ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Ульяновский государственный технический университет

ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОИСТВА ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Методические указания к лабораторным работам

Составители: В. А. Сергеев
А. В. Моисеев

Ульяновск
2009

УДК 621.382 (076)
ББК 32.85я7
С 23

Рецензент д-р физ.- мат. наук М. К. Самохвалов

Одобрено секцией методических пособий научно-методического совета университета

Сборник лабораторных работ по курсу «Основы твердотельной электроники» : методические указания для студентов базовой кафедры «Радиотехника, опто- и наноэлектроника» / сост. В. А. Сергеев, А. В. Моисеев. - Ульяновск : УлГТУ, 2009. - 56 с.

Указания содержат описания лабораторных работ по изучению свойств и характеристик элементов и устройств твердотельной электроники, подробно не рассматриваемых в курсе «Электроники». Описанию лабораторных работ предшествуют разделы, указывающие порядок подготовки к работе, правила выполнения работ в лаборатории, требования к оформлению отчета и порядок получения зачета по работе, правила техники безопасности при выполнении работ. Приведены сведения о стандартных методиках измерения параметров изучаемых элементов и устройств, а также справочные данные по изучаемым элементам.

Методические указания подготовлены в УФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН на базовой кафедре «Радиотехника, опто- и наноэлектроника».

УДК 621.382 (076)
ББК 32.85я7

© Сергеев В. А., Моисеев А. В., составление, 2009
© Оформление. УлГТУ, 2009

СОДЕРЖАНИЕ

1. Правила выполнения лабораторных работ 4

1.1. Подготовка к выполнению лабораторной работы 4

1.2. Выполнение работ в лаборатории 4

1.3. Оформление отчета и зачет по работе 4

2. Техника безопасности при выполнении работ 4

3. Лабораторная работа №1

Туннельный диод и резонансный генератор на его основе 6

4. Лабораторная работа №2

Исследование фильтров и резонаторов на основе активных диэлектриков 18

5. Лабораторная работа №3

Датчики на основе эффекта Холла 35

6. Лабораторная работа №4

Характеристики ферромагнетиков и элементов на их основе 44

7. Приложения 55

1. ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1.1. Подготовка к выполнению лабораторной работы

При подготовке к работе студенты должны изучить физические принципы действия исследуемых элементов и устройств твердотельной электроники, их основные характеристики и параметры, а также принцип работы измерительных приборов и устройств, используемых при выполнении работы. При этом следует:

- по конспектам лекций и рекомендованной литературе изучить теоретический материал, относящийся к данной лабораторной работе;
- ознакомиться с устройством и принципиальной электрической схемой лабораторной установки;
- ознакомиться с применяемыми в работе измерительными приборами;
- продумать ответы на контрольные вопросы, относящиеся к данной работе.

1.2. Выполнение работ в лаборатории

Лабораторные работы выполняются в часы, предусмотренные расписанием, группами по 2—3 человека. Выполнению работ предшествует проверка готовности студента. При этом студент должен ответить на вопросы преподавателя по теории предстоящей работы и методике ее выполнения. Если результаты проверки готовности признаются преподавателем удовлетворительными, студент получает допуск к работе.

Экспериментальная часть работы считается законченной только после просмотра и утверждения преподавателем полученных результатов

По окончании работы студент должен выключить все приборы и отключить лабораторный стенд от электросети, привести рабочее место в порядок.

1.3. Оформление отчета и зачет по работе

Отчет должен быть составлен индивидуально на листах писчей бумаги формата А4. При ручной подготовке отчета экспериментальные графики вычерчиваются на листах миллиметровки и вклеиваются в отчет. Предпочтение следует отдавать компьютерным способам подготовки отчетов и обработке результатов экспериментальных исследований в пакетах MathCAD, MatLab и др.

Зачет по лабораторной работе студент получает после защиты работы; для этого студент представляет отчет по работе, обсуждает с преподавателем полученные результаты и отвечает на контрольные вопросы.

2. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ РАБОТ

1. Студенты допускаются к выполнению лабораторных работ только после инструктажа по технике безопасности. Инструктаж проводится преподавателем и подтверждается личной подписью студента в специальном журнале. В лаборатории студенты обязаны соблюдать правила внутреннего трудового

распорядка УФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН.

Студенты, нарушающие правила техники безопасности, от работы отстраняются, при необходимости проходят дополнительный инструктаж и в крайних случаях, при грубейших нарушениях, привлекаются к ответственности.

2. В лаборатории опасными производственными факторами являются:

- повышенное напряжение в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека;
- ВЧ и СВЧ излучение, длительное воздействие которых на незащищенные части тела человека нежелательно

3. Для предотвращения несчастных случаев при выполнении лабораторных работ студенты должны выполнять следующие правила:

• Выполнение лабораторных работ в лаборатории без преподавателя или лаборанта запрещается.

• Включение лабораторных установок производится только с разрешения преподавателя.

• Запрещается оставлять без присмотра включенные лабораторные установки, касаться руками или неизолированными предметами обнаженных проводов и деталей, находящихся под напряжением.

• Запрещается переключать без необходимости переключатели, кнопки и ручки настройки, регулировки и пределов измерения.

• Запрещается загромождать рабочее место одеждой, портфелями и другими вещами, не относящимися к выполняемой работе.

• Не оставлять без присмотра включенные приборы и стенды.

• Выполнять на оборудовании и приборах только те операции, которые предусмотрены данной работой.

• При обнаружении неисправности в работе установок немедленно прекратить работу, выключить напряжение, отключить приборы от электрической сети, отсоединить разъемы питания.

• Бережно относиться к установкам.

4. Для предотвращения поражения электрическим током запрещается производить переключения в схемах, находящихся под напряжением и в отключенных схемах без предварительной разрядки конденсаторов. Не касаться одновременно отопительной батареи и прибора (его части), который находится под напряжением.

5. Все работающие в лаборатории должны уметь оказывать первую (доврачебную) помощь при поражении током, проводить искусственное дыхание по методу «изо рта в рот», проводить непрямой массаж сердца и владеть методом наложения повязок при травмировании.

6. В случае поражением электротоком или травмировании следует:

1) выключить автомат электропитания лаборатории;

2) принять меры по освобождению пострадавшего от действия тока;

3) оказать первую помощь пострадавшему;

5) сообщить об этом преподавателю и администрации УФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН

3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Туннельный диод и резонансный генератор на его основе

1. Цель работы

Изучить принцип работы туннельного диода, освоить методики измерения характеристик и параметров туннельных диодов и резонансного генератора на его основе.

2. Туннельные и обращенные диоды: устройство и принцип действия

Туннельным диодом называют полупроводниковый диод на основе p^+-n^+ перехода с сильнолегированными областями, на прямом участке вольт-амперной характеристики (ВАХ) которого наблюдается N-образная зависимость тока от напряжения. На рис. 1.1. приведена ВАХ типичного туннельного диода при прямом смещении. Проанализируем особенности ВАХ туннельного диода. Для этого рассмотрим p^+-n^+ переход, образованный двумя вырожденными полупроводниками. Если концентрация доноров и акцепторов в эмиттере и базе диода будет N_A, $N_D \sim 10^{20}$ см$^{-3}$, то концентрация основных носителей будет много больше эффективной плотности состояний в разрешенных зонах p_{p0}, $n_{n0} >> N_C$, N_V. В этом случае уровень Ферми будет находиться в разрешенных зонах p^+ и n^+ полупроводников.

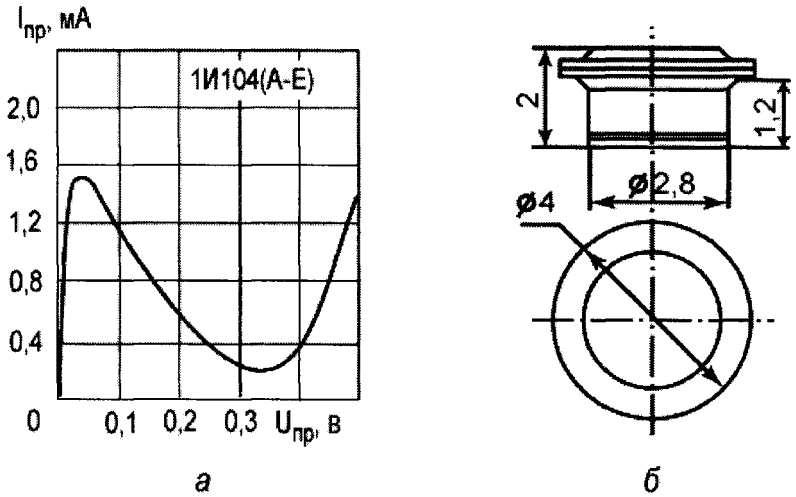


Рис. 1.1. Туннельный диод 1И104:
а) вольт-амперная характеристика при прямом смещении; б) конструкция туннельного диода

В полупроводнике n^+ типа все состояния в зоне проводимости вплоть до уровня Ферми заняты электронами, а в полупроводнике p^+-типа – дырками. Зонная диаграмма p^+-n^+ перехода, образованного двумя вырожденными полупроводниками, приведена на рис. 1.2. Для прямого диффузионного тока имеет место большая высота потенциального барьера. Чтобы получить типичные значения прямого тока, нужно приложить большое прямое напряжение (больше или

примерно равное половине ширины запрещенной зоны $E_g/2$). В выражении для обратного дрейфового тока концентрация неосновных носителей $p_{n0} = n_i^2/N_D$ мала, и поэтому обратный ток тоже будет мал.

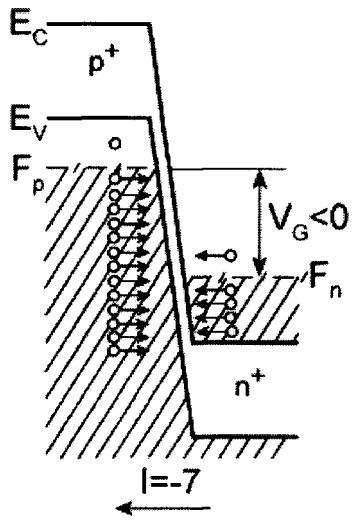


Рис. 1.2. Зонная диаграмма p^+-n^+ перехода в равновесии

Рассчитаем, чему равна геометрическая ширина вырожденного несимметричного p-n п

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s\varepsilon_0 2\varphi_0}{qN_D}} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s\varepsilon_0 E_g}{qN_D}} = \sqrt{\frac{2\cdot 1\cdot 10^{-12}\cdot 1}{1.6\cdot 10^{19}}} \sim 10^{-6}\,\text{см} \sim 100\text{Å}. \tag{1.1}$$

Дебройлевскую длину волны электрона оценим из простых соотношений:

$$E = kT = \frac{\hbar^2 k^2}{2m};\ k = \frac{2\pi}{\lambda};\ E = \frac{\hbar^2(2\pi)^2}{2m\lambda^2} = kT;\ \lambda = \frac{2mkT}{h^2} = \frac{1}{h}\sqrt{2mkT},$$

$$\lambda = \frac{\sqrt{2\cdot 9{,}1\cdot 10^{-31}\cdot 1{,}38\cdot 10^{-23}\cdot 300}}{6{,}3\cdot 10^{-34}} \sim 140\text{Å}. \tag{1.2}$$

$$\lambda - \frac{\sqrt{2\ \cdot\ 9{,}1\ \cdot\ 10^{-31}\ \cdot\ 1{,}38\cdot 10^{-23}\ 300}}{6{,}3\cdot 10^{-34}}\ 140\text{Å} \tag{1.2}$$

Таким образом, геометрическая ширина p^+-n^+ перехода оказывается сравнима с дебройлевской длиной волны электрона. В этом случае в вырожденном p^+-n^+ переходе будут проявляться квантово-механических эффекты, одним из которых является туннелирование через потенциальный барьер. При узком барьере вероятность туннельного просачивания через барьер отлична от нуля.

Рассмотрим более *подробно* туннельные переходы в вырожденных p^+-n^+ переходах при различных напряжениях. На рис. 1.3. показана зонная диаграмма туннельного диода при обратном смещении. При обратном напряжении ток в диоде обусловлен туннельным переходом электронов из валентной зоны на свободные места в зоне проводимости. Поскольку концентрация электронов и число мест велики, то туннельный ток резко возрастает с ростом обратного напряжения. Такое поведение ВАХ резко отличает туннельный диод от обычного

выпрямительного диода. При прямом напряжении ток в диоде обусловлен туннельным переходом электронов из зоны проводимости на свободные места в валентной зоне. Поскольку туннельные переходы происходят без рассеяния, то есть с сохранением энергии туннелирующей частицы, то на зонной диаграмме эти процессы будут отражены прямыми горизонтальными линиями.

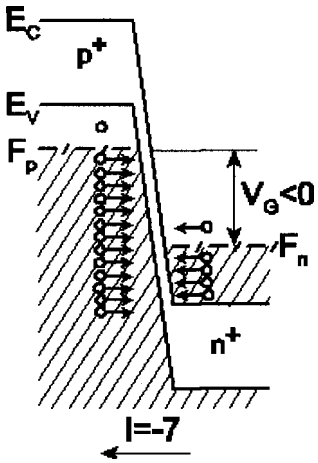


Рис. 1.3. Зонная диаграмма туннельного диода при обратном смещении

На рис. 1.4. показаны зонные диаграммы туннельного диода при прямом смещении, соответствующие трем точкам на прямом участке ВАХ.

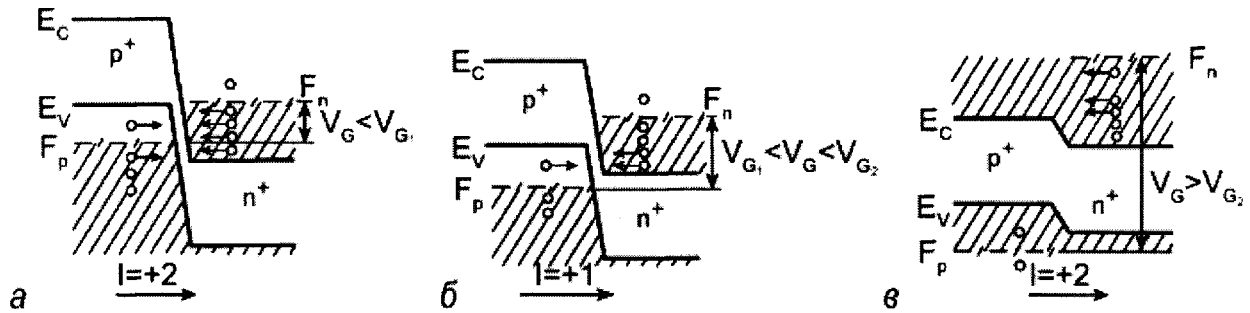


Рис. 1.4. Зонные диаграммы туннельного диода при прямом смещении:
а) участок 1; б) участок 2; в) участок 3

На участке 1 при небольшом прямом напряжении напротив электронов зоны проводимости начинают появляться свободные места в валентной зоне при той же самой энергии. По мере роста напряжения число свободных мест возрастает и ток растет с ростом напряжения. Туннельный ток достигает максимума, когда все свободные места в валентной зоне оказываются по энергии напротив энергетических уровней, занятых электронами в зоне проводимости (участок 2). Затем, по мере роста прямого напряжения, число этих свободных мест начинает уменьшаться, поскольку по энергии напротив уровней, занятых электронами в зоне проводимости оказываются состояния в запрещенной зоне (энергетические уровни в идеальных полупроводниках в запрещенной зоне отсутствуют). На участке 3 туннельный ток уменьшается с ростом напряжения и

превращается в ноль, когда запрещенная зона p полупроводника будет находиться по энергии напротив уровней, занятых электронами в зоне проводимости. При дальнейшем росте прямого напряжения появляется компонента обычного диффузионного тока p-n перехода.

Участок 3 на рис. 1.4. - это участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Рассмотрим более подробно ВАХ туннельного диода. Для случая прямого смещения она имеет следующий вид:

$$I = A' \frac{qV}{4kT}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - qV)^2, \tag{1.3}$$

где ε_1 и ε_2 - расстояние от энергии Ферми до дна зоны проводимости или вершины валентнои зоны.

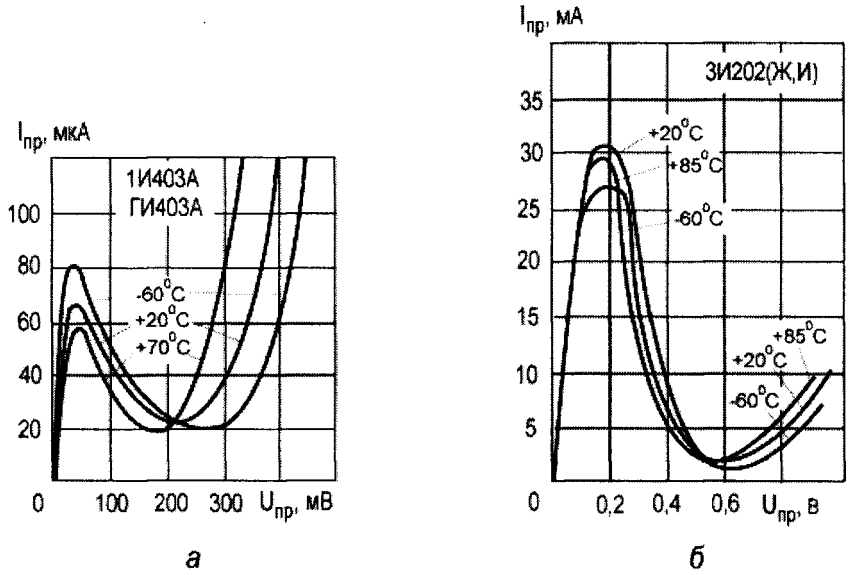


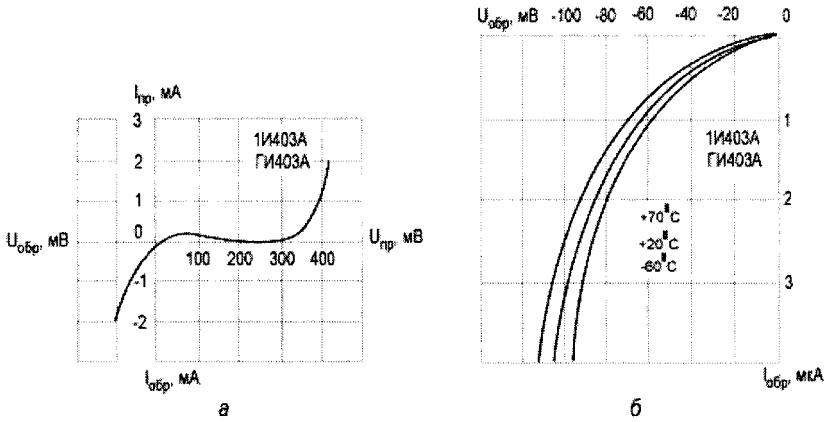
Рис. 1.5. Температурные зависимости прямого тока от напряжения в туннельных диодах: а) германиевый диод 1И403; б) арсенид галлиевый диод 3И202

Расчет ВАХ туннельного диода по уравнению (1.3) дает хорошее согласие с экспериментом. На рис. 1.5. приведены температурные зависимости прямого тока от напряжения в туннельных диодах, изготовленных из германия и арсенида галлия. Видно, что у диода с более широкозонным материалом GaAs, чем Ge, минимум тока наблюдается при больших значениях прямого напряжения.

Отметим, что туннельный диод имеет высокие значения максимальной граничной частоты $f_{max} \sim 10^9$ Гц, поскольку времена процессов при туннелировании составляют наносекунды, то есть $\tau_{min} \sim 10^{-9}$ с. По этой причине туннельные диоды используются в СВЧ-технике.

Рассмотрим ВАХ p-n перехода в особом случае, когда энергия Ферми в электронном и дырочном полупроводниках совпадает или находится на расстоянии $+ kT/q$ от дна зоны проводимости или потолка валентной зоны. В этом случае ВАХ такого диода при обратном смещении будут точно такие же, как и у туннельного диода, то есть при росте обратного напряжения будет быстрый рост обратного тока. При прямом смещении, то туннельная компонента ВАХ

будет полностью отсутствовать в связи с тем, что нет полностью заполненных состояний в зоне проводимости. Поэтому при прямом смещении в таких диодах до напряжений, больше или равных половине ширины запрещенной зоны, ток будет отсутствовать. С точки зрения выпрямительного диода ВАХ такого диода будет инверсной, то есть будет высокая проводимость при обратном смещении и малая при прямом. Такие туннельные диоды получили название обращенных диодов. ВАХ обращенного диода приведена на рис. 1.6. Таким образом, обращенный диод - это туннельный диод без участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Высокая нелинейность ВАХ при малых напряжениях вблизи нуля (порядка микровольт) позволяет использовать этот диод для детектирования слабых сигналов в СВЧ-диапазоне.



а б

Рис. 1.6. Вольт-амперная характеристика германиевого обращенного диода ГИ403: а) полная ВАХ; б) обратный участок ВАХ при разных температурах

3. Некоторые схемы на туннельных диодах

Наиболее просто с применением туннельных диодов строятся схемы автогенераторов. Так как туннельный диод представляет собой двухполюсник с отрицательным сопротивлением, устойчивым по напряжению, то при подключении к нему параллельного колебательного контура он может генерировать. При этом отрицательное сопротивление диода будет компенсировать потери, и в контуре могут возникнуть и поддерживаться незатухающие колебания. Обычные низкочастотные туннельные диоды хорошо работают на частотах, равных единицам мегагерц. Более высокочастотные диоды, в которых уменьшена емкость перехода и индуктивность выводов, генерируют на частотах тысяч мегагерц. Однако из-за небольших величин участка вольтамперной характеристики диода с отрицательным сопротивлением мощность, отдаваемая им на любых частотах, составляет доли мВт. Чтобы форма генерируемых колебаний не искажалась, как правило, применяют частичное подключение диода к контуру генератора. В этом случае сопротивление потерь, приведенное к выводам диода, должно быть равно его отрицательному сопротивлению. В реальных схемах приведенное сопротивление потерь выбирают больше отрицательного. сопротивления туннельного диода с тем, чтобы гарантировать надежное возбуждение генератора при изменении температуры, питающего напряжения и частоты.

Учитывая, что параллельное сопротивление потерь в реальных колебательных контурах значительно превышает сопротивление туннельного диода, отвод приходится делать от незначительной части витков контура (рис. 1.7.). На внутреннем сопротивлении источника смещения будет выделяться часть колебательной мощности, поэтому оно должно быть как можно меньше.

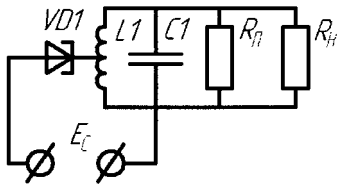
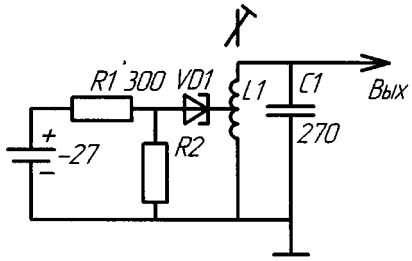


Рис. 1.7. Колебательный контур с туннельным диодом

Обычно туннельные диоды питаются от делителя напряжения, что приводит к неэкономному расходованию мощности питания. Для германиевых диодов напряжение смещения в режиме генерации равно 0,1-0,15 В, а минимальное напряжение большинства химических источников тока составляет 1,2-2,0 В, поэтому в цепи питания необходимо применять делители напряжения. При этом примерно 80-90% всей потребляемой мощности рассеивается на делителе. Из соображений экономичности для питания туннельных диодов целесообразно применять источники с возможно более низким напряжением. Выходное сопротивление делителя напряжения выбирают в пределах 5-10 Ом, и только в устройствах, где требуется большая экономичность, его повышают до 20-30 Ом. Отрицательное сопротивление туннельного диода должно превышать сопротивление делителя в 5-10 раз. Шунтировать столь малые сопротивления конденсаторами нецелесообразно, так как это может привести к неустойчивой работе генератора.

При питании диодов от химических источников тока обеспечить их стабильную работу довольно трудно. Более целесообразно питать их от окисно-ртутных элементов, напряжение которых незначительно меняется в процессе работы, а в ряде случаев приходится использовать предварительно стабилизированное напряжение или применять в делителе нелинейные сопротивления: в верхнем плече - стабилизирующие ток, а в нижнем - напряжение.

Если в схеме автогенератора (рис. 1.8., а) вместо сопротивления R2 применить германиевый диод Д11 в прямом включении, как это показано на рис. 1.8., б, стабильность работы генератора улучшится и при изменении напряжения питания от 1,5 до 1 В никаких регулировок не потребуется. В приведенных схемах автогенераторов на частоту 465 кГц катушка L1 намотана на 4-секционном полистироловом каркасе диаметром 4 мм с сердечником из феррита Ф-1000 диаметром 2,8 и длиной 12 мм. Обмотка катушки содержит 220 витков провода ПЭВ 0,13 с отводом от 18 витка. Напряжение высокой частоты на контуре составляет 1 В.



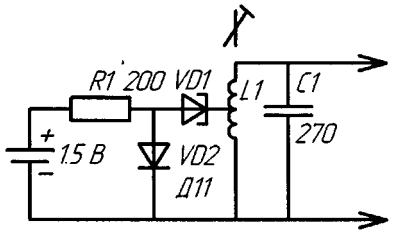


Рис. 1.8. Схемы автогенераторов на туннельных диодах

Все упомянутые выше способы стабилизации несколько усложняют схемы, а в ряде случаев и увеличивают потребляемую мощность, поэтому широкого применения они не нашли. В аппаратуре туннельные диоды чаще всего применяются совместно с транзисторами. Известно, что у транзистора ток эмиттера сравнительно мало зависит от напряжения питания коллектора, особенно если смещение транзистора стабилизировано каким-либо способом. Поэтому при питании диодов эмиттерным током транзистора можно получить выигрыш не только в стабильности, но и в экономичности. Последняя повышается здесь из-за того, что потери на верхнем плече делителя устраняются, а дополнительная мощность, потребляемая туннельным диодом, невелика.

Помимо генераторов, настроенных на фиксированную частоту, туннельные диоды можно применить и в диапазонных генераторах. Правда, при этом приходится более тщательно подбирать связь диода с контуром, чтобы во всем перекрываемом диапазоне поддержать амплитуду колебании и мощность в нагрузке на заданном уровне. Примером такого использования туннельного диода может служить схема гетеродина для супергетеродинного приемника, которая получается при этом проще, чем на транзисторе (рис. 1.9).

Для связи с туннельным диодом поверх L1 со стороны ее заземленного конца наматывается обмотка L2, содержащая 10 витков провода ПЭЛШО 0,15. Обмотка связи с преобразователем L3 остается примерно прежней, но для наибольшей чувствительности число витков нужно заново подобрать. Емкости конденсаторов C1 и C2 остаются без изменения.

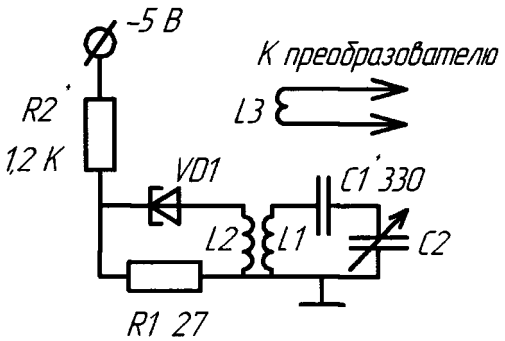


Рис. 1.9. Схема гетеродина на туннельном диоде

Питается туннельный диод от общего источника, при этом сопротивление R2 должно быть равно 1,2 кОм. Туннельный диод нужно выбрать с током максимума не более 1,5 мА. Для питания диода лучше применить упомянутую выше схему стабилизации с помощью транзистора. Для этого усилитель НЧ переделывают по схеме на рис. 1.10. Между транзисторами усилителя вводится связь по постоянному току. Смещение на базу транзистора T1 снимается с эмиттера транзистора T2 через цепочку R4Д1, и сопротивления R2, R3. Возникающая при этом отрицательная обратная связь по току поддерживает ток эмиттера, а значит, и напряжение на сопротивлениях R2 и R3, почти постоянным при снижении питающего напряжения на 25-30% от номинальной величины (величину питающего напряжения лучше повысить до 9 В).

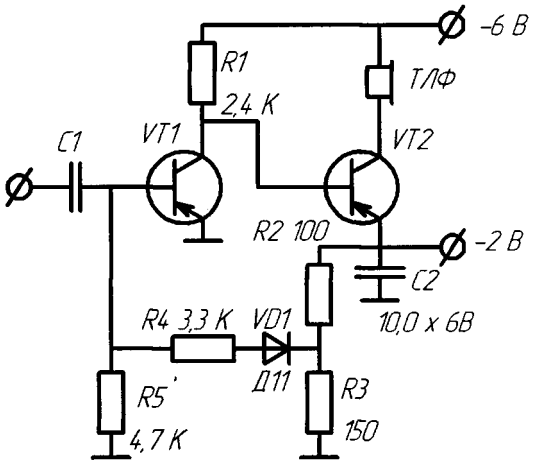


Рис. 1.10. Схема стабилизации питания туннельного диода

При проектировании генераторов на туннельных диодах следует стремиться получить максимальную добротность колебательного контура с тем, чтобы увеличить мощность, отдаваемую в нагрузку. Для увеличения мощности можно также включить два или большее число диодов в схему генератора. При этом, как следует из рассмотрения энергетических соотношений, диоды выгодно соединять по постоянному току последовательно.. Тогда напряжение на нижнем сопротивлении делителя будет вдвое больше, чем для одного туннельного диода, и потери на верхнем плече уменьшаются. Нужно иметь ввиду, что сопротивление нижнего плеча должно обязательно состоять из двух одинаковых сопротивлений, а их средняя точка должна быть соединена по постоянному току со средней точкой двух диодов (рис. 1.11).

В противном случае, устойчивая работа двух последовательно соединенных диодов невозможна. По переменному току можно соединить диоды параллельно или последовательно. В схеме, приведенной на рис. 11., каждый диод подключен к отдельной обмотке. Чтобы получить наибольшую мощность, связь каждого туннельного диода с контуром следует регулировать индивидуально.

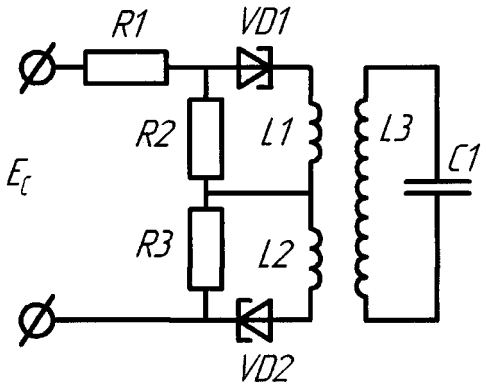


Рис. 1.11. Схема генератора с двумя туннельными диодами

На туннельных диодах можно строить резонансные усилители. Они могут быть выполнены, например, по схеме автогенератора, в котором коэффициент обратной связи недостаточен для возбуждения колебаний. Таким схемам присущи все недостатки регенеративных усилителей: нестабильность порога регенерации, возможность возбуждения при изменении нагрузки, сужение полосы пропускания при повышении усиления.

Однако такие усилители могут работать достаточно устойчиво, если не стремиться получить от них максимальное усиление. Схема с таким применением туннельного диода приведена на рис. 1.12. На рисунке показана схема входной части приемника прямого усиления с ферритовой антенной. Известно, что для согласования сопротивления контура антенны с входным сопротивлением транзистора, коэффициент трансформации трансформатора, образованного обмотками катушек L1 и L2, делается много меньше единицы.

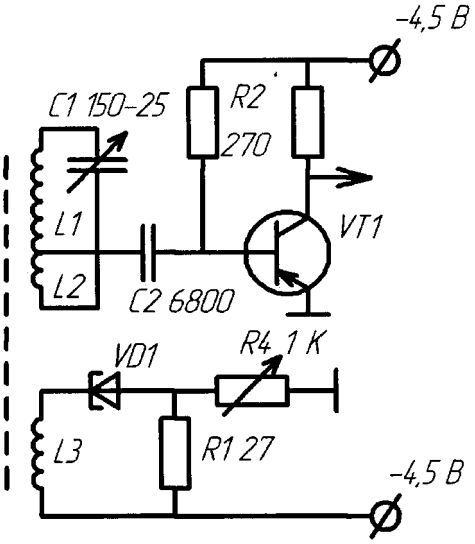


Рис. 1.12. Схема резонансного усилителя на туннельном диоде

В схеме, показанной на рис. 1.12., коэффициент связи выбран значительно больше обычного и отвод к базе транзистора Т1 сделан от 1/5 общего числа витков катушки L1. В этом случае контур L1C1 оказывается сильно шунтированным, полоса его расширяется и чувствительность приемника падает. При подключении туннельного диода к обмотке L3 контур частично «разгружается», его затухание и полоса пропускания возвращаются к нормальной величине. Так удается получить выигрыш в чувствительности приемника в 4-5 раз. Число витков обмотки L3 выбирается таким, чтобы затухание контура компенсировалось не полностью, и усилитель не возбуждался. Однако, чтобы получить максимальную чувствительность, нужно подойти к порогу возбуждения как можно ближе, поэтому смещение туннельного диода делают регулируемым. Недостатком схемы является то, что коэффициент перекрытия входной цепи уменьшается, так как из-за увеличенного коэффициента связи сильней будет сказываться входная емкость транзистора Т1 и приведенная емкость туннельного диода. Поэтому целесообразно туннельный диод применять с минимальной емкостью.

При монтаже нужно учитывать, что туннельные диоды склонны к возбуждению на паразитных реактивных сопротивлениях. Поэтому выводы диода и связанных с ним деталей делают минимальной длины, а монтаж осуществляет так, как если бы схема предназначалась для работы на очень высоких частотах.

4. Описание лабораторного макета и используемого оборудования

Экспериментируя с туннельными диодами, нужно избегать бросков тока и напряжения, иначе диод может выйти из строя. Подключать и отключать диод следует только при выключенном питании.

Общая схема лабораторного макета приведена на рис. 1.13.

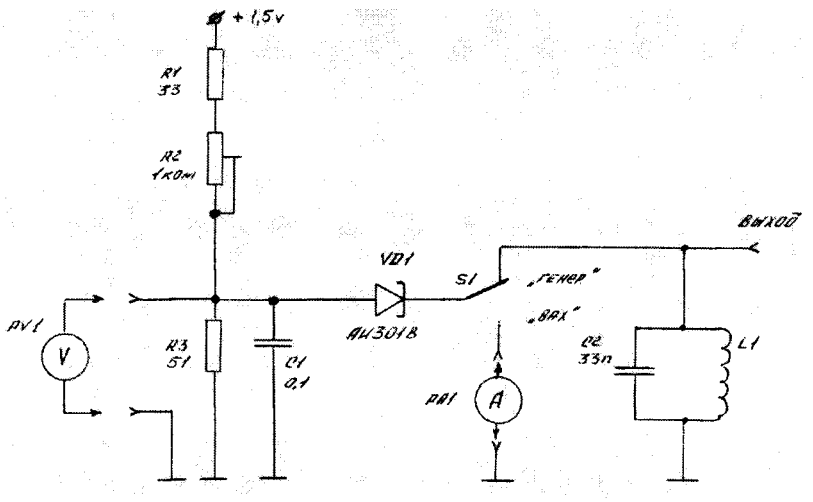


Рис. 1.13. Схема лабораторного макета

В макете предусмотрено два режима включения исследуемого туннельного диода: режим измерения статической ВАХ и режим исследования характеристик резонансного усилителя. Переключение из одного режима в другой осуществляется тумблером S1.

Схема подключения измерительных приборов при измерении ВАХ показана на рис. 1.14. Для проведения измерений в данной лабораторной работе используется универсальный вольтметр В7-16, вольтметр переменного тока В3-38, электронно-счетный частотомер Ч3-57 и мультиметр MY-61.

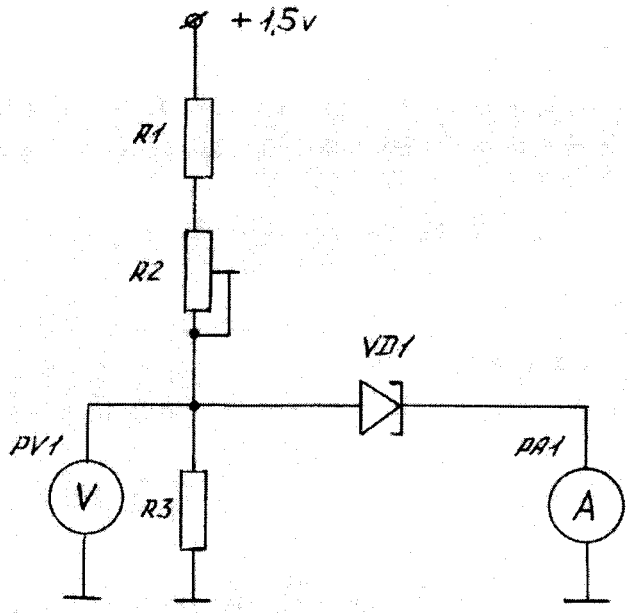


Рис. 1.14. Схема измерения ВАХ туннельного диода

Схема подключения измерительных приборов при исследовании характеристик генератора на туннельном диоде показана на рис. 1.15.

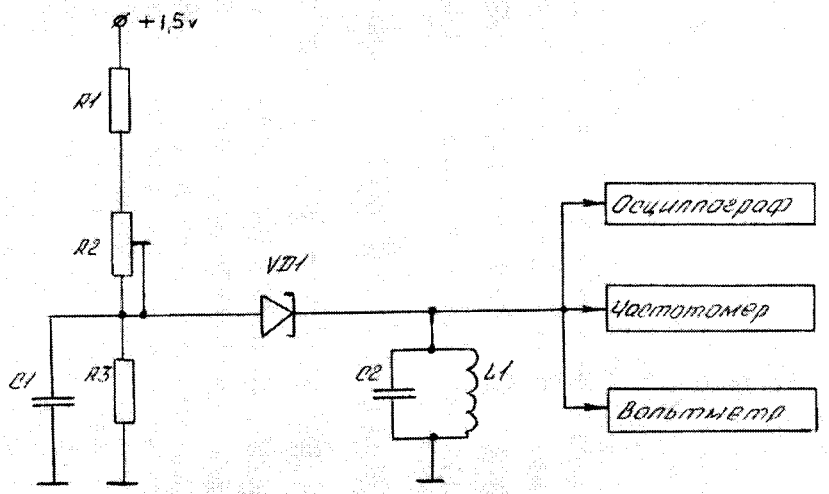


Рис. 1.15. Схема измерения характеристик генератора на туннельном диоде

Перед выполнением лабораторного задания ознакомиться с разделами «Подготовка к работе» и «Порядок работы» измерительных приборов, используемых в данной лабораторной работе: В7-16А, Ч3-57.

5. Лабораторное задание. Порядок выполнения работы

5.1. Измерение прямой ветви ВАХ туннельного диода.

5.1.1. Тумблером S2 перевести лабораторный макет в режим измерения ВАХ.

5.1.2. Вставить туннельный диод в контактную колодку анодом в положительную клемму, катодом - в отрицательную.

5.1.3. Подключить измерительные приборы по схеме на рис. 1.14., при этом мультиметр включить в режим измерения постоянного тока с пределом 20 мА, а вольтметр В7-16 - в режим измерения постоянного напряжения с пределом 1 В.

5.1.4. Тумблером S1 включить питание диода; плавно вращая винт многоповоротного переменного резистора R2, изменять напряжение смещения на туннельном диоде с шагом 20-30 мВ и регистрировать показания вольтметра и мультиметра в таблице 1.1.

5.1.5. Зарегистрировать напряжение смещения и тока диода в точке максимума (срыва) и в точке минимума прямой ветви ВАХ.

5.1.6. Выключить питание диода.

Таблица 1.1.

Прямая ветвь вольт-амперной характеристики туннельного диода

U, мВ	30	60	90	120		Umax	Umin		390	420	450
I, мА						Imax	Imin				

5.2. Измерение обратной ветви ВАХ туннельного диода.

5.2.1. Поменять полярность включения туннельного диода, то есть вставить туннельный диод в контактную колодку анодом в отрицательную клемму, катодом - в положительную и выключить питание диода.

5.2.2. Выполнить действия по пп. 5.1.3. и 5.1.4. и регистрировать показания вольтметра и мультиметра в таблице 1.2.

Таблица 1.2.

Обратная ветвь вольт-амперной характеристики туннельного диода

U, мВ	30	60	90	120	150			360	390	420	450
I, мА											

5.3. Исследование характеристик резонансного генератора на туннельном диоде.

5.3.1. Тумблером S2 перевести макет в режим измерения характеристик генератора на туннельном диоде.

5.3.2. Вставить туннельный диод в контактную колодку анодом в положительную клемму, катодом - в отрицательную.

5.3.3. Подключить измерительные приборы к макету по схеме на рис. 1.15.

5.3.4. Тумблером S1 включить питание диода; плавно увеличивая напряжение смещения на диоде, вращая винт переменного резистора R2, добиться появления на экране осциллографа периодических колебаний; форму колебаний зарисовать. Плавно увеличивая напряжение смещения, снять показания вольтметра переменного тока В3-38, частотомера Ч3-57 и вольтметра В7-16; данные записать в таблицу 1.3. Напряжение смещения увеличивать вплоть до срыва колебаний.

Таблица 1.3.

Зависимость частоты и амплитуды колебаний автогенератора от напряжения смещения

$U_{см}$, мВ								
$U_{вых}$, мВ								
$F_{вых}$, Гц								

6. Домашнее задание

6.1. Построить графики прямой и обратной ветви ВАХ, сравнить их со справочными данными.

6.2. Оценить величину отрицательного дифференциального сопротивления на участке спада прямой ветви ВАХ.

6.3. Построить графики зависимостей амплитуды и частоты колебаний резонансного генератора от напряжения смещения на туннельном диоде. При этом рекомендуется использовать линейный масштаб.

6.4. Пояснить полученные зависимости на основе теоретических представлений о принципе работы туннельного диода.

7. Контрольные вопросы

7.1. Нарисовать энергетическую диаграмму туннельного диода в равновесном (без смещения) состоянии.

7.2. Пояснить характер прямой ветви ВАХ туннельного диода.

7.3. Пояснить характер обратной ветви ВАХ туннельного диода.

7.4. Приведите примеры применения туннельного диода.

7.5. Объяснить, что такое обращенный диод, нарисовать вид его ВАХ.

7.6. Чем ограничена верхняя частота работы туннельного диода?

7.7. Пояснить принцип работы генератора на туннельном диоде.

7.8. Объяснить характер зависимости амплитуды и частоты колебаний генератора на туннельном диоде от напряжения смещения.

7.9. Пояснить температурную зависимость ВАХ туннельного диода.

8. Рекомендуемая литература

1. Ржевкин, К. С. Физические принципы действия полупроводниковых приборов / К. С. Ржевкин. - М. : Изд-во МГУ, 1986. - 256 с.

2. Викулин, И. М. Физика полупроводниковых приборов / И. М. Викулин, В. И. Стафеев. - М. : Сов. радио, 1980. - 296 с.

4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Исследование фильтров и резонаторов на основе активных диэлектриков

1. Цель работы

Изучить свойства и характеристики пьезокерамических фильтров, фильтров на поверхностных акустических волнах, пьезокерамических излучателей ультразвука и электретных микрофонов, освоить методики измерения характеристик пьезокерамических фильтров.

2. Активные диэлектрики: виды, свойства и характеристики

Активными диэлектриками, или управляемыми диэлектриками, принято называть такие диэлектрики, свойства которых существенно зависят от внешних условий - температуры, давления, напряженности поля и так далее. Такие диэлектрики могут служить рабочими телами в разнообразных датчиках, преобразователях, генераторах, модуляторах и других активных элементах.

К активным диэлектрикам относят сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, электреты, материалы квантовой электроники, суперионные проводники и др. Строгая классификация активных диэлектриков невозможна, поскольку один и тот же материал может проявлять признаки различных активных диэлектриков. Так, сегетоэлектрики часто сочетают свойства пьезоэлектриков. Нет резкой границы и между активными и пассивными диэлектриками. Один и тот же материал в зависимости от условий эксплуатации может выполнять либо функции пассивного изолятора, либо функции преобразующего или управляющего элемента.

2.1. Сегнетоэлектрики

Сегнетоэлектриками называют материалы, обладающие спонтанной поляризацией, направление которой может быть изменено с помощью внешнего электрического поля. В отсутствии внешнего электрического поля сегнетоэлектрики, как правило, имеют доменную структуру, то есть разбиваются на микроскопические области, обладающие спонтанной поляризацией.

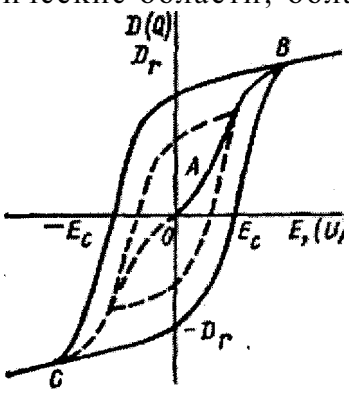


Рис. 2.1. Характеристика поляризуемости сегнетоэлектрика

У ферромагнетиков также имеются домены - области спонтанного намагничивания, поэтому поведение сегнетоэлектриков в электрическом поле подобно поведению ферромагнетиков в магнитном поле Различием между сегнетоэлектриками и ферромагнетиками является то, что при помещении сегнетоэлектриков в электрическое поле меняется вектор электрического смещения **D = E + P** (рис. 2.1), а у ферромагнетиков при помещении в магнитное поле меняется индукция **B = H+I.**

В иностранной литературе сегнетоэлектрики называют ферроэлектриками, поскольку сегнетоэлектрики являются формальными аналогами ферромагнетиков. Отечественное название - сегнетоэлектрики - произошло от сегнетовой соли, двойной калий-натриевой соли винно-каменной кислоты ($NaKC_4H_4O_6$). Сегнетова соль была первым материалом, в котором обнаружена спонтанная поляризация; ее свойства были исследованы И. В. Курчатовым и П. П. Кобеко в начале 30-х годов двадцатого века. Монокристаллы сегнетовой соли нашли широкое применение для изготовления различных приборов в годы Великой Отечественной войны; в настоящее время сегнетова соль утратила свое техническое значение из-за низкой влагостойкости и низких механических свойств. Фундаментальные и прикладные работы по сегнетоэлектричеству интенсивно начали развиваться после открытия Б. М. Вулом (1944 г.) сегнетоэлектрических свойств титаната бария $BaTiO_3$.

Химические связи в $BaTiO_3$ ионно-ковалентные. Титанат бария кристаллизуется в структуру типа перовскит. Элементарную ячейку решетки такого типа можно представить следующим образом: основу структуры составляют кислородные октаэдры, в центре которых расположены ионы титана. В свою очередь, ионы кислорода центрируют грани куба, составленного из ионов бария (рис. 2.2.).

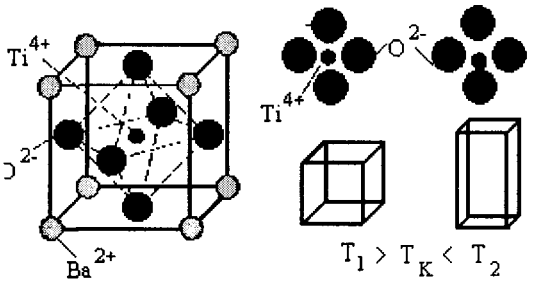


Рис. 2.2. Структура кристаллической решетки титаната бария

Размеры элементарной ячейки больше удвоенной суммы ионных радиусов ионов титана и кислорода, и ион титана имеет некоторую свободу перемещения в кислородном октаэдре. Понижение температуры ведет к снижению кинетической энергии иона титана и при некоторой температуре (ниже 120 °С) он локализуется вблизи одного из ионов кислорода. В результате, симметрия в расположении заряженных частиц нарушается, и элементарная ячейка приобретает дипольный момент. В соседней элементарной ячейке ион титана смещается к отрицательному полюсу образовавшегося диполя. Таким образом, соседние элементарные ячейки становятся спонтанно поляризованными. Одновременно со спонтанной поляризацией идет деформация кристаллической решетки и кубическая решетка становится ромбоэдрической. Выше некоторой температуры (температуры Кюри) сегнетоэлектрики переходят в параэлектрическое состояние, и кристаллическая решетка становится симметричной. Изменение типа кристаллической решетки при переходе через точку Кюри называть фазовым переходом второго рода.

Образование доменов в кристаллах сегнетоэлектриков связано с тем, что, когда все соседние элементарные ячейки кристалла поляризованы в одном и том же направлении, вокруг кристалла появляется внешнее электрическое поле. Наличие электрического поля повышает энергию системы и для снижения энергии кристалл самопроизвольно разбивается на домены. Поскольку ниже температуры Кюри симметрия кристаллической решетки уменьшается, то число направлений, вдоль которых выгодна спонтанная поляризация соседних кристаллических решеток, сравнительно мало.

Такими направлениями будут направления типа <111>. Соответственно соседние домены могут быть разориентированы на 180 или на 90 градусов (рис. 2.3.). Поскольку суммарные электрические моменты соседних доменов антипараллельны или перпендикулярны, то в целом кристалл сегнетоэлектрика не обладает электрическим моментом.

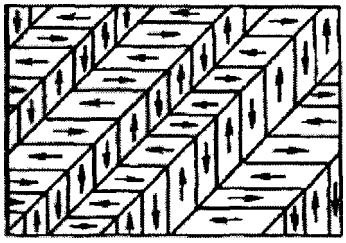


Рис. 2.3. Доменная структура сегнетоэлектрика

На границах доменов происходит постепенный поворот дипольных моментов из одного направления в другое, аналогично повороту магнитного момента в ферромагнетиках. В этом еще одно сходство сегнетоэлектриков с ферромагнетиками.

При помещении сегнетоэлектрика в электрическо ...еют миним... снижения суммарной энергии материала эти домены ра ...ия сегнето... как благоприятно ориентированные домены заполнят в ...ции прекра...

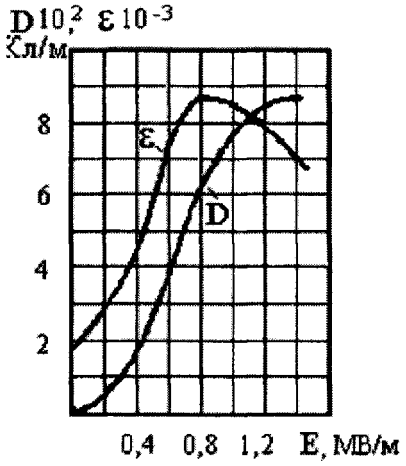


Рис. 2.4. Зависимость электрического смещения и диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля

трического поля $\varepsilon = D/E$. Таким образом, в области резкого роста поляризации диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков максимальна.

Такая зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков от напряженности электрического поля позволяет использовать такие материалы для изготовления датчиков напряженности электрического поля и варикондов - нелинейных конденсаторов, емкость которых зависит от приложенного напряжения.

Сильное влияние на поведение диэлектриков в электрическом поле оказывает и температура. При повышении температуры кинетическая энергия ионов возрастает и взаимодействие между ионами кислорода и титана, образующими дипольные моменты, ослабевает, поворот диполей облегчается и максимум поляризации наблюдается при меньших значениях напряженности электрического поля. Следовательно, диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков растет. При равенстве энергии электростатического взаимодействия ионов кислорода и титана с кинетической энергией колебаний ионов титана сегнетоэлектрик переходит в параэлектрическое состояние; при этом диэлектрическая проницаемость достигает максимума (рис. 2.5).

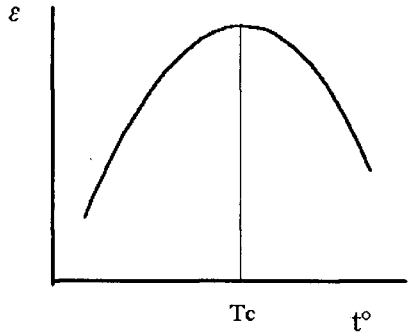


Рис.2.5. Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры

Дальнейший рост температуры приводит к тому, что тепловые колебания разориентируют диполи и диэлектрическая проницаемость снижается. Отсюда следуют две важных вывода: во-первых, сегнетоэлектрики можно использовать для изготовления датчиков температуры; во-вторых, изменение энергии электростатического взаимодействия между ионами и изменение массы ионов при легировании позволяет изменять температуру Кюри.

2.2. Пьезоэлектрики

Работа приборов пьезоэлектроники основана на ***пьезоэлектрическом эффекте,*** который был открыт в 1880 г. французскими учеными братьями П. Кюри и Ж. Кюри. Слово «пьезоэлектричество» означает «электричество от давления». ***Прямой пьезоэлектрический эффект*** или просто ***пьезоэффект*** состоит в том, что при давлении на некоторые кристаллические тела, называемые пьезоэлектриками, на противоположных гранях этих тел возникают равные по величине, но разные по знаку электрические заряды. Если изменить направление деформации, т. е. не сжимать, а растягивать пьезоэлектрик, то заряды на гранях изменят знак на обратный.

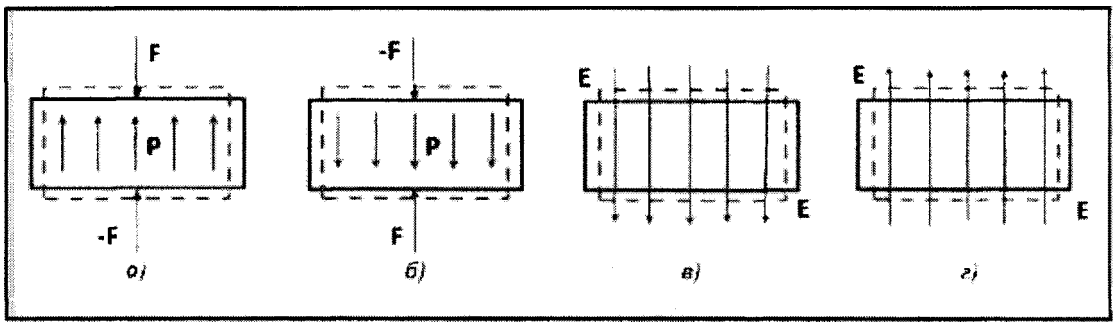


Рис. 2.6. Схематичные изображения прямого (а, б) и обратного (в, г) пьезоэффектов. F и E - механическая сила и напряженность электрического поля. Штриховые линии - контуры пьезоэлектрика до внешнего воздействия, сплошные линии - контуры деформации пьезоэлектрика (для наглядности во много раз увеличены); P - вектор поляризации

К пьезоэлектрикам относятся некоторые естественные или искусственные кристаллы, например, кварц или сегнетова соль, а также специальные пьезоэлектрические материалы, например, титанат бария. Пьезоэффект наблюдается в анизотропных диэлектриках, преимущественно в кристаллах некоторых веществ, обладающих определенной, достаточно низкой симметрией. Пьезоэффектом могут обладать кристаллы, не имеющие центра симметрии, а имеющие так называемые полярные направления (оси). Пьезоэффектом могут обладать также некоторые поликристаллические диэлектрики с упорядоченной структурой (текстурой), например керамические материалы и полимеры.

Кроме прямого пьезоэффекта наблюдается также и ***обратный пьезоэффект*** (не путать с электрострикцией - явлением свойственным всем диэлектрикам но гораздо слабее обратного), который состоит в том, что под действием электрического поля пьезоэлектрик сжимается или расширяется в зависимости от направления вектора напряженности поля. У кристаллических пьезоэлектриков интенсивность прямого и обратного пьезоэффекта зависит от того, как направлена относительно осей кристалла механическая сила или напряженность электрического поля.

Прямой и обратный пьезоэффект линейны и описываются линейными зависимостями. Электрическая поляризация P связана с механическим напряжением t соотношением: $P = d \cdot t$; коэффициент пропорциональности d называется пьезоэлектрическим модулем (пьезомодулем). Обратный пьезоэффект описывается зависимостью: $r = d \cdot E$, где r - деформация; E - напряженность электрического поля. Пьезомодуль d для прямого и обратного эффектов имеет одно и то же значение.

Выражения даны в упрощенной форме для уяснения качественной стороны пьезоэффекта. В действительности пьезоэлектрические явления в кристаллах более сложны, что обусловлено анизотропией их упругих и электрических свойств.

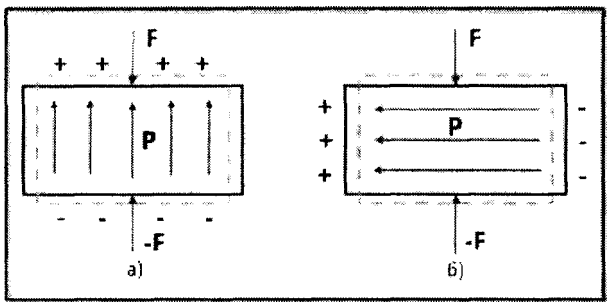


Рис. 2.7 Схематичные иллюстрации продольного (а) и поперечного (б) пьезоэффекта

Пьезоэффект зависит не только от величины механического или электрического воздействия, но и направления сил относительно кристаллофических осей кристалла и описывается несколькими пьезомодулями, число которых зависит от симметрии кристалла. Существуют направления, для которых пьезоэффект равен нулю. При совпадении направлений поляризации и механического напряжения пьезоэффект называют ***продольным,*** а при их взаимно перпендикулярном расположении - ***поперечным.***

Деформации пьезоэлектрика, возникающие вследствие пьезоэффекта, весьма незначительны по абсолютной величине. Например, кварцевая пластина толщиной 1 мм под действием напряжения 100 В изменяет свою толщину всего на 2,3 х 10" мм. Это объясняется очень высокой жесткостью пьезоэлектриков.

Из кристаллов пьезоэлементы вырезают определенным образом, соблюдая ориентацию относительно осей кристалла. На практике применяют пьезоэлектрики различной формы: прямоугольные или круглые пластинки, цилиндры, кольца. Пьезоэлемент помещают между металлическими обкладками или наносят металлические пленки на противоположные грани пьезоэлемента. В результате получается конденсатор с диэлектриком из пьезоэлектрика. Если к такому пьезоэлементу подвести переменное напряжение, то пьезоэлемент за счет обратного пьезоэффекта будет сжиматься и расширяться, т. е. совершать механические колебания: энергия электрических колебаний превращается в энергию механических колебаний с частотой, равной частоте приложенного переменного напряжения. Так как пьезоэлемент обладает определенной частотой собственных колебаний, то может наблюдаться явление резонанса. Наибольшая амплитуда колебаний пьезоэлемента получается при совпадении частоты внешней ЭДС с собственной частотой колебаний пластинки. Имеется несколько резонансных частот, соответствующих различным типам колебаний пластинки.

Под воздействием внешней переменной механической силы на пьезоэлементе возникает переменное напряжение той же частоты. В этом случае механическая энергия преобразуется в электрическую и пьезоэлемент становится генератором переменной ЭДС. Таким образом пьезоэлемент является колебательной системой, в которой могут происходить электромеханические колеба-

ния; он эквивалентен обычному колебательному контуру, состоящему из катушки и конденсатора, в котором энергия электрического поля в конденсаторе переходит в энергию магнитного поля катушки и наоборот.

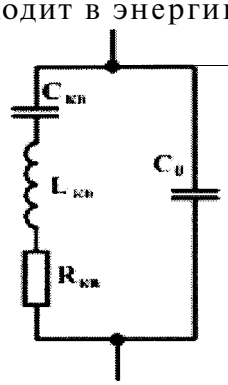


Рис. 2.8. Эквивалентная схема пьезоэлемента

В пьезоэлементе механическая энергия периодически переходит в электрическую. Эквивалентная схема пьезоэлемента показана на рис. 2.8. Индуктивность L отражает инерционные свойства пьезоэлектрической пластинки, емкость C характеризует упругие свойства пластинки, активное сопротивление R - потери энергии при колебаниях. Емкость C_0 называется статической и представляет собой обычную емкость между обкладками пьезоэлемента и не связана с его колебательными свойствами.

Большую группу пьезоэлектрических приборов представляют различные пьезодатчики, реагирующие на температуру, давление, перемещение, ускорение. Работа таких датчиков основана на эффектах изменения резонансной частоты пьезоэлемента при изменении его геометрических размеров. На использовании прямого пьезоэффекта работают пьезоэлектрические микрофоны и звукосниматели. В них применяется сегнетова соль или пьезокерамика. Эти же материалы используются в пьезоэлектрических телефонах и динамиках, работающих на основе обратного пьезоэффекта.

3. Устройства на основе активных диэлектриков

3.1. Пьезоэлектрические трансформаторы

Широкое применение в различных радиоэлектронных устройствах нашли ***пьезоэлектрические трансформаторы*** (ПЭТ), в которых пьезоэлемент имеет три и более электродов, подключенных к источникам переменного напряжения и нагрузке. Так же, как и обычные трансформаторы с обмотками, ПЭТ могут увеличивать сигнал по напряжению или по току, преобразовывать нагрузочное сопротивление, осуществлять фазовый сдвиг на 180°. Бывают ПЭТ узкополосные, работающие на частотах, близких к одной резонансных частот пьезоэлемента, или широкополосные.

Чаще всего ПЭТ являются трансформаторами напряжения, но если они рассчитаны на большие токи - в несколько ампер, то их называют трансформаторами тока. Часть ПЭТ, подключенная к источнику переменного напряжения, называется ***возбудителем***, а часть, подключенная к нагрузке - ***генератором.*** В возбудителе за счет обратного пьезоэффекта энергия электрических колебаний переходит в энергию акустических волн, которые распространяются по направлению к генератору. В нем за счет прямого пьезоэффекта энергия механических колебаний преобразуется в электрическую; коэффициент трансформации будет максимальным на резонансных частотах.

В простейшем виде ПЭТ делается из двух пьезокерамических брусков, склеенных друг с другом. Один брусок служит возбудителем, другой - генера-

тором. Оба бруска сделаны из пьезокерамики различного состава, так как к материалам возбудителя и генератора предъявляются разные требования. В зависимости от расположения электродов на возбудителе и генераторе возможны трансформаторы различных типов. Наибольшее применение получили трансформаторы поперечно-продольного типа, который показан на рис. 2.10.

У такого трансформатора электрическое поле в возбудителе направлено поперек, а в генераторе - вдоль. В зависимости от соотношения размеров коэффициент трансформации напряжения в режиме холостого хода может достигать нескольких тысяч.

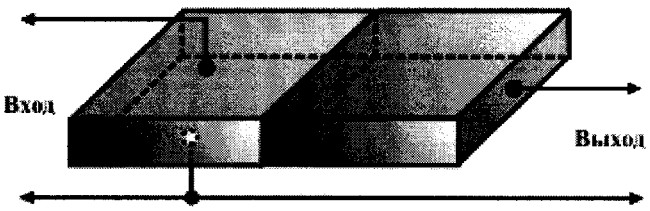


Рис. 2.10. Пьезоэлектрический трансформатор поперечно-продольного типа

Помимо «брусковых» в электронных устройствах применяются и другие ПЭТ - дисковые, цилиндрические, кольцевые. Пьезотрансформаторы используются в различных схемах при мощности до нескольких десятков ватт, их КПД достигает 80-95%. Достоинства ПЭТ - простота, низкая стоимость, малая масса, возможность микроминитюаризации для применения в микросхемах, возможность работы как на низких, так и на высоких частотах. Недостаток ПЭТ - отсутствие проводимости для постоянной составляющей тока, что не позволяет применять их в некоторых конструкциях.

3.2. Резонаторы на активных кристаллах

3.2.1. Кварцевые резонаторы

Одним из первых пьезоэлектрических приборов был ***кварцевый резонатор,*** имеющий очень высокую стабильность частоты колебаний. Кварцевый резонатор применяется для стабилизации частоты генераторов и радиопередатчиков. Особенно высокая стабильность достигается, если кварц поместить в термостат. Собственная резонансная частота кварца зависит от его геометрических размеров.

На рис. 2.9. приведен пример схемы генератора с кварцевой стабилизацией. Кварцевый резонатор задает на вход транзистора колебания со стабильной частотой, а усиленные колебания получаются в колебательном контуре, включенном в выходную, коллекторную цепь. Обратная связь, необходимая для самовозбуждения генератора, осуществляется через емкость коллектор-база. Если эта емкость недостаточна, то между коллектором и базой включают дополнительный конденсатор. Резисторы R1 и R2 включены для обеспечения прямого смещения эмиттерного перехода.

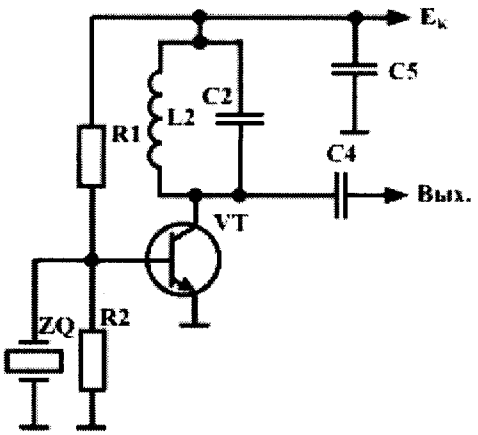


Рис 2.9. Схема простого генератора с кварцевой стабилизацией

Добротность кварцевых резонаторов, т. е. отношение запасаемой реактивной энергии к энергии потерь, очень велика и составляет $10^4 \div 10^6$. В соответст-

вии с ***эквивалентнойсхемой*** кварц имеет две основные резонансные частоты: для последовательного резонанса (резонанса напряжений) и параллельного резонанса (резонанса токов), при котором частота резонанса выше.

Пьезорезонаторы могут быть сделаны и из пьезокерамики, однако добротность при этом снижается и составляет $10^2 \div 10^4$. В таблице 2.1. для примера приведены краткие сведения о двух типах кварцевых резонаторов.

Таблица 2.1.

	Кварцевые резонаторы АТ-среза РК206АА изготовляются в стандартном микроминиатюрном металлическом корпусе. Применяются в микропроцессорной и портативной аппаратуре, средствах связи и вычислительных устройствах бытового и промышленного назначения.		
Диапазон частот, кГц	Точность настройки, ppm	Динамическое сопротивление, Ом	Тип корпуса
32,768	±20	50	DT-26
	Кварцевые резонаторы АТ-среза РК374 производятся в стандартных малогабаритных металлических корпусах, предназначенных как для объемного монтажа, так и для монтажа на поверхность. Применяются как в схемах тактовых генераторов, так и в сложной радиосвязной аппаратуре бытового и промышленного назначения. По параметрам аналогичны резонаторам РК169, РП-97, РГ05, РК8, РК112, РК188, РК242 и являются эффективной заменой этих изделий		
Диапазон частот, МГц	Точность настройки, ppm	Динамическое сопротивление, Ом	Тип корпуса
3-125	±5...±200	30...200	HC-49U

3.2.2. Резонаторы на поверхностных акустических волнах

Основой резонатора на ПАВ является кварцевая пластина, вырезанная из монокристалла кварца или ниобата лития с определенной ориентацией относительно осей монокристалла. На поверхность пластины нанесен тонкий слой металла; чаще всего алюминия. В металле методом фотолитографии сформирована структура резонатора, состоящая из одного или двух преобразователей на встречных штырях (ВШП) и двух отражательных решеток (рис. 2.11.).

Электрический ВЧ сигнал посредством одного ВШП создает на поверхности кварца механические (акустические) колебания, распространяющиеся в виде волны, другой ВШП принимает акустическую волну. Такая волна получила название - поверхностная акустическая волна (ПАВ). ПАВ были впервые описаны лордом Релеем в 1885.

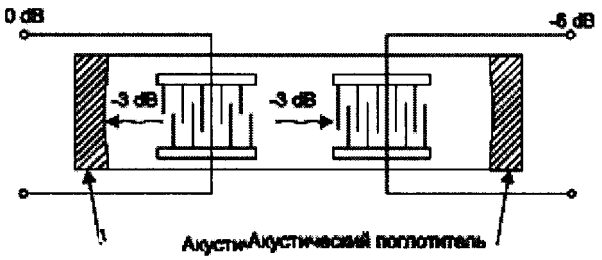


Рис. 2.11. Структура ПАВ с ВШП на пьезоэлектрической подложке

ПАВ распространяются вдоль поверхности и проникают в глубину кристалла на расстояние 2-3 длины волны. Скорость таких волн на пять порядков меньше скорости света и на маленькой подложке можно воспроизвести сотни и тысячи периодов радиоимпульса. Максимальная эффективность преобразования достигается на частоте синхронизма, когда длина волны акустических колебаний

совпадает с пространственным периодом электродов преобразователя. Так, на частоте 433,92 МГц длина волны акустических колебаний составляет 7 мкм.

Две решетки на частоте синхронизма работают как два зеркала, отражая акустическую волну. За счет сохранения и накопления энергии механических колебаний в области между решетками на резонансной частоте образуется высокодобротная колебательная система. Длина всей системы составляет несколько сотен длин волн, а общая длина кварцевой подложки резонатора с частотой 433,92 МГц не превышает 3 мм. Существуют три основных типа резонаторов: одновходовый, двухвходовый и связанный. На рис. 1 показаны структуры этих типов резонаторов и приведены соответствующие эквивалентные схемы, которые достаточно хорошо моделируют частотную характеристику вблизи резонансной частоты.

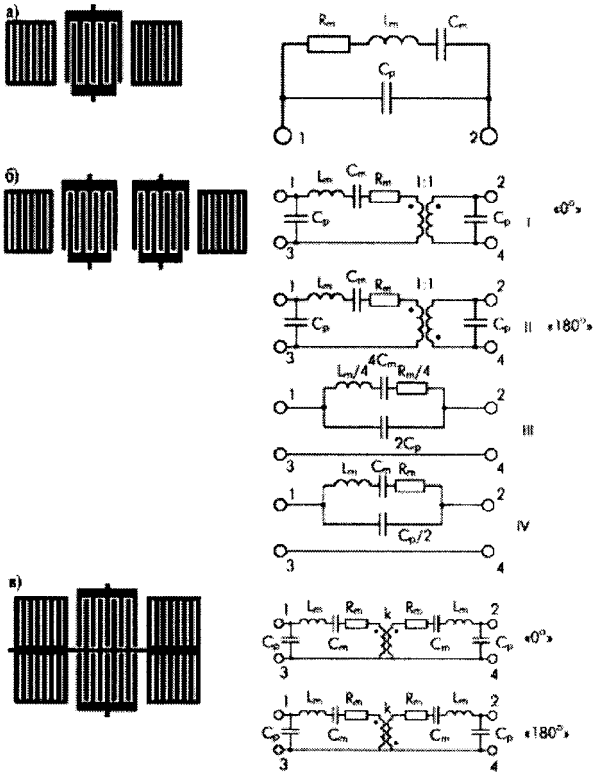


Рис. 2.12. Структуры и эквивалентные схемы резонаторов: а) одновходовый; б) двухвходовый; в) связанный

В таблице 2.2. в качестве примера приведены типовые значения основных параметров одновходовых резонаторов с частотой 433,92 МГц.

Таблица 2.2.

Типовые значения основных параметров резонаторов РК1825, РК1912, РК1412

Наименование параметра, единица измерения	Буквенное обозначение	РК1825	РК1912	РК1412
1. Номинальная частота резонанса, МГц	f_0	433,92	433,92	433,92
2. Точность настройки, кГц, не более по группе 50, по группе 75, по группе 150	F	±35 ±60 ±135	±35 ±60 ±135	±35 ±60 ±135
3. Вносимые потери в тракте 50 Ом, дБ	a	1,1	1,25	1,25
4. Добротность собственная	Qu	12400	12100	12100
5. Статическая емкость, пФ	Co	2,5	2,10	2,10
6. Динамическое сопротивление, Ом	Rm	13,8	16	16
7. Максимальное изменение рабочей частоты в диапазоне температур (-40; +85°С), кГц	Fт	60	60	60
8. Тип корпуса		QCC8	To-39	SIP-4M

Внешний вид и основные размеры корпусов резонаторов 433,92 МГц приведены на рис. 2.13. Для этих резонаторов используется SMD-корпус с размерами 5x5 мм (QCC8) и реже металло-стеклянные корпуса типа ТО-39 и SIP-4M.

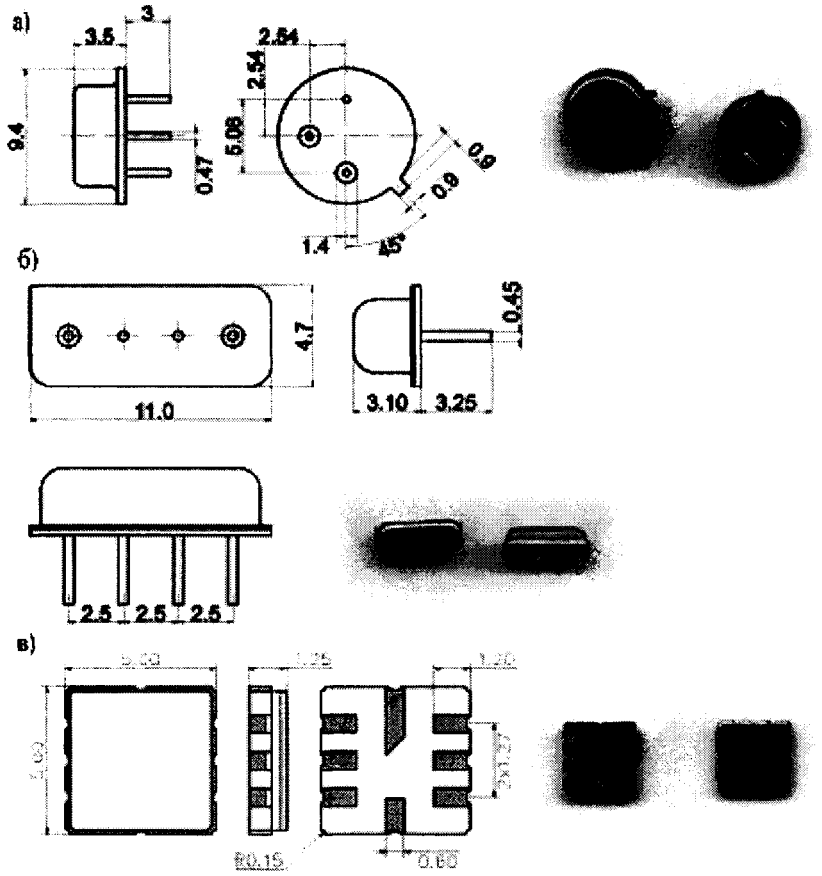


Рис. 2.13. Внешний вид и чертежи корпусов: а) корпус ТО-39; б) корпус SIM-4M; в) корпус QCC8

Резонаторы РК1912, РК1412 изготавливаются с использованием единого кристаллического элемента и отличаются только конструкцией корпуса. Частотные характеристики этих резонаторов имеют вид, приведенный на рис. 2.14.

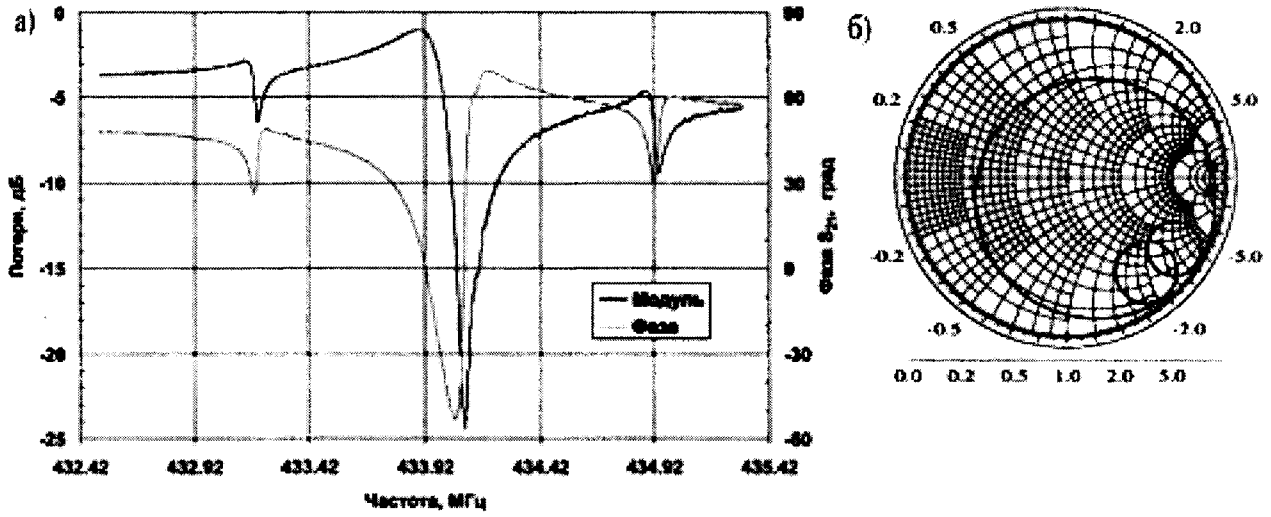


Рис. 2.14. Характеристики резонаторов РК1912 и РК1412: а) модуль и фаза коэффициента передачи в тракте 50 Ом; б) импеданс резонатора на круговой диаграмме

Характеристики для резонатора РК1825, выпускающегося в керамическом корпусе для монтажа на поверхность печатной платы, приведены на рис. 2.15.

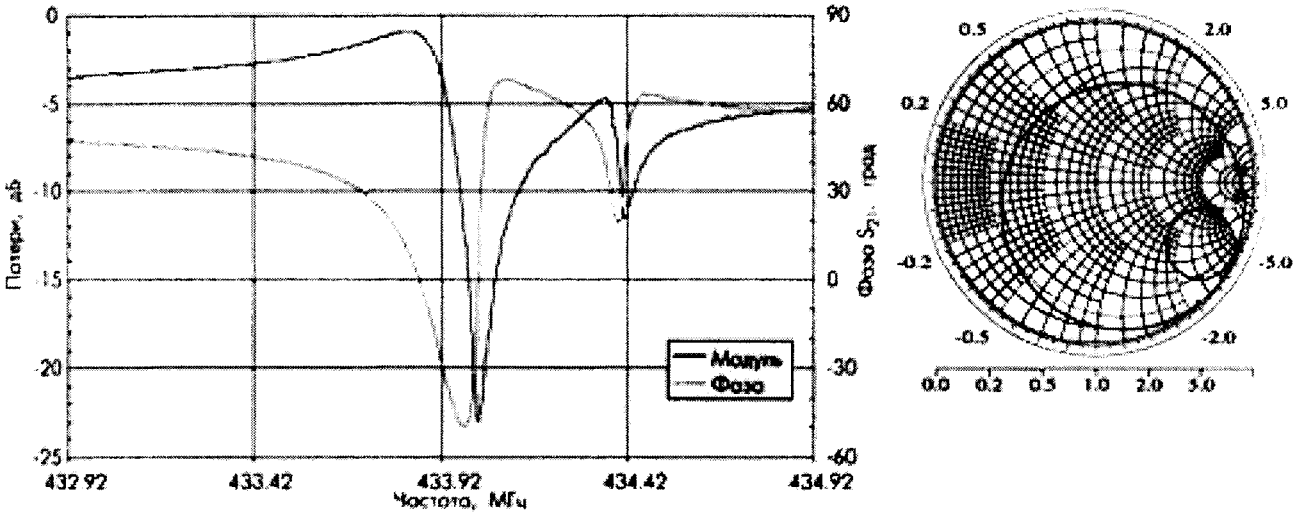


Рис. 2.15. Характеристики резонатора РК1825: а) модуль и фаза коэффициента передачи в тракте 50 Ом; б) импеданс резонатора на круговой диаграмме

Резонаторы на ПАВ хорошо зарекомендовали себя в качестве элемента стабилизации частоты задающего генератора для маломощных передающих устройств. Такие устройства нашли широкое применение в радиотехнических системах малого радиуса действия. Специально для приборов, относящихся к этому классу систем, выделена полоса частот шириной 1,72 МГц в диапазоне частот 433,05...434,79 МГц. Использование диапазона регламентируется Европейским стандартом I-ETS 300 220 (433,92 МГц).

Основные преимущества резонаторов на ПАВ:

- кварцевая стабильность частоты во времени и в диапазоне температур;
- низкий уровень фазовых шумов, обеспечивающий исключительно высокую чистоту спектра генерируемого сигнала;
- высокая добротность;
- относительно высокий уровень допустимой рассеиваемой мощности;
- высокая устойчивость к внешним механическим воздействиям;
- миниатюрность;
- высокая воспроизводимость эквивалентных параметров;
- низкая цена.

4. Фильтры на основе активных диэлектриков

4.1. Кварцевые, пьезоэлектрические, электромеханические фильтры

В многоканальной аппаратуре связи, в устройствах автоматики, телемеханики, телерадиовещания и других селективных устройствах широкое применение находят кварцевые, пьезоэлектрические и электромеханические фильтры, характеризующиеся высокой избирательностью, стабильностью, широким диапазоном рабочих частот и полос пропускания и высокой надежностью.

В качестве традиционных материалов для изготовления пьезоэлектрических фильтров используются кварц и пьезокерамика. В настоящее время все более широкое применение находят такие пьезоматериалы, как титанат бария ($BaTiO_3$) ниобат лития ($LiNbO_3$) и танталат лития ($LiTaO_3$), на которых реализуются ВЧ фильтры. Все многообразие пьезоэлектрических фильтров принято классифицировать по трем основным признакам:

1. **По материалу пьезоэлемента:**

- Кварцевые фильтры - имеющие в своей основе кварцевые резонаторы;
- Пьезокерамические фильтры - созданные на основе пьезокерамики;
- Пьезокристаллические фильтры - использующие другие пьезоэлектрики.

2. **По функциональному назначению:**

- полосовые фильтры - имеющие полосу пропускания между двумя полосами задерживания;
- режекторные фильтры - имеющие одну или более полос непропускания (режекции), расположенные между определенными полосами пропускания;
- дискриминаторные фильтры - предназначенные для преобразования напряжения переменного тока в напряжение постоянного тока на выходе фильтра с изменяющейся по величине и знаку амплитудой;
- гребенки полосовых фильтров - с определенным законом расположения полос пропускания на частотной оси с заданным уровнем пересечения частотной характеристики затухания;
- фильтры одной боковой полосы (ОБП) - предназначенные для выделения верхней или нижней боковой полосы спектра модулированного сигнала.

3. **По конструктивно-технологическому исполнению:**

- дискретные фильтры - сочетание пьезоэлектрических резонаторов с дискретными элементами, связь между которыми осуществляется гальванически;
- монолитные фильтры - фильтры с акустической связью между резонаторами, размещенными на одной пьезоэлектрической подложке;
- интегральные фильтры - фильтры, все элементы которых выполнены на пьезоэлектрической подложке;
- гибридные фильтры - фильтры, имеющие в своем составе дискретные элементы и элементы, нанесенные на одну или несколько подложек.

В основе работы монолитных, интегральных и гибридных фильтров лежит распространение объемных акустических волн (ОАВ) в пьезоэлементе. В пьезоэлектрических фильтрах на поверхностных акустических волнах (ПАВ) частотно-избирательные свойства осуществляются за счет передачи-приема акустических волн, распространяющихся вдоль поверхности пластины пьезоэлектрика.

Электромеханические фильтры (ЭМФ), которые имеют в своем составе электромеханические и механические резонаторы.

В таблице 2.3. представлены данные о некоторых типах фильтров, используемых в современной радиоэлектронной аппаратуре.

Таблица 2.3.

Области реализуемых частот и полос пропускания фильтров

Вид фильтров	Диапазон изменения частоты, МГц	Диапазон изменения ширины полосы, %
Дискретные полосовые кварцевые фильтры	0,008 ... 93,500	0,00053 ...4,61000
Монолитные полосовые кварцевые фильтры	2,048 ... 210,000	0,0084 ... 0,6000
Дискретные режекторные кварцевые фильтры	0,010 ... 42,075	0,0066 ... 0,1000
Монолитные режекторные кварцевые фильтры	5,040 ... 20,000	0,0065 ... 0,0700
Дискретные дискриминаторные кварц. фильтры	0,25 ... 11,05	0,0427 ... 0,5800
Монолитные дискриминаторные кварц. фильтры	5,0475	0,059
Пьезокристаллические фильтры на ОАВ	5,038 ... 15,000	0,7... 4,2
Пьезокристаллические фильтры на ПАВ	8 ... 400	1 ... 25
Пьезокерамические фильтры	0,064 ... 10,76	0,83 - 8,38
Электромеханические фильтры	0,001...0,500	0,05...3,75

4.2. Фильтры на поверхностных акустических волнах

По назначению устройства на ПАВ можно разделить на несколько классов: полосовые фильтры для обработки сигналов на промежуточных частотах, линии задержки, резонаторы, фильтры с малыми потерями для входных цепей приемников, антенные дуплексоры для связных приемников, в том числе систем AMPS, GSM, CDMA. В новом поколении сотовой телефонии IMT-2000 разделение доступа осуществляется с помощью акустоэлектронного конвольвера [1]. ***Дуплексоры*** - двухканальные фильтры, которые осуществляют разделение по частоте тракта передачи и тракта приема; они имеет один вход, соединенный с антенной, и два выхода, присоединенных к выходу передающего тракта и ко входу приемного тракта, соответственно. ***Конвольвер*** - шестиполюсник, формирующий свертку двух сигналов: входного и опорного, используя нелинейные свойства среды распространения упругих волн.

Фильтры на ПАВ имеют коммерческое применение на частотах от 30 МГц до 3 ГГц. На НЧ габариты фильтров становятся слишком большими и вместо них применяют монолитные пьезокерамические фильтры на объемных волнах. На частотах выше 3 ГГц разрешающая способность фотолитографического процесса не позволяет получить высокий процент выхода годных изделий, и цена таких фильтров становится неконкурентной по сравнению с другими решениями. На ВЧ применяются электромагнитные керамические фильтры на связанных полостях.

Основными системами, в которых возможно применение фильтров на частотах от нескольких МГц до 20 ГГц, являются следующие: AMPS, глобальная система связи с подвижными объектами (GSM), NMT450 - 900 MHz, DECT, системы многостанционного доступа с кодовым разделением каналов (CDMA), цифровая сотовая связь (DCS), персональная радиотелефонная связь (PCN), беспроводная локальная вычислительная сеть (Wireless LAN), сотовые базовые станции и абонентские подвижные радиостанции: TETRA, PMR, UMTS.

Большинство преимуществ ПАВ-устройств обусловлено их физической структурой: малым весом и габаритами; линейной фазой; фактором формы, близким к единице (высокая прямоугольность); исключительным внеполосным подавлением; температурной стабильностью. Поскольку центральная частота и форма частотной характеристики определяются топологией, они не требуют сложной настройки в аппаратуре и не изменяются в процессе эксплуатации. Технология изготовления, совместимая с полупроводниковым производством, позволяет выпускать их в большом объеме с высокой воспроизводимостью.

Фильтры реализуются на основе связи нескольких резонаторов. При этом необходимо обеспечить компромисс между числом резонаторов, полосой пропускания, вносимыми потерями и подавлением в полосе пропускания. Увеличение числа резонаторов даст лучшее ослабление и/или увеличенную полосу пропускания, но более высокие потери. Увеличение числа элементов в резонаторе уменьшает потери, но увеличивает размер фильтра.

Схема построения современного радиотракта показана на примере блок-схемы PCS-приемника (рис. 2.16). Приемник предназначен для работы в диапазоне 915 МГц и в нем использованы два типа фильтров на ПАВ (915 и 70,875 МГц) и один керамический на объемных волнах. Фильтр на 915 МГц должен обладать малыми потерями и обеспечивать подавление зеркальных каналов не менее, чем на 50 дБ.

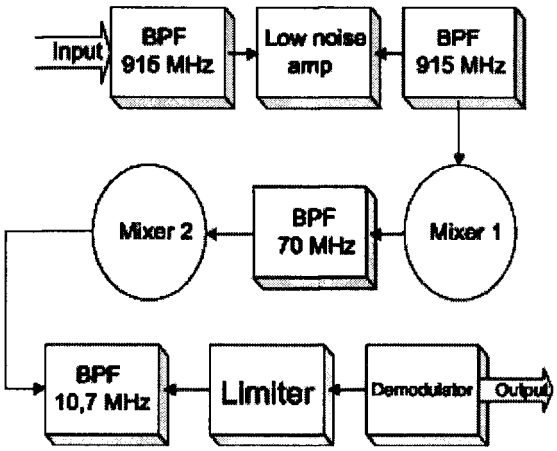


Рис. 2.16. Блок схема PCS приемника

Фильтр на 70 МГц используется для обработки сигнала на первой промежуточной частоте. К нему предъявляются очень высокие требования по равномерности частотной характеристики в полосе пропускания. Для отстройки от соседних каналов от должен иметь очень крутые скаты и обеспечивать высокое внеполосное заграждение. На характеристики ПАВ-фильтров также сильно влияют условия согласования с нагрузкой. Наиболее сильным нежелательным эффектом является сигнал тройного эха, который вызван отражением от преобразователей в силу двунаправленности последних. Обычно фирма-производитель рекомендует номиналы согласующих цепей для включения в 50-Ом тракт.

Всем перечисленным требованиям отвечает фильтр, разработанный для базовой станции сотовой связи с кодовым разделением доступа CDMA-ONE. Фильтр выполнен на ST-Кварце, который обеспечивает исключительную термостабильность. На рис. 2.17. приведены характеристики фильтра на 70 Мгц: модуль коэффициента передачи (а), импульсная характеристика (б), развернутая полоса пропускания (в) и отклонение фазы от линейной в полосе пропускания (г). Вносимые потери составляют 23 дБ, неравномерность частотной характеристики менее 1 дБ. Другими средствами сложно обеспечить столь высокую прямоугольность наряду с хорошей неравномерностью в полосе пропускания.

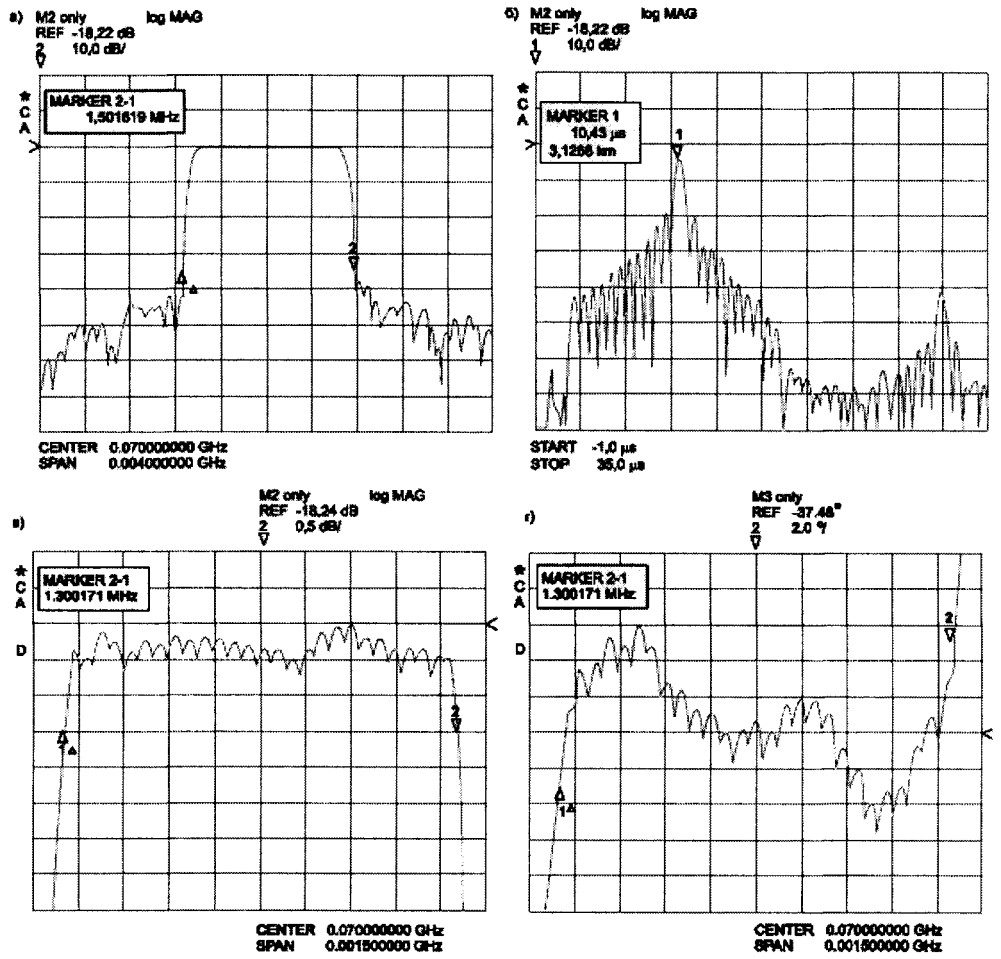


Рис. 2.17. Характеристики фильтра на 70 МГц

При планировании коммуникационных сетей приходится учитывать реальную обстановку в эфире. Помехи, не попадающие непосредственно в спектр сигнала, могут ухудшать условия приема. Для борьбы с детерминированными помехами служат заграждающие фильтры. Они пропускают очень широкую полосу частот с малыми потерями, но не пропускают заданную узкую полосу частот. Такие фильтры проектируются на основе мостовой схемы, в плечи которой включаются резонансные элементы на ПАВ.

Особый класс – это фильтры с малыми потерями для входных цепей приемников. Такие фильтры используются на частотах от десятков МГц до 3 ГГц, а полосы пропускания - от долей процента до 25%. Вносимые потери в таких фильтрах приближаются к 1 дБ. На рис. 2.18 показана частотная характеристика фильтра на 102 МГц с полосой 200 кГц. Фильтр выполнен на ST-Кварце, имеет вносимые потери 3 дБ и очень маленькие габариты.

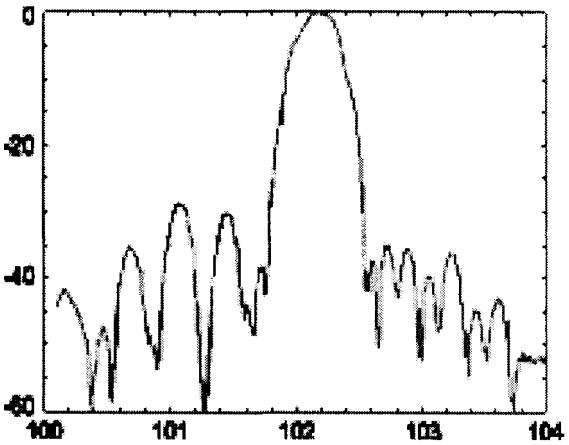


Рис. 2.18. Частотная характеристика фильтра на 102 МГц

5. Описание лабораторного макета

Лабораторный макет представляет собой блок (металлическую коробку), содержащий контактную колодку для подключения фильтров и резонаторов различного типа и входной и выходной разъемы - для подключения ВЧ генератора, осциллографа и вольтметра переменного тока, соответственно. Для задания сигнала на входе фильтра используется генератор Г3-154. Для наблюдения и измерения сигнала на выходе фильтра используется осциллограф С1-108 и вольтметр В3-38.

6. Лабораторное задание

6.1. Установить пьезокерамический фильтр ФП1П1 в контактную колодку, подать на вход сигнал с генератора, выходное напряжение генератора установить величиной 5 В. Начальное значение частоты установить 100 МГц. Запустить режим нарастания частоты генератора и по изменению уровня сигнала на экране осциллографа определить примерный диапазон частот сигнала, пропускаемых фильтром.

6.2. Плавно изменяя частоту генератора и записывая показания вольтметра В3-38, измерить детально амплитудно-частотную характеристику фильтра в области частот сигнала, пропускаемых фильтром. В области пропускания измерения проводить через каждые 0,2 МГц. Повторить измерения для нескольких (2-3) образцов фильтра. Результаты измерений оформить в таблицу 2.4.

Таблица 2.4.

Амлитудно-частотная характеристика акустоэлектронного элемента

Частота, МГц	400	405		495	500
Амплитуда, В					
Амплитуда, дБ					

6.3. Установить в колодку пьезокерамический фильтр SFE 5.5 и выполнить измерения по п. 6.1.-6.2. в соответствующем диапазоне частот.

6.4. Установить в контактную колодку фильтр на ПАВ и повторить измерения по пп. 6.1.-6.2. в соответствующем диапазоне частот. Шаг изменения частоты вблизи и в диапазоне полосы пропускания фильтра выбирать не более чем два младших разряда цифрового индикатора генератора.

6.5. Исследовать характеристику пьезокерамического резонатора (или резонатора на ПАВ). Для этого вставить резонатор в контактную колодку и повторить измерения по пп. 6.1.-6.2.

7. Домашнее задание

7.1. Построить частотные характеристики исследованных элементов, провести их анализ и сравнение с приведенными в справочной литературе.

7.2. Определить добротность исследованных резонаторов
7.3. Рассчитать полосу пропускания исследованных фильтров.
7.4. Рассчитать подавление сигнала в полосе пропускания.

8. Контрольные вопросы

8.1. Пояснить природу сегнетоэлектричества.
8.2. Что такое прямой и обратный пьезоэффекты?
8.3. Пояснить конструкцию и принцип работы пьезотрансформатора
8.4. Нарисовать и пояснить эквивалентную схему кварцевого резонатора
8.5. По каким признака классифицируются твердотельные фильтры?
8.6. Пояснить принцип действия резонаторов на ПАВ.
8.7. Пояснить принцип действия фильтров на ПАВ.
8.8. В чем заключаются преимущества устройств на ПАВ?
8.9. Объяснить устройство и характеристики пьезокерамического фильтра.

9. Рекомендуемая литература

1. Желудев, И. С. Основы сегнетоэлектричества. - М. : Атомиздат, 1973. 472 с.

2. Тамм, И. Е. Основы теории электричества - М. : Наука, 1976. - 616 с.

3. Пасынков, В. В. Материалы электронной техники : учебник для студентов вузов. - М. : Высшая школа, 1980. - 406 с.

4. Морган, Д. Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах. - М. : Радио и связь, 1990. - 415 с.

5. Багдасарян, А. С. Импедансные фильтры на ПАВ. - М. : Международная программа образования, 1998.

5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

Датчики на основе эффекта Холла

1. Цель работы

Изучить физические принципы работы датчиков различного типа на основе эффекта Холла и освоить методы измерения их характеристик.

2. Эффект Холла

Эффектом Холла называется возникновение поперечного электрического поля и разности потенциалов в проводнике или полупроводнике, по которым проходит электрический ток, при помещении их в магнитное поле, перпендикулярное к направлению тока. Эффект открыт в 1879 году американским физиком Эдвином Холлом (E.Hall; 1855-1938)

Если в магнитное поле с индукцией B поместить проводник или электронный полупроводник, по которому течет электрический ток плотности j, то на электроны, движущиеся со скоростью V в магнитном поле, действует сила Лоренца F, отклоняющая их в определенную сторону (рис. 3.1., а). На противоположной стороне скапливаются положительные заряды. В дырочном полупроводнике знаки зарядов на поверхностях меняются на противоположные (рис. 3.1., б).

а) б)

а) б)

Рис. 3.1. Действие силы Лоренца на движущиеся заряды: а) на электроны; б) на дырки

Если цепь не замкнута, то в полупроводнике возникает поперечное электрическое поле препятствующее отклонению движущихся заряженных частиц магнитным полем. Образующаяся разность потенциалов будет равна:

$$U = R\,(BxI/d), \tag{3.1}$$

где I - сила тока; d – линейный размер образца в направлении вектора B; R - постоянная Холла. Напряженность поперечного электрического поля определяется соотношением:

$$E_п = R\,(Bxj). \tag{3.2}$$

Эффект Холла имеет феноменологический характер. Для металлов и примесных полупроводников с одним типом проводимости:

$$R = A/Mq, \tag{3.3}$$

где q и M - заряд и концентрация носителей тока; A - безразмерный числовой коэффициент порядка единицы, связанный со статистическим характером распределения скоростей носителей тока.

По знаку постоянной Холла определяют тип проводимости материалла: при электроннои проводимости $q = -e$ (e – заряд электрона) и $R < 0$; при дырочной проводимости $q = e$ и $R > 0$. По величине R можно определить концентрацию носителей тока. Для полупроводников со смешанной проводимостью постоянная Холла в общем случае зависит не только от подвижностей и концентраций обоих типов носителей тока - электронов (μ_n, n) и дырок (μ_p, p), но и от величины магнитной индукции. Для слабых магнитных полей (критерием малости служит условие, что электрон не начнет двигаться по спирали), т. е. при условии $B << \max(1/\mu_n, 1/\mu_p)$, постоянная Холла равна:

$$R = (A/e)\,(\mu_p^2 \cdot p - \mu_n^2 n) / (\mu_p p + \mu_n n)^2. \qquad (3.4)$$

Знак постоянной Холла позволяет определить тип проводимости полупроводника. Эффект Холла определяется следующими временными параметрами: время инициации - $10^{-7} \div 10^{-6}$ с; время существования – $10^{-13} \div 10^{-15}$ с.

На эффекте Холла основан принцип действия датчика Холла (рис. 3.2.) - ключевого элемента многообразных средств измерений. В магнитном поле с индукцией B находится полупроводниковая пластинка, например, из арсенида иридия или антимонида индия, через которую протекает электрический ток I.

Действие эффекта Холла заключается в том, что на боковых сторонах пластинки перпендикулярно направлению тока возникает разность потенциалов - напряжение Холла или ЭДС Холла U_H. Максимальное значение ЭДС Холла U_H принимает при совпадении вектора B с нормалью к пластинке полупроводника.

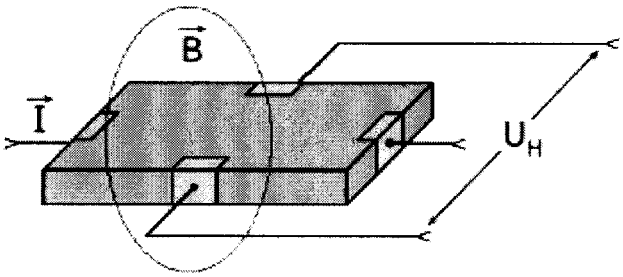


Рис. 3.2. Техническая реализация эффекта Холла в датчике Холла

На использовании эффекта Холла и применении датчиков Холла основан принцип действия датчиков магнитного поля и электрического тока.

3. Техническое использование эффекта Холла

3.1. Датчики магнитного пол, генератор Холла

Датчики магнитного поля обеспечивают на выходе электрическое напряжение (разность потенциалов), пропорциональное величине магнитной индукции. В измерительной практике широко применяется генератор Холла - измерительный прибор для определения индукции магнитного поля. Его принцип действия основан на измерении ЭДС Холла U_H, пропорциональной магнитной индукции поля, при постоянном управляющем токе I_{st}.

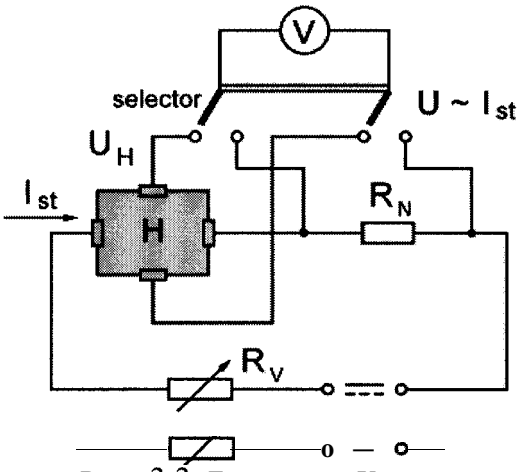


Рис. 3.3. Генератор Холла

При помощи добавочного сопротивления R_V устанавливается оптимальное значение управляющего тока, которое контролируется вольтметром через падение напряжения на резисторе R_N. Этот же вольтметр переключается для измерения ЭДС Холла. При наличии двух прямоугольных расположенных напротив друг друга датчиков Холла можно определить направление магнитного поля.

3.2. Датчики тока

Среди множества методов измерения тока только три объединяет простота, низкая стоимость и массовое применение: резистивного делителя, на основе токового трансформатора и на основе эффекта Холла. В таблице 3.1. приведен сравнительных анализ основных характеристик датчиков тока, выполненных с использованием этих трех технологий. Другие методы находят применение лишь в дорогостоящем лабораторном оборудовании.

Резистивный метод с использованием токового шунта является очень распространенным и недорогим. Однако ему свойственны два недостатка: поглощение мощности и, соответственно, нагрев и отсутствие электрической изоляции. Вместе с этим индуктивность большинства мощных резисторов ограничивает частотный диапазон. Низкоиндуктивные мощные шунты для ВЧ-приложений позволяют работать в диапазоне выше 500 кГц , но более дорогие.

Таблица 3.1.

Характеристики датчиков тока, выполненных по различным технологиям

Датчики	Поглощение мощности	Электрическая изоляция	Внешнее питание	Частотный диапазон	Напряжение смещения	Относительная стоимость
Резистивные DC	да	нет	нет	< 100 кГц	нет	самая низкая
Резистивные AC	да	нет	нет	> 500 кГц	нет	низкая
На эффекте Холла открытые	нет	да	да	< 100 кГц	да	средняя
На эффекте Холла компенсационные	нет	да	да	> 1 МГц	нет	высокая
Токовые трансформаторы	да	нет	нет	фиксирован	нет	высокая

Датчики тока на эффекте Холла (открытого типа и компенсационные) представляют наиболее интересную группу распространенных на сегодняшний день устройств измерения тока. К их главным достоинствам следует отнести

отсутствие вносимых с систему потерь мощности (и как следствие, выделение теплоты), хорошую электрическую изоляцию, широкий диапазон частот и возможность измерения постоянных токов. Недостатком этого вида датчиков является необходимость внешнего источника питания.

Датчики тока с логическим выходом позволяют обнаружить превышение тока в контролируемом проводнике выше определенного значения и сформировать логический сигнал. Основой этих приборов является интегрированный датчик Холла с логическим выходом. Значение порога срабатывания определяется моделью датчика и может иметь следующие значения: 0,5, 3,5, 5,0, 7,0, 10,0 и 54,00 А. Порог срабатывания может быть установлен меньше номинального значения путем увеличения числа витков проводника вокруг кольца датчика.

Датчики тока открытого типа предназначены для бесконтактного измерения постоянного, переменного и импульсного токов в диапазонах ±57...±950 А. Датчики тока открытого типа построены на базе интегрированных линейных датчиков Холла, обладающих повышенной температурной стабильностью и линейностью характеристики. Так, датчики тока фирмы Honeywell на основе линейных датчиков Холла 91SS12-2 и SS94A1имеют аналоговый выход, напряжение на котором пропорционально величине тока, протекающего через контролируемый проводник. Датчики на базе сенсора SS94A1 имеют двухтактный выходной каскад, построенный на комплементарной паре из биполярных p-n-p- и n-p-n-транзисторов, а на базе 91SS12-2 - каскад на p-п-p-транзисторе с открытым коллектором.

4. Основные характеристики датчиков Холла

4.1. Линейные датчики

Полная шкала выхода соответствует диапазону выходных напряжений, в котором нелинейность не выходит из заданных пределов. Определяется как часть напряжения питания.

Диапазон измеряемой индукции — в гауссах или миллитеслах.

Чувствительность, определяемая как крутизна характеристики преобразования в мВ/Гс или мВ/мТл.

Погрешность линейности характеристики преобразования - отклонение статической характеристики преобразования датчика от идеальной прямой линии в заданном диапазоне давлений; указывается в процентах от полной шкалы.

Напряжение нуля магнитного поля - значение выходного напряжения, соответствующее отсутствию магнитного поля.

Температурный дрейф нуля - изменение напряжения нуля, вызванное изменением температуры. Указывается в %/°С от напряжения нуля, соответствующего 25°С.

Температурный дрейф чувствительности — изменение чувствительности, вызванное изменением температуры. Указывается в %/°С от напряжения полной шкалы, соответствующего 25°С.

Время отклика, определяется как время изменения выходного сигнала от 10% до 90% установившегося значения его приращения при скачкообразном изменении магнитного поля.

Полоса пропускания f_S определяется по уровню снижения чувствительности на 3 дБ в режиме малого сигнала.

4.2. Логические датчики

Индукция включения - значение индукции, при которой происходит переход выходного напряжения датчика от низкого к высокому уровню.

Индукция выключения — значение индукции, при которой происходит переход выходного напряжения датчика от высокого к низкому уровню.

Гистерезис - разность между индукциями включения и выключения.

Время переключения - определяется как время изменения выходного сигнала от 10% до 90% его установившегося значения при скачкообразном изменении индукции. Сертифицируется отдельно для нарастания и спада магнитного поля. Для двухвыводных датчиков сертифицируется ток потребления при низкой индукции (Н) и при высокой (В).

5. Характеристики исследуемого датчика Холла

Датчик Холла **ДХК-0.5А** предназначен для измерения величины магнитной индукции на основе преобразования магнитной индукции в выходное напряжение. Датчик выполнен на основе планарной топологической структуры, сформированной на поверхности кремниевого кристалла. На рис. 3.4. показано расположение выводов датчика: –Ix и +Ix – выводы для подключения источника управляющего тока (токовые выводы); –Ux и +Ux – выводы выходного сигнала (холловские выводы).

Основные технические характеристики:

- номинальный управляющий ток - 3 мА;
- напряжение Холла при магнитной индукции 0,25 Т и номинальном управляющем токе - 70 мВ (чувствительность K = 280 мВ/Т);
- остаточное напряжение при номинальном управляющем токе - не более 7 мВ (значение этого параметра зависит от условий поставки);
- входное сопротивление (между выводами Ix) – 1.8 ... 3 кОм;
- выходное сопротивление (между выводами Ux) – не более 3 кОм;
- масса - не более 2,5 г.

Выходное напряжение в мВ:

$$U_{вых} = U_x - (-U_x) = K\,(I_x\,B) \cdot B, \qquad (3.5)$$

где Ix – значение управляющего тока в мА, K - чувствительность в мВ/Т (около 280 мВ/Т), B - величина магнитной индукции в тесла.

На рис. 3.5. показана схема включения датчика ДХК-0.5А. Датчик является знакочувствительным как по отношению к направлению магнитной индукции, так и по отношению к полярности управляющего тока.

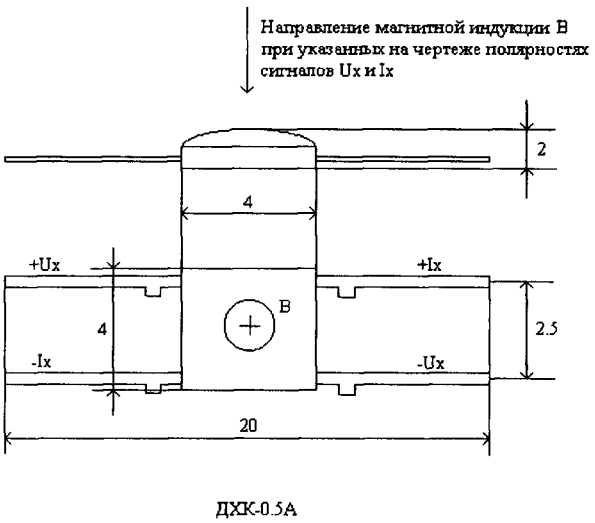


Рис. 3АВнешний вид датчика ДХК-0.5А

Рис. 3.5. Схема включения датчика ДХК-0.5А

6. Описание лабораторного макета

В состав лабораторного макета входит блок с датчиком Холла, включаемым по схеме, показанной на рис. 1. В качестве источника питания используется батарея «Крона» с номинальной ЭДС - 9,9 В. Рабочий ток датчика регулируется в диапазоне от 0,5 мА до 3 мА переменным резистором R2 и контролируется путем измерения мультиметром MY-64 напряжения на вспомогательном резисторе R3. Выходные выводы датчика Холла подключены к разъему, с которого измеряемый сигнал подается на универсальный вольтметр В7-16.

Для создания магнитного поля используется катушка индуктивности (соленоид), размеры и характеристики которого показаны на рис. 3.6. Ток через катушку задается с помощью источника питания Б5-47, включаемом в режиме источника тока. Омическое сопротивление катушки 2 Ом. Катушка индуктивности закреплена на предметном столике, перемещаемом в двух направлениях (параллельно рабочей поверхности датчика Холла) микрометрическими винтами. Блок с датчиком Холла и предметный столик размещены на оптической скамье, снабженной мерной линейкой, что позволяет изменять и контролировать расстояние между рабочей поверхностью датчика Холла и краем соленоида.

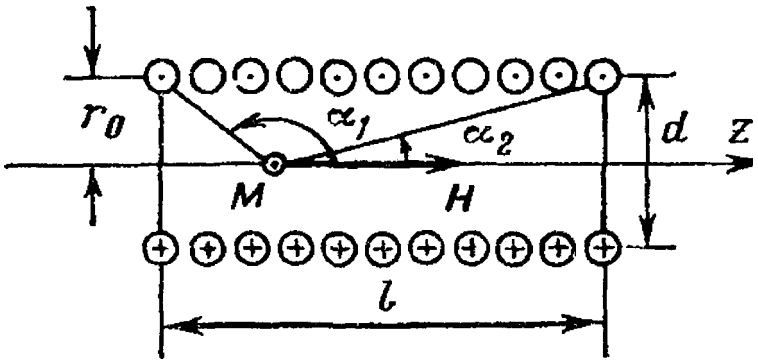


Рис. 3.6. Геометрия катушки индуктивности

Напряженность магнитного поля в воздухе $(\mu \approx 1{,}0)$ в произвольной точке М лежащей на оси соленоида определяется по формуле

$$H = \frac{mI}{2}(\cos\alpha_2 - \cos\alpha_1), \tag{3.6}$$

где m - число витков в катушке, I - сила тока, протекающего по виткам катушки, $\alpha_{1,2}$ - углы между осью катушки и линиями, соединяющими точку М и края соленоида (рис. 3.6.). На краях соленоида очевидно $\alpha_1 = 90^\circ$ и напряженность поля будет определяться выражением

$$H = \frac{mI}{2}\cos\alpha_2 \tag{3.7}$$

В случае, когда длина ℓ соленоида много больше диаметра d, напряженность поля на краю соленоида можно вычислить по примерной формуле

$$H = \frac{mI}{2}\left(1 - \frac{2d^2}{\ell^2}\right). \tag{3.8}$$

Если внутрь соленоида поместить стержень из ферромагнитного материала то магнитная индукция воздействующая на датчик возрастет в μ раз, где μ – относительная магнитная проницаемость ферромагнитного материала.

7. Лабораторное задание

7.1. Подключить соленоид к источнику питания Б5-47, включенному в режиме источнике тока, и установить силу тока через соленоид величиной 1 А. Приблизить край соленоида к датчику Холла на минимально возможное расстояние порядка $0{,}5 \div 1{,}0$ мм.

7.2. Включить питание датчика Холла и установить с помощью переменного резистора и мультиметра рабочий ток датчика величиной 0,5 мА; к сигнальному выходу датчика подключить вольтметр постоянного тока В7-16. Перемещая соленоид с помощью микрометрических винтов, добиться максимальных показаний вольтметра.

7.3. Изменяя ток источника питания снять зависимость показаний вольтметра В7-16 от тока через соленоид; получить не менее 5-6 точек; данные занести в таблицу 3.2.

Таблица 3.2.

Зависимость ЭДС Холла от тока соленоида

Iсол, А	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
U_X, мВ							

ВНИМАНИЕ: измерения при токах больше одного ампера производить максимально быстро для исключения перегрева катушки.

7.4. Повторить измерения по п. 7.3. при нескольких различных значениях рабочего тока датчика: 1,0 мА; 1,5 мА; 2,0 мА; 2,5 мА; 3,0 мА.

7.5. Вновь выполнить п. 7.2. и при токе через соленоид 1,0 А снять показания вольтметра В7-16 при различном рабочем токе датчика; результаты занести в таблицу 3.3.

Таблица 3.3.

Зависимость ЭДС Холла от рабочего тока датчика

Ідат, мА	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
U_X, мВ							

7.6. Установить номинальное значение рабочего тока датчика величиной 3 мА, установить ток через соленоид равный 1,0 А и, перемещая соленоид с помощью микрометрических винтов, добиться максимальных показаний вольтметра. Отодвигая предметный столик с соленоидом от датчика, снять зависимость показаний вольтметра от расстояния между рабочей поверхностью датчика и краем соленоида; результаты измерений занести в таблицу 3.4.

Таблица 3.4.

Зависимость ЭДС Холла от расстояния края соленоида от поверхности датчика

L, мм	4	8	12	16	20	24	28
U_X, мВ							

7.7. Вставить в соленоид металлический сердечник (железный или ферритовыи стержень) и выполнить измерения по пп. 7.2÷7.6.

7.8. Повторить измерения по пп. 7.2. -7.6. при питании соленоида от генератора переменного тока Г3-34.

ВНИМАНИЕ: следить, чтобы ток генератора не превышал предельно допустимого значения и измерения при токах больше одного ампера производить максимально быстро для исключения перегрева катушки.

8. Домашнее задание

8.1. Построить зависимости ЭДС Холла от тока соленоида при различных рабочих токах датчика. Рассчитать индукцию магнитного поля соленоида, действующую на датчик, при заданных токах соленоида. По полученным данным рассчитать чувствительность датчика Холла при различных рабочих токах.

8.2. Построить зависимости напряжения Холла от рабочего тока датчика при различных (не менее 4-х) значениях тока соленоида. Оценить значение постоянной Холла полупроводникового материала датчика, полагая толщину кристалла $d = 0{,}5$ мм.

8.3. Построить зависимость ЭДС Холла при максимальном рабочем токе датчика и двух-трех токах соленоида (0,5 А; 1,0 А; 1,5 А) от расстояния между краем соленоида и поверхностью датчика. Сравнить полученные зависимости с теоретическими зависимостями индукции магнитного поля на оси соленоида от расстояния от края соленоида, рассчитанными по формуле (3.7).

8.4. Оценить магнитную проницаемость металлического сердечника по результатам сравнения ЭДС Холла заполненного и пустого соленоида при минимальном расстоянии края соленоида от поверхности датчика Холла.

9. Контрольные вопросы

9.1. Что такое сила Лоренца?

9.2. Объясните физическую сущность эффекта Холла.

9.3. Чем определяются временные характеристики эффекта Холла?

9.4. Запишите и поясните выражение для постоянной Холла.

9.5. В чем особенности эффекта Холла в металлах?

9.6. Как зависит постоянная Холла от типа и концентрации носителей заряда в полупроводнике?

9.7. Как зависит постоянная Холла от температуры полупроводника?

9.8. Приведите примеры использования эффекта Холла в датчиках физических величин.

9.9. Поясните принцип работы генератора Холла.

9.10. Поясните принцип работы датчиков тока на эффекте Холла.

9.11. Как зависит напряженность магнитного поля на оси соленоида от тока, протекающего по виткам соленоида?

10. Рекомендуемая литература

1. Епифанов, Г. И. Твердотельная электроника : учебник для студентов вузов. - М. : Высш. шк., 1986. - 304 с.

2. Яворский, Б. М. Справочник по физике. - М. : Наука, 1968.

3. Шульц, Ю. Электроизмерительная техника: 1000 понятий для практиков ; Пер. с нем. - М. : Энергоатомиздат, 1989.

6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

Характеристики ферромагнетиков и элементов на их основе

1. Цель работы

Изучение магнитных свойств вещества. Измерение кривой намагничивания, снятие петли гистерезиса и определение тепловых потерь на перемагничивание ферромагнетиков. Вычисление коэрцитивной силы и остаточной намагниченности изучаемого образца железа или ферромагнетика.

2. Основы теории ферромагнетизма

2.1. Намагниченность. Магнитное поле в веществе

Все вещества в магнитном поле способны намагничиваться, т. е. создавать собственное магнитное поле. Такие вещества называются магнетиками. Магнитное поле магнетиков характеризуется ***вектором намагниченности J,*** который равен магнитному моменту единицы объема вещества:

$$\vec{J} = \frac{\sum \vec{P}_{m_ат}}{\Delta V}, \tag{4.1}$$

где $\vec{P}_{m_at}$ – магнитные моменты атомов или молекул, находящихся в пределах малого объема V. Величина $\vec{P}_{m_at}$ представляет, в свою очередь, векторную сумму орбитальных и спиновых магнитных моментов электронов, а также магнитных моментов ядер, входящих в состав атомов.

Магнитное поле в магнетике складывается из двух полей: внешнего B_o и внутреннего $\vec{B}_{BH}$, создаваемого намагниченным веществом:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_{вн} = \mu_0\vec{H} + \mu_0\vec{J}, \tag{4.2}$$

где $\vec{B}_o$ - напряженность внешнего магнитного поля; μ_0 – магнитная постоянная вакуума ($4\pi\ 10^{-7}$ Гн/м). Намагниченность J связана с напряженностью магнитного поля соотношением

$$\vec{J} = \chi\vec{H}, \tag{4.3}$$

где χ – безразмерная величина, называемая магнитной восприимчивостью вещества. Учитывая (4.2), индукцию магнитного поля в магнетике можно представить в виде

$$\vec{B} = \mu_0(1+\chi)\vec{H} = \mu\mu_0\vec{H} \tag{4.4}$$

или

$$\vec{B} = \mu\vec{B}. \tag{4.5}$$

Величина μ, равная

$$\mu = 1 + \chi, \tag{4.6}$$

называется ***магнитной проницаемостью,*** она показывает во сколько раз индукция магнитного поля в магнетике отличается от внешнего поля.

По значению магнитной проницаемости μ все вещества делятся на три группы: диамагнетики (μ <1), парамагнетики (μ >1) и ферромагнетики (μ>> 1). Особенностью ферромагнетиков является то, что μ не является константой, а зависит от напряженности внешнего поля, т. е. $\mu = \mu$ (H).

2.2. Диа- и парамагнетики

Диамагнетиками являются вещества, атомы которых, находясь вне магнитного поля, имеют полный магнитный момент $\vec{P}_{max}$, равный нулю. Только внешнее магнитное поле индуцирует магнитный момент атомов диамагнетика. В результате в нем возникает собственное поле

$$\vec{B}_{вн} = \mu_0 \vec{J}, \tag{4.7}$$

направленное, согласно правилу Ленца, против порождающего его внешнего поля (рис. 4.1). Все вещества в целом приобретают магнитный момент, направленный противоположно *H,* поэтому диамагнетик выталкивается из магнитного поля.

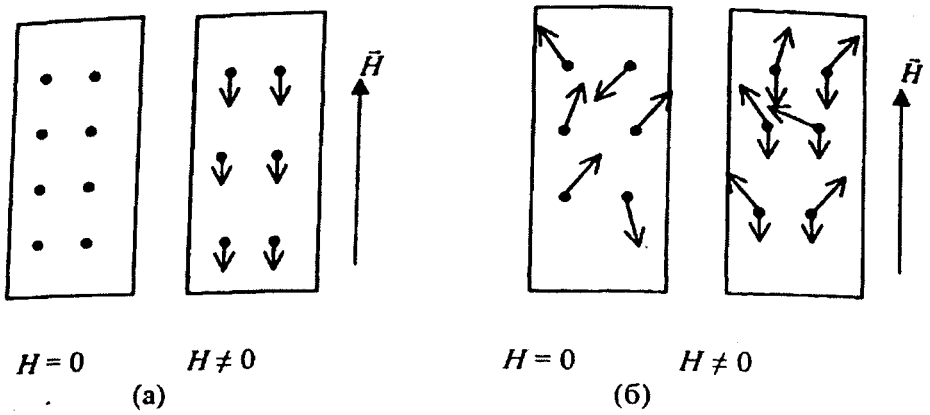


Рис. 4.1. Возникновение собственного магнитного поля в диамагнетиках (а) и парамагнетиках (б)

Атомы парамагнетиков обладают магнитным моментом даже в отсутствии внешнего магнитного поля (орбитальные и спиновые магнитные моменты электронов не скомпенсированы). Однако, в следствие хаотического расположения атомов, вещество в целом не обладает магнитным моментом. В этом случае внешнее магнитное поле не только порождает индукционный момент, но и ориентирует магнитные моменты атомов, устанавливая их преимущественно по направлению поля (рис. 4.1.). Возникающий при этом положительный (т. е. направленный вдоль поля H) магнитный момент значительно больше, чем отрицательный индукционный. В итоге, собственное магнитное поле $B_{вн}$ совпадает по направлению с внешним, и, следовательно, парамагнетик втягивается в магнитное поле. Следует отметить, что тепловое хаотическое движение атомов и молекул препятствует строгой ориентации магнитных моментов вдоль поля, поэтому намагниченность парамагнетиков зависит от температуры:

$$\chi = C/T. \tag{4.8}$$

Приведенное соотношение (4.8) носит название ***закона Кюри*** (открыт П. Кюри в 1896 г.). Коэффициент пропорциональности *C* зависит от рода вещества и находится в пределах $10^{-5} - 10^{-6}$ К.

Все диа- и парамагнетики являются слабо намагничивающимися веществами. Так, для диамагнетиков величина магнитной восприимчивости - $\chi \sim 10^{-6}$, а для парамагнетиков – $\chi \sim 10^{-4}$. К диамагнетикам относятся многие металлы (Bi, Ag, Au, Cu), парамагнетиками являются редкоземельные элементы (Pt, Al и т. д.).

2.3. Ферромагнетики

Свойства ферромагнитных веществ существенно отличаются от рассмотренных выше свойств диа- и парамагнетиков:

1) магнитная проницаемость μ достигает больших значений порядка 10^2 - 10^6;

2) намагниченность ферромагнетиков *J* имеет нелинейную зависимость от H;

3) наличие магнитного гистерезиса - явления запаздывания изменения *B* в ферромагнетике по отношению к изменению H;

4) способность сохранять намагниченность даже в отсутствии внешнего магнитного поля.

Наиболее распространенный ферромагнетик - железо (отсюда и название), никель, кобальт, гадолиний, их сплавы и соединения марганца и хрома с неферромагнитными материалами (MnAlCu, CrFe и др.)

Свойства ферромагнетиков заключаются в особенностях их кристаллической структуры. Ферромагнетик обладает отдельными микроскопическими (линейные размеры $\sim 10^{-6}$ - 10^{-4} м) областями (доменами), которые намагничены до насыщения даже в отсутствии внешнего поля. Однако магнитные моменты всех этих доменов ориентированы хаотически, поэтому суммарный магнитный момент макроскопического объема равен нулю.

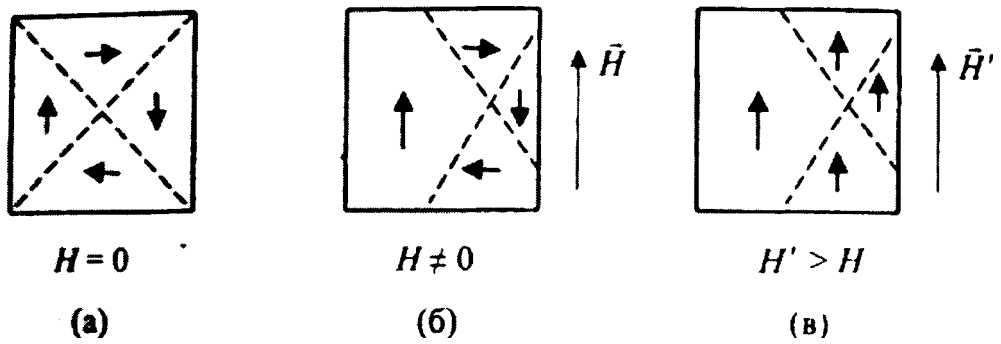


Рис. 4.2. Изменение доменной структуры ферромагнетика при намагничивании:
а — внешнее поле отсутствует; б — процесс смещения;
в — процесс вращения магнитных моментов

При внесении ферромагнетика во внешнее магнитное поле ориентируются магнитные моменты не отдельных атомов (как в случае парамагнетиков), а целых областей - доменов. Процесс намагничивания делится на три стадии. В начальный момент происходит смешение границ доменов (рис. 4.2.), при этом увеличиваются размеры тех из них, магнитные моменты которых совпадают с направлением внешнего поля. Если на этой стадии внешнее поле выключить, то

ферромагнетик вернется в исходное состояние. Таким образом процесс намагничивания на первой стадии является обратимым (рис. 4.3.). Процесс смешения границы доменов продолжается по мере увеличения внешнего магнитного поля.

Затем наступает вторая стадия намагничивания (рис. 4.3.). На этой стадии намагничивание становится необратимым, т. е. домены не возвращаются в исходное состояние, даже при выключении внешнего поля.

Третья стадия наступает при еще больших значениях напряженности внешнего поля, когда происходит вращение магнитных моментов доменов вдоль вектора Н. Завершением этой стадии является насыщение намагниченности, которое наступает при одинаковой ориентации магнитных моментов всех без исключения доменов (рис 4 3.)

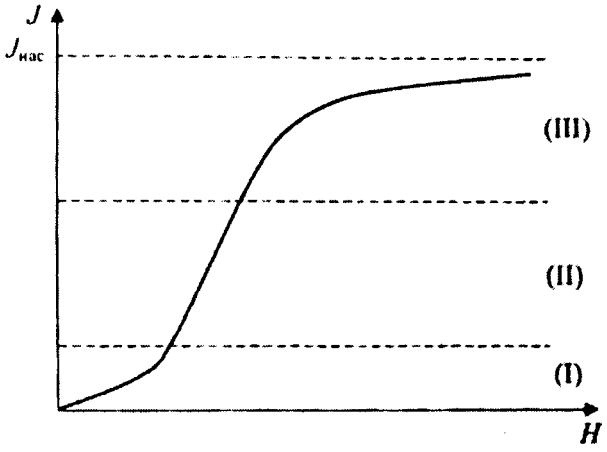


Рис. 4.3. Основная кривая намагничивания ферромагнетика: I - процессы обратимого смещения границ; II - процессы необратимого смещения границ; III - процессы вращения

Магнитная проницаемость μ так же является нелинейной функцией от Н, что является следствием зависимости J(Н). Из выражения (4.2) следует:

$$\mu = \frac{B}{B_0} = 1 + \frac{J}{H} \qquad (4.9)$$

Когда намагниченность достигает насыщения $J_{нас}$, а напряженность растет, значение μ стремится к единице. График зависимости μ(Н) показан на рис. 4.4.

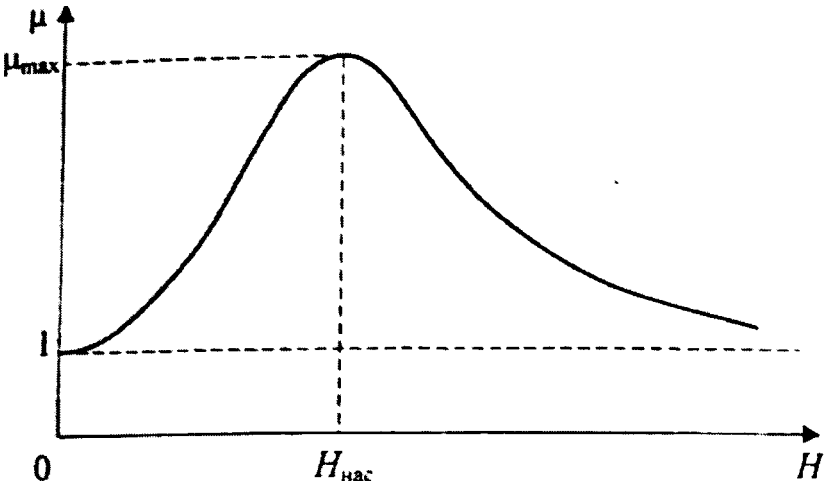


Рис. 4.4. Кривая зависимости магнитной проницаемости от напряженности внешнего поля

Магнитным ***гистерезисом*** называется явление запаздывания изменения магнитной индукции В в ферромагнетике по отношению к изменению напряженности Н внешнего поля. В этом запаздывании проявляется зависимость намагниченности от предшествующего его состояния. ***Петлей гистерезиса*** (рис. 4.5.) назы-

вается кривая изменения магнитной индукции ферромагнетика, помещенного во внешнее магнитное поле, изменяющееся от $+H$ до $-H$ и обратно.

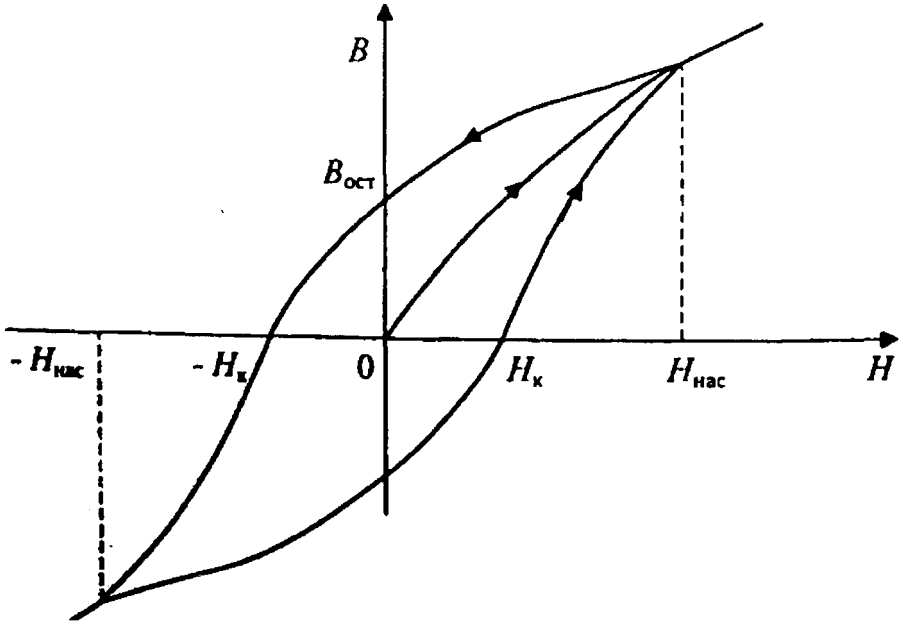


Рис. 4.5. Петля гистерезиса для ферромагнетиков

При изменении H от нуля в сторону положительных значений индукция B возрастает, причем кривая сменяется прямолинейным участком после достижения насыщения (рис. 4.5). При уменьшении H до 0 магнитная индукция запаздывает в уменьшении и при H = 0 оказывается равной $B_{ост}$ (остаточное намагничивание). Для полного размагничивания образца нужно приложить магнитное поле противоположного направления H_K называемое ***коэрцитивной силой*** (задерживающей напряженностью).

Перемагничивание образца сопровождается потерями энергии магнитного поля, которая затрачивается на переориентировку доменов. Объемная плотность энергии магнитного поля определяется соотношением

$$w = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}. \qquad (4.10)$$

Изменение энергии при небольшом намагничивании будет:

$$dw = \mu\mu_0 HdH = H(\mu\mu_0 dH) = HdB \qquad (4.11)$$

Таким образом работа магнитного поля за цикл перемагничивания единицы объема ферромагнетика будет равна:

$$q = \oint dw = \oint HdB \qquad (4.12)$$

Изменение энергии при небольшом намагничивании будет:

$$dw = \mu\mu_0 HdH = H(\mu\mu_0 dH) = HdB \qquad (4.11)$$

Таким образом работа магнитного поля за цикл перемагничивания единицы объема ферромагнетика будет равна:

$$q = \oint dw = \oint HdB \qquad (4.12)$$

т.е. пропорциональна площади петли гистерезиса. Ясно, что потери внешнего магнитного поля переходят во внутреннюю энергию образца и, в конечном счете, приводят к его нагреванию.

По величинам H_K и q ферромагнетики подразделяются на ***мягкие*** (H_K<100 А/м, малая площадь *q)* и ***жесткие*** (H_K > 100 А/м, площадь *q* большая). Магнитно мягкие материалы используются для изготовления сердечников трансформаторов, маг-

Поскольку разница в энергиях между намагниченным и ненамагниченным состояниями составляет лишь несколько десятых электронвольт, то повышение температуры образца (энергия теплового движения ~ *кТ)* может уничтожить намагничивание доменов. При температуре Кюри намагниченность доменов действительно исчезает и ферромагнетик превращается в парамагнетик. Температура Кюри для различных веществ имеет строго определенные значения. Например для железа - 770°С, кобальта - 1127°С, никеля - 358°С, гадолиния - 16°С.

3. Свойства некоторых ферромагнитных материалов

Материалы с малой коэрцитивной силой и большой магнитной проницаемостью называют ***магнитно-мягкими.*** Они обладают узкой петлей гистерезиса. Материалы с большой коэрцитивной силой и малой магнитной проницаемостью относится к ***магнитно-твердым.*** Они обладают широкой петлей гистерезиса.

Магнитно-мягкие низкочастотные материалы применяют для изготовления магнитопроводов трансформаторов, электромагнитов, электрических машин, измерительных приборов, в которых при минимальных затратах энергии необходимо получить наибольшую индукцию. В группу магнитно-мягких низкочастотных материалов входит особо чистое ***электролитическое железо,*** получаемое путем электролиза, и *карбонильное железо,* изготавливаемое термическим разложением пентокарбонила [$Fe(CO)_5 \rightarrow Fe+5CO$]. Эти материалы содержат весьма малое (менее 0,05%) количество примесей. ***Технически чистое железо*** обычно содержит небольшое (до 0,1%) количество примесей углерода и других элементов, ухудшающих его магнитные свойства. Оно обладает относительно малым удельным сопротивлением и используется в основном для изготовления магнитопроводов постоянного магнитного поля. Параметры некоторых магнито-мягких материалов приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1.

Параметры некоторых магнито-мягких материалов

Материал	Коэрцитивная сила А/м	Максимальная магнитная проницаемость	Содержание примесей	
			Углерод	Кислород
Электролитическое железо	28	15000	0,02	0,01
Карбонильное железо	6,4	21000	0,005	0,005
Технически чистое железо	64	7000	0,02	0,06
Низко углеродистая техническая сталь	64	4500	0,04	-

Магнитно-мягкие высокочастотные материалы по частотному диапазону предназначаются для низких, средних, высоких и сверхвысоких частот, а по физической природе их делят на ***магнитодиэлектрики*** и ***ферриты.***

Магнитодиэлектрики получают прессованием порошкообразного ферромагнетика (например, ***карбонильного железа)*** с изолирующей связкой (полистирол, стекло и др.). Прессованные сердечники из магнитодиэлектрика применяют в индуктивных катушках генераторов, контуров радиоприемников. Сердечники на основе карбонильного железа имеют высокую стабильность, малые потери, положительный температурный коэффициент проницаемости и могут работать в широком диапазоне частот.

Ферриты - являются двойными оксидами железа и других металлов (например, $ZnO{\cdot}Fe_2O_3$, $CdO{\cdot}Fe_2O_3$) и представляют собой растворы нескольких простейших соединений. Они обладают высоким удельным сопротивлением (а, следовательно, малыми потерями энергии в области высоких частот) и высокой магнитной проницаемостью. В обозначении ферритов (см. таблицу 4.2.) на первом месте стоят цифры (перед буквами), указывающие значение начальной магнитной проницаемости, затем буквы, определяющие верхнюю границу частотного диапазона, при которой начинается быстрый рост потерь. У низкочастотных ферритов Н нижняя частота от 0,1 до 50 Мгц, у высокочастотных 50-600 Мгц. Последние буквы обозначают материал (М - марганец-цинковый, Н - никель-цинковый). Последняя цифра указывает на разновидность материала.

Таблица 4.2

Параметры некоторых ферритов

Марка	Магнитная проницаемость		Коэрцитивная сила, А/м	Остаточная индукция, Тл	Граничная частота, МГц	Удельное объемное сопротивление, Ом·М	Плотность, Мг/м³
	Начальная	Максимальная					
20000Н0	15000	35000	0,24	0,11	0,1	0,001	–
6000НМ	4800-8000	10000	8	0,11	0,5	0,1	5
1000 НМ	800-1200	1800	28	0,11	5	0,5	4,5
1000НН	800-1200	3000	24	0,1	3	10	4,9
600НН	500-800	1500	40	0,12	5	100	4,8
2000НМ1	1700-2500	3500	25	0,12	1,5	5	5
700НМ1	550-850	1800	25	0,05	8	4	4,8
100ВЧ	80-120	280	300	0,15	80	10^5	4,8
20ВЧ2	16-24	45	1000	0,1	300	10^6	4,7
9ВЧ	9-13	30	1500	0,06	600	10^7	4,4
Ферриты СВЧ	6-85	12-300	30-800	0,1		10^2-10^{11}	–

4. Описание лабораторной установки и используемого оборудования

Петлю гистерезиса можно получить на экране осциллографа, если а) ферромагнитный образец поместить в переменное магнитное поле; б) на горизонтально отклоняющие пластины подать напряжение U_X пропорциональное H; в) на вертикально отклоняющие - U_Y пропорциональное B.

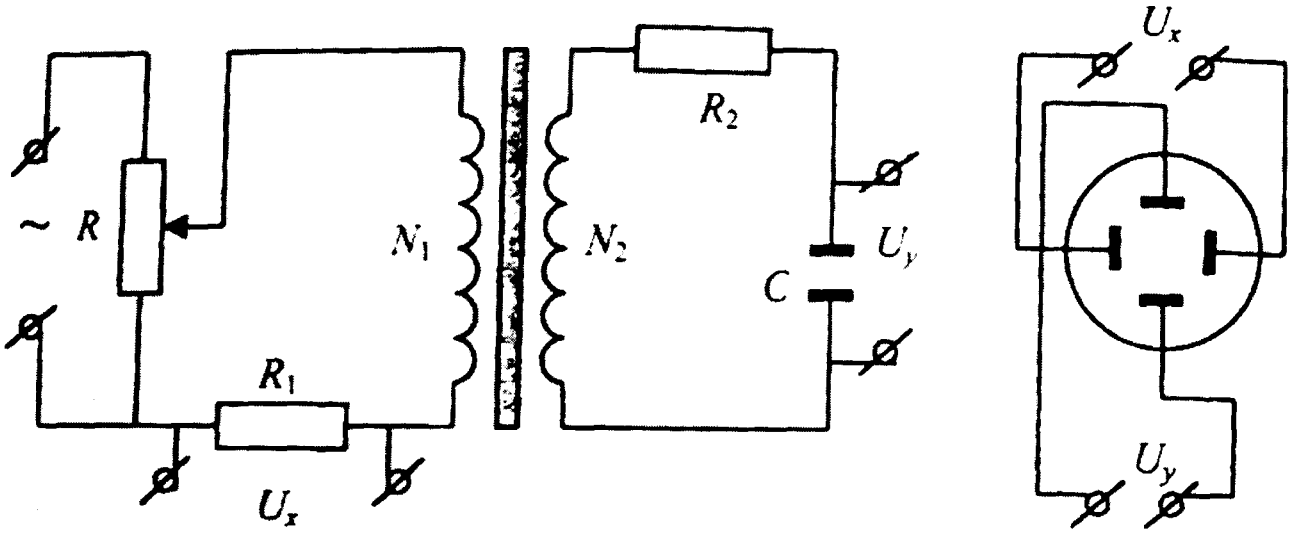


Рис. 4.6. Схема установки для получения петли гистерезиса на экране осциллографа

Принципиальная схема установки приведена на рис. 4.6. веществом является железо или ферриты, имеющее форму стержня, на который намотаны две обмотки. Первичная обмотка питается через сопротивление R_1 переменным током. Напряженность магнитного поля внутри полого соленоида, образованного первичной обмоткой, равна

$$H = \frac{N_1}{l} I_1, \tag{4.13}$$

где I_1 и N_1 – сила тока и число витков в первичной обмотке; l –длина соленоида и стержня внутри него. Из (4.13) следует, что напряжение U_1 на сопротивлении R_1, подаваемое на пластины X осциллографа, пропорционально H:

$$U_X \equiv U_1 = R_1 \cdot I_1 = \frac{l \cdot R_1}{N_1} H \tag{4.14}$$

Во вторичной обмотке возникает ЭДС индукции:

$$\varepsilon = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}, \tag{4.15}$$

где $\Phi = BS$ – поток вектора магнитной индукции через вторичную обмотку; N_2 - число витков на ней; S — площадь стержня, и (4.15) можно переписать в виде:

$$\varepsilon = -N_2 S \frac{dB}{dt}. \tag{4.16}$$

Если во вторичную обмотку включить интегрирующую ***RC*** цепочку и выбрать сопротивление R_2 достаточно большим (~10 кОм), то, пренебрегая падени-

ем напряжения U_C на конденсаторе С по сравнению с падением напряжения на резисторе $(I_2R_2 >> U_C)$, получим выражение для тока I_2 во вторичной обмотке

$$I_2 = \frac{\varepsilon}{R_2} = -\frac{N_2 S}{R_2}\frac{dB}{dt}. \qquad (4.17)$$

При этом напряжение U_C на конденсаторе С, подаваемое на пластины Y осциллографа будет пропорционально *B*:

$$U_Y = U_C = \frac{q}{C} = \frac{1}{C}\int I_2 dt - \frac{N_2 S}{R_2 C}\int \frac{dB}{dt}dt = -\frac{N_2 S}{R_2 C}B \qquad (4.18)$$

где *q* - заряд, С - емкость конденсатора.

В результате на одни пластины осциллографа подается напряжение пропорциональное H, а на другие - пропорциональное B.

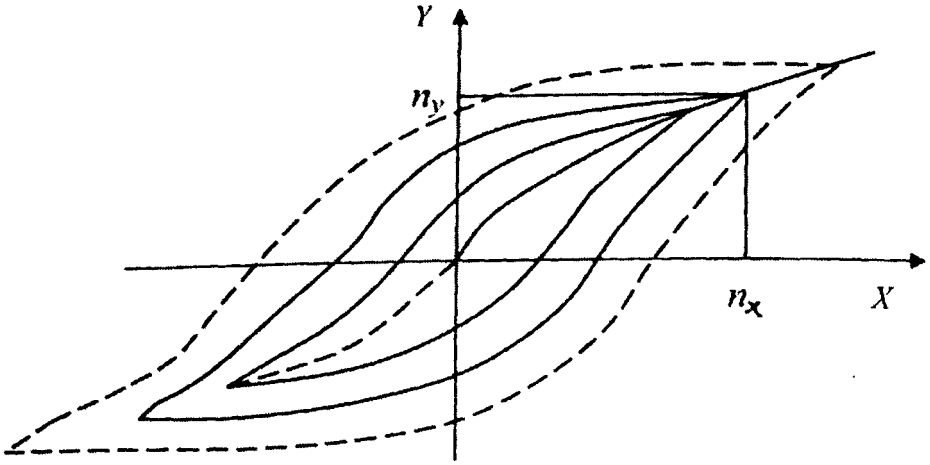


Рис. 4.7. Форма петель гистерезиса, наблюдаемая на экране осциллографа

При увеличении напряжения U_X потенциометром *R* будет увеличиваться амплитуда колебаний *H*, при этом на экране будет получаться ряд различных по площади петель гистерезиса (рис. 4.7.). Верхняя точка петли гистерезиса находится на кривой намагничивания. Следовательно, для построения кривой *B=B(H)* необходимо снять координаты n_x и n_y вершины петель гистерезиса, которые определяются в делениях шкалы экрана осциллографа (рис. 4.7.). Величины *B* и *H* можно вычислить из соотношений (4.14) и (4.18):

$$H = \frac{N_1}{I \cdot R_1}U_X; \qquad B = \frac{R_2 C}{N_2 S}U_Y \qquad (4.19)$$

Умножая значения координат n_x и n_y на значения чувствительности каналов горизонтального и вертикального отклонения u_x и u_y, соответственно, (в В/дел или мВ/дел), получим абсолютные значения напряжения U_x и U_y:

$$U_x = u_x n_x; \qquad U_y = u_y n_y. \qquad (4.20)$$

Окончательные выражения для вычисления *B* и *H* принимают вид:

$$H = \frac{N_1 \cdot u_X}{I \cdot R_1}n_X; \quad B = \frac{R_2 \cdot C \cdot u_Y}{N_2 S}n_Y. \qquad (4.21)$$

Потери на перемагничивание ферромагнетика пропорциональны площади петли гистерезиса, которую можно вычислить по числу клеток N сетки осциллографа. Обозначим через $h_X = \frac{N_1 \cdot u_X}{I \cdot R_1}$; $b_Y = \frac{R_2 \cdot C \cdot u_Y}{N_2 S}$ - масштабные коэффициенты, равные напряженности и индукции магнитного поля в пределах одного деления шкалы экрана осциллографа по оси X по оси Y, соответственно. Тогда площадь одной клетки будет равна $S=h_x b_y$. Если петля содержит N клеток, то теплота q, выделяемая единицей объема, равна

$$q = N \cdot h_x \cdot b_y . \qquad (4.22)$$

Количество тепла, которое выделяется за 1 с в изучаемом образце ферромагнетика объемом $V=S \cdot l$, можно найти по формуле

$$Q=q\ V\ v=(N\ h_x\ b_x)(S\ l)f, \qquad (4.23)$$

где f - частота переменного тока; S и l - площадь сечения и длина ферромагнитного стержня. Параметры установки: R_1 = 3 Ом, R_2 = 14кОм, N_1 = 3000, N_2 = 5000, S = 12,6-10^{-6} м^2, l = 0,08 м, С = 20 мкФ, f = 50 Гц.

5. Порядок выполнения работы

5.1 Задание 1. Определение кривой намагничивания.

5.1.1. Включить лабораторный стенд и приборы. Установить удобную для наблюдения петель гистерезиса чувствительность каналов осциллографа. Для этого, с помощью потенциометра ***R***, установить максимальную по площади петлю гистерезиса; рекомендуемые значения: $u_X \sim 0{,}1$ V/дел – канал X; $u_Y \sim 10$ mV/дел – канал Y). Затем уменьшить потенциометром ***R*** подаваемое напряжение до минимума и получить точку в центре экрана.

5.1.2. Устанавливая различное напряжение U_1 с помощью потенциометра R, получить на экране осциллографа семейство петель гистерезиса (не менее 10). Определить для каждой из них координаты вершины в делениях сетки осциллографа (n_X; n_Y) и записать их в таблицу 4.3.

Таблица 4.3.

Результаты измерения и расчета характеристик ферромагнетика

U_1	n_X	n_Y	H, (А/м)	B, (Тл)	μ

5.2. Задание 2. Определение тепловых потерь на перемагничивание ферромагнетика.

5.2.1. С помощью потенциометра R установить максимальную по площади петлю гистерезиса.

5.2.2. Скопировать эту петлю на миллиметровую бумагу и по клеткам подсчитать ее площадь.

5.3. Задание 3. Определение коэрцитивной силы и остаточной намагниченности ферромагнетика.

5.3.1. С помощью потенциометра ***R*** установить максимальную по площади петлю гистерезиса.

5.3.2. По максимальной петле гистерезиса найти координаты n_{XK} и n_{YOCT} пересечения с осями *X* и *Y*.

6. Домашнее задание

6.1. По результатам измерений параметров петель гистерезиса по формулам (4.21) вычислить ***B, Hи*** значения магнитной проницаемости $\mu = B/\mu_0 H$.

6.2. По полученным расчетным данным построить графики зависимостей $B = B(H)$ и $\mu=\mu(H)$.

6.3. По площади максимальной петли гистерезиса с использованием формулы (4.23) вычислить мощность *Q* тепловых потерь в ферромагнетике.

6.4. По результатам измерения параметров петли гистерезиса максимальной площади вычислить коэрцитивную силу H_c и остаточную намагниченность.

6.5. По полученным данным определить группу ферромагнетика: мягкий или жесткий.

7. Контрольные вопросы

7.1. Какие физические величины характеризуют магнитное поле в веществе?

7.2. Какие существуют типы магнетиков и чем они отличаются?

7.3. Как протекает процесс намагничивания диа- и парамагнетиков?

7.4. Какова природа ферромагнетизма?

7.5. Как протекает процесс намагничивания ферромагнетика?

7.6. Каковы основные свойства ферромагнетиков?

7.7. Что такое магнитный гистерезис, каковы его характеристики?

7.8. Как определяются потери на перемагничивание ферромагнетиков?

7.9. Какие существуют типы ферромагнетиков, где они применяются?

8. Список литературы

1. Калашников, С. Г. Электричество. - М. : Наука, 1977. - 407 с.

2. Трофимова, Т. И. Курс физики. - М. : Высшая школа, 1998. - 542 с.

3. Савельев, И. В. Курс общей физики. Т. 2. - М. : Наука, 1998. - 496 с.

4. Гуртов, В. А. Физика твердого тела для инженеров. - М. : Техносфера, 2007. - 520 с.

СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ НЕКОТОРЫМИ ФИЗИЧЕСКИМИ ЕДИНИЦАМИ

1 ампер (А) = 1 Кл/с

1 ангстрем = 10^{-10} м = 10^{-4} мкм

1 атмосфера (атм) = 760 мм рт. ст. = 101325 Па

1 кулон (Кл) = 1 А с

1 электрон-вольт (эВ) = 1, 6 10^{-19} Дж

1 фарад (Ф) = 1Кл·В

1 калория (кал) = 4,1868 Дж

1 генри (Гн) = 1 В·с/А

1 джоуль (Дж)= 10^{7} эрг =1 Вт·с= 6,25 10^{18} эВ = 1 Н·м = 1 Кл·В

1 ньютон (Н) = 1 кг·м/$с^2$

1 сименс (См) = 1 $Ом^{-1}$

1 тесла (Тл) = 1 Вб/$м^2$

1 вольт (В) = 1 Вт/А

1 ватт (Вт) = 1 Дж·с

1 вебер (Вб) = 1 В·с

МНОЖИТЕЛИ ДОЛЬНЫХ И КРАТНЫХ ЕДИНИЦ

Множитель	**Наименование приставки**	**Обозначение приставки**	**Множитель**	**Наименование приставки**	**Обозначение приставки**
10^{18}	Экза	Э	10^{-1}	Деци	д
10^{15}	Пета	П	10^{-2}	Санти	с
10^{12}	Тера	Т	10^{-3}	Милли	м
10^{9}	Гига	Г	10^{-6}	Микро	мк
10^{6}	Мега	М	10^{-9}	Нано	н
10^{3}	Кило	к	10^{-12}	Пико	п
10^{2}	Гекта	г	10^{-15}	Фемто	ф
10	Дека	да	10^{-18}	Атто	а

Окончание приложения

НЕКОТОРЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

Наименование	Обозначение	Численное значение
Скорость света в вакууме	c	$2{,}998\ 10^{8}$ м/с
Заряд электрона	q, e	$1{,}602\ 10^{-19}$ Кл
Масса покоя электрона	m_n	$9{,}109\ 10^{-31}$ кг
Постоянная Планка	h	$6{,}626\ 10^{-34}$ Дж*с
Приведенная постоянная Планка	$\hbar = h/2\pi$	$1{,}055\ 10^{-34}$ Дж*с
Радиус Бора	α_0	$5{,}292\ 10^{-11}$ м
Магнитный момент электрона	μ_e	$9{,}285\ 10^{-24}$ Дж/Т
Атомная единица массы	u	$1{,}6605\ 10^{-27}$ кг
Постоянная Больцмана	k	$1{,}381\ 10^{-23}$ Дж/К
Число Авогадро	N_A	$6{,}023\ 10^{23}$ 1/моль
Магнитная постоянная вакуума	μ_0	$1{,}257\ 10^{-6}$ Гн/м
Электрическая постоянная вакуума	ε_0	$8{,}849\ 10^{-12}$ Ф/м
Энергия равная одному электрон-вольту	1 эВ	$1{,}602\ 10^{-19}$
Тепловой потенциал при температуре 300 К	$\varphi_T = kT/q$	25,8 эВ

Учебное издание

Элементы и устройства твердотельной электроники»

Методические указания к лабораторным работам

Составители СЕРГЕЕВ Вячеслав Андреевич
МОИСЕЕВ Алексей Владимирович

Редактор Штаева М.

ЛР №020640 от 22.10.97.
Подписано в печать 12.05.2009. Формат 60x84/16.
Усл. печ. л. 3,26. Тираж 50 экз. Заказ №601.

Ульяновский государственный технический университет
432027, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, 32

Типография УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, 32.