

ложек, регулировать плотность молекулярного потока, т. е. скорость роста кристаллов, обеспечивать возможность при помощи маски выполнять локальную кристаллизацию, получать резкие межслойные границы, выращивать сверхтонкие (1—100 нм) эпитаксиальные слои (плёнки) полупроводников, диэлектриков и металлов, создавать *сверхрешётки* (последовательность большого числа чередующихся слоёв разного состава толщиной 5—10 нм), осуществлять многослойную застройку решётки. На основе плёнок, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, создают оптоэлектронные интегральные схемы, сверхбыстродействующие большие интегральные схемы, фотоприёмники и лазеры на гетероструктурах, фотокатоды с отрицат. электронным средством, др. приборы и устройства.

Метод мгновенного испарения близок к методу осаждения из молекулярных пучков и заключается в том, что исходное вещество непрерывно и равномерно поступает в испаритель, между ним и составом газовой фазы поддерживается термодинамич. равновесие. Обычно этот метод используют для получения ЭС материалов, компоненты к-рых обладают разл. упругостями пара (напр., GaP, GaAlAs, GaAsP).

Метод катодного распыления отличается от термич. методов тем, что исходным веществом служит вещество нагреваемого твёрдого тела. В осн. применяют катодное распыление с помощью тлеющего разряда (рис. 2). Про-

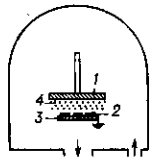


Рис. 2. Схема камеры для катодного распыления: 1—катод; 2—подложка; 3—анод; 4—плазма Ag^+ .

цесс идёт в среде инертного газа при давлениях 0,133—13,3 Па, при более низкой, чем в методах термич. испарения, эпитаксиальной темп-ре.

Метод катодного осаждения сочетает методы катодного распыления и осаждения из молекулярных пучков. Вещество (рис. 3) испаряется термич. путём, подложка служит отрицат. электродом и располагается в зоне плазмы, поддерживаемой постоянным током или ВЧ-разрядом. Испарившиеся атомы ионизируются в плазменном пространстве и осаждаются на катоде подложки. С сер. 1980-х гг. развивается метод осаждения веществ из ионизир. пучков, позволяющий получить ЭС, легированные летучими примесями при сравнительно низких темп-рах.

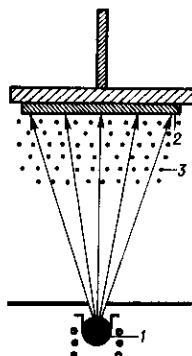
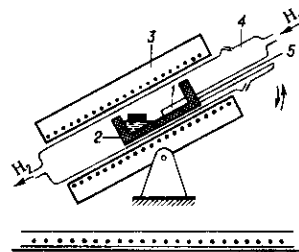


Рис. 3. Схема метода катодного осаждения: 1—источник; 2—подложка; 3—плазма.

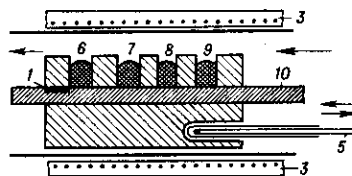
Методы ЖФЭ основаны на кристаллизации из раствора в расплаве и различаются в зависимости от способа удаления раствора с поверхности плёнки [простым сливом (рис. 4, а), принудительным удалением (рис. 4, б) и без удаления]. ЖФЭ можно проводить при относительно невысоких темп-рах (400—500 °С). ЖФЭ позволяет получить многослойные эпитаксиальные структуры и плёнки определённой конфигурации (с помощью маски из SiO₂).

Методы ТФЭ основаны на процессах ориентированного роста ЭС в двух-, трёхслойных системах при изотермич. отжиге. Один из слоёв — монокристаллич. подложка, другие — аморфные и поликристаллич. слои полупроводников и металлов. Для сохранения расположенных в подложке приборных структур применяют импульсную термич. обработку.

Рис. 4. Схема устройства для жидкофазной эпитаксии со сливом раствора с поверхности плёнки (вверху) и принудительным удалением раствора (внизу): 1—подложка; 2—контейнер; 3—печь сопротивления; 4—кварцевая ампула; 5—термопара; 6—9—растворы; 10—ползунок; 11—каска.



За последние годы получили широкое распространение разл. методы газофазной Э. из металлоорганич. соединений (МОС). Метод МОС-гидридной Э. при пони-



женном давлении в реакторе является наиб. универсальным для синтеза большинства соединений A^{III}B^V и по основным параметрам не уступает МЛЭ, а по производительности, степени совершенства поверхности эпитаксиальных плёнок, относительно более простому аппаратному оформлению выгодно отличается от последнего. Данный метод используется для новейших разработок и производства полупроводниковых СВЧ- и оптоэлектронных приборов, напр. транзисторов с высокой подвижностью электронов, где реализуется эффект двумерного электрон. газа на гетерограницах GaAlAs/GaAs, InGaAs/InP, лазеров на основе гетероструктур GaAlAs/GaAs, InGaAs/InP с квантовыми ямами, приборов на основе четверных соединений типа InGaAsP с напряжёнными слоями, разл. наноразмерных гетероструктур с чередующимися слоями и др. Освоение разл. модифицируемых методов МОС-гидридной Э. и МЛЭ в сочетании с хим. пучковой Э. и атомно-слоевой Э. позволяет охватить практически все новые задачи полупроводникового материаловедения.

Лит.: Чистяков Ю. Д., Райнова Ю. П., Физико-химические основы технологии микроэлектроники, М., 1979; Современная кристаллография, т. 3, М., 1980; Денисов А. Г., Кузнецов Н. А., Макаренко В. А., Оборудование для молекулярно-лучевой эпитаксии, «Обзоры по электронной технике», сер. 7, в. 17, М., 1981; Херман М., Полупроводниковые сверхрешетки, пер. с англ., М., 1989; Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры, под ред. Л. Ченга, К. Плюга, пер. с англ., М., 1989.

Г. С. Дорджин, Л. М. Можаров.

ЭПСИЛОН-РАЗЛОЖЕНИЕ (ϵ -разложение) — метод приближённого вычисления критических показателей в статистич. физике [или аномальных размерностей в квантовой теории поля (КТП)] с помощью разложения корреляц. ф-ций и др. физ. величин вблизи критической точки (соответственно пропагаторов в пределе асимптотической свободы в КТП) по степеням малого параметра $\epsilon = 4 - d$, где d — размерность конфигурац. пространства (соответственно пространства-времени в КТП). В случае более сложных особенностей термодинамич. величин Э.-р. возможно в окрестности др. значений d (напр., вблизи *трикритической точки* возникает Э.-р. по степеням $\epsilon = 3 - d$). Э.-р. обычно строится в рамках вычислений по методу *ренормализационной группы* (РГ) с использованием теории возмущений и диаграммной техники фейнмановского типа или её температурного обобщения (в т. ч. для спиновых операторов). Нецелые размерности вводятся посредством аналитич. продолжения и обеспечивают регуляризацию соответствующих выражений в КТП. Для получения результатов, имеющих физ. смысл и сопоставимых с результатами экспериментов и численными аппроксимациями, Э.-р. рассматривают как экстраполяц. схему и в конце вычислений обычно полагают $\epsilon = 1$. Э.-р. для шести критич. показателей с точностью до 3-го порядка по степеням ϵ см. в [Ма Ш., 1980]. Аналогично наряду с Э.-р. в методе РГ широко используются и др. разложения критич. показателей, напр. разложение по степеням $1/n$ (n — число ком-