

Особенности определения концентраций мелких примесей в полупроводниках из анализа спектров экситонной люминесценции

© К.Д. Глинчук[†], А.В. Прохорович

Институт физики полупроводников Национальной академии наук Украины,
03028 Киев, Украина

(Получена 10 января 2001 г. Принята к печати 26 сентября 2001 г.)

Проанализированы пределы применимости метода определения содержания мелких акцепторов и доноров в полупроводниках из соотношений низкотемпературных ($T = 1.8\text{--}4.2\text{ K}$) интенсивностей полос экситонной люминесценции, обусловленных, в частности, излучательной аннигиляцией связанных на них и свободных экситонов. Показано, что корректные данные о концентрациях мелких акцепторов и доноров и изменении их содержания при различных воздействиях могут быть получены, если заполнение рассматриваемых дефектов дырками и электронами не зависит от интенсивности возбуждения люминесценции и приложенных внешних воздействий. Указаны способы проверки выполнения критериев корректности применения метода. Приведен пример использования метода для определения термически стимулированных изменений концентраций мелких акцепторов и доноров в арсениде галлия.

1. Введение

Известно, что в спектре краевого излучения полупроводников (энергия испускаемых квантов света $h\nu$) при низких температурах ($T = 1.8\text{--}4.2\text{ K}$) наблюдаются интенсивные полосы люминесценции, обусловленные излучательной аннигиляцией свободных экситонов X (реакция $X \rightarrow h\nu$, ее вероятность α_X , интенсивность I_X), а также связанные с мелкими примесями — нейтральными акцепторами A^0 (далее связанные экситоны A^0X , реакция $A^0X \rightarrow A^0 + h\nu$, ее вероятность α_{A^0X} , интенсивность I_{A^0X}), с ионизированными (D^+) и нейтральными (D^0) донорами (далее связанные экситоны D^+X и D^0X , реакции $D^+X \rightarrow D^+ + h\nu$ и $D^0X \rightarrow D^0 + h\nu$, вероятности α_{D^+X} и α_{D^0X} , а интенсивности I_{D^+X} и I_{D^0X}) [1].¹ Ранее (см., например, [4–13]) анализ отношений интенсивностей полос экситонной люминесценции в полупроводниках широко применялся для определения их примесного состава. Так, измерение отношений интенсивностей полос люминесценции, обусловленных аннигиляцией связанных и свободных экситонов, использовалось для определения в различных полупроводниках концентраций мелких акцепторов N_A и доноров N_D (см., например, в Si [4–7], GaAs [8,9], InP [9]) и изменений в их содержании, вызванных различными внешними воздействиями F , в частности легированием и прогревом (см., например, в GaAs [10,11]). Кроме того, измерение в арсениде галлия отношений интенсивностей полос люминесценции, обусловленных аннигиляцией экситонов, связанных на мелких акцепторах и донорах, использовалось для определения соотношения между их концентрациями N_A/N_D [12] и его изменения при внешнем воздействии F (вариации

условий выращивания эпитаксиальных слоев) [13]. Однако при этом недостаточное внимание было уделено рассмотрению физических основ метода, в частности критериям, при выполнении которых возможно его использование для получения достоверных данных о величинах N_A , N_D и N_A/N_D и об их зависимостях от F .

Далее мы детально рассмотрим физические условия, при которых возможно корректное определение концентраций мелких акцепторов и доноров в полупроводниках и обусловленных различными воздействиями изменений в их содержании. Мы покажем, что использование нормированных интенсивностей полос экситонной люминесценции для определения величин N_A , N_D и N_A/N_D и их изменений при варьировании F имеет определенные ограничения; приведем критерии, при выполнении которых возможно получить надежные результаты об указанных величинах, и детально их проанализируем. Мы также проиллюстрируем корректное использование рассматриваемого люминесцентного метода на примере определения термически стимулированных изменений концентраций мелких акцепторов и доноров в полупроводнике арсениде галлия.

2. Основы метода

2.1. Общие выражения для отношений интенсивностей люминесценции

Рассмотрим полупроводник, содержащий изолированные и связанные с экситонами акцепторы и доноры. Найдем в нем при низких² температурах $T = 1.8\text{--}4.2\text{ K}$ нормированные интенсивности экситонной люминесценции I_{A^0X}/I_X , I_{D^+X}/I_X , I_{D^0X}/I_X , I_{A^0X}/I_{D^+X} , I_{A^0X}/I_{D^0X} и

² Предполагается, что при указанных температурах, во-первых, проводимость полупроводника вследствие вымораживания равновесных носителей заряда полностью определяется избыточными электронами (их концентрация δn , а время жизни τ_n) и дырками (их концентрация δp , а время жизни τ_p) и, во-вторых, отсутствуют процессы термического разрушения экситонов.

[†] E-mail: ria@isp.kiev.ua
Факс: (044)2653337

¹ Заметим, что, в частности, в связанных экситонах A^0X , D^+X и D^0X могут иметь место не только излучательные, но и безызлучательные (с вероятностями α'_{A^0X} , α'_{D^+X} и α'_{D^0X} соответственно) электронные переходы [2,3].

I_{D^+X}/I_{D^0X} . Очевидно, в указанных выше условиях интенсивности полос экситонной люминесценции определяются как

$$\begin{aligned} I_{A^0X} &= \alpha_{A^0X} n_{A^0X} = B_{A^0X} N_{A^0} n_X, \\ I_{D^+X} &= \alpha_{D^+X} n_{D^+X} = B_{D^+X} N_{D^+} n_X, \\ I_{D^0X} &= \alpha_{D^0X} n_{D^0X} = B_{D^0X} N_{D^0} n_X, \end{aligned}$$

где B_{A^0X} , B_{D^+X} и B_{D^0X} — коэффициенты пропорциональности, зависящие от природы акцепторов и доноров; n_X , n_{A^0X} , n_{D^+X} и n_{D^0X} — концентрации свободных (X) и связанных (A^0X , D^+X и D^0X) экситонов, а N_{A^0} , N_{D^+} и N_{D^0} — соответственно концентрации нейтральных акцепторов, ионизированных и нейтральных доноров.³ Тогда нормированные интенсивности рассматриваемых полос экситонной люминесценции равны

$$\frac{I_{A^0X}}{I_X} \propto \varphi_{A^0} N_A, \quad \frac{I_{D^+X}}{I_X} \propto \varphi_{D^+} N_D, \quad \frac{I_{D^0X}}{I_X} \propto \varphi_{D^0} N_D; \quad (1)$$

$$\frac{I_{A^0X}}{I_{D^+X}} \propto \frac{\varphi_{A^0}}{\varphi_{D^+}} \frac{N_A}{N_D}, \quad \frac{I_{A^0X}}{I_{D^0X}} \propto \frac{\varphi_{A^0}}{\varphi_{D^0}} \frac{N_A}{N_D}; \quad (2)$$

$$\frac{I_{D^+X}}{I_{D^0X}} \propto \frac{\varphi_{D^+}}{\varphi_{D^0}} \propto \frac{\delta p}{\delta n}, \quad (3)$$

где концентрации $N_{A^0} = \varphi_{A^0} N_A$, $N_{D^+} = \varphi_{D^+} N_D$ и $N_{D^0} = \varphi_{D^0} N_D$ выражены через вероятности заполнения акцепторов дырками (φ_{A^0}), доноров — дырками (φ_{D^+}) или электронами (φ_{D^0}):

$$\varphi_{A^0} = \frac{c_{pA}^- \delta p}{c_{pA}^- \delta p + c_{nA}^0 \delta n}, \quad \varphi_{D^+} = \frac{c_{pD}^0 \delta p}{c_{pD}^0 \delta p + c_{nD}^+ \delta n}, \quad (4)$$

$$\varphi_{D^0} = \frac{c_{nD}^+ \delta n}{c_{pD}^0 \delta p + c_{nD}^+ \delta n}, \quad (5)$$

где c_{pA}^- и c_{nA}^0 — коэффициенты захвата дырок ионизированными акцепторами и электронами — нейтральными акцепторами, а c_{pD}^0 и c_{nD}^+ — коэффициенты захвата дырок нейтральными донорами и электронами — ионизированными донорами.⁴ Таким образом, соотношения (4),

³ При записи соотношений для I_{A^0X} , I_{D^+X} и I_{D^0X} предполагается, что, во-первых, мала концентрация акцепторов и доноров, на которых связаны экситоны, т.е. $n_{A^0X} \ll N_{A^0}$, $n_{D^+X} \ll N_{D^+}$ и $n_{D^0X} \ll N_{D^0}$ (отмеченное является одним из основных условий применимости рассматриваемого метода, — см. далее, а также [6]). Во-вторых, предполагается, что безызлучательная аннигиляция связанных экситонов A^0X , D^+X и D^0X (если ее роль существенна, т.е. $\alpha'_{A^0X} \geq \alpha_{A^0X}$, $\alpha'_{D^+X} \geq \alpha_{D^+X}$ и $\alpha'_{D^0X} \geq \alpha_{D^0X}$) не обусловлена их взаимодействием со свободными носителями тока; в частности, можно пренебречь процессами разрушения экситонно-примесных комплексов A^0X , D^+X и D^0X за счет переходов свободных электронов и дырок на акцепторы или доноры.

⁴ При записи соотношений (4) и (5) предполагается, что вероятности φ_{A^0} , φ_{D^+} и φ_{D^0} определяются лишь переходами свободных электронов и дырок на нейтральные и ионизированные акцепторы и доноры [14,15], т.е. процессы генерации и аннигиляции связанных экситонов A^0X , D^+X и D^0X не изменяют величины N_{A^0} , N_{D^+} и N_{D^0} . Очевидно, это предположение справедливо, если аннигиляция экситонно-примесных комплексов A^0X , D^+X и D^0X сопровождается, в основном, появлением изолированных акцепторов A^0 и доноров D^+ , D^0 [2,3], т.е. можно пренебречь оже-рекомбинацией связанных экситонов A^0X , D^+X и D^0X [15].

(5) определяют вероятности: найти акцептор в нейтральном состоянии A^0 , донор — в состоянии D^+ или в нейтральном состоянии D^0 .

2.2. Определение зависимостей N_A , $N_D = f(F)$ из анализа спектров экситонной люминесценции

Как отмечалось выше, определение зависимостей N_A и N_D от величины внешнего воздействия F основано на измерении при низких температурах ($T = 1.8-4.2$ К) отношений интенсивностей I_{A^0X}/I_X , I_{D^+X}/I_X и I_{D^0X}/I_X при различных внешних воздействиях F [10,11]. Однако из соотношений (1), (4) и (5) видно, что в общем случае вариации этих отношений при изменении F определяются не только зависимостями концентраций мелких акцепторов и доноров от F , но также и величин φ_{A^0} , φ_{D^+} и φ_{D^0} , т.е. зависимостями отношений концентраций избыточных электронов и дырок ($\delta n/\delta p$), так же как и зависимостями темпов их захвата акцепторами ($c_{pA}^0 \delta n/c_{pA}^- \delta p$) и донорами ($c_{nD}^+ \delta n/c_{pD}^0 \delta p$) от величины F .

Очевидно, соотношения (1) переходят в следующие:

$$\frac{I_{A^0X}}{I_X} \propto N_A, \quad (6)$$

если $\varphi_{A^0} \neq f(L, F)$, где L — интенсивность возбуждения люминесценции;

$$\frac{I_{D^+X}}{I_X} \propto N_D, \quad (7)$$

если $\varphi_{D^+} \neq f(L, F)$; и

$$\frac{I_{D^0X}}{I_X} \propto N_D. \quad (8)$$

если $\varphi_{D^0} \neq f(L, F)$ (о критериях, при выполнении которых φ_{A^0} , φ_{D^+} , $\varphi_{D^0} \neq f(L, F)$, см. далее).

Выражения (6)–(8) являются основными при использовании спектров экситонной люминесценции для определения зависимостей N_A , $N_D = f(F)$. Они отображают необходимую для корректности метода линейную связь между нормированными интенсивностями люминесценции (обусловленной связанными экситонами) и концентрациями мелких примесей.⁵ Следовательно, корректное использование рассматриваемого метода для определения индуцированных внешним воздействием изменений в концентрации мелких акцепторов возможно, если $\varphi_{A^0} \neq f(L, F)$, а изменений концентрации мелких доноров — если φ_{D^+} либо φ_{D^0} не зависят от L и F , т.к. лишь в этих случаях I_{A^0X}/I_X линейно возрастает с N_A , а отношения I_{D^+X}/I_X и I_{D^0X}/I_X растут линейно

⁵ Рассматриваемый метод корректен, если лишь небольшое число акцепторов и доноров связывается с экситонами, т.е. $n_{A^0X} \ll N_A$ и $n_{D^+X} + n_{D^0X} \ll N_D$. В этом случае интенсивности люминесценции I_{A^0X} , I_{D^+X} и I_{D^0X} пропорциональны L^m , где m может изменяться от 1.5 до 2 [16], а нормированные интенсивности полос экситонной люминесценции возможно не зависят от L (см. далее). Иначе, если, например, $n_{A^0X} \approx N_A$, то интенсивность $I_{A^0X} \approx \alpha_{A^0X} N_A$ не зависит от L , а отношение интенсивностей $I_{A^0X}/I_X \propto N_A/n_X = f(L)$ при любых L .

с увеличением N_D . В противном случае использование рассматриваемого метода приведет к некорректной зависимости N_A и N_D от внешних воздействий, т.е. ее вид будет отличаться при различных значениях L (в частности, если φ_{A^0} , φ_{D^+} , $\varphi_{D^0} = f(L)$; это, очевидно, имеет место, когда вид зависимостей I_{A^0X} , I_{D^+X} и I_{D^0X} от L различен, — см., например, [9,16]).

Указанная независимость вероятностей φ_{A^0} , φ_{D^+} и φ_{D^0} от L и F может иметь место, как вытекает из соотношений (4) и (5), при следующих условиях:

а) $\delta p \simeq \delta n$ либо $\delta p/\delta n \neq f(L, F)$, тогда φ_{A^0} , φ_{D^+} , $\varphi_{D^0} \neq f(L, F)$;

б) $c_{pA}^- \delta p \gg c_{nA}^0 \delta n$, тогда $\varphi_{A^0} \simeq 1$, т.е. $\varphi_{A^0} \neq f(L, F)$;

в) $c_{nD}^+ \delta n \gg c_{pD}^0 \delta p$, тогда $\varphi_{D^0} \simeq 1$, т.е. $\varphi_{D^0} \neq f(L, F)$;

г) $c_{pD}^0 \delta p \gg c_{nD}^+ \delta n$, тогда $\varphi_{D^+} \simeq 1$, т.е. $\varphi_{D^+} \neq f(L, F)$.

Очевидно, на опыте о выполнении соотношения φ_{A^0} , φ_{D^+} , $\varphi_{D^0} \neq f(L)$ свидетельствует независимость отношений интенсивностей I_{A^0X}/I_X , I_{D^+X}/I_X и I_{D^0X}/I_X от L . Несомненно, о выполнении на опыте соотношений φ_{A^0} , φ_{D^+} , $\varphi_{D^0} \neq f(L, F)$ может также свидетельствовать независимость отношения интенсивностей $I_{D^+X}/I_{D^0X} \propto \delta p/\delta n$ от L и F [см. выражение (3)].

Выполнение указанных условий, определяющих границы независимости величин φ_{A^0} , φ_{D^+} и φ_{D^0} от L и F , существенно ограничивает область применимости обсуждаемого метода. Их соблюдение на опыте вызывает определенные трудности. Поэтому при соответствующих экспериментальных исследованиях весьма вероятны случаи, когда нормированные интенсивности I_{A^0X}/I_X , I_{D^+X}/I_X , I_{D^0X}/I_X и отношения I_{A^0X}/I_{D^+X} и I_{A^0X}/I_{D^0X} зависят от L , и, следовательно, данная методика не может быть использована для определения изменений N_A , N_D и N_A/N_D при варьировании F . Так, условие $\delta p \simeq \delta n$ может выполняться лишь при достаточно больших значениях L (не всегда достигаемых на опыте), величина которых зависит от параметров рекомбинационных центров [14,15]. Соотношение $\delta p/\delta n \neq f(L)$ может выполняться лишь при определенной схеме рекомбинационных переходов в полупроводнике [14,15]. Соотношение $\delta p/\delta n \neq f(F)$ может выполняться лишь при слабых внешних воздействиях (они мало изменяют величины δp и δn , тогда δp , $\delta n \neq f(F)$) либо при воздействиях, одинаково изменяющих величины δp и δn . Последнее возможно лишь при определенных рекомбинационных параметрах локальных уровней [14,15]. В то же время, вследствие большого отличия коэффициентов c_{pA}^- и c_{nA}^0 ($c_{pA}^- \gg c_{nA}^0$), c_{nD}^+ и c_{pD}^0 ($c_{nD}^+ \gg c_{pD}^0$) и несколько меньших отличий величин δp и δn , на опыте весьма вероятно выполнение соотношений $c_{pA}^- \delta p \gg c_{nA}^0 \delta n$ и $c_{nD}^+ \delta n \gg c_{pD}^0 \delta p$. Действительно, например, в GaAs коэффициенты c_{pA}^- и c_{nA}^0 , c_{nD}^+ и c_{pD}^0 отличаются примерно на 5 порядков (c_{pA}^-/c_{nA}^0 , $c_{nD}^+/c_{pD}^0 \simeq 10^5$) [17]. В то же время в зависимости от технологии изготовления GaAs, типа и величины его проводимости, а также используемых интенсивностей возбуждения L (при измерении спектров люминесценции обычно $L \gtrsim 10^{18}$ фотон/см²с) величины

δn и δp (очевидно, что $\delta p/\delta n = \tau_p/\tau_n$) могут быть одного порядка (см., например, [18,19]) либо отличаться не более чем на 2–3 порядка (см., например, [19–21]).

2.3. Определение зависимостей $N_A/N_D = f(F)$ из анализа спектров экситонной люминесценции

Как отмечалось выше, определение зависимостей N_A/N_D от F основано на измерении при низких температурах ($T = 1.8–4.2$ К) отношений интенсивностей I_{A^0X}/I_{D^+X} либо I_{A^0X}/I_{D^0X} при различных F [13]. Как следует из выражения (2),

$$\frac{I_{A^0X}}{I_{D^+X}} \propto \frac{N_A}{N_D}, \quad (9)$$

если $\varphi_{A^0}/\varphi_{D^+} \neq f(L, F)$, и

$$\frac{I_{A^0X}}{I_{D^0X}} \propto \frac{N_A}{N_D}, \quad (10)$$

если $\varphi_{A^0}/\varphi_{D^0} \neq f(L, F)$. Очевидно, что критерии, при выполнении которых $\varphi_{A^0}/\varphi_{D^+}$ и $\varphi_{A^0}/\varphi_{D^0}$ не зависят от L и F , аналогичны рассмотренным в п. 2.2.

Следовательно, корректное использование рассматриваемого люминесцентного метода для определения изменения N_A/N_D с F возможно, когда $\varphi_{A^0}/\varphi_{D^+}$ либо $\varphi_{A^0}/\varphi_{D^0}$ не зависят от L и F . В этом случае отношения I_{A^0X}/I_{D^+X} либо I_{A^0X}/I_{D^0X} не изменяются с L и линейно возрастают с увеличением N_A/N_D . В противном случае отношения интенсивностей I_{A^0X}/I_{D^+X} и I_{A^0X}/I_{D^0X} будут зависеть от L и окажутся нелинейно связаны с отношением концентраций мелких акцепторов и доноров N_A/N_D .

2.4. Определение N_A , N_D и N_A/N_D из анализа спектров экситонной люминесценции

Указанный метод основан на вычислении отношений I_{A^0X}/I_X , I_{D^0X}/I_X и I_{A^0X}/I_{D^0X} из низкотемпературных ($T = 1.8–4.2$ К) спектров люминесценции тестовых кристаллов (пленок). Затем по известным калибровочным зависимостям $I_{A^0X}/I_X = f(N_A)$, $I_{D^0X}/I_X = f(N_D)$ и $I_{A^0X}/I_{D^0X} = f(N_A/N_D)$ (очевидно, они имеют линейный вид, если φ_{A^0} , $\varphi_{D^0} \neq f(L, N_A, N_D)$) определяются концентрации N_A и N_D , а также их отношение [4–9,12]. Несомненно, как следует из изложенного в п.п. 2.2 и 2.3, при такой процедуре определения эти величины могут быть получены лишь в случае, если вероятности φ_{A^0} и φ_{D^0} [см. соотношения (1) и (2)] не зависят (либо одинаково зависят, что маловероятно) от L , N_A и N_D , как для тестовых структур, так и для калибровочных кристаллов. В этом случае I_{A^0X}/I_X , I_{D^0X}/I_X , $I_{A^0X}/I_{D^0X} \neq f(L)$.

3. Пример: использование метода для определения термически стимулированных изменений концентрации мелких акцепторов и доноров в арсениде галлия

Корректное использование обсуждаемого метода мы проиллюстрируем на примере изучения вариаций концентрации мелких акцепторов и доноров в полуизолирующем GaAs, вызванных термическим воздействием (при температуре отжига $T_a = 900^\circ\text{C}$) различной длительности t (время отжига t изменялось от 20 до 90 мин). При $T = 4.2\text{ K}$ проводимость GaAs определяется избыточными электронами и дырками. Для простоты мы ограничимся приведением спектров люминесценции и зависимостей I_{A^0X}/I_X , I_{D^+X}/I_X , I_{D^0X}/I_X , $I_{D^+X}/I_{D^0X} = f(L)$ при фиксированном внешнем воздействии в отсутствие термообработки, а зависимостей I_{A^0X}/I_X , I_{D^+X}/I_X , I_{D^0X}/I_X , $I_{D^+X}/I_{D^0X} = f(t)$ — при фиксированной интенсивности возбуждения L . Отмеченное связано с тем, что приведенные далее зависимости отношений интенсивностей от L не зависят от длительности термообработки t , а зависимости от времени отжига — от L .

На рис. 1 приведен типичный спектр экситонной люминесценции исследуемого GaAs при $T = 4.2\text{ K}$ (люминесценция возбуждалась излучением He-Ne-лазера, энергия квантов $h\nu_e = 1.96\text{ эВ}$). В спектре наблюдаются полосы люминесценции, обусловленные аннигиляцией связанных (A^0X , D^+X , D^0X) и свободных (X) экситонов. Положение максимумов излучения — $h\nu_m = 1.512$, 1.5133 , 1.541 и 1.5153 эВ соответственно [8–13,22]. Как отмечалось выше, вид спектров люминесценции не зависит от интенсивности возбуждения L и времени термообработки кристалла t , т.е. интенсивности различных полос в спектре одинаково изменяются с L и при вариации времени отжига t изменяется лишь соотношение между интенсивностями полос в спектре.

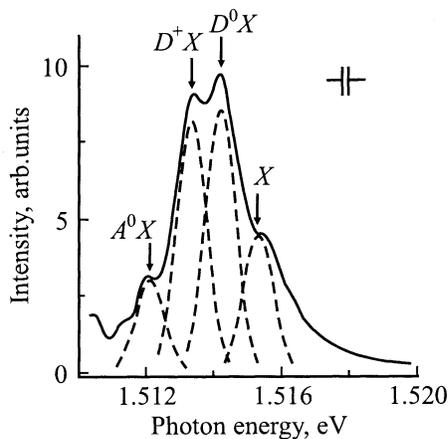


Рис. 1. Спектр люминесценции исходного полуизолирующего GaAs при температуре $T = 4.2\text{ K}$ и интенсивности возбуждения люминесценции $L = 10^{18}$ фотон/см 2 ·с.

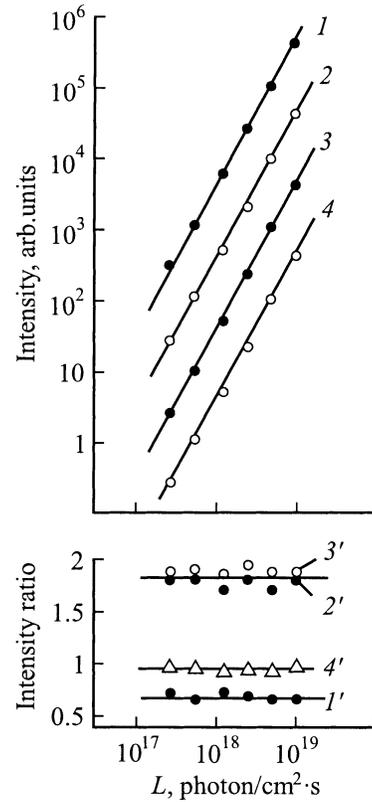


Рис. 2. Зависимости интенсивностей экситонных полос люминесценции I_{A^0X} (1), I_{D^+X} (2), I_{D^0X} (3) и I_X (4), а также их отношений I_{A^0X}/I_X (1'), I_{D^+X}/I_X (2'), I_{D^0X}/I_X (3') и I_{D^+X}/I_{D^0X} (4') от интенсивности возбуждения люминесценции L в исходном полуизолирующем GaAs при $T = 4.2\text{ K}$. Соотношения между величинами I_{A^0X} , I_{D^+X} , I_{D^0X} и I_X произвольные; истинные соотношения видны из рис. 1.

На рис. 2 приведены типичные зависимости интенсивностей I_{A^0X} , I_{D^+X} , I_{D^0X} и I_X (линии 1–4), а также их отношений (линий 1'–4') от интенсивности возбуждения. Интенсивности полос люминесценции возрастают с увеличением L сверхлинейно ($\propto L^2$), а их отношения не зависят от L . Аналогичная независимость отношений интенсивностей от L , как отмечалось выше, наблюдалась и в GaAs, прогретом различное время ($t = 30$ и 90 мин).

На рис. 3 приведены зависимости отношений интенсивностей I_{D^+X}/I_{D^0X} , а также I_{A^0X}/I_X , I_{D^+X}/I_X и I_{D^0X}/I_X от времени термообработки GaAs при температуре $T_a = 900^\circ\text{C}$. Вид этих зависимостей сохранился при изменении L . Как видно из рис. 3, отношение интенсивностей I_{D^+X}/I_{D^0X} не зависит от времени t , а отношения I_{A^0X}/I_X , I_{D^+X}/I_X и I_{D^0X}/I_X немонотонно изменяются с t .

Из наблюдаемых на опыте квадратичных зависимостей интенсивностей люминесценции I_{A^0X} , I_{D^+X} и I_{D^0X} от L , а также независимости отношений интенсивностей I_{A^0X}/I_X , I_{D^+X}/I_X , I_{D^0X}/I_X от L и I_{D^+X}/I_{D^0X} от L и t следует, что в исследуемом арсениде галлия $n_{A^0X} \ll N_A$ и $n_{D^+X} + n_{D^0X} \ll N_D$, а $\delta p/\delta n \neq f(L, F)$, т.е. выполняется соотношение φ_{A^0} , φ_{D^+} , $\varphi_{D^0} \neq f(L, F)$, необходимое

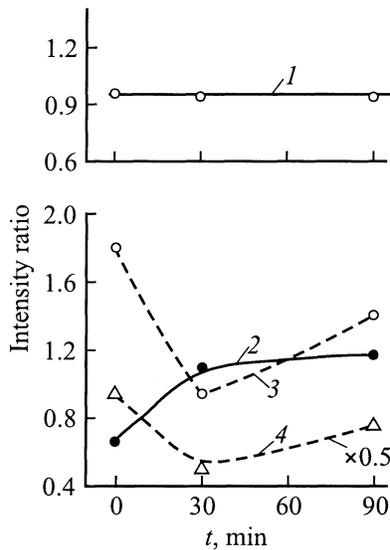


Рис. 3. Зависимости отношений интенсивностей полос люминесценции I_{D+X}/I_{D^0X} (1), I_{A^0X}/I_X (2), I_{D+X}/I_X (3) и I_{D^0X}/I_X (4) от времени термообработки t полуизолирующего GaAs при температуре $T_a = 900^\circ\text{C}$. Измерения проведены при $T = 4.2\text{K}$ и интенсивности возбуждения люминесценции $L = 10^{18}$ фотон/см²с.

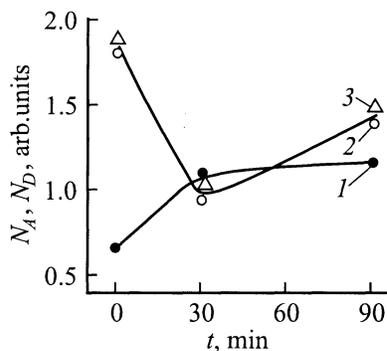


Рис. 4. Изменение концентрации мелких акцепторов N_A (1) и доноров N_D (2, 3) при вариации времени термообработки t полуизолирующего GaAs при $T_a = 900^\circ\text{C}$.

для корректного использования рассматриваемого метода определения вариаций N_A и N_D при термическом воздействии (см. п. 2.2).⁶ Найденные этим методом вариации N_A и N_D с изменением времени отжига t в термообработанных при $T_a = 900^\circ\text{C}$ полуизолирующем GaAs показаны на рис. 4. Концентрация мелких акцепторов N_A (1) получена из данных $I_{A^0X}/I_X = f(t)$ (см. рис. 3); концентрация доноров N_D (2, 3) — по зависимостям I_{D+X}/I_X , $I_{D^0X}/I_X = f(t)$.

⁶ Весьма вероятно, что независимость отношений интенсивностей I_{A^0X}/I_X и I_{D^0X}/I_X от L также связана с тем, что в исследуемом арсениде галлия выполняются соотношения $c_{pA}^- \delta p \gg c_{nA}^0 \delta n$ и $c_{pD}^+ \delta p \gg c_{nD}^0 \delta n$ (см. п. 2.2).

4. Заключение

Измерение при $T = 1.8-4.2\text{K}$ отношения интенсивностей полос люминесценции, обусловленных аннигиляцией связанных и свободных экситонов, широко используется для определения концентраций мелких акцепторов N_A и доноров N_D в полупроводниках, а также для определения индуцированных внешними воздействиями изменений в их содержании. Однако необходимо иметь в виду, что этот метод дает корректные величины N_A , N_D , N_A/N_D и их зависимостей от различных воздействий F лишь в предположении, что при используемых значениях L и F имеет место „предельное“ (не зависящее от L и F) заполнение акцепторов дырками, а доноров — дырками и электронами. Отмеченное имеет место при близких концентрациях избыточных дырок δp и электронов δn либо когда их отношение $\delta p/\delta n$ не зависит от L и F или при существенном отличии темпов захвата электронов и дырок рассматриваемыми дефектами. В противном случае использование рассматриваемого метода приведет к некорректным значениям N_A , N_D , N_A/N_D и их зависимостям от внешних воздействий.

Список литературы

- [1] В.И. Гавриленко, А.М. Грехов, Д.В. Корбутяк, В.Г. Литовченко. *Оптические свойства полупроводников* (Киев, Наук. думка, 1987).
- [2] T. Taguchi, J. Shiraruji, Y. Inuishi. *Phys. St. Sol. (b)*, **68**, 727 (1975).
- [3] T. Schmidt, K. Lischka, W. Zulehner. *Phys. Rev. B*, **45**, 8989 (1992).
- [4] M. Tajima. *Appl. Phys. Lett.*, **32**, 719 (1978).
- [5] H. Nakayama, T. Nishino, Y. Hamakawa. *Japan. J. Appl. Phys.*, **19**, 501 (1980).
- [6] А.С. Каминский, Л.И. Колесник, Б.М. Лейферов, Я.Е. Покровский. *ЖПС*, **36**, 745 (1982).
- [7] Б.М. Лейферов, А.Г. Либинсон. *Высокочистые вещества*, № 1, 147 (1987).
- [8] S. Ambros, W. Kamp, K. Wolter, M. Weyers, H. Heinecke, H. Kurz, P. Balk. *J. Appl. Phys.*, **64**, 5098 (1988).
- [9] H.F. Pen, F.A. Driessen, S.M. Olsthoorn, L.J. Giling. *Semicond. Sci. Technol.*, **7**, 1400 (1992).
- [10] К.Д. Глинчук, Н.М. Литовченко, О.Н. Стрильчук, А.В. Прохорович. *ФТП*, **34**, 530 (2000).
- [11] К.Д. Глинчук, Н.М. Литовченко, О.Н. Стрильчук, А.В. Прохорович. *ФТП*, **34**, 1311 (2000).
- [12] Z.H. Lu, M.C. Hanna, D.M. Szymd, E.G. Oh, A. Mejerfeld. *Appl. Phys. Lett.*, **56**, 177 (1990).
- [13] К.С. Журавлев, А.К. Калагин, Н.Т. Мешегов, А.И. Торопов, Т.С. Шамирзаев. *ФТП*, **30**, 1704 (1996).
- [14] С.М. Рывкин. *Фотоэлектрические явления в полупроводниках* (М., Физматгиз, 1963).
- [15] В.Е. Лашкарев, А.В. Любченко, М.К. Шейнкман. *Неравновесные процессы в фотопроводниках* (Киев, Наук. думка, 1981).

- [16] К.Д. Глинчук, Н.М. Литовченко, О.Н. Стрильчук, А.В. Прохорович. В сб.: *Оптоэлектроника и полупроводниковая техника* (Киев, Наук. думка, 2000) вып. 35, с. 176.
- [17] Ж. Панков. *Оптические процессы в полупроводниках* (М., Мир, 1973).
- [18] M.J. Parastamatiou, G.L. Parasioanna. *J. Appl. Phys.*, **68**, 1094 (1990).
- [19] И.А. Карпович, М.В. Степихова. *ФТП*, **30**, 1785 (1996).
- [20] V. Kazukauskas. *Appl. Phys. A*, **60**, 509 (1995).
- [21] Н.М. Литовченко, Л.Г. Шепель. В сб.: *Оптоэлектроника и полупроводниковая техника* (Киев, Наук. думка, 1995) вып. 29, с. 108.
- [22] К.Д. Глинчук, Н.М. Литовченко, О.Н. Стрильчук, А.В. Прохорович. *ФТП*, **35**, 537 (2001).

Редактор Т.А. Полянская

Peculiarities of the determination of shallow impurity concentrations in semiconductors from the analysis of exciton luminescence

K.D. Glinchuk, A.V. Prokhorovich

Institute of Semiconductor Physics,
National Academy of Sciences of Ukraine,
03028 Kiev, Ukraine

Abstract An analysis was made of the applicability limits of the method for the determination of the content of shallow acceptors and donors in semiconductors proceeding, from the ratio of the low-temperature ($T = 1.8\text{--}4.2\text{ K}$) luminescence intensities of exciton bands, in particular, induced by radiative annihilation of excitons bound to acceptors (donors) and free excitons. It is shown that correct data about the concentrations of shallow acceptors and donors as well as data on changes in their content as a result of various treatments may be obtained if the occupancy of the defects in question by holes and electrons does not depend on the excitation intensity or external treatments. A way to check the fulfillment of criteria for the method application is suggested. An example is given of the method application for determination of thermally stimulated changes in the concentration of shallow acceptors and donors in gallium arsenide.