т. Рябов

Доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Ключевые слова: магнетронное нанесение покрытий (*sputter deposition*), контроль сопротивления пленки (*thin film resistance control*), квантовые точки (*quantum dots*), тонкопленочные покрытия (*thin films*), аналого-цифровой преобразователь (*analog-to-digital converter*).

Аннотация: В статье рассматриваются два варианта электрических схем, которые возможно применять для фиксирования сопротивления формируемой пленки в режиме реального времени. Рассмотренные схемы получения данных о текущем сопротивлении пленки могут применяться при любом технологическом методе нанесения покрытий. По результатам математического анализа зависимостей выходного напряжения от сопротивления пленки сделаны выводы о пригодности схем для регистрации точного момента образования сплошной пленки или точного момента зарождения островковых наноразмерных структур в зависимости от используемой схемы.

Введение

Нанесение тонких пленок на поверхность деталей или изделий в условиях вакуума (10^{-7} Па) используется в планарной технологии полупроводниковых микросхем, в производстве тонкопленочных гибридных схем, изделий пьезотехники, акустоэлектроники (нанесение проводящих, диэлектрических, защитных слоев, масок и др.), в оптике (нанесение просветляющих, отражающих и др. покрытий) и при металлизации поверхностей пластмассовых и стеклянных изделий. Этим методом наносят также и металлы, сплавы, химические соединения, стекла сложного состава.

Технология создания такого покрытия основана на создании направленного потока частиц (атомов, молекул или кластеров) наносимого материала на поверхность изделий с их последующей конденсацией. Весь процесс включает в себя несколько стадий: переход напыляемого вещества или материала из конденсированной фазы в газовую, перенос молекул газовой фазы к поверхности изделия, их конденсацию на поверхности, образование и рост зародышей и окончательное формирование пленки.

В настоящее время при нанесении тонких пленок достаточно часто применяется принцип магнетронного распыления, основанный на образовании над поверхностью катода кольцеобразной плазмы в результате столкновения электронов с молекулами газа (чаще всего аргон). Положительные ионы, образующиеся в разряде, ускоряются в направлении катода, бомбардируют его поверхность, выбивая из неё частицы материала [1].

Технологические процессы, заключающиеся в поэтапном формировании тонких пленок, не могут регулироваться иначе как автоматическими системами управления технологических установок, в связи с чем возникает проблема контроля параметров наносимых покрытий в режиме реального времени. В данной статье рассмотрен вопрос о выборе электрической схемы для установки вакуумного нанесения тонких пленок при ориентации на формирование островковых структур или на нанесение сплошных покрытий.

Островковые пленки

В последнее время все больший научный интерес вызывают так называемые островковые пленки, уникальные свойства (электронные, оптоэлектронные и др.) которых связаны с тем, что их размеры во всех трёх измерениях лежат в нанометровом диапазоне. Этот факт обуславливает эффект размерного квантования энергетических уровней электрона, находящегося внутри островковой наноструктуры (островка). Поведение электрона внутри наноразмерного островка подобно его поведению внутри трёхмерной потенциальной ямы. По этой причине островковые пленки или островковые наноструктуры (ОНС) диаметром от 2 до 10 нм получили название «квантовые точки» (КТ) [2].

На сегодняшний день применение свойств островковых структур наиболее перспективно в таких приборах, как транзистор с квантовыми точками в канале, лазер на квантовых точках (в том числе лазер с поверхностным излучением), эластичный QLED дисплей и фотоприемник ИК-диапазона на квантовых точках.

Конструкция установки

Отработку технологических режимов при формировании функциональных сплошных или островковых покрытий возможно осуществлять на установке вакуумного нанесения тонких пленок (УВН-1М), находящейся в лаборатории кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана. УВН-1М является установкой модульного типа, включающей в себя устройства для газофазного осаждения, термический модуль, магнетронный модуль и модуль дугового разряда. Разнообразный состав технологической среды образуется путем комбинации различных рабочих газов и регулируется вакуумными запорными клапанами. Внешний вид установки представлен на рисунке 1.

Технологическое оснащение установки позволяет наносить сверхтонкие и островковые пленки, выращивать нанотрубки и получать наноструктурированные тонкопленочные покрытия. Технические характеристики установки УВН-1М сведены в таблицу 1.



Рис. 1. Внешний вид УВН-1М

Таблица 1. Технические характеристики установки

Предельное давление, Па	10^{-4}
Давление рабочих газов, Па	0,1–100
Потребляемая мощность, кВт	9
Габаритные размеры, м	0,5x1,2x1,65

Методами термического резистивного испарения и магнетронного распыления на установке можно получать островковые тонкие пленки, которые, в зависимости от занимаемой ими площади, представляют из себя или ноль-мерные квантовые точки, или островковые наноструктуры с фрактальной размерностью.

Система автоматического управления УВН-1М позволяет в режиме реального времени отслеживать и контролировать все необходимые параметры технологического процесса: давление в рабочей камере, частоты вращения роторов насосов, температуру нагревателя, сопротивление наносимой пленки, положение клапанов вакуумной арматуры (открыто/закрыто).

Целесообразность использования данной установки заключается в:

- сравнительно низкой стоимости;
- больших возможностях проведения работ по ее модернизации;
- точной воспроизводимости технологии для ее отработки (строгий контроль токов и напряжений на магнетроне, давления, времени, температуры подложки);
- возможности визуального наблюдения за технологическим процессом;
- регистрации момента образования сплошного покрытия.

Узел подложкодержателя

Рабочая камера УВН-1М 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 (показан на рисунке 2) позволяет проводить нагрев подложки до необходимой температуры. На подложкодержателе так же спроектирована система, допускающая фиксацию электрического сопротивления наносимой пленки, тем самым регистрировать момент образования сплошной пленки из островковых структур и контролировать ее толщину. Функция контроля толщины имеет большое значение как в опытном производстве, когда точное время нанесения покрытия еще не установлено, так и в научных изысканиях. Два контакта из бериллиевой бронзы, подводимые к подложке, прижимают ее к нагревательному элементу и ограничивают максимальный диаметр подложки до 40 мм. Утечек тока с пленки на подложкодержатель и фланец не происходит вследствие электрической изолированности элементов конструкции друг от друга посредством диэлектрических элементов.

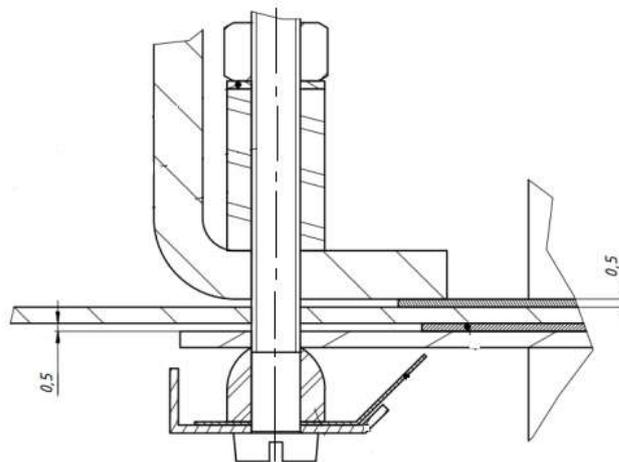


Рис. 2. Узел подложкодержателя

Виды электрических схем контроля

Помимо толщины пленки, на практике при любом технологическом процессе необходимо точно регистрировать момент начала образования тонких пленок (что соответствует бесконечно большому сопротивлению) и момент окончательного формирования пленки (бесконечно малое сопротивление). Далее рассмотрены две электрические схемы, реализация которых в узле подложкодержателя позволяет решить поставленные задачи.

Обе схемы предусматривают использование двенадцатиразрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) промышленного контроллера ADAM5510. АЦП необходим для

формирования дискретного сигнала, пропорционального напряжению через формируемую пленку, и передачи его на контроллер. Контроллер в соответствии с используемой программой при каждом получении сигнала будет принимать решение о необходимости остановки технологического процесса.

Опорное напряжение используемого АЦП составляет 10 В. Величина выходного напряжения, подаваемого на АЦП, не должна превышать значение опорного, исходя из чего были подобраны номиналы резисторов. Разность потенциалов подается на контакты из бериллиевой бронзы, прижимающие подложку.

Первая схема (приведена на рисунке 3) представляет собой последовательно подключенные к формируемой пленке резисторы R1 и R2. Делитель напряжения позволяет снизить максимальное напряжение, подаваемое на АЦП, до 9 В.

Последовательное соединение резистора

При используемой комбинации номиналов резисторов (рисунок 3) зависимость выходного напряжения цепи от сопротивления формируемой пленки $U_{out}(R_f)$ имеет вид:

$$U_{out}(R_f) = \frac{U_{in}R_2}{R_1 + R_2 + R_f}, \quad (1)$$

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

R_1 – сопротивление впаянного в схему первого резистора, $R_1=50 кОм$;

R_2 – сопротивление впаянного в схему второго резистора, $R_2=30 кОм$.

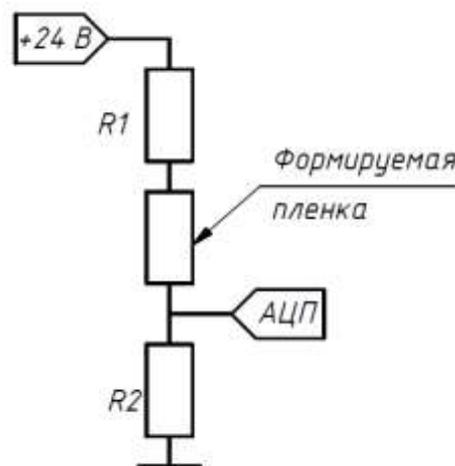


Рис. 3. Последовательное соединение резистора

По данной функции были построены графики (рисунок 4), демонстрирующие полученную зависимость в двух диапазонах: от 1 до 100 Ом (который соответствует формированию сплошного покрытия) и от 1 до 10 МОм, при котором происходит образование островковых структур.

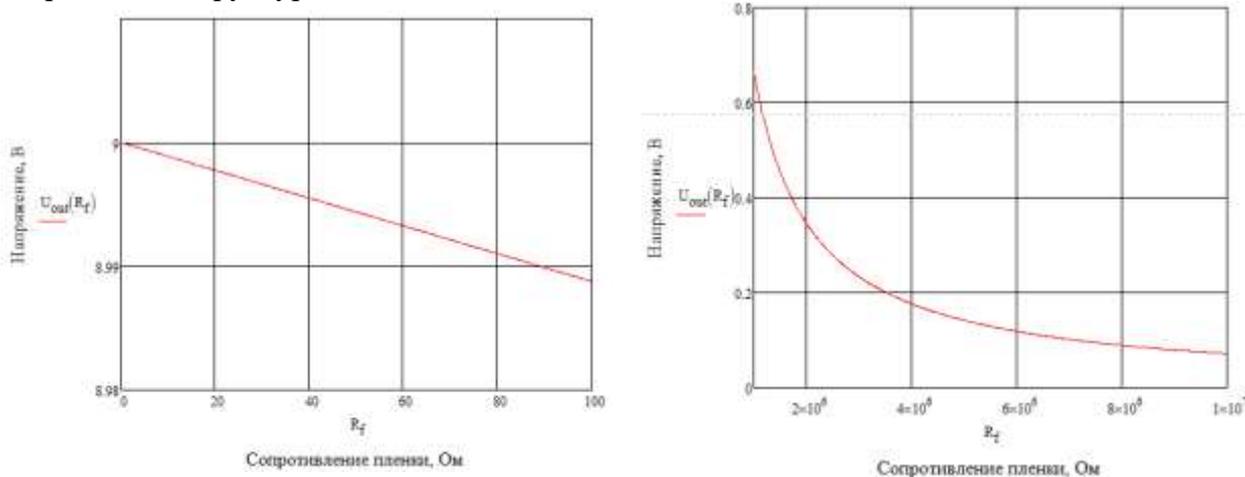


Рис. 4. Напряжение при последовательном включении резистора

Шаг квантования напрямую влияет на точность контроля технологического процесса. Чем меньше величина шага, тем точнее снимаются параметры наносимого покрытия. Так как в

указанной схеме применяется двенадцатиразрядный АЦП, зависимость шага квантования по напряжению от сопротивления пленки $U_d(R_f)$ примет вид:

$$U_d(R_f) = \frac{U_{in}R_2}{(R_1 + R_2 + R_f)(2^n - 1)}, \quad (2)$$

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

На основании полученной зависимости (2) построены графики (рисунок 5) в прежних диапазонах.

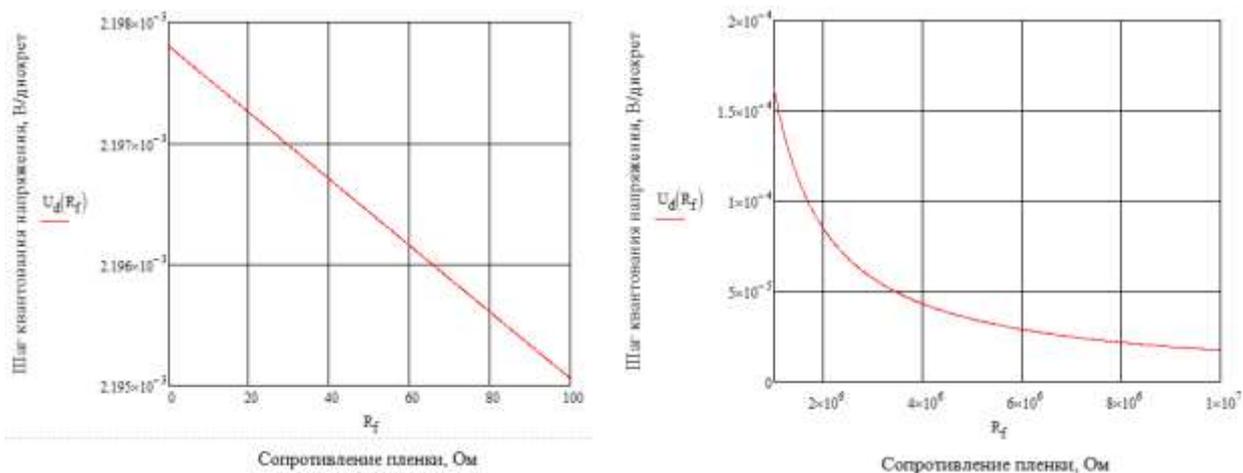


Рис. 5. Шаг квантования напряжения при последовательном соединении

Как видно из графической иллюстрации выражения (2) шаг квантования напряжения на АЦП составляет для моментов: образования островковых структур – порядка 0,02 мВ/дискрету АЦП, образования сплошной пленки – порядка 2,2 мВ/дискрету. При этом по формуле (3) для границ диапазона было рассчитано изменение сопротивления пленки R_d при изменении напряжения на одну дискрету:

$$R_d = \frac{U_d}{I}, \quad (3)$$

где I – сила тока, проходящего через пленку при данном сопротивлении пленки.

Идеальным случаем является чрезвычайно малая величина данного параметра, однако рассчитанные по формуле (3) значения составляют при образовании сплошной пленки 4,6 Ом/дискрету (при токе 478 мкА), а при формировании островковой структуры – 4,26 Ом/дискрету (при токе 4,7 мкА). Как видно, этот параметр на всем исследуемом диапазоне сопротивлений пленки меняется незначительно, а при 10 МОм показывает достаточно высокую точность определения сопротивления.

Значительную роль в определении сопротивления пленки при помощи АЦП играет стабильность метода. В данном случае под стабильностью понимается величина приращения выходного напряжения в одной дискрете АЦП в зависимости от приращения сопротивления пленки $U_{dR}(R_f)$. Поэтому выражение (2) было продифференцировано с получением формулы (4):

$$U_{dR}(R_f) = \frac{dU_d(R_f)}{dR_f} = - \frac{U_{in}R_2}{(2^n - 1)(R_1 + R_2 + R_f)^2} \quad (4)$$

По зависимости (4) построены графики:

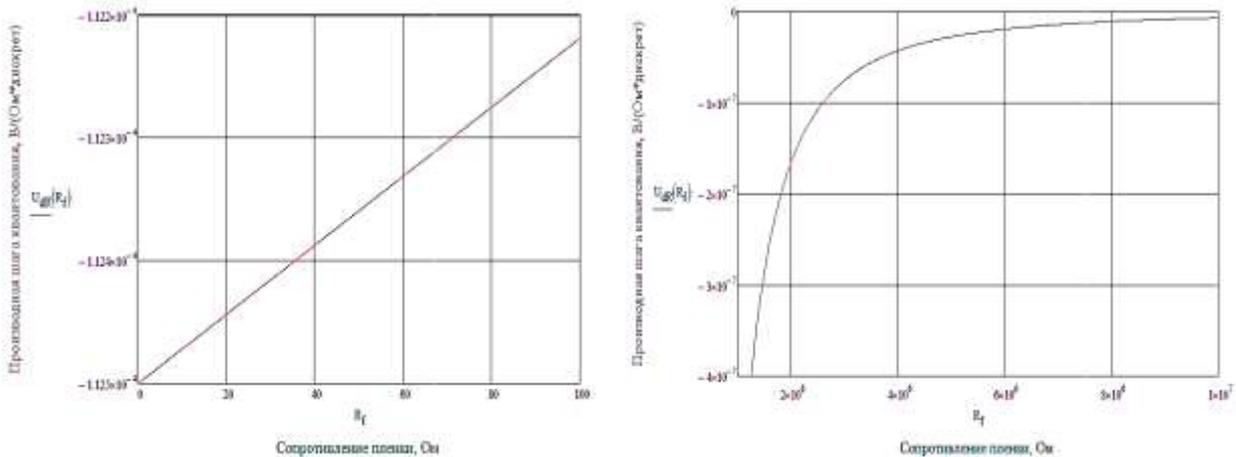


Рис. 6. График производной шага квантования по сопротивлению пленки при последовательном включении

По графикам на рисунке 6 видно, что приращение напряжения в одной дискрете составляет порядка 100 мкВ/Ом·дискрету в диапазоне формирования сплошного покрытия и порядка 100 нВ/Ом·дискрету в области зарождения островковой пленки.

Во второй из рассматриваемых схем (рисунок 7) пленка подсоединена параллельно резистору R2.

Параллельное соединение резистора

При использовании данной схемы зависимость напряжения, подаваемого на АЦП, от сопротивления наносимого покрытия имеет вид

$$U_{out}(R_f) = \frac{U_{in} \frac{R_2 R_f}{R_2 + R_f}}{R_1 + \frac{R_2 R_f}{R_2 + R_f}} \quad (5)$$

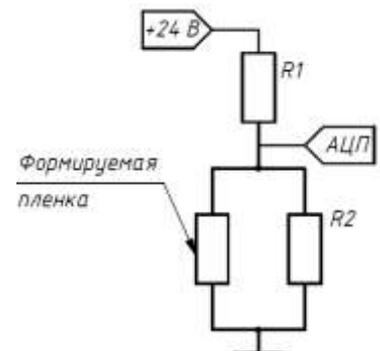


Рис. 7. Схема параллельного соединения резистора

Графически зависимость (5) выглядит следующим образом:

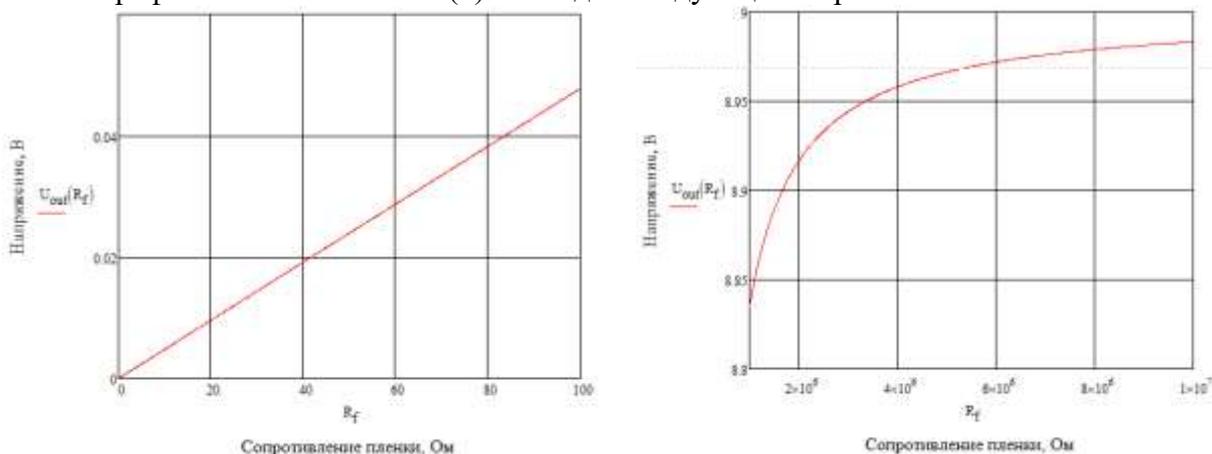


Рис. 8. График напряжения при параллельном включении

При таком подключении резисторов зависимость шага квантования по напряжению от сопротивления пленки $U_d(R_f)$ примет вид выражения (6):

$$U_d(R_f) = \frac{U_{in} \frac{R_2 R_f}{R_2 + R_f}}{\left(R_1 + \frac{R_2 R_f}{R_2 + R_f}\right) (2^n - 1)} \quad (6)$$

Графически выражение (6) показано на рисунке 9.

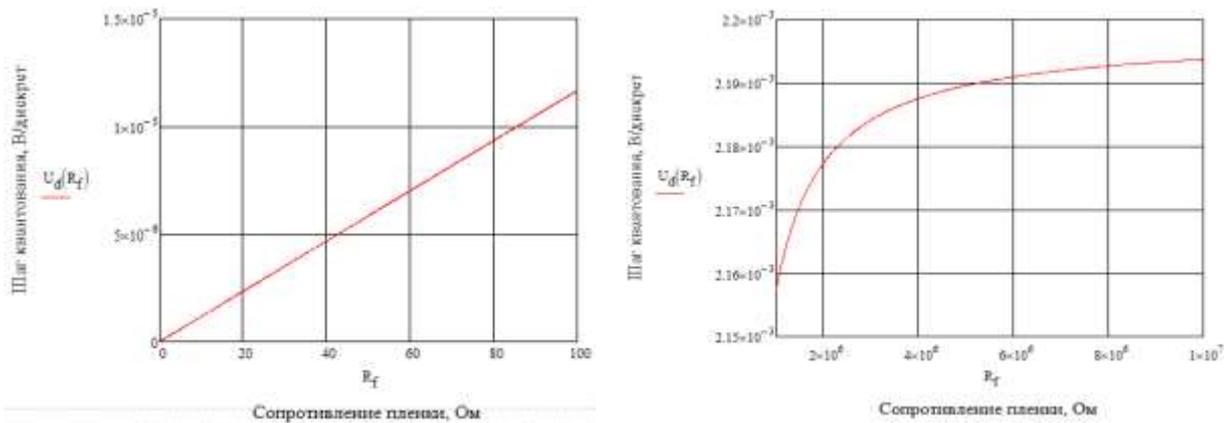


Рис. 9. График шага квантования напряжения при параллельном соединении

Шаг квантования по напряжению на АЦП при параллельном соединении резисторов составит для моментов: образования островковых структур (сопротивление составляет 10 МОм) – порядка 2,2 мВ/дискрету АЦП, образования сплошной пленки (сопротивление близко к нулю) – стремится к величине порядка 0,1 мкВ/дискрету.

Рассчитанные по формуле (3) значения составляют при образовании сплошной пленки $2 \cdot 10^{-4}$ Ом/дискрету (при токе 480 мА), а при формировании островковой структуры – 1222 Ом/дискрету (при токе 1,8 мкА).

Аналогично случаю с последовательно подключенным резистором в данной схеме было определено приращение выходного напряжения в одной дискрете в зависимости от сопротивления пленки. Аналитически зависимость выглядит в соответствии с формулой (7):

$$U_{dR}(R_f) = \frac{dU_d(R_f)}{dR_f} = \frac{U_{in} R_2}{(R_2 + R_f)(2^n - 1)} - \frac{U_{in} R_2 R_f}{(R_2 + R_f)^2 (2^n - 1)} - \frac{U_{in} R_2 R_f \left[\frac{R_2}{R_2 + R_f} - \frac{R_2 R_f}{(R_2 + R_f)^2} \right]}{(R_2 + R_f)(2^n - 1) \left(R_1 + \frac{R_2 R_f}{R_2 + R_f} \right)^2} \quad (7)$$

По зависимости (7) построены графики:

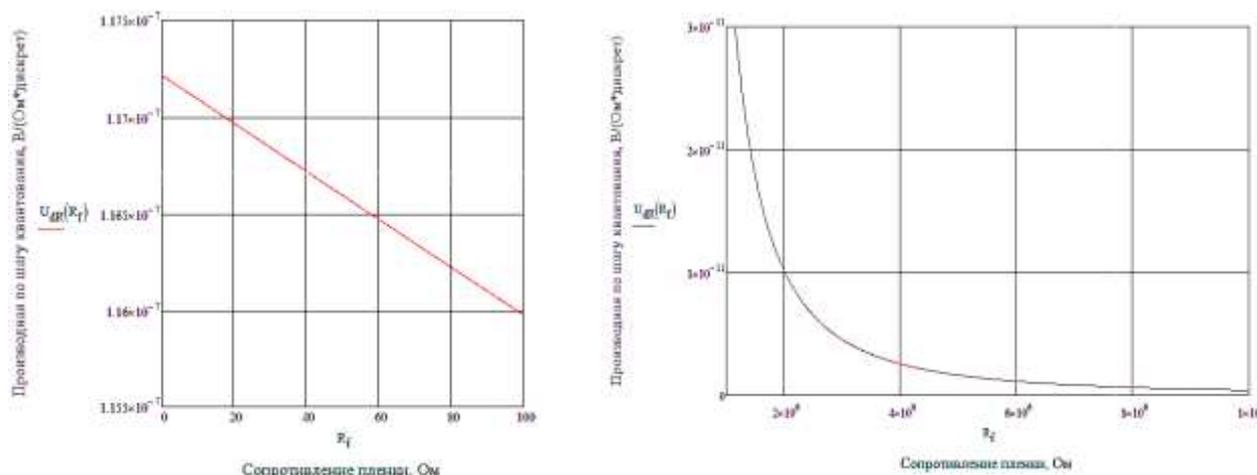


Рис. 10. График производной шага квантования по сопротивлению пленки при параллельном соединении резистора

При рассмотрении графиков в представленных диапазонах выявлено, что при образовании сплошного покрытия величина приращения напряжения на одну дискрету АЦП в зависимости от сопротивления пленки составляет порядка 100 нВ/Ом·дискрету, а при образовании островковой пленки – порядка 10 пВ/Ом·дискрету.

Результаты анализа сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Результаты математического анализа схем

	Резистор соединен	
	последовательно	параллельно
Шаг квантования при образовании		
– сплошной пленки, мВ/дискрету	2,2	10^{-4}
– островковой пленки, мВ/дискрету	0,02	2,2
Изменение сопротивления пленки в одной дискрете АЦП при образовании		
– сплошной пленки, Ом/дискрету	4,6	$2 \cdot 10^{-4}$
– островковой пленки, Ом/дискрету	4,26	1222
Модуль приращения выходного напряжения на одну дискрету АЦП при образовании		
– сплошной пленки, пВ/Ом·дискрету	10^8	10^5
– островковой пленки, пВ/Ом·дискрету	10^5	10

Данные таблицы 2 показывают, что применение схемы с параллельно соединенным резистором предпочтительно для фиксирования момента образования сплошной пленки, а схемы с последовательно соединенным резистором целесообразнее использовать при точном контроле момента образования островковых пленок. В пользу такого решения свидетельствуют численные данные первых двух параметров таблицы. Однако стоит заметить, что схема с параллельным включением резистора обеспечивает большую стабильность метода и при образовании сплошного покрытия, и при формировании островковых структур.

Выводы

По приведенным расчетам и графикам можно сделать следующие выводы:

1. Схема с параллельным соединением резистора обеспечивает достаточно высокую точность (шаг квантования составляет 0,1 мкВ/дискрету) фиксирования момента образования сплошной резистивной пленки, позволяя регистрировать изменения в ее

сопротивления на уровне $2 \cdot 10^{-4}$ Ом/дискрету. Следовательно, при ориентации использования конкретной проектируемой установки на получение традиционных сплошных тонкопленочных покрытий необходимо применять схему с использованием АЦП и резистора, соединенного параллельно наносимой пленке.

2. Схема с последовательно соединенным резистором допускает точное (шаг квантования порядка 0,02 мВ/дискрету) определение момента зарождения квантовых островков. При этом расчетная величина изменения сопротивления островковой пленки составляет 4,26 Ом/дискрету. Поэтому рекомендуется при нанесении островковых наноразмерных структур проводить контроль сопротивления пленки с помощью последовательно соединенных резисторов и АЦП.

Литература

1. Информационный бюллетень «Технология вакуумного напыления. Современные возможности замещения». Режим доступа: <http://www.tspc.ru/tech/VACUUM.php> (дата обращения 8.03.2016).
2. Сидорова С.В., Юрченко П.И. Формирование островковых наноструктур в вакууме // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. №11. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/259672.html> (дата обращения 9.11.2015).