

парской Высшей технической школе г. Цюриха состоялся Международный семинар, посвященный 20-летию создания квантового каскадного лазера. Семинар привлек внимание ученых 10 ведущих университетов и разработчиков более 20 известных компаний.

Литература

- [1] И. И. Засавицкий. Труды ФИАН, **224**, 3 (1993).
- [2] D. L. Partin. *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-**24**, 1716 (1988).
- [3] M. Fill, F. Felder, M. Rahim, *et al.*, *SPIE Proc.*, **8242**, 8242OH (2012).
- [4] Р. Ф. Казаринов, Р. А. Сурис. *ФТП*, **5**, 797 (1971).
- [5] J. Faist, F. Capasso, D. L. Sivco, *et al.*, *Science*, **264**, 553 (1994).
- [6] C. Gmachl, F. Capasso, D. L. Sivco, *et al.*, *Rep. Prog. Phys.*, **64**, 1533 (2001).
- [7] J. Cockburn. In *Mid-Infrared Semiconductor Optoelectronics*, Spr. Ser. in Opt. Sci., Springer, Berlin, Heidelberg, 2006, vol. 118, p. 323.
- [8] M. Razeghi. *Technology of Quantum Devices* (Springer, 2010).
- [9] J. Faist. *Quantum Cascade Lasers* (Oxford University Press, 2013).
- [10] *The Wonder of Nanotechnology: Quantum Optoelectronic Devices and Applications*. (Eds. M. Razeghi, L. Esaki, K. von Klitzing, SPIE Press, 2013).
- [11] И. И. Засавицкий. *Квантовая электроника*, **42**, 863 (2012).
- [12] I. Vurgaftman, W. W. Bewley, C. L. Canedy, *et al.*, *IEEE J. Sel. Topics Quant. Electron.*, **19**, 120010 (2013).
- [13] Л. В. Асрян, Р. А. Сурис. *ФТП*, **38**, 3 (2004).
- [14] F. Capasso, R. Paiella, R. Martini, *et al.*, *IEEE J. Quantum Electron.*, **38**, 511 (2002).
- [15] A. Lyakh, R. Maulini, A. G. Tsekoun, *et al.*, *SPIE Proc.*, **7853**, 79531L (2011).
- [16] P. Q. Liu, A. J. Hoffman, M. D. Escarra, *et al.*, *Nat. Photonics*, **4**, 95 (2010).
- [17] O. Cathabard, R. Teissier, J. Devenson, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **96**, 141110 (2010).
- [18] Q. Y. Lu, N. Bandyopadhyay, S. Slivken, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **104**, 221105 (2014).

Магнетофононный резонанс в графене и магнито-рамановская спектроскопия

Ю.А. Фирсов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия

Измерение магнетофононного резонанса позволяет определить силу взаимодействия электронов с фононами и влияние на нее различных внешних сил: механических напряжений, электрических и магнитных постоянных и переменных полей и управлять работой различных приборов, что широко использовалось применительно к обычным полупроводникам и к квантовым ямам и к квантовым точкам на их основе. Не удивительно, что такие исследования были проделаны и для графена. Результаты вычислений в рамках

двухмерной модели Дирака (плоская мембрана) не позволяли описать все экспериментальные результаты и стало ясно, что модель должна быть усложнена. Эксперимент показал, что поверхность однослойной графеновой мембраны не плоская, а покрыта «барханами» (рипплами). Стало ясно, что это соответствует теореме Ландау-Пайерлса о неустойчивости чисто двумерного кристалла по отношению к внутриспоскостным атомным колебаниям, но если возможны внеплоскостные смещения («выглядывание» в третье измерение) и учесть связи между смещениями двух этих типов, то мембрана «сморщится», но не развалится и не свернется в клубок. Однако будут происходить и другие физически важные изменения в модели графеновой мембраны. Во-первых, безразмерная константа силы межэлектронных взаимодействий порядка 1 и теория возмущений не работает. Во-вторых, эксперимент показывает, что среди рипплов почти половина очень мелких (доли нанометров) и такие мелкие деформации нельзя описывать методами континуальной теории упругости. Атомарный подход, который мы и спользуем, позволяет обойти эти трудности описания смещений («выглядывание» в 3-е измерение и малые «внутриспоскостные» смещения). Известно, что внеплоскостные смещения при воздействии на них переменным во времени полем создают дополнительное «синтетическое» нестационарное поле. «Внутриспоскостные» смещения входят в уравнение Дирака как входят внешние магнитные поля и поэтому их называют «псевдомагнитными» полями. Как включить в уравнение Дирака электрон-фононные (изгибные колебания) тоже известно. Необходимо также включить внешнее (истинное!) магнитное поле в уравнение Дирака, нестационарное электрическое поле и его взаимодействие с изгибными колебаниями (для описания эффекта Рамана) и вклад последних в уравнение Дирака. Остается найти достаточно хороший способ для решения этого уравнения, что и удалось сделать. Результаты этого анализа будут доложены на лекции.