

Электрофизические свойства InP, облученного быстрыми нейтронами реактора

© Н.Г. Колин[¶], Д.И. Меркурисов, С.П. Соловьев*

Филиал ГНЦ "НИФХИ им. Л.Я. Карпова",
249020 Обнинск, Россия

* Институт атомной энергетики,
249020 Обнинск, Россия

(Получена 11 января 1999 г. Принята к печати 27 мая 1999 г.)

Исследована зависимость электрофизических свойств монокристаллических образцов InP с различными исходными концентрациями носителей заряда от условий облучения быстрыми нейтронами реактора и последующих термообработок в интервале температур $20 \div 900^\circ\text{C}$. Показано, что характер изменения электрофизических свойств зависит от уровня легирования исходного материала, а отжиг в указанном интервале температур приводит к полному устранению радиационных дефектов, что делает возможным применение метода ядерного легирования к образцам InP. Вклад от ядерных реакций на промежуточных нейтронах в общий уровень ядерного легирования образцов InP составляет $\sim 10\%$.

Изучению радиационных дефектов (РД) в образцах InP, вызванных облучением нейтронами, посвящено небольшое количество работ [1–5]. Практическая реализация метода ядерного легирования применительно к полупроводниковым соединениям $A^{III}B^V$ вызвала необходимость более детального изучения радиационно-физических процессов, происходящих в таких материалах под действием реакторного спектра нейтронов. Однако изучение РД в процессе ядерного легирования за счет облучения тепловыми нейтронами реактора затруднено вводимой в материал примесью. Настоящая работа посвящена изучению влияния быстрых нейтронов ядерного реактора и последующих термообработок на электрофизические свойства монокристаллов InP.

В качестве исходных использовались выращенные по методу Чохральского монокристаллические образцы InP, как нелегированные, так и легированные в процессе выращивания теллуром до различных концентраций. Все образцы имели в исходном состоянии электронный тип проводимости. Исходные электрофизические параметры образцов (концентрация носителей n , подвижность μ , удельное сопротивление ρ) представлены в таблице.

Облучение образцов InP проводилось в Cd-пеналах при температурах не выше 70°C в вертикальных каналах активной зоны реактора ВВР-ц с плотностью потока быстрых нейтронов $\varphi_f = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (энергии $E > 0.1 \text{ МэВ}$). Время облучения подбиралось таким образом, чтобы флюенсы нейтронов изменялись в диапазоне $F_f = 8 \cdot 10^{15} \div 2.27 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$. Использование Cd-пеналов предотвращало эффект ядерного легирования на тепловых нейтронах. Влияние резонансных нейтронов (энергия $E = 1.46 \text{ эВ}$, сечение реакции $\sigma = 2.2 \cdot 10^4 \text{ барн}$) устранялось путем сошлифовывания с обеих сторон облученных образцов слоя толщиной $\sim 50 \text{ мкм}$. Из-за высокой наведенной радиоактивности после облучения образцы InP выдерживались в специ-

альных боксах в течение $4 \div 18$ месяцев в зависимости от полученного флюенса. После спада наведенной радиоактивности до допустимого уровня образцы InP подвергались дезактивационной отмывке, шлифовке и травлению в растворе $\text{HNO}_3 : \text{HCl} = 3 : 1$. Электрофизические параметры образцов InP определялись из измерений по методу Ван-дер-Пау при комнатной температуре.

На рис. 1, а и 2, а приведены зависимости электрофизических параметров образцов InP с различной исходной концентрацией носителей заряда от флюенса быстрых нейтронов (F_f). Как видно, в результате образования РД концентрация (n) и подвижность (μ) носителей заряда при облучении уменьшаются. При этом, чем выше уровень легирования исходного материала, тем при больших флюенсах нейтронов начинается уменьшение n . При больших флюенсах — $F_f \geq 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ для образцов с исходной концентрацией $n = (2 \div 4) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и $F_f \geq 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ для образцов с $n = 3.9 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ — происходит увеличение концентрации электронов и проводимости с последующим выходом на насыщение в соответствии с предельным положением уровня Ферми в сильно облученных образцах InP [6]. Это, по-видимому, объясняется перекрытием оболочек областей разупорядочения и проявлением механизма прыжковой проводимости [7].

Скорость изменения подвижности носителей заряда тоже зависит от исходных значений n . При флюенсе $\sim 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ для нелегированных исходных образцов InP μ уменьшается на 80% от исходного значения, а для сильно легированных — на 92%. Это свидетельствует о том, что наличие примесей в исходном материале ускоряет спад подвижности носителей заряда в процессе облучения в указанном интервале флюенсов, но при дальнейшем росте флюенса нейтронов темп деградации μ в нелегированных образцах InP становится выше, чем в сильно легированных. При флюенсе $\sim 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ спад подвижности носителей заряда для нелегированных и сильно легированных образцов приблизительно одинаков и находится на уровне $98 \div 99\%$.

[¶] Факс: (08439) 63911
E-mail: FCI@meteo.ru

Электрофизические свойства исходных и облученных образцов InP

№ образца	Исходные образцы			Примесь	F_f , 10^{17} см^{-2}	После облучения и отжига при 900°C		
	n , 10^{17} см^{-3}	μ , $10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	ρ , $10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}$			n , 10^{17} см^{-3}	μ , $10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	ρ , $10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{см}$
1	0.18	4.20	80.00	–	0.51	0.25	6.60	3.90
2	0.18	4.20	80.00	–	5.10	1.17	2.90	1.83
3	0.18	4.20	80.00	–	50.40	11.00	1.83	0.31
4	4.00	2.80	5.60	Te	0.51	5.30	2.35	0.50
5	4.00	2.80	5.60	Te	5.10	5.80	2.75	0.39
6	4.00	2.80	5.60	Te	50.40	14.60	1.70	0.25
7	39.00	1.90	0.85	Te	0.51	35.00	1.63	0.11
8	39.00	1.90	0.85	Te	5.10	20.50	2.00	0.15
9	39.00	1.90	0.85	Te	50.40	33.00	1.54	0.12
10	0.35	3.76	–	–	0.08	0.44	3.20	4.40
11	0.35	3.76	–	–	2.74	0.51	3.50	3.50
12	0.35	3.76	–	–	5.27	0.92	3.50	2.00
13	1.80	3.03	–	Te	0.08	2.80	2.70	0.83
14	1.80	3.03	–	Te	2.74	2.30	2.75	0.99
15	1.80	3.03	–	Te	5.27	2.60	2.88	0.82
16	7.50	2.49	–	Te	0.08	7.30	2.25	0.38
17	7.50	2.49	–	Te	2.74	8.60	2.50	0.38
18	7.50	2.49	–	Te	5.27	8.90	2.10	0.33
19	7.50	2.49	–	Te	227.00	16.00	1.90	0.21

В целях изучения термической стабильности радиационных дефектов производился отжиг образцов в вакуумированных отпаянных кварцевых ампулах в течение 20 мин в интервале температур $T = 20 \div 900^\circ\text{C}$ с шагом 100°C . Изменение электрофизических параметров облученных образцов в зависимости от температуры отжига показано на рис. 1, *b* и 2, *b*. Как видно, концентрации и подвижности носителей заряда для всех исследуемых образцов увеличиваются с ростом температуры отжига и выходят на насыщение после отжига в интервале температур $T = 700 \div 900^\circ\text{C}$. Наиболее интенсивный отжиг происходит в интервале температур $300 \div 600^\circ\text{C}$ независимо от уровня легирования в исходном состоянии.

Конечное значение n зависит от исходной концентрации носителей заряда, а также от полученного флюенса нейтронов вследствие того, что, как и в других In-содержащих полупроводниковых соединениях $A^{III}B^V$, в InP за счет сильного поглощения промежуточных нейтронов, которые не отсекаются Cd-пеналом, происходит подлегирование образцов оловом по реакции: $^{115}\text{In}(n, \gamma)^{116}\text{In} \xrightarrow{\beta^-} ^{116}\text{Sn}$. Так как атомы олова образуются в подрешетке индия, они выступают в роли доноров по отношению к исходному материалу, увеличивая тем самым концентрацию свободных электронов. Об этом свидетельствуют значения n при насыщении (рис. 1, *b*, кривые 1, 3, 4), полученные после отжига образцов InP с одинаковыми исходными значениями n , облученных разными флюенсами нейтронов.

При больших флюенсах (рис. 1, *b*, кривые 4, 5, 7) и, соответственно, высоких концентрациях радиационных дефектов в интервале температур $200 \div 400^\circ\text{C}$ наблюдается участок "отрицательного отжига" концентрации

носителей заряда, что, по-видимому, как и в случае GaAs [8], связано с перестройкой мелких РД и образованием более сложных дефектов, отжигающихся при более высоких температурах.

Из рис. 2, *b* видно, что температура начала отжига μ тем ниже, чем большим флюенсом нейтронов был облучен образец и, следовательно, чем большее количество примеси олова было введено в результате ядерных реакций на промежуточных нейтронах. Отсюда следует, что наличие примесей в образцах InP способствует увеличению скоростей как образования, так и отжига РД.

Таким образом, полученные экспериментальные результаты позволяют выделить три основные стадии отжига РД в облученных быстрыми нейтронами образцах InP. I стадия ($T = 100 \div 300^\circ\text{C}$) характеризуется отжигом мелких точечных дефектов, а также образованием более сложных РД.

II стадия ($T = 300 \div 600^\circ\text{C}$) характеризуется резким увеличением как концентрации, так и подвижности носителей заряда, что свидетельствует об эффективном отжиге РД. По-видимому, как и в случае GaAs, на второй стадии происходит отжиг областей разупорядочения и более сложных РД, образованных на I стадии отжига.

Характер изменения n и μ свидетельствует о существовании в области $T = 700 \div 900^\circ\text{C}$ III стадии отжига, приводящей к выходу значений n и μ на насыщение и, по-видимому, связанной с протеканием вторичных процессов в материале.

На рис. 3 представлены зависимости концентрации носителей заряда от флюенса нейтронов для облученных образцов InP после отжига при 900°C в течение 20 мин. Кривая 1 соответствует образцам, облучавшимся в Cd-пеналах, а кривая 2 — образцам, облучавшимся

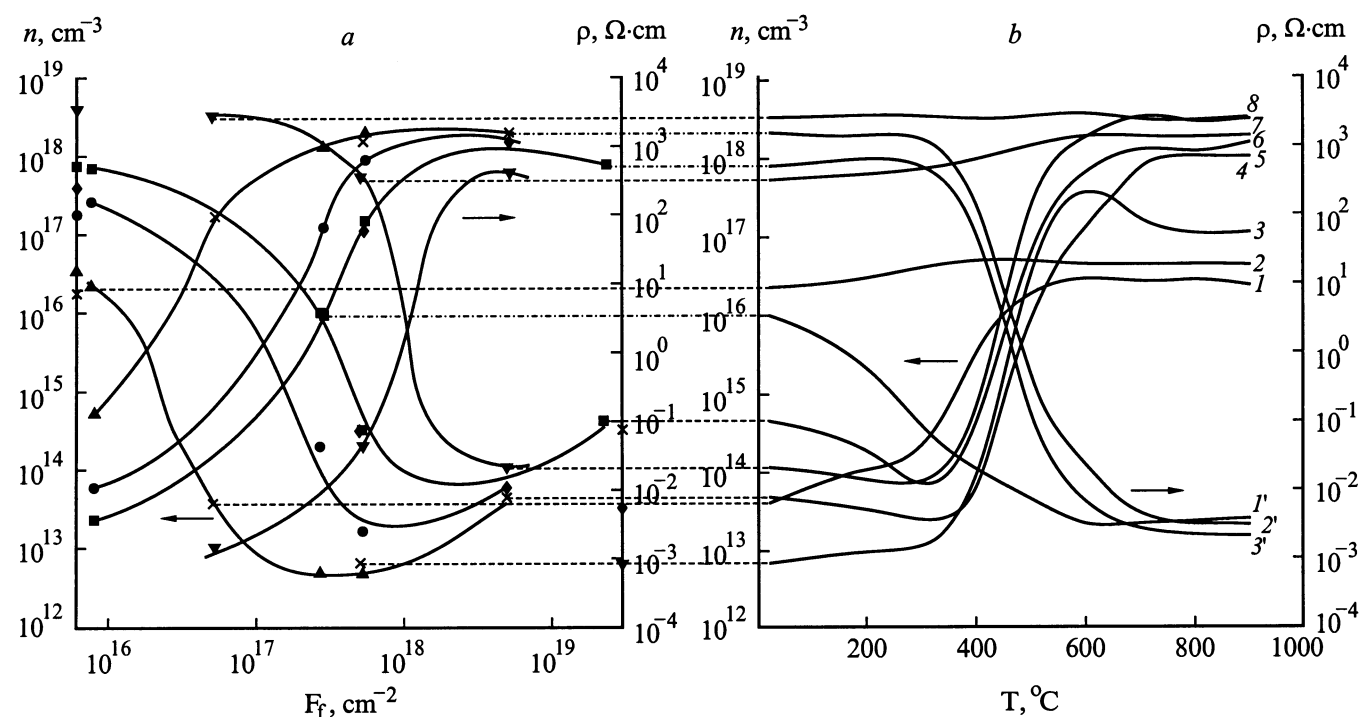


Рис. 1. Зависимости концентрации носителей заряда (n) и удельного сопротивления (ρ): a — от флюенса быстрых нейтронов (F_f) для различных образцов InP (на осях приведены исходные значения); b — от температуры отжига (T) различных образцов InP (см. таблицу) после облучения разными флюенсами быстрых нейтронов F_f , 10¹⁷ см⁻² (номер образца): 1 — 0.51 (1), 2 — 0.08 (10), 3 — 5.10 (2), 4 — 50.40 (3), 5 — 227.00 (19), 6 — 5.10 (8), 7 — 50.40 (9), 8 — 0.51 (7); 1' — 2.74 (17), 2' — 50.40 (3), 3' — 227.00 (19).

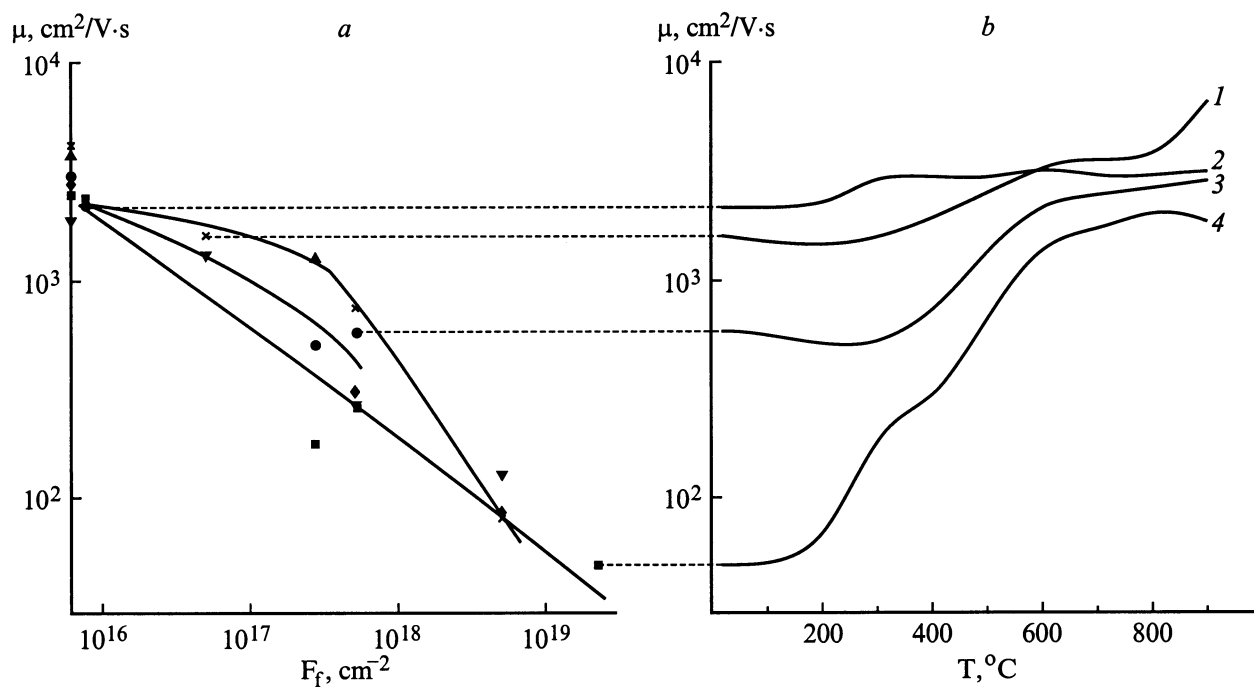


Рис. 2. Зависимость подвижности носителей заряда (μ): a — от флюенса быстрых нейтронов (F_f) для различных образцов InP (на оси приведены исходные значения); b — от температуры отжига (T) для различных образцов InP (см. таблицу) после облучения разными флюенсами быстрых нейтронов F_f , 10¹⁷ см⁻² (номер образца): 1 — 0.51 (1), 2 — 0.08 (10), 3 — 5.27 (15), 4 — 50.40 (3).

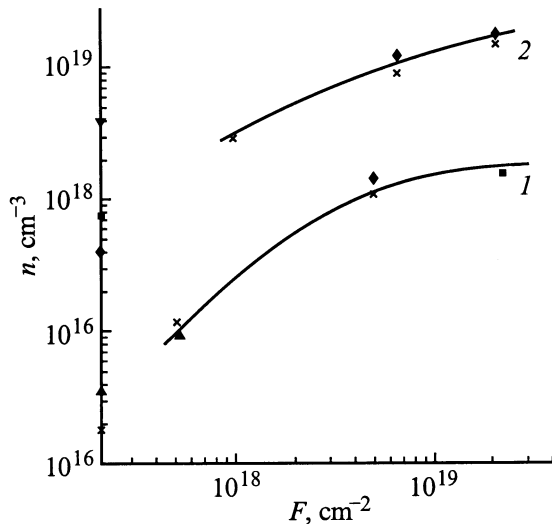


Рис. 3. Зависимость концентрации носителей заряда (n) от флюенса нейтронов (F) для образцов InP, облученных в одном и том же канале реактора ВВР-ц в Cd-пеналах (1) и без Cd-пеналов (2, ядерное легирование) и отожженных при $T = 900^\circ\text{C}$ (на оси приведены исходные значения).

в том же канале без Cd-пеналов, т.е. полным спектром реакторных нейтронов при соотношении плотностей потоков тепловых и быстрых нейтронов $\varphi_s/\varphi_f \approx 1$. Эти данные с учетом политропии при высоких концентрациях примеси подтверждают ранее сделанное заключение [9] о том, что подлегирование в In-содержащих полупроводниковых соединениях $A^{III}B^V$ за счет реакций на промежуточных нейтронах составляет порядка 10% от общего уровня ядерного легирования для образцов, облученных в каналах активной зоны реактора ВВР-ц.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- показано, что отжиг облученных нейтронами образцов InP при $T = 900^\circ\text{C}$ в течение 20 мин практически полностью устраняет радиационные дефекты, влияющие на электрофизические параметры материала, что может служить основой для практической реализации технологии ядерного легирования применительно к InP;

- уровень исходного легирования InP оказывает существенное влияние на скорость образования и отжига РД при последующем облучении нейтронами реактора;

- эффект подлегирования фосфида индия за счет ядерных реакций на промежуточных нейтронах можно описать эмпирической зависимостью $n = 0.2F_f$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и технической политики РФ в рамках ГНТП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники гражданского назначения" (проект № 045) и Ассоциации промышленников США (USIC) в рамках субконтракта № 4616510 с Национальной лабораторией США им. Лоуренса (г. Беркли, Калифорния).

Список литературы

- [1] L.W. Aukerman. In: *Semiconductors and Semimetals*, ed by R.K. Willardson, A.C. Bear (Academic Press, N.Y., 1968) v. 4. p. 343.
- [2] N.P. Kekelidze, G.P. Kekelidze. *Inst. Phys. Conf. Ser.*, **1**, 387 (1977).
- [3] V.N. Broudnyi, V.A. Charchenko, N.G. Kolin, V.A. Novikov, A.D. Pogrebnjak, Sh.M. Rusimov. *Phys. St. Sol. (a)*, **93**, 195 (1986).
- [4] B. Lee, N. Pan, G.E. Stillman, K.L. Hess. *J. Appl. Phys.*, **62**, 1129 (1987).
- [5] V.N. Broudnyi, N.G. Kolin, V.A. Novikov. *Phys. St. Sol. (a)*, **132**, 35 (1992).
- [6] В.Н. Брудный, С.Н. Гриняев. *ФТП*, **32**(3), 315 (1998).
- [7] Н.Г. Колин, Л.В. Куликова, В.Б. Освенский, С.П. Соловьев, В.А. Харченко. *ФТП*, **18**(12), 2187 (1984).
- [8] Н.Г. Колин, В.Б. Освенский, В.В. Токаревский, В.А. Харченко, С.М. Иевлев. *ФТП*, **19**(9), 1558 (1985).
- [9] Н.Г. Колин, В.Б. Освенский, Н.С. Рыгова, Е.С. Юрова. *Физика и химия обраб. материалов*, № 6, 3 (1986).

Редактор Л.В. Шаронова

Electrical properties of InP irradiated by fast neutrons of a nuclear reactor

N.G. Kolin, D.I. Mercurisov, S.P. Solov'ev*

Branch of State Research Centre
"Karpov Institute of Physical Chemistry",
249020 Obninsk, Russia

* Institute of Nuclear-Power Engineering,
249020 Obninsk, Russia

Abstract Electrophysical properties of InP single crystalline samples with different initial concentrations of charge carriers have been studied in relation to irradiation conditions with fast neutrons of a nuclear reactor and subsequent heat treatments within the temperature range of $20 \div 900^\circ\text{C}$. It has been shown that changes of the properties depend on the initial doping level and the above heat treatments give rise to elimination of radiation defects. This makes it possible to use the nuclear doping method for InP samples. In this respect the contribution of intermediate neutrons to the whole effect of the InP nuclear doping was estimated to be of 10%.