

УДК 621.37/39:534

Я. И. Лепих

Одесский национальный университет им. И.И.Мечникова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СВЯЗИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИКОВ ДЛЯ ВОЛН РЭЛЕЯ

Рекомендовано до друку науковим семінаром
кафедри експериментальної фізики ОНУ 20.12.1999 р.

Описано метод визначення коефіцієнта електромеханічного зв'язку п'єзоелектриків та п'єзонапівпровідників для випадку розповсюдження в них поверхневих акустичних хвиль (ПАВ) Рэлея. Метод базується на вимірюванні швидкості ПАВ системою безконтактних зустрічно-штирьових перетворювачів на вільній та металізованій поверхні п'єзозвукопроводу. Приводяться дані про електрофізичні параметри деяких матеріалів. Показана можливість використання методу для структурних досліджень поверхневих шарів п'єзонапівпровідників.

Описан метод определения коэффициента электромеханической связи пьезоэлектриков и пьезополупроводников для случая распространения в них поверхностных акустических волн (ПАВ) Рэлея. Метод основан на измерении скорости ПАВ системой бесконтактных встречно-штирьевых преобразователей на свободной и металлизированной поверхности пьезозвукопровода. Приводятся данные об электрофизических параметрах некоторых материалов. Метод может использоваться для структурных исследований пьезополупроводников.

A method to determine the electromechanical force factor of piezoelectric in propagation of the Rayleigh surface acoustics waves (SAW) is describes. The method is based on changes in speed of SAW by a system of contactless complementary Golay-coded transducers on a free and metallised surface of piezoacoustic duct. The data referring to electrophysical parameters of some materials. It is proved that the method can be applied in structural studies of the piezosemiconductors.

Коефіцієнт електромеханічної зв'язки K_p належить до числа основних електрофізических параметрів (ЕФП) п'єзоелектричних матеріалів. Цим параметром визначаються основні характеристики пристроїв на поверхневих акустических волнах (ПАВ), в яких п'єзоелектрики використовуються в якості преобразователів — звукопроводів. K_p може бути виражен через упругі, діелектрическі та п'єзоелектрическі характеристики матеріала. По суті, K_p має значення тензора [1], а в загальному випадку може бути представлений [2] у вигляді

$$K_p = \frac{(u_{kl} n_k e_{klm})^2}{(\epsilon_{ij} n_i n_j)(c_{ijkl} u_{ij} u_{kl})}, \quad (1)$$

де u — тензор деформації;

e — п'єзотензор;

ϵ_{ij} — тензор діелектрическої проникності;

c — модуль упругої податливості;

n — вектор одиничної нормалі до поверхні пластинки;

i, j, k, l — індекси тензора.

Величина K_p залежить від геометрических розмірів та форм зразка матеріала, впливаючих на просторове розподілення в ньому упругих зміщень та електрического поля.

В сложившейся практике величину K_p определяют для одного из направлений пьезотензора, чаще всего e_{33} , пользуясь методом “резонанса — антирезонанса”. В [3] показано, что значения K_p связаны с модой колебаний образца и тем, как соотносятся направления электрического и механического напряжений. Для K_p , соответствующего пьезомодулю d_{33} получено

$$K_{p33}^2 = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{\Delta f}{f_a} \right) \operatorname{tg} \left(\frac{\pi \Delta f}{2 f_a} \right), \quad (2)$$

где $\Delta f = f_r - f_a$,

f_r — резонансная частота образца;

f_a — антирезонансная частота;

Применив разложение в степенной ряд функции $\operatorname{tg} \left(\frac{\pi \Delta f}{2 f_a} \right)$ получено [4]

приближенное выражение

$$K_{p33}^2 = \frac{\pi \Delta f}{4 f_a} \left[1 - \frac{\Delta f}{f_a} + \frac{\pi}{12} \left(\frac{\Delta f}{f_a} \right)^2 - \dots \right], \quad (3)$$

В дальнейшем (3) было преобразовано к виду, удобному для расчетно - экспериментального определения K_p

$$K_p = \left[\frac{\eta^2 - 1 + \sigma^2}{2(1 + \sigma)} \left(1 - \frac{f_r^2}{f_a^2} \right) \right]^{1/2}, \quad (4)$$

где η — положительный наименьший корень частотного уравнения, зависящий от коэффициента Пуассона σ .

Формула (4) принята международными стандартами [5, 6] для определения K_p пьезоматериалов. При этом для расчета K_p фазовым и амплитудным методами проводят измерения f_r и f_a специально изготовленных заданных размеров и форм образцов и выбирают определенные полуэмпирическим методом значения σ и η . Очевидно, что определение таким методом K_p является достаточно сложным. Кроме того, в технических условиях на пьезоматериал, как правило, указывается только значение K_p , соответствующее одному пьезомодулю d_{33} , что в ряде случаев бывает недостаточным, например, когда векторы поляризации материала и возбуждающего акустические колебания внешнего электрического поля не совпадают по направлению. Такая ситуация имеет место при использовании пьезоэлектрических пластин с поляризацией по толщине в акустоэлектронных устройствах на поверхностных акустических волнах (ПАВ) Рэлея со встречно-штыревыми преобразователями (ВШП). Воспользоваться измерением f_r и f_a образца с размерами, определяемыми параметрами ПАВ Рэлея, не представляется возможным. В этом случае было предложено [7] использовать относительное изменение скорости распространения ПАВ на свободной и металлизированной (электрически закороченной) поверхности пьезоэлектрика — $\Delta V/V$. Выражение для K_p при таком подходе имеет вид

$$K_p^2 = 2 \left[1 + \left(\epsilon_p^T \right)^{-1} \right] \frac{\Delta V}{V} \left(1 - \frac{\Delta V}{V} \right)^{-1}, \quad (5)$$

где ε_p^T — эффективная относительная диэлектрическая проницаемость материала в направлении распространения ПАВ, определяемая как $\varepsilon_p^T = (\varepsilon_{11}\varepsilon_{33} - \varepsilon_{13}^2)^{1/2}$, а $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{33}, \varepsilon_{13}$ — компоненты тензора диэлектрической проницаемости при постоянном механическом напряжении;

V — скорость распространения ПАВ на свободной поверхности пьезоэлектрика;

$\Delta V = V - V_{кз}$, $V_{кз}$ — скорость ПАВ на закороченной поверхности.

Вследствие того, что $(\varepsilon_p^T)^{-1} \ll 1$ и $\Delta V/V \ll 1$ для практических целей можно воспользоваться первым приближением (5)

$$K_p^2 = -\frac{2\Delta V}{V}. \quad (6)$$

Определение K_p таким методом дает более точные результаты, необходимые для устройств на ПАВ, однако имеет недостатки, обусловленные технологией изготовления на поверхности звукопровода существенно отличающихся по толщине проводниковых слоев волновода и ВШП, а также акустическими и электроакустическими эффектами, возникающими при взаимодействии ПАВ с ВШП.

Данная работа посвящена методу определения K_p пьезоэлектрических и пьезополупроводниковых материалов, основанному на бесконтактном возбуждении и детектировании ПАВ ВШП. Ранее этот метод использовался для определения скорости ПАВ в звукопроводах и вносимых потерь устройств на ПАВ [8].

Бесконтактный преобразователь (БКП) представляет собой систему возбуждающего и приемного эквидистантных ВШП, нанесенных тонкопленочными методами на пассивную в пьезоэлектрическом отношении диэлектрическую подложку. Возбуждение и прием ПАВ осуществляется энергией переменного электрического поля, проникающего через зазор между ВШП и пьезоэлектрической пластиной.

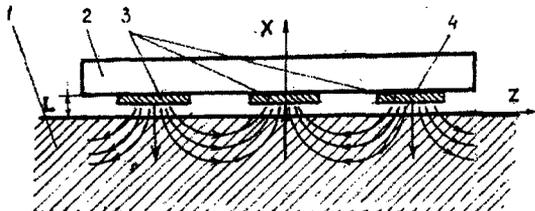


Рис.1. Схематическое представление бесконтактного ВШП. 1 — диэлектрическая пьезопассивная подложка, 2 — электроды ВШП, 3 — пьезоэлектрический звукопровод, 4 — геометрия электрического поля

Определение V основано на том, что между ее величиной и частотой возбуждения f_0 существует однозначная взаимосвязь, выражающаяся соотношением

$$V = \lambda f_0, \quad (7)$$

где λ — длина ПАВ.

Поскольку для эквидистантного ВШП $\lambda = 2t$, где t — шаг расстановки электродов ВШП, то при постоянном значении t изменение f_0 может быть обусловлено только изменением V и, следовательно, значение V можно получить путем измерения f_0 и деления ее на коэффициент $b = 1/\lambda$, т. е.

$$V = f_0 / b. \quad (8)$$

K_p рассчитывается по формуле (6) по результатам измерений V и $V_{кз}$, что осуществляется измерителем [8] автоматически.

Для снижения механической нагрузки слоя металла на поверхность звукопровода необходимо выбрать металл, имеющий максимально близкий к материалу звукопровода акустический импеданс $Z_{ак}$. В таблице 1 приведены значения $Z_{ак}$ для наиболее широко применяемых в акустоэлектронике пьезоэлектриков и металлов, удовлетворяющих требованиям высокой электропроводности. Из табл. 1 видно, что наиболее подходящим по критерию близости величин $Z_{ак}$ проводниковым материалом для большинства пьезоэлектриков является алюминий.

Таблица 1

Акустический импеданс и удельное электрическое сопротивление наиболее широко используемых в устройствах на ПАВ материалов

Материал	LiNbO ₃	SiO ₂	Bi ₁₂ GeO ₂₀	ЦТС	Al	Cu	Au	Ag	Ni
Параметр									
Акустический импеданс, $Z_{ак}$, (кг/м ² с) · 10 ⁶	16,15	8,37	15,67	17,28	17,3	38,5	66,0	49,50	48,00
Удельное электрическое сопротивление, ρ , Ом · м · 10 ⁻⁸	—	—	—	—	2,7	1,7	2,2	1,6	8,7

Для обеспечения точности измерений система ВШП должна составлять с пьезоэлектриком узкополосную фильтровую структуру, предусматривающую исключение либо минимизацию влияния на передаточную характеристику вторичных эффектов [8, 9]. Последняя задача существенно упрощается для БКП, поскольку ему не свойственны такие вторичные эффекты, как трехпролетный сигнал, сигналы многократных переотражений и регенерация сигналов ВШП. Дифракционные потери и искажение фазового фронта могут быть снижены выбором соответствующей конструкции ВШП [9—11] и оптимальной его апертуры в соответствии с условием [12]

$$L_{min} \geq (rV / f_b)^{1/2}, \tag{9}$$

где L_{min} — минимальное перекрытие электродов ВШП;

r — расстояние между неаподизированным ВШП и наиболее удаленной от него парой электродов с наименьшим перекрытием аподизированного ВШП;

f_b — верхняя граничная частота полосы пропускания фильтра.

Отражения от границ звукопровода можно уменьшить применением акустопоглотителя [13], а сигналы прямого прохождения — экранированием ВШП [10, 14]. Необходимо также максимально точно обеспечить плоскопараллельность диэлектрической и пьезоэлектрической пластин при минимальной величине зазора между ними ($h / \lambda_0 \ll 1$, где h — расстояние между пластинами, λ_0 — длина ПАВ на центральной частоте f_0), что достигается напылением по периметру диэлектрической пластины полоски соответствующей толщины из устойчивого к истиранию материала, например, хрома.

До начала измерений K_p необходимо измерить любым из известных способов [8, 15] потери на распространение ПАВ в материале с учетом их частотных зависимостей. Описанный в [8] автоматизированный измеритель позволяет за время

10 с — 15 с измерить скорость распространения ПАВ Резля в пьезоматериале с точностью не хуже 10^{-6} и по значениям V и $V_{кз}$ вычислить K_p .

Результаты измерений K_p некоторых пьезоматериалов указанным методом показали наличие значительных расхождений с данными различных информационных источников. Например, по данным ТУ 6-09-27-58-78 на пьезокерамику ЦТСС-5 $K_p \gg 0,5$, а по нашим измерениям — $K_p = 0,45$. По данным [16] для ЦТС-40 — $K_p = 0,22$, наши измерения дают $K_p = 0,20$.

Конструкцией БКП предусмотрена возможность изменения ориентации продольной системы ВШП относительно кристаллографической оси монокристаллического пьезозвукопровода. Это позволяет также исследовать зависимость фазовой скорости ПАВ от угла между волновым вектором и кристаллографической осью пьезомонокристалла [17] и, соответственно, значения K_p для различных направлений распространения ПАВ Резля.

Расширить возможности данного метода можно, заменив фильтровую структуру БКП на структуру резонатора на ПАВ. При этом определение K_p осуществляется по измеренным значениям электрических параметров эквивалентной схемы ПАВ-резонатора и, кроме того, представляется возможность определения диэлектрической проницаемости пьезоматериала ε_p^T .

Для одноходового ПАВ-резонатора (рис.2, а) параллельная эквивалентная электростатическая схема, более адекватно отражающая механизм резонанса ПАВ [18], приведена на рис. 2, б.

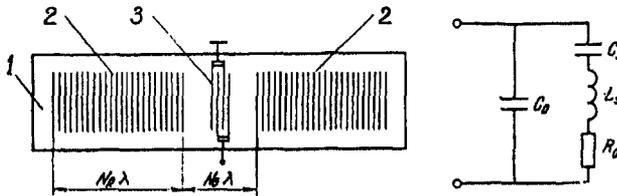


Рис. 2, а) структура одноходового резонатора на ПАВ. 1 — пьезоэлектрический звукопровод, 2 — отражательные структуры, 3 — бесконтактный ВШП, $N_R \lambda$ — ширина отражателя, $N_G \lambda$ — ширина резонансной полости; б) эквивалентная параллельная электрическая схема ВШП. C_0 — статическая емкость, R_0 — сопротивление излучения, C_s и L_s — эквивалентные динамические емкость и индуктивность

Она содержит C_0 — статическую емкость ВШП, C_s и L_s — динамические эквивалентные емкость и индуктивность, R_0 — сопротивление излучения, определяющее мощность излучения ПАВ на резонансной частоте f_r . Поскольку на f_r импеданс последовательной цепи C_s и L_s равен нулю, то полный импеданс будет определяться величинами R_0 и C_0 , соответственно равными

$$R_0 = \left(8N^2 f_0 K_p^2 C_s\right)^{-1}, \quad (10)$$

$$C_0 = C_s N, \quad (11)$$

где N — количество электродов ВШП;

$C_s = C_1 W$, где C_1 — емкость единицы длины пары электродов;

W — апертура ВШП.

Из (10) и (11) видно, что измерив на резонансе C_0 и R_0 , зная N, W, f_0 можно определить K_p , а по величине C_0 , определяемой выражением [2]

$$C_0 = F \varepsilon_p^T W N, \tag{12}$$

где $F(d;t)$ — безразмерная функция отношения ширины электродов d к расстоянию между соседними электродами t , можно определить ε_p^T пьезоэлектрика.

БКП со структурой резонатора на ПАВ выполнен таким образом, что ВШП расположен на диэлектрической пластине, а отражатели, формирующие резонаторную полость, - на поверхности пьезоэлектрика. ВШП расположен в резонаторной полости так, что центр его среднего электрода совпадает с центром резонаторной полости, чем обеспечиваются условия возбуждения стоячей ПАВ симметричного типа. Топология структуры ПАВ- резонатора такова, что отражение акустических волн от границ резонансной полости происходит с нулевой фазой коэффициента отражения, т.е. практически без потерь. Резонансные частоты выбираются из условия равенства набега фазы ПАВ при ее распространении в прямом и обратном направлении в полости резонатора целому числу 2π , т.е.

$$\omega_0 = \pi V / l, \tag{13}$$

где n — номер моды волны (n — четное);

l — эффективная длина резонансной полости, выбираемая из условия

$$l = p\lambda / 2 + \lambda/4, p — \text{целое число.} \tag{14}$$

Следует заметить, что предложенный метод бесконтактного преобразования ПАВ Рэлея может быть использован для структурных исследований поверхностных слоев полупроводников, обладающих пьезоэффектом. Для этого могут оказаться полезными данные о дисперсии скорости ПАВ, угловая зависимость скорости ПАВ, K_p и ε пьезополупроводника. При этом толщина исследуемого слоя может задаваться изменением f_0 , однозначно связанной с длиной волны Рэлея λ_R , 95 % энергии которой сосредоточено в слое толщиной λ_R . В таблице 2 приведены данные о пьезоэлектрических свойствах наиболее широко используемых пьезополупроводников, полученные разными авторами.

Таблица 2

Коэффициент электромеханической связи пьезополупроводниковых материалов

Материал	ZnO	CdS	CdSe	Te	GaAs	InSb	GaP	SiC	AlN
Коэффициент электромеханической связи K_p	0,28	0,15	0,12	0,35	0,02	0,04	0,11	0,03	0,20

Таким образом, метод, основанный на использовании бесконтактного преобразования ПАВ Рэлея, обеспечивает измерение основных электрофизических и акустических параметров пьезоэлектрических материалов (K_p, ε_p^T, V) с высокой точностью, имеет ряд преимуществ перед аналогами и может использоваться также для структурных исследований поверхности полупроводников.

1. Farnel G.W. Properties of Elastic Surface Waves // Physical acoustics.- 1970.-Vol. 6. P.109.
2. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику.- М.: Наука, Главная редакция физ.-мат. литературы, 1984.- 400 с.
3. У.Мезон Физическая акустика: Пер. с англ. - М.: Мир, 1966.-592 с.

4. **Pojewski W.** Measurements of the dielectric; piezoelectric and elastic constants of barium titanate ceramics // Proc. of the II conference on ultrasonics. Poliak Acad. Scien.-1956.-P. 38-44.
5. IRE standards on piezoelectric crystals: measurements of piezoelectric ceramics// Proc. IRE.- 1961.- Vol. 49.- № 7.- P. 1161-1169.
6. ГОСТ 12370-80. Материалы пьезокерамические. Методы испытаний.- М.: Изд-во стандартов.- 1980.- 30 с.
7. **Shultz M.B. and Matsinger J.H.** Rayleigh-wave electromechanical coupling constants // Appl. Phys. Lett.— Vol. 20.— 1972.— P. 367-369.
8. **Лепих Я.И., Снегур П.А.** Измерение электрофизических параметров пьезоэлектрических звукопроводов // Радиотехника.- М., 1989.- № 8.- С. 30-33.
9. **Лепих Я.И.** Особливості проектування вузькосмугових фільтрів на ПАХ з п'єзокерамічним звукопроводом // Радіоелектроніка та інформатика.- 1999.- № 2.- С. 17-18.
10. **Орлов В.С., Бондаренко В.С.** Фильтры на поверхностных акустических волнах.- М.: Радио и связь, 1984.- 272 с.
11. **Морган Д.** Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах: Пер. с англ. /Под ред. С.И.Баскакова.- М.: Радио и связь, 1990.- 416 с.
12. А.С. № 1039017 СССР, МКИ H03H. Фильтр на поверхностных акустических волнах / Лепих Я. И. - Оpubл. 30.08.83 // Бюл. № 32.
13. **Лепих Я.И.** Акустопоглощающий материал для массового производства устройств на ПАВ // Техника средств связи. Сер. ТПО.- 1990.- Вып. 1.- С. 78-79.
14. А.С. № 1731023 СССР, МКИ H03H. Фильтр на поверхностных акустических волнах / Лепих Я. И., Снегур П. А.- Оpubл. 28.01.91 // Бюл. № 38.
15. **Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б.** Ультразвуковые методы в физике твердого тела: Пер. с англ.- М.: Мир, 1972.- 307 с.
16. **Климов В.В., Дидковская О.В., Савенкова Г.Е., Веницев Ю.Н.** Пьезокерамика донецкая // Фундаментальные проблемы пьезоэлектроники. Сб. трудов Международной научно-практической конференции "Пьезотехника-95".- Ростов-на-Дону: МП "Книга",-1995.-Т.1.- С. 59-65.
17. **Лепих Я.И.** Исследование угловой зависимости скорости ПАВ в кварце различных кристаллографических срезов // Акустоэлектрические и фотоакустические методы исследования вещества.- 1989.- С. 102-104.
18. **Staples E.J., Schoenwald J.S., Rosenfeld R.C., Hartman C.S.** UHF Acoustic Wave Resonators // Proc. IEEE Ultrasonics Symp. Nov.- 1974.- P. 245.