

## О влиянии легирующей примеси на процесс формирования разупорядоченных областей в GaAs при облучении быстрыми нейтронами

© В.П. Кладько, С.В. Пляцко

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

(Получена 5 мая 1997 г. Принята к печати 14 июля 1997 г.)

Рентгеновскими методами изучено влияние дозы облучения, концентрации и типа легирующей примеси на размеры разупорядоченных областей в GaAs. Проанализирована роль примеси в формировании разупорядоченных областей и их эволюции с дозой облучения.

Облучение полупроводников тяжелыми частицами высоких энергий приводит наряду с генерацией точечных дефектов (ТД) в его объеме к образованию разупорядоченных областей (РО) [1]. Являясь совокупностью интегрированных в локальном объеме точечных дефектов, РО обладает специфическими по отношению к матрице полупроводника свойствами и являются, как правило, основной причиной деградации его оптических и электрофизических свойств [2]. В связи с этим оказывается важным вопрос об экспериментальном определении основных параметров РО и изучении определяющих их факторов.

В данной работе исследовался вопрос о влиянии типа и уровня легирования на эффективный размер РО при облучении арсенида галлия быстрыми нейтронами. С этой целью были отобраны образцы монокристаллического GaAs *n*- и *p*-типа проводимости, выращенного по методу Чохральского в направлении [100]. В случае *n*-GaAs кристаллы отличались по концентрации  $N_{\text{Sn}}$  основной донорной примеси Sn<sub>Ga</sub>. Концентрация равновесных электронов  $n_0$  в этих кристаллах определялась концентрацией легирующей примеси и при  $T = 300$  К составляла  $2 \cdot 10^{16} - 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Кристаллы *p*-типа были легированы атомами цинка (Zn<sub>Ga</sub>), с концентрацией равновесных дырок  $p_0 = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  при  $T = 300$  К. Плотность дислокаций в исследуемых кристаллах *n*-GaAs (Sn) и *p*-GaAs (Zn) практически не отличалась и составляла  $(2-3) \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$ . Образцы подвергались облучению быстрыми нейтронами (средняя энергия  $E_n = 2$  МэВ) дозами  $\Phi_n = 10^{15} - 10^{17} \text{ н/см}^2$  в канале реактора с принудительным охлаждением (температура образцов при этом не превышала 60°C). Концентрация индуцированных нейтронным облучением дозой  $\Phi_n$  точечных дефектов  $N_S$  и разупорядоченных областей  $N^*$  пропорциональны величине  $\Phi_n$  и составляют  $50 \cdot \Phi_n$  и  $0.21 \cdot \Phi_n$  соответственно [3]. Как известно, при облучении полупроводников быстрыми электронами дозой  $\Phi_e$  происходит генерация ТД (их концентрация равна  $5 \cdot \Phi_e$ ), тогда как РО не образуются вплоть до очень высоких доз.

Облученные кристаллы исследовались методом рентгеновской топографии и дифрактометрии [4,5]. По данным рентгеновской топографии, плотность дислокаций

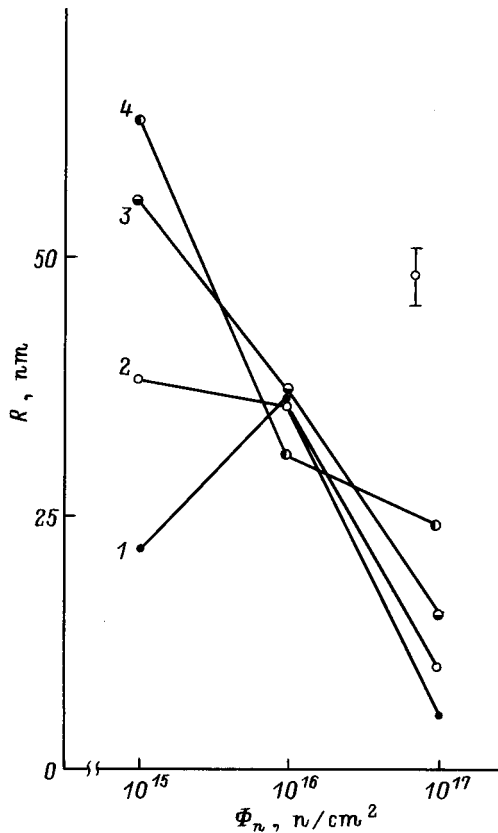
в процессе облучения практически не менялась. Согласно методике [5] определялось значение статического фактора Дебая–Валлера  $L$ , величины, характеризующей относительную объемную долю искаженной решетки в кристалле. Исходя из того факта, что плотность дислокаций в кристаллах в процессе облучения не изменялась, все изменения ( $\Delta L$ ) величины статического фактора можно отнести за счет образования РО. Добавка  $\Delta L$  связана с концентрацией РО  $N^*$  и средним эффективным размером  $R_{av}$  для модели кластеров формулой [6]

$$\Delta L = N^* \cdot R_{av}^5. \quad (1)$$

Таким образом, из экспериментальных значений  $\Delta L$ , учитывая приведенную выше зависимость  $N^*$  от дозы, легко рассчитать  $R_{av}$  и его эволюцию с дозой облучения. Рассчитанные из (1) дозовые зависимости  $R_{av}$  в облученных кристаллах *p*- и *n*-типа приведены на рис. 1. По методике измерения интегральных интенсивностей для квазизапрещенных отражений [7] проводился контроль изменения соотношения компонент в кристаллах в процессе облучения. Эти результаты приведены на рис. 2.

Для анализа полученных зависимостей будем исходить из устоявшейся в последние годы модели РО [2]. В процессе формирования РО выделяют четыре основные стадии: каскадную, посткаскадную, квазихимическую и аккомодации. На первых двух стадиях за очень короткие времена ( $10^{-14} - 10^{-13}$  и  $10^{-11} - 10^{-10}$  с соответственно) формируется ядро РО, размер которого составляет 50–150 Å. На квазихимической стадии вытесненные из каскада ТД (в основном межузельные атомы As<sub>i</sub>, Ga<sub>i</sub>) активно диффундируют на стоки в матрицу полупроводника, где либо рекомбинируют, либо образуют сложные дефекты или дефектно-примесные комплексы (ДПК). Стоками могут являться как ростовые дефекты, так и индуцированные в матрице ТД. Эти так называемые процессы аккомодации имеют место в течение всего времени набора дозы облучения.

Таким образом, размер РО будет определяться протяженностью дефектно-примесной оболочки (ДПО), сформировавшейся вокруг ядра РО и представляющей собой скопление различного рода ДПК. С точки зрения рентгеновских измерений ДПО представляет собой

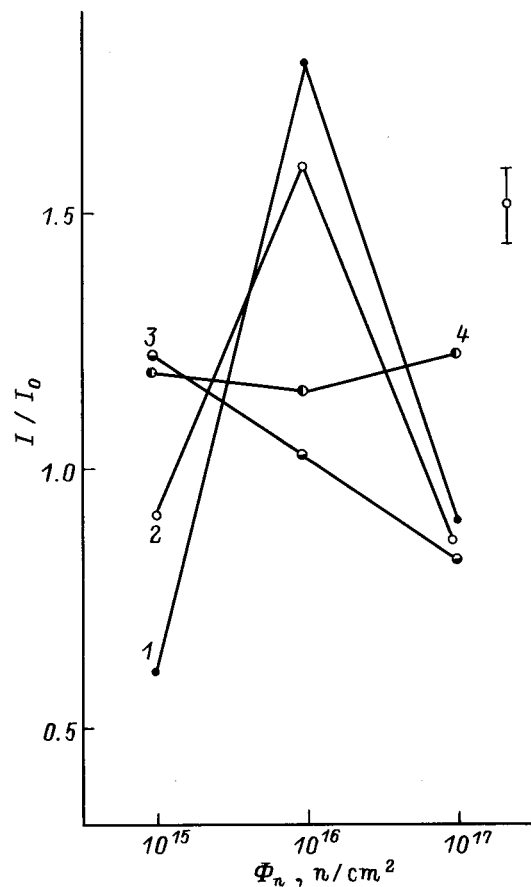


**Рис. 1.** Зависимости эффективных размеров разупорядоченных областей  $R$  в GaAs от дозы нейтронного облучения и уровня легирования. 1, 2, 3 — кристаллы, легированные Sn с концентрацией соответственно  $2 \cdot 10^{16}$ ,  $2 \cdot 10^{17}$ ,  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ; 4 — Zn с  $N_{\text{Zn}} = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

искаженную вблизи ядра РО область кристаллической решетки GaAs, эффективный размер которой пропорционален градиенту деформации, вызванному распределением ДПК между ядром РО и невозмущенной матрицей. С повышением концентрации РО (процесс перекрытия) повышается деформационный уровень всего кристалла и детектируемый предел градиента деформации смещается ближе к ядру РО (уменьшается эффективный размер  $R_{av}$ ).

Как видно из представленных на рис. 1 зависимостей, влияние уровня легирования на величину  $R_{av}$  оказывается существенным при малой дозе облучения ( $\Phi_n = 10^{15} \text{ н/см}^2$ ). Увеличение дозы приводит к уменьшению степени зависимости величины  $R_{av}$  от концентрации атомов легирующей примеси, и при  $\Phi_n > 10^{16} \text{ н/см}^2$  эта зависимость полностью исчезает. Такой характер изменения величины  $R_{av}$  с дозой облучения в образцах с различным уровнем легирования свидетельствует о наличии нескольких основных факторов, определяющих величину  $R_{av}$ . В случае малых доз генерация ТД в матрице GaAs практически не изменяет свойств последней, и, в частности, для всех значений  $N_{\text{Sn}}$  оказывается справедливым соотношение  $N_S < N_{\text{Sn}}$ . Кроме того, в

силу малой концентрации РО среднее расстояние между отдельными РО оказывается больше величины  $R_{av}$ , т.е. РО оказываются изолированными (их ДПО не перекрываются). Исходя из этих соображений и приведенных данных можно предположить, что при малых дозах облучения: а) формирование РО происходит в основном на квазихимической стадии (аккомодационные процессы практически не влияют на формирование РО), б) рост величины  $R_{av}$  при увеличении уровня легирования обусловлен эффективным взаимодействием вытесненных из каскада ТД с атомами  $\text{Sn}_{\text{Ga}}$  с образованием ДПК. Анализ рис. 2 показывает, что в РО увеличивается содержание  $\text{As}_i$  и Sn. При увеличении дозы облучения, с одной стороны, возрастает величина  $N^*$ , и при определенном значении  $\Phi_n$  РО уже нельзя рассматривать как изолированные (т.е. их ДПО начинают перекрываться), вследствие чего должно наблюдаться уменьшение величины  $R_{av}$ . С другой стороны, рост  $\Phi_n$  приводит к увеличению  $N_S$ , так что для данного значения  $N_{\text{Sn}}$  становится справедливым условие  $N_S > N_{\text{Sn}}$ , и возможен рост  $R_{av}$  вследствие декорирования ТД, генерируемых в матрице. Как видно из приведенных дозовых зависи-



**Рис. 2.** Зависимости отношения  $I/I_0$  интегральных интенсивностей квазизапрещенных рентгеновских рефлексов (200), измеренных в облученных  $I$  и исходном  $I_0$  кристаллах, от дозы облучения и уровня легирования. Обозначения те же, что и на рис. 1.

мостей  $R_{av}$ , при максимальном значении  $N_{Sn}$ , когда  $R_{av}$  изолированной РО максимален, увеличение  $\Phi_n$  приводит к перекрытию РО и к падению значения величины  $R_{av}$ . При минимальном уровне легирования и, соответственно, минимальном значении  $R_{av}$  изолированной РО увеличение дозовой нагрузки приводит к возрастанию  $R_{av}$  вследствие аккомодационных процессов до тех пор, пока РО остаются изолированными. При  $\Phi_n > 10^{16}$  н/см<sup>2</sup> перекрытие ДПО оказывается доминирующим фактором, и для всех образцов независимо от величины  $N_{Sn}$  наблюдается уменьшение эффективного размера РО.

Важно отметить тот факт, что в образцах GaAs с разным типом проводимости, но одинаковой концентрацией легирующей примеси ( $N_{Sn} = N_{Zn}$ ) наблюдается практически одинаковый характер изменения величины  $R_{av}$  с дозой облучения  $\Phi_n$  (рис. 1), что также свидетельствует о роли атомов легирующей примеси в качестве эффективных стоков для ТД в процессе формирования РО.

Таким образом образующиеся при облучении быстрыми нейтронами радиационные дефекты нельзя отнести к чисто вакансионным дефектам. Вероятнее всего, в нашем случае образуются комплексы вакансий и межузельных атомов, а также комплексы из первичных дефектов с технологическими (легирующими) примесями в областях разупорядочения. Наиболее существенные изменения в системе точечных дефектов происходят при дозе  $10^{16}$  см<sup>-2</sup> (рис. 2). Причем эти изменения тем больше, чем ниже уровень легирования кристаллов. Рост размеров РО также наблюдается до значений дозы облучения  $10^{16}$  см<sup>-2</sup>, а дальнейшее ограничение в размерах связано с перекрытием полей деформаций от различных ДПО.

## Список литературы

- [1] Н.А. Ухин. *Радиационная физика неметаллических кристаллов* (Киев, Наук. думка, 1971).
- [2] А.И. Баранов, С.С. Смирнов. ФТП, **7**, 2227 (1973).
- [3] В.Л. Винецкий, Г.А. Холодарь. *Радиационная физика полупроводников* (Киев, Наук. думка, 1979).
- [4] М.Я. Скороход, А.Н. Гуреев, Л.И. Даценко. УФЖ, **18**, 1860 (1973).
- [5] Л.И. Даценко. УФЖ, **24**, 1306 (1979).
- [6] P.H. Dedericks. Phys. Rev., B, **1**, 1306 (1970).
- [7] I. Fujimoto. Jap. J. Appl. Phys., **25**, 291 (1986).

Редактор В.В. Чалдышев

## On the influence of a dopant on the mechanism of formation of disordered regions in GaAs under bombardment by fast neutrons

V.P. Klad'ko, S.V. Plyatsko

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

**Abstract** The influence of neutron irradiation dose and impurity type and concentration on disordered regions was studied by X-ray technique. The role of impurities on formation of the disordered region and its evolution under different irradiation doses was analyzed.