ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС С УДАЛЕННЫМ ДОСТУПОМ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК В ВАКУУМЕ

LABORATORY EQUIPMENT WITH REMOTE ACCESS FOR THIN FILM DEPOSITION IN VACUUM

УДК 621.793, ВАК 05.16.08, DOI: 10.22184/1993-8578.2017.77.6.76.82

Л.Колесник*, К.Моисеев*, Ю.Панфилов*, В.Рябов*, С.Сидорова* / panfilov@bmstu.ru
L.Kolesnik*, K.Moiseev*, Yu.Panfilov*, V.Ryabov*, S.Sidorova*

Рассмотрены вакуумные установки для нанесения тонких пленок с автоматическим управлением, встроенным в систему удаленного доступа. На установках реализованы методы термического, магнетронного, ионно-лучевого и газофазного осаждения наноструктурированных тонкопленочных покрытий. Разработаны методическое обеспечение для подготовки к выполнению лабораторных работ и виртуальный симулятор для обучения практической работе на установке. Данная статья продолжает цикл статей, опубликованных в журнале "НАНОИНДУСТРИЯ" за 2016 год (№ 3 и 5).

Thin film vacuum deposition systems with automatic control that is built-in into the system of remote access are considered. Methods for thermal, magnetron, ion beam and chemical vapor deposition of nanostructured thin films are used in equipment. The methodical support for the preparation of laboratory works and the virtual simulator for the training on the equipment are developed. This paper continues a series of publications in the NANOINDUSTRY journal No. 3 and 5, 2016.

Качественное обучение студентов технических специальностей, включая нанотехнологии, невозможно без лабораторного практикума, выполняемого на современном оборудовании. Проблема заключается в ограниченности доступа студентов к сложному и, как правило, дорогостоящему технологическому или аналитическому оборудованию. Поэтому, в большинстве случаев, лабораторный практикум включает изучение технической документации на оборудование и методики выполнения лабораторной работы, а практическая часть сводится к наблюдению за работой учебного мастера и записи показаний приборов. Практического навыка работы на оборудовании при такой постановке лабораторного занятия студенты не получают.

В МГТУ им. Н.Э.Баумана на кафедре "Электронные технологии в машиностроении" разработан лабораторный комплекс для

нанесения тонких пленок в вакууме с функцией удаленного доступа, предназначенный для получения каждым студентом практических навыков работы на вакуумном технологическом оборудовании. В рамках двух государственных контрактов созданы вакуумные установки для нанесения тонких пленок с системой автоматического управления, методическое обеспечение для изучения теоретических основ технологии тонких пленок и подготовки к выполнению лабораторных работ, система удаленного доступа к установке и виртуальный симулятор, выполняющий роль тренажера для овладения умением работы на оборудовании [1].

Возможность удаленного доступа позволяет студентам изучать теорию, знакомиться с устройством и принципом действия оборудования, осваивать методику выполнения лабораторной работы в компьютерном классе, дома,

* МГТУ им. Н.Э. Баумана / Bauman MSTU.

в транспорте и т.п., что экономит время и студента, и преподавателя.

МАЛОГАБАРИТНОЕ ВАКУУМНОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Входящая в состав комплекса вакуумная установка УВН-1М (рис.1а) оснащена безмасляной системой откачки [2], вакуумной камерой объемом 2 л, быстросъемными фланцами, на одном из которых размещается источник нанесения пленки (резистивный испаритель или магнетронное распылительное устройство), а на другом – подложкодержатель с диэлектрической подложкой, на которой сформированы контактные площадки [3, 4]. К контактным площадкам через герметичный токоввод подключается пикоамперметр, LCR-станция или другой прибор, измеряющий характеристики тонкой пленки [4].

Вторая вакуумная установка МВТУ-11-1 [4] (рис.1б) укомплектована безмасляной системой откачки и технологическими источниками, реализующими корпускулярно-лучевые методы генерации потоков пленкообразующих частиц: электронно-лучевым испарителем и автономным источником ионов. В дальнейшем планируется оснастить установку импульсной системой лазерной абляции.

Рис.1. Внешний вид установок УВН-1М (слева) и МВТУ-11-1 (справа)

Fig.1. Appearance of UBN-1M (left) and MBTU-11-1 (right)

Для обеих установок разработана система автоматического управления, подключаемая к локальной сети и имеющая возможность выхода в интернет.

Конфигурация установок позволяет проводить измерение ключевых характеристик наносимых пленок непосредственно во время их

Qualitative training of students of technical specialties, including nanoengineering, is impossible without laboratory practical work using modern equipment. The problem lies in the limited access of students to complex and, as a rule, expensive process or analytical equipment. Therefore, in most cases, the laboratory practice includes the study of technical documentation for equipment and methods of performing laboratory work, and the practical part is reduced to observation the work of the teacher and recording instrument readings. At such organization of lab work students do not receive practical skill of work on the equipment.

A laboratory complex for vacuum deposition of thin films with a remote access function, designed to give each student practical skills of working on vacuum process equipment, is developed in the BMSTU at the department of Electronic Technologies in Mechanical Engineering. Within the framework of two state contracts, the following solutions have been created: vacuum systems for the thin films deposition with an automatic control system; methodical support for studying the theoretical foundations of thin film technology and preparation for laboratory work; remote access system; virtual simulator that acts as a tool for training work on equipment [1].

The possibility of remote access allows students to study the theory, get acquainted with the device and the principle of its operation, master the methodology of performing laboratory work in a computer class, at home, in transport, etc., which saves time for both the student and the teacher.

COMPACT VACUUM PROCESS EQUIPMENT

The UBN-1M vacuum unit, a part of the complex (Fig.1a), is equipped with an oil-free pumping system [2], a vacuum chamber with a volume of 2 liters, quick-detachable flanges, one of which is base for a film deposition source (resistive evaporator or magnetron), and another – for a substrate holder

Рис.2. График изменения тока, протекающего между контактными площадками, в зависимости от стадии формирования пленки

Fig.2. Current flowing between contact pads depending on stage of formation of film

формирования. В качестве примера на рис.2 приведен график изменения тока, протекающего между контактными площадками в зависимости от времени формирования сначала островковой, а затем сплошной пленки [4]. Нелинейный характер нарастания тока на втором участке графика

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

with a dielectric substrate on which contact pads are formed [3, 4]. A picoammeter, a LCR station or another device measuring the characteristics of a thin film is connected to the contact pads via a sealed current lead [4].

The second vacuum unit, MBTY-11-1 [4] (Fig.1b), is equipped with an oil-free pumping system and technological sources that implement particle-beam methods for generating fluxes of film-forming particles: an electron-beam evaporator and an autonomous ion source. In the future it is planned to equip the unit with a pulse laser ablation system.

For both units, an automatic control system has been developed, connected to the local network and having the ability to access the Internet.

The configuration of the units allows to measure the key characteristics of the films directly during their deposition. As an example, Fig.2 shows a graph of the change in the current flowing between contact pads as a function of the formation time first of an islet film and then of a continuous film [4]. The nonlinear nature of current growth in the second section of the graph indicates an island growth of

a thin film with coalescence of islands and change in the distance between them. This section allow to study the initial stages of growth of thin films depending on the deposited material, the deposition rate and the energy of the film-forming particles, which depends on the thin film deposition method.

The laboratory session includes the study of the theoretical foundations of thin film technology and of the methods of performing laboratory work with which the student can get acquainted by connecting to the Internet through an intuitive interface (Fig.3).

Рис.3. Интерфейс методического обеспечения подготовки к лабораторным работам

Fig.3. Interface of methodical software for preparation for laboratory works

частиц, которая зависит от метода нанесения тонкой пленки.

Лабораторное занятие включает в себя изучение теоретических основ технологии тонких пленок и методики выполнения лабораторной работы, с которыми студент может знакомиться, подключившись к сети интернет через интуитивный интерфейс (рис.3).

Обучение управлению установкой осуществляется с помощью виртуального симулятора, встроенного в систему удаленного доступа. Сдав тест и получив допуск к практикуму, студенты, находясь в компьютерном классе, приступают к выполнению лабораторной работы в режиме удаленного доступа.

Рис.4. Интерфейс виртуального симулятора

Fig.4. Interface of virtual simulator

СИСТЕМА УДАЛЕННОГО ДОСТУПА И ВИРТУАЛЬНЫЙ СИМУЛЯТОР

Для обеспечения удаленного доступа к оборудованию была разработана специальная программа – сервер удаленного доступа [5]. Система автоматического управления вакуумной установкой подключается к системе удаленного доступа через драйвер сопряжения, который является промежуточным звеном между оборудованием и сервером удаленного доступа. Реализация взаимодействия с реальной системой автоматического управления скрыта

Training in equipment management is carried out using a virtual simulator built into the remote access system. Having passed the test and got the admission to the practical work, students, being in the computer class, begin to perform laboratory work in the remote access mode.

REMOTE ACCESS SYSTEM AND VIRTUAL SIMULATOR

To provide remote access to the equipment, a special software was developed – the remote access server [5]. The automatic control system of the vacuum unit is connected to the remote access system

via the pairing driver, which is an intermediate link between the equipment and the remote access server. The implementation of interaction with a real automatic control system is hidden inside the driver. Using a driver that conforms to the specification of a remote access system, it is possible to connect virtually any process equipment with a control system without changing the functionality of the software of the system.

The virtual simulator (Fig.4) allows to simulate the work, creating a feeling that the user controls the real equipment. This solution does not require the presence

of an operator, allows to simultaneously conduct several virtual experiments and can be used for educational purposes and for scientific research. When working with equipment both in real-time remote access mode and in virtual simulator mode, common methods and algorithms are implemented except for operations requiring manual actions on the equipment side, for example, the loading of a substrate.

In the real-time remote access mode, the user controls the unit through a local computer network or the Internet, that is, works with the simulator.

Рис.5. Установка для нанесения тонких пленок в вакууме, собранная из унифицированных комплектующих: а – технологические модули; б – элементы вакуумной системы; с – вакуумная камера; д – измерительные средства; е – система автоматического управления

Fig.5. Apparatus for vacuum thin film deposition assembled using standardized units: a – process modules; b – elements of vacuum system; c – vacuum chamber; d – measuring tools; e – automatic control system

LABORATORY UNIT FROM STANDARDIZED COMPONENTS

Having a sufficiently large choice of standardized components of vacuum equipment – small vacuum chambers, vacuum pumps, vacuum gauges, vacuum fittings, as well as thermal evaporation and ion sputtering sources – it is possible to assemble an inexpensive laboratory unit (Fig.5), to equip it with an automatic control system and to operate in the remote access mode. At the same time, it is possible to conduct laboratory work on courses of technological and research training cycles, as well

as on the design and operation of vacuum process equipment, where students will acquire the skills of assembly from unified units, setting-up, starting the system and outputting it to specified operating modes.

CONCLUSION

The developed approach to conducting laboratory works can be applied to practically all methods of vacuum thin film deposition, including molecular beam epitaxy, atomic layer deposition and other methods. It can be implemented on any laboratory vacuum system for

the deposition of thin films, which has an automatic control system, as well as on industrial equipment, for example, manufactured by the Research Institute of Precision Machine Manufacturing (Zelenograd) [6]. The series of small vacuum systems developed by the NIITM is quite suitable for implementing a remote access system and conducting training sessions and scientific research if they are equipped with methodological support and a virtual simulator, which can significantly expand the range of potential users of such equipment. ■

внутри драйвера. С помощью драйвера, соответствующего спецификации системы удаленного доступа, можно подключать фактически любое технологическое оборудование, оснащенное системой управления, без изменения функционала программной части комплекса.

Виртуальный симулятор (рис.4) позволяет имитировать работу, создавая у пользователя ощущение, что он управляет реальным оборудованием. Это решение не требует присутствия оператора, позволяет одновременно проводить несколько виртуальных экспериментов и может использоваться как в учебных целях, так и для проведения научных исследований. 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.

В режиме удаленного доступа в реальном масштабе времени пользователь управляет установкой через локальную вычислительную сеть или Интернет, то есть работает с имитатором установки.

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ИЗ УНИФИЦИРОВАННЫХ КОМПЛЕКТУЮЩИХ

Располагая достаточно большим выбором унифицированных комплектующих элементов вакуумного оборудования – малогабаритных вакуумных камер, вакуумных насосов, вакуумметров, вакуумной арматуры, а также источников термического испарения и ионного распыления материалов – можно изготовить недорогую лабораторную установку (рис.5), оснастить ее системой автоматического управления и эксплуатировать в режиме удаленного доступа. При этом можно проводить лабораторные работы по курсам технологического и исследовательского учебных циклов, а также по конструированию и эксплуатации вакуумного технологического оборудования, на которых студенты получают навыки сборки из унифицированных узлов, наладки, запуска установки и вывода ее на заданные режимы работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный подход к проведению лабораторных работ может быть применен практически к любым методам нанесения тонких пленок в вакууме, включая молекулярно-лучевую

эпитаксию, атомно-слоевое осаждение и другие методы. Он может быть реализован на любой лабораторной вакуумной установке для нанесения тонких пленок, имеющей систему автоматического управления, а также на промышленном оборудовании, например, производства ОАО "НИИ точного машиностроения" (Зеленоград) [6]. Разработанная в НИИТМ серия малогабаритных вакуумных установок вполне подходит для реализации системы удаленного доступа и проведения учебных занятий и научных исследований при условии оснащения их методическим обеспечением и виртуальным симулятором, что может существенно расширить круг потенциальных пользователей 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. – СПб: СПб-ГЭТУ "ЛЭТИ", 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. 2014. № 8. С. 14–18.
4. **Панфилов Ю.В., Сидорова С.В.** Контроль роста островковых наноструктур в вакууме // Наноинженерия. 2012. № 9. С. 8–11.
5. **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.
6. **Одинокоев В.В., Панфилов Ю.В.** Выбор типа вакуумного нанотехнологического оборудования по критерию заданной производительности // Наноинженерия. 2013. № 11. С. 7–18.