

05

О возможности формирования монокристаллических конденсатов алюминия на изотропных подложках при помощи самоорганизованных ионных распылителей

© В.И. Перекрестов, А.С. Корнющенко, Ю.А. Косминская

Сумский государственный университет, Сумы, Украина
E-mail: kre@sumdu.edu.ua

Поступило в Редакцию 4 апреля 2006 г.

Предложен принципиально новый технологический подход самоорганизации монокристаллического состояния Al на изотропных подложках при стационарной конденсации обратных диффузионных потоков планарного магнетрона. Проанализированы функциональные возможности самоорганизованных ионных распылителей.

PACS: 81.10.-h

Исходя из модели малых зародышей Уолтона и Родина [1–3], можно установить качественную взаимосвязь между количеством атомов в критическом зародыше и разностью химических потенциалов паровой фазы и конденсата ($\Delta\mu$) [3], из которой следует, что в общем случае необходимо различать три варианта перехода вещества в конденсированное состояние. Так, в области высоких пересыщений (больших $\Delta\mu$) наблюдается статистическое осаждение в виде одноатомных критических зародышей. Переход ко второму варианту наблюдается при снижении пересыщения и соответствующей реализации многоатомных

критических зародышей. В этом случае количество атомов в критическом зародыше $\sim 1/\Delta\mu$ [4]. И наконец, третий, самый важный вариант реализуется в случае предельно малых $\Delta\mu$. При таких условиях диффузионное поле адатомов ослабевает и организация многоатомных критических зародышей на поверхности роста практически исключается. Следовательно вещество поатомно встраивается только на активных центрах ростовой поверхности с повышенной энергией связи, превышающей некоторое критическое значение E_s [3].

Известно, что на основании третьего варианта реализованы технологии послыонного наращивания при использовании молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) [5], роста с газовой фазы при разложении металлоорганических соединений [6], кристаллизации с пересыщенных растворов [7] или электролитического осаждения [8]. Близость к фазовому равновесию в системе пар–конденсат при использовании МЛЭ достигается осаждением слабых потоков при достаточно высокой температуре. Наряду с этим в способах [6–8] подобные условия реализованы за счет химического взаимодействия адатомов с окружающей средой, способствующих повторному их переходу в раствор или в газовую смесь. Такие процессы менее чувствительны к температурным изменениям, т.е. обладают определенными признаками самоорганизации. В этой связи представляется достаточно перспективным создание аналогичных более универсальных самоорганизованных систем, работающих на физических принципах, что и положено в основу предлагаемой работы.

Самоорганизованные ионные распылители и их функциональные возможности. Основой работы самоорганизованных ионных распылителей является передача энергии адатома от потока частиц, воздействующих на поверхность роста, что усиливает вероятность повторного перехода адатомов в газообразное состояние [3,9]. При этом самоорганизация технологических параметров осаждения определяет близость к равновесию в системе среда–конденсат и стационарность процесса, а энергия частиц, воздействующих на ростовую поверхность, не должна превышать пороговой энергии распыления кристаллического конденсата.

В настоящей работе предлагается вариант самоорганизованного ионного распылителя, созданного на базе планарного магнетрона на постоянном токе. В этом устройстве (рис. 1,а) распыление мишени 3 происходило в области скрещенных электрических и магнитных

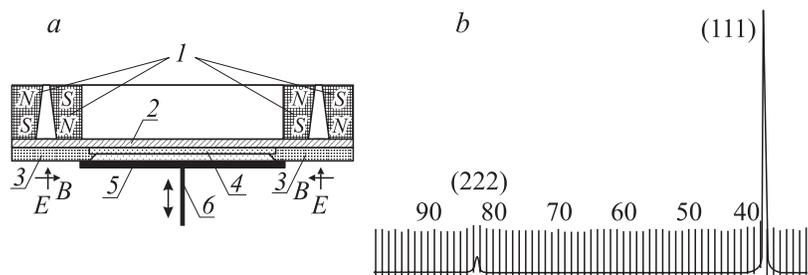


Рис. 1. Самоорганизованный ионный распылитель: *a* — распылительная система; *b* — рентгенограмма от слоев Al.

полей, создаваемых постоянными магнитами *1*. После обезгаживания и глубокой очистки рабочего газа (Ar) до парциальных давлений химически активных газов 10^{-8} Pa по методике, изложенной в [10], штанга *б* перемещалась вниз и открывалась заслонка *5*. В дальнейшем распыленное вещество посредством обратной диффузии осаждалось на подложку *4*, которая крепилась в средней части водоохлаждаемого держателя мишени *2* и находилась под отрицательным потенциалом распыляемой мишени.

Условия необходимой обратной диффузии можно реализовать при давлениях Ar свыше $5 \dots 7$ Pa, что также снижает и усредняет энергию осаждаемых атомов и ионов Ar [11]. При этом самоорганизация близости к равновесию достигалась синхронным изменением таких основных технологических параметров, как температура ростовой поверхности, интенсивность осаждаемого потока, а также энергии и потока частиц, облучающих ростовую поверхность. Так, при изменении в определенных пределах мощности разряда одновременно изменяются и осаждаемый поток, и плазменный поток, воздействующий на ростовую поверхность, что в той или иной степени обеспечивает постоянство E_s . Важно подчеркнуть, что повторно испарившиеся или распыленные атомы, наиболее вероятно, вновь ионизировались и осаждались, причем подобный кольцевой механизм массопереноса для каждого атома может повторяться до тех пор, пока не реализуется энергия связи, превышающая E_s . По своей сути каждое кольцо подобного массопереноса является „прилежным строителем“ необходимой структуры. В этой

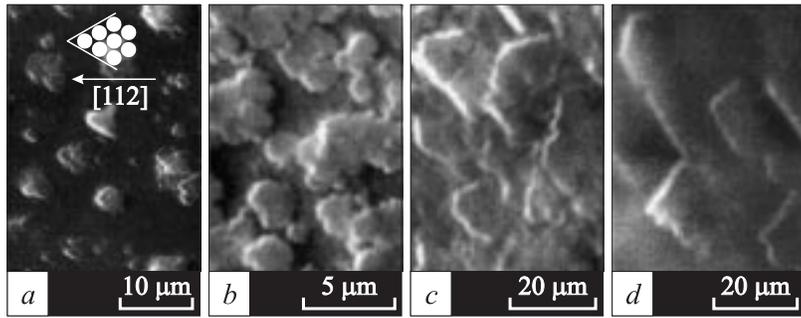


Рис. 2. Этапы формирования слоев Al: *a* — время осаждения 0.5 h; *b* — 1.2 h; *c* — 2 h; *d* — 10 h.

связи управляемое электрическим полем и значением E_s , поэтапное встраивание в ростовую поверхность можно отнести к нанотехнологии.

Рассмотрим последовательные этапы формирования монокристаллического слоя Al на стеклянной подложке при мощности разряда ~ 40 W и давлении Ar 15 Pa. Внимательный анализ этапа зарождения конденсатов (рис. 2, *a*) указывает на примерно одинаковую ориентацию островков в плоскости подложки в направлении [112]. Наличие этой преимущественной ориентации подтверждается тем, что в границе кристаллов присутствуют шестидесятиградусные углы, ориентированные примерно в одном направлении (рис. 2, *a*), и, по-видимому, объясняется наличием тангенциальной составляющей напряженности электрического поля над диэлектрической поверхностью подложки. Следует подчеркнуть, что одинаковая ориентация кристаллов в целом возможна только в случае одинаковой привязки к подложке, по крайней мере, еще одного кристаллографического направления. Действительно, на основании рентгеновских исследований установлен рост кристаллов перпендикулярно к поверхности подложки только в направлении [111] (рис. 1, *b*), что можно объяснить условиями минимизации свободной энергии на границе раздела конденсат–подложка. При этом необходимо подчеркнуть, что одинаковая ориентация кристаллов по отношению к изотропной подложке возможна только в условиях зарождения конденсата на активных центрах и в виде одноатомных критических зародышей, так как управлять ориентацией многоатомных критических

зародышей не представляется возможным. Используя метод расчета осаждаемого потока, изложенный в [11], а также оценивая объем осажденного вещества на основании рис. 2, *a*, можно показать, что по завышенным оценкам только примерно 1...7% взаимодействующих с ростовой поверхностью атомов Al сконденсируются с первой попытки. Этот факт еще раз подтверждает близость к фазовому равновесию системы плазма–конденсат.

В процессе постепенного срастания зародышей (рис. 2, *b–d*) образуется слой с близким к монокристалльному состоянию, что подтверждается наличием на ростовой поверхности значительного количества одинаково направленных ступенек роста, а также рентгеновскими исследованиями. Очевидно, в силу изотропности подложки, при срастании кристаллов формируется сеть дислокаций несоответствия. Наряду с этим преобладающий рост отдельных ступенек (рис. 2, *c*) перекрывает рядом находящиеся ранее разобщенные кристаллы, что в конечном итоге способствует формированию более совершенной структуры.

Очевидно, преимущества самоорганизованных ионных распылителей по сравнению с функциональными возможностями широкоиспользуемых в настоящее время способов послойного наращивания кристаллов [5–8] состоят в следующем:

1. Самоорганизованные ионные распылители обладают наиболее широкими возможностями как перевода вещества в газообразное состояние, так и самоорганизации условий, близких к фазовому равновесию системы среда–конденсат. Так, равновесное давление паров над Al при температуре его плавления составляет всего лишь 10^{-7} Pa [12], что предельно усложняет его послойное наращивание при помощи МЛЭ.

2. Наличие электрического поля над поверхностью роста и осажденные ионизированные атомы способствуют самоорганизации не только монокристаллического состояния, но и различных столбчатых структур [13]. По своей сути электрическое поле является дополнительным параметром управления при поатомной сборке конденсата.

3. При сохранении предельно малых коэффициентов конденсации самоорганизацию условий, близких к равновесным, можно получить даже осаждая достаточно интенсивные потоки, что позволяет ускоренно формировать слои с различными архитектурными формами.

4. Снижение коэффициента конденсации происходит при непосредственной передаче энергии адатомам от воздействующих на ростовую поверхность ионов, что позволяет получить условия, близкие к

равновесным, на охлаждаемых подложках и, следовательно, снизить взаимную диффузию при создании гетеропереходов, а также расширить ассортимент используемых подложек.

Список литературы

- [1] *Родин Т., Уолтон Д.* Монокристаллические пленки. М.: Мир, 1966.
- [2] *Walton D., Rhodin T., Rollings R.* // J. Chem. Phys. 1963. V. 38. P. 2698.
- [3] *Перекрестов В.И.* // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 19. С. 41–46.
- [4] *Чернов А.А.* Кристаллография. Т. 3. М.: Наука, 1980.
- [5] *Херман М.* Полупроводниковые сверхрешетки. М.: Мир, 1989.
- [6] *Уфимцев В.Б., Акчурич Р.Х.* Физико-химические основы жидкофазной эпитаксии. М.: Металлургия, 1983.
- [7] *Федосюк В.М., Шелег М.У., Касютнич О.И.* // Зарубежная радиоэлектроника. 1990. № 5. С. 88.
- [8] *Фельдман Л., Майер Д.* Основы анализа поверхности и тонких пленок. М.: Мир, 1989.
- [9] *Перекрестов В.И., Косминская Ю.А.* // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 78. С. 258.
- [10] *Перекрестов В.И., Кравченко С.Н.* // ПТЭ. 2002. № 3. С. 123.
- [11] *Данилин Б.С.* Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. М.: Энергоатомиздат, 1989.
- [12] *Глэнг Р.* Технология тонких пленок. Т. 1. М.: Сов. радио, 1977.
- [13] *Перекрестов В.И., Косминская Ю.А.* // Металлофизика и новейшие технологии. 2005. Т. 27. С. 265.