

# Трансформация полупроводниковых квантовых точек в диэлектрической матрице при высокоэнергетическом ионном облучении

В.Н. Ювченко<sup>1</sup>, Ф.Ф. Комаров<sup>1</sup>, Л.А. Власукова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко  
Белорусского государственного университета, Минск

<sup>2</sup> Белорусский государственный университет, Минск

E-mail: yuvchenko@bsu.by

В настоящее время большой интерес вызывает поиск методов синтеза, совместимых с кремниевой технологией, массивов нанокластеров (НК) прямозонных полупроводников  $A^3B^5$ , в частности, InAs и InSb, заданной формы и однородных размеров для использования в оптоэлектронных приборах на кремнии. Эффективным является метод ионной имплантации с последующей термообработкой.

Облучение быстрыми тяжелыми ионами (БТИ) вызывает чрезвычайно короткое по времени и интенсивное возбуждение твердотельной матрицы, локализованное в наноразмерном объеме, которого невозможно добиться другими методами модификации материалов [1]. Прохождение БТИ может стимулировать, в частности, трансформацию сферических НК металлов и полупроводников в удлиненные эллипсоиды и нанопроволоки, а также сужение разброса по размерам НК [2].

Для моделирования воздействия быстрых тяжёлых ионов на НК полупроводников в диэлектрической матрице использовалась модель термического пика [3]. Решалась система уравнений теплопроводности для электронной и атомной подсистем материала с учетом двухкомпонентной среды: нанокластер и матрица из аморфного  $SiO_2$ :

$$\begin{aligned} (C_a(T_a, r) + \Delta H_m \delta(T_a - T_m)) \frac{\partial T_a}{\partial t} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r K_a(T_a, r) \frac{\partial T_a}{\partial r} \right] + Q(T_e, T_a, r), \\ C_e(T_e, r) \frac{\partial T_e}{\partial t} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r K_e(T_e, r) \frac{\partial T_e}{\partial r} \right] - Q(T_e, T_a, r) + A(r, t) \end{aligned} \quad (1)$$

где  $C_e$  и  $K_e$ , и  $K_a$  – теплоемкость и теплопроводность электронной и атомной подсистем соответственно;  $T_e$  и  $T_a$  – температуры электронов и решетки;  $\Delta H_m$  – скрытая теплота плавления;  $T_m$  – температура плавления;  $Q$  – коэффициент электрон-фононной связи;  $A$  – плотность энергии, переданной налетающим ионом в электронную подсистему. При этом

$$C_a(T_a, r) = \begin{cases} C_{a,NC}(T_a), & r \leq r_{NC} \\ C_{a,SiO_2}(T_a), & r > r_{NC} \end{cases} \quad (2)$$

где  $NC$  – материал нанокластера; аналогично определялись и другие теплофизические параметры. Для учета энергетического барьера для электронов на границе НК/ $\alpha$ -SiO<sub>2</sub>, коэффициент термической диффузии электронов  $D_e(T_e) = K_e(T_e)/C_e(T_e)$  в узкой области на границе раздела материалов принимался равным  $K_e(T_e, r_{NC}) = aK_e(T_e, 0)$ .  $a$  рассматривалось как подгоночный параметр.

Результаты расчетов для НК InAs радиусом 7 нм в  $\alpha$ -SiO<sub>2</sub>, облучаемых ионами Xe с энергией 200 МэВ при комнатной температуре, при  $a = 0,01$  дают полное плавление нанокластера, нагрев материала до 5400 К, плавление и нагрев до температуры кипения области  $\alpha$ -SiO<sub>2</sub> вокруг НК общим радиусом 31 нм (см. рисунок). Рассчитанное время существования расплава InAs составляет не менее 30 пс, а расплава SiO<sub>2</sub> – около 20 пс. Данное время может быть достаточным для перемещения атомов НК в горячей области диэлектрика вдоль ионного трека, под воздействием создаваемых растягивающих напряжений. Наблюдаемое экспериментально удлинение НК [4] может вызываться эффектом наложения воздействия многих ионов при высоких флюенсах облучения.

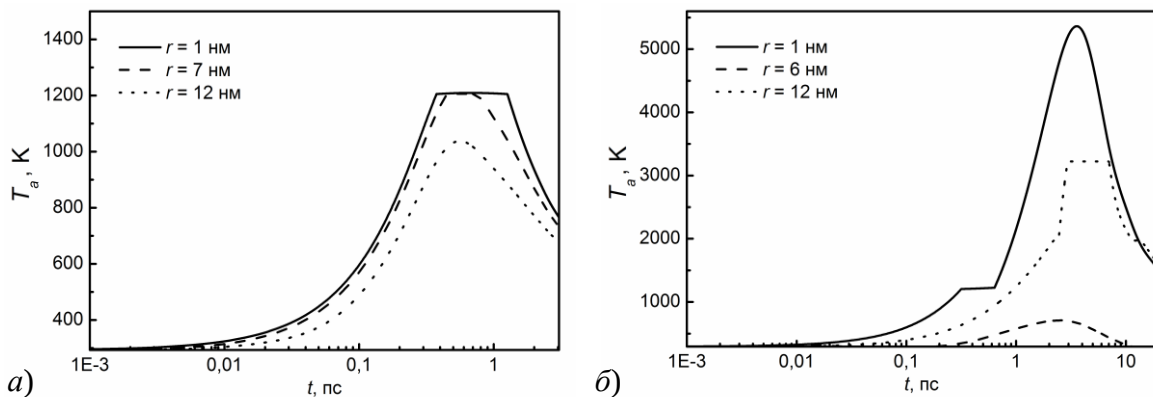


Рис. Рассчитанные зависимости атомной температуры от времени для InAs, облучаемого ионами Xe с энергией 200 МэВ при комнатной температуре:  
а – объемный материал; б – нанокластер радиусом 7 нм в матрице SiO<sub>2</sub>

Для НК InSb радиусом 7 нм в  $\alpha$ -SiO<sub>2</sub>, облучаемых ионами Xe с энергией 200 МэВ, результаты расчетов показывают полное плавление НК при  $a = 0,05$ , что объясняется различием теплофизических параметров InAs и InSb и более низкой температурой плавления последнего.

1. Комаров Ф.Ф. // УФН. 2017. Т. 187, № 5. С. 465–504.
2. Leino A.A., Djurabekova F., Nordlund K. // Eur. Phys. J. B. 2014. Vol. 87, No. 10. P. 242(1-15).
3. Власукова Л.А., Комаров Ф.Ф., Ювченко В.Н. и др. // Доклады НАНБ. 2007. Т. 51, № 5. С. 65–70.
4. Комаров Ф.Ф., Мильчанин О.В., Пархоменко И.Н. и др. // Инженерно-Физический Журнал. 2019. Т. 92, № 2. С. 527–535.