

УДК 548.527

**МОДЕЛЬ РОСТА, ЛИМИТИРУЕМОГО ГЕТЕРОГЕННОЙ
ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИЕЙ, НАНОРАЗМЕРНЫХ
НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ,
ПРИ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ ИХ РАСПОЛОЖЕНИЯ
НА ПОДЛОЖКЕ**

**О. Д. Козенков¹, Я. А. Болдырева¹, В. Г. Санников¹,
И. О. Бакланов¹, И. В. Сычев²**

¹ — *Военный учебно-научный центр ВВС “Военно-воздушная академия им. профессора
Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина”;*

² — *Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации*

Поступила в редакцию 12.05.2023 г.

Аннотация. Рост наноразмерных нитевидных кристаллов при высокой плотности их расположения на ориентирующей монокристаллической подложке представляет научный и практический интерес. Результаты кинетических исследований для таких кристаллов плохо укладываются в имеющиеся модельные представления. В данной работе для нитевидных кристаллов кремния, выращенных в проточной системе Si-H-Cl, предложена модель роста в кинетическом режиме в пределах диффузионного слоя постоянной толщины. Концентрации компонентов газовой фазы в диффузионном слое меняются линейно в виду плоской симметрии. В рамках модели роста, лимитируемого гетерогенной химической реакцией выделения кристаллизующегося вещества, с учетом положений модели роста нитевидных кристаллов при высокой плотности на подложке получено выражение, описывающее зависимость скорости роста кристалла от его радиуса. Вид зависимости определяется временем роста кристаллов. При достаточно большом времени роста результаты, полученные в работе, соответствуют эксперименту. Получено выражение для минимального критического радиуса кристалла, при котором скорость его роста обращается в ноль.

Ключевые слова: нитевидный кристалл, гетерогенная химическая реакция, скорость роста, плотность кристаллов на подложке, размерный эффект, расплав, концентрация.

A MODEL OF GROWTH LIMITED BY HETEROGENEOUS CHEMICAL REACTION, NAN-SIZED SILICON WHISKER, WITH A HIGH DENSITY OF THEIR LOCATION ON THE SUBSTRATE

O. D. Kozenkov, Ya. A. Boldyreva, V. G. Sannikov,
I. O. Baklanov, I. V. Sychev

Abstract. The growth of nano-sized whisker crystals at a high density of their arrangement on an orienting single-crystal substrate is of scientific and practical interest. The results of kinetic studies for such crystals do not fit well into the existing model concepts. In this work, a growth model in the kinetic regime within a diffusion layer of constant thickness is proposed for silicon whiskers grown in a Si-H-Cl flow system. The concentrations of gas phase components in the diffusion layer vary linearly due to plane symmetry. Within the framework of a growth model limited by a heterogeneous chemical reaction of the release of a crystallizing substance, taking into account the provisions of the model for the growth of whiskers at a high density on a substrate, an expression was obtained that describes the dependence of the crystal growth rate on its radius. The type of dependence is determined by the crystal growth time. For a sufficiently long growth time, the results obtained in this work are consistent with experiment. An expression is obtained for the minimum critical radius of a crystal at which its growth rate becomes zero.

Keywords: whisker, heterogeneous chemical reaction, growth rate, density of crystals on the substrate, dimensional effect? melt, concentration.

ВВЕДЕНИЕ

Нитевидные кристаллы (НК) — квазиодномерные кристаллические объекты, длина которых много больше их диаметра [1–3], растущие по механизму пар-жидкость-кристалл. Нитевидные кристаллы — это практически идеальные монокристаллы, в которых отсутствуют линейные дефекты, с прочностью мало отличающейся от теоретических значений. Причем прочность НК приближается к теоретической по мере уменьшения их поперечного размера [4]. Нитевидная форма и близкая к теоретическим значениям прочность НК делают их уникальными армирующими элементами, которые используют для создания композиционных материалов. НК полупроводниковых материалов перспективны для изготовления датчиков различных физических величин [5]. Наиболее перспективны в этом отношении термоанометры и тензометры, которые в максимальной степени используют нитевидную геометрию и теоретическую прочность нитевидных кристаллов. Возможность легирования НК в процессе роста позволяет создавать в них продольные и поперечные $p-n$ переходы, что дополнительно расширяет функциональные возможности датчиков на их основе [5].

Известные на сегодняшний день лабораторные технологии получения НК несовершенны [3]. Существует ряд технологических проблем сопровождающих рост НК, которые связаны с воспроизводимостью процесса роста, размеров кристаллов, их морфологии и физических свойств. Причины таких проблем связаны в первую очередь с чистотой газов, используемых для роста НК, и системой разводки и регулирования потоков газов. Такого рода технологические проблемы не представляют собой существенных препятствий для промышленного производства НК различных материалов [2–3]. Одним из наиболее перспективных материалов являются углеродные нанотрубки, которые также как и прочие НК растут по механизму пар-жидкость-кристалл. Возможность получения углеродных нанотрубок достаточной длины принципиально позволяет решить амбициозную задачу создания “космического лифта” [6].

Решение технологических проблем, связанных с воспроизводимым получением НК различных материалов, в значительной степени определяется уровнем понимания физико-химических процессов, сопровождающих и определяющих рост нитевидных кристаллов.

Анализ литературы для НК, растущих в системах обеспечивающих выделение кристаллизующегося вещества в результате протекания гетерогенной химической реакции или физического осаждения из молекулярных пучков позволяет утверждать:

— скорость роста НК зависит от диаметра кристалла, исходного состава газовой фазы, температуры [7–10];

— скорость роста НК зависит от плотности их расположения на подложке так, что с ростом плотности кристаллов до предельно возможных значений скорость их роста уменьшается на порядок [3, 11];

— скорость роста НК существенно зависит от природы металла, образующего расплав на его вершине [12].

В работе [13] предложена модель роста НК, контролируемого гетерогенной химической реакцией выделения кремния на поверхности расплава кремний-металл. В основе модели лежит баланс потока диффузионной доставки реагентов к поверхности жидкой фазы и потока химической реакции их взаимодействия. В рамках модели [13] обсуждена зависимость скорости роста кристаллов от их диаметра [14], концентрации газовых компонентов [9], конусность НК и определены условия цилиндрического роста в виде нити “бесконечной” длины [15, 16].

В работах [17, 18, 19] обсуждена температура вершины НК в зависимости от его диаметра. Показано, что температура кристаллов достаточно большого диаметра может существенно превышать температуру окружающей среды.

Особый интерес с практической точки зрения имеет процесс роста НК при максимальной плотности их расположения на подложке [2].

Цель данной работы состоит в создании модели роста субмикроразмерных НК кремния, растущих при максимальной плотности их расположения на монокристаллической ориентирующей подложке.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В работах [13, 20, 21] предложена модель роста лимитируемого гетерогенной реакцией. Рост НК рассмотрен в стационарном случае. Выделения кремния на поверхности расплава идет по реакции



Зависимость скорости роста НК $V_{\text{НК}(1,2)}$ от его радиуса $R_{\text{НК}}$ [13, 20, 21], имеет вид:

$$V_{\text{НК}(1,2)} = \frac{2\Omega D_1}{aR_{\text{НК}}\sqrt{2\alpha}} \left[\left(\frac{\sqrt{2\alpha}D_1}{R_{\text{НК}}\Delta R} + d \right) \pm \sqrt{\left(\frac{\sqrt{2\alpha}D_1}{R_{\text{НК}}\Delta R} + d \right)^2 - 4ac} \right], \quad (2)$$

коэффициенты a , c , d имеют вид:

$$\begin{aligned} a &= \left(k_1 \frac{D_1}{D_2} - 4C_s k_2 \frac{D_1^2}{D_3^2} \right), \\ c &= k_1 C_{01} C_{02} - k_2 C_s C_{03}^2 - \frac{C_s C_{0\text{H}}}{2\Delta R} \sqrt{\frac{8k_{\text{BT}}}{\pi m}} \exp\left(\frac{2\Omega\alpha_{\text{жг}}}{R_{\text{жНК}} k_{\text{BT}}} \right), \\ d &= k_1 \left(C_{01} \frac{D_1}{D_2} + C_{02} \right) + 4C_s k_2 C_{03} \frac{D_1}{D_3}, \end{aligned} \quad (3)$$

где Ω — объем атома кремния, D_1 , D_2 , D_3 — коэффициенты диффузии компонентов газовой фазы SiCl_2 , H_2 , и HCl соответственно, $\alpha = 1 + \text{Cos}\theta_{\text{к}}$ ($\theta_{\text{к}}$ — контактный угол между касательной к поверхности расплава и плоскостью фронта кристаллизации НК в тройной точке),

ΔR — толщина слоя у поверхности расплава, в пределах которого устанавливается постоянная концентрация компонентов газовой фазы, k_1, k_2 — константы скорости прямой и обратной реакции (1), C_{01}, C_{02}, C_{03} — концентрации в объеме газовой фазы $\text{SiCl}_2, \text{H}_2$, и HCl соответственно, C_s — относительная атомарная концентрация кремния в сплаве, $R_{\text{жнк}}$ — радиус кривизны расплава на вершине НК, $C_{0\text{н}}$ — концентрация насыщенного пара над поверхностью расплава при $R_{\text{жнк}} \rightarrow \infty$, $\alpha_{\text{жг}}$ — поверхностная энергия жидкого сплава на границе жидкость-газ, m — масса атома кремния k_B — постоянная Больцмана, T — температура.

Без учета размерного эффекта выражение (2) при $R \rightarrow 0$ имеет предел

$$V_{\text{НК}} = \frac{2\Omega\Delta R}{\alpha} \left(k_1 C_{01} C_{02} - k_2 C_s C_{03}^2 - \frac{C_s C_{0\text{н}}}{2\Delta R} \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}} \right). \quad (4)$$

Как следует из (4), скорость роста $V_{\text{НК}}$ не зависит от его радиуса, что соответствует кинетическому режиму роста. Переход в квазикинетический режим роста для НК кремния происходит для кристаллов с радиусами $R \approx 1$ мкм.

Учтем в выражении (4) для скорости роста в кинетическом режиме размерный эффект (коэффициент c в (3))

$$V_{\text{НК}} = \frac{2\Omega\Delta R}{\alpha} \left(k_1 C_{01} C_{02} - k_2 C_s C_{03}^2 - \frac{C_s C_{0\text{н}}}{2\Delta R} \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}} \exp\left(\frac{2\Omega\alpha_{\text{жг}}}{R_{\text{жнк}} k_B T}\right) \right). \quad (5)$$

Запишем выражение для скорости роста НК (5) в виде:

$$V_{\text{НК}} = A \left(k_1 C_{01} C_{02} - k_2 C_s C_{03}^2 - B \exp\left(\frac{E}{R_{\text{жнк}}}\right) \right). \quad (6)$$

Коэффициенты A, B, E имеют вид:

$$A = \frac{2\Omega\Delta R}{\alpha}, B = \frac{C_s C_{0\text{н}}}{2\Delta R} \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}}, E = \frac{2\Omega\alpha_{\text{жг}}}{k_B T}. \quad (7)$$

В работе [2] НК кремния выращивались при максимально возможной плотности их расположения на подложке. Скорость роста НК кремния измерялась в “просеках” (рис. 1 а), где их плотность НК была много меньше. Экспериментальная зависимость скорости роста НК кремния от их диаметра в соответствии с работой [2] приведена на рис. 1 б.

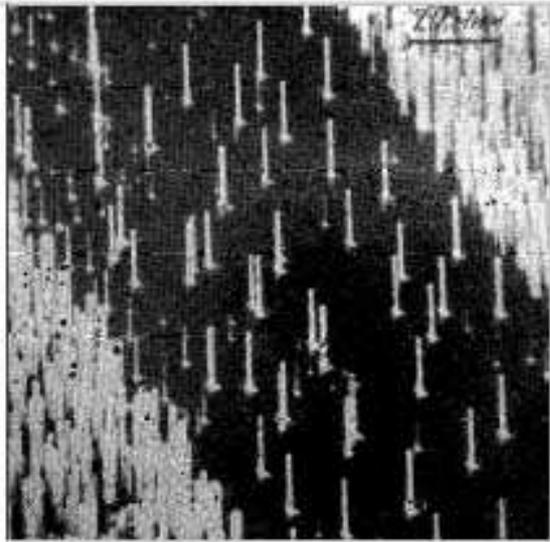
Как следует из выражения (6), скорость роста НК постоянна, вне зависимости от его радиуса для кристаллов больших диаметров, когда размерный эффект пренебрежимо мал. Для НК с малыми радиусами размерный эффект существенен, скорость роста кристалла падает с уменьшением его радиуса (6).

Рассмотрим рост НК в “просеках”, используя модель, представленную на рисунке 2, где использованы следующие обозначения: C_{01}, C_{02}, C_{03} — концентрации $\text{SiCl}_2, \text{H}_2$, и HCl соответственно в объеме газовой фазы, C_{11}, C_{12}, C_{13} — соответствующие концентрации компонентов на уровне подложки, C_1, C_2, C_3 — соответствующие текущие концентрации компонентов на вершине НК высотой x , δ — толщина диффузионного слоя.

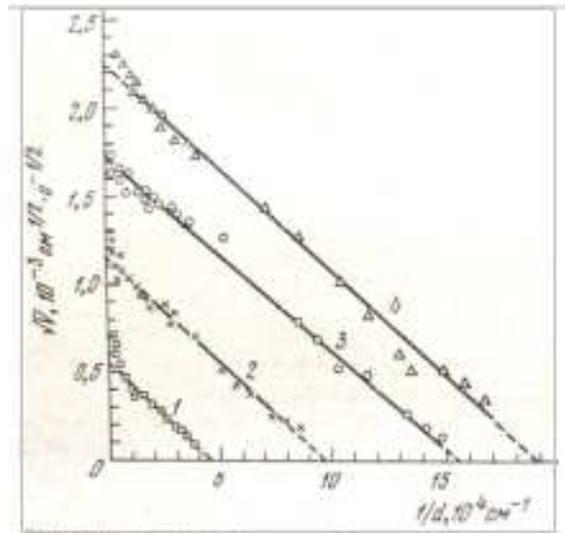
В диффузионном слое, который формируется в процессе роста НК с максимальной плотностью, зависимость концентрации компонентов от расстояния x линейная (рис. 2.), в виду плоской симметрии. Тогда для текущих концентраций C_1, C_2, C_3 справедливы соотношения:

$$C_1 = C_{11} + \frac{\Delta C_1}{\delta} x, C_2 = C_{12} + \frac{\Delta C_2}{\delta} x, C_3 = C_{13} - \frac{\Delta C_3}{\delta} x, \quad (8)$$

где $\Delta C_1 = C_{01} - C_{11}, \Delta C_2 = C_{02} - C_{12}, \Delta C_3 = C_{13} - C_{03}$ — соответствующие разности концентраций компонентов на границах диффузионного слоя толщиной δ (рис. 3), для кристалла длиной x .



а)



б)

Рис. 1. а) “Пресека” в системе НК кремния; б) Зависимость скорости роста НК от их диаметра в координатах $\sqrt{V} - 1/d$ [2].

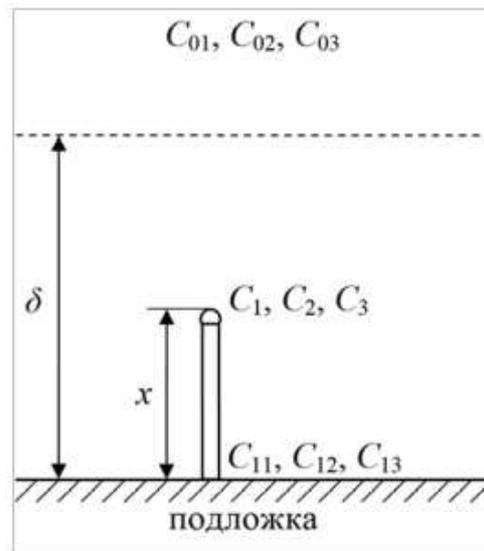


Рис. 2. Модель роста НК в “пресеке”.

Учтем значения текущих концентраций компонентов (8) в выражении (6)

$$V_{\text{НК}} = A \left[k_1 \left(C_{11} + \frac{\Delta C_1}{\delta} x \right) \left(C_{12} + \frac{\Delta C_2}{\delta} x \right) - k_{2s} \left(C_{13} - \frac{\Delta C_3}{\delta} x \right)^2 - B \exp \left(\frac{E}{R_{\text{жНК}}} \right) \right], \quad (9)$$

где $k_{2s} = k_2 C_s$.

Преобразуем (9) к виду

$$V_{\text{НК}} = A (V_0 + mx + nx^2), \quad (10)$$

где соответствующие обозначения имеют вид

$$\begin{aligned} V_0 &= k_1 C_{11} C_{12} - k_{2s} C_{13}^2 - B \exp \left(\frac{E}{R_{\text{жНК}}} \right), \\ m &= k_1 C_{11} \frac{\Delta C_2}{\delta} + k_1 C_{12} \frac{\Delta C_1}{\delta} + 2k_{2s} C_{13} \frac{\Delta C_3}{\delta}, \\ n &= k_1 \frac{\Delta C_1 \Delta C_2}{\delta^2} - k_{2s} \frac{\Delta C_3^2}{\delta^2}. \end{aligned} \quad (11)$$

С учетом определения скорости $V_{\text{НК}} = \frac{dx}{dt}$ запишем (10) в виде уравнения

$$\frac{1}{A} \int_0^x \frac{dx}{nx^2 + mx + V_0} = \int_0^t dt. \quad (12)$$

Решение уравнения (12) имеет вид

$$x = \frac{2V_0}{\sqrt{m^2 - 4nV_0} \frac{(P+1)}{(P-1)} - m}, \quad (13)$$

где коэффициент P записывается в виде

$$P = \exp \left(At \sqrt{m^2 - 4nV_0} \right). \quad (14)$$

Как следует из выражения (13) при $t \rightarrow 0$, $P \rightarrow 1$, а знаменатель (13) стремится к бесконечности. Следовательно, в момент времени $t = 0$ длина НК $x = 0$, что соответствует исходным положениям предложенной модели.

При $t \rightarrow \infty$, множитель $\frac{(P+1)}{(P-1)}$ знаменателя (13) стремятся к единице. Следовательно, условие

$$\sqrt{m^2 - 4nV_0} \frac{(P+1)}{(P-1)} > m \quad (15)$$

соответствует значениям $x > 0$.

При условии

$$\sqrt{m^2 - 4nV_0} \frac{(P+1)}{(P-1)} \rightarrow m \quad (16)$$

длина НК $x \rightarrow \infty$, что противоречит физическому смыслу.

При условии

$$\sqrt{m^2 - 4nV_0} \frac{(P+1)}{(P-1)} = m \quad (17)$$

знаменатель выражения (13) обращается в нуль, что соответствует неопределенности длины НК x .

При условии

$$\sqrt{m^2 - 4nV_0} \frac{(P+1)}{(P-1)} < m \quad (18)$$

длина НК $x < 0$ становится отрицательной, что противоречит физическому смыслу рассматриваемой задачи.

Учтем в выражении (10) для скорости роста НК его длину (12)

$$V_{\text{НК}} = A \left[\left(V_0 + m \left(\frac{2V_0}{\sqrt{m^2 - 4nV_0} \frac{(P+1)}{(P-1)} - m} \right) + n \left(\frac{2V_0}{\sqrt{m^2 - 4nV_0} \frac{(P+1)}{(P-1)} - m} \right)^2 \right) \right]. \quad (19)$$

Выражение (19) описывает зависимость скорости роста НК от его радиуса и времени роста кристалла, что учитывается соответствующими коэффициентами в выражениях (11), (14).

По условию рассматриваемой модели, скорость роста НК не может превышать максимального значения V_{max} , которое определяется выражением

$$V_{\text{max}} = A (k_1 C_{01} C_{02} - k_2 C_s C_{03}^2). \quad (20)$$

Ограничим скорость роста НК, которая определяется выражением (10), ее максимально возможным значением (18)

$$V_{\text{max}} = V_{0\text{max}} + mx_{\text{к}} + nx_{\text{к}}^2, \quad (21)$$

где $V_{0\text{max}} = k_1 C_{11} C_{12} - k_2 C_s C_{13}^2$ – максимальное значение скорости роста НК в отсутствие размерного эффекта.

Уравнение (21) позволяет найти критическое значение длины НК $x_{\text{к}}$

$$x_{\text{к}} = \frac{\sqrt{m^2 + 4n(V_{\text{max}} - V_{0\text{max}})} - m}{2n}. \quad (22)$$

Учтем (22) в выражении (13) считая, что $V_0 = V_{0\text{max}}$ найдем критическое значение параметра $P_{\text{к}}$

$$P_{\text{к}} = \frac{(\sqrt{m^2 - 4nV_{0\text{max}}} - m) (m - \sqrt{m^2 + 4n(V_{\text{max}} - V_{0\text{max}})}) - 4nV_{0\text{max}}}{((\sqrt{m^2 - 4nV_{0\text{max}}} + m) (\sqrt{m^2 + 4n(V_{\text{max}} - V_{0\text{max}})} - m) - 4nV_{0\text{max}})}. \quad (23)$$

Учитывая (22) в выражении (14) найдем критическое время $t_{\text{к}}$ перехода процесса роста НК в “стационарный” режим

$$t_{\text{к}} = \frac{\ln \left[\frac{(\sqrt{m^2 - 4nV_{0\text{max}}} - m) (m - \sqrt{m^2 + 4n(V_{\text{max}} - V_{0\text{max}})}) - 4nV_{0\text{max}}}{((\sqrt{m^2 - 4nV_{0\text{max}}} + m) (\sqrt{m^2 + 4n(V_{\text{max}} - V_{0\text{max}})} - m) - 4nV_{0\text{max}})} \right]}{A\sqrt{m^2 - 4nV_0}}. \quad (24)$$

Считая, что “стационарное” распределение НК по высоте x достигается при критическом времени $t_{\text{к}}$ (24) с учетом значений коэффициентов (7, 8, 11, 14) для скорости роста НК кремния $V_{\text{НК}}$ в зависимости от его радиуса R , получены результаты, приведенные на рисунке 3. Как следует из рис. 3 при увеличении времени роста НК от $t = 0$ до $t = t_{\text{к}}$, экспонента (кривая 1) “выпрямляется”, переходя в кривую визуально похожую на прямую, что соответствует экспериментальным данным [2].

Приравняв к нулю скорость роста НК (9) с учетом (8) получим выражение, определяющее критический радиус кристалла

$$R_{\text{НК}} = \frac{\sqrt{2\alpha E}}{\ln \frac{k_1 C_1 C_2 - k_2 C_s^2}{B}}. \quad (25)$$

Выражение (25) записано с учетом соотношения между радиусом НК $R_{НК}$ и радиусом поверхности капли жидкой фазы на вершине $R_{жНК}$

$$R_{жНК} = \frac{R_{НК}}{\sqrt{2\alpha}}. \quad (26)$$

Кривая 1 на рис. 3 соответствует начальному моменту времени $t \rightarrow 0$ и описывается выражением (9) при условии, что длина НК $x = 0$. Так как концентрации компонентов C_{11} , C_{12} , C_{13} , в газовой фазе на уровне подложки для НК всех радиусов постоянны, то зависимость \sqrt{V} от $\frac{1}{R}$ экспоненциальная (9). Критический радиус НК R_k имеет минимально возможное в данных условиях значение R_{kmin} , которое может быть определено из выражения (25) при условии равенства текущих концентраций C_1 , C_2 , C_3 , соответствующим концентрациям на уровне подложки C_{11} , C_{12} , C_{13} .

Кривая 3 на рис. 3 соответствует критическому времени t_k (24), при котором достигается “стационарное” распределение НК. В этом случае концентрации компонентов в газовой фазе для НК всех радиусов постоянны и соответствуют максимально возможным C_{01} , C_{02} , C_{03} . Последнее утверждение не следует из предложенной модели, но соответствует экспериментальным данным [2]. Несоблюдение данного утверждения приведет к изменению угла наклона прямых на рис. 1, что противоречит эксперименту. Критический радиус НК R_k имеет максимальное значение R_{kmax} и может быть определен из выражения (25) при условии равенства текущих концентраций C_1 , C_2 , C_3 , соответствующим концентрациям в объеме газовой фазы C_{11} , C_{12} , C_{13} .

Кривая 2 (рис. 3) соответствует промежуточному значению времени роста кристаллов $0 < t < t_k$. Критический радиус НК R_k имеет промежуточное значение. Получить аналитическое выражение для критического радиуса НК в этом случае невозможно, однако такая задача может быть решена численно или графически.

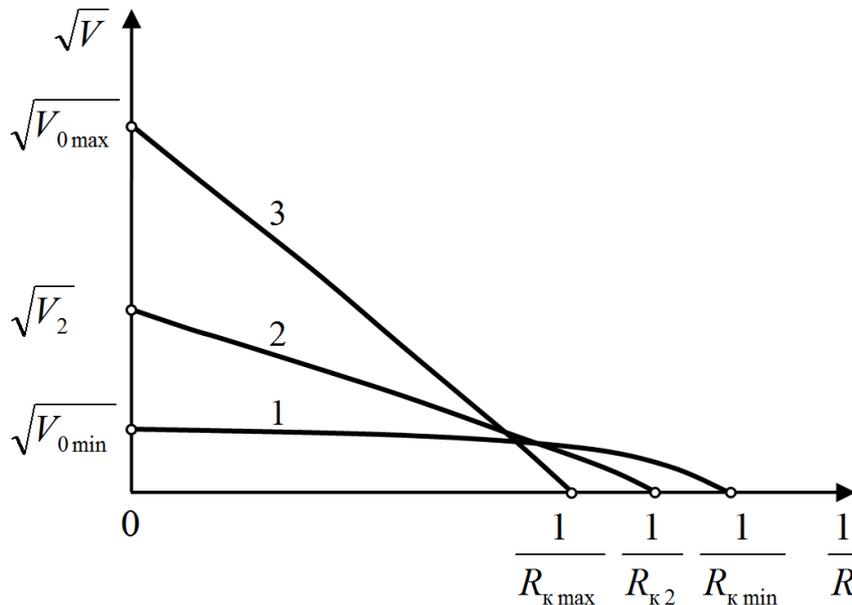


Рис. 3. Зависимость корня квадратного из скорости роста НК \sqrt{V} от его обратного радиуса $\frac{1}{R}$. Кривая 1 соответствует моменту времени $t \approx 0$; кривая 2 соответствует промежуточному моменту времени $0 < t < t_k$; кривая 3 соответствует критическому моменту времени $t = t_k$. R_{kmin} , R_{k2} , R_{kmax} – соответствующие критические радиусы НК, при которых скорость роста обращается в нуль.

Экспериментальные данные позволяют утверждать, что во всех экспериментах [2] время роста НК превышало критическое t_k . К сожалению экспериментальные данные, подтверждающие предложенную модель в интервале времени $0 < t < t_k$ отсутствуют. Кроме того, в описании методики проведения эксперимента нет сведений о продолжительности роста НК после создания “метки времени” на кристаллах.

Экспериментальные результаты, представленные на рис.1 б показывают, что скорость роста кристаллов большого радиуса существенно отклоняется от линейной зависимости. Этот факт указывает на то, что кристаллы большого радиуса, располагаясь выше всех прочих НК, находятся в кинетическом режиме роста (в отсутствие диффузионных ограничений) и имеют максимально возможную скорость, которая ограничивается только размерным эффектом. Кристаллы меньшего радиуса, скорость роста которых укладывается на “прямую”, находятся в диффузионном слое с толщиной δ (рис. 2). Однако с течением времени, все большее количество НК будет отрываться от диффузионного слоя, переходя в кинетический режим роста. Этому утверждению соответствуют кривые 1 и 2 на рис. 1 б. Можно предположить, что время роста НК для этих кривых из-за малой скорости роста было больше, что и привело к существенному отклонению от линейной зависимости для кристаллов больших радиусов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена модель роста НК кремния для кристаллов, растущих с максимальной плотностью на подложке. Модель предполагает, что в “просеках”, где плотность НК на подложке не высока, реализуется кинетический режим роста в пределах диффузионного слоя постоянной толщины. В виду плоской симметрии считается, что концентрации компонентов газовой фазы в диффузионном слое меняются линейно.

Скорость роста НК в “просеках” описывается в рамках модели роста, контролируемого гетерогенной химической реакцией выделения кристаллизующегося вещества с учетом размерного эффекта. Учет зависимости концентраций компонентов от положения НК в диффузионном слое в выражении для скорости роста НК в кинетическом режиме, позволил получить аналитическое выражение для скорости роста НК в “просеках”.

Вид зависимости корня квадратного из скорости роста НК в зависимости от обратного радиуса кристалла, эволюционирует со временем. В начальный момент времени эта зависимость экспоненциальная. По мере увеличения времени роста НК эта зависимость все в большей степени становится визуально похожей на прямую.

Получены выражения для критического радиуса НК при котором скорость его роста обращается в нуль.

Модель роста, лимитируемого гетерогенной химической реакцией, наноразмерных нитевидных кристаллов кремния, при высокой плотности их расположения на подложке в целом соответствует экспериментальным данным.

Результаты, полученные в работе, могут быть полезны при создании промышленной технологии выращивания НК в больших скоплениях при максимальной плотности расположения кристаллов на монокристаллической подложке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вагнер, Р. Монокристалльные волокна и армированные ими материалы / Р. Вагнер. — под ред. А. Т. Туманова. — М. : Мир, 1973. — 464 с.
2. Гиваргизов, Е. И. Рост нитевидных и пластинчатых кристаллов из пара / Е. И. Гиваргизов. — М. : Наука, 1977. — 304 с.
3. Небольсин, В. А. Рост нитевидных кристаллов / В. А. Небольсин, А. А. Щетинин. — Воронеж : ВГТУ, 2003. — 620 с.
4. Антипов, С. А. Релаксационные явления в нитевидных кристаллах полупроводников /

- С. А. Антипов, А. И. Дрожжин, А. М. Рощупкин. — Воронеж : ВГУ, 1987. — 192 с.
5. Дрожжин, А. И. Воронеж : 1984. — 241 с. Деп в ВИНТИ 29.06.84. № 6606-84, 241 с.
 6. Zhang R., Zhang Y, Zhang Q et al. // ACS Nano. — 2013. — V. 7. — № 7. — P. 6156–6161.
 7. Дубровский, В. Г. Кинетика самопроизвольного формирования структуры ядро-оболочка в нитевидных нанокристаллах (In,Ga)As / В. Г. Дубровский, Г. Э. Цырлин, В. М. Устинов // Физика и техника полупроводников. — 2009. — Т. 43, № 12. — С. 1585–1628.
 8. Даринский, Б. М. О зависимости скорости роста нитевидных кристаллов от их диаметра / Б. М. Даринский, О. Д. Козенков, А. А. Щетинин // Известия вузов. — Физика. — 1986. — Т. 32, № 12. — С. 18–22.
 9. Козенков, О. Д. Зависимость скорости роста нитевидного кристалла, лимитируемого гетерогенной химической реакцией, от состава газовой фазы / О. Д. Козенков, Л. Г. Косырева // Неорганические материалы. — 2015. — Т. 51, № 11. — С. 1255–1259.
 10. Козенков, О. Д. Скорость роста нитевидных кристаллов / О. Д. Козенков, И. В. Сычев, В. Г. Санников // Охрана, безопасность, связь–2021 : Сборник статей материалов международной конференции «Охрана, безопасность, связь». — Воронеж. — 22 ноября 2021 г. — № 6–1. — Ч. 1. — Воронеж : Воронежский институт МВД России. — С. 197–203.
 11. Щетинин, А. А. Модель роста нитевидных кристаллов, контролируемого гетерогенной химической реакцией, с учетом размерного эффекта / А. А. Щетинин, О. Д. Козенков, В. А. Небольсин // Известия вузов. Физика. — 1989. — Т. 32, № 6. — С. 115–116.
 12. Козенков, О. Д. Зависимость скорости роста нитевидного кристалла, лимитируемого гетерогенной химической реакцией, от состава жидкой фазы / О. Д. Козенков // Конденсированные среды и межфазные границы. — 2016. — Т. 18, № 3. — С. 338–344.
 13. Козенков, О. Д. Модель роста нитевидного кристалла, лимитируемого гетерогенной химической реакцией / О. Д. Козенков // Неорганические материалы. — 2014. — Т. 50, № 11. — С. 1238–1242.
 14. Козенков, О. Д. Экспериментальное подтверждение модели роста нитевидного кристалла, лимитируемого гетерогенной химической реакцией / О. Д. Козенков, И. В. Сычев, И. О. Бакланов // Вестник Воронежского института ФСИН России. — 2021. — № 2. — С. 44–51.
 15. Козенков, О. Д. Конусность нитевидного кристалла, обусловленная гетерогенной химической реакцией / О. Д. Козенков // Неорганические материалы. — 2016. — Т. 52, № 3. — С. 279–284.
 16. Козенков, О. Д. Зависимость скорости роста нитевидного кристалла, лимитируемого гетерогенной химической реакцией, от состава газовой фазы при больших концентрациях тетрахлорида кремния / О. Д. Козенков, А. Б. Козьяков, А. А. Щетинин // Известия вузов, Физика. — 1986. — Т. 29, № 9. — С. 115–117.
 17. Козенков, О. Д. Модель теплового баланса бесконечно длинного нитевидного кристалла / О. Д. Козенков, В. В. Горбунов // Неорганические материалы. — 2015. — Т. 51, № 5. — С. 576–580.
 18. Козенков, О. Д. Оценка температуры на вершине конусного нитевидного кристалла в точке перехода к цилиндрическому росту / О. Д. Козенков, В. В. Горбунов, Л. Г. Косырева // Вестник ВГТУ. — 2016. — Т. 13, № 4. — С. 125–130.
 19. Козенков, О. Д. Модель теплового баланса нитевидного кристалла, растущего на толстой подложке / О. Д. Козенков, И. О. Бакланов, И. В. Сычев // Вестник Воронежского института МВД России. — 2021. — № 4. — С. 34–42.
 20. Козенков, О. Д. Модель роста нитевидного кристалла при физическом осаждении из пара / О. Д. Козенков, И. В. Сычев, Е. В. Журавлева // Вестник Воронежского института МВД России. — 2019. — № 2. — С. 101–112.
 21. Козенков, О. Д. Модель роста нитевидных кристаллов, контролируемого гетерогенной химической реакцией, с учетом размерного эффекта / О. Д. Козенков, Д. А. Жукалин,

И. О. Бакланов // Конденсированные среды и межфазные границы. — 2019. — Т. 21, № 4. — С. 579–589.

REFERENCES

1. Vagner R. Single crystal fibers and materials reinforced with them. Ed. by A.T. Tumanova. [Vagner R. Monokristal'nye volokna i armirovannye imi materialy. pod red. A. T. Tumanova]. Moscow: Mir Publ., 1973, 464 p.
2. Givargizov E.I. Growth of filamentous and lamellar crystals from steam. [Givargizov E.I. Rost nitevidnykh i plastinchatykh kristallov iz para]. Moskva: Nauka, 1977, 304 p.
3. Nebol'sin V.A., Shchetinin A.A. Growth of filamentous crystals. [Nebol'sin V.A., Shchetinin A.A. Rost nitevidnykh kristallov]. Voronezh: VGTU, 2003, 620 p.
4. Antipov S.A., Drozhzhin A.I., Roshhupkin A.M. Relaxation phenomena in filamentous semiconductor crystals. [Antipov S.A., Drozhzhin A.I., Roshhupkin A.M. Relaksacionny'e yavleniya v nitevidny'x kristallax poluprovodnikov]. Voronezh: VGU, 1987, 192 p.
5. Drozhzhin A.I. Voronezh: Politekh. in-t, 1984, Dep. v VINITI, 29.06.84, № 6606-84, 241 p.
6. Zhang R., Zhang Y, Zhang Q et al. ACS Nano, 2013, vol. 7, no. 7, pp. 6156–6161.
7. Dubrovskii V.G., Tsyrlin G.E., Ustinov V.M. Kinetics of spontaneous formation of the core-shell structure in filamentous nanocrystals (In,Ga)As. [Dubrovskii V.G., Tsyrlin G.E., Ustinov V.M. Kinetika samoproizvol'nogo formirovaniya struktury yadro-obolochka v nitevidnykh nanokristallah (In,Ga)As]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov — Physics and technology of semiconductors*, 2009, vol. 43, no. 12, pp. 1585–1628.
8. Darinskii B.M., Kozenkov O.D., Shchetinin A.A. On the dependence of the growth rate of filamentous crystals on their diameter. [Darinskii B.M., Kozenkov O.D., Shchetinin A.A. O zavisimosti skorosti rosta nitevidnykh kristallov ot ih diametra]. *Izvestiya vuzov. Fizika — News of universities. Physics*, 1986, vol. 32, no. 12, pp. 18–22.
9. Kozenkov O.D., Kosyreva L.G. Dependence of the growth rate of a filamentous crystal limited by a heterogeneous chemical reaction on the composition of the gas phase. [Kozenkov O.D., Kosyreva L.G. Zavisimost' skorosti rosta nitevidnogo kristalla, limitiruемого geterogennoj himicheskoy reakciej, ot sostava gazovoj fazy]. *Neorganicheskie materialy — Inorganic materials*, 2015, vol. 51, no. 11, pp. 1255–1259.
10. Kozenkov O.D., Sy'chev I.V., Sannikov V.G. The growth rate of filamentous crystals. [Kozenkov O.D., Sy'chev I.V., Sannikov V.G. Skorost' rosta nitevidnykh kristallov]. Oхрана, bezopasnost', svyaz'—2021: sbornik statej materialov mezhdunarodnoj konferencii «Oхрана, bezopasnost', svyaz'» — Security, security, communication — 2021: Collection of articles of the materials of the international conference «Security, security, communication», Voronezh. 22 noyabrya 2021 g. № 6–1, ch. 1, Voronezh: Voronezhskij institut MVD of Russia, pp. 197–203.
11. Shchetinin A.A., Kozenkov O.D., Nebol'sin V.A. A model of the growth of filamentous crystals controlled by a heterogeneous chemical reaction, taking into account the dimensional effect. [Shchetinin A.A., Kozenkov O.D., Nebol'sin V.A. Model' rosta nitevidnykh kristallov, kontroliruемого geterogennoj himicheskoy reakciej, s uchetom razmernogo effekta]. *Izvestiya vuzov, Fizika — News of universities. Physics*, 1989, vol. 32, no. 6, pp. 115–116.
12. Kozenkov O.D. Dependence of the growth rate of a filamentous crystal limited by a heterogeneous chemical reaction on the composition of the liquid phase. [Kozenkov O.D. Zavisimost' skorosti rosta nitevidnogo kristalla, limitiruемого geterogennoj himicheskoy reakciej, ot sostava zhidkoj fazy]. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granicy — Condensed media and interphase boundaries*, 2016, vol. 18, no. 3, pp. 338–344.
13. Kozenkov O.D. A model of the growth of a filamentous crystal limited by a heterogeneous chemical reaction. [Kozenkov O.D. Model' rosta nitevidnogo kristalla, limitiruемого geterogennoj himicheskoy reakciej]. *Neorganicheskie materialy — Inorganic materials*, 2014, vol. 50, no. 11, pp. 1238–1242.

14. Kozenkov O.D., Sychev I.V., Baklanov I.O. Experimental confirmation of the growth model of a filamentous crystal limited by a heterogeneous chemical reaction. [Kozenkov O.D., Sychev I.V., Baklanov I.O. Eksperimental'noe podtverzhdenie modeli rosta nitevidnogo kristalla, limitiruемого geterogennoj himicheskoy reakciej]. *Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii — Proceedings of Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia*, 2021, no. 2, pp. 44–51.

15. Kozenkov O.D. Taper of a filamentous crystal caused by a heterogeneous chemical reaction. [Kozenkov O.D. Konusnost' nitevidnogo kristalla, obuslovlennaya geterogennoj himicheskoy reakciej]. *Neorganicheskie materialy — Inorganic materials*, 2016, vol. 52, no. 3, pp. 279–284.

16. Kozenkov O.D., Koz'yakov A.B., Shhetinin A.A. Dependence of the growth rate of a filamentous crystal limited by a heterogeneous chemical reaction on the composition of the gas phase at high concentrations of silicon tetrachloride. [Kozenkov O.D., Koz'yakov A.B., Shhetinin A.A. Zavisimost' skorosti rosta nitevidnogo kristalla, limitiruемого geterogennoj himicheskoy reakciej, ot sostava gazovoy fazy pri bol'shikh koncentraciyah tetrahlorida kremniya]. *Izvestiya vuzov, Fizika — News of universities, Physics*, 1986, vol. 29, no. 9, pp. 115–117.

17. Kozenkov O.D., Gorbunov V.V. A model of the thermal balance of an infinitely long filamentous crystal. [Kozenkov O.D., Gorbunov V.V. Model' teplovogo balansa beskonechno dlinnogo nitevidnogo kristalla]. *Neorganicheskie materialy — Inorganic materials*, 2014, vol. 51, no. 5, pp. 576–580.

18. Kozenkov O.D., Gorbunov V.V., Kosyreva L.G. Estimation of the temperature at the tip of a conical filamentous crystal at the transition point to cylindrical growth. [Kozenkov O.D., Gorbunov V.V., Kosyreva L.G. Ocenka temperatury na vershine konusnogo nitevidnogo kristalla v tochke perekhoda k cilindricheskomu rostu]. *Vestnik VGTU — Vestnik VGTU*, 2016, vol. 13, no. 4, pp. 125–130.

19. Kozenkov O.D., Baklanov I.O., Sychev I.V. A model of the thermal balance of a filamentous crystal growing on a thick substrate. [Kozenkov O.D., Baklanov I.O., Sychev I.V. Model' teplovogo balansa nitevidnogo kristalla, rastushchego na tolstoj podlozhke]. *Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii — Proceedings of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*, 2021, no. 4, pp. 34–42.

20. Kozenkov O.D., Sychev I.V., Zhuravleva E.V. A model of the growth of a filamentous crystal during physical vapor deposition. [Kozenkov O.D., Sychev I.V., Zhuravleva E.V. Model' rosta nitevidnogo kristalla pri fizicheskom osazhdenii iz para]. *Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii — Proceedings of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*, 2019, no. 2, pp. 101–112.

21. Kozenkov O.D., Zhukalin D.A., Baklanov I.O. A model of the growth of filamentous crystals controlled by a heterogeneous chemical reaction, taking into account the dimensional effect. [Kozenkov O.D., Zhukalin D.A., Baklanov I.O. Model' rosta nitevidnyh kristallov, kontroliruемого geterogennoj himicheskoy reakciej, s uchetom razmernogo effekta]. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granicy — Condensed media and interphase boundaries*, 2019, vol. 21, no. 4, pp. 579–589.

Козенков Олег Дмитриевич, к.ф.-м.н.,
доцент кафедры физики и химии Военный
учебно-научный центр ВВС “Военно-
воздушная академия им. профессора
Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина”,
Воронеж, Россия
E-mail: kozenkov_w@mail.ru

Kozenkov Oleg D., Cand. Sci. (Phys.-Math.),
Associate Professor of the Department of
Physics and Chemistry Military Education
and Science Center of the Air Force “Air
Force Academy named after Professor
N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin”,
Voronezh, Russia
E-mail: kozenkov_w@mail.ru

Болдырева Яна Александровна, к.ф.-м.н., доцент кафедры физики и химии Военный учебно-научный центр ВВС “Военно-воздушная академия им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина”, Воронеж, Россия
E-mail: yana_alex9@mail.ru

Boldyreva Yana A., Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor of the Department of Physics and Chemistry Military Education and Science Center of the Air Force “Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin”, Voronezh, Russia
E-mail: yana_alex9@mail.ru

Санников Владимир Геннадьевич, к.ф.-м.н., старший преподаватель кафедры физики и химии Военный учебно-научный центр ВВС “Военно-воздушная академия им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина”, Воронеж, Россия
E-mail: v_sannikov@mail.ru

Sannikov Vladimir G., Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Lecturer of the Department of Physics and Chemistry Military Education and Science Center of the Air Force “Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin”, Voronezh, Russia
E-mail: v_sannikov@mail.ru

Бакланов Игорь Олегович, д. п. н., начальник кафедры физики и химии Военный учебно-научный центр ВВС “Военно-воздушная академия им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина”, Воронеж, Россия
E-mail: iobaklanov@yandex.ru

Baklanov Igor O., Doctor of Pedagogical Sciences, Head of the department of Physics and Chemistry Military Education and Science Center of the Air Force “Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin”, Voronezh, Russia
E-mail: iobaklanov@yandex.ru

Сычев Игорь Валерьевич, к.ф.-м.н., доцент кафедры физики и радиоэлектроники Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации, Воронеж, Россия
E-mail: mail.r.1964@mail.ru

Sychev Igor V., Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor of the Department of Physics and Radio Electronics Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of the Russian Federation, Voronezh, Russia
E-mail: mail.r.1964@mail.ru