

5. Bystrov Yu.A., Vetrov N.Z., Lisenkov A.A. Anti-Emission Intermetallic Coating Based on Platinum and Zirconium // Technical Physics Letters. 2009. Vol. 35, № 7. P. 618–621.
6. Bystrov Yu.A., Vetrov N.Z., Lisenkov A.A. Barrier Layer of an Anti-Emission Coating // Technical Physics Letters. 2010. Vol. 36, № 6. P. 570–573.
7. Bystrov Yu.A., Vetrov N.Z., Lisenkov A.A. Special Aspects of Structure Formation of a Multicomponent Layer from Arc-Vacuum Plasma // Technical Physics Letters. 2013. Vol. 39, № 10. P. 914–916.
8. Барченко В.Т., Ветров Н.З., Лисенков А.А. Технологические вакуумно-дуговые источники плазмы. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 243 с.
9. Bystrov Yu.A., Vetrov N.Z., Lisenkov A.A. Kostrin D.K. Technological Capabilities of Vacuum Arc Plasma Sources // Vakuum in Forschung und Praxis. 2014. Vol. 26, № 5. P. 19–23.
10. Kostrin D.K., Lisenkov A.A. Surface Modification by Vacuum Arc Plasma Source // Materials Science Forum. 2016. Vol. 843. P. 278–283.
11. Лисенков А.А., Ветров Н.З., Кострин Д.К. Антиэмиссионное покрытие на основе карбида циркония // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43, № 8. С. 55–62.

## **Конкурентоспособное отечественное оборудование для молекулярно-лучевой эпитаксии материалов АЗВ5**

*А.Н. Алексеев*

*г. Санкт-Петербург, ЗАО «НТО», пр. Энгельса, 27, к.5, лит.А, sales@semiteq.ru*

*Обладание самостоятельными компетенциями для аппаратного и технологического обеспечения критически важных технологий микро- и оптоэлектроники является определяющим для успешной конкуренции государства на мировом рынке. Важнейшим направлением для радиоэлектронной отрасли является разработка и производство ЭКБ на основе сложных полупроводников АЗВ5. В докладе представлены результаты одной из последних разработок ЗАО «НТО» - система МЛЭ STE35 для выращивания высококачественных эпитаксиальных гетероструктур на подложках Ø100мм.*

### ***Competitive domestic molecular beam epitaxy systems for A3B5 materials epitaxial growth.***

*A. Alexeev. The availability of independent competencies for hardware and technology provision of critical technologies of micro- and optoelectronics is crucial for successful Russia competition worldwide. The most important direction in radio electronics industry is the development and production of electronic components based on A3B5 compound semiconductors. The report presents SemiTEq JSC development results of MBE STE35 system for growing high-quality epitaxial heterostructures on Ø100mm substrates.*

Полупроводниковые гетероструктуры на основе материалов АЗВ5 (арсениды, фосфиды, антимониды, нитриды) являются важнейшим базовым материалом для разработки и производства широкого класса приборов микро- и оптоэлектроники. Технологии материалов АЗВ5 обеспечивает производство таких важнейших приборов, как СВЧ-транзисторы и МИС, применяемые в современной радиолокации, инфракрасные фотодетекторы различных диапазонов, широкоформатные QWIP-матрицы для тепловизионных приборов, перспективные системы скоростной оптоволоконной связи, вертикально-излучающие лазеры на квантовых ямах и квантовых точках (VCSEL), мощные лазерные диоды для накачки твердотельных лазеров и многое другое. Именно поэтому, в России, как и за рубежом, базовые технологические процессы и специальное технологическое оборудование, которые лежат в основе технологических маршрутов создания данных приборов, относятся к категории критических.

Одним из таких критических процессов является получение гетероструктур на основе материалов АЗВ5 с заданными свойствами. Качество гетероструктур, наряду с ключевыми технологиями кристалльного производства, во многом определяет параметры конечного

полупроводникового прибора. В свою очередь, параметры и выход годных гетероструктур зависит от качества и надёжности специального технологического оборудования для их получения. В современной технологии производства приборов на сложных полупроводниках доминируют два технологических метода – МОС-гидридная эпитаксия (МОГФЭ) и МЛЭ, обладая теми или иными преимуществами по отношению друг к другу и применительно к конкретным типам приборных гетероструктур. ЗАО «НТО» (г. Санкт-Петербург) уже более 15 лет разрабатывает и производит системы молекулярно-лучевой эпитаксии различного назначения. При создании новых единиц оборудования и совершенствовании модельного ряда специалисты компании работают в тесной кооперации с конечными пользователями, а также активно используют возможности собственной Прикладной лаборатории. Только такой формат сотрудничества, глубокое понимание технологических задач пользователя (текущих и перспективных) помогают производить конкурентное оборудование МЛЭ, обеспечивающее высокий уровень функциональных и потребительских характеристик.

ЗАО «НТО» сегодня одно из ведущих отечественных предприятий, которому удалось сохранить традиции и научно-технический задел в области создания специального сверхвысоковакуумного технологического оборудования, сформированный ещё с советских времен. Основателями ЗАО «НТО» стали ведущие технологи ФТИ им. А. Ф. Иоффе и разработчики сверхвысоковакуумного оборудования из НПО «Аналитприбор», которые до сих пор занимают ключевые позиции в коллективе. Однако, специалисты компании не только сохраняют, но и все эти годы неуклонно развивают собственные компетенции следуя стратегии постепенного улучшения новых разработок и расширения номенклатуры предлагаемых продуктов и сервисов. Стратегия развития компании ставит своей задачей учитывать при разработках следующих поколений оборудования все текущие проблемы и предложения пользователей. ЗАО «НТО» разрабатывает и производит целый комплекс сверхвысоковакуумного оборудования как для эпитаксиального выращивания полупроводниковых наногетероструктур, так и для дальнейшего проведения ключевых технологических операций для кристалльного производства. Оборудование компании известно на рынке под брендом SemiTEq с 2001 года, оно поставляется в крупнейшие университеты, исследовательские центры и научные институты страны, а также за рубеж. Тем не менее, в рамках расширения продуктовой линейки ключевой компетенцией компании была и остаётся разработка систем молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) для роста материалов А3В5, А3N, А2В6.

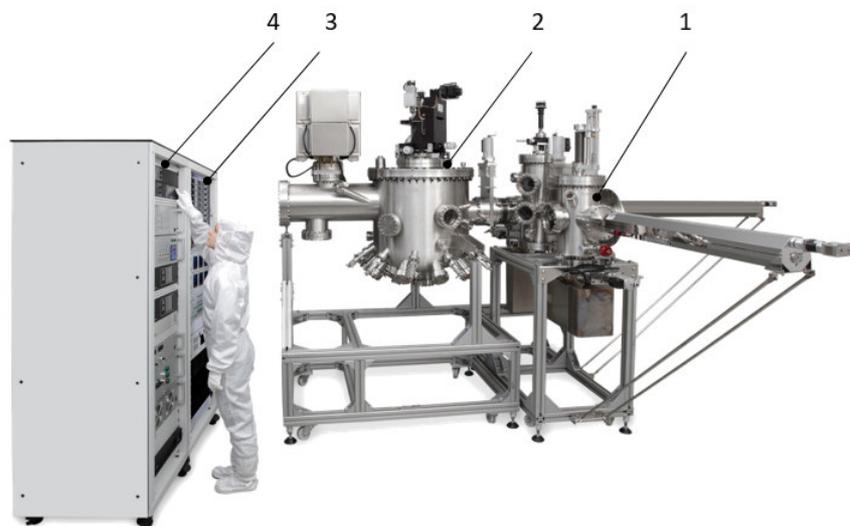
Всего в продуктовой портфеле компании представлено 4 продуктовые линейки специального технологического оборудования:

1. Системы для молекулярно-лучевой эпитаксии (сокр. МЛЭ, серия STE);
2. Установки электронно-лучевого и магнетронного напыления (серии STE EB, STE MS);
3. Установки плазмохимических процессов травления и осаждения (серия STE ICP);
4. Установки быстрого термического отжига (серии STE RTA, STE RTP).

Начало работы с чрезвычайно сложными, с производственной точки зрения, системами МЛЭ в компании началось в 2001 году после накопленного в 90-е годы огромного опыта эксплуатации и глубокой модернизации установок, производившихся в бывшем СССР. Первая установка МЛЭ собственной разработки ЭПНЗ, предназначенная для высокотемпературной эпитаксии нитридов III группы, была выпущена уже спустя 2 года. Тем не менее, на завершение испытаний экспериментального образца и запуск в производство серии нитридных установок STE3N2, ушло ещё несколько лет. Серийный выпуск установок STE3N2 стартовал в 2005 году, с тех пор реализован целый ряд поставок, в т.ч. на экспорт. В 2007-2008 гг. линейка оборудования МЛЭ была расширена за счёт разработки первого поколения установок для эпитаксии традиционных материалов А3В5 (STE3532). В 2009 году на её основе был разработан и изготовлен первый двухреакторный комплекс STE3526, сконфигурированный для выращивания гибридных наногетероструктур  $A^3B^5/A^2B^6$  и успешно эксплуатирующийся специалистами ФТИ им. А.Ф.Иоффе.

В 2014-2015 году, с учётом накопленного опыта эксплуатации поставленных заказчикам установок МЛЭ, ЗАО «НТО» была завершена разработка и комплексное тестирование системы

МЛЭ STE35 нового поколения для роста материалов АЗВ5 на подложках до  $\varnothing 100$  мм. Новая система обеспечивает получение приборных гетероструктур на пластинах  $\varnothing 2", 3", 100$  мм, а также  $3 \times 2"$  в одном процессе. (рис. 1). Система нового поколения получила новую ростовую камеру и целый ряд заново разработанных ключевых узлов.



*Рис.1. Установка молекулярно-лучевой эпитаксии STE35.*

*1- Стойка подготовки (включает камеру шлюза и камеру предварительной подготовки);  
2 - Стойка камеры роста; 3 - Стойка контроля; 4- Стойка управления.*

Ростовая камера новой конструкции показана на рис.2. В рамках разработки камеры нового поколения было решено несколько ключевых задач:

- а) уменьшено количество портов для подачи азота. Теперь для удобства обслуживания все они расположены на крышке камеры;
- б) две криопанели в камере были объединены в единую для повышения эффективности потребления жидкого азота;
- в) увеличено количество портов с заслонками для установки источников материалов, что очень удобно в использовании и увеличивает рабочий цикл до регламентного вскрытия установки с целью дозагрузки ростовых материалов;
- г) появилась возможность визуального контроля всех источников и заслонок за счет увеличения количества смотровых окон.



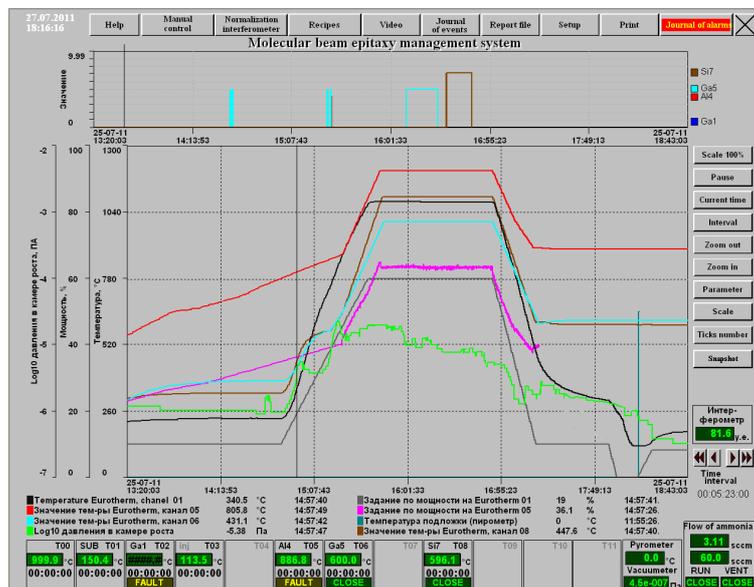
*Рис. 2. Ростовый реактор системы МЛЭ STE35 нового поколения.*



*Рис.3. Камера подготовки системы МЛЭ STE35 нового поколения.*

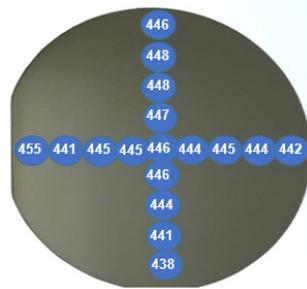
Все ключевые узлы разработаны в собственном конструкторском бюро ЗАО «НТО». В компании на протяжении нескольких лет продолжается активная работа по дополнительной локализации производства узлов и систем, позволяющих импортозаместить критически важные позиции при выпуске продуктовой линии компании.

Установка МЛЭ STE35 комплектуется специально разработанной системой управления процессом эпитаксиального роста (рис. 4). Поставка установки сопровождается демонстрацией базовых технологических процессов, а персонал заказчика проходит обязательное обучение по работе с системой.



*Рис. 4. Скриншот основного рабочего окна системы управления процессом эпитаксиального роста установки STE35.*

Результаты тестирования STE35, проведённого совместно со специалистами ЗАО «Светлана-Рост» (Санкт-Петербург) – однородность слоевого сопротивления по площади модельной рНЕМТгетероструктуры, выращенной на подложке GaAs диаметром 100мм, представлены на рис. 5. Данный результат в сочетании с хорошими результатами дальнейшего приборного тестирования подтверждает высокий потенциал использования разработанной установки для производства гетероструктур приборного качества для СВЧ-применений.



*Рис. 5. Карта измерений слоевого сопротивления pHEMT структуры на подложке GaAs Ø100мм (Ом/□).*

Несмотря на успешное производственное и технологическое тестирование системы STE35, специалисты ЗАО «НТО» отмечают, что сегодня производительность данных машин уже недостаточна для обеспечения возрастающих потребностей российских предприятий в эпитаксиальном материале, прежде всего речь о GaAs и СВЧ-применениях. Сейчас в России необходимо отечественное оборудование средней производительности (1x150мм, 3xØ3”, а также, в перспективе, 3xØ100мм в одном процессе). Аналогичный прогноз потребностей отечественных производителей и разработчиков ЭКБ в оборудовании для МЛЭ на пластинах диаметром до 150мм представлен и в Стратегической программе исследований технологической платформы «СВЧ технологии». (рис.6). При этом, особенность российского рынка радиоэлектроники состоит в том, что большинство игроков сконцентрировано на изделиях специальной техники, а не на массовом выпуске ЭКБ для коммерческой электроники. Разработка оборудования МЛЭ увеличенной производительности должна проводиться на других принципах, нежели это принято у зарубежных коллег. Установка должна обеспечивать выращивание гетероструктур на подложках указанных диаметров и при этом быть более компактной и гораздо более эффективной в части расхода дорогостоящих сверхчистых ростовых материалов.

Основные ТТХ	Достижимые значения параметров		
	2011 г.	2015 г.	2020 г.
<i>Характеристика технологического базиса твердотельной СВЧ электроники</i>			
Материалы	материалы группы A <sub>3</sub> B <sub>5</sub> , A <sub>2</sub> B <sub>6</sub>	материалы группы A <sub>3</sub> B <sub>5</sub> , A <sub>2</sub> B <sub>6</sub>	материалы группы A <sub>3</sub> B <sub>5</sub> , A <sub>2</sub> B <sub>6</sub> , алмаз
Технология	HEMT, HBT	LD MOS, SIT, HEMT, HBT	LD MOS, SIT, HEMT, HBT
Эпитаксия	MOCVD, МЛЭ	MOCVD, МЛЭ	MOCVD, МЛЭ
Диаметр пластин, мм	75-100	100-150	100-150
Топологическое разрешение, мкм	0.15 0.1	0.1 0.07	0.1 0.07

*Рис.6. Характеристика технологического базиса твердотельной СВЧ электроники.*

Задача создания импортозамещающего аналога производственно-ориентированной установки МЛЭ является, таким образом, актуальной и важной для обеспечения технологической безопасности РФ. Разработка такой сложности потребует дальнейшего углубления кооперации с производителями ЭКБ. Сегодня активно ведется дискуссия о необходимости перехода к формату «foundry» на отечественных производствах ЭКБ, а также необходимости создания гибких кластерных систем и минифабов. В любом из обсуждаемых сценариев развития отрасли потребность в высококачественных гетероструктурах на основе материалов A<sub>3</sub>B<sub>5</sub> будет возрастать, также, как и увеличение их рабочего диаметра. Для отрасли сейчас важно, чтобы данная проблематика нашла отражение в разрабатываемой Минпромторгом «Стратегии радиоэлектронной промышленности до 2030 года» в части «Программы развития полупроводниковых и опто-фотоэлектронных приборов». Грамотно сформированная стратегия позволит разработчикам оборудования правильно распределить собственные ресурсы и предложить пользователям оборудование МЛЭ с новыми производственными возможностями именно тогда, когда оно будет востребовано для решения перспективных и критически важных задач.