

УДК 534.221—16

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОЛНЫ В АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ

М. Д. Левин, Г. А. Лобанова, Н. С. Пащин, И. Б. Яковкин

Приведены экспериментальные данные по измерению скоростей поверхностных звуковых волн в изолирующем арсениде галлия в различных плоскостях и направлениях для случаев свободной и металлизированной поверхности. Приведены результаты подобных измерений и для других пьезоэлектриков. Анализируются причины отличия от аналогичных расчетных величин, приводимых другими авторами. Произведена оценка коэффициента электромеханической связи для полупространства с поверхностной волной.

Развитие эпитаксиальной технологии позволяет надеяться, что в ближайшее время появятся пленки арсенида галлия с подвижностью свободных носителей в единицы тысяч $\text{см}^2/\text{в} \cdot \text{сек}$ и удельным сопротивлением более десяти $\text{ом} \cdot \text{см}$, выращенные на изолирующих подложках GaAs. Это, наряду с использованием МДП технологии, позволит разрабатывать линии задержки, фильтры и усилительные элементы на поверхностных звуковых волнах, работающие в непрерывном режиме на частотах порядка 1 Гц. Сочетание на одной подложке функциональных микросхем на основе эффекта Ганна и акустоэлектронных явлений может стать основой создания нового класса малогабаритных быстродействующих устройств для обработки информации. Поэтому имеет смысл всестороннее исследование распространения поверхностных звуковых волн в арсениде галлия, а также оценка взаимодействия свободных носителей заряда с пьезоэлектрическим полем поверхностной волны, распространяющейся в кристалле. Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию распространения поверхностных волн на трех характерных плоскостях арсенида галлия: (100), (110) и (111), наиболее приемлемых для выращивания эпитаксиальных пленок. Для ряда направлений на этих плоскостях определены скорости распространения поверхностных волн и коэффициенты электромеханической связи. Подобные измерения произведены и для достаточно сильных пьезоэлектриков, таких, как ниобат лития (LiNbO_3) и монокристаллический кварц, с целью сравнения полученных результатов.

В качестве подложек для исследования использовали арсенид галлия марки АГП с удельной проводимостью $\sigma \sim 10^{-8} (\text{ом} \cdot \text{см})^{-1}$ и плотностью дислокаций $\sim 10^4 \text{ см}^{-2}$, а также монокристаллы ниобата лития Y-среза и кварца XY-среза. Подложки из арсенида галлия подвергались химической полировке, а остальные — механической обработке. Во всех случаях плоскости, по которым распространялась поверхностная волна, имели 14-й класс чистоты.

На подложках гравировкой изготавливались преобразователи для возбуждения и индикации ультразвуковых поверхностных волн, представляющие собой встречно-штыревые системы электродов из алюминиевой пленки толщиной $\sim 1000 \text{ \AA}$, напыленной на поверхность звукопровода. Период систем электродов соответствовал длине волны в 50 Мкм, а взаимное перекрытие соседних электродов (апертура преобразователей) составляло в среднем 40 длин волн.

На фигуре схематически изображены исследуемые образцы, а также схема экспериментальной установки, позволяющей фазово-интерференционным методом определить скорость поверхностной волны в заданном направлении. Опорным сигналом служил сигнал электромагнитной наводки, амплитуда которого подбиралась равной амплитуде сигнала с выхода линии задержки. Скорость измерялась дважды: первое измерение проводилось, когда поверхность подложки была свободной, второе — после того, как между преобразователями напылялась тонкая проводящая металлическая

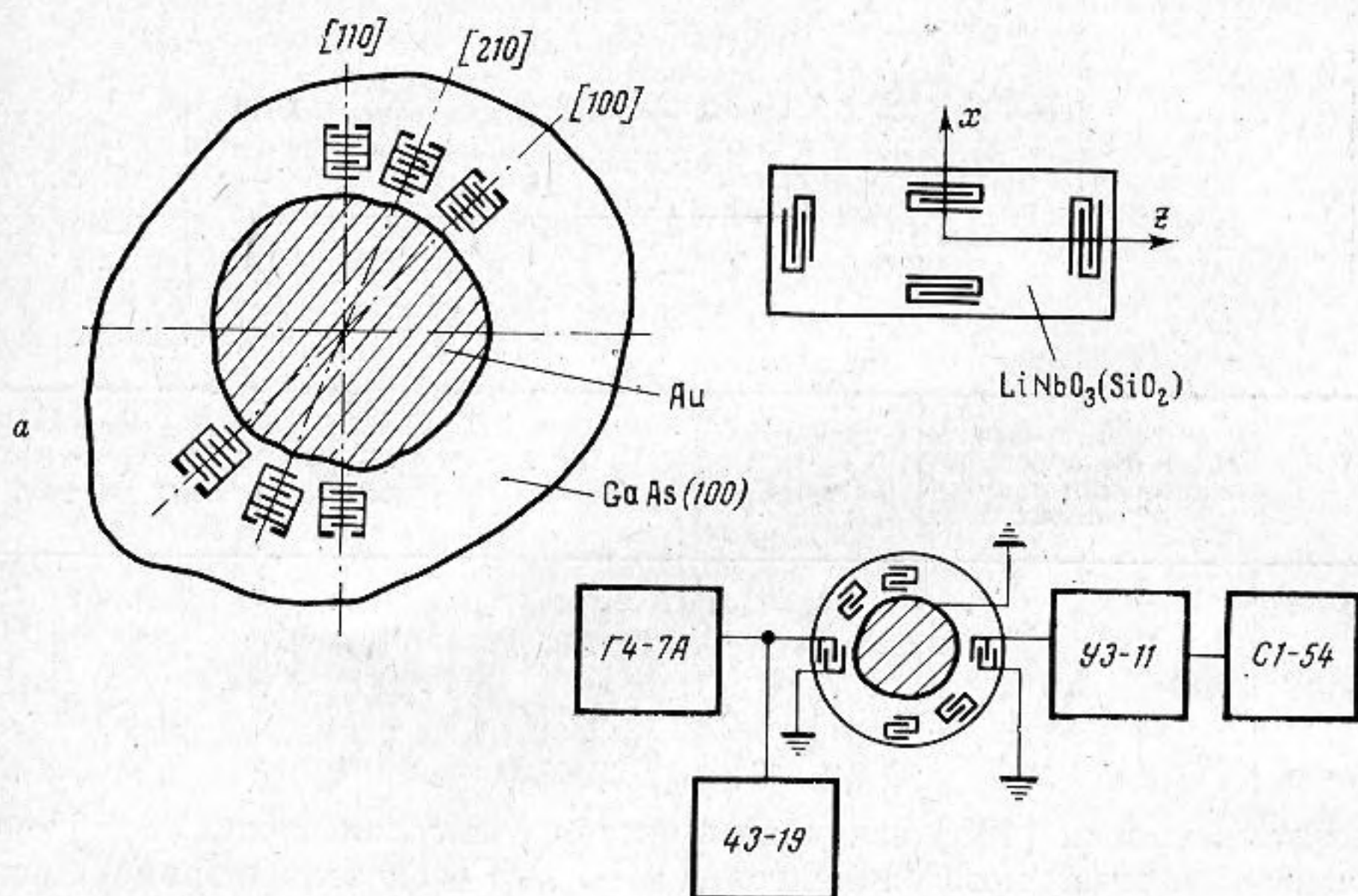


Схема эксперимента по исследованию распространения УПВ в пьезоэлектриках: *a* — расположение преобразователей на (100) GaAs; *б* — расположение преобразователей на $\text{LiNbO}_3(\text{SiO}_2)$; *в* — блок-схема экспериментальной установки

пленка. Разность между значениями скоростей, полученными в этих двух измерениях, отнесенная к величине скорости на свободной поверхности $(V_{\text{нм}} - V_{\text{м}})/V_{\text{нм}}$, пропорциональна квадрату коэффициента электромеханической связи [1]. Относительное изменение скорости из-за дисперсии, обусловленное нанесением на поверхность звукопровода материала с отличающимся акустическим импедансом, по нашим оценкам [2] составляло 10^{-7} и, следовательно, не могло существенным образом повлиять на достоверность результатов измерений.

Точность вычисления $(V_{\text{нм}} - V_{\text{м}})/V_{\text{нм}}$ не зависит от погрешности измерения расстояния между преобразователями и связана лишь с погрешностью в измерении изменения скорости поверхностной волны, т. е. в изменении времени распространения волны между преобразователями. Несмотря на то, что относительная погрешность в измерении скоростей составляет 0,05%, точность вычисления относительной разности скоростей для разных направлений лежит в пределах от 7 до 60%.

Результаты измерений, проведенных для трех различных плоскостей GaAs, приведены в табл. 1.

Представлялось интересным сравнить полученные результаты с расчетами, приведенными в работе [3]. Экспериментальные данные абсолютных значений скорости близки к расчетам для всех направлений за исключением [100] на плоскости (100), где различие между экспериментальным и расчетным значением достигает 10%. На плоскости (100) в направлении [210] наблюдалось возбуждение как объемной, так и поверхностной вол-

Таблица 1

Плоскость	Направление распространения поверхностных волн	$V_{HM} \cdot 10^{-5}$, см/сек	$V_M \cdot 10^{-5}$, см/сек	$(V_{HM} - V_M)/V_{HM} \cdot 10^4$	Погрешность измерения $(V_{HM} - V_M)/V_M$, %
100	100	$C_t = 3,332$	—	—	—
	110	2,7726	2,7706	8	60
	210	2,7249	2,7058	70	7
		$C_t = 3,264$			
110	100	2,6423	2,5390	13	40
	110	2,5123	2,5076	19	25
	111	2,6940	2,6770	62	8
111	110	2,4101	—	—	—
	112	2,5251	—	—	—

Таблица 2

Материал	Плоскость	Направление распространения поверхностных волн	$V_{HM} \cdot 10^{-5}$, см/сек	$V_M \cdot 10^{-5}$, см/сек	$(V_{HM} - V_M)/V_{HM} \cdot 10^4$	Погрешность измерения $(V_{HM} - V_M)/V_{HM}$, %
LiNbO ₃	010	100	3,7411	3,6895	177	3
		001	3,4753	3,4016	212	2,4
SiO ₂	001	100	3,2487	3,2110	106	5

ны, а в направлении [100] излучалась чистая сдвиговая волна. Экспериментальные значения коэффициентов $(V_{HM} - V_M)/V_{HM}$ оказались примерно на порядок выше аналогичных расчетных величин. Для подтверждения справедливости полученных результатов нами был рассчитан из известных энергетических соотношений [4] коэффициент электромеханической связи с учетом граничных условий для случаев металлизированной и неметаллизированной поверхности пьезодиэлектрика. Даже для сравнительно простого случая распространения поверхностных волн вдоль направления [110] на плоскости (100) точный расчет оказался громоздким, а приближенное значение $K^2 - 8 \cdot 10^{-4}$ близко к результатам работы [5]. Кроме того, были проведены аналогичные измерения на других пьезодиэлектриках, таких, как кварц и ниобат лития, и вычислены коэффициенты электромеханической связи. Результаты этих измерений приведены в табл. 2. Полученные результаты хорошо совпадают с расчетами, приведенными в работе [6].

Измерения параметров ультразвуковых поверхностных волн в арсениде галлия свидетельствуют о том, что в кубических кристаллах не существует запрещенных направлений для распространения поверхностных волн, предсказанных в работе [7]*. Предположение о существовании в этом направлении двухпарциальной волны [9, 10] и соответственные расчеты ее фазовой скорости хорошо согласуются с экспериментальными данными.

По окончании работы появились экспериментальные результаты [11] по измерению скоростей в GaAs на плоскости (100), которые также подтверждают наличие двухпарциальной поверхностной волны в направлении [110], распространяющейся со скоростью $2,840 \cdot 10^5$ см/сек. Значения же K^2 , приводимые авторами работы [11], вызывают сомнения, поскольку точность измерения параметров эквивалентной схемы R_a и C_s , по которым рассчитывается K^2 , не очень велика. Точность наших измерений K^2 для

* В направлении [110] плоскости (100) в кубических кристаллах может распространяться волна Гуляева - Блюстейна [8], однако нами экспериментально было установлено, что наблюдаемая волна не принадлежит к указанному типу волн.

всех направлений, исключая [110], составляет от 7 до 40% и выше, чем в работе [11].

Авторы благодарят Ю. Б. и Р. И. Болховитяновых за подготовку образцов арсенида галлия.

ЛИТЕРАТУРА

1. K. A. Ingebrigtsen. Surface waves in piezoelectrics. J. Appl. Phys., 1969, 40, 7, 2681—2686.
2. С. В. Богданов, М. Д. Левин, И. Б. Яковкин. О существовании поверхностной волны в системе слой — полупространство. Акуст. ж., 1969, 15, 1, 12—16.
3. J. J. Campbell, W. R. Jones. Propagation of piezoelectric surface waves on cubic and hexagonal crystals. J. Appl. Phys., 1970, 41, 7, 2796—2801.
4. Физическая акустика под ред. У. Мэзона. т. 1, ч. А. М., «Мир» 1966.
5. И. А. Викторов. Рэлеевские волны в полупроводниковых пьезоэлектрических кристаллах арсенида галлия. Докл. АН СССР, 1969, 187, 2, 294—297.
6. J. J. Campbell, W. R. Jones. A method for estimating optimal crystal cuts and propagation directions for excitation of piezoelectric surface waves. IEEE Trans. Sonic and Ultrasonics 1968, SU-15, 4, 209—217.
7. D. C. Gasis, R. Hermann, R. F. Wallis. Surface elastic waves in cubic crystals. Phys. Rev., 1960, 119, 2, 533—544.
8. Ю. В. Гуляев. Поверхностные электрорезонансные волны в твердых телах. Письма в ЖЭТФ, 1969, 12, 68, 396—398.
9. И. Б. Яковкин. Исследование особенностей распространения УПВ в слоистой системе диэлектрик — полупроводник. Канд. дис. Новосибирск, 1968.
10. T. C. Lim, G. W. Farnell. Search for forbidden directions of elastic surface wave propagation in anisotropic crystals. J. Appl. Phys., 1968, 39, 9, 4319—4325; Физическая акустика под ред. У. Мэзона, Р. Терстона, т. 6, М., «Мир», 1973.
11. J. M. Deacon, J. Heighway. Acoustic surface-wave propagation on gallium arsenide. Electron. Lett., 1972, 8, 1, 6—7.

Институт физики полупроводников
СО Академии наук СССР

Поступила
24 августа 1972 г.
После переработки
26 марта 1974 г.