

Структура и свойства наноматериалов, спеченных при высоком давлении, определяются как термодинамическими условиями их спекания (давление, температура), так и кинетическими параметрами (временем их воздействия, а также характером их изменения в процессе спекания). При этом термодинамические параметры спекания обеспечиваются характеристиками аппарата высокого давления, а кинетические параметры спекания в значительной степени определяются возможностями системы управления РТ – условиями в зоне спекания. С учетом высокой скорости протекания процессов консолидации нанопорошков при высоких давлениях особое значение имеет точность задания и регулировки температуры и давления в процессе спекания.

УДК 621.793

### **Получение, свойства и области применения тонкопленочных покрытий карбида кремния**

Студент гр. 10406112 Жук В.А.

Научный руководитель – Ковалевский В.Н.

Белорусский национальный технический университет  
г. Минск

Карбид кремния – единственное полупроводниковое бинарное соединение  $A^{IV}B^{IV}$ . Тип связи – ковалентный, доля ионной составляющей порядка 10%. Ширина запрещенной зоны для кристаллов SiC составляет 2,39 эВ, для различных модификаций SiC ширина запрещенной зоны может иметь значение в пределах от 2,72 до 3,34 эВ. Большие значения ширины запрещенной зоны позволяют создавать на его основе полупроводниковые приборы, сохраняющие работоспособность при температурах до 600°C. Собственная электропроводность из-за большой ширины запрещенной зоны наблюдается лишь при температурах выше 1400°C. Карбид кремния тугоплавок ( $t_{пл}$  2830°C), химически стоек, по твердости уступает лишь алмазу и нитриду бора: твердость по MOOCy – 9,1 – 9,5; микротвердость 3300 – 3600 кгс/мм<sup>2</sup>. Карбид кремния обладает высокой термической, химической и радиационной стойкостью, выделяется своей устойчивостью к окислению среди многих окалиностойких сплавов и химических соединений. Заметно окисляется только при температурах выше 800 °C. Он не реагирует с минеральными кислотами любых концентраций, включая и плавиковую кислоту. При комнатной температуре химически взаимодействует с ортофосфорной и кислотой и смесью азотной и фтористоводородной кислот при температуре 200 °C. Вплоть до 1100 °C с карбидом кремния совершенно не взаимодействует азот. Инертен он также в среде водорода и углекислого газа. В среде хлора теряет устойчивость при сравнительно низких температурах. Карбид кремния активно разлагается с образованием соответствующих силикатов при сплавлении с едкими и углекислыми щелочами и перекисями.

Карбид кремния, благодаря ряду уникальных свойств: большой ширине запрещенной зоны, чрезвычайно высокому критическому полю лавинного пробоя, теплопроводности, превосходящей при комнатной температуре теплопроводность меди, химической и радиационной стойкости является перспективным материалом для применения в различных областях современной электроники. Структуры на его основе обладают стабильными временными характеристиками, широким диапазоном рабочих температур (вплоть до 900 °C) и могут быть использованы при создании новых приборов микро-, СВЧ-, мощной и сильноточной электроники, полупроводниковых детекторов ядерных частиц и фотоэлектропреобразователей УФ излучения. Кроме того, важным направлением развития технологии микроэлектроники в настоящее время является совмещение широкозонных материалов (GaN, AlN) с кремниевой электроникой. Слои карбида кремния на кремниевых подложках используются для последующего роста нитрида галлия и нитрида алюминия.

Монокристаллический SiC используют для изготовления радиационностойких светодиодов, обладающих очень высокой надежностью и стабильностью работы. Его можно ис-

пользовать для изготовления высокотемпературных силовых полупроводниковых приборов, полевых транзисторов, туннельных диодов, счетчиков частиц высокой энергии, терморезисторов, нелинейных резисторов, а на основе пленок аморфного SiC – светодиоды и солнечные элементы.

Из-за высоких значений температуры и давления, при которых существует расплав карбида кремния, классические методы получения из него монокристаллов не применимы. Используют методы выращивания кристаллов SiC из газовой фазы или из растворов в расплаве. Большое распространение получил метод сублимации. В этом методе рост кристаллов карбида кремния происходит из газовой фазы в графитовых тиглях в атмосфере инертных газов при температуре 2500 – 2600°C. Гетероэпитаксиальные слои выращиваются методом газофазной эпитаксии в открытой системе. В качестве газа-носителя используется водород диффузионной очистки; в первой зоне свободный углерод связывается с водородом и переносится в зону роста полупроводниковой пленки. Чистый карбид кремния можно получить с помощью так называемого процесса Лели, в котором порошкообразный SiC возгоняется в атмосфере аргона при 2500 °C и осаждается на более холодной подложке в виде чешуйчатых монокристаллов размерами до 2×2 см. Этот процесс дает высококачественные монокристаллы, в основном состоящие из 6H-SiC фазы (это связано с высокой температурой роста). Улучшенный процесс Лели при участии индукционного нагрева в графитовых тиглях дает еще большие монокристаллы до 10 см в диаметре. Кубический SiC, как правило, выращивается с помощью более дорогостоящего процесса – химического осаждения паров. Чистый карбид кремния также может быть получен путем термического разложения полимера полиметилсилана (SiCH<sub>3</sub>)<sub>n</sub>, в атмосфере инертного газа при низких температурах. Одним из наиболее технологичных методов создания тонких пленок карбида кремния является метод вакуумного лазерного испарения. Лазерное излучение обеспечивает самую высокую плотность энергии на распыляемой поверхности, что делает данный метод практически безальтернативным при получении сложных систем, в состав которых входят элементы с различными коэффициентами распыления. На протяжении последних двух десятилетий метод импульсной лазерной абляции стал предметом возрастающего интереса исследователей благодаря расширяющемуся кругу применений (среди них нанесение тонких пленок различных соединений, обработка и травление поверхности, производство кластеров и нанокластеров, и т.д.). Но, несмотря на все более глубокое проникновение в физику процессов, происходящих в процессе импульсной лазерной абляции, механизмы лазерного испарения материалов все еще далеки от полного понимания.

В настоящее время наиболее перспективными методами нанесения покрытий являются вакуумно-плазменные методы. Это обусловлено их экологической безопасностью, высокой чистотой технологических процессов и качеством продукции. Магнетронное распыление, в отличие от обычного диодного распыления, позволяет получать высокую плотность ионного тока, а значит, и высокие скорости распыления при относительно низких давлениях порядка 0,1 Па и ниже. В отличие от других способов нанесения тонкопленочных покрытий, способ магнетронного распыления позволяет достаточно тонко регулировать толщину металлического слоя, а значит, его сопротивление, что очень важно при создании структур с определенной проводимостью.

Получение наноструктурных покрытий карбида кремния перспективно осуществлять с использованием магнетронного распыления составных катодов кремний – графит в среде аргона, при котором возможно получение покрытий в виде смеси атомов кремния и углерода. Использование планарного магнетрона позволяет реализовать электрический разряд для распыления мишени – катода. Пленки карбида кремния с аморфной структурой получены магнетронным методом из мишени спеченного SiC при осаждении на подложках с температурой 20°C. Изменение электросопротивления пленок в зависимости от температуры отжига оценивали в диапазоне 40...400°C. Максимальное значение твердости в пленках составило 2400 кг/мм<sup>2</sup>.

Метод магнетронного распыления позволяет получать тонкие пленки высокого качества с рекордными физическими характеристиками (толщина, пористость, адгезия и пр.), а также проводить послойный синтез новых структур (структурный дизайн), создавая пленку буквально на уровне атомных плоскостей.

УДК 621.793

### Получение тонких пленок методом вакуумного лазерного испарения

Студент гр. 104611 Лазарчик М.В.  
Научный руководитель – Жук А.Е.  
Белорусский национальный технический университет  
г. Минск

Одним из наиболее технологичных методов создания тонких пленок карбида кремния является метод вакуумного лазерного испарения. Лазерное излучение обеспечивает самую высокую плотность энергии на распыляемой поверхности, что делает данный метод практически безальтернативным при получении сложных систем, в состав которых входят элементы с различными коэффициентами распыления. Например, получение омических контактов к карбиду кремния и материалам на основе соединений  $A^{III}B^V$  желательнее проводить с нанесением всех слоев в едином технологическом вакуумном цикле, что возможно только при использовании лазерного испарителя, причем одного типа. Модификация поверхности лазерным излучением позволяет существенно повысить качество получаемых контактов.

Дополнительным преимуществом метода лазерного распыления в случае карбида кремния является то, что состав реагирующих элементов ограничивается кремнием и углеродом, благодаря чему достигается высокая чистота получаемых пленочных структур.

В физической литературе термином «абляция» (от лат. «ablation» — отнятие, устранение) обозначают совокупность сложных физико-химических процессов, результатом которых является удаление (унос) вещества с поверхности или из объема твердого тела. Следуя значению латинского корня, абляцией можно назвать любую потерю. Поэтому иногда термин «лазерная абляция» толкуют расширительно, обозначая им любой процесс лазерно-стимулированного удаления вещества, включая удаление летучих продуктов химического травления и даже эмиссию электронов.

На протяжении последних двух десятилетий метод импульсной лазерной абляции стал предметом возрастающего интереса исследователей благодаря расширяющемуся кругу применений (среди них нанесение тонких пленок различных соединений, обработка и травление поверхности, производство кластеров и нанокластеров, и т.д.).

Типичная установка ИЛО, состоит из вакуумной системы, системы лазерного испарения и системы нагрева подложек. В качестве источника лазерного излучения могут использоваться различные типы мощных лазеров, например 1) твердотельный лазер  $YAG:Nd^{3+}$  (1064 нм) и его гармоники 532 нм, 354.7 нм, 266 нм, 213 нм; и 2) эксимерные лазеры  $XeCl$  (308 нм),  $KrF$  (248 нм),  $ArF$  (193 нм),  $F_2$  (157 нм). Распыляемая мишень устанавливается в вакуумной камере под углом  $45^\circ$  относительно падающего на ее поверхность лазерного излучения. Подложки располагаются параллельно мишени, на расстоянии от 4 до 10 см. В начале лазерного импульса происходят разогрев мишени и испарение небольшой дозы вещества. Степень ионизации газа увеличивается с ростом температуры, при этом растет и коэффициент поглощения проходящего через него излучения. В некоторый момент наступает тепловой пробой, пар полностью ионизируется, и поглощение в нем резко возрастает. В дальнейшем только малая часть излучения будет доходить до мишени, а основная энергия импульса пойдет на разогрев плазменного облака. К концу лазерного импульса испаренным оказывается приповерхностный слой мишени, а над облученной областью формируется плазменный факел.