

**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ
МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ****Лукьянов В. В., студент**

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук, доцент Щербакова Е. Н.

Аннотация. Настоящая работа включает краткий литературный обзор, в котором систематизированы сведения о современном уровне развития метода молекулярно-лучевой эпитаксии и обозначены его наиболее значимые перспективы.

Молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) представляет собой высокоточную модификацию классической технологии вакуумного напыления, ключевым отличием которой является прецизионный контроль всех стадий процесса. Данный метод основан на осаждении монокристаллических слоев на нагретую подложку путем взаимодействия молекулярных или атомных пучков с ее поверхностью. Нагревание подложки интенсифицирует поверхностную миграцию атомов, обеспечивая их упорядоченное размещение в узлах кристаллической решетки. Это обуславливает эпитаксиальный рост – ориентированное наращивание пленки на монокристаллической подложке. Критическими параметрами для успешной эпитаксии являются степень соответствия постоянных решеток пленки и подложки, точно выверенные интенсивности молекулярных пучков и температурный режим подложки. Проведем краткий обзор современных источников литературы по состоянию и перспективам развития МЛЭ.

Авторы [1] детально анализируют прогресс в технологии МЛЭ для создания квантовых точек с управляемыми параметрами. Особое внимание уделяется методам контроля размеров и плотности точек для применения в лазерах и однофотонных источниках.

В статье [2] рассматриваются передовые методы *in-situ* диагностики, такие как рефлексия быстрых электронов и масс-спектрометрия, при выращивании нитридных гетероструктур. Подчеркивается важность реального контроля для точного управления составом и свойствами слоев в мощной электронике и светодиодах. Источник [3] посвящен применению МЛЭ для создания структур на основе нитрида галлия и карбида кремния. Отмечается, что метод позволяет достичь высокого качества эпитаксиальных слоев, необходимого для производства мощных высокочастотных транзисторов. Авторы [4] демонстрируют, как алгоритмы машинного обучения позволяют оптимизировать сложные взаимосвязи между параметрами роста МЛЭ. Показано, что это значительно сокращает время эмпирического подбора условий и улучшает воспроизводимость структур. В обзоре [5] описываются современные многомодульные установки МЛЭ, в которые напрямую встроены аналитические инструменты. Статья [6] освещает сложности и последние достижения в области легирования широкозонных полупроводников (таких как GaN и ZnO) примесями р-типа. Описываются новые легирующие источники и методы активации примесей, позволяющие повысить концентрацию дырок. Авторы [7] исследуют возможности МЛЭ для выращивания высококачественных пленок топологических изоляторов. Показано, что контроль на атомарном уровне критически важен для проявления их уникальных поверхностных свойств, перспективных для спинтроники. Исследование [8] фокусируется на использовании методов, основанных на дифракции быстрых электронов, падающих под скользящим углом на поверхность объекта, для мониторинга в реальном времени процесса самоорганизованного образования квантовых точек. Детально анализируется, как изменения в дифракционной картине позволяют точно управлять моментом начала и режимом роста наноструктур.

Обзор [9] посвящен прорывам в области выращивания гетероструктур из двумерных материалов (например, графен/гексагональный нитрид бора) методом МЛЭ. Подчеркивается потенциал таких искусственно созданных ван-дер-ваальсовых гетероструктур для создания устройств квантовой обработки информации. Проведенный анализ позволяет выделить несколько ключевых направлений, определяющих будущее технологии молекулярно-лучевой эпитаксии:

1. Переход от эмпирического к цифровому и прогнозному выращиванию. Развитие направлено на глубокую интеграцию систем искусственного интеллекта и машинного обучения для анализа данных *in-situ* диагностики в реальном времени.

2. Создание гетероструктур с атомарной точностью и новыми функциональными свойствами. Перспектива заключается в комбинировании ранее несовместимых материалов (например, различных полупроводниковых соединений III–V, II–VI с оксидами) для создания гибридных гетероструктур.

3. Расширение областей применения за пределы исследовательских лабораторий: производство сложных многослойных структур для:

– Силовой электроники: мощные транзисторы (HEMT) для 5G/6G коммуникаций и электромобилей.

– Квантовых технологий: выращивание структур для кубитов и однофотонных излучателей.

– Микроэлектроники: создание основ для транзисторов следующего поколения, а также интеграция МЛЭ в существующие КМОП-техпроцессы.

Таким образом, эволюция МЛЭ движется в сторону создания полностью автоматизированных, «интеллектуальных» фабрик по производству сложнейших гетероструктур с атомарной точностью, что откроет новые возможности в микро-, опто- и квантовой электронике.

Список использованных источников

1. Черняев, В. В. Современные тенденции в молекулярно-лучевой эпитаксии квантовых точек для оптоэлектронных применений / В. В. Черняев, Е. С. Лазарева // Физика и техника полупроводников, 2023. – Т. 57, № 2. – С. 115–128.

2. Orlov, D. A. In-situ monitoring and control in molecular beam epitaxy of III-nitride heterostructures / D. A. Orlov, A. V. Novikov // Journal of Vacuum Science & Technology A. – 2023. – Vol. 41, № 3. – P. 033406.

3. Кузнецов, П. И. Молекулярно-лучевая эпитаксия широкозонных полупроводников для мощной электроники / П. И. Кузнецов, А. А. Григорьев // Письма в ЖТФ. – 2022. – Т. 48, № 16. – С. 45–52.

4. Wang, X. Machine learning approaches for optimization of molecular beam epitaxy growth parameters / X. Wang, L. Zhang // Applied Surface Science. – 2023. – Vol. 607. – P. 155028.

5. Сидоров, А. А. Современные установки молекулярно-лучевой эпитаксии с интегрированной аналитикой / А. А. Сидоров, М. И. Петров // Приборы и техника эксперимента, 2022. – № 5. – С. 78–85.

6. Tanaka, S. Advances in p-type doping of wide bandgap semiconductors by molecular beam epitaxy / S. Tanaka, K. Yamamoto // Materials Science in Semiconductor Processing. – 2023. – Vol. 154. – P. 107205.