

УДК 621.382-181.4.774.002.5

Расчет взаимного расположения молекулярных источников и подложки в молекулярно-пучковой эпитаксии. Филаретов А.Г., Цырлин Г.Э. // Научное приборостроение. Физика аналитических приборов. Л.: Наука, 1989. - С. 59-63.

Предложена методика расчета взаимного расположения молекулярных источников и подложки в ростовой камере установки молекулярно-пучковой эпитаксии для выращивания соединений  $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$ . Рассмотрены принципы расположения источников для материалов Ш, У и легирующих групп. Лит. - 8 назв., ил. - 3.

РАСЧЕТ ВЗАИМНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ИСТОЧНИКОВ  
И ПОДЛОЖКИ В МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВОЙ ЭПИТАКСИИ

Современное развитие метода молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) привело к тому, что он вышел за рамки применения в фундаментальных исследованиях роста кристаллов и становится технологическим способом создания полупроводниковых приборов с прецизионными свойствами. Для приборной технологии существенно, чтобы электрофизические свойства выращенных слоев были постоянны по всей площади обрабатываемой пластины, что, в свою очередь, определяется следующими факторами: равномерной по поверхности образца толщиной растущего слоя; постоянным по площади уровнем легирования; одинаковыми по всей поверхности образца условиями роста кристалла.

Как известно, метод МПЭ представляет собой процесс выращивания слоев кристаллов в условиях сверхвысокого вакуума при взаимодействии молекулярных пучков с поверхностью подложки, нагретой до определенной температуры. Тем самым все условия роста (за исключением температурного поля нагревателя образца) определяются исключительно взаимным расположением молекулярных источников и подложки.

Существует ряд работ, в которых рассматривались диаграмма направленности молекулярного источника [1] и метод оценки неравномерности слоя [2], а также частный случай расчета неравномерности роста нелегированного  $GaAs$  [3]. Однако их общим недостатком для практического применения является отсутствие метода, который позволил бы провести полный расчет взаимного расположения молекулярных источников и подложки.

В статье предложен метод расчета расположения источников в ростовой камере установки МПЭ для получения пленок соединений  $A^{III}B^V$  с заданными коэффициентом неравномерности и неоднородности легирования на вращающейся подложке (неперспективность в общем случае неподвижного образца выявлена, в частности, в работе [3]).

## О п и с а н и е м е т о д а М П Э

Феноменологическая модель процесса МПЭ-роста кристаллов сводится к описанию взаимосвязи таких параметров, как температура подложки, скорости поступления материалов на поверхность, коэффициента прилипания. В предложенном методе учитывалось, что физические процессы, происходящие при взаимодействии с поверхностью элементов III, V и легирующих групп, несут разную функциональную нагрузку, хотя и коррелируют друг с другом.

Скорость и неравномерность роста в методе МПЭ определяются скоростью поступления элементов III группы, начиная с некоторого соотношения потоков элементов III и

У групп. Это связано с тем, что коэффициент прилипания металлов при типичных для МПЭ температурах подложки равен единице. Экспериментально установлено, что диффузионные длины для элементов III группы на поверхности GaAs не превышают одного микрона, поэтому атомы металлов, поступившие на подложку, стали считаться неподвижными [4].

В процессе МПЭ-роста для легирования наиболее широко применяются материалы, у которых коэффициент прилипания равен (либо близок) к единице. При этом их потоки имеют плотность на 3-4 порядка меньше, чем у основных металлов.

По-другому обстоит дело с материалами V группы. Характерная их особенность состоит в том, что в этом случае коэффициент прилипания сильно зависит от заселенности поверхности атомами металлов и может находиться в диапазонах от 0 до 1 для двухатомных и от 0 до 0,5 для четырехатомных молекул (в частности, для мышьяка [5]). Расчет производился на основании диаграммы направленности кругового молекулярного источника. Интенсивность потока из источников определялась по формуле:

$$I = 1,118 \cdot 10^{22} \frac{\kappa \tau^2}{L^2} \frac{P(T)}{\sqrt{\mu T}} \cos \Theta \cdot C\left(\frac{L}{2\tau}, \Theta\right),$$

где  $\tau$  - радиус источника;  $L$  - расстояние от апертуры тигля до подложки по оси источника;  $\Theta$  - угол между осью источника и нормалью к плоскости образца;  $T$  - температура в тигле;  $\mu$  - молекулярная масса испаряемого (сублимирующего) материала;  $P(T)$  - давление в тигле;  $C\left(\frac{L}{2\tau}, \Theta\right)$  - коэффициент, учитывающий опустошение тигля [1].

Эмпирическая зависимость давления от температуры в этом уравнении имеет вид

$$P(T) = 10 \left( \frac{A}{T} + B \lg T - C \right),$$

где  $A, B, C$  - коэффициенты, характерные для каждого материала. Значения коэффициентов  $A, B, C$ , рассчитанные на основании экспериментальных данных работы [6], приведены в таблице:

	A	B	C
Ga	-11021,9	7	15,42
As <sub>4</sub>	-8401,75	-5,1	-27,38
Al	-16620,2	-2,14	-16,45
Be	-15866,3	2,16	-1,89
Si	-25332,3	-10,26	-46,7

Взаимное расположение источников и подложки определялось тремя геометрическими параметрами:  $X, Y, \Theta$  (рис.1). Коэффициент неравномерности определялся как процентное отношение разности максимальной и минимальной осаждаемой массы к максимальной [3]. Расчет производился с помощью оптимизирующей функции, учитывающей как коэффициент неравномерности (а в случае элементов V группы - нормированную интенсивность потока на подложке), так и коэффициент использования расходуемых материалов.

Следует отметить, что регулярность растущего кристалла в данной работе не учитывалась, так как стехиометрия соединений A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> поддерживается сама собой в широком диапазоне соотношений потоков элементов III и V групп, а поверхность подлож-

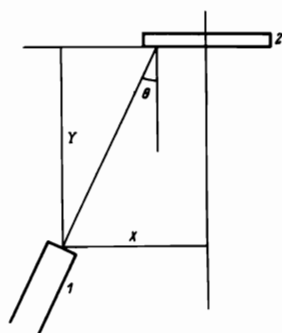


Рис.1. Геометрия "источник-подложка": 1 - источник, 2 - подложка

ки в начале процесса представлялась идеально гладкой.

## Результаты

### Элементы III группы

Типичная зависимость коэффициента неравномерности  $\gamma$  от угла  $\theta$  при фиксированном коэффициенте опустошения для подложки диаметром 40 мм приведена на рис.2. Характерной чертой построенных зависимостей является наличие области, ма-

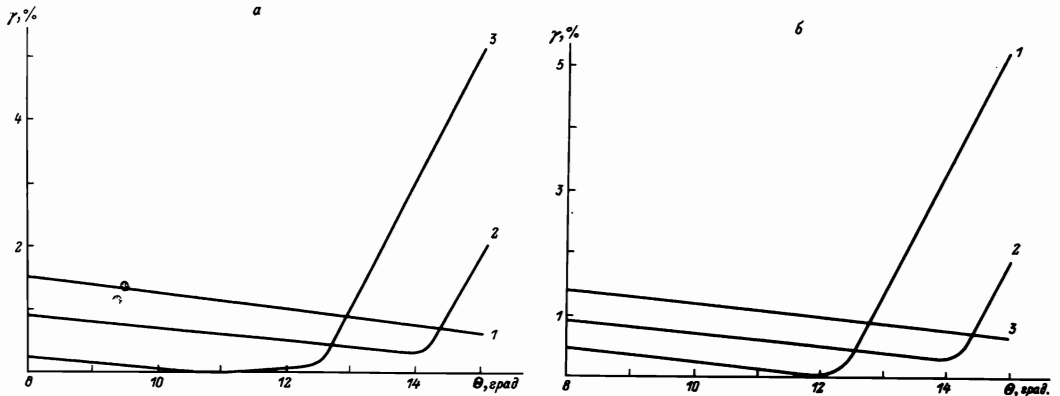


Рис.2. Зависимости  $\gamma$  от  $\theta$  : а - (при  $K_{\text{опуст}} = 1$ ,  $X = 6$  см), 1 -  $Y = 15$  см, 2 -  $Y = 16$  см, 3 -  $Y = 18$  см; б - (при  $K_{\text{опуст}} = 1$ ,  $Y = 16$  см) 1 -  $X = 5,5$  см, 2 -  $X = 6$  см, 3 -  $X = 6,5$  см

лочувствительной к изменению угла  $\theta$ . При этом видно, что "область безразличия" растет с увеличением расстояния  $Y$  от апертуры тигля до плоскости подложки и расстояния  $X$  от апертуры тигля до оси вращения образца.

Известно, что в методе МПЭ используются достаточно длинные тигли и естественно использование источников элементов У группы в полном объеме без дополнительной дозарядки, а полное опустошение тиглей с этими элементами приводит к опустошению тиглей с металлами III группы на величину порядка 20 % [7]. В связи с этим проведено дополнительное исследование коэффициента неравномерности в реальном диапазоне коэффициентов опустошения от 1 до 2,5 при оптимальных углах  $\theta$  (рис.3). В то же время установлено, что зависимость  $\gamma = f(K_{\text{опуст}})$  при изменении параметра  $X$  в реальном диапазоне от 55 до

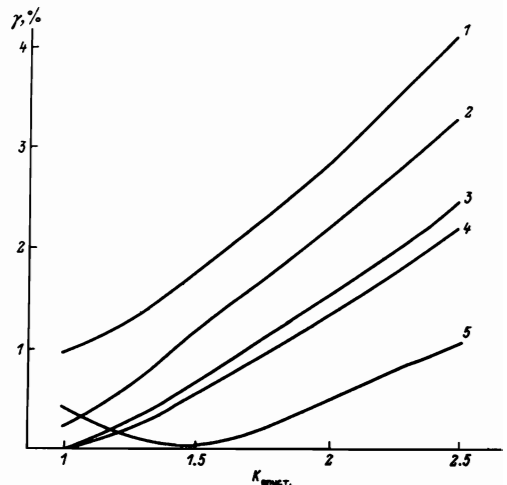


Рис.3. Зависимости  $\gamma$  от  $K_{\text{опуст}}$  при  $X = 6$  см и оптимальных углах  $\theta$  : 1 -  $Y = 14$  см,  $\theta = 16,5^\circ$ ; 2 -  $Y = 16$  см,  $\theta = 14^\circ$ ; 3 -  $Y = 18$  см,  $\theta = 11^\circ$ ; 4 -  $Y = 20$  см,  $\theta = 6,5^\circ$ ; 5 -  $Y = 22$  см,  $\theta = 9^\circ$

65 мм меняется слабо и для практических целей может считаться не зависящей от  $X$ .

Прямым следствием зависимости  $\gamma = f(K_{\text{опуср}})$ , приведенной на рис.3, является вывод о том, что для получения слоев с  $\gamma'$  не более 1% необходимо относить источник от подложки на расстояние не менее 220 мм, что влечет за собой увеличение температуры молекулярных источников для получения приемлемой скорости роста. Так, для выращивания слоев  $GaAs$  при данной геометрии температура галлиевого источника должна составлять  $\sim 1280$  К. Естественно, что при этом уменьшается коэффициент использования материалов.

В связи с этим представляет интерес вопрос о применении так называемых "турбоисточников", то есть источников с постоянным коэффициентом опустошения, по своим свойствам приближающихся к кнудсеновским. Расчет для таких источников более прост и, кроме того, достижение требуемой неравномерности возможно на более широком диапазоне взаимных расположений источников и подложки (см.рис.2).

### Леггирующие примеси

Расчеты показывают, что форма диаграммы направленности для малых по интенсивности потоков леггирующих примесей мало отличается от формы диаграммы направленности элементов III группы. Принимая во внимание, что расход леггирующих материалов на 3-4 порядка ниже расхода металлов, изменением диаграммы направленности источников леггирующих примесей можно пренебречь. Кроме того, учитывая, что коэффициент прилипания большинства леггирующих примесей, используемых в методе МПЭ, близок к единице, расчет для их источников аналогичен расчету для турбоисточников.

Следует отметить, что используемые в современной полупроводниковой технологии уровни легирования (кроме особых случаев) не оказывают влияния на равномерность роста [8]. Тем самым положение источников с леггирующими примесями определяет лишь стабильность уровня легирования по поверхности образца.

### Элементы У группы

При рассмотрении взаимного расположения молекулярных источников элементов У группы и подложки учитывалось, что в реальном МПЭ-процессе соотношение потоков элементов У и III групп много больше единицы. Ранее было показано, что в этом случае небольшое изменение потока элементов У группы практически не влияет на рост кристалла [8]. Таким образом, в данном случае наиболее существенным в оптимизирующей функции становится член, учитывающий коэффициент использования материалов У группы. Расчеты, проведенные в таких условиях, показали, что для оптимального расположения молекулярных источников разброс величины интенсивности молекулярного потока по поверхности образца не превосходит 30% даже для полного опустошения тигля. В случае расположения молекулярных источников симметрично по окружности относительно образца (то есть с фиксированными параметрами  $X$  и  $Y$ ) означает, что оси источников элементов У группы должны пересекать плоскость подложки вблизи его центра вращения.

В результате проведенных исследований предложен метод расчета взаимного расположения молекулярных источников и подложки в ростовой камере установки молекулярно-пучковой эпитаксии для получения пленок соединений  $A_{III}B_{V}$  с заданными параметрами. Рассмотрены принципы расположения разных типов источников для элементов

Ш, У и легирующих групп. Выявлена перспективность использования турбисточников в установках МПЭ. Метод проверялся на примерах установок МПЭ двух типов и показал хорошее соответствие теоретических расчетов и экспериментальных данных.

Несмотря на то, что приведенные расчеты выполнены для установок, ориентированных на подложку диаметром 40 мм, предложенный метод может быть применен для подложек любого диаметра.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Herman M.A.//Vacuum. 1982.- V. 32.- N 9.- P. 555.
2. Лембра Р.Я.//Поверхность. - 1985. - № 9. - С. 81.
3. Майоров А.А., Филаретов А.Г., Цырлин Г.Э.//Научное приборостроение. Автоматизация научных исследований. - Л.: Наука, 1988. - С. 73.
4. Nagata S., Tanaka T.//J.Appl.Phys.- 1977.- V. 48.- P. 940.
5. Joyce B.A. In.: Molecular Beam Epitaxy and Heterostructures. Ed. by Chand L.L., Ploog K. 1985.- P. 37.
6. Таблица физических величин. Справочник//Под ред.И.К.Кикоина. - М.: 1976. - С. 200.
7. Luscher P.E., Collins D.M.//Prog.Cristal Growth Charact.-1972.-V.2.-N 1-P.15
8. Майоров А.А. и др.//Научное приборостроение. Автоматизация научных исследований. - Л.: Наука, 1988. - С. 98.