

С. ИГНАТОВИЧ, А. КОБУС, Т. ЯНИЦКИЙ
(Варшава, ПНР)

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ КОНСТРУКЦИИ ДАТЧИКОВ Э. Д. С. ХОЛЛА*

Классический метод изготовления датчиков э. д. с. Холла состоит в вырезании пластинок в форме параллелепипеда из полупроводникового материала с последующей шлифовкой для получения необходимых форм и размеров, изготовлением электродов и герметизацией готового датчика. Можно считать, что в настоящее время вопрос получения датчиков э. д. с. Холла из кристаллических материалов решен. Дальнейшее развитие этого рода приборов может быть связано с открытием нового полупроводникового материала или улучшением свойств известного.

Второй метод изготовления датчиков, т. е. испарение в вакууме или катодное распыление полупроводникового материала на изоляционное основание, создает новые возможности в технологии гальваномангнитных приборов. Испарение в вакууме позволяет получать очень тонкие слои полупроводника, что является наиболее важным фактором в повышении чувствительности датчика.

Первые тонкие пленки теллурида ртути (HgTe) были получены О. Д. Елпатьевской [1], а затем исследованы М. В. Котом и Ю. Е. Марончуком [2]. Авторы занимались анализом пригодности тонких слоев HgTe для изготовления датчиков, в результате чего разработали технологию испарения поликристаллического теллурида ртути на подложку из слюды [3—5]. Обычно применялась пластинка слюды толщиной 80—120 мк. Напыленные на слюду слои подвергались термической обработке в парах ртути и в аргоне для доведения до стехиометрического состава, который в результате диссоциации изменялся во время испарения, что приводило к излишку теллура.

В пленках, полученных указанным выше способом, измерялись основные физические параметры, такие, как удельное объемное сопротивление ρ , коэффициент Холла R_x и подвижность носителей μ . Была установлена значительная зависимость удельного объемного сопротивления и подвижности носителей от толщины пленки [3, 4]. В то же время, как показано на рис. 1, коэффициент Холла не зависит от толщины пленки, за исключением диапазона малых толщин (менее 1 мк). Вели-

* Материал доложен на VIII Всесоюзной конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений в сентябре 1966 года в Новосибирске.

чина ρ уменьшается почти в десять раз при изменении толщины пленки от 0,3 до 3 мк. В результате подвижность изменяется от $\mu=600 \text{ см}^2/\text{в} \cdot \text{сек}$ при $c=0,3 \text{ мк}$ до $\mu=4000 \text{ см}^2/\text{в} \cdot \text{сек}$ при $c=3 \text{ мк}$. Данные, представленные на рис. 1—3*, служили основанием для анализа свойств датчиков, изготовленных путем напыления тонких пленок теллурида ртути на подложку из слюды.

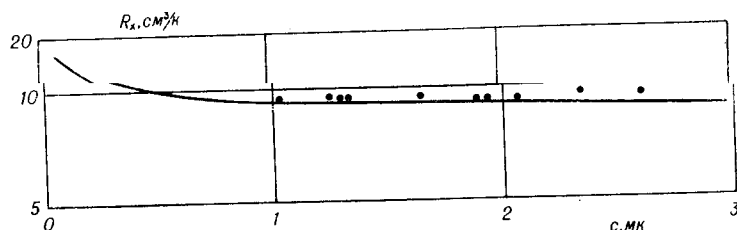


Рис. 1.

Ниже приводятся выражения, устанавливающие связь между основными параметрами датчика, анализ которых проводится в настоящей работе.

Уравнение теплового баланса для входной цепи датчика имеет вид

$$I_x^2 R_x = \nu S \Delta T, \quad (1)$$

где I_x — управляющий ток датчика; R_x — входное сопротивление; ν — коэффициент теплоотдачи; $S=2ab$ — поверхность датчика в предположении, что $c \ll a, b$; ΔT — допустимое приращение температуры; a, b, c — соответственно длина, ширина и толщина датчика.

Из (1) нетрудно получить выражение для определения допустимой плотности управляющего тока

$$i_{x \max} = \sqrt{\frac{2\nu \Delta T}{\rho c}}. \quad (2)$$

Чувствительность прибора может быть определена следующим образом:

$$\gamma = \frac{U_{\text{вых}}}{I_x B}, \quad (3)$$

где γ — средний наклон статических характеристик; $U_{\text{вых}}$ — выходное напряжение датчика; B — индукция.

Из известной зависимости для э. д. с. Холла вытекает следующее выражение чувствительности:

$$\gamma = \frac{G_x R_x}{c}, \quad (4)$$

* Для измерений использовались образцы с разбросом параметров (ρ и R_x) не более $\pm 25\%$.

где G_x — коэффициент, зависящий от геометрии пластинки и электродов.

Существует и другое определение чувствительности, связывающее выходное напряжение датчика и индукции при максимальном управляющем токе:

$$\gamma' = \frac{U_{\text{вых}}}{B} \Big|_{I_{x \text{ макс}}} . \quad (5)$$

Используя формулу (3) и выражение плотности управляющего тока, получаем

$$\gamma' = \gamma i_{x \text{ макс}} b c . \quad (6)$$

Выходная мощность датчика для случая оптимальной нагрузки, т. е. $R = R_n$, может быть определена из следующей формулы:

$$P_x = \frac{U_{\text{вых}}^2}{4R\xi} , \quad (7)$$

где ξ — коэффициент, зависящий от формы электродов напряжения.

Рассматривая выражение (7) для пленки с отношением длины к ширине $\frac{a}{b} = 2$ и полагая $\xi = 4$, можно определить коэффициент мощности согласно следующей зависимости:

$$p_x \pm \frac{P_x}{B^2} \Big|_{\frac{a}{b} = 2; \xi = 4} = \frac{\gamma'^2 c}{8\rho} . \quad (8)$$

Используя выражения (2), (3), (6) и (8), а также зависимости $R_x = f(c)$, $\rho = f(c)$ и $\mu = f(c)$, представленные на рис. 1—3, определяем

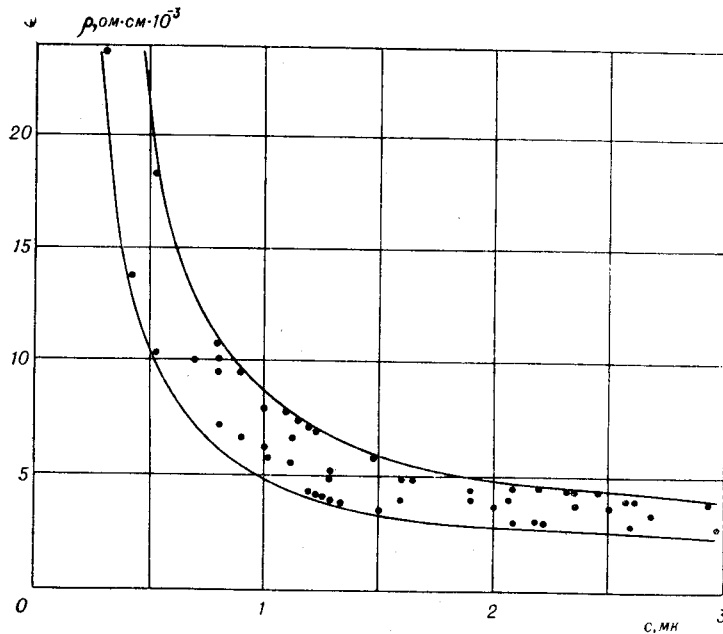


Рис. 2.

основные параметры пленочных датчиков из теллурида ртути ($i_{x \max}$, γ , γ' и ρ_x) в функции толщины пленки. При расчетах принималось: $\nu = 4 \cdot 10^{-3}$ вт/°С и $\Delta T = 130^\circ\text{С}$. Полученные результаты показаны на рис. 4 и 5. Вычисления производились для средних значений R_x , ρ , μ и для максимальных разбросов этих параметров. Как следует из рис. 4 и 5, допустимая плотность управляющего тока очень слабо зависит от толщины пленки. Чувствительность γ' , определяющая максимальное выходное напряжение, медленно уменьшается с ростом толщины пленки, а мощность, отдаваемая датчиком, быстро растет.

Для определения оптимальных свойств датчиков необходимо исследовать их температурные свойства. С этой целью исследовались температурные зависимости сопротивления и выходного напряжения датчиков. По измеренным данным определялись средние значения температурного коэффициента удельного сопротивления $\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}$ и

$$\text{коэффициента Холла } \beta = \frac{1}{R_x} \frac{dR_x}{dT}$$

в диапазоне температур от 0 до 100°С. Полученные результаты показаны на рис. 6 и 7. Коэффициенты α и β принимают при толщинах пленок 1,3—1,5 мк минимальные значения.

На основании полученных данных в нашем институте разработаны три типа датчиков из пленок теллурида ртути толщиной 1,3—1,5 мк. Внешний вид датчиков показан на рис. 8, а, параметры

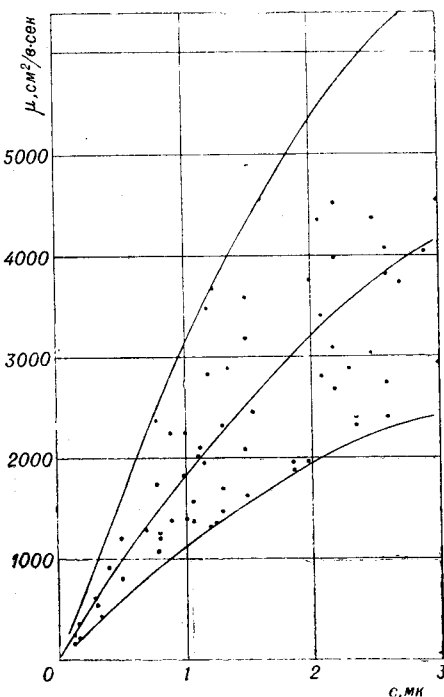


Рис. 3.

Параметр	Символ	НН-13	НН-14	НН-15
Продольное сопротивление	R_x , ом	180	180	180
Поперечное сопротивление	R , ом	120	120	120
Максимальный управляющий ток	I_x , ма	40	25	12
Чувствительность	γ , в/а·кгс	0,8	0,8	0,8
Полевая чувствительность	γ' , мкв/гс	32	20	10
Максимальное напряжение Холла (для $B=10$ кгс)	U_x , мв	320	200	100
Коэффициент асимметрии	γ_0 , в/а	0,3	0,3	0,3
Температурный коэффициент сопротивления	α , %/°С	0,05	0,05	0,05
Температурный коэффициент	β , %/°С	0,22	0,22	0,22
Максимальная рабочая температура	T_{\max} , °С	80	80	80

приведены в таблице. Конструктивно датчики отличаются только размером активного слоя. Как видно из таблицы, выходные напряжения этих датчиков не столь велики, как у датчиков, полученных испарением

полупроводниковых материалов типа $A_{III}B_{V}$, где э. д. с. Холла достигает $1-8\text{ в}$ при $B=10\text{ кгс}$. Но датчики из теллурида ртути имеют ценное достоинство — упругость пленки, что в сочетании с применением подложки из слюды толщиной $80-120\text{ мк}$ дает возможность изгиба датчиков до кривизны с радиусом порядка 1 см . Это позволяет применять датчики, изготовленные из теллурида ртути, для измерения магнитных полей в очень узких зазорах, где измерения другими датчиками невозможны. Датчики из теллурида ртути могут применяться для исследования полей в узких зазорах малых электрических машин благодаря возможности приклеивания датчика к криволинейной поверхности полюсного наконечника. Следует подчеркнуть, что после специальной обработки слюды были изготовлены датчики толщиной менее 50 мк .

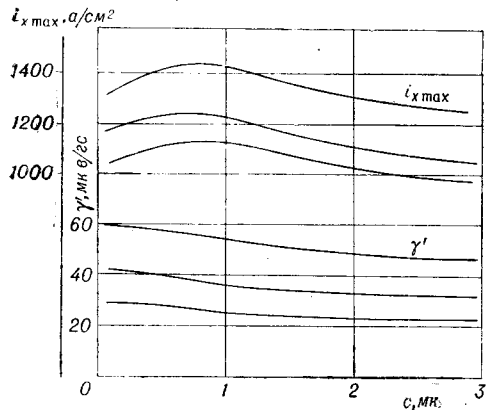


Рис. 4.

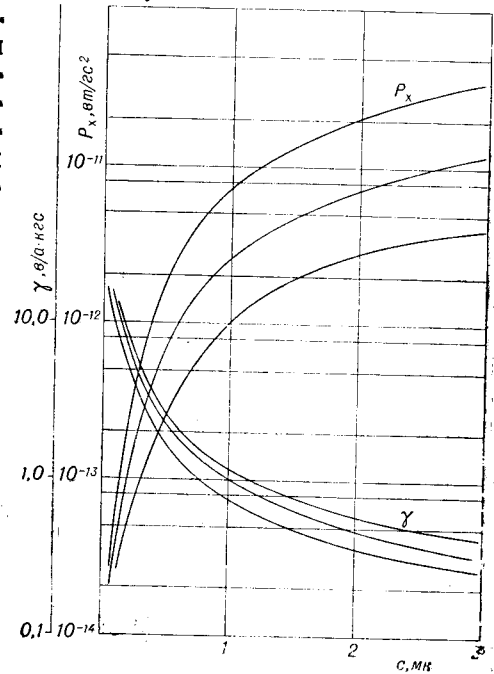


Рис. 5.

Дальнейшие исследования тонких пленок показали, что структура их еще не совершенна не только из-за малых размеров кристаллов (т. е. многочисленных границ зерен), но и из-за отклонения от стехиометрического состава. Предварительные измерения состава пленок методом фотоэлектрического калориметра показали, что в пленках, электрические параметры которых имеют разброс $\pm 25\%$, отклонение от стехиометрического состава достигает нескольких процентов за счет излишка теллура.

Можно, таким образом, полагать, что уменьшение подвижности,

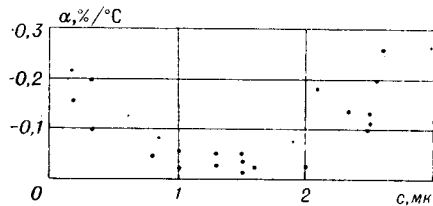


Рис. 6.

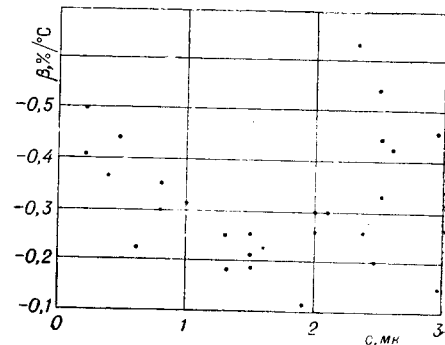


Рис. 7.

имеющее место в тонкой пленке, является результатом отступления от стехиометрии и рассеяния носителей на границах зерен. Следует стремиться к такому изменению технологии, чтобы избежать этих двух вредных явлений в тонкой пленке. Главным затруднением при этом полупроводника и увеличивает отступление от стехиометрического состава. Для сведения к минимуму этого явления при получении тонких пленок интересный метод применили Карроль и Спивак [6]. После быстрого напыления пленки во избежание чрезмерной утечки более летучего элемента окисляли поверхность пленки, а затем осуществляли процесс термической обработки. Слой окиси предохранял пленку от диссоциации. В таких пленках была достигнута подвижность порядка $55\,000\text{ см}^2/\text{в} \cdot \text{сек}$, что соответствует подвижности в литом материале с погрешностью 20%.

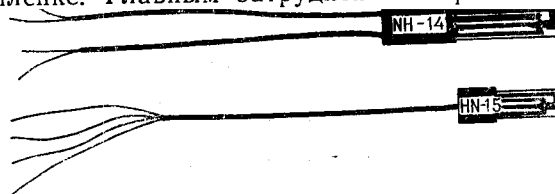


Рис. 8.

Приведенные выше рассуждения показывают, что следует провести широкие исследования старения тонких пленок. Существует и другой технологический метод, широко применяемый в полупроводниковой технике, который до сих пор не применялся при реализации датчиков Холла, — метод диффузии. Этот метод использовали К. Меринский и М. Морвиц [7] для исследования германиевого датчика, конфигурация которого показана на рис. 9. В этом датчике на расстоянии 1—10 мк от поверхности пластинки изготавливается диффузионный *p-n* переход, изолирующий весь объем материала от тонкого поверхностного слоя. После изготов-

ления электродов получается монокристаллический датчик очень малой толщины. Диффузионный метод изготовления *p-n* переходов освоен в надлежащей степени только по отношению к германию и кремнию, а в таких материалах, как InAs и InSb, его использование встречается с большими затруднениями. Поэтому такие датчики до сих пор не нашли применения.

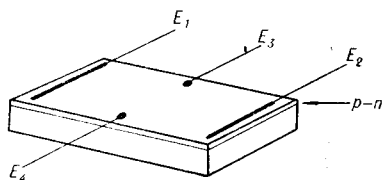


Рис. 9.

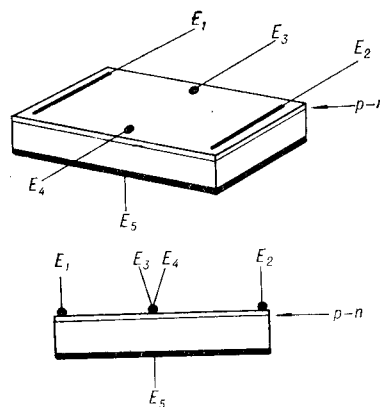


Рис. 10.

ления электродов получается монокристаллический датчик очень малой толщины. Диффузионный метод изготовления *p-n* переходов освоен в надлежащей степени только по отношению к германию и кремнию, а в таких материалах, как InAs и InSb, его использование встречается с большими затруднениями. Поэтому такие датчики до сих пор не нашли применения.

Некоторые перспективы открываются при использовании модификации этого датчика, показанной на рис. 10. В этом датчике добавляется еще один электрод базы, с помощью которого можно поляризовать $p-n$ переход в заперном направлении, что приводит к изменению положения объемного заряда в переходе, т. е. к изменению эффективной толщины датчика [8]. Таким образом, был создан новый полупроводниковый прибор-датчик с переменной толщиной активного слоя.

Коротко рассмотрим упрощенную теорию этого прибора. Выходное напряжение такого датчика можно описать зависимостью

$$U_{\text{вых}} = \frac{G_x R_x}{c_0 - \Delta c} I_x B, \quad (9)$$

где c_0 — толщина датчика, определяемая положением $p-n$ перехода; Δc — изменение толщины перехода, возникающее в результате его поляризации.

Легко показать, что характеристики этого датчика определяются следующим соотношением:

$$\frac{U_x}{U_{x0}} = \frac{c_0}{c_0 - \Delta c}, \quad (10)$$

где U_x — напряжение Холла при поляризации перехода; U_{x0} — напряжение Холла без поляризации перехода.

Для диффузионного перехода, обладающего линейным распределением примесей, на основании упрощенной теории получаем следующую зависимость для Δc :

$$\Delta c = - \frac{1}{2} \left\{ \frac{3\kappa (V_d - V_E)}{\pi e a} \right\}^{1/3}, \quad (11)$$

где κ — диэлектрическая постоянная; V_d — диффузионный потенциал перехода; V_E — напряжение поляризации перехода; $a = - \frac{dN(x)}{dx}$ — градиент концентрации примесей в области $p-n$ перехода.

Для изготовления экспериментальных датчиков переменной толщины применялся монокристаллический кремний типа n , сопротивление которого около $1,5 \text{ ом} \cdot \text{см}$, что соответствует концентрации примесей $N_D = 8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

На рис. 11 показаны теоретические характеристики датчика переменной толщины, вычисленные для различных поверхностных концентраций примесей до диффузии N_s , что определяет положение $p-n$ перехода, а также и толщину датчика c_0 . Из сказанного выше вытекает возможность реализации датчиков с «глубинной модуляцией» выходного напряжения порядка несколь-

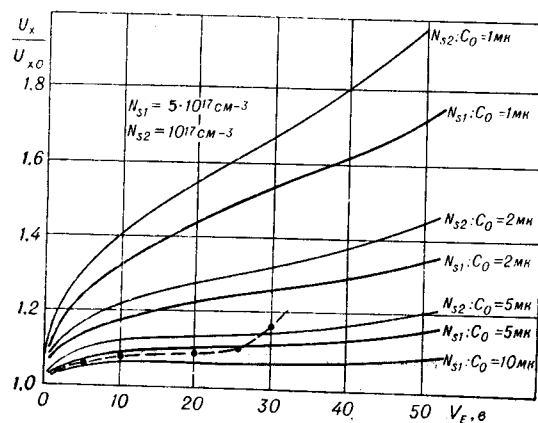


Рис. 11.

ких десятков процентов. Штриховой линией представлена характеристика одного из экспериментальных датчиков. Загиб характеристики при меньших напряжениях поляризации объясняется явлением пробоя перехода, чего не учитывают теоретические характеристики.

Датчик с переменной толщиной активного слоя находится еще в начальной стадии исследований. При обработке этого прибора следует учесть и по возможности предотвратить многие явления, имеющие место в $p-n$ переходах, которые могут ухудшить его характеристики. Самыми важными являются вопросы, связанные с однородностью переходов, обладающих большой поверхностью и деполяризацией $p-n$ перехода, вызванной падением напряжения от управляющего тока.

Следует подчеркнуть возможность изменения формы характеристик в довольно широком диапазоне путем регулирования распределения примесей вдоль перехода. Особое значение при этом может иметь эпитаксиальная техника, которая теоретически дает возможность произвольно изменять форму профиля распределения примесей.

Датчик с переменной толщиной активного слоя может найти широкое применение в измерительной технике, автоматике, регулирующих и функциональных цепях. Однако это потребует тесного сотрудничества технологов и проектировщиков аппаратуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. О. Д. Елпатьевская. ЖТФ, 28(1958), № 12, стр. 2669 и 2676.
2. М. В. Кот, Ю. Е. Марончук. Труды по физике полупроводников Кишиневского ун-та, 1962, № 1, стр. 77.
3. S. Ignatowicz, A. Kobus. Bull. Pol. Sci., Ser. Techn., 1966, № 9.
4. A. Kobus, S. Ignatowicz. Solid Sta. Electronics, 9(1966), 5, 595.
5. A. Kobus, S. Ignatowicz. Przegląd Elektroniki, 5 (1964), 12, 632.
6. J. A. Carrol, J. F. Spivak. Solid Sta. Electronics, 5 (1966), 5, 383.
7. K. Merinski, M. Morvic. Elektrotechniky čas (Bratislava), 17 (1966), 2, 93.
8. T. Janicki, A. Kobus. Патент ПНР № 50459 от 19 янв. 1965.

Поступила в редакцию
19 сентября 1966 г.