

Коэффициенты захвата свободных экситонов мелкими акцепторами и донорами в арсениде галлия

© К.Д. Глинчук[¶], Н.М. Литовченко, О.Н. Стрильчук^{¶¶}

Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева Национальной академии наук Украины, 03028 Киев, Украина

(Получена 5 августа 2003 г. Принята к печати 25 сентября 2003 г.)

Проведен анализ спектров ($T = 4.2$ К) экситонной люминесценции полуизолирующих кристаллов GaAs с различными концентрациями мелких акцепторов (C) и доноров (Si). Это позволило найти при температуре жидкого гелия коэффициенты захвата свободных экситонов мелкими нейтральными акцепторами [$b_{A^0X} = (4 \pm 2) \cdot 10^{-8}$ см³/с] и донорами [$b_{D^0X} = (1.5 \pm 0.8) \cdot 10^{-7}$ см³/с], а также оценить коэффициент захвата свободных экситонов мелкими ионизированными донорами ($b_{D^+X} \gg b_{D^0X}$).

1. Введение

Известно, что в полупроводниках происходят эффективные процессы связывания свободных экситонов X (их концентрация n_X) мелкими нейтральными акцепторами A^0 , мелкими ионизированными (D^+) и нейтральными (D^0) донорами (далее — нейтральные акцепторы, ионизированные и нейтральные доноры, их концентрации N_{A^0} , N_{D^+} и N_{D^0} соответственно), приводящие к образованию в них экситонно-примесных комплексов A^0X (нейтральный акцептор–экситон), D^+X (ионизированный донор–экситон) и D^0X (нейтральный донор–экситон). Важными характеристиками скорости протекания процессов связывания являются коэффициенты захвата свободных экситонов нейтральными акцепторами b_{A^0X} , ионизированными (b_{D^+X}) и нейтральными (b_{D^0X}) донорами. Однако в литературе данные об этих величинах практически отсутствуют. Лишь в работе [1] проведено теоретическое рассмотрение процесса связывания свободных экситонов нейтральными примесями в полупроводниках (к сожалению, выражение для b_{A^0X} в ней не приведено), а в работах [2,3] сделаны попытки оценить коэффициент захвата свободных экситонов мелкими нейтральными и ионизированными ловушками в CdS: $b_{A^0X} = 3 \cdot 10^{-10}$ см³/с либо $3 \cdot 10^{-7}$ см³/с, согласно [2], и $b_{D^+X} = 6 \cdot 10^{-8}$ см³/с, $b_{D^0X} = 6 \cdot 10^{-9}$ см³/с, согласно [3]. В настоящей работе на основе анализа при $T = 4.2$ К спектров экситонной люминесценции полуизолирующих кристаллов GaAs (при низких температурах они являются фотопроводниками [4]) с различными концентрациями мелких акцепторов N_A и доноров N_D мы найдем величины коэффициентов b_{A^0X} и b_{D^0X} и оценим коэффициент b_{D^+X} .

2. Метод определения коэффициентов b_{A^0X} , b_{D^+X} и b_{D^0X}

Очевидно, что проводимость фотопроводников определяется неравновесными электронами и дырками и при $T = 4.2$ К концентрации нейтральных или ионизиро-

ванных примесных центров составляют $N_{A^0} = N_{D^0} = 0$, $N_{D^+} = N_D$ в темноте и $N_{A^0} \approx N_A$, а $N_{D^0} \approx N_D \gg N_{D^+}$ при освещении.¹ Интенсивности полос люминесценции, обусловленных аннигиляцией экситонно-примесных комплексов A^0X (I_{A^0X}), D^+X (I_{D^+X}) и D^0X (I_{D^0X}), а также свободных экситонов X (I_X), определяются следующими соотношениями [4]:

$$I_{A^0X} = b_{A^0X} N_{A^0} n_X \approx b_{A^0X} N_A n_X, \quad (1)$$

$$I_{D^+X} = b_{D^+X} N_{D^+} n_X, \quad (2)$$

$$I_{D^0X} = b_{D^0X} N_{D^0} n_X \approx b_{D^0X} N_D n_X, \quad (3)$$

$$I_X = \alpha_X n_X, \quad (4)$$

где α_X — вероятность излучательной аннигиляции свободного экситона; $\alpha_X = 2.5 \cdot 10^8$ с⁻¹ при 4.2 К, как следует из времени затухания люминесценции, обусловленной аннигиляцией свободных экситонов $\tau_X = 1/\alpha_X \approx 4$ нс при гелиевой температуре [6].² При записи (1)–(4) предполагалось, что, во-первых, концентрации акцепторов и доноров, связавших экситоны, невелики, и, во-вторых, аннигиляция свободных и связанных экситонов происходит в основном с излучением фотонов. Как видно из соотношений (1)–(4), величины b_{A^0X} , b_{D^+X} и b_{D^0X} могут быть найдены из выражений

$$b_{A^0X} = \frac{I_{A^0X}}{I_X} \frac{\alpha_X}{N_A}, \quad b_{D^+X} = \frac{I_{D^+X}}{I_X} \frac{\alpha_X}{N_{D^+}},$$

$$b_{D^0X} = \frac{I_{D^0X}}{I_X} \frac{\alpha_X}{N_D}, \quad (5)$$

если мы используем измеряемые на опыте относительные интенсивности полос экситонной люминесценции I_{A^0X}/I_X , I_{D^+X}/I_X и I_{D^0X}/I_X и концентрации мелких акцепторов и доноров, а также известное значение вероятности α_X .

¹ Приведенные соотношения для N_{A^0} , N_{D^+} и N_{D^0} в освещенном фотопроводнике справедливы для изолированных акцепторов и доноров [4]. С ними в основном и связываются свободные экситоны в полуизолирующем GaAs [5].

² Заметим, что если свободные экситоны при низких температурах распределены по Максвеллу, то теоретически $\alpha_X = 3 \cdot 10^9$ с⁻¹ [7]. Отличие экспериментальных и теоретических значений α_X свидетельствуют о том, что при низких температурах свободные экситоны распределены не по Максвеллу.

[¶] E-mail: ria@isp.kiev.ua

Fax: (044)2653337

^{¶¶} E-mail: strilchuk@isp.kiev.ua

3. Эксперимент

В опытах использовались полуизолирующие кристаллы GaAs. Их темновая проводимость определялась ионизацией частично скомпенсированных глубоких доноров-дефектов $EL2$. Их концентрация $N_{EL2} \approx 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} > N_A - N_D > 0$, удельное сопротивление $\rho \approx 4 \cdot 10^7 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при $T = 300 \text{ К}$. При освещении (с интенсивностью L) и $T = 4.2 \text{ К}$ она определялась фотоэлектронами и фотодырками [4]. Изучались при $T = 4.2 \text{ К}$ спектры экситонной люминесценции полуизолирующих кристаллов арсенида галлия с известными (с точностью $\pm 30\%$) концентрациями мелких акцепторов (C) N_A и доноров (Si) N_D . В них наблюдались (после разложения на индивидуальные компоненты с точностью $\pm 20\%$) полосы люминесценции, обусловленные аннигиляцией связанных экситонов A^0X (пик люминесценции $h\nu_m = 1.512 \text{ эВ}$), D^+X ($h\nu_m = 1.5133 \text{ В}$), D^0X ($h\nu_m = 1.5141 \text{ эВ}$) и свободных экситонов X ($h\nu_m = 1.5153 \text{ эВ}$) (см. рис. 1). Определялись при различных концентрациях мелких акцепторов и доноров интенсивности I_{A^0X} , I_{D^+X} , I_{D^0X} и I_X . При используемых интенсивностях возбуждения L интенсивности полос I_{A^0X} , I_{D^+X} , I_{D^0X} и I_X квадратично возрастали по мере увеличения L [4,5]:

$$I_{A^0X}, I_{D^+X}, I_{D^0X}, I_X \propto L^2.$$

Как и ожидалось [4], нормированная (обусловленная аннигиляцией связанных экситонов A^0X) интенсивность I_{A^0X}/I_X изменялась пропорционально N_A , а нормированная (обусловленная аннигиляцией связанных экситонов D^0X) интенсивность I_{D^0X}/I_X изменялась пропорционально N_D , т.е. $I_{A^0X}/I_X \propto N_A$ и $I_{D^0X}/I_X \propto N_D$ (см. рис. 2).

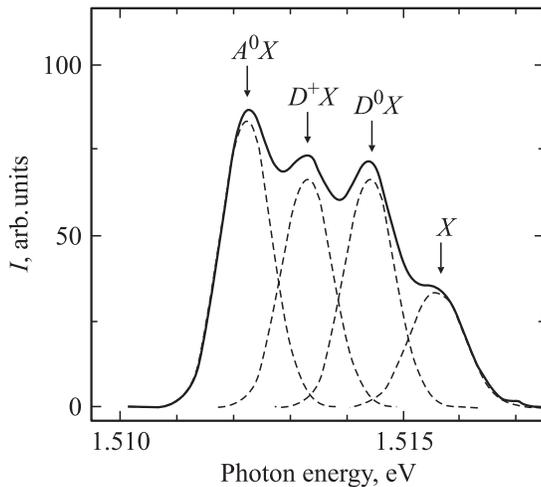


Рис. 1. Полосы люминесценции, обусловленные связанными (A^0X , D^+X , D^0X) и свободными (X) экситонами в полуизолирующем арсениде галлия при $T = 4.2 \text{ К}$.

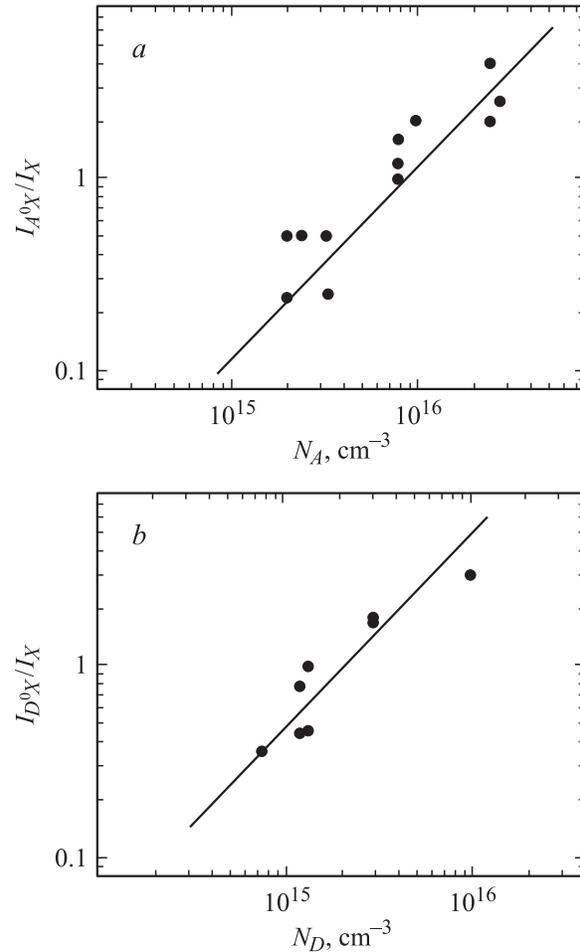


Рис. 2. Зависимости $I_{A^0X}/I_X = f(N_A)$ (a) и $I_{D^0X}/I_X = f(N_D)$ (b) в полуизолирующем арсениде галлия при $T = 4.2 \text{ К}$. Прямые линии — вытекающие из соотношений (1), (3) и (4) теоретические зависимости $I_{A^0X}/I_X = (b_{A^0X}/\alpha_X)N_A$ (a) и $I_{D^0X}/I_X = (b_{D^0X}/\alpha_X)N_D$ (b), где $b_{A^0X} = 4 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{с}$, $b_{D^0X} = 1.5 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с}$, а $\alpha_X = 3 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$. Среднее отклонение экспериментальных точек от теоретических прямых линий показывает точность определения коэффициентов b_{A^0X} и b_{D^0X} .

4. Результаты и обсуждение

По соотношениям (5) были найдены следующие величины коэффициентов захвата свободных экситонов нейтральными акцепторами, ионизированными и нейтральными донорами при $T = 4.2 \text{ К}$:

$$b_{A^0X} = (4 \pm 2) \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{с},$$

$$b_{D^0X} = (1.5 \pm 0.8) \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с}, \quad b_{D^+X} \gg b_{D^0X}.$$

Оценка величины b_{D^+X} сделана из наблюдаемых на опыте соотношений $N_{D^+} \ll N_D$ и $I_{D^+X}/I_{D^0X} = b_{D^+X}N_{D^+}/b_{D^0X}N_{D^0} \leq 1$. Следовательно, в арсениде галлия коэффициенты b_{A^0X} , b_{D^+X} и b_{D^0X} связаны соотношением $b_{A^0X} < b_{D^0X} \ll b_{D^+X}$.

Приведенные соотношения между этими коэффициентами можно объяснить следующим образом. Образование связанных экситонов A^0X , D^+X и D^0X происходит вследствие притяжения свободных экситонов к акцепторам и донорам. Притяжение обусловлено диполь-дипольным взаимодействием (это относится к образованию комплексов A^0X и D^0X) и заряд-дипольным взаимодействием (это относится к образованию комплексов D^+X). Очевидно, что появление диполей связано со взаимной поляризацией свободных экситонов и нейтральных акцепторов или доноров. Несомненно, дипольный момент нейтральных акцепторов меньше, чем соответствующий у нейтральных доноров. Это следует из сравнения боревских радиусов дырок, связанных с акцепторами, и электронов, связанных с донорами. Дипольный момент ионизированных доноров существенно больше, чем нейтральных.

Полученные значения коэффициентов b_{A^0X} , b_{D^+X} и b_{D^0X} в GaAs достаточно велики. Это свидетельствует о весьма высокой эффективности связывания свободных экситонов мелкими акцепторами и донорами в арсениде галлия.

5. Заключение

Приведенные экспериментальные значения коэффициентов захвата свободных экситонов нейтральными акцепторами и ионизированными и нейтральными донорами в арсениде галлия важны для понимания широко изучаемых в настоящее время закономерностей образования различных экситонно-примесных комплексов в интерметаллических полупроводниках.

Список литературы

- [1] А.А. Липник. ФТТ, **3**, 2322 (1961).
- [2] D. Magde, H. Mahr. Phys. Rev. B, **2**, 4098 (1970).
- [3] В.Л. Броуде, И.И. Тартаковский, В.Б. Тимофеев. ФТТ, **14**, 3531 (1972).
- [4] К.Д. Глинчук, А.В. Прохорович. ФТП, **36**, 519 (2002).
- [5] K.D. Glinchuk, A.V. Prokhorovich. Semicond. Phys., Quant. Electron. and Optoelectron., **5**, 353 (2002).
- [6] G.W. Hoofst, W.A. Poel, L.W. Molenkamp, C.T. Foxon. Phys. Rev. B, **35**, 8281 (1987).
- [7] А.П. Леванюк, В.В. Осипов. УФН, **133**, 427 (1981).

Редактор Т.А. Полянская

Coefficients of capture of free excitons by shallow acceptors and donors in gallium arsenide

K.D. Glinchuk, N.M. Litovchenko, O.N. Strilchuk

Lashkaryov Institute of Semiconductors Physics,
National Academy of Sciences of Ukraine,
03028 Kiev, Ukraine

Abstract An analysis of the 4.2 K exciton luminescence spectra of semi-insulating GaAs crystals with different shallow acceptors (C) and donors (Si) concentrations is given. As a result, the 4.2 K capture coefficients of free excitons by shallow neutral acceptors [$b_{A^0X} = (4 \pm 2) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{s}$] and donors [$b_{D^0X} = (1.5 \pm 0.8) \cdot 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{s}$] are found and also an estimate of the capture coefficient of free excitons by ionized shallow donors has been made [$b_{D^+X} \gg b_{D^0X}$].