

Влияние нейтронного облучения на свойства нитевидных микрокристаллов n -InSb

© И.А. Большакова[¶], В.М. Бойко⁺, В.Н. Брудный^{*¶¶¶}, И.В. Каменская*, Н.Г. Колин^{¶¶},
Е.Ю. Макидо, Т.А. Московец, Д.И. Меркурисов⁺

Львовский политехнический национальный университет,
290013 Львов, Украина

⁺ Филиал ФГУП Физико-химический институт им. Л.Я. Карпова,
249033 Обнинск, Россия

^{*} Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова при Томском государственном университете,
634050 Томск, Россия

(Получена 3 ноября 2004 г. Принята к печати 25 ноября 2004 г.)

Представлены результаты исследований изменения свойств сенсоров магнитного поля на основе нитевидных микрокристаллов n^+ -InSb в процессе облучения быстрыми нейтронами реактора ИБР-2. Оценена оптимальная концентрация свободных электронов $n \approx (6-7) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ в InSb, которая обеспечивает максимальную радиационную стойкость сенсоров. Определен отдельный вклад двух конкурирующих процессов в изменение электрофизических свойств InSb при нейтронном облучении: трансмутационного легирования InSb мелкой донорной примесью Sn и компенсации исходной проводимости n^+ -InSb вследствие генерации глубоких радиационных дефектов акцепторного типа.

1. Введение

Сенсоры магнитного поля на основе полупроводниковых материалов используются для картографирования магнитных полей, в том числе в условиях воздействия жесткой радиации в ускорителях заряженных частиц, на объектах атомной энергетики, в бортовых системах космических аппаратов и т.д. Это выдвигает требование высокой устойчивости и долговременной стабильности выходных характеристик чувствительных элементов сенсоров при воздействии высокоэнергетической радиации [1]. Основная характеристика сенсора — его чувствительность $K = U_{\text{out}}/B$ (U_{out} — выходное напряжение, B — индукция магнитного поля) — связана с электрофизическими параметрами материала. При этом в условиях облучения малыми дозами высокоэнергетической радиации основной вклад в изменение величины K вносит изменение концентрации носителей заряда в материале. Поэтому для обеспечения стабильности выходных параметров сенсоров магнитного поля необходимо по возможности обеспечить минимальное изменение концентрации свободных носителей в полупроводнике под воздействием жесткой радиации.

Среди полупроводников групп IV и III–V соединение InSb привлекает особое внимание для производства чувствительных элементов сенсоров вследствие высокой подвижности свободных электронов. Однако использование таких датчиков в полях высокоэнергетической радиации приводит к формированию в кристаллической решетке InSb радиационных дефектов (РД) донорной и акцепторной природы, что вызывает изменение концентрации носителей заряда, их подвижности, времени жизни [2–5]. Все это является причиной нестабильности выходных параметров сенсоров магнитного поля

на основе InSb, работающих в условиях воздействия жесткого облучения.

2. Методика эксперимента

В настоящей работе проведено исследование влияния облучения реакторными нейтронами на параметры материала и сенсоров магнитного поля на основе нитевидных микрокристаллов n -InSb в зависимости от уровня их исходного легирования. Нитевидные образцы n -InSb, полученные методом свободной кристаллизации из газовой фазы [6], легировались в процессе выращивания несколькими примесями одновременно: Sn, Al и Cr. Основная донорная примесь (Sn) обеспечивала необходимую концентрацию свободных электронов (n_0), а добавки Al и Cr использовались для повышения стабильности характеристик материала в условиях радиационного воздействия. Предполагается, что Al и Cr, вызывая деформацию кристаллической решетки InSb [7], создают дополнительные стоки для подвижных во время облучения РД, что должно повышать устойчивость материала к воздействию жесткой радиации. Уровень легирования исходного материала изменялся в пределах $n_0 = 3 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, величина холловской подвижности в пределах $52400 - 22300 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при 290 К. Размеры исследуемых образцов составляли $0.7 \times 0.07 \times 0.03 \text{ мм}^3$. Следует отметить, что данные по облучению сильно легированных образцов n -InSb реакторными нейтронами в литературе отсутствуют.

Облучение нейтронами проводилось на импульсном реакторе ИБР-2 Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна, Россия). Флюенс быстрых нейтронов (энергия электронов $E > 0.1 \text{ МэВ}$) достигал величины $F_{fn} = 3.1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ при плотности потока

[¶] E-mail: inessa@mail.lviv.ua

^{¶¶} E-mail: ngkolin@mail333.com

^{¶¶¶} E-mail: brudnyi@ic.tsu.ru

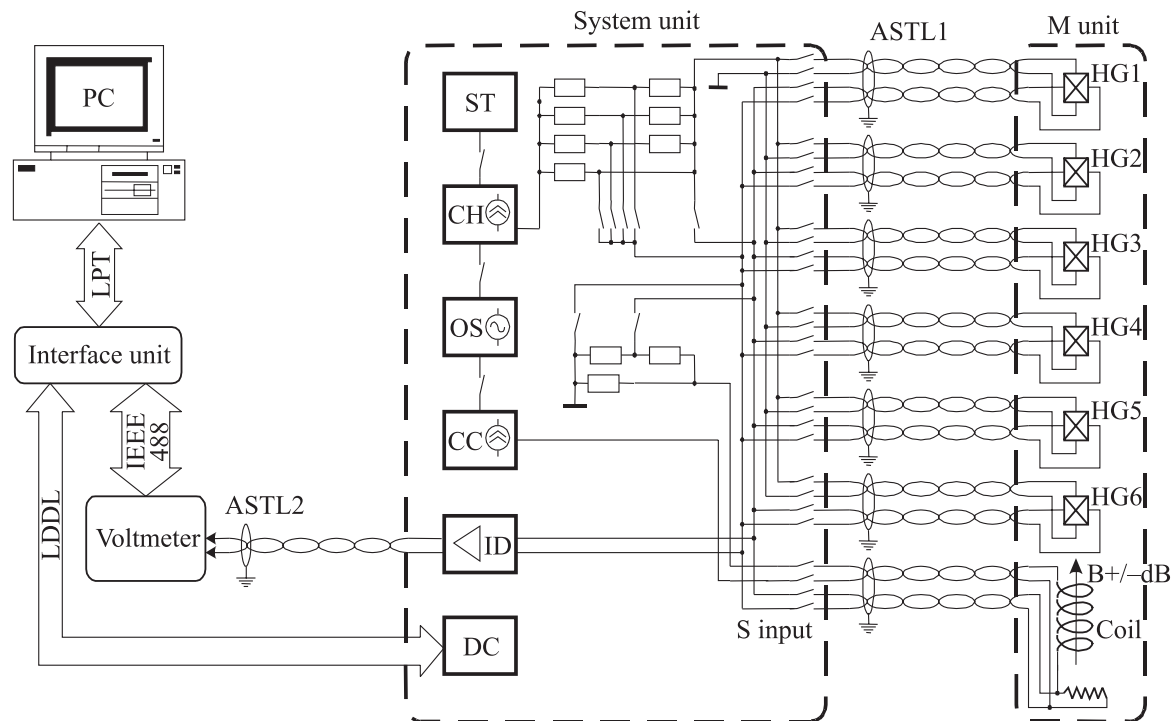


Рис. 1. Схема измерительной установки MMSI: (HG1–HG6) — исследуемые образцы, ST — стабилизатор напряжения, CH и CC — источники тока, OS — формирователь опорного напряжения, ID — входной усилитель, DC — дешифратор команд, ASTL 1, ASTL 2 — линии передачи сигналов.

$\varphi = 9 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и средней энергии нейтронов реактора $E \approx 1.35 \text{ МэВ}$. Особенность настоящего эксперимента состоит в том, что параметры сенсоров измерялись непосредственно в процессе облучения в канале реактора, что повышало точность дозовых измерений при использовании одного и того же образца и сокращало продолжительность эксперимента [1,8–10].

Исследуемые образцы располагались в зазоре между полюсами постоянного магнита на основе SmCo_5 ($B = 290 \text{ мТл}$), который размещался в горизонтальном канале реактора. Измерения проводились дистанционно с использованием автоматизированной помехоустойчивой прецизионной измерительной системы, разработанной и изготовленной в Лаборатории магнитных сенсоров Национального университета „Львовская Политехника“ (г. Львов, Украина). Данная система обеспечивала измерения относительных изменений электрофизических параметров образцов с точностью до 0.01%, контроля температуры в зоне расположения образцов с точностью до 0.1°C , а также измерение индукции магнитного поля, создаваемого размещенным в канале реактора постоянным магнитом на основе SmCo_5 , с точностью до 0.1% [11]. Блок-схема установки для измерения параметров сенсоров магнитного поля во время облучения представлена на рис. 1. Исследуемые образцы, постоянный магнит и измерительная аппаратура пространственно были размещены в трех зонах. В первой зоне, зоне реактора, размещался блок постоянного магнита с исследуемыми образцами — M_unit. Во второй зоне,

техническом помещении на расстоянии 10 метров от канала реактора, размещался основной блок измерительной аппаратуры — System_unit. В третьей зоне, помещении для работы персонала на расстоянии 30 метров от канала реактора, были размещены измерительный вольтметр, интерфейсный блок и персональный компьютер. Запись результатов измерений, как и коррекция функций измерительной аппаратуры, проводились в автоматическом режиме, число измерений достигало $3 \cdot 10^6$ [12].

3. Экспериментальные результаты

На рис. 2 представлены зависимости относительного изменения $\Delta K/K$ коэффициента чувствительности сенсоров магнитного поля, параметры которых представлены в таблице. В указанном диапазоне флюенсов нейтронов F_{fn} наблюдаются практически линейные изменения $\Delta K/K$ для всех исследованных в работе образцов. В зависимости от исходного уровня легирования *n*-InSb отмечены как положительные значения величины $\Delta K/K$, так и отрицательные значения. При этом для образца 2 ($n_0 = 6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) изменение $\Delta K/K$ не превышает 0.05% при облучении флюенсом быстрых нейтронов $F_{fn} = 1.7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ и не более 1% при флюенсе нейтронов до $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Это означает, что среди исследуемых образцов при облучении в указанных условиях образец 2 обладает наиболее высокой радиационной стойкостью.

Параметры холловских сенсоров на основе нитевидных кристаллов n -InSb при 295 К

Параметры	№ образца		
	1	2	3
Концентрация носителей заряда n_0 , см^{-3}	$8 \cdot 10^{16}$	$6 \cdot 10^{17}$	$1 \cdot 10^{18}$
Магнитная чувствительность при номинальном токе K , мВ/Тл	40	14	10
Номинальный ток I , мА	30	40	60
Входное сопротивление R_{in} , Ом	5.0	2.3	1.2
Выходное сопротивление R_{out} , Ом	2.0	1.8	1.0
Остаточное напряжение при номинальном токе U_0 , мВ	0.07	0.03	0.02
Рабочий диапазон температуры T , К	4.2–350	4.2–350	4.2–350

На рис. 3 представлены зависимости скорости изменения концентрации носителей заряда при облучении быстрыми нейтронами ($\Delta n/\Delta F_{fn}$) в микрокристаллах n -InSb от исходной концентрации носителей заряда в облученных образцах (n_0) для потоков нейтронов $1.7 \cdot 10^{15}$ и $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Как видно из рис. 3, наблюдается практически линейная зависимость скорости удаления носителей заряда от концентрации носителей заряда в облученном n -InSb. Для количественного объяснения физических процессов, протекающих в InSb при облучении реакторными нейтронами, необходимо учитывать два основных фактора: 1) образование радиационных дефектов в материале под действием быстрых нейтронов, атомов отдачи и γ -составляющей излучения реактора; 2) образование атомов легирующих примесей ($\sim 98\%$ Sn) за счет ядерных реакций, протекающих при взаимодействии тепловых и промежуточных нейтронов с атомами основного вещества.

Как известно, образование атомов Sn в InSb зависит от параметров реактора, флюенса нейтронов и не зависит от концентрации носителей заряда в исходном материале. Коэффициент легирования InSb оловом при нейтронном облучении может быть оценен из выражения $\alpha = \sigma \cdot N_{\text{In}}$, где σ — сечение образования атомов Sn при нейтронном облучении, N_{In} — концентрация атомов In в InSb. При малых дозах нейтронов скорость изменения концентрации носителей заряда в облученных образцах InSb может быть представлена линейной зависимостью вида

$$\Delta n/\Delta F_{fn} \approx \alpha - \beta n, \quad (1)$$

где β — сечение образования радиационных дефектов ($N_{RA} - N_{RD}$), N_{RD} (N_{RA}) — концентрация радиационных доноров (акцепторов); n — концентрация носителей заряда в облученном материале. Из рис. 3 следует, что для микрокристаллических образцов InSb (при 295 К) сечение образования радиационных дефектов

($N_{RA} - N_{RD}$) равно $\beta \approx 1.5 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$. Выбором исходного уровня легирования можно обеспечить $\alpha \approx \beta n$, что будет соответствовать $\Delta n/\Delta F_{fn} \approx 0$. Именно добавочное легирование оловом приводит к этой ситуации при облучении n -InSb реакторными нейтронами. При этом конкретная критическая концентрация n , обеспечивающая $\Delta n/\Delta F_{fn} \approx 0$, зависит от спектра реакторных нейтронов в зоне облучения.

Полученные ранее результаты [13] по облучению образцов InSb большими флюенсами полного спектра реакторных нейтронов с целью ядерного легирования свидетельствуют о том, что основная часть вводимой в материал примеси (в данном случае Sn) находится в электрически активном состоянии сразу после облучения (без последующих термообработок), что в большей степени определяет основные электрофизические харак-

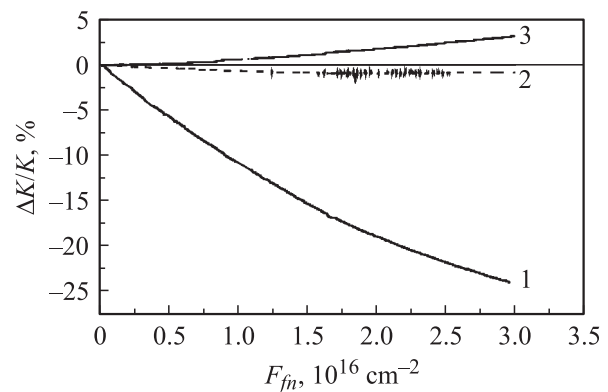


Рис. 2. Дозовые зависимости относительного изменения чувствительности $\Delta K/K$ сенсоров магнитного поля на основе нитевидных микрокристаллов n -InSb (образцы 1, 2, 3 — см. таблицу) при нейтронном облучении. Температура измерения 290 К.

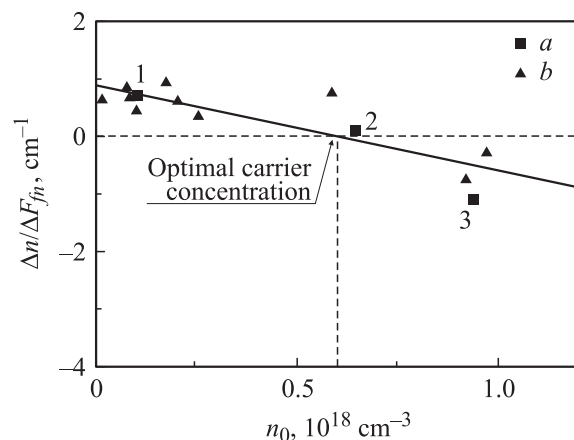


Рис. 3. Зависимость скорости изменения концентрации носителей заряда ($\Delta n/\Delta F_{fn}$) в микрокристаллах n -InSb от исходной концентрации носителей заряда в образцах, облученных быстрыми нейтронами. a — образцы 1, 2, 3 (таблица) после облучения флюенсом быстрых нейтронов $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. b — дополнительные образцы (не указаны в таблице) после облучения флюенсом быстрых нейтронов $1.7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

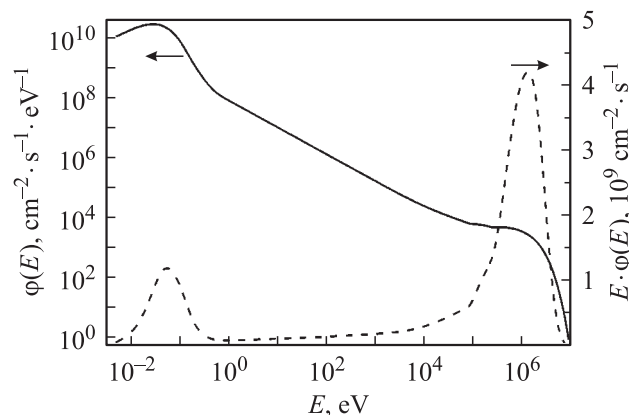


Рис. 4. Зависимости дифференциальной плотности нейтронов $\varphi(E)$ и величины $E\varphi(E)$ от энергии нейтронов для реактора ИБР-2.

теристики облученных образцов. При этом даже облучение InSb в Cd-пенале [10] не приводит к полному устранению эффекта ядерного легирования. С целью оценки величины α было проведено определение плотностей потоков медленных и промежуточных нейтронов в нейтронном спектре импульсного реактора ИБР-2 с учетом экспериментальных данных, полученных с использованием датчиков для нейтронов с энергией $E > 0.4$ МэВ по методике, описанной в [14]. Исходя из того, что доля промежуточных нейтронов ($E = 0.5$ эВ–0.1 МэВ) составляет $\sim 20\%$ от флюенса быстрых нейтронов [15] и $\varphi(E = 0.1 \text{ МэВ}) = 3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{МэВ}^{-1} = 3 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{эВ}^{-1}$, получено описание для спектра промежуточных нейтронов (проведена сшивка при 0.1 МэВ и подобран показатель степени — $E^{-0.89}$):

$$\varphi(E) = \varphi_{\text{epi}} dE / E^{0.89},$$

$$\varphi_{\text{epi}} = 0.84 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{эВ}^{-0.11}.$$

Значения модуля показателя степени меньше единицы характерны для спектров нейтронов, сформированных металлами (теплоносителем в ИБ-2 является жидкий натрий). Дифференциальный спектр нейтронов в зоне облучения реактора ИБР-2 представлен на рис. 4. Проведенные расчеты с учетом энергетических спектров нейтронов позволили определить значения потоков промежуточных и медленных нейтронов в общем потоке нейтронов на уровне 20 и 25% от интегрального потока быстрых нейтронов соответственно. Ввиду малых геометрических размеров микрокристаллов InSb было также учтено резонансное поглощение нейтронов (сечение поглощения $\sigma_0 \approx 4 \cdot 10^4$ барн) с энергией 1.46 эВ (полуширина $\Gamma = 75$ мэВ) на атомах In. Полученное значение коэффициента введения Sn на тепловых нейтронах равно 0.56 см^{-1} , на промежуточных нейтронах с учетом максимального резонанса 0.19 см^{-1} , тогда суммарное значение коэффициента введения Sn $\alpha = 0.75 \text{ см}^{-1}$ (коэффициент нормирован на один быстрый нейтрон). Значение коэффициента α , оцененное из экспериментальных данных рис. 3, для слабо легированных образцов

составляет $\sim 0.9 \text{ см}^{-1}$, что достаточно хорошо согласуется с расчетной величиной α , полученной из анализа спектра реактора ИБР-2. Все это позволяет оценить концентрацию вводимой в InSb примеси олова за счет ядерных реакций на атомах In [16,17–20].

Следует отметить, что, несмотря на значительный объем экспериментальных данных по исследованию РД в InSb, информация об изменении электрофизических свойств данного материала при радиационном воздействии весьма противоречива, а в случае сильно легированного InSb такая информация практически отсутствует. В соответствии с опубликованными данными параметры облученного InSb в сильной степени зависят от условий облучения — типа бомбардирующих частиц, их энергии и температуры образца во время облучения. Так, бомбардировка InSb быстрыми нейтронами, протонами или электронами высоких энергий (десятки МэВ) независимо от температуры облучения всегда дает материал n -типа проводимости [21–24]. В то же время облучение электронами с энергиями менее 10 МэВ при температурах $T \leq 200 \text{ К}$ формирует материал p -типа проводимости, а в случае аналогичного облучения вблизи комнатных температур получают n -InSb или p -InSb в зависимости от дозы облучения и температурной области измерения параметров облученных образцов [21,25–28]. Такое поведение InSb при высокоэнергетическом радиационном воздействии связывается как с характером доминирующих по концентрации РД, так и с низкой термической стабильностью радиационных дефектов в данном соединении. Высказаны предположения о том, что в области низких температур доминируют дефекты акцепторного типа, а с повышением температуры образца накапливаются преимущественно РД донорного типа. Предположительно, это приводит к смещению уровня Ферми из нижней половины запрещенной зоны в верхнюю и соответственно к смене типа проводимости облученного материала при повышении температуры. При этом отсутствие экспериментальных исследований вблизи комнатных температур в сильно легированном n -InSb, облученном быстрыми нейтронами, затрудняет анализ данных настоящей работы. Можно также отметить, что в целом имеющиеся экспериментальные данные по свойствам облученного InSb не согласуются с соответствующими данными для других полупроводников. Для большинства полупроводников характерно, что параметры облученного материала в малой степени зависят от условий облучения и предыстории материала и в большей степени являются „собственными“ характеристиками кристалла. Действительно, в соответствии с современными теоретическими моделями и экспериментальными исследованиями процесс радиационного модифицирования электрофизических параметров полупроводника — это процесс понижения его исходной электрической активности, в результате которого степень взаимной компенсации материала радиационными донорами и акцепторами по мере облучения приближается к 1. В конечном счете при концентрации РД выше концентрации исходной легирующей примеси это

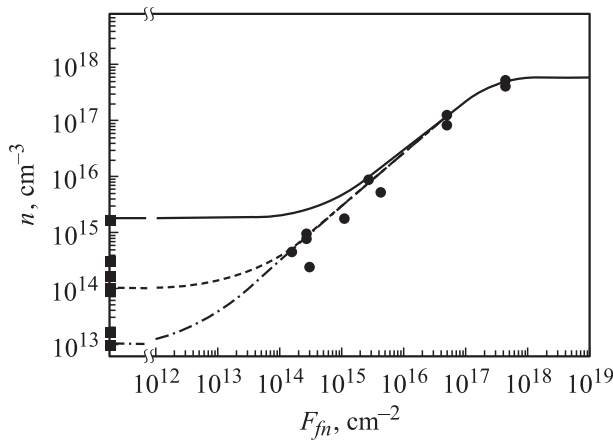


Рис. 5. Зависимость концентрации свободных электронов при 77 К в объемных кристаллах n -InSb (метод Чохральского), облученных полным спектром нейтронов (соотношение потоков быстрых и медленных нейтронов $\varphi_{fn}/\varphi_{sn} \approx 1$) реактора ВВР-ц, от флюенса быстрых нейтронов. Точки — эксперимент, кривые — расчет согласно (3) для образцов с различной исходной концентрацией носителей заряда (точки на оси) для $\alpha \approx 2.9 \text{ см}^{-1}$ и $\beta \approx 4.8 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$.

приводит к закреплению уровня Ферми в некотором „предельном“ положении F_{lim} , характерном для каждого полупроводника [29]. В свою очередь это соответствует „предельной“ концентрации носителей заряда n_{lim} (p_{lim}) в облученном материале. Согласно моделям [29], предельные электрофизические параметры InSb после высокоэнергетического облучения должны соответствовать материалу p -типа проводимости и закреплению уровня Ферми в нижней половине запрещенной зоны кристалла [27]. С учетом этого и имеющихся экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что при облучении исходных образцов p^+ -InSb должны быть более эффективны радиационные доноры, а в случае исходного n^+ -InSb радиационные акцепторы. Действительно, измерения, проводимые при 77 К, свидетельствуют о компенсации исходной проводимости в кристаллах InSb при различных видах облучения. В то же время измерения при 295 К указывают на незначительные изменения электрофизических свойств InSb даже в условиях облучения большими интегральными потоками частиц. Хотя данные для n^+ -InSb крайне ограничены, они подтверждают высокую эффективность компенсации электронной проводимости в таком материале за счет введения акцепторов при облучении электронами (50 МэВ) вблизи комнатных температур [30]. Данные настоящей работы также указывают на высокую эффективность формирования РД акцепторного типа при облучении n^+ -InSb реакторными нейтронами вблизи 300 К.

Результаты настоящего исследования могут быть использованы и при анализе работы сенсоров магнитного поля на основе n -InSb при их эксплуатации в других реакторах. Действительно, в случае постоянных значений α и β выражение (1) может быть записано в виде

$$n \approx (n_0 - \alpha/\beta) \exp(-\beta F_{fn}) + \alpha/\beta, \quad (2)$$

которое при $F_{fn} \rightarrow \infty$ переходит в выражение

$$n \approx (n_0 - n_\infty) \exp(-\beta F_{fn}) + n_\infty, \quad \text{где } n_\infty \approx \alpha/\beta. \quad (3)$$

Это выражение может быть использовано при оценке исходного уровня легирования материала $n_\infty \approx \alpha/\beta$, которое обеспечивает максимальную радиационную стойкость сенсоров на основе n -InSb к воздействию нейтронного облучения, если известны параметры α и β . Так, на рис. 5 представлены экспериментальные данные изменения концентрации электронов в объемных кристаллах n -InSb в случае их облучения полным спектром нейтронов реактора ВВР-ц (Филиал ФГУП „НИФХИ им. Л.Я. Карпова“) [10,13]. Обработка этих данных в соответствии с выражениями (1)–(3) для $\alpha \approx 2.9 \text{ см}^{-1}$ и $\beta \approx 4.8 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$ дает $n_\infty \approx 6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ при выборе исходного n -InSb для данного реактора (сплошные кривые на рис. 5).

4. Заключение

Таким образом, данные экспериментальных исследований сенсоров магнитного поля на основе нитевидных микрокристаллов n -InSb при облучении быстрыми нейтронами, снятые непосредственно в процессе набора дозы, хорошо описываются в предположении двух конкурирующих процессов: формирование РД акцепторного типа и легирование InSb мелкой донорной примесью Sn за счет ядерных реакций на атомах In. Именно это позволяет путем выбора исходного уровня легирования материала в зависимости от условий облучения обеспечить стабильность выходных параметров сенсоров на основе нитевидных микрокристаллов n^+ -InSb по отношению к нейтронному потоку. Оценен оптимальный уровень исходного легирования $n_0 \approx (6-7) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ n -InSb для производства радиационно стойких сенсоров магнитного поля (с оптимальной чувствительностью $\sim 14 \text{ мВ/Тл}$ при номинальном токе 40 мА) при их работе в горизонтальном канале реактора ИБР-2. Эти исследования могут послужить основой при выборе исходного n -InSb для производства сенсоров магнитного поля, работающих не только в полях нейтронного излучения, но и в ускорителях высокоэнергетических ионов с учетом эффективности ядерного легирования материала при его облучении и с оценкой скорости образования радиационных дефектов.

Работа выполнена при поддержке совместного российско-украинского проекта № 1630(МНТЦ)/RUS-02(УНТЦ).

Список литературы

- [1] I. Bolshakova. Sens. Actuators: A Phys., **106**, 344 (2003).
- [2] Ф.А. Зайтов, Ф.К. Исаев, А.Я. Поляков, А.В. Кузьмин. *Влияние проникающей радиации на свойства антимонида и арсенида индия* (Баку, ЭЛМ, 1984).
- [3] В.В. Бутков, А.В. Войцеховский. Изв. вузов. Физика, **24**(12), 102 (1981).

- [4] В.Н. Брудный, И.В. Каменская. Изв. вузов. Физика **34** (7), 99 (1991).
- [5] V.N. Brudnyi, I.A. Bolshakova, I.V. Kamenskaya, N.G. Kolin. *Proc. 12th. Int. Conf. Rad. Phys. and Chem. of Inorg. Mater.*, Tomsk, 2003 (TPU, 2003) p. 235.
- [6] Ф. Терра, Г. Фахим, И.А. Большакова, С. Лерой, Е.Ю. Макидо, А. Матковский, Т.А. Московец. Изв. вузов. Физика, **46** (6), 67 (2003).
- [7] Е.И. Гиваргизов. *Рост нитевидных и пластинчатых кристаллов из пара* (М., Наука, 1977).
- [8] Н.И. Ярмолюк, В.Н. Вигдорович, Н.Г. Колин, В.Б. Харченко, Л.П. Холодный. ФТП, **14** (7), 1311 (1980).
- [9] Г.А. Вихлий, А.А. Карпенко, И.Г. Мегела, Л.И. Тараброва. УФЖ, **27** (7), 1104 (1982).
- [10] Н.Г. Колин, Д.И. Меркурисов, С.П. Соловьев. ФТП, **33** (8), 927 (1999).
- [11] I.A. Bolshakova, R. Holyaka, C. Leroy. *IEEE Trans. Appl. Superc.*, **12** (1), 1655 (2002).
- [12] М. Кумада, И. Большакова, Р. Холяка. Изв. вузов. Физика, **46** (6), 98 (2003).
- [13] Н.Г. Колин, Д.И. Меркурисов, С.П. Соловьев. ФТП, **33** (7), 774 (1999).
- [14] А.Д. Галанин. *Введение в теорию ядерных реакторов на тепловых нейтронах*, 2-е изд. (М., Энергоатомиздат, 1990).
- [15] В.В. Голиков, Г.Я. Касканов, Е.Н. Кулагин, В.В. Кухтин, Е.Л. Флорман, К. Леруа, В.И. Лушиков, А.П. Чеплаков, Е.П. Шабалин. *Сообщения ОИЯИ. Облучательная установка крупногабаритных объектов на пучке № 3 реактора ИБР-2* (Дубна, 1996).
- [16] К. Бекурц, К. Виртц. *Нейтронная физика* (М., Атомиздат, 1968).
- [17] J.W. Cleland, J.H. Crawford, Jr. *Phys. Rev.*, **95** (5), 1177 (1954).
- [18] W.G. Clark, R.A. Isakson. *J. Appl. Phys.*, **38** (5), 2284 (1966).
- [19] F. Kuchar, E. Fantner, G. Bauer. *Phys. Status Solidi A*, **24**, 513 (1974).
- [20] N.G. Kolin, D.I. Merkurisov, S.P. Solov'ev. *Physica B*, **307**, 258 (2001).
- [21] Л.К. Водопьянов, Н.И. Курдиани. ФТТ, **7** (9), 2749 (1965).
- [22] I. Fujisawa. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **19** (1), 2137 (1980).
- [23] Ф.А. Зайтов, О.В. Горшкова, А.Я. Поляков, М.И. Кеворков, А.Н. Попков, М.Д. Хлыстовская. Изв. АН СССР. Неорг. матер., **18** (1), 8 (1982).
- [24] Н.А. Витовский, Т.В. Машовец, О.В. Оганесян, Н.Х. Памбухчан. ФТП, **12** (9), 1861 (1978).
- [25] S. Mynra. *Phys. Status Solidi A*, **9** (1), 985 (1978).
- [26] В.П. Скипетров, В.В. Дмитриев, В.Ф. Зайтов, Г.И. Кольцов, Е.А. Ладыгин. ФТП, **20** (10), 1787 (1986).
- [27] В.Н. Брудный, В.М. Бойко, И.В. Каменская, Н.Г. Колин. ФТП, **38** (7), 802 (2004).
- [28] L.W. Aukerman. *Phys. Rev.*, **115** (5), 1125 (1959).
- [29] V.N. Brudnyi, S.N. Grinyaev, N.G. Kolin. *Physica B*, **348**, 213 (2004).
- [30] Г.А. Вихлий, А.А. Карпенко, И.Г. Мегела, Л.И. Тараброва. Изв. АН СССР. Неорг. матер., **21** (8), 1279 (1985).

Редактор Л.В. Шаронова

Effect of neutron irradiation on n -InSb microcrystal whisker properties

I.A. Bolshakova, V.M. Boyko⁺, V.N. Brudnyi*, I.V. Kamenskaya*, N.G. Kolin⁺, E.Yu. Makido, T.A. Moskovets, D.I. Merkurisov⁺

Lviv Polytechnic National University,
290013 Lviv, Ukraine

⁺ Obninsk Branch of Federal State Unitary Enterprise „Karpov Institute of Physical Chemistry“,
249033 Obninsk, Russia

* Siberian Physical-Technical Institute
by V.D. Kuznetsov at Tomsk State University,
634050 Tomsk, Russia

Abstract The investigation results of the magnetic sensors based on n^+ -InSb microcrystal whiskers during irradiation with IBR-2 reactor fast neutrons are presented. Optimal free electron concentration $n \approx (6-7) \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ in n -InSb which provide maximum radiation resistance of sensors is determined. It was revealed that changes of InSb electrical properties upon neutron irradiation is occurred due to competition of two processes: (1) transmutation doping of InSb with „shallow“ Sn-donor impurity; (2) compensation of n^+ -InSb initial conductivity due to the „deep“ acceptor-type radiation defects generation.