

Лекционные демонстрации, 15 минут.

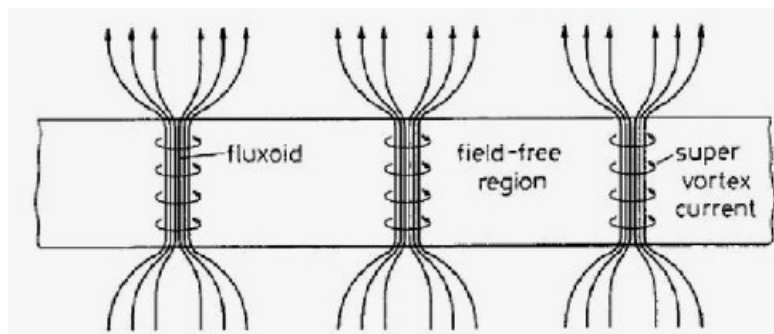
Свойства сверхпроводников (продолжение).

10). Сверхпроводники 2-го рода.

Сверхпроводник, состоящий из атомов одного химического элемента, является сверхпроводником 1-го рода. Сплавы разных металлов и металлокерамики являются сверхпроводниками 2-го рода.

При увеличении внешнего магнитного поля сверхпроводники переходят из сверхпроводящего состояния в состояние с обычной отличной от нуля проводимостью (в сильном магнитном поле сверхпроводимость пропадает). В сверхпроводниках 2-го рода этот переход происходит через некоторое промежуточное состояние (частичный эффект Мейснера), которое отсутствует у сверхпроводников 1-го рода.

В сверхпроводящих сплавах полный эффект Мейснера наблюдается только в слабых магнитных полях. В более сильном магнитном поле в сверхпроводящем сплаве наблюдается частичный эффект Мейснера. В этом случае магнитное поле проникает в объем сверхпроводника в виде узких пучков магнитных линий. Внутри этих пучков магнитных линий вещество переходит из сверхпроводящего состояния в обычное состояние, а между пучками остается в сверхпроводящем состоянии. Вокруг пучков магнитных линий в сверхпроводнике образуются токи (вихри Абрикосова). Если после этого внешнее магнитное поле убрать, то вихри Абрикосова остаются. Такой сверхпроводник создает вокруг себя магнитное поле, подобно постоянному магниту. Вихри Абрикосова поддерживают пучки линий магнитного поля в объеме сверхпроводника. На малых расстояниях внутри сверхпроводника вихри Абрикосова отталкиваются друг от друга, как однонаправленные магнитные диполи. Как пишут в научной литературе, на больших расстояниях внутри сверхпроводника вихри Абрикосова притягиваются друг к другу, хотя мне кажется, что центр каждого вихря привязан к неоднородности материала (к дефекту сверхпроводимости), поэтому вихри расходятся друг от друга неохотно. В результате вихри Абрикосова образуют структуру с дальним порядком подобно двумерному кристаллу, где два измерения перпендикулярны пучкам линий магнитного поля.



Если внешнее магнитное поле убрать, то вихри Абрикосова остаются в сверхпроводнике, и сверхпроводник создает вокруг себя магнитное поле, как постоянный магнит. К этому сверхпроводнику можно поднести другой магнит в такой полярности, что на больших расстояниях он будет притягиваться к

сверхпроводнику, а на малых начнет отталкиваться от своего изображения в сверхпроводнике. В результате магнит можно устойчиво подвесить над сверхпроводником 2-го рода без каких-либо отверстий в сверхпроводнике.

11). СВЧ граница сверхпроводимости.

ВЧ диапазон частот: $(30 \div 300)$ МГц.

СВЧ диапазон частот $(300 \text{ МГц} \div 300 \text{ ГГц})$. СВЧ — сверхвысокие частоты. Он же — микроволновой диапазон $\lambda = 1 \text{ мм} \div 1 \text{ м}$.

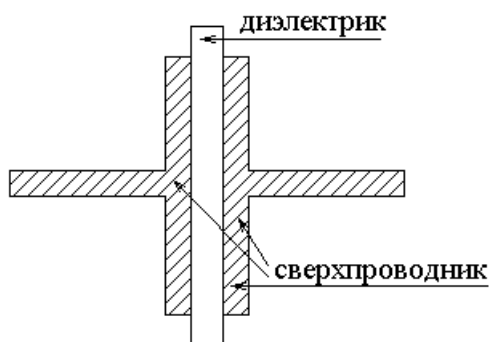
На частоте $f > 10^{11} \text{ Гц} = 100 \text{ ГГц}$ сверхпроводимости нет. Масса покоя электронов не позволяет им мгновенно подстраивать величину поверхностного тока, так чтобы не пропустить магнитное поле внутрь сверхпроводника. Эта инерционность изменения поверхностных токов и определяет СВЧ границу сверхпроводимости.

На более низких частотах сверхпроводник представляет собой идеальное зеркало, отражающее электромагнитные волны без потерь.

12). Эффект Джозефсона.

Эффект Джозефсона — это протекание постоянного тока через элемент Джозефсона.

Рассмотрим элемент Джозефсона.



Элемент Джозефсона — плоский конденсатор из сверхпроводника. Между пластинами конденсатора помещен тонкий слой диэлектрика. Характерная толщина диэлектрика — $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$.

При малом постоянном токе наблюдается стационарный эффект Джозефсона, при большом токе — нестационарный.

Стационарный эффект состоит в том, что постоянный ток через элемент Джозефсона проходит, а напряжение на элементе Джозефсона не падает $U = 0$.

В нестационарном эффекте Джозефсона при постоянном токе на элементе Джозефсона падает напряжение U , и из области диэлектрика излучается свет с частотой ν , такой что

$$h\nu = 2eU,$$

где e — модуль заряда электрона.

Факультативная вставка.

На основе элемента Джозефсона и закорачивающей его обкладки сверхпроводящей петли создают кубиты — элементарные ячейки памяти

квантового компьютера. Поток магнитного поля через петлю сверхпроводника квантуется, квант потока равен $\frac{h}{2e}$.

В системе СГС Гаусса $\frac{hc}{2e}$.

Конец факультативной вставки.

13). Куперовские пары.

Из уравнения $h\nu = 2eU$ видно, что энергия одного фотона равна изменению энергии пары электронов при прохождении элемента Джозефсона с напряжением U .

Следовательно, электроны преодолевают элемент Джозефсона парами.

Спин электрона $s = \frac{1}{2}$. Электроны объединяются парами с противоположно направленными спинами. Пара электронов (куперовская пара) имеет нулевой спин $S = 0$ и ведет себя, как один бозон. Электроны в куперовской паре расположены не слишком близко друг к другу, объем куперовской пары имеет размер порядка толщины слоя поверхностного тока сверхпроводника: 100 нм.

Факультативная вставка.

Элементарные частицы делятся на два больших класса.

Фермионы — частицы с полуцелым спином $s = \frac{1}{2}$ или $\frac{3}{2}$. Так, например, спин $s = \frac{1}{2}$ у электрона, протона и нейтрона.

Бозоны — частицы с целым спином $s = 0$ или 1 или 2. Например, у фотонов $s = 1$.

Никто не знает почему, но две частицы одного вида, если это два фермиона, не могут быть в одном состоянии.

Частицы одного вида, если это бозоны, наоборот, предпочитают находиться в одном состоянии, и это можно объяснить. Стремление бозонов находиться в одном состоянии называют эффектом группировки бозонов.

Рассмотрим три равновероятных состояния и два бозона. Какова вероятность того, что два бозона окажутся в одном и том же состоянии?



Элементарные частицы одного вида тождественны, то есть неразличимы.

Для обычных нетождественных частиц вероятность двум частицам оказаться в одном и том же состоянии из трех возможных состояний равна $\frac{3}{9}$, так как всего вариантов размещения частиц 9, а число благоприятных вариантов размещения 3.

Для тождественных бозонов число возможных состояний — 6, так как перестановка тождественных бозонов не приводит к новому состоянию. Предположим, что эти 6 состояний равновероятны. Все выводы из этого предположения согласуются с опытом. Следовательно, предположение верное. В таком случае вероятность того, что два бозона будут в одном состоянии равна $\frac{3}{6}$.

Рассмотрим теперь мысленный опыт, в котором эти два бозона вбрасывают в систему из трех состояний по очереди один за другим.

Первый бозон равновероятно попадает в любое из трех состояний. Второй бозон попадает в то же состояние, что и первый бозон, с вероятностью $\frac{3}{6} = \frac{1}{2}$, так как это обсуждавшаяся выше вероятность того, что два бозона будут в одном состоянии.

Сумма всех вероятностей равна 1, тогда вероятность того, что второй бозон попадает в каждое из двух оставшихся состояний, равна $\frac{1}{4}$.

Следовательно, вероятность попадания в занятое состояние вдвое больше, чем вероятность попадания в свободное состояние.

Аналогично можно доказать, что для любого числа состояний $p_i \sim (n_i + 1)$, где p_i — вероятность бозону попасть в i -е состояние, в котором уже есть n_i бозонов.

Используя комбинаторику и распределение Больцмана можно получить, что для большого числа частиц в системе среднее число частиц в i -м состоянии n_i равно:

для бозонов
$$n_i = \frac{1}{e^{\frac{E_i - \mu(T)}{kT}} - 1}$$
 — это распределение Бозе — Эйнштейна,

для фермионов
$$n_i = \frac{1}{e^{\frac{E_i - \mu(T)}{kT}} + 1}$$
 — распределение Ферми — Дирака,

для нетождественных частиц
$$n_i = \frac{1}{e^{\frac{E_i - \mu(T)}{kT}}}$$
 — распределение Больцмана.

Здесь $\mu(T)$ — химический потенциал, который находится из условия нормировки: $\sum_i n_i = N$, где N — общее число частиц в системе. Для частиц с нулевой массой покоя $\mu(T) = 0$.

Сверхпроводимость — это коллективный эффект. Я высверлил отверстие в сверхпроводящем диске и выяснил, что малые крупинки сверхпроводника (диаметром меньше 0.3 мм) не отталкиваются от магнита. В них нет

достаточного количества атомов, чтобы там происходил фазовый переход в сверхпроводящее состояние.

Конец факультативной вставки.

При охлаждении системы с большим числом бозонов происходит фазовый переход — бозе-конденсация, при которой все бозоны переходят в одинаковое (нижнее) состояние энергии. Этот вывод следует из анализа формулы распределения Бозе — Эйнштейна. Можно сказать, что бозоны не хотят находиться в разных состояниях.

Сверхпроводимость — это бозе-конденсация куперовских пар.

Сверхтекучесть гелия — бозе-конденсация атомов гелия. В сверхтекучем состоянии гелий протекает через длинную трубу без вязкого трения. Дело в том, что все атомы гелия находятся в одном состоянии с одинаковой скоростью, направленной вдоль оси трубы. При этом атомы не хотят неупруго рассеиваться на стенках трубы, так как при неупругом рассеянии атом окажется в другом состоянии не таком, как все другие атомы.

Аналогично вязкому трению потока жидкости в трубе сопротивление проводника связано с неупругим рассеянием электронов на ионах металлической решетки. В условиях сверхпроводимости электроны парами движутся в одну сторону и не желают рассеиваться на положительных ионах сверхпроводника.

Электрический разряд в газе.

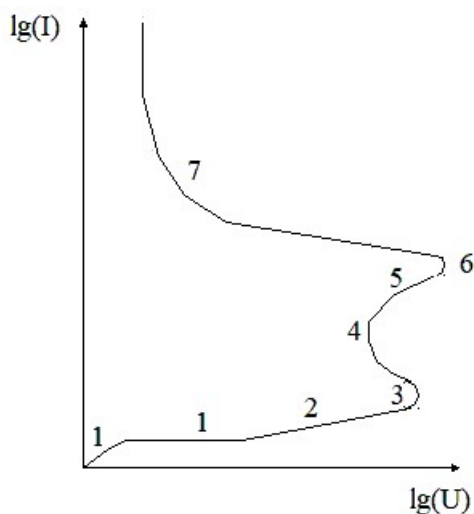


Рис.1 Вольт-амперная характеристика разряда в газе.

1 — несамостоятельный разряд, плотность тока $j < 10^{-12}$ А/см²;

2 — темновой несамостоятельный разряд;

3-4-5 — тлеющий разряд, $j = (10^{-4} — 10^{-2})$ А/см²;

4-5 — аномальный тлеющий разряд;

6-7 — дуговой разряд, $j > 0.1$ А/см².

1). При малой (или сколь угодно малой) напряженности электрического поля в газе наблюдается так называемый несамостоятельный разряд.

В газовой среде всегда есть небольшое количество свободных электронов и положительных ионов. Из космоса постоянно прилетают частицы с высокими

энергиями. Частично заряженные частицы в газе образуются под действием высокоэнергетических частиц космического излучения в результате распада нейтральных атомов; частично электроны в газе появляются в результате фотоэффекта, при котором фотоны света выбивают электроны из проводящих электродов; частично электроны образуются в газе в результате термоэлектронной эмиссии, при которой изредка электроны в соответствии с распределением Ферми — Дирака случайно получают энергию достаточную для того, чтобы покинуть проводящий электрод.

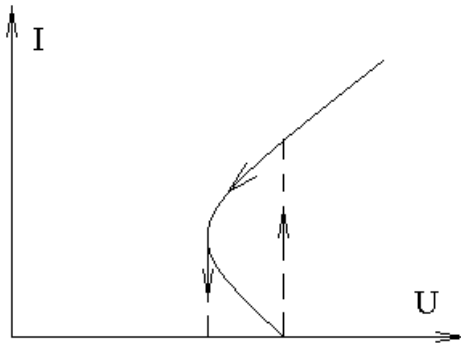
Если к воздушному промежутку между проводящими электродами приложить напряжение, то между электродами потечет электрический ток — несамостоятельный разряд в газе.

Часть образующихся под действием внешних причин зарядов не достигает электродов, а попадают на стенки разрядной трубки и прилипает к ним. По мере увеличения приложенного к электродам напряжения всё большая часть формирующихся зарядов несамостоятельного разряда достигает электродов, и ток возрастает за счет сбора всё большей части образующихся заряженных частиц. Это отображено на левом самом начальном наклонном участке графика цифрой 1. Следующий участок также отмечен цифрой 1, здесь ток не возрастает с ростом напряжения, так как уже все формирующиеся заряды достигают электродов.

На участке 2 формируются лавины электронов, но положительные ионы не выбивают электроны из катода. Это так называемый темновой несамостоятельный разряд. Приложенное между проводящими электродами напряжение ускоряет заряженные частицы в газе. Если напряженность электрического поля достаточно велика, то между столкновениями с нейтральными атомами газа электроны успевают набрать энергию достаточную для ионизации нейтральных атомов, по пути к аноду такие электроны будут создавать новые пары электронов и положительных ионов. Электрическое поле ускоряет новые электроны. При ударе снова образуются заряженные частицы и так далее. Образуется лавина электронов, но ионизация атомов происходит только в направлении анода от начального положения появившегося электрона. Каждая такая лавина электронов доходит до анода и прекращается. Положительные ионы, сформированные лавиной электронов, медленно дрейфуют к катоду, достигают катода и уходят от катода в виде нейтральных атомов. По мере возрастания приложенного к электродам напряжения каждый электрон достигает достаточной для ионизации атомов энергии на всё более коротком расстоянии. При этом каждая лавина несет в себе всё больший заряд.

Если приложенное напряжение достигает точки 3 на рисунке, то загорается самостоятельный разряд в газе. В этом случае при ударе положительного иона о катод из катода выбиваются новые электроны. Источником электронов становится сам разряд, а не внешние причины вроде космических лучей, поэтому разряд называют самостоятельным. Момент, когда загорается самостоятельный разряд, называют электрическим пробоем газа.

В линейном масштабе вольт-амперная характеристика тлеющего разряда приведена на рисунке ниже.



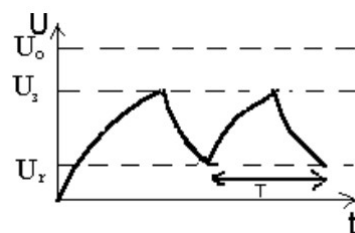
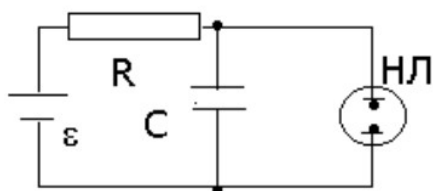
Правая вертикальная пунктирная линия — пробой газа. Сила тока при этом изменяется скачком. Если теперь понижать напряжение на разряде, то разряд не погаснет до тех пор, пока напряжение не достигнет левой вертикальной пунктирной линии.

Часто оказывается, что между электродами есть заметная паразитная емкость. После пробоя газа эта емкость быстро разряжается, и часть напряжения падает на внутреннем сопротивлении источника. Если напряжения между электродами не достаточно для поддержания самостоятельного разряда, то разряд гаснет. Получается так называемый искровой разряд — искра. Если искра очень мощная, то это — молния.

Участок между точками 3 и 4 вольт-амперной характеристики разряда на первом рисунке — это тлеющий разряд с отрицательным дифференциальным сопротивлением $R_{дифф} \equiv \frac{dU}{dI}$. Чтобы заставить разряд гореть в точке на участке

3-4, необходимо последовательно с разрядом включить резистор с сопротивлением большим, чем модуль отрицательного дифференциального сопротивления в соответствующей точке. В самостоятельном разряде положительные ионы, ударяясь о катод, выбивают из него электроны, а сами возвращаются в разряд в виде возбужденных нейтральных атомов. Эти возбужденные атомы излучают свет прямо около катода, газ светится у катода. На участке 3-4 первого рисунка с ростом тока разряда возрастает площадь катодного свечения газа. Чем больше площадь, тем больше электронов выбивается из катода. Чем больше электронов, тем меньше напряжения падает на разряде. В результате тлеющий разряд имеет отрицательное дифференциальное сопротивление.

Отрицательное дифференциальное сопротивление, например неоновой лампы (НЛ), позволяет создать генератор импульсов по схеме, изображенной на рисунке ниже. Генерация происходит при условии $R < R_{дифф НЛ}$.



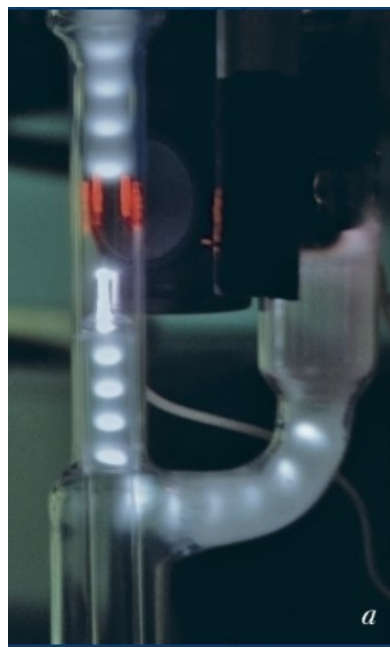
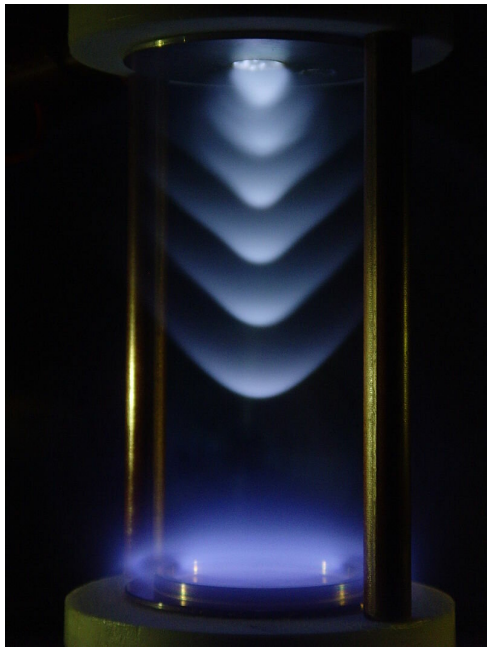
Участок 4-5 вольт-амперной характеристики на рисунке 1 — это аномальный тлеющий разряд. На этом участке катодное свечение покрывает весь катод, и рост приложенного напряжения не приводит к увеличению электронов в разряде. На этом участке положительное дифференциальное сопротивление.

Участок 6-7 вольт-амперной характеристики на рисунке 1 — дуговой разряд. В дуговом разряде положительные ионы, ударяющиеся в катод, сильно его разогревают. Из горячего катода вылетает большое количество электронов в результате термоэлектронной эмиссии. При этом резко падает напряжение на разряде. Этот участок вольт-амперной характеристики снова имеет отрицательное дифференциальное сопротивление.

Страты газового разряда.

Электроны и ионы, разогнанные электрическим полем, не обязательно ионизируют нейтральные атомы при столкновении с ними. Вместо этого возможно возбуждение нейтральных атомов, то есть переход атомов в энергетическое состояние с большей энергией электронной оболочки. При возвращении в состояние с наименьшей энергией атом излучает избыток энергии в виде светового фотона. По этой причине разряд в газе светится.

Электроны, выбитые из катода разрядной трубки, по мере ускорения электрическим полем не сразу достигают скорости достаточной для ионизации нейтральных атомов, и даже скорости достаточной для возбуждения атомов. В результате около катода образуется темное катодное пространство, в котором нет свечения газа. За темным катодным пространством следует светящаяся область газа, в которой ускоренные полем электроны отдают энергию атомам газа. Потеряв энергию, электроны снова какое-то время ускоряются без возбуждения атомов газа. В этой области возникает второе темное пространство. За ним идет снова светлое пространство, затем снова темное и так далее. Это так называемые страты газового разряда. Положение страт часто бывает неустойчивым, так как страты изменяют концентрацию поверхностного заряда на стенках трубки, а заряд на стенках изменяет положение страт. При этом часто возникают автоколебания положения страт. Эти колебания могут быть и непериодическими.



Теория хаоса. Колебания страт часто оказываются неперiodическими или хаотическими. Хаос — это состояние системы, при котором очень малые (бесконечно малые) изменения начальных условий радикально изменяют движение системы.

Амбиполярная диффузия.

Тлеющий разряд иногда называют плазмой положительного столба. Дело в том, что в разрядной трубке концентрация положительных ионов чуть-чуть превышает концентрацию электронов.

При одинаковой энергии электронов и ионов масса электрона в тысячи раз меньше массы иона, поэтому скорость электрона в десятки, а то и сотни, раз больше скорости ионов. Электроны летят хаотически, а не только к аноду. Часть электронов быстро достигает стенки разрядной трубки. При столкновении со стенкой часть электронов прилипает к стенке.

В результате на стенке образуется отрицательный заряд, а в объеме газового разряда — недостаток электронов, положительный объемный заряд. В цилиндрической разрядной трубке возникает радиальное электрическое поле, которое задерживает (не пускает к стенке) электроны и ускоряет положительные ионы. Это радиальное напряжение возрастает до тех пор, пока поток на стенку более быстрых, но замедленных радиальным полем, электронов не окажется уравновешенным потоком ускоренных положительных ионов.

В постоянном газовом разряде к стенке движутся и отрицательные электроны, и положительные ионы. Это явление называется амбиполярной диффузией. В обратном направлении от стенки разрядной трубки к ее оси движутся нейтральные атомы.