

торца трубки, в которую вдавливаются или втягивается мениск. Теорию легко видоизменить. Эти примеры показывают, что известные методы могут быть реализованы для других типов капиллярных поверхностей.

Остановимся на тех методах, где измеряемые параметры капиллярной поверхности могут быть выбраны многими способами и по существу изменяются непрерывно в зависимости от изменения определяющих условий. Так, в качестве измеряемых параметров для лежащей капли могут быть взяты координаты некоторой точки, для которой задан числом угол наклона касательной (значение производной). Ясно, что заданное значение угла наклона касательной можно изменить по своему усмотрению. Способ может быть перенесен на другой тип поверхности, например на висющую каплю. Однако, если для лежащей капли реализуются участки меридиана со значениями угла наклона вплоть до 180° , то для висящей капли предельное значение угла наклона существенно меньше и кроме того существует по две точки меридиана с одинаковым значением производной.

В данном случае для анализа необходимо использовать теорию устойчивости капиллярных поверхностей, которая достаточно разработана [3]. Однако в связи с перегибом меридианной кривой для висящих капель необходимо преодолеть небольшие затруднения, которые не свойственны лежащей капле. Обратим внимание на то, что впервые на висящей капле было предложено измерять максимальный диаметр d_1 и диаметр d_s на уровне, отстоящем от вершины на величину максимального диаметра в работе [4], а затем в [5].

Второй диаметр в работе [6] предложено измерять на уровнях, равных максимальному диаметру d_1 , умноженному на некоторый коэффициент K (в частности применялись значения K от 0,7 до 1,2 [7]).

В работе [8] продемонстрирован перенос измерений по этому принципу на лежащие капли.

Множественность способов определения измеряемых параметров позволяет еще увеличить их число. Однако задача заключается в том, чтобы путем соответствующего анализа найти такие параметры, которые позволяют получить наивысшую точность определения капиллярной постоянной. Число таких пар параметров будет небольшим, потребность в других отпадет.

1. Иващенко Ю. М., Єременко В. Н. Основи прецизійного вимірювання поверхневої енергії розплавів за методом лежачої краплі.— Київ: Наук. думка, 1972.— 231 с.
2. Иващенко Ю. Н. Физическая химия поверхностных явлений в расплавах.— Киев: Наук. думка, 1971.— С. 118—124.
3. Бабский В. Г. и др. Гидромеханика невесомости / Под ред. А. Д. Мышкиса.— М.: Наука, 1976.— 504 с.
4. Andreas J. M., Hauser E. A., Tucker W. B. // J. Phys. Chem.— 1938.— 42.— P. 1001—1019.
5. Fordham S. // Proc. Roy. Soc.— 1948.— A194.— P. 1—16.
6. Mills O. S. // Brit. Journ. of appl. Phys.— 1953.— 4 (8)— P. 247—258.
7. Мелик-Гайказян В. И. // Изв. Томского политехн. ин-та.— 1965.— 136.— С. 133—161.
8. Мелик-Гайказян В. И., Верончихина В. В. // Там же.— 1966.— 151.— С. 46—51.

Ин-т пробл. материаловедения
им. И. Н. Францевича АН Украины, Киев

Получено 22.07.91

УДК 539.216.2+532.64

Н. Т. Гладких, С. В. Дукаров

О СВЯЗИ РАЗМЕРА ОСТРОВКОВ С МАССОВОЙ ТОЛЩИНОЙ ПЛЕНКИ

Приводятся результаты исследований распределения микрочастиц по размерам в островковых пленках галлия различной массовой толщины на аморфной углеродной подложке. На основании обобщения полученных результатов построена диаграмма, отражающая закономерности изменения количества (или суммарного объема) островков фиксированного размера с увеличением массовой толщины пленки.

© Н. Т. Гладких, С. В. Дукаров, 1993

Distribution of microparticles by sizes in the isle films of gallium with different mass thicknesses on amorphous carbon substrate has been studied. Results are presented. Basing on generalization of the obtained results a diagram is constructed which reflects regularities of the change in quantity (or total volume) of the isles of fixed dimension with the increased mass thickness of the film.

Одной из основных характеристик островковых пленок, в значительной мере определяющей их свойства и возможность практического применения [1, 2], является их дисперсность, т. е. средний размер частиц, образующих пленку. Теоретические расчеты зарождения и роста конденсированных

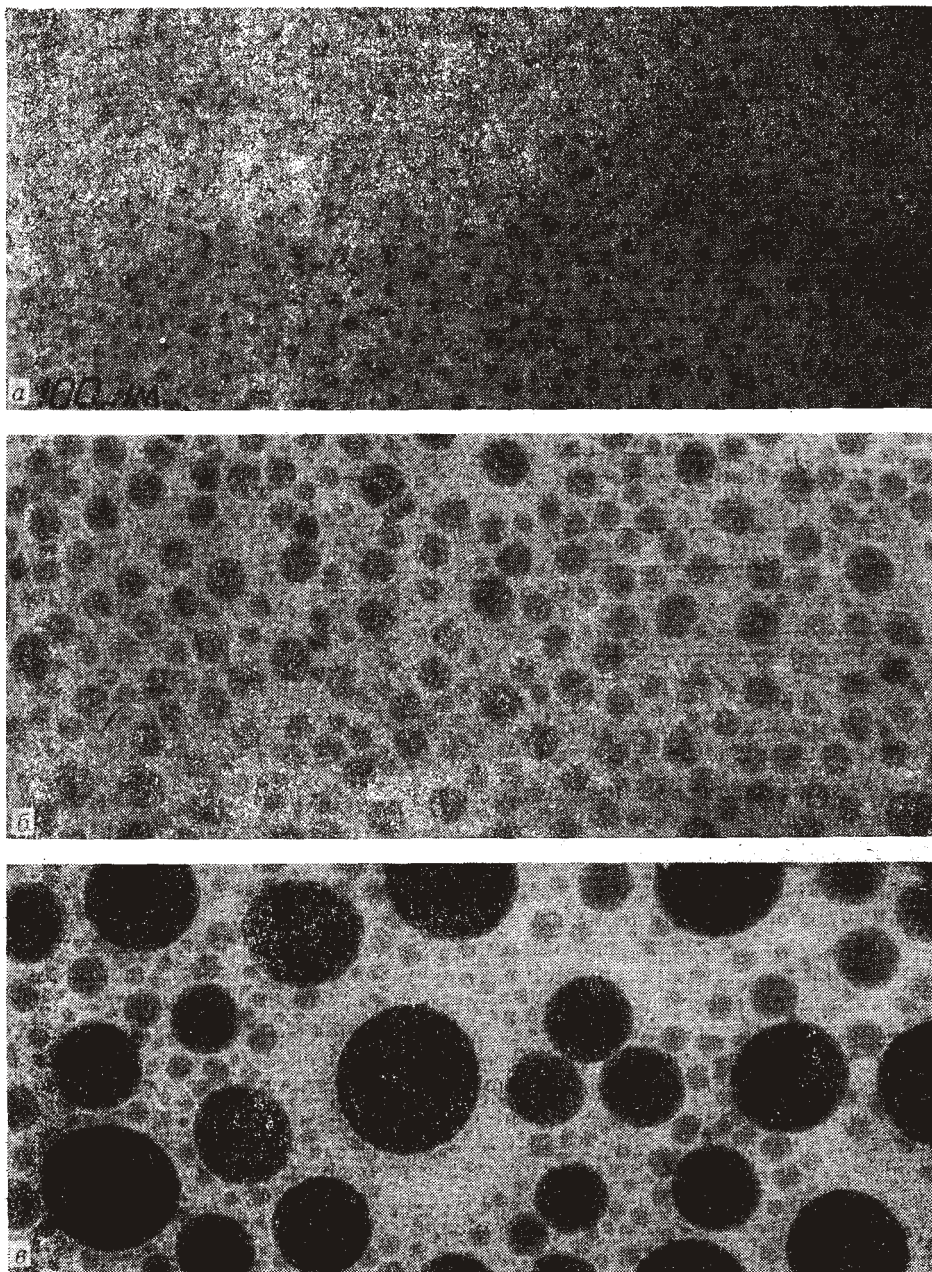


Рис. 1 Электронно-микроскопические снимки островковых пленок галлия различной массовой толщины.

a — 1 нм; *б* — 5 нм; *в* — 14 нм

Fig. 1 Electron-microscopic photos of isle gallium films of mass thickness:

a — 1 nm; *б* — 5 nm; *в* — 14 nm

пленок с учетом коалесценции островков [3, 4] достаточно сложны и позволяют определить лишь качественный вид функции распределения микрочастиц по размерам. Поэтому выбор условий препарирования островковых пленок с заданной дисперсностью, как правило, производится экспериментально. При конденсации пленок обычно нет возможности непосредственно измерять размер микрочастиц и поэтому для получения островковых пленок требуемой степени дисперсности необходимо знание связи между контролируемой в процессе конденсации массовой толщиной пленки и характерным размером частиц.

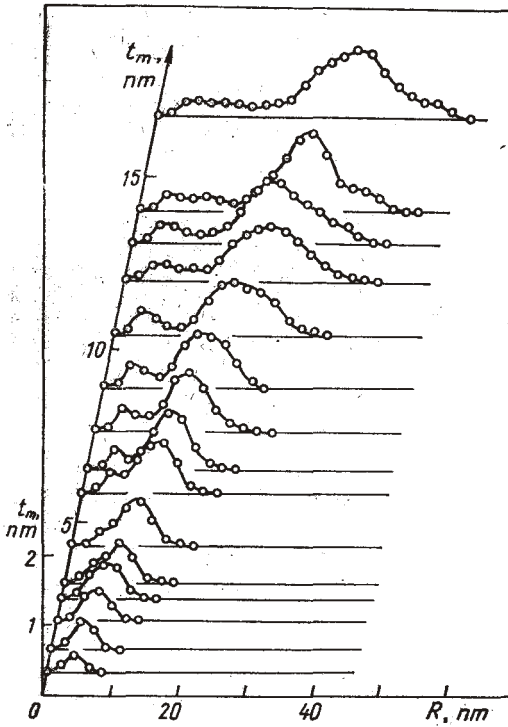


Рис. 2. Распределение по размерам островков галлия в пленках различной массовой толщины

Fig. 2. Size distribution of gallium isles in the films of different mass thickness

и затем исследовались в электронном микроскопе. Характерные электронно-микроскопические снимки пленок Ga/C представлены на рис. 1. Из расчета микроснимков определялись распределения частиц металла по их радиусам $N(R, t_m)$ в пленках различной массовой толщины. Такие распределения для пленок, сконденсированных по механизму пар — жидкость в отсутствие реиспарения, характеризуются очень большим количеством частиц минимального размера и ввиду этого неудобны для анализа. В то же время для практических целей часто оказывается более важным знать не количество микрочастиц заданного размера, а в зависимости от изучаемого явления, их суммарный объем или площадь поверхности. При изучении объемных эффектов данные по $N(R, t_m)$ могут быть представлены в координатах R — $t(R, t_m)$ в виде серии гистограмм (рис. 2), соответствующих различным значениям массовой толщины. Величина $t(R, t_m)$, соответствующая объему частиц в интервале значений их радиусов (R — $\Delta R/2$, $R + \Delta R/2$) в пленке толщиной t_m , отнесенному к площади участка (S), на котором проводились измерения, имеет смысл массовой толщины пленки, образуемой частицами данного интервала размеров, и определяется следующим выражением:

$$t(R, t_m) = \frac{4}{3} \pi R^3 \Phi(\theta) N(R, t_m) / S,$$

Найти эту связь можно на основе анализа эволюции распределения микрочастиц по размерам во время конденсации пленки. Имеющиеся в литературе данные относятся к кристаллическим островковым пленкам и поэтому представлялось целесообразным использовать жидкие островковые пленки для изучения эволюции распределения по размерам, так как в них процессы, связанные с изменением распределения, протекают значительно быстрее и частицы имеют сферическую форму. Исходя из этого в качестве объекта исследований были выбраны островковые пленки галлия на аморфной углеродной подложке. Образцы препарировались путем конденсации галлия в вакууме 10^{-4} Па на протяженную пластину при температуре 50°C , что позволяло получать в одном эксперименте непрерывный набор массовых толщин в интервале $1 < t_m < 20$ нм. После завершения конденсации пленки охлаждались в вакууме до комнатной температуры

где $\Phi(\theta) = (2 + \cos(\theta))(1 - \cos(\theta))^2/4$ — геометрический фактор, учитывающий краевой угол смачивания (θ) островками металла подложки (для галлия на аморфной углеродной подложке $\theta = 110^\circ$). Суммирование величин $t(R, t_m)$ по всем интервалам радиусов позволяет непосредственно определить значение массовой толщины пленки на данном образце. Характерной особенностью распределения частиц по размерам для исследованной системы, как видно из рис. 2, является наличие первого неподвижного максимума при $R \sim 3$ нм и появление второго максимума (начиная с $t_m \sim 3$ нм), который с ростом массовой толщины смещается в область больших размеров частиц.

Изложенная выше методика построения гистограмм является общеприимой и вполне применима, когда нужно определить характеристики данной пленки. Однако нередко возникает и обратная задача, получить пленку с максимальным вкладом частиц заданного размера. В этом случае необходимо проследить за изменением объема частиц фиксированного размера и более целесообразным оказывается поменять местами переменную и параметр и представить данные по $N(R, t_m)$ в координатах « t_m — $t(R, t_m)$ ».

На рис. 3 приведены зависимости $t(R, t_m) = f_R(t_m)$ для островковых пленок галлия на аморфной углеродной подложке. Видно, что в исследованном интервале массовых толщин пленок галлия (1–20 нм) с ростом t_m наблюдается немонокотное изменение количества частиц фиксированного размера. При этом на зависимости $f_R(t_m)$ для постоянного радиуса частицы R можно выделить три характерных значения массовых толщин: $f_{m1} \sim 0,25R$ — толщина, до которой частицы данного размера отсутствуют; $t_{m2} \sim 0,5R$ — толщина, соответствующая максимальному объему частиц радиусом $R \pm \Delta R/2$ и $t_{m3} \sim R$ — толщина, при которой объем частиц данного

радиуса принимает постоянное значение, сохраняющееся в широком интервале толщин $t_m > t_{m3}$ (до $t_m \sim 20$ нм) и составляющее примерно 20 % от максимальной величины. Обобщение этих результатов позволяет построить диаграмму в координатах $t_m - R$, отражающую закономерности изменения размера островков в процессе роста пленок (рис. 4). Нанесенные на диаграмме линии зависимости толщин t_{m1} , t_{m2} , t_{m3} от радиуса частиц разделяют области, в которых оказывается различным характер изменения объема частиц фиксированного размера с ростом массовой толщины пленки. В области A (ниже линии t_{m1}) частицы данного размера не наблюдаются: $t_R(t_m) = 0$. Линия t_{m1} соответствует началу появления частиц радиуса R , а линия t_{m3} — стабилизации их количества. В промежутке между этими линиями объем (количество) частиц данного размера проходит через максимальное значение, определяемое линией t_{m2} , т. е. в области B с ростом толщины происходит увеличение суммарного их объема, а в области C — уменьшение. Выше линии t_{m3} (в области D) объем частиц данного радиуса не зависит от толщины пленки: $f_R(t_m) = \text{const}(R)$.

Видно, что использование указанной диаграммы позволяет легко находить изменение количества (объема или площади поверхности) частиц

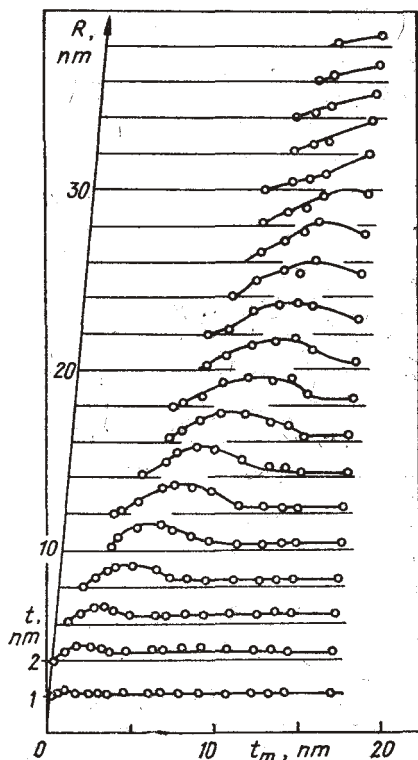


Рис. 3. Изменение суммарного объема частиц различных размеров с массовой толщиной пленки галлия

Fig. 3. Change of the total volume of different-size particles with mass thickness of the gallium film.

заданного размера (например, R') с ростом массовой толщины пленки. Как видно из рис. 4, частицы радиусом R' появляются при толщине пленки t_{m1} , их количество увеличивается с ростом t_m и достигает максимального значения при $t_m = t_{m2}$, далее до толщины t_{m3} наблюдается уменьшение количества частиц данного размера. При толщине $t_m > t_{m3}$ число частиц радиусом $R \pm \Delta R/2$ постоянно и составляет незначительную долю от общего объема пленки. Следовательно, если по условиям эксперимента нужно получить пленку с максимальным количеством частиц заданного размера, то массо-

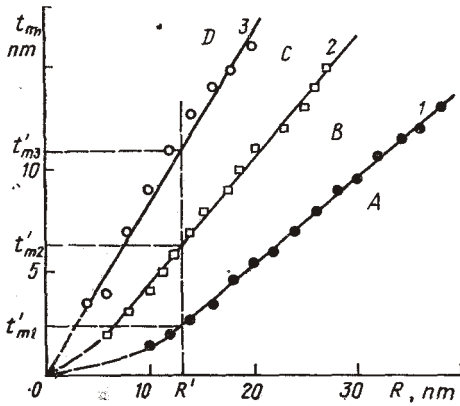


Рис. 4. Диаграмма роста островковых пленок галлия:

1 — 3 критические толщины t_{m1} , t_{m2} , t_{m3}

Fig. 4. Growth diagram of isle gallium films:

1 3 correspond to critical thicknesses t_{m1} , t_{m2} , t_{m3}

вая толщина такой пленки должна соответствовать значению, расположенному на линии t_{m2} , т. е. $t_{m2}(R')$. Совместный анализ результатов, представленных на рис. 2 и 3, показывает, что линия t_{m2} на рис. 4 соответствует зависимости от массовой толщины размера, на который приходится максимальный объем. При этом около 50 % общего объема пленки приходится на интервал соответствующий отклонению размера частиц в 20 % от R' : $(0.8-1.2)R'$

В тех случаях, когда определяющим параметром является площадь поверхности островков заданного размера, семейства зависимостей $t(R, t_m)$ (см. рис. 2, 3) могут быть перестроены в соответствующих координатах. При этом диаграмма (см. рис. 4) не претерпевает существенных изменений, а также может использоваться для выбора оптимальных условий препарирования

островковых пленок заданной степени дисперсности.

В заключение следует отметить, что полученные распределения и диаграмма относятся к указанным выше условиям препарирования пленок. Для целенаправленного изменения распределения микрочастиц по размерам можно либо варьировать параметры получения пленок (температуру подложки, скорость конденсации, температуру и длительность отжига образцов), либо вводить дополнительные внешние факторы. Так, наложение продольного электрического поля во время конденсации пленок или после ее прекращения стимулирует коалесценцию, что приводит к увеличению характерного размера частиц [5].

- 1 Комник Ю. Ф. Физика металлических пленок.— М. Атомиздат, 1979.— 264 с.
- 2 Хирс Ж. Э., Моazed К. Л. Физика тонких пленок.— М. Мир, 1970.— С. 124—166.
- 3 Трофимов В. И. // Физика твердого тела.— 1978.— 20, № 5.— С. 1285—1289.
- 4 Венгеренков Р. Д. // Укр. физ. журн.— 1980.— 25, № 3.— С. 442—447
- 5 С. П. Чижик, С. В. Дукаров, Н. Т. Гладких, Л. К. Григорьева // Докл. АН СССР.— 1990.— 314, № 4.— С. 863—865.