

ДК 621.793.1

С.А. Воронов, д-р техн. наук, Л.Ю. Цыбульский

## Коллимация атомарных потоков индукционных испарителей для создания наноразмерных структур

Предложено использовать индукционный испаритель тигельного типа совместно с механическими коллиматорами и модуляторами атомных потоков для создания периодических наноструктур посредством фокусировки атомов матрицей линз стоячей волны лазерного излучения. Предложены оптимальные конструкции механических модуляторов и коллиматоров и рассмотрены варианты их применения для отбора атомов с заданной энергией.

Получены алгебраические выражения, описывающие закономерности работы механических коллиматоров и модуляторов, пригодные для конструирования и моделирования их работы.

Induction crucible-type evaporator with mechanical collimators and modulators of atom flows is suggested to use for creation of periodical nanostructures by atom focusing with a lens array and using of a standing laser wave. The optimal designs of mechanical modulators and collimators are offered, also, variants of its applications for sorting of different types of atoms are considered.

The algebraic expressions that described the operation of mechanical collimators and modulators are obtained. Its suitable for designing and simulating of these devices operation.

**Ключевые слова:** наноразмерные структуры, коллимация, модуляция, потоки атомов, испарение.

### Введение

В производстве наноразмерных структур, для формирования которых используют стоячие волны лазерного излучения [1], необходимы однородные потоки низкотемпературных моноэнергетических нейтральных атомов с параллельными траекториями. Потоки атомов с приемлемыми параметрами удаётся получить с помощью тигельного испарителя с индукционным нагревом, с последующей их коллимацией. При диаметре испаряющей поверхности испарителя, большем диаметра подложки, достигается высокая пространственная однородность потока, т.е. равномерная плотность атомов по всему сечению потока, что является условием одинаковой скорости роста наноструктур по

всей площади подложки. Тигельные испарители с индукционным нагревом обеспечивают одинаковую температуру по всей испаряющей поверхности за счёт теплопроводности и магнитного перемешивания расплава навески. В отличие от резистивных испарителей они не содержат перегретых токоведущих частей, которые являются источниками загрязнений и радиационного влияния на растущие структуры и технологическую оснастку. Электронно-лучевые испарители (ЭЛИ) также имеют ограничения к использованию. Взаимодействие электронного луча с поверхностью навески возбуждает рентгеновское излучение, которое нагревает оснастку и подложку, действует разрушающе на растущие наноструктуры. Излучение и сам электронный луч ионизируют испарённые атомы. Ионы, даже в незначительном количестве, существенно ухудшают вакуумные условия и разрушают наноструктуры.

Для обработки широких потоков атомов с означенными свойствами устройства атомной оптики не применимы. Современные лазерные охладители атомов работают с узкими потоками и повышают поперечную скорость атомов, т.е. расхождение потока. Лазерные коллиматоры повышают направленность потока, но при этом сужают его [2]. Для получения коллимации частота лазерного излучения  $\omega_L$  должна быть отстроена в красную область ( $\omega_L - \omega_0 = -13$  МГц) относительно частоты атомного перехода  $\omega_0$ . Соответственно для коллимации каждому типу атома должна подбираться своя частота лазерного излучения. К тому же, техническая реализация процессов лазерной коллимации и охлаждения весьма проблематична для промышленных устройств. Во-первых, необходимо согласовать работу нескольких сложных оптических устройств, что усложняет и технику и технологию. Во-вторых, остаются не решёнными задачи обеспечения пространственной однородности потока и моноэнергетичности атомов в потоке. В-третьих, для управления энергией атомов в потоке, что важно в условиях промышленного производства, тоже необходимо дополнительное устройство. В-четвёртых, на поверхностях оптических устройств во время работы будут оседать рассеянные атомы из парового потока, выводя их из рабочего состояния.

Все перечисленные проблемы устраняются применением тигельного испарителя с индукционным нагревом навески с последующей механической коллимацией и фильтрацией потока испарённых атомов (молекул). Оба процесса реализуются ограничением траекторий неподходящих атомов.

### 1. Коллимация атомных частиц в широких потоках

Согласно закону, установленному Кнудсеном, интенсивность испарённых частиц пропорциональна косинусу угла между нормалью к испаряющей поверхности и направлением испарения [3]. В направлении перпендикулярном испаряющей поверхности интенсивность испарения максимальна. Это направление и выбирают направлением потока. Угол  $\gamma$  максимального отклонения траекторий атомов у поверхности подложки от направления потока зависит от расстояния  $L$  между поверхностью испарения и подложкой (см. рис. 1), и определяется выражением

$$\operatorname{tg} \gamma = D / L,$$

где  $D$  – диаметр испаряющей поверхности

Например, для наибольшего отклонения траекторий атомов от направления потока с углом  $\gamma = 0,5^{\circ}$  на подложке диаметром 100 мм от источника диаметром 100 мм, расстояние необходимо задать  $L = 11,5$  м.

Для уменьшения расстояния между подложкой и источником атомов используют коллиматоры – механические ограничения в виде трубок, каналов, перегородок, меандров различного сечения. В этом случае наибольший угол отклонения от направления потока определяется высотой  $h$  и характеристическим размером ячейки  $d$  коллиматора:

$$\operatorname{tg} \gamma = d / h$$

Тогда, для  $\gamma = 0,5^{\circ}$ , справедливо соотношение  $h = 114,59 d$ . Для ячеек с характеристическим размером  $d = 10$  мм длина коллиматора составит  $h = 1,15$  м, и не зависит от диаметра подложки и испарителя.

Стенки коллиматора снижают однородность потока атомов. Для устранения этого недостатка толщина стенок должна быть предельно тонкой, а сам коллиматор должен перемещаться поперёк потока.

Доля молекул прошедших через коллиматор при  $\gamma = 0,5^{\circ}$  составит:

$$\xi = \sin^2 \gamma = 7,615 \times 10^{-5}.$$

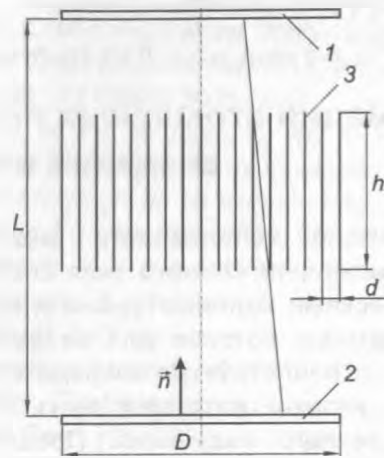


Рис. 1. Применение коллиматора: 1 – подложка; 2 – испаритель; 3 – коллиматор

### 2. Механическая фильтрация атомов в потоке

Распределение по скоростям испарённых атомов в потоке в любом направлении от поверхности испарения определяется законом Максвелла-Больцмана [3]:

$$dn_v = n 4\pi v^2 \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-\frac{mv^2}{2kT}} dv, \quad (1)$$

где  $dn_v$  – количество паровых частиц (атомов), скорость которых находится в пределах от  $v$  до  $v + dv$ ;  $T$  – температура испаряющей поверхности;  $m$  – масса испаряемых атомов (молекул);  $n$  – количество частиц испаряемых единичной поверхностью в единицу времени.

Для отсеивания из потока атомов с близкими скоростями удобно использовать механический модулятор, конструкция которого приведена на рис. 2. Такие устройства имеют несколько конкурирующих названий: обтюратор, коллиматор, фильтр.

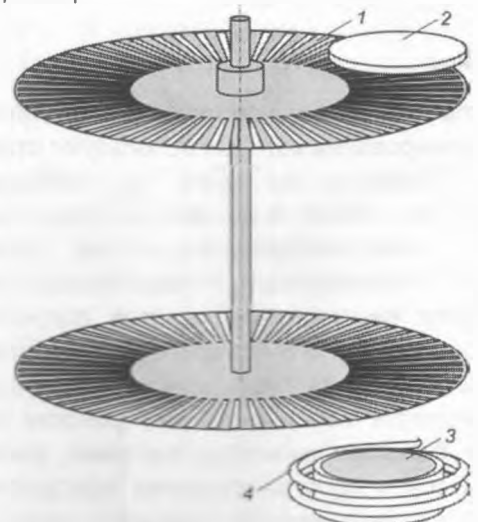


Рис. 2. Модулятор атомов парового потока: 1 – диск с отверстиями; 2 – подложка; 3 – испаряющая поверхность; 4 – индуктор

Выбирая ширину отверстий в диске модулятора расстояние между ними, относительное смещение дисков и скорость их вращения можно добиться пролёта атомов из тигля к подложке только с заданной скоростью. При выборе конструкции модулятора целесообразно ориентироваться на наиболее вероятную скорость молекул в потоке, которой соответствует максимум распределения (1), то есть наибольшая доля молекул в потоке:

$$v_{вер} = \sqrt{2kT / m} \tag{2}$$

где  $k$  - постоянная Больцмана;  $T$  - абсолютная температура;  $m$  - масса атома.

От температуры испаряющей поверхности зависит интенсивность потока паровых частиц и характер распределения частиц по скоростям. В табл. 1 приведены наиболее вероятные скорости атомов различных материалов при температуре испарения  $T=1700^{\circ}\text{C}$ .

Таблица 1. Параметры испарённых атомов

Материал	Атомная масса, а. е. м. (г/моль)	масса молекулы, кг $\times 10^{-26}$	наиболее вероятная скорость при $T=1700^{\circ}\text{C}$ , м/с
Li	6,941	1,153	2017
Ti	47,88	7,951	768,189
Sr	87,62	14,55	567,868
ZnSe	144,35	23,97	442,43

Основным критерием выбора температуры испарения является размер наноструктур на подложке. Объём наноструктур включает тысячи, а то и сотни атомов и для их формирования необходимы весьма малые потоки, низкие скорости испарения и, соответственно, пониженные температуры по сравнению с задачами микроэлектроники.

Частоту  $f$  вращения дисков и расстояние  $l$  между отверстиями в дисках модулятора, в зависимости от выбранной скорости атомов  $v$ , можно установить из выражения:

$$f = \frac{v \cdot l}{2\pi R \cdot h_M} \tag{3}$$

где  $R$  - радиус вращения;  $h_M$  - расстояние между дисками.

Количество отверстий в дисках модулятора целочисленное и выражение (3) преобразуется к следующему:

$$f = \frac{v}{g \cdot h_M} \tag{4}$$

где  $g = 2\pi R / l$  - число отверстий в диске модулятора.

На рис.3 приведены графики, полученные по зависимости (4), а в табл.2 приведены частоты вращения модулятора с 30 отверстиями на диске для наиболее вероятной скорости при температуре  $T=1700\text{ K}$ .

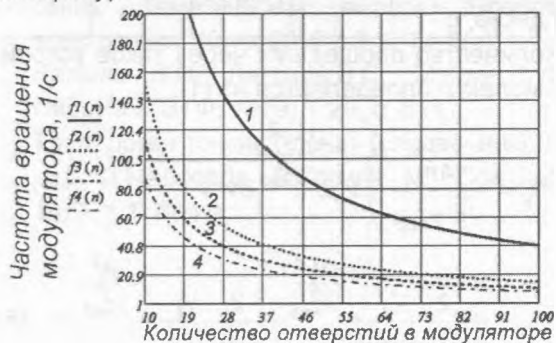


Рис. 3. Зависимость частоты вращения модулятора от количества отверстий на дисках для выделения атомов с наиболее вероятной скоростью при  $T=1700\text{ K}$  : 1 – Li, 2 – Ti, 3 – Sr, 4 – ZnSe

Отношение ширины отверстия к расстоянию между отверстиями на диске  $a/l$  определяет разброс прошедших молекул по скорости и пропускную способность модулятора. Динамическая ширина отверстия на периферии и внутри диска одинакова, так как зависит от круговой скорости перемещения.

Для определения диапазона скоростей молекул, которые прошли через модулятор из (4) получим следующие выражения:

- самые медленные молекулы

$$v_2 = \frac{2\pi \cdot r \cdot h_M \cdot f}{l + a} = \frac{g \cdot h_M \cdot f \cdot l}{l + a}$$

- наиболее быстрые молекулы

$$v_1 = \frac{2\pi \cdot r \cdot h_M \cdot f}{l - a} = \frac{g \cdot h_M \cdot f \cdot l}{l - a}$$

- средняя скорость молекул

$$v = g \cdot h_M \cdot f$$

где  $a$  - ширина отверстия на окружности радиуса  $r$ .

Конструкция модулятора, обеспечивающая наибольшую пропускную способность, представляет собой радиально расположенные наклонные перегородки. Схематически такая конструкция показана на рис.4.

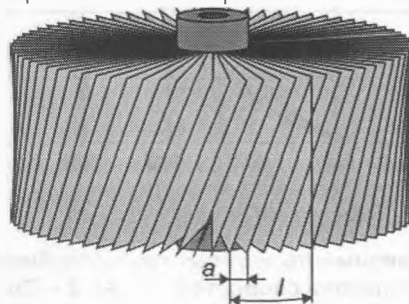


Рис. 4. Оптимальная конструкция модулятора:  $l$  - период расположения отверстий на диске;  $a$  - ширина отверстий

Таблица 2. Частота вращения дисков модулятора при 30 отверстиях на диске для наиболее вероятной скорости при  $T=1700\text{ K}$

Материал	Li	Ti	Sr	ZnSe
Частота вращения диска, $\text{с}^{-1}$	134,5	51,2	37,9	29,5

Количество прошедших через такое устройство молекул определяется из (1):

$$n_v = \frac{4n}{\sqrt{\pi} \cdot v_{\text{вер}}^3} \int_{v_1}^{v_2} v^2 e^{-\frac{v^2}{v_{\text{вер}}^2}} dv =$$

$$= n \left( \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{v_2}{v_{\text{вер}}} e^{-\frac{v_2^2}{v_{\text{вер}}^2}} - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{v_1}{v_{\text{вер}}} e^{-\frac{v_1^2}{v_{\text{вер}}^2}} + \right. \quad (5)$$

$$\left. + \operatorname{erf}\left(\frac{v_2}{v_{\text{вер}}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{v_1}{v_{\text{вер}}}\right) \right).$$

Предельные скорости  $v_1$  и  $v_2$  удобно выразить через отклонение относительно рабочей скорости атомов:

$$v_1 = (1-b)v_{\text{вер}}, \quad v_2 = (1+b)v_{\text{вер}},$$

где  $b$  - предельное отклонение от рабочей скорости молекул, отн. ед. Тогда из (5):

$$n_v = n \left( \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left( (1+b)e^{-(1+b)^2} - (1-b)e^{-(1-b)^2} \right) + \right. \quad (6)$$

$$\left. + \operatorname{erf}(1+b) - \operatorname{erf}(1-b) \right).$$

На рис. 5 показан график функции (6) при испарении различных металлов. График показывает количество в потоке испарённых атомов со скоростями от  $v_1 = (1-b)v_{\text{вер}}$  до  $v_2 = (1+b)v_{\text{вер}}$ , в зависимости от величины отклонения скорости  $b$ . Отклонение  $b$ , в свою очередь, задаётся параметрами модулятора. Свойства металлов и температура испарителя приведены в табл. 3.



Рис. 5. Зависимость количества испарённых атомов от диапазона скоростей: 1 – Al; 2 – Cu; 3 – Cr; 4 – In

Зависимость (6) позволяет оценить технологические условия получения наноразмерных

структур. Например, количество молекул Al со скоростями, отличающимися от наиболее вероятной на  $\pm 2\%$  ( $b=0,02$ ), согласно графику составит  $n_v = 2,3 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1} = 2,3 \cdot 10^5 \text{ мкм}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

Таблица 3. Свойства некоторых металлов

Свойство	Al	Cr	Cu	In
Температура, К	1480	1665	1545	1361
Скорость испарения вещества, $\text{кг}/(\text{м}^2 \text{с}) \times 10^{-3}$	0,79	1	1,2	1,7
Масса молекулы, $\text{кг} \times 10^{-26}$	4,8	9,29	10,55	19,07
Скорость испарения атомов, $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1} \times 10^{20}$	165	108	114	86

При периоде матрицы линз стоячей волны лазерного излучения в  $0,2 \text{ мкм}$ , на  $1 \text{ мкм}^2$  приходится 25 линз, а на одну линзу  $n_v = 9,2 \cdot 10^3$  атомов.

Доля молекул прошедших через коллиматор при отклонении от параллельности траекторий не больше  $\gamma = 0,5^\circ$  составляет  $\xi = \sin^2 \gamma = 7,615 \times 10^{-5}$ . Тогда за 10 секунд через одну линзу пройдёт  $n_v \cdot \xi = 7$  атомов.

Алюминий формирует кубическую гранецентрированную решётку с базовым вектором  $a=4,050 \text{ \AA}$ . Идеальную структуру  $4 \times 4 \times 4 \text{ нм}^3$  образуют 4631 атом. При температуре испарения  $1480 \text{ K}$  наноструктура алюминия с такими габаритами сформируется за 6616 с (110 минут). При температуре испарения  $1700 \text{ K}$  поток атомов алюминия возрастает приблизительно в 18 раз и длительность формирования структуры уменьшается до 6 минут.

## Выводы

Использование индукционных тигельных испарителей совместно с механическими модуляторами позволяет решить ряд технических и технологических задач для промышленного производства наноструктур методами лазерного фокусирования нейтральных атомов

- обеспечение пространственной однородности потока по всему сечению, что позволяет значительно увеличивает площадь подложки, на которой создаются наноструктуры. Размер подложки ограничен только техническими возможностями создания испарителя атомов.

- простое управление энергией частиц на подложке. Это позволяет управлять размерами

растущих наноструктур и энергетическими условиями их роста.

- обеспечение малого разброса атомов по энергиям в потоке.

- значительное упрощение конструкции и эксплуатации коллиматоров и модуляторов атомного потока.

Получены алгебраические выражения, описывающие закономерности работы механических коллиматоров и модуляторов, пригодные для конструирования и моделирования их работы.

Предложены оптимальные конструкции механических модуляторов и коллиматоров и рассмотрены варианты их применения для атомов различного типа

—ациональный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт»

## Литература

1. *Воронов С.А., Цыбульский Л.Ю.* Использование пучков нейтральных атомов в нанотехнологиях. Часть 2. Атомная литография // Электроника и связь Тематический выпуск "Проблемы электроники", Киев, 2007, ч.3, с. 13-18.
2. *Балыкин В.И., Летохов В.С., Мишин В.И.* // Письма ЖЭТФ. 1979 Т.29. с. 614
3. *Технология тонких плёнок (справочник).* Под ред Л Майссела, Р Глэнга. М., Сов радио, 1977, т.1, 664 с.