

О роли изолированных и связанных дефектов в определении спектра ближкрасевой 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 ближкрасевом 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 ближкрасевые полосы люминесценции. Показано (на основе анализа ближкрасевого спектра люминесценции полуизолирующего GaAs), что в твердых телах весьма вероятны ситуации, когда интенсивности ближкрасевых полос люминесценции определяются различными состояниями (изолированное или связанное) мелких акцепторов и доноров.

1. Введение

Известно, что в спектрах люминесценции твердых тел наблюдаются интенсивные ближкрасевые 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 ближкрасевых 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 ближкрасевых 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 ближкрасевой 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 ближкрасевых полос люминесценции. Полученные соотношения использованы для выявления относительной роли изолированных и связанных акцепторов и доноров в формировании ближкрасевого 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 δn) и фотодырками (концентрация δp). 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 ближкрасевых 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

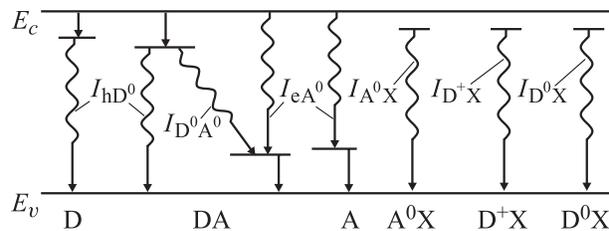


Рис. 1. Излучательные (волнистые линии) и безызлучательные (прямые линии) переходы на изолированные доноры D и акцепторы A, а также в донорно-акцепторных парах DA и связанных экситонах A^0X , D^+X и D^0X .

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 ближкравом 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 δp и δn . 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 ближкравых полос люминесценции в полупроводнике, содержащем изолированные и связанные акцепторы и доноры

3.1. Общие соотношения. Очевидно, в обсуждаемом случае спектр ближкравой 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 δn , δp и n_X зависят от N_A и N_D). Они равны¹ (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 ближкравых 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 $N_{A^0_1} \gg N_{A^0_2}$,

¹ 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 ближкравых 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 δp и δn 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 ближкравых полос люминесценции изолированных, а второе — связанных акцепторов и доноров.

3.2. Низкие δp и δn . 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 случае² 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

² 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, φ_{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 δp и δn . Очевидно, при высоких δp и δn 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 $N_{D1} + N_{D2} = N_D$.³

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 δp и δn 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 δp и δn . 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 δn , δp 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

³ При записи выражения (23) для I_{D^+X} принято, что $N_{D^+2} \approx (1 - \varphi_{D^0}) N_{D2}$ при высоких δp и δn [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 δp .

спектра ближней 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 δp , 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 δp и δn . Несомненно, что при высоких концентрациях фотодырок и фотоэлектронов вклад изолированных и связанных акцепторов и доноров в формирование спектра ближней люминесценции полупроводника, т.е. в интенсивности ближних полос примесной и экситонной люминесценции, зависит лишь от соотношения между их концентрациями (он пропорционален их концентрациям, если δn , δp 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 δp и δn , 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 δp , 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 ближней люминесценции полуизолирующего GaAs

На рис. 2 приведен спектр ближней 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 δp и δn (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 ближнего 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}); с) 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

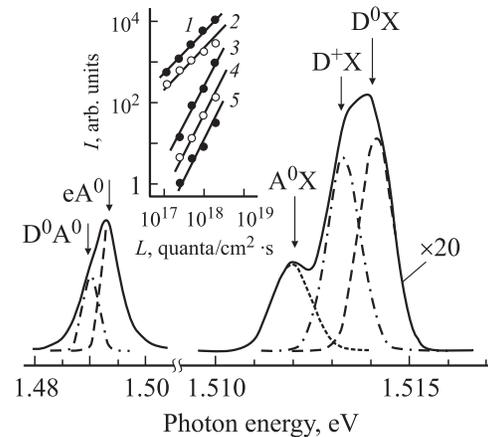


Рис. 2. Спектр ближней люминесценции полуизолирующего арсенида галлия (штриховые линии разного вида — результат разложения спектра на элементарные составляющие). На вставке — зависимости интенсивностей ближних полос люминесценции $I_{D^0A^0}$ (1), I_{eA^0} (2), I_{A^0X} (3), I_{D^+X} (4) и I_{D^0X} (5) от интенсивности возбуждения (соотношения между интенсивностями полос произвольные; истинные соотношения видны из спектра). Измерения проведены при $T = 4.2$ К и низких δp и δn ; спектр записан при $L = 10^{18}$ quanta/cm² · 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 полупроводнике 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).