



Получено: 24.08.2023 г. | Принято: 28.08.2023 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.5.306.309>

Научная статья

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ВАКУУМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫМИ ИСПАРИТЕЛЯМИ

В.В.Одиноков<sup>1</sup>, д.т.н., проф., ORCID: 0000-0003-1652-8013 / [vodinokov@niitm.ru](mailto:vodinokov@niitm.ru)

М.Г.Бирюков<sup>1</sup>, к.т.н., ORCID: 0000-0002-5765-1221

**Аннотация.** Исследована эффективность работы серийно выпускаемой установки с электронно-лучевым испарителем (ЭЛИ) периодического действия и новой вакуумной установки с ЭЛИ полунепрерывного действия. Проанализировано, что на новой установке цикловая производительность выше даже при загрузке меньшего количества подложек на групповой подложкодержатель, при этом существенно повышается выход годных интегральных микросхем.

**Ключевые слова:** вакуумное кластерное оборудование, кремниевые пластины, электронно-лучевой испаритель, металлизация

**Для цитирования:** В.В. Одиноков, М.Г. Бирюков. Исследование эффективности работы вакуумного оборудования с электронно-лучевыми испарителями. НАНОИНДУСТРИЯ. 2023. Т. 16, № 5. С. 306–309. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.5.306.309>

Received: 24.08.2023 | Accepted: 28.08.2023 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.5.306.309>

Original paper

## STUDY OF EFFICIENCY OF VACUUM EQUIPMENT WITH ELECTRON BEAM EVAPORATORS

V.V.Odinokov<sup>1</sup>, Doct. of Sci. (Tech), Prof., ORCID: 0000-0003-1652-8013 / [vodinokov@niitm.ru](mailto:vodinokov@niitm.ru)

M.G.Biryukov<sup>1</sup>, Cand. of Sci. (Tech), ORCID: 0000-0002-5765-1221

**Abstract.** Operation efficiency of a commercially available unit with a batch-type electron beam evaporator (EBE) and a new vacuum unit with a semi-continuous EBE has been studied. It is analyzed that on the new unit cycle productivity is higher even at loading of less number of substrates on the group substrate holder at the same time the yield of perfect integrated circuits is significantly increased.

**Keywords:** vacuum cluster equipment, silicon wafers, electron beam evaporator, metallization

**For citation:** V.V. Odinokov, M.G. Biryukov. Study of efficiency of vacuum equipment with electron beam evaporators. NANOINDUSTRY. 2023. V. 16, no. 5. PP. 306–309. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.5.306.309>.

<sup>1</sup> Акционерное общество "Научно-исследовательский институт точного машиностроения", Зеленоград, Россия / Research institute of precision machine manufacturing, Zelenograd, Russia

## ВВЕДЕНИЕ

Уровень технических решений в современном оборудовании для микроэлектроники в значительной степени влияет на выполнение требований технологических процессов создания современных интегральных схем (ИС). На практике ранее применяемые конструктивные схемы и технологические узлы по своим физико-техническим характеристикам могут быть непригодными или становятся сдерживающим фактором реализации технологических требований производства современных ИС.

В технологическом производстве одним из основных процессов является получение в вакууме качественных и воспроизводимых по электрофизическим характеристикам тонкопленочных элементов. Совершенство этой технологии металлизации и вакуумного оборудования является определяющим, так как операции металлизации практически выполняются на финише изготовления ИС, то есть когда изделие почти готово и интегрировало в себя основную стоимость изготовления – брак экономической недопустим!

Для реализации процессов металлизации ИС часто применяется вакуумное оборудование с электронно-лучевым испарителем (ЭЛИ) материалов. Технологический процесс испарения материалов и нанесения пленок на подложки с использованием ЭЛИ требует низкого давления ( $10^{-4}$ – $10^{-5}$ ) Па и чистой газовой среды в процессной (рабочей) камере.

Промышленное вакуумное оборудование с ЭЛИ оснащается достаточно объемными процессными камерами (0,7–1,0) м<sup>3</sup> с групповыми подложкодержателями с безмасляными откачными средствами с использованием турбомолекулярных (ТМН) и криогенных насосов (КН).

Анализируя работу такого вакуумного оборудования необходимо отметить, что все действия и операции подготовки оборудования для осуществления основного рабочего процесса нанесения пленок на подложки и завершения рабочего цикла выгрузкой подложек из процессной камеры осуществляются последовательно и достаточно длительно, что отражается на низкой производительности оборудования в целом. Такие установки относятся к оборудованию периодического действия [1, 2].

Так, на примере вакуумной установки с ЭЛИ 01НЭ-7-004 (Оратория 9), серийно выпускаемой с 1979 года с объемом процессной камеры ~0,8 м<sup>3</sup>, были зафиксированы следующие подготовительные и рабочие операции (рис.1) и их временные характеристики:

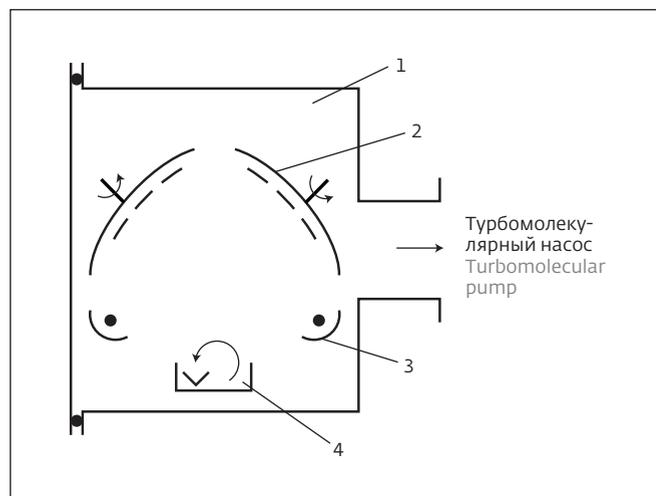


Рис.1. Принципиальная схема процессной камеры вакуумной установки с ЭЛИ (Оратория 9)

1 – процессная камера, 2 – групповые подложкодержатели, 3 – нагреватели, 4 – ЭЛИ

Fig.1. Schematic diagram of the process chamber of the vacuum unit with EBE (Oratoria 9)

1 – process chamber, 2 – group substrate holders, 3 – heaters, 4 – EBE

Подготовительные и рабочие операции:

$t^3$  ПОД – время загрузки группового подложкодержателя с 42 подложками в процессную камеру (~4 мин);

$t^3$  ЭЛИ – время загрузки испаряемого материала Al в ЭЛИ (~2 мин);

$t^{отк}$  КАМ – время форвакуумной и высоковакуумной откачки процессной камеры до давления  $10^{-5}$  Па (~70 мин);

$t^{наг}$  ПОД – время нагрева и обезгаживания подложек (~5 мин);

$t^{об}$  ЭЛИ – время расплавления материала Al в ЭЛИ и его обезгаживания (~5 мин);

$t^{РАБ}$  – рабочее время нанесения пленок Al на подложки (~10 мин);

$t^{охл.}$  ПОД – время охлаждения подложек в вакууме (~3 мин);

$t^B$  НАП – время напуска воздуха в процессную камеру (~2 мин);

$t^{выгр}$  ПОД – время выгрузки подложек из процессной камеры (~5 мин).

Таким образом, цикловая производительность вакуумной установки (Qц) может быть рассчитана по формуле:

$$Q_{ц} = P/T_{ц}, \quad (1)$$

где P – количество подложек в групповом подложкодержателе (42 шт. Ø 100).

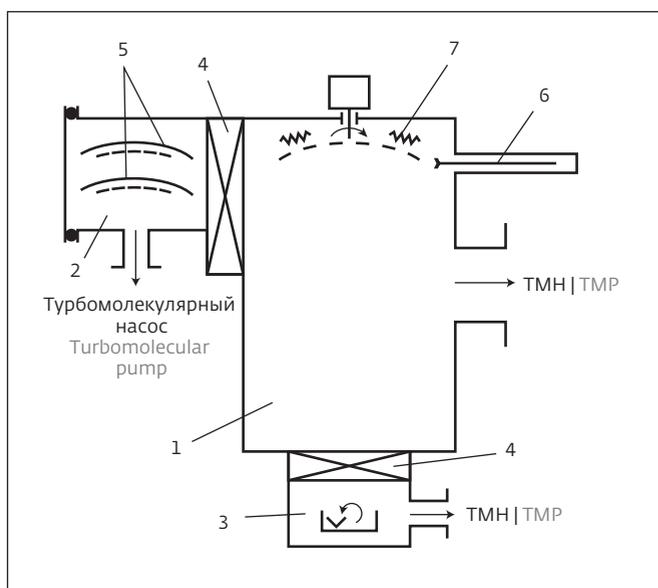


Рис.2. Принципиальная схема новой вакуумной установки ЭЛУ ТМ 1 Ш

1 – процессная камера, 2 – шлюзовая камера, 3 – камера с ЭЛИ, 4 – шибберные затворы, 5 – подложкодержатели, 6 – механизм перегрузки подложкодержателей из шлюзовой камеры в рабочую, 7 – нагреватели

Fig.2. Schematic diagram of the new vacuum installation of ELU TM 1 Sh

1 – process chamber, 2 – sluice chamber, 3 – chamber with EBE, 4 – slide gates, 5 – substrate holders, 6 – mechanism of substrate holders reloading from the sluice chamber to the working chamber, 7 – heaters

$t_{ц} = t^3 \text{ ПОД} + t^3 \text{ ЭЛИ} + t^{\text{отк}} \text{ КАМ} + t^{\text{наг}} \text{ ПОД} + t^{\text{об}} \text{ ЭЛИ} + t^{\text{РАБ}} + t^{\text{охл.}} \text{ ПОД} + t^{\text{ВНАП}} + t^{\text{выгр}} \text{ ПОД} \sim 106 \text{ мин} \sim 1,7 \text{ ч.}$  Таким образом, получим:  $Q_{ц} = 42/1,7 \sim 25$  подложек /ч.

Анализ работы этой установки и аналогичного назначения с периодическим циклом работы позволяет сделать вывод, что выход годных изделий составляет ~70–80% в основном из-за невоспроизводимости состава остаточной газовой среды, из-за периодического сообщения объема процессорной камеры с атмосферным воздухом, а также из-за попадания мелкодисперсных частиц на поверхность подложки из помещения, механизма вращения подложек и стенок процессорной камеры при периодической форвакуумной откачке атмосферного воздуха. Особенно это критично при металллизации более сложных ИС с более высоким уровнем интеграции.

Фактическая производительность установки  $Q_{ф}$  с учетом выхода годных ( $\gamma$ ) изделий будет еще меньше:

$$Q_{ф} = P/t_{ц} \times \gamma, \text{ где } \gamma = 0,7$$

$$Q_{ф} = 25 \times 0,7 \sim 17 \text{ подл./ч.}$$

С целью устранения указанных недостатков была создана более прогрессивная модель вакуумной установки с ЭЛИ, которая работает в полунепрерывном режиме и имеет более высокую производительность и выход годных изделий. Для этого процессорная камера не вскрывается и не сообщается с атмосферным воздухом хотя бы в течение одной рабочей смены. При этом рабочие циклы нанесения пленок на подложки проводятся в постоянной и воспроизводимой по составу вакуумной среде [3].

Главной отличительной особенностью этой вакуумной установки с ЭЛИ (ЭЛУ ТМ 1 Ш) является наличие двух дополнительных камер, соединенных с процессорной камерой через затворы (рис.2).

Одна камера выполняет функции шлюзовой камеры, в которой располагается магазин из двух групповых подложкодержателей (под подложки диаметром 100 и 150 мм).

Шлюзовая камера снабжена безмасляными средствами форвакуумной и высоковакуумной откачки. Загрузка и выгрузка групповых подложкодержателей в шлюзовой камере и ее высоковакуумная откачка осуществляются во время рабочего процесса нанесения пленок на подложки в процессорной камере.

Другая камера предназначена для размещения шеститигельного ЭЛИ. Камера отделяется герметично от процессорной камеры шибберным затвором и снабжена так же безмасляными средствами форвакуумной и высоковакуумной откачки.

Таким образом, обеспечивается загрузка тиглей испаряемым материалом, расплавление, обезгаживание и выход на режим испарения материала в тигле без влияния на вакуумную среду процессорной камеры. В этом случае подготовительные операции выглядят следующим образом:

$t^3 \text{ ПОД}$  – время загрузки двух групповых подложкодержателей (по восемь подложек  $\varnothing$  100 мм на одном подложкодержателе) (~2 мин);

$t^3 \text{ ЭЛИ}$  – время загрузки испаряемого материала в ЭЛИ (~2 мин);

$t^{\text{отк}} \text{ КАМ}$  – время форвакуумной и высоковакуумной откачки процессорной камеры до давления  $10^{-5}$  Па (~70 мин);

$t^{\text{отк}} \text{ ШЛЮЗ}$  – время откачки шлюзовой камеры объемом  $V1 = 0,07 \text{ м}^3$  до давления  $10^{-3}$  Па (~5 мин);

$t^{\text{отк}} \text{ ЭЛИ}$  – время откачки камеры с ЭЛИ объемом  $V2 = 0,04 \text{ м}^3$  до давления  $10^{-3}$  Па (~5 мин);

$t^{\text{об}} \text{ ЭЛИ}$  – время расплавления материала в ЭЛИ и его обезгаживания (~3 мин);



$t^{\text{наг}}$  ПОД – время нагрева и обезгаживания подложек в процессной камере (~5 мин);

$t^{\text{РАБ}}$  – рабочее время нанесения пленок алюминия на подложки (~8 мин);

$t^{\text{перегр}}$  ПОД – время перегрузки одного подложкодержателя из шлюзовой камеры в процессную и обратно (~2 мин).

Подложки после процесса нанесения пленок остывают в шлюзовой камере.

Суммарное время подготовки шлюзовой камеры для транспортирования подложкодержателя в процессную камеру составляет:

$T \text{ ШЛЮЗ} = t^3 \text{ ПОД} + t^{\text{отк}} \text{ ШЛЮЗ} = 2 \text{ мин} + 5 \text{ мин} = 7 \text{ мин}.$

Суммарное время подготовки камеры с ЭЛИ к процессу испарений материала составляет:

$T \text{ ЭЛИ} = t^3 \text{ ЭЛИ} + t^{\text{отк}} \text{ ЭЛИ} + t^{\text{об}} \text{ ЭЛИ} = 2 \text{ мин} + 3 \text{ мин} + 5 \text{ мин} = 10 \text{ мин}.$

Время откачки шлюзовой камеры и камеры с ЭЛИ совмещено с временем откачки процессной камеры и значительно меньше этого времени. В последующих циклах работы установки процессная камера всегда находится под вакуумом и не сообщается с атмосферным воздухом.

Если шеститигельный ЭЛИ полностью загружен испаряемым материалом (Al), а объем материала в каждом тигле обеспечивает по два и более процесса испарения материала (Al), то обеспечивается двенадцать рабочих циклов нанесения пленок без вскрытия камеры с ЭЛИ.

Таким образом, производительность установки будет зависеть только от времени процесса нанесения пленок  $t^{\text{РАБ}}$ , временем нагрева подложек  $t^{\text{наг}}$  ПОД и временем перегрузки подложкодержателя из процессорной камеры в шлюзовую и обратно ( $t^{\text{перегр}}$  ПОД).

$T_{\text{ц}} = t^{\text{РАБ}} + t^{\text{наг}} \text{ ПОД} + t^{\text{перегр}} \text{ ПОД} = 7 + 5 + 2 = 14 \text{ мин}.$

Суммарное время для проведения рабочих циклов ( $T_{\text{ц}}$ ) в смену (8 ч) с учетом потери времени на подготовку установки к рабочим процессам нанесения пленок (1,6 ч) будет составлять  $(8 - 1,6) = 6,4 \text{ ч}$  или 384 мин.

Количество рабочих циклов за указанное время (384 мин) будет составлять:  $384 / 14 = \sim 27$  циклов.

Цикловая производительность установки будет равна:  $8 \text{ подл.} \times 27 \text{ циклов} = 220 \text{ подложек}$  в смену или  $220/6,4 = 34 \text{ подложки/ч}.$

С учетом вышесказанного видно, что на современной вакуумной установке с ЭЛИ – ЭЛУ ТМ 1 Ш цикловая производительность выше, чем на установке 01НЭ-7-004 (Оратория 9).

Указанная установка обладает более высоким процентом выхода годных из-за очень высокой

воспроизводимости газовой среды в процессной камере, так как она не сообщается с атмосферным воздухом, минимизировано количество опор качения подложкодержателя вследствие чего значительно уменьшается количество мелкодисперсных частиц, попадающих на рабочие подложки. Выход годных ИС с высоким уровнем интеграции составляет более 95%.

Фактическая производительность составляет:

$$Q^{\Phi} = 34 \times 0,95 \sim 32 \text{ подл./ч}.$$

Следовательно, фактическая производительность установки полунепрерывного действия ЭЛУ ТМ 1Ш почти в два раза выше, чем на установке периодического действия 01НЭ-7-004.

## ВЫВОДЫ

Создание вакуумного оборудования полунепрерывного действия с ЭЛИ перспективно и актуально как с целью повышения цикловой производительности этого оборудования, так и для повышения выхода годных ИС.

Совмещение во времени основных рабочих операций и вспомогательных операций возможно только при использовании шлюзовых систем загрузки и выгрузки подложкодержателей.

## ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также за размещение статей на сайте журнала и передачу их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

*Декларация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.*

## ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Машиностроение, Энциклопедия, том III-8 Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении. М.: Машиностроение, 2000. С. 269–273.
2. **Одинокое В.В.** Шлюзовые системы в вакуумном оборудовании: Учебное пособие для проф.-тех. учебных заведений. М.: Высшая школа, 1981. С. 55.
3. **Хошев А.В., Аверьянов Е.В., Одинокое В.В., Костюков Д.А., Овцын А.А.** Вакуумная установка с электронно-лучевым испарителем и шлюзовой загрузкой групповых подложкодержателей // Электронная техника. 2022. С. 24–28. Серия 3. Микрорэлектроника.