Задавая неоднородность поля полем диполя $H_0 \sim \mu_{20} r^{-3}$, для $U_\text{п}$ имеем

$$U_\text{п} = -\frac{\mu_{10}\mu_{20}}{r^3}\left(1 - \frac{\gamma^2 H_1^2}{(\Delta\omega(r))^2 + \omega_r^2 + \gamma^2 H_1^2}\right). \quad (7)$$

Из зависимости $U\Sigma(r) = U_\text{п} + U_\text{ц}$ (рис. 2, *б*) следует возможность возникновения устойчивых состояний движения (рис. 2, *б*), замеченных ранее при ФМР [5, 6], при $r_1 < r \leqslant r_2$, где $U_\text{ц}$ — центробежный вклад, а r_1 удовлетворяет уравнению $\omega = |\gamma|\mu_{20} r_1^{-3}$.

Таким образом, неустойчивую систему с потенциальной энергией типа $\sim r^{-3}$ можно стабилизировать магнитным резонансным взаимодействием. Данная ситуация является частным случаем задач стабилизации неустойчивости с помощью диссипативных и неконсервативных сил [12]. В принципе возможен захват в резонансное состояние и на кратных частотах — гармониках 2ω, 3ω и т. д., если учесть нелинейные члены взаимодействий в уравнениях (3), (4). Это приведет к набору дискретных орбит по r.

Аналогичный резонансный захват, по-видимому, возможен и для других частиц, обладающих дипольными моментами и спинами, к примеру электрические диполи, ядерные псевдомагнитные диполи, так как уравнения движения [13, 14] при классическом рассмотрении будут по своему виду аналогичны уравнениям (3), (4).

Литература

[1] *И. М. Тернов, В. А. Бордовицын.* УФН, 132, 345 (1980).
[2] *В. Г. Багров, В. А. Бордовицын.* Изв. вузов, Физика, № 2, 67 (1980).
[3] *В. В. Козорез.* Изв. АН СССР, сер. МТТ, № 4, 29 (1974).
[4] *В. В. Козорез.* ДАН СССР, 232, 1055 (1977).
[5] *А. И. Филатов, В. Г. Широносов.* Изв. вузов, Физика, № 1, 138 (1977).
[6] *В. Г. Широносов.* Деп. ВИНИТИ, № 2035-79 (1979).
[7] *В. Г. Широносов.* ЖТФ, 51, 192 (1981).
[8] *В. Г. Широносов.* В кн.: Тез. Всес. конф. по физике магнитных явлений, П9-7, 259. Харьков (1979).
[9] *В. Г. Широносов.* УФЖ, 25, 1742 (1980).
[10] *А. Г. Гуревич.* Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. «Наука», М. (1973).
[11] *Дж. Пейк.* Парамагнитный резонанс. «Мир», М. (1965).
[12] *Д. Р. Меркин.* Введение в теорию устойчивости движения. «Наука», М. (1971).
[13] *И. Е. Тамм.* Основы теории электричества. «Наука», М. (1976).
[14] *В. Г. Показаньев, Г. В. Скроцкий.* УФН, 129, 615 (1979).

Ижевский
государственный медицинский институт

Поступило в Редакцию
10 октября 1982 г.

УДК 532.78

ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ РОСТА НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ В ПРОТОЧНОЙ СИСТЕМЕ

А. А. Щетинин, О. Д. Козенков, А. И. Дунаев

В настоящей работе приводятся новые результаты экспериментальных исследований скорости роста нитевидных кристаллов (НК) кремния в стандартном хлоридном процессе в широком интервале пересыщений и поперечных размеров при температуре 1050 °С. В качестве агента-растворителя для инициирования их роста по механизму пар—жидкость—кристалл (ПЖК) использовались опилки меди (99.99%), помещаемые на монокристаллические подложки кремния (111). Для исследования кинетики роста применялась методика «меток времени» [1]. Скорость роста определялась как отношение длины НК выше метки к времени роста. Точность измерения длины в оптическом микроскопе ММР-2Р составляла 0.5 мкм, диаметра 0.2 мкм. Мольное отношение исходных реагентов в газовой фазе $n = M_{SiCl_4}/M_{H_2}$ изменялось в пределах от 0.0025 до 0.1.

Нами обнаружено влияние густоты НК (число их на единице поверхности подложки) на скорость роста, которое обусловлено недостатком питания из газовой фазы. С увеличением

густоты скорость роста заметно уменьшалась. Для получения воспроизводимых результатов НК располагались друг от друга не ближе 500 мкм.

На рис. 1 представлены графики изменения скорости роста от диаметра НК, снятые при n=0.0075 (*1*), 0.01 (*2*), 0.005 (*3*) и 0.015 (*4*). В области 2—5 мкм наблюдается перегиб кривых, связанный с эффектом Гиббса—Томсона [1]. На рис. 2 показаны зависимости аксиальной скорости роста НК различных поперечных размеров (*d*: *1* — 15, *2* — 30, *3* — 50) от мольного отношения реагентов n. Как видно из рисунка, скорость роста вначале быстро увеличивается, достигает максимума при n=0.0075 и затем постепенно уменьшается до нуля. При $n > 0.1$ рост сменяется травлением. Такой ход кривых мы связываем с двумя причинами. Во-первых, с увеличением n изменяется соотношение между скоростями кристаллизации и растворения кремния, что ранее обнаружено при выращивании пленок [2]. Во-вторых, в соответствии с диффузионно-дислокационной моделью роста НК [1] значительный вклад в поставку материала на вершину НК может вносить поверхностная диффузия адсорбированных атомов (или молекул) по их боковой поверхности. При $n >$ —0.0075 на боковых гранях НК начинается процесс двумерного зародышеобразования. Образующиеся двумерные зародыши перехватывают материал, поступающий к вершине за счет поверхностной диффузии, и приводят к появлению огранки и радиальной составляющей скорости роста НК. С ростом n этот процесс идет с возрастающей скоростью и совместно (или в конкуренции) с первой причиной может способствовать уменьшению аксиальной скорости при $n > 0.0075$ (рис. 2).

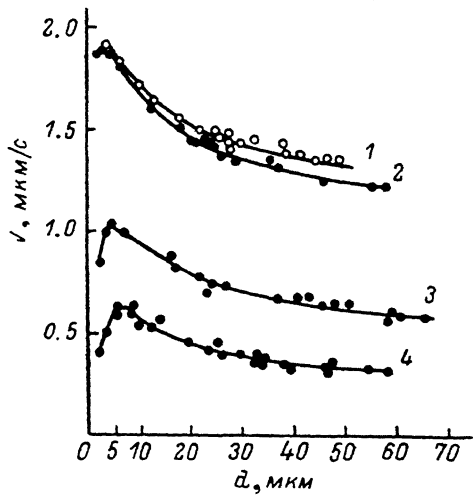

Рис. 1.

Перестроение кривых рис. 1 в координатах $V=f(1/d)$ показывает, что для НК диаметром более 5—10 мкм экспериментальные точки вполне удовлетворительно укладываются на прямые линии (рис. 3). Эти линии могут быть описаны уравнением типа

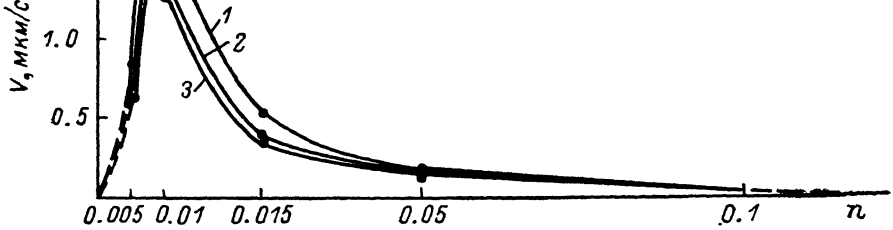

Рис. 2.

$$V = a + b\,(1/d), \tag{1}$$

где a, b — некоторые константы, изменяющиеся с изменением мольного отношения n. В соответствии с диффузионно-дислокационной моделью полную аксиальную скорость роста НК можно представить в виде суммы

$$V = V_{\text{пж}} + V_{\text{диф}}, \tag{2}$$

где $V_{\text{пж}}$, $V_{\text{диф}}$ — скорости роста, обусловленные соответственно осаждением молекул из газа на поверхность жидкой капли и диффузионным потоком материала по боковой поверхности НК, поступающим в ту же каплю.

Скорость роста $V_{\text{диф}}$ в стационарных условиях может быть представлена как величина, пропорциональная отношению

$$V_{\text{диф}} \sim \frac{S_{\text{диф}}}{S_{\text{жт}}} \sim \frac{2\pi R\lambda_s}{\pi R^2} \sim \frac{\lambda_s}{R}, \qquad (3)$$

λ_s — средняя длина диффузионного пробега адсорбированных атомов (или молекул) до реиспарения; $S_{\text{диф}}=2\pi R\lambda_s$ — площадь боковой поверхности, с которой каждый адсорбированный атом попадает в каплю на вершине; πR^2 — площадь раздела фаз $S_{\text{жт}}$; R — радиус НК.

Таким образом, $V_{\text{диф}}$ обратно пропорциональна поперечным размерам НК, что и объясняет полученные экспериментально закономерности (рис. 3). Если считать в первом приближении площадь $S_{\text{пж}}$ равной площади полусферы $2\pi R^2$, то выражение (2) легко привести к виду

$$V = V_{\text{пжк}} + V_{\text{пжк}}\frac{\lambda_s}{R} = V_{\text{пжк}}\left(1+\frac{\lambda_s}{R}\right), \qquad (4)$$

которое с точностью до постоянных совпадает с зависимостью, полученной для НК с длиной $l \gg \lambda_s$ при детальном анализе уравнения материального баланса в модели Диттмара—Ноймана [1].

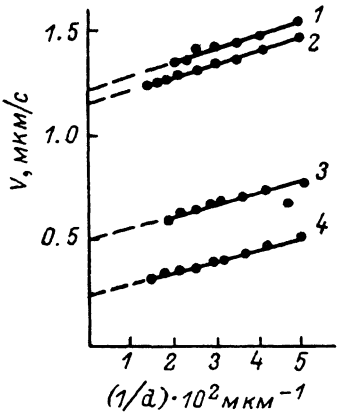

Рис. 3. Зависимость скорости роста НК от обратного диаметра при n=0.0075 (*1*), 0.01 (*2*), 0.005 (*3*), 0.015 (*4*).

Уравнение (4) позволяет сделать оценку важного параметра λ_s. Действительно, экстраполяция прямых рис. 3 при $1/R \to 0$ дает величину $V_{\text{пжк}}$, а тангенс угла наклона прямой

$$\operatorname{tg}\alpha = V_{\text{пжк}}\lambda_s,$$

откуда

$$\lambda_s = \operatorname{tg}\alpha / V_{\text{пжк}}. \qquad (5)$$

Полученные из (5) значения λ_s следующие:

n	0.005	0.0075	0.01	0.025
λ_s, мкм	10.2	6.0	6.5	13.0

Они довольно хорошо согласуются с результатами работы [3], в которой λ_s было определено по размытию предварительно нанесенного на пластины монокристаллического кремния рельефа в процессе высокотемпературного отжига в глубоком вакууме. Наблюдающуюся зависимость λ_s от n можно, по-видимому, отнести на счет изменения состава адсорбционного слоя и разного вклада двумерного зародышеобразования при изменении n.

Литература

[1] *Е. И. Гиваргизов.* Рост нитевидных и пластинчатых кристаллов из пара. «Наука», М. (1977).

[2] *J. Bloem, L. J. Giling.* Current Topics in Material Science 1978, v. 1, eg. lg E. Kaldis, North-Holland Publishing Company, p. 161.

[3] *Ю. Л. Гаврилюк, Ю. С. Кагановский, В. Г. Лифшиц.* Кристаллография, 3, 561 (1981).

Воронежский
политехнический институт

Поступило в Редакцию
18 октября 1982 г.