

УДК 621.793.182, 658.589

## МОДЕРНИЗАЦИЯ УСТАНОВКИ ВУП-11М ДЛЯ ПРОЦЕССОВ РЕАКТИВНОГО МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

Дмитрий Александрович Коротченко<sup>(1)</sup>, Валерий Павлович Родин<sup>(1)</sup>, Денис Дмитриевич Васильев<sup>(2)</sup>

*Студент 3 курса<sup>(1)</sup>, аспирант 1 года<sup>(2)</sup>  
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»  
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: К.М. Моисеев,  
кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»*

*Ключевые слова: температура подложки (temperature wafer), модернизация (improvement), оксид кремния (oxide silicon), магнетронное распыление (magnetron sputtering).*

*Аннотация: В работе рассмотрены основные факторы при реактивном магнетронном распылении, влияющие на качество пленки. Разработана и реализована конструкция нагревателя, токоввода и ввода вращения. Представлены наработки по изменению последовательности операций при магнетронном распылении с нагревом подложек излучением. Проведен эксперимент по нанесению диоксида кремния реактивным магнетронным распылением кремния в среде кислорода.*

### **Введение**

Температура поверхности подложки является одним из важнейших факторов, определяющим не только скорость образования зародышей и роста пленки, но и структуру и свойства тонкопленочного покрытия. Структура пленки определяется характером зависимости максимального количества устойчивых зародышей от температуры поверхности подложки. Существует критическая температура  $T_0$ , выше которой имеет место неполная конденсация, когда коэффициент аккомодации меньше единицы, время жизни адатома меньше времени диффузии (перемещения) адатома по поверхности подложки, а максимальное количество устойчивых зародышей не зависит от потока осаждающихся атомов или молекул, т.е. созданы условия для роста кристаллической пленки. Если подложка относительно холодная, то максимальное количество устойчивых зародышей зависит от потока осаждающихся атомов и молекул, и практически каждый осевший атом или молекула остается на подложке, т.е. при полной конденсации, пленка получается аморфной, показано на рис.1. Следовательно, нагрев подложки и измерение её температуры является необходимым требованием к установкам вакуумного нанесения.



Рис. 1 Изменение структуры плёнки в зависимости от температуры [1]

При магнетронном нанесении плёнка осаждается не только на подложке, но и на всех внутрикамерных элементах и стенках вакуумной камеры. Лабораторное оборудование должно быть универсальным и совмещать в себе несколько источников для проведения исследований. Поэтому покрытие будет осаждаться на источниках. Установки магнетронного нанесения комплектуются с источниками ионов, и осаждаемое покрытие может замкнуть ускоряющие сетки источников ионов. Поэтому необходимо использовать заслонки, которые закрывают остальные источники во время работы одного источника. Передача вращения заслонкам осуществляется с помощью вводов вращения, которые могут являться источниками натекания атмосферы в камеру.

Лаборатория кафедры «Электронные технологии в машиностроении» оборудована установкой магнетронного нанесения ВУП-11М, в которой отсутствует возможность контроля температуры и нагрева подложек. Отсутствие вводов вращения с закреплёнными на них заслонками не позволяет наносить покрытия за один вакуумный цикл. Поэтому целью работы является реализация нагрева и контроля температуры подложки, заслонок и вводов вращения для источников.

### Реализация нагрева и контроля температуры подложки

Теплообмен возможен тремя способами: теплопередачей, конвекцией и излучением. Конвекция в вакууме невозможна из-за наличия разреженной среды. Для реализации нагрева методом теплопередачи необходимо встроить в конструкцию подвижного подложкодержателя нагревательный элемент и подвести к нему потенциал, что технологически сложнее, чем установка узла с галогеновыми лампами для нагрева излучением. Выбраны лампы, которые должны обеспечить требуемую температуру подложки до 300°C. Исходя из размеров ламп и вакуумной камеры, разработаны чертежи и 3D модель (рис.2), изготовлен корпус из нержавеющей стали и элементы нагревателя. Проведена сборка нагревателя, проверка работоспособности и произведён монтаж в камеру (рис. 3 а, б).

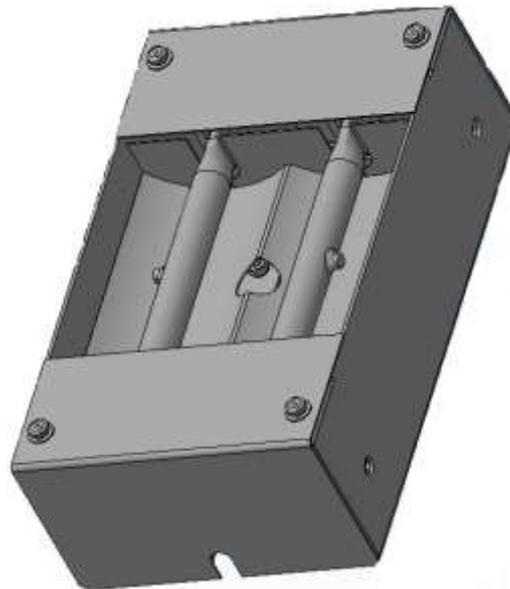
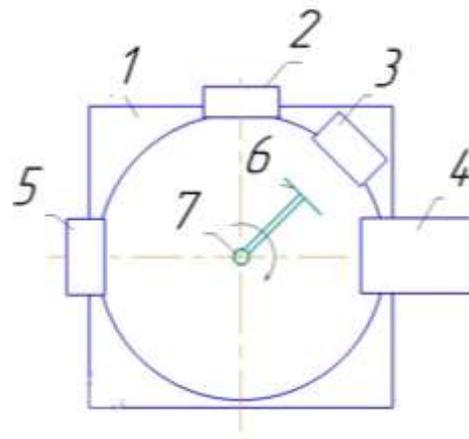


Рис. 2 3D модель нагревателя

Контроль температуры в вакуумной камере может осуществляться термопарными датчиками или датчиками сопротивления. Датчики сопротивления имеют значительно большую задержку по показанию температуры по времени, меньший диапазон измерения температуры и дороже, чем термопарные датчики. Измерение потенциала на датчике производится терморегулятором, который программно настраивается под выключение подачи потенциала при достижении заданной температуры. Подключение датчика давления в вакуумной камере с терморегулятором, установленном в блоке питания установки, производится посредством токоввода. Для уменьшения погрешности измерения до токоввода в камере и после до терморегулятора используются термокомпенсирующие провода. Для установки токоввода в камере изготовлено отверстие в одном из фланцев. Токоввод имеет 10 контактов, 2 из которых используются для подачи потенциала питания на узел нагрева, 4 – на термопары, оставшиеся 4 контакта можно будет использовать в будущем для реализации подачи потенциала смещения, зонда Ленгмюра или добавления термопар.



а)



б)

Рис. 3 Расположение нагревателя: а) в вакуумной камере б) схема, вид сверху:  
1 – вакуумная камера; 2 – источник ионов; 3 – нагреватель; 4 – дуговой испаритель;  
5 – магнетрон; 6 – подложкодержатель; 7 – ввод вращения

### Реализация заслонок и вводов вращения

Механизмы передачи движения в вакууме делятся на три группы: для передачи движения качения, возвратно-поступательного движения и вращения. Конструкции с возвратно-поступательным движением и движением качения технологически сложнее, чем механизмов с вращением. Исходя из размеров и компоновки установки, разработаны чертежи заслонок и вводов вращения, изготовлены элементы конструкции и произведена сборка (рис. 4).

Для установки системы передачи движения необходимо модернизировать вакуумную камеру. Поэтому, исходя из расположения элементов вакуумной камеры, разработаны чертежи, в верхнем фланце изготовлены отверстия для крепления вводов вращения заслонок нагревателя, магнетрона и дугового испарителя, а в заднем фланце для источника ионов. Для уменьшения натекания атмосферы отверстия выполнены с низкой шероховатостью, используются уплотнительные кольца, прижимаемые втулкой.

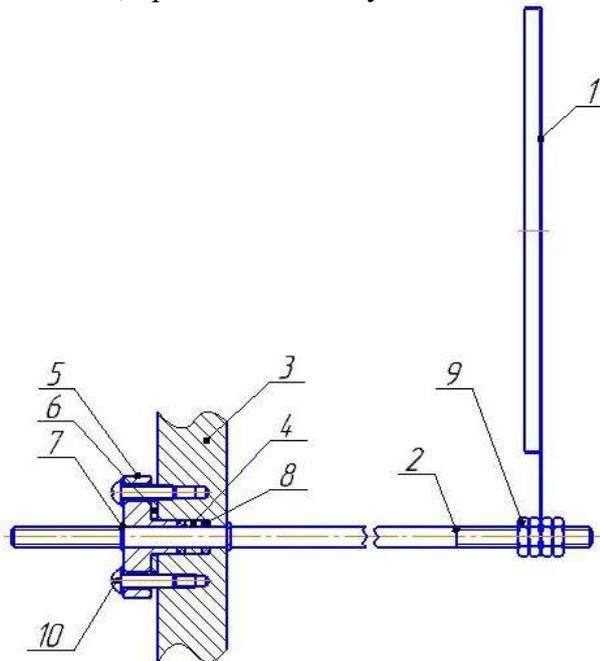


Рис. 4 Ввод вращения: 1 – заслонка; 2 – ось; 3 – фланец; 4 – цилиндр; 5 – втулка; 6 – шайба; 7 – прижимная шайба; 8 – уплотнительное кольцо; 9 – гайка; 10 – винт.

### Эксперименты с нагревателем

По завершению монтажа нагревателя необходимо проверить его работоспособность в камере и снять временные характеристики температуры при нагреве (рис. 5). Решено это сделать двумя способами. В первом способе термопара прикрепляется к заслонке нагревателя. Камера откачана до давления 5 Па. На терморегуляторе выставлена предельная температура 300°C.

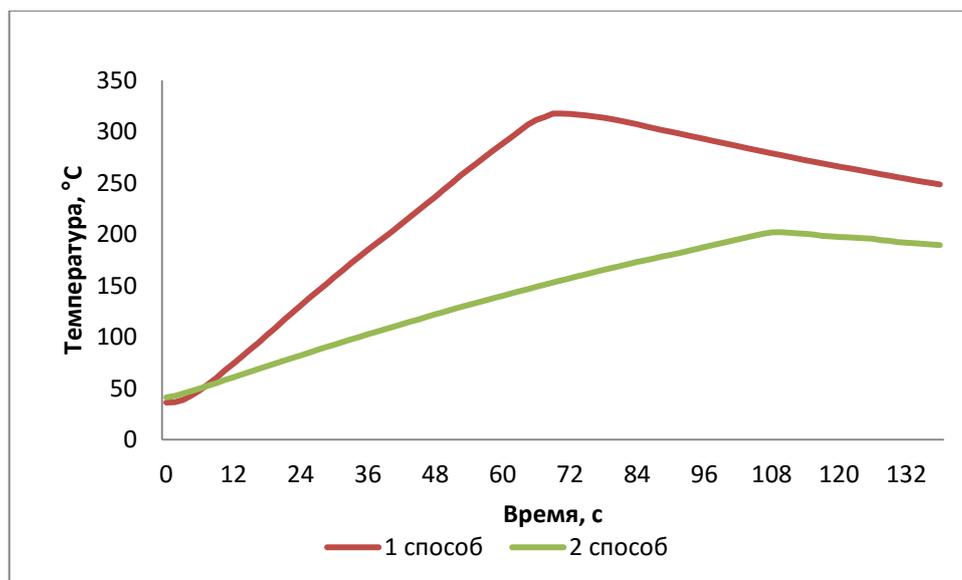


Рис. 5 Временная характеристика температуры при нагреве

Во втором способе термопара прикрепляется к подложке. Для этого потребовалось усовершенствовать подложкодержатель. Для более точных показаний нужно, чтобы теплоотдача была минимальной, и в то же время, теплопроводность как можно выше. Поэтому пришлось применить схему (рис. 6), где термопара ставится между металлической пластиной, у которой высокая теплопроводность, а также для равномерного распределения температуры по пластине, и пластиной фторопласта, у которой низкое значение теплоотдачи, для уменьшения отвода тепла. Камера откачана до давления 5 Па. На терморегуляторе выставлена предельная температура 200°C.

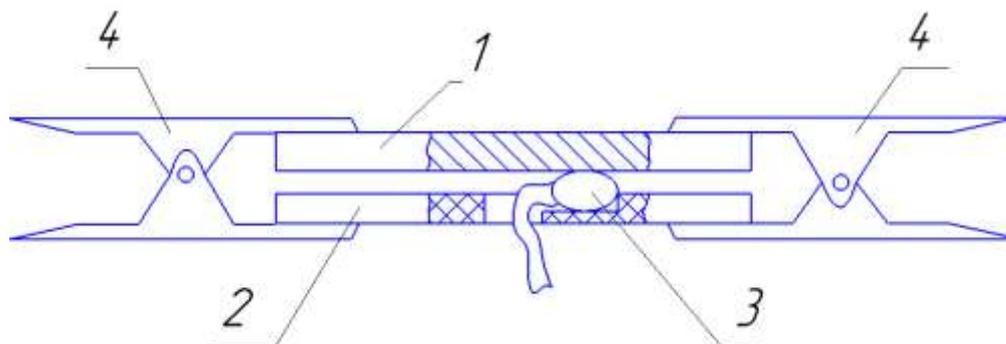


Рис. 6 Схема установки термопары при втором способе измерения: 1 – металлическая пластина; 2 – пластина из фторопласта; 3 – термопара; 4 – зажимы.

### Эксперименты по формированию оксида кремния

После проверки работы нагревателя в условиях вакуума и получения временных характеристик температуры при нагреве принято решение провести магнетронное нанесение оксида кремния реактивным способом с нагревом подложки из ситала до 200 °C. Особенностью такого нанесения является алгоритм последовательности действий: откачка до требуемого давления; напуск рабочего газа — аргона, «тренировка» мишени, то есть подложкодержатель отвёрнут от работающего магнетрона для очистки мишени от загрязнений; выключение магнетрона; нагрев подложки до требуемой температуры; напуск реактивного газа — кислорода; «тренировка» мишени в среде реактивного и рабочего газа; поворот подложкодержателя к магнетрону. Параметры эксперимента указаны в табл. 1. Выполнив заданный алгоритм, плёнка оксида кремния нанесена успешно на ситаловую подложку.

Таблица 1. Параметры эксперимента по нанесению оксида кремния.

Параметр	Значение
Предельное давление, Па	$5 \cdot 10^{-3}$
Рабочее давление, Па	$2,2 \cdot 10^{-1}$
Поток аргона, В	1,92
Поток кислорода, В	0,33
Мощность, Вт	200
Температура подложки, °С	200
Расстояние до мишени, мм	120
Время нанесения, мин	10

### Заключение

В ходе работы рассмотрен один из важнейших факторов – температура подложки при магнетронном нанесении и его влияние на структуру плёнки. Из литературного обзора выявлен оптимальный вид теплообмена в вакууме – излучением. Рассмотрено оборудование универсальной установки вакуумного нанесения ВУП-11М в целях проведения модернизации для возможности нанесения в одном вакуумном цикле. Спроектированы, изготовлены и монтированы на установку: нагреватель, заслонки для источников нанесения и нагревателя, вводы вращения. Проведены эксперименты по снятию временных характеристик температуры нагрева подложки, и по нанесению оксида кремния. В дальнейшем данная модернизация позволит наносить плёнки с большими качественными показателями в одном вакуумном цикле. Планируются эксперименты по исследованию по влиянию температуры на структуру плёнки.

### Литература

1. *Панфилов Ю.В.* Конспект лекций «Электронные, ионные и плазменные технологии». – МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 34с.