



ОБОРУДОВАНИЕ КОМПАНИИ PICOSUN ДЛЯ СИНТЕЗА СВЕРХТОНКИХ ПЛЕНОК ПО ТЕХНОЛОГИИ АТОМНО-СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ

PICOSUN EQUIPMENT FOR SYNTHESIS OF ULTRATHIN FILMS BY ATOMIC LAYER DEPOSITION TECHNOLOGY

DOI: 10.22184/1993-8578.2018.11.5.434.444

А.Веселов*, к.т.н. / alexey.veselov@picosun.com
A.Veselov*, Ph.D.

Рассматривается история разработки, принципы, преимущества и ограничения технологии атомно-слоевого осаждения (АСО), а также оборудование компании Picosun для исследовательских и промышленных задач.

The history of development, principles, advantages and limitations of atomic layer deposition (ALD), as well as Picosun equipment for R&D and industry are considered.

Разработки в области технологии атомно-слоевого осаждения (АСО) имеют длительную историю, начиная с 1950-х годов, когда впервые концепция данного метода была предложена в работах проф. В.Б.Алесковского (СССР). В 1974 году технология АСО была запатентована в Финляндии доктором Туомо Сунтолой, который длительное время до этого занимался различными НИОКР в данном направлении. В настоящее время на рынке представлено множество марок оборудования, реализующего принципы АСО, но особое положение, безусловно, занимает Picosun (Финляндия) – компания, идейным вдохновителем и членом совета директоров которой является Т.Сунтола. Длительное время техническим директором Picosun был Свен Линдфорс, на протяжении 40 лет занимавшийся разработкой оборудования АСО для разных применений. Огромный опыт научного коллектива в области создания различного оборудования АСО и постоянные усовершенствования технологии также способствуют лидерству компании. Picosun – пример того, что научные изыскания могут и должны приводить к успеху, когда в практическом применении их результатов заинтересовано множество отраслей промышленности.

ТЕХНОЛОГИЯ

В основе АСО лежит принцип самонасыщения, согласно которому атомы или молекулы типа А реагируют на поверхности изделий только со свободными химическими связями атомов (молекул) предыдущего слоя (тип В), равномерно покрывая всю поверхность изделий однородным монослоем. Если свободной химической связи нет, реакции на поверхности изделий не происходит. Поскольку реакционная камера, в которой находится изделие, постоянно продувается азотом или аргоном, избыток частиц типа А и продукты реакции удаляются, что позволяет предотвратить возможные "паразитные" химические реакции на поверхности изделий. Молекулы следующего слоя (тип В) реагируют только с молекулами типа А и также адсорбируются на поверхности одним слоем, после чего камера снова продувается азотом (аргоном). Далее цикл повторяется до достижения требуемой толщины пленки. Именно последовательность импульсного напуска и удаления рабочих газов является главным отличием АСО от традиционного метода химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ), при котором реакционные газы находятся в рабочей камере одновременно в течение значительного периода (до десятков минут). Благодаря эффекту самонасыщения химических

* Компания Picosun (Финляндия, FI-02150, Эспоо, Тьетотие 3) / Picosun Oy (Tietotie 3, FI-02150 Espoo, Finland).



Таблица 1. Сравнение АСО с другими технологиями синтеза тонких пленок

Table 1. Comparison of ALD with other thin film deposition technologies

Параметр Characteristic	АСО ALD	Молекулярно-лучевая эпитаксия Molecular-beam epitaxy	Химическое осаждение из газовой фазы Chemical vapor deposition	Магнетронное распыление Magnetron sputtering	Термическое испарение Thermal evaporation
Однородность толщины Thickness uniformity	Превосходная Excellent	Хорошая Good	Хорошая Good	Приемлемая Satisfactory	Приемлемая Satisfactory
Плотность пленки Film density	Хорошая Good	Хорошая Good	Хорошая Good	Приемлемая Satisfactory	Хорошая Good
Покрывание рельеф- ных ступенек Steps coverage	Полное Full	Зависит от процесса Depends on process	Неполное Incomplete	Неполное Incomplete	Неполное Incomplete
Адгезия между пленкой и образцом Film adhesion	Хорошая Good	Зависит от процесса Depends on process	Плохая Poor	Плохая Poor	Зависит от процесса Depends on process
Осаждение при низкой температуре Deposition at low temperature	Зависит от процесса Depends on process	Зависит от процесса Depends on process	Зависит от процесса Depends on process	Зависит от процесса Depends on process	Зависит от процесса Depends on process
Скорость осаждения Deposition rate	Зависит от процесса Depends on process	Хорошая Good	Хорошая Good	Хорошая Good	Хорошая Good
Применение в промышленном производстве Industrial applicability	Используется Useable	Используется Useable	Используется Useable	Используется Useable	Редко используется Rarely used

реакций на поверхности изделия выращивание тонких пленок методом АСО может управляться на уровне атомных слоев с высочайшими воспроизводимостью и однородностью. Еще одним преимуществом АСО над другими технологиями осаждения тонких пленок является уникальная возможность синтеза однородных пленок на ступеньках и в микроканавках со сверхвысокими аспектными

отношениями. Эти обстоятельства крайне актуальны в связи с тенденцией миниатюризации изделий микроэлектроники и устройств на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС).

Температура при проведении процессов АСО зависит от материалов осаждаемой пленки и изделия, на котором она синтезируется. Как правило, она находится в диапазоне от 100 до 400 °С.

Developments in the field of atomic layer deposition (ALD) have a long history since the 1950s, when for the first time the concept of this method was proposed in the works of prof. V.B. Aleskovsky (USSR). In 1974, the ALD technology was patented in Finland by Dr. Tuomo Suntola, who had been engaged in various R&Ds in this area for a long time. Currently, there are many brands of equipment on the market that

implement the principles of ALD, but Picosun (Finland) – the company inspired by T. Suntola, – of course, holds a special position. For a long time, Picosun's technical director was Sven Lindfors, who for 40 years was engaged in the development of ALD equipment for various applications. The vast experience of the research team in the field of creating various ALD equipment and constant improvements in technology also contribute to the

company's leadership. Picosun is an example of the fact that scientific research can and should lead to success when many industries are interested in the practical application of their results.

TECHNOLOGY

ALD is based on the principle of self-saturation, according to which atoms or molecules of type A react on the surfaces of products only with the free chemical bonds of

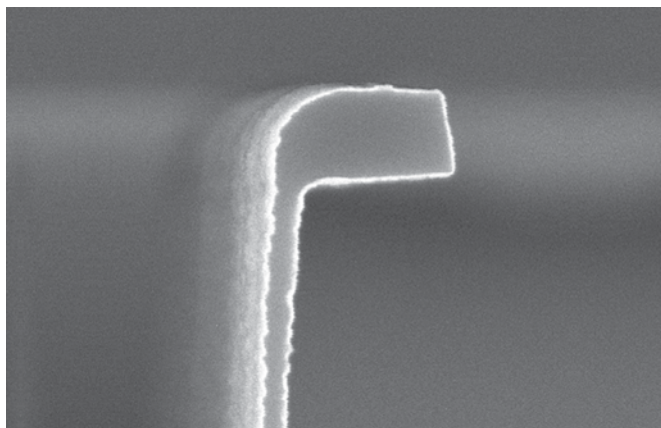


Рис.1. СЭМ однородной пленки АСО, синтезированной на всех поверхностях микроканала сложной геометрической формы (фото – собственность Fraunhofer IMS, Германия)

Fig.1. SEM-image of homogeneous ALD film synthesized on surface of micro-pillar of complex geometric shapes (photo: Fraunhofer IMS, Germany)

С использованием плазменной стимуляции во многих случаях удастся достичь снижения рабочих температур до значений, близких к комнатным, что особенно важно для изделий, которые критически чувствительны к нагреву.

Таким образом, технология АСО обеспечивает следующие основные достоинства:

- прецизионный контроль толщины и роста пленок;
- превосходная конформность и однородность;
- отсутствие микропор и дефектов;

atoms (molecules) of the previous layer (type B) covering the entire surface of products with a uniform monolayer. If there is no free chemical bond, the reaction on the surface of the products does not occur. Since the reaction chamber in which the product is located is constantly flushed with nitrogen or argon, the excess of type A particles and the reaction products are removed, thus preventing possible "parasitic" chemical reactions on the surface of the products. The molecules of the next layer (type B) react only with molecules of type A and are also adsorbed on the surface with one layer, after which

the chamber is again purged with nitrogen (argon). Then the cycle is repeated to achieve the desired film thickness. The sequence of pulsed puffing and removal of process gases is the main difference between ALD and the traditional method of chemical vapor deposition (CVD), in which the reaction gases remain in the working chamber at the same time for a considerable period (up to tens of minutes). Due to the self-saturation effect of chemical reactions on the surface of the product, thin film growth by the ALD method can be controlled at the level of atomic layers with the highest reproducibility and

uniformity. Another advantage of ALD over other thin film deposition technologies is the unique possibility of synthesizing homogeneous films on steps and micro-grooves with ultra-high aspect ratios. These circumstances are extremely relevant in connection with the trend of miniaturization of microelectronic products and devices based on microelectromechanical systems (MEMS).

The temperature of the ALD processes depends on the materials of the deposited film and the product at which it is synthesized. As a rule, it is in the range from 100°C to 400°C. With the use of plasma

- высокая воспроизводимость роста пленок как от пластины к пластине, так и между кассетами с пластинами;
- относительно низкие температуры процессов.

Обратной стороной неоспоримых достоинств является низкая скорость осаждения. Как следствие, в прикладных задачах толщина синтезируемых пленок редко превышает 50–100 нм.

Другие методы получения тонких пленок не обладают точностью контроля роста, свойственной АСО (табл.1). Кроме того, общим недостатком методов физического осаждения, будь то магнетронное напыление, электронно-лучевое или термического испарение, является трудность, а в ряде случаев – практическая невозможность получения однородного покрытия на структурах сложной формы. Дело в том, что поток частиц от источника к подложке в этих технологиях имеет линейную направленность, угол падения относительно поверхности меняется очень значительно, при этом некоторые участки оказываются затененными. Примерами сложных поверхностей являются МЭМС и структуры типа TSV (переходные отверстия в кремнии). Именно в их производстве технология АСО стала одной из ключевых, поскольку позволяет наносить однородное покрытие на стенки микроканалов со сверхвысоким аспектным отношением (включая ступеньки), в сквозных отверстиях и т.д. (рис.1).

Перечень материалов пленок, которые могут быть синтезированы с использованием технологии АСО, достаточно широк: диэлектрики

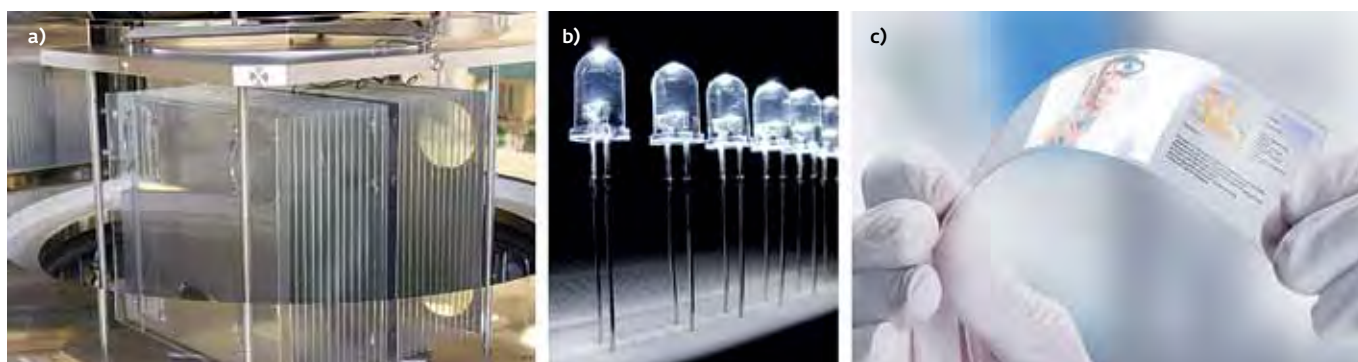


Рис.2. Некоторые примеры использования оборудования ACO Picosun. Слева-направо: кассета с листами стекла для осаждения оптических покрытий; производство светодиодов; гибкая печатная электроника

Fig.2. Examples of ALD applications: cassette with glass sheets for deposition of optical coatings (a), production of LEDs (b), flexible printed electronics (c)

(оксиды, оксонитриды и т.д.), полупроводники типов A2B6 и A3B5, тройные соединения (SrTiO_3 , BaTiO_3 и пр.), металлизированные соединения (нитрид титана), металлы, включая алюминий, титан, рутений, медь, серебро, золото, палладий, иридий и платину.

Ниже приведен краткий перечень областей применения оборудования Picosun для ACO:

- выращивание различных слоев при производстве МЭМС-структур;
- синтез пленочных структур, используемых при производстве полупроводниковых приборов и ИС;
- проводящие и барьерные слои в TSV-структурах;
- пассивация различных материалов (солнечные элементы, защита от потускнения и прочее);
- слои для оптических устройств и декоративные слои;
- слои, препятствующие механическому износу и химическому воздействию, а также гидрофобные, гидрофильные и суперомнифобные покрытия;
- синтез катализаторов и осаждение пленок на наночастицы и нанотрубки;
- напыление биосовместимых и биodeградируемых покрытий;
- напыление покрытий для адресной доставки лекарственных препаратов;
- напыление диффузионных барьеров для влаги и кислорода (при изготовлении печатных плат, для коллекционных монет и др.).

stimulation, in many cases it is possible to achieve a reduction in operating temperatures to values close to room temperature, which is especially important for products that are critically sensitive to heat.

Thus, the ALD provides the following main advantages:

- precise control of film thickness and growth;
- excellent conformality and uniformity;
- absence of micropores and defects;
- high reproducibility of film growth both from wafer to wafer and between cassettes with wafers;
- relatively low process temperatures.

The downside of the indisputable advantages is the low deposition rate. As a result, in applied use, the thickness of the synthesized films rarely exceeds 50–100 nm.

Other methods for producing thin films do not have the accuracy of ALD growth control (Table 1). In addition, a common drawback of physical deposition methods (magnetron sputtering, electron beam, thermal evaporation) is the difficulty and, in some cases, the practical impossibility of obtaining a uniform coating on structures of complex shape. The fact is that the

flow of particles from the source to the substrate in these technologies has a linear direction, the angle of incidence relative to the surface varies very much, with some areas being shaded. Examples of complex surfaces are MEMS and structures like TSV. Therefore, in their production, ALD has become one of the key technologies, since it allows applying a uniform coating on the walls of micro-grooves with ultra-high aspect ratio (including steps), in through-holes, etc. (Fig.1).

The list of materials of films that can be synthesized using ALD is rather wide: dielectrics (oxides, oxonitrides, etc.), A2B6 and A3B5



Рис. 3. Оборудование Picosun R-серии с интегрированным автоматизированным модулем Brooks Automation MX400. Предназначено для автоматической безатмосферной загрузки одиночных пластин в реакционную камеру АСО Picosun

Fig.3. Picosun R-Series system with integrated automated Brooks Automation MX400 module. Designed for automatic atmosphere-less loading of single wafers into reaction chamber



Рис.4. Оборудование Picosun R-серии, интегрированное с рентгеновским спектрометром Thermo Fisher Scientific для проведения in vacuo измерений синтезируемых пленок

Fig.4. Picosun R-series system integrated with Thermo Fisher Scientific X-ray spectrometer for in-vacuo measurements of synthesized films

ОБОРУДОВАНИЕ

Компания Picosun выпускает оборудование АСО как для проведения научных исследований и небольших пилотных производств (R-серия), так и для промышленных крупносерийных производств (P-серия). Необходимо отметить, что оборудование имеет модульную конструкцию и позволяет с легкостью переходить от НИОКР к промышленному производству.

semiconductors, ternary compounds (SrTiO_3 , BaTiO_3 , etc.), metallized compounds (titanium nitride), metals, including aluminum, titanium, ruthenium, copper, silver, gold, palladium, iridium and platinum.

The following is a brief list of Picosun equipment applications:

- growing different layers in the production of MEMS;
- synthesis of film structures for manufacture of semiconductor devices and ICs;
- conductive and barrier layers in TSV;
- passivation of various materials (solar cells, anti-tarnishing, etc.);
- layers in optical devices and decorative layers;
- layers that prevent mechanical wear and chemical attack, as well as hydrophobic, hydrophilic and super omniphobic coatings;
- synthesis of catalysts and deposition of films on nanoparticles and nanotubes;
- deposition of biocompatible and biodegradable coatings;
- deposition of films for targeted drug delivery;
- deposition of diffusion barriers for moisture and oxygen (in the manufacture of printed circuit boards, for collectible coins, etc.).

EQUIPMENT

Picosun manufactures ALD equipment for both scientific research and small pilot production (R-series), and for industrial large-scale production (P-series). It should be noted that the equipment has a modular design and makes it easy to move from R&D to industrial production.

The R-series (Fig.3) allows deposition of ALD films of the highest quality with excellent uniformity even on the surface of the most complex structures with deaf and through pores, ultra-high aspect ratio, as well as on nanoparticles and on flexible materials with roll



Рис.5. Оборудование Picosun R-серии с двумя реакционными камерами для АСО пленок оксидов и нитридов и с вакуумированной загрузочной камерой

Fig.5. Picosun R-series system with two reaction chambers for ALD of oxide and nitride films and vacuum loading chamber

R-серия (рис.3) позволяет напылять пленки АСО высочайшего качества с превосходной однородностью даже на поверхности сложнейших структур с глухими и сквозными порами, сверхвысоким аспектным отношением, а также на наночастицы и на гибкие материалы при рулонной подаче. Высокофункциональные и легкозаменяемые источники для жидкостных, газообразных и твердых прекурсоров (реагентов) обеспечивают напыление пленок различного состава без постпроцессных частиц на различные материалы, трехмерные объекты и пластины, имеющие наномасштабные особенности поверхностной геометрии. Оборудование позволяет подключать до 12 источников реагентов, оснащается генераторами озона и плазмы, дает возможность обрабатывать как одиночные пластины диаметром от 76 до 200 мм, так и кассеты с вертикально расположенными пластинами диаметром до 150 мм. Установки могут быть оснащены аналитическим оборудованием, включая квадрупольный масс-спектрометр и пьезокварцевый микровзвешиватель, эллипсометр для *in situ* измерений толщин пленок, а также приборами для *in vacuo* измерений, например, для проведения рентгено-спектрометрического анализа (рис.4). Возможна интеграция с вакуумированными загрузочными шлюзовыми камерами с ручной (рис.5) или автоматизированной подачей пластин в реакционную

Таблица 2. Данные пользователей оборудования Picosun R-200 Advanced о неоднородности толщины (1σ) различных пленок для 150 и 200 мм пластин

Table 2. Data of users of Picosun R-200 Advanced on heterogeneity (1σ) of various films for 150 mm and 200 mm wafers

Материал пленки Film material		Неоднородность толщины (1σ), % Thickness heterogeneity (1σ), %
Al ₂ O ₃ (кассета из 25 пластин 150 мм) (cassette for 25 150 mm wafers)		0,13
SiO ₂ (кассета из 12 пластин 150 мм) (cassette for 12 150 mm wafers)		0,77
TiO ₂		0,28
ZnO		0,94
Ta ₂ O ₅		1,0
HfO ₂		0,47
Pt		3,41
TiN		1,10
Плазменно-стимулированное АСО Plasma-enhanced ALD	Al ₂ O ₃	0,50
	AlN	0,62
	SiO ₂ при низкой температуре at low temperature	1,10
	SiN при низкой температуре at low temperature	1,58
	TiN	2,16
	TiAlN	2,87



Таблица 3. Данные пользователей оборудования Picosun P-300S, полученные для 300 мм пластин

Table 3. Data of users of Picosun P-300S obtained for 300 mm wafers

Материал пленки Film material	Неоднородность (1σ), % Heterogeneity (1σ), %	Электрические характеристики пленок Electrical characteristics of films
Al_2O_3	0,90 (толщины пленки) (film thickness)	Пробивное напряжение > 8 МВ/см Breakdown voltage > 8 MV/cm
HfO_2	0,35 (толщины пленки) (film thickness)	Пробивное напряжение > 3,5 МВ/см (зависит от процесса) Breakdown voltage > 3.5 MV/cm (depends on process)
ZrO_x	0,50 (толщины пленки) (film thickness)	Зависит от процесса Depends on process
TiN	2,39 (поверхностного сопротивления) (surface resistivity)	Поверхностное сопротивление 77,4 Ом/квадрат Surface resistivity of 77.4 Ω/sq

камеру, а также с роботизированными вакуумными модулями Brooks Automation MX400 (рис.3) и MX700 с загрузкой через SMIF-порты. Такие решения применяются для безатмосферной загрузки пластин в реакционную камеру, например, для выращивания пленок нитридов или металлов. Кроме того, возможно объединение модуля АСО с перчаточным боксом, один из вариантов которого показан на рис.6. Оборудование интегрируется также и в другие вакуумные технологические линии

и процессы, например, с модулями плазменного травления, оборудованием молекулярно-лучевой эпитаксии и пр.

В табл.2 представлен краткий перечень стандартных материалов пленок и их характеристик, полученных с использованием Picosun R-200 Advanced.

Для промышленного производства предлагается оборудование Picosun P-серии для одиночной и кассетной обработки пластин размером до 450 мм, выращивания пленок

feed. Highly functional and easily replaceable sources for liquid, gaseous and solid precursors (reagents) provide deposition of films of different composition without post-process particles on various materials, three-dimensional objects and wafers having nanoscale features of surface geometry. The equipment allows you to connect up to 12 sources of reagents, is equipped with generators of ozone and plasma, allows you to handle both single wafers with a size from 76 mm to 200 mm, and cassettes with vertically arranged wafers up to 150 mm in size. ALD systems

can be equipped with analytical instruments, including a quadrupole mass spectrometer and piezo quartz microbalance, an ellipsometer for in situ measurements of film thickness, as well as instruments for in-vacuo measurements, for example, for X-ray spectrometry analysis (Fig.4). Integration with vacuum loading lock-chambers with manual (Fig.5) or automated loading of wafers into the reaction chamber, as well as with Brooks Automation MX400 (Fig.3) and MX700 robotic vacuum modules with loading via SMIF ports is possible. Such solutions are used for atmosphereless

loading of wafers into the reaction chamber, for example, for growing films of nitrides or metals. In addition, it is possible to combine the ALD module with the glove box, one of the variants of which is shown in Fig.6. The equipment is also integrated into other vacuum technological lines and processes, for example, with plasma etching modules, molecular beam epitaxy equipment, etc.

Table 2 presents a brief list of standard film materials and their characteristics obtained using Picosun R-200 Advanced.

For industrial production, Picosun P-series systems are



Рис.6. Оборудование Picosun R-серии, объединенное с перчаточным боксом Mbraun

Fig.6. Picosun R-series system combined with Mbraun glove box

на больших трехмерных изделиях, работы с большими объемами мелкодисперсных порошков, а также обработки широких гибких рулонных материалов.

Некоторые характеристики пленок, полученных на оборудовании Picosun P-300S, представлены в табл.3.

Промышленное оборудование АСО Picosun P-300S (рис.7) и Picosun P-300B (рис.8) предназначено для одиночной и кассетной обработки пластин диаметром до 300 мм, а также для



Рис.7. Оборудование Picosun P-300S для одиночной обработки 300 мм пластин. Конфигурация с вакуумным роботизированным модулем Brooks Automation Marathon 2

Fig.7. Picosun P-300S system for single processing of 300 mm wafers. Configuration with vacuum robotic module Brooks Automation Marathon 2

обработки большого числа трехмерных объектов и мелкодисперсных порошков. Имеется возможность подключения от восьми (P-300B) до двенадцати (P-300S) источников реагентов. P-300B может комплектоваться механическим или автоматизированным устройством для загрузки и выгрузки тяжелых изделий в реакционную камеру. Для P-300S возможна интеграция с загрузочной камерой с ручным

offered for single and cassette processing of wafers of up to 450 mm in size, growing films on large three-dimensional products, working with large volumes of fine powders, as well as processing wide flexible roll materials.

Some characteristics of the films obtained on Picosun P-300S, are presented in Table 3.

Industrial ALD systems Picosun P-300S (Fig.7) and Picosun P-300B (Fig.8) are designed for single and cassette processing of wafers with a size of up to 300 mm, as well as for processing a large number of three-dimensional objects and fine powders. It is possible

to connect from eight (P-300B) to twelve (P-300S) reagent sources. P-300B can be equipped with a mechanical or automated device for loading and unloading heavy products into the reaction chamber. It is possible to integrate P-300S with a loading chamber with a manual manipulator for airless feeding of single wafers, as well as equipping with a Brooks Automation Marathon 2 vacuum robotic module (Fig.7) allowing airless loading of single 300 mm wafers into the reaction chamber via FOUF ports.

Industrial ALD system Picosun R-300BV (Fig.9), designed for

large-scale industrial production, allows you to connect up to eight sources of reagents and can be equipped with two automated vacuum loading chambers for atmosphereless loading of the cassette with wafers up to 200 mm in size into the ALD reaction chamber. Loading chambers with the heating option allow loading/unloading of sensitive wafers and high-performance deposition of materials such as metal nitrides.

The results obtained by Picosun P-300B users for Al_2O_3 films when loading two cassettes with 27 200 mm wafers each are shown in Table 4.



Таблица 4. Рекордные результаты, полученные пользователями Picosun P-серии для пленок АСО Al_2O_3 для двух кассет по 27 пластин диаметром 200 мм

Table 4. Record results obtained by users of Picosun R-series for ALD Al_2O_3 films for two cassettes with 27 200 mm wafers

Неоднородность (1σ) толщины пленки на пластине, % Heterogeneity (1σ) of film thickness on wafer, %	0,51
Неоднородность (1σ) толщин пленок на всех пластинах в кассете, % Heterogeneity (1σ) of thickness of films on all wafers in cassette, %	0,80
Разброс скорости роста (1σ) между кассетами с пластинами, % Variation in rate of growth (1σ) between cassettes with wafers, %	0,18
Постпроцессные частицы на одной пластине (более 70 нм) Postprocess particles on single wafer (70 nm)	1–2
Коэффициент преломления (190 нм) Refractive index (190 nm)	> 1,864
Отслоение пленки и образование микроотверстий после травления HF Delamination of film and formation of pin-holes after etching HF	Отсутствуют No
Загрязнение щелочью, атом./см ² Contamination with alkali, atoms/cm ²	< 0,02 · 10 ¹⁰
Адгезия Adhesion	Превосходная Excellent
Уменьшение скорости пропускания паров воды и кислорода (для полимерного образца) Decrease in transmittance of water vapor and oxygen (for polymeric sample)	> 3000
Твердость, ГПа Hardness, GPa	8–14
Механическое напряжение (остаточное напряжение относительно Si) при толщине 100 нм, МПа Mechanical stress (residual stress relative to Si) at thickness of 100 nm, MPa	180
Жесткость (модуль упругости), ГПа Stiffness (elastic modulus), GPa	140–180
Среднее время между операциями технического обслуживания, мес. Mean time between maintenance operations, months	> 6
Коэффициент непрерывной работы Ratio of continuous work	> 0,9



Рис.8. Оборудование Picosun P-300V для обработки трехмерных изделий и пластин диаметром до 300 мм в кассете
Fig.8. Picosun R-300V system for processing three-dimensional products and 300 mm wafers in cassette



Рис.9. Оборудование Picosun P-300BV с вакуумированными шлюзовыми камерами для полуавтоматической безатмосферной загрузки кассеты с пластинами в реакционную камеру АСО
Fig.9. Picosun P-300BV system with vacuum lock-chambers for semi-automatic, atmosphere-free loading of cassette with wafers into ALD reaction chamber

манипулятором для безатмосферной подачи одиночных пластин, а также оснащение вакуумным роботизированным модулем Brooks Automation Marathon 2 (рис.7), позволяющим осуществлять безатмосферную загрузку одиночных 300 мм пластин в реакционную камеру посредством FOUF-портов.

Промышленное оборудование АСО Picosun P-300BV (рис.9), предназначенное для крупносерийных промышленных производств, позволяет подключать до восьми источников реагентов и может быть оснащено двумя автоматизированными вакуумированными загрузочными камерами для безатмосферной загрузки кассеты с пластинами диаметром до 200 мм в реакционную камеру АСО. Загрузочные камеры с опцией нагрева позволяют проводить загрузку/выгрузку чувствительных пластин и осаждение таких материалов как нитриды металлов с высокой производительностью.

Результаты, полученные пользователями Picosun P-300B для пленок АСО Al_2O_3 при загрузке двух кассет по 27 пластин размером 200 мм приведены в табл.4.

Флагманом промышленной серии оборудования Picosun является Picosun P-300F (рис.10). Основная особенность оборудования – автоматизированная загрузка с помощью вакуумной кластерной системы Brooks Automation MX400 или MX700 с функцией переворота кассеты с пластинами диаметром до 200 мм в реакционной камере. К оборудованию



Рис.10. Оборудование Picosun P-300F с тремя модулями АСО для роста оксидов, нитридов и металлов. Оборудовано роботизированным модулем Brooks Automation MX700 и механизмами вращения кассет со 150 мм пластинами. Совместимо с SEMI S2

Fig.10. Picosun P-300F system with three ALD modules for growth of oxides, nitrides and metals. Equipped with robotic module Brooks Automation MX700 and cassette rotation mechanisms for 150 mm wafers. SEMI S2 compatible

возможно подключение до двенадцати источников реагентов. P-300F сертифицировано по стандартам SEMI S2/S8 и может быть интегрировано в автоматизированное промышленное производство благодаря опции SECS/GEM. Производительность достигает 1 тыс. пластин в сутки при толщине осаждаемой пленки

The flagship of the Picosun industrial series of equipment is the Picosun P-300F (Fig.10). The main feature of the system is automated loading using a Brooks Automation MX400 or MX700 vacuum cluster system with the function of flipping a cassette with wafers up to 200 mm in size in the reaction chamber. Up to twelve reagent sources can be connected to the equipment. P-300F is certified according to SEMI S2/S8 standards and can be integrated into automated industrial production thanks to the SECS/GEM option. Productivity reaches 1 thousand wafers per day

at a thickness of the deposited film of 15 nm (Al_2O_3). The P-300F is characterized by the lowest operating cost compared with competing equipment of similar performance.

For processing large three-dimensional objects, glass sheets of up to 400×600 mm in size or cassettes with silicon wafers up to 450 mm in diameter, the Picosun P-1000 ALD module is available in the Picosun equipment range (Fig.11). Up to ten reagent sources can be connected via six separate vacuum inputs. The main purpose of this system is the application of passivating and barrier layers to

increase productivity and increase the service life of products.

In addition to manufacturing equipment, Picosun also offers development services based on customer specifications, foundry services and test depositions, assists in the selection of necessary reagents, and also supplies them to users. Picosun and its customers have created an extensive database of ALD processes that are available to all of the company's customers. In addition, Picosun offers various levels of technical support for users and various ALD equipment training programs. ■



Рис.11. Промышленное оборудование АСО Picosun P-1000 для обработки больших партий различных изделий

Fig.11. Picosun P-1000 industrial ALD system for processing large batches of various products

15 нм (Al_2O_3). P-300F характеризуется наименьшей стоимостью эксплуатации в сравнении с конкурирующим оборудованием схожей производительности.

Для обработки больших трехмерных объектов, листов стекла размером до 400×600 мм или кассеты с кремниевыми пластинами диаметром до 450 мм в линейке оборудования Picosun имеется модуль АСО Picosun P-1000 (рис.11). Возможно подключения до десяти источников реагентов посредством шести отдельных вакуумных вводов. Основное назначение данного оборудования – нанесение пассивирующих и барьерных слоев для повышения производительности и увеличения срока службы изделий.

Помимо непосредственно производства оборудования, компания Picosun также предлагает услуги разработки процессов по техническим заданиям заказчиков, услуги фаундри и тестовых напылений, оказывает помощь в выборе необходимых реагентов, а также осуществляет их поставку пользователям. Picosun и ее заказчики создали обширную базу процессов АСО, которые доступны для всех клиентов компании. Кроме того, Picosun предлагает различные уровни технической поддержки пользователей и различные программы обучения работе на оборудовании АСО. ■

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ СОВЕРШАЮТ РЕВОЛЮЦИЮ В ПРОИЗВОДСТВЕ БАТАРЕЕК

В мире больше мобильных телефонов, чем людей. Почти все они питаются от перезаряжаемых литиево-ионных батарей, которые являются одним из важнейших компонентов, обеспечивших революцию в портативной электронике за последние несколько десятилетий. Ни одно из этих устройств не было бы привлекательным для пользователей, если бы у них не хватало энергии работать непрерывно хотя бы несколько часов, при весе, не напоминающем пользователю о необходимости регулярного посещения фитнес-клуба. Литиево-ионные аккумуляторы также полезны и в более крупных устройствах, таких как электрические транспортные средства и интеллектуальные системы энергосбережения. Инновации, предлагаемые исследователями в области материаловедения, стремящимися улучшить литий-ионные батареи, прокладывают путь для производства еще большего количества батарей с еще более высокой производительностью и КПД. Уже формируется спрос на батареи большой емкости, которые не будут загораться или взрываться в процессе эксплуатации. Многие пользователи мечтают о меньших, более легких батареях, которые заряжаются

в считанные минуты или даже секунды, но при этом сохраняют достаточно энергии для питания устройства в течение нескольких дней. Аккумуляторная индустрия уже работает над уменьшением стоимости литий-ионных батарей, в том числе путем удаления дорогого кобальта из катодов. Исследователи находят способы заменить материалы, содержащие кобальт, катодами, изготовленными из никеля или марганца, а вместо ионов лития, перемещающихся между двумя электродами с ионами и электролитами, планируют использовать натрий, магний, цинк или алюминий. Но теперь исследователи могут наблюдать и анализировать даже атомную структуру батарей и их состав в реальном режиме времени. Используя методы рентгеновской микроскопии, синхротроны, а также электронные микроскопы и сканирующие зонды, можно вживую наблюдать за движением ионов и изменением физических структур во время запасаания, хранения и высвобождения энергии в батарее.

По материалам: <https://www.nanowerk.com>