

# БУМ ВОКРУГ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

Л. МАТВЕЕНКО, канд. физ.- мат. наук

- Прорыв в сверхпроводящей микроэлектронике
- Появление сверхчувствительных приемников, микрогенераторов, мини-магнитометров
- Магнитометрические сканирующие микроскопы

Чуть более 10 лет назад в средствах массовой информации стали упоминаться такие понятия, как “сверхпроводимость”, “высокотемпературная сверхпроводимость”, “низкотемпературная сверхпроводимость” — термины, которые ранее обычно употребляли только специалисты — физики. Сообщалось о революционном научном открытии, о прорыве в микроэлектронике и наступлении новой эры в техническом развитии общества.

Почему было уделено тогда, и тем более сегодня, такое внимание явлению, известному ученым и специалистам уже десятки лет, но с которым большинство людей сталкивалось разве что в произведениях писателей-фантастов? В чем суть этого явления и какие оно сулит перспективы? Чтобы ответить на эти вопросы, обратимся к истории открытия сверхпроводимости и поясним основные понятия, связанные с ним.

В 1911 г. голландский физик Х. Камерлинг-Оннес, исследуя электрическое сопротивление ртути при очень низких температурах, неожиданно для себя обнаружил, что при температуре, равной 4,15 К (это приблизительно — 269°С), сопротивление образца вдруг резко упало до нуля, в то время как такие прекрасные проводники, как золото и медь при тех же температурах имели весьма малое, но вполне измеримое остаточное сопротивление ( $10^{-9}$  Ом·см). Это явление Камерлинг-Оннес назвал

“сверхпроводимостью”, а температуру  $T_c$ , при которой происходит переход из нормального в сверхпроводящее состояние, — “критической” или “температурой перехода”.

Некоторое время спустя обнаружили, что подобный же эффект наблюдается и в других металлах, например, алюминии, свинце, индии. Из чистых металлов самую высокую  $T_c$  имеет ниобий:  $T_c$  (Nb) ~ 10 К.

С течением времени учеными достигался дальнейший рост критических температур сверхпроводников. Правда, медленный, но довольно постоянными темпами (рис. 1). И только в 1973 г. была зарегистрирована самая высокая  $T_c$  в сплаве ниобия с германием (NbGe) — 23,2 К.

В конце 1986 г. мир облетела сенсационная весть: ученые Ж. Бендорц и К. Мюллер, работающие в Цюрихе в исследовательской лаборатории известной компьютерной фирмы IBM, сообщили о зафиксированном ими резком падении сопротивления керамического металлооксидного образца Ba-La-Cu-O при температуре 35 К! А вскоре поступило подтверждение других исследователей, в том числе российских, о наблюдении этого явления.

В первых числах марта 1987 г. стало известно о новом замечательном открытии: в Алабамском и Хьюстонском университетах группой М. К. Ву с сотрудниками на керамике Y-Ba-Cu-O (так называемой иттриевой керамике) была

достигнута температура сверхпроводящего перехода  $T_c \sim 92$  К, что гораздо выше температуры кипения жидкого азота (77 К, или -196°С), дешевого и доступного хладагента, производимого промышленностью в больших количествах.

На сегодняшний день уже имеются материалы, в которых температура перехода в сверхпроводящее состояние достигает 135 К, и нет оснований полагать, что это уже предел.

Интерес к сверхпроводимости принял массовый характер. В терминологии физиков появились два понятия: “низкотемпературная сверхпроводимость” (НТСП) и “высокотемпературная сверхпроводимость” (ВТСП). Авторам открытия ВТСП Ж. Бендорцу и К. Мюллеру была присуждена Нобелевская премия.

В течение многих лет считали, что сверхпроводящее состояние, в первую очередь, характеризуется бесконечной проводимостью. В 1933 г. немецкими физиками Мейснером и Оксенфельдом было открыто второе фундаментальное свойство сверхпроводников — идеальный диамагнетизм. Эффект Мейснера (рис. 2) состоит в том, что при охлаждении массивного сверхпроводника ниже температуры перехода происходит выталкивание магнитного поля из толщи сверхпроводящего образца в окружающее магнитное поле, так что внутри образца (за исключением тонкого поверхностного слоя толщиной 100...1000 ангстрем) оно всегда равно нулю. Именно эти два свойства — бесконечная проводимость и идеальный диамагнетизм — являются главными характеристиками сверхпроводимости.

Исследования открыли еще один важный эффект. Если увеличивать напряженность магнитного поля, то при некоторой величине его  $H=H_c$ , называемой “критическое магнитное поле”, сверхпроводимость скачком исчезает и образец переходит в “нормальное” состояние. То же самое происходит при увеличении тока, пропускаемого через сверхпроводник. Сверхпроводимость разрушается при достижении током критической величины  $I = I_c$ .

Позднее было обнаружено, что в зависимости от вида взаимодействия с магнитным полем сверхпроводники делятся на два типа: сверхпроводники 1-го рода — как правило, чистые металлы и сверхпроводники 2-го рода, к которым относится большинство сплавов, чистый ниобий и вновь открытые высокотемпературные металлооксидные сверхпроводники.

Сверхпроводники 1-го рода, характерная особенность которых состоит в том, что они полностью выталкивают магнитный поток из своего объема, все имеют критические магнитные поля ниже 100 мТл, при этом они скачком переходят из сверхпроводящего состояния в нормальное.

У сверхпроводников же 2-го рода, существование которых впервые было предсказано в 1952 г. одним из основоположников теории сверхпроводимости российским ученым А. А. Абрикосовым, при величине внешнего поля  $H=H_{c1}$  (первое критическое поле) реализуется смешанное состояние (рис. 3), в котором сверхпроводник как бы пронизан тонкими нитями или цилиндриками (ди-

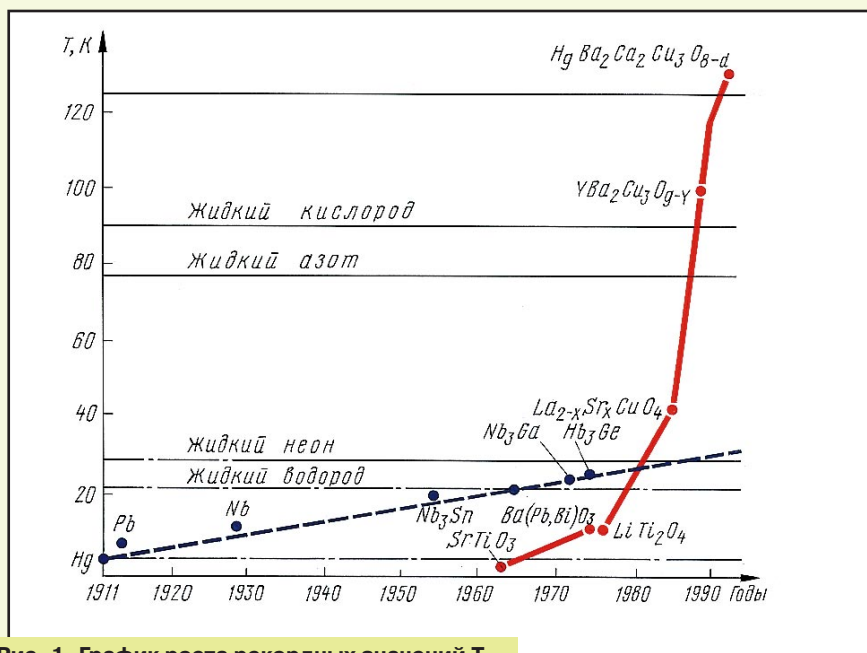


Рис. 1. График роста рекордных значений  $T_c$