

Электрофизические свойства InSb, облученного быстрыми нейтронами реактора

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

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

*Институт атомной энергетики,
249020 Обнинск, Россия

(Получена 11 января 1999 г. Принята к печати 18 февраля 1999 г.)

Выяснено влияние быстрых нейтронов реакторного спектра на образование и отжиг радиационных дефектов и ядерное легирование монокристаллов InSb. Установлен характер изменения электрофизических свойств материала при облучении и последующих термообработках.

К настоящему времени опубликовано большое количество работ по исследованию радиационных дефектов (РД) в антимониде индия. Изучено воздействие различного вида излучений: электронов [1–3], ионов [4,5], протонов [6], нейтронов [7–10] на свойства InSb. Показано, что облучение низкоэнергетичными ($E < 5$ МэВ) электронами при комнатной температуре приводит преимущественно к образованию в материале простых радиационных дефектов в подрешетке индия и их комплексов с атомами кислорода (центры M_1 с уровнем $E_c - 0.05$ эВ), обладающих акцепторными свойствами и приводящих к конверсии $n \rightarrow p$ типа проводимости, а облучение нейтронами, протонами, ионами и высокоэнергетичными электронами создает более сложные РД — так называемые разупорядоченные области (РО) и кластеры дефектов со средним радиусом $150 \div 200 \text{ \AA}$, вызывающие конверсию $p \rightarrow n$ типа проводимости.

Отжиг сложных РД продолжается вплоть до температуры плавления, и тем самым они оказывают существенное влияние на электрофизические, оптические и структурные свойства материала, а также на эксплуатационные параметры приборов и изделий на его основе. Поэтому изучение механизмов образования и отжига РД в InSb имеет важное значение, особенно для практической реализации возможных преимуществ ядерного легирования материала. В связи с этим цель

настоящей работы заключается в выяснении влияния быстрых нейтронов реакторного спектра на образование радиационных дефектов и ядерное легирование монокристаллов InSb, а также в установлении характера изменения электрофизических свойств материала при облучении и последующих термообработках.

В качестве исходных материалов использовались монокристаллы InSb диаметром ~ 40 мм n - и p -типа проводимости, выращенные по методу Чохральского в направлении [211], легированные до разных концентраций Sn и Zn соответственно. Свойства исходных образцов представлены в таблице.

Облучение проводилось в вертикальных каналах ядерного реактора ВВР-ц в Cd-пеналах при температуре, не превышающей 70°C . Образцы 3–5 (см. таблицу) облучались в канале активной зоны с плотностью потока быстрых ($E > 0.1$ МэВ) нейтронов, равной $\varphi_f = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, а остальные — в периферийном канале с плотностью потока $\varphi_f = 7 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Время облучения выбиралось таким образом, что флюенсы быстрых нейтронов (F_f) составляли от $1.8 \cdot 10^{16}$ до $1.26 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$. Использование Cd-пеналов толщиной 1 мм предотвращало эффект ядерного легирования за счет реакций на тепловых нейтронах. Вклад резонансных нейтронов ($E = 1.46$ эВ, $\sigma = 2.2 \cdot 10^4$ барн) в ядерное легирование [11] устранялся путем сошлифовывания

№ образца	Исходные значения электрофизических параметров		Исходная легирующая примесь	Тип проводимости	Флюенс быстрых нейтронов $F_f, 10^{16} \text{ см}^{-2}$	Электрофизические параметры после облучения и отжига при $400 \div 450^\circ\text{C}$	
	$n, 10^{13} \text{ см}^{-3}$	$\mu, 10^5 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$				$n, 10^{16} \text{ см}^{-3}$	$\mu, 10^4 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$
1	8.72	6.12	Sn	n	5.00	1.00	5.60
2	8.72	6.12	Sn	n	25.00	4.00	3.40
3	31.00	4.70	Sn	n	1.80	$0.50 \div 0.60$	15.00
4	31.00	4.70	Sn	n	12.60	3.00	7.30
5	31.00	4.70	Sn	n	126.00	$50.00 \div 60.00$	1.30
6	40.00	5.00	Sn	n	5.00	1.00	6.00
7	40.00	5.00	Sn	n	25.00	6.00	5.50
8	5.50	0.01	Zn	p	5.00	1.20	4.90
9	5.50	0.01	Zn	p	25.00	5.00	8.70

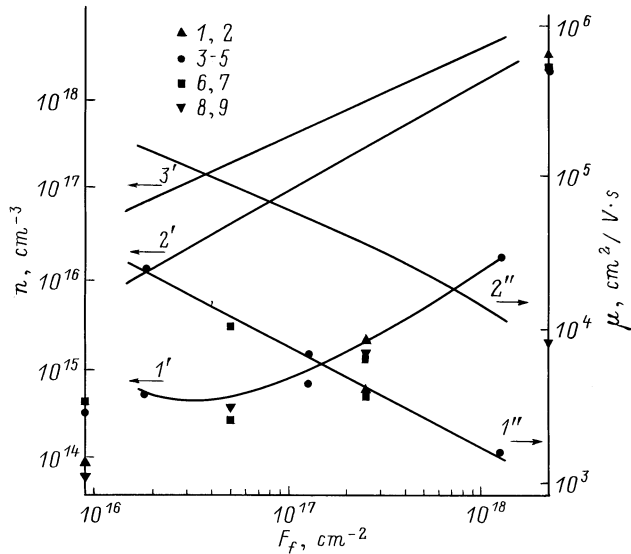


Рис. 1. Концентрация (n , кривые $1'–3'$) и подвижность (μ , кривые $1'', 2''$) носителей заряда в образцах InSb, представленных в таблице, в зависимости от флюенса быстрых нейтронов (на осях указаны исходные значения n и μ). Номера символов экспериментальных точек соответствуют номерам образцов в таблице. Зависимости измерены: $1', 1''$ — после облучения; $2', 2''$ — после облучения и термообработки при $T \approx 400 \div 450^\circ\text{C}$; $3'$ — после облучения полным спектром реакторных нейтронов (без Cd-экранов) и термообработки.

с обеих сторон облученного образца слоя толщиной не менее 50 мкм. В связи с высокой наведенной радиоактивностью перед началом работ облученные образцы выдерживались в специальных боксах от 3 ÷ 4 до 10 ÷ 12 месяцев в зависимости от флюенса нейтронов. Электрофизические параметры измерялись методом Ван-дер-Пау при температуре жидкого азота.

Зависимости концентрации (n) и подвижности (μ) носителей заряда в образцах InSb от флюенса быстрых нейтронов представлены на рис. 1 (кривые $1', 1''$). Как видно, при флюенсе нейтронов $1.8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ в образцах InSb уже произошла $p \rightarrow n$ конверсия типа проводимости, а при дальнейшем увеличении флюенса происходит линейное возрастание концентрации и уменьшение подвижности носителей заряда для всех исследованных образцов независимо от исходного типа проводимости.

Наблюдаемая картина отличается от некоторых литературных данных, полученных при облучении нейтронами с другим спектральным составом или на исходных образцах n -InSb с высокой концентрацией носителей заряда ($n \geq 10^{14} \text{ см}^{-3}$), когда при малых флюенсах нейтронов ($F \leq 10^{14} \text{ см}^{-2}$) наблюдалось уменьшение концентрации носителей заряда с ростом флюенса.

С целью выявления радиационно-физических процессов, происходящих в InSb при облучении и последующих термообработках, нами проводился изохронный отжиг облученных образцов в течение 20 мин в интервале температур $20 \div 450^\circ\text{C}$. Зависимости концентрации и

подвижности носителей заряда от температуры отжига в образцах InSb, облученных разными флюенсами быстрых нейтронов, представлены на рис. 2 и 3 соответственно. Как видно, с ростом температуры отжига происходит увеличение концентрации и подвижности

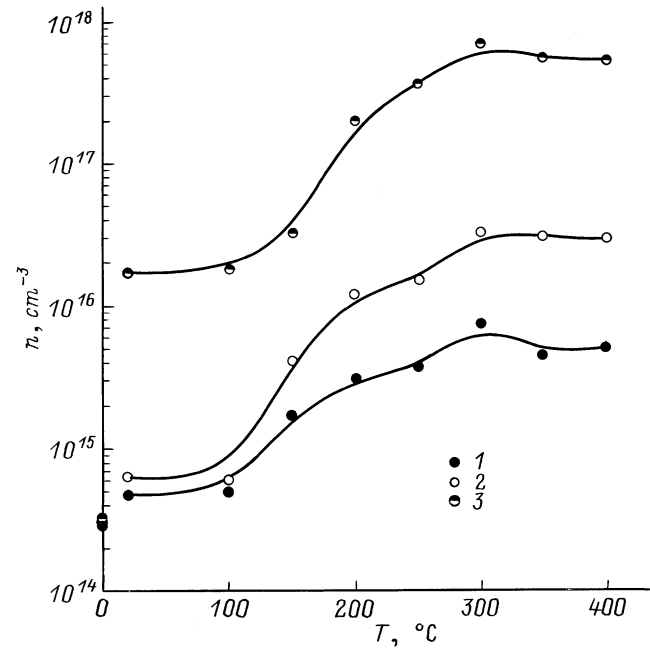


Рис. 2. Зависимость концентрации носителей заряда (n) от температуры изохронного отжига для образцов InSb 3–5, представленных в таблице, после облучения флюенсами быстрых нейтронов $F_f, 10^{16} \text{ см}^{-2}$: 1 — 1.8, 2 — 12.6, 3 — 126. На оси указаны исходные значения n .

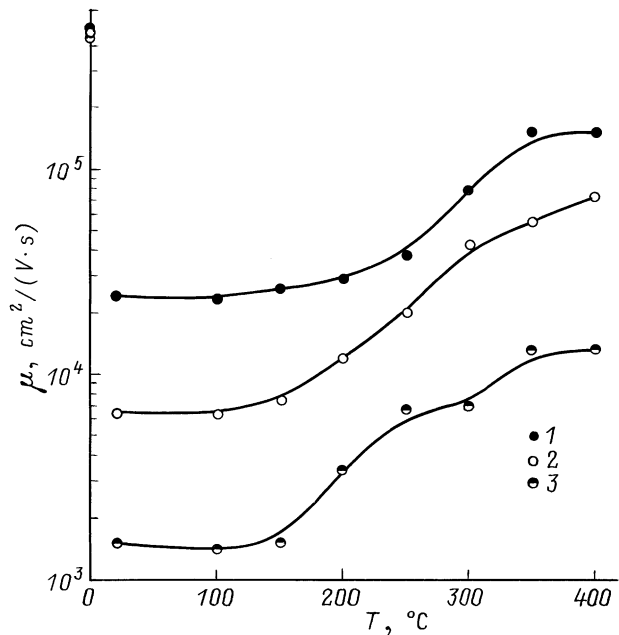


Рис. 3. Зависимость подвижности носителей заряда (μ) от температуры изохронного отжига для тех же образцов InSb, что и на рис. 2. На оси указаны исходные значения μ .

носителей заряда, что свидетельствует об эффективном отжиге вводимых при облучении радиационных дефектов. Можно выделить две основные стадии отжига радиационных дефектов: 1 стадия — $100 \div 200^\circ\text{C}$, 2 стадия — $250 \div 350^\circ\text{C}$, хотя отжиг РД происходит во всем исследуемом интервале температур. Характер зависимости n и μ от температуры отжига для разных флюенсов нейтронов одинаков. Следует заметить, что, как и в случае GaAs [12], чем выше флюенс нейтронов, тем ниже температура, при которой начинается восстановление μ .

Значительные (на $1 \div 2$ порядка) изменения величин n и μ после термообработки облученных образцов свидетельствует о существенном вкладе вводимых при облучении РД. Известно [7–10], что РД в облученном нейтронами InSb отжигаются в использованном нами интервале температур, однако в нашем случае концентрации и подвижности носителей заряда после отжига при $300 \div 400^\circ\text{C}$ не восстанавливаются, а выходят на насыщение при уровне, значения которого линейно зависят от флюенса нейтронов (рис. 1, кривые $2'$ и $2''$). Последнее свидетельствует о том, что при облучении образцов в наших условиях в InSb вводится определенная концентрация примесей как продуктов ядерных реакций на промежуточных нейтронах. Количество таких нейтронов в общем потоке зависит от типа реактора, места расположения канала и применяемого устройства для облучения.

Результаты проведенного химико-спектрального анализа показали наличие в образцах после термообработки стабильной донорной примеси олова, концентрация которой линейно зависит от флюенса нейтронов. Зависимость температуры начала восстановления μ , по видимому, определяется разной концентрацией вводимой в материал примеси. Обобщение полученных нами экспериментальных результатов позволяет описать зависимость концентрации носителей заряда в облученных в Cd-пеналах и отожженных образцах InSb от флюенса быстрых нейтронов эмпирической формулой

$$n_{(\text{Cd})} \approx 0.2F_f.$$

Для сравнительной оценки эффективности ядерного легирования InSb за счет реакций на промежуточных нейтронах на рис. 1 (кривая $3'$) приведена зависимость концентрации носителей заряда от флюенса быстрых нейтронов в образцах ядерно-легированного InSb, полученного облучением полным спектром реакторных нейтронов (без Cd-пеналов). В предыдущих работах [11] нами была выведена экспериментальная зависимость концентрации носителей заряда, вводимых при ядерном легировании, от флюенса тепловых нейтронов (F_s): $n_{\text{тр}} \approx 2.1F_s$. Так как для определенного канала реактора, в котором производится облучение образцов, известно соотношение плотностей потоков тепловых и быстрых нейтронов ($k = \varphi_s/\varphi_f = F_s/F_f$), то, сопоставив эти две зависимости, можно определить эффект подлегирования за счет промежуточных нейтронов при ядерном легиро-

вании антимонида индия:

$$\frac{n_{(\text{Cd})}}{n_{\text{тр}}} = \frac{0.2F_f}{2.1kF_s} \approx 0.1/k.$$

Следовательно, в зависимости от того, каково соотношение плотностей потоков тепловых и быстрых нейтронов в конкретном канале, вклад ядерного легирования за счет надтепловых нейтронов составляет от 5% (для $k \approx 2$ — периферийные каналы) до 10% ($k \approx 1$ — каналы активной зоны).

На основании полученных в работе результатов можно сделать следующие выводы.

1. В отличие от ядерного легирования InSb при облучении полным спектром реакторных нейтронов, когда электрофизические параметры облученного материала определяются в основном концентрацией вводимой примеси (Sn), устранение роли тепловых и резонансных нейтронов позволяет глубже изучать кинетику образования и отжига РД в широком интервале флюенсов.

2. При облучении полным спектром реакторных нейтронов вклад промежуточных нейтронов в общий уровень ядерного легирования в каждом конкретном случае зависит от соотношения плотностей потоков тепловых и быстрых нейтронов и для реактора ВВР-ц достигает $5 \div 10\%$.

Авторы благодарны И.И. Кузьмину и О.Л. Кухто за участие в обсуждении результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и технической политики РФ по 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] Е.П. Скипетров, В.В. Дмитриев, Ф.А. Зайтов, Г.И. Кольцов, Е.А. Ладыгин. ФТП, **20**(10), 1787 (1986).
- [2] Г.А. Вихлий, А.Я. Карпенко, И.Г. Мегела, Л.И. Тараброва. Неорг. матер., **21**(8), 1279 (1985).
- [3] Н.А. Витовский, Т.В. Машовец, О.В. Оганесян, Н.Х. Памбучян. ФТП, **12**(9), 1861 (1978).
- [4] А.Н. Блаут-Блачев, Н.Н. Герасименко, Л.В. Лежейко, Е.В. Любопытова, В.И. Ободников. ФТП, **14**(2), 306 (1980).
- [5] А.Б. Коршунов, Г.М. Кузнецов, А.Г. Макаров, В.В. Оленин, И.В. Постников. ФТП, **12**(5), 938 (1978).
- [6] В.А. Богатырев, Г.А. Качурин. ФТП, **11**(7), 1360 (1977).
- [7] J.W. Cleland, J.H. Crawford. Phys. Rev., **95**(5), 1177 (1954).
- [8] Н.И. Курдиани. ФТП, **3**(11), 1683 (1969).
- [9] Н.А. Витовский, А.П. Долголенко, Т.В. Машовец, О.В. Оганесян. ФТП, **13**(10), 1958 (1979).
- [10] В.Н. Брудный, Н.В. Каменская, Н.Г. Колин. В сб.: *Электрические свойства сильно облученного InSb* (Павлодар, АН СССР, 1989) ч. 2, с. 140.

- [11] Н.Г. Колин, В.Б. Освенский, Н.С. Рытова, Е.С. Юрова. ФТП, **20**(5), 822 (1986).
- [12] Н.Г. Колин, Л.В. Куликова, В.Б. Освенский, С.П. Соловьев, В.А. Харченко. ФТП, **18**(12), 2187 (1984).

Редактор Т.А. Полянская

Electrophysical properties of InSb irradiated by fast neutrons of a nuclear reactor

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

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

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

Abstract The influence of fast neutrons of a nuclear reactor spectrum both on the generation and the annealing of radiation defects and the nuclear transmutation doping of InSb single crystals has been studied. The parameters of changes in electrophysical properties under irradiation and subsequent heat treatments have been measured.

Fax: (08439) 6-39-11

E-mail: FCI@meteo.ru