

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ФОРМИРОВАНИЮ ОСТРОВКОВЫХ НАНОСТРУКТУР НА УСТАНОВКЕ МОДУЛЬНОГО ТИПА

С.В. Сидорова⁽¹⁾, А.М. Аветисян⁽²⁾

*Аспирант⁽¹⁾, студент⁽²⁾,
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»*

*Научный руководитель: Ю.В.Панфилов,
доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные технологии в
машиностроении»*

ВВЕДЕНИЕ

Атомистическая теория роста пленок, авторами которой являются Уолтер и Родин, описывает процесс зародышеобразования с помощью методов статической физики и позволяет представить этот процесс с помощью зародышей малого размера, состоящих из небольшого числа отдельных атомов. Стабильные зародыши называются зародышами закритического размера, а нестабильные – докритического размера.

После образования зародышей закритического размера на подложке начинается рост пленки, в результате которого адсорбируемые атомы и зародыши докритического размера мигрируют на поверхности, захватываясь закритическими зародышами (островками).

Островки разрастаются, просвет между ними уменьшается. В этот момент пленка представляет собой совокупность островков закритического размера, пока не связанных между собой гальванически. Такую пленку называют островковой (рис. 1). В зависимости от расстояния между островками преобладают различные механизмы электропроводимости. При сравнительно больших расстояниях (100 Å) – термоэлектронный механизм, а при малых зазорах (25 Å) – туннельный эффект переноса носителей.

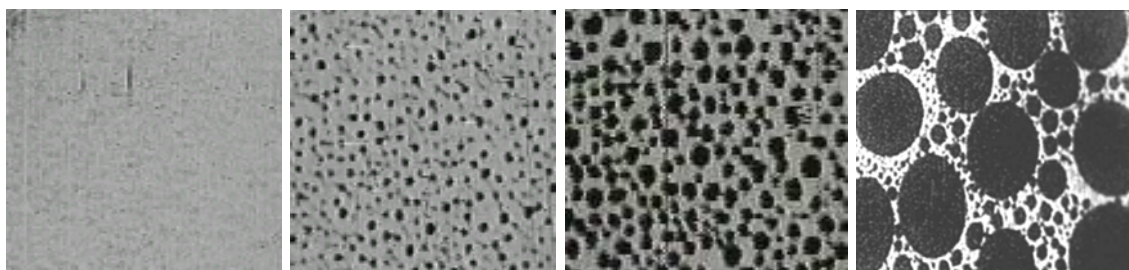


Рис. 1. Процесс формирования островковых наноструктур

НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ВАКУУМНАЯ УСТАНОВКА МОДУЛЬНОГО ТИПА

Эксперименты по образованию островковых наноструктур проводились на нанотехнологической установке модульного типа (рис. 2) для формирования тонкопленочных наноструктур четырьмя наиболее распространенными методами. А именно:

- Магнетронное распыление.
- Термовакuumное испарение.
- Газофазное осаждение.
- Дуговой разряд.

Модульность спроектированной установки заключается в возможности компоновки ее отдельных узлов (модулей) под определенные задачи.

Для высоковакуумной откачки предусмотрен диффузионный насос, который позволяет откачивать рабочую камеру до давления 10^{-5} Па. С целью обеспечения безмасляного вакуума предлагается турбомолекулярный насос с возможностью откачивать рабочую камеру до давления 10^{-9} Па. Варианты высоковакуумной откачки представлены на рис. 3.



Рис. 2. Нанотехнологическая вакуумная установка модульного типа



Рис. 3. Варианты высоковакуумной откачки:
а) диффузионный насос; б) турбомолекулярный насос.

В установке предлагается два варианта конструкции промежуточной камеры: куб и цилиндр (рис. 4). Это предусмотрено для различных возможностей крепления промежуточной камеры к раме и арматуры к промежуточной камере.

Для реализации возможности формирования тонкопленочных наноструктур четырьмя вышеперечисленными методами спроектированы и изготовлены четыре фланца (модуля). Все модули (рис. 5) имеют один типоразмер, что позволяет легко производить их установку и смену.

Т.к. для использования некоторых методов нанесения требуется рабочий газ, то в установке предусмотрены линейки РРГ для напуска азота, циклогексана и аргона.

Таким образом, модульность (рис. 6) нанотехнологической установки заключается в возможности варьировать набором элементов установки (ее частей):

- Высоковакуумной откачки.
- Промежуточной камеры.
- Вариантами методов нанесения тонкопленочных покрытий.
- Газовой средой.

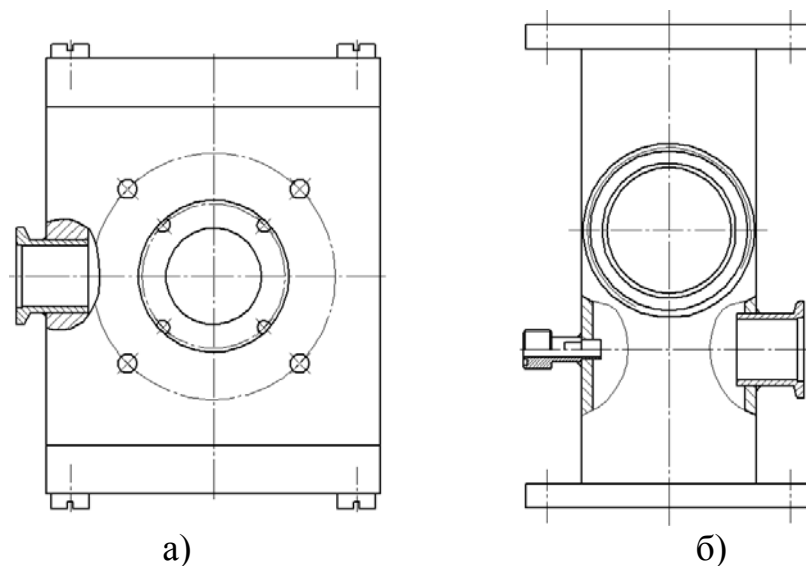


Рис. 4. Варианты конструкции промежуточной камеры установки: а) – куб; б) – цилиндр.

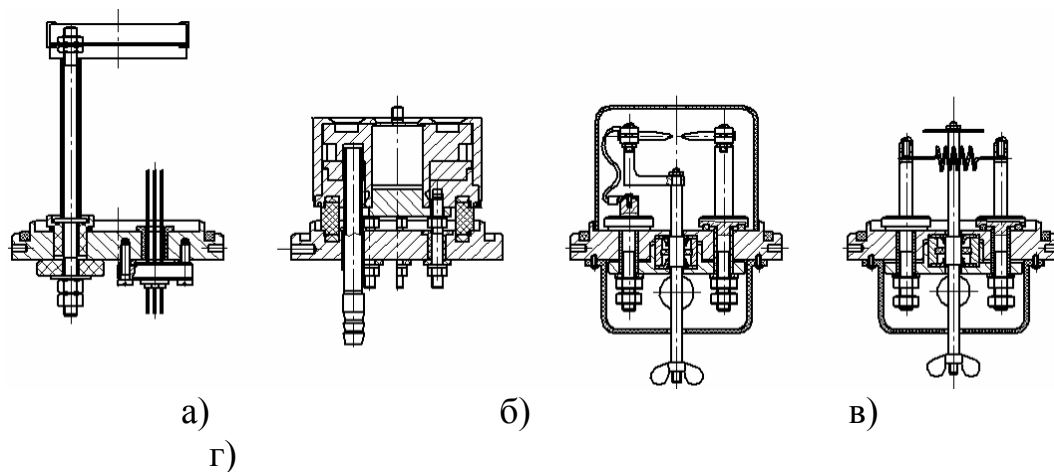


Рис. 5. Варианты фланцев-модулей: а – газофазное осаждение; б – магнетронное распыление; в – дуговой разряд; г – термическое испарение.

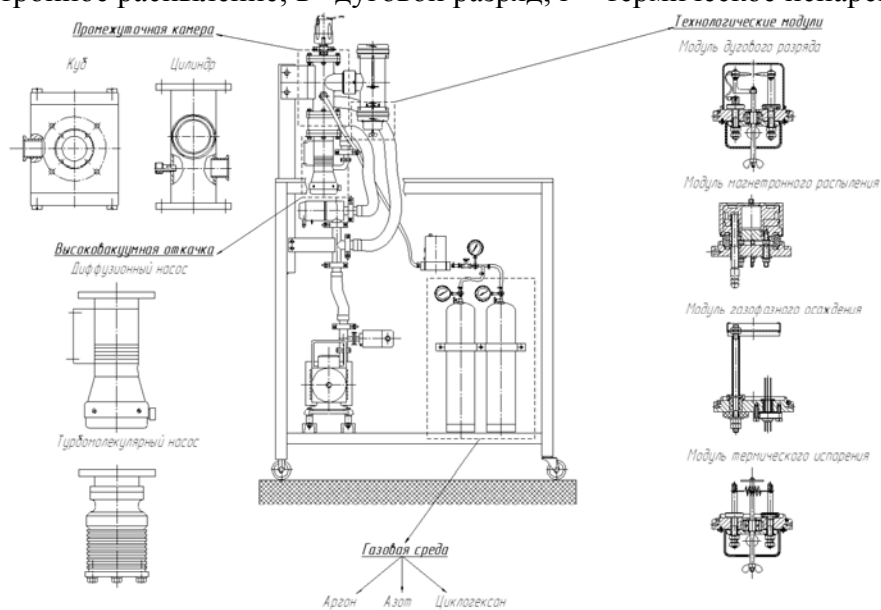


Рис. 6. Модульность нанотехнологической установки

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ФОРМИРОВАНИЮ ОСТРОВКОВЫХ НАНОСТРУКТУР

Для проведения исследований был организован стенд (рис. 7), в который вошли:

- Нанотехнологическая установка модульного типа.
- Измеритель иммитанса LCR-816.
- Лабораторный автотрансформатор регулировочный.
- Персональный компьютер.

Целью экспериментов было выявление времени начала образования островковых наноструктур на подложке из ситалла при нанесении на нее меди методом термического испарения.

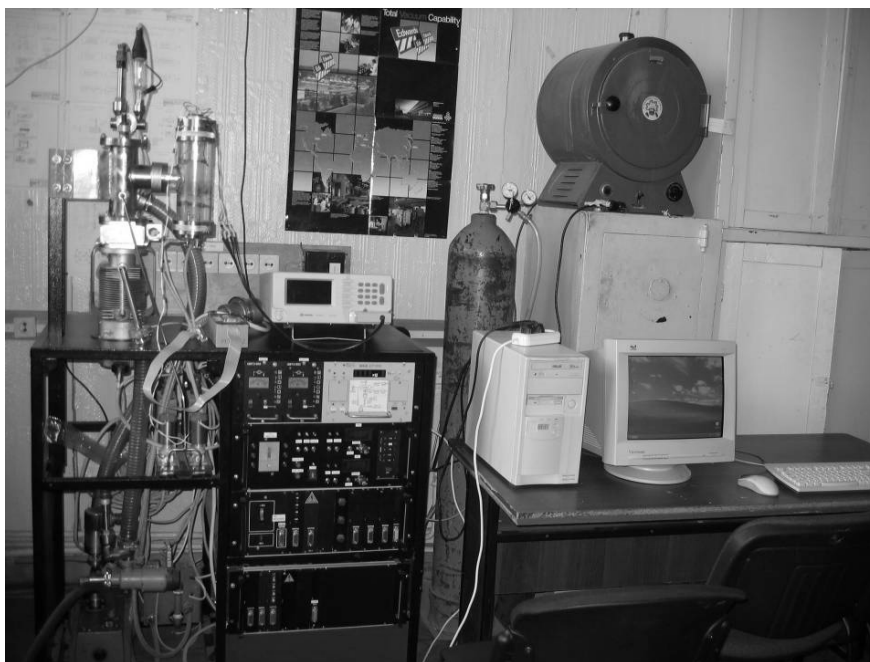


Рис. 7. Экспериментальный стенд

Эксперименты проводились следующим образом. Подложка из ситалла с предварительно сформированными на ней контактными площадками (рис. 10, а) помещалась в рабочую камеру (рис. 9). Затем проводили откачку камеры до рабочего давления (10^{-3} Па). Подложку нагревали до температуры 80°C и начинали испарять медь с вольфрамовой спирали. Аналогичным образом были получены образцы без подогрева подложки.

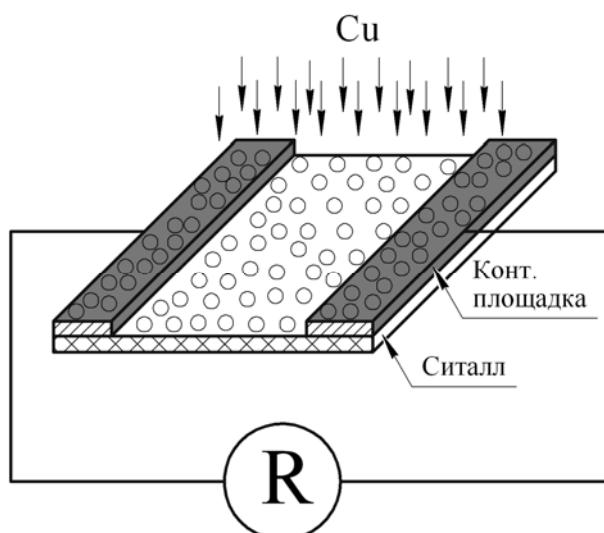


Рис. 8. Схема измерения сопротивления

Для определения времени начала образования тонкой (5-10 нм) пленки одновременно с началом испарения меди включали измеритель иммитанса LCR-816, с которого на компьютер начиналась запись изменения сопротивления в файл «.txt». Схема измерения представлена на рисунке 8. Очевидно, что в момент образования сплошной пленки (рис. 10, б) сопротивление резко начинает падать. Именно это и было зафиксировано при помощи LCR-816.

Далее были проведены эксперименты с целью определения момента начала падения сопротивления, т.е. начала роста пленки. Как раз того момента, когда островки еще не «слились» в сплошную пленку.

Результатом исследований стал ряд графиков (рис. 11), показывающих зависимость изменения электрического сопротивления во времени при нанесении меди на ситалловую подложку.

На графике можно выделить 3 стадии формирования пленки: 1 – адсорбция атомов меди на ситалловой подложке, образование зародышей; 2 – рост зародышей, образование островков; 3 – формирование каналов, образование сплошной пленки. Как видно из полученных результатов, оптимальное время формирования островков – до 85 секунд.

На вакуумной установке были отработаны режимы формирования островковых наноструктур. Для возможности получения островковых пленок, предположили, что скорость осаждения должна быть меньше либо равна 0,1 нм/с ($V_o \leq 0.1$ нм/с)

Скорость осаждения для метода термического испарения находится, используя выражение (1):

$$V_o = \frac{5.834 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{M}{T_u}} \cdot p_{нас} \cdot A_u \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(\theta) \cdot 10^9}{\rho \cdot 4 \cdot \pi \cdot R^2} \text{ нм/с (1)}$$



Рис. 9. Подложка установлена в рабочую камеру



а)



б)

Рис. 10. Оснастка с закрепленной подложкой до (а) и после (б) проведения эксперимента

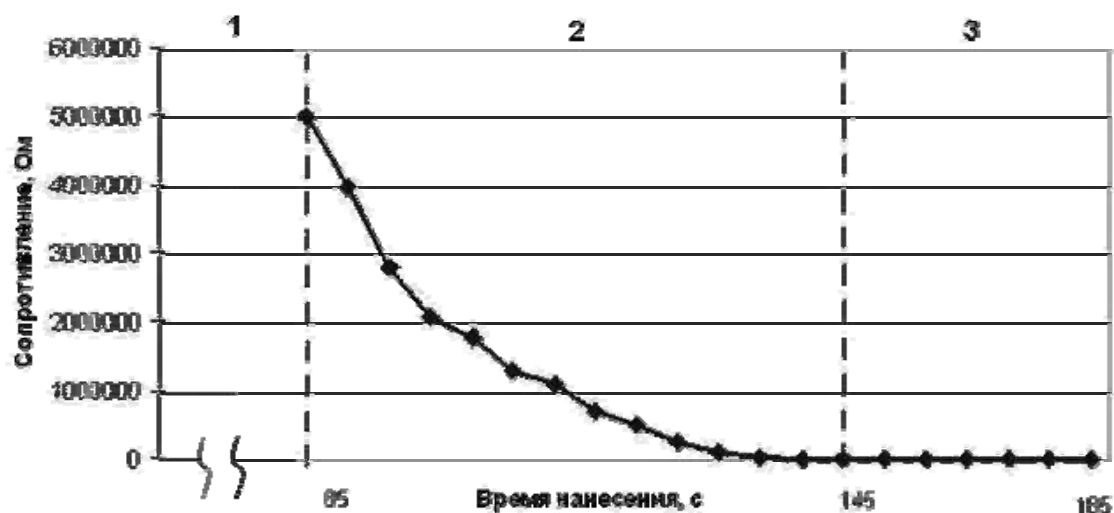


Рис. 11. Зависимость сопротивления от времени нанесения

M – молярная масса испаряемого вещества, кг/кмоль;

T_u – температура плавления испаряемого вещества, К;

A_u – площадь испарителя, м²;

$p_{нас}$ – давление насыщенных паров, Па;

ρ – плотность испаряемого материала, кг/м³;

R – расстояние до подложки от точечного испарителя, м.

Для оценочного расчета значение углов испарения и осаждения считаем равным нулю. Тогда скорость осаждения примет следующий вид:

$$V_o = \frac{5.834 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{M}{T_u}} \cdot p_{нас} \cdot A_u \cdot 10^9}{\rho \cdot 4 \cdot \pi \cdot R^2} \quad (2)$$

В условиях нашей лаборатории введем некоторые известные значения: $R=0.15$ м, $A_u=40 \cdot 10^{-6}$ м. Тогда:

$$\frac{\sqrt{\frac{M}{T_u}} \cdot p_{нас}}{\rho} \leq \frac{0.1 \cdot 4 \cdot \pi \cdot R^2}{A_u \cdot 10^9 \cdot 5.834 \cdot 10^{-3}} = 1.212 \cdot 10^{-4} \quad (3)$$

Таким образом, заданную скорость возможно обеспечить, если подобрать испаряемое вещество, удовлетворяющее следующему требованию (4):

$$\frac{\sqrt{\frac{M}{T_u}} \cdot p_{нас}}{\rho} \leq 1.212 \cdot 10^{-4} \quad (4)$$

Для меди из выражения (5) при $p_{нас}=1$ Па, $M=64$ кг/кмоль, $T_u=1530$ К, $\rho=8960$ кг/м³:

$$\frac{\sqrt{\frac{64}{1530}} \cdot 1}{8960} = 2.283 \cdot 10^{-5} \leq 1.212 \cdot 10^{-4} \quad (5)$$

Итак, используя медь в качестве испаряемого материала можно обеспечить скорость осаждения в заданных пределах.

Для никеля из выражения (6) при $p_{\text{нас}}=1$ Па, $M=58.7$ кг/кмоль, $T_{\text{и}}=1800$ К, $\rho=8900$ кг/м³:

$$\frac{\sqrt{\frac{58.7}{1800}} \cdot 1}{8900} = 2.029 \cdot 10^{-5} \leq 1.212 \cdot 10^{-4} \quad (6)$$

Как видно, никель удовлетворяет заданным требованиям.

Для золота из выражения (7) при $p_{\text{нас}}=1$ Па, $M=197$ кг/кмоль, $T_{\text{и}}=1670$ К, $\rho=19320$ кг/м³:

$$\frac{\sqrt{\frac{197}{1670}} \cdot 1}{19320} = 1.778 \cdot 10^{-5} \leq 1.212 \cdot 10^{-4} \quad (7)$$

Золото также удовлетворяет заданным требованиям.

Скорость осаждения для метода магнетронного распыления находится используя следующее выражение (8):

$$V_o = \frac{j_u \cdot S_p \cdot M_M \cdot A_u \cdot 10^9}{q_e \cdot N_A \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2} \text{ н/с} \quad (8)$$

j_u – плотность ионного тока, А/м²;

S_p – коэффициент распыления, атом/ион;

M_M – молярная масса, кг/кмоль;

A_u – площадь распыления, м²;

q_e – заряд электрона $1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл;

N_A – число Авогадро $6,022 \cdot 10^{26}$ 1/кмоль.

Для возможности получения островковых пленок необходимо выполнить условие (9):

$$V_o = \frac{j_u \cdot S_p \cdot M_M \cdot A_u \cdot 10^9}{q_e \cdot N_A \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2} \leq 0.1 \text{ н/с} \quad (9)$$

В данном методе осаждения тонкой пленки, параметром, который будет регулировать скорость осаждения, будет плотность ионного тока из (9). Получаем (10), подставляя известные величины – (11).

$$j_u \leq \frac{0.1 \cdot q_e \cdot N_A \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2}{S_p \cdot M_M \cdot A_u \cdot 10^9} \quad (10)$$

$$j_u \leq 0.227 \frac{\rho}{S_p \cdot M_M} \quad (11)$$

Для титана находим плотность ионного тока (12) при $M_M=48$ кг/кмоль, $\rho=4520$ кг/м³, $S_p=0.4$ атом/ион.

$$j_u \leq 0.227 \frac{4520}{0.4 \cdot 48} = 53.44 \quad (12)$$

Итак, используя титан в качестве распыляемого материала можно обеспечить скорость осаждения в заданных пределах.

Для углерода находим плотность ионного тока (13) при $M_M=12$ кг/кмоль, $\rho=2250$ кг/м³, $S_p=0.4$ атом/ион.

$$j_u \leq 0.227 \frac{2250}{0.4 \cdot 12} = 106.406 \quad (13)$$

Используя углерод как распыляемый материал, можно добиться заданных скоростей осаждения.

Для никеля находим плотность ионного тока (14) при $M_M=58.7$ кг/кмоль, $\rho=8900$ кг/м³, $S_p=1.5$ атом/ион.

$$j_u \leq 0.227 \frac{8900}{1.5 \cdot 58.7} = 22.945 \quad (14)$$

Никель тоже может использоваться для распыления при заданных пределах скорости осаждения.

Список литературы:

1. Ю.Г.Обичкин. Физические основы зарождения и роста тонких пленок // Учебное пособие, Москва, 1981, 38 с.
2. Технология, оборудование и системы управления в электронном машиностроении. Энциклопедия «Машиностроение» Т.III-8 / Ю.В.Панфилов, М.: Машиностроение. – 2000г., 744 с.