

**Рисунок 5.** Переползание краевой дислокации. Атомы лишней полуплоскости переходят в вакантные узлы решетки.

Переползание связано с диффузионным переносом массы, пластической деформацией и происходит при высоких температурах; поэтому при высокотемпературном отжиге, способствующем переползанию, плотность дислокаций понижается.

Итак, из рассмотренных методов пассивации процесса электродиффузии в тонкопленочных проводниках при больших плотностях тока наиболее перспективным можно считать создание квазимонокристаллической пленки с диэлектрическим покрытием и последующей обработкой с целью удаления линейных дефектов.

#### Список использованных источников

1. Колешко В.М., Белицкий В.Ф. Массоперенос в тонких пленках – М.: Наука и техника, 1980.
2. Технология тонких пленок. Т.2. Справочник: Под. ред. Л.Майсела, Р.Глена. М.:Советское радио, 1977.

УДК 539.216

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ КВАЗИМОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

Осипов А.Н., Архипов А.В.

За последние годы в электронике наблюдается тенденция к возрастанию функциональной плотности микросхем, зачастую в ущерб универсальности, и к уменьшению геометрических размеров кристаллов микросхем, что приводит к резкому увеличению плотности тока, протекающего по пленочной металлизации. Вследствие чего, становится очевидно необходимым применение структурно совершенных металлических плёнок, выполняемых на диэлектрическом основании.

Квазимонокристаллические плёнки можно получить с помощью эпитаксиальных процессов. Эпитаксия (от греческого “эпи” и “такси” – ориентированное наращивание) – это наращивание тонкой плёнки на ори-

ентирующей подложке. Эпитаксия заключается в том, что формирующаяся тонкая плёнка попадает под ориентирующее воздействие монокристаллической подложки. Эпитаксия имеет две разновидности. Автоэпитаксия, представляющая собой ориентированное наращивание материала пленки на подложку из того же материала и гетероэпитаксия – наращивание пленки на подложке другого материала.

Энергетические параметры поверхностей раздела плёнки и подложки определяют возможность ориентационных изменений при росте плёнок, преимущественные конечные ориентации. В то же время для прогнозирования ожидаемых ориентаций в большинстве случаев нет данных о значениях энергии поверхностей раздела, особенно межфазных границ подложка-плёнка, поэтому ранее на основе наблюдаемых экспериментально общих закономерностей ориентированной кристаллизации предлагали кристаллогеометрические критерии для предсказания взаимных ориентировок решёток сопрягающихся фаз.

Для объяснения наблюдаемых и прогнозирования возможных ориентационных соотношений наиболее часто используются 2 теории: теория псевдоморфного роста и теория решётки совпадающих узлов (PCY).

Теория псевдоморфного роста заключается в том, что на первых стадиях роста плёнки на подложке происходит аномальное изменение периода кристаллической решётки плёнки, приводящее его в полное соответствие периоду решетки подложки. Явление обусловлено тем, что для рассматриваемых систем атомы осадка связаны с глубокими центрами адсорбции, соответствующими минимумам периодически изменяющейся потенциальной энергии взаимодействия на межфазной границе. При этом межфазное взаимодействие сильнее, чем взаимодействие между атомами осадка. Тонкая пленка в этом случае находится в состоянии однородной плоской деформации. Псевдоморфная структура имеет место в слоях толщиной не более 10 параметров кристаллической решётки.

Теория PCY позволяет предсказывать ориентации совпадения при совмещении плоских решёток одной ориентации. Для построения PCY на межфазной границе необходимы две параллельно ориентированные плоские решётки одной симметрии, различающиеся только параметрами. В общий для решёток узел помещают начало координат и выбирают в каждой решётке атомы, находящиеся от него на одинаковых расстояниях

$\Sigma_1 a_1 = \Sigma_2 a_2$ . Получают углы между осью координат и направлением на эти атомы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ . При взаимном повороте решёток на угол  $\theta_k = \varphi_1 \pm \varphi_2$  получим PCY с параметрами  $\Sigma_1$  и  $\Sigma_2$ , характеризующими обратную долю совпадающих узлов в каждой решётке. В реальных системах отношение решёточных параметров является в основном иррацио-

нальным и “идеальным” РСУ будет характеризоваться  $\Sigma \rightarrow \infty$ . В этом случае теряется смысл применения концепции РСУ. Поэтому выбирают ячейки РСУ отвечающие приблизительному совпадению. Таким образом, межфазная граница совпадения будет характеризоваться, помимо параметра  $\Sigma$ , еще несоответствием параметров РСУ, равным упругой деформации, необходимой для достижения точного совпадения [1].

Задавая отношения  $\Sigma_2 \Sigma_1$ , можно получить углы, отвечающие ориентациям совпадения, и отношения параметров  $\alpha = a_1 a_2 = \Sigma_2 \Sigma_1$ , при которых эти ориентации возможны.

Известно 2 механизма роста эпитаксиальных тонких плёнок: механизм монослойного роста и механизм островкового роста.

Для механизма монослойного роста (Франка и Ван дер Мерве) характерно возникновение на поверхности кристаллической подложки соответствия параметров кристаллических решёток плёнки и подложки. При дальнейшем росте происходит релаксация упругой деформации путём введения на межфазную границу дислокаций, компенсирующих несоответствие параметров сопрягающихся решёток и поэтому называющихся дислокациями несоответствия.

Осуществлению этого механизма препятствует то, что из-за больших рассогласований параметров решёток (при гетероэпитаксии) дислокации несоответствия не могут скомпенсировать возникающие напряжения, и поэтому плёнка распадается на отдельные островки. Дальнейший рост происходит по островковому механизму. Коалесцентный распад уже сплошной плёнки может произойти при неравномерности толщин плёнки, которые, в свою очередь, могут возникнуть из-за различия степени адгезии плёнки с подложкой.

Механизм островкового роста (Крастанова-Странского) предполагает двухмерное зарождение плёнки с образованием трёхмерных островков при последующем росте. В процессе роста островки увеличиваются в размерах, коалесцируют, сливаются в сплошную плёнку. Этот механизм является основным для роста большинства металлических плёнок.

Эпитаксиальные процессы можно разделить на собственно эпитаксию и на искусственную эпитаксию. Эпитаксия может протекать как со средой носителем, так и без неё.

Эпитаксия со средой носителем может, в свою очередь, происходить со вступлением вещества носителя в химическую реакцию с подложкой, с выделением на ней нужно реагента и без вступления в химическую реакцию.

Эпитаксия, использующая химическую реакцию, называется хемоэпитаксией. В основе хемоэпитаксии могут лежать различные принципы. Это либо электрическое разделение ионов как, например, при элек-

трохимическом осаждении и анодировании или использование тепловых эффектов как, например, при осаждении из паровой фазы и термическом выращивании. В любом случае для окончательного формирования плёнки необходимо обеспечить протекание определённых химических реакций.

Электрическое разделение ионов, кроме указанных методов, используют ионное осаждение и газовое анодирование. К хемозпитаксии относится также химическое осаждение.

Осаждение из паровой фазы или газофазная эпитаксия делится по типам реакций. Это либо диспропорционирование, либо восстановление. В качестве “транспорта” чаще используются галогениды требуемых металлов, т.к. галогенным соединениям свойственно высокое давление паров, а остаточные газообразные продукты реакции легко удаляются из реакционного объёма. Существенным недостатком данного метода и хемозпитаксии в целом является наличие в области протекания процесса осаждения большого количества продуктов реакции, что влияет на чистоту получаемой плёнки и на её связь с подложкой. В результате существенно ухудшается ориентирующее воздействие подложки. Ещё одним недостатком является требование высокой температуры процесса, что не даёт подвергнуть этому процессу уже структурированную подложку. Также хемозпитаксия позволяет выращивать плёнки не всех металлов.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что хемозпитаксия не позволяет решить поставленную задачу.

Ещё один вид эпитаксии со средой носителем, но без осуществления химической реакции делится на ионное распыление и на жидкофазную эпитаксию.

Представляет интерес ионное распыление двух типов: создание тлеющего разряда на постоянном токе и высокочастотное ионное распыление. Последний метод используется в основном для осаждения на диэлектрическую подложку. К достоинствам ионного распыления можно отнести то, что оно позволяет осаждать многокомпонентные системы и термостойкие материалы; обеспечивает хорошую адгезию и однородность плёнки по толщине на большой площади; весь процесс происходит при относительно низких температурах. Недостатком является низкая скорость осаждения и иногда (при повышении скоростей) необходимость охлаждать подложку. Так как процесс ионного распыления не может проходить в вакууме, то необходима какая-либо атмосфера (в большинстве случаев используется атмосфера инертных газов), что сильно сказывается на чистоте плёнки.

Жидкофазная эпитаксия протекает при больших температурах и не позволяет получать чистых плёнок из-за наличия среды - “транспорта”, в качестве которого выступает металл растворитель двухкомпонентного раствора – расплава.

К эпитаксии без среды носителя относится осаждение в вакууме, которое, в свою очередь, делятся на 2 части: молекулярно-лучевую эпитаксию и термовакуумное напыление.

Молекулярно-лучевая эпитаксия протекает при относительно низкой температуре подложки, в условиях вакуума, что позволяет получать чистые плёнки, а также использовать эту, уже структурированную плёнку, в качестве подложки для напыления последующих слоёв. Недостатком является необходимость в течение всего процесса поддерживать высокий вакуум.

Термовакуумное распыление целесообразно разделить по конструкциям испарителей. Испарители бывают из проволоки и металлической фольги, сублимационные испарители и тиглевые. Также испарение материала может происходить с помощью нагрева электронной бомбардировкой, испарители такого типа делятся на электронные пушки с испаряемым анодом, с независимым анодом и с изгибом траектории электронного луча.

Конкретный выбор испарителя зависит от испаряемого вещества. Метод нагрева электронной бомбардировкой позволяет уменьшить взаимодействие между испаряемым веществом и материалом испарителя, что наряду с возможностью плавной регулировки скоростей испарения делает его наиболее привлекательным для реализации эпитаксиальных процессов.

Метод искусственной эпитаксии в целом не является альтернативой эпитаксии, а скорее является процессом её дополняющим. В общем, искусственную эпитаксию можно разделить на 2 класса: с созданием ориентирующего рельефа и без ориентирующего рельефа.

Ориентирующий рельеф можно разделить на потенциальный и топографический, выделив в отдельный вид боковую эпитаксию. Топографический рельеф можно создать следующими способами: механическим царапаньем и фотолитографией. Недостатком фотолитографии является то, что она не позволяет получить достаточно ровные боковые стенки микрорельефа. Глубина рельефа играет определённую роль: слишком глубокий рельеф, как правило, не желателен в микроэлектронике, поскольку может быть существенно нарушена плоскостность плёнок и тем самым затруднены последующие технологические операции (например, фотолитография). Вместе с тем ясно, что существует некая минимальная высота ступенек, способная обеспечить ориентированный рост.

Потенциальный рельеф может быть создан несколькими способами. Может быть создан термический рельеф, нагревом лазером или плосковым нагревателем. Терморельеф в отличие от топографического действует только в динамической системе, т.е. в сочетании с движением расплавленной зоны. Может быть создана также акустическая стоячая волна, но этот процесс встречает ряд трудностей. В вакуумной камере

сложно создать такую установку, и удовлетворительный микрорельеф требует создание волн больших частот. Также к потенциальному рельефу можно отнести использование полей упругих напряжений, создаваемых фокусированным лазерным лучом сквозь маску с кристаллографически симметричным чёрно-белым рисунком. Этот метод не даёт удовлетворительных результатов.

В рамках методов создания ориентирующего рельефа можно выделить боковую эпитаксию. К ней относят жидкофазную, твёрдофазную и парофазную кристаллизации. Недостатком жидкофазной является высокая температура процесса. Твёрдофазная протекает при температурах от комнатной до  $200^{\circ}\text{C}$ , и эпитаксиальный процесс идет очень медленно. Возникает опасность спонтанного, неориентированного зарождения кристаллитов в исходной аморфной фазе вдали от затравочного отверстия. Упорядоченному росту также препятствует пористость аморфных плёнок, полученных осаждением при комнатной температуре, что чревато их окислением. Парофазная позволяет строго управлять ориентацией растущей плёнки, но такая плёнка, как правило, имеет островковый характер. Кроме того, в варианте с кристаллизацией из пара иногда требуется проводить дополнительные операции по сглаживанию неровностей.

В искусственной эпитаксии без ориентирующего рельефа можно выделить зонную плавку (точнее горизонтальную зонную плавку для выращивания тонких плёнок). Применение зонной плавки позволяет совместить в одном технологическом цикле сразу три операции: синтез, глубокую очистку синтезированного соединения и выращивание из него монокристалла. Недостатком является высокая температура [2].

Был произведён анализ методов получения квазимонокристаллических тонких металлических плёнок. Как было показано, тонкие монокристаллические плёнки можно получить только с помощью эпитаксиальных процессов. В каждом из них есть как свои плюсы, так и минусы. Наиболее дешёвыми и освоенными методами из рассмотренных являются жидкофазная и газофазная эпитаксии, но они не позволяют получать плёнки высокого качества. Наибольшего качества позволяет добиться вакуумная технология, но это дорогостоящий технологический процесс, что связано с созданием и поддержанием высокого вакуума в камере, где происходит напыление. Удешевить технологию и увеличить качество плёнки позволяет применение совместно с эпитаксией методов искусственной эпитаксии. Наиболее дешёвым и простым в осуществлении является создание топографического рельефа, но этот метод сравнительно груб. Потенциальный рельеф максимально приближен к реальным параметрам кристаллической решётки, поэтому позволяет добиваться лучших ориентационных эффектов, но его трудно совместить с вакуумными процессами, так как необходимо управления извне. А это, в свою очередь, усложняет конструкцию установки в целом. Зонная плавка может применяться совместно практи-

чески с любым методом. Она позволяет очистить уже готовую плёнку от возникших в процессе её формирования дефектов. Этот метод достаточно прост и дешёв и обеспечивает получение плёнок высокого качества.

Поэтому целесообразней всего использовать при получении тонких металлических плёнок совокупность нескольких процессов. Я предлагаю использовать вакуумное распыление с заменой резистивного термического испарителя на испаритель с электронной бомбардировкой, предварительно создав потенциальный рельеф, например путём наложения акустической стоячей волны. Затем, для очистки плёнки от дефектов можно применить зонную перекристаллизацию лазером, что и завершит процесс формирования плёнки. Данная технология будет дешевле, чем применение сугубо вакуумных методов, поскольку не требует на ранних стадиях поддержания высокого вакуума, а, следовательно, и дорогой установки для его создания. Вероятная схема формирования микрорельефа с помощью стоячей поверхностной акустической волны (ПАВ) приведена на рисунке 1.

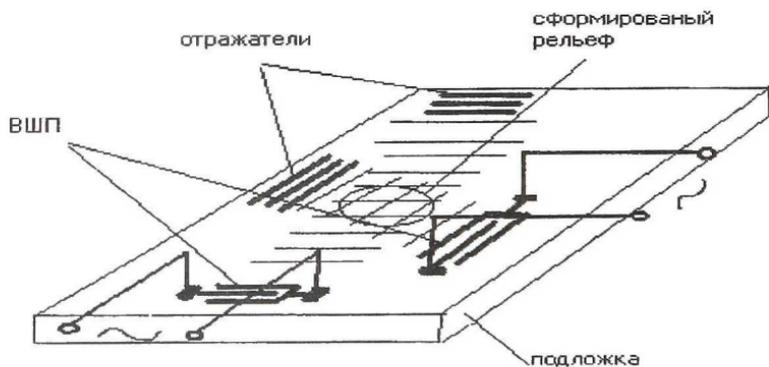


Рисунок 1 - Схема создания микрорельефа с помощью ПАВ

Частоту акустических волн, необходимую для создания ориентирующего рельефа, можно найти исходя из того, что период атомной решётки порядка 0.2 нм, но это соответствует частоте волны 5 ГГц, что в настоящее время невозможно в условиях высокого вакуума. Ориентирующим можно считать рельеф с периодом 200 – 300 нм, что соответствует частотам 5 – 3 МГц. Такую частоту создать гораздо легче. Адсорбируемые частицы будут преимущественно в потенциальных ямах, что в процессе дальнейшего роста создаст ориентирующий эффект.

На рисунке 2 изображена возможная схема перекристаллизации тонкой пленки с использованием лазерного сканирования для создания микрорасплавленной зоны.

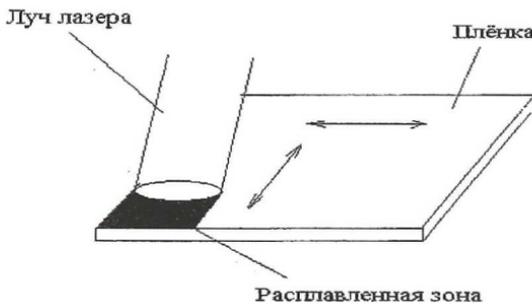


Рисунок 2 - Схема процесса перекристаллизации лучом лазера.

Температура в процессе перекристаллизации должна быть порядка температуры плавления металлической плёнки. Создаётся расплавленная локальная зона и продвигается вдоль всей плёнки. Используют узкую зону, около 40 мкм, при движении её со скоростью лишь 3 мкм/с, при этом создают градиент температуры  $>190$  °С/мм. Зонную плавку применяют потому, что большинство примесей обладает хорошей растворимостью в жидкой фазе по сравнению с твёрдой. Поэтому примеси скапливаются в расплавленной зоне и перемещаются с ней к краю плёнки. Такой процесс позволяет получать плёнки отличного качества не прибегая к высокому вакууму, поскольку плёнка подвергается дальнейшей глубокой очистке. Этим и обусловлен выбор данной совокупности процессов.

#### Список использованных источников

1. Иевлев В.М., Трусов Л.И., Холлианский В.А. Структурные превращения в тонких пленках. – М.: Металлургия, 1988.
2. Гиваргизов Е.И. Искусственная эпитаксия - новое направление кристаллизации пленок в технологии микроэлектроники и вычислительной техники - М.: Наука, 1987.

УДК 533.661

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ДАТЧИКОВ ВСТРОЕННОГО КОНТРОЛЯ (ДВК) ПАРАМЕТРОВ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ (ДФ)

Кондоров Д.А., Логвинов Л.М.

В настоящее время актуален вопрос перехода к эксплуатации гидравлических систем оборудования по их фактическому состоянию, а также непрерывный контроль суперчистых жидкостей, что подразумевает использование датчиков встроенного контроля (ДВК). При этом всевозможные помеховые факторы в ДВК должны быть сведены к минимуму, поскольку при контроле чистых жидкостей любой помеховой импульс