

# Влияние облучения быстрыми нейтронами на интенсивность обусловленной атомами меди полосы люминесценции с $h\nu_m = 1.01$ эВ в $n$ -GaAs

© К.Д. Глинчук, А.В. Прохорович

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

(Получена 24 сентября 1996 г. Принята к печати 3 февраля 1997 г.)

Изучено влияние нейтронного облучения (энергия  $E = 2$  МэВ, поток  $\Phi = 10^{13} \div 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ) и последующих отжигов (температура отжига  $T_a = 400 \div 700^\circ\text{C}$ , длительность 30 мин) кристаллов  $n$ -GaAs(Te,Cu) с исходной концентрацией носителей  $n_0 = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  на интенсивность обусловленной атомами меди полосы люминесценции с положением максимума излучения  $h\nu_m = 1.01$  эВ. Наблюдалось значительное увеличение интенсивности полосы в результате облучения. Это объясняется радиационно-стимулированным возрастанием концентрации излучающих центров (пар  $\text{Cu}_{\text{Ga}}\text{V}_{\text{As}}$ ) вследствие эффективного взаимодействия межузельных атомов меди с индуцированными облучением вакансиями галлия  $V_{\text{Ga}}$ , мышьяка  $V_{\text{As}}$  и дивакансиями  $V_{\text{Ga}}V_{\text{As}}$ .

## 1. Введение

Изучая влияние облучения быстрыми нейтронами и последующих отжигов на фотолюминесценцию (ФЛ) кристаллов  $n$ -GaAs(Te,Cu), мы обнаружили индуцированное радиационно-термическим воздействием (РТВ) увеличение интенсивности обусловленной атомами меди полосы люминесценции с положением максимума излучения  $h\nu_m$  вблизи 1.01 эВ. На этом, а также модели, объясняющей указанный факт, мы и остановимся далее.

## 2. Методика

Исходными для опытов являлись легированные теллуrom кристаллы  $n$ -GaAs с концентрацией атомов теллура  $N_{\text{Te}} = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , концентрацией равновесных электронов  $n_0 = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Облучение кристаллов быстрыми нейтронами (средняя энергия  $E = 2$  МэВ, интегральная доза  $\Phi = 10^{13} \div 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , концентрация вводимых радиационных дефектов  $n_d(0) \approx 50 [\text{см}^{-1}] \cdot \Phi$ ) проводилось при  $20^\circ\text{C}$ . Нейтронное облучение мало изменяло величину  $n_0$ , так как  $n_d(0) \ll N_{\text{Te}}$ .

Диффузия атомов меди из тонкого слоя, нанесенного на поверхность, в необлученные и облученные нейтронами кристаллы  $n$ -GaAs(Te) проводилась при  $T = 400\text{--}700^\circ\text{C}$  в течение 30 мин с последующим быстрым охлаждением (концентрация меди  $N_{\text{Cu}}$ , максимальная глубина проникновения атомов меди 100 мкм). Диффузия атомов меди мало изменяла величину  $n_0$ , поскольку  $N_{\text{Cu}} \ll N_{\text{Te}}$ . Однако в процессе диффузии атомов меди большинство радиационных дефектов аннигилировало на различных стоках (их концентрация в отожженных кристаллах  $n_d \approx (0.2 \div 0.3)n_d(0)$ ).

Фотолюминесценция измерялась при 77 К. Возбуждение осуществлялось сильно поглощаемым излучением He-Ne-лазера с энергией квантов 1.96 эВ (коэффициент поглощения  $4 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$ , интенсивность возбуждения

$L = 10^{18} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ). Источником ФЛ являлся тонкий слой, порядка нескольких микрон, вблизи поверхности GaAs. При используемых величинах  $L$  интенсивность обусловленной атомами меди полосы люминесценции с максимумом  $h\nu_m = 1.01$  эВ ( $I_{1.01}$ ) линейно возрастала с ростом  $L$ , т.е. изменения интенсивности люминесценции  $I_{1.01}$  при РТВ отображали соответствующие изменения концентрации обуславливающих ее центров  $N_{1.01}$  ( $I_{1.01} \sim N_{1.01}$ ) [1]. Относительные величины концентрации  $N_{1.01}$  в необлученных и облученных кристаллах находились (с точностью  $\pm 15\%$ ) из сравнения соответствующих изменений интенсивности индуцируемой атомами меди полосы люминесценции с максимумом  $h\nu_m = 1.01$  эВ ( $I_{1.01}$ ) и интенсивности собственной полосы люминесценции с максимумом  $h\nu_m = 1.52$  эВ ( $I_{1.52}$ ): очевидно,  $N_{1.01} \sim I_{1.01}/I_{1.52}$  [2,3].

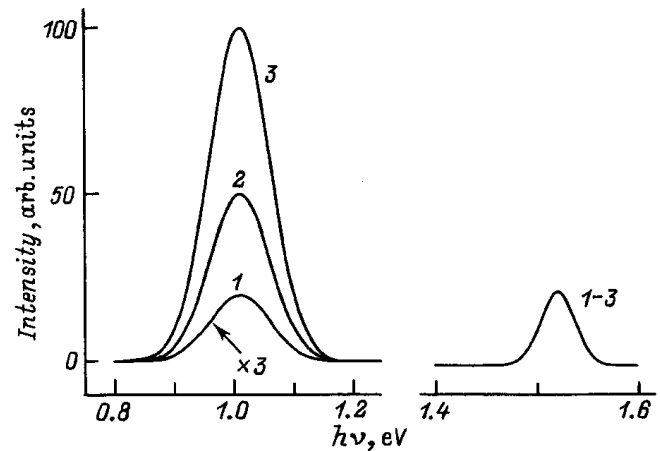
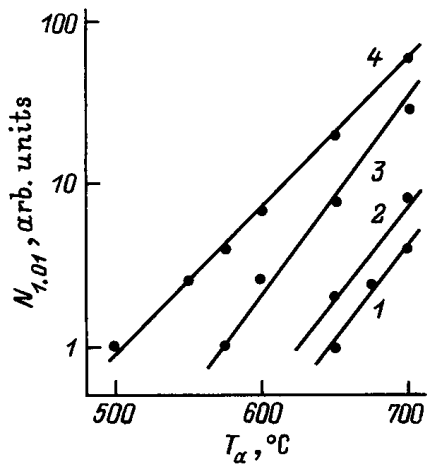


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции кристаллов  $n$ -GaAs, необлученных (1), а также облученных потоком быстрых нейтронов  $\Phi = 10^{14}$  (2) и  $10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Слева — без отжига; справа — после отжига при  $T_a = 700^\circ\text{C}$ , 30 мин со слоем меди на поверхности.

### 3. Результаты

На рис. 1 приведены низкотемпературные ( $T = 77\text{ K}$ ) спектры ФЛ необлученных и облученных быстрыми нейтронами кристаллов  $n\text{-GaAs}$  после диффузии в них атомов меди. Как и ожидалось: а) диффузия атомов меди приводит к появлению полосы люминесценции с максимумом  $h\nu_m = 1.01\text{ эВ}$  ( $I_{1.01} = 0$  при любых  $T$ , если  $N_{\text{Cu}} = 0$ ) [3]; б) интенсивность полосы собственной люминесценции примерно одинакова в необлученных и облученных отожженных кристаллах (при используемых высоких температурах отжига большинство радиационных дефектов, ряд из которых являлись эффективными центрами рекомбинации избыточных электронов и дырок, аннигилировали на различных стоках [2,4–6]). Неожиданным явилось существенное индуцированное нейтронным облучением увеличение интенсивности полосы люминесценции с  $h\nu_m = 1.01\text{ эВ}$  ( $I_{1.01} = 0$  при любых  $\Phi$ , если  $N_{\text{Cu}} = 0$ ).



**Рис. 2.** Зависимость относительных концентраций индуцированных атомами меди излучающих центров в кристаллах  $n\text{-GaAs}$  от температуры отжига  $T_a$  при длительности 30 мин со слоем меди на поверхности. 1 — необлученный кристалл; 2–3 — облученные потоками быстрых нейтронов  $\Phi = 10^{13}$ ,  $10^{14}$ ,  $10^{15}\text{ см}^{-2}$  соответственно.

На рис. 2 приведены зависимости концентрации обусловленных атомами меди излучающих центров от температуры отжига  $T_a$  в необлученных и облученных различными потоками быстрых нейтронов кристаллах  $n\text{-GaAs}$ . Как видно: а) облучение быстрыми нейтронами существенно увеличивает концентрацию обусловленных атомами меди излучающих центров  $N_{1.01}$  и сдвигает к более низким температурам отжига область их существенной генерации; б) эффект увеличения  $N_{1.01}$  тем сильнее, чем выше доза облучения (это подтверждает радиационно-стимулированную природу увеличения концентрации обусловленных атомами меди излучающих центров).

### 4. Обсуждение

Как известно [3], полоса люминесценции с максимумом  $h\nu_m = 1.01\text{ эВ}$  в кристаллах  $n\text{-GaAs}$  обусловлена излучательной рекомбинацией электронов в парах  $\text{Cu}_{\text{Ga}}V_{\text{As}}$  ( $\text{Cu}_{\text{Ga}}$  — атом меди в галлиевой подрешетке арсенида галлия,  $V_{\text{As}}$  — вакансия мышьяка). Они появляются в результате последовательного взаимодействия межузельных атомов меди с изолированными вакансиями галлия  $V_{\text{Ga}}$  и мышьяка  $V_{\text{As}}$ , или в результате захвата межузельных атомов меди дивакансиями  $V_{\text{Ga}}V_{\text{As}}$  [3]. Следовательно, наблюдаемое радиационно-стимулированное увеличение интенсивности полосы люминесценции с максимумом  $h\nu_m = 1.01\text{ эВ}$  связано с увеличением в облученных нейтронами кристаллах  $n\text{-GaAs}$  концентрации пар  $\text{Cu}_{\text{Ga}}V_{\text{As}}$  вследствие индуцированного радиационным воздействием возрастания концентраций вакансий  $V_{\text{Ga}}$ ,  $V_{\text{As}}$  и дивакансий  $V_{\text{Ga}}V_{\text{As}}$ .<sup>1</sup>

### 5. Заключение

Облучение нейтронами кристаллов  $n\text{-GaAs}(\text{Te},\text{Cu})$  приводит к существенному увеличению концентрации пар  $\text{Cu}_{\text{Ga}}V_{\text{As}}$  в них. Это обусловлено эффективным взаимодействием межузельных атомов меди с созданными облучением изолированными вакансиями галлия, мышьяка и дивакансиями  $V_{\text{Ga}}V_{\text{As}}$ . Полученные результаты важны для понимания процессов междефектного взаимодействия в облученных полупроводниках [4–6].

### Список литературы

- [1] К.Д. Глинчук, В.И. Гурошев, А.В. Прохорович. ФТП, **27**, 1030 (1993).
- [2] К.Д. Глинчук, В.И. Гурошев, А.В. Прохорович. ФТП, **25**, 82 (1991).
- [3] Ф.М. Воробкало, К.Д. Глинчук, А.В. Прохорович. ФТП, **7**, 2047 (1973).
- [4] Л.С. Смирнов. *Вопросы радиационной технологии полупроводников* (Новосибирск, 1980).
- [5] В.В. Емцев, Т.В. Машовец. *Примеси и точечные дефекты в полупроводниках* (М., 1981).
- [6] G. Dlubek, A. Dlubek, R. Krause, R. Brummer. Phys. St. Sol. (a), **107**, 111 (1988).
- [7] К.Д. Глинчук, К. Лукат, В.Е. Родионов. ФТП, **15**, 1337 (1981).

Редактор Л.В. Шаронова

<sup>1</sup> Как показывают оценки (метод оценок описан в [7], его точность  $\pm 50\%$ ),  $N_{1.01} \approx 1 \cdot 10^{14}\text{ см}^{-3}$  в необлученных отожженных при  $700^\circ\text{C}$  кристаллах и  $N_{1.01} \approx 2 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-3}$  в облученных максимальным потоком нейтронов  $\Phi = 10^{15}\text{ см}^{-2}$  отожженных при  $700^\circ\text{C}$  кристаллах.

## Effect of neutron irradiation on the intensity of the copper-related 1.01 eV luminescence band in *n*-type GaAs crystals

K.D. Glinchuk, A.V. Prokhorovich

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

**Abstract** A study has been made of the effect of neutron irradiation (neutron energy was  $E = 2\text{ MeV}$  and dose  $\Phi = 10^{13} \div 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ) and subsequent annealing (annealing temperature  $T = 400 \div 700^\circ\text{C}$ , period 30 min) to the intensity of the copper-related peaked at  $h\nu_m = 1.01\text{ eV}$  luminescence band in *n*-type GaAs(Te,Cu) crystals with an initial concentration  $n_0 = 2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . A strong irradiation-induced increase in the intensity of the luminescence band was observed witnesses the irradiation-stimulated growth in the concentration of the copper-related radiative centres ( $\text{Cu}_{\text{Ga}}\text{V}_{\text{As}}$  pairs). The latter occurs due to a significant interaction between interstitial copper atoms and radiation-induced gallium ( $\text{V}_{\text{Ga}}$ ) and arsenic ( $\text{V}_{\text{As}}$ ) vacancies or divacancies  $\text{V}_{\text{Ga}}\text{V}_{\text{As}}$ .

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

E-mail: Mickle@semicond.kiev.ua (K.D. Glinchuk)