

## Электрофизические свойства ядерно-легированного антимонида индия

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

Филиал государственного научного центра Научно-исследовательского физико-химического института им. Л.Я. Карпова, 249020 Обнинск, Россия

\* Институт атомной энергетики, 249020 Обнинск, Россия

(Получена 13 ноября 1998 г. Принята к печати 1 декабря 1998 г.)

Изучена возможность ядерного легирования антимонида индия в широком диапазоне концентраций ( $5 \cdot 10^{14} \div 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) облучением нейтронами реактора; исследовано поведение электрофизических параметров материала при облучении и последующих термообработках. На основе сравнительного анализа качества ядерно-легированного и обычного InSb показана возможность практического использования ядерно-легированного материала.

В мировой практике метод ядерного легирования полупроводниковых материалов нашел широкое применение для кремния и в меньшей степени — для германия и некоторых соединений типа  $A^{III}B^V$  [1]. Возможности ядерного легирования антимонида индия были показаны в 60-е годы [2,3]. В работе [4] приведены сравнительные исследования электрофизических свойств InSb, облученного электронами, ионами  $H^+$  и нейтронами реактора в процессе ядерного легирования. В литературе нет данных о ядерном легировании антимонида индия как практически реализованном методе.

В данной работе изучена возможность ядерного легирования антимонида индия в широком диапазоне концентраций от  $n \approx 5 \cdot 10^{14}$  до  $n \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$  облучением тепловыми нейтронами ядерного реактора, исследовано поведение электрофизических характеристик материала при облучении и последующих термообработках, проведен сравнительный анализ качества ядерно-легированного антимонида индия (ЯЛИС) и материала, легированного металлургическим способом в процессе выращивания.

В качестве исходного материала использовались нелегированные и легированные теллуром до концентрации  $n \approx 1.6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  пластины InSb диаметром от 30 до 50 мм, толщиной  $1.5 \div 2$  мм, выращенные методом Чохральского.

Облучение проводилось в вертикальных каналах реактора ВВР-ц при температуре  $T \leq 70^\circ\text{C}$ . Использовались два типа каналов: в активной зоне с плотностью потока тепловых нейтронов  $\varphi_s \approx 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  и отношением плотностей потоков тепловых и быстрых (с энергией  $E > 0.1 \text{ МэВ}$ ) нейтронов  $\varphi_s/\varphi_f \approx 1$ , и на периферии зоны, где  $\varphi_s \approx 1.3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $\varphi_s/\varphi_f \approx 2$ .

Как известно, при взаимодействии тепловых нейтронов с атомами вещества происходят ядерные реакции с образованием нестабильных изотопов, которые с течением времени испытывают  $\beta$ -распад, в результате чего образуются атомы с порядковым номером, большим на единицу по отношению к атомам облучаемого вещества, и являющиеся легирующими примесями для основного вещества [1]. В табл. 1 представлены основные продукты ядерных реакций ( $n, \gamma$ ), протекающих на тепловых нейтронах в антимониде индия. Так как сечение поглощения тепловых нейтронов для основного изотопа индия  $\text{In}^{115}$  ( $\approx 200$  барн) существенно больше, чем для сурьмы, конечным продуктом ядерного легирования в антимониде индия, как и в InAs и InP будут преимущественно атомы олова.

Большое сечение поглощения изотопа  $\text{In}^{115}$  обуславливает сильное самоэкранирование образцов InSb в процессе облучения. Плотность потока тепловых нейтро-

Таблица 1. Продукты ядерных реакций ( $n, \gamma$ ) в антимониде индия

Элемент	Изотоп	Содержание изотопа, %	Сечение поглощения тепловых нейтронов, барн	Период полураспада	Эффективность ядерного легирования, $n_{lr}/F_s$	Продукты реакций (в скобках указана доля продукта)	Суммарный продукт реакций
In	Естественный $\text{In}^{113}$	4.23	$190 \pm 10$ $58 \pm 12$	50.1 дн	$3.6 \cdot 10^{-2}$	$\text{Sn}^{114}$ (0.980) $\text{Cd}^{114}$ (0.010)	Олово (97.50%), теллур (1.62%), кадмий (0.01%), другие элементы (0.87%)
	$\text{In}^{115}$	95.77	$200 \pm 20$	54 мин	2.8	$\text{Sn}^{116}$ (1.000)	
Sb	Естественный		$5.5 \pm 1.0$				
	$\text{Sb}^{121}$ $\text{Sb}^{123}$	57.25 42.75	$5.7 \pm 0.5$ $3.9 \pm 0.3$	2.8 дн 21 мин	$4.8 \cdot 10^{-2}$ $2.5 \cdot 10^{-2}$	$\text{Te}^{122}$ (0.969) $\text{Te}^{124}$ (0.031)	

**Таблица 2.** Свойства исходных и ядерно-легированных образцов антимонида индия

Номера образцов	$n$ , $10^{14} \text{ см}^{-3}$	$\mu$ , $10^5 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	$F_s$ , $10^{16} \text{ см}^{-2}$	$N^{\text{th}}$ , $10^{16} \text{ см}^{-3}$	$N^{\text{csa}}$ , $10^{16} \text{ см}^{-3}$	$N_{ir}$ , $10^{16} \text{ см}^{-3}$	$n_{ia}$ , $10^{16} \text{ см}^{-3}$	$\mu_{ia}$ , $10^4 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$
1	0.10	4.00	0.03	0.09		0.05	0.05	39.0
2	0.15	3.76	4.80	13.6		8.60	10	5.00
3	0.15	3.76	43.20	122.7	113.6	54.0	100	1.70
4	0.16	0.05	0.03	0.07		0.02	0.05	17.0
5	0.75	6.50	0.50	1.42		0.90	0.81	13.5
6	1.20	6.50	0.05	0.14		0.08	0.12	26.5
7	1.50	6.00	0.05	0.14		0.10	0.11	28.0
8	1.70	6.14	0.20	0.57		0.18	0.52	17.2
9	3.10	4.70	0.42	1.20	2.10	0.54	0.90	12.0
10	3.10	4.70	4.80	13.6		9.10	10	5.00
11	3.10	4.70	43.2	122.7		45.0	90	2.00
12	16.0	2.80	4.80	13.6		13.0	17	4.00
13	16.0	2.90	43.2	122.7		43.0	100	1.50

*Примечание:*  $n, \mu$  — исходные значения концентрации и подвижности электронов;  $n_{ir}$  — концентрация электронов после облучения;  $n_{ia}, \mu_{ia}$  — концентрация и подвижность после облучения и отжига при  $T = 450^\circ$  в течение 20 мин;  $F_s$  — невозмущенный флюенс тепловых нейтронов;  $N^{\text{th}}$  — расчетная концентрация вводимой примеси (для невозмущенного  $F_s$ );  $N^{\text{csa}}$  — концентрация вводимой примеси (Sn) по данным химико-спектрального анализа.

нов уменьшается в  $e$  раз на расстоянии 1.4 мм. Кроме того, для индия характерно резонансное поглощение нейтронов с энергией 1.46 эВ при сечении поглощения, равном  $2.2 \cdot 10^4$  барн. Резонансные нейтроны сильно поглощаются поверхностью InSb и их плотность уменьшается в  $e$  раз на глубине порядка единиц микрон, поэтому, чтобы исключить влияние резонансных нейтронов, образцы InSb либо предварительно заворачивают в индиевую фольгу, либо после облучения с них сошлифовывают с двух сторон слой толщиной порядка 30 мкм. Еще одной особенностью In-содержащих соединений является довольно сильное поглощение надтепловых нейтронов атомами In, за счет чего происходит дополнительное легирование материала [4].

Для расчета концентрации олова, вводимого в результате ядерных реакций на тепловых нейтронах, использовалась формула

$$N_{\text{Sn}} = N_0 K \sigma F_s, \quad (1)$$

где  $N_0$  — количество атомов вещества в единице объема,  $K$  — процентное содержание изотопа,  $\sigma$  — сечение поглощения тепловых нейтронов,  $F_s$  — флюенс тепловых нейтронов. Теоретический расчет по формуле (1) и данным табл. 1 дает эффективность ядерного легирования ( $N_{\text{Sn}}/F_s$ ) в антимониде индия порядка 2.8. Полученные нами экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что время выдержки облученных образцов InSb, для спада наведенной радиоактивности до допустимого уровня, варьируется от 4–6 до 12–24 месяцев в зависимости от флюенса нейтронов.

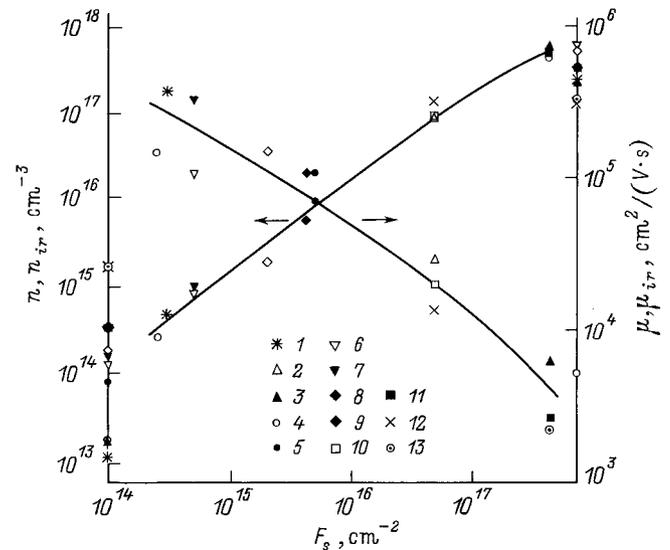
Электрофизические свойства облученного InSb в основном определяются тремя параметрами:

- исходной концентрацией примесей и ростовых дефектов;

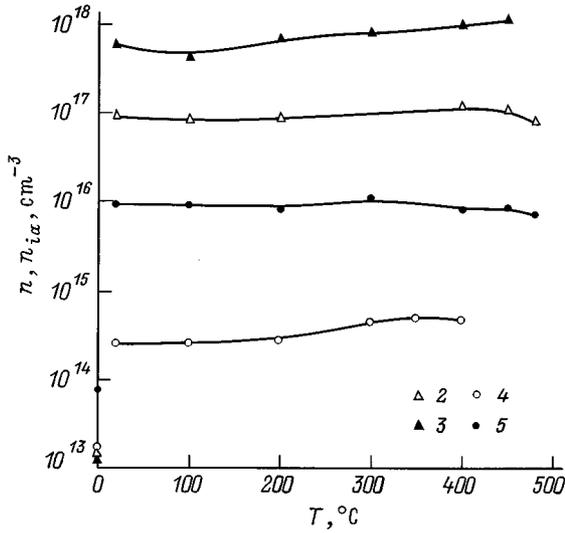
- концентрацией примесей, введенных в InSb в результате ядерных реакций под действием тепловых нейтронов;

- радиационными дефектами, образующимися в InSb в процессе облучения.

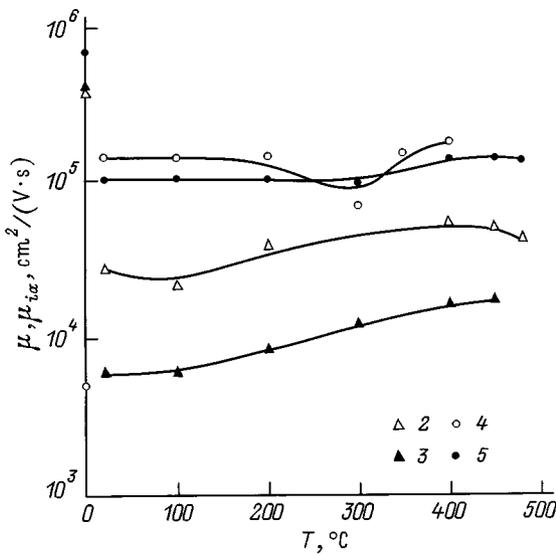
Флюенсы тепловых нейтронов выбирались таким образом, чтобы концентрация примесей, вводимых в результате ядерных превращений, была не менее чем в 3 ÷ 5 раза больше концентрации исходных примесей с целью уменьшения влияния последних на свойства ядерно-легированного материала.



**Рис. 1.** Зависимости концентрации  $n_{ir}$  и подвижности  $\mu_{ir}$  основных носителей заряда от флюенса тепловых нейтронов  $F_s$  для образцов InSb (на осях указаны исходные значения  $n$  и  $\mu$ ). Номера значков на рисунке соответствуют номерам образцов в табл. 2.



**Рис. 2.** Зависимости концентрации основных носителей заряда от температуры изохронного отжига для образцов антимида индия, облученных разными флюенсами полного спектра реакторных нейтронов (на оси ординат указаны исходные значения концентрации). Номера значков на рисунке соответствуют номерам образцов в табл. 2.



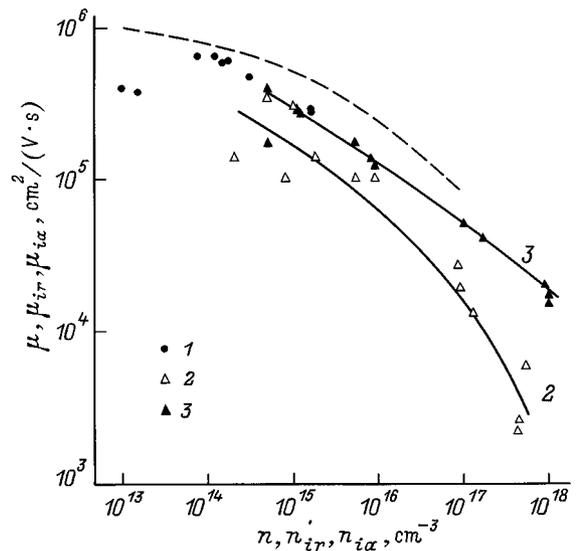
**Рис. 3.** Зависимости подвижности основных носителей заряда от температуры изохронного отжига для образцов антимида индия, облученных разными флюенсами полного спектра реакторных нейтронов (на оси ординат указаны исходные значения подвижности). Номера значков на рисунке соответствуют номерам образцов в табл. 2.

На рис. 1 представлены зависимости концентрации и подвижности носителей заряда в образцах InSb, приведенных в табл. 2, от флюенса тепловых нейтронов. Как видно, концентрация носителей заряда монотонно возрастает с увеличением флюенса нейтронов и в отличие от других полупроводников (GaAs, InP [5,6]) не наблюдается уменьшения концентрации носителей заряда или кон-

версии типа проводимости  $n \rightarrow p$ . Это свидетельствует о том, что в процессе облучения нейтронами реактора в образцы InSb вводятся преимущественно примесные уровни  $n$ -типа, что хорошо согласуется с расчетами предельного положения уровня Ферми в сильно облученных полупроводниках [7]. Подвижность носителей заряда уменьшается с ростом флюенса нейтронов, что обусловлено увеличением концентрации введенной примеси и количества радиационных дефектов.

С целью выявления механизмов образования и отжига радиационных дефектов проводился изохронный отжиг облученных образцов в течение 20 мин в интервале температур от 100 до 480°C. Анализ полученных результатов позволяет отдельно определить влияние примесей, образованных в результате ядерных превращений, и вводимых радиационных дефектов на электрофизические свойства InSb.

На рис. 2 и 3 представлены зависимости концентрации и подвижности носителей заряда от температуры изохронного отжига для образцов InSb с различными концентрациями носителей заряда в исходном состоянии. Как видно, изохронный отжиг не приводит к значительному изменению электрофизических параметров облученного InSb. Концентрация носителей заряда после облучения и соответствующих термообработок практически не изменяется, т.е. почти вся введенная примесь в результате ядерного легирования находится в материале в электрически активном состоянии, что может быть объяснено узкой шириной запрещенной зоны антимида индия (0.18 эВ).



**Рис. 4.** Зависимости подвижности основных носителей заряда от их концентрации для образцов InSb, полученных разными способами. Номера значков и линий на рисунке соответствуют данным для: 1 — исходных необлученных образцов ( $\mu$ ), 2 — образцов после облучения разными флюенсами полного спектра реакторных нейтронов ( $\mu_{ir}$ ), 3 — образцов после облучения и отжига при 450°C ( $\mu_{ia}$ ). Штриховая линия соответствует теоретической зависимости.

Небольшие изменения концентрации и подвижности носителей заряда в процессе термообработки наблюдаются при низких и высоких уровнях легирования, что, по-видимому, связано с преобладающим влиянием радиационных дефектов по сравнению с влиянием вводимой примеси при данных уровнях легирования. При температуре отжига выше 450°C концентрация и подвижность носителей заряда уменьшаются, что свидетельствует о снижении качества материала при температурах, близких к температуре плавления InSb (525°C).

На рис. 4 представлены зависимости подвижности основных носителей заряда от их концентрации для образцов InSb, легированных разными способами. Хорошо заметно, что с увеличением флюенса нейтронов, а следовательно, и концентрации носителей заряда все больший вклад в изменение подвижности вносят радиационные дефекты, которые удаляются после термической обработки (разница между кривыми 1 и 2). Сравнение теоретической и экспериментальной зависимостей свидетельствует о высоком качестве ядерно-легиrowанного InSb и, в частности, при высоких уровнях легирования трудно реализуемых металлургическим способом. Сводные данные о свойствах ядерно-легиrowанных образцов InSb представлены в табл. 2.

Экспериментальные данные, полученные после облучения и отжига образцов при 450°C, позволяют вывести эмпирическую зависимость концентрации основных носителей заряда в ЯЛИС от флюенса тепловых нейтронов

$$n_{tr} = 2.1F_s. \quad (2)$$

Полученные в работе результаты являются прямым доказательством возможности ядерного легирования InSb оловом в широком диапазоне концентраций. ЯЛИС обладает хорошими электрофизическими свойствами, не уступающими свойствам InSb, легированного металлургическим способом в процессе выращивания. Вместе с тем продолжительное время выдержки образцов после облучения для спада наведенной радиоактивности затрудняет широкое применение метода для промышленного изготовления материала. Метод ядерного легирования может быть применен к антимониду индия для легирования скрытых тонких слоев в многослойных полупроводниковых структурах и на разных технологических этапах в процессе изготовления приборов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и технической политики Российской Федерации по программе "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] Л.С. Смирнов, С.П. Соловьев, В.Ф. Стась, В.А. Харченко. *Легирование полупроводников методом ядерных реакций* (Новосибирск, Наука, 1981).
- [2] Ш.М. Мирианшвили, Д.И. Нанобашвили, З.Г. Размадзе. *ФТТ*, **7**, 3566 (1965).
- [3] Л.К. Водопьянов, Н.И. Курдиани. *ФТТ*, **8**, 72 (1966).
- [4] В.Н. Брудный, Н.В. Каменская, Н.Г. Колин. В сб.: *Электрические свойства сильно облученного InSb* (Павлодар, АН СССР, 1989) ч. 2, с. 140.
- [5] Н.Г. Колин, Л.В. Куликова, В.Б. Освенский, С.П. Соловьев, В.А. Харченко. *ФТП*, **18**, 2187 (1984).
- [6] V.N. Brudnyi, N.G. Kolin, V.A. Novikov. *Phys. St. Sol. (a)*, **132**, 35 (1992).
- [7] В.Н. Брудный, С.Н. Гриняев. *ФТП*, **32**, 315 (1998).

Редактор Т.А. Полянская

## Electrophysical Properties of Nuclear Doped Indium Antimonide

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

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

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

**Abstract** The possibility of the neutron transmutation doping of indium antimonide has been studied up to impurity levels of  $5 \cdot 10^{14} \div 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Electrophysical parameters of the material have been investigated after irradiation and subsequent heat treatments. A comparison has been made as to the quality of nuclear doped againts that of conventional indium antimonide and some fields of practical applications of nuclear doped material are outlined.

Fax: (08439) 6-39-11

E-mail: FCI@meteo.ru