

## СЕКЦИЯ 4. ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ПОКРЫТИЯ И НАНОСТРУКТУРЫ

### Осаждение сверхтонких пленок в вакууме для изделий наноэлектроники

*Ю.В. Панфилов, И.А. Родионов, И.А. Рыжиков, А.С. Бабурин, Д.О. Москалев, Е.С. Лотков  
Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., 5, Email: panfilov@bmstu.ru*

*Представлены результаты исследований процесса осаждения пленок толщиной менее 100 нм методом электронно-лучевого испарения на специальном вакуумном технологическом оборудовании. Приведены результаты расчета величины энергомассопереноса для получения пленок ITO, Ag и Al с заданной структурой, однородностью состава и шероховатостью.*

*Vacuum technology of ultra thin films for nanoelectronic products manufacturing. Y.V.Panfilov, I.A.Rodionov, A.S.Baburin, D.O. Moskaev, E.S. Lotkov. Study results of thin film deposition with thickness less than 100 nm by means of electron beam evaporation on special vacuum coaters are represented. Calculation results of energy and mass carry magnitude for ITO, Ag and Al thin films deposition with preset of structure and composition homogeneity and roughness are shown.*

#### Введение

Возможность формирования пленок толщиной менее 50 нм с требуемыми показателями качества зависит от характеристик энергомассопереноса [1], определяемых методом генерации пленкообразующих частиц («энергия») и режимами работы и конфигурацией расположения источников этих частиц («масса»). Так, для получения сверхтонких ультрагладких сплошных пленок с кристаллической структурой и однородным составом требуется низкая скорость осаждения и энергия частиц, высокая температура подложки и высокий вакуум, обеспечивающие двумерный рост пленки.

Всем этим требованиям отвечает метод электронно-лучевого испарения [2], реализуемый в специальном вакуумном технологическом оборудовании, которое имеется в МГТУ им. Н.Э. Баумана. На этом оборудовании изготавливаются сверхтонкие монокристаллические пленки для изделий наноэлектроники, сверхпроводниковые пленки для квантовых вычислений и другие перспективные образцы современной наноэлектроники.

#### Специальное вакуумное технологическое оборудование

Вакуумная установка «Evo Vac Angstrom Engineering» состоит из откачной системы (спиральный форвакуумный насос и криогенный высоковакуумный насос), технологических источников (двухлучевой электронный источник испарения с 7-ю тиглями и ионный источник с полым катодом), рабочей камеры с регулируемым по высоте и вращающимся с частотой до 40 об/мин подложкодержателем (диаметр подложек до 200 мм), который можно нагревать до температуры 773 К и охлаждать до криогенных температур жидким азотом. Рабочая камера оснащена также датчиками скорости осаждения и устройством оптического контроля толщины пленки, неравномерность толщины пленки на диаметре 200 мм обеспечивается  $\pm 2\%$ .

Установка электронно-лучевого испарения Plassys MEB550 SL3 предназначена для осаждения в вакууме металлических тонких пленок с возможностью реактивного осаждения оксидов с заданной стехиометрией состава пленки, путем подачи кислорода в камеру. Подложки можно нагревать до температуры 873 К, а перед нанесением пленки поверхность подложки очищается в газоразрядной плазме аргона.

Установка оборудована тремя камерами, откачка ведется с помощью форвакуумного спирального насоса и высоковакуумного турбомолекулярного насоса производства Edwards до следующих давлений: камера загрузки –  $3 \cdot 10^{-6}$  Па, камера осаждения –  $10^{-7}$  Па и камера окисления –  $10^{-6}$  Па.

Установка оснащена держателем образцов с 3 степенями свободы для крепления пластин диаметром 100 мм. Процесс осаждения пленок ведется автоматически с помощью ПК по заданному рецепту. Одновременно можно осажать 4 различных материала.

### Примеры осаждения сверхтонких пленок электроннолучевым осаждением

В оптических модуляторах используется пленка ИТО (IndiumTinOxide) – прозрачный проводящий оксид – толщиной 10 – 20 нм, который наносился методом электронно-лучевого испарения. Гранулы  $\text{In}_2\text{O}_3$  и  $\text{SnO}$  испарялись электронным лучом при давлении в вакуумной камере  $10^{-5}$  Па и осаждались на подложки из кремния. Процесс осаждения проводился с ионным ассистированием, скорость осаждения контролировалась с помощью кварцевого датчика и поддерживалось на уровне  $2 \text{ \AA}/\text{сек}$ .

Главным элементом сверхпроводящих кубитов для квантовых вычислений является джозефсоновский переход (рис. 1). Он представляет собой трехслойную структуру, состоящую из двух слоев сверхпроводника с изолирующим между ними слоем диэлектрика.

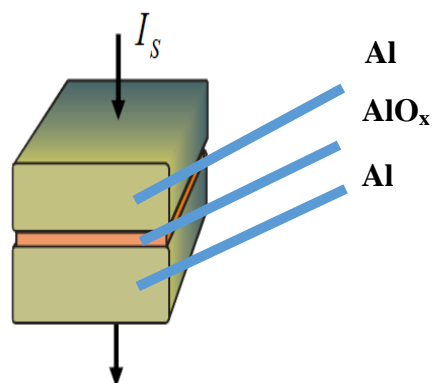


Рис. 1. Схема джозефсоновского перехода ( $I_s$  электрический ток).

В качестве сверхпроводника использовался алюминий толщиной 100 нм, который наносился методом электронно-лучевого испарения на установке Plassys MEB 550 SL3.

Изготовление джозефсоновского перехода проводилось в одном вакуумном цикле так, чтобы обеспечить контролируемое формирование туннельного барьера – тонкого диэлектрического слоя толщиной 1,5 нм. Скорость осаждения варьировалась от  $2 \text{ \AA}/\text{с}$  до  $10 \text{ \AA}/\text{с}$ .

Сформированные пленки обладали 100%-й площадью и имели шероховатость  $< 2$  нм. Влияние скорости осаждения на шероховатость пленки показана на рис. 2. На основании проведенных экспериментов можно констатировать, что минимальной шероховатостью обладают пленки, полученные при скорости осаждения  $5 \text{ \AA}/\text{с}$ .

Для наноплазмоники наиболее подходящим материалом являются пленки серебра толщиной порядка 40 нм и имеющие монокристаллическую структуру, 100%-ю сплошность и шероховатость  $< 1$  нм. Такие пленки были получены на установке Evo Vac Angstrom Engineering при давлении  $10^{-5}$  Па, температура подложки варьировалась от 400 до 800 К. Скорость осаждения варьировалась от  $1 \text{ \AA}/\text{с}$  до  $4 \text{ \AA}/\text{с}$ .

Как будет показано ниже, обеспечение столь малых скоростей осаждения методом электронно-лучевого испарения связано с необходимостью поддержания строго определенной температуры нагрева материала в тигле соответствующей требуемому давлению насыщенного пара испаряемого вещества.

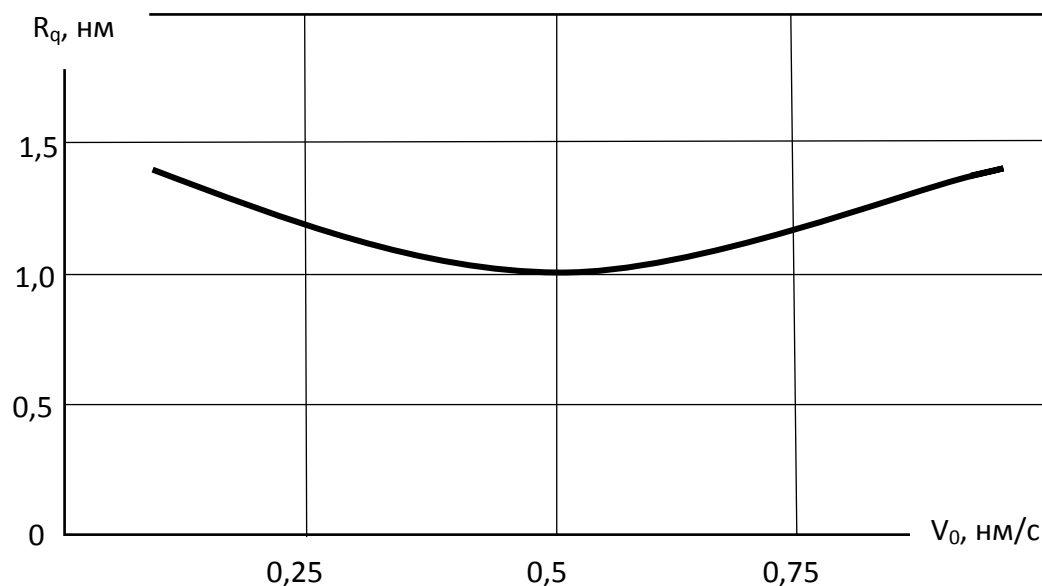


Рис. 2. Влияние скорости осаждения на шероховатость тонкой пленки.

Были проведены исследования зависимости размера кристаллитов серебра от температуры подложки в процессе нанесения пленки (рис. 3) и от скорости осаждения серебра (рис. 4). Расчетная зависимость скорости осаждения  $V_0$  от температуры нагрева материала до температуры испарения  $T_i$  (с соответствующим давлением насыщенного пара) для пленок серебра и алюминия показана на рис. 5.

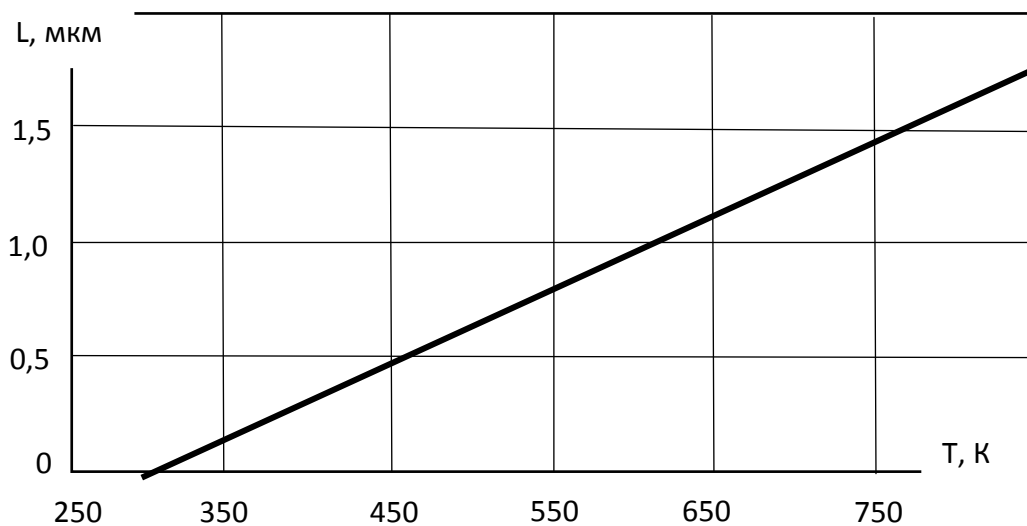


Рис. 3. Зависимость размера кристаллита  $L$  от температуры подложки  $T$ .

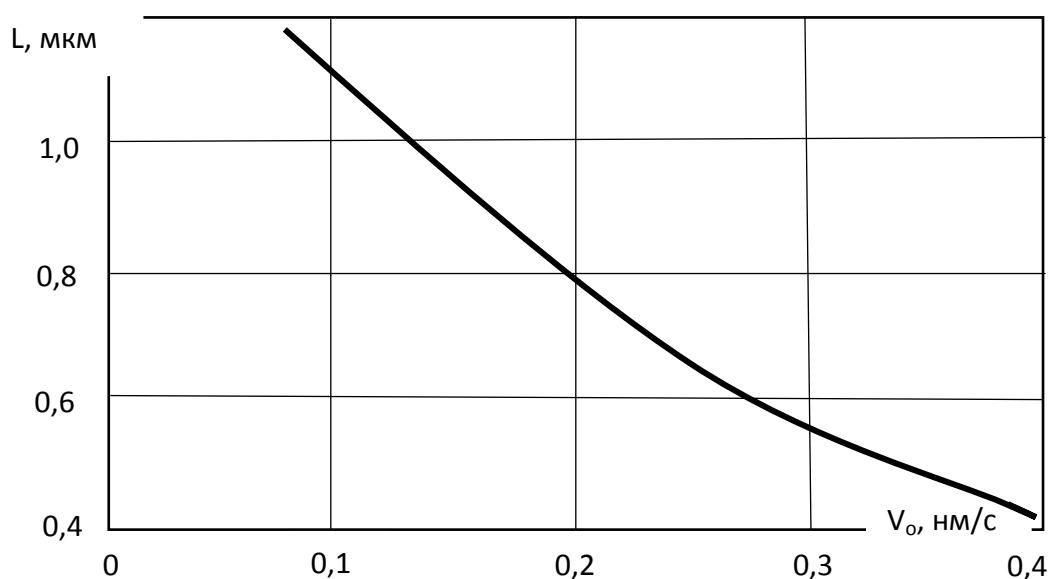


Рис. 4. Зависимость размера кристаллита  $L$  от скорости осаждения  $V_0$ .

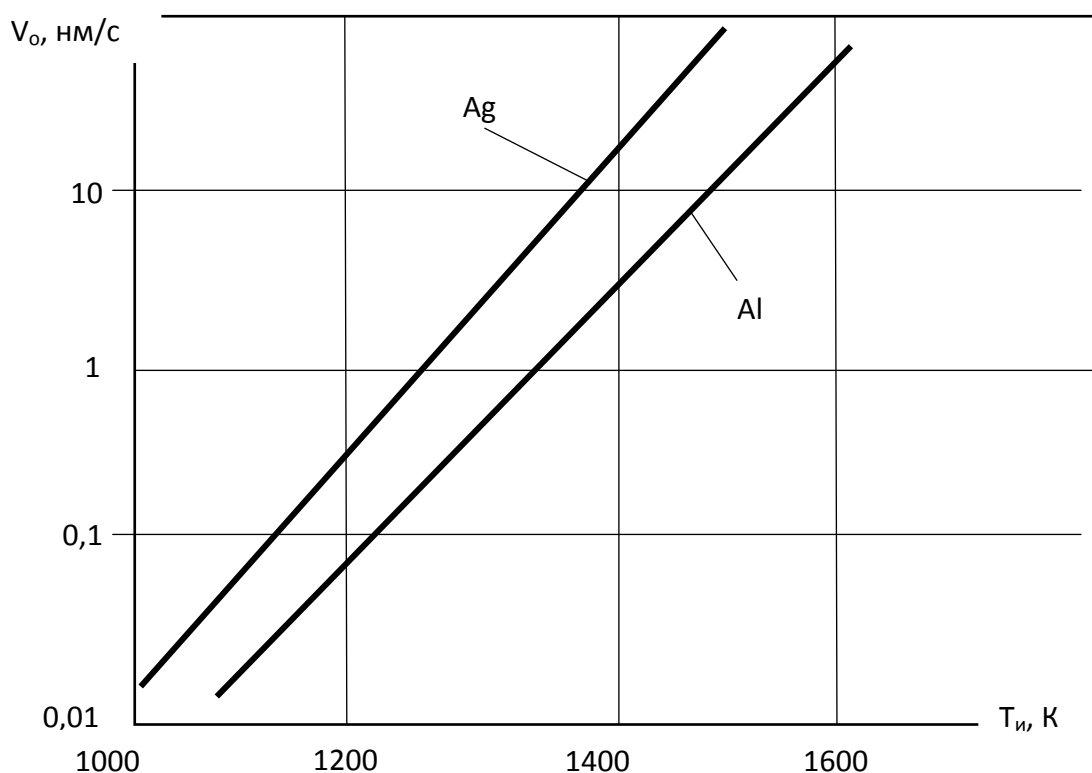


Рис. 5. Зависимость скорости осаждения  $V_0$  пленок серебра и алюминия от температуры испарения  $T_u$

Расчет скорости осаждения пленок Ag и Al показал, что для обеспечения  $V_0$ , равной 0,1 – 0,4 нм/с, необходимо материал в тигле нагревать электронным лучом до температуры  $T_u$ , обеспечивающей давление насыщенного пара  $p_{нас}$  на уровне  $10^{-2} - 10^{-3}$  Па. Так, для пленки серебра при допущении, что скорость осаждения приблизительно равна скорости испарения, рост тонкой пленки происходит со следующей скоростью:

$$V_0 = 5,83 \cdot 10^{-3} p_{\text{нас}} \sqrt{\frac{M}{T_{\text{и}}}} \frac{10^9}{\rho} = 5,83 \cdot 10^{-3} 10^{-3} \sqrt{\frac{108}{1195}} \frac{10^9}{10500} = 0,16 \text{ нм/с},$$

где  $M$  – молярная масса, кг/(кмоль);  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>.

Для пленки алюминия

$$V_0 = 5,83 \cdot 10^{-3} 10^{-3} \sqrt{\frac{27}{1355}} \frac{10^9}{2700} = 0,3 \text{ нм/с}.$$

При этом величина энергомассопереноса составляет:  
для серебра

$$E_{\text{и}} V_0 = k T_{\text{и}} \cdot 5,83 \cdot 10^{-3} p_{\text{нас}} \sqrt{\frac{M}{T_{\text{и}}}} = 1,38 \cdot 10^{-23} 1195 \cdot 5,83 \cdot 10^{-3} 10^{-3} \sqrt{\frac{108}{1195}} \\ = 2,88 \cdot 10^{-26} \frac{\text{Дж} \cdot \text{кг}}{\text{м}^2 \text{с}}$$

$$\text{или } 1,8 \cdot 10^{-7} \text{ эВ} \cdot \text{кг}/(\text{м}^2 \text{с}),$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;

для алюминия

$$E_{\text{и}} V_0 = 1,38 \cdot 10^{-23} 1355 \cdot 5,83 \cdot 10^{-3} 10^{-3} \sqrt{\frac{27}{1355}} = 1,5 \cdot 10^{-26} \frac{\text{Дж} \cdot \text{кг}}{\text{м}^2 \text{с}}$$

$$\text{или } 9 \cdot 10^{-8} \text{ эВ} \cdot \text{кг}/(\text{м}^2 \text{с}).$$

### Заключение

Методом электронно-лучевого испарения на специальном вакуумном технологическом оборудовании были получены пленка ИТО в качестве прозрачного проводящего оксида толщиной 10 – 20 нм, джозефсоновский переход в виде Al-AlO<sub>x</sub>-Al с толщиной металлических слоев 100 нм и диэлектрического слоя толщиной 1,5 нм, а также пленки серебра толщиной 40 нм. Во всех случаях скорость осаждения варьировалась от 0,1 до 10 нм/с, а пленки соответствовали заданным требованиям по структуре, однородности состава, шероховатости и неравномерности толщины.

Полученные результаты позволяют утверждать, что с помощью электронно-лучевого испарения можно обеспечить величину энергомассопереноса порядка  $1 \cdot 10^{-7}$  эВ кг/(м<sup>2</sup>с), что соответствует условию формирования монокристаллических пленок [3]. При этом необходимо точно контролировать скорость осаждения пленкообразующих частиц или иметь возможность измерять температуру материала в тигле, чтобы обеспечить необходимое давление насыщенного пара.

### Литература

1. Панфилов Ю.В. Выбор метода нанесения наноструктурированных тонкопленочных покрытий по критерию «энергомассоперенос» / Наноинженерия, №12, 2015, С. 3 – 10.
2. Панфилов Ю.В. Новые разделы в классификации методов нанесения тонких пленок в вакууме / Справочник. Инженерный журнал, 2016, №5, С. 6 – 15
3. Монокристаллические пленки. Пер. с англ. С.Н. Горина, А.К. Милай, А.Ф. Орловой. Под ред. З.Г. Пинскера. Изд-во «Мир», М.: 1966. – 400 с.