

7. Что такое пробой *p-n*-перехода?

Литература: [8, стр. 214 – 240].

Лабораторная работа 12

ГЕТЕРОЭПИТАКСИЯ

Цель работы: изучить закономерности эпитаксиального роста тонких плёнок из раствора.

Приборы и принадлежности: световой микроскоп, подложки из стекла и слюды, 5 %-ный спиртовой раствор йодистого калия.

Методические указания

Эпитаксия – это ориентированный рост одного кристалла на поверхности другого. При этом решётка нарастающего вещества строго определённо ориентируется относительно плоской сетки атомов на поверхности подложки. Эпитаксиальные плёнки имеют монокристаллическую структуру и низкую концентрацию дефектов. Это позволяет получить высокую стабильность параметров микросхем и других элементов микроэлектроники, получаемых пленарной технологией.

Различают гетероэпитаксию, когда материалы нарастающей плёнки и подложки различны ($\text{Si}/\text{Al}_2\text{O}_3$), и гомо- или автоэпитаксию, когда они одинаковы (Si/Si). Разновидностью гетероэпитаксии можно назвать хемоэпитаксию, при которой материал плёнки образуется в результате химической реакции подложки с окружающей средой (SiO/Si).

Для гетероэпитаксии важнейшим условием является структурно-геометрическое соответствие кристаллов нарастаемого слоя и подложки в плоскости роста $[112] (111)\text{Si}/[1100](0001)\text{Al}_2\text{O}_3$.

Эта структурная формула означает, что грань (111) кристалла кремния (решётка типа алмаза) нарастает на плоскость (0001) Al_2O_3 (типа корунд), являющуюся поверхностью подложки. Параллельны и направления в двух кристаллах – $[112] \text{Si}$ и $[1100]$ корунда. Если сращиваемые вещества имеют близкие структурные типы и параметры решётки (разница не больше 10 %), наблюдается явление *псевдоизоморфизма* – плёнка имеет точно такую же структуру, как и подложка: $[100] (100) \text{Au} // [100] (100) \text{Ag}$. Однако с ростом толщины плёнки упругие искажения, связанные с разницей параметров (для золота $a = 2,88 \text{ \AA}$, серебра $a = 2,89 \text{ \AA}$), увеличиваются. Поэтому при толщинах больше критической (для $\text{Au}/\text{Ag} - 600 \text{ \AA}$) после псевдоизоморфного переходного слоя будет собственная решётка золота.

Если разница параметров больше 10 %, сопрягаются наиболее плотно упакованные плоскости и направления кристалла и подложки. При этом часть плоскостей в одной решётке не имеет продолжения в другой. Края таких оборванных плоскостей образуют в переходном слое *дислокации несоответствия*.

Управляя процессом эпитаксии можно менять концентрацию дислокаций, уменьшая напряжения на границе контакта. Это улучшает стабильность механических и электрических свойств тонких плёнок, снижает их склонность к старению при эксплуатации.

Эпитаксиальная структура тонкой плёнки закладывается на ранних стадиях её роста (рис. 12.1, а). После адсорбции атомов или молекул вещества на подложку 1 в результате поверхностной диффузии появляются плоские зародыши 2, кристаллическая решётка которых ориентирована по структурному "мотиву" подложки. Для них суммарная поверхностная энергия границ кристалл – окружающая среда, среда – подложка, кристалл – подложка минимальна. При реальных скоростях конденсации вещества всегда образуются и случайно ориентированные кристаллики 3.

Их суммарная поверхностная энергия заметно больше. Поэтому на следующей стадии роста тонкой плёнки – первичной коалесценции (рис. 12.1, б) – эти "дефектные" зёрна распадаются на атомы.

Эпитаксиальные зародыши продолжают расти. Увеличение упругих искажений приводит к тому, что при коалесценции они утрачивают правильную огранку боковых поверхностей, стремясь к минимуму энергии.

В дальнейшем эти кристаллы на следующих этапах роста снова самоограняются. При вторичной коалесценции из плоских они становятся трёхмерными. На стадии образования "мостиков" они сраста-

ются своими гранями и постепенно заполняют всю поверхность подложки, сливаясь в одну монокристаллическую плёнку.

Распад случайно ориентированных зародышей возможен лишь при достаточно высокой диффузионной подвижности атомов на подложке, а значит зависит от её температуры.

Эпитаксиальной температурой называется температура подложки, ниже которой растёт только неориентированная, т.е. поликристаллическая плёнка.

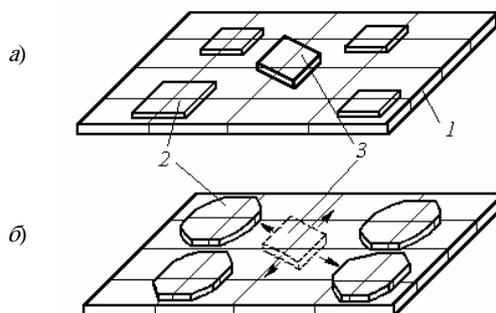


Рис. 12.1. Образование эпитаксиальной плёнки:

а – появление зародышей, *б* – первичная коалесценция

Другими параметрами, влияющими на эпитаксию, является степень пересыщения (переохлаждения) кристаллизующегося вещества в окружающей среде, дефектность структуры подложки, степень чистоты её поверхности и др.

В работе изучается первая стадия роста плёнки йодистого калия из его спиртового раствора на различных подложках.

При нанесении капли раствора на подложку и выдержке в течение 5 – 10 мин происходит испарение растворителя – этилового спирта. За счёт этого концентрация соли в растворе увеличивается и достигает её предельной растворимости при данной температуре. При малых пересыщениях на активных центрах подложки образуются плоские микрокристаллы.

Их форма близка к равновесной и подчиняется закону Гиббса–Кюри–Вульфа. В соответствии с этим законом и анизотропией роста кристаллы самоограниваются плоскостями с малыми индексами Миллера, имеющими минимальную поверхностную энергию. На это также влияют и тип подложки – активная (эпитаксиальная) или пассивная (аморфная), состав раствора и другие факторы.

Кристаллы йодистого калия имеют ГЦК решётку типа каменной соли. При кристаллизации из растворов наблюдаются следующие плоскости роста (границ кристаллов): (100), (111) и (110). При этом плоские зародыши будут иметь форму: квадрат, треугольник и прямоугольник, соответственно.

На практике, как уже обсуждалось выше, форма и размеры – величина случайная, зависящая от множества параметров. Однако вероятность появления той или иной морфологии кристаллов определяется действием закона – большая часть кристаллов будет иметь форму, соответствующую минимуму энергии.

В качестве подложек используется оптическое стекло (аморфный материал) и монокристаллические пластинки слюды.

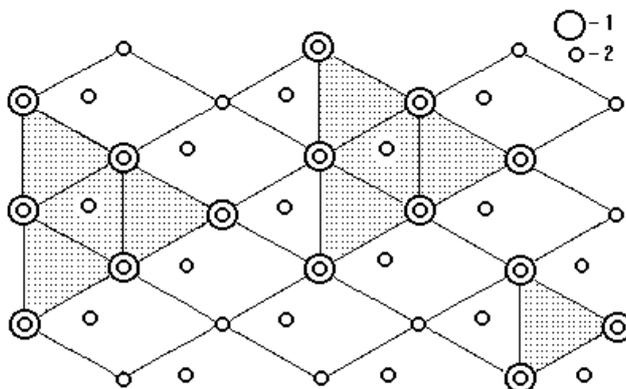


Рис. 12.2. Совпадение плоских атомных сеток слюды (2) и йодистого калия (1)

Слюда – мусковит $\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ имеет сложную слоистую кристаллическую решётку моноклинной сингонии. Однако в её плоскости спайности (001) наблюдается гексагональная симметрия в расположении атомов, близкая к плоской сетке (111) в йодистом калии.

Параметры решётки вдоль [100] у слюды ($a = 5,18 \text{ \AA}$) и по [100] для KI ($a = 4,99 \text{ \AA}$) близки. Поэтому при наложении плоских сеток (111) KI и (001) слюды (рис. 12.2) отдельные узлы совпадают (показаны двойными кружками и штриховкой) и наблюдается эпитаксиальный рост кристаллов йодистого калия на мусковите.

Порядок выполнения работы

1. Взять подготовленные обезжиренные подложки из стекла и слюды и нанести пипеткой на каждую каплю 5 %-ного спиртового раствора йодистого калия. Легкими покачиваниями подложки увеличить растекание капли до диаметра 10 – 15 мм.
2. Поместить подложки под объектив микроскопа и дождаться полного испарения растворителя (10 – 15 мин).

Внимание! Не допускается нагревать или дуть на подложку при испарении растворителя.

3. Изучить под микроскопом формы кристаллов, встречающиеся на каждой подложке.
4. Провести вероятностную оценку частоты встречи различных форм зародышей на каждой подложке. Для этого по пятидесяти случайным кристаллам определить число кристаллов, форма которых соответствует плоскостям роста (111), (110) и (100).

Содержание отчёта

1. Название и цель работы.
2. Методика изучения роста кристаллов из раствора.
3. Рисунки форм зародышей кристаллов с указанием соответствующей им плоскости роста.
4. Столбчатая гистограмма частоты встречи различных форм кристаллов для аморфной и монокристаллической подложки и вывод о наличии эпитаксиального роста.
5. Структурная формула эпитаксиального роста для кристаллов, предложенных преподавателем.

Контрольные вопросы

1. Адсорбция. Виды и изотермы адсорбции.
2. Термодинамика образования зародышей.
3. Рост кристаллов.
4. Стадии роста тонких плёнок.
5. Эпитаксия. Виды эпитаксии.
6. Структурные условия эпитаксии.
7. Влияние температуры подложки на структуру плёнки. Температура эпитаксии.

Литература: [3, с. 374 – 376]; [8, с. 70 – 71; 84 – 85].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пустыльник, Б.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений / Б.И. Пустыльник. – М. : Наука, 1968. – 288 с.
2. Савельев, И.В. Курс общей физики. Т. 2. / И.В. Савельев. – М. : Наука, 1987. – 496 с.
3. Шаскольская, М.П. Кристаллография / М.П. Шаскольская. – М. : Высшая школа, 1984. – 376 с.
4. Пшеничнов, Ю.П. Выявление тонкой структуры кристаллов / Ю.П. Пшеничнов. – М. : Металлургия, 1974. – 521 с.
5. Лившиц, Б.Г. Физические свойства металлов и сплавов / Б.Г. Лившиц. – М. : Металлургия, 1980. – 320 с.
6. Лахтин, Ю.М. Metalловедение и термическая обработка металлов / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – М. : Машиностроение, 1976. – 407 с.
7. Гуляев, А.П. Metalловедение / А.П. Гуляев. – М. : Металлургия, 1986. 544 с.
8. Епифанов, Г.И. Физические основы конструирования и технологии РЭА и ЭВА / Г.И. Епифанов, Ю.А. Мома. – М. : Советское радио, 1979. – 352 с.
9. Практикум по полупроводникам и полупроводниковым приборам / под ред. К.В. Шалимовой. – М. : Высшая школа, 1968. – 277 с.
10. Пасынков, В.В. Материалы электронной техники / В.В. Пасынков, В.С. Сорокин. – М. : Высшая школа, 1986. – 367 с.