

УДК 621.315.592

УМЕНЬШЕНИЕ СТЕПЕНИ КОМПЕНСАЦИИ ПРОВОДИМОСТИ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЯХ n -InP ПРИ ОБЛУЧЕНИИ БЫСТРЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

Н. Б. Пышная, И. М. Тигиняну, В. В. Урсаки

Институт прикладной физики Академии наук Молдовы, 277028, Кишинев. Молдова
(Получена 15 марта 1993 г. Принята к печати 1 апреля 1993 г.)

Исследованы температурные зависимости электрических параметров чистых эпитаксиальных слоев InP (концентрация электронов $n = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ при 300 К) до и после облучения быстрыми электронами (энергия электронов $E = 3.5\text{--}4$ МэВ). Обнаружено уменьшение степени компенсации проводимости с ростом дозы облучения в интервале $1 \cdot 10^{15} \div 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, в то время как энергия активации проводимости слоев увеличивается от 0.33 до 0.41 эВ. Выявленные закономерности объясняются преимущественным накоплением в решетке InP при электронном облучении радиационного дефекта донорного типа с энергией ионизации ≈ 0.4 эВ.

При радиационной обработке фосфида индия электронами и протонами происходит уменьшение концентрации свободных носителей заряда в образцах обоих типов проводимости, что при больших дозах облучения проявляется в закреплении уровня Ферми на энергии $E_c - 0.4$ эВ (так называемый эффект пиннинга [$1\text{--}3$]). В результате исследования электрических и оптических характеристик, облученных электронами монокристаллов n -InP и p -InP, выяснено, что закрепление уровня Ферми вызвано присутствием в материале радиационного дефекта донорного типа, ответственного за полосу люминесценции с максимумом при 0.99 эВ [3]. Был предложен ряд моделей для объяснения пиннинга в InP, включающих теорию самокомпенсации проводимости в широкозонных материалах [$4, 5$] и предположение об образовании приблизительно равных количеств радиационных доноров и акцепторов с энергетическими уровнями, лежащими вблизи $E_c - 0.4$ эВ [1]. Очевидно, что для интерпретации особенностей механизма переноса в облученных электронами кристаллах необходимо получить информацию о темпах накопления доминирующих радиационных доноров (RD) и акцепторов (RA). В случае фосфида индия такая информация может быть получена из анализа температурной зависимости электрических параметров исходных и облученных электронами кристаллов.

В данной работе такие исследования проведены на специально не легированных эпитаксиальных слоях n -InP с ориентацией (100) и толщиной ≈ 10 мкм, полученных методом хлоридно-гидридного осаждения из газовой фазы на полуизолирующие подложки [6]. При температуре $T = 77$ К концентрация электронов в слоях составляла $n = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, подвижность $\mu = 7.8 \cdot 10^4 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$. Облучение электронами при дозах $D = 1 \cdot 10^5 \div 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ (энергия электронов $E = 3.5 \div 4$ МэВ) проводилось при комнатной температуре. Электрические параметры определялись путем измерения эффекта Холла ме-

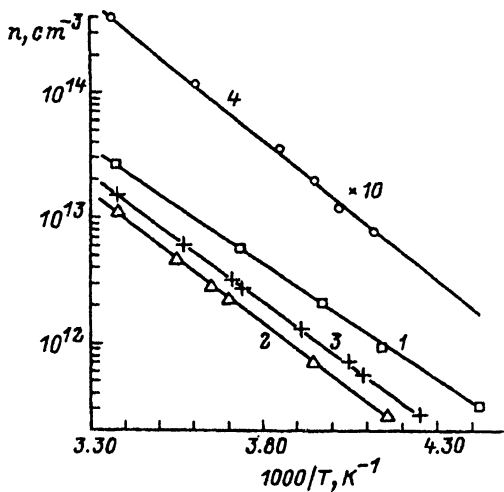


Рис. 1. Температурная зависимость концентрации электронов n в эпитаксиальных слоях n -InP после облучения электронами. Дозы облучения D , см^{-2} : 1 — 10^{15} ; 2 — 10^{16} ; 3 — $3 \cdot 10^{16}$; 4 — 10^{17} .

тодом Ван-дер-Пау. До проведения измерений облученные электронами образцы выдерживались при комнатной температуре в течение 2÷3 недель.

На рис. 1 приведены температурные зависимости концентрации свободных носителей тока в облученных электронами слоях n -InP. Сплошные линии на рис. 1 получены в результате численного решения уравнения электронейтральности

$$N_{0d} + \frac{N_{rd}}{1 + 2 \exp(-E_d/kT)} + p = n + N_a, \quad (1)$$

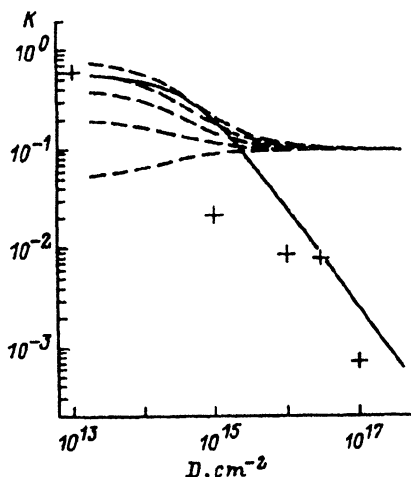
где N_{0d} — концентрация донорных центров в образцах до облучения, N_{rd} — концентрация доминирующего донорного радиационного дефекта, N_a — полная концентрация акцепторных центров, E_d — энергия активации проводимости в облученных образцах. Поскольку все кривые в интервале температур $77 \div 300$ К соответствуют областям ионизации глубоких центров (при измерениях температура образцов не превышала температуру хранения, т. е. 300 К, что позволяло многократно перепроверять данные), то подгонка зависимостей $n = f(T)$ проводилась по двум параметрам: энергии активации E_d и степени компенсации проводимости $K = N_a / (N_{0d} + N_{rd})$. Полученный ряд пар значений K и E_d представлен в таблице (значения K для исходных образцов определялись из анализа температурной зависимости подвижности по методике, описанной в [7]). Обнаруженный здесь факт уменьшения степени компенсации K с ростом дозы облучения определенно указывает на неприменимость моделей [1, 4, 5] для объяснения эффекта пиннинга в InP.

Отмеченная особенность поведения степени компенсации в InP при облучении электронами позволяет сделать некоторые предположения о механизме

Параметры слоев n -InP до и после облучения электронами

| D , см^{-2} | 0 | $1 \cdot 10^{15}$ | $1 \cdot 10^{16}$ | $3 \cdot 10^{16}$ | $1 \cdot 10^{17}$ |
|--|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| n , см^{-3} ($T = 300$ К) | $2.1 \cdot 10^{14}$ | $2.6 \cdot 10^{13}$ | $1.1 \cdot 10^{13}$ | $1.5 \cdot 10^{13}$ | $3.9 \cdot 10^{13}$ |
| K | 0.600 | 0.0219 | $8.8 \cdot 10^{-3}$ | $8.0 \cdot 10^{-3}$ | $7.7 \cdot 10^{-4}$ |
| E_d , эВ | — | 0.330 | 0.369 | 0.380 | 0.410 |

Рис. 2. Зависимость степени компенсации проводимости K от дозы облучения электронами: точки — эксперимент; штриховая линия — расчет по (2) при нескольких значениях отношений N_{0a}/N_{0d} ; сплошная линия — расчет по (3) при $N_{0a} = 2.6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $N_{0d} = 4.6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$; $V_a = 0.1 \text{ см}^{-1}$; $V_d = 1 \text{ см}^{-1}$.



дефектообразования в InP при взаимодействии с быстрыми электронами, поскольку, во-первых, создаются наиболее стабильные условия для наблюдения пиннинга, а во-вторых, такое взаимодействие удобно для модельного анализа, поскольку, согласно [8], его результатом является выраженное доминирование в ансамбле радиационных дефектов простых френкелевских пар.

Если скорости введения радиационных дефектов донорного и акцепторного типа равны соответственно V_d и V_a , то полные концентрации доноров и акцепторов (при отсутствии взаимодействия между центрами) будут расти с дозой облучения D , согласно соотношениям:

$$\begin{aligned} N_a &= N_{0a} + V_a D, \\ N_d &= N_{0d} + V_d D, \end{aligned} \quad (2)$$

где N_{0a} — концентрация акцепторных центров в исходных образцах. В этом случае при больших дозах облучения зависимость $K = f(D)$ будет иметь вид, представленный на рис. 2 штриховой линией (разные кривые соответствуют различным значениям степени компенсации в исходных образцах $K_0 = N_{0a}/N_{0d}$). Обнаруженная в эксперименте тенденция изменения $K = f(D)$ указывает на асимметричный характер образования радиационных дефектов в InP. Речь идет о преимущественном накоплении в решетке дефектов донорного типа с энергией ионизации ≈ 0.4 эВ, ответственных за закрепление уровня Ферми вблизи этой энергии. Если при этом концентрация радиационных акцепторов растет при малых дозах со скоростью V_a и насыщается вблизи N_{0d} , то зависимость $K = f(D)$ может приблизительно быть описана соотношением

$$K = \frac{N_{0a}}{N_{0d} \exp(-DV_a/N_{0d}) + V_d D}, \quad (3)$$

учитывающим, с одной стороны, образование радиационных дефектов донорного типа и, с другой стороны, уменьшение концентрации мелких фоновых донорных примесей вследствие их взаимодействия с радиационными акцепторами и образования нейтральных ассоциатов [9, 10]. Результат сопоставления экспериментальных данных с аналитической кривой $K = f(D)$, полученной по формуле (3), следует из рис. 2.

На данном этапе трудно дать однозначную физическую интерпретацию обнаруженных закономерностей, однако можно показать, что эффект насыщения концентрации радиационных акцепторов, участвующих в компенсации мелких доноров, может быть реализован простыми способами. Например, если имеется значительное различие между скоростями диффузии доминирующих

радиационных доноров и акцепторов и при этом акцепторы мобильнее, то при температуре выдержки может сохраниться однородное распределение RD в толще слоя, в то время как RA , не вступившие в ассоциаты с донорами, сосредоточатся в основном в стоках, не оказывая влияния на концентрацию свободных носителей заряда в образце.

Таким образом, при электронном облучении эпитаксиальных слоев n -InP происходит уменьшение как концентрации носителей заряда в образцах, так и степени компенсации проводимости. Обнаруженные закономерности получают удовлетворительное объяснение в предположении асимметрии процессов накопления, доминирующих RA и RD . Концентрация доноров растет с постоянной скоростью V_d по крайней мере до доз порядка $4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, а начальный темп прироста электрически активных радиационных акцепторов сохраняется только до достижения ими концентраций порядка N_{0d} . При этом закрепление уровня Ферми происходит на глубине залегания доминирующего RD , а энергетическое положение RA не влияет на проявление эффекта пиннинга и вряд ли может быть определено в экспериментах в условиях термического равновесия.

Авторы выражают благодарность И. Н. Цыпленкову и В. Н. Ламму за любезно предоставленные эпитаксиальные слои n -InP, а также Н. А. Соболеву за содействие при выполнении работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] J. P. Donnelly, C. E. Hurwitz. Sol. St. Electronics, **20**, 727 (1977).
- [2] E. Yu. Brailovskii, F. K. Karapetyan, I. G. Megela, V. P. Tartachnik, Phys. St. Sol. (a), **71**, 563 (1982).
- [3] N. B. Pyshnaya, S. I. Radautsan, I. M. Tiginyanu, V. V. Ursaki, V. A. Ursu, I. M. Aliev, H. A. Halilov. Cryst. Res. Technol., **26**, K129 (1991).
- [4] В. Л. Винецкий, Л. С. Смирнов. ФТП, **5**, 176 (1971).
- [5] А. Н. Георгобиани, И. М. Тигиняну. ФТП, **22**, 3 (1988).
- [6] Л. А. Иванютин, Б. В. Кутубидзе, В. Н. Ламм, В. М. Михаэлян, В. П. Попов, И. Н. Цыпленков. Электрон. техн. сер. Материалы. Вып. 6, **20** (1981).
- [7] W. Walukiewicz, J. Lagowski, L. Jastrzebski, P. Rava, M. Lichtensteiger, C. H. Gatos, H. C. Gatos. J. Appl. Phys., **51**, 2659 (1980).
- [8] Ф. П. Коршунов, Ю. В. Богатырев, В. А. Вавилов. Воздействие радиации на интегральные микросхемы. 254. Минск (1986).
- [9] Ф. П. Коршунов, С. И. Радауцан, Н. А. Соболев, И. М. Тигиняну, В. В. Урсаки, Е. А. Кудрявцева. ФТП, **23**, 1581 (1989).
- [10] Ф. П. Коршунов, С. И. Радауцан, Н. А. Соболев, И. М. Тигиняну, Е. А. Кудрявцева, В. А. Урсу, И. Н. Цыпленков, В. Н. Ламм, В. А. Шераухов. ФТП, **24**, 2034 (1990).

Редактор Л. В. Шаронова