

## Свойства сверхпроводников (продолжение).

### 10). Сверхпроводники 2-го рода (продолжение).

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 всяких отверстий в сверхпроводнике.

### 11). СВЧ граница сверхпроводимости.

ВЧ диапазон частот: (30 — 300) МГц.

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

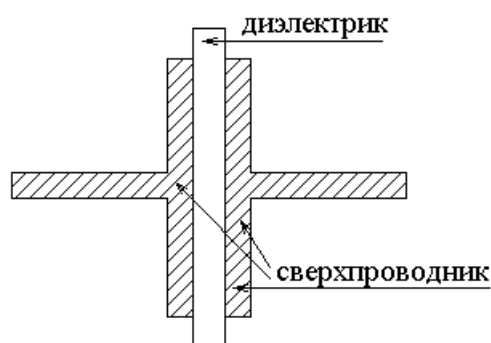
На частоте  $f > 10^{11} \text{ Гц} = 100 \text{ ГГц}$  сверхпроводимости нет. Масса покоя электронов не позволяет им мгновенно подстраивать величину поверхностного тока, так чтобы не пропустить магнитное поле внутрь сверхпроводника. Эта инерционность изменения поверхностных токов и определяет СВЧ границу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

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

В нестационарном эффекте Джозефсона — на элементе Джозефсона падает напряжение  $U$  и из области диэлектрика излучается свет с частотой  $\nu$ , 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  $\frac{hc}{2e}$  в системе СГС Гаусса и  $\frac{h}{2e}$  в системе СИ.

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. Пара электронов расположена 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.

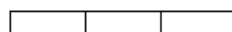
Фермионы — частицы с полуцелым спином  $s = \frac{1}{2}$  или  $\frac{3}{2}$ . Так, например, спин  $s = \frac{1}{2}$  у электрона, протона и нейтрона.

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 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.

Сопротивление проводника связано с неупругим рассеянием электронов на узлах металлической решетки. При сверхпроводимости электроны парами движутся в одну сторону и не желают рассеиваться на положительных ионах сверхпроводника.

#### Электрический разряд в газе.

Если к воздушному промежутку между проводящими электродами приложить достаточно большое напряжение, то в газе наступает электрический пробой и загорается разряд.

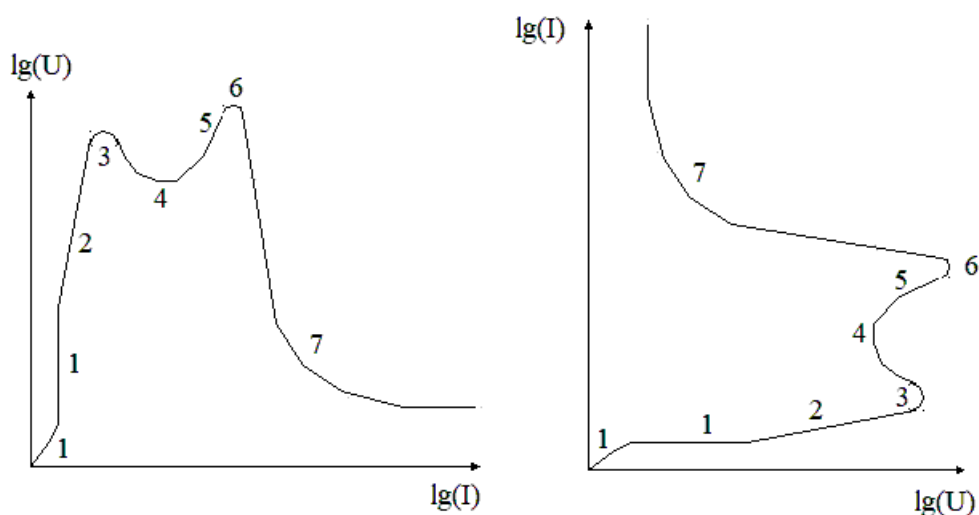
Возникновение электрического пробоя связано с тем, что в газовой среде всегда есть небольшое количество свободных электронов и положительных ионов. Частично эти заряженные частицы образуются в результате распада нейтральных атомов под действием высокоэнергетических частиц космического излучения. Из космоса постоянно прилетают частицы с высокими энергиями. Частично электроны в газе появляются в результате фотоэффекта, при котором фотоны света выбивают электроны из проводящих электродов, и, наконец, 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.

Приложенное между проводящими электродами напряжение ускоряет заряженные частицы в газе. Если напряженность электрического поля достаточно велика, то между столкновениями с нейтральными атомами газа заряженные частицы успевают набрать энергию достаточную для ионизации нейтральных атомов.

В результате таких неупругих столкновений образуются новые заряженные частицы — электроны и положительные ионы. Электрическое поле

ускоряет их. При ударе снова образуются заряженные частицы и так далее. Образующаяся лавина заряженных частиц представляет собой электрический пробой газа или искру.

Отрицательно заряженные электроны стремятся к положительно заряженному проводящему электроду — аноду. Положительные ионы стремятся к отрицательно заряженному катоду. При ударе положительного иона о катод из катода могут быть выбиты новые электроны, которые по пути к аноду будут создавать новые пары электронов и положительных ионов. Таким образом, искра пробоя превращается в тлеющий газовый разряд. С ростом силы тока увеличивается площадь катодного свечения и падает напряжение на разряде. Когда катодное свечение покрывает весь катод, дальнейшее увеличение тока разряда ведет к увеличению напряжения на разряде — это аномальный тлеющий разряд. Дуговой разряд возникает в случае сильного разогрева катода и многократного увеличения носителей тока за счет термоэлектронной эмиссии электронов катода.



1 — несамостоятельный разряд, ток  $< 10^{-12}$  А/см<sup>2</sup>; 3-4-5 — тлеющий разряд, ток  $(10^{-4} — 10^{-2})$  А/см<sup>2</sup>; 4-5 — аномальный тлеющий разряд (катодное свечение покрывает весь катод); 6-7 — дуговой разряд, ток  $> 0.1$  А/см<sup>2</sup>.

Отрицательное дифференциальное сопротивление разряда в газе.

Высокочастотный разряд.

Трансформатор Тесла.

-----

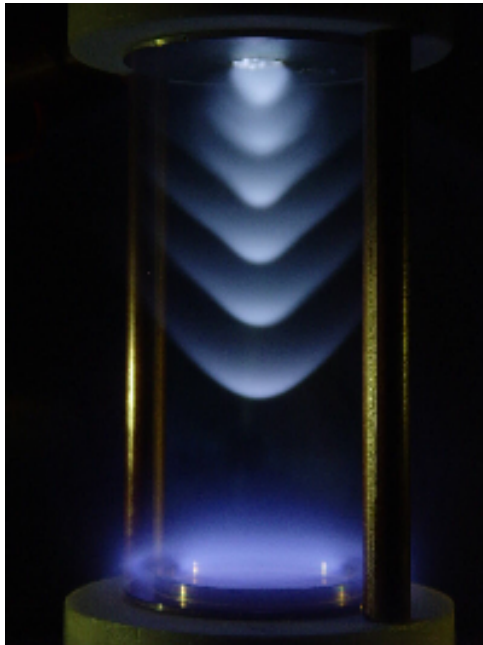
#### Страты газового разряда.

Электроны и ионы, разогнанные электрическим полем, не обязательно ионизуют нейтральные атомы при ударе 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 стенке трубки, а заряд на стенке изменяет положение страт. При этом часто возникают автоколебания положения страт. Эти колебания могут быть и непериодическими.

Теория хаоса. Колебания страт часто оказываются непериодическими 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 — 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 ни 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.

-----

#### Пылевая плазма.

Если в газовый разряд добавить твердую пыль, то пылинки, как и стенки трубки, заряжаются отрицательно. Пусть катод разрядной трубки расположен внизу, а анод — наверху. Тогда электрическое поле, действуя на заряженные пылинки, может уравновесить силу тяжести. Заряженные пылинки будут отталкиваться друг от друга своими отрицательными зарядами, образуя правильную структуру похожую на кристалл. Это так называемый пылевой кристалл.

#### Электробезопасность (начало).

Смертельный ток: 0.1 А.

Порог чувствительности: 3 мА.

Электрический стул.