



Получено: 17.05.2022 г. | Принято: 27.05.2022 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.3-4.224.231>

Научная статья

## ПРИВНОСИМАЯ ДЕФЕКТНОСТЬ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ НАНОСТРУКТУР В ВАКУУМЕ

Ю.В.Панфилов<sup>1</sup>, д.т.н., проф., ORCID: 0000-0001-6861-2028 / [panfilov@bmstu.ru](mailto:panfilov@bmstu.ru)  
Л.Л.Колесник<sup>1</sup>, к.т.н., доц., ORCID: 0000-0002-1037-997X

**Аннотация.** Проанализированы основные источники привносимой дефектности изделий микро- и наноэлектроники в вакуумном технологическом оборудовании кластерного типа. Рассмотрены механизмы формирования потоков мелкодисперсных частиц в шлюзовых и технологических вакуумных камерах, молекулярных загрязнений и следов металлов в результате изнашивания конструкционных материалов и трибодесорбции.

**Ключевые слова:** привносимая дефектность, вакуумное оборудование, микро- и наноэлектроника, молекулярные загрязнения, трибодесорбция

**Для цитирования:** Ю.В. Панфилов, Л.Л. Колесник. Привносимая дефектность при формировании наноструктур в вакууме. НАНОИНДУСТРИЯ. 2022. Т. 15, № 3–4. С. 224–231. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.3-4.224.231>

Received: 17.05.2022 | Accepted: 27.05.2022 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.3-4.224.231>

Original paper

## MICRO-CONTAMINATION OF NANOSTRUCTURES AT MANUFACTURING IN VACUUM

Yu.V.Panfilov<sup>1</sup>, Doct. of Sci. (Tech), Prof., ORCID: 0000-0001-6861-2028 / [panfilov@bmstu.ru](mailto:panfilov@bmstu.ru)  
L.L.Kolesnik<sup>1</sup>, Cand. of Sci. (Tech), Docent, ORCID: 0000-0002-1037-997X

**Abstract.** Main sources of micro-contamination of the micro- and nanoelectronic devices in vacuum cluster-type processing equipment were analysed. Generation mechanism of microparticles flows at locks and processing vacuum chambers, molecular contamination and metal particles as a results of construction materials wear and tribo-desorption were shown.

**Keywords:** micro-contamination, vacuum equipment, micro and nanoelectronics, molecules contamination, tribo-desorption

**For citation:** Yu.V. Panfilov, L.L. Kolesnik. Micro-contamination of nanostructures at manufacturing in vacuum. NANOINDUSTRY. 2022. V. 15, no. 3–4. PP. 224–231. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.3-4.224.231>

### ВВЕДЕНИЕ

Утверждение, что в борьбе с привносимой дефектностью изделий микроэлектроники победить невозможно [1], наглядно проявляется при

### INTRODUCTION

The claim that the fight against introduced defects in microelectronics products cannot be won [1] is clearly demonstrated in the nanoelectronics production. For

<sup>1</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия / Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

переходе к производству изделий нанoeлектроники. Так, при минимальных размерах элементов современных сверхбольших интегральных микросхем (СБИС) 7-18 нм критичными с точки зрения выхода годных СБИС становятся не только мелкодисперсные частицы (МДЧ) [2], но и так называемые молекулярные загрязнения [3]. Целью данной статьи является анализ источников привносимой дефектности изделий микро- и нанoeлектроники в вакуумном технологическом оборудовании кластерного типа.

Кластерные производственные системы (рис.1) объединяют в едином вакуумном цикле различные технологические операции и на сегодняшний день

example, with the minimum element sizes of modern super large integrated circuits (VLSI) of 7-18 nm, not only fine particles (FP) [2], but also so-called molecular contamination becomes critical in terms of VLSI yield [3]. The purpose of this paper is to analyse the sources of introduced defects in micro- and nanoelectronic products in the vacuum cluster-type process equipment.

Cluster production systems (Fig.1) integrate different technological operations in a single vacuum cycle and today they are used to produce the most advanced micro- and nanoelectronic products. One of the main challenges in designing and operating such equipment is to ensure the quality of the vacuum

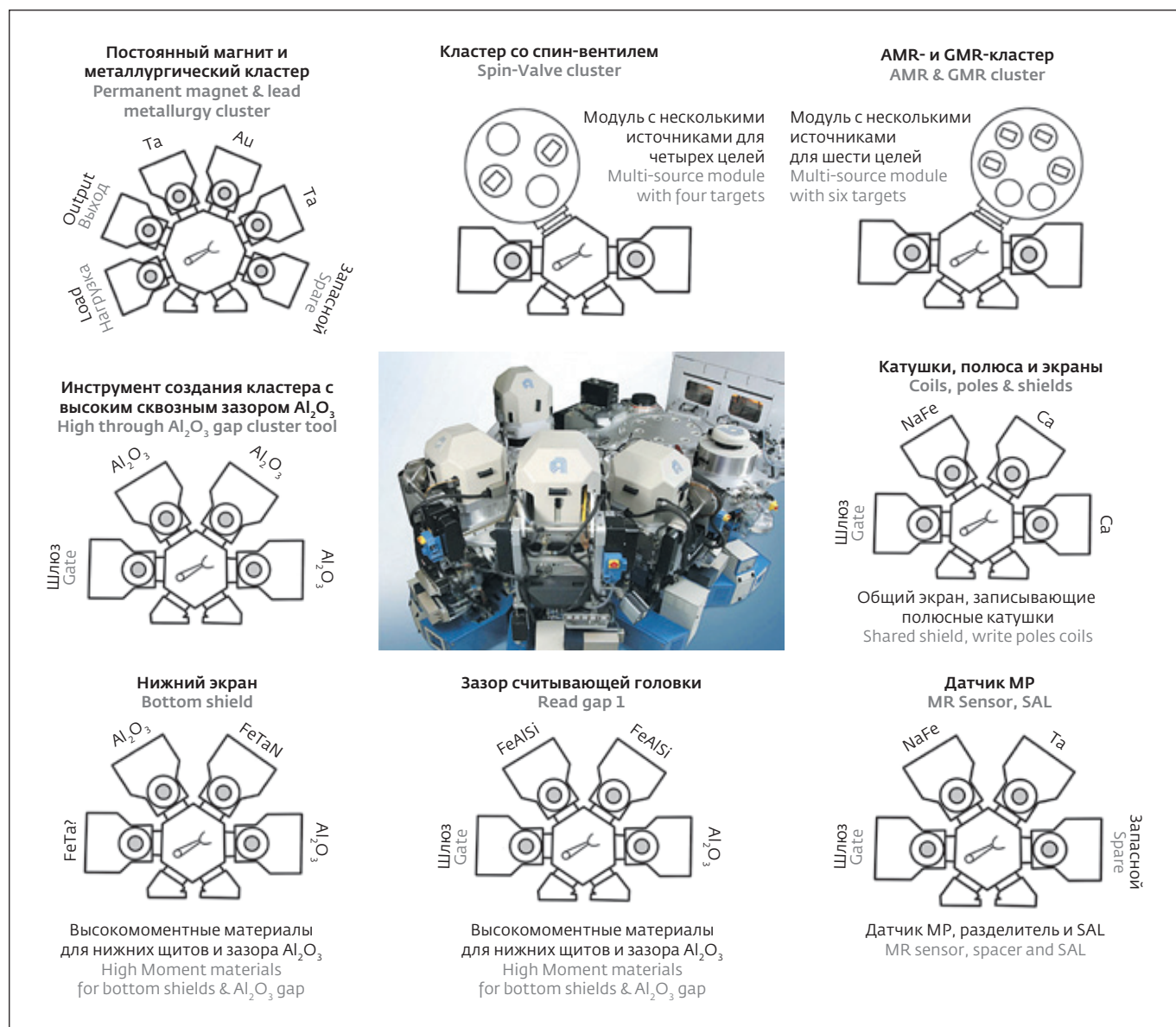


Рис.1. Кластерные производственные системы [5]  
Fig.1. Cluster production systems [5]



на них производятся самые современные изделия микро- и нанoeлектроники. Одна из основных проблем проектирования и эксплуатации такого оборудования связана с обеспечением качества вакуумной технологической среды, а именно, с минимумом привносимой дефектности изготавливаемых микро- и наноструктур. Если для микроструктур с размерами порядка 1 мкм основными причинами брака из-за привносимой дефектности являются твердые или жидкие мелкодисперсные частицы [2], то для наноструктур с размерами в десятки и даже единицы нанометров критичными с точки зрения выхода годных становятся молекулярные загрязнения [3] в виде продуктов распада полимерных конструкционных материалов и органических соединений, а также продуктов газовой выделений резиновых смесей. Кроме того, в результате высокотемпературного и фрикционного воздействия (трибодесорбции [4]) на материалы внутрикамерных устройств и механизмов на обрабатываемые наноструктуры попадают атомы и молекулы кислорода, метана, моно и диоксида углерода, соединений серы, а также металлов и их оксидов. В оборудовании кластерного типа присутствует еще одна причина появления брака, связанная с проникновением газообразных реагентов и продуктов плазмохимических реакций из одного технологического модуля через высоковакуумный транспортный модуль в другие технологические модули.

Привносимая дефектность изделий микроэлектроники в виде мелкодисперсных частиц была достаточно подробно исследована в 90-е годы прошлого столетия, что нашло отражение во множестве публикаций, в том числе в [5]. Были проведены исследования распределения МДЧ на поверхности полупроводниковой пластины после откачки вакуумных, в том числе шлюзовых камер, напуска в них воздуха для разгерметизации, а также после перемещения пластины в вакуумных технологических камерах с помощью, например, транспортеров. На рис.2 приведены результаты измерения набора дозы привносимой дефектности на поверхности полупроводниковой пластины в установке шлюзового типа 01НИ-7-015 разработки НИИТМ (Зеленоград).

Молекулярные загрязнения полупроводниковых пластин с формируемыми наноструктурами в вакуумных камерах технологического оборудования могут появляться, во-первых, при их разгерметизации из атмосферы ЧПП и состоять из органофосфатов, силиконов, крезолов, углеводородов и других соединений [3], во-вторых, в результате газовой выделений из органических материалов и пар трения, десорбции паров воды со стенок вакуумной камеры, газонатекания через подвижные и неподвижные контакты, в-третьих, продукты коррозии (порядка 100 Å/30 дней) и окисления поверхности технологической оснастки

process environment, namely, to minimise the introduced defectiveness of the manufactured micro- and nanostructures. While for the microstructures with dimensions of 1 µm the main cause of defects is solid or liquid fine particles [2], for the nanostructures with dimensions of tens or even several nanometres the molecular contamination [3] in the form of degradation products of polymer structural materials and organic compounds as well as products of gas emission of rubber mixtures are critical in terms of good quality yield. In addition, as a result of high-temperature and frictional influence (tribodesorption [4]), on the materials of intra-chamber devices and mechanisms, the atoms and molecules of oxygen, methane, mono- and carbon dioxide, sulfur compounds as well as, metals and their oxides get on the processed nanostructures. In the cluster type equipment there is another cause of defects related to penetration of gaseous reagents and products of plasma chemical reactions from one process module into the other process modules through the high-vacuum transport module.

Introduced defectiveness of microelectronic products in the form of fine particles was investigated sufficiently in detail in the 90's of the last century, which was reflected in many publications, including [5]. There were studies of FP distribution on the semiconductor wafer surface after pumping of vacuum, including sluice chambers, pumping air into them for depressurization, and also after wafer transfer in vacuum process chambers with the help of, for example, conveyors. Figure 2 shows the results of the induced defect measurements on the semiconductor wafer surface in the 01NI-7-015 gateway-type device developed by RIPMM, Zelenograd.

Molecular contamination of semiconductor wafers with formed nanostructures in vacuum chambers of technological equipment can appear, firstly, during their depressurization from CR atmosphere, and consist of organophosphates, silicones, cresols, hydrocarbons and other compounds [3], secondly, emissions from organic materials and friction pairs, desorption of water vapors from the walls of a vacuum chamber, gas leakage through mobile and fixed contacts, thirdly, corrosion products (about 100 Å/30 days) and oxidation of the technological equipment surface and the walls of the vacuum chamber. The intensity of molecular contamination, e.g. by phosphorus, can be  $2.5 \cdot 10^{11}$  atoms/cm<sup>2</sup> per hour [3].

According to SEMI F21-951, molecular contamination in vacuum can include condensable compounds (CC) and trace metals (TM). GOST R ISO 14644-9-2013 characterizes surface roughness classes according to particle concentration, which define maximum permissible concentration of particles of certain sizes on

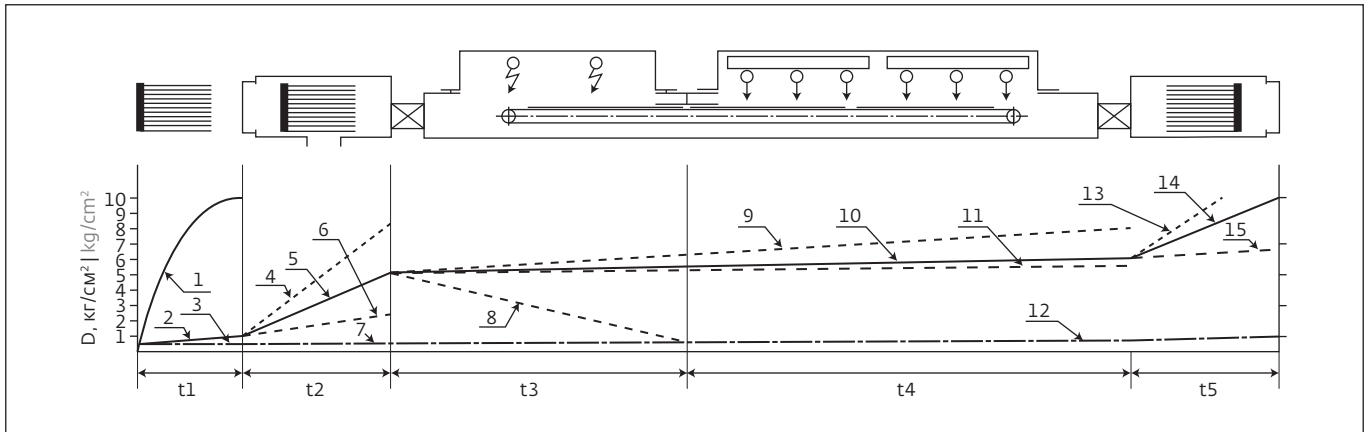


Рис.2. Схема набора дозы  $D$  привносимой дефектности изделий, обрабатываемых на установке О1НИ-7-015: 1 – в чистом производственном помещении (ЧПП) класса 100 (по Федеральному стандарту США FS-209c); 2 – в ЧПП класса 10; 3 – в ЧПП класса 1; 4 – в шлюзовом загрузочном устройстве (ШЗУ) после откачки при доле осаждаемых МДЧ, равной 0,2; 5 – при доле, равной 0,17; 6 – при доле, равной 0,1; 7 – при доле, равной 0 (при использовании вакуумного СМИФ-контейнера); 8 – при удалении МДЧ с поверхности пластины; 9 – в рабочей вакуумной камере при потоке МДЧ, равном  $1 \cdot 10^{-1}$  шт./( $\text{cm}^2 \cdot \text{c}$ ); 10 – при потоке МДЧ, равном  $5 \cdot 10^{-2}$  шт./( $\text{cm}^2 \cdot \text{c}$ ); 11 – при потоке МДЧ, равном  $1 \cdot 10^{-2}$  шт./( $\text{cm}^2 \cdot \text{c}$ ); 12 – при потоке МДЧ, равном  $1 \cdot 10^{-2}$  шт./( $\text{cm}^2 \cdot \text{c}$ ); 13 – в ШЗУ выгрузки после напуска воздуха при доле осаждаемых МДЧ, равной 0,2; 14 – при доле осаждаемых МДЧ, равной 0,17; 15 – при доле осаждаемых МДЧ, равной 0,1

Fig.2. Schematic diagram of the  $D$  dose intake of the introduced defects of the products processed on the O1NI-7-015: 1 – in clean room (CR) class 100 (according to US Federal Standard FS-209c); 2 – in CR class 10; 3 – in CR class 1; 4 – in sluice loading unit (SLU) after evacuation at a fraction of deposited FP equal to 0.2; 5 – at the fraction equal to 0.17; 6 – at the fraction equal to 0.1; 7 – at the fraction equal to 0 (when using a vacuum SMIF container); 8 – at the removal of CR from the plate surface; 9 – in the working vacuum chamber at CR flux equal to  $1 \cdot 10^{-1}$  pcs./( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ); 10 – at the CR flux equal to  $5 \cdot 10^{-2}$  pcs./( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ); 11 – at the CR flux equal to  $1 \cdot 10^{-2}$  pcs./( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ); 12 – at the CR flux equal to  $1 \cdot 10^{-2}$  pcs./( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ); 13 – in the unloading pond after the air inlet at the fraction of deposited CR equal to 0.2; 14 – at the fraction of deposited CR equal to 0.17; 15 – at the fraction of deposited CR equal to 0.1

и стенок вакуумной камеры. Интенсивность образования молекулярных загрязнений, например фосфора, может составлять  $2,5 \cdot 10^{11}$  атомов/ $\text{cm}^2$  в час [3].

В соответствии со стандартом SEMI F21-951 к молекулярным загрязнениям в вакууме можно отнести конденсируемые соединения (МС) и следы металлов (ММ). ГОСТ Р ИСО 14644-9-2013 характеризует классы чистоты поверхности по концентрации частиц, которые определяют максимально допустимую концентрацию частиц определенных размеров на поверхности полупроводниковой пластины. Измерение массовой концентрации поверхностных загрязнений основано на определении характерных длин волн основных функциональных групп загрязняющих веществ и мощности сигналов. С помощью современных методов можно проводить мониторинг загрязнений на уровне  $0,1 \text{ ng/cm}^2$  [3].

Следы металлов на поверхности полупроводниковых пластин в вакууме теоретически могут появиться в результате сублимации атомов металлической арматуры. Сублимация – многостадийный процесс, для проведения которого необходима дополнительная тепловая энергия. При ее подводе частицы материала твердого тела мигрируют на поверхности твердой фазы из состояния с наибольшей прочностью

the semiconductor wafer surface. Measurement of mass concentration of surface contaminants is based on determining characteristic wavelengths of the main functional groups of contaminants and signal power. With the help of modern methods it is possible to monitor contamination at the level of  $0.1 \text{ ng/cm}^2$  [3].

Traces of metals on the semiconductor wafers surface in a vacuum can theoretically appear as a result of sublimation of metal armature atoms. Sublimation is a multi-step process that requires additional thermal energy. When it is supplied, particles of solid material migrate to the solid phase surface from the highest bond strength state to a state with lower bond strength and then to the gas phase. At the same time the particles desublimates from it. The maximum sublimation rate and desublimation processes in a vacuum can be calculated from the Hertz-Knudsen equation:

$$\frac{dN_{\text{и}}}{dt \cdot A} = \frac{P_{\text{нас}} \alpha_{\text{и}}}{\sqrt{2\pi m k T}} \frac{\text{atom}}{\text{m}^2 \cdot \text{c}} \quad (1)$$

where  $N_{\text{и}}$  is the number of evaporated (sublimated) atoms or molecules,  $t$  is time,  $s$ ,  $A$  is the evaporation

связей в состоянии с их меньшей прочностью, а затем в газовую фазу. Одновременно из нее происходит десублимация частиц. Максимальную скорость процессов сублимации и десублимации в вакууме можно рассчитать по уравнению Герца – Кнудсена:

$$\frac{dN_i}{dt \cdot A} = \frac{P_{\text{нас}} \alpha_i}{\sqrt{2\pi m k T}} \frac{\text{atom}}{\text{m}^2 \text{c}}, \quad (1)$$

где  $N_i$  – количество испаренных (сублимированных) атомов или молекул;  $t$  – время, с;  $A$  – площадь испарения (сублимации),  $\text{m}^2$ ;  $\alpha_i$  – коэффициент испарения (для чистых материалов  $\alpha_i = 1$ );  $m$  – масса испаренного (сублимированного) атома или молекулы, кг;  $T_i$  – температура испарения, К.

Давление насыщенного пара над поверхностью твердого тела описывается уравнением Клапейрона – Клаузиуса:

$$\frac{dp_{\text{нас}}}{dT} = \frac{H_{\text{г}} - H_{\text{ж}}}{T(V_{\text{г}} - V_{\text{ж}})} = \frac{\Delta H}{TV_{\text{г}}}, \quad (2)$$

где  $P_{\text{нас}}$  – давление насыщенного пара испаряемого материала, Па;  $T$  – температура материала, К;  $H$  – энтальпия газа (г) и жидкости (ж), ккал/кмоль;  $V$  – объем газа (г) и жидкости (ж),  $\text{m}^3$  ( $V_{\text{г}} \gg V_{\text{ж}}$ );  $\Delta H$  – теплота испарения, ккал/кмоль.

Однако давление насыщенного пара при температуре ниже температуры испарения очень мало. Так, давление насыщенного пара металла, например нептуния, при комнатной температуре в вакууме равно [6]:

$$\lg p_{\text{нас}} = 5,1 - 2,06 \cdot 10^4/T, \quad (3)$$

где  $T$  – абсолютная температура, К.

При  $T = 1000$  К давление насыщенного пара составляет  $p_{\text{нас}} = 10^{-15}$  Па, а при комнатной температуре 293 К давление насыщенного пара составляет всего  $p_{\text{нас}} = 10^{-65}$  Па. При таких величинах давлений скорость процессов сублимации приблизительно составляет, соответственно,  $10^7$  и  $10^{-39}$  атом/ $\text{m}^2 \text{c}$ . Из этого следует, что при комнатной температуре загрязнения микро- и наноструктур атомами и молекулами конструкционными материалами вакуумного технологического оборудования можно не учитывать.

Привносимая дефектность в виде атомов и молекул конструкционных материалов может иметь заметное влияние на характеристики наноструктур, вплоть до брака, в результате трибодесорбции [4] из пар трения внутрикамерных механизмов.

Как показал опыт проектирования и эксплуатации вакуумных транспортных и загрузочных модулей,

(sublimation) area,  $\text{m}^2$ ,  $a_i$  is the evaporation coefficient (for pure materials  $a_i = 1$ ),  $m$  is mass of an evaporated (sublimated) atom or molecule, kg,  $T_i$  is the evaporation temperature, K.

The saturated vapour pressure over the surface of a solid body is described by the Clapeyron – Clausius equation:

$$\frac{dp_{\text{нас}}}{dT} = \frac{H_{\text{г}} - H_{\text{ж}}}{T(V_{\text{г}} - V_{\text{ж}})} = \frac{\Delta H}{TV_{\text{г}}}, \quad (2)$$

where  $p_{\text{нас}}$  is saturated vapour pressure of material to be vaporised, Pa;  $T$  is material temperature, K;  $H$  is enthalpy of gas (г) and liquid (ж), kcal/kmol;  $V$  is volume of gas (г) and liquid (ж),  $\text{m}^3$  ( $V_{\text{г}} \gg V_{\text{ж}}$ );  $\Delta H$  is heat of vaporisation, kcal/kmol.

However, the saturated vapour pressure at temperatures below the evaporation temperature is very low. For example, the saturated vapour pressure of a metal, e.g. neptunium, at room temperature in a vacuum is [6]:

$$\lg p_{\text{нас}} = 5,1 - 2,06 \cdot 10^4/T, \quad (3)$$

where  $T$  is the absolute temperature, K.

At  $T = 1,000$  K the saturated vapour pressure is  $p_{\text{нас}} = 10^{-15}$  Pa, and at room temperature 293 K the saturated vapour pressure is only  $p_{\text{нас}} = 10^{-65}$  Pa. At these pressures the speed of sublimation processes is approximately  $10^7$  and  $10^{-39}$  atoms/ $\text{m}^2 \text{s}$ , respectively. It follows that at room temperature contamination of micro- and nanostructures with atoms and molecules by structural materials of vacuum technological equipment can be disregarded.

Introduced defects in the form of atoms and molecules in structural materials can have a marked effect on performance of nanostructures, up to and including rejection, as a result of tribodesorption [4] from intra-cavity friction pairs.

As the experience of design and operation of vacuum transport and loading modules showed, the main sources of contamination in the form of chemically active gases and fine particles are friction pairs of mechanisms, guides, motion inputs, located in high and ultra-high vacuum [7]. Information on tribodesorption in vacuum from various steels, polymeric materials, minerals, solid lubricants, soft metals (silver, lead) is accumulated, with tribodesorption having both thermal and athermal (at low loads and friction speeds) character. The compositions of polypropylene, ethylene propylene, chlorobutylene and fluorocarbon rubbers stand out in the friction of synthetic rubbers. Low molecular weight compounds such as methane, mono and carbon dioxide, non-polymerised monomers



основными источниками загрязнений в виде химически активных газов и мелкодисперсных частиц являются пары трения механизмов, направляющих, вводов движения, расположенных в высоком и сверхвысоком вакууме [7]. Накоплена информация по трибодесорбции в вакууме из различных сталей, полимерных материалов, минералов, твердосмазочных материалов, мягких металлов (серебро, свинец), причем трибодесорбция имеет как термический, так и атермический (при малых нагрузках и скоростях трения) характер. При трении синтетических каучуков выделяются композиции полипропиленового, этиленпропиленового, хлорбутилового и фторкаучуков. В спектре масс обнаружены низкомолекулярные соединения: метан, моно и диоксид углерода, непалимеризованные мономеры и летучие компоненты примесей.

Явления трибоэмиссии включают в себя различные физические и химические процессы, происходящие внутри и вокруг зоны контакта трущихся тел и приводящие к эмиссии атомов и молекул самих тел, окклюдированных газов и наночастиц [5]. Эти свойства трибоэмиссионных явлений были положены в основу целого ряда разработок принципиально новых технологических процессов, материалов и методов с заданными свойствами, в том числе:

- специальные трибологические покрытия, обладающие способностью к самовосстановлению и адаптирующихся к условиям эксплуатации;
- новые смазочные материалы для оборудования вакуумных и космических систем и особо чистой среды;
- новый метод анализа содержания и распределения газов в материалах и покрытиях.

Для использования в СВВ оборудовании НИТИ г. Рязань в 80-е годы прошлого столетия были разработаны два типа твердосмазочных покрытий на основе дисульфида молибдена: химико-термическое покрытие "Димолит-4" разработки ВНИИОФИ и ионно-плазменное покрытие "ИПН MoS<sub>2</sub>" разработки ИМАШ РАН. Однако в спектре газовой выделений из пары трения с "Димолит-4" присутствовали следы серы и ее соединений, что оказалось не приемлемо для процессов молекулярно-лучевой эпитаксии, так как приводило к перелегированию гетероструктур на основе GaAs. Поэтому в эксплуатацию были приняты узлы трения манипуляторов и направляющих скольжения с покрытием "ИПН MoS<sub>2</sub>", в спектре газовой выделений которых даже при температуре 773 К следов серы и ее соединений обнаружено не было (рис.3).

При исследовании привносимой дефектности от узлов и механизмов в вакуумных камерах технологического оборудования, в частности от подшипников скольжения с ТСП на основе дисульфида молибдена, нанесенного вакуумным ионно-плазменным

and volatile components of impurities are found in the mass spectrum.

Tribo-emission phenomena include various physical and chemical processes occurring in and around the contact zone of rubbing bodies and leading to emission of atoms and molecules out of the bodies themselves, occluded gases and nanoparticles [5]. These properties of tribo-emission phenomena made the basis for a number of developments of the fundamentally new technological processes, materials and methods with given properties, including:

- special tribological coatings with self-repairing ability and adaptable to operating conditions;
- new lubricants for vacuum and space systems and particularly clean environments;
- a new method for analysing the content and distribution of gases in materials and coatings.

Two types of solid-lubricant coatings based on molybdenum disulphide were developed for use in UHV equipment by RITI Ryazan in 1980s: chemical-thermal coating "Dimolit-4" developed by All-Russian Scientific Research Institute optical-physical measurements and ion-plasma coating "IPN MoS<sub>2</sub>" developed by Mechanical Engineering Research Institute of the Russian

Academy of Sciences. However, in a spectrum of gas emissions from friction pair with "Dimolit-4" there were traces of sulphur and its compounds that turned out to be unacceptable for processes of molecular beam epitaxy as it led to overlegging of GaAs-based heterostructures. Therefore, the friction assemblies of manipulators and slideways coated with MoS<sub>2</sub> IPN were taken into use and no traces of sulphur and its compounds were detected in their gas emission spectrum even at 773 K (Fig.3).

In research of brought defectiveness from units and mechanisms in vacuum chambers of the process equipment, in particular, from sliding bearings with solid lubricant coating (SLC) on the basis of molybdenum disulphide, applied by vacuum ionic-plasma method, traces of metals and sulphur on surface of control plates which have been placed in immediate proximity of a sliding bearing (Fig.4) were found. The quantity and composition of these traces varied with operating time, expressed as the total number of revolutions of the bearing shaft.

## CONCLUSIONS

Thus, the analysis of causes and sources of the introduced defects in micro- and nanoelectronics products, as well as occurrence and spread of molecular contaminants in cluster-type vacuum processing equipment show that:

For microstructures with dimensions of the order of 1 μm, the main causes of rejects due to introduced

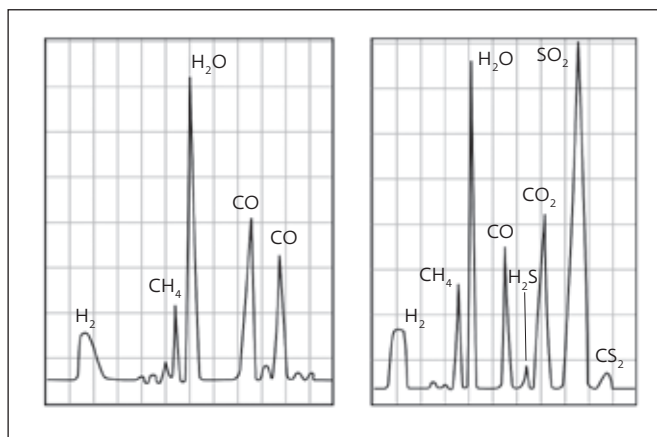


Рис.3. Спектры газовой выделения покрытий на основе  $\text{MoS}_2$ : а – ИПН  $\text{MoS}_2$ ,  $T=773\text{ K}$ ,  $t=1\text{ ч}$ ; б – Димолит-4,  $T=623\text{ K}$ ,  $t=1\text{ ч}$   
 Fig.3. Gas release spectra of  $\text{MoS}_2$ -based coatings: а –  $\text{MoS}_2$  IPN,  $T=773\text{ K}$ ,  $t=1\text{ h}$ ; б – Dimolite-4,  $T=623\text{ K}$ ,  $t=1\text{ h}$

методом, были обнаружены следы металлов и серы на поверхности контрольных пластин, которые были размещены в непосредственной близости от подшипника скольжения (рис.4). Причем количество и состав этих следов изменялось с наработкой, выраженной в суммарном количестве оборотов вала подшипника.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, анализ причин и источников привносимой дефектности изделий микро- и нанозлектроники, а также появления и распространения молекулярных загрязнений в вакуумном технологическом оборудовании кластерного типа показывает, что:

- для микроструктур с размерами порядка 1 мкм основными причинами брака из-за привносимой дефектности являются мелкодисперсные частицы, попадающие в вакуумные камеры с потоками технологического газа, отрывающиеся от стенок и оснастки частицы наносимых и стравливаемых пленок и слоев, в также частицы, генерируемые механизмами, работающими в вакууме;
- для наноструктур с размерами менее 100 нм (вплоть до 5–10 нм) критичными становятся молекулярные загрязнения в виде продуктов распада полимерных конструкционных материалов и органических соединений, продуктов газовой выделений резиновых смесей и т.п.;
- атомы и молекулы химически активных газов, таких, например, как кислород, метан, моно и диоксид углерода, а также соединения серы, следы металлов и оксидов, отрицательно влияющих на характеристики формируемых наноструктур, появляются на полупроводниковых пластинах в результате высокотемпературного

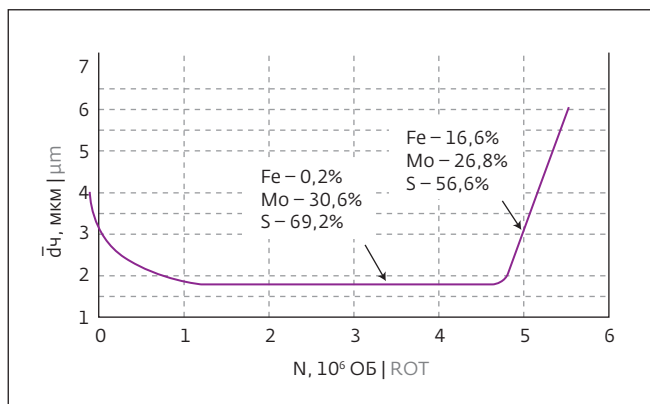


Рис.4. Средний диаметр МДЧ и их химический состав в зависимости от наработки  $N$  подшипника скольжения с ТСП на основе  $\text{MoS}_2$

Fig.4. Mean diameter and chemical composition of CRs as a function of the running time  $N$  of a slide bearing with  $\text{MoS}_2$ -based SLC

defects are fine particles entering vacuum chambers with process gas flows, particles of films and layers being deposited on and peeled off the walls and tools and particles generated by the mechanisms operating in vacuum;

For nanostructures smaller than 100 nm (down to 5–10 nm), molecular contamination in the form of degradation products of polymer construction materials and organic compounds, outgassing products of rubber compounds, etc., becomes critical;

Atoms and molecules of chemically active gases such as oxygen, methane, carbon monoxide and carbon dioxide, as well as sulphur compounds, traces of metals and oxides negatively affecting the characteristics of formed nanostructures appear on semiconductor wafers as a result of high temperature and friction effects (tribodesorption) on materials of in-cell devices and mechanisms as well as their wear;

The cause of defects in nanostructures processed in cluster-type equipment are atoms and molecules of gaseous reagents and products of plasma chemical reactions diffusing from one process module to another through transport and loading and intermediate modules.

## PEER REVIEW INFO

Editorial board thanks the anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work. It is also grateful for their consent to publish papers on the journal's website and SEL eLibrary eLIBRARY.RU.

**Declaration of Competing Interest.** The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.



и фрикционного воздействия (трибодесорбции) на материалы внутрикамерных устройств и механизмов, а также их износа;

- причиной появления брака обрабатываемых в оборудовании кластерного типа наноструктур является атомы и молекулы газообразных реагентов и продуктов плазмохимических реакций, диффундирующих из одних технологических модулей в другие через транспортно-загрузочные и промежуточные модули.

### 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.

### ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Чистые помещения / Под ред. И.Хаякавы; пер. с японск. М.: Мир, 1990. 456 с.
2. Панфилов Ю.В. Проектирование вакуумного технологического оборудования для производства СБИС по критерию минимума привносимой дефектности // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. Вып. 1 (135). 1990. С. 51–59.
3. Севрюкова Е.А. Теория ростового процесса молекулярных загрязнений и научные основы кон-

троля чистоты поверхностей изделий индустрии высоких технологий. Автореферат дисс. д.т.н., М.: МИЭТ (ТУ), 2016. 40 с.

4. Невшупа Р.А. Научные основы управления процессами трибодесорбции газов в узлах трения механизмов сверхвысоковакуумного оборудования электронной техники и нанотехнологий. Автореферат дисс. д.т.н., М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2010. 32 с.
5. Панфилов Ю.В., Ковалев Л.К., Блохин В.Г. и др. Машиностроение. Энциклопедия. Ред. Совет: К.В.Фролов (пред.) и др. М.: Машиностроение. Технология, оборудование и системы управления в электронном машиностроении. Т. III-8.; Под общ. ред. Ю.В.Панфилова, 2000. 744 с.
6. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С.Григорьева, Е.З.Мейлихова. М.: Энергоатомизда, 1991. 1232 с.
7. Deulin E.A., Mikhailov V.P., Panfilov Y.V., Nevshupa R.A. Mechanics and physics of precise vacuum mechanisms. Springer, 2010. 234 p.

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



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



В.Н. Трещиков, В.Н. Листвин

## DWDM-системы

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2021. – 420с.  
ISBN 978-5-94836-634-0

Цена 1960 руб.

В книге собран курс лекций по DWDM-системам, предназначенный для специалистов, занимающихся разработкой, внедрением и эксплуатацией DWDM-оборудования. Это четвертое издание, расширенное и дополненное, состоящее из четырех разделов. В первой части рассмотрены основы DWDM-систем, история их возникновения и эволюция, во второй части — компоненты волоконно-оптического тракта, в третьей — приемник и передатчик канало-образующего оборудования, в четвертой части — механизмы формирования шумов и способы их расчета применительно к волоконно-оптическим линиям связи.

### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

125319, Москва, а/я 91; тел.: +7 495 234-0110; факс: +7 495 956-3346; e-mail: knigi@technosphere.ru; sales@technosphere.ru