

- [25] S. Bednarek, B. Szafran, *Phys. Rev. B* **73**, 155318 (5 pp.) (2006).
- [26] J. Yao, H. Yan, S. Das, *et al.*, *PNAS* **111**, 2431–2435 (2014).
- [27] Н.А. Поклонский, А.Т. Власов, С.А. Вырко, *Теории оболочек и мембран в механике и биологии: от макро- до наноразмерных структур: матер. междунар. науч. конф.*, Минск, 16–20 сент. 2013 г. / под общ. ред. Г.И. Михасева, Х. Альтенбаха (Изд. центр БГУ, Минск, 2013) С. 95–98.
- [28] Р. Уинстон, *В мире науки* № 5, 44–50 (1991).
- [29] N.A. Poklonski, E.F. Kislyakov, S.A. Vyrko, *et al.*, *J. Nanophotonics* **6**, 061712 (9 pp.) (2012).
- [30] N.A. Poklonski, E.F. Kislyakov, S.A. Vyrko, *Proc. Int. Sci. Conf. Shell and Membrane Theories in Mechanics and Biology: from Macro- to Nanoscale Structures*, September 16–20, 2013, Minsk / Ed. by G.I. Mikhasev, H. Altenbach (BSU, Minsk, 2013) P. 105–108.
- [31] Н.А. Поклонский, С.А. Вырко, О.Н. Поклонская и др., *Журн. прикл. спектр.* **80**, 379–384 (2013).
- [32] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, М.В. Колдаева и др., *ФТТ* **54**, 305–312 (2012).
- [33] А.Л. Бучаченко, *УФН* **184**, 101–108 (2014).
- [34] А.Д. Алексеев, Е.В. Ульянова, Т.А. Василенко, *УФН* **175**, 1217–1232 (2005).

Полупроводниковые источники излучения для ИК области спектра

И.И. Засавицкий

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Инфракрасная (ИК) область спектра (1–1000 мкм) представляет большой интерес, так как в ней расположены основные атмосферные окна пропускания атмосферы и вращательно-колебательные линии поглощения большинства молекул. Спектральная плотность мощности излучения абсолютно черного тела относительно невелика и падает с увеличением длины волны излучения. Однако она велика для лазеров, и даже для полупроводниковых лазеров она на много порядков величины превышает соответствующее значение для абсолютно черного тела. Исторически такими ИК лазерами являются диодные лазеры на основе твердых растворов типа A^4B^6 ($PbSSe$, $PbSnSe$, $PbSnTe$ и др.). Длина волны излучения лазеров может перестраиваться от 3 до 40 мкм путем изменения состава и внешних воздействий [1]. Путем комбинации полупроводников типа A^4B^6 с Eu , Sr и другими элементами [2] для области спектра 3–10 мкм создаются [3] одномодовые лазеры с вертикальным выводом излучения (VCSEL). Однако основными недостатками всех этих лазеров

являются низкая рабочая температура (< 200 К) и небольшая мощность излучения (десятки мВт).

В настоящее время наиболее актуальным направлением в области источников ИК излучения являются квантовые каскадные лазеры (ККЛ). ККЛ это униполярный полупроводниковый прибор, основанный на межподзонных переходах. Уже с момента изобретения лазера в 60-е годы прошлого столетия ученые рассматривали возможности использования магнитного и размерного квантования для получения лазерной генерации. В случае магнитного квантования успех был достигнут при комбинационном рассеянии на уровнях Ландау с переворотом спина (спин-флип-лазер). Первые работы по размерному квантованию и успехи в молекулярно-пучковой эпитаксии привели к созданию полупроводниковой сверхрешетки в 1970 году. Идея о возможности усиления электромагнитных волн в полупроводниках со сверхрешеткой была высказана в 1971 году [4], и в 1994 году [5] был создан первый ККЛ. При этом существенно, что в рабочей схеме ККЛ было добавлено рассеяние с участием ЛО-фонона. В итоге получилась четырехуровневая рабочая схема лазера.

Классическая концепция ККЛ [6–10] включает в себя периодическое повторение (~ 30) активных областей и примыкающих к ним инжекторов. Активная область ККЛ представляет собой гетероструктуру, состоящую обычно из 3 квантовых ям с глубиной $\Delta E_c = 0,3\text{--}1,5$ эВ и шириной 2–6 нм. Накачка верхнего лазерного уровня осуществляется путем туннельной инжекции в электрическом поле, а опустошение нижнего лазерного уровня происходит благодаря резонансному рассеянию электрона с участием ЛО-фонона. Разработаны схемы активной области [11] с различными излучательными переходами (диагональные, вертикальные, межминизонные, междузонные [12]). Для опустошения нижнего лазерного уровня используются также переходы «связанное состояние \rightarrow континуум» и двухфононная (и даже трехфононная) релаксация. В перспективе рассматривается создание ККЛ на квантовых точках [13], что приведет к снижению порогового тока.

Поскольку ККЛ является униполярным прибором, то межподзонные переходы отличаются узкой, δ -образной линией усиления, и оже-рекомбинация в нем подавлена, что позволяет повысить рабочую температуру (≥ 400 и > 100 К соответственно в средней и далекой ИК областях спектра). Благодаря пониженной размерности, у ККЛ ширина линии излучения (~ 100 кГц или 3×10^{-6} см $^{-1}$) меньше, чем у других полупроводниковых лазеров, так как фактор α , отражающий вариации флуктуации инверсии населенностей, здесь мал ($\alpha = 0,5\text{--}2$) [14].

Достигнутые рекордные мощности излучения при $\lambda = 4,6$ мкм и $T = 293$ К составляют более 3 Вт в непрерывном и более 30 Вт в импульсном

режиме [15]. Путем оптимизации рабочих схем ККЛ с одновременным увеличением числа каскадов (до 80) при низких температурах достигнут КПД $\geq 50\%$ [16]. Короткие времена релаксации электронов и времени жизни фотонов в резонаторе ($\sim 1-3$ пс) позволяют генерировать короткие ($\tau = 89$ пс, $f = 100$ МГц) импульсы излучения, а также осуществлять высокочастотную модуляцию вплоть до 100 ГГц [14].

Длина волны излучения ККЛ в настоящее время охватывает широкую область спектра 3–24; 70–250 мкм, что достигается путем использования различных гетеропар (InAs/AlSb [17], GaInAs/AlInAs, GaAs/AlGaAs) и варьирования дизайна гетероструктур, а также благодаря использованию напряженных гетероструктур и применению сильного магнитного поля. С целью увеличения рабочего диапазона спектра ККЛ рассматриваются как другие гетеропары (GaN/AlGaN, II-VI, Si/Ge), так и другие значения энергии LO-фонона. Реальная перестройка длины волны излучения для отдельной гетероструктуры ограничена полосой усиления (> 100 см $^{-1}$ при 300 К). Созданы РОС-лазеры, для которых тонкая, одномодовая перестройка частоты излучения достигает 20 см $^{-1}$, при этом мощность излучения в непрерывном режиме при 15 °С составляет > 100 мВт в области спектра 5–8 мкм.

В терагерцовой области спектра (~ 3 ТГц) созданы ККЛ, работающие уже при 225 К в импульсном режиме и до 117 К в непрерывном режиме. Применительно к терагерцовой области спектра на основе ККЛ развиваются также методы нелинейной оптики, и получена генерация с мощностью излучения более 1 мВт при 300 К [18].

Основным технологическим методом выращивания гетероструктур для ККЛ является метод МПЭ. Однако активно применяется также метод МОС-гидридной эпитаксии, при этом достигнутые характеристики лазеров уже сравнимы с характеристиками лазеров, получаемых методом МПЭ. Данная технология может привести к существенному удешевлению ККЛ. Типичная лазерная гетероструктура содержит 500–1000 различных эпитаксиальных слоев как согласованных по постоянной решетки, так и рассогласованных, напряженных слоев с докритическими толщинами. Поэтому важна проблема срока службы таких приборов.

Благодаря высокой рабочей температуре и высокой мощности излучения ККЛ весьма перспективны для различных практических приложений (молекулярная спектроскопия высокого разрешения, высокочувствительный спектральный газоанализ, медицина и др.). Для ряда газов в области спектра 4–8 мкм уже достигнуты чувствительности на уровне ppb: несколько частиц примеси на 10^{12} основных частиц.

С 16 по 17 января 2014 г. в Институте квантовой электроники при Швей-

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