

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Промышленная электроника»

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ**
В трех частях
Часть 3

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
по одноименному курсу
для студентов специальности 1-36 04 02
«Промышленная электроника»
дневной формы обучения**

Гомель 2006

УДК 621.384(075.8)
ББК 32.85я73
Ф51

*Рекомендовано научно-методическим советом
факультета автоматизированных и информационных систем
ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 1 от 12.09.2005 г.)*

Авторы-составители: Б. А. Верига, О. В. Гуреева

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, доц., зав. каф. «Физика» ГГТУ им. П. О. Сухого П. А. Хило

Физические основы электронной техники. В 3 ч. Ч. 3 : лаб. практикум по одному курсу для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника» днев. формы обучения / авт.-сост.: Б. А. Верига, О. В. Гуреева. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2006. – 17 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://gstu.local/lib>. – Загл. с титул. экрана.

Лабораторный практикум состоит из двух работ «Исследование поверхностных эффектов в металлах и полупроводниках» и «Исследование сегнетоэлектриков». Содержит достаточный теоретический материал, способствующий пониманию физических основ и принципов действия элементов электронной техники – МДП-элементов, сегнето- и пьезоэлектриков. Является продолжением изданий, вышедших в 2004 (ч. I) и 2006 (ч. II) годах.

Для студентов специальности «Промышленная электроника».

УДК 621.384(075.8)
ББК 32.85я73

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2006

Лабораторная работа № 7

Исследование поверхностных эффектов в металлах и полупроводниках

Цель работы: изучить явление скин-эффекта для металлических проводников на основе экспериментального исследования импедансных параметров различных металлических проводников; изучить поверхностные явления в полупроводниках на основе исследования параметров МДП (МОП) структур.

1. Краткие теоретические сведения

1.1. Физико-математический аппарат описания явлений.

Основой для анализа рассматриваемых ниже явлений является система уравнений Максвелла – основной закон электродинамики. Поле электрическое \vec{E} , магнитное \vec{H} , плотность тока \vec{j} и плотность зарядов ρ взаимосвязаны посредством уравнений Максвелла:

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad (1)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (2)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad (4)$$

где $\vec{D} = \epsilon\epsilon_0\vec{E}$, $\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}$.

Дополнительно будем использовать уравнение непрерывности:

$$\operatorname{div} \vec{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

и параметры среды: σ – проводимость материала; l – длина свободного пробега электрона в среде.

1.2. Скин-эффект.

Скин-эффект (от англ. Skin – кожа, оболочка) – поверхностный эффект, затухание электромагнитных волн по мере их проникновения вглубь проводящей среды. В результате этого, например, переменный ток распределен по сечению проводника не равномерно, а преимущественно в поверхностном слое. Эффект обусловлен тем, что при распространении электромагнитной волны в соответствии с уравнением (4) возникают вихревые токи, которые в соответствии с законом Джоуля-Ленца, приводят

к выделению тепловой энергии, электромагнитная энергия поля падает и напряженность электрического и магнитного полей уменьшается.

В металлах токи проводимости существенно превышают токи смещения, которыми можно пренебречь:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j}.$$

Применим к этому уравнению операцию rot и учитывая, что $\vec{j} = \sigma \vec{E}$, получим:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{H} &= \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{H} - \Delta \vec{H} = \operatorname{rot} \vec{j} = \sigma \operatorname{rot} \vec{E} = -\sigma \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\sigma \mu \mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \\ \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} &= \frac{1}{\sigma \mu \mu_0} \Delta \vec{H}. \end{aligned} \quad (6)$$

Уравнение (6) является по сути вторым уравнением Фика для явления диффузии с коэффициентом $D = \frac{1}{\sigma \mu \mu_0}$. Известно, что все процессы диффузии могут быть описаны общим решением уравнения (6) [2]. В одномерном случае это решение имеет вид:

$$\frac{B(x)}{B(0)} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_U^{\infty} e^{-U^2} dU,$$

где $U = \sqrt{\frac{\sigma \mu \mu_0}{4}} \frac{x}{\sqrt{t}}$.

Для глубины проникновения δ_0 электромагнитного поля, определяемой как расстояние половинного затухания поля, можно примерно считать, что $\delta_0 = \sqrt{\frac{t_0}{\sigma \mu \mu_0}}$, где t_0 – время наблюдения. Для переменного тока t_0 – это половина периода $t_0 = \frac{T}{2} = \frac{1}{2f}$, f – частота изменения поля. Отсюда $\delta_0 = \sqrt{\frac{1}{\pi f \sigma \mu \mu_0}}$. Строгий расчет дает значение затухания на глубине δ_0 в $e \approx 2,72$ раза и поле затухает по закону

$$B(x) = B(0) e^{-\frac{x}{\delta_0}}.$$

Например, для меди ($\sigma = 5,8 \cdot 10^7$ Сим/м, $\mu = 1$) δ_0 на частоте $f = 50$ Гц равно 9,4 мм, а для стали ($\mu = 1000$, $\sigma = 1 \cdot 10^7$ Сим/м) $\delta_0 = 0,74$ мм. Если частоту увеличить до 0,5 МГц, то толщина скин-слоя уменьшается в 100 раз, т.е. ток протекает только в поверхностном очень тонком слое и сопротивление проводника на высоких частотах обратно пропорционально не площади сечения этого проводника, а периметру сечения l_c . На переменном токе сопротивление становится комплексным и может быть вычислено для проводника длиной 1 м по формуле:

$$Z = R + jX = \frac{\sqrt{j2\pi f\mu\mu_0}}{\sigma} \cdot \frac{1}{l_c}. \quad (7)$$

При сильном скин-эффекте

$$Z = \frac{1-j}{l_c \sigma \delta_0}. \quad (8)$$

Для идеального проводника ($\sigma \rightarrow \infty$) толщина скин-слоя $\delta_0 \rightarrow 0$, т.е. электромагнитная волна не проникает вглубь идеального проводника, ток течет только по поверхности.

Скин-эффект часто нежелателен. В проводах переменный ток при сильном скин-эффекте протекает не по всему сечению, сечение провода не используется полностью, сопротивление провода и потери мощности в нем при заданном общем токе возрастают. В ферромагнитных пластинах или лентах магнитопроводов трансформаторов, электрических машинах и других устройствах переменный магнитный поток проходит главным образом по их поверхностному слою; вследствие этого ухудшается использование сечения магнитопровода, возрастают намагничивающий поток и потери в стали. Необходимо уменьшать толщину пластин или лент, применять магнитопроводы из магнетодиэлектриков, имеющих низкую проводимость σ .

1.3. Поверхностные явления в полупроводниках.

У поверхности кристаллов возникают так называемые поверхностные энергетические состояния, изменяющие структуру энергетического спектра носителей заряда вблизи поверхности. Причинами этих нарушений являются: нарушение периодичности потенциала решетки кристалла вследствие ее обрыва у поверхности (появляются энергетические уровни Тамма); наличие некомпенсированных валентных связей у поверхностных атомов (уровни Шокли) и искажение потенциала решетки у поверхности, вызванное адсорбированными атомами и поверхностными дефектами структуры кристалла. У металлов вследствие высокой концентрации носителей зарядов ($n \approx 10^{28} \text{ м}^{-3}$) и очень большой концентрацией поверхностных уровней ($n_s \approx 10^{19} \text{ м}^{-2}$) толщина переходного слоя составляет величину порядка постоянной решетки и поверхностное явление можно не учитывать. Для полупроводников $n \approx 10^{21} \text{ м}^{-3}$; $n_s \approx 10^{15} \text{ м}^{-2}$ нейтрализация поверхностного заряда происходит в слое $10^{-4} - 10^{-3} \text{ см}$, что имеет существенное значение для физических свойств.

Если перпендикулярно к поверхности полупроводника приложить электрическое поле (рис.1а), у поверхности полупроводника будут накапливаться заряды. Если полупроводник n-типа и к нему приложен отрицательный потенциал, тогда у поверхности скапливается

отрицательный заряд и энергетическая диаграмма искривляется вниз. При положительном потенциале поверхность обедняется и диаграмма искривляется вверх. Это явление называют эффектом поля. Если слой 2 на рис.1а диэлектрик, мы получаем МДП (металл-диэлектрик-полупроводник) структуру, если диэлектрик выполнен в виде окисной пленки – МОП (металл-окисел-полупроводник) структуру.

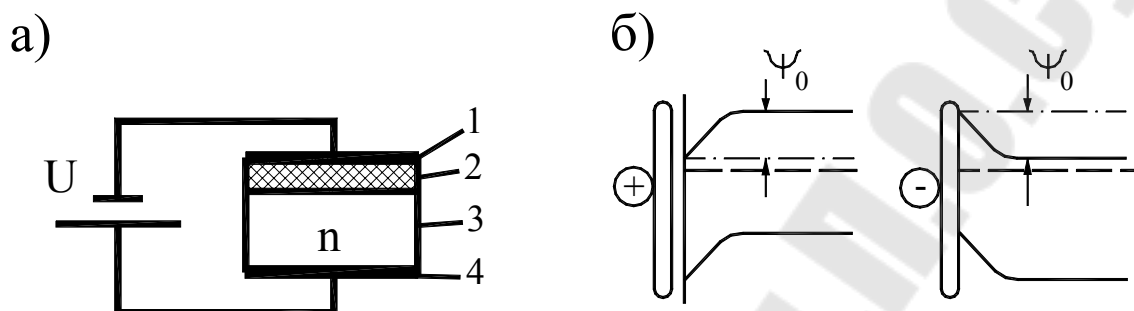


Рис.1. МДП-структура:

- а) МДП-структура: 1 – металлический электрод, 2 – диэлектрик, 3 – полупроводник, 4 – омический контакт с полупроводником;
 б) Энергетическая диаграмма МДП-структуры в случае обогащения (+) и обеднения (–) приповерхностного слоя.

Зависимость поверхностной проводимости в таких структурах нелинейна с выраженным минимумом, зависимым от степени легирования полупроводника [1]. Величина потенциала у поверхности, соответствующего минимуму поверхностной проводимости, выражается формулой:

$$\varphi_{0\text{мин}} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{\lambda^2 \mu_p}{\mu_n} \right) = \frac{\psi_0}{q}, \quad (9)$$

где q – заряд электрона; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура в градусах Кельвина; μ_n , μ_p – подвижность электронов и дырок соответственно; $\lambda = n_i/n_0$ – относительная концентрация электронов.

Рассмотренный эффект поля служит основой для создания многих электронных устройств (варикапы – управляемые напряжением емкости, полевые транзисторы, транзисторы на горячих электронах, диоды со структурой металл1-диэлектрик-металл2 и др.). В настоящей лабораторной работе будут экспериментально исследованы зависимости емкости МДП-структуры для дырочных и электронных полупроводников.

2. Методика измерения и установка для исследования

В работе рассмотрены два поверхностных явления: скин-эффект и эффект поля в полупроводниках. Поэтому исследования проводятся на двух стендах.

2.1. Исследование скин-эффекта в металлах.

Исследование проводится на переменном токе в диапазоне частот $f \in [10 \text{ Гц} - 1 \text{ МГц}]$. Образцы из различных металлов (медь, алюминий и сталь) выполнены в виде безиндуктивных катушек (бифилярная намотка). Используются катушки проводов различного сечения. Схема лабораторного стенда показана на рис. 2.

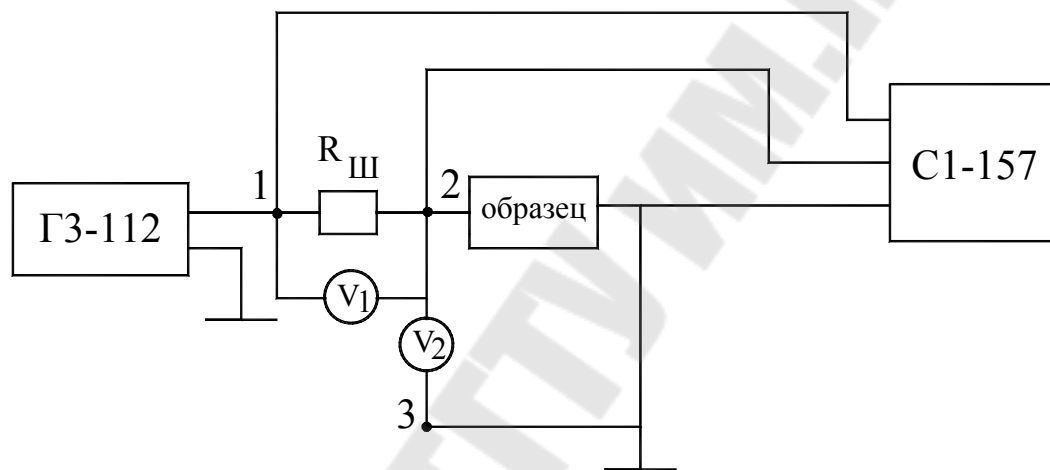


Рис.2. Схема лабораторного макета.

Электрический ток переменной частоты создает генератор сигналов. Значение тока ограничено резистивным шунтом $R_{ш}$, сопротивление которого много больше комплексного сопротивления образца. Показания вольтметра V_1 позволяют найти $I = V_1/R_{ш}$. Показания вольтметра $V_2 = |Z|I$. Осциллограф позволяет найти сдвиг фаз между током и напряжением на образце $\psi = \arctg(X/R)$. Сравнение измеренного значения X и R с расчетным по формулам (7,8) – основная практическая часть работы.

2.2. Измерение вольт-амперных характеристик варикапов.

Измерения проводятся на стенде рис.3.

Клеммы 1 и 2 используются для установки исследуемого электронного прибора. Изменение уровня потенциала осуществляется

реохордом R_1 . Потенциал V_1 определяет напряженность электрического поля в приборе Д. При изменении частоты генератора Γ можно обеспечить последовательный резонанс в контуре $L(C+C_d)$.

$$f_{\text{рез}} = \frac{2\pi}{\sqrt{L(C+C_d)}}.$$

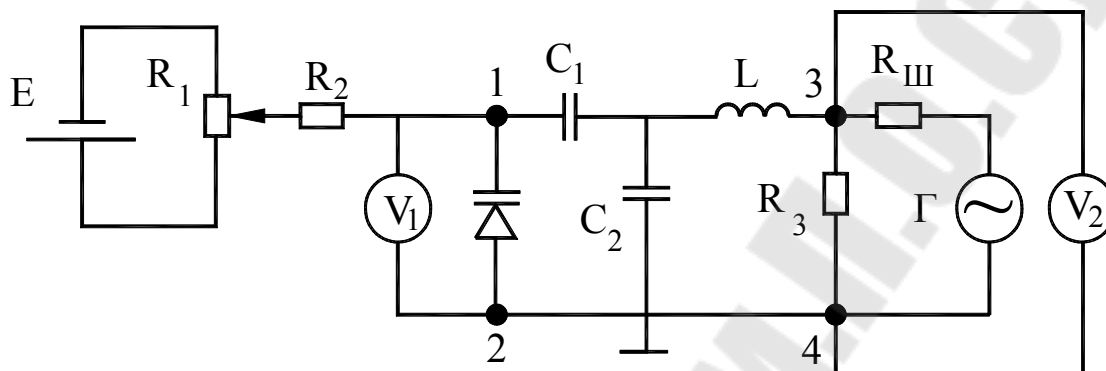


Рис.3. Схема стенда для изучения эффекта поля.

Так как L и C известны, получим C_d и его зависимость от V_1 . Факт резонанса фиксируется по минимуму V_2 .

$$V_2 \approx U_2 \frac{R_n}{R_{\text{ш}} + R_n}; R_n = \frac{R_3(R_L + R_d)}{R_3 + R_L + R_d},$$

где R_L – сопротивление катушки; R_d – сопротивление исследуемого элемента; $C_2 \gg C_d$ – разделительный конденсатор.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Исследование скин-эффекта.

3.1.1. Ознакомиться с экспериментальным стендом. Перерисовать схему стенда. Получить исследуемые образцы у преподавателя.

3.1.2. Включить электропитание генератора и осциллографа, приступить к измерениям через 5 минут.

3.1.3. Изменяя частоту сигнала генератора от нижней к верхней, произвести измерения V_1 , V_2 , ψ , результаты занести в таблицу 1.

Таблица 1

f , Гц	f_1	f_2	...	f_N
V_1 , В				
V_2 , В				
Ψ , град				

Частоты для измерений $f_n = 10$ Гц; 25 Гц; 50 Гц; 200 Гц; 1 кГц; 5 кГц; 25 кГц; 100 кГц; 300 кГц; 1 МГц.

3.1.4. Провести расчет $|Z|$, R , X . Построить графики зависимости этих величин от частоты.

3.1.5. Выполнить численный расчет вышеуказанных величин по формулам (7) и (8). Данные о типе проводника, диаметре провода и его длине указаны на образцах. Сравнить теоретические и экспериментальные значения.

3.2. Исследование эффекта поля в МДП структуре.

3.2.1. Ознакомиться с экспериментальным стендом, перерисовать его схему. Получить исследуемые электронные приборы у преподавателя.

3.2.2. После включения стенда выполнить измерения для каждого электронного прибора в диапазоне изменения V_1 от -10 В до 10 В с шагом 1 В. Результаты занести в таблицу 2.

Таблица 2

$V_1, \text{В}$	-10	-9	...	10
$f_{\text{рез}}, \text{Гц}$				
$V_L, \text{В}$				
$C_d, \text{пФ}$				

3.2.3. Провести расчет C_d , R_d . Построить зависимость $C_d(V_1)$ и $R_d(V_1)$ и определить область наиболее быстрого изменения C_d , R_d . Выполнить измерения в этой области с шагом изменения V_1 через $0,1$ В.

4. Содержание отчета

4.1. Название и цель работы.

4.2. Схемы экспериментов.

4.3. Таблицы измерений и результаты расчетов.

4.4. Графические зависимости.

4.5. Выводы по полученным физическим результатам.

5. Контрольные вопросы

5.1. Получите уравнение диффузии электрического поля \vec{E} по аналогии с уравнением (6).

5.2. Оцените тангенциальную составляющую электрического поля, используя первое уравнение Фика для N .

5.3. Почему при бифилярной намотке образцов не происходит компенсации собственной индуктивности проводника?

5.4. Оцените количественно характеристики скин-эффекта для собственных и легированных полупроводников.

5.5. Используя эффект поля, оцените ожидаемые характеристики структуры металл₁-диэлектрик-металл₂. Работа выхода для металлов 1 и 2 – различная.

5.6. Почему изменение $C_d(V_1)$ происходит с некоторого порогового значения V_1 , а не с нулевого? Дайте объяснение, исходя из энергетических диаграмм МДП структуры.

5.7. Возможно ли параллельное или последовательное включение варикапов?

Литература

1. Кухаркин Е.С. Инженерная электродинамика. Техническая электродинамика. – М.: Высшая школа, 1982.

2. Новиков В.В. Теоретические основы микроэлектроники. – М.: Высшэйшая школа, 1990.

Лабораторная работа № 8

Исследование сегнетоэлектриков

Цель работы: изучить основные свойства сегнетоэлектриков, на примере электронных устройств на их основе экспериментально определить области использования.

1. Краткие теоретические сведения

Линейные среды характеризуются независимостью макроскопических параметров ϵ , μ и σ от интенсивности электромагнитного поля. К типичным нелинейным средам относятся ферромагнетики и сегнетоэлектрики. В общем случае проявление нелинейности проявляется в зависимости значения электрического смещения D от величины электрического поля E .

$$D = (D)_{E=0} + \sum_n \frac{1}{n!} \left(\frac{\partial^n D}{\partial E^n} \right)_{E=0} E^n. \quad (1)$$

Постоянный член в разложении (1) существует при наличии спонтанной поляризации в отсутствие электрического поля (пироэлектрики). Спонтанная поляризация пироэлектриков мала, она не создает внешнее электрическое поле и наблюдать ее можно при нагревании, когда спонтанная поляризация меняется. Сегнетоэлектрическими называют вещества, которые обладают спонтанным электрическим моментом в отсутствие внешнего поля в некотором интервале температур (до температуры Кюри).

Все сегнетоэлектрики обладают следующими свойствами:

- 1) резкая зависимость $\epsilon(E)$;
- 2) высокое значение $\epsilon \geq 10^3$;
- 3) наличие диэлектрического гистерезиса;
- 4) резкая зависимость $E(T)$ при аномально больших значениях у точки Кюри [1].

На основе сегнетоэлектриков изготавливается большое количество разнообразных электронных приборов. Используются их нелинейные и пьезоэлектрические свойства.

Керамические конденсаторы с резко выраженными нелинейными свойствами называют варикондами. Основным материалом служит титанат бария с добавками в виде оксидов бария, циркония и др. Простейшей эквивалентной схемой вариконда может служить параллельное соединение нелинейного (без потерь) конденсатора C_3 и нелинейного сопротивления

$R_{\text{Э}}$. Для приближенного расчета этих параметров можно использовать соотношение

$$i = C_{\text{Э}} \frac{du}{dt} + \frac{u}{R_{\text{Э}}}. \quad (2)$$

Для синусоидального напряжения $u = U_m \sin \omega t$

$$i = \omega C_{\text{Э}} U_m \cos \omega t + G_{\text{Э}} U_m \sin \omega t = A \sin \omega t + B \cos \omega t. \quad (3)$$

Формула (3) позволяет определить $C_{\text{Э}}$ и $G_{\text{Э}} = 1/R_{\text{Э}}$ при эксперименте на переменном токе (рис.2).

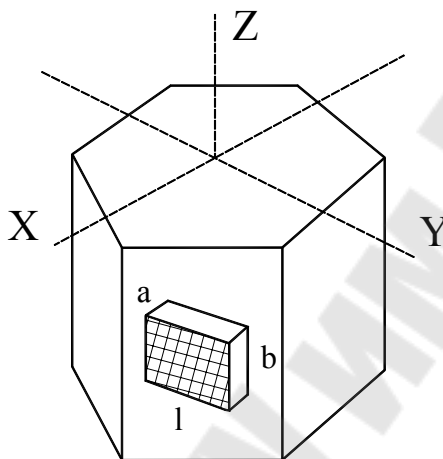


Рис.1. Ориентация выреза кварцевой пластины.

Приближенно $C_{\text{Э}}$ и $G_{\text{Э}}$ можно найти по вольт-кулоновой (рис.2б) и вольт-амперной (рис.2в) осциллограммам. Значение заряда и тока при увеличении напряжения обозначим q_1 и i_1 , а при уменьшении – через q_2 и i_2 соответственно. Тогда

$$i_1 = \frac{dq_1}{dt} = \frac{dq_1}{du} \frac{du}{dt}; \quad i_2 = \frac{dq_2}{du} \frac{du}{dt} \quad (4)$$

$$A = G_{\text{Э}} U_m = \frac{2}{T} \int_0^T i \sin \omega t dt = \frac{\omega}{\pi U_m} \int_{-U_m}^{U_m} (q_2 - q_1) du \quad (5)$$

$$B = \omega C_{\text{Э}} U_m = \frac{2}{T} \int_0^T i \cos \omega t dt = \frac{1}{\pi U_m} \int_{-U_m}^{U_m} (i_1 - i_2) du \quad (6)$$

Интегралы в (5) и (6) определяются как площади заштрихованных фигур на рис.2.

Пьезоэлектрический эффект представляет собой способность некоторых материалов образовывать на гранях поверхности при механическом нагружении электрические заряды (прямой пьезоэффект) и механически деформироваться при приложении электрического поля

(обратный пьезоэффект). Явление пьезоэффекта наблюдается в сегнетоэлектриках, в кристаллах кварца и некоторых других веществах.

Количественно эффект оценивается пьезомодулем d , устанавливающим связь между величиной возникающего заряда q и приложенной силой P .

$$q = d \cdot P \quad (7)$$

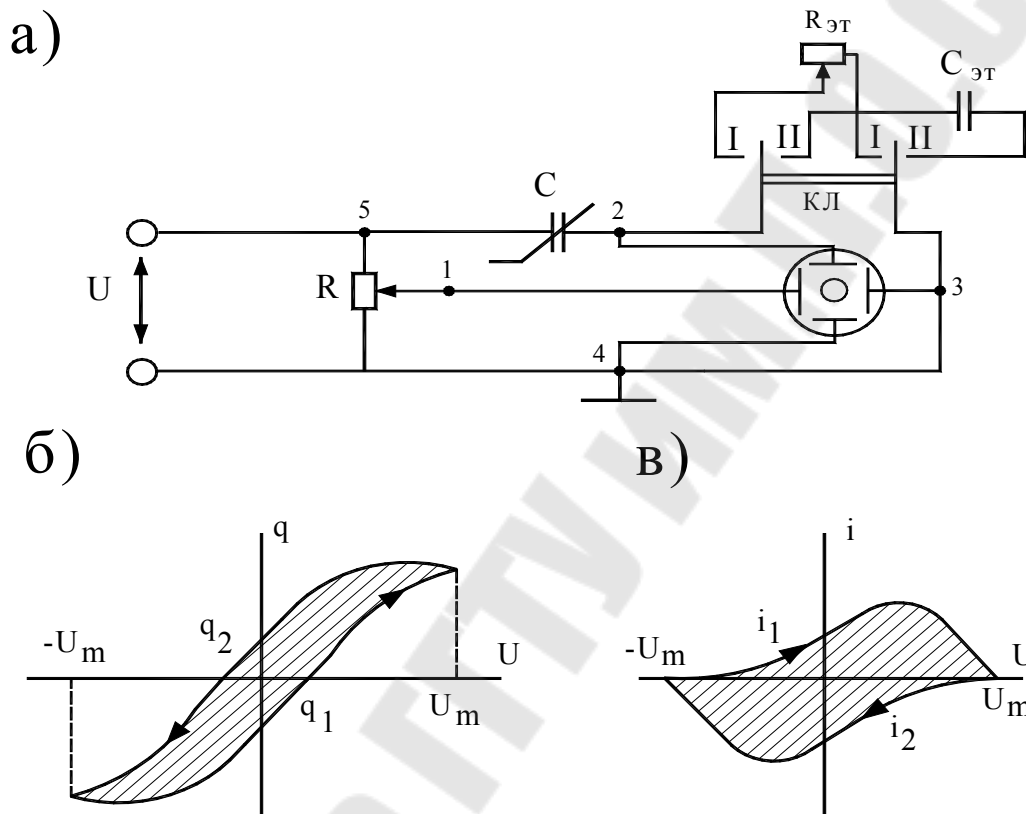


Рис.2. Измерительная схема (а) для исследования варикорнда и типичные характеристики (б, в).

Пьезоэффект наблюдается только в веществах с гетерополярной связью (ионных или сильнополярных диэлектриках). Вторым необходимым условием является отсутствие центра симметрии в кристаллической решетке, что приводит при ее деформации к несимметричному смещению зарядов разного знака. Для успешного наблюдения пьезоэффекта необходимо, чтобы вещество имело высокое удельное электросопротивление.

Если из кристалла кварца вырезать шайбу, как показано на рис.1, тогда наибольшая плоскость перпендикулярна кристаллографической оси X (электрическая ось); ребро a параллельно этой оси; ребро b по оси Z

(оптическая ось); ребро l – вдоль оси Y (механическая ось). При нагружении пластин силой P_x на ее грани образуется заряд

$$Q_{\text{ПР}} = d_{\parallel} P_x,$$

не зависящий от геометрических размеров пластины (d_{\parallel} - пьезомодуль при таком нагружении). При сжатии по оси Y на гранях X образуется заряд

$$Q_{\perp} = -d_{\perp} \frac{\ell}{a} P_y.$$

При приложении силы вдоль оси Z заряда не образуется. Обычно измеряют не заряд, а напряжение u на емкости C , образованной обкладками пластины:

$$u = \frac{q}{C} \div \frac{dP}{a}. \quad (8)$$

2. Методика измерения и установка для исследования

2.1. Исследование нелинейных характеристик сегнетоэлектриков на примере варикондов выполняется по схеме на рис.2.

В качестве образцов применяются нелинейные конденсаторы ВК-1 и ВК-3. Питание осуществляется от источника переменного напряжения $U_m=10$ В, $f=50$ Гц. На канал X осциллографа неизменно подается входное напряжение, на канал Y поочередно при переключении ключа в режиме I и II подаются сигналы, пропорциональные напряжению или току исследуемого образца. В первом случае на экране осциллографа будет наблюдаться вольт-кулоновая характеристика, а во втором – вольт-амперная. Зарисованные с экрана петлеобразные характеристики дают информацию о параметрах вариконда согласно формулам (5) и (6).

2.2. Пьезоэлектрический эффект наблюдается и исследуется на стенде, представленном на рис.3. Пьезоэлектрический элемент (ПЭ) зафиксирован в штативе. Микрометрический винт задает деформацию этого элемента, которая измеряется по микрометрической шкале (МШ). Усилие $p = \gamma x$, где x – деформация, γ – постоянная стенда. Разность потенциалов после усиления в усилителе U измеряется вольтметром В. Деформация осуществляется только в одном направлении. Измерение проводится в пределах, ограниченных упорными шайбами. Запрещено снимать шайбы, чтобы не произошло разрушение пьезоэлемента.

3. Порядок выполнения работы

3.1. При снятии характеристик вариконда необходимо сделать следующее:

- перерисовать схему эксперимента;
- уточнить у преподавателя значения $R_{ЭТ}$, $C_{ЭТ}$;
- получить образцы.

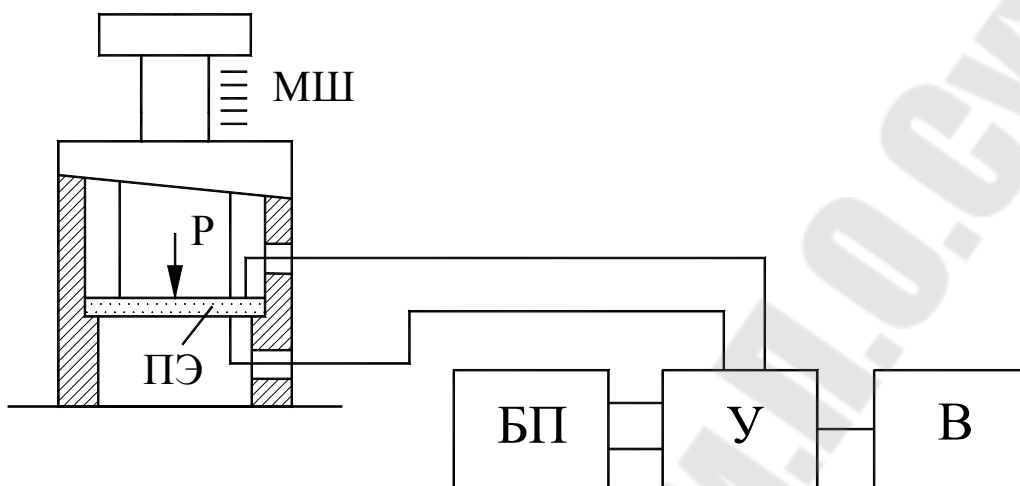


Рис. 3. Стенд для изучения пьезоэффекта.

3.2. Установить в клеммы 2 – 5 первый образец и установить реохордом $R U_m=5 В$.

3.3. Снять вольт-кулоновую характеристику, установив ключ в положении II.

3.4. Снять вольт-амперную характеристику, установив ключ в положении I.

3.5. Повторить измерения по п.п. 3.3. и 3.4 при $U_m=7,5 В$ и $U_m=10 В$.

3.6. Найти $C_Э$ и $R_Э$ в соответствии с методикой раздела 1. Результаты занести в таблицы.

3.7. Выполнить измерения для второго образца по п.п. 3.2 – 3.6.

3.8. При изучении пьезоэффекта предварительно выполнить следующее:

- ознакомиться со стендом и перерисовать схему эксперимента;
- уточнить значение γ у преподавателя.

3.9. Установить усилие $P=0$, поворачивая микровинт против часовой стрелки до упора.

3.10. Изменяя положение микровинта с шагом $0,05 мм$, произвести измерения $U_{ВЫХ}$. Найти значение пьезомодуля d для каждого измерения. Найти среднее значение \bar{d} .

3.11. Произвести измерение в обратном порядке от $x_{макс}$ до $x=0$. Получить значение d и \bar{d} .

4. Содержание отчета

- 4.1. Название и цель работы.
- 4.2. Схемы экспериментов.
- 4.3. Таблицы и осциллограммы измерений.
- 4.4. Результаты расчетов параметров исследуемых образцов.

5. Контрольные вопросы

- 5.1. Дайте физическое объяснение явления пьезоэлектричества.
- 5.2. Каким математическим соотношением связаны вектор электрического смещения \vec{D} и вектор напряженности электрического поля \vec{E} для нелинейных диэлектриков?
- 5.3. В чем суть фазовых переходов при температуре Кюри у сегнетоэлектриков?
- 5.4. Перечислите технические недостатки варикондов.
- 5.5. Предложите способ оценки импульсных характеристик варикондов по измеренным статическим значениям R_{Σ} и C_{Σ} .
- 5.6. Перечислите области применения пьезоэффекта.

Литература

1. Жеребцов П.И. Основы электроники. – Л.: Энергоатомиздат, 1990.
2. Кухаркин Е.С. Инженерная электродинамика. Техническая электродинамика. – М.: Высшая школа, 1982.

Содержание

Лабораторная работа № 7

1. Краткие теоретические сведения	3
2. Методика измерения и установка для исследования	7
3. Порядок выполнения работы	8
4. Содержание отчета	9
5. Контрольные вопросы	9
Литература	10

Лабораторная работа № 8

1. Краткие теоретические сведения	11
2. Методика измерения и установка для исследования	14
3. Порядок выполнения работы	14
4. Содержание отчета	16
5. Контрольные вопросы	16
Литература	16

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

В трех частях

Часть 3

**Лабораторный практикум
по одноименному курсу
для студентов специальности 1-36 04 02
«Промышленная электроника»
дневной формы обучения**

Авторы-составители: **Верига** Бронислав Антонович
Гуреева Ольга Викторовна

Подписано в печать 17.11.06.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Цифровая печать. Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1,0.

Изд. № 165.

E-mail: ic@gstu.gomel.by

<http://www.gstu.gomel.by>

Отпечатано на МФУ XEROX WorkCentre 35 DADF
с макета оригинала авторского для внутреннего использования.
Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого».
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.