САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МОРСКОЙ

ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

###### **Кафедра физики**

**Реферат**

на тему

Эффект Холла

Выполнил:

студент группы 32СУ1

Лазарев Герасим

Проверил:

преподаватель Скидан В.В.

2000

**Содержание.**

1. Общие сведения 3
2. Объяснение эффекта Холла с помощью электронной теории 6
3. Эффект Холла в ферромагнетиках 9
4. Эффект Холла в полупроводниках 10
5. Эффект Холла на инерционных электронах в полупроводниках 11
6. Датчик ЭДС Холла 15
7. Список используемой литературы 17

**1.Общие сведения.**

Эффектом Холла называется появление в провод­нике с током плотностью *j*, помещён­ном в магнитное поле *Н*, электрического поля *Ех*, перпендикулярного *Н* и *j*. При этом на­пряжённость электрического поля, называемого ещё полем Холла, равна:

### Рис 1.1

*Ex = RHj sin α, (1)*

 где α угол между векторами *Н* и *J* (*α<180°*). Когда *H⊥j*, то величина поля Холла *Ех* максимальна: *Ex = RHj*. Ве­личина *R*, называемая коэффициентом Холла, является основной характеристикой эффекта Холла. Эффект открыт Эдвином Гербертом Холлом в 1879 в тонких пла­стинках золота. Для наблюдения Холла эффекта вдоль прямоугольных пластин из иссле­дуемых веществ, длина которых *l* значитель­но больше ширины *b* и толщины *d*, про­пускается ток:

*I = jbd* (см. рис.);

здесь маг­нитное поле перпендикулярно плоскос­ти пластинки. На середине боковых граней, перпендикулярно току, распо­ложены электроды, между которыми из­меряется ЭДС Холла *Vx*:

*Vx = Ехb = RHj/d. (2)*

Так как ЭДС Холла меняет знак на обратный при изменении направления магнитного поля на обратное, то Холла эффект относится к не­чётным гальваномагнитным явлениям.

Простейшая теория Холла эффекта объясняет появление ЭДС Холла взаимодействием носителей тока (электронов проводимости и дырок) с магнитным полем. Под дейст­вием электрического поля носители заряда приобретают направленное движе­ние (дрейф), средняя скорость которого (дрейфовая скорость) *vдр≠0*. Плотность тока в проводнике *j = n\*evдр*, где *n* — концентрация чи­сла носителей, *е* — их заряд. При наложе­нии магнитного поля на носители действу­ет Лоренца сила: *F = e[Hvдp]*, под действием которой частицы отклоняются в направлении, перпендикулярном *vдр*и *Н*. В результате в обеих гранях провод­ника конечных размеров происходит на­копление заряда и возникает электростатическое поле — поле Холла. В свою очередь поле Холла действует на заряды и урав­новешивает силу Лоренца. В условиях равновесия *eEx = еНvдр*, *Ex =1/ne Hj*, отсюда *R = 1/ne* (cмз/кулон). Знак *R* сов­падает со знаком носителей тока. Для металлов, у которых концентрация носи­телей (электронов проводимости) близка к плотности атомов (*n*≈1022См-3), *R*~10-3(см3/кулон), у полупроводников кон­центрация носителей значительно меньше и *R*~105 (см3/кулон). Коэффициент Холла *R* мо­жет быть выражен через подвижность носителей заряда *μ = еτ/m\** и удельную электропроводность *σ = j/E = еnvлр/Е*:

*R=μ/σ (3)*

Здесь *m\**— эффективная масса носи­телей, *τ* — среднее время между двумя последовательными соударениями с рассеивающи­ми центрами.

Иногда при описании Холла эффекта вводят угол Холла *ϕ* между током *j* и направлением суммарного поля *Е*: *tgϕ= Ex/E=Ωτ*, где *Ω* — циклотронная частота носи­телей заряда. В слабых полях *(Ωτ<<1)* угол Холла *ϕ≈Ωτ*, можно рассматривать как угол, на который отклоняется движу­щийся заряд за время *τ*. Приведённая те­ория справедлива для изотропного про­водника (в частности, для поликристал­ла), у которого *m\** и *τ* их— постоянные вели­чины. Коэффициент Холла (для изотроп­ных полупроводников) выражается через парциальные проводимости *σэ* и *σд* и концентрации электронов *nэ* и дырок *nд*:

 (a) для слабых полей

 *(4)*

  (б) для сильных полей.

При *nэ = nд, = n* для всей области магнитных полей :

,

а знак *R* указывает на преобладающий тип про­водимости.

Для металлов величина *R* зависит от зонной структуры и формы Ферми поверхности. В случае замкнутых по­верхностей Ферми и в сильных магнит­ных полях *(Ωτ»1)* коэффициент Холла изо­тропен, а выражения для *R* совпадают с формулой 4,б. Для открытых поверхно­стей Ферми коэффициент *R* анизотропен. Одна­ко, если направление *Н* относительно кристаллографических осей выбрано так, что не возникает открытых сечений поверхности Ферми, то выражение для *R* аналогич­но 4,б.

2. Объяснение эффекта Холла с помощью электронной теории.

Если металлическую пластинку, вдоль которой течет постоянный электрический ток, поместить в перпендикулярное к ней магнитное поле, то между гранями, параллельными направлениям тока и поля возникает разность потенциалов U=ϕ1-ϕ2 (смотри рис 2.1). Она называется Холловской разностью потенциалов (в предыдущем пункте – ЭДС Холла) и определяется выражением:

*uh =RbjB (2.1)*

Здесь *b* — ширина пластинки, *j* — плотность тока, *B* — магнитная индукция поля, *R* — коэффициент пропорциональности, получивший название постоянной Холла. Эффект Холла очень просто объясняется электронной теорией, отсутствие магнитного поля ток в пластинке обусловливается электрическим полем *Ео* (смотри рис 2.2). Эквипотенциальные поверхности этого поля образуют систему перпендикулярных к вектору *Ео* скоростей. Две из них изображены на рисунке сплошными прямыми линиями. Потенциал во всех точках каждой поверхности, а следовательно, и в точках 1 и 2 одинаков. Носители тока — электроны — имеют отрицательный заряд, поэтому скорость их упорядоченного движения и направлена противоположно вектору плотности тока *j*.

При включении магнитного поля каждый носитель оказывается под действием магнитной силы *F*, направленной вдоль стороны *b* пластинки и равной по модулю

*F=euB (2.2)*

В результате у электронов появляется составляющая скорости, направленная к верхней (на рисунке) грани пластинки. У этой грани образуется избыток отрицательных, соответственно у нижней грани — избыток положительных зарядов. Следовательно, возникает дополнительное поперечное электрическое поле *ЕB*. Тогда напряженность этого поля достигает такого значения, что его действие на заряды будет уравновешивать силу (2.2), установится стационарное распределение зарядов в поперечном направлении. Соответствующее значение *EB* определяется условием: *eEB=euB*. Отсюда:

*ЕB=uВ.*

Поле *ЕB* складывается с полем *Ео* в результирующее поле *E*. Эквипотенциальные поверхности перпендикулярны к вектору напряженности поля. Следовательно, они повернутся и займут положение, изображенное на рис. 2.2 пунктиром. Точки 1 и 2, которые прежде лежали на одной и той же эквипотенциальной поверхности, теперь имеют разные потенциалы. Чтобы найти напряжение воз­никающее между этими точками, нужно умножить расстояние между ними *b* на напряженность *ЕB*:

*UH=bEB=buB*

Выразим *u* через *j*, *n* и *e* в соответствии с формулой *j=neu*. В результате получим:

*UH=(1/ne)bjB (2.3)*

Последнее выражение совпадает с (2.1), если положить

*R=1/ne (2.4)*

Из (2.4) следует, что, измерив постоянную Холла, можно найти концентрацию носителей тока в данном металле (т. е. число носи­телей в единице объема).

Важной характеристикой вещества является подвижность в нем носителей тока. Подвижностью носителей тока называется средняя скорость, приобретаемая носителями при напряженности электри­ческого поля, равной единице. Если в поле напряженности *Е* носи­тели приобретают скорость *u* то подвижность их *u0* равна:

*U0=u/E (2.5)*

Подвижность можно связать с проводимостью*σ* и концентрацией носителей *n*. Для этого разделим соотношение *j=neu* на напряжённость поля *Е*. Приняв во внимание, что отношение *j* к *Е* дает *σ*, а отношение *u* к *Е* - подвижность, получим:

*σ=neu0 (2.6)*

Измерив постоянную Холла *R* и проводимость *σ*, можно по формулам (2.4) и (2.6) найти концентрацию и подвижность носи­ли тока в соответствующем образце.

*ϕ1*

 *j*

## *B*

*b*

*ϕ2*

### Рис 2.1

– – – – – – – – – – *1*– – – – – – – – – – –

#### E

*EB*

#### F

–



*E0*

*u*

B

+++++++++++++2+++++++++++++

### Рис 2.2

3. Эффект Холла в ферромагнетиках.

В ферромагнетиках на электроны про­водимости действует не только внешнее, но и внутреннее магнитное поле:

# В = Н + 4πМ

Это приводит к особому ферромагнит­ному эффекту Холла. Экспериментально обнаруже­но, *Ex= (RB + RаM)j*, где *R* — обык­новенный, a *Ra* — необыкновенный (ано­мальный) коэффициент Холла. Между Ra и удельным электросопротивлением ферромагнетиков установлена корреляция.

4. Эффект Холла в полупроводниках.

Эффект Холла наблюдается не только в металлах, но и в полупроводниках, причем по знаку эффекта можно судить о принадлеж­ности полупроводника к n- или p-типу, так как в полупроводниках n-типа знак носителей тока отрицательный, полупроводниках p-типа – положительный. На рис. 4.1 сопоставлен эффект Холла для образцов с положительными и отрицательными носителями. Направление магнитной силы изменяется на противоположное как при изменении направления движения заряда, так и при изменении его знака. Следовательно, при одинаковом направлении тока и поля магнитная сила, действующая на положительные и отрицательные носители, имеет одинаковое направление. Поэтому в случае положительных носителей потенциал верхней (на рисунке) грани выше, чем нижней, а в случае отрицательных носителей — ниже. Таким образом, определив знак холловской разности потенциалов, можно установить знак носителей тока. Любопытно, что у некоторых металлов знак Uн соответствует положительным носителям тока. Объяснение этой аномалии дает квантовая теория.



 *j*

*F*

*F*

*u*

*u*

– – – – – – – – – – –

 *j*

#### B

#### B

– – – – – – – – – – –

+++++++++++++++

+++++++++++++++

### Рис 4.1

5. Эффект Холла на инерционных электронах в полупроводниках.

Предсказан новый физический эффект, обусловленный действием силы Лоренца на электроны полупроводника, движущегося ускоренно. Получено выражение для поля Холла и выполнены оценки холловского напряжения для реальной двумерной гетероструктуры. Выполнен анализ возможной схемы усиления холловского поля на примере двух холловских элементов, один из которых — генератор напряжения, а второй — нагрузка.

Известен опыт Толмена и Стюарта, в котором наблюдался импульс тока *j*, связанный с инерцией свободных электронов. При инерционном разделении зарядов в проводнике возникает электрическое поле напряженностью *E*. Если такой проводник поместить в магнитное поле *B*, то следует ожидать появления эдс, аналогичной эффекту Холла, обусловленной действием силы Лоренца на инерционные электроны.

В проводнике, движущемся с ускорением *dvx*/*dt*, возникает ток *jx* и поле *Ex*

, (1)

, (2)

где σ = *enμ* — проводимость, *μ* — подвижность. В магнитном поле *B*(0; 0; *Bz*) возбуждается поле *Ey* = (1/*ne*) *jxBz* или

 (3)

Последнее выражение эквивалентно *Ey* = *ExμBz*.

Наиболее подходящий объект для экспериментального наблюдения эффекта — двумерные электроны в гетеросистеме *n*-Al*x*Ga1-xAs/GaAs. В единичном образце (1x1 см2) в поле 1 Тл и μ≅ 104 см2 (В \* с) для *dvx/dt ≅* 10 м/с2 следует ожидать сигнал *Vy≅* 6\*10-11B, что вполне доступно для современной техники измерений.

Рассмотрим одну из возможностей усиления эффекта на примере двух холловских элементов, один из которых (I) является генератором поля Холла, а второй (II) —нагрузкой. Схема соединений холловских элементов I и II показана на рисунке.

Итак, в магнитном поле *Bz* (направление которого на рисунке обозначено знаком ⊕) в первом холловском элементе (I) возбуждается ток *j*(1)*x* , поле *E*(1)*x* и холловское поле *E*(1)*y*, даваемые выражениями (1)–(3). Замкнув потенциальные (холловские) контакты *X*1-*X1* на токовые контакты *T*2-*T2* холловского элемента II, в последнем дополнительно к первичному полю *E*(2)*x* = *E*(1)*x*, определяемому выражением (2), имеем и поле *E*(1)*y*. Так что результирующее поле имеет два компонента — *E*(2)*x* = *E*(1)*x+ E*(1)*y*. Это возможно, если холловский элемент I рассматривать как генератор напряжения, нагруженный на холловский элемент II. В этом случае должен выполняться режим ”холостого хода”, для чего необходимо выполнить условие *R*(*X*1-*X*1)<<*R*(*T*2-*T*2), где *R* — сопротивление между соответствующими контактами. В таком случае в холловском элементе II возбуждается поле

E(2)y=(E(1)y+ E(1)y)μBz (4)

Учитывая соотношение *E*(1)*y=E*(1)*xμBz,* получаем

E(2)y=(1+μBz)μBzE(1)x (5)

Непосредственное наблюдение эффекта, видимо, затруднено. Более реально осуществить опыты с вибрацией образца в магнитном поле. Полезный сигнал ε*y* при этом может быть отделен от наводки ε\**y* по квадратичной зависимости от частоты колебаний ω (наводка пропорциональна 1-й степени частоты колебаний).

В самом деле, для данной геометрии опыта (см рисунок) в магнитном поле *B*(0; 0; *Bz*) при изменении координаты *x* со временем по закону *x* = *x*0 cos ωt, где ω — частота задающего генератора, нагруженного на пьезоэлемент, и *x*0 — амплитуда колебаний последнего, имеем из соотношения (3)

 (6)

где *ly* — расстояние между холловскими контактами образца (*X*1-*X*1) т. е. E*y* = *Eyly*. Паразитная наводка ε\**y*, возникающая в соединительных проводах в соответствии с законом электромагнитной индукции Фарадея, определяется выражением

 (7)

где *l\*y* — эффективная длина соединительных проводников, включающих образец в схему измерений. Таким образом, полезный сигнал ε*y* имеет отличительные особенности по отношению к наводке ε\**y*. Первая особенность это пропорциональность величине ω2, тогда как ε\**y*≈ω. Одновременно ε*y* во времени изменяется синфазно, а ε\**y* — противофазно напряжению задающего генератора. Существенно отметить, что масса, входящая в выражения (1)-(3), это масса свободного электрона; величина же подвижности *μ* определяется эффективной массой.

Рис 5.1

*Схема усиления холловского поля из двух элементов I и II.*

*Указаны направления: знаком ⊕ — магнитного поля Bz; стрелками — ускорения dVx/dt; полей Холла E(1)y , E(2)y ; плотностей тока j(1)x , j(2)x .*

6. Датчик ЭДС Холла.

Датчик ЭДС Холла – это элемент автоматики, радиоэлектроники и измерительной техники, используемый в качестве измерительного преобразователя, действие которого основано на эффекте Холла. Представляет собой тонкую прямоугольную пластину (площадь – несколько мм2), или пленку, изготовленную из полупроводника (Si, Ge, InSb, InAs), имеет четыре электрода для подвода тока и съёма ЭДС Холла. Чтобы избежать механических повреждений, пластинки Холла ЭДС датчика монтируют (а пленку напыляют в вакууме) на прочной подложке из диэлектрика (слюды, керамики). Для получения наибольшего эффекта толщина пластины (плёнки) делается возможно меньшей. Датчики ЭДС Холла применяют для бесконтактного измерения магнитных полей (от 10-6 до 105 Э). При измерении слабых магнитных полей пользуются Холла ЭДС датчиками, вмонтированными в зазоре ферро– или ферримагнитного стержня (концентратора), что позволяет значительно повысить чувствительность датчика. Так как в полупроводниках концентрация носителей зарядов (а следовательно, и коэффициент Холла) может зависеть от температуры, то в случае точных измерений необходимо либо термостатировать Холла ЭДС датчик, либо применять сильнолегированные полупроводники (последнее снижает чувствительность датчика).

При помощи Холла ЭДС датчика можно измерять любую физическую величину, которая однозначно связана с магнитным полем; в частности можно изменять силу тока, так как вокруг проводника с током образуется магнитное поле, которое можно измерить. На основе Холла ЭДС датчика созданы амперметры на токи до 100 кА. Кроме того Холла ЭДС датчики применяются в измерителях линейных и угловых перемещений, а также в измерителях градиента магнитного поля, магнитного потока и мощности электрических машин, в бесконтактных преобразователях постоянного тока в переменный, и, наконец, в воспроизводящих головках систем звукозаписи.

8. Список используемой литературы.

1) Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. *Теоретическая физика*, т. VIII. *Электродинамика сплошных сред* (М., Наука, 1982)

с. 309.

2) И.М. Цидильковский УФН, **115**, 321 (1975).

*Редактор Т.А. Полянская*

3) Физика и техника полупроводников, 1997, том 31, № 4

##### 4) И.В. Савельев Курс общей физики, т. II. *Электричество и магнетизм. Волны. Оптика*: Учебное пособие. – 2-е издание, переработанное (М., Наука, главная редакция физико-математической литературы,1982) с.233 – 235.

5) Большая советская энциклопедия, том 28, третье издание (М., издательство «Советская энциклопедия», 1978) с.338-339.