

06:07

Температурно-зависимое интегральное поглощение экситона в полупроводниковых кристаллах GaAs

© С.А. Ваганов, Р.П. Сейсян

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: sv.exciton@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 4 июня 2012 г.

Экспериментально исследована температурная зависимость края фундаментального поглощения тонких слоев GaAs, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Экспериментально определены критическая температура $T_c = 135$ К, выше которой интегральное поглощение становится постоянным, соответствующие ей значения критического параметра затухания $\Gamma_c = 0.248$ meV и продольно-поперечного расщепления $\hbar\omega_{LT} = 0.082$ meV. Выделена температурная зависимость истинного диссипативного затухания.

Впервые характерный для механизма экситон-поляритонного светопереноса в полупроводниковых кристаллах „аномальный“ рост зависимости интегрального экситонного поглощения $K(\Gamma)$ от параметра диссипативного затухания Γ с последующим насыщением при затуханиях больше критического Γ_c [1] был экспериментально продемонстрирован исследованием края фундаментального поглощения тонких образцов полупроводниковых кристаллов GaAs [2] со свободной границей. Впоследствии насыщение интегрального поглощения после низкотемпературного участка аномального роста было экспериментально подтверждено в полупроводниковых кристаллах ZnTe, CdTe [3], ZnSe [4], InP [5].

В представляемой статье впервые приведены результаты экспериментального исследования температурно-зависимого поглощения основного экситонного состояния дискретного спектра в образцах полупроводниковых кристаллов GaAs с интерфейсной границей, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Экспериментально определено значение продольно-поперечного расщепления $\hbar\omega_{LT}$. Исследуемые образцы полупроводникового кристалла GaAs не имели свободной поверхности, толщина слоя „удлиненной квантовой ямы“ GaAs в образцах составляла 2.1 ± 0.1 μm , поэтому экситон в толще такого

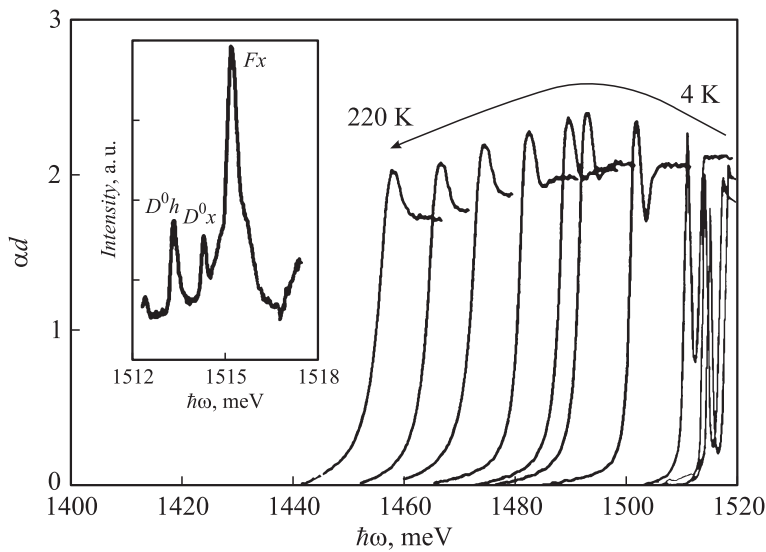


Рис. 1. Температурная эволюция оптической плотности края фундаментального поглощения образца полупроводникового кристалла GaAs. На вставке в увеличенном масштабе изображен фрагмент спектра люминесценции образца при возбуждении HeNe-лазером ($T = 2$ К), иллюстрирующий качество исследуемого образца.

образца можно считать не подверженным влиянию электрического поля поверхностного заряда, а коэффициент поглощения — не подверженным влиянию толщинной зависимости изменения экситонного поглощения [6–8].

Высокое кристаллофизическое совершенство исследуемых образцов иллюстрируется спектром люминесценции при температуре 2 К при возбуждении HeNe-лазером (см. вставку рис. 1). D^0h интерпретируется как переход, соответствующий дырке и нейтральному донору, D^0x — экситон-донорному комплексу. Пик Fx интерпретируется как свободный экситон, его интенсивность существенно выше остальных пиков, что свидетельствует о высокой чистоте образцов.

Образцы упаковывались свободно в бокс из покровного стекла [9] и помещались в температурный криостат УТРЕКС-240. Эксперимен-

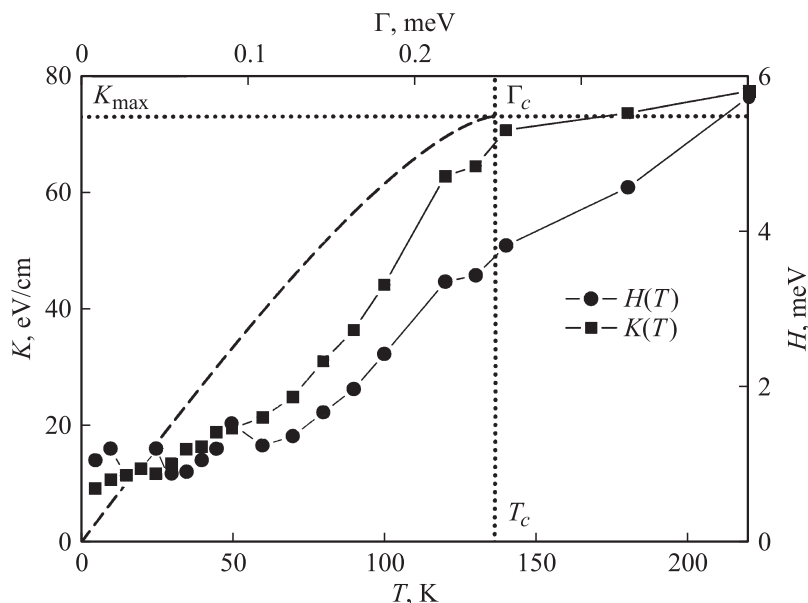


Рис. 2. Экспериментальные температурные зависимости интегрального поглощения $K(T)$, ширины линии поглощения $H(T)$, основного экситонного состояния образца полупроводникового кристалла GaAs. Пунктирной линией показана теоретическая [1] зависимость интегрального поглощения $K(\Gamma)$, рассчитанная с экспериментально определенными параметрами $K_{\max} = 73 \text{ eV/cm}$ и $\Gamma_c = 0.248 \text{ meV}$.

тальная установка и методика измерений описана в [10]. Вклад основного экситонного состояния GaAs выделялся из суммарного края фундаментального поглощения согласно методике [5]. Значение оптической плотности ad в максимуме экситонного поглощения исследуемых образцов GaAs (рис. 1) первоначально увеличивается с ростом температуры, затем после критической температуры T_c уменьшается одновременно с увеличением экспериментально наблюдаемой ширины линии. При этом спектральное положение максимума экситонного поглощения следует за положением запрещенной зоны, смещаясь в длинноволновую область.

С увеличением температуры интегральное $K(T)$ поглощение основного экситонного состояния растет (рис. 2) до критической темпера-

туры $T_c = 135$ К, после которой становится практически постоянным, принимая свое максимальное значение $K_{\max}(T) = 73$ eV/cm. В диапазоне температур 100–150 К существенный рост наблюдаемой ширины линии поглощения $H(T)$ связан с вкладом взаимодействием экситона с ионизованными примесями, насыщающимся при дальнейшем увеличении температуры. Экспериментальное значение максимального поглощения K_{\max} позволяет вычислить значение продольно-поперечного расщепления $\hbar\omega_{LT}$ [1]

$$\hbar\omega_{LT} = K_{\max} \frac{c\hbar}{\sqrt{\epsilon_b}\hbar\omega_0} = 0.0818 \text{ meV}$$

и значение критического параметра затухания Γ_c [1]

$$\Gamma_c = 2\hbar\omega_0 \sqrt{2\epsilon_0 \frac{\hbar\omega_{LT}}{Mc^2}} = 0.248 \text{ meV},$$

где $\hbar\omega_0 = 1515$ meV — энергия экситонного резонанса в GaAs, $\epsilon_b = 12.35$ — фоновая диэлектрическая проницаемость GaAs, c — скорость света, $M_{ex} = m_e + m_{hh}$ — трансляционная масса экситона, $m_e = 0.0665m_0$, $m_h = 0.52m_0$ — эффективные массы электрона и дырки в GaAs [11].

Экспериментально определенные значения продольно-поперечного расщепления $\hbar\omega_{LT}$ и критического параметра затухания Γ_c хорошо согласуются с данными других источников [11,12].

Анализ выделенной [13] из экспериментально наблюдаемой ширины линии $H(T)$ температурной зависимости истинного диссипативного затухания (однородного уширения) $\Gamma(T)$ с учетом основных каналов нерезонансного затухания экситона [14]

$$\Gamma = \Gamma_0 + AT + \frac{B}{\exp\left(\frac{\hbar\omega_{LO}}{kT}\right) - 1},$$

где Γ_0 — температурно-независимый вклад, позволяет оценить константы взаимодействия [10] с акустическими $A = 140$ neV/K и оптическими $B = 1.62$ meV ($\hbar\omega_{LO} = 36.8$ meV [11]) LO-фотонами.

Истинное диссипативное затухание экситона существенно меньше экспериментально наблюдаемой ширины линии экситонного поглощения, определяемой неоднородным уширением. Вклад неоднородного

уширения, связанный с неоднородными деформациями, неоднородным распределением заряженных и ионизованных примесей и неоднородным электрическим полем зарядов на границах раздела, существенно превышает вклады однородного уширения, связанные со взаимодействием экситонов с примесями и фононами.

Данные экспериментальных исследований температурно-зависимого поглощения высокосоввершенных образцов полупроводниковых кристаллов ZnTe, CdTe [3], ZnSe [4], InP [5], GaAs качественно и количественно согласуются с теоретическими расчетами механизма экситон-поляритонного светопереноса и позволяют считать интегральное поглощение эффективным методом экситон-поляритонной спектроскопии полупроводниковых кристаллов с пространственной дисперсией.

Список литературы

- [1] *Ахмедиев Н.Н.* // ЖЭТФ. 1980. Т. 79. В. 4 (10). С. 1534–1543.
- [2] *Kosobukin V.A., Seisyan R.P., Vaganov S.A.* // *Semiconf. Sci. Techn.* 1993. V. 8 (7). P. 1235–1238.
- [3] *Алиев Г.Н., Коцуг О.С., Сейсян Р.П.* // ФТТ. 1994. Т. 36. В. 2. С. 373–338.
- [4] *Datsiev R.M., Kosobukin V.A., Lukyanova N.V., Seisyan R.P., Vladimirova M.R.* // *Electrochemical Society Proceedings / Eds R.T. Williams, W.M. Yen. Boston, Massachusetts, 1998. V. 98–25. P. 228–233.*
- [5] *Ваганов С.А., Сейсян Р.Н.* // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 3. С. 39–45.
- [6] *Горбань И.С., Крохмаль А.П., Янчук З.З.* // ФТТ. 2000. Т. 42. В. 9. С. 1582–1589.
- [7] *Алиев Г.Н., Лукьянова Н.В., Сейсян Р.П.* // ФТТ. 1998. Т. 40. В. 5. С. 869–871.
- [8] *Aliiev G.N., Lukyanova N.V., Seisyan R.P., Vladimirova M.R., Hibbs H., Hitrova G.* // *Phys. Stat. Sol. A.* 1997. V. 164. P. 93.
- [9] *Сейсян Р.П.* Спектроскопия диамагнитных экситонов. М.: Наука, 1984. 163 с.
- [10] *Ваганов С.А., Сейсян Р.П.* // ФТП. 2011. Т. 45. В. 1. С. 104–110.
- [11] *Rudin S., Reinecke T.L., Segall B.* // *Phys. Rev. B.* 1990. V. 42. N 17. P. 11 218–11 231.
- [12] *Pavesi L., Guzzi M.* // *J. Appl. Phys.* 1994. V. 75. P. 4779–4842.
- [13] *Маркосов М.С., Сейсян Р.П.* // ФТП. 2009. Т. 43. В. 5. С. 656–661.
- [14] *Сейсян Р.П., Кособукин В.А., Маркосов М.С.* // ФТП. 2006. Т. 40. В. 11. С. 1321–1330.