

## ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА ПОД АНОДНЫМ ОКИСЛОМ НА ИЗМЕНЕНИЕ СОСТАВА ПОВЕРХНОСТИ И КОНВЕРСИЮ ТИПА ПРОВОДИМОСТИ МОНОКРИСТАЛЛОВ $p\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ( $x \approx 0.2$ )

Талипов Н. Х., Попов В. П., Ремесник В. Г., Налькина З. А.

Методами резерфордского обратного рассеяния, оптического отражения и дифференциальных холловских измерений исследовалось влияние отжига под анодным окислом толщиной  $\sim 100$  нм на изменение состава приповерхностной области и процесс конверсии узкозонного полупроводникового соединения  $p\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  при  $T=175\text{--}300$  °С. Получены количественные данные по увеличению содержания ртути (уменьшению  $x$ ) в приповерхностном слое в зависимости от температуры отжига. Обнаруженное различие в величинах  $x$ , определенных методами обратного рассеяния и оптического отражения, связывается с появлением в межузлиях решетки  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  избыточной ртути, которая образуется в результате взаимодействия с элементами соединения на границе раздела. Поверхностный слой толщиной  $\sim 20$  нм с накопленной межузельной ртутью является диффузионным источником. Ртуть из источника диффундирует в объем  $p\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  в процессе отжига под анодным окислом, в результате чего происходит конверсия типа проводимости с  $p$ -типа на  $n$ -тип. Для конкретных экспериментальных условий определены параметры диффузии ртути в температурном интервале  $200\text{--}275$  °С. Полученные значения концентрации электронов  $n=4\cdot 10^{14}\text{--}1\cdot 10^{15}$  см $^{-3}$  и их подвижности  $\mu_n=(1.5\text{--}3.6)\cdot 10^5$  см $^2$ /В·с в конвертированном слое, образовавшемся при отжиге  $p\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  под анодным окислом, соответствуют литературным данным для электрофизических свойств  $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ , получаемым отжигом под давлением паров ртути.

Анодный окисел (АО), выращенный на  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  (КРТ), используется для пассивации поверхности [1, 2], получения слоев  $n$ -типа и  $n$ - $p$ -переходов в материале  $p$ -типа [3-6], а также его применяют в качестве маски при отжиге ионно-имплантированных образцов [7].

Исследования методом оже-спектроскопии свойств границы раздела АО—КРТ после термообработки показывают, что изменяется состав приповерхностной области, которая обедняется кадмием и обогащается ртутью [1, 2]. Предполагается также, что за процесс конверсии типа проводимости с  $p$ -типа на  $n$ -тип ответственна ртуть, которая накапливается в поверхностном слое  $p$ -КРТ при анодном окислении, а затем в процессе отжига диффундирует в объем кристалла и аннигилирует с вакансиями ртути [3, 5]. Однако в литературе практически отсутствуют количественные данные об изменении состава поверхности соединения и по электрофизическим свойствам слоев  $n$ -типа, полученных на  $p$ -КРТ отжигом под анодным окислом при различных режимах, что затрудняет понимание механизма происходящих при этом процессов, а также их необходимо знать и для практического применения при создании, например,  $n$ - $p$ -переходов.

Цель данной работы — изучение изменения состава поверхности и процесса конверсии  $p$ -КРТ при термообработке под АО.

Исследования проводились на монокристаллах КРТ  $p$ -типа с  $x=0.20\text{--}0.22$ , концентрацией дырок  $p=(0.7\text{--}1.0)\cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ , подвижностью  $\mu_p=600\text{--}700$  см $^2$ /В·с. Образцы КРТ подвергались химико-механической полировке и травлению в полирующем травителе на основе бром—этанолэтиленгликоля. Толщина образцов после подготовки поверхности составляла 600 мкм. Анодный окисел толщиной  $\sim 100$  нм выращивался на свежетравленной поверхности КРТ

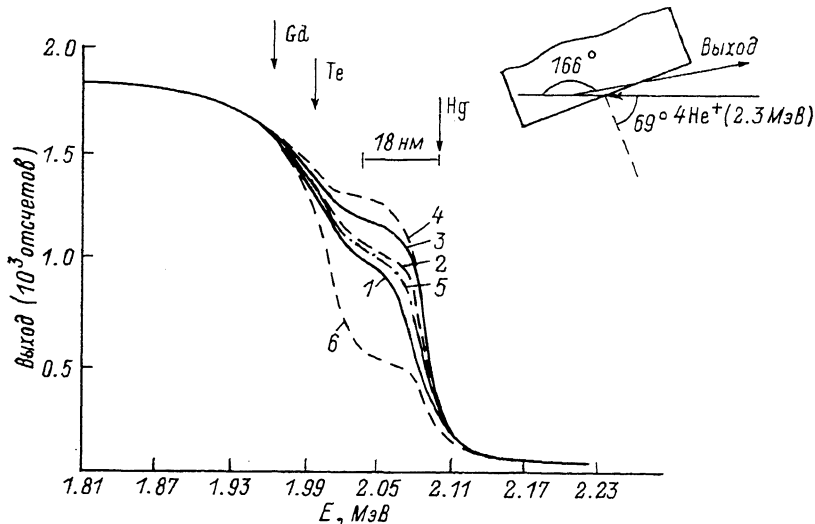


Рис. 1. Энергетические спектры РОР.

Время отжига КРТ под АО  $t=30$  мин. 1 — исходный КРТ; температура отжига, °С: 2 — 200; 3 — 250; 4 — 300; 5 — 300, после травления на глубину  $\sim 50$  нм. 6 — пленка АО на КРТ.

в электролите на основе 0.1 н. КОН в смеси этиленгликоль—вода 9 : 1 при плотности тока  $0.3 \text{ мА/см}^2$  в гальваностатическом режиме. Отметим, что при таком способе анодного окисления стехиометрия поверхности соединения не изменяется. С целью уменьшения интенсивности испарения ртути из самой пленки АО и подложки в процессе термообработки [8–11] с окисленной стороны КРТ и с обратной наносилась пленка  $\text{SiO}_2$  толщиной  $\sim 300$  нм газофазным осаждением при  $T=100$  °С. Отжиг проводился в атмосфере азота при  $T=175$ – $300$  °С длительностью  $t=30$  с– $30$  мин, затем пленки двуоксида кремния и анодного окисла удалялись в HF. Термообработки в течение  $t=30, 60, 120$  с проводились в печи для быстрого отжига.

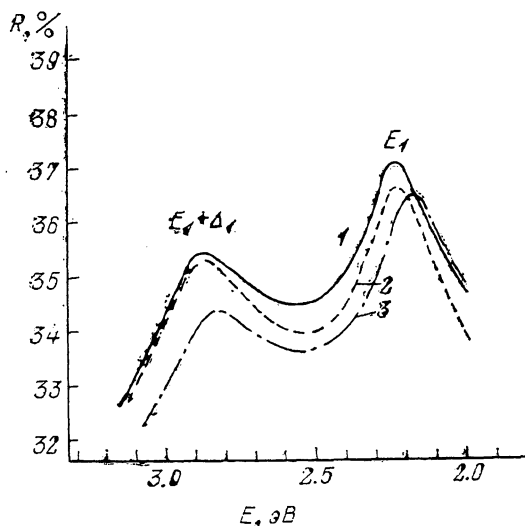
Дифференциальные холловские измерения проводились при  $T=77$  К методом Ван-дер-Пау в переменном магнитном поле  $B=0$ – $1.0$  кГс. Состав приповерхностной области КРТ исследовался методом резерфордского обратного рассеяния (РОР) ионов  $^4\text{He}^+$  с энергией 2.3 МэВ и по спектрам оптического отражения, снятым на спектрофотометре *Specord-UV-VIS* при комнатной температуре.

На рис. 1 представлены неориентированные спектры РОР для исходного КРТ и после отжига под АО при  $T=200, 250, 300$  °С в течение 30 мин. Здесь же приведены спектр для образца с удаленным после отжига под АО при  $T=300$  °С поверхностным слоем толщиной  $\sim 50$  нм и спектр, полученный от пленки АО. Геометрия исследования методом РОР, показанная на рис. 1, позволяет в нашем эксперименте получить максимальное разрешение по изменению содержания ртути в поверхностном слое КРТ на глубине  $\sim 20$  нм. Анализ спектров РОР показывает, что с ростом температуры отжига концентрация ртути в приповерхностной области увеличивается. Аналогичное увеличение содержания ртути в поверхностном слое КРТ, термообработанного под анодным окислом, наблюдалось ранее в работах [7, 8].

Спектры оптического отражения, представленные на рис. 2, измерялись на тех же образцах КРТ, для которых приведены спектры РОР (рис. 1). На спектрах отражения наблюдаются пики  $E_1$  и  $E_1+\Delta_1$ , положение которых смещается при изменении состава твердого раствора  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ , что позволяет

Рис. 2. Спектры отражения.

Время отжига КРТ под АО  $t=30$  мин. 1 — исходный КРТ; температура отжига, °C: 2 — 200, 3 — 250.



определять значение  $x$  [12]. Толщина анализируемого слоя определяется глубиной проникновения света и составляет величину  $\sim 30$  нм. Поверхность образца, который отжигался при  $T=300$  °C, помутнела и потеряла отражающую способность. Из рис. 2 видно, что с ростом температуры отжига пики смещаются в сторону меньших энергий фотонов, что соответствует увеличению содержания ртути и уменьшению содержания кадмия в анализируемом слое КРТ. После

стравливания поверхностного слоя на глубину  $\sim 50$  нм состав поверхности образцов, отожженных при  $T=200, 250$  °C, вернулся к исходному значению.

Отметим также, что увеличение содержания ртути в приповерхностной области наблюдается методами РОР и оптического отражения и при быстром термическом отжиге КРТ под АО в течение  $t=30$  с. Для количественной же обработки результатов исследований этими методами мы использовали экспериментальные данные, представленные на рис. 1, 2, для времени отжига  $t=30$  мин. В табл. 1 приведены результаты расчета по изменениям состава (величины  $x$ ) концентрации избыточной ртути  $\Delta$  [Hg]. Методика расчета величины  $\Delta$  [Hg] по спектрам РОР рассматривалась в работе [11]. Анализ табл. 1 показывает, что с ростом температуры отжига в приповерхностной области КРТ уменьшается значение  $x$ , т. е. уменьшается содержание кадмия. При  $T=300$  °C по данным РОР в поверхностном слое толщиной  $\sim 50$  нм образовалась фаза HgTe, что согласуется с результатами работы [6]. Более высокие значения величин  $\Delta$  [Hg], полученные методом РОР, по сравнению с оптическим отражением объясняются, на наш взгляд, тем, что оптическое отражение «чувствует» только ртуть, находящуюся в узлах подрешетки HgTe, тогда как методом РОР анализируется полное содержание ртути в исследуемом слое, которая находится как в узлах, так и накапливается в межузельном положении.

Наблюдаемое изменение состава КРТ по спектрам отражения свидетельствует о замещении кадмия в подрешетке CdTe ртутью, что, по-видимому, может происходить только за счет химических реакций между АО и КРТ на

Таблица 1

Состав поверхностной области  $Cd_xHg_{1-x}Te$  и концентрация избыточной ртути  $\Delta$  [Hg] после отжига под АО в течение 30 мин

Температура отжига, °C	Спектры отражения		Спектры РОР	
	$x$	$\Delta$ [Hg], см <sup>-3</sup>	$\Delta$ [Hg], см <sup>-3</sup>	$x$
Исходная	0.200	—	—	0.200
200	0.184	$\sim 0.2 \cdot 10^{21}$	$1 \cdot 10^{21}$	$\sim 0.14$
250	0.125	$\sim 1.1 \cdot 10^{21}$	$2 \cdot 10^{21}$	$\sim 0.07$
300	—	—	$3 \cdot 10^{21}$	$\sim 0.00$

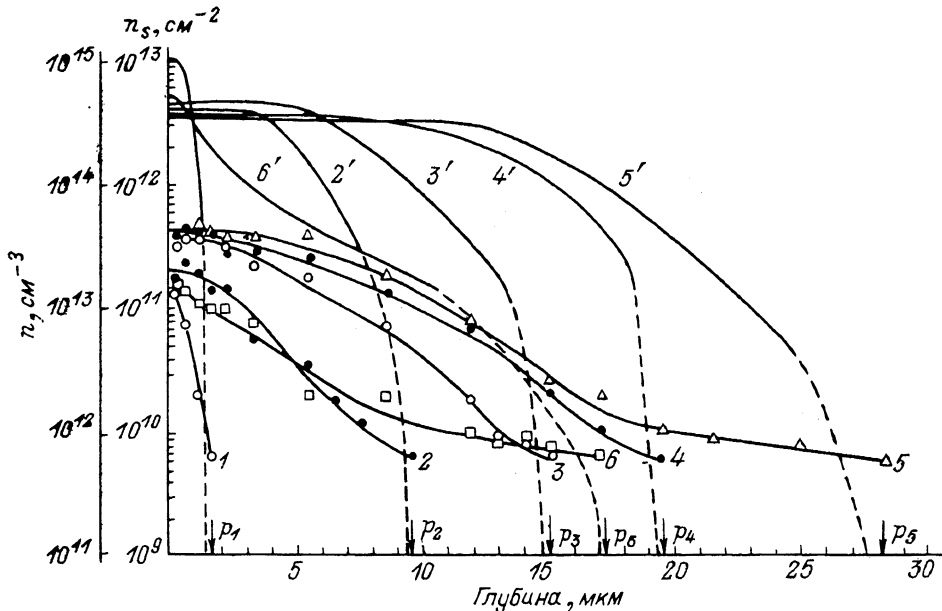


Рис. 3. Профили распределения слоевой концентрации электронов  $n_s$  (1—6) и концентрации  $n$  (1'—6').

Время отжига КРТ под АО  $t=60$  с; температура отжига, °C: 1, 1' — 175; 2, 2' — 200; 3, 3' — 225; 4, 4' — 250; 5, 5' — 275; 6, 6' — 300.

границе раздела [1, 2, 13], в результате которых ртуть из пленки анодного окисла (согласно работе [8] и рис. 1, отношение  $[Hg]^{AO}/[Hg]^{KPT} \approx 0.6$ ) поступает на место кадмия, образуя фазу  $HgTe$ , а также выделяется в свободном состоянии. Несвязанная ртуть накапливается в поверхностной области КРТ в межузлиях решетки и в процессе отжига мигрирует в объем полупроводника, что приводит к конверсии типа проводимости с  $p$ -типа на  $n$ -тип. Количественно концентрацию межузельной ртути  $[Hg]^I$  можно определить как разность значений  $\Delta [Hg]$ , полученных из спектров РОР и спектров отражения. Из данных табл. 1 имеем оценку:  $[Hg]^I \approx (8-9) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Учитывая, что максимальное увеличение содержания ртути происходит в поверхностном слое  $\sim 20$  нм, получаем величину поверхностной концентрации межузельной ртути:  $[Hg]^I_s \approx \approx 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Заметим, что такого количества ртути хватило бы для компенсации  $p$ -КРТ с исходной концентрацией дырок  $p \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$  на глубину  $\sim 2$  мм, если бы не происходила потеря ртути из соединения за счет ее испарения во внешнюю среду сквозь защитные покрытия АО и  $SiO_2$ . Потеря ртути заметно проявляется с увеличением времени и температуры отжига.

Процесс образования  $n$ -слоя при отжиге  $p$ -КРТ под АО исследовался на тех образцах, которые до выращивания анодного окисла при измерении исходных параметров ( $p$ ,  $\mu_p$ ) в переменном магнитном поле  $B=0-1.0$  кГс имели положительное значение постоянной Холла  $R(B)$  [встречаются кристаллы  $p$ -КРТ со знакопеременной зависимостью  $R(B)$ ]. Это было необходимо для того, чтобы обнаружить по отрицательному знаку измеряемой ЭДС (постоянной) Холла в слабом магнитном поле наличие  $n$ -слоя после отжига. Как было показано в работе [6], величина ЭДС Холла при измерении в полях  $B=0-10.0$  кГс зависит от глубины  $n$ -слоя и может иметь знакопеременный вид. Это объясняется тем, что с увеличением магнитного поля проводимость  $n$ -слоя  $\sigma_n$  уменьшается за счет его магнитосопротивления (подвижность электронов в  $n$ -слое

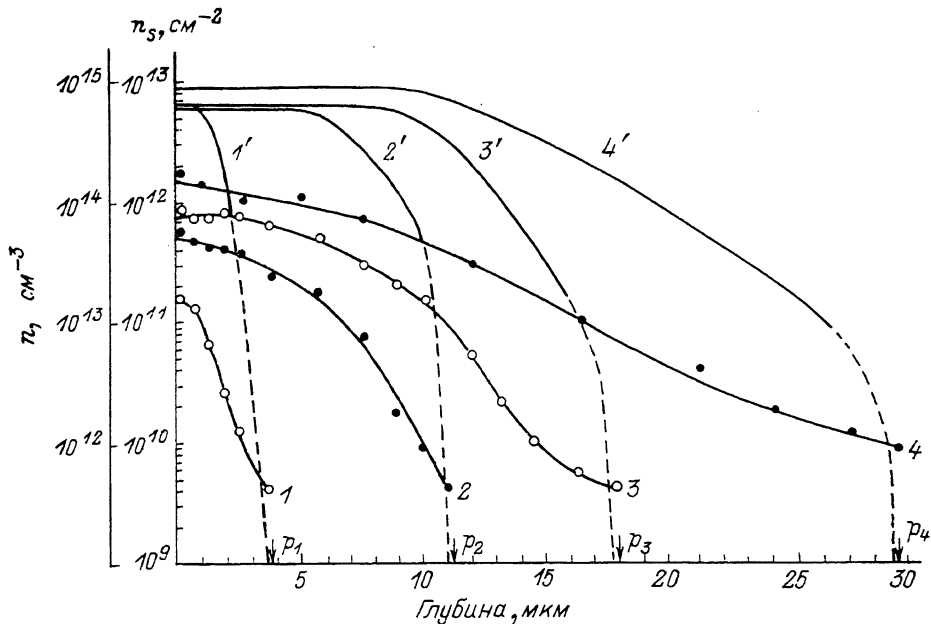


Рис. 4. Профили распределения слоевой концентрации электронов  $n_s$  (1—4) и концентрации  $n$  (1'—4').

Температура отжига КРТ под АО  $T=200$  °С. Время отжига: 1, 1' — 30; 2, 2' — 60; 3, 3' — 120 с; 4, 4' — 10 мин.

намного больше подвижности дырок в подложке) и при больших ( $B \approx 10$  кГс) полях вклад проводимости подложки  $p$ -типа  $\sigma_p$  в полную проводимость двухслойного образца  $\sigma = \sigma_n + \sigma_p$ , а значит и в измеряемое значение  $R(B)$  тем больше, чем меньше глубина конвертированного слоя. Поэтому для определения параметров  $n$ -слоев, имеющих глубину  $d_n$  несколько мкм на подложке  $p$ -типа толщиной  $\sim 600$  мкм, мы использовали фиксированное значение слабого магнитного поля  $B=90$  Гс, а за глубину  $d_n$  принималась суммарная толщина стравленного  $n$ -слоя перед последним шагом травления, когда ЭДС Холла при данном поле меняла знак с отрицательного на положительный. Полная проводимость  $\sigma$  измерялась при  $B=0$ . Определение слоевой концентрации электронов  $n_s$  и их подвижности для оставшегося после каждого шага травления  $n$ -слоя проводилось на основе метода расчета эффекта Холла для двухслойных образцов [14]. Пересчет слоевой концентрации на объемную концентрацию электронов  $n$  в стравленном слое осуществлялся по формулам, приведенным в монографии [15, стр. 217] после сглаживания профилей распределения  $n_s$ .

Результаты дифференциальных холловских измерений образцов КРТ после термообработки под АО представлены на рис. 3 и 4, на которых приведены профили распределения слоевой концентрации электронов и их объемной концентрации в  $n$ -слое для различных температур (рис. 3) и времен (рис. 4) отжига. Стрелками на рис. 3 и 4 показана глубина, на которой измеренная концентрация дырок в подложке после полного стравливания  $n$ -слоя соответствовала их концентрации в исходном образце, а концентрация электронов имела в объеме  $p$ -КРТ, применявшемся в данной работе, величину  $n_p \approx 10^{11}$  см $^{-3}$ .

Как видно из рис. 3 и 4, концентрация электронов в  $n$ -слое на начальном участке профиля распределения для всех образцов имеет постоянное значение  $n = 4 \cdot 10^{14} - 1 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$ , а дальше уменьшается по некоторому закону, близкому по виду к функции  $\text{erfc}$ , математически описывающей процесс диффузии [16].

Т а б л и ц а 2

Зависимость глубины  $n$ -слоя от времени отжига  $p$ -КРТ под АО при  $T=200^\circ\text{C}$ 

Время отжига $t$	Глубина $n$ -слоя, мкм $d_n$	$d_n^2/t$ , см <sup>2</sup> /с
30 с	$4 \pm 0.5$	$5.4 \cdot 10^{-9}$
60 с	$10 \pm 1$	$1.5 \cdot 10^{-8}$
120 с	$16 \pm 1$	$2.1 \cdot 10^{-8}$
10 мин	$27 \pm 2$	$1.2 \cdot 10^{-8}$
60 мин*	$50 \pm 5$	$7.0 \cdot 10^{-9}$
3 ч*	$90 \pm 10$	$7.6 \cdot 10^{-9}$

Примечание. \* Данные взяты из работы [6].

Подвижность электронов имела одинаковое значение по всей глубине  $n$ -слоя и для всех образцов КРТ (рис. 3 и 4) составляла величину  $\mu_n = (1.5-3.6) \cdot 10^5$  см<sup>2</sup>/В·с.

Концентрация и подвижность электронов в слое  $n$ -типа, образовавшемся при термообработке  $p$ -КРТ под анодным окислом, и электрофизические параметры  $n$ -КРТ, получаемые отжигом  $p$ -КРТ в насыщенных парах ртути [17], имеют хорошее соответствие между собой. Это, по-видимому, свидетельствует об одинаковой природе конверсии типа проводимости с  $p$ -типа на  $n$ -тип в том и другом случае, а именно за счет диффузии ртути в объем кристалла. Очень важно иметь в виду то обстоятельство, что для разных образцов  $p$ -КРТ, даже близких по исходным параметрам, их физические свойства (состав, концентрация остаточных донорных примесей, плотность дислокаций, концентрация вакансий ртути) отличаются, из-за чего, по-видимому, при одних и тех же режимах отжига (например,  $T=200^\circ\text{C}$ ,  $t=60$  с на рис. 3 и 4) концентрация электронов в  $n$ -слое и его глубина несколько различны. Следует учесть и то, что время диффузии ртути при быстром ( $t \leq 30$  с) отжиге может быть несколько меньше длительности термообработки за счет некоторого времени, необходимого, по-видимому, для первоначального накопления ртути с началом реакции между анодным окислом и КРТ. Напротив, при длительных отжигах потеря ртути с поверхности КРТ за счет испарения может быть значительной и ее диффузионный источник начнет истощаться, что, во-первых, меняет условия диффузии и, во-вторых, приведет к образованию  $n$ -слоя с меньшей глубиной по сравнению с той, которая имела бы место для того же образца за данное время в случае диффузии из постоянного источника, так как количество продиффундировавшей ртути и, следовательно, заполненных вакансий ртути в объеме  $p$ -КРТ при этом стало бы больше.

В табл. 2 приведена экспериментально полученная зависимость глубины  $n$ -слоя от времени отжига  $p$ -КРТ под АО при  $T=200^\circ\text{C}$ . Несмотря на некоторое различие в величинах  $d_n^2/t$ , учитывая изложенное ранее обсуждение, из данных табл. 2 можно считать, что выполняется соотношение  $d_n^2 \sim t$ , которое также свидетельствует о диффузионном характере образования слоя с  $n$ -типом проводимости на  $p$ -КРТ.

Анализ рис. 3 показывает, что с ростом температуры отжига до  $T=275^\circ\text{C}$  глубина  $n$ -слоя растет, а при  $T=300^\circ\text{C}$  она значительно уменьшается. Для слоевой концентрации электронов наблюдается существенный рост до  $T=225^\circ\text{C}$ , затем наступает насыщение и при  $T=300^\circ\text{C}$  — снижение. Мы считаем, что рост глубины конвертированного слоя и, следовательно, величины  $n$ , обусловлен повышением коэффициента диффузии ртути  $D_{\text{Hg}}$  с увеличением температуры. Уменьшение же концентрации электронов и глубины  $n$ -слоя при  $T=300^\circ\text{C}$  происходит, по-видимому, за счет истощения диффузионного источника ртути из-за ее испарения, так как маскирующие свойства двуокиси кремния и анодного окисла на КРТ значительно ухудшаются при высоких температурах [6, 9]. Об истощении источника диффузии ртути при длительных отжигах  $p$ -КРТ под АО сообщается в работе [5]. Учитывая кратковременность отжига, для  $T=200-275^\circ\text{C}$  можно пренебречь испарением ртути, тогда диффузионный источник в приповерхностном слое будем считать неограниченным и бесконечно тонким (по сравнению с глубиной  $n$ -слоя). Воспользуемся моделью диффузии

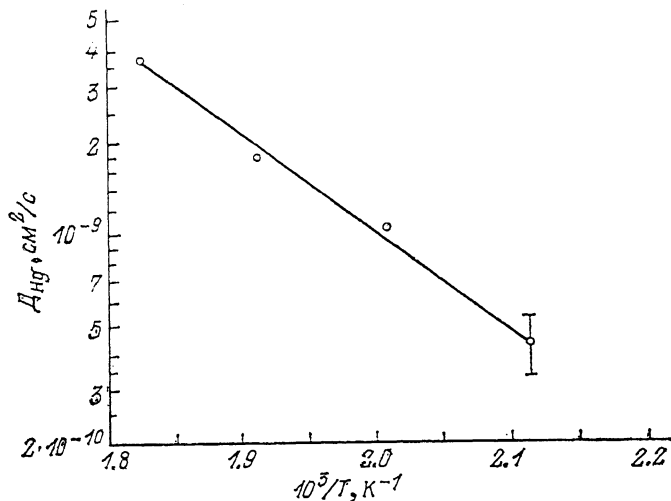


Рис. 5. Температурная зависимость коэффициента диффузии ртути при отжиге КРТ под АО.

ртути из бесконечно тонкого неограниченного источника и формулой определения коэффициента диффузии методом  $n-p$ -перехода [16, стр. 189]. Результаты расчета  $D_{Hg}$  для отжигов при  $T=200-275^\circ C$  приведены на рис. 5. Из данного рисунка получаем следующее выражение для зависимости коэффициента диффузии ртути от температуры:

$$D_{Hg} = 3.5 \cdot 10^{-9} \exp(-0.65 \text{ эВ}/kT) \text{ см}^2/\text{с}.$$

Очевидно, полученные нами величины энергии активации и коэффициента диффузии следует рассматривать не как исследование процесса диффузии ртути в КРТ (данным исследованиям посвящено большое количество работ, имеющих в литературе), а как подтверждение того предположения, что конверсия типа проводимости с  $p$ -типа на  $n$ -тип во время отжига  $p$ -КРТ под АО — это термически активируемый диффузионный процесс, а его параметры определены для конкретных экспериментальных условий: исходных свойств образцов; подготовки поверхности; способа выращивания анодного окисла и его толщины; наличия дополнительной защитной пленки двуокиси кремния. Возможно, изменение каких-либо из этих условий даст отличные от полученных в данной работе параметры диффузии ртути, для чего необходимо проведение дальнейших исследований.

Итак, в настоящей работе получены количественные данные по изменению состава приповерхностной области соединения  $Cd_xHg_{1-x}Te$  ( $x \approx 0.2$ ) в результате отжига под анодным окислом. Обнаруженное различие в величинах  $x$ , определенных методами РОР и оптического отражения, связывается с появлением в межузлиях решетки  $Cd_xHg_{1-x}Te$  избыточной ртути, которая образуется в результате взаимодействия анодного окисла с элементами соединения на границе раздела. Приповерхностный слой толщиной  $\sim 20$  нм с накопленной межузельной ртутью является диффузионным источником. В процессе отжига под анодным окислом образцов  $p$ - $Cd_xHg_{1-x}Te$  ртуть из источника диффундирует в объем кристалла и приводит к образованию слоя с  $n$ -типом проводимости. Для конкретных экспериментальных условий определены параметры диффузии ртути в температурном интервале  $200-275^\circ C$ . Электрофизические свойства  $n$ -слоя, образовавшегося при отжиге  $p$ - $Cd_xHg_{1-x}Te$  под анодным окислом, со-

ответствуют литературным данным для концентрации и подвижности электронов в  $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ , получаемым отжигом под давлением паров ртути.

Авторы выражают благодарность В. В. Васильеву за помощь в проведении экспериментов, Л. С. Смирнову, Л. Н. Сафронову за полезные обсуждения.

#### Список литературы

- [1] Stahle C. M., Helms C. R., Simmons A. // *J. Vac. Sci. Techn.* 1987. V. B5. N 4. P. 1092—1096.
- [2] Stahle C. M., Helms C. R., Schaake H. F., Strong R. L., Simmons A., Pallix J. P., Becker C. H. // *J. Vac. Sci. Techn.* 1989. V. A7. N 2. P. 474—482.
- [3] Jenner M. D., Blackman M. V. // *Patent. United Kingdom.* 1981. N 1 600 599.
- [4] Ито Макото, Фудзигу К. К. // *Патент. Япония.* 1987. № 60—48 22 12.
- [5] Brogowski P., Piotrowski J. // *Semicond. Sci. Techn.* 1990. N 5. P. 530—532.
- [6] Талипов Н. Х., Попов В. П., Корнюшкин Н. А., Кремаренко А. А., Качурин Г. А. // *Матер. II Всес. сем. «Примеси и дефекты в узкозонных полупроводниках».* Павлодар, 1989. Ч. 1. С. 69—73.
- [7] Kao T. M., Sigmon T. W., Bubulac L. O. // *J. Vac. Sci. Techn.* 1987. V. A5. N 5. P. 3175—3179.
- [8] Takita K., Ipposhi T., Murakami K., Masuda K., Kudo H., Seki S. // *Appl. Phys. Lett.* 1986. V. 48. N 13. P. 852—854.
- [9] Takita K., Ipposhi T., Murakami K., Masuda K., Kudo H., Seki S. // *Japan. J. Appl. Phys.* 1986. V. 25. N 12. P. 1862—1864.
- [10] Takita K., Ipposhi T., Murakami K., Masuda K., Kudo H., Seki S. // *J. Appl. Phys.* 1986. V. 59. N 5. P. 1500—1503.
- [11] Conway K. L., Opyd W. G., Gibbons J. F., Sigmon T. W. // *Nucl. Instr. Meth.* 1983. V. 209-210. P. 651—655.
- [12] Arwin H., Aspnes D. E. // *J. Vac. Sci. Techn.* 1984. V. A2. N 3. P. 1316—1323.
- [13] Kao T. M., Sigmon T. W. // *J. Electrochem. Soc. Sol. St. Sci. a. Techn.* 1988. V. 135. N 12. P. 3076—3081.
- [14] Коньков В. Л. // *Изв. вузов СССР. Физика.* 1966. № 2. С. 161—163.
- [15] Мейер Дж., Эрикссон Л., Дэвис Дж. Ионное легирование полупроводников. М., 1973. 296 с.
- [16] Болтакс Б. И. Диффузия в полупроводниках. М., 1963. 462 с.
- [17] Jones C. L., Quelch M. J. T., Capper P., Gosney J. J. // *J. Appl. Phys.* 1982. V. 53. N 12. P. 9080—9092.

Институт физики полупроводников СО РАН  
Новосибирск

Получена 4.04.1991  
Принята к печати 15.08.1991