

КИНЕТИКА ОБРАЗОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ИНДУЦИРОВАННЫХ РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПАР $V_{As}Zn_{Ga}$ В p -GaAs(Zn)

© К.Д.Глинчук, А.В.Прохорович

Институт физики полупроводников Национальной академии наук Украины,
252028 Киев, Украина

(Получена 23 октября 1995 г. Принята к печати 16 января 1996 г.)

Изучено влияние электронного облучения (с дозой $\Phi = 10^{16}$ см⁻²) и последующих отжигов (при температуре $T = 150 \div 350^\circ$ С, в течение времени $t = 10 \div 600$ мин) кристаллов p -GaAs(Zn) на образование и диссоциацию пар $V_{As}Zn_{Ga}$. Анализ кинетики образования и диссоциации пар $V_{As}Zn_{Ga}$ позволил определить коэффициент диффузии радиационно-стимулированных вакансий мышьяка D ($D = 1.5 \cdot 10^{-18}$, $1 \cdot 10^{-17}$ и $5 \cdot 10^{-17}$ см²/с при 150, 175 и 200° С соответственно), энергию активации процесса их диффузии ϵ_m ($\epsilon_m = 1.1$ эВ), а также энергию диссоциации последних ϵ_d ($\epsilon_d = 1.6$ эВ).

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 вакансий мышьяка V_{As} с атомами цинка в галлиевой подрешетке арсенида галлия Zn_{Ga} , приводящее к появлению в них близких (сформированных ближайшими соседями) пар As_iZn_{Ga} (их радиус $r_p = 2 \text{ \AA}$) [1-3]. Несомненно, весьма важным является изучение кинетики образования и разрушения стимулированных РТВ указанных пар, что позволяет определить их основные электрические характеристики (подвижности межузельной и вакансионной составляющих пар, коэффициентов диффузии межузельных атомов мышьяка и вакансий мышьяка D и энергии активации процесса их диффузии ϵ_m , энергии связи между компонентами пар ϵ_b , энергии диссоциации пар $\epsilon_d = \epsilon_m + \epsilon_b$, т.е. энергию, необходимую для отрыва As_i либо V_{As} от атомов Zn_{As}). Ранее эти данные были приведены для стимулированных РТВ пар As_iZn_{As} (т.е. для созданных облучением

между этими атомами мышьяка As_i) [4]. В настоящей работе аналогичные данные будут приведены для стимулированных РТВ пар $V_{As}Zn_{Ga}$ (т.е. для созданных облучением вакансий мышьяка V_{As}).

Статья построена следующим образом. Сначала представлены основные детали методики исследований. Затем относительно кратко рассматриваются некоторые (существенно отличающиеся от соответствующих для стимулированных РТВ пар As_iZn_{Ga}) теоретические аспекты образования и разрушения стимулированных РТВ пар $V_{As}Zn_{Ga}$ и приведены экспериментальные данные о процессах их генерации и аннигиляции. Из анализа последних определены основные электрические характеристики рассматриваемых пар D , ϵ_m , ϵ_b и ϵ_d . В заключение подчеркивается значение полученных результатов для физики радиационных процессов и образования ионных пар в полупроводниках.

1. Методика эксперимента

Для исследований отбирались легированные атомами цинка кристаллы p -GaAs (концентрация атомов цинка в них $N_{Zn} \simeq 1.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, а равновесных дырок — $p_0 \simeq 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при 77 К и $p_0 \simeq 1.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при 20–400° С). Для радиационного воздействия использовалось облучение быстрыми электронами при 20° С (их энергия $E = 2.2 \text{ МэВ}$, поток $\Phi = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, концентрация радиационно-стимулированных дефектов $n_v \simeq 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, из них вакансий мышьяка $n_v^* \simeq 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$). Облучение мало изменяло величину p_0 ($n_v \ll N_{Zn}$). Последующий отжиг облученных кристаллов проводился при температурах $T = 150\text{--}350^\circ \text{ С}$ в течение времени t от 10 мин до 10 ч.

Концентрация пар $V_{As}Zn_{Ga}$ с точностью $\pm 10\%$ ($N = 0$ в необлученных кристаллах, очевидно, $N \ll N_{Zn}$ и $N \leq n_v^*$, ибо $n_v^* \ll N_{Zn}$) определялась из стимулированных РТВ изменений при 77 К в спектрах фотолюминесценции кристаллов p -GaAs(Zn), а именно — из отношения интенсивности индуцированной ими полосы с положением максимума $h\nu_m \simeq 1.38 \text{ эВ}$ и интенсивности собственного излучения с положением максимума $h\nu_m \simeq 1.5 \text{ эВ}$, $N \sim I_{1.38}/I_{1.5} [1^{-3}]$. Основные характеристики пар $V_{As}Zn_{Ga}$ (величины D с точностью $\pm 20\%$, ϵ_m , ϵ_b , ϵ_d с точностью $\pm 10\%$) находились из анализа закономерностей генерации и диссоциации изучаемых пар при различных длительностях и температурах отжига облученных быстрыми электронами кристаллов p -GaAs(Zn).

2. Результаты и их обсуждение

1. *Основные соотношения.* Рассмотрим p -GaAs, содержащий хаотически распределенные изолированные (не связанные в пары $V_{As}Zn_{Ga}$) вакансии мышьяка (их концентрация n_v^*) и цинка (их концентрация $N_{Zn} - N$). Соотношение между концентрациями $n_v^*/(N_{Zn} - N) \ll 1$. Образование пар $V_{As}Zn_{Ga}$ происходит путем перемещения подвижного положительно заряженного иона V_{As}^+ к ближайшему неподвижному отрицательно заряженному иону Zn_{Ga}^- . Вероятность генерации пар $V_{As}Zn_{Ga}$ обозначим α , время генерации пар $\tau = 1/\alpha$, очевидно, что α не

зависит от N . Диссоциация пар $V_{As}Zn_{Ga}$ происходит путем их термического разрушения на изолированные компоненты V_{As} и Zn_{Ga} . Вероятность диссоциации пар $V_{As}Zn_{Ga}$ обозначим β , время жизни пар $\tau^* \equiv 1/\beta$, очевидно, что β не зависит от N . В этом случае изменение концентрации стимулированных РТВ пар $V_{As}Zn_{Ga}$ при вариации длительности отжига кристаллов p -GaAs(Zn) t определяется разностью скоростей их генерации αn_v^* и диссоциации βN и задается следующим соотношением:

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

где n_v^* , N и α , β зависят от температуры отжига.

При определении величины N из соотношения (1) необходимо учесть следующее.

При низких температурах отжига ($T \leq T^* = 225^\circ \text{C}$, см. далее) вероятность генерации пар $V_{As}Zn_{Ga}$ существенно превышает вероятность их диссоциации. В этом диапазоне температур процессов прямой аннигиляции радиационно-стимулированных вакансий мышьяка V_{As} и межузельных атомов мышьяка As_i (соответствующая вероятность γ) не играют существенной роли ($\gamma \ll \alpha$) [5,6]. Также несущественны процессы прилипания вакансий мышьяка (с вероятностью δ) на различных (помимо атомов цинка) дефектах ($\delta \ll \alpha$ при $T < T^*$ [5,6]. Из отмеченного следует, что в интересующем нас интервале температур отжига основным стоком для радиационно-стимулированных вакансий мышьяка V_{As} будут являться атомы цинка Zn_{Ga} (тогда, очевидно, $n_v^* = n_v^* - N$). Это подтверждается детальным анализом экспериментальных зависимостей N от N_{Zn} , T , t , а также оценкой соотношения между величинами N и n_v^* ($N_{\max} \simeq n_v^*$)¹ Следовательно, в рассмотренном случае низких температур отжига возрастание концентрации стимулированных РТВ пар $V_{As}Zn_{Ga}$ со временем отжига и температурой прогрева полностью связано с процессами их генерации. Тогда, как следует из соотношения (1), изменение N с t ($t \ll t^*$) при некоторой постоянной температуре отжига $T_c \leq T^*$ определяется выражением

$$N(t, T_c) = n_v^* \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{t}{\tau(T_c)} \right] \right\}, \quad (2)$$

т.е. N сначала линейно увеличивается при малых $t \ll \tau$ ($N(t) \simeq (t\tau)n_v^* \ll n_v^*$), а затем при больших t ($\tau \ll t \ll t^*$) достигает максимального (квазистационарного) значения $N_{\max} \simeq n_v^*$.

При вариации температуры отжига T ($T \leq T^*$) и некоторой постоянной длительности прогрева t_c изменения N , как следует из соотношения (1), определяются выражением

$$N(T, t_c) = n_v^* \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{t_c}{\tau(T)} \right] \right\}, \quad (3)$$

¹ Очевидно, отмеченное пренебрежение процессами захвата радиационно-стимулированных вакансий мышьяка межузельными атомами мышьяка (для них $\gamma \ll \alpha$) и иными (помимо атомов цинка) дефектами (для них $\delta \ll \alpha$) справедливо лишь при умеренных (в частности, используемых в настоящей работе) длительностях отжига кристаллов $t \ll t^* \simeq [\alpha/(\gamma + \delta)](1/\beta) = [\alpha/(\gamma + \delta)]\tau^*$ [4].

т.е. $N(T) \sim 1/\tau(T)$, если t_c удовлетворяет соотношению $t_c \ll \tau$, и $N(T)$ достигает максимального значения $N = N_{\max} \simeq n_v^*$ при температуре прогрева T^* , для которой выполняется соотношение $\tau(T^*) \simeq t_c/2$.

При высоких температурах отжига ($T > T^* \simeq 225^\circ \text{C}$, см. далее) вероятность диссоциации пар $V_{\text{As}}\text{Zn}_{\text{Ga}}$ существенно превышает вероятность их генерации. В этом диапазоне температур процессы прямой аннигиляции радиационно-стимулированных вакансий мышьяка и межузельных атомов мышьяка также не играют существенной роли ($\gamma \ll \alpha$) [5,6]. Однако значительное число вакансий мышьяка V_{As} (как и межузельных атомов мышьяка As [5]) прилипают на различных (помимо атомов цинка) дефектах D ($\delta \geq \alpha$ при $T > T^*$), т.е. происходят эффективные процессы захвата вакансий мышьяка различными стоками и весьма слабые процессы их теплового освобождения из них. Это подтверждается наблюдаемым на опыте соотношением между величинами n_v^* и n_v^* ($n_v^* \ll n_v^*$ при $N \ll n_v^*$, см. далее). Тогда атомы цинка больше не являются доминирующим стоком для них и, следовательно, $n_v^* \neq n_v^* - N$ ($n_v^* - N$). Вследствие увеличения при возрастании температуры отжига числа эффективных стоков для стимулированных облучением вакансий мышьяка наблюдается существенное уменьшение их квазистационарной концентрации $n_v^{**'}$, достигаемой уже при минимальных используемых длительностях прогрева $t_{\min} = 10$ мин (см. рис. 1). На опыте $n_v^* \gg n_v^{**'} \sim \exp(0.4/kT)$ при $T > 225^\circ \text{C}$, т.е. характеристическая (измеряемая с точностью $\pm 10\%$) энергия соответствующего процесса $\varepsilon_v = 0.4$ эВ (здесь и далее энергия активации в экспоненциальном множителе приведены в эВ, k — постоянная Больцмана).² В этом случае при умеренных временах прогрева ($t_{\min} \leq t \ll t^*$, т.е. $n_v^* \simeq n_v^{**'}$) величина N достигает квазистационарного значения N^* , которое, как следует из соотношения (1), равно

$$N^*(T) = \frac{\alpha(T)}{\beta(T)} n_v^{**'}(T), \quad (4)$$

т.е. квазистационарная концентрация пар $V_{\text{As}}\text{Zn}_{\text{Ga}}$ N^* зависит от соотношения α/β (при рассматриваемых высоких температурах $\alpha/\beta \ll 1$) и существенно ниже $n_v^{**'}$ и, следовательно, намного меньше n_v^* .

2. Результаты. На рис. 2 показаны зависимости концентрации пар $V_{\text{As}}\text{Zn}_{\text{Ga}}$ в облученных быстрыми электронами кристаллах $p\text{-GaAs}(\text{Zn})$ от времени их отжига при различных температурах. Из детального анализа приведенных кривых изотермического отжига кристаллов $p\text{-GaAs}(\text{Zn})$ [см. соотношения (2) и (4)] вытекает следующее.

² Как следует из детального изучения природы радиационных дефектов в облученном быстрыми электронами арсениде галлия, доминирующими рекомбинационно-активными дефектами в нем являются вакансии мышьяка [6]. Поэтому об изменении величины n_v^* в процессе отжига облученных электронами кристаллов $p\text{-GaAs}(\text{Zn})$ мы судили по соответствующим изменениям интенсивности собственного излучения $I_{1.5}$, определяемой концентрацией центров тушения люминесценции, т.е. концентрацией вакансий мышьяка n_v^* (очевидно, $I_{1.5} \sim 1/n_v^*$) [1].

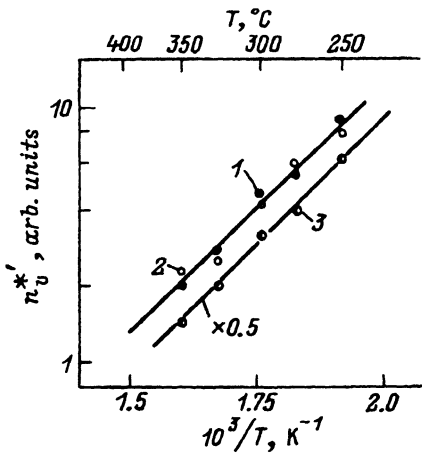


Рис. 1. Зависимость концентрации изолированных вакансий мышьяка n_v^* от температуры отжига при длительности прогрева $t = 10$ (1), 30 (2) 180 мин (3) в облученных быстрыми электронами ($\Phi = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$) кристаллах $p\text{-GaAs(Zn)}$.

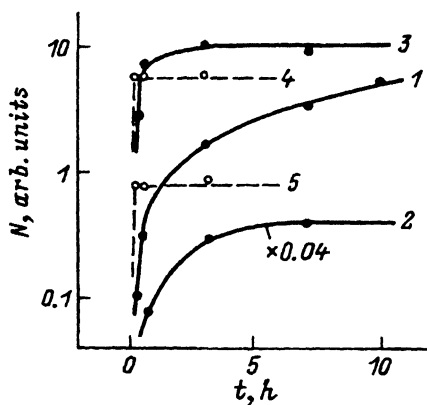


Рис. 2. Изменение концентрации пар $V_{As}Zn_{Ga}$ в облученных быстрыми электронами ($\Phi = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$) кристаллах $p\text{-GaAs(Zn)}$ с длительностью их отжига при $T = 150$ (1), 175 (2), 200 (3), 275 (4) и 325°C (5). Светлые и темные точки — эксперимент; сплошные кривые — теоретические зависимости $N(t, T_c)$, построенные согласно соотношению (2) для $N_{\max} = n_v^*$ и $\tau = 1030$ (1), 160 (2) и 30 мин (3).

При низких температурах отжига ($T = 150\text{--}225^\circ \text{C}$) наблюдаемые изменения N с t полностью связаны с процессами генерации пар $V_{As}Zn_{Ga}$ и могут быть удовлетворительно описаны соотношением (2). Поэтому, как отмечалось выше, при малых $t \ll \tau$ наблюдается линейное возрастание N с ростом t , связанное с тем, что при рассматриваемых временах прогрева кристаллов $p\text{-GaAs(Zn)}$ лишь небольшое число вакансий мышьяка ($\ll n_v^*$) образуют пары с атомами цинка ($N \ll n_v^*$). При умеренных $t \simeq \tau$ замедление скорости генерации пар $V_{As}Zn_{Ga}$ при возрастании времени отжига связано с заметным понижением концентрации изолированных вакансий атомов мышьяка $n_v^* - N$ вследствие их существенного оттока к атомам цинка. При больших $t \gg \tau$ величина N стремится к насыщению ($N \simeq n_v^*$), связанному с тем, что большинство вакансий атомов мышьяка образуют пары с атомами цинка. Вычисленные из сравнения наблюдаемых на опыте и теоретических зависимостей $N(t, T_c)$ [см. соотношение (2)] времена генерации пар $V_{As}Zn_{Ga}$ τ оказались равными 1030, 160 и 30 мин при $T = 150, 175$ и 200°C соответственно, т. е. существенно понижались при возрастании температуры отжига.

При высоких температурах отжига ($T \leq 225^\circ \text{C}$) в наблюдаемом изменении N от времени важную роль начинают играть и процессы термического разрушения пар $V_{As}Zn_{Ga}$ на индивидуальные компоненты V_{As} и Zn_{Ga} (вероятность генерации пар $V_{As}Zn_{Ga}$ α становится ниже вероятности их диссоциация β). В этом случае уже при $t = 10$ мин достигается «квазистационарное» значение концентрации пар $V_{As}Zn_{Ga}$ N^* (время жизни пар $\tau^* < 10$ мин при $T \geq 225^\circ \text{C}$). Величина N^* , как отмечалось выше, существенно зависит от соотношения между вероятно-

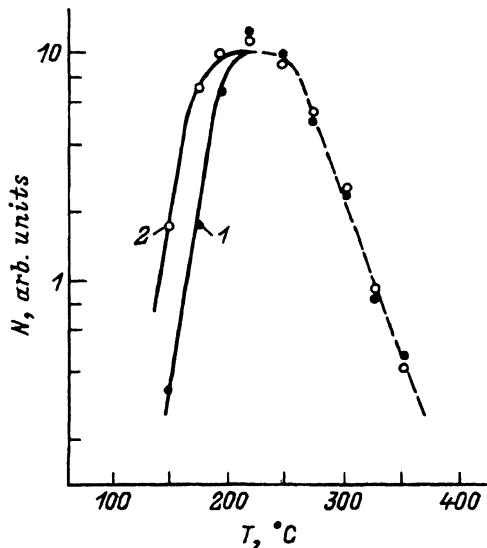


Рис. 3. Изменение концентрации пар $V_{As}Zn_{Ga}$ при изохронном ($t = 30$ (1) и 180 (2) мин) отжиге облученных быстрыми электронами ($\Phi = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$) кристаллов $p\text{-GaAs(Zn)}$. Светлые и темные точки — эксперимент; сплошные кривые 1 и 2 — теоретические зависимости $N(T, t_c)$, построенные согласно соотношению (3) для $t_c = 30$ (1) и 180 мин (2), $N_{\text{max}} = n_v^*$ и $\tau = 1030, 160$ и 30 мин при $T = 150, 175$ и 200°C соответственно.

стями генерации и аннигиляции пар $V_{As}Zn_{Ga}$ α/β и квазистационарной концентрации изолированных вакансий мышьяка $n_v^{**'}$ и определяется соотношением (4).

На рис. 3 показано влияние изохронного отжига ($t = 30$ и 180 мин) при различных температурах ($T = 150\text{--}350^\circ \text{C}$) на концентрацию пар $V_{As}Zn_{Ga}$ в облученных быстрыми электронами кристаллах $p\text{-GaAs(Zn)}$. Из детального анализа температурной области существования пар $V_{As}Zn_{Ga}$ видно следующее.

При низких температурах отжига ($T = 150\text{--}200^\circ \text{C}$) концентрация пар $V_{As}Zn_{Ga}$ существенно [по экспоненциальному закону — $N(T) \sim \exp(-1.1/kT)$] увеличивается при возрастании температуры отжига. В этой области температур вероятность генерации пар $V_{As}Zn_{Ga}$ значительно выше вероятности их диссоциации, а вид зависимостей N от T и t_c может быть удовлетворительно описан соотношением (3). Вычисленные из сравнения наблюдаемых на опыте $N(T, t_c)$ и теоретических зависимостей (3) времена генерации пар $V_{As}Zn_{Ga}$ τ оказались равными 1030, 160 и 30 мин при $T = 150, 175$ и 200°C соответственно, т.е. существенно понижались при возрастании температуры отжига.

При высоких температурах отжига ($T \leq 225^\circ \text{C}$) измеряемая квазистационарная концентрация пар $V_{As}Zn_{Ga}$ N^* (время жизни пар $\tau^* < 10$ мин при $T \geq 225^\circ \text{C}$) существенно [по экспоненциальному закону — $N^*(T) \sim \exp(0.9/kT)$] понижается при возрастании температуры отжига. В этой области температур диссоциации пар $V_{As}Zn_{Ga}$ больше вероятности их генерации. Однако наблюдаемое уменьшение концентрации пар N^* при возрастании температур отжига существенно выше ожидаемого исходя лишь из термической диссоциации пар $V_{As}Zn_{Ga}$ — в этой области температур снижается также скорость генерации пар $V_{As}Zn_{Ga}$ вследствие значительного понижения с ростом температуры концентрации изолированных вакансий мышьяка $n_v^{*'}$ (рис. 1). Поэтому при рассматриваемых высоких температурах отжига детальный вид зависимости $N^*(T)$ будет определяться не только усилением с ростом T

скорости диссоциации пар βN (это связано с очевидным возрастанием вероятности их диссоциации $\beta \sim \exp(-\varepsilon_d/kT)$, но и соответствующим понижением скорости их генерации αn_v^{*1} (это связано с соответствующим уменьшением концентрации изолированных вакансий мышьяка, см. соотношение (4)).

3. *Обсуждение.* Проанализируем полученные результаты. Очевидно, в изучаемых кристаллах образование пар $V_{As}^+ Zn_{Ga}^-$ происходит путем диффузионно-дрейфового перемещения положительно заряженных ионов V_{As}^+ к отрицательно заряженным ионам Zn_{Ga}^- (создаваемый последними потенциал $V_c = -e/\varepsilon r$, где $-e$ — заряд электрона, ε — диэлектрическая постоянная кристалла, а r — расстояние между ионами V_{As}^+ и Zn_{Ga}^-). Действительно, в изучаемых сильно легированных кристалла 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 вакансиями 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 $E_c = -e/\varepsilon r^2$ ионов V_{As}^+ к ионам Zn_{Ga}^- . Энергия их кулоновского взаимодействия $\varepsilon_c = -e^2/\varepsilon r$ порядка и больше энергии теплового движения kT . В этом случае каждый из ионов V_{As}^+ перемещается в своей собственной сфере к ближайшему иону Zn_{Ga}^- , а время генерации пар $V_{As} Zn_{Ga}$ τ задается выражением [7,8]

$$\tau = \frac{1}{\alpha} = \frac{\varepsilon kT}{4\pi e^2 D N_{Zn}} = \frac{\varepsilon kT}{4\pi e^2 D_0 N_{Zn}} \exp\left(\frac{\varepsilon_m}{kT}\right), \quad (5)$$

где $D = D_0 \exp(-\varepsilon_m/kT)$, а D_0 — частотный фактор.

Тогда определенный из сравнения наблюдаемых экспериментальных зависимостей τ от температуры $\tau \sim T \exp(1.1/kT)$, см. рис. 4 и теоретически зависимостей [см. соотношение (5) и рис. 4] коэффициент диффузии вакансий мышьяка $D = D_0 \exp(-1.1/kT)$, где $D_0 = 6 \times 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$, т.е. $D \simeq 1.5 \cdot 10^{-18}$, $1 \cdot 10^{-17}$ и $5 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2/\text{с}$ при 150, 175 и 200° C соответственно, а энергия миграции вакансий мышьяка $\varepsilon_m = 1.1 \text{ эВ}$.³

Несомненно, разрушение пар $V_{As} Zn_{Ga}$ происходит путем их термической диссоциации на изолированные компоненты V_{As} и Zn_{Ga} ввиду относительно низкой энергии связи между последними ε_b и достаточно высокой подвижности вакансий мышьяка, позволяющей им эффективно мигрировать от удерживающих их атомов цинка. Вероятность соответствующего процесса $\beta = A\nu_0 \exp(\varepsilon_d/kT)$, где A — постоянная ($A \geq 1$), $\nu_0 = 10^{13} \text{ с}^{-1}$ — частота колебаний атомов решетки; очевидно, $\beta/\alpha \sim \exp(\varepsilon_b/kT)$, ибо $\alpha \sim \exp(-\varepsilon_m/kT)$, см. соотношение (5) [9,10]. Тогда величина ε_b может быть найдена из анализа зависимости N^* от температуры в области диссоциации пар $V_{As} Zn_{Ga}$, т.е. при $T > 225^\circ \text{ C}$ (рис. 3), в которой, как следует из соотношения (4),

³ Величина τ (с точностью $\pm 10\%$) находилась непосредственно из анализа кинетики генерации пар $V_{As} Zn_{Ga}$ (рис. 2) и зависимостей N от температуры в области генерации пар $V_{As} Zn_{Ga}$ (рис. 3). Оба метода определения τ давали совпадающие результаты.

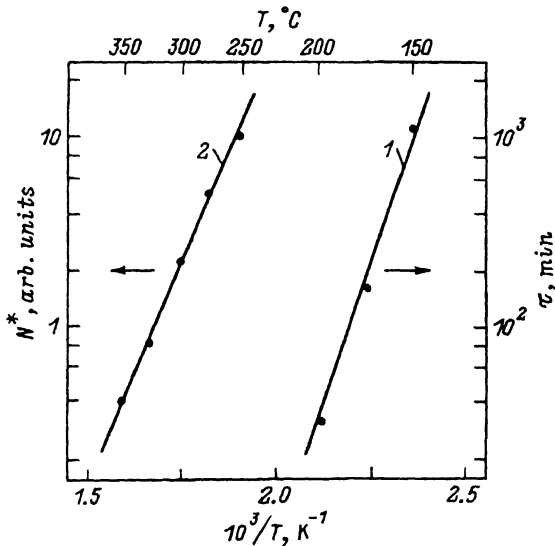


Рис. 4. Зависимости времени генерации пар $V_{As}Zn_{Ga}$ τ (1) и их концентрации N^* (2) от температуры отжига в облученных быстрыми электронами ($\Phi = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$) кристаллах $p\text{-GaAs(Zn)}$. Точки — эксперимент; сплошная линия 1 — теоретическая зависимость $\tau(T)$, построенная согласно соотношению (5) для $D_0 = 6 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$, $\varepsilon_m = 1.1 \text{ эВ}$, $N_{Zn} = 1.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и $\varepsilon = 12$.

$N^* \sim \exp(\varepsilon_b + \varepsilon_v)/kT$. Как оказалось (рис. 4), в этой области температур $N^* \sim \exp(0.9/kT)$, т.е. энергия связи между компонентами пар $V_{As}Zn_{Ga}$ действительно невелика — $\varepsilon_b = 0.5 \text{ эВ}$. Найденная величина ε_b несколько выше ожидаемой, если считать, что она полностью определяется кулоновской энергией связи компонентами пары $\varepsilon_b > -\varepsilon_c = e^2/\varepsilon r_p = 0.45 \text{ эВ}$.

Как следует из полученных значений величин ε_m и ε_b , энергия диссоциации пар $V_{As}Zn_{Ga}$ относительно велика — $\varepsilon_d = 1.6 \text{ эВ}$.

Заключение

Приведенные данные о процессах генерации и диссоциации стимулированных РТВ пар $V_{As}Zn_{Ga}$ и их характеристиках важны для понимания широко изучаемых процессов дефектообразования в облученных быстрыми частицами полупроводниках, в частности процессов, приводящих к низкой (высокой) стабильности и подвижности различных радиационных дефектов в них (см., например, обзоры [11–14]). Они также важны для выяснения механизмов образования и диссоциации ионных пар в полупроводниках, детально обсуждаемых в настоящее время (см., например, [10, 15–18]).

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований ГКНТ Украины.

- [1] K.D. Glinchuk, V.I. Guroshv, A.V. Prokhorovich, N.S. Zayats. *Cryst. Res. Technol.*, **21**, 811 (1986).
- [2] К.Д. Глинчук, Н.С. Заяц, А.В. Прохорович. *ФТП*, **23**, 657 (1989).
- [3] К.Д. Глинчук, В.И. Гурошев, А.В. Прохорович. *ФТП*, **25**, 82 (1991).
- [4] К.Д. Глинчук, В.И. Гурошев, А.В. Прохорович. *ФТП*, **30**, (1996).
- [5] D. Stievenard, J.C. Bourgoin. *J. Appl. Phys.*, **59**, 743 (1986).
- [6] D. Stievenard, X. Boddaert, J.C. Bourgoin, H.J. Bardeleben. *Phys. Rev. B*, **41**, 5271 (1990).
- [7] В.М. Глазов, В.С. Земсков. *Физико-химические основы легирования полупроводников* (М., Наука, 1967).
- [8] Ф. Крегер. *Химия несовершенных кристаллов* (М., Мир, 1969).
- [9] A. Ourmazd, W. Schröter. *J. Appl. Phys.*, **56**, 1670 (1984).
- [10] T. Zundel. *Phys. Rev. B*, **39**, 13 549 (1989).
- [11] Л.С. Смирнов. *Физические процессы в облученных полупроводниках* (Новосибирск, Наука, 1977).
- [12] D. Pons, J.C. Bourgoin. *J. Phys. C*, **18**, 3839 (1985).
- [13] G. Dlubek. *Phys. St. Sol. (a)*, **102**, 443 (1987).
- [14] J.C. Bourgoin, H.J. Bardeleben, D. Stievenard. *Phys. St. Sol. (a)*, **102**, 499 (1987).
- [15] W. Pfeiffer, *Appl. Phys. Lett.*, **58**, 1751 (1991).
- [16] S.J. Pearton. *Appl. Phys. Lett.*, **59**, 3571 (1991).
- [17] S.J. Pearton, N.S. Hobson, C.R. Abernathy. *Appl. Phys. Lett.*, **61**, 1588 (1992).
- [18] A.B. Conibeare, A.W. Leitch. *Phys. Rev. B*, **49**, 5069 (1994).

Редактор В.В. Чалдышев

A study of kinetics of formation and dissociation of radiation and annealing induced $V_{As}Zn_{Ga}$ pairs in p -type GaAs⟨Zn⟩

K.D. Glinchuk, A.V. Prokhorovich

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