

ИМПЛАНТАЦИЯ ГАЛЛИЯ В ПЛЕНКИ РЬТЕ

Б.З. АЛИЕВ

Азербайджанский Технологический Университет

г. Гянджа, ул. 28 Мая, 103

Приводятся результаты исследования ионной имплантации Ga в РЬТЕ при высоких дозах внедрения (до $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$). Показано, что определяющее влияние на электрофизические свойства пленок оказывают радиационные дефекты, а холловские концентрации электронов после бомбардировки практически от дозы не зависят.

Экспериментально показано [1], что перспективным способом изготовления диодных структур на основе полупроводниковых структур $A^{IV}B^{VI}$ является ионная имплантация (ИИ). Этим методом на халькогенидах свинца и узкощелевых твердых растворах получены фотодиоды [2] с обнаружительной способностью, близкой к теоретической.

В результате исследований, выполненных в основном в Австрии [1], была выявлена определяющая роль радиационных дефектов (РД), сопутствующих внедрению заряженных частиц в твердое тело, в формировании электрофизических параметров ИИ слоев $Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}Se_y$ ($0 \leq x \leq 1$, $0 \leq y \leq 1$). Практически независимо от параметров исходного кристалла, бомбардировка ионами H^+ , Sb^+ , As^+ , In^+ , Pb^+ , S^+ , Xe^+ , Ar^+ создает слой n-типа с концентрацией электронов, стабилизирующихся при достаточно высоких дозах облучения $D \sim 10^{14} \text{ см}^{-2}$. По мнению авторов этих исследований, свойства нарушенного слоя (НС) определяются вакансиями теллура. С ними связаны резонансные уровни, стабилизирующие энергию Ферми в РЬТЕ при $T=0 \text{ К}$ примерно на 50 МэВ выше дна зоны проводимости.

С ростом температуры, а также с увеличением содержания олова в $Pb_{1-x}Sn_xTe$, уровень РД смещается в запрещенную зону, РД не стабильно. Их влияние можно устранить отжигом слоев при $T \approx 600 \text{ К}$ в течение 20-30 мин.

Имея в виду использование ИИ для создания высокоэффективных приборов на основе $A^{IV}B^{VI}$ и устранения деградационных процессов, важной задачей на данном этапе следует считать изучение характера и механизма влияния разных сортов имплантируемых ионов, режимов ИИ, последующей обработки.

В настоящем сообщении приводятся результаты исследования ИИ Ga^+ в РЬТЕ при высоких дозах внедрения (до $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$), влияния отжига на свойства ИИ образцов и обсуждается электрическая активность Ga в РЬТЕ.

Метод исследования.

1. Из-за малой ширины запрещенной зоны, высокой концентрации электрически активных собственных дефектов и большой диэлектрической проницаемости, слой объемного заряда вблизи p-n перехода, созданный в РЬТЕ методом ИИ, имеет слишком малое сопротивление, чтобы обеспечить изоляцию НС от толщин образца. Поэтому при измерении электрофизических параметров вдоль плоскости пленок определяются интегральные характеристики слоисто-неоднородной системы. Для надежной оценки параметров НС необходимо, чтобы его относительный вклад в явление переноса был существенным, т.е. его толщина $d_{нс}$, должна быть сравнима с малой толщиной образца d . Согласно [1], протяженность области НС составляет несколько долей микрометра, а глубина проникновения ионов еще меньше, следовательно, имплантированные образцы должны иметь толщину $d = 1 \text{ мкм}$.

В настоящей работе объектами исследования были блочные монокристаллические пленки РЬТЕ толщиной 0,5-0,7 мкм, полученные методами дискретного испарения на слюдяной подложке. Предварительно пленки отжигались в атмосфере инертного газа при $T \approx 600 \text{ К}$ в течение 20 мин, что способствовало стабилизации их параметров. Подготовленные таким образом пленки имели дырочный тип проводимости $p = 2,5 \cdot 10^{17} \div 2,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. При $T = 300 \text{ К}$ значения холловской подвижности составляли $U \approx 600 \div 800 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, коэффициент термоэдс $\alpha = 350 \div 450 \text{ мкВ/К}$.

2. Имплантация ионов Ga^+ с энергией 90 кэВ проводилась на установке ИЛУ-1 в режиме горизонтального сканирования импульсами длительностью 1,2 мс с частотой 50 Гц. Использовались два значения средней плотности ионного тока – 0,5 и 1 мкА/см², которые допустимы еще без существенного нагрева образца. Дозы внедрения составляли: $D \approx 6 \cdot 10^{14}$; $2 \cdot 10^{15}$; $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, что значительно превышает ранее использованные [1]. Усредненные по толщине образца концентрации ИИ примеси достигали 10^{20} см^{-3} (таблица 1).

Таблица 1.

Номер образца	Толщина (мкм)	Тип имплан. иона	Плотность ионного тока (мкА/см ²)	Доза (см ⁻²)	Отклонение ионного пучка от нормали к пленке
1.	0,69	Ga^+	1,0	$6,25 \cdot 10^{14}$	-
2.	0,69	Ga^+	1,0	$5,6 \cdot 10^{15}$	-
3.	0,54	Ga^+	1,0	$1,9 \cdot 10^{15}$	-
4.	0,53	Ga^+	0,5	$1,9 \cdot 10^{15}$	-
5.	0,57	Ga^+	0,5	$6,25 \cdot 10^{14}$	-
6.	0,65	Ar^+	1,0	$6,25 \cdot 10^{14}$	-
7.	0,65	Ar^+	0,5	$6,25 \cdot 10^{14}$	7°
8.	0,65	Ar^+	0,5	$6,25 \cdot 10^{14}$	15°

3. Для разделения влияния примеси и РД, а также для выяснения условий устранения РД последующим отжигом, часть образцов (см. таблицу 1) вместо Ga^+ облучались ионами Ag^+ , в тех же условиях ИИ. Ag^+ вводился в пленки под различными углами для исследования возможных процессов каналирования [3] в ориентированных образцах.

4. Метод послойного травления, широко применяемый для исследования электрических свойств в ИИ слоев, может давать искаженные результаты из-за загрязнения поверхности примесями и генерации в пленках новых дефектов при обработке. В частности в [1] отмечено, что в РЬТе ионы малых энергий (ионное травление) создают такие же НС, как и быстрые ионы. Поэтому в настоящей работе для выявления неоднородного распределения примеси и оценки параметров НС использовались измерение и комплексный анализ эффективных (интегральных) кинетических коэффициентов: электропроводности (σ), Холла (R), термоэдс (α) и поперечного эффекта Нернста-Эттингсгаузена (Q). Теоретические основы и некоторые конкретные приемы такого метода обсуждаются в [4,5].

Результаты эксперимента.

1. Влияние РД на свойства пленок.

Главный результат процесса ИИ проявляется в инверсии знака R и α во всех образцах, в том числе и в имплантированных Ag^+ . Абсолютная величина соотношения кинетических коэффициентов в ИИ образцах близка к характеристикам однородных пленок p-PbTe (рис.1,2). Од-

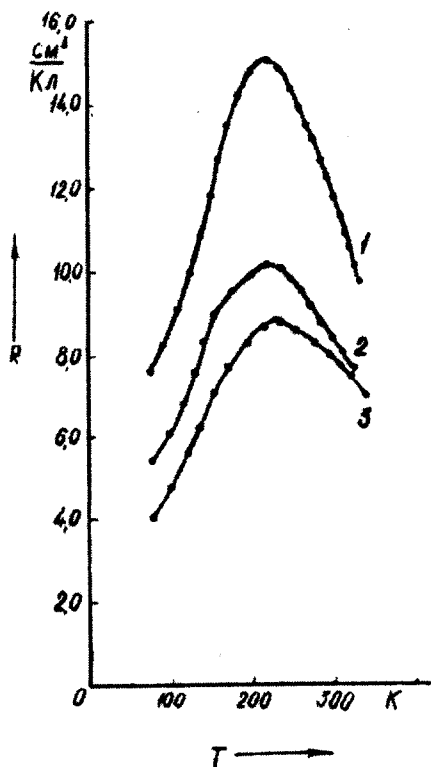


Рис.1. Температурные зависимости коэффициента Холла пленок РЬТе, имплантированных ионами Ga D , мкКл/см²: 1 - 100; 2 - 900; 3 - 300 α , мкм: 1 - 0,42; 2 - 0,5; 3 - 0,69.

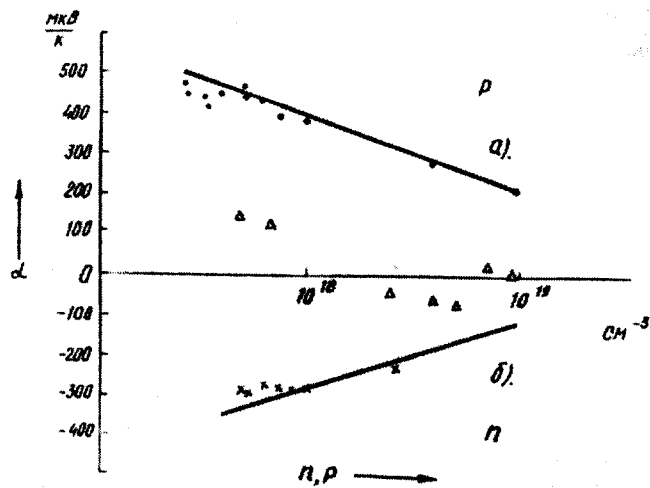


Рис.2. Зависимость коэффициента термоэдс от холловской концентрации:
а) усредненные данные для однородных пленок p-типа;
б) усредненные данные для однородных пленок n-типа;
• - до имплантации;
× - после имплантации;
Δ - после отжига.

нозначной корреляции свойств пленок с условиями ИИ установить не удается, что может быть следствием применения столь больших доз внедрения. Обращает внимание немонотонный характер $R(T)$ (рис.1) во всех ИИ образцах. Их можно объяснить, предположив по аналогии с [1], что огромная плотность РД в пленках приводит к образованию в зонном спектре резонансных состояний у края зоны проводимости.

Рассчитав по известной методике [6] температурные зависимости уровня химпотенциала в пленках (рис.3), мы

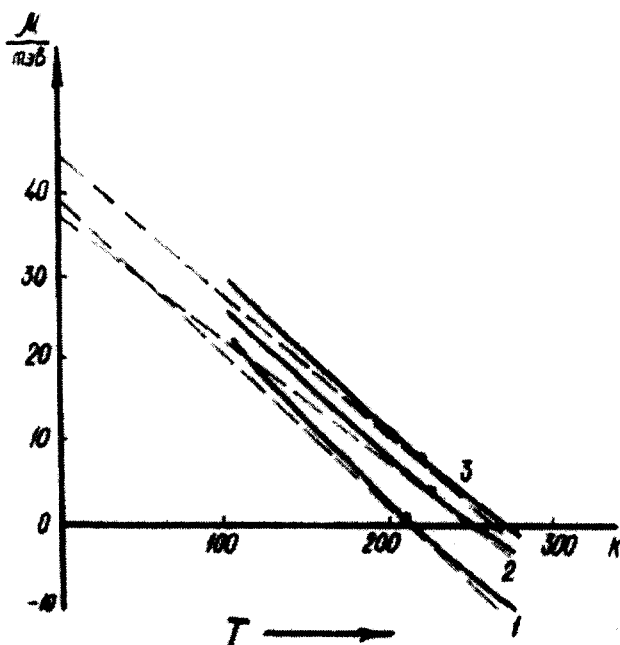


Рис.3. Температурная зависимость уровня химпотенциала в пленках РЬТе<Ga>. D , мкКл/см²: 1 - 100; 2 - 900; 3 - 300.

оценили энергию таких состояний. При $T=0$ уровень РД оказывается выше дна зоны проводимости ε_c на величину $\varepsilon_i = 40 \pm 6$ мэВ. С ростом T он отодвигается в запрещенную зону со скоростью около 0,2 мэВ/К. Эти результаты согласуются с величинами, указанными в [1] $\varepsilon_i = 25-55$ мэВ; $\partial \varepsilon_i / \partial T = 0,12-0,22$ мэВ для других имплантированных примесей.

Подчеркнем дополнительно, что в ИИ пленках PbSe до отжига РД никак не проявляется неоднородное распределение примеси по толщине. В аналогичных условиях на пленках PbSe [4] и в соответствии с расчетами для PbTe получается, что при энергии имплантируемых ионов около 100 кэВ, глубина залегания максимума профиля распределения галлия составляет не более 0,05 мкм, что значительно меньше толщины образца.

Экспериментально нам удалось исследовать распределение примеси до глубины 0,13 мкм (рис.4). Существенно неравномерное распределение примеси (рис.4) не проявляется экспериментально.

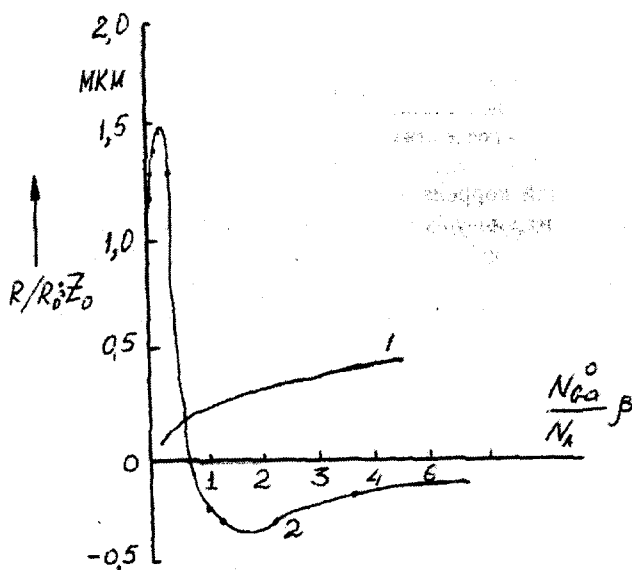


Рис. 4. Глубина залегания p-n перехода (1) и относительное изменение коэффициента Холла (2) в пленках PbSe, имплантированных галлием в зависимости от

$N_{Ga}^0 \beta / N_A$ (расчет.).

Точками отмечены экспериментальные значения.

Возможны на наш взгляд два объяснения этого факта: либо действие РД является определяющим и влияние неравномерного распределенного Ga на свойства пленок мало по сравнению с этим главным фактором; либо Ga вообще не оказывает существенного влияния на характеристики PbTe. Аргументом в пользу первого объяснения является аналогия свойств пленок ИИ галлием и аргоном, а электрическую активность Ga в PbTe мы обсудим на основе данных о свойствах пленок после отжига РД.

Если вернуться к РД и создаваемым им локализованным состояниям, то следует учесть, что при большой плотности состояний в примесной полосе уровень Ферми стабилизирован у ее середины, и концентрация носителей заряда может быть существенно ниже концентрации дефектов ($N_{деф}$). При этом в широком интервале измене-

ний $N_{деф}$, n может быть практически постоянной величиной $n = n_0$. Если предположить, что $N_{деф} = N_{деф}(d)$, но $N_{деф} > n_0$ во всех сечениях образца, то концентрация носителей заряда может не зависеть от координаты. Это может быть причиной того, что соотношения σ и R , R и α , R и Q в ИИ пленках такие же, как и в однородно-легированных слоях. В любом случае, однако, приходится предположить, что концентрация РД в пленках очень велика, и они пронизывают всю толщину образца. Возможно, их ускоренному распределению вглубь пленки способствует специфическая структура этих образцов с дислокационными стенками вдоль направления имплантации [7].

Существенный вклад могут вносить и процессы каналирования, видимо наиболее эффективные [3] именно в выбранном направлении имплантации (вдоль 111). Это обстоятельство мы проверяли, проводя наклонную имплантацию Ag^+ (см. табл.1). Свойства этих образцов, однако, не отличались от параметров пленки ИИ по нормали к поверхности, что указывает на отсутствие существенного вклада каналирования в формирование НС.

2. Изменение свойств пленок в процессе отжига.

Согласно литературным данным [1], отжиг ИИ пленок при $T=600$ К в течение 20-30 мин снимает концентрацию РД до пренебрежимо малого уровня.

Однако, в наших экспериментах с образцом № 6 было выявлено, что данный режим отжига не приводит к полному возврату свойств пленки к начальным (до имплантации). Пленка трижды отжигалась при $T=573$ К по 20 мин. После первой двадцатиминутки еще сохраняется интегральная проводимость n-типа, после второй - происходит инверсия знака R и α , но холловская концентрация дырок, вычисленная по интегральному значению R , оказывается слишком низкой, а соотношение α , σ , Q и R указывает на собственный характер проводимости. И лишь после третьего акта отжига свойства образца стабилизируются, абсолютные значения кинетических коэффициентов приближаются к исходным и количественно соответствуют характеристикам однородной пленки такой же концентрации дырок. Возможно, что использование более значительных, чем в [1] доз имплантации требует более длительного отжига.

После отжига РД верхний слой пленки обладает проводимостью n-типа, а в глубине образца восстанавливается проводимость r-типа. При этом легко объяснить [5] нереальное для однородных пленок PbTe соотношение кинетических коэффициентов, когда интегрально измеренной по R концентрации носителей заряда около 10^{19} см⁻³ соответствуют значения $\alpha = 10-50$ мкВ/К, Q становится положительным и достигает для некоторых образцов значений 800-900 см²/В·с.

Мы провели подробный расчет свойств слоя PbTe, легированного галлием, задаваясь ступенчатым распределением примеси и варьируя глубину залегания p-n перехода ($d_{нс}$). При этом были использованы формулы [5] для двухслойных образцов с разным типом проводимости в слоях.

Подбором $d_{нс}$ не удается получить характерные для PbTe<Ga> [8,9] соотношения кинетических коэффициентов в ИИ слое.

В таблице 2 показаны результаты такого расчета для образца № 2 при $T=300$ К.

Таблица 2.

$d_{нс}$, мкм	0,1	0,15	0,2	0,25
$\sigma_{нс}$, Ом ⁻¹ ·см ⁻¹	465	330	260	215
$\alpha_{нс}$, мкВ/К	-380	-345	-310	-280
n , см ⁻³	$4 \cdot 10^{18}$	$3,1 \cdot 10^{18}$	$2,8 \cdot 10^{18}$	$2,7 \cdot 10^{18}$
Q , см ² /В·с	730	650	570	500

При $d_{нс}$ 0,2-0,25 мкм получается реальное соотношение σ , α и R . Отсюда легко сделать приблизительную оценку электрической активности Ga в PbTe. $\beta = N_{Ga} / n_{нс}$ - это показывает, что каждые 100 атомов Ga образуют лишь 1-2 донорных центра. Для Ga не удается получить разумной оценки, что свидетельствует о грубости приближения ступенчатого распределения примеси.

После отжига при $T=573$ К в большинстве пленок происходит инверсия. Необычный характер температур-

ных зависимостей кинетических коэффициентов свидетельствует об определяющем влиянии неоднородно распределенной донорной примеси на свойства образцов. Простым расчетом в модели ступенчатого распределения Ga уже не удается получить реальных соотношений величин σ , α , R и Q . Видимо второй отжиг приводит уже к значительному «расплыванию» профиля распределения Ga, наблюдавшемуся в частности в [5], и Q достигает значений 1600-1700 см²/В·с, что также может быть объяснено с учетом наличия в пленке слоев с р- и п-типом проводимости.

Таким образом, при использованных режимах имплантации и отжига в PbTe каждые 100 имплантированных атомов галлием создают 1-2 донорных центра.

В заключении автор выражает благодарность А.В. Суворову, проводившему имплантацию Ga⁺ и Ag⁺ в исследованных пленках.

- [1] L. Palmetshofer. Appl.Phys.A., 1984, № 34, p. 139-153.
 [2] J.P.Donnely, T.C.Harman, A.G.Foyt, W.T. Lindley. Appl. Phys. Lett., 1972, № 20, p. 279-282.
 [3] X.Руссел, И. Руге. Ионная имплантация, М., «Наука», 1983, с. 360.
 [4] И.А. Абряян, Б.З. Алиев, С.Д. Имамкулиев, С.А. Казьмин, В.И. Кайданов, Г.Д. Касаманли, А.В. Суворов. ФТП, т. 17, № 4, с. 611-613.
 [5] Б.М. Гольцман, З.М. Дашевский, В.И. Кайданов, Н.В. Коломоец. «Пленочные термоэлементы» (физика и применение), М., «Наука», 1985, с. 232.
 [6] А.Н. Аверкин, В.И. Кайданов, Р.Б. Мельник. ФТП, 1976, т. 5, в. 1, с. 91-95.
 [7] Л.И. Бышенский, Т.С. Гудкин, С.К. Иорданишвили, С.А. Казьмин, В.И. Кайданов, С.А. Немов, Ю.И. Равич. ФТП, 1977, т. 11, в. 8, с. 1522-1526.
 [8] А.Н. Вейс, В.И. Кайданов, Н.А. Костылева, Р.Б. Мельник, Ю.И. Уханов. ФТП, 1973, т. 7, № 5, с. 928-930.
 [9] А.А. Аверкин, Т.С. Бушмарина, И.А. Дробкин, Ю.З. Сонфиоров. ФТП, 1971, т. 5, в. 1, с. 197-200.

B.Z. Əliyev

QALLIUMUN PbTe TƏBƏQƏLƏRİNƏ İMPLANTASIYASI

Məqalədə, qalliumun, yüksək miqdarlarda ($6 \cdot 10^{15}$ sm⁻² qədər), PbTe təbəqələrinə ion implantasiyasının tədqiqindən alınmış nəticələr təqdim olunmuşdur. Radiasiya defektlərində aşqarların qeyri-bircins paylanması müəyyənləşdirmək üçün, kinetik əmsallar ölçülərək, onların kompleks araşdırılması aparılmışdır.

B.Z. Aliyev

GALLIUM IMPLANTATION TO FILMS PbTe

The results of the investigation of Ga ion implantation to PbTe at high dose of implantation (up to $6 \cdot 10^{15}$ sm⁻²) are presented. It is shown, that radiation defects influence on electrophysical properties of films essentially and Hall electron concentrations not depend on dose after the bombardment practically.