

## Экситонная люминесценция твердых растворов $Cd_{1-x}Fe_xTe$

© С.А. Пермогоров, Т.П. Суркова\*, Л.Н. Тенишев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

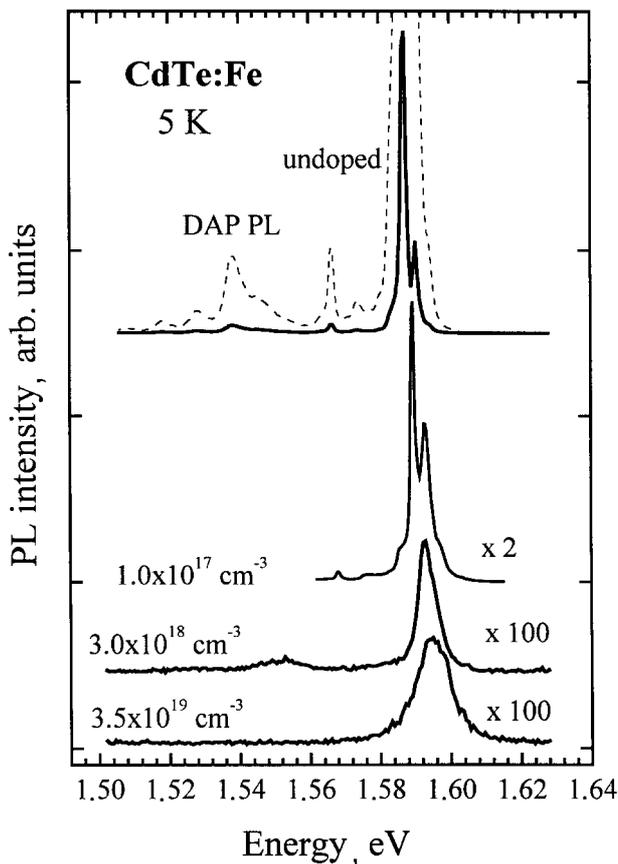
\*Институт физики металлов Уральского отделения Российской академии наук,  
620219 Екатеринбург, Россия

Оптические спектры твердых растворов  $Cd_{1-x}Fe_xTe$  вблизи края фундаментального поглощения существенно изменяются по сравнению со спектрами нелегированного CdTe. Характер изменения спектров фотолюминесценции (ФЛ) с увеличением концентрации Fe связан с изменением каналов излучательной рекомбинации.

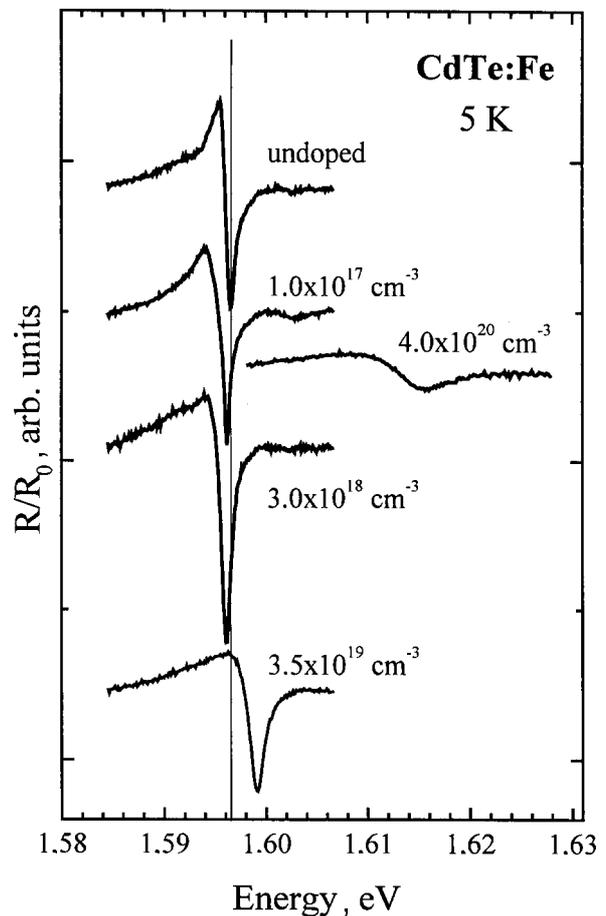
Железо и другие примеси переходных металлов — самые распространенные неконтролируемые примеси в широкозонных полупроводниках II–VI, и их роль в рекомбинационных процессах чрезвычайно важна. Физические свойства  $Cd_{1-x}Fe_xTe$  существенно зависят от положения энергетического уровня  $Fe^{2+}$  относительно энергетических зон кристалла. Предполагается [1–3], что донорный уровень изоэлектронной примеси замещения  $Fe_{Cd}$  расположен в запрещенной щели при энергии

$E_c = 1.45$  eV. При существенном увеличении концентрации Fe энергетическое положение этого уровня будет совпадать с краем валентной зоны твердого раствора [4]. Представляется интересным сравнить, как изменяется при этом характер излучательных процессов.

Исследованные в работе монокристаллы  $Cd_{1-x}Fe_xTe$  были выращены методом Бриджмена. Измерения ФЛ и отражения света были выполнены на образцах во всем диапазоне растворимости Fe  $0 < x < 0.04$  в



**Рис. 1.** Спектры ФЛ кристаллов  $Cd_{1-x}Fe_xTe$  для образцов с различным содержанием Fe. Спектры получены при  $T = 5$  K при возбуждении He–Ne-лазером. Штриховой линией показан спектр чистого CdTe ( $\times 10$ ), в котором хорошо видна донорно-акцепторная фотолюминесценция (DAP).



**Рис. 2.** Спектры экситонного отражения света кристаллов  $Cd_{1-x}Fe_xTe$  для образцов с различным содержанием железа. Спектры получены при  $T = 5$  K.

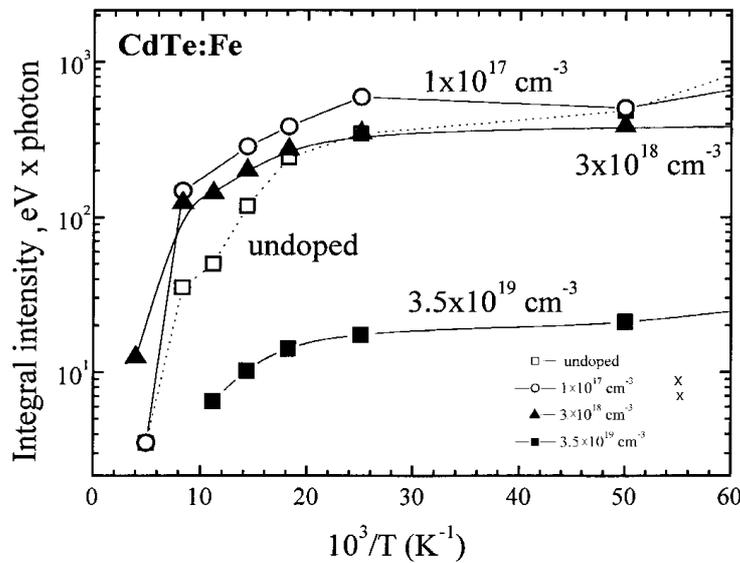


Рис. 3. Температурное тушение ФЛ кристаллов  $\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Te}$ .

температурном интервале 5–250 К. В качестве источника возбуждения использовался He–Ne-лазер. Оптические спектры регистрировались монохроматором ДФС-12 и фотоумножителем, связанным с системой счета фотонов.

Спектры ФЛ и экситонного отражения показаны на рис. 1, 2. Некоторые характеристики образцов и оптических спектров представлены в таблице. Как видно из рис. 1, спектры ФЛ  $\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Te}$  и  $\text{CdTe}$  качественно отличаются. Для нелегированного кристалла  $\text{CdTe}$  наблюдаются несколько каналов излучательной рекомбинации. Существенный вклад в ФЛ дают излучение свободного экситона ( $E_x = 1.5964 \text{ eV}$ ), экситонов, связанных на доноре ( $D^0, x = 1.5931 \text{ eV}$ ) и акцепторе ( $A^0, x = 1.5899 \text{ eV}$ ), а также донорно-акцепторная ФЛ и их  $LO$  фонные повторения [5]. Напротив, в спектрах излучения  $\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Te}$  с концентрацией  $\text{Fe}$   $3.5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  наблюдается только одна полоса излучения, максимум которой близок к положению максимума экситонной линии отражения (рис. 2). С увеличением концентрации  $\text{Fe}$  суммарная интенсивность ФЛ уменьшается, и она не регистрируется для наивысшей концентрации  $\text{Fe}$   $x = 8 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ . В тоже время линия экситонного

Положение линии свободного экситона  $E_{FE}$ , ширина линии экситонного отражения  $\Delta = (E_{FE}^{\min} - E_{FE}^{\max})$ , и энергия активации температурного тушения ФЛ  $E_{\text{act}}$  кристаллов  $\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Te}$ .  $E_{FE}$  и  $\Delta$  приведены для  $T = 5 \text{ K}$

Концентрация $\text{Fe}, \text{cm}^{-3}$	$E_{FE}, \text{eV}$	$\Delta, \text{meV}$	$E_{\text{act}}, \text{meV}$
0	1.5964	1.0	23.0
$1 \cdot 10^{17}$	1.5963	1.53	19.8
$3 \cdot 10^{18}$	1.5967	1.96	14.2
$3.5 \cdot 10^{19}$	1.5992	3.05	10.6
$4 \cdot 10^{20}$	1.6157	7.4	—
$8 \cdot 10^{20}$	1.6527	30.0	—

отражения, заметно уширяясь, сдвигается в сторону больших энергий и остается довольно узкой.

Таким образом, мы можем сделать вывод, что эволюция спектров ФЛ с увеличением концентрации  $\text{Fe}$  обусловлена изменением каналов излучения: от излучения преимущественно экситона, связанного на акцепторе ( $A^0, x$ ) в нелегированном  $\text{CdTe}$  к излучению свободного экситона в твердых растворах  $\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Te}$ . Наблюдаемое уменьшение энергии активации температурного тушения интегральной интенсивности ФЛ (рис. 3)  $E_{\text{act}}$  от 23 meV для связанного экситона ( $A^0, x$ ) в  $\text{CdTe}$  до 10.6 meV для свободного экситона в  $\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Te}$  подтверждает данный вывод (таблица). Мы полагаем, что наблюдаемое уменьшение концентрации нейтральных акцепторов связано с переходом ионов  $\text{Fe}$  в другое зарядовое состояние:  $2+ \rightarrow 3+$ .

Характер изменения спектров ФЛ и отражения с температурой аналогичен их изменению с концентрацией  $\text{Fe}$ . Можно предположить, что оба фактора влияют на время жизни свободного экситона, и распределение кинетической энергии экситонов имеет выраженный неравновесный характер. Большое различие ширины линий экситонного отражения и линий ФЛ указывает на участие фононов в рекомбинационном процессе.

В нашей предыдущей статье [6] был выполнен анализ формы экситонной линии излучения в  $\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Te}$ . Мы использовали выражение, учитывающее как ( $A-LO$ ) фонную рекомбинацию, так и резонансное экситонное излучение. Форма экситонной линии ФЛ  $I(E)$  описывается выражением

$$I(E) = \frac{[E^{1/2} \exp(-E/kT) + \varphi S(E)](1 + \gamma E)}{(E - \omega_{LO})^2 + \Gamma^2} \quad (1)$$

где  $E$  — кинетическая энергия экситона,  $S(E)$  — дополнительный неравновесный вклад в функцию распределения,  $\varphi$  и  $\gamma$  — параметры, описывающие отношение неравновесное/равновесное распределение и процессы с

сохранением/несохранением волнового вектора, соответственно,  $\omega_{LO}$  — энергия  $LO$ -фонона,  $\Gamma$  — затухание экситонного состояния, оцененное из ширины экситонной линии отражения. Предполагается, что неравновесная часть функции распределения свободного экситона воспроизводит плотность состояний в экситонной зоне. Необходимость учитывать неравновесное распределение экситонов проистекает из уменьшения времени жизни экситона в легированных Fe образцах. Частичное несохранение волнового вектора в процессе экситонной рекомбинации обусловлено рассеянием экситонов на примеси Fe и других дефектах. Наилучшее совпадение расчетной кривой и экспериментального спектра ФЛ ( $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  Fe,  $T = 30 \text{ K}$ ) было получено с параметрами  $\varphi = 0.007$ ,  $\gamma = 0.2$ ,  $\Gamma = 1.5 \text{ meV}$ . Аналогичный анализ формы линии излучения при комнатной температуре нелегированных кристаллов CdTe [7] также показал экситонную природу ФЛ и участие фононов в рекомбинационном процессе.

В заключение можно сделать следующие выводы. Образование твердого раствора  $Cd_{1-x}Fe_xTe$  приводит к увеличению ширины запрещенной зоны с увеличением концентрации Fe. Одновременно наблюдается уширение линий экситонного отражения и уменьшение интегральной интенсивности ФЛ. Мы полагаем, что эти изменения указывают на уменьшение времени жизни свободного экситона в результате сильного рассеяния на центрах излучательной и безызлучательной рекомбинации. В результате этого распределение кинетических энергий свободного экситона становится существенно неравновесным. При низких уровнях легирования Fe наблюдается уменьшение интенсивности линии излучения экситонов, связанных на нейтральных акцепторах, вследствие уменьшения их концентрации в результате изменения зарядового состояния ионов железа.

Данная работа была частично поддержана РФФИ (проекты 96-02-16496 и 96-02-16933), INTAS (проект 93-3657) и ГНТП "Физика твердотельных наноструктур" (проект 95-1001).

Авторы благодарят А. Мисельского за представление кристаллов  $Cd_{1-x}Fe_xTe$ .

## Список литературы

- [1] A. Mycielski. *J. Appl. Phys.* **63**, 3279 (1988).
- [2] K. Lishka, G. Brunthauer, W. Jantsch. *J. Cryst. Growth* **72**, 355 (1985).
- [3] A.J. Szadkowski. *J. Phys. Condens. Matter* **2**, 9853 (1990).
- [4] B.A. Orlovski, B.J. Kowalski, A. Sarem, A. Mycielski, B. Velicky, V. Chab. In: *Proc. 19th Int. Conf. Physics of Semiconductors* / Ed. W. Zawadzki. IF PAN Warsaw (1988). P. 1267.
- [5] R. Zanio. In: *Cadmium Telluride. Semiconductors and semimetals*. Acad Press, N.Y. (1978). V. 13.
- [6] S.A. Permogorov, L.N. Tenishev, T.P. Surkova. *Acta Phys. Pol.* **A82**, 702 (1992).
- [7] J. Lee, N.C. Giles, D. Rajavel, C.J. Summers. *Phys. Rev.* **B43**, 1668 (1994).