

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР

ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

КиУи-90-17.

Препринт КИЯИ-90-17

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ  
ДЕФЕКТОВ В *InSb*, ОБРАЗУЮЩИХСЯ  
ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ЗАРЯЖЕННЫМИ  
ЯДЕРНЫМИ ЧАСТИЦАМИ

АКАДЕМИЯ НАУК УССР

Г.А.Вихлий, А.Я.Карченко, П.Г.Литовченко, Л.И.Тарabrina  
А.А. Гриси

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В  $\text{InSb}$   
ОБРАЗУЮЩИХСЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ  
ЗАРЯЖЕННЫМИ ЯДЕРНЫМИ ЧАСТИЦАМИ

© Киев, Институт ядерных исследований, 1990

УДК 621.315.592

Г.А.Вихлий, А.Я.Карпенко, П.Г.Литовченко, Л.И.Тараброва,  
А.А.Гроза

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В  $\text{InSb}$ ,  
ОБРАЗУЮЩИХСЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ  
ЗАРЯЖЕННЫМИ ЯДЕРНЫМИ ЧАСТИЦАМИ**

Рассмотрена возможность создания в объеме массивных образцов  $\text{InSb}$  высоких концентраций радиационных дефектов с помощью протонов с энергией 47 МэВ и альфа-частиц 80 МэВ. Исследованы дозовые зависимости электропроводности и спектр оптического поглощения, а также температурные и полевые зависимости гальваномагнитных свойств образцов с дефектами. Определены стадии отжига и электрические свойства дефектов, отжигающихся на этих стадиях.

G.A.Vikhlii, A.Ya.Karpenko, P.G.Litovchenko, L.I.Tarabrova,  
A.A.Groze

**INVESTIGATION OF RADIATION DEFECTS IN  $\text{InSb}$  FORMED BY CHARGED HIGH ENERGY NUCLEAR PARTICLES**

A possibility of creation of high concentrations of radiation defects in the bulk of  $\text{InSb}$  samples by 47 MeV protons and 80 MeV alpha particles is considered. Dose dependencies of electroconductivity, optical absorption spectra as well as temperature and field relations of galvanomagnetic properties of samples with defects are investigated. Annealing stages and electrical properties of defects annealed at these stages are determined.

Печатается по постановлению Ученого совета  
Института ядерных исследований АН УССР

Высокая дефектообразующая способность заряженных ядерных частиц средних энергий, широкий спектр генерируемых радиационных дефектов (РД), небольшие, как правило, по сравнению с реакторными нейтронами, сечения ядерных реакций делают перспективными их использование для ресурсных испытаний различных материалов, поскольку позволяют на короткое время создать экстремально высокие концентрации РД и практически равномерно распределенную по объему образцов дозовую нагрузку.

Учитывая это, представляло интерес использовать указанный вид радиации для создания РД в наиболее чувствительных к ним материалах — полупроводниках, в частности, в  $\text{InSb}$  — одном из наиболее изученных с точки зрения исследования РД соединений  $A^3B^5$ , исследовать свойства РД, закономерности их образования, отжига и влияния на физические свойства образцов.

В данной работе в процессе облучения и отжига РД исследовались гальваномагнитные  $(\sigma, R_H, \Delta\rho(H)/\rho_0)$  свойства при 1, 2–300 К и спектры оптического поглощения при 5 и 300 К. Дефекты в образцах n- и p-типа с концентрацией примесей  $10^{14} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$  вводились протонами с энергией 47 МэВ и альфа-частицами с энергией 80 МэВ при 140 и 300 К. Толщина образцов составляла 1–2 мм. Флюэнс варьировался от  $10^9$  до  $10^{17} \text{ см}^{-2}$ . Облучение проводилось на изохронном циклотроне У-240 ИЯИ АН УССР. В процессе облучения исследовалась зависимость темновой электропроводности, измеренная при 78 К, от флюэнса частиц с помощью автоматизированной системы измерений на базе ЭВМ СМ-4 и промышленной электрофизической аппаратуры в стандарте КАМАК [1].

Дефекты, созданные в процессе облучения разными дозами, отжигались. Изохронный отжиг РД проводился в два этапа: сначала до  $100^\circ\text{C}$  в атмосфере гелия с шагом 10 и  $20^\circ\text{C}$  и временем отжига 5 мин., затем, при более высоких температурах, в вакууме ( $\sim 10^{-1}$  мм рт.ст.) с шагом в  $30^\circ\text{C}$  и временем отжига 30 мин. На втором этапе образцы подвергались дополнительной обработке: перепайке контактов и травлению после нагрева выше  $300^\circ\text{C}$ . Травление осуществлялось в охлажденном травителе СР-4А в несколько приемов с промежуточным контролем толщины удаленного слоя, а также электрических параметров до их стабилизации.

В процессе облучения наблюдались сильные изменения электрических и оптических свойств образцов, что, в первую очередь, подтверждают дозовые зависимости электропроводности.

Известно, что облучение  $\text{InSb}$   $\gamma$ -лучами  $^{60}\text{Co}$  /2/, электронами (1–50 МэВ /3,10/ и быстрыми реакторными нейтронами /11/ ведет к уменьшению электропроводности, конверсии типа проводимости и выходу на насыщение, характеризующему предельным уровнем Ферми, достижение которого при указанных видах радиации проблематично. n-p -Конверсия происходит при низкотемпературном облучении /2,10/, p-n -конверсия – при комнатной температуре /3,11/, вследствие преимущественного введения РД акцепторного и донорного типа соответственно. Насыщение достигается только при больших флюэнсах высокоэнергетической радиаций в наиболее чистых образцах, причем на практике чаще всего область насыщения выявляется экстраполяцией экспериментальных кривых в направлении больших доз.

При облучении заряженными ядерными частицами (протонами (47 МэВ) /4/, дейтронами (12 МэВ) /12/ и альфа-частицами (0,3 МэВ) /5/) удалось существенно продвинуться в область насыщения дозовой зависимости и выйти за ее пределы. Так при облучении дейтронами наблюдались не только все перечисленные выше участки дозовой зависимости, но также участок роста электропроводности, а после

облучения р-**InSb** альфа-частицами при комнатной температуре во всех без исключения случаях наблюдалось образование слоев с повышенной концентрацией дырок, т.е. отсутствовала р- $n$ -конверсия. Эти факты, по-видимому, связаны с высокой концентрацией РД и их спектральным составом, но интерпретация в данных случаях осложнена особенностями дефектообразования при имплантации (тонкие слои с РД, неоднородность распределения РД по объему слоя, наличие границы раздела между облученной и необлученной частями образца, наличие имплантированных атомов).

В наших экспериментах эти трудности отсутствовали, поскольку образцы облучались напролет. Независимо от температуры облучения, концентрации и типа примесей, облучение протонами приводило к проводимости  $n$ -типа, которая стремилась к насыщению при флюэнсе  $10^{15}$  см<sup>-2</sup>. В подобных образцах, облученных быстрыми нейтронами /11/, эта область экстраполируется к флюэнсу  $10^{18}$  см<sup>-2</sup> /4/, что позволило в предположении идентичности протонных и нейтронных повреждений определить эффективность дефектообразования протонов с энергией 47 МэВ по сравнению с быстрыми реакторными нейтронами как отношение флюэнсов, при которых достигаются предельные состояния после р- $n$ -конверсии. Видно, что эффективность дефектообразования данных протонов в  $10^3$  раз больше, чем рассматриваемых быстрых нейтронов.

Это позволило не только экспериментально достигнуть области насыщения, но и наблюдать ход изменения электропроводности в широком диапазоне значений флюэнса после его достижения, выявив несовпадение кривых для образцов  $n$ - и  $p$ -типа в этой области.

Большой интерес представляют результаты исследования **InSb** в процессе облучения альфа-частицами, поскольку их дефектообразующая способность больше, чем у протонов - больше масса и энергия частиц.

На рис.1 приведены кривые зависимости  $\sigma$ , измеренной при 78 К, образцов  $n$ - и  $p$ - **InSb**, облученных при 140 К, от флюэнса альфа-частиц. Зависимость имеет сложный немонотонный ход, который условно, для удобства рассмотрения, мы разбили на несколько участков. Первый участок - резкое уменьшение,  $n$ - $p$ -конверсия и выход на насыщение, плато которого лежит в интервале флюэнсов  $10^{12}$ - $10^{13}$  см<sup>-2</sup>. Здесь обоим образцам соответствует дырочная проводимость. Второй участок -  $p$ - $n$ -конверсия и вновь выход на насыщение. Плато этого насыщения лежит в интервале  $7 \cdot 10^{14}$ - $5 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>, проводимость на нем вначале осуществляется электронами из свободной зоны, но по мере увеличения флюэнса все заметнее становятся туннельные перебросы между уровнями в запрещенной зоне, соответствующими  $P1$ , возникает конкурирующий с классической проводимостью механизм прыжковой проводимости. Третий участок - резкое уве-



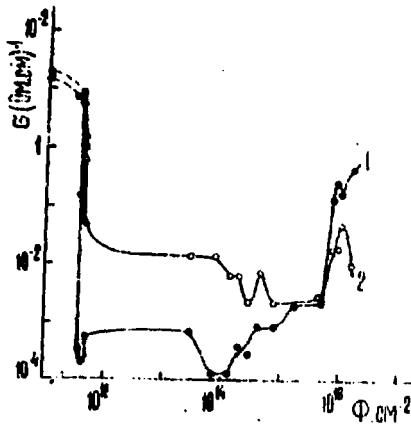


Рис. 1. Зависимость электропроводности при 78 К образцов *n*- и *p*-типа, облученных при 240 К альфа-частицами с энергией 80 МэВ, от флюэнса.

$$\begin{array}{l}
 1 - n - \text{InSb} \langle \text{Sn} \rangle, N_D - N_A = 1,6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} \\
 2 - p - \text{InSb} \langle \text{Cd} \rangle, N_A - N_D = 7,6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}
 \end{array}$$

лишение электропроводности. Он начинается при флюэнсе  $(8-9) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Увеличение электропроводности с ростом флюэнса наблюдалось, как уже упоминалось, в **InSb** при облучении дейтронами /12/ и в **GaAs** при облучении быстрыми реакторными нейтронами /13/. Увеличение электропроводности в этой области может быть обусловлено, как ростом прыжковой проводимости, так и возникновением и последующим усилением еще одного канала проводимости - протекания и наращиванием его эффективности, например, при перекрытии объемных дефектов. При флюэнсе  $10^{16} \text{ см}^{-2}$  наблюдаются неустойчивости - срывы электропроводности, ко-

торая затем восстанавливается. О форме этих колебаний трудно судить, поскольку измерения дискретны. Причиной неустойчивости могут быть автоколебания, т.к. кристалл с дефектами представляет собой открытую диссипативную систему с подводом энергии /6/, или фазовые превращения дефектов при достижении критических концентраций.

После облучения образцов **InSb** протонами ( $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) исследовались также спектры оптического поглощения (рис.2).

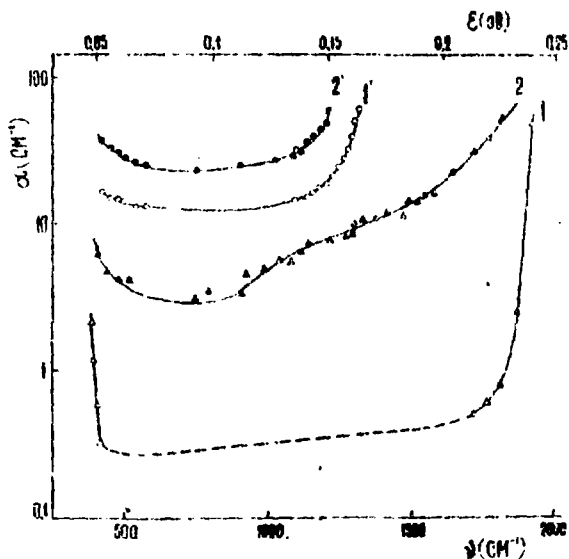


Рис.2. Спектры поглощения при 5 (1,2) и 300 К (1',2').

1, 1' - до облучения, 2, 2' - после облучения;

Действие облучения приводит к сдвигу края собственного поглощения в длинноволновой области и появлению дополнительного поглощения, прилегающего к краю собственной полосы поглощения, т.е. "околокраевое" поглощение (ОКП). Наблюдается также увеличение поглощения в далекой ИК-области.

В настоящее время принято считать, что сдвиг края поглощения и появление ОКП в полупроводниках связано с возникновением "хвостов" плотности состояний в запрещенной зоне. "Хвосты" плотности состояний в случае облучения могут быть обусловлены неравномерным распределением введенных РД и/или компенсацией, в результате чего появляются искривления энергетических зон под влиянием электростатического потенциала в местах скопления дефектов, большими локальными напряжениями, приводящими к флуктуации ширины запрещенной зоны. При повышении температуры увеличивается концентрация свободных электронов, снижается степень неоднородности. Поглощение при 300 К в длинноволновой области, по-видимому, происходит на свободных электронах, поставляемых в зону проводимости как с дефектных уровней, так и собственных.

Для выяснения механизма электропереноса исследовались температурные зависимости электропроводности, коэффициента Холла и подвижности до и после облучения протонами (рис.3). До облучения образцы характеризовались наличием частично компенсированных мелких примесей. В результате облучения произошли сильные изменения: перестали проявляться мелкие

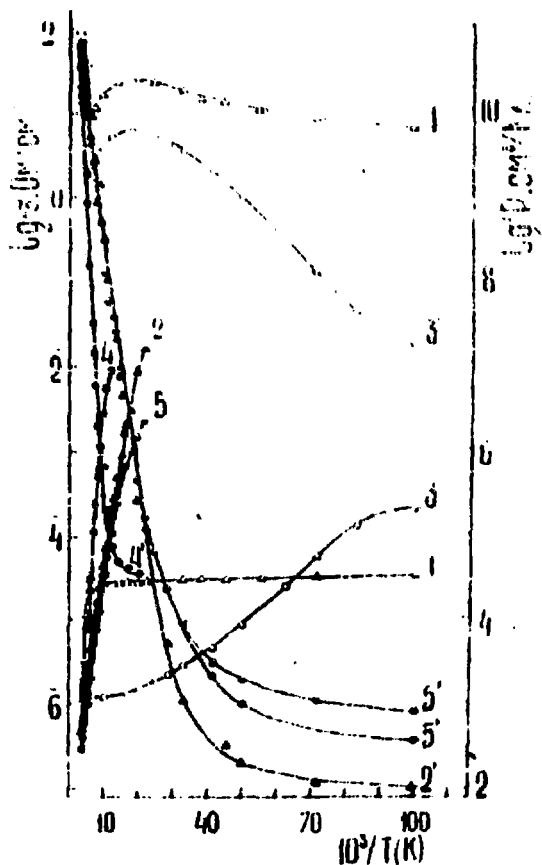


Рис.3 (а). Температурная зависимость коэффициента Холла (1-5) и электропроводности (1'-5') образцов *n*- (1,2) и *p*-типа (3-5). 1,3 (2,4) - до (после) облучения, 5 - после облучения и отжига до 300 К

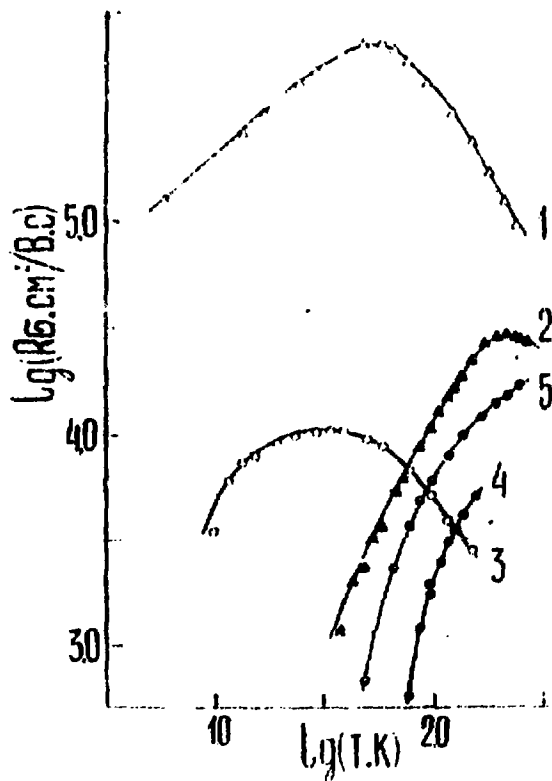


Рис. 3 (б). Температурная зависимость подвижности носителей тока образцов  $n$ - (1,2) и  $p$ -типа (3-5). 1, 3 (2,4) - до (после) облучения, 5 - после облучения и отжига до 300 К

примеси, повысилась глубина уровней, принадлежащие РД, резко снизилась подвижность в области рассеяния на локализованных примесях и ее наклон стал очень крутым, что является свидетельством проявления неоднородностей в образцах. Если при высоких температурах электроперенос осуществляется электронами, поставляемыми в зону проводимости с дефектных уровней, то в области температур, меньших 40 К, механизм проводимости сложен и характерен для сильно неоднородных систем. При температурах 1,2-5 К в образцах, облученных большим флюэнсом протонов, в чистом виде проявляется прыжковая проводимость с переменной шириной прыжка по состояниям вблизи уровня Ферми, т.е. электропроводность в этой области описывается зависимостью

$$\sigma \sim \exp(T^{-1/4}).$$

Исследовались вольт-амперные характеристики (ВАХ) образцов до и после облучения протонами. ВАХ, независимо от температуры облучения, концентрации, вида и типа примесей, имеют одинаковый ход и резко смещены в область высоких электрических полей с крутым подъемом прямолинейных участков ( $J \sim E^n$ ,  $2,5 \leq n \leq 5$ ) и напряжением пробоя  $\sim 800$  В/см.

Магнетосопротивление образцов, облученных большими флюэнсами частиц, при 1,2-4,2 К является отрицательным (ОМС) в магнитных полях вплоть до 7 Тл. В максимуме эти изменения достигают нескольких процентов (рис.4).

С повышением температуры ОМС уменьшается и при 78 К принимает положительные значения. В сильно облученных образцах ОМС, измеренные при 4,2 К, не зависят от ориентации магнитного поля по отношению к току.

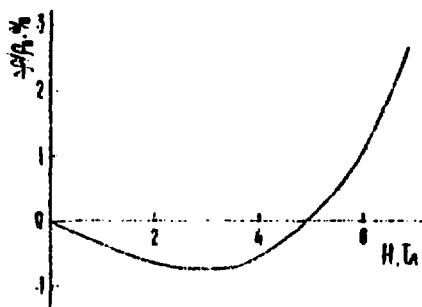


Рис. 4. Магнитосопротивление при 4,2 К образца, облученного при 140 К альфа-частицами с энергией 80 МэВ флюксом  $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$

Изохронный отжиг РД стабильных до комнатной температуры, в образцах, облученных протонами, (рис. 5) ведет к увеличению концентрации электронов и их подвижности, которое происходит в две стадии: 140 – 220 и 260–350 К. Подвижность в пределах первой стадии изменяется незначительно, второй – увеличивается в 10 раз. Отжиг концентрации свободных электронов на этих стадиях идет в противоположных направлениях, т.е. отжигающиеся РД – акцепторы.

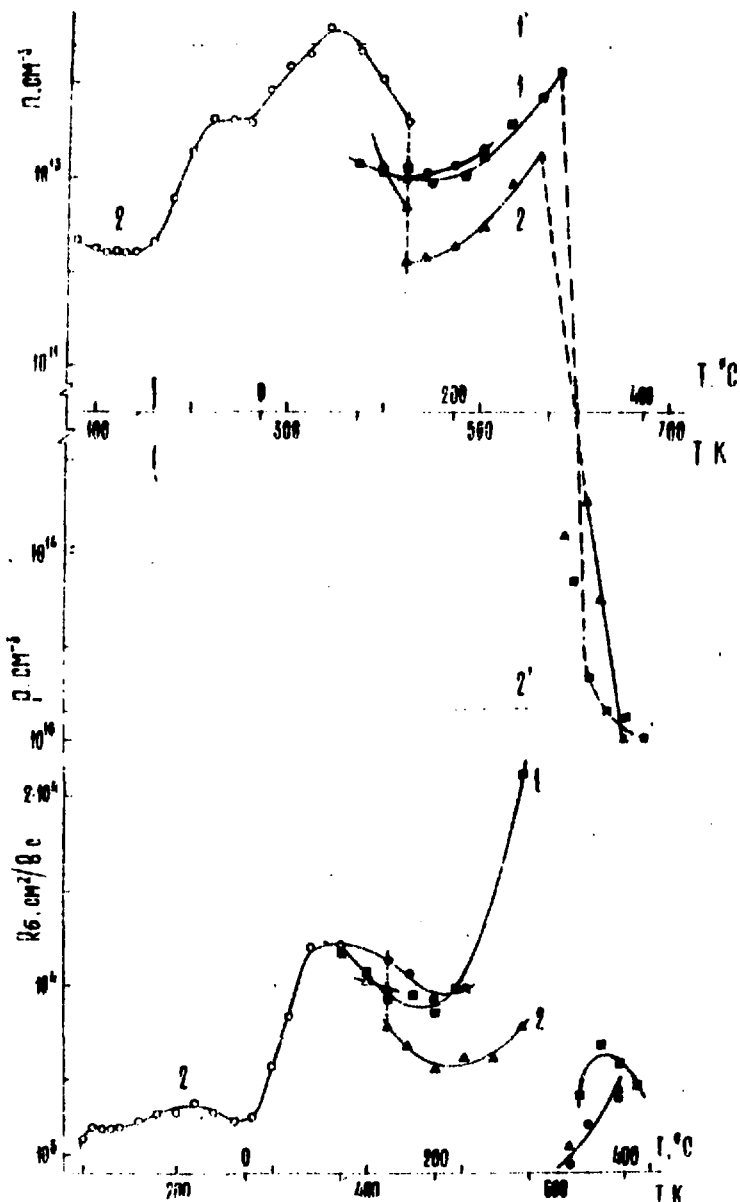


Рис.5. Изохронный отжиг образцов  $L-1'$  (1) и p-типа - 2' (2) до (после) облучения ( $\Delta$ ,  $\blacktriangle$ ,  $\blacksquare$ ) измерены при 80 К, ( $\circ$ ,  $\bullet$ ) - 100 К; светлые фигуры - 5, темные - 30 мин



Отжиг РД, стабильных при комнатной температуре, происходит в три стадии: 100–200, 200–300 и 300–400 °С. На первой стадии концентрация электронов и их подвижность уменьшаются, на второй – увеличиваются. Отжиг образцов на третьей стадии сложен. На этой стадии помимо отжига дефектов вводятся термоакцепторы (ТА). Установлено, что при 310 °С образцы имеют еще  $n$ -тип проводимости. При более высокой температуре происходит  $n$ - $p$ -конверсия. Дальнейший изохронный и продолжительный изотермический отжиг при 400 °С показал, что образцы не вернулись в исходное состояние вследствие введения при отжиге акцепторов. Это иллюстрирует рис. 6, из которого следует, что введенные акцепторы обладают глубокими уровнями.

Стадии отжига низкотемпературных РД совпадают с ранее наблюдавшимися стадиями отжига после низкотемпературного облучения радиацией, передающей атомам решетки энергию немного больше порога образования простейших РД. Поэтому этим стариям могут быть сопоставлены простые точечные дефекты.

Первые две стадии отжига дефектов, стабильных при комнатной температуре, мы связываем с соответствующими стадиями отжига РД, вводимых в иллитичные образцы при облучении электронами с энергией 4 МэВ [7], т.е. также с простыми точечными дефектами. При этом на первой стадии отжигаются дефекты донорного типа, на второй – акцепторного. На третьей стадии отжигаются дефекты донорного типа. Они образуются только при облучении высокоэнергети-

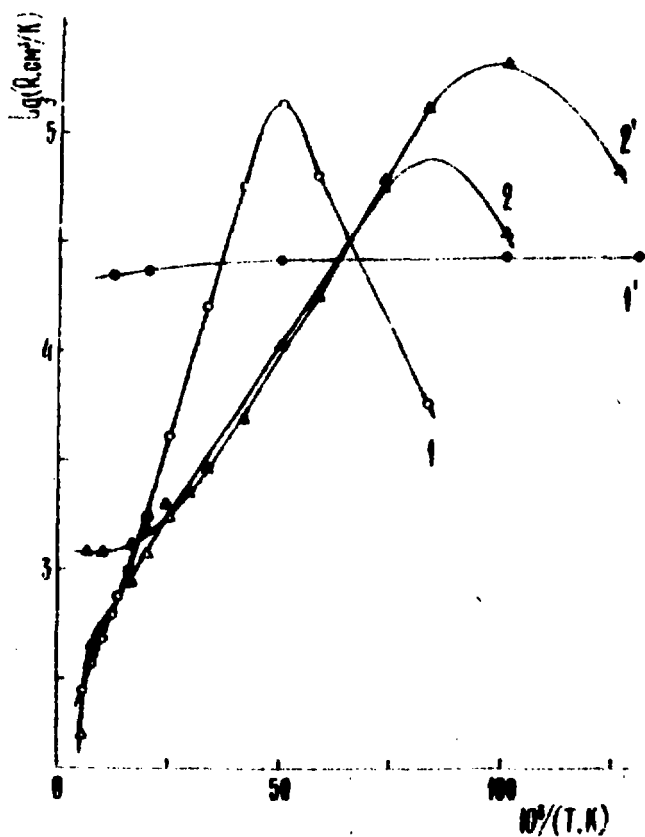


Рис. 6. Температурные зависимости коэффициента Холла до (1', 2') и после (1, 2) радиационно-термической обработки образцов  $n$ -((1, 1')) и  $p$ -типа (2, 2')

ческой радиацией. Возможно, что эти дефекты представляют собой сложные объемные нарушения - разупорядоченные области (РО), обладающие проводимостью  $n$ -типа. О том, что такие дефекты могут иметь место в образцах  $\text{InSb}$ , облученных альфа-частицами, свидетельствует отжиг РД, стабильных при низких температурах, (рис.7). По мере роста флюэнса не проявляются РД, отжигающиеся на стадии 140-220 К, по-видимому, вследствие шунтирующего действия путей протекания, возникающих при перекрытии сложных протяженных дефектов.

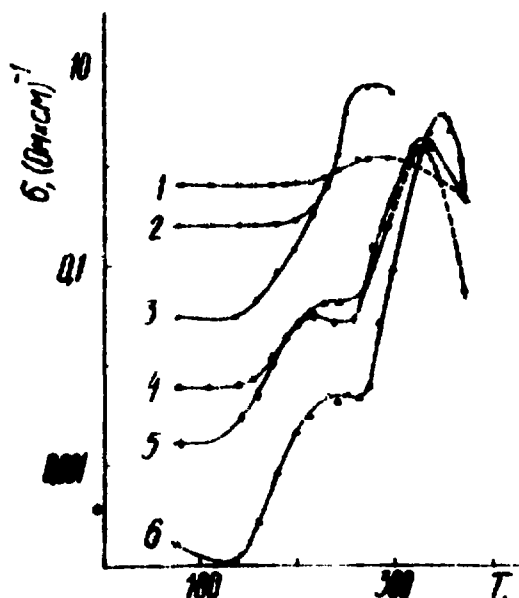


Рис.7. Изохронный (5 мин) отжиг стабильных при низких температурах РД в образцах, облученных при 140 К различными флюэнсами альфа-частиц. Кривым 1, 2, ..., 6 соответствуют флюэнсы  $\Phi_1 > \Phi_2 > \dots > \Phi_6$

При облучении  $\text{InSb}$  высокоэнергетическими заряженными ядерными частицами вклад в дефектообразование дают упругие и неупругие взаимодействия частиц с ядрами. Оценки, сделанные для протонов в случае обычных кулоновских взаимодействий (основной канал образования ГД) /8/, показывают, что ядра отдачи, приведенного к однокомпонентному составу  $\text{InSb}$  с  $\langle M \rangle = 118$  а.е.м. и  $\langle Z \rangle = 50$  ед. заряда, приобретают максимальную энергию 1,5 МэВ, среднюю – 110 эВ, полное сечение рассеяния протонов – 170 б, среднее число смещенных атомов при пороговой энергии 10 эВ – 6. Отсюда следует, что образуется большое количество простых дефектов, из которых формируются термодинамически устойчивые комплексы. В этом процессе участвует электронная подсистема, поглощающая основную долю энергии. Не участвуя в ударном дефектообразовании (максимальная энергия электронов ниже пороговой), она активно участвует в процессе образования ГД /7/. Эффективность образования простых дефектов очень высокая (рис.1). Переход  $n$ - $p$ -конверсия проводимости в образце  $n$ -типа ( $N_D = N_A = 1,6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) происходит при флюэнсе  $10^{12} \text{ см}^{-2}$ , а это значит, что одна альфа-частица образует  $10^4$  акцепторов.

При облучении  $\text{InSb}$  высокоэнергетическими заряженными ядерными частицами, по-видимому, также имеет место образование ГО, поскольку атомы отдачи обладают большими энергиями. Действительно, теоретические исследования, выпол-

ленные на германии /19/, показывают, что уже при энергии атомов отдачи  $\sim 1$  кэВ образуются нарушения ("области малого размера") с линейным размером  $\sim 30 \text{ \AA}$  и с плотностью смещенных атомов в области нарушения  $\sim 1,4 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ , а при энергии атомов отдачи 1-500 кэВ образуются нарушения ("сгустки") с линейными размерами 30-4000  $\text{ \AA}$  и плотностью смещенных атомов  $1,4 \cdot 10^{21} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Эти области из-за высокой плотности дефектов резко отличаются по своим свойствам от остального кристалла и представляют собой разновидность сложных дефектов.

Высокая плотность дефектов в РО может приводить к возникновению новых более сложных форм - ассоциаций РД, с характерными для них термодинамическими, электрическими и оптическими свойствами. Образование в кристалле РО ведет к неоднородному распределению дефектов и, как следствие, к макроскопически неоднородному электрическому полю, которое сильно влияет на электроперенос и другие свойства.

Масса атомов индия и сурьмы больше массы атомов германия, а диапазон энергии отдачи, приобретенных ядрами индия и сурьмы, шире приведенного выше, поэтому при облучении  $\text{InSb}$  протонами и альфа-частицами неизбежно образование РО. Представления об РО в  $\text{InSb}$  многократно привлекались и ранее для объяснения результатов облучения быстрыми нейтронами /15/ и при имплантации ионов /5/. Предпринимались и самостоятельные исследования РО в  $\text{InSb}$  с

помощью электронной микроскопии /14/, но в настоящее время нет еще единого мнения даже о наиболее простых характеристиках этих дефектов, таких как температура отжига и тип проводимости, не говоря об их природе. Мы предположили, что дефекты, отжигающиеся на стадии  $300-400^{\circ}\text{C}$  и обладающие донорными свойствами, и представляют РО. В основу предположения положен тот факт, что они образуются только высокоэнергетической радиацией, обладают высокой проводимостью и при перекрытии шунтируют объем кристалла, вследствие чего не наблюдается отжиг РД в интервале температур  $140-220\text{ K}$ , а отжиг точечных РД в интервале  $100-300^{\circ}\text{C}$  не дает четких стадий, характерных для этих же РД, введенных при облучении низкоэнергетической электронной радиацией ( $4\text{ МэВ}$ ). По нашему мнению, отсутствие четких стадий отжига точечных дефектов связано с тем, что изменения измеряемых величин, происходящее при отжиге, ограничены уровнем, заданным сетью перекрывающихся РО.

Однако, авторы работы /5/ считают, что дефекты донорного типа, отжигающиеся на стадии  $300-400^{\circ}\text{C}$ , являются относительно простыми несовершенствами, а РО, возникающие при облучении альфа-частицами с энергией  $300\text{ кэВ}$ , представляют собой переплавленные микроучастки, окруженные дислокациями. Они обуславливают дырочную проводимость, интенсивно отжигаются при  $250^{\circ}\text{C}$  и образуются в результате возникновения тепловой вспышки под действием отдельной частицы

В наших опытах при облучении альфа-частицами эти дефекты не наблюдались, по-видимому, по причине большого различия в энергии частиц и поглощенной дозе, которая отличалась в 10 раз. Различия в дозах поглощенной энергии, идущей в основном на ионизационные потери, по-видимому, являются тем решающим фактором, который определяет скорость введения РД акцепторного типа. Увеличение скорости введения акцепторов, отжигающихся при  $250^{\circ}\text{C}$ , может объяснить наблюдаемые в работе [5] результаты.

Облученные протонами и альфа-частицами образцы  $\text{InSb}$  представляют собой сильно неоднородную дефектную структуру, что подтверждено совокупностью экспериментальных данных и наличием "хвостов" плотности состояний, сдвигом края поглощения, наблюдаемых в опытах по оптическому поглощению, и большой круговой температурной зависимости эффективной подвижности и ВАХ в области низких температур в опытах по гальваномагнитным исследованиям. Сдвиг края собственного поглощения в длинноволновую область (рис.2, кр. 1' и 2') в результате облучения можно интерпретировать как сужение запрещенной зоны под действием локальных напряжений, возникающих в решетке при образовании дефектов. Поскольку при введении только точечных дефектов этот эффект не наблюдается, то решающую роль в сдвиге, по-видимому, играют РО. При понижении температуры неоднородности усиливаются, что приводит к появлению отрицательного магнито-

сопротивления и прыжковой проводимости по состояниям, принадлежащим РД и находящимся вблизи уровня Ферми. Причиной неоднородного распределения дефектов могут быть не только РО, но и некоррелированное распределение исходных примесей. В самом деле, наличие даже равномерно распределенных точечных дефектов донорного и акцепторного типа в силу компенсации также неизбежно должно вести к проявлению неоднородностей. В сильно облученных альфа-частицами образцах

$\text{InSb}$  в результате перекрытия РО, по-видимому, может возникнуть такая степень разупорядочения кристаллов, что их можно считать макроскопически однородными, что подтверждается отсутствием ориентационной зависимости магнитосопротивления по отношению к току.

Отжиг образцов, облученных протонами и альфа-частицами, вплоть до  $460^\circ\text{C}$ , а это составляет  $\sim 0,9 T_{\text{пл}}$ , не восстанавливает исходные свойства. Известно, что в  $\text{InSb}$  при  $T \geq 350^\circ\text{C}$  вводятся ТА /16/, природа которых сегодня еще недостаточно изучена. По своим свойствам эти ТА близки к свойствам меди в  $\text{InSb}$ , которая, будучи электрически неактивной, быстро диффундирует по межузлиям, взаимодействуя с вакансиями и, становясь атомом замещения, обретает акцепторные свойства. У ТА близкий к меди уровень энергии и коэффициенты диффузии, которые зависят от совершенства кристаллов, в частности, от концентрации дислокаций, из чего следует, что температура инверсии зависит от плотности дислокаций.



Медь может поступать в образцы в процессе их обработки или переходить из неактивной формы, в которой она может находиться в образцах. В данной работе не представляется возможным ответить на вопрос о том, являются ли введенные в наши образцы при  $T > 310^{\circ}\text{C}$  акцепторы тождественными ТА. Обращает на себя внимание и тот факт, что концентрация акцепторов в наших образцах значительно превысила максимально достижимую концентрацию ТА ( $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  /17/). Объяснение этого факта требует дальнейших исследований.

Итак, при облучении  $\text{InSb}$  высокоэнергетическими заряженными ядерными частицами образуется большое количество неоднородно распределенных дефектов различного вида от простых точечных до сложных объемных; что позволяет моделировать экспериментально высокую повреждаемость кристалла.

## Список использованной литературы

1. Вихлий Г.А., Карпенко А.Я., Олейников Л.Н. и др.  
Исследование дозовых зависимостей электропроводности образцов твердых тел на ускорителях заряженных частиц с помощью ЭВМ и аппаратуры КАМАК. - Киев, 1986. - 30 с. - (Препр./АН УССР. Ин-т ядерн.исслед.; КИЯИ-86-9).
2. Машовец Т.В., Хансеваров Р.Ю. Низкотемпературное  $\gamma$ -облучение и отжиг сурьмянистого индия // Радиационная физика неметаллических кристаллов: Тр.совещ. - Киев: Наук. думка, 1967. - с.200-206.
3. Вихлий Г.А., Карпенко А.Я., Конозенко И.Д. и др.  
Влияние электронов с энергией 50 МэВ на электрические свойства  $InSb$  .-Киев, 1976.-с.52-53.  
-(Препр./АН УССР. Ин-т ядерн.исслед.; КИЯИ-76-22).
4. Вихлий Г.А., Карпенко А.Я., Литовченко П.Г. и др.  
Влияние протонов с энергией 47 МэВ на электропроводность полупроводниковых соединений  $A^3B^5$ . -Киев, 1982.-с.30-34.- (Препр./АН УССР. Ин-т ядерн.исслед.; КИЯИ-82-6).
6. Богатырев В.А., Качурин Г.А. Отжиг дефектов в антимониде индия после ионной бомбардировки // Физика и техника полупроводников. - 1977. - Т.11. - с. 1360-1363

6. Селищев П.А., Сугаков В.И. Автоколебания температуры и плотности дефектов в примесных кристаллах под облучением. -Киев, 1989. -19 с. - (Препр./АН УССР. Ин-т ядерн. исслед.; КИЯИ-89-29).
7. Карпенко А.Я. Радиационные дефекты в антимониде индия, стабильные при комнатной температуре: Автореф.дисс. ... канд. физ.-мат.наук.-Черновцы, 1989.-19 с.
8. Быстрые легкие ионы ; обычные кулоновские столкновения //Томпсон М. Дефекты и радиационные повреждения в металлах,-М., 1971.-Гл.4.- с.114-117.
9. Классификация нарушений в Si и Ge при облучении протонами высоких энергий//Коноплева Р.Ф., Остроумов В.Н. Взаимодействие заряженных частиц высоких энергий с германием.-М., 1975.-Гл.У.-с. 110.
10. Aukerman L.W. Electron irradiation of Indium Antimonide//Phys.Rev. -1959. -Vol.115. -P.1125-1132.
11. Cleland J.W. and Crawford J.H., Jr. Neutron irradiation of Indium Antimonide//Phys.Rev. -1954.-Vol.95.-P.1177-1182.
12. Gonzer U. and Okkerse B. Radiation Damage and the Nature of Thermal Spikes in 111-V Compounds (InSb)//Phys. Rev.B.-1958.-Vol.105.-P.757-762.
13. Coates R. and Mitchell E.W.J. The optical and electrical effects of high concentrations of defects in irradiated crystalline Gallium Arsenide//Adv.Phys.-1975.Vol.25 N5.-P.593-614.
14. Bertolotti M. Experimental Observation of Damage Clusters in Semiconductors//Radiation Effects in Semiconductors: Proceedings of the Santa Fe Conference on Radiation Effects in Semiconductors (October 3-5, 1967). -New York. Plenum Press. 1969.-P.311-330.

15. Курдиани Н.И. Отжиг радиационных дефектов и подвижность электронов в антимониде индия, облученном быстрыми нейтронами //Физика и техника полупроводников.- 1969.-т.11.-с.1683-1686.
16. Ильин В.Е., Горбачева И.Е. Влияние отжига на электрические и гальваномагнитные свойства сурьмянистого индия // Физика твердого тела. -1961.т.111, вып.2.-535-544.
17. Галаванов В.В., Рыбин В.Н. Влияние отжига на электрические свойства  $InSb$  //Сб.: Оптические и механические свойства полупроводников и диэлектриков. - Кишинев , 1967, -с.38-45.

Георгий Александрович Вихлий  
Андрей Яковлевич Карпенко  
Петр Григорьевич Литовченко  
Людмила Ивановна Тараброва  
Алла Аркадьевна Гроза

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В  $InSb$   
ОБРАЗУЮЩИХСЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ И  
ЗАРЯЖЕННЫМИ ЯДЕРНЫМИ ЧАСТИЦАМИ  
(Препринт КИЯИ-90-17)**

Рецензенты В.П.Таргачник  
Е.Ю.Брайловский

Редакторы: Н.А.Солдатенко  
Л.П.Малашкина

Подписано к печати 03.07.1990 г.

БФ 15830

Бумага офсетная Усл.-печ.л. - 0,6

Изд. № КИЯИ-90-17 Печать офсетная Уч.-изд.л. - 0,4

Тил.заказ 222 Формат бумаги 60x90/16

Тираж 200 экз. Цена 3 коп.

---

СКТБ с ЭП Института ядерных исследований АН УССР  
252028, Киев-28, проспект Науки, 47

---