

## К СТОЛЕТИЮ ОТКРЫТИЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

В 2011 г. исполнилось 100 лет открытия голландцем Хейке Камерлинг-Оннесом явления сверхпроводимости, за что он был удостоен Нобелевской премии. Однако это открытие не могло сразу получить широкого распространения и тем более применения, так как практическим исследованием сверхпроводимости могли заниматься лишь несколько лабораторий в мире, в том числе в Лейденском университете, в котором в 1911 г. Каммерлинг-Оннес изучая свойства веществ при низких температурах обнаружил, что при понижении температуры электрическое сопротивление ртути уменьшалось, а при температуре 4,2 К резко обращалось в нуль. Это явление получило название

**Г.В. Жуть,**

к. тех. н., доцент кафедры общей физики ЯГПУ им. К.Д. Ушинского,

**И.Н. Чернышев,**

аспирант МПГУ, лаборант кафедры общей физики ЯГПУ им. К.Д. Ушинского

сверхпроводимости, а температуру  $T$ , при которой происходит переход в сверхпроводящее состояние, называют критической температурой перехода. Рисунок 1 скопирован с одной из первых работ Каммерлинг-Оннеса, посвященной сверхпроводимости.

Следующий серьезный шаг в исследовании сверхпроводников был сделан в 1933 г. В. Мейснером и Р. Оксенфельдом, которые показали, что сверхпроводящее состояние обладает еще одним важным свойством. Оно заключалось в следующем: независимо от условий проведения эксперимента (т. е. независимо от того, было ли магнитное поле включено до или после перехода материала в сверхпроводя-

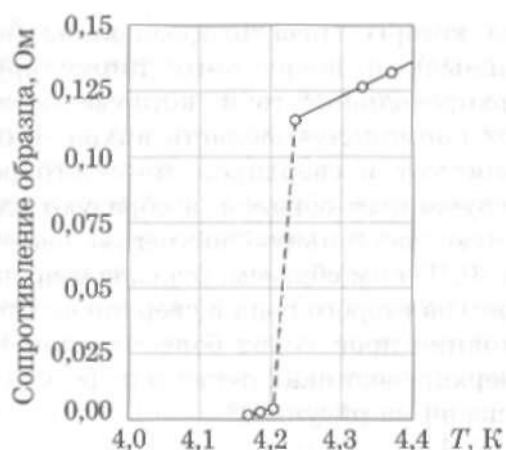


Рис. 1

щее состояние) магнитное поле всегда выталкивается из объема сверхпроводника. Это явление получило название эффекта Мейснера–Оксенфельда. В сверхпроводнике магнитная индукция  $\vec{B} = 0$ , магнитная проницаемость  $\mu = 0$ , а магнитная восприимчивость  $\chi_m = k_m = -1$ , (безразмерная величина, характеризующая способность данного вещества намагничиваться в магнитном поле и связывающая намагничённость  $\vec{J}_m$  с напряженностью магнитного поля  $\vec{H}$ :  $\vec{J} = k_m \vec{H}$ ), т. е. сверхпроводник является «идеальным диамагнетиком»\*.

Классическая физика не могла дать объяснения сверхпроводимости. Только с развитием квантовой физики были найдены ответы на некоторые из поставленных вопросов. В 1957 г. Дж. Бардином, Л. Купером и Дж. Шриффером была создана макроскопическая квантовая теория сверхпроводимости (теория БКШ). Теория строится на представлении об образовании пар электронов с противоположным спи-

ном, которые взаимодействуют друг с другом через узлы кристаллической решетки. Размер пары около  $10^{-6}$  м (для сравнения: размер атома —  $10^{-10}$  м) и потеря энергии при столкновении ее с узлами кристаллической решетки очень мала. Впоследствии эти пары назвали куперовскими.

В это же время в СССР вопросами сверхпроводимости и сверхтекучести занимались и русские ученые, работавшие на факультете общей и прикладной физики МФТИ, в физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова и многих других. С этой темой, так или иначе, связывали себя такие именитые ученые как: П.Л. Капица, Л.Д. Ландау, В.Л. Гинзбург, А.А. Абрикосов.

Довольно долгое время теория БКШ являлась единственной теорией для объяснения возникновения эффекта сверхпроводимости вплоть до середины 80-х годов XX в.

В 1986 г. (с апреля по декабрь) несколько лабораторий независимо друг от друга получают сверхпроводники на основе лантана, бария и оксида меди. Температура перехода в сверхпроводящее состояние этого образца превосходила ранее известные данные на 30–40 К. А уже в феврале 1987 г. был получен сверхпроводник на основе иттрия, бария и оксида меди (иттриевая керамика), температура перехода в сверхпроводящее состояние которого составляла 93 К, что выше температуры кипения азота. Таким образом, в физике начался, так называемый, «сверхпроводниковый бум». Явлением сверхпроводимости заинтересовались многие лаборатории мира. В это время было выяснено, что получаемые сверхпроводники на основе оксида меди не только имеют более высокую температуру перехода в сверхпроводящее состояние, но и по-другому взаимодействуют с магнитным полем. С этого момента началось разделение сверхпроводников на два

\* Диамагнетиками называют материалы, атомы (ионы) которых не обладают результирующим магнитным моментом. Внешне диамагнетики проявляют себя тем, что выталкиваются из магнитного поля. К ним относят цинк, медь, золото, ртуть и другие материалы.

типа: сверхпроводники первого и второго рода. Сверхпроводниками первого рода оказались простые элементы (свинец, тантал, алюминий и др.) за исключением Cu, Ag, Au, Pt, щелочных (Li, Na, K и др.), щелочноземельных (Ca, Sr, Ba, Ra), а сверхпроводниками второго рода все сложные оксиды и сплавы. В 1993 г. был получен сверхпроводник  $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$  с температурой перехода в сверхпроводящее состояние равной 135 К, а при давлении 350 тысяч атмосфер 165 К, что лишь на 20 К уступает самой низкой температуре на Земле зарегистрированной в 1983 г.

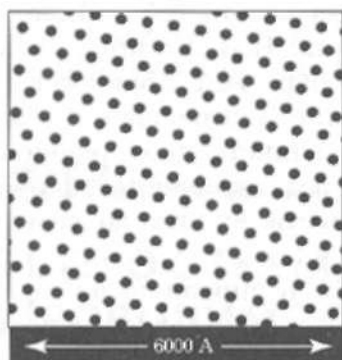


Рис. 2

В сверхпроводниках 2-го рода разрушение сверхпроводимости идет поэтапно. Пока индукция магнитного поля не превышает  $B_{c1}$  (нижнее критическое поле), сверхпроводник — идеальный диамагнетик, т. е. находится в мейснеровском состоянии. Когда индукция поля превысила критическое значение  $B_{c1}$  (рис. 2), сверхпроводнику становится энергетически выгодно впускать поле в себя в виде своеобразных микроскопических «нитей» (характерный размер которых составляет 100 нм — 1 мкм), вытянутых вдоль силовых линий внешнего поля. Чем больше индукция поля, тем больше этих нитей будет в сверхпроводнике. При большом увеличении эти образования представляют собой вихри (абрикосовские вихри),

ядра которых несверхпроводящие (нормальные), а вокруг них циркулируют сверхпроводящие токи, которые экранируют нормальную область вихря. Вихри проникают в сверхпроводник 2-го рода не случайным образом, а образуют однородную треугольную вихревую решетку (рис. 3). Таким образом, переход сверхпроводников второго рода в сверхпроводящее состояние происходит более плавно, чем в сверхпроводниках первого рода, как это показано на рисунке 3.

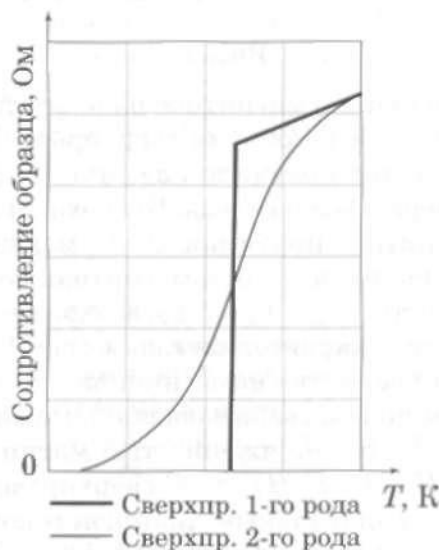


Рис. 3

С середины 90-х годов наступило некоторое затишье. Казалось, что ученые, как теоретики, так и экспериментаторы зашли в тупик исследований, и дальнейшее изучение требовало поиска новых подходов. До сих пор не решен вопрос о теоретическом объяснении сверхпроводимости второго рода. Однако в прошлом году в мировой научной литературе стали появляться данные о новых открытиях, которые пусть и не сулят повышения температуры перехода в сверхпроводящее состояние, зато расширяют наши знания о действии магнитного поля на сверхпроводники.

В 2005 г. Егор Бабаев и Мартин Спейт теоретически предсказали существование сверхпроводников 1,5-го рода, в которых взаимодействие вихрей отличается от сверхпроводников 1-го и 2-го рода и напоминает поведение молекулярных сил. Иными словами, вихри на близких расстояниях должны отталкиваться друг от друга, а на далеких расстояниях притягиваться. Вследствие этого возможно образование более сложных и неоднородных (по сравнению с абрикосовской решеткой) вихревых структур. Например, формирование объединений (кластеров) из двух и более близкорасположенных вихрей или, как их назвали вышеупомянутые теоретики Бабаев и Спейт, вихревых «молекул». Спустя четыре года группа ученых под руководством Виктора Мошалкова сообщила, что действительно в монокристаллах  $MgB_2$  проникновение магнитного поля происходит приблизительно так, как предсказывали Е. Бабаев и М. Спейт. Эксперименты установили, что пока индукция внешнего магнитного поля не превышает  $B_{c1}$ , сверхпроводник находится в мейснеровском состоянии, т. е. не впускает в себя силовые линии. Далее, при индукции поля 0,0001 Тл, вихри входят в сверхпроводник, образуя не треугольную решетку, а паутинную. Плавное увеличение

индукции магнитного поля до 0,0005 Тл приводит к преобразованию паутинной вихревой решетки в чередующиеся полосы с высокой и низкой плотностью вихрей, т. е. те самые кластеры, о которых говорилось выше. Если усилить внешнее поле, то произойдет еще одно превращение и возникнет хорошо знакомая треугольная решетка вихрей: диборид магния ведет себя уже как сверхпроводник второго рода.

Особенности сверхпроводников различных типов представлены на рисунке 4.

Сейчас несколько крупных лабораторий в мире занимаются вопросами сверхпроводимости. Строится множество различных гипотез. Одна из них основывается на изменении плоскости оксида меди в составе сверхпроводника, для достижения более высокой температуры перехода в сверхпроводящее состояние. Предпосылки этой гипотезы были сделаны еще в конце 80-х годов во время изучения свойств и строения кристаллической решетки иттриевой керамики.

На сегодняшний день токопроводящие ленты ВТСП получают в виде тонких пленок на гибких металлических подложках и используют для создания сверхпроводимых ЛЭП. Так же создают сверхчувствительные датчики, способные определить малое изменение энергии. Сверхпроводники первого рода используют для



создания сверхсильных магнитных полей в ускорителях элементарных частиц и для создания поездов на магнитной подушке.

Несмотря на то, что техника с использованием сверхпроводников шагнула далеко вперед, остаются неясными дальнейшие перспективы развития сверхпроводимости.

### Литература

1. Гинзбург В.Л., Андрюшин Е.А. Сверхпроводимость. — М.: Альфа-М, 2006.

2. Тригг Дж. Физика XX века: ключевые эксперименты. — М.: Мир, 1978.

3. Капица П.Л. Эксперимент, теория, практика. — М.: Наука, 1981.

4. Андроникашвили Э. Воспоминания о жидком гелии. — Тбилиси: Ганатлеба, 1980.

5. <http://www.ewh.ieee.org/tc/csc/europe/europeguide/Category6.html> — список европейских лабораторий, занимающихся практическим применением сверхпроводимости в настоящее время.

### Приложение. Историческая справка

#### Нобелевские премии по физике, присужденные за вклад в исследование сверхпроводимости

1913 г. «За исследования свойств вещества при низких температурах, которые привели к производству жидкого гелия» (Х. Камерлинг-Оннес)

1972 г. «За создание теории сверхпроводимости, обычно называемой БКШ-теорией» (Дж. Бардин, Л. Купер, Дж. Шриффер).

1987 г. «За важный прорыв в физике, выразившийся в открытии сверхпроводимости в керамических материалах» (Г. Беднорц, К. Мюллер).

2003 г. «За создание теории сверхпроводимости второго рода и теории сверхтекучести жидкого гелия-3» (А. Абрикосов, В. Гинзбург, Э. Леггет).

#### Ученые, внесшие вклад в развитие исследований по сверхпроводимости

Капица Петр Леонидович (1894–1984) — советский инженер, физик, академик АН СССР.

Лауреат Нобелевской премии по физике (1978) за открытие явления сверхтекучести жидкого гелия, ввел в научный обиход термин «сверхтекучесть».

Гинзбург Виталий Лаазаревич (1916–2009) — советский и российский физик-теоретик, академик АН СССР и РАН, доктор физико-математических наук, лауреат Нобелевской премии по физике (2003).

Абрикосов Алексей Алексеевич (род. 1928) — советский и американский физик, лауреат Нобелевской премии по физике (2003), академик РАН, доктор физико-математических наук.

Ландау Лев Давидович (1908–1968) — выдающийся советский физик-теоретик, ака-

демик АН СССР. Лауреат Нобелевской премии.

Бардин Джон (1908–1991) — американский физик, единственный человек, получивший две Нобелевские премии по физике: в 1956 г. за изобретение транзистора и в 1972 г. за теорию обычных сверхпроводников или просто БКШ-теория.

Купер Леон Нил (род. 1930) — американский физик, лауреат Нобелевской премии. Именем Купера названы электронные пары. В 2006 г. является профессором Университета Брауна.

Шриффер Джон Роберт (род. 1931) — лауреат Нобелевской премии в области физики в 1972 г. (совместно с Дж. Бардиным и Л.Н. Купером) за создание БКШ-теории.