

- [1] Берг А., Дин П. Светодиоды. М., 1979. 688 с.
 [2] Алфёров Ж. И., Гарбузов Д. З., Конников С. Г., Кошнев П. С., Мишурный В. А., Румянцев В. Д., Третьяков Д. Н. // ФТП. 1973. Т. 7. В. 3. С. 624—627.
 [3] Muller H.-J. // Phys. St. Sol. (b). 1985. V. 132. N 2. P. 607—617.
 [4] Крутоголов Ю. К., Горшков В. П., Бондарь С. А., Лебедева Л. В., Стрельченко С. С. // ФТП. 1980. Т. 14. В. 7. С. 1281—1286.
 [5] Уханов Ю. И. Оптические свойства полупроводников. М., 1977. 368 с.
 [6] Крутоголов Ю. К., Довженко С. В., Крутоголова Л. И., Пилипенко А. В. // ЖПС. 1988. Т. 48. В. 5. С. 866—867.
 [7] Nelson R. J., Holonyak N., Jr. // J. Phys. Chem. Sol. 1976. V. 37. N 6. P. 629—637.
 [8] Pitt G. D., Vyas M. K. R., Mabbitt A. W. // Sol. St. Commun. 1974. V. 14. N 7. P. 621—625.
 [9] Auvergne D., Merle P., Methieu H. // Sol. St. Commun. 1977. V. 21. N 5. P. 437—439.
 [10] Вавилов В. С., Ермаков О. Н., Игнаткина Р. С., Сушков В. П., Чукичев М. В. // ФТП. 1977. Т. 11. В. 11. С. 2089—2094.
 [11] Onton A., Lorenz M. B., Reuter W. // J. Appl. Phys. 1971. V. 42. N 9. P. 3420—3432.

Получено 11.07.1988

Принято к печати 3.01.1989

ФТП, том 23, вып. 5, 1989

**ОБРАЗОВАНИЕ ЦЕНТРОВ $E10$ ($E_c - 0.62$ эВ)
 В ОБЛАСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА
 И НЕЙТРАЛЬНОМ ОБЪЕМЕ n -InP
 ПРИ ЭЛЕКТРОННОМ И γ -ОБЛУЧЕНИЯХ**

Бакин Н. Н., Брудный В. Н., Пешев В. В., Смородинов С. В.

Известно, что зарядовое состояние дефектов может оказывать влияние на вероятность разделения пар Френкеля, величину энергии миграции дефектов, высоту потенциального барьера для образования комплексов и, следовательно, на скорость накопления радиационных дефектов [1]. Так, в [2] путем сравнения спектров нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (НЕСГУ) диодов, облученных при нулевом и обратном смещениях, было установлено влияние зарядового состояния на накопление центров $E3$ ($E_c - 0.33$ эВ) в GaAs. Экспериментальные данные о влиянии зарядового состояния дефектов на накопление радиационных дефектов в InP в настоящее время отсутствуют.

Целью настоящей работы являлось изучение накопления радиационных дефектов в InP-диодах с барьером Шоттки, облученных при нулевом и обратном напряжениях смещения. Образцы представляли собой слои n -InP, выращенные методом газотранспортной эпитаксии, с концентрацией носителей заряда $2 \cdot 10^{15}$ см⁻³. Облучение проводилось в γ -контуре реактора на медленных нейтронах при интенсивности $1.7 \cdot 10^{12}$ кв/см²·с. Температура образцов при облучении находилась в пределах 50—70 °С. Интегральный поток составлял $D = 1.2 \cdot 10^{17}$ кв/см². Облучение проводилось также электронами с $E = 4$ МэВ на импульсном ускорителе при температуре (65 ± 5) °С. Плотность тока электронов в импульсе и длительность импульса составляли 5.2 мкА/см² и 5 мкс соответственно. Интенсивность облучения выбрана такой, чтобы область пространственного заряда (ОПЗ), заданная напряжением смещения, не сжималась во время импульса облучения. Интегральный поток электронов составлял $2.4 \cdot 10^{14}$ см⁻². Измерения концентрации глубоких центров проводились методом НЕСГУ.

В исходных диодах наблюдались две основные ловушки электронов A ($E_c - 0.37$ эВ) и B ($E_c - 0.55$ эВ), концентрации которых составляли $1.5 \cdot 10^{14}$ и $1 \cdot 10^{14}$ см⁻³ соответственно (рис. 1, кривые 1, 4). После облучения γ -квантами наряду с другими пиками радиационного происхождения в спектрах НЕСГУ

появлялся пик при $T=294$ К (рис. 1). Энергия активации термоэмиссии электронов с этого центра определялась на образцах, обратно смещенных при облучении. При этом длительность заполняющего импульса уменьшалась до 0.1 мкс, чтобы сделать данный пик доминирующим по отношению к пику B . Энергия активации, определенная таким образом, равна (0.62 ± 0.01) эВ, что соответствует центрам $E10$ в обозначениях [3] и $E5$ в обозначениях [4]. Из сравнения кривых 2 (или 3) и 5 видно, что концентрация центров $E10$ в ОПЗ значительно больше, чем в нейтральном объеме (НО).

Согласно имеющимся данным [3], центр $E10$ является сложным (вторичным) дефектом, который формируется при температурах около 340 К. Поэтому увеличение эффективности накопления центров $E10$ в ОПЗ при $T_{061} = 50 \div 70$ °С по сравнению с НО мы связали с уменьшением барьера комплексообразования

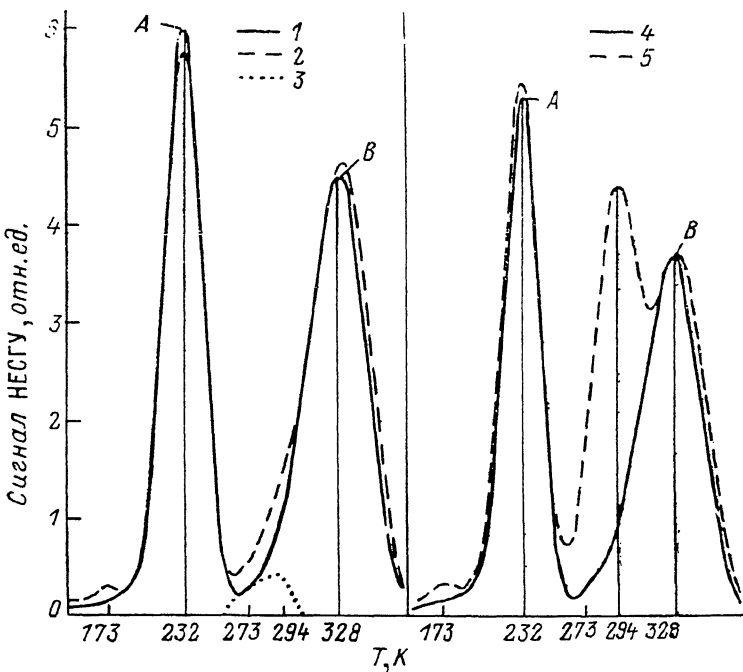


Рис. 1. Спектры НЕСГУ.

1 — до облучения, 2 — после облучения при $U=0$ В, 3 — результат вычитания 1 из 2 в области пика $E10$, 4 — до облучения, 5 — после облучения при $U=-9.8$ В. $D=1.2 \cdot 10^{17}$ кв/см². Временное окно $t_1/t_2 = 1970/9970$ [мкс/мкс], напряжение смещения 4 В, амплитуда заполняющего импульса 4 В.

данного сложного дефекта. Можно предположить следующую модель центра $E10$: компонент разделенной пары Френкеля, подвижный при температуре облучения, — неподвижный дефект до- или радиационного происхождения. Если предположить, что таким компонентом является междоузельный атом (I) — донор с глубоким уровнем, а стоком — мелкий акцептор (X), то можно рассмотреть следующие зарядовые состояния этих дефектов: в ОПЗ и НО — X^- , стационарные зарядовые состояния для междоузельного атома в НО — I^0 , в ОПЗ — I^+ . Предполагается при этом, что времена установления стационарных зарядовых состояний глубокого донора меньше времени его диффузии к стоку. В этой модели барьер для образования комплекса ($I^+ - X^-$) в ОПЗ меньше, чем для комплекса ($I^0 - X^-$), вследствие кулоновского взаимодействия в паре.

Если исходить из данной модели, то профиль концентрации центров $E10$ в образце, обратно смещенном при облучении, должен иметь ступенчатый характер, а координатой скачка концентрации должна быть точка пересечения квазиуровня Ферми для электронов с уровнем глубокого донора. На рис. 2 представлены профили концентрации мелких доноров, центров $E10$ и ловушек B в образце, облученном при $U=-9.8$ В. Видно, что профиль концентрации центров $E10$ имеет ступенчатый характер, а скорость накопления цен-

тров $E10$ не зависит от напряженности электрического поля в ОПЗ (профиль концентрации этих дефектов в значительной части ОПЗ является однородным). Скорость накопления центров $E10$ в НО равна $1.8 \cdot 10^{-4}$ см $^{-1}$, что согласуется с данными [4]. Для ОПЗ скорость в 7.9 раза больше и равна $1.42 \cdot 10^{-3}$ см $^{-1}$.

Характер профиля концентрации центров $E10$ не изменится, если зарядовое состояние будет оказывать влияние на накопление вторичных дефектов также

на стадии разделения пар Френкеля, т. е. если увеличение скорости накопления комплексов в ОПЗ происходит за счет увеличения скорости образования изолированных I . В этом случае с увеличением энергии атомов отдачи влияние зарядового состояния радиационного дефекта на образование комплексов должно уменьшаться. Нами было проведено облучение InP электронами с $E=4$ МэВ. При переходе от γ -квантов к облучению электронами энергия ато-

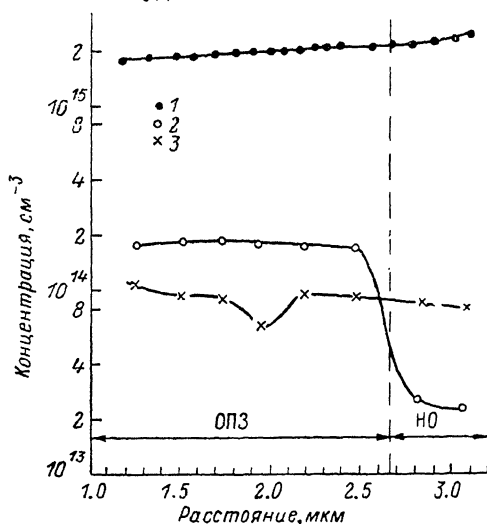


Рис. 2. Профили концентрации мелких доноров (1), центров $E10$ (2), ловушек B (3) в образце, облученном при $U=-9.8$ В.

мов отдачи увеличивается. Скорости накопления центров $E10$ в НО и ОПЗ при электронном облучении равны 0.13 и 0.78 см $^{-1}$, а их отношение, равное 6, близко к значению, полученному при γ -облучении, т. е. зарядовое состояние дефектов оказывает влияние на накопление центров $E10$ в основном на стадии объединения с X -дефектом.

Таким образом, установлена высокая скорость накопления центров $E10$ ($E_c=0.62$ эВ) в ОПЗ по сравнению с НО при электронном и γ -облучениях n -InP.

Список литературы

- [1] Емцев В. В., Машовец Т. В. Примеси и точечные дефекты в полупроводниках. М., 1981. 248 с.
- [2] Брудный В. Н., Пешев В. В., Притулов А. М. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 6. С. 1124—1126.
- [3] Suski J., Sibille A., Bourgoin J. // Sol. St. Commun. 1984. V. 49. N 9. P. 875—878.
- [4] Кольченко Т. И., Ломачко В. М., Мороз С. Е. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 6. С. 1075—1078.

Сибирский физико-технический институт
им. В. Д. Кузнецова при ТГУ
Томск

Получено 28.07.1988
Принято к печати 3.01.1989

ФТП, том 23, вып. 5, 1989

ИОННО-СТИМУЛИРОВАННОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ GaAs

Аброян И. А., Беляков В. С., Крысов Г. А., Титов А. И.

Облучение ионами монокристаллических полупроводниковых подложек с аморфными слоями (АС) на поверхности позволяет перевести их в кристаллическое состояние при температурах, существенно более низких, чем температура обычной термической кристаллизации (см., например, [1-4]). Такая ионно-стимулированная эпитаксиальная твердофазная кристаллизация