

ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЕ В n -InP ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ОБЛУЧЕНИЯ

Козловский В. В., Кольченко Т. И., Ломако В. М., Мороз С. Е.

Методом емкостной спектроскопии исследовано влияние температуры облучения в интервале 25—250 °С на эффективность образования электронных ловушек в InP с $n_0 \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Показано, что при повышении температуры облучения скорость введения большинства глубоких уровней, а также скорость удаления носителей заряда уменьшаются, что объясняется отжигом дефектов, протекающим одновременно с облучением. Вместе с тем при $T_{\text{обл}} \geq 200 \text{ °С}$ наблюдались быстрый рост эффективности образования донорного центра $E5$ ($E_a = 0.60 \text{ эВ}$), обусловленный изменением зарядового состояния одного из первичных дефектов решетки InP, а также образование нового центра $ET1$ ($E_a = 0.16 \text{ эВ}$).

Экспериментальные исследования зависимостей скоростей введения глубоких центров от температуры облучения представляют значительный интерес, так как они могут дать информацию об изменении зарядовых состояний дефектов решетки, наличии энергетических барьеров комплексообразования, перекатке компонентов одних дефектных комплексов в другие и т. д. Кроме того, высокотемпературное облучение является одним из перспективных методов технологической обработки полупроводниковых материалов [1, 2], практическое использование которого требует знания особенностей дефектообразования при повышенных температурах облучения. Экспериментальные данные о влиянии высокотемпературного облучения на эффективность образования глубоких центров в InP в литературе, по-видимому, отсутствуют.

В настоящей работе с помощью метода нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (НЕСГУ) исследовалось влияние температуры облучения на эффективность образования электронных ловушек в n -InP. Использовались структуры с барьером Шоттки на основе эпитаксиального фосфида индия с концентрацией электронов $n_0 = (7 \div 10) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Импульсное облучение электронами с $E = 900 \text{ кэВ}$ ($\tau_{\text{имп}} = 370 \text{ мкс}$, $f = 450 \text{ Гц}$) проводилось в интервале температур 25—250 °С. Доза облучения составляла $\Phi = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, средняя по времени интенсивность потока электронов $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Образцы, облученные при комнатной температуре (к. т.), подвергались затем изохронному отжигу в интервале температур 50—300 °С. Концентрация носителей заряда в пленках, подвергнутых облучению и отжигу, определялась $C-V$ -методом при 78 К.

После облучения образцов при комнатной температуре в спектре присутствовали характерные глубокие уровни $E1-E6$ [3] (рис. 1, а). При повышении температуры облучения в спектре НЕСГУ наблюдались существенные изменения (рис. 1, б, в), в частности исчезали центры $E2$ (0.2 эВ) и $E6$ (0.7 эВ), и после облучения при $T = 250 \text{ °С}$ наблюдался новый, ранее в литературе не описанный центр $ET1$, имеющий параметры эмиссии $E_a = 0.16 \text{ эВ}$, $\sigma_{\infty} = 3.3 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2$. Подробная информация о температурной зависимости эффективности образования центров $E1-E6$ и концентрации удаленных облучением носителей заряда $\Delta n = n_0 - n(T_{\text{обл}})$ представлена на рис. 2 [здесь $n(T_{\text{обл}})$ — концентрация носителей заряда в пленках после облучения]. Видно, что уже при $T_{\text{обл}} = 50 \text{ °С}$ практически не образуется доминирующий центр $E6$ и резко уменьшается эффективность образования центра $E2$. При $T_{\text{обл}} > 150 \text{ °С}$ уменьшается эффектив-

ность образования центров $E1$ и $E4$ и начинается быстрый рост концентрации центра $E5$ (0.60 эВ). Центр $ET1$ начинает формироваться при $T_{обл} \geq 200$ °С.

На рис. 3 для сравнения приведены результаты изохронного отжига образцов, облученных при комнатной температуре. Сопоставление данных, приведенных на рис. 2 и 3, позволяет сделать следующие выводы.

1. Характер изменений величин Δn и N_T для всех центров, кроме $E5$ и $ET1$, при высокотемпературном облучении и отжиге аналогичен. Основной эффект заключается в снижении концентрации ловушек и соответствующего значения Δn .

2. Зависимости $N_T(T_{обл})$ для центров $E1-E4$, $E6$ сдвинуты в сторону более низких температур по сравнению с зависимостями $N_T(T_{отж})$. Особенно сильный сдвиг наблюдается для центра $E2$ — около 80 °С. Причины такого сдвига в на-

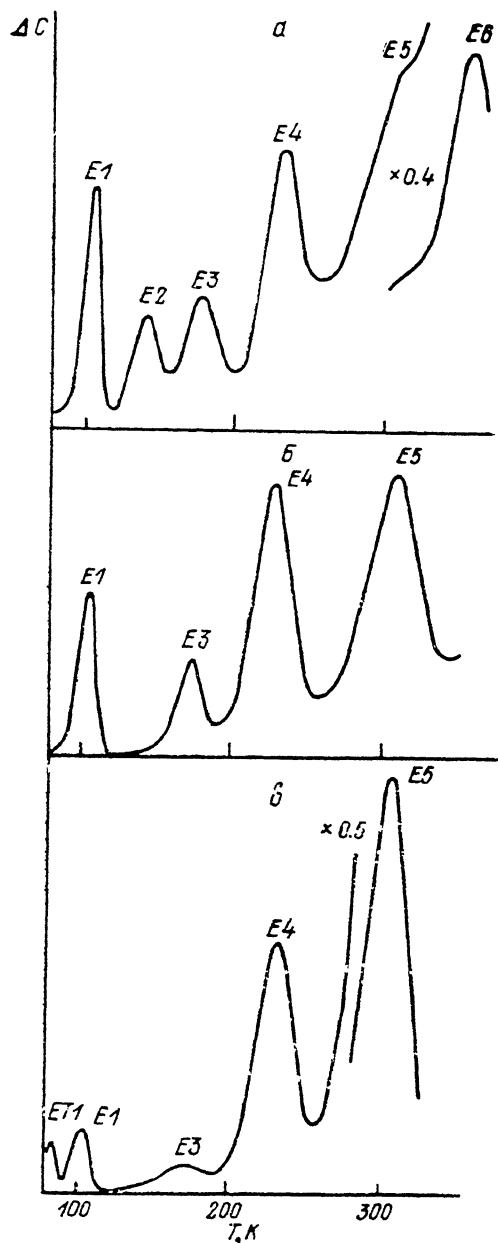


Рис. 1. Спектры НЕСГУ образцов n -InP, облученных при различных температурах ($e_n = 847$ с $^{-1}$).

$T_{обл}$, °С: а — комнатная, б — 100, в — 250.

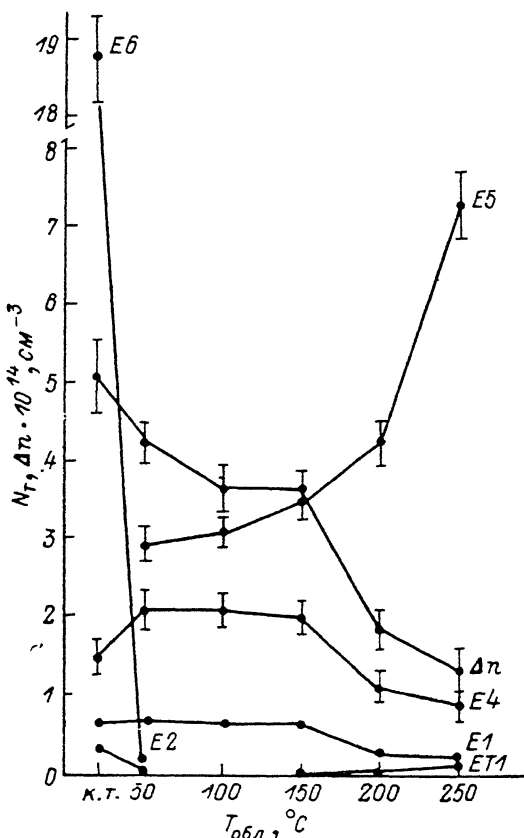


Рис. 2. Зависимость концентрации введенных облучением глубоких центров $E1-E6$ и концентрации удаленных носителей заряда Δn от температуры облучения.

стоящее время не вполне ясны, хотя в случае центра $E6$ можно предположить, что происходит ускорение отжига за счет сопутствующей облучению ионизации кристалла, поскольку, согласно [4], центр $E6$ ($E10$ в обозначениях [4]) испытывает инжекционный отжиг.

3. На зависимостях $\Delta n(T_{обл})$ и $\Delta n(T_{отж})$ можно выделить две стадии, первая из которых согласуется с исчезновением центра $E2$, а вторая — с уменьшением концентраций ловушек $E1$, $E4$ (многозарядного M -центра [3]).

4. Новый центр $ET1$ наблюдается только после облучения при повышенных температурах ($T_{обл} \geq 200^\circ\text{C}$). В случае облучения при комнатной температуре и последующего отжига до 300°C этот центр не образуется.]

5. Зависимости N_T ($T_{обл}$) и N_T ($T_{отж}$) для центра $E5$ носят противоположный характер. Если при отжиге концентрация $E5$ уменьшается примерно на 30 %, то в случае облучения при повышенных температурах эффективность его образования значительно возрастает (более чем в 3.5 раза). Отметим, что в случае облучения при $T \geq 200^\circ\text{C}$ концентрация центра $E5$ в несколько раз превышает концентрацию удаленных носителей заряда. Этот факт указывает на донорный характер центра $E5$.

Существенное возрастание вероятности образования центров $ET1$ и $E5$ при высокотемпературном облучении может быть в принципе обусловлено наличием энергетического барьера для их образования, который преодолевается при $T_{обл} \geq 200^\circ\text{C}$. Однако при учете одного этого фактора трудно объяснить сравнительно высокую и слабо зависящую от температуры облучения в интервале 50 —

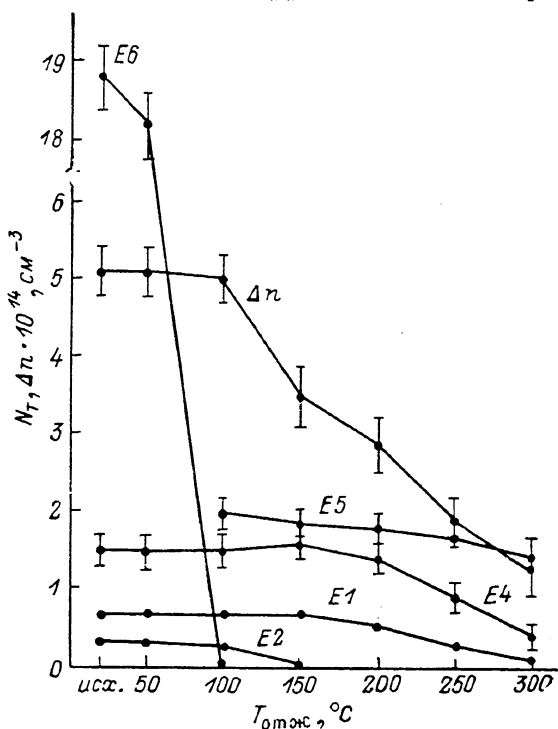
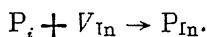


Рис. 3. Изменение концентрации введенных облучением при комнатной температуре глубоких центров и концентрации удаленных носителей заряда в ходе изохронного отжига ($\Delta t = 10$ мин).

200°C эффективность образования центра $E5$. Второй наиболее вероятной причиной наблюдаемых явлений может быть изменение зарядовых состояний реагирующих дефектов вследствие перемещения уровня Ферми с температурой. Действительно, ранее в результате исследований накопления [6, 7] и отжига [8] радиационных дефектов в области объемного пространственного заряда барьеров Шоттки было установлено, что вероятность образования центра $E5$ зависит от зарядового состояния одной из составляющих этого комплекса. Как показано в [7], эта компонента представляет собой высокоподвижный дефект в подрешетке фосфора D (P), характеризующийся энергетическим уровнем $E_c - 0.3$ эВ. Переход дефекта D (P) из нулевого состояния в положительное зарядовое приводит к увеличению вероятности образования центра $E5$ по меньшей мере на порядок величины. В случае высокотемпературного облучения, как видно из рис. 2, быстрый рост эффективности образования центра $E5$ начинается при $T_{обл} = 200$ — 250°C . При этой температуре в образцах с $n_0 = 7 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ уровень Ферми находится на 0.3 эВ ниже дна зоны проводимости. Таким образом, в случае высокотемпературного облучения, как и в [7], эффективность образования центра $E5$ изменяется при пересечении квазиуровнем Ферми уровня $E_c - 0.3$ эВ, который, согласно [7], может соответствовать переходу междоузельного атома фосфора из нулевого состояния в положительное зарядовое. В [7] был приведен ряд доводов, указывающих на связь донорного центра $E5$ с антипозиционным дефектом P_{In} , который может формироваться с участием междоузельных атомов фосфора по реакции



Таким образом, основные изменения характера дефектообразования в n - InP при повышенных температурах облучения обусловлены изменением зарядового

состояния одного из первичных дефектов решетке InP (по-видимому, междоузельного атома фосфора) и протекающим одновременно с облучением отжигом дефектов.

Список литературы

- [1] Газаринов Ю. Н., Козловский В. В., Ломасов В. Н., Шустров Б. А., Ярмаркин В. К. // Электрон. техника. Сер. 7. ТОПО. 1981. № 1. С. 3—8.
- [2] Болотов В. В., Васильев А. В., Смирнов Л. С. // Физические основы радиационной технологии твердотельных электронных приборов. Киев, 1978. С. 9—24.
- [3] Кольченко Т. И., Ломако В. М., Мороз С. Е. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 6. С. 1075—1078.
- [4] Benton J. L., Levinson M., Macrander A. T., Temkin H., Kimerling L. C. // Appl. Phys. Lett. 1984. V. 45. N 5. P. 566—568.
- [5] Кольченко Т. И., Ломако В. М., Мороз С. Е. // ЖПС. 1989. Т. 50. В. 1. С. 136—138.
- [6] Бакин Н. Н., Брудный В. Н., Пешев В. В., Смородинов С. В. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 5. С. 890—892.
- [7] Мороз С. Е. // Деп. ВИНТИ АН СССР. Томск, 1989. № 7361-B89.
- [8] Кольченко Т. И., Ломако В. М., Мороз С. Е. // Деп. ВИНТИ АН СССР. Томск, 1988. № 755-B88.

Научно-исследовательский институт
прикладных физических проблем
им. А. Н. Севченко при БГУ им. В. И. Ленина
Минск

Получена 6.09.1990
Принята к печати 9.10.1990