

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра радиоэлектронных устройств и систем

РАДИОМАТЕРИАЛЫ И РАДИОКОМПОНЕНТЫ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ № 1-2
для студентов специальности 11.05.01
«Радиоэлектронные системы и комплексы»
очной формы обучения

Воронеж 2024

УДК 621.396.6(07)
ББК 32я7

Составитель
канд. физ.-мат. наук А. С. Бадаев

Радиоматериалы и радиокомпоненты: методические указания к выполнению лабораторных работ № 1-2 для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: А. С. Бадаев. — Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2024. — 33 с.

В методических указаниях изучаются и экспериментально исследуются тепловое расширение и распространение ультразвуковых волн в твёрдых телах, также изучается явление термических напряжений. Приводятся теоретические и практические сведения, необходимые для выполнения лабораторных работ № 1-2. Тематика лабораторных работ соответствует рабочей программе дисциплины «Радиоматериалы и радиокомпоненты».

Предназначены для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» 4 и 5 курсов очной формы обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле РМиРК_1-2.pdf.

Ил. 9. Табл. 1. Библиогр.: 3 назв.

УДК 621.396.6(07)
ББК 32я7

Рецензент — *А. В. Останков, д-р техн. наук, профессор
кафедры радиотехники ВГТУ*

*Издается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ И ТЕРМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В СПЯХ МЕТАЛЛ-СТЕКЛО

1.1. Общие указания

1.1.1. Цель работы

Экспериментальная проверка положений теории термического расширения твердых тел с целью углубленного их понимания. Освоение на практике методов измерения коэффициента термического расширения.

1.1.2. Содержание работы

Основным содержанием работы является: изучение теории теплового расширения твердых тел, экспериментальные исследования коэффициента термического расширения стекла марки ТСМ-700 на промышленном dilatометре ДКВ-4А, расчет термического напряжения спая сплав-стекло и дается характеристика надежности спая.

Обучение осуществляется в процессе выполнения домашних и лабораторных заданий. Контроль усвоения полученных студентами знаний и навыков производится при собеседовании путем оценки ответов на контрольные вопросы, а также при выполнении лабораторной работы.

Время выполнения домашних заданий 3 ч. Общее время на выполнение лабораторных заданий, включая собеседование и отчет по лабораторной работе 4 ч.

1.1.3. Указания по технике безопасности

В процессе работы необходимо соблюдать общие правила техники безопасности при работе с электроустановками напряжением до 1000 В.

Шпиндель подвижной системы должен быть заарретирован при отсутствии в блоке испытуемого образца от арретира при установленном образце.

1.2. Домашние задания и методические указания по их выполнению

1.2.1. Задание № 1

Изучить взаимосвязь термического расширения твердых тел с особенностями межатомных взаимодействий. Рассмотреть феноменологические уравнения Грюнайена. В заготовку отчёта занести основные уравнения и рис. 1, 2, 3.

1.2.1.1. Методические указания по выполнению первого задания

Для выполнения задания необходимо ознакомиться с материалом [1], с. 201-208.

Взаимодействие атомов твёрдого тела складывается из сил приближения и отталкивания.

При воздействии внешней растягивающей нагрузки расстояние между атомами увеличивается и равновесное расположение их в кристалле нарушается. Это приводит к нарушению равенства сил притяжения и отталкивания, характерного для равновесного состояния атомов в решетке, и возникновению внутренних сил, стремящихся вернуть атомы в первоначальные положения равновесия. Величину этих сил, рассчитанную на единицу площади поперечного сечения кристалла, называют *напряжением*.

Энергия взаимодействия частиц 1 и 2 в твердом теле является функцией расстояния r между ними и описывается кривой $U(r)$, схематически показанной на рис. 1. При смещении частицы 2 из положения равновесия на расстояние x , т.е. при увеличении расстояния между частицами до $r = r_0 + x$, энергия частицы увеличивается, становясь равной $U(r)$. Изменение энергии $U(x) = U(r) - U(r_0)$ можно найти, разлагая $U(r)$ в ряд Тейлора по степеням x :

$$U(x) = \left(\frac{\partial U}{\partial r} \right)_0 x + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} \right)_0 x^2 + \frac{1}{6} \left(\frac{\partial^3 U}{\partial r^3} \right)_0 x^3 + \dots \quad (1)$$

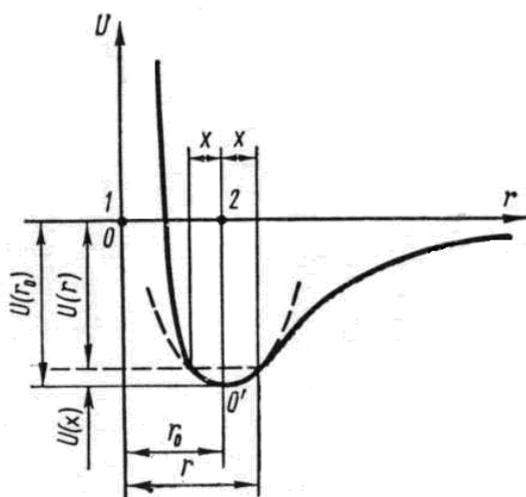


Рис. 1. Потенциальная энергия взаимодействия двух атомов

Ограничиваясь квадратичным членом разложения и учитывая, что $(\partial U / \partial r)_0$ в точке O' равна нулю, находим

$$U(x) \approx \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} \right)_0 x^2 = \frac{1}{2} s \cdot x^2, \quad (2)$$

Это приближенное выражение для изменения энергии частицы вследствие смещения ее из положения равновесия на расстояние x . Приближенным оно является потому, что в разложении (1) мы ограничились квадратичным членом и отбросили члены более высокого порядка. Графически зависимость в таком приближении выражается параболой, показанной на рис. 1. пунктиром.

Сила, которая возникает между частицами 1 и 2 при изменении расстояния между ними на x , равна

$$f = -\frac{\partial U(x)}{\partial x} = -s \cdot x. \quad (3)$$

Как видно из (3), сила пропорциональна первой степени смещения x и направлена к положению равновесия, на что указывает знак минус. Известно, что под действием такой силы тело совершает гармонической, а приближение (2), приведшее к гармонической силе, называют гармоническим приближением

Теперь представим себе, что к стержню с поперечным сечением S и длиной L приложена растягивающая сила F , которая изменяет расстояние между соседними атомными плоскостями 1 и 2 на x , вызывая тем самым удлинение стержня на ΔL . Эта сила будет уравновешена внутренней силой F_{BH} , численно равной

$$F_{BH} = f \cdot N = N \cdot s \cdot x, \quad (4)$$

где N — число частиц, находящихся в атомном слое площадью S .

Напряжения σ , которые возникнут в растянутом стержне, будут равны

$$\sigma = \frac{F_{BH}}{S} = \frac{N}{S} s \cdot x = c \cdot x, \quad (5)$$

где $c = N \cdot s / S$. Умножая и деля правую часть (5) на расстояние между атомными плоскостями r_0 , получим:

$$\sigma = c \cdot r_0 \cdot \frac{x}{r_0} = E \cdot \varepsilon, \quad (6)$$

$$E = c \cdot r_0 = \frac{N}{S} s \cdot r_0. \quad (7)$$

Называется модулем упругости, или модулем Юнга, а

$$\varepsilon = \frac{x}{r_0} \quad (8)$$

представляет собой относительное удлинение параметра решётки в направлении действия внешней силы F .

Формула (6) выражает закон Гука.

При наличии касательных напряжений τ закон Гука имеет следующий вид

$$\tau = G \cdot \gamma, \quad (9)$$

где G — модуль сдвига;

γ — относительная деформации сдвига.

Модуль сдвига связан с модулем упругости следующим соотношением

$$G = \frac{E}{2}(1 + \mu), \quad (10)$$

где μ — коэффициент Пуассона.

Коэффициент Пуассона для различных материалов находится в пределах $0,2 - 0,5$.

Из гармонического приближения непосредственно следует закон Гука, описывающий упругую деформацию твердых тел. Это же приближение было положено в основу рассмотрения тепловых колебаний решетки и построения теории решеточной теплоемкости твердых тел, которая достаточно хорошо согласуется с опытом.

Однако с точки зрения гармонического приближения оказалось невозможным объяснить ряд хорошо известных явлений, таких, например, как тепловое расширение твердых тел, их теплопроводность и др.

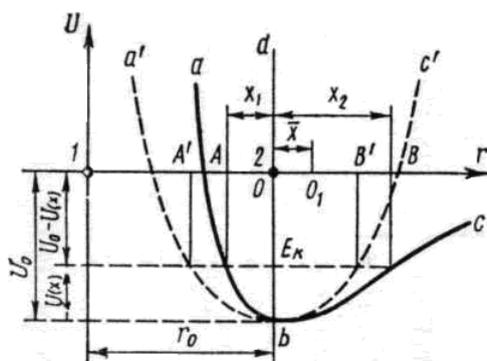


Рис. 2. Зависимость потенциальной энергии взаимодействия частиц твёрдого тела от расстояния между ними

Рассмотрим кривую зависимости потенциальной энергии взаимодействия частиц твердого тела от расстояния между ними (рис. 2). При абсолютном нуле частицы располагаются на расстояниях r_0 , отвечающих минимуму энергии взаимодействия U_0 (на дне потенциальной ямы abc). Эти расстояния определяют размер тела при абсолютном нуле. С повышением температуры частицы начинают колебаться около положений равновесия O . Ради простоты допустим, что частица 1 закреплена неподвижно и колеблется лишь частица 2. Колеблющаяся частица обладает кинетической энергией, достигающей наибольшего значения E_k в момент прохождения ею положения равновесия O . На рис. 2

энергия E_K отложена вверх от дна потенциальной ямы. При движении частицы 2 влево от положения равновесия кинетическая энергия расходуется на преодоление сил отталкивания ее от частицы 1 и переходит в потенциальную энергию взаимодействия частицы. Отклонение влево происходит до тех пор, пока вся кинетическая энергия частицы E_K не перейдет в потенциальную энергию. Последняя увеличится на $U(x) = E_K$ и станет равной $-[U_0 - U(x)]$, а частица 2 сместится предельно влево на расстояние x_1 . При движении частицы 2 вправо от положения равновесия кинетическая энергия расходуется на преодоление сил притяжения ее к частице 1 и также переходит в потенциальную энергию взаимодействия частиц. В точке В, отстоящей от положения равновесия на расстоянии x_2 , вся кинетическая энергия E_K переходит в потенциальную, вследствие чего последняя увеличивается на $U(x) = E_K$ и становится равной $-[U_0 - U(x)]$.

Если бы частица 2 совершала чисто гармонические колебания, то сила $f(x)$, возникающая при отклонении ее от положения равновесия на расстояние x , была бы строго пропорциональна этому отклонению и направлена к положению равновесия (формула (3)).

Изменение потенциальной энергии $U(x)$ частицы описывалось бы при этом параболой $a'bc'$ (рис. 2) уравнением которой является (2).

Эта парабола симметрична относительно прямой bd , параллельной оси ординат и отстоящей от нее на расстоянии r_0 . Поэтому отклонения x_1 и x_2 были бы одинаковыми по величине и середина размаха AB совпадала бы с положением равновесия O . Нагревание тела в этом случае не могло бы вызывать его расширения, так как с увеличением температуры происходило бы лишь увеличение амплитуды колебаний частиц, а средние расстояния между ними оставались бы неизменными.

В действительности же потенциальная кривая abc является, как видно из рис. 2, несимметричной относительно прямой bd : ее левая ветвь ba поднимается значительно круче правой ветви bc . Это означает, что колебания частиц в твердом теле являются ангармоническими (негармоническими). Для учета асимметрии потенциальной кривой необходимо в уравнение ввести дополнительный член $-gx^3/3$, выражающий эту асимметрию (g – коэффициент пропорциональности). Тогда (2) и (3) примут следующий вид:

$$U(x) = s \cdot x^2 / 2 - gx^3 / 3, \quad (11)$$

$$f(x) = -\partial U / \partial x = -sx + gx^2. \quad (12)$$

При отклонении частицы 2 вправо ($x > 0$) член $gx^3/3$ вычитается из $sx^2/2$ и ветвь bc идет ниже ветви bc' при отклонении влево ($x < 0$) член $gx^3/3$ прибавляется к $sx^2/2$ и ветвь ba идет круче ветви ba' .

Несимметричный характер потенциальной кривой приводит к тому, что отклонения частицы 2 вправо и влево оказываются неодинаковыми: вправо частица отклоняется сильнее, чем влево (рис. 2). Вследствие этого среднее положение частицы 2 (точка O_1) уже не совпадает с положением равновесия O , а

смещается вправо. Это соответствует увеличению среднего расстояния между частицами на \bar{x} .

Таким образом, с нагреванием тела средние расстояния между частицами должны увеличиваться и тело должно расширяться. Причиной этого является ангармонический характер колебаний частиц твердого тела, обусловленный асимметрией кривой зависимости энергии взаимодействия частиц от расстояния между ними.

Степень изменения объема характеризуется объемным коэффициентом теплового расширения β :

$$\beta = \frac{1}{V} \left(\frac{dV}{dT} \right)_p, \quad (13)$$

где V — объем твердого тела.

Чаще используется коэффициент термического линейного расширения (КТЛР):

$$\alpha = \frac{1}{l} \left(\frac{dl}{dT} \right), \quad (14)$$

где l — линейный размер твердого тела.

$$\beta \approx 3 \cdot \alpha. \quad (15)$$

Расширение твердого тела при нагреве сводится, как это следует из рентгеноструктурного анализа, к увеличению межатомного расстояния.

Произведем оценку коэффициента теплового расширения α . Среднее значение силы, возникающей при смещении частицы 2 от положения равновесия, равно

$$\bar{f} = -s \cdot \bar{x} + g\bar{x}^2.$$

При свободных колебаниях частицы $\bar{f} = 0$, поэтому $g\bar{x}^2 = s \cdot \bar{x}$. Отсюда находим

$$\bar{x} = g\bar{x}^2 / s. \quad (16)$$

С точностью до величины второго порядка малости потенциальная энергия колеблющейся частицы определяется соотношением, а ее среднее значение равно $\bar{U}(x) \approx sx^2 / 2$. Отсюда находим

$$\bar{x}^2 \approx 2\bar{U}(x) / s.$$

Подставив это в (16), получим

$$\bar{x} \approx 2g\bar{U}(x) / s^2.$$

Помимо потенциальной энергии $U(x)$ колеблющаяся частица обладает кинетической энергией E_k , причем $\bar{U}(x) = \bar{E}_k$. Полная энергия частицы $E = \bar{E}_k + \bar{U}(x) = 2\bar{U}(x)$. Это позволяет выражение для \bar{x} переписать в следующем виде:

$$\bar{x} = gE / s^2.$$

Относительное линейное расширение, представляющее собой отношение изменения среднего расстояния \bar{x} между частицами к нормальному расстоянию r_0 между ними, равно

$$\frac{\bar{x}}{r_0} = \frac{g}{s^2 r_0} E$$

а коэффициент линейного расширения

$$\alpha = \frac{1}{r_0} \cdot \frac{d\bar{x}}{dT} = \frac{g}{s^2 r_0} \cdot \frac{dE}{dT} = \chi \cdot c_v. \quad (17)$$

где

$$\chi = \frac{g}{s^2 r_0} \quad (18)$$

c_v — теплоёмкость, отнесённая к одной частице.

Теплоёмкость c_v твёрдого тела при постоянном объёме выражает изменение тепловой энергии решётки при изменении температуры на 1°C :

$$c_v = \frac{dE_{\text{реш}}}{dT}. \quad (19)$$

Таким образом, коэффициент линейного расширения оказывается пропорциональным теплоемкости тела. В качестве примера на рис. 3 показана, зависимость коэффициента линейного расширения и теплоемкости меди от температуры, подтверждающая наличие связи между α и c_v .

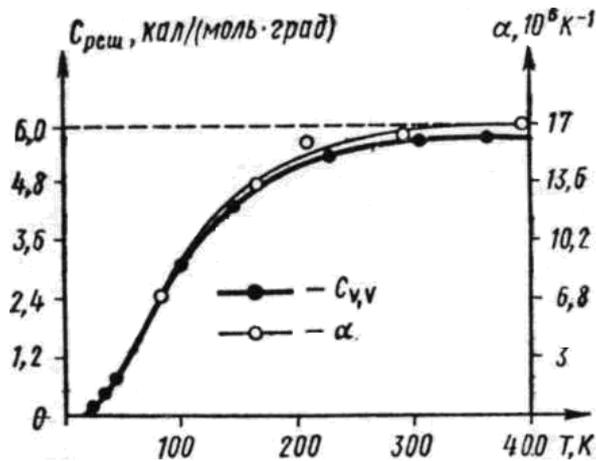


Рис. 3. Зависимость КЛТР и теплоёмкости меди от температуры

В области высоких температур энергия линейно колеблющихся частиц равна kT , теплоемкость c_v , отнесенная к частице, равна k . Поэтому коэффициент расширения линейной цепочки атомов будет равен

$$\alpha = \chi c_v = \frac{gk}{s^2 r_0}$$

Подставка числовых значений g, k, s и r_0 для различных твердых тел дает для α величину порядка $10^{-4} - 10^{-5}$, что удовлетворительно согласуется с опытом. Опыт подтверждает также, что в области высоких температур α практически не зависит от температуры (рис. 3).

В области низких температур α ведет себя подобно c_v : уменьшается с понижением температуры и при приближении к абсолютному нулю стремится к нулю.

В заключение отметим, что формула, подобная (17) была впервые предложена для металлов Грюнайzenом и имела вид

$$\alpha = \frac{\gamma \cdot n}{3V} c_v, \quad (20)$$

где n — коэффициент сжимаемости металла;

V — атомный объем;

γ — постоянная Грюнайзена, колеблющаяся для разных металлов от 1,5 до 2,5 и только для стёкол с большим содержанием SiO_2 $\gamma < 1$.

Согласно второму уравнению Грюнайзена при увеличении температуры от абсолютного нуля до температуры плавления объема чистых металлов увеличивается примерно на 6 %. Это увеличение объема для легкоплавких материалов распределено на малом интервале температур, а для тугоплавких — на большом. Поэтому у тугоплавких металлов коэффициент линейного расширения меньше, чем у легкоплавких.

1.2.2. Задание № 2

Освоить методику расчёта термических напряжений спая металл-стекло, изучить последствия возникновения этих напряжений. Ознакомиться со стёклами, металлами и сплавами, применяемыми в микроэлектронике и их свойствами.

1.2.2.1. Методические указания по выполнению второго задания

Для выполнения задания следует проработать материал [2], с.115-121; 121-124.

На практике очень часто приходится сталкиваться с использованием спаев металл-стекло. Например, для защиты микросхем от воздействия окружающей среды их устанавливают с использованием спая металла со стеклом, который затем герметизируется. При этом электрические вводы осуществляются с использованием спая металла со стеклом, который также должен быть герметичным. При охлаждении полученного спая ниже температуры стеклования в нем развиваются термические напряжения, возникающие из-за разности коэффициентов термического расширения стекла и металла. Следует обратить особое внимание на то, что напряжения растут именно от температуры перехода стекла в стеклообразное твердое состояние (температура стеклования) и присутствуют во всем температурном диапазоне ниже этой температуры.

Термические напряжения могут вывести прибор из строя в результате растрескивания стекла в месте спая или разрыва проводника. Напряжение на границе раздел металл-стекло определяется из выражения

$$\sigma_{нов} = \frac{(\alpha_{ст} - \alpha_{м}) E_{ст} (T - T_g)}{1 - \mu_{ст}}, \quad (21)$$

где $\alpha_{ст}$ и $\alpha_{м}$ — коэффициенты линейного термического расширения стекла и металла соответственно;

$E_{ст}$ и $\mu_{ст}$ — модуль Юнга и коэффициента Пуассона стекла соответственно;

$T - T_g$ — разность между температурой эксплуатации и начальной температурой, в качестве начальной температуры принимается T_g — температура стеклования.

Если эти напряжения превысят предел прочности стекла на разрыв, то произойдет его растрескивание. Одновременно возникают напряжения в сечении проводника:

$$\sigma_{сеч} = \frac{2 \cdot \sigma_{нов} \cdot l}{r}, \quad (22)$$

где l — длина проводника в месте спая;

r — его радиус.

Если напряжения растяжения в сечении проводника превысят его предел прочности на разрыв, то также произойдет выход прибора из строя.

Из выражения (21) и (22) видно, что механические напряжения тем выше, чем выше разность коэффициентов термического расширения стекла и металла. Принято считать, что стекло и металл совместимы при пайке, если разность их КТЛР не превышает порядка $1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Стекла и ситаллы, используемые в микроэлектронике, маркируются с указанием КТЛР (две цифры после букв). Например, стекло С59 имеет КТЛР $5,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Стекло представляет собой твердое аморфное вещество, образующейся при сплавлении стеклообразующихся оксидов и безоксидных соединений. Стеклообразующим и являются оксиды SiO_2 , B_2O_3 , P_2O_5 , GeO_2 и некоторые безкислородные соединения селена, теллура, мышьяка. По виду стеклообразующих оксидов стекла называют соответственно силикатными, боратными, фосфатными, германатными. Основную часть стекол, применяемых в радиоэлектронных средствах, составляют силикатные стекла.

Кварцевое стекло, или плавленый кварц состоит из практически чистого SiO_2 в аморфном состоянии. Его получают из горного хрусталя или из мелкого кварцевого песка при температуре выше 1700°C . Кварцевое стекло обладает рядом уникальных свойств:

- температурный коэффициент линейного расширения $\alpha_1 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (ТКЛР) имеет наименьшее значение из всех материалов и составляет $5 \cdot 10^{-7}$, а при температуре ниже -73°C имеет отрицательное значение ТКЛР;
- модуль упругости растет с повышением температуры;
- удельное сопротивление составляет 10^{15} - $10^{16} \text{ Ом}\cdot\text{м}$;
- высокие диэлектрические свойства — тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 10^6 Гц составляет $(1-2) \cdot 10^{-4}$, а диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 3,8$;
- высокая нагревостойкость (длительная до 1200°C и в течение нескольких часов — 1400°C).

Благодаря вышеперечисленным свойствам кварцевое стекло является материалом для изготовления линз, баллонов ламп ультрафиолетового излучения; применяются в полупроводниковой технологии в виде труб, тиглей, термостойкой и химической посуды. Высокие диэлектрические свойства наряду с высокой механической добротностью и малым КТЛР являются определяющими параметрами кварцевого стекла при изготовлении на его основе диэлектрических резонаторов. Тонкие аморфные пленки SiO_2 , полученные осаждением из газовой фазы широко применяются в технологии интегральных схем и полупроводниковых приборов.

Электровакуумные стекла используются при изготовлении баллонов электронных ламп и изоляционных бус для электровакуумных, полупроводниковых приборов и гибридных интегральных схем. Определяющим параметром этих стекол наряду с высокими электрическими свойствами, является значение ТКЛР. Электровакуумные стекла по признаку спаиваемости с определенным

металлом или сплавом подразделяются на: вольфрамовые, молибденовые и платиновые, хотя в своем составе не содержат указанных металлов. Так стекла молибденовой группы имеют ТКЛР, равный молибдену и при спаивании с ним образуют прочные вакуумно-плотные спаи. К стеклам вольфрамой группы относятся стекла марок С37-1...С41-1, молибденовой группы С47-1...С52-1 и платиновой группы — С48-1...С95-3. Цифра после дефиса указывает порядковый номер разработки. Так стекло марки С52-1 имеет ТКЛР равный $52 \cdot 10^{-7} \text{ C}^{-1}$.

Молибденовые электровакуумные стекла С48-1, С49-1, С49-2, С52-1 широко применяются для спаивания с коваром при изготовлении вакуумноплотных выводов гибридных интегральных схем.

Конденсаторные стекла применяются в качестве диэлектриков тонкопленочных конденсаторов. Такие стекла помимо высокой диэлектрической проницаемости и малого значения $\text{tg}\delta$ должны иметь высокие удельное сопротивление и электрическую прочность, и отсутствие пор. Для пленочных конденсаторов применяют в основном двухкомпонентные боро-силикатные с удельной емкостью ($C_{\text{уд}} = 150 \text{ пФ/мм}^2$) алюмо-силикатные ($C_{\text{уд}} = 300 \text{ пФ/мм}^2$) и иттрий-боросиликатные ($C_{\text{уд}} = 500 \text{ пФ/мм}^2$) стекла.

Стекла для герметизации полупроводниковых приборов и ИС. Эти стекла используются в виде тонких пленок, наносимых на поверхность кремниевых кристаллов для защиты от внешних воздействий. Пленки должны хорошо покрывать ступеньки топологического рельефа и поэтому иметь ТКЛР, близкий к ТКЛР кремния; должны быть сплошными, без разрывов и пор.

Проводящие стекла представляют собой стеклообразные вещества, которые вследствие нестехиометрического состава обладают повышенной электропроводностью, при этом носителями в них служат электроны. К таким стеклам (халькогенидные) относятся, например, соединения химического состава As_2 , S_3 , Sb_2S_3 , GeSe и другие. Халькогенидные стекла имеют низкую температуру размягчения ($230 \dots 430 \text{ }^\circ\text{C}$) и удельное сопротивление $\rho = 10^5 \text{--} 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Низкая температура обработки обусловила использование высокоомных стекол для герметизации интегральных схем, но основное применение они находят из-за их полупроводниковых свойств (как полупроводниковые материалы).

Ситаллы являются многофазными материалами, состоящими из зерен одной или нескольких кристаллических фаз, скрепленных между собой стекловидной прослойкой. В настоящее время синтезированы ситаллы на основе стекол различного химического состава: литий-, кальций-, магний-, стронций натрий-алюмосиликатных, калиево-титаносиликатных и др.

По структуре ситаллы занимают промежуточное положение между обычными стеклами и керамикой. От стекол они отличаются тем, что имеют в основном кристаллическое строение, и от керамики — значительно меньшим размером кристаллических зерен и отсутствием пористости. Ситаллы по сравнению со стеклами обладают более высокой механической прочностью, нагревостойкостью, теплопроводностью. Температурный коэффициент линейного расширения (ТКР) лежит в пределах $(7\text{--}30) \cdot 10^{-7} \text{ C}^{-1}$.

Термоситаллы марок СТ38-1, СТ50-1, СТ50-2 в виде полированных пластин толщиной 0,5-1 мм широко используются в качестве подложек тонкопленочных гибридных интегральных микросхем.

Выводы из корпусов через стекло чаще всего выполняют из платенита (сплава состава 54% Fe + 46% Ni), этот сплав характерен тем, что его КТЛР равен КТЛР платины ($8,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) – отсюда его название. Для спаивания с тугоплавкими стеклами применяют также сплав ковар (54% Fe + 29% Ni + 17% Co), КТЛР которого равен $5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Все сплавы с низким КТЛР представляют собой сплавы никеля и железа, что связано с ферромагнитной природой этих металлов. Для ферромагнитных материалов КТЛР можно представить в виде

$$\alpha = \alpha_{\text{анг}} + \frac{d\lambda}{dT},$$

где $\alpha_{\text{анг}}$ — температурный коэффициент линейного расширения, определяемый ангарнонизмом межатомных взаимодействий;

$d\lambda/dT$ — слагаемое, учитывающее изменение магнитострикции с температурой.

Так как никель обладает большой отрицательной магнитострикцией, то его присутствие в сплаве приводит к понижению КТЛР сплава.

1.3. Вопросы к домашнему заданию

1. Как меняются межатомные силы притяжения при сближении атомов.
2. Какую силу и приближение называют гармоническими?
3. Что является причиной термического расширения твёрдых тел?
4. Что такое объёмный и линейный коэффициенты теплового расширения, как они связаны?
5. Как связан коэффициент термического расширения с теплоёмкостью тела?
6. Приведите уравнение Грюнайзена?
7. Дайте характеристику термическим напряжениям в спае с стеклометалл.
8. Как изменяется КТЛР кварцевого стекла при введении в него добавок?
9. Охарактеризуйте сплавы с низким значением коэффициента термического расширения.
10. Что такое ситаллы? Чему равен их КТЛР и где они применяются в микроэлектронике?
11. Как определяются термические напряжения в спае металл-стекло и в сечении проводника.

1.4. Лабораторные задания и методические указания по их выполнению

1.4.1. Задание № 1

Изучить по описанию принцип работы дилатометра ДКА-4А, приведенного на рисунке 4, обратив особое внимание на материалы, из которых он изготовлен, и занести в отчет его схему.

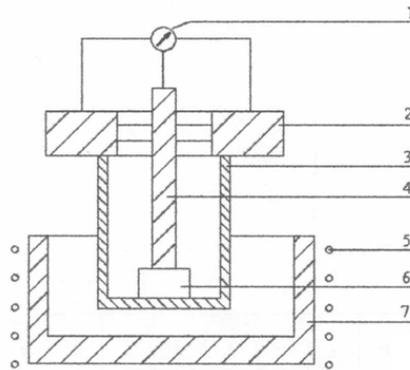


Рис. 4. Схема кварцевого дилатометра:

- 1) датчик измеритель; 2) держатель; 3) кварцевая трубка; 4) кварцевый стержень-толкатель; 5) спираль; 6) испытуемый образец; 7) трубка из жаропрочной стали

1.4.2. Задание № 2

Измерить температурный коэффициент термического расширения тугоплавкого стекла ТСМ-700 в температурном диапазоне 20-220 °С с интервалом 20 К. Измерение КТЛР проводить следующим образом:

1. Установить образец.
2. Установить и закрепить измерительную головку.
3. Установить рукоятку автотрансформатора в крайнее левое положение и включить тумблер «Сеть» и «Нагревание».
4. С периодичностью в 20 градусов, до 220 °С, снимать показания величины удлинения образца (см. приложение).
5. Рассчитать КТЛР во всех двадцатиградусных интервалах по формуле

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L \Delta T}, \quad (23)$$

где L — длина образца (50 мм);

ΔT — приращение температуры.

Полученный результат КТЛР приписать температуре середины интервала.

Полученные экспериментальные данные заносятся в табл.1.

Таблица 1

Температурный интервал	20+	40+	60+	80+	100+	120+	140+	160+	180+	200+
	40°C	60°C	80°C	100°C	120°C	140°C	160°C	180°C	200°C	220°C
$\Delta L(10^{-6})_{,м}$										
T, °C	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210
α, K^{-1}										

6. Построить график температурной зависимости КТЛР стекла ТСМ-700.

1.4.3. Задание № 3

Определить знак и величину напряжения в спае стекла ТСМ-700 – ковар при температуре, дать характеристику надежности такого спая.

Для определения знака и величины напряжения в спае стекло ТСМ-700 – ковар провести следующие действия.

1. Подставить полученное значение α в формулу (21) вместе со значением КТЛР для ковара $\alpha_m = 5 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ и характеристиками стекла: $E_{cm} = 7,7 \cdot 10^{10}$ Па, $m = 0,21$, $T_g = 850$ К. Рассчитать величину и знак $\sigma_{пов}$.
2. Если $\sigma_{пов} > 0$ то это соответствует растягивающим напряжениям в металле и сжимающим - в стекле. Так как наиболее опасны растягивающие напряжения, то подставив $\sigma_{пов}$ в формулу (22), определить напряжения в сечении проводника длиной 3 мм и радиусом 0,1 мм и сравнить их с пределом прочности для ковара ($\sigma_b = 4,5 \cdot 10^8$ Па).
3. Если $\sigma_{пов} < 0$, то это соответствует растягивающим напряжениям в стекле и сжимающим в металле. Сравнить полученное значение растягивающих напряжений в стекле с пределом прочности стекла на разрыв $\sigma_g = 6 \cdot 10^6$ Па).

Если значения растягивающих напряжений не превышают пределов прочности, то спай будет устойчив в работе. Если же растягивающие напряжения превышают пределы прочности, то необходимо делать рекомендации по выбору стекла (каков должен быть его КТЛР).

1.5. Указания по оформлению отчёта

Отчет оформляется в виде пояснительной записки на листах формата А4. Необходимо дома подготовить заготовку отчета по данной лабораторной работе. Заготовка отчета должна содержать наименование лабораторной работы, цель и краткое содержание работы, все пункты лабораторных заданий и свободные места для выполнения.

Отчет должен содержать виды материалов, которые должны исследоваться студентом, практическое выполнение лабораторной работы и графики зависимости исследуемых параметров от частоты и температуры. В конце отчета

необходимо сделать выводы по результатам работы. В выводах должно быть дано объяснение величин ε и $tg\delta$ в исследуемых материалах в зависимости от их структуры, а также изменение их частотной и температурной зависимостей. Рисунки и графики необходимо выполнять на отдельных листах формата А4, на которых, если позволяет место, может быть размещено несколько рисунков.

1.6. Контрольные вопросы к лабораторным заданиям

1. Почему надо учитывать α и β контактирующих материалов?
2. Расскажите о методике измерения α твёрдых тел.
3. Нарисуйте дилатометр и объясните принцип его работы.
4. Какие материалы использовались для изготовления дилатометра и почему?
5. Как произвести расчет КТЛР для любого заданного температурного интервала и для данной температуры?
6. Какие напряжения возникают в стекле и металле спая, если $\alpha_{ст} > \alpha_{м}$?
7. Какие напряжения возникают в стекле и металле спая, если $\alpha_{ст} < \alpha_{м}$?

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН В ТВЁРДЫХ ТЕЛАХ

2.1. Общие указания по выполнению работы

2.1.1. Цель работы

Изучение процессов возбуждения, распространения и приема ультразвуковых волн в твердых телах.

2.1.2. Содержание работы

В работе изучаются механические свойства твёрдых тел, измеряются и рассчитываются скорости распространения продольных и сдвиговых ультразвуковых волн в стёклах, их затухающие и упругие характеристики.

Обучение осуществляется в процессе выполнения домашних и лабораторных заданий. Контроль усвоения полученных студентами знаний и навыков производится при собеседовании путем оценки ответов на контрольные вопросы, а также при выполнении лабораторной работы.

Время выполнения домашних заданий 3 ч. Общее время на выполнение лабораторных заданий, включая собеседование и отчет по лабораторной работе 4 ч.

2.1.3. Указания по технике безопасности

В процессе работы необходимо соблюдать общие правила техники безопасности при работе с электроустановками напряжением до 1000 В.

Шпиндель подвижной системы должен быть заарретирован при отсутствии в блоке испытуемого образца от арретира при установленном образце.

2.2. Домашние задания и методические указания по их выполнению

2.2.1. Задание № 1

Изучить виды напряжений и деформаций, закон Гука и нормальные колебания в твёрдых телах. В заготовку отчёта занести сведения о скорости распространения и коэффициенте поглощения упругих волн.

2.2.1.1. Методические указания по выполнению первого задания

Для выполнения задания необходимо ознакомиться с материалом [3], с. 97-127, [1], с. 148-200.

Деформацией называют изменение размеров и форм тела под действием приложенных усилий. Деформация может вызываться приложенными внешними

ми силами или различными физико-механическими процессами, возникающими в материалах вследствие температурного градиента или изменения объёма кристаллов при фазовых превращениях.

Для оценки действия внешних сил, не зависящих от размеров деформируемого тела вводится понятие напряжения, которое численно равно отношению силы P к площади поперечного сечения F ($\sigma = P/F, Н/м^2$). В каждом элементе сечения различают нормальные напряжения σ , действующие перпендикулярно плоскости, и касательные τ (лежащие в самой плоскости), действующие вдоль направления плоскости (рис. 5).

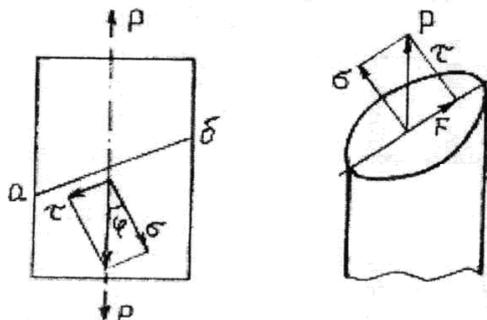


Рис. 5. Схема распределения нормальных и касательных напряжений в материале

Различают временные напряжения, обусловленные действием внешней силы, которые исчезают после снятия нагрузки и внутренние остаточные напряжения, возникающие в пределах тела без приложения внешней нагрузки. Образование внутренних остаточных напряжений связано в основном с неоднородным распределением деформаций по объёму тела они часто возникают при быстром нагреве или охлаждении материала вследствие неодинакового расширения или сжатия наружных или сжатия наружных и внутренних слоев (тепловых напряжения). Кроме того, остаточные напряжения возникают в процессе кристаллизации, при неравномерной деформации, при термической обработке из-за неоднородного протекания фазовых превращений. Эти остаточные напряжения называют фазовыми, или структурными.

Деформации, вызываемые нагрузками, могут быть трёх типов:

1) упругая деформация — обратимая, исчезающая после снятия нагрузки;
 2) пластическая деформация — необратимая, остающаяся после снятия нагрузки;

3) деформация разрушения — нарушение сплошности материала вследствие появления трещин или разделения его на отдельные части

При упругой деформации частицы (атомы) незначительно смещаются из положения равновесия под действием внешних сил. Эти смещения, нарушающие равновесное состояние атомов в кристаллической решётке, приводят к возникновению внутренних сил притяжения, стремящихся вернуть частицы в первоначальное положение равновесия. После снятия нагрузки атомы возвращаются в первоначальное положение равновесия (на дно своих потен-

циальных ямок). Сила, стремящаяся вернуть атомы в первоначальное положение, приближённо пропорциональна деформации ε

$$P = -\alpha \cdot \varepsilon, \quad (24)$$

где α — коэффициент пропорциональности. Умножая на число атомов NS находящихся на единице площадки поперечного сечения образца, получаем выражение, связывающее напряжение с деформацией

$$\sigma = NS \cdot \alpha \cdot \varepsilon = E \cdot \varepsilon, \quad (25)$$

или

$$\varepsilon = 1 / E \cdot \sigma = \kappa \cdot \sigma,$$

где E — модуль упругости;

κ — коэффициент, равный обратной величине модуля упругости и называется упругой податливостью;

S — площадь поперечного сечения образца.

Соотношение 2 выражает закон Гука, согласно которому небольшие смещения частиц тела при упругой деформации пропорциональны действующим напряжениям. Модуль упругости E характеризует жёсткость материала - его сопротивление упругим деформациям. Чем выше модуль упругости, тем меньше упругая деформация при данном напряжении. Значение модуля упругости определяется силами межатомного взаимодействия и является константой материала. Чем больше Энергия связи и чем круче кривая атомного взаимодействия, тем выше E . Большое значение E наблюдается у тугоплавких материалов и малое значение — у органических материалов молекулярной структуры. Например, модуль упругости для алюминия — $70 \cdot 10^3$ МПа, для меди — $130 \cdot 10^3$ МПа, для железа - $200 \cdot 10^3$ МПа. Наиболее жёстким является алмаз ($E = 1200 \cdot 10^3$ МПа), а наименее жёстким — резина ($E = 0,007 \cdot 10^3$ МПа). Эта характеристика материала является структурно нечувствительной, т.е. термическая обработка или другие способы изменения структуры материала практически не меняют модуль упругости.

При наличии касательных напряжений τ закон Гука имеет следующий вид:

$$\tau = G \cdot \gamma, \quad (26)$$

где γ — относительная деформация сдвига.

Модуль сдвига связан с модулем упругости следующим соотношением

$$G = E / 2 \cdot (1 + \mu), \quad (27)$$

где μ — коэффициент Пуассона.

Коэффициент Пуассона для различных материалов находится в пределах $0,2 - 0,5$. Для большинства реальных тел $\mu = 0,3$, а для тел, объём которых не изменяется при деформации, $\mu = 0,5$.

При непрерывном увеличении внешней нагрузки непрерывно растут напряжение σ и деформация ε (рис. 6). При некотором напряжении σ_s , характерном для каждого материала, наблюдается или разрушение образца, или нарушение прямой пропорциональности между σ и ε и возникновение остаточной (пластической) деформации $\varepsilon_{ост}$, не исчезающей после снятия внешней нагрузки. В первом случае материал является хрупким, во втором — пластичным. Напряжение σ_s , при котором начинается заметное течение тела, называется пределом текучести; области OA и AB — соответственно областями упругой и пластической деформации (в области OA выполняется закон Гука).

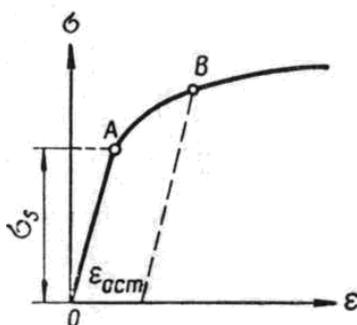


Рис. 6. Диаграмма напряжение – деформация для твёрдого тела

В хрупких материалах предел упругости совпадает с пределом прочности, поэтому они разрушаются без видимой пластической деформации. В пластичных же металлах предел упругости и текучести, как правило, значительно меньше предела прочности. Поэтому разрушение таких материалов происходит после значительной пластической деформации.

Атомы твёрдых тел совершают тепловые колебания около положения равновесия. Вследствие их сильного взаимодействия между собой, колебание, возникающее у одной частицы, немедленно передаётся соседним, и в веществе возбуждается коллективное движение в форме упругой волны, охватывающей все частицы твёрдого тела. Такое коллективное движение называется нормальным колебанием структуры. Если соседние атомы колеблются в одной фазе, то такие колебания называются акустическими, если в противофазе — оптически. Акустические колебания бывают двух видов: продольные и сдвиговые.

Одним из наиболее простых и надёжных способов определения модулей упругости твёрдых тел является их расчет из экспериментальных данных по измерению скорости звука.

Упругие волны в твёрдых телах затухают; наблюдается отчетливо выраженная частотная зависимость (дисперсия) скорости звука. Выражение для смещения частиц в случае волны растяжения, распространяющейся в направлении оси x , можно представить в виде

$$u = u_0 e^{i\omega t - k \cdot x}, \quad (28)$$

где u_0 — амплитуда смещения;
 t — время;
 k — комплексное волновое число.

$$k = \alpha + i \cdot \beta = \alpha + i \cdot \frac{\omega}{c}, \quad (29)$$

где α — коэффициент поглощения;
 c — скорость упругой волны ($c = f \cdot \lambda$, где λ — длина волны).

В твердых телах могут распространяться несколько типов волн.

В неограниченной среде, т. е. в случае, когда длина волны λ меньше поперечных размеров тела ($\lambda \ll d$), скорость чисто продольной волны при условии, что затухание достаточно мало, выражается формулой

$$c_l = \sqrt{\frac{K'_s + 4/3 \cdot G'}{\rho}}, \quad (30)$$

где K'_s — динамический модуль всестороннего сжатия;
 G' — динамический модуль сдвига.

Выражение для скорости продольной волны в неограниченной среде может быть записано и в другой форме:

$$c_l = \sqrt{\frac{E'}{\rho} \cdot \frac{(1 - \mu')}{(1 + \mu') \cdot (1 - 2 \cdot \mu')}}}, \quad (31)$$

где E' — динамический модуль Юнга;
 ρ — плотность среды, в которой распространяется волна;
 μ' — динамический коэффициент Пуассона.

В том случае, когда волны распространяются в тонких стержнях (полимерные волокна, узкие полоски из пленки), т. е. если $\lambda \gg d$ (где d — поперечный размер тела)

$$c_e = \sqrt{\frac{E'}{\rho}}. \quad (32)$$

Скорость сдвиговых волн, в которых колебания происходят в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны, может быть представлена в виде

$$c_t = \sqrt{\frac{G'}{\rho}}, \quad (33)$$

где G' — динамический модуль сдвига.

В этом случае модули упругости и коэффициент Пуассона определяются по формулам:

$$E' = \rho \cdot c_e^2, \quad (34)$$

$$G' = \rho \cdot c_t^2, \quad (35)$$

$$\mu' = \frac{1}{2} \cdot \frac{E' - 2 \cdot G'}{E' - G'}. \quad (36)$$

Следует заметить, что формулы (34) и (35) являются приближенными и справедливы лишь в том случае, когда $\alpha \cdot \lambda / (2\pi) \ll 1$, т. е. когда затухание, приходящееся на одну длину волны, мало. В общем случае связь между скоростью распространения c , поглощением звуковых волн и модулями упругости определяется следующими формулами:

$$E' = \frac{\rho \cdot c_e^2 \left[1 - \left(\frac{\alpha \cdot \lambda}{2 \cdot \pi} \right)^2 \right]}{\left[1 + \left(\frac{\alpha \cdot \lambda}{2 \cdot \pi} \right)^2 \right]^2}, \quad (37)$$

$$G' = \frac{\rho \cdot c_t^2 \left[1 - \left(\frac{\alpha \cdot \lambda}{2 \cdot \pi} \right)^2 \right]}{\left[1 + \left(\frac{\alpha \cdot \lambda}{2 \cdot \pi} \right)^2 \right]^2}. \quad (38)$$

Из выражений (28) и (29) следует, что амплитуда колебаний частиц в распространяющейся волне уменьшается с расстоянием по экспоненциальному закону:

$$u = u_0 e^{-\alpha \cdot x} \quad (39)$$

Если в плоской звуковой волне известны значения u_1 и u_2 в точках с координатами x_1 и x_2 , то коэффициент затухания равен

$$\alpha = \frac{1}{x_2 - x_1} \cdot \ln \frac{u_1}{u_2}. \quad (40)$$

Коэффициент затухания имеет размерность $см^{-1}$, иногда его выражают в *непер/см*. Так как 1 *непер* представляет собой отношение двух величин, имеющих одну и ту же размерность и отличающихся в $e = 2,71$ раза; то $1/\alpha$ показывает дли-

ну акустического пути, на котором амплитуда затухает в e раз. Иногда коэффициент затухания измеряют в *децибелах на см (дб/см)*, $1 \text{ непер/см} = 8,686 \text{ дб/см}$.

Скорость распространения объемных акустических волн в твердом теле на много порядков меньше скорости распространения электромагнитных волн (например, для стали $c_l = 5,1 \cdot 10^3 \text{ м/с}$, $c_t = 3,2 \cdot 10^3 \text{ м/с}$). Это позволяет использовать акустические колебания, возникающие в твердых телах, в различных радиоэлектронных устройствах, прежде всего - в акустических линиях задержки и пьезофильтрах на поверхностных и объемных акустических волнах.

2.2.2. Задание № 2

Изучить физические основы пьезоэлектрического эффекта, ознакомиться с материалами, обладающими пьезоэлектрическими свойствами и областями практического применения эффекта.

2.2.2.1. Методические указания по выполнению второго задания

Для выполнения задания следует проработать материал [2], с.141-165/.

Обратить внимание на то, что к пьезоэлектрикам относят диэлектрики, которые обладают сильно выраженным пьезоэлектрическим эффектом.

Прямым пьезоэлектрическим эффектом называют явление поляризации диэлектрика под действием механических напряжений. Возникающий на каждой из поверхностей диэлектрика электрический заряд прямо пропорционален приложенному механическому напряжению:

$$q_s = P = d \cdot \sigma, \quad (41)$$

где q_s — заряд, который приходится на единицу площади:

P — поляризованность;

d — пьезомодуль;

σ — механическое напряжение в сечении диэлектрика.

Таким образом, пьезомодуль d численно равен заряду, возникающему на единице поверхности пьезоэлектрика при приложении к нему единицы давления. Значение пьезомодуля используемого в практике пьезоэлектриков составляет около 10^{-10} Кл/н.

Пьезоэлектрический эффект обратим. При обратном пьезоэлектрическом эффекте происходит изменение размеров диэлектрика $\Delta l / l$ в зависимости от напряженности электрического поля E :

$$\Delta l / l = \varepsilon = dE, \quad (42)$$

где ε — относительная деформация.

Пьезомодули d прямого и обратного пьезоэффектов для одного и того же материала равны между собой. Если к такому пьезоэлектрику приложить пере-

менное электрическое напряжение, то в нем, благодаря обратному пьезоэффекту, будут возникать механические колебания с частотой приложенного напряжения. Эффективность преобразования электрической энергии пьезоэлектрика в механическую определяется коэффициентом электромеханической связи

$$K = \sqrt{P_a / P_э}, \quad (43)$$

где $P_э$ — электрическая мощность;

P_a — мощность механических колебаний, развиваемая пьезоэлектриком.

Коэффициент электромеханической связи зависит от вида пьезоэлектрика и колеблется в пределах 0,01-0,3.

Пьезоэлектрический эффект анизотропен, т.е. по-разному проявляется в различных направлениях. Если поляризация возникает в том же направлении, что и деформирующие механические усилия, то пьезоэффект окажется продольным, а если поперёк, то — поперечным.

Таким образом, пьезоэлектрики являются электромеханическими преобразователями, преобразующими механическую энергию в электрическую и наоборот, в соответствии с методом электромеханических замещений электрическим аналогом массы m является индуктивность L_M , электрическим аналогом гибкости C (или упругости $S = 1/C$) является емкость C_M (или $1/C_M$). Коэффициенту механических потерь r соответствует электрическое активное сопротивление R . С учетом этого эквивалентная электрическая схема пьезоэлектрика вблизи резонанса имеет вид, представленный на рис. 7.

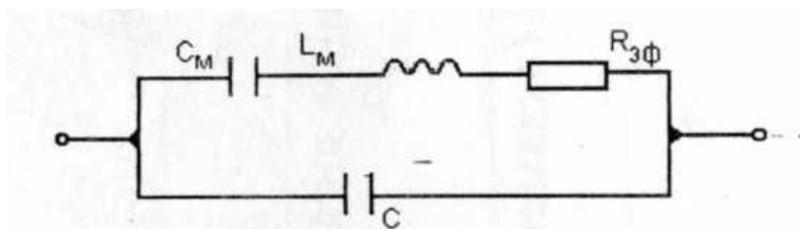


Рис. 7. Эквивалентная схема пьезоэлектрика:

C_M — механическая емкость; L_M — механическая индуктивность;
 $R_{эф}$ — эффективное сопротивление; C — статическая междуэлектродная емкость

На рис. 8 представлено схематическое изображение пьезоэлемента, изготовленного на основе пьезоэлектрика.

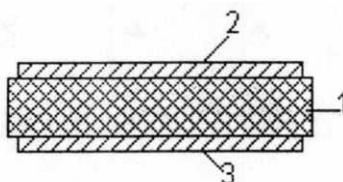


Рис. 8. Внешний вид пьезоэлемента: 1) пьезоэлектрик; 2), 3) электроды

Известно более тысячи веществ, обладающих пьезоэлектрическими свойствами, в том числе — все сегнетоэлектрики. Среди них одно из важных мест занимает монокристаллический кварц SiO_2 . Плоскопараллельная полированная кварцевая пластинка с электродами и держателем представляет собой пьезоэлектрический резонатор, т.е. является колебательным контуром с определенной резонансной частотой колебаний. Преимуществами кварцевых резонаторов являются малый $\text{tg}\delta$ и высокая механическая добротность (до $10^6 - 10^7$). Благодаря высокой добротности кварцевые резонаторы используются в качестве фильтров с высокой избирательной способностью, а также для стабилизации и эталонирования частоты генераторов.

Помимо кварца в различных пьезопреобразователях применяют кристаллы сульфата лития $\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, сегнетовой соли, дигидрофосфата аммония NH_4PO_4 , а также ниобат лития LiNbO_3 и танталат лития LiTaO_3 . Последние составляют значительную конкуренцию кварцу, превосходя его по добротности в диапазоне высоких и сверхвысоких частот. Сегнетоэлектрики на основе ниобата и танталата лития находят применение в качестве электрических фильтров на поверхностных акустических волнах, а также в качестве ячеек для модуляции и отклонения луча лазера.

Наиболее широкое применение в качестве пьезоэлектрического материала находит сегнетоэлектрическая керамика, поляризованная в сильном электрическом поле при температуре близкой к точке Кюри. Пьезокерамика по сравнению с монокристаллами обладает тем преимуществом, что из нее можно изготовить активный элемент практически любого размера и любой формы. Основным материалом для изготовления пьезокерамических элементов являются твердые растворы PbZrO_3 PbTiO_3 (цирконат – титанат свинца или ЦТС). Пьезокерамику широко используют в качестве пьезопреобразователей для объемных ультразвуковых линий задержки, пьезотрансформаторов высокого напряжения, мощных ультразвуковых излучателей для целей гидроакустики, дефектоскопии, механической обработки материалов. Пьезокерамические датчики применяют в качестве датчиков давлений, деформаций, вибраций.

Все более широкое применение находят пленочные пьезоэлектрики, которые получают на основе монокристаллических соединений AlN , ZnS , CdS , CdSe и окиси цинка ZnO определенной кристаллографической ориентацией. Пьезоэлектрическими свойствами обладают также некоторые полимерные материалы в виде механически ориентированных и поляризованных в электрическом поле пленок.

В зависимости от среза пластины пьезоэлектрика (ориентации монокристалла пьезоэлектрика при вырезании пластин) под действием электрического поля в них могут возбуждаться продольные или сдвиговые колебания. В соответствии с этим преобразователи делятся на сдвиговые и продольные. Толщина пластин пьезоэлектриков (h) выбирается из соображений эффективности и обычно определяется из выражения:

$$h = c_{l,t} / f .$$

где $c_{l,t}$ – скорость продольной или сдвиговой волны в кристалле;

f — требуемая частота механических колебаний.

Для возбуждения и приема продольных и сдвиговых волн преобразователи припаивают к поверхности образца, на которую предварительно наносят слой меди или серебра.

2.3. Вопросы к домашнему заданию

1. Сформулируйте закон Гука.
2. Какими упругими модулями характеризуются изотропные твердые тела?
3. Какие колебания называют нормальными? Их виды.
4. Какие типы волн могут распространяться в твёрдых телах?
5. Как связаны упругие модули со скоростями звука в твёрдом теле?
6. Чему равен коэффициент затухания упругих волн?
7. Сформулируйте прямой и обратный пьезоэлектрические эффекты.
8. Объясните физику возникновения пьезоэлектрического эффекта.
9. Какие величины характеризуют пьезоэлектрические свойства материала?
10. Нарисуйте и объясните эквивалентную схему пьезоэлектрического преобразователя.
11. Какие материалы обладают пьезоэффектом?
12. Где используются пьезоэлектрики? Приведите примеры.

2.4. Лабораторные задания и методические указания по их выполнению

2.4.1. Задание № 1

По прилагаемому описанию познакомиться с устройством и работой осциллографа С1-79 и измерителя временных интервалов И2-22.

2.4.2. Задание № 2

Определить скорости продольной и сдвиговой волн в стекле К-8. Рассчитать модули Юнга, сдвига и коэффициента Пуассона этого стекла.

Для определения скорости продольной и сдвиговой волн необходимо собрать схему по рис. 9 двухкаскадного импульсного генератора Г5-27А импульс первого канала поступает на пьезопреобразователь. Упругая волна, излучаемая преобразователем, после прохождения через стекло принимается на другой стороне образца вторым преобразователем (приемником) и поступает на один канал осциллографа С1-79. Со второго канала генератора на осциллограф поступает импульс сравнения, который, как и первый, визуально наблюдается на осциллографе. Изменяя ступенчато и плавно задержку импульса сравнения, на экране осциллографа можно совместить его с прошедшим через образец импульсом, и по показаниям лимбов ступенчатой и плавной задержки определить время распространения в образце ультразвукового сигнала (время задержки) τ .

В зависимости от того, какой поляризации используются преобразователи, это будет время распространения продольной τ_l или сдвиговой τ_t волны в образце.

Зная длину образца ($L_l = 48\text{мм}$, $L_t = 47\text{мм}$), легко рассчитать скорость продольной и сдвиговой волны

$$c_l = \frac{L_l}{\tau_l} \quad c_t = \frac{L_t}{\tau_t}. \quad (44)$$

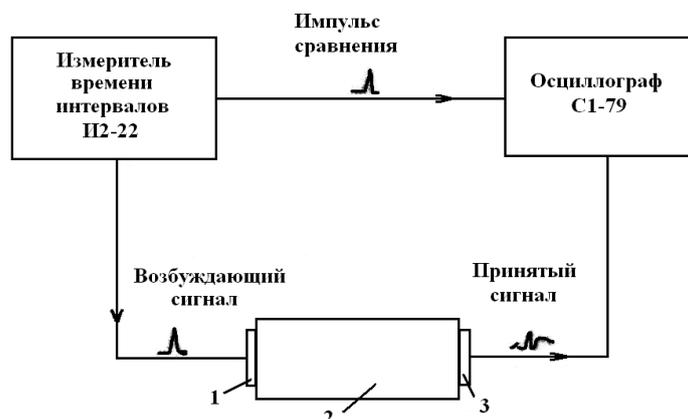


Рис. 9. Схема установки для измерения скорости объемных волн (1 — излучатель, 2 — исследуемый образец, 3 — приемник)

Зная плотность стекла ($\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$), по формулам (34) – (36) рассчитать модуль Юнга, сдвига и коэффициент Пуассона.

2.4.3. Задание № 3

Определить коэффициент поглощения продольной α_l и сдвиговой α_t волны в стекле.

Коэффициент поглощения ультразвука обычно выражается в децибелах на сантиметр (дБ/см) и рассчитывается по выражению

$$\alpha = \frac{20}{L_2 - L_1} \lg \frac{U_1}{U_2},$$

где U_1 — амплитуда волны после прохождения в среде пути L_1 ;

U_2 — амплитуда волны после прохождения пути L_2 .

Амплитуда U_1 определяется по осциллографу по первому принятому сигналу; амплитуда U_2 — по величине сигнала, испытавшего отражение в образце, т.е. прошедшего путь $L_2 = 3L_1$, Амплитуда импульсов определяется визуально на сетке осциллографа по размаху колебаний.

2.4.4. Задание № 4

Снять температурную зависимость времени задержки распространения продольной волны в стекле в диапазоне температур 20 – 80 °С

Рассчитать температурный коэффициент скорости распространения продольной волны (TKC_l).

Для измерения температурной зависимости подключить измерительную схему к образцу, находящемуся в термошкафу. Включить термошкаф и измерить задержку через 20 градусов до 80 °С. Построить график зависимости C_l от температуры (длина образца в термошкафу 101 мм)

Определить TKZ_l в диапазоне 20 – 80 °С по формуле

$$TKZ_l = \frac{\tau_{l2} - \tau_{l1}}{\tau_{l1}(T_2 - T_1)},$$

где τ_{l1} и τ_{l2} — время задержки при температурах 20 °С и 80 °С соответственно (T_1 и T_2)

Вывести формулу для расчета температурного коэффициента скорости продольной волны (TKC_l) через известные значения TKZ_l и коэффициента термического расширения стекла α ($\alpha = 7 \cdot 10^{-5} K^{-1}$) (температурный коэффициент величины X равен $\Delta X / X \Delta T$).

Рассчитать величину TKC_l по полученной формуле.

2.5. Указания по оформлению отчёта

Отчет оформляется в виде пояснительной записки на листах формата А4. Необходимо дома подготовить заготовку отчета по данной лабораторной работе. Заготовка отчета должна содержать наименование лабораторной работы, цель и краткое содержание работы, все пункты лабораторных заданий и свободные места для выполнения.

Отчет должен содержать виды материалов, которые должны исследоваться студентом, практическое выполнение лабораторной работы и графики зависимости исследуемых параметров от частоты и температуры. В конце отчета необходимо сделать выводы по результатам работы. В выводах должно быть дано объяснение величин ϵ и $\text{tg}\delta$ в исследуемых материалах в зависимости от их структуры, а также изменение их частотной и температурной зависимостей. Рисунки и графики необходимо выполнять на отдельных листах формата А4, на которых, если позволяет место, может быть размещено несколько рисунков.

2.6. Контрольные вопросы к лабораторным заданиям

1. Охарактеризовать распространение объемных волн в изотропных твердых телах.
2. Расскажите о методах возбуждения и регистрации объемных акустических волн в твердых телах.
3. Опишите методику измерения скорости объемных волн.
4. Охарактеризуйте методику измерения поглощения ультразвука в твердых телах.
5. Приведите схему лабораторной установки, расскажите о порядке работы с приборами, входящими в её состав.
6. Как измеряется температурный коэффициент задержки?
7. Как связаны $TKЗ$ и $TKС$?
8. Какие параметры твёрдого тела характеризуют упругие модули?
9. Сравните полученные значения модулей Юнга и сдвига, исследованных стёкол с аналогичными параметрами алмаза, металлов и эластомеров. Чем обусловлена столь значительная разница этих параметров?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павлов П. В. Физика твёрдого тела: учебник / П. В. Павлов, А. Ф. Хохлов. — 3-е изд., стер. — М.: Высш.шк., 2000. — 494 с.
2. Чернышов А. В. Радиоматериалы. Ч. 1: Органические и неорганические диэлектрические материалы: учебное пособие / А. В. Чернышов. — Воронеж: ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2007. — 187 с.
3. Чернышов А. В. Материаловедение в РЭС: учебное пособие / А. В. Чернышов. — Воронеж: ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2009. — 150 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО РАСШИРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ И ТЕРМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В СПЯЯХ МЕТАЛЛ-СТЕКЛО	3
1.1. Общие указания.....	3
1.1.1. Цель работы.....	3
1.1.2. Содержание работы.....	3
1.1.3. Указания по технике безопасности.....	3
1.2. Домашние задания и методические указания по их выполнению	3
1.2.1. Задание № 1.....	3
1.2.2. Задание № 2.....	11
1.3. Вопросы к домашнему заданию.....	14
1.4. Лабораторные задания и методические указания по их выполнению	15
1.4.1. Задание № 1.....	15
1.4.2. Задание № 2.....	15
1.4.3. Задание № 3.....	16
1.5. Указания по оформлению отчёта.....	16
1.6. Контрольные вопросы к лабораторным заданиям.....	17
2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН В ТВЁРДЫХ ТЕЛАХ	18
2.1. Общие указания по выполнению работы.....	18
2.1.1. Цель работы.....	18
2.1.2. Содержание работы.....	18
2.1.3. Указания по технике безопасности.....	18
2.2. Домашние задания и методические указания по их выполнению	18
2.2.1. Задание № 1.....	18
2.2.2. Задание № 2.....	24
2.3. Вопросы к домашнему заданию.....	27
2.4. Лабораторные задания и методические указания по их выполнению	27
2.4.1. Задание № 1.....	27
2.4.2. Задание № 2.....	27
2.4.3. Задание № 3.....	28
2.4.4. Задание № 4.....	29
2.5. Указания по оформлению отчёта.....	29
2.6. Контрольные вопросы к лабораторным заданиям.....	30
Библиографический список	31

РАДИОМАТЕРИАЛЫ И РАДИОКОМПОНЕНТЫ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению лабораторных работ № 1-2
для студентов специальности 11.05.01
«Радиоэлектронные системы и комплексы»
очной формы обучения

Составитель
Бадаев Андрей Станиславович

Издается в авторской редакции

Подписано к изданию 30.05.2024.
Уч.-изд. л. 1,7.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84