

# О роли изолированных и связанных дефектов в определении спектра ближкрасовой люминесценции твердых тел

© К.Д. Глинчук, А.В. Прохорович

Институт физики полупроводников Национальной академии наук Украины,  
03028 Киев, Украина  
E-mail: ria@isp.kiev.ua

(Поступила в Редакцию 5 мая 2003 г.  
В окончательной редакции 26 августа 2003 г.)

Приведены выражения для интенсивностей полос в ближкрасовом спектре люминесценции твердых тел, содержащих как изолированные, так и связанные дефекты (мелкие акцепторы и доноры). Найдены условия, при выполнении которых они вносят незначительный либо доминирующий вклад в ближкрасовые полосы люминесценции. Показано (на основе анализа ближкрасового спектра люминесценции полуизолирующего GaAs), что в твердых телах весьма вероятны ситуации, когда интенсивности ближкрасовых полос люминесценции определяются различными состояниями (изолированное или связанное) мелких акцепторов и доноров.

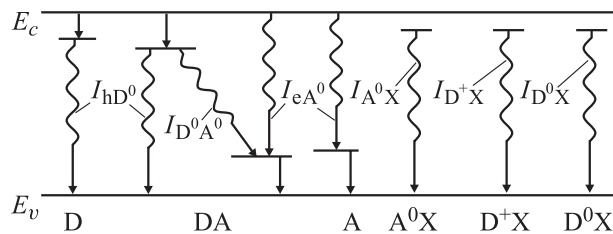
## 1. Введение

Известно, что в спектрах люминесценции твердых тел наблюдаются интенсивные ближкрасовые полосы (примесные и экситонно-примесные; их появление обусловлено рекомбинацией электронов и дырок на дефектах — мелких акцепторах и донорах- и аннигиляцией связанных с ними экситонов). При расчете интенсивностей ближкрасовых полос люминесценции обычно предполагается, что твердые тела содержат изолированные [1–5] либо связанные в донорно-акцепторные пары [1,6,7] мелкие акцепторы и доноры (далее акцепторы и доноры). Однако, очевидно, что в твердых телах имеются как изолированные, так и связанные акцепторы и доноры. Расчету интенсивностей ближкрасовых полос люминесценции в твердых телах, содержащих изолированные и связанные дефекты (мелкие акцепторы и доноры), и посвящена настоящая работа. Показано, что в рассматриваемом случае (в отличие от существующих представлений) вклад изолированных и связанных акцепторов и доноров в формирование спектров ближкрасовой люминесценции не всегда определяется лишь соотношением между их концентрациями. Из этого следует, что в твердых телах весьма вероятны случаи, когда изолированные и связанные акцепторы и доноры даже при близких их концентрациях вносят существенно различный вклад в интенсивности ближкрасовых полос люминесценции. Полученные соотношения использованы для выявления относительной роли изолированных и связанных акцепторов и доноров в формировании ближкрасового спектра люминесценции полуизолирующих кристаллов арсенида галлия.

## 2. Модель и основные предположения

Рассмотрим твердые тела, находящиеся при низких температурах; в них отсутствуют термически стимулированные процессы, их проводимость определяется

равномерно распределенными фотоэлектронами (концентрация  $\delta n$ ) и фотодырками (концентрация  $\delta p$ ). Пусть они содержат изолированные в концентрациях  $N_{A1}$  и  $N_{D1}$  и связанные в концентрациях  $N_{A2}$  и  $N_{D2}$  акцепторы и доноры соответственно (полная концентрация акцепторов в них  $N_A = N_{A1} + N_{A2}$ , а доноров  $N_D = N_{D1} + N_{D2}$ ). Обозначим коэффициент захвата свободных электронов акцепторами  $c_{nA}^0$ , донорами  $c_{nD}^+$ , коэффициент захвата свободных дырок акцепторами  $c_{pA}^-$ , а донорами —  $c_{pD}^0$ . Средний коэффициент межпримесной рекомбинации  $c_n^*$ . Вероятности заполнения связанных (при низком темпе межпримесных переходов) и изолированных акцепторов дырками составляют  $\varphi_{A^0} = c_{pA}^- \delta p / (c_{pA}^- \delta p + c_{nA}^0 \delta n)$ , доноров электронами —  $\varphi_{D^0} = c_{nD}^+ \delta n / (c_{nD}^+ \delta n + c_{pD}^0 \delta p)$ , а дырками —  $1 - \varphi_{D^0} = c_{pD}^0 \delta p / (c_{nD}^+ \delta n + c_{pD}^0 \delta p)$  [5,7]. Свободные экситоны X (их концентрация  $n_X$ ) могут связываться с нейтральными акцепторами  $A^0$ , ионизированными  $D^+$  и нейтральными  $D^0$  донорами, образуя экситонно-примесные комплексы  $A^0X$ ,  $D^+X$  и  $D^0X$  (коэффициенты связывания соответственно  $b_{A^0X}$ ,  $b_{D^+X}$  и  $b_{D^0X}$ , а вероятности —  $b_{A^0X}N_{A^0}$ ,  $b_{D^+X}N_{D^+}$  и  $b_{D^0X}N_{D^0}$ ). В дальнейшем при записи выражений для интенсивностей ближкрасовых полос люминесценции (обусловленных переходом свободных электронов  $e$  на нейтральные акцепторы  $I_{eA^0}$ , свободных дырок  $h$  на нейтральные доноры  $I_{hD^0}$ , донорно-акцепторными переходами  $I_{D^0A^0}$ , аннигиляцией



**Рис. 1.** Излучательные (волнистые линии) и безызлучательные (прямые линии) переходы на изолированные доноры D и акцепторы A, а также в донорно-акцепторных парах DA и связанных экситонах  $A^0X$ ,  $D^+X$  и  $D^0X$ .

связанных экситонов  $A^0X$ ,  $D^+X$  и  $D^0X$  соответственно  $I_{A^0X}$ ,  $I_{D^+X}$  и  $I_{D^0X}$ ; рис. 1) предполагается, что рекомбинационные переходы являются в основном излучательными. Кроме того, выражения для интенсивностей полос в ближкравеом спектре приводятся при наиболее вероятных соотношениях между величинами  $c_{nD}^+ N_{D2} \delta n = b$  и  $c_{pA}^- N_{A2} \delta p = d$  ( $b \gg d$  и  $d \gg b$ ) и для низких ( $c_n^*(b+d) \gg (c_{nD}^+ \delta n + c_{pD}^0 \delta p)(c_{pA}^- \delta p + c_{nA}^- \delta n) = a$ ) и высоких ( $a \gg c_n^*(b+d)$ ) значений  $\delta p$  и  $\delta n$ . Это связано с тем, что лишь в указанных случаях можно получить удобные для анализа аналитические выражения для концентраций связанных акцепторов и доноров в различных зарядовых состояниях [5,7].

### 3. Теоретические соотношения для интенсивностей ближкравеых полос люминесценции в полупроводнике, содержащем изолированные и связанные акцепторы и доноры

**3.1. Общие соотношения.** Очевидно, в обсуждаемом случае спектр ближкравеой люминесценции твердого тела формируется электронно-дырочными переходами как на изолированные, так и на связанные акцепторы и доноры, а также аннигиляцией связанных с ними экситонов (рис. 1). Интенсивности полос в нем определяются концентрациями нейтральных акцепторов и ионизированных и нейтральных доноров, находящихся в изолированном (соответственно  $N_{A^0_1}$ ,  $N_{D^+1}$  и  $N_{D^0_1}$ ) и связанном (соответственно  $N_{A^0_2}$ ,  $N_{D^+2}$  и  $N_{D^0_2}$ ) состояниях ( $N_{D^+1} + N_{D^0_1} = N_{D1}$  и  $N_{D^+2} + N_{D^0_2} = N_{D2}$ ), а также концентрациями фотоэлектронов, фотодырок и свободных экситонов (возможно, что  $\delta n$ ,  $\delta p$  и  $n_X$  зависят от  $N_A$  и  $N_D$ ). Они равны<sup>1</sup> (рис. 1)

$$I_{eA^0} = c_{nA}^0 (N_{A^0_1} + N_{A^0_2}) \delta n, \quad (1)$$

$$I_{hD^0} = c_{pD}^0 (N_{D^0_1} + N_{D^0_2}) \delta p, \quad (2)$$

$$I_{D^0A^0} = c_n^* N_{D^0_2} N_{A^0_2}, \quad (3)$$

$$I_{A^0X} = b_{A^0X} (N_{A^0_1} + N_{A^0_2}) n_X, \quad (4)$$

$$I_{D^+X} = b_{D^+X} (N_{D^+1} + N_{D^+2}) n_X, \quad (5)$$

$$I_{D^0X} = b_{D^0X} (N_{D^0_1} + N_{D^0_2}) n_X. \quad (6)$$

Из выражений (1)–(6) видно, что относительная роль изолированных и связанных акцепторов и доноров в определении интенсивностей ближкравеых полос люминесценции зависит от соотношения величин  $N_{A^0_1}$  и  $N_{A^0_2}$ ,  $N_{D^+1}$  и  $N_{D^+2}$ ,  $N_{D^0_1}$  и  $N_{D^0_2}$  (они определяются изолированными акцепторами и донорами, если  $N_{A^0_1} \gg N_{A^0_2}$ ,

<sup>1</sup> При записи выражений (4)–(6) предполагается, что лишь небольшое число нейтральных акцепторов, ионизированных и нейтральных доноров связано с экситонами.

$N_{D^+1} \gg N_{D^+2}$  и  $N_{D^0_1} \gg N_{D^0_2}$ , и связанными акцепторами и донорами, если  $N_{A^0_2} \gg N_{A^0_1}$ ,  $N_{D^+2} \gg N_{D^+1}$  и  $N_{D^0_2} \gg N_{D^0_1}$ ). Из них также следует, что интенсивности  $I_{eA^0}$  и  $I_{A^0X}$  обусловлены одним и тем же состоянием акцепторов (изолированным, если  $N_{A^0_1} \gg N_{A^0_2}$ , и связанным, если  $N_{A^0_2} \gg N_{A^0_1}$ ), а интенсивности  $I_{hD^0}$  и  $I_{D^0X}$  определяются одним и тем же состоянием доноров (изолированным, если  $N_{D^0_1} \gg N_{D^0_2}$ , и связанным, если  $N_{D^0_2} \gg N_{D^0_1}$ ).

Выражения (1)–(6) используются далее для определения при низких и высоких концентрациях фотодырок и фотоэлектронов интенсивностей ближкравеых полос люминесценции в полупроводниках, содержащих как изолированные, так и связанные акцепторы и доноры (входящие в них величины  $N_{A^0_{1,2}}$ ,  $N_{D^+_{1,2}}$  и  $N_{D^0_{1,2}}$  при различных соотношениях между  $b$  и  $d$ , а также при низких и высоких  $\delta p$  и  $\delta n$  приведены в [5,7]).

Полученные выражения для  $I_{eA^0}$ ,  $I_{hD^0}$ ,  $I_{A^0X}$ ,  $I_{D^+X}$  и  $I_{D^0X}$  далее представляются в виде двух слагаемых, первое из которых показывает вклад в интенсивности ближкравеых полос люминесценции изолированных, а второе — связанных акцепторов и доноров.

**3.2. Низкие  $\delta p$  и  $\delta n$ .** Для простоты ограничимся рассмотрением весьма вероятных случаев:  $c_{nD}^+ N_{D2} \delta n \gg c_{pA}^- N_{A2} \delta p$  и  $c_{pA}^- N_{A2} \delta p \gg c_{nD}^+ N_{D2} \delta n$ .

а)  $c_{nD}^+ N_{D2} \delta n \gg c_{pA}^- N_{A2} \delta p$ . При указанных соотношениях между рекомбинационными характеристиками мелких дефектов интенсивности рассматриваемых полос примесной, межпримесной и экситонной люминесценции определяются следующими выражениями (в них, очевидно,  $c_{pA}^- \delta p / c_n^* \varphi_{D^0} N_{D2} \ll 1$ ,  $c_{pA}^- N_{A2} \delta p / (c_{nD}^+ \delta n + c_{pD}^0 \delta p) \ll N_{D2}$ , а  $N_{D1} + N_{D2} = N_D$ ):

$$I_{eA^0} = c_{nA}^0 \left( \varphi_{A^0} N_{A1} + \frac{c_{pA}^- \delta p}{c_n^* \varphi_{D^0} N_{D2}} N_{A2} \right) \delta n, \quad (7)$$

$$I_{hD^0} = c_{pD}^0 \varphi_{D^0} (N_{D1} + N_{D2}) \delta p, \quad (8)$$

$$I_{D^0A^0} = c_{pA}^- N_{A2} \delta p, \quad (9)$$

$$I_{A^0X} = b_{A^0X} \left( \varphi_{A^0} N_{A1} + \frac{c_{pA}^- \delta p}{c_n^* \varphi_{D^0} N_{D2}} N_{A2} \right) n_X, \quad (10)$$

$$I_{D^+X} = b_{D^+X} \left\{ (1 - \varphi_{D^0}) N_{D1} + \left[ (1 - \varphi_{D^0}) N_{D2} + \frac{c_{pA}^- N_{A2} \delta p}{c_{nD}^+ \delta n + c_{pD}^0 \delta p} \right] \right\} n_X, \quad (11)$$

$$I_{D^0X} = b_{D^0X} \varphi_{D^0} (N_{D1} + N_{D2}) n_X. \quad (12)$$

В этом случае<sup>2</sup> имеем

1)  $I_{eA^0} / I_{D^0A^0} = c_{nA}^0 \varphi_{A^0} N_{A1} \delta n / c_{pA}^- N_{A2} \delta p$ , если  $I_{eA^0}$  определяется изолированными акцепторами (тогда

<sup>2</sup> Очевидно, что  $\varphi_{A^0} \simeq 1$ , если  $c_{pA}^- \delta p \gg c_{nA}^0 \delta n$ , и  $\varphi_{A^0} = c_{pA}^- \delta p / c_{nA}^0 \delta n \ll 1$ , если  $c_{pA}^- \delta p \ll c_{nA}^0 \delta n$ ;  $\varphi_{D^0} \simeq 1$ , если  $c_{nD}^+ \delta n \gg c_{pD}^0 \delta p$  (тогда  $1 - \varphi_{D^0} \simeq c_{pD}^0 \delta p / c_{nD}^+ \delta n \ll 1$ ), и  $\varphi_{D^0} = c_{nD}^+ \delta n / c_{pD}^0 \delta p \ll 1$ , если  $c_{nD}^+ \delta n \ll c_{pD}^0 \delta p$ . Несомненно,  $\varphi_{A^0}$ ,  $1 - \varphi_{D^0}$ ,  $\varphi_{D^0} \neq (\delta n, \delta p)$ , если  $\delta p \sim \delta n$ .

$I_{eA} \ll I_{D^0A^0}$ , если  $N_{A2} \geq N_{A1}$ , а  $\varphi_{A^0} \simeq 1$ , и  $I_{eA^0}/I_{D^0A^0} = N_{A1}/N_{A2}$  ( $I_{eA^0} > I_{D^0A^0}$  при  $N_{A1} > N_{A2}$  и  $I_{eA^0} < I_{D^0A^0}$  при  $N_{A1} < N_{A2}$ ), если  $\varphi_{A^0} \ll 1$ ), и  $I_{eA^0}/I_{D^0A^0} = c_{nA}^0 \delta n / c_n^* \varphi_{D^0} N_{D2} \ll 1$ , если  $I_{eA^0}$  определяется связанными акцепторами;

2)  $I_{hD^0}/I_{D^0A^0} = c_{pD}^0 \varphi_{D^0} N_{D1} / c_{pA}^- N_{A2}$ , если  $I_{hD^0}$  определяется изолированными донорами, и  $I_{hD^0}/I_{D^0A^0} = c_{pD}^0 \varphi_{D^0} N_{D2} / c_{pA}^- N_{A2}$ , если  $I_{hD^0}$  определяется связанными донорами (весьма вероятно, что  $I_{hD^0} \ll I_{D^0A^0}$ , так как следует ожидать, что  $c_{pD}^0 \ll c_{pA}^-$ );

3)  $I_{eA^0} \sim \varphi_{A^0} \delta n$ , а  $I_{A^0X} \sim \varphi_{A^0} n_X$ , если излучение обусловлено изолированными акцепторами (тогда  $I_{eA^0} \sim \delta p$ , а  $I_{A^0X} \sim (\delta p / \delta n) n_X$ , если  $\varphi_{A^0} \ll 1$ ), и  $I_{eA^0} \sim \delta p \delta n / \varphi_{D^0}$ , а  $I_{A^0X} \sim n_X \delta p / \varphi_{D^0}$ , если излучение обусловлено связанными акцепторами (тогда  $I_{eA^0} \sim \delta p^2$ , а  $I_{A^0X} \sim (\delta p^2 / \delta n) n_X$ , если  $\varphi_{D^0} \ll 1$ );

4)  $I_{hD^0} \sim \varphi_{D^0} \delta p$ ,  $I_{D^+X} \sim (1 - \varphi_{D^0}) n_X$ , а  $I_{D^0X} \sim \varphi_{D^0} n_X$ , если излучение обусловлено изолированными донорами либо связанными акцепторами и донорами (тогда  $I_{D^+X} \sim (\delta p / \delta n) n_X$ , если  $\varphi_{D^0} \simeq 1$ , и  $I_{hD^0} \sim \delta n$ , а  $I_{D^0X} \sim (\delta n / \delta p) n_X$ , если  $\varphi_{D^0} \ll 1$ ).

б)  $c_{pA}^- N_{A2} \delta p \gg c_{nD}^+ N_{D2} \delta n$ . Несомненно, при выполнении указанного неравенства интенсивности близкраевых полос люминесценции определяются следующими выражениями (в них, очевидно,  $c_{nD}^+ \delta n / c_n^* \varphi_{A^0} N_{A2} \ll 1$ , а  $N_{A1} + N_{A2} = N_A$ ):

$$I_{eA^0} = c_{nA}^0 \varphi_{A^0} (N_{A1} + N_{A2}) \delta n, \quad (13)$$

$$I_{hD^0} = c_{pD}^0 \left( \varphi_{D^0} N_{D1} + \frac{c_{nD}^+ \delta n}{c_n^* \varphi_{A^0} N_{A2}} N_{D2} \right) \delta p, \quad (14)$$

$$I_{D^0A^0} = c_{nD}^+ N_{D2} \delta n, \quad (15)$$

$$I_{A^0X} = b_{A^0X} \varphi_{A^0} (N_{A1} + N_{A2}) n_X, \quad (16)$$

$$I_{D^+X} = b_{D^+X} [(1 - \varphi_{D^0}) N_{D1} + N_{D2}] n_X, \quad (17)$$

$$I_{D^0X} = b_{D^0X} \left( \varphi_{D^0} N_{D1} + \frac{c_{nD}^+ \delta n}{c_n^* \varphi_{A^0} N_{A2}} N_{D2} \right) n_X. \quad (18)$$

В этом случае имеем

1)  $I_{eA^0}/I_{D^0A^0} = c_{nA}^0 \varphi_{A^0} N_{A1} / c_{nD}^+ N_{D2}$ , если  $I_{eA^0}$  определяется изолированными акцепторами, и  $I_{eA^0}/I_{D^0A^0} = c_{nA}^0 \varphi_{A^0} N_{A2} / c_{nD}^+ N_{D2}$ , если  $I_{eA^0}$  определяется связанными акцепторами (весьма вероятно, что  $I_{eA^0} \ll I_{D^0A^0}$ , так как следует ожидать, что  $c_{nA}^0 \ll c_{nD}^+$ );

2)  $I_{hD^0}/I_{D^0A^0} = c_{pD}^0 \varphi_{D^0} N_{D1} \delta p / c_{nD}^+ N_{D2} \delta n$ , если  $I_{hD^0}$  определяется изолированными донорами (тогда  $I_{hD^0} \ll I_{D^0A^0}$ , если  $N_{D2} \geq N_{D1}$ , а  $\varphi_{D^0} \simeq 1$ , и  $I_{hD^0}/I_{D^0A^0} = N_{D1}/N_{D2}$  ( $I_{hD^0} > I_{D^0A^0}$  при  $N_{D1} > N_{D2}$  и  $I_{hD^0} < I_{D^0A^0}$  при  $N_{D1} < N_{D2}$ ), если  $\varphi_{D^0} \ll 1$ ), и  $I_{hD^0}/I_{D^0A^0} = c_{pD}^0 \delta p / c_n^* \varphi_{A^0} N_{A2} \ll 1$ , если  $I_{hD^0}$  определяется связанными донорами;

3)  $I_{eA^0} \sim \varphi_{A^0} \delta n$  и  $I_{A^0X} \sim \varphi_{A^0} n_X$ , если излучение обусловлено изолированными либо связанными акцепторами (тогда  $I_{eA^0} \sim \delta p$ , а  $I_{A^0X} \sim (\delta p / \delta n) n_X$ , если  $\varphi_{A^0} \ll 1$ );

4)  $I_{hD^0} \sim \varphi_{D^0} \delta p$ ,  $I_{D^+X} \sim (1 - \varphi_{D^0}) n_X$ , а  $I_{D^0X} \sim \varphi_{D^0} n_X$ , если излучение обусловлено изолированными донорами

(тогда  $I_{D^+X} \sim (\delta p / \delta n) n_X$ , если  $\varphi_{D^0} \simeq 1$ , и  $I_{hD^0} \sim \delta n$ , а  $I_{D^0X} \sim (\delta n / \delta p) n_X$ , если  $\varphi_{D^0} \ll 1$ ), и  $I_{hD^0} \sim \delta p \delta n / \varphi_{A^0}$ ,  $I_{D^+X} \sim n_X$  и  $I_{D^0X} \sim n_X \delta n / \varphi_{A^0}$ , если излучение обусловлено связанными донорами (тогда  $I_{hD^0} \sim \delta n^2$ , а  $I_{D^0X} \sim (\delta n^2 / \delta p) n_X$ , если  $\varphi_{A^0} \ll 1$ ).

**3.3. Высокие  $\delta p$  и  $\delta n$ .** Очевидно, при высоких  $\delta p$  и  $\delta n$  интенсивности близкраевых полос люминесценции равны

$$I_{eA^0} = c_{nA}^0 \varphi_{A^0} (N_{A1} + N_{A2}) \delta n, \quad (19)$$

$$I_{hD^0} = c_{pD}^0 \varphi_{D^0} (N_{D1} + N_{D2}) \delta p, \quad (20)$$

$$I_{D^0A^0} = c_n^* N_{A2} N_{D2}, \quad (21)$$

$$I_{A^0X} = b_{A^0X} \varphi_{A^0} (N_{A1} + N_{A2}) n_X, \quad (22)$$

$$I_{D^+X} = b_{D^+X} (1 - \varphi_{D^0}) (N_{D1} + N_{D2}) n_X, \quad (23)$$

$$I_{D^0X} = b_{D^0X} \varphi_{D^0} (N_{D1} + N_{D2}) n_X, \quad (24)$$

где, как отмечалось выше,  $N_{A1} + N_{A2} = N_A$  и  $N_{D1} + N_{D2} = N_D$ .<sup>3</sup>

В этом случае имеем 1)  $I_{eA^0}$ ,  $I_{hD^0} \gg I_{D^0A^0}$ ; 2) вид зависимостей  $I_{eA^0}$ ,  $I_{hD^0}$ ,  $I_{A^0X}$ ,  $I_{D^+X}$  и  $I_{D^0X}$  от  $\delta p$  и  $\delta n$  не зависит от того, чем обусловлено соответствующее излучение — изолированными либо связанными акцепторами и донорами ( $I_{D^+X} \sim (\delta p / \delta n)$  при  $\varphi_{D^0} \simeq 1$ ,  $I_{eA^0} \sim \delta p$ , а  $I_{A^0X} \sim (\delta p / \delta n) n_X$  при  $\varphi_{A^0} \ll 1$  и  $I_{hD^0} \sim \delta n$ , а  $I_{D^0X} \sim (\delta n / \delta p) n_X$  при  $\varphi_{D^0} \ll 1$ ).

**3.4. Обсуждение. Низкие  $\delta p$  и  $\delta n$ .** При рассмотрении приведенных соотношений интенсивностей близкраевых полос люминесценции при низких концентрациях фотодырок и фотоэлектронов можно отметить следующее. Лишь в некоторых случаях (они реализуются, если межпримесные переходы мало изменяют величины  $N_{A^0_2}$ ,  $N_{D^+2}$  и  $N_{D^0_2}$ , т.е.  $N_{A^0_2}$ ,  $N_{D^+2}$ ,  $N_{D^0_2} \neq \varphi(c_n^*)$ ) вклад изолированных и связанных акцепторов и доноров в формирование спектра близкраевой люминесценции полупроводника, т.е. в интенсивности близкраевых полос люминесценции, зависит только от соотношения между их концентрациями (он пропорционален их концентрациям, если  $\delta n$ ,  $\delta p$  и  $n_X$  не зависят от  $N_A$  и  $N_D$ ). При этом близкраевой спектр люминесценции определяется изолированными акцепторами и донорами, если  $N_{A1} \gg N_{A2}$  и  $N_{D1} \gg N_{D2}$ , и, наоборот, связанными акцепторами и донорами, если  $N_{A2} \gg N_{A1}$  и  $N_{D2} \gg N_{D1}$ . Так, при  $b \gg d$  это относится к интенсивностям  $I_{hD^0}$  и  $I_{D^0X}$ , а при  $d \gg b$  — к интенсивностям  $I_{eA^0}$ ,  $I_{A^0X}$  и  $I_{D^+X}$  (см. соотношения (8), (12), (13), (16) и (17)). Однако в большинстве случаев (они реализуются, если межпримесные переходы существенно изменяют величины  $N_{A^0_1}$ ,  $N_{D^+2}$  и  $N_{D^0_2}$ ) вклад изолированных и связанных акцепторов и доноров в формирование

<sup>3</sup> При записи выражения (23) для  $I_{D^+X}$  принято, что  $N_{D^+2} \approx (1 - \varphi_{D^0}) N_{D2}$  при высоких  $\delta p$  и  $\delta n$  [7]. Как следует из общего соотношения для  $dN_{D^+2}/dt = -dN_{D^0_2}/dt = 0$  (см. уравнение (2) в [7]), это справедливо при  $c_{pD}^0 \delta p \gg c_n^* N_{A^0_2} \approx c_n^* \varphi_{A^0} N_{A2}$ , т.е. при высоких  $\delta p$ .

спектра ближкравеой люминесценции полупроводника, т.е. в соответствующие интенсивности полос люминесценции, зависит не только от соотношения между их концентрациями, но и от их рекомбинационных характеристик. Так, при  $\varphi_{A^0} N_{A1} \gg (c_{pA} \delta p / c_n^* \varphi_{D^0} N_{D2}) / N_{A2}$  и  $\varphi_{D^0} N_{D1} \gg (c_{nD}^+ \delta n / c_n^* \varphi_{A^0} N_{A2}) / N_{D2}$  интенсивности люминесценции  $I_{eA^0}$  и  $I_{A^0X}$  (если  $b \gg d$ ) и  $I_{hD^0}$  и  $I_{D^0X}$  (если  $d \gg b$ ) могут определяться изолированными акцепторами и донорами, даже если их концентрации  $N_{A1}$  и  $N_{D1}$  существенно ниже концентраций связанных акцепторов  $N_{A2}$  и доноров  $N_{D2}$  (см. (7), (10), (14) и (18)). В то же время интенсивность экситонной люминесценции  $I_{D^+X}$  может быть обусловлена связанными акцепторами (если  $b \gg d$ ), даже когда их концентрация  $N_{A2}$  ниже концентрации доноров  $N_D$  (при  $c_{pA} N_{A2} \gg c_{pD}^0 N_D$ , см. (11)), и связанными донорами (если  $d \gg b$ ), даже когда их концентрация  $N_{D2}$  существенно ниже концентрации изолированных доноров  $N_{D1}$  (это имеет место при  $N_{D2} \gg (1 - \varphi_{D^0}) N_{D1}$ , см. (17)). Очевидно, интенсивность межпримесной люминесценции определяется лишь связанными акцепторами и донорами (см. (9) и (15)).

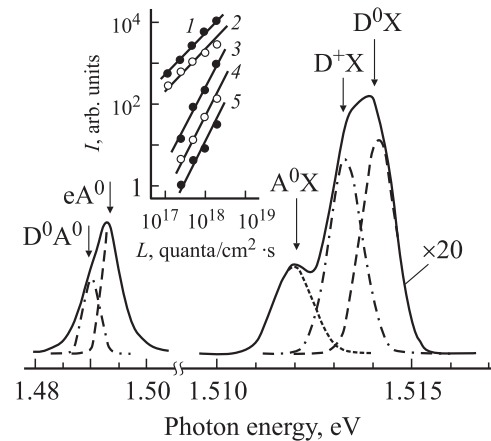
В рассматриваемых условиях весьма вероятно, что  $I_{eA^0}, I_{hD^0} \ll I_{D^0A^0}$  (см. подраздел 3.2). Лишь в отдельных случаях (если интенсивности  $I_{eA^0}$  и  $I_{hD^0}$  определяются изолированными акцепторами и донорами, а  $N_{A1} > N_{A2}$ ,  $\varphi_{A^0} \ll 1$  и  $N_{D1} > N_{D2}$ ,  $\varphi_{D^0} \ll 1$ ) возможна реализация соотношения  $I_{eA^0}, I_{hD^0} > I_{D^0A^0}$ .

Несомненно, что при низких концентрациях фотодырок и фотоэлектронов люкс-яркостные характеристики интенсивностей  $I_{eA^0}$  и  $I_{hD^0}$ ;  $I_{A^0X}$ ,  $I_{D^+X}$  и  $I_{D^0X}$  совпадают ( $I_{eA^0}, I_{hD^0} \sim \delta n$  либо  $\delta p$ , а  $I_{A^0X}, I_{D^+X}, I_{D^0X} \sim n_X$ ), если они обусловлены изолированными акцепторами и донорами, а  $\delta p \sim \delta n$  (т.е.  $\varphi_{A^0}, \varphi_{D^0} \neq \varphi(\delta p, \delta n)$ ) (см. подраздел 3.2). В то же время люкс-яркостные характеристики интенсивностей  $I_{eA^0}$  и  $I_{hD^0}$ ,  $I_{A^0X}$  и  $I_{D^0X}$  существенно различаются, если они определяются связанными акцепторами и донорами.

**Высокие  $\delta p$  и  $\delta n$ .** Несомненно, что при высоких концентрациях фотодырок и фотоэлектронов вклад изолированных и связанных акцепторов и доноров в формирование спектра ближкравеой люминесценции полупроводника, т.е. в интенсивности ближкравеых полос примесной и экситонной люминесценции, зависит лишь от соотношения между их концентрациями (он пропорционален их концентрациям, если  $\delta n$ ,  $\delta p$  и  $n_X$  не зависят от  $N_A$  и  $N_D$ ) (см. (19), (20), (22)–(24)). Очевидно, интенсивность межпримесной люминесценции в этом случае, как и при низких  $\delta p$  и  $\delta n$ , определяется лишь связанными акцепторами и донорами (см. (21)). В обсуждаемом случае люкс-яркостные характеристики интенсивностей  $I_{eA^0}$  и  $I_{hD^0}$ ;  $I_{A^0X}$ ,  $I_{D^+X}$  и  $I_{D^0X}$  совпадают ( $I_{eA^0}, I_{hD^0} \sim \delta n$  либо  $\delta p$ , а  $I_{A^0X}, I_{D^+X}, I_{D^0X} \sim n_X$ ) независимо от того, определяются ли они изолированными или связанными акцепторами и донорами, а  $\delta p \sim \delta n$  (т.е.  $\varphi_{A^0}, \varphi_{D^0} \neq \varphi(\delta p, \delta n)$ ) (см. подраздел 3.3).

#### 4. Анализ спектра ближкравеой люминесценции полуизолирующего GaAs

На рис. 2 приведен спектр ближкравеой люминесценции, а также зависимости интенсивностей полос в нем от интенсивности возбуждения  $L$ , измеренные для специально нелегированного полуизолирующего арсенида галлия при 4.2 К и низких  $\delta p$  и  $\delta n$  (люминесценция возбуждалась излучением He–Ne-лазера,  $\lambda = 632.8$  nm,  $h\nu = 1.96$  eV; проводимость GaAs задавалась избыточными дырками и электронами,  $\delta p, \delta n \sim L$ ). Вид ближкравеого спектра и интенсивности полос в нем определяются: а) излучательными переходами в связанных акцепторах и донорах (индуцируется полоса люминесценции  $I_{D^0A^0}$ ); б) излучательной рекомбинацией свободных электронов на изолированных акцепторах (индуцируется полоса  $I_{eA^0}$ ) и излучательной аннигиляцией экситонов, связанных с ними (индуцируется полоса  $I_{A^0X}$ ); в) излучательной аннигиляцией экситонов, связанных с изолированными донорами (индуцируются полосы  $I_{D^+X}$  и  $I_{D^0X}$ ). О доминирующей роли изолированных акцепторов и доноров в определении интенсивностей  $I_{A^0X}$ ,  $I_{D^+X}$  и  $I_{D^0X}$  свидетельствует близкий вид зависимостей данных интенсивностей от  $L$  (это возможно, если  $\delta p \sim \delta n$ ), а именно  $I_{A^0X}, I_{D^+X}, I_{D^0X} \sim L^2$  (см. рис. 2 и подраздел 3.4). На доминирующую роль изолированных акцепторов в определении интенсивности  $I_{eA^0}$  указывает установленная природа дефектов (изолированные акцепторы), ответственных за появление полосы с интенсивностью  $I_{A^0X}$  (как отмечалось в подразделе 3.1, интенсивности  $I_{eA^0}$  и  $I_{A^0X}$  индуцируются одним и тем



**Рис. 2.** Спектр ближкравеой люминесценции полуизолирующего арсенида галлия (штриховые линии разного вида — результат разложения спектра на элементарные составляющие). На вставке — зависимости интенсивностей ближкравеых полос люминесценции  $I_{D^0A^0}$  (1),  $I_{eA^0}$  (2),  $I_{A^0X}$  (3),  $I_{D^+X}$  (4) и  $I_{D^0X}$  (5) от интенсивности возбуждения (соотношения между интенсивностями полос произвольные; истинные соотношения видны из спектра). Измерения проведены при  $T = 4.2$  К и низких  $\delta p$  и  $\delta n$ ; спектр записан при  $L = 10^{18}$  quanta/cm<sup>2</sup> · s.

же состоянием акцепторов). Кроме того, об этом также свидетельствуют и близкие значения величин  $I_{eA^0}$  и  $I_{D^0A^0}$  при любых  $L$  ( $I_{eA^0}, I_{D^0A^0} \sim L$ , т.е.  $I_{eA^0}/I_{D^0A^0}$  не зависит от  $L$ ) (см. рис. 2 и подраздел 3.4). Следовательно, в полупроводящем арсениде галлия в формировании спектра ближней люминесценции принимают участие как изолированные, так и связанные акцепторы и доноры.

## 5. Заключение

Изолированные и связанные мелкие дефекты могут вносить и аддитивный (зависящий только от соотношения их концентраций), и неаддитивный (зависящий как от соотношения их концентраций, так и от их рекомбинационных характеристик, а также от концентраций в твердом теле фотоэлектронов и фотодырок) вклад в интенсивность низкотемпературных ближних полос люминесценции. Это связано с различной ролью межпримесных переходов в определении заполнения мелких дефектов электронами и дырками, т.е. величин  $N_{A^0_2}$ ,  $N_{D^0_2}$  и  $N_{D^0_2}$ . Приведенные соотношения интенсивностей примесных, межпримесных и экситонных полос излучения, а также зависимости интенсивностей ближних полос излучения от уровня возбуждения позволяют на опыте установить вклад изолированных и связанных мелких дефектов в формирование спектра ближней люминесценции твердых тел.

## Список литературы

- [1] А. Берг, П. Дин. Светодиоды. Мир, М. (1979).
- [2] O. Brandt, J. Ringling, K.H. Ploog. Phys. Rev. B **58**, 24, R 15 977 (1998).
- [3] S. Seto, K. Suzuki, M. Adachi, K. Inabe. Physica B **302–303**, 307 (2000).
- [4] I. Brousell, J.A.H. Stotz, M.L.W. Thewalt. J. Appl. Phys. **92**, 10, 5913 (2002).
- [5] К.Д. Глинчук, А.В. Прохорович. ФТП **36**, 5, 519 (2002).
- [6] T. Schmidt, K. Lischka, W. Zulehner. Phys. Rev. B **45**, 16, 8989 (1992).
- [7] К.Д. Глинчук, А.В. Прохорович. ФТП **37**, 2, 159 (2003).