

## НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНДУЦИРОВАННЫХ РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПАР $As_iZn_{Ga}$ В $p$ -GaAs(Zn)

© К.Д.Глинчук, В.И.Гурошев, А.В.Прохорович

Институт физики полупроводников Национальной академии наук Украины, 252028 Киев, Украина  
(Получена 5 апреля 1995 г. Принята к печати 3 июля 1995 г.)

Изучено влияние низкотемпературного ( $T = 77$  К) электронного облучения ( $\Phi = 1 \cdot 10^{16}$  электрон/см<sup>2</sup>) и последующих отжигов ( $T = 80$ – $300$  К) кристаллов  $p$ -GaAs(Zn) на образование и аннигиляцию пар  $As_iZn_{Ga}$ . Показано, что эффективная генерация пар  $As_iZn_{Ga}$  наблюдается в температурном интервале  $20$ – $225^\circ$ С. Анализ кинетики образования и аннигиляции пар  $As_iZn_{Ga}$  позволил определить коэффициент диффузии радиационно-стимулированных межузельных атомов мышьяка  $D$  [ $D \approx 10^{-17}$  см<sup>2</sup>/с при  $20^\circ$ С,  $D \sim \exp(-0.45/kT)$  при  $20$ – $100^\circ$ С], энергию активации процесса из диффузии  $\epsilon_m = 0.45$  эВ, энергию связи между компонентами пар  $As_iZn_{Ga}$   $\epsilon_b = 0.55$  эВ, а также энергию диссоциации последних  $\epsilon_d = 1.0$  эВ.

### 1. Введение

Известно, что в подвергнутых облучению быстрыми частицами (электронами, протонами, нейтронами) и последующему отжигу кристаллах  $p$ -GaAs(Zn) [далее радиационно-термическое воздействие (РТВ)] происходит эффективное взаимодействие созданных радиацией межузельных атомов мышьяка  $As_i$  и атомов цинка в галлиевой подрешетке арсенида галлия  $Zn_{Ga}$ , приводящее к появлению в них пар  $As_iZn_{Ga}$  [<sup>1–3</sup>].<sup>1</sup> Несомненно весьма важным является определение основных электрических характеристик указанных пар: температурной области их существования, подвижности «мышьяковой» составляющей пар (коэффициента диффузии межузельных атомов мышьяка  $D$  и энергии активации процесса их диффузии  $\epsilon_m$ ), энергии связи между компонентами пар  $\epsilon_b$ , энергии диссоциации пар  $\epsilon_d$ . Именно эти данные (они получены при изучении кинетики генерации и аннигиляции пар  $As_iZn_{Ga}$ , созданных РТВ) и будут впервые приведены в настоящей работе.

<sup>1</sup> Заметим, что созданные облучением межузельные атомы мышьяка эффективно взаимодействуют также и с иными атомами, в частности с атомами бора и мышьяка в галлиевой подрешетке арсенида галлия  $B_{Ga}$  и  $As_{Ga}$ , с атомами углерода в мышьяковой подрешетке арсенида галлия  $C_{As}$ , образуя с ними пары  $As_iB_{Ga}$ ,  $As_iAs_{Ga}$  и  $As_iC_{As}$  [<sup>4–6</sup>].

## 2. Методика эксперимента

Для исследований отбирались легированные атомами цинка кристаллы  $p$ -GaAs с концентрацией атомов цинка  $N_{Zn} \approx 1.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и равновесных дырок  $p_0 \approx 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  при 77 К. Для радиационного воздействия использовалось облучение быстрыми электронами (энергия электронов  $E = 2.2 \text{ МэВ}$ , поток  $\Phi = 1 \cdot 10^{16} \text{ электрон/см}^2$ , концентрация радиационно-стимулированных дефектов  $n_d \approx 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , из них межузельных атомов мышьяка  $n_d^* \approx 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ). Облучение мало изменяло величину  $p_0$  ( $n_d \ll N_{Zn}$ ). Для исключения нагрева кристаллов во время радиационного воздействия, которое могло бы существенно исказить температурную область генерации пар  $As_iZn_{Ga}$ , облучение  $p$ -GaAs(Zn) проводилось при 77 К. Последующий отжиг облученных кристаллов проводился при температурах  $T = 80\text{--}500 \text{ К}$  в течение  $t = 15 \text{ мин}$  (изохронный отжиг) и от 3 мин до 15 ч (изотермический отжиг).

Концентрация пар  $As_iZn_{Ga}$   $N$  ( $N = 0$  в необлученных кристаллах, очевидно,  $N \ll N_{Zn}$  и  $N \leq n_d^*$ , ибо  $n_d^* \ll N_{Zn}$ ) определялась из стимулированных РТВ изменений при 77 К в спектрах фотолюминесценции кристаллов  $p$ -GaAs(Zn), а именно путем сравнения изменений интенсивности индуцированной ими полосы излучения с положением максимума  $h\nu_m \approx 1.26 \text{ эВ}$  ( $I_{1.26}$ ) и интенсивности собственного излучения с положением максимума  $h\nu_m = 1.5 \text{ эВ}$  ( $I_{1.5}$ ). Очевидно, что  $N \sim I_{1.26}/I_{1.5}$  (см. рис. 1) [1-3]. Основные характеристики пар  $As_iZn_{Ga}$  (в частности, величины  $D$ ,  $\varepsilon_m$ ,  $\varepsilon_b$ ) находились из анализа кинетики генерации и аннигиляции обсуждаемых пар  $N(t)$  в кристаллах  $p$ -GaAs(Zn) при различных длительностях и температурах их отжига.

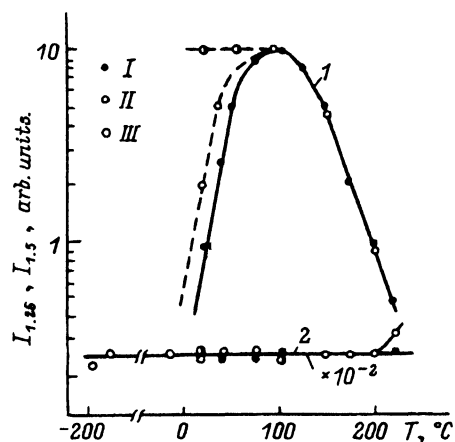


Рис. 1. Изменение интенсивностей люминесценции  $I_{1.26}$  (1) и  $I_{1.5}$  (2) при отжиге облученных быстрыми электронами ( $\Phi = 1 \cdot 10^{16} \text{ электрон/см}^2$ ) кристаллов  $p$ -GaAs(Zn). Длительность отжига, мин: I — 15, II — 30, III — 900

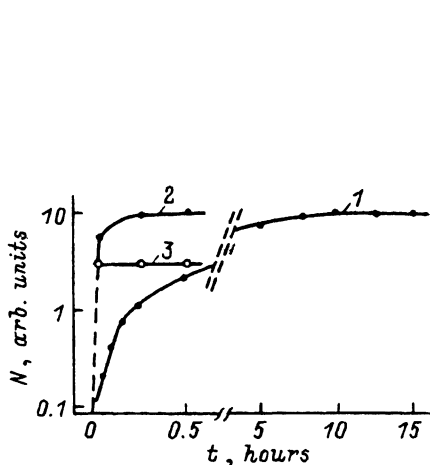


Рис. 2. Изменение концентрации пар  $As_iZn_{Ga}$  в облученных быстрыми электронами ( $\Phi = 1 \cdot 10^{16} \text{ электрон/см}^2$ ) кристаллах  $p$ -GaAs(Zn) с длительностью их отжига при  $T$ ,  $^{\circ}\text{C}$ : 1 — 20, 2 — 100, 3 — 150.

### 3. Результаты и их обсуждение

1. Основные соотношения. Рассмотрим  $p$ -GaAs, содержащий хаотически распределенные изолированные (не связанные в пары  $\text{As}_i\text{Zn}_{\text{Ga}}$ ) межузельные атомы мышьяка (их концентрация  $n_d^* - N$ ) и цинка (их концентрация  $N_{\text{Zn}} - N$ ). Соотношение между их концентрациями  $(n_d^* - N)/(N_{\text{Zn}} - N) \ll 1$ . Тогда образование пар  $\text{As}_i\text{Zn}_{\text{Ga}}$  в нем (очевидно,  $N \leq n_d^* \ll N_{\text{Zn}}$ ) происходит путем перемещения подвижного положительно заряженного иона  $\text{As}_i^+$  к ближайшему неподвижному отрицательно заряженному иону  $\text{Zn}_{\text{Ga}}^-$  ( $\alpha$  — вероятность генерации пар  $\text{As}_i\text{Zn}_{\text{Ga}}$ , время генерации пар  $\tau = 1/d$ ; очевидно, что  $\alpha$  не зависит от  $N$ ). Диссоциация пар  $\text{As}_i\text{Zn}_{\text{Ga}}$  происходит путем их термического распада на изолированные компоненты  $\text{As}_i$  и  $\text{Zn}_{\text{Ga}}$  ( $\beta$  — вероятность диссоциации пар  $\text{As}_i\text{Zn}_{\text{Ga}}$ , время жизни пар  $\tau^* = 1/\beta$ ; очевидно, что  $\beta$  не зависит от  $N$ ).

Несомненно, протекание и детали процессов спаривания ионов  $\text{As}_i^+$  и  $\text{Zn}_{\text{Ga}}^-$  и разрушения пар  $\text{As}_i^+\text{Zn}_{\text{Ga}}^-$  во многом аналогичны изученным ранее при образовании и диссоциации иных ионных пар и кластеров атомов в полупроводниках (см., например, [7-10]). При записи уравнений для описания кинетики генерации и аннигиляции стимулированных РТВ пар  $\text{As}_i\text{Zn}_{\text{Ga}}$  необходимо учесть следующее.

В температурной области существования рассматриваемых пар ( $T = 20-225^\circ\text{C}$ , см. далее) не наблюдается заметного уменьшения концентрации созданных облучением вакансий мышьяка  $V_{\text{As}}$ , т.е. в ней процессы прямой аннигиляции созданных облучением межузельных атомов мышьяка  $\text{As}_i$  и вакансий мышьяка  $V_{\text{As}}$  (соответствующая вероятность  $\gamma$ ) не играют существенной роли ( $\gamma \ll \alpha$ ) [4,11,12]. Это в условиях наших опытов подтверждается следующим. Известно, что основными радиационными дефектами в облученном электронами арсениде галлия являются  $V_{\text{As}}$  и  $\text{As}_i$  [11,12]. Из них вакансии мышьяка  $V_{\text{As}}$  (их концентрация  $[V_{\text{As}}]$ ) являются доминирующими центрами, снижающими интенсивность собственного излучения  $I_{1.5}$  в облученных быстрыми электронами кристаллах  $p$ -GaAs(Zn), т.е.  $I_{1.5} \sim 1/[V_{\text{As}}]$  (см., например, [1-3]). Поэтому наблюдаемые нами весьма слабые изменения интенсивности  $I_{1.5}$  при вариации температуры отжига кристаллов  $p$ -GaAs(Zn) также свидетельствуют о небольших изменениях в них концентрации созданных облучением вакансий мышьяка при используемых режимах прогрева (см. рис. 1).

Следовательно, в интересующем нас интервале температур существования пар  $\text{As}_i\text{Zn}_{\text{Ga}}$  основным стоком для созданных облучением межузельных атомов мышьяка  $\text{As}_i$  будут являться атомы цинка  $\text{Zn}_{\text{Ga}}$ , т.е. изменение концентрации межузельных атомов мышьяка происходит лишь вследствие из взаимодействия с атомами цинка ( $\alpha \gg \gamma$ ). В частности, образовавшиеся в результате термического разрушения пар  $\text{As}_i\text{Zn}_{\text{Ga}}$  межузельные атомы мышьяка будут затем вновь образовывались пары с атомами цинка, т.е. возможен многократный захват межузельных атомов мышьяка  $\text{As}_i$  атомами цинка  $\text{Zn}_{\text{Ga}}$  (можно пренебречь процессами прямой аннигиляции  $\text{As}_i$  и  $V_{\text{As}}$ ).<sup>2</sup> В этом случае из-

<sup>2</sup> Несомненно, вследствие отличия от нуля вероятности прямой аннигиляции межузельных атомов мышьяка и вакансий мышьяка ( $\gamma > 0$ ) при достаточно боль-

менение концентрации стимулированных РТВ пар  $\text{As}_i\text{Zn}_{\text{Ga}}$   $N$  со временем отжига  $t$  ( $t \ll t^*$ ) определяется разностью скоростей их генерации  $\alpha(n_d^* - N)$  и аннигиляции  $\beta N$  и задается следующим соотношением:

$$\frac{dN}{dt} = \alpha(n_d^* - N) - \beta N. \quad (1)$$

Тогда, как следует из соотношения (1), в рассматриваемом случае [ $N_{\text{Zn}} \gg n_d^* \geq N$  и  $\alpha, \beta$  не зависят от  $N$ , очевидно,  $N = 0$  при  $t = 0$ ] возрастание концентрации стимулированных РТВ пар  $\text{As}_i\text{Zn}_{\text{Ga}}$  со временем отжига  $t$  ( $t \ll t^*$ ) определяется соотношением

$$N(t) = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} n_d^* \{1 - \exp[-(\alpha + \beta)t]\}, \quad (2)$$

а квазиравновесная [достигаемая при  $1/(\alpha + \beta) \ll t \ll t^*$ ] концентрация стимулированных РТВ пар  $\text{As}_i\text{Zn}_{\text{Ga}}$   $N^*$  равна

$$N^* = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} n_d^*. \quad (3)$$

**2. Результаты.** На рис. 2 показаны зависимости концентрации пар  $\text{As}_i\text{Zn}_{\text{Ga}}$  в облученных быстрыми электронами кристаллах  $p\text{-GaAs}(\text{Zn})$  от времени их отжига при различных температурах. Из детального анализа приведенных данных с помощью соотношений (2), (3) вытекает следующее.

При низких температурах отжига ( $T = 20\text{--}100^\circ\text{C}$ ) наблюдаемые изменения  $N$  с  $t$  полностью связаны с процессами генерации пар  $\text{As}_i\text{Zn}_{\text{Ga}}$  (вероятность генерации пар  $\text{As}_i\text{Zn}_{\text{Ga}}$   $\alpha$  существенно выше вероятности их аннигиляции  $\beta$ ) и могут быть удовлетворительно описаны следующим соотношением:

$$N(t) = n_d^*[1 - \exp(-t/\tau)]. \quad (4)$$

Поэтому при  $t \ll \tau$  наблюдается линейное возрастание  $N$  с ростом  $t$  [ $N \simeq (t/\tau)n_d^*$ ], связанное с тем, что при рассматриваемых временах прогрева кристаллов  $p\text{-GaAs}(\text{Zn})$  лишь небольшое число межузельных атомов мышьяка ( $\ll n_d^*$ ) образуют пары с атомами цинка ( $N \ll n_d^*$ ). При умеренных  $t \simeq \tau$  замедление скорости генерации пар  $\text{As}_i\text{Zn}_{\text{Ga}}$  при возрастании времени отжига связано с заметным понижением концентрации изолированных межузельных атомов мышьяка  $n_d^* - N$  вследствие их существенного оттока к атомам цинка. При  $t \gg \tau$  величина  $N$  стремится к насыщению ( $N \simeq n_d^*$ ), связанному с тем, что большинство межузельных атомов мышьяка образует пары с атомами цинка. Вычисленные из соотношения (4) времена генерации пар  $\text{As}_i\text{Zn}_{\text{Ga}}$   $\tau$  оказались равными 150 мин при  $20^\circ\text{C}$  и 4 мин при  $100^\circ\text{C}$ , т. е. существенно понижались при возрастании температуры отжига.

При временах отжига  $t \simeq t^*$  [очевидно,  $t^* \simeq (\alpha/\gamma)(1/\beta) = (\alpha/\gamma)\tau^*$ ] образующиеся вследствие распада пар  $\text{As}_i\text{Zn}_{\text{Ga}}$  изолированные атомы  $\text{As}_i$  в основном прорекомбинируют с вакансиями  $V_{\text{As}}$  (поэтому  $N \simeq 0$  при  $t \geq t^*$ ). Следовательно, если процессы термической диссоциации пар  $\text{As}_i\text{Zn}_{\text{Ga}}$  играют определенную роль, то отмеченное пренебрежение актами прямой рекомбинации созданных облучением дефектов  $\text{As}_i$  и  $V_{\text{As}}$  справедливо лишь при умеренных (в частности, используемых в настоящей работе) длительностях отжига кристаллов  $t \ll t^*$ .

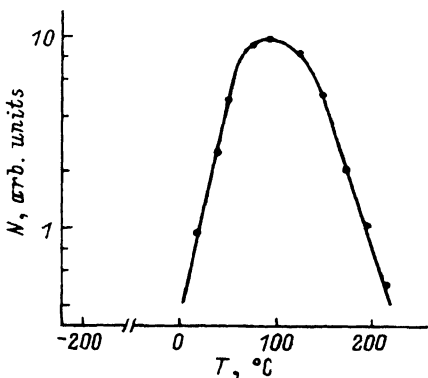


Рис. 3. Изменение концентрации пар  $As_iZn_{Ga}$  при изохронном ( $t = 15$  мин) отжиге облученных быстрыми электронами ( $\Phi = 1 \cdot 10^{16}$  электрон/см<sup>2</sup>) кристаллов  $p$ -GaAs(Zn).

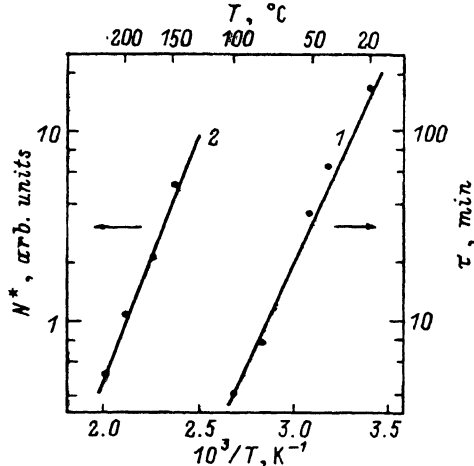


Рис. 4. Зависимости времени генерации пар  $As_iZn_{Ga}$   $\tau$  (1) и их концентрации  $N^*$  (2) от температуры отжига в облученных быстрыми электронами ( $\Phi = 1 \cdot 10^{16}$  электрон/см<sup>2</sup>) кристаллах  $p$ -GaAs(Zn).

При высоких температурах отжига ( $T \geq 125^\circ\text{C}$ ) в наблюдаемом изменении  $N$  с  $t$  важную роль начинают играть и процессы термического распада пар  $As_iZn_{Ga}$  на индивидуальные компоненты  $As_i$  и  $Zn_{Ga}$  (вероятность генерации пар  $As_iZn_{Ga}$   $\alpha$  становится ниже вероятности их аннигиляции  $\beta$ ). Поэтому в этом случае детальный вид зависимостей  $N(t)$  будет определяться временем жизни пар  $As_iZn_{Ga}$   $\tau^*$  ( $\tau^* < 1$  мин при  $T \geq 125^\circ\text{C}$ ), а достигаемая при  $t \gg \tau^*$  квазистационарная концентрация пар  $N = N^* \simeq (\alpha/\beta)n_d^*$  существенно ниже  $n_d^*$  и зависит от соотношения  $\alpha/\beta$ .

На рис. 3, 4 показано влияние изохронного отжига ( $t = 15$  мин) при различных температурах на концентрацию пар  $As_iZn_{Ga}$  в облученных быстрыми электронами кристаллах  $p$ -GaAs(Zn). Из детального анализа температурной области существования пар  $As_iZn_{Ga}$  ( $20$ – $225^\circ\text{C}$ ) видно следующее [см. соотношения (2), (3)].<sup>3</sup>

При низких температурах ( $T = 20$ – $100^\circ\text{C}$ ) концентрация пар  $As_iZn_{Ga}$  существенно [по экспоненциальному закону  $N(T) \sim \exp(-0.45/kT)$ , здесь и далее энергии активации в экспоненциальном множителе приведены в эВ] увеличивается при возрастании температуры отжига. В этой области температур, как отмечалось выше, преобладают процессы генерации пар  $As_iZn_{Ga}$ , а  $N \simeq (t/\tau)n_d^*$ . При высоких температурах ( $T = 125$ – $225^\circ\text{C}$ ) концентрация пар  $As_iZn_{Ga}$  существенно [по экспоненциальному закону  $N(T) \sim \exp(0.55/kT)$ ] понижается при возрастании

<sup>3</sup> В отличие от приведенных в [1–3] данных температурная область эффективной генерации пар  $As_iZn_{Ga}$  сдвинута в область более высоких температур. Это связано с неизбежным нагревом кристаллов  $p$ -GaAs(Zn), если их облучение проводится при комнатной температуре [1–3]. Весьма вероятно, что аналогичный эффект имеет место и для пар  $As_iB_{Ga}$  и  $As_iC_{As}$ , значительная генерация которых наблюдалась при «высокотемпературном» ( $T = 20$ – $40^\circ\text{C}$ ) облучении [5, 6].

температуры отжига. В этой области температур, как отмечалось выше,  $N = N^* \simeq (\alpha/\beta)n_d^*$ , поэтому существенную роль в определении величины  $N$  играют и процессы аннигиляции пар  $As_iZn_{Ga}$ .

3. *Обсуждение.* Проанализируем полученные результаты.

Очевидно, в изучаемых кристаллах образование пар  $As_i^+Zn_{Ga}^-$  происходит путем диффузионно-дрейфового перемещения положительно заряженных ионов  $As_i^+$  к отрицательно заряженным ионам  $Zn_{Ga}^-$  (создаваемый последними потенциал  $V = -e/\epsilon r$ , где  $e$  — заряд электрона,  $\epsilon$  — диэлектрическая постоянная кристалла, а  $r$  — расстояние между ионами  $As_i^+$  и  $Zn_{Ga}^-$ ). Действительно, в изучаемых сильно легированных кристаллах  $p$ -GaAs(Zn) среднее расстояние между атомами цинка  $l = 0.7/\sqrt[3]{N_{Zn}} \simeq 60 \text{ \AA}$ , а первоначальное (после облучения) расстояние между атомами цинка и мышьяка  $l' \leq l/2 \simeq 30 \text{ \AA}$ . При столь малых  $l'$  (очевидно,  $r < l'$ ) несомненно помимо диффузионного переноса весьма существен и дрейфовый перенос (в поле  $E = -e/\epsilon r^2$ ) ионов  $As_i^+$  к ионам  $Zn_{Ga}^-$  (энергия их кулоновского взаимодействия  $\epsilon_c = e^2/\epsilon r$  порядка и больше энергии теплового движения  $kT$ ). В этом случае каждый из ионов  $As_i^+$  перемещается в своей собственной сфере к ближайшему иону  $Zn_{Ga}^-$ , а время генерации пар  $As_iZn_{Ga}$  задается выражением [7]

$$\tau = \frac{\epsilon kT}{4\pi e^2 D N_{Zn}}. \quad (5)$$

Тогда определенный из величины  $\tau$  коэффициент диффузии межузельных атомов мышьяка  $D$  [очевидно,  $D = D_0 \exp(-\epsilon_m/kT)$ , т. е.  $\tau \sim T \exp(\epsilon_m/kT)$ ] оказался равен  $1 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2/\text{с}$  при  $20^\circ\text{C}$  и  $5 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2/\text{с}$  при  $100^\circ\text{C}$ , а найденные из приведенной на рис. 4 зависимости  $\tau = \varphi(1/T)$  [ $\tau \sim T \exp(0.45/kT)$ ] частотный фактор  $D_0 = 6 \cdot 10^{-10} \text{ см}^2/\text{с}$ , а энергия миграции межузельных атомов мышьяка  $\epsilon_m = 0.45 \text{ эВ}$ .<sup>4</sup>

Несомненно, разрушение пар  $As_iZn_{Ga}$  происходит путем их термической диссоциации на изолированные компоненты  $As_i$  и  $Zn_{Ga}$  ввиду относительно низкой энергии связи между последними  $\epsilon_b$  и достаточно высокой подвижности межузельных атомов мышьяка, позволяющей им эффективно мигрировать от удерживавших их атомов цинка [энергия диссоциации пар  $\epsilon_d = \epsilon_m + \epsilon_b$ ], вероятность соответствующего процесса  $\beta \sim \exp(-\epsilon_d/kT)$ ; очевидно,  $\beta/\alpha \sim \exp(-\epsilon_b/kT)$  [9,10]. Тогда величина  $\epsilon_b$  может быть найдена из анализа зависимости  $N^* = \varphi(1/T)$  в области аннигиляции пар  $As_iZn_{Ga}$  (см. рис. 3), в которой, как следует из соотношения (3),  $N^* \simeq (\alpha/\beta)n_d^* \sim n_d^* \exp(\epsilon_b/kT)$ . Как оказалось, в этой области температур (см. рис. 4)  $N^* \sim \exp(0.55/kT)$ , т. е. энергия связи между компонентами пар  $As_iZn_{Ga}$  действительно невелика  $\epsilon_b = 0.55 \text{ эВ}$ . Если считать, что найденная величина  $\epsilon_b$  полностью определяется кулоновской энергией связи ( $\epsilon_b \simeq -\epsilon_c = e^2/\epsilon r_p$ ), то расстояние между

<sup>4</sup> Величины  $\tau$  при  $T = 200$  и  $100^\circ\text{C}$  непосредственно находились из анализа кинетики генерации пар  $As_iZn_{Ga}$   $N(t)$  при соответствующих температурах (см. рис. 2), а при промежуточных  $T$  — из анализа зависимости  $N \simeq \varphi(T)$  в области генерации пар  $As_iZn_{Ga}$  (см. рис. 3).

компонентами пары  $As_iZn_{Ga}$   $r_p = 2 \text{ \AA}$ . Эта величина  $r_p$  весьма близка к типичному радиусу пар  $As_i$ -примесь [13,14].

Как следует из полученных значений величин  $\epsilon_m$  и  $\epsilon_b$ , энергия диссоциации пар  $As_iZn_{Ga}$  также относительно невелика  $\epsilon_d = 1.0 \text{ эВ}$ .

#### 4. Заключение

Приведенные данные о процессах генерации и аннигиляции пар  $As_iZn_{Ga}$  и их характеристиках важны для понимания широко изучаемых радиационно-стимулированных процессов дефектообразования в интерметаллических и других полупроводниках, в частности их стабильности и подвижности (см., например, обзоры [11,15-18]). Повидимому, установленные закономерности характерны также и для иных ионных пар, содержащих в качестве компоненты межузельные атомы мышьяка, в частности для пар  $As_iB_{Ga}$ ,  $As_iAs_{Ga}$  и  $As_iC_{As}$  [4-6]. Кроме того, они могут быть весьма полезными для теоретического описания структуры и стабильности (в различных зарядовых конфигурациях) разнообразных пар  $As_i$ -примесь (дефект) [13,14].

#### Список литературы

- [1] K.D. Glinchuk, V.I. Guroshev, A.V. Prokhorovich. Cryst. Res. Technol., **21**, 811 (1986).
- [2] К.Д. Глинчук, В.И. Гуросhev, А.В. Прохорович. ФТП, **23**, 657 (1989).
- [3] К.Д. Глинчук, В.И. Гуросhev, А.В. Прохорович. ФТП, **25**, 82 (1991).
- [4] D. Stievenard, J.C. Bourgoin. J. Appl. Phys., **59**, 743 (1986).
- [5] L. Murray, R.C. Newman, J. Woodhead. Semicond. Sci. Technol., **2**, 399 (1987).
- [6] J.D. Collins, G.A. Gledhill, R. Murray, R.C. Newman. Phys. St. Sol. B, **151**, 469 (1989).
- [7] Ф. Крегер. Химия несовершенных кристаллов (М., 1969).
- [8] Н.Б. Херней. Химия твердого тела (М., 1970).
- [9] A. Ourmazd, W. Schröter. J. Appl. Phys., **56**, 1670 (1984).
- [10] T. Zundel, J. Weber. Phys. Rev. B, **39**, 549 (1989).
- [11] D. Pons, J.C. Bourgoin. J. Phys. C: Sol. St. Phys., **18**, 3839 (1985).
- [12] D. Stievenard, X. Boddaert, J.C. Bourgoin, H.J. von Bardeleben. Phys. Rev. B, **41**, 5271 (1990).
- [13] R. Jonest, S. Öberg. Semicond. Sci. Technol., **7**, 429 (1992).
- [14] R. Jonest, S. Öberg. Semicond. Sci. Technol., **7**, 855 (1992).
- [15] В.В. Емцев, Т.В. Машовец. Примеси и точечные дефекты в полупроводниках (М., 1981).
- [16] К.Д. Глинчук, К. Лукат, А.В. Прохорович. Оптоэлектроника и полупроводниковая техника, **1**, 39 (1982).
- [17] G. Dlubek, R. Krause. Phys. St. Sol. A, **102** 443 (1987).
- [18] J.C. Bourgoin, H.J. von Bardeleben, D. Stievenard. Phys. St. Sol. A, **102**, 499 (1987).

Редактор В.В. Чалдышев

**Some characteristics of  $As_iZn_{Ga}$  pairs induced by irradiation plus annealing in  $p$ -type GaAs(Zn) crystals.**

*K.D. Glinchuk, V.I. Guroshev, A.V. Prokhorovich*

Institute of Semiconductor Physics, Ukrainian Academy of Sciences,  
252028 Kiev, the Ukraine