

# **ВАКУУМНАЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ УСТАНОВКА**

А.В. Хошев, Е.В. Аверьянов, В.В. Одинокоев, Д.А. Костюков, А.А. Овцын.

## **АННОТАЦИЯ**

Разработана новая вакуумная установка (ЭЛУ ТМ 1Ш) с многотигельным электронно-лучевым испарителем (ЭЛИ) и шлюзовой загрузкой групповых подложкодержателей под пластины 100-150 мм. Установка предназначена в основном для нанесения однослойных или многослойных пленок в технологии взрывной фотолитографии.

## **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА**

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЕ ИСПАРЕНИЕ, ВАКУУМ, ТОНКИЕ ПЛЕНКИ, ВЗРЫВНАЯ ФОТОЛИТОГРАФИЯ, ОБОРУДОВАНИЕ

## **VACUUM UNIT WITH ELECTRON-BEAM EVAPORATOR**

A.V. Khoshev, E.V. Averyanov, V.V. Odinkov, D.A. Kostyukov, A.A. Ovtsyn

## **ABSTRACT**

A new vacuum apparatus (ЭЛУ ТМ 1Ш) with multi-crucible electron beam evaporation (EBE) and gateway loading of group substrate holders for 100-150 mm wafers has been developed. The unit is designed mainly for deposition of single-layer or multilayer films in lift-off lithography processes.

## **KEYWORDS**

ELECTRON BEAM EVAPORATION, VACUUM, THIN FILMS, LIFT-OFF, EQUIPMENT

## **ВВЕДЕНИЕ**

Тонкие плёнки широко применяются в качестве функциональных, упрочняющих, светоотражающих, проводящих и диэлектрических материалов при формировании контактов, изготовлении печатных плат, элементов интегральных схем в нано- и микроэлектронике, создании светофильтров, элементной базы оптоэлектроники, в современных литографических процессах [1]. Актуальным является улучшение технических характеристик, повышение точности и надёжности информационно-измерительных приборов и систем специального назначения. От совершенства технологических процессов нанесения тонких пленок в значительной степени зависит надёжность, качество, технический уровень и экономические показатели производства изделий нано- и микроэлектроники.

Задача получения высококачественных и воспроизводимых по электрофизическим параметрам тонкоплёночных слоев требует применения современного высокотехнологичного оборудования.

Разработана новая вакуумная установка с многотигельным электронно-лучевым испарителем и шлюзовой загрузкой подложкодержателей под пластины 100-150 мм. Установка предназначена в основном для нанесения однослойных или многослойных пленок в технологии взрывной фотолитографии.

## ОПИСАНИЕ УЗЛОВ УСТАНОВКИ

Вакуумная установка с ЭЛИ состоит из трех вакуумных камер: рабочая технологическая камера с высоковакуумной откачной системой (ВОС), шлюзовой камерой с ВОС и камерой с ЭЛИ снабженной также ВОС (рис. 1).

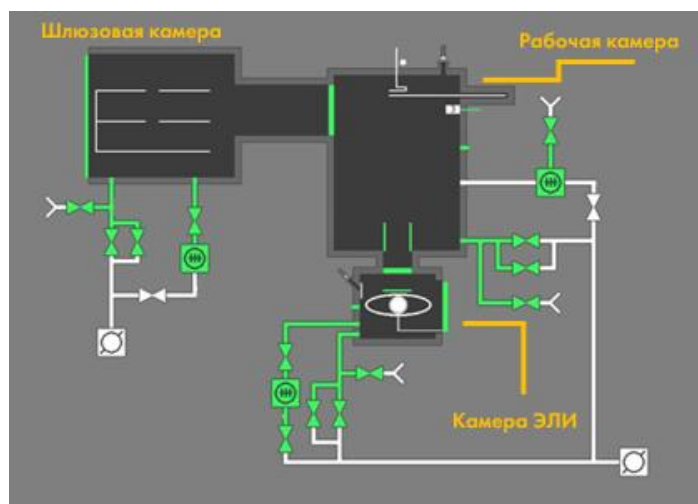


Рис. 1. Мнемосхема вакуумной установки с электронно-лучевым испарителем.

В состав вакуумной установки ЭЛУ ТМ 1Ш входят следующие основные узлы:

- прогреваемая шлюзовая камера загрузки/выгрузки подложкодержателей с вакуумным затвором;
- технологическая камера с системой защиты от запыления, приводом вращения карусели; измерителем толщины, лампами ИК нагрева; пирометром для контроля температуры;
- камера испарителя с высоковакуумным затвором и электронно-лучевой пушкой с 6-позиционным поворотным тиглем, с системой зеркал для наблюдения;
- три турбомолекулярных высоковакуумных насоса в шлюзовой камере в технологической и в камере испарителя;
- два безмасляных форвакуумных насоса рабочей камеры и камеры с ЭЛИ;
- элементы гидравлической и пневматической систем охлаждения.

Основные узлы вакуумной установки ЭЛУ ТМ 1Ш представлены на рисунке 2.

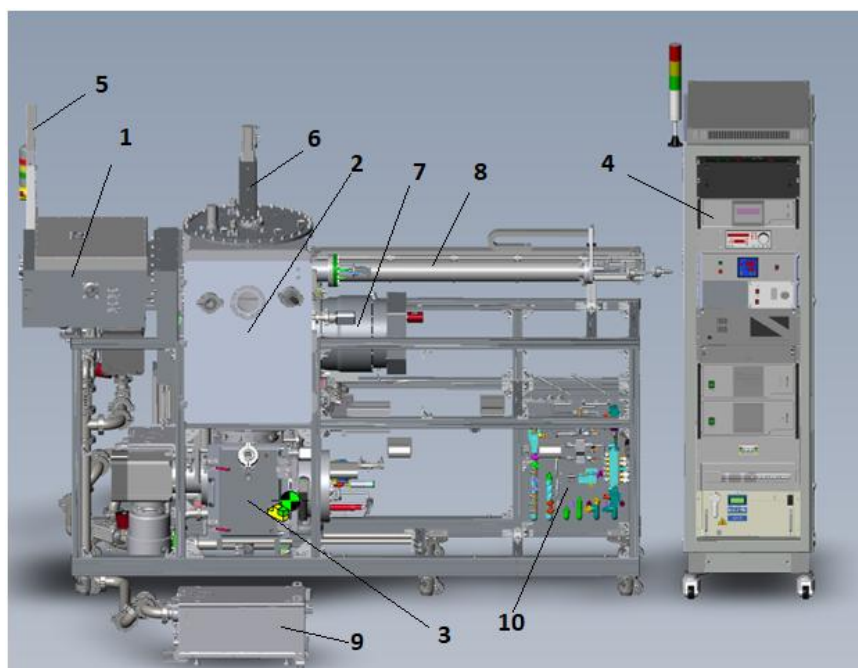


Рис. 2. Основные узлы вакуумной установки ЭЛУ ТМ 1Ш.

1 – шлюзовая камера, 2 – технологическая камера, 3 – камера испарителя, 4 – шкаф управления, 5 – монитор, 6 – привод вращения карусели, 7 турбомолекулярный насос, 8 – привод транспортно-загрузочной системы, 9 – форвакуумный насос, 10 – многоконтурная система охлаждения.

Воспроизводимость параметров получаемой тонкой плёнки металлов в значительной степени зависит от стабильности уровня рабочего давления в технологической камере, состава газовой среды, определяющей этот уровень, эмиссионных характеристик ЭЛИ. Наличие шлюзовой камеры позволяет поддерживать рабочее давление и состав газовой среды в технологической камере на требуемом уровне от процесса к процессу [2].

В шлюзовую камеру (рисунок 3) возможно загрузить два подложкодержателя с 5 пластинами диаметром 150 мм на каждом. Шлюз оборудован датчиками положения подложкодержателей. Транспортно-загрузочная система обеспечивает автоматическую загрузку подложкодержателей из шлюзовой камеры в технологическую [3].



Рис. 3. Шлюзовая камера с выдвинутыми подложкодержателями.

В технологической камере происходит процесс осаждения материала на подложку. Давление остаточных газов в камере достигает значений менее  $10^{-5}$  Па. Камера оборудована легкосъёмными экранами, защищающими стенки от загрязнения.

Подложкодержатель перемещается в камеру манипулятором транспортно-загрузочной системы, переключается на вертикальный привод, который вращается двигателем, установленным на верхней части камеры.

Камера электронно-лучевого испарителя (ЭЛИ) отделена от технологической камеры высоковакуумным затвором, что позволяет загружать материал в тигель без напуска атмосферы в технологическую камеру. Камера снабжена двухступенчатой системой откачки, состоящей из турбомолекулярного и форвакуумного насосов, которая обеспечивает достижение высокого вакуума после загрузки материала в тигель. Таким образом, обеспечивается поддержание постоянной газовой среды и чистоты в рабочей технологической камере.

Камера испарителя оборудована системой зеркал для наблюдения за процессом плавления и испарения металла. Прямое наблюдение через смотровое окно затруднено по причине довольно быстрого запыления испаряемым материалом, в то время как зеркало долгое время позволяет наблюдать за лучом и процессом испарения.

Электронно-лучевой испаритель состоит из трех основных частей: электронной пушки, отклоняющей системы и водоохлаждаемого тигля. Эмитируемые из вольфрамового термокатода электроны проходят через фокусирующую систему, ускоряются за счёт разности потенциалов до 10 кВ между катодом и анодом и формируются в электронный луч. Отклоняющая система создаёт магнитное поле, перпендикулярное направлению движения выходящих из фокусирующей системы пушки электронов. Это поле направляет электронный луч в центральную часть водоохлаждаемого тигля. В месте падения луча создаётся локальная зона разогрева и испарения вещества из жидкой фазы. Поток испарившегося материала осаждается в виде тонкой плёнки на подложки (пластины диаметром 100, 150 мм), расположенные над испарителем [4].

Электронно-лучевой испаритель имеет 6-ти позиционный поворотный тигель (рис. 4). Каждая позиция предназначена для распыления одного материала, при этом для

загрузки используется тугоплавкий тигель (вставка). Заслонка над тиглем необходима для процессов дегазации навесок перед распылением материала на подложки.

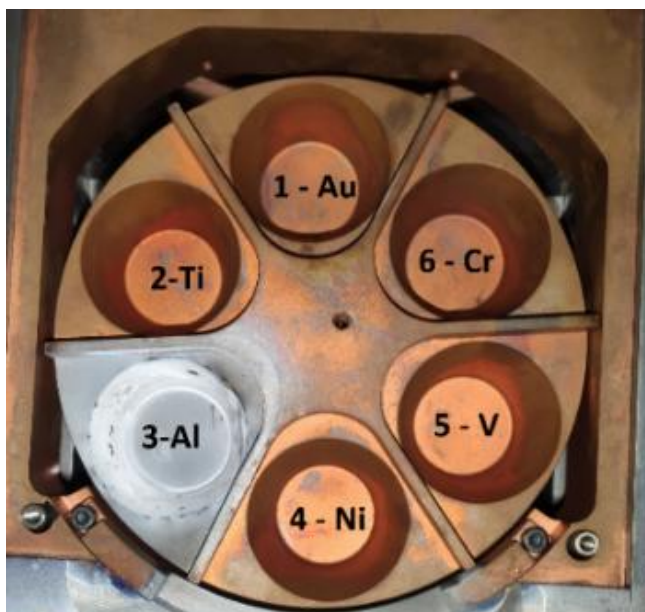


Рис. 4. Шестипозиционный тигель и расположение материалов в нём.

На рисунке 5 представлена фотография навесок ванадия во вставке из вольфрама. Навески имеют вид гранул одинакового размера и насыпаются примерно на 3/4 объёма вставки. После оплавления электронным лучом навески приобретают вид цельного слитка.

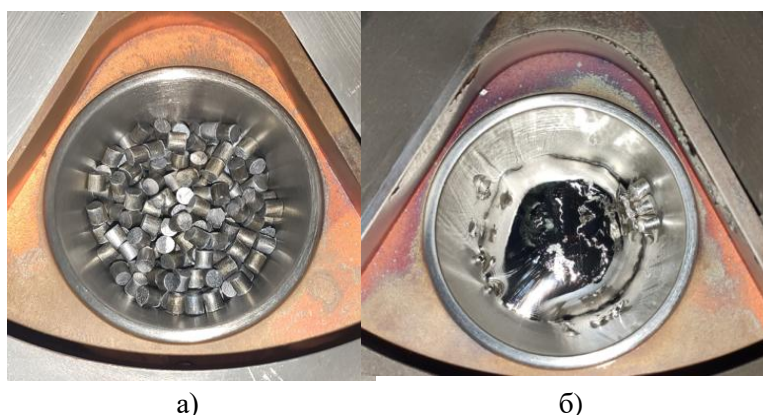


Рис. 5. Фотографии навески во вставке из тугоплавкого материала. а) во время загрузки; б) после расплавления электронным лучом.

Вставки для тигля могут быть изготовлены из различных тугоплавких материалов – вольфрама, молибдена, тантала, корунда, графита, а также меди (таблица 2) [5]. Материал вставки выбирается исходя из физико-химических особенностей испаряемого материала. Важно, чтобы материал вставки и материал испарения не образовывали интерметаллидов при расплавлении под действием электронного луча. Это может привести к загрязнению материалом вставки осаждаемой на пластины плёнки.

Таблица 2 Вставки в тигли для электронно-лучевого нанесения

	Графитовые тигли. Используются с материалами: Cr, Cu, Ge, In, Mg, Mo, Pd, Pt, Sb, SiO, SiO <sub>2</sub> , Sr, Ta, Ti, Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Zn.		Тигли FABMATE. Используются с материалами: Ag, Al, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Au, B, Cr, Cu, Fe, Ga, Ge, In, Mg, Mo, Pd, Pt, Se, Si, Sb, SiO, SiO <sub>2</sub> , Sr, Ta, Ti, Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Zn.
	Интерметаллические тигли (BN-TiB <sub>2</sub> ). Используются с материалами: Al		Тигли из оксида алюминия (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
	Тигли из молибдена (Mo)		Медные тигли (Cu)
	Тигли из вольфрама (W)		Тигли из тантала (Ta)
	Тигли из нитрида бора (BN)		Тигли из ванадия (V)

## УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ НАНЕСЕНИЯ

Задание параметров технологического процесса распыления осуществляется через специальное программное обеспечение. В автоматическом режиме возможно нанесение многослойных гетероструктур из разных материалов заданной толщины.

Прогрев пластин для дегазации перед нанесением тонкой плёнки происходит с помощью ИК ламп сверху через отверстия в подложкодержателе. Мощность ИК ламп задаётся через программу управления, что позволяет нагревать пластины в требуемом диапазоне температур. Значение температуры определяется пирометром, установленным через специальное ИК-прозрачное стекло на верхней части камеры. Фокусное расстояние пирометра настроено на пластину, расположенную на подложкодержателе.

Наличие измерителя толщины позволяет осуществлять режим нанесения по толщине – процесс происходит до достижения заданной толщины. Это позволяет более точно воспроизводить параметры тонкой плёнки в разных рабочих циклах напыления.

Измеритель толщины имеет 6 позиций с резонаторами (кварцевыми кристаллами) и оборудован шаговым двигателем для перемещения позиций.

Каждый резонатор настроен на свой материал. Настройка параметров резонатора в зависимости от материала осуществляется путём внесения справочных характеристик материалов, таких как плотность и z-фактор (мера влияния испаряемого материала на изменение частоты кварцевого кристалла, определяемая как отношение акустического импеданса кристалла к акустическому сопротивлению нанесенного материала) и экспериментальных данных, таких как tooling (коэффициент, учитывающий разницу скорости осаждения между датчиком измерения и подложкой), определяемый экспериментальным путём и вычисляемый по формуле [6]:

$$tooling(\%) = T_i \frac{T_m}{T_x},$$

где  $T_i$  – начальное значение (100);  $T_m$  – измеренная толщина на пластине;  $T_x$  – показания резонатора.

В таблице 1 представлены параметры настройки резонаторов для используемых материалов.

Таблица №1 Параметры калибровки резонатора (датчика толщины)

Номер мат-ла	Наимен. материала	№ резонат	$T_{пл}, ^\circ C$	Плотность, г/см <sup>3</sup>	z-фактор	tooling
1	Золото (Au)	1	1064	19,3	0,381	230
2	Титан (Ti)	2	1670	4,5	0,628	250
3	Алюминий (Al)	3	660	2,7	1,08	180
4	Никель (Ni)	4	1452	8,91	0,331	245
5	Ванадий (V)	5	1920	5,96	0,53	220
6	Хром (Cr)	6	1856	7,2	0,305	250

В блоке управления электронно-лучевого испарителя возможно осуществить тонкую настройку электронного луча, в которую входит форма, скорость сканирования, мощность, частота, амплитуда.

При достижении заданной толщины процесс прекращается в автоматическом режиме и пластины выгружаются в шлюз манипулятором транспортно-загрузочной системы.

Вакуумная установка ЭЛУ ТМ 1Ш позволяет получать тонкие плёнки металлов с равномерностью не хуже  $\pm 3\%$  на пластинах 150 мм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вакуумная установка ЭЛУ ТМ 1Ш электронно-лучевого испарения позволяет проводить качественные процессы нанесения и получать тонкие плёнки металлов с высокой точностью воспроизведения параметров. Установка предназначена для применения в производстве современных изделий микро- и нанoeлектроники.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Технология тонких пленок и покрытий: учеб. пособие / Л. Н. Маскаева, Е. А. Федорова, В. Ф. Марков; [под общ. ред. Л. Н. Маскаевой]; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 236 с.
2. Одинокое В.В. Шлюзовые системы в вакуумном оборудовании: Учебное пособие для проф.-тех. учебных заведений. М.: Высшая Школа, 1981. 55 с.
3. Бирюков М. Г., Одинокое В. В., Панин В. В., Долгополов В. М., Шубников А. В. Модульное проектирование вакуумных установок для микроэлектронных технологий // Международный форум «Микроэлектроника-2019» 5-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули». Сборник тезисов Республика Крым, г. Алушта, 30 сентября – 05 октября 2019, г. Москва: ТЕХНОСФЕРА. 2019. – С. 497-498.
4. Иванов А., Смирнов Б. Электронно-лучевое напыление: технология и оборудование // Наноиндустрия. 2012. №6. С. 28-34.
5. Kurt J. Lesker Company Material Deposition Chart // URL: [https://www.lesker.com/newweb/deposition\\_materials/materialdepositionchart.cfm?pgid=0](https://www.lesker.com/newweb/deposition_materials/materialdepositionchart.cfm?pgid=0) (дата обращения: 20.02.2023).

6. SQM-160 Multi-Film Rate / Thickness Monitor Operating Manual // Inficon URL: <https://www.inficon.com/en/products/SQM-160#Downloads> (дата обращения: 20.02.2023).

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

Хошев Александр Вячеславович – кандидат технических наук (ORCID: 0009-0002-9243-561X). АО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения», АО «НИИТМ», 124460, Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект 10, akhoshev@niitm.ru.

Аверьянов Евгений Владимирович (ORCID:0009-0008-8424-2045). АО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения», АО «НИИТМ», 124460, Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект 10, eaveryanov@niitm.ru.

Одинокоев Вадим Васильевич – доктор технических наук, профессор (ORCID: 0000-0003-1652-8013), АО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения». 124460, Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект 10, vodinokov@niitm.ru.

Костюков Денис Андреевич (ORCID: 0009-0005-7144-5394). АО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения». 124460, Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект 10, dkostyukov@niitm.ru.

Овцын Александр Андреевич – кандидат химических наук, (ORCID: 0000-0002-7621-1571). АО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения». 124460, Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект 10, aovtsin@mail.ru.