

Влияние облучения быстрыми нейтронами на фотолюминесценцию кристаллов *n*-GaAs(Te)

© К.Д. Глинчук, А.В. Прохорович

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

(Получена 3 апреля 1996 г. Принята к печати 8 июля 1996 г.)

Исследовано влияние нейтронного облучения ($\Phi = 10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-2}$) и последующих отжигов ($T = 100 - 750^\circ\text{C}$) на фотолюминесценцию сильно легированных теллуром кристаллов *n*-GaAs ($n_0 \approx 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$). Показано, что указанное радиационно-термическое воздействие при возрастании температуры отжига приводит сначала (при $T \approx 300^\circ\text{C}$) к появлению интенсивной полосы люминесценции с максимумом излучения вблизи 1.35 эВ, а затем (при $T > 550^\circ\text{C}$) к снижению ее интенсивности. Отмеченное связано с радиационно-стимулированной генерацией пар $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}V_{\text{As}}$ при умеренных температурах прогрева и последующей их диссоциацией при повышенных температурах прогрева.

Изучая влияние облучения быстрыми нейтронами и последующих отжигов (далее радиационно-термическое воздействие (РТВ)) на фотолюминесценцию (ФЛ) кристаллов *n*-GaAs(Te), мы обнаружили нетривиальные изменения в их спектрах ФЛ (стимулированное РТВ появление полосы люминесценции с максимумом излучения вблизи 1.35 эВ и немонотонные изменения ее интенсивности с температурой прогрева). На этом, а также на модели, объясняющей указанное, мы и остановимся далее.¹

Методика

Для опытов использовались сильно легированные теллуром (в концентрации $N_{\text{Te}} \approx 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) кристаллы *n*-GaAs (концентрация равновесных электронов $n_0 \approx 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$).

Облучение кристаллов *n*-GaAs быстрыми нейтронами (средняя энергия нейтронов $E = 2 \text{ МэВ}$, интегральная доза облучения $\Phi = 10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-2}$, концентрация созданных облучением точечных дефектов (изолированных и в кластерах) $n_d(0) \approx (50 \text{ см}^{-1}) \Phi$) проводилось при 20°C . При максимальной дозе облучения температура кристаллов могла подниматься до 60°C . Изохронный отжиг длительностью 1 ч с последующей закалкой облученных и контрольных необлученных кристаллов *n*-GaAs(Te) проводился при $T = 100 - 750^\circ\text{C}$ в условиях исключающих попадание в их объем различных загрязнений, в том числе атомов меди (концентрация радиационных дефектов (РД) в отожженных облученных кристаллах $n_d < n_d(0)$). Облучение и последующий отжиг мало изменяли величину n_0 , ибо $n_d(0) \ll N_{\text{Te}}$.

ФЛ кристаллов *n*-GaAs (ее интенсивность I) возбуждалась излучением He-Ne-лазера (энергия квантов $h\nu_e = 1.96 \text{ эВ}$, интенсивность возбуждения $L = 10^{18} \text{ кв./см}^2 \cdot \text{с}$). Возбуждение мало изменяло проводимость кристаллов. Измерение спектров ФЛ проводилось при 77 К в области линейной зависимости I

от L , т.е. в области линейной рекомбинации избыточных носителей тока [2].

Изучались изменения спектров ФЛ кристаллов *n*-GaAs(Te) при различных дозах нейтронного облучения и температурах их последующего отжига. Отжиг необлученных кристаллов *n*-GaAs(Te) практически не приводил к изменениям в их спектрах ФЛ, т.е. мало изменял концентрацию "ростовых" и не создавал новых центров излучательной и безызлучательной рекомбинации избыточных носителей тока в них (рис. 1). При анализе полученных данных основное внимание уделено наиболее интересной области РТВ, связанной с генерацией новых центров люминесценции. Само радиационное воздействие не приводит к образованию последних (рис. 1). Следовательно, мы не будем рассматривать тривиальные изменения при указанном РТВ интенсивностей ФЛ кристаллов *n*-GaAs(Te), связанные с генерацией и аннигиляцией РД, представляющих собой эффективные центры безызлучательной рекомбинации избыточных носителей тока (см., например, [1-3]).

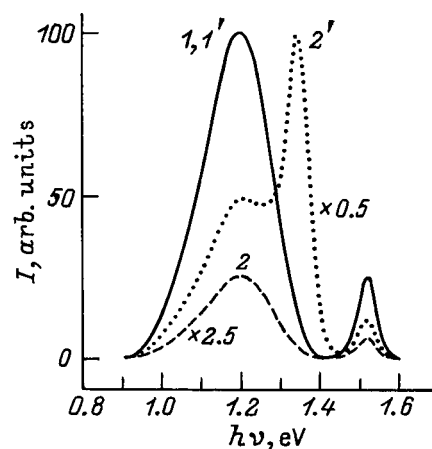


Рис. 1. Спектры ФЛ кристаллов *n*-GaAs(Te) исходных (1), а затем прогретых при 500°C , 1 ч (1'), облученных потоком быстрых нейтронов $\Phi = 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (2), а затем прогретых при 500°C , 1 ч (2'). Температура измерений 77 К.

¹ Некоторые данные о влиянии нейтронного облучения на ФЛ кристаллов *p*-GaAs(Zn,Te) приведены нами ранее в [1].

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены низкотемпературные ($T = 77$ К) спектры ФЛ контрольных и облученных быстрыми нейтронами кристаллов n -GaAs(Te) после их прогрева при 500°C , 1 ч. Как видно, облучение и последующий отжиг кристаллов n -GaAs(Te) приводит к появлению интенсивной "примесной" полосы люминесценции с максимумом излучения $h\nu_m$ вблизи 1.35 эВ (в прогретых необлученных кристаллах эта полоса ФЛ не наблюдается) и слабым изменением интенсивностей примесной полосы люминесценции с $h\nu_m \approx 1.20$ эВ и "собственной" полосы люминесценции с $h\nu_m \approx 1.52$ эВ. Как известно [4–6], указанные примесные полосы люминесценции обусловлены излучательной рекомбинацией электронов в парах, включающих в свой состав вакансии галлия V_{Ga} , мышьяка V_{As} и атомы теллура в мышьяковой подрешетке арсенида галлия Te_{As} , а именно в парах $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}V_{\text{As}}$ и $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}$ соответственно. Следовательно, отжиг облученных быстрыми нейтронами кристаллов n -GaAs(Te) приводит к генерации пар $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}V_{\text{As}}$ и мало изменяет концентрацию пар $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}$ (концентрация стимулированных РТВ пар $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}$ (последние несомненно образуются вследствие взаимодействия освобожденных из кластеров РД вакансий галлия с изолированными атомами теллура, см. далее) ниже концентрации ростовых ("врожденных") пар $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}$).

На рис. 2 приведены изменения концентрации пар $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}$ ($N_{1.2}$) и $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}V_{\text{As}}$ ($N_{1.35}$) при изохронном отжиге облученных различными потоками быстрых нейтронов кристаллов n -GaAs(Te).² Как видно, отжиг облученных кристаллов n -GaAs(Te) мало изменяет концентрацию пар $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}$, доминируют ростовые пары $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}$, концентрация которых $N_{1.2}(0) \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при любых T . Отжиг при повышенных температурах прогрева приводит к генерации пар $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}V_{\text{As}}$. При используемых временах прогрева практически достигались квазистационарная концентрация пар $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}V_{\text{As}}$. Максимальная генерация пар $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}V_{\text{As}}$ наблюдается при $T = T^* \approx 550^\circ\text{C}$ ($N_{1.35}(\text{max}) \approx 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} \ll n_d(0)$ при $\Phi = 10^{15} \text{ см}^{-2}$), а при $T > T^*$ определенную роль начинают играть и процессы их термической диссоциации, что и приводит к соответствующему снижению концентрации указанных пар. Сам эффект генерации пар $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}V_{\text{As}}$ тем сильнее, чем выше доза облучения нейтронами, что подтверждает их радиационно-стимулированную природу.

Обсудим приведенные результаты.

Несомненно, образование пар $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}V_{\text{As}}$ при рассматриваемом РТВ может происходить вследствие взаимо-

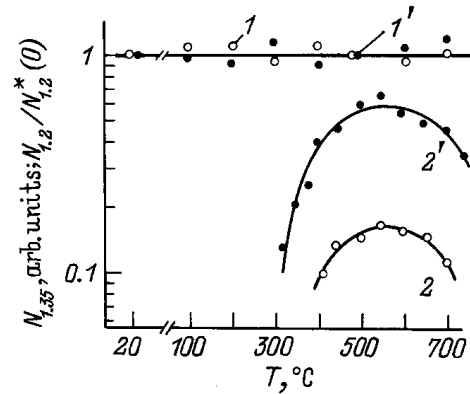


Рис. 2. Изменение концентрации пар $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}$ (I, I') и $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}V_{\text{As}}$ ($2, 2'$) при изохронном отжиге ($t = 1$ ч) облученных потоком быстрых нейтронов $\Phi = 10^{14}$ ($I, 2$) и 10^{15} см^{-2} ($I', 2'$) кристаллов n -GaAs(Te). Зависимости I, I' нормированы относительно концентрации пар $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}$ в отожженных необлученных кристаллах $N_{1.2}^*(0) \approx N_{1.2}(0)$. $T = 20^\circ\text{C}$ соответствует неотожженным кристаллам.

действия стимулированных нейтронным облучением подвижных вакансий мышьяка с ростовыми парами $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}$ либо подвижных вакансий мышьяка и галлия с изолированными атомами теллура. Очевидно, изолированные подвижные вакансии мышьяка и галлия появляются при разрушении созданных нейтронным облучением кластеров РД, ибо именно в последних в основном сосредоточены созданные радиацией точечные дефекты [1,3,7–9].³

По видимому, первый процесс (реакция преобразования пар $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}} + V_{\text{As}} \rightarrow V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}V_{\text{As}}$) является мало эффективным. Это вытекает из следующего. Как показывают оценки (см. сноску 2), концентрация ростовых пар $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}$ сравнима с концентрацией стимулированных РТВ пар $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}V_{\text{As}}$, в частности, с их максимальной концентрацией $N_{1.35}(\text{max})$. Поэтому прямое преобразование пар $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}$ в пары $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}V_{\text{As}}$ вследствие их взаимодействия с вакансиями мышьяка должно приводить к заметному снижению концентрации пар $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}$ при РТВ. Однако на опыте это не наблюдается — концентрация пар $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}$ остается практически неизменной (рис. 2). Более эффективным (доминирующим, ибо $N_{\text{Te}} \gg N_{1.2}$) мы считаем второй процесс ($\text{Te}_{\text{As}} + V_{\text{As}} + V_{\text{Ga}} \rightarrow V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}V_{\text{As}}$). В этом случае изолированные атомы теллура сначала являются стоком для освобожденных из R -кластеров РД вакансий мышьяка, а затем для освобождения из Q -кластеров РД вакансий галлия. Указанное подтверждается совпадением температурных областей разрушения R - и Q -кластеров РД (отмеченное происходит при $T \geq 300$ и 450°C соответственно [1,3,7–9]) и радиационно-стимулированной генерации пар $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}V_{\text{As}}$.

³ При используемых температурах и длительностях прогрева скорости миграции радиационно-стимулированных вакансий мышьяка и галлия достаточны для диффузионно-ограниченного образования пар $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}V_{\text{As}}$ [10].

² Относительные концентрации пар $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}$ и $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}V_{\text{As}}$ (с точностью $\pm 15\%$) находились из сравнения соответствующих изменений интенсивностей обусловленных ими примесных полос люминесценции и интенсивности "собственного" излучения [1,6]. Абсолютные величины концентрации врожденных пар $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}$ и максимальных концентраций стимулированных РТВ пар $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}V_{\text{As}}$ определялись (с точностью $\pm 30\%$) из анализа кинетики затухания индуцируемых ими примесных полос ФЛ [4].

Сравнительно узкая температурная область устойчивости (стабильности) стимулированных РТВ пар $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}V_{\text{As}}$ (рис. 2) обусловлена относительно слабой связью между входящими в их состав компонентами [11].

Таким образом, можно сделать следующее заключение.

Нейтронное облучение и последующий отжиг легированных атомами теллура кристаллов n -GaAs приводит к генерации в них пар $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}V_{\text{As}}$ с относительно низкой термической стабильностью. Отмеченное связано с захватом изолированными атомами теллура подвижных вакансий мышьяка и галлия из R - и Q -кластеров РД и с низкой энергией связи между компонентами пар $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}V_{\text{As}}$. Указанное важно для выяснения природы и определения скорости миграции создаваемых нейтронным облучением РД в арсениде галлия [3,7–9].

Список литературы

- [1] Е.В. Винник, К.Д. Глинчук, В.И. Гурошев, А.В. Прохорович. ФТП, **25**, 82 (1991).
- [2] Е.В. Винник, К.Д. Глинчук, В.И. Гурошев, А.В. Прохорович. ФТП, **27**, 1030 (1993).
- [3] Л.С. Смирнов. *Вопросы радиационной технологии полупроводников* (Новосибирск, 1980).
- [4] К.Д. Глинчук, К. Лукат, В.Е. Родионов. ФТП, **15**, 1337 (1981).
- [5] K.D. Glinchuk, A.V. Prokorovich, N.S. Zayats. Phys. St. Sol. (a), **82**, 503 (1984).
- [6] К.Д. Глинчук, В.Ф. Коваленко, А.В. Прохорович. Оптоэлектрон. и полупроводн. техн., **22**, 46, (1992).
- [7] R. Coates, F.W. Mitchell. Adv. Phys., **24**, 593 (1975).
- [8] G. Dlubek, R. Krause. Phys. St. Sol. (a), **102**, 443 (1987).
- [9] G. Dlubek, A. Dlubek, R. Krause, O. Brümer. Phys. St. Sol. (a), **107**, 11 (1988).
- [10] К.Д. Глинчук, А.В. Прохорович. Кристаллография, **41**, 324 (1996).
- [11] Е.В. Винник, К.Д. Глинчук, В.И. Гурошев, А.В. Прохорович. ФТП, **24**, 1363 (1990).

Редактор В.В. Чалдышев

Effect of irradiation by fast neutrons on photoluminescence of n -type GaAs crystals

K.D. Glinchuk, A.V. Prokhorovich

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

Abstract Effect of neutron irradiation ($\Phi = 10^{14}$ to 10^{15} cm $^{-2}$) and subsequent annealing ($T \leq 750^\circ\text{C}$) on photoluminescence of heavily tellurium doped n -type GaAs crystals ($N_0 = 1 \cdot 10^{18}$ cm $^{-3}$) has been studied. It is shown that the radiation-plus-annealing treatment, as the annealing temperature rises, leads first (at $T \simeq 300^\circ\text{C}$) to appearance of an intensive luminescence band near 1.35 eV and then (at $T > 550^\circ\text{C}$) to a decrease of its intensity. The results obtained are connected with the radiation-stimulated generation of $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}V_{\text{As}}$ pairs at moderate annealing temperatures and their following dissociation at high annealing temperatures.

Fax: (044) 265-83-42 (K.D. Glinchuk)

E-mail: MICLE%SEMICOND.KIEV.UA@ts.kiev.ua
(K.D. Glinchuk)