

ПОВЫШЕНИЕ И КОНТРОЛЬ РАВНОМЕРНОСТИ ЭПИТАКСИАЛЬНОГО РОСТА ТОНКИХ ПЛЕНОК В СВЕРХВЫСОКОВАКУУМНОМ АНАЛИТИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ

Разработана математическая модель сложных перемещений исполнительного устройства автоматизированного сверхвысоковакуумного аналитико-технологического оборудования, позволяющая управлять и контролировать равномерность эпитаксиального роста тонких пленок в целях ее повышения. Представлены технологические преимущества l -координатных исполнительных устройств в сравнении с планетарными компоновками и основные пути повышения равномерности получения тонких пленок в вакууме.

The mathematical model of difficult moving of an actuation mechanism of the automated superhigh vacuum analytic-process equipment is developed, allowing to control and inspect uniformity of epitaxial growth of thin films for the purpose of its rise. Technological advantages l -coordinate actuation mechanisms in comparison with planetary arrangements and the main paths of rise of uniformity of reception of thin films in vacuum are presented.

Ключевые слова: эпитаксиальный рост, l -координатное исполнительное устройство, аналитико-технологическое оборудование, поток испаряемого вещества, тонкие пленки.

Key words: epitaxial growth, l -coordinate actuation mechanism, the analytical-process equipment, stream of evaporated substance, thin films.

Повышение эксплуатационных характеристик оборудования для производства изделий электронной техники достигается за счет применения l -координатных исполнительных устройств [1].

Кинематические возможности l -координатных исполнительных устройств на шесть степеней подвижности позволяют эффективно использовать их в сверхвысоковакуумном аналитико-технологическом оборудовании эпитаксиального роста тонких пленок [2]. Исходными предпосылками при разработке математической модели сложных перемещений l -координатного исполнительного устройства для процесса эпитаксиального наращивания являются следующие:

1) поток испаряемого вещества и связанная с ним толщина слоя конденсата на поверхности неподвижной подложки подчиняются закону Кнудсена;

2) временная нестабильность испарителя достаточно мала, и поэтому скорость эпитаксиального роста вещества в любой точке подложки считается постоянной во времени;

3) миграция атомов на поверхности подложки и вторичное их испарение с поверхности подложки незначительно.

С учетом приведенных предпосылок рассмотрим движение исполнительного устройства, изображенного на рис. 1. Введем две системы координат — неподвижную $O\xi\zeta$ и подвижную систему координат O_lxyz ,

связанную с подложкой M . Точка O_1 совпадает с центром тяжести подложки M .

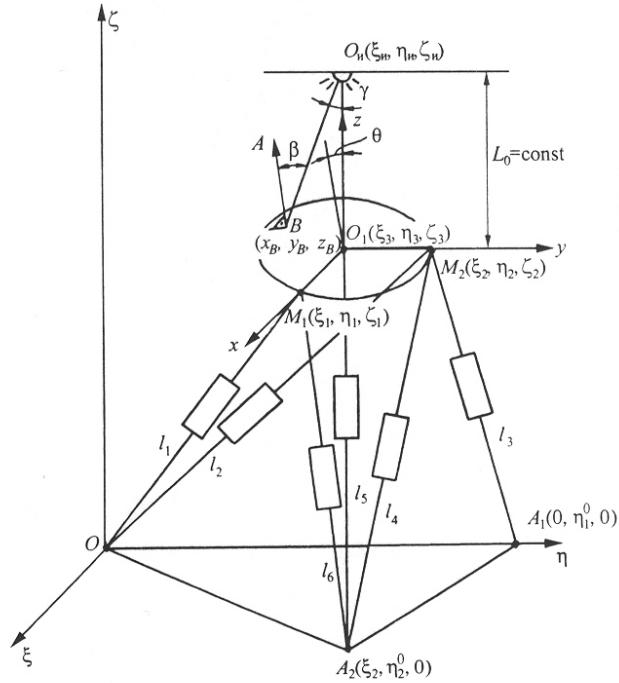


Рис. 1. Схема исполнительного устройства для автоматизированного оборудования эпитаксиального роста тонких пленок

В точке $O_i(\xi_i, \eta_i, \zeta_i)$ находится испаритель, при работе которого вещество осаждается на подложку со скоростью

$$v = \frac{\mu \cos\beta \cos\gamma}{\pi j L^2},$$

где μ – поток вещества, г/с; β – угол между направлением луча испарителя, соединяющего точку O_i и элементарную площадку, и нормалью к поверхности элементарной подложки; γ – угол между направлением луча испарителя, соединяющего точку O_i и элементарную площадку, нормально расположенную к поверхности испарения; j – плотность осаждаемого вещества, г/см³; L – расстояние от испарителя до элементарной площадки, см.

Толщина наращиваемого слоя на подложке в точке с координатами x_B, y_B, z_B в зависимости от промежутка времени Δt определяем по формуле

$$\Delta\delta(x_B, y_B, z_B, t) = v(L, \beta, \gamma)\Delta t.$$

В целом, за время τ

$$\delta(x_i, y_j, z_k, t) = \frac{\mu}{4\pi j} \int_0^t \frac{\cos\beta(x_i, y_j, z_k, t) \cos\gamma(x_i, y_j, z_k, t)}{L^2(x_i, y_j, z_k, t)} dt.$$

Координаты точки x_i, y_j, z_k подложки в неподвижной системе координат можно записать

$$\xi_B = \xi_i + x_B (\cos\psi \cos\phi - \cos\theta \sin\psi \sin\phi) + y_B (-\cos\psi \sin\phi - \cos\theta \sin\psi \cos\phi) + z_B \sin\theta \sin\psi,$$

$$\eta_B = \eta_i + x_B (\sin\psi \cos\phi + \cos\theta \cos\psi \sin\phi) + y_B (-\sin\psi \sin\phi + \cos\theta \cos\psi \cos\phi) - z_B \sin\theta \cos\psi,$$

$$\zeta_B = \zeta_i + x_B \sin\theta \sin\phi + y_B \sin\theta \cos\phi + z_B \cos\theta.$$

Добавим к этим трем выражениям кинематические уравнения Эйлера, отражающие зависимость между проекциями угловой скорости на соответствующие оси подвижной системы координат x, y, z углами Эйлера ϕ, ψ, θ и их производными во времени:

$$w_x = \dot{\psi} \sin\theta \sin\phi + \dot{\theta} \cos\phi;$$

$$w_y = \dot{\psi} \sin\theta \cos\phi - \dot{\theta} \sin\phi;$$

$$w_z = \dot{\psi} \cos\theta + \dot{\phi}.$$

При этом угол β определяется из скалярного произведения двух векторов

$$\bar{n}(\xi_A - \xi_B, \eta_A - \eta_B, \zeta_A - \zeta_B) \text{ и} \\ \bar{L}(\xi_i - \xi_B, \eta_i - \eta_B, \zeta_i - \zeta_B);$$

$$\cos\beta = \frac{\bar{n} \cdot \bar{L}}{|\bar{n}| |\bar{L}|} = \frac{(\xi_A - \xi_B)(\xi_i - \xi_B) + (\eta_A - \eta_B)(\eta_i - \eta_B) + (\zeta_A - \zeta_B)(\zeta_i - \zeta_B)}{\sqrt{(\xi_A - \xi_B)^2 + (\eta_A - \eta_B)^2 + (\zeta_A - \zeta_B)^2} \sqrt{(\xi_i - \xi_B)^2 + (\eta_i - \eta_B)^2 + (\zeta_i - \zeta_B)^2}}.$$

Угол γ определяется

$$\cos\gamma = \frac{\zeta_i - \zeta_B}{L},$$

где

$$L = \sqrt{(\xi_i - \xi_B)^2 + (\eta_i - \eta_B)^2 + (\zeta_i - \zeta_B)^2}.$$

Текущие значения длин тяг (см. рис. 1) находят по формулам:

$$l_1 = \sqrt{\xi_1^2 + \eta_1^2 + \zeta_1^2};$$

$$l_2 = \sqrt{\xi_2^2 + \eta_2^2 + \zeta_2^2};$$

$$l_3 = \sqrt{\xi_3^2 + (\eta_2 - \eta_1^0)^2 + \zeta_2^2};$$

$$l_4 = \sqrt{(\xi_2 - \xi_2^0)^2 + (\eta_2 - \eta_2^0)^2 + \zeta_2^2};$$

$$l_5 = \sqrt{(\xi_3 - \xi_2^0)^2 + (\eta_3 - \eta_2^0)^2 + \zeta_3^2};$$

$$l_6 = \sqrt{(\xi_1 - \xi_2^0)^2 + (\eta_1 - \eta_2^0)^2 + \zeta_1^2}.$$

Решая последнее уравнение компьютерным методом, получим циклограмму изменения l_i .

Характер распределения наращиваемого слоя материала по поверхности подложки представлен на рис. 2 для случая неизменности угла нутации θ и при его изменении. При выборе правильного закона распределения разнотолщинность не превышает 7 %.

На рис. 3 представлена схема автоматизированной установки молекулярно-пучковой эпитетаксии, на которой реализована математическая модель сложных перемещений. Основные функции l -координатного исполнительного устройства:

1) захват подложки с передающего манипулятора;

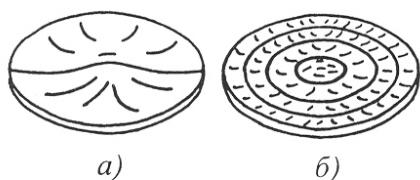


Рис. 2. Характер распределения полученного слоя материала на поверхности подложки:
а – без изменения угла нутации; б – при изменении угла нутации

- 2) перенос подложки в зону эпитаксиального роста;
- 3) выполнение сложного движения в целях повышения равномерности роста.

С учетом того что толщина наращиваемого вещества на подложке в любой точке подложки с координатами x, y, z должна быть величиной постоянной, на ЭВМ получены выражения для текущих значений l_i , по которым также ведется контроль процесса.

В относительных единицах текущие значения длины тяг l_i при заданном угле нутации θ и угле прецессии $\theta \leq \psi \leq 2\pi$ имеет вид, показанный на рис. 4.

Для создания такого сложного движения используются шаговые двигатели с системой управления временными интервалами между шагами.

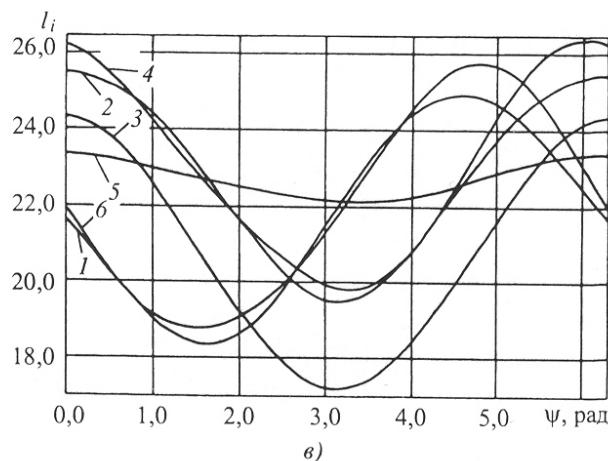
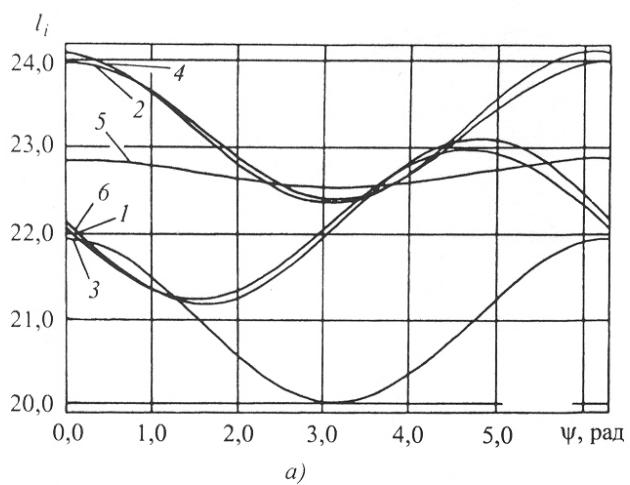


Рис. 4. Текущие значения длин тяг l_i при угле нутации:
а – $\theta = \pi/16$; б – $\theta = \pi/8$;
в – $\theta = \pi/4$; кривые 1, ..., 6
соответствуют длинам тяг
 l_1, \dots, l_6 , мм

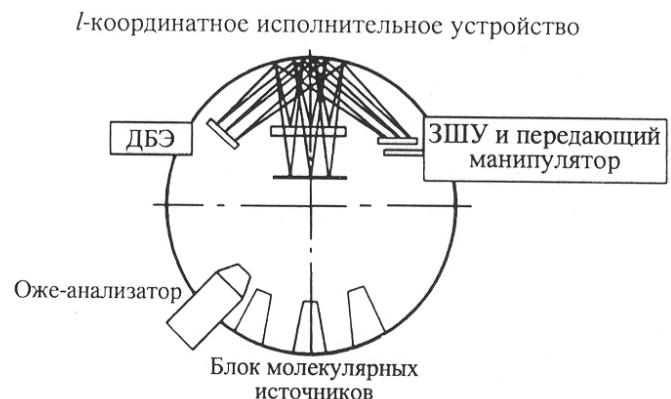
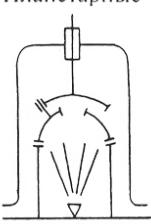
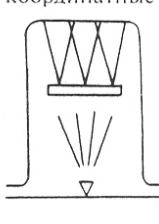


Рис. 3. Схема автоматизированной установки молекулярно-пучковой эпитаксии:
ДБЭ – дифрактометр быстрых электронов;
ЗШУ – загрузочное шлюзовое устройство

Технологические преимущества I -координатных исполнительных устройств по сравнению с обычными планетарными компоновками представлены в табл. 1.

С помощью I -координатных исполнительных устройств можно воспроизводить любой закон движения с любой заданной толщиной наращиваемого слоя, ис-

1. Технологические преимущества *l*-координатных исполнительных устройств автоматизированного сверхвысоковакуумного оборудования

| | Схемы компоновок | |
|---|---|---|
| | Планетарные | <i>l</i> -координатные |
| Основные показатели |  |  |
| Закон движения | Жесткий | Любой |
| Возможность управления технологическим процессом | Отсутствует | Существует |
| Основное назначение | Технологическая обработка | Транспортировка, технологическая обработка, аналитические исследования |
| Количество одновременно загружаемых и обрабатываемых подложек | 6...16 | 6...16 |
| Основные источники привносимой дефектности в вакуумном объеме | Зубчатые пары, подшипники качения | Отсутствуют |
| Основное применение | Для быстротекущих процессов эпитаксиального роста тонких пленок | Для любых процессов эпитаксиального роста тонких пленок |
| Неравномерность по толщине | 10 % | 7 % |

ходя из заданного закона распределения его толщины при одновременном контроле процесса.

Наряду с перемещением подложкодержателя возможно также перемещение источника испаряемого материала по заданному закону движения, что также обеспечивается применением *l*-координатных исполнительных устройств.

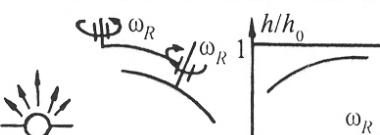
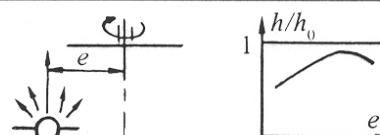
Как показано в работе [3], повышение и контроль равномерности эпитаксиального роста вещества можно осуществлять изменением: пространственно-временных характеристик потока массы; пространствен-

но-временных характеристик первичного энергопотока; функции распределения температуры по поверхности испарения; закона сканирования первичным потоком энергии по поверхности испарения; закона перемещения приемной поверхности относительно поверхности испарения.

Основные пути реализации этих возможностей представлены в табл. 2.

На основании исследований можно сделать вывод о целесообразности применения *l*-координатных исполнительных устройств.

2. Основные пути повышения равномерности получения тонких пленок в вакууме

| Способ | Управление потоком | | Конструктивное исполнение |
|---|--------------------|---------|--------------------------------|
| | массы | энергии | |
|  | | | Планетарное вращение подложек |
|  | | | Изменение положения испарителя |

| Способ | Управление потоком | | Конструктивное исполнение |
|--------|--------------------|---------|---|
| | массы | энергии | |
| | | | Введение корректирующей диафрагмы |
| | | | Изменение расстояния испаритель – подложка |
| | | | Сканирование первичным потоком энергии |
| | | | Изменение диаметра, фокусного пятна, плотности первичного тока |
| | | | Движение подложкодержателя по заданному закону посредством l-координатного исполнительного устройства |
| | | | Движение испарителя по заданному закону посредством l-координатного исполнительного устройства |

— есть; — нет; ω_R — угловая скорость вращения подложкодержателя; h — геометрическая толщина пленки по периферии подложкодержателя; h_0 — геометрическая толщина пленки в центре подложкодержателя; e — расстояние от испарителя до центра вращения подложкодержателя; R — радиус подложкодержателя; H_1 , H_2 , L_0 — расстояния от испарителя до подложки; q_1 — первичный поток энергии; γ_B — плотность сконденсированной пленки; l — длины тяг l-координатного устройства.

нительных устройств для повышения и контроля равномерности полученных тонких пленок в современном автоматизированном сверхвысоковакуумном аналитико-технологическом оборудовании.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ивашов Е.Н., Ляпин В.М., Некрасов М.И., Степанчиков С.В. Исполнительные устройства на основе l-координат для работы в условиях вакуума и чистых технологических средах / Технология материалов и средства автоматизации в

производстве изделий электронной техники. М.: МИЭМ, 1989. С. 50–53.

2. Ивашов Е.Н. Применение l-координатных исполнительных устройств в напылительном оборудовании / Автоматическое оборудование и технология производства изделий электронной техники. М.: МИЭМ, 1991. С. 33–37.

3. Производство тонкопленочных структур в электронном машиностроении: учеб. для вузов: в 2 т. Т. 1 / А.Т. Александрова, Е.Н. Ивашов, С.В. Степанчиков и др. М.: Машиностроение, 2006. 462 с.