ЛИТЕРАТУРА

1. А. Д. Перник. Проблемы кавитации. Л., Судпромгиз, 1963.
2. М. Г. Сиротюк. Об энергетике и динамике кавитационной области. Акуст. ж., 1967, **13**, 2, 265—269.
3. Rayleigh, Lord. On preussure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity. Phil. Mag., 1917, **34**, 94—100.
4. Б. С. Когарко. Об одной модели кавитирующей жидкости. Докл. АН СССР, 1961, **137**, 6, 1331—1333.

Акустический институт АН СССР
Москва

Поступило в редакцию
27 марта 1967 г.

УДК 534.232

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ИЗ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

В. С. Васильев, И. Н. Каневский

В последнее время значительное внимание уделяется исследованию пьезоэлектрических свойств полупроводниковых соединений типа $A^{III}B^{V}$, а также использованию этих материалов для создания новых типов электроакустических преобразователей и усилителей ультразвуковых волн [1—5]. Ниже сообщается о результатах предварительных исследований основных характеристик преобразователей продольных ультразвуковых волн, изготовленных из нелегированного арсенида галлия электронного типа проводимости, имеющего следующие электрические данные: $\rho = 1{,}9$ *ом·см*, $n = 1{,}9 \cdot 10^{15}$ *см*$^{-3}$, $\mu = 1700$ *см*^{2}/*в·сек*.

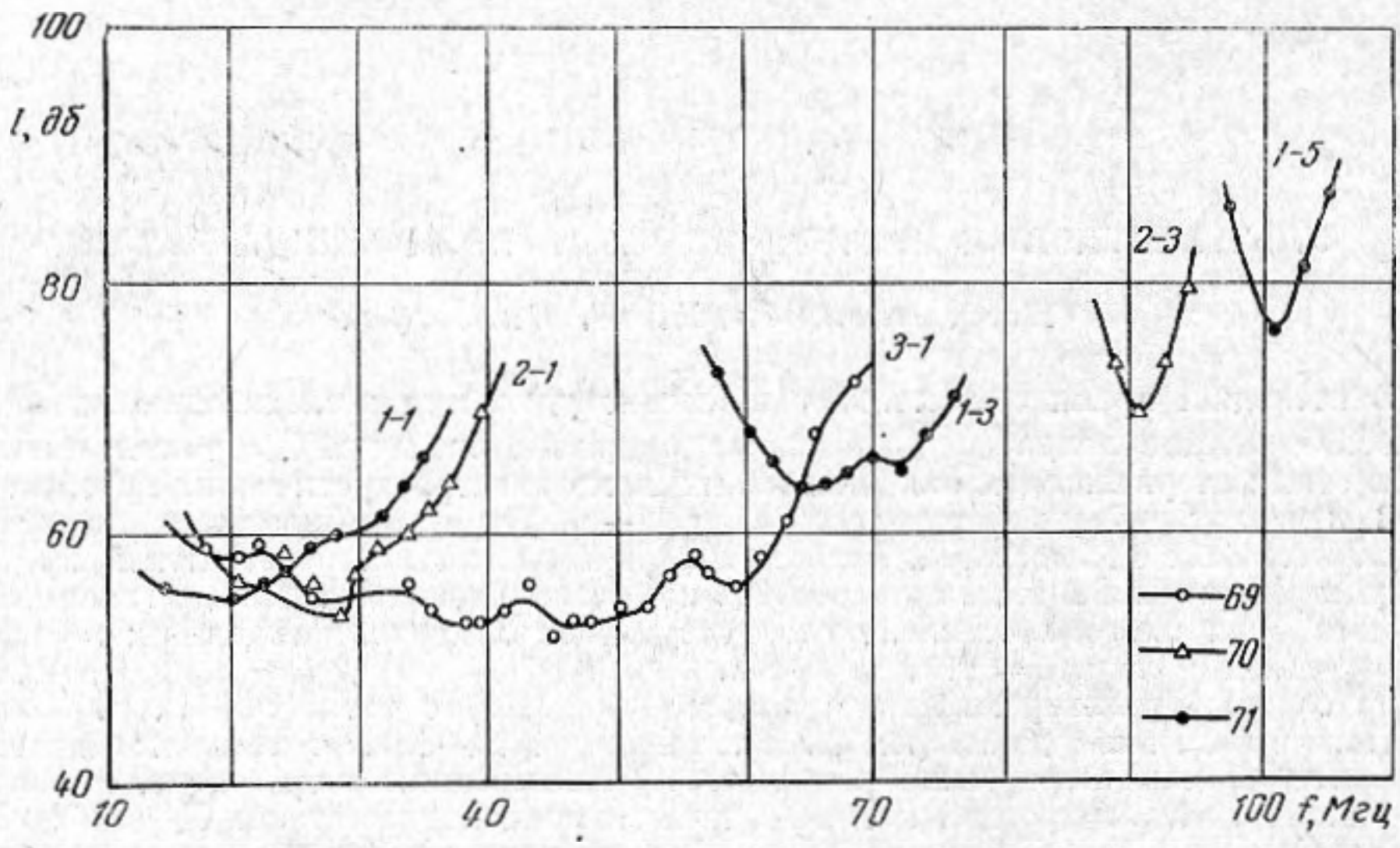
Из слитка, ориентированного в направлении (111) с точностью 1°, вырезались пластины в виде шайб диаметром 7 *мм* и толщиной 1,4—1,6 *мм*. После механической шлифовки образцы подвергались химическому полированию в травителе, состоящем из 3 частей концентрированной H_2SO_4, 1 части концентрированной H_2O_2 и 1 части дистиллированной H_2O, в течение 1 *мин*. Одна сторона образцов покрывалась термическим способом медью, противоположная — индием. В наших экспериментах использовалась медь высокой чистоты, общее содержание примесей в которой составляло менее 0,01%. Диффузионный отжиг подготовленных таким образом пластин проводился при температуре 500° в кварцевых ампулах, откачанных до давления 10^{-4} *мм* рт. ст., в результате чего в арсениде галлия создавалась область с удельным сопротивлением, повышенным по сравнению с исходным, являющаяся преобразователем ультразвуковых волн. Время диффузионного отжига изменялось от 1 до 30 *мин* (см. таблицу).

№ преобразователя	69	70	71	73	74
$t_{диф}$, *мин*	3	10	30	1	17
$C_{изм}$, *пф*	83	46	38	125	35
$f_{расч}$, *Мгц*	49,3	28	23,7	77,8	21,8
$f_{изм}$, *Мгц*	47	30	20	70	24
$\frac{f_{расч} - f_{изм}}{f_{расч}}$, %	+4,7	−7,2	+15,6	+10	−10

Полученные преобразователи исследовались методом измерения на различных частотах потерь при электроакустическом преобразовании на установке, выполненной по известной блок-схеме [6], когда один и тот же преобразователь поочередно использовался в качестве излучателя и приемника ультразвуковых колебаний. По измерениям частотной зависимости потерь определялись резонансные частоты преобразователей. На фигуре представлены частотные характеристики электроакустических преобразователей с диффузионным слоем, снятые при испытании их в линии задержки с одним входом из плавленого кварца. По оси абсцисс отложена частота ультразвуковых колебаний *f Мгц*, а по оси ординат — величина полных потерь *I* в децибеллах при двойном преобразовании. Обозначения на фигуре отвечают номерам преобразователей соответственно приведенной таблице. Кривые *1—1*, *2—1* и *3—1* характеризуют работу преобразователей на основной частоте. На этом же графике

показаны частотные характеристики преобразователей, соответствующие их колебаниям на третьей и пятой гармониках (кривые *1—3*, *2—3* и *1—5*). Из полученных данных следует, что величина полных потерь на основной частоте преобразователей составляет 53—55 *дб*, а ширина полосы, определяемая на уровне 3 *дб*, достигает 50—60%. Видно также, что при работе полупроводникового преобразователя с диффузионным слоем на его гармонике потери возрастают, а ширина полосы уменьшается. Это согласуется с теоретическим рассмотрением работы обычного пьезоэлектрического преобразователя ультразвуковых колебаний [6].

Наблюдаемые большие потери электроакустического преобразования могут быть частично обусловлены недостаточно полной компенсацией арсенида галлия в результате диффузии меди [7], рассогласованием акустических импедансов материалов преобразователя и линии задержки (их отношение равно 1,8) и значительными, трудно контролируемыми потерями в переходном слое между преобразователями и



линией задержки. Большая же ширина полосы определяется в основном наличием градиента концентрации меди на фронте диффузии.

Описанные выше преобразователи исследовались также в режиме приема ультразвуковых волн. В качестве излучателей использовались пьезокварцевые пластины *X*-среза, настроенные на основную частоту или гармонику. Анализ полученных данных показал, что на резонансной частоте величина потерь при электроакустическом преобразовании составила 30—32 *дб*.

Были также измерены емкости диффузионных слоев преобразователей и рассчитаны их резонансные частоты ($f_{расч}$) на основании известного соотношения между собственной частотой преобразователя, толщиной его диффузионного слоя и скоростью распространения продольных ультразвуковых волн в арсениде галлия [3, 8]. Результаты измерений и расчетов представлены в таблице. Из полученных данных следует, что наибольшее расхождение между значениями резонансных частот преобразователей, определенных двумя различными способами, не превосходит 16%.

Можно показать, что существует связь между резонансной частотой преобразователя, коэффициентом диффузии примеси и временем диффузии. Это означает, что исследование характеристик электроакустических преобразователей, изготовленных из пьезоэлектрических полупроводниковых соединений при диффузии в них различных примесей, позволит определить коэффициент диффузии, а также исследовать температурную зависимость коэффициента диффузии этих примесей для разрушения диффузионного слоя материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. F. S. Hickernell. The electroacoustic gain interaction in III—V compounds: gallium arsenide. IEEE Trans. Son. Ultrason., 1966, SU-13, 2, 73—77.
2. F. S. Hickernell, D. E. Allen. A. GaAs Diffusion layer transducer delay line. Proc. IEEE, 1965, 53, 12, 1735. (рус. перевод: Хиккернел, Аллен. Линия задержки с преобразователями на диффузионном слое из GaAs, Тр. Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике, 1965, 12, 2395—2396).
3. У. Мэзон. Физическая акустика. Методы и приборы ультразвуковых исследований, (пер. с англ.), т. I, ч. Б, гл. 5, 303—338. М., «Мир», 1967.
4. С. Н. Иванов, Н. Е. Скворцова, Б. Г. Степанов. Исследование *p — n*-переходов из GaAs в режиме преобразования ультразвуковых колебаний в электрические. Акуст. ж., 1965, 11, 3, 398—399.

5. I. Bohm, G. W. Farnell. GaAs transdusers. IEEE Trans. Son. Ultrason., **1966**, SU-13, 4, 125—129.
6. Л. Бергман. Ультразвук и его применение в науке и технике, (пер. с нем.), 2-е изд., М., ИЛ, 1957.
7. Б. И. Болтакс. Диффузия в полупроводниках. М., Физматгиз, 1961.
8. T. B. Bateman, H. I. McSkimin, I. M. Whelam. Elastic moduli of single-crystals gallium arsenide. J. Appl. Phys., 1959, **30**, 4, 544—545.

Государственный н.-и. и проектный институт
редкометаллической промышленности
Москва

Поступило в редакцию
24 июня 1967 г.

УДК 534.222

УСИЛЕНИЕ РЭЛЕЕВСКИХ ВОЛН В КРИСТАЛЛАХ СУЛЬФИДА КАДМИЯ

И. А. Викторов

Усиление объемных (продольных и поперечных) волн в кристаллах сульфида кадмия исследовано подробно как теоретически, так и экспериментально; в то же время об усилении рэлеевских волн в таких кристаллах имеется лишь две небольшие экспериментальные работы [1, 2]. В настоящей заметке делается попытка рассмотреть этот вопрос теоретически.

В работе [3] рассчитано затухание рэлеевских волн в кристаллах CdS, обусловленное взаимодействием с электронами проводимости. Результаты этого расчета нетрудно обобщить и на режим усиления рэлеевских волн в таких кристаллах. Пусть кристалл граничит с вакуумом вдоль плоскости $z = 0$, перпендикулярной гексагональной оси, а рэлеевская волна распространяется в направлении x в этой плоскости. Пусть, далее, в кристалле наряду с переменным электрическим полем решетки и электронов имеется постоянное дрейфовое поле с напряженностью E_0, направленное по оси x. Уравнения (1)—(5) работы [3], описывающие распространение рэлеевской волны в полупроводниковом кристалле CdS, справедливы и для режима усиления волны, только под E_x теперь следует понимать прежнюю величину плюс E_0. Граничные условия на плоскости $z = 0$ для переменных составляющих электрического поля, электрической индукции и смещений U_x и U_z (а именно эти составляющие нас интересуют, поскольку они связаны с рэлеевской волной) записываются в прежней форме.

Учитывая эти замечания и производя вычисления, аналогичные описанным в работе [3], получим следующие расчетные формулы для относительного изменения $\Delta c / c_0$ фазовой скорости рэлеевской волны и отнесенного к 2π коэффициента γ затухания (усиления) рэлеевской волны на длине волны:

$$\frac{\Delta c}{c_0} = \frac{0{,}232\cdot 10^{-2}\left(\frac{\omega^2}{\omega_D{}^2} + 1{,}04\zeta^2\right)\left(\frac{\omega^2}{\omega_D{}^2} - 1{,}277\frac{\omega_c}{\omega_D} + 1{,}04\zeta^2\right)}{1{,}69\frac{\omega_c{}^2}{\omega^2}\zeta^2 + \left(\frac{\omega^2}{\omega_D{}^2} - 1{,}277\frac{\omega_c}{\omega_D} + 1{,}04\zeta^2\right)^2} +$$

$$+ \frac{1{,}64\cdot 10^{-2}\cdot\left(\frac{\omega^2}{\omega_D{}^2} + 1{,}065\zeta^2\right)\left(\frac{\omega^2}{\omega_D{}^2} + 1{,}438\frac{\omega}{\omega_D} + 1{,}065\zeta^2\right)}{2{,}21\frac{\omega_c{}^2}{\omega^2}\zeta^2 + \left(\frac{\omega^2}{\omega_D{}^2} + 1{,}438\frac{\omega_c}{\omega_D} + 1{,}065\zeta^2\right)^2},$$

$$\gamma = \frac{0{,}302\cdot 10^{-2}\frac{\omega_c}{\omega}\left(\frac{\omega^2}{\omega_D{}^2} + 1{,}04\zeta^2\right)\zeta}{1{,}69\frac{\omega_c{}^2}{\omega^2}\zeta^2 + \left(\frac{\omega^2}{\omega_D{}^2} - 1{,}277\frac{\omega_c}{\omega_D} + 1{,}04\zeta^2\right)^2} +$$

$$+ \frac{2{,}435\cdot 10^{-2}\cdot\frac{\omega_c}{\omega}\left(\frac{\omega^2}{\omega_D{}^2} + 1{,}065\zeta^2\right)\zeta}{2{,}21\frac{\omega_c{}^2}{\omega^2}\zeta^2 + \left(\frac{\omega^2}{\omega_D{}^2} + 1{,}438\frac{\omega_c}{\omega_D} + 1{,}065\zeta^2\right)^2}.$$