

## Реализация удаленного доступа к вакуумному технологическому оборудованию

*Ю.В. Панфилов, В.Т. Рябов, Л.Л. Колесник, С.В. Сидорова*  
*МГТУ им Н. Э. Баумана, Москва, 2-ая Бауманская, д.5*  
*e-mail: panfilov@bmstu.ru*

*Рассмотрена вакуумная установка для нанесения тонких пленок в вакууме модульного типа с системой автоматического управления, встроенной в систему удаленного доступа. Разработаны методическое обеспечение для подготовки к выполнению лабораторных работ и виртуальный симулятор для овладения умением работы на установке.*

*Implementation of remote access to the vacuum equipment. Yu.V. Panfilov, V.T. Ryabov, L.L. Kolesnik, S.V. Sidorova. The vacuum installation for deposition of thin films with vacuum modular automatic control device built in the remote access system is viewed. The methodological support for the preparation of laboratory works and virtual simulator for mastering the ability to work with the installation are developed.*

### Введение

В рамках Государственного контракта «Создание функционирующего в режиме удаленного доступа интерактивного учебно-научного комплекса для выполнения работ по формированию наноструктурированных тонкопленочных покрытий с использованием современного высоковакуумного оборудования модульного типа и его виртуального симулятора» №16.647.12.2018 были разработаны вакуумная установка для нанесения тонких пленок модульного типа с системой автоматического управления, методическое обеспечение для подготовки к выполнению лабораторных работ, система удаленного доступа к установке и виртуальный симулятор, выполняющий роль тренажера для овладения умением работы на установке [1].

Однако, широкого распространения в учебном процессе других вузов разработанный интерактивный учебно-научный комплекс не получил и тому несколько причин:

- отсутствие отраслевого регламента его использования;
- необходимость в дополнительном финансировании работ по совершенствованию комплекса и внедрению его в образовательный процесс;
- ограниченность вариантов лабораторных работ из-за использования пока только одного метода нанесения тонких пленок – резистивного термического испарения.

### Вакуумная установка модульного типа для нанесения тонких пленок

Входящая в состав комплекса вакуумная установка УВН-1М (рис. 1, а) оснащена безмасляной системой откачки [2], вакуумной камерой объемом 2 л, быстроръемными фланцами, на одном из которых размещается резистивный испаритель, а на другом – подложкодержатель с диэлектрической подложкой (рис. 1, б).

Конструкция технологических модулей подразумевает быструю их замену с одного метода на другой. Предусмотрены такие методы формирования тонких пленок, как термовакuumное испарение, магнетронное распыление, дуговой разряд и плазмо-химическое осаждение.

Перечисленные методы позволяют формировать покрытия из различных материалов, таких как титан, олово, медь, углерод, алюминий, а также нитриды металлов. В зависимости от режимов и типа метода можно получать тонкие пленки различных свойств и структуры. А также с разными физическими характеристиками.

Для реализации любого перечисленного метода нанесения подложка закрепляется на подложкодержателе через проводящие пластины. На подложке предварительно сформированы контактные площадки, к которым через герметичный токоввод подключается пикоамперметр, LCR-станция или другой прибор, измеряющий одну из характеристик тонкой пленки [3]. Система автоматического управления установки подключена к локальной сети с возможностью выхода в Интернет.



а)

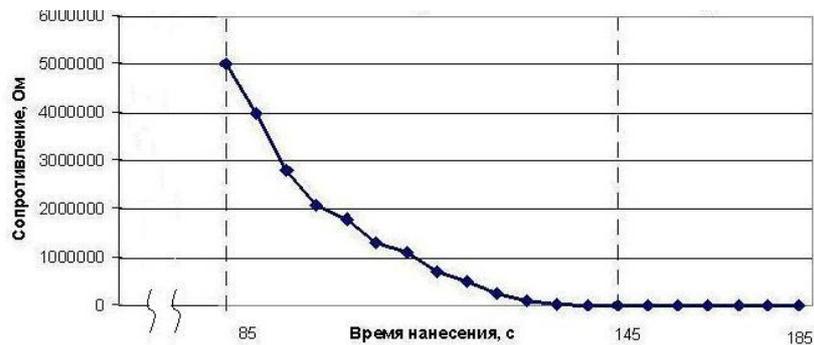


б)

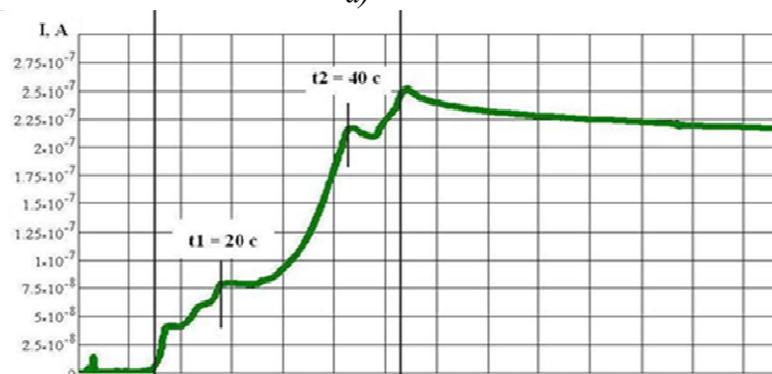
Рис. 1. Внешний вид установки УВН-1М (а) и верхнего фланца (б) с подложкодержателем и установленной на нем подложкой.

Такое решение реализации верхнего фланца позволяет проводить измерение ключевых характеристик наносимых пленок непосредственно во время их формирования.

В качестве примера приведены графики изменения тока (рис. 2, б), протекающего между контактными площадками в зависимости от времени формирования сначала островковой, а затем сплошной пленки [4, 5], а также сопротивления (рис. 2, а) [5, 6].



а)



б)

Рис. 2. График изменения сопротивления (а) и тока (б) между контактными площадками в зависимости от стадии формирования пленки.

Нелинейный характер нарастания тока на втором участке графика (рис. 2, б) свидетельствует об островковом росте тонкой пленки с коалесценцией островков и изменением расстояния между ними. По этому участку можно изучать начальные стадии роста тонких

пленок в зависимости от осаждаемого материала, скорости осаждения и энергии пленкообразующих частиц, которая зависит от метода нанесения тонкой пленки.

Методика проведения лабораторной работы включает в себя изучение теоретических основ технологии тонких пленок и овладение умением управлять установкой с помощью встроенного в систему симулятора. Сдав тест и получив допуск к лабораторной работе, студенты, находясь в компьютерном классе, приступают к выполнению лабораторной работы в режиме удаленного доступа.

### Система удаленного доступа к вакуумному технологическому оборудованию

Для обеспечения удаленного доступа к оборудованию была разработана специальная программа – сервер удаленного доступа [7].

Общая схема организации удаленного доступа к оборудованию представлена на рис. 3.



Рис. 3. Общая схема организации удаленного доступа к оборудованию.

Система автоматического управления вакуумной установкой подключается через драйвер сопряжения к системе удаленного доступа. Драйвер сопряжения является промежуточным звеном между оборудованием и сервером удаленного доступа. Он имеет четкую спецификацию описания форматов контролируемых и управляющих сигналов, через которые взаимодействует с системой. Реализация взаимодействия с реальной системой автоматического управления скрыта внутри драйвера. Такое решение позволяет подключать фактически любое технологическое оборудование, оснащенное системой управления, написав к ней драйвер, соответствующий спецификации системы удаленного доступа, без изменения функционала программной части комплекса.

В качестве реальной установки может выступать и виртуальный симулятор оборудования, который также подключается через аналогичный драйвер. Виртуальный симулятор позволяет полностью имитировать работу, создавая у пользователя ощущение, будто он работает с реальным оборудованием. Этот вариант не требует присутствия оператора, позволяет одновременно проводить несколько виртуальных экспериментов и может использоваться для учебных целей.

При работе с оборудованием как в режиме удаленного доступа в реальном масштабе времени, так и в режиме виртуального симулятора реализуются общие методики и алгоритмы за исключением операций, требующих ручных действий на стороне оборудования, например, установки подложки. Для таких операций симулятор просто дает сигнал о готовности оборудования к работе.

К серверу удаленного доступа можно подключить требуемое количество виртуальных симуляторов или установок. Их количество определяется мощностью вычислительных средств и канала передачи данных. Сервер удаленного доступа с одной стороны взаимодействует с оборудованием через драйверы сопряжения, а с другой стороны принимает подключения клиентов из внешней сети.

При реализации данного проекта принята концепция двухуровневого подхода к созданию системы коллективного доступа к ресурсам лаборатории. Первый уровень доступа – доступ к оборудованию виртуальной лаборатории через локальную сеть университета, второй – через сеть Интернет.

Учебно-научный комплекс может работать в трех режимах: в режиме директивного управления, удаленного доступа в реальном масштабе времени и в режиме виртуального симулятора. При работе в режиме директивного управления пользователь находится непосредственно перед установкой, самостоятельно производя все действия. В этом случае алгоритм и методика взаимодействия конечного пользователя с учебно-научным комплексом ничем не отличается от работы с любым другим технологическим оборудованием.

В режиме удаленного доступа в реальном масштабе времени пользователь управляет установкой через локальную вычислительную сеть или Интернет. В этом случае около установки требуется присутствие оператора для выполнения «ручных» операций. Также в случае возникновения внештатных ситуаций или потери связи с пользователем оператор может перевести установку в директивный режим управления.

Если в режиме директивного управления пользователь (при необходимости) имеет возможность провести технологический процесс, используя элементы управления, расположенные непосредственно на блоках питания, то в режиме удаленного управления все действия происходят только через персональный компьютер с установленным программным обеспечением. Любая команда, полученная удаленно, обрабатывается в системе управления, проверяется на предмет корректности действия и передается в соответствующую подсистему установки.

В режиме виртуального симулятора пользователь работает с имитатором установки. Наличие оператора не требуется. Возможно подключение для проведения виртуального эксперимента нескольких пользователей. Прием подключений при работе в режиме удаленного доступа осуществляется без использования веб-сервера, с подключением напрямую к серверу удаленного доступа. Для подключения необходимо использовать специальную программу – тонкий клиент.

Такой вариант подключения позволяет уменьшить время отклика сервера и обеспечивает процесс управления оборудованием наиболее приближенный к реальному режиму управления.

Программный продукт, с которым взаимодействует пользователь, реализует концепцию тонкого клиента. Для работы с комплексом достаточно иметь лишь специальную клиентскую программу.

### **Заключение**

Разработанная методика подходит практически к любым методам нанесения тонких пленок в вакууме, таких как: электронно-лучевое испарение, магнетронное распыление, молекулярно-лучевая эпитаксия, атомно-слоевое осаждение и др. Она может быть реализована на любой лабораторной вакуумной установке для нанесения тонких пленок, имеющей систему автоматического управления.

Так, например, в ОАО НИИТМ (г. Зеленоград) разработана серия малогабаритных вакуумных установок, которые по заверению производителя предназначены, в том числе, для обучения методам нанесения пленок в вакууме (рис. 4) [8].

Для серии малогабаритных вакуумных установок компании ОАО НИИТМ магнетронного (рис. 4, а), термического (рис. 4, б) и плазмо-химического (рис. 4, в) нанесения так же характерна одинаковая вакуумная платформа. Модельный ряд малогабаритных вакуумных установок предполагает возможность смены рабочего модуля с одного типа на другой [6].



Рис. 4. Малогабаритные вакуумные установки ОАО НИИТМ:  
а – MBU TM Магна Т; б – MBU TIS; в – MBU TM ИЗОФА3 CVD.

Однако, эти установки не снабжены методическим обеспечением для проведения практических занятий со студентами, что затрудняет внедрение их в учебный процесс. Кроме того, предлагаемая методика может быть полезна и для исследователей с целью отработки технологии и подбора технологических режимов. Оснащение установок системой удаленного доступа с виртуальным симулятором и поставка совместно с учебно-методическими материалами может существенно расширить круг потенциальных потребителей такого оборудования.

#### Литература

1. Панфилов Ю. В., Колесник Л. Л., Рябов В. Т., Моисеев К. М., Сидорова С. В. Интерактивный учебно-научный модульный комплекс для выполнения работ по формированию наноструктурированных тонкопленочных покрытий с использованием современного высоковакуумного оборудования и его виртуального симулятора / Интерактивные учебно-научные комплексы для выполнения работ в режиме удаленного доступа: Учебно-методическое издание (сборник–каталог) / Под общ. ред. В. В. Лучинина и А. Г. Савченко; СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб., 2012. 300 с.
2. Капустин Е. Н., Бурмистров А. В., Саликеев С. И. Этапы разработки типоразмерного ряда безмасляных спиральных вакуумных насосов // Вакуумная техника и технология. 2015. Т. 25. № 2. С. 176–180.
3. Панфилов Ю. В., Рябов В. Т., Сидорова С. В. Нанотехнологическая вакуумная установка модульного типа // Наноинженерия. № 8. 2014. С. 14–18.
4. Панфилов Ю. В., Сидорова С. В. Контроль роста островковых наноструктур в вакууме // Наноинженерия. № 9. 2012. С. 8–11.
5. Сидорова С. В., Панфилов Ю. В. Формирование островковых пленок на установке модульного типа // Матер. IV МНТК Вакуумная техника, материалы и технология. М. 2009. С. 21–24.
6. Сидорова С. В. Расчет технологических режимов и выбор параметров оборудования для формирования островковых тонких пленок в вакууме [Текст]: дис. .... канд. техн. наук: 05.27.06: защищена 27.10.2016 / Сидорова Светлана Владимировна. М. 2016. 191 с.
7. Колесник Л. Л. Реализация удаленного доступа к технологическому оборудованию на примере создания научно-учебного комплекса для изучения процессов формирования тонкопленочных покрытий // Наноинженерия. 2013. № 12. С. 31–37.
8. Одинокоев В. В., Панфилов Ю. В. Выбор типа вакуумного нанотехнологического оборудования по критерию заданной производительности // Наноинженерия. № 11. 2013. С. 7–18.