

5. По разности сигналов на входе и выходе определить ослабление сигнала в пластине кварца на различных частотах.

### 1. Зависимость амплитуды сигнала от частоты

Частота $F$ , КГц								
Амплитуда $U$ , В								

6. Определить время задержки сигнала по смещению  $h$  полуволн сигнала на экране осциллографа:  $\tau = hn$ , где  $n$  – коэффициент развертки, ms/дел.

7. Рассчитать скорости движения акустических волн в пластине кварца:  $V = \frac{l}{\tau}$ , где  $l$  – расстояние между электродами входного и выходного преобразователей.

### Содержание отчета

1. Рисунок лабораторной установки с пояснениями к принципу ее работы.
2. Заполненная таблица зависимости амплитуды от частоты с отмеченной резонансной частотой.
3. График зависимости амплитуды от частоты.
4. Расчетные данные ослабления сигнала и скорости распространения акустических колебаний в пластине кварца.

### Контрольные вопросы

1. Структура кристаллов кварца и их электромеханические свойства.
2. Принцип работы кварцевого резонатора.
3. Применение кварцевых резонаторов.
4. От каких параметров зависит резонансная частота?
5. Принцип работы установки для определения АЧХ.

Литература: [6].

## Лабораторная работа 8

### СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА ОКСИДНЫХ ТЕРМОРЕЗИСТОРОВ

*Цель работы:* изучить структуру оксидных терморезисторов и зависимость их электропроводности от температуры.

*Приборы и принадлежности:* мост постоянного тока Ш-34, печь нагревательная, потенциометр КВП, термопара, терморезисторы ММТ-1, СТ 4-15, КМТ-1.

### Методические указания

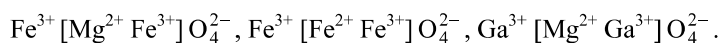
Понятие "термистор" относится к материалам, проводимость которых при нагреве сильно изменяется. Различают материалы, в которых с ростом температуры сопротивление падает – терморезисторы с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), и позисторы, в которых до определенной температуры оно растет.

Удельное электрическое сопротивление терморезисторов уменьшается с ростом температуры как в классических полупроводниках, что описывается уравнением  $\rho(T) = A \exp\left(\frac{B}{T}\right)$ , где  $B < 0$  – коэффициент температурной чувствительности, определяющийся энергией активации процесса электропроводности,  $A$  – коэффициент, зависящий от технологии их изготовления.

Наряду с легированным германием, кремнием, полупроводниковыми стеклами, подавляющее число терморезисторов изготавливается во всех странах на основе оксидов переходных металлов, состав которых описывается формулой  $XY_2Z_4$ , где  $X$  – чаще всего ион двухвалентного металла ( $Zn^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ),  $Y$  – трехвалентный металл ( $Al^{3+}$ ,  $Mn^{3+}$ ,  $Cr^{3+}$ ), а  $Z$  – анион  $O^{2-}$ .

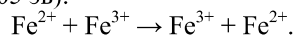
Элементарная ячейка шпинели состоит из 8-ми формульных единиц, то есть  $X_8Y_{16}O^{32}$ . В состав ячейки входят 32 кислородных иона, образующих ГЦК-подрешетку, в порах которой располагаются катионы. В ГЦК решетке существует два вида пустот – октаэдрические (32 в элементарной ячейке шпинели) и тетраэдрические (64 поры). В прямых шпинелях в тетра-порах располагаются двухвалентные катионы  $X$  (занято 8 из 64 позиций), а 16 из 32 окто-пор занимают трехвалентные катионы  $Y$ . Формула прямой шпинели –  $XY_2O_4$  (или  $X[Y_2]O_4$ ), где скобки [ ] показывают окто-пору. Например:  $Zn^{2+} [Al^{3+} Al^{3+}] O_4^{2-}$ ,  $Co^{2+} [Al_2^{3+}] O_4^{2-}$ ,  $Mn^{2+} [Al_2^{3+}] O_4^{2-}$ .

В шпинелях другого типа в окта-порах часть позиций занята двухвалентным металлом. Такие шпинели называют обратными и записывают в виде  $Y[XY]O_4$ . Примером обратных шпинелей являются:

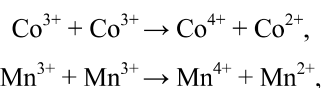


Электропроводность оксидных полупроводников нельзя объяснить с точки зрения зонной теории, используемой для классических полупроводников (германий, кремний и др.) В оксидных материалах действует ионная связь, в которой электроны локализованы на отдельных атомах (ионах). Процесс электропроводности состоит в перескакивании электронов от одного катиона к другому (прыжковый механизм).

Несмотря на то, что такие металлы как Fe, Mn, Co, Ni расположены в периодической системе рядом, электропроводность их оксидов  $\sigma$  сильно отличается. Так, для  $Fe_3O_4$  при 20 °C значения  $\sigma$  составляет  $200 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ ,  $Co_3O_4$  –  $10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ ,  $Mn_3O_4$  –  $10^{-10} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ , а для стехиометрической закиси никеля NiO достигает  $10^{-14} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ . Разница в проводимости  $Fe_3O_4$  и  $Mn_3O_4$  связывается с характером распределения катионов по окта- и тетра-кристаллографическим позициям. В окиси железа  $Fe^{+3} [Fe^{2+} Fe^{3+}] O_4^{2-}$  в октаэдрических позициях располагаются разновалентные катионы железа, электронный обмен между которыми облегчен и протекает с незначительной энергией активации ( $\Delta E = 0,05 \text{ эВ}$ ):



В оксидах типа  $Co^{2+} [Co^{3+}] O_4^{2-}$  и  $Mn^{2+} [Mn^{3+}] O_4^{2-}$  между одноименными катионами окта-пор электронный обмен затруднен и сопровождается значительно большей энергией активизации:



поэтому для них характерно большое сопротивление и малое значение ТКС.

Свойства терморезисторов можно описать рядом характеристик:

- номинальное сопротивление  $R_N$  при номинальной рабочей температуре  $T_N$ ;
- температурная характеристика;
- вольтамперная характеристика;
- термическая постоянная времени;
- переходный процесс нагрева термистора;
- технологический разброс характеристик сопротивления, временная стабильность.

Описываемая уравнением  $R(T) = A \exp\left(\frac{B}{T}\right)$  температурная характеристика согласуется с измерениями

тем точнее, чем меньше их диапазон, что связано с температурной зависимостью коэффициента  $A$ . Для более широких диапазонов температуры  $T$  часто необходимо более точное аналитическое выражение. При этом целесообразно принять для коэффициента  $B$  линейную или квадратичную зависимость:

$$B(T) = B_a [1 + b (T - T_a)]$$

$$B(T) = B_a [1 - b (T - T_a) + c (T - T_a)^2]. \quad (2).$$

Здесь  $B_a$  – значение коэффициента  $B$  для рабочей температуры  $T_a$ ,  $b$  и  $c$  – коэффициенты.

В заводской практике удобно выразить эту величину в виде:

$$B_a = B_N [1 + b (T_a - T_N)] = \frac{T_a T_N}{T_a - T_N} \ln \frac{R_a}{R_N},$$

где  $B_N$  соответствует номинальной рабочей точке. Из уравнения  $R(T) = R_N \exp \left[ B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_N} \right) \right]$  можно опреде-

лить  $R(T)$ -характеристику:  $dR(T) / dT = -BR(T) / T^2$ . Откуда с учетом выражения для температурного коэффициента сопротивления:  $\alpha(T) = \frac{1}{R(T)} \frac{dR(T)}{dT}$  получаем  $\alpha = -B / T^2$ .

Температурный коэффициент также зависит от температуры и определяется конкретным значением коэффициента температурной чувствительности  $B$ , соответствующего выбранному материалу.

### Порядок выполнения работы

1. Выданные преподавателем терморезисторы (один – системы  $\text{NiMn}_2\text{O}_4$ , другой –  $\text{CuMn}_2\text{O}$ ) установить в зажимы электроконтактного устройства для измерения электросопротивления и поместить их в масляную ванну-термостат нагревательной печи (рис. 1).
2. Включить потенциометр КВП и измерить начальную температуру образцов после одной минуты выдержки в термостате.
3. Включить мост ШЦ-34 и измерить начальное сопротивление обоих терморезисторов, переключая цепь измерения с помощью ключа 5.
4. Включить питание электропечи 3.
5. Снять зависимость сопротивления терморезисторов от температуры в диапазоне  $20 \dots 100$  °С с шагом температуры  $10$  °С.

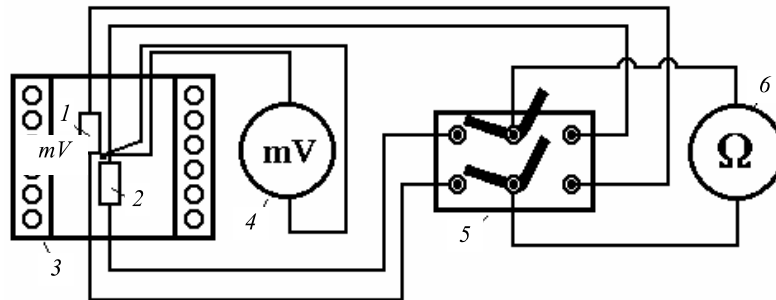


Рис. 1. Схема установки для изучения электропроводности терморезисторов:  
1, 2 – образцы; 3 – печь; 4 – потенциометр; 5 – ключ; 6 – омметр

6. Определить номинальное электросопротивление  $R_N$ , коэффициент температурной чувствительности  $B$ , температурный коэффициент сопротивления  $\alpha$  и энергию активации процесса электропроводности  $\Delta E = Bk$ , где  $k$  – постоянная Больцмана ( $k = 8,62 \cdot 10^{-5}$  эв/град).

### Содержание отчета

1. График температурной характеристики терморезисторов  $R = f(T)$ , расчет значений  $\alpha$ ,  $R_N$ ,  $B$ ,  $\Delta E$ .
2. Сравнить значения  $\Delta E$  с литературными и сделать вывод о механизме электропроводности в каждом терморезисторе.

### Контрольные вопросы

1. Структура и механизм электропроводности оксидных терморезисторов.
2. Рабочие характеристики оксидных терморезисторов.
3. Требования, предъявляемые к электрофизическим и физико-химическим свойствам терморезисторов.
4. Рабочие параметры температурной характеристики терморезистора, их физический смысл.

Литература: [7].