

УСТАНОВКА ДЛЯ МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ «КАТУНЬ-100»

**В. В. Блинов¹, В. И. Машанов¹, А. И. Никифоров^{1, 2},
Д. Н. Придачин¹, Д. О. Пчеляков¹, О. П. Пчеляков^{1, 2},
Л. В. Соколов¹, В. П. Титов¹**

¹Институт физики полупроводников имени А. В. Ржанова СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Томский государственный университет, г. Томск, Российская Федерация

Одной из наиболее перспективных в полупроводниковой электронике технологий является молекулярно-лучевая эпитаксия, которая представляет собой последовательное осаждение на полупроводниковую подложку слоев атомной толщины различных материалов из молекулярных пучков в условиях сверхвысокого вакуума (давление остаточных газов менее 10^{-8} Па). В ходе этого процесса (*in situ*) проводится диагностика молекулярных пучков и формируемых наногетероструктур. Создание высокоэффективных приборов микро-, нано- и фотозлектроники на основе полупроводниковых наногетероструктур, состоящих из соединений III-V, выращенных на дешевых и прочных Si подложках, является одной из приоритетных задач современного полупроводникового материаловедения. Решение этой проблемы крайне важно и для развития высокоэффективной фотовольтаики. Современные высокоэффективные солнечные элементы представляют собой сложные многослойные гетеросистемы с КПД до 45 % при концентрации солнечного излучения в несколько сотен солнц. Они состоят из трех основных p-n переходов, выполненных из Ge, InGaAs, InGaP и соединенных последовательно туннельными диодами. В настоящей статье представлена автоматизированная компактная установка молекулярно-лучевой эпитаксии нового поколения для эпитаксии плёнок и наноструктур на основе Si, Ge и (или) соединений типа AZB₅, разработанная в Институте физики полупроводников имени А. В. Ржанова Сибирского отделения РАН.

Ключевые слова: молекулярно-лучевая эпитаксия, полупроводниковые наногетероструктуры, солнечные элементы, сверхвысокий вакуум, космическое материаловедение.

Введение

Содружество Института физики полупроводников (ИФП) СО РАН и Опытного завода СО РАН по созданию вакуумного производственного участка началось лет двадцать пять назад [1–9]. Многие специалисты знают и помнят, как началась эта большая работа. С 1979 по 1990 годы ИФП СО РАН совместно со Специальным конструкторско-технологическим бюро специальной электроники и аналитического приборостроения СО АН СССР (с 1991 года – Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники) и НИИ вакуумного электронного машиностроения (НИИ ВЭМ, г. Ижевск) под руководством профессора С. И. Стенина была про-

ведена разработка целого ряда технологических сверхвысоковакуумных установок. При этом был использован опыт совместной с Институтом ядерной физики СО АН СССР разработки и изготовления трехкамерной сверхвысоковакуумной установки «Селенга» для исследования процессов синтеза полупроводниковых пленок из молекулярных пучков и создания технологии молекулярно-лучевой эпитаксии. В отделе роста и структуры полупроводниковых материалов хранятся документы, в том числе в электронной версии, отражающие этапы комплексных исследований, разработки целого ряда технологических сверхвысоковакуумных установок и создания новой технологии. Даже краткая выборка информации очень красноречива. Благодаря освоению новой конкурентоспособной техники и технологии изготовления полупроводниковых гетероструктур для микроэлектроники фактически преодолелась зависимость от соответствующих импортных по-

© Блинов В. В., Машанов В. И., Никифоров А. И., Придачин Д. Н., Пчеляков Д. О., Пчеляков О. П., Соколов Л. В., Титов В. П., 2018

ставок. В конструкции установки использовались только отечественные комплектующие [1–7].

Описание установки

Установка «Катунь-100» может состоять из нескольких технологических и вспомогательных модулей, например в однокамерной установке молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ): модуль загрузки-выгрузки подложек (модуль ЗВП); модуль эпитаксиального роста элементарных полупроводников, полупроводниковых соединений и металлических покрытий (модуль ЭПМ). Технологические модули взаимозаменяемы и содержат блок откачки, выполненный в виде горизонтальной вакуумной камеры, снабженной насосом НМД-04, криопанелью с титановым сублиматором и вакуумным откачным постом. Блок откачки размещен на раме и включает в себя камеру предварительной очистки подложек. Для проведения технологических процессов с напуском газов или выделением газов на блоке откачки предусмотрена возможность установки турбомолекулярного насоса. К блоку откачки через фланец Ду300 подсоединена технологическая камера, выполненная в виде вертикальной вакуумной камеры, которая в зависимости от назначения модуля снабжена соответствующей технологической оснасткой. Дегазация блока откачки и технологической камеры обеспечивается системой прогрева. Технологические камеры снабжены патрубками Ду150, к которым можно подсоединять другие модули через клапаны СВВ. В двухмодульном варианте два технологических модуля соединены через модуль ЗВП, содержащий вакуумную камеру и снабженный кассетной загрузкой (2 кассеты по 10 подложек диаметром 102 мм). Передача подложек из кассеты модуля ЗВП в технологические модули осуществляется с помощью транспортной системы, выполненной в виде зубчатой рейки, на которой размещены две подложки, и имеющей возможность перемещения на приводных поддерживающих роликах за счет зубчатого зацепления. Перемещение каретки осуществляется по прямолинейному транспортному каналу, образованному патрубками, технологическими камерами и модулями ЗВП, причем ось транспортного канала пересекает оси манипуляторов, что обеспечивает возможность перегрузки подложек с рейки на манипуляторы и кассеты. Транспортная система может управляться вручную, также предусмотрена возможность перевода на управление в автоматическом режиме.

Модули эпитаксиального роста элементарных полупроводников (Si, Ge), полупроводниковых соединений, металлических и диэлектрических слоев снабжены электронно-лучевыми испарителями и плазменными источниками; модули

для выращивания полупроводниковых соединений А3В5, А3N и А2В6 снабжены молекулярными источниками (до 12 молекулярных источников, в том числе вентильного типа для Р и As). Все источники снабжены независимыми заслонками для перекрытия молекулярных пучков. Все камеры могут быть оборудованы устройствами неразрушающего контроля структуры и свойств получаемых полупроводниковых эпитаксиальных систем в процессе их синтеза, такими как дифрактометр быстрых электронов и автоматический быстродействующий эллипсомер. Для повышения качества выращиваемых пленок источники МЛЭ и электронно-лучевые испарители снабжены защитными тепловыми экранами (водяными, криогенными). Возможна комбинация рабочих камер в любом порядке. Установка оборудована системой автоматизированного управления и пакетом программ для проведения технологических процессов. Скорости роста пленочных структур – от долей атомного слоя до микронов в час. Конструкция однокамерной установки МЛЭ «Катунь-100» в одно- и двухкамерном варианте представлена на рис. 1–4.

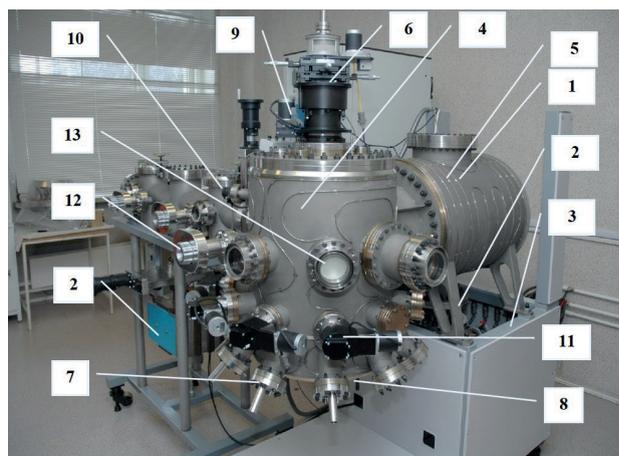


Рис. 1. Общий вид однокамерной установки МЛЭ «Катунь-100»

- 1 – блок откачки; 2 – насос НМД-04; 3 – стол;
- 4 – технологическая камера; 5 – система прогрева;
- 6 – манипулятор с нагревателем; 7 – источник молекулярного пучка; 8 – блок электронно-лучевых испарителей;
- 9 – датчик масс-спектрометра;
- 10 – датчик давления; 11 – заслонка источника молекулярных пучков; 12 – приводы перемещения зубчатой рейки; 13 – флуоресцентный экран дифрактометра быстрых электронов

В комплекте с установкой или отдельно изготавливаются и могут поставляться:

- тигли из пиролитического нитрида бора различных размеров, обработанные по оригинальной методике в соответствии с требованиями эпитаксиальной технологии;

- тигельные, вентильные и электронно-лучевые источники молекулярных пучков;
- электронные дифрактометры (ускоряющее напряжение до 30 кВ) с системой для регистрации дифракционных картин и анализа их интенсивности с программным обеспечением;
- блоки питания и управления технологическими процессами с программным обеспечением;
- автоматизированные эллипсометры для регистрации оптических, морфологических, магнитных параметров и толщины тонкопленочных структур в процессе и после их получения [1];
- оптические пирометры.

Таблица
Технические характеристики установки

Максимальный диаметр используемых подложек, мм	Примечание
Количество образцов одновременно загружаемых в модуль загрузки, шт. а) подложки диаметром 60 и 102 мм б) подложки диаметром 40 мм	20 40
Максимальная температура прогрева подложек, К	1400
Точность поддержания температуры нагревателей подложек, К	0,5
Предельное вакуум, Па (Торр) в технологических модулях в модуле загрузки выгрузки	$1,3 \cdot 10^{-8}$ ($1 \cdot 10^{-10}$) $1,3 \cdot 10^{-6}$ ($1 \cdot 10^{-8}$)
Количество источников молекулярных пучков, шт в камере эпитаксии тигельных источников в камере эпитаксии электронно-лучевых испарителей	до 12 до 2
Максимальная температура нагрева тиглей молекулярных источников, К	1500
Точность поддержания температуры нагревателей молекулярных источников, К	0,5
Количество выращиваемых структур с пленкой толщиной 1 мкм за день (18 часов) на подложках диаметром 102 мм	18
Максимальная мощность, подводимая к установке, кВт	10
Необходимая площадь размещения, м ²	30
Температура прогрева корпуса, К	до 473
Максимальный объем загрузки источников, см ³ тигельных электронно-лучевых	140 125
Расход жидкого азота в процессе выращивания эпитаксиальных структур, л/сутки	100

Расход технической воды, л/мин	3
Масса установки, кг	1000



Рис. 2. Общий вид однокамерной установки МЛЭ Катунь-100

- 1 – камера вакуумная; 2 – привод перемещения зубчатой рейки; 3 – насос НМД-0,4;
4 – сверхвысоковакуумный клапан фирмы MDC;
5 – патрубок для установки кассеты с подложками

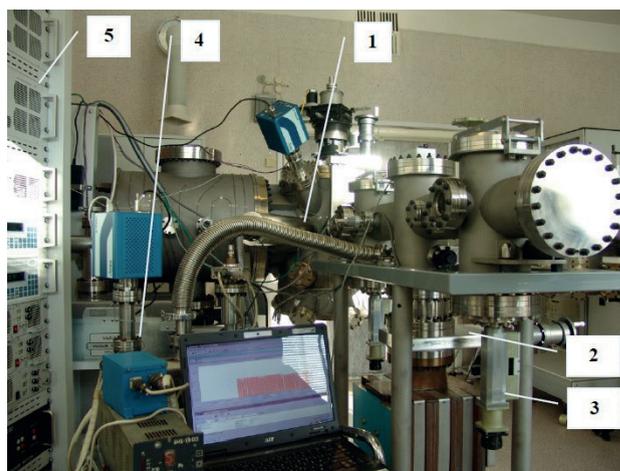


Рис. 3. Общий вид однокамерной установки МЛЭ «Катунь-100»

- 1 – электронная пушка дифрактометра быстрых электронов; 2 – сверхвысоковакуумный клапан фирмы MDC; 3 – привод перемещения кассеты с подложками; 4 – блок предварительной откачки фирмы Varian Turbo Task PS V 81M;
5 – шкаф управления

Области применения

Установку «Катунь-100» можно использовать для проведения экспериментальных исследований и промышленно-ориентированных разработок в области физики конденсированного состояния и синтеза полупроводниковых и металлических наноструктур, обучения специалистов в области нанотехнологий, производства

многослойных эпитаксиальных структур для элементной базы микро- нано- и оптоэлектроники (СВЧ-приборы, фотоприемные устройства, навигационное оборудование, лазерные системы, телекоммуникации, спутниковое телевидение и т.д.).



Рис. 4. Двухкамерная установка «Катунь-100» на сборочном участке в ИФП СО РАН

Технико-экономические преимущества установки

- компактность, низкая стоимость и экономичность;
- новизна и оригинальность технологических решений (защита патентами и ноу-хау);
- экономия расходных материалов и высокие характеристики эпитаксиальных структур при низкой себестоимости технологического процесса;

Список литературы

1. Новое оборудование для молекулярно-лучевой эпитаксии [Электронный ресурс]. URL: <http://lib.isp.nsc.ru/16/Repen/pgs/Laboratory/K-100.html> (дата обращения: 22.08.2018).
2. Валиев К. А., Орликовский А. А. Технологии СБИС: основные тенденции развития / Электроника: Наука, технология, бизнес. 1996. № 5–6. С. 3–11.
3. Hueser J. E., Brock F. J. Theoretical analysis of the density within an orbiting molecular shield // *J. Vac. Sci. Technol.*, 1976, vol. 13, no. 3, pp. 702–710.
4. Melfi L. T., Outlaw R. A., Hueser J. E., Brock F. J. Molecular shield: An orbiting low-density materials laboratory // *J. Vac. Sci. Technol.*, 1976, vol. 13, no. 3, p. 698.
5. Ignatiev A. The Wake Shield Facility and Space-Based Thin Film Science and Technology // *Earth Space Review*, 1995, no. 4, p. 10.
6. News Briefs // *Compound semiconductors*, 1997, no. 1, p. 11.
7. Neu G., Teisserire M., Freundlich A., Horton C., Ignatiev A. // *Appl. Phys. Lett.*, 1999, vol. 74, no. 22, pp. 3341–3343.
8. Бержатый В. И., Зворыкин Л. Л., Иванов А. И., Пчеляков О. П., Соколов Л. В. Перспективы реализации вакуумных технологий в условиях орбитального полета // *Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтральные исследования*, 2001, № 9, С. 63–73.
9. Ignatiev A., Freundlich A., Pchelyakov O., Nikiforov A., Sokolov L., Pridachin D., Blinov V. Molecular Beam Epitaxy in the Ultrahigh Vacuum of Space: Present and Near Future // *From Research to Mass Production*, 2018, pp. 741–749. doi: 10.1016/B978-0-12-812136-8.00035-9
10. Pchelyakov O. P., Dvurechensky A. V., Latyshev A. V., Aseev A. L. Ge/Si heterostructures with coherent Ge quantum dots in silicon for applications in nanoelectronics // *Semiconductor Science and Technology*, 2011, vol. 26, no. 1, pp. 14–27. doi: 10.1088/0268-1242/26/1/014027

- автоматическая загрузка-выгрузка пластин-подложек;
- полная автоматизация технологического процесса;
- унификация всех узлов и возможность построения многомодульных установок;
- бесконтактный контроль параметров структур в процессе роста (эллисометры и электронные дифрактометры).

Заключение

Промышленная реализация и развитие метода МЛЭ убедительно показали, что он и в настоящее время остается лучшим методом получения многослойных эпитаксиальных структур с атомной гладкостью границ, прецизионно заданными толщинами слоев, их составом и профилем легирования.

Применение высокочувствительных электроннозондовых и оптических средств контроля параметров получаемых структур и управления процессом их синтеза обеспечивает высокую воспроизводимость этих параметров. Существует множество примеров использования таких структур в перспективных полупроводниковых приборах нанoeлектроники нового поколения, принцип действия которых основан на волновой природе электрона. Среди этих примеров не последнее место занимает изготовление квантоворазмерных структур для нанoeлектроники и преобразования солнечного света в электроэнергию [10].

PLANT FOR MOLECULAR BEAM EPITAXY «KATUN-100»

V. V. Blinov¹, V. I. Mashanov¹, A. I. Nikiforov^{1,2}, D. N. Pridachin¹,
D. O. Pchelyakov¹, O. P. Pchelyakov^{1,2}, L. V. Sokolov¹, V. P. Titov¹

¹Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

²Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

One of the most promising technologies in semiconductor electronics is molecular beam epitaxy, which is a successive deposition on the semiconductor substrate of layers of atomic thickness of various materials from molecular beams in ultra-high vacuum (residual gas pressure less than 10^{-8} Pa). During this process (in situ), molecular beams and nanoheterostructures are diagnosed. Creation of high-performance micro-, nano- and photoelectronics devices based on semiconductor nanoheterostructures consisting of III-V compounds grown on cheap Si substrates is one of the priorities of modern semiconductor materials science. The solution this problem is extremely important for the development of high-performance photovoltaics. Modern high-performance solar cells are complex multilayer heterosystems with an efficiency of up to 45 % at a concentration of solar radiation in several hundred suns. They consist of three main p-n junctions made of Ge, InGaAs, InGaP connected in series by tunnel diodes. This article presents an automated compact plant of new generation of molecular beam epitaxy for epitaxy of films and nanostructures based on Si, Ge and (or) compounds of A₃B₅ type, developed at the Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of the Siberian Branch of RAS.

Keywords: molecular beam epitaxy, semiconductor nanoheterostructures, solar cells, ultrahigh vacuum, space materials science.

References

1. New equipment for molecular beam epitaxy. Available at: <http://lib.isp.nsc.ru/16/Renew/pgs/Laboratory/K-100.html> (accessed: 22.08.2018).
2. Valiev K. A., Orlikovsky A. A. *Tekhnologii SBIS: osnovnye tendencii razvitiya* [VLSI Technologies: Main Development Trends] // Electronics: Science, Technology, Business, 1996, no. 5–6, pp. 3–11. (In Russian)
3. Hueser J. E., Brock F. J. Theoretical analysis of the density within an orbiting molecular shield // *J. Vac. Sci. Technol.*, 1976, vol. 13, no. 3, pp. 702–710.
4. Melfi L. T., Outlaw R. A., Hueser J. E., Brock F. J. Molecular shield: An orbiting low-density materials laboratory // *J. Vac. Sci. Technol.*, 1976, vol. 13, no. 3, p. 698.
5. Ignatiev A. The Wake Shield Facility and Space-Based Thin Film Science and Technology // *Earth Space Review*, 1995, no. 4, p. 10.
6. News Briefs // *Compound semiconductors*, 1997, no. 1, p. 11.
7. Neu G., Teisserire M., Freundlich A., Horton C., Ignatiev A. // *Appl. Phys. Lett.*, 1999, vol. 74, no. 22, pp. 3341–3343.
8. Berzhaty V. I., Zvorykin L. L., Ivanov A. I., Pchelyakov O. P., Sokolov L. V. *Perspektivy realizacii vakuumnyh tekhnologij v usloviyah orbital'nogo poleta* [Prospects for the implementation of vacuum technologies in orbital flight conditions] // *Journal of surface investigation. X-Ray, sunchrotron and neutron techniques*, 2001, no. 9, pp. 63–73. (In Russian)
9. Ignatiev A., Freundlich A., Pchelyakov O., Nikiforov A., Sokolov L., Pridachin D., Blinov V. Molecular Beam Epitaxy in the Ultravacuum of Space: Present and Near Future // *From Research to Mass Production*, 2018, pp. 741–749. doi: 10.1016/B978-0-12-812136-8.00035-9
10. Pchelyakov O. P., Dvurechensky A. V., Latyshev A. V., Aseev A. L. Ge/Si heterostructures with coherent Ge quantum dots in silicon for applications in nanoelectronics // *Semiconductor Science and Technology*, 2011, vol. 26, no. 1, pp. 14–27. doi: 10.1088/0268-1242/26/1/014027