

Анализ фононных мод в квантово-каскадных лазерных гетероструктурах

Ан. А. Афоненко, А.А. Афоненко, Д.В. Ушаков

Белорусский государственный университет, Минск

E-mail: afonenko@bsu.by

Распространенный дизайн квантово-каскадных структур терагерцового диапазона основан на быстром опустошении нижнего рабочего уровня за счет резонансного испускания продольных оптических фононов [1]. Информация о частотах оптических фононов необходима для проектирования и оптимизации квантово-каскадных лазеров. Целью данной работы является анализ фононных мод в полупроводниковых сверхрешетках GaAs/AlGaAs, в которых происходит смещение колебаний атомных решеток двойных и тройных соединений.

Пространственное распределение потенциала продольных колебаний φ находилось из уравнения Максвелла для индукции электрического поля \vec{D} :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = -\vec{\nabla} \varepsilon(z, \omega) \vec{\nabla} \varphi = 0. \quad (1)$$

Спектральная зависимость диэлектрической проницаемости $\varepsilon(\omega)$ находилась в модели Фрёлыха:

$$\varepsilon_{\text{GaAs}}(\omega) = \varepsilon_{\infty} \frac{\omega^2 - \omega_{\text{LO}}^2}{\omega^2 - \omega_{\text{TO}}^2}, \quad \varepsilon_{\text{AlGaAs}}(\omega) = \varepsilon_{\infty} \frac{\omega^2 - \omega_{\text{LO1}}^2}{\omega^2 - \omega_{\text{TO1}}^2} \frac{\omega^2 - \omega_{\text{LO2}}^2}{\omega^2 - \omega_{\text{TO2}}^2}. \quad (2)$$

Частоты собственных колебаний поперечных ω_{TO} и продольных ω_{LO} фононов в тройных соединениях $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ в зависимости от состава x соединения брались из работы [2]. Индексами 1 и 2 отмечены частоты GaAs- и AlAs-подобных колебаний кристаллической решетки. Отметим, что при $x = 0$ частоты ω_{LO2} и ω_{TO2} совпадают и $\varepsilon_{\text{GaAs}}(\omega) \equiv \varepsilon_{\text{AlGaAs}}(\omega)$.

Потенциал фононов, распространяющихся в плоскости слоев с волновым вектором q , в каждом слое n предоставлялся в виде

$$\varphi(x, z) = [A_n \exp(qz) + B_n \exp(-qz)] \exp(iqx). \quad (3)$$

На границах слоев сшивались величины φ и $\varepsilon d\varphi/dz$. Использовались периодические граничные условия на одном каскаде структуры.

В расчетах анализировалась структура квантово-каскадного лазера GaAs/Al_{0.15}Ga_{0.85}As [3]. Толщины барьерных слоев/квантовых ям составляли соответственно 3.1/7.1/4.2/6.0/4.1/6.0/3.4/9.6/5.7/8.2 нм.

В анализируемой структуре можно выделить три типа продольных фононных мод, которые соответствуют собственным колебаниям в исходных материалах GaAs и Al_{0.15}Ga_{0.85}As. Частоты собственных мод

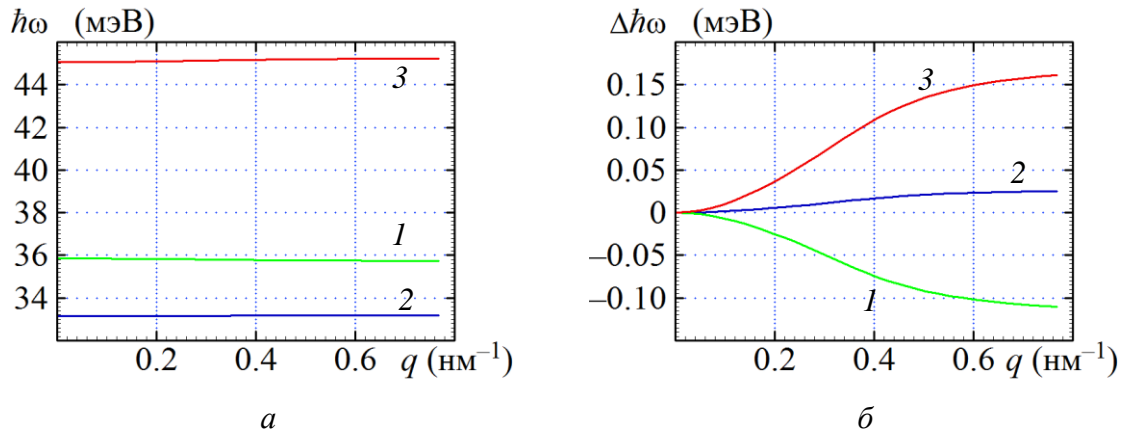


Рис. 1. Зависимость энергии продольных оптических фононов $\hbar\omega$ от волнового вектора q (а) и отличие энергии фононов от ее значения при $q = 0$ (б): 1, 2 – GaAs подобная мода; 3 – AlAs подобная мода.

структуры для $q = 0$ получились равными 35.85, 33.15 и 45.06 мэВ, в то время как частоты собственных колебаний объемного кристалла равны 36.15, 35.33 и 45.81 мэВ. Таким образом, отличие составило от 0.3 до 2.2 мэВ, что может быть существенным при анализе генерационных характеристик квантово-каскадных лазеров терагерцового диапазона.

Дисперсия продольных оптических фононов в широком диапазоне изменения волнового вектора незначительная и для статистически значимых величин волнового вектора электрона $q < \sqrt{2m_c kT} / \hbar \approx 0.2 \text{ nm}^{-1}$ ($T = 300 \text{ K}$, $m_c = 0.067$) не превышает 0.05 мэВ (рис. 1). Пространственные распределения потенциала различных фононных мод эквивалентны для заданной величины q . При увеличении волнового вектора распределение потенциала начинает отличаться от постоянного, максимумы потенциала возникают вблизи наиболее широких слоев (рис. 2).

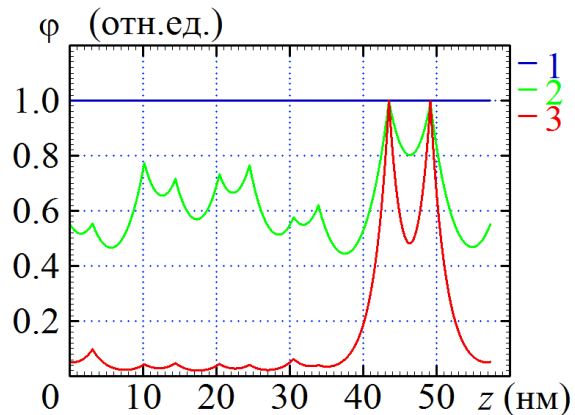


Рис.2. Пространственное распределение потенциала фононных мод для $q = 0$ (1), 0.24 (2) и 0.48 nm^{-1}

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта БРФФИ № Ф18Р-107.

1. Williams B.S., Callebaut H., Kumar S. et al. // Appl. Phys. Lett. 2003. Vol. 82. P.1015–1017.
2. Adachi S. J. // Appl. Phys. 1985. Vol. 58, No 3. P.R1–R29.
3. Хабибуллин Р.А., Щаврук Н.В., Пономарев Д.С. и др. // ФТП. 2018. Т. 52, № 11. С. 1268–1273.