

THÂN ĐỨC HIỀN

NHẬP MÔN VỀ SIÊU DẪN
(VẬT LIỆU, TÍNH CHẤT VÀ ỨNG DỤNG)



NHÀ XUẤT BẢN BÁCH KHOA – HÀ NỘI

Mã số: 912-2008/CXB/15-123/BKHN

LỜI NÓI ĐẦU

Một đặc tính kỳ diệu của một số vật liệu là dưới một nhiệt độ nhất định (tùy theo từng chất) điện trở suất của vật liệu bằng không, độ dẫn điện trở nên vô cùng. Đó là hiện tượng siêu dẫn. Hiện tượng lý thú này được phát hiện lần đầu tiên ở thủy ngân cách đây gần một thế kỷ (năm 1911) ở vùng nhiệt độ gần không độ tuyệt đối ($\leq 4,2$ K). Sau này, tính chất siêu dẫn đã được tìm thấy ở hàng loạt kim loại, hợp kim và hợp chất. Ngoài đặc tính siêu dẫn, người ta còn phát hiện thấy, với chất siêu dẫn từ trường bên trong nó luôn luôn bằng không và hiện tượng xuyên ngầm lượng tử...

Mãi hơn 40 năm sau, hiện tượng kỳ lạ của chất siêu dẫn đã được lý giải bằng lý thuyết vi mô. Theo đó, khác với các chất dẫn điện thông thường, ở trạng thái siêu dẫn, hiện tượng dẫn điện là do các cặp điện tử kết hợp với nhau và khi chuyển động tạo nên dòng điện, các cặp không bị mất mát năng lượng và điện trở suất bằng không.

Với các đặc tính nêu trên, các chất siêu dẫn đã được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực điện, điện tử... Các thiết bị có độ nhạy, độ tin cậy cực cao đã được chế tạo. Một ví dụ: thiết bị chụp ảnh cộng hưởng từ dùng trong các bệnh viện để chuẩn đoán chính xác bệnh tật trong con người không thể không sử dụng cuộn dây tạo từ trường bằng dây siêu dẫn.

Vật liệu siêu dẫn nhiệt độ cao được phát hiện cách đây hơn 20 năm đã mở ra triển vọng to lớn trong việc nghiên cứu, ứng dụng các chất siêu dẫn. Để sử dụng các chất siêu dẫn nhiệt độ cao, chỉ cần dùng tới nitơ lỏng (nhiệt độ sôi là 77 K hay -196°C) với giá thành hạ hơn hàng trăm lần so với dùng chất siêu dẫn thông thường.

Tập tài liệu này cung cấp cho độc giả các nội dung sau:

- Giới thiệu tổng quát về các chất siêu dẫn (nhiệt độ thấp và nhiệt độ cao);
- Các đặc tính đặc biệt của các chất siêu dẫn và các lý thuyết lý giải hiện tượng siêu dẫn;

- Các ứng dụng của chất siêu dẫn.

Nội dung tài liệu này đã được dùng để giảng dạy nhiều năm (được cập nhật hàng năm) cho sinh viên các năm cuối và học viên cao học các ngành khoa học tự nhiên, khoa học kỹ thuật...

Tài liệu này có thể bổ ích cho các nghiên cứu sinh và những ai quan tâm, tìm hiểu về siêu dẫn.

Tác giả xin chân thành cảm ơn PGS. TS. Lưu Tuấn Tài (Bộ môn Vật lý nhiệt độ thấp, Trường đại học Khoa học tự nhiên) và PGS. TS. Vũ Ngọc Hùng (Viện Đào tạo Quốc tế về Khoa học Vật liệu, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội) đã đọc bản thảo, đóng góp các ý kiến quý báu và giới thiệu tài liệu để xuất bản.

Tác giả đặc biệt cảm ơn sự đóng góp tích cực của TS. Nguyễn Khắc Mẫn, ThS. Lê Thanh Hùng và CN. Nguyễn Thị Phương Loan đã hoàn tất bản thảo tài liệu này.

Tác giả xin cảm ơn những ý kiến đóng góp của các độc giả.

Hà Nội, tháng 9 năm 2008

Tác giả

MỤC LỤC

	Trang
Lời nói đầu	3
Mục lục	5
Chương 1: Hiện tượng siêu dẫn và các vật liệu siêu dẫn	9
1.1. Hiện tượng siêu dẫn	9
1.1.1. Khái niệm	9
1.1.2. Điện trở không	9
1.1.3. Cảm ứng từ bên trong chất siêu dẫn $B = 0$	11
1.2. Các chất siêu dẫn	13
1.2.1. Các nguyên tố kim loại tinh khiết	14
1.2.2. Các hợp kim siêu dẫn	16
1.2.3. Các hợp chất siêu dẫn chứa oxy	18
1.2.4. Các hợp chất siêu dẫn carbit bo	18
1.2.5. Các tinh thể siêu dẫn dạng Fullerenes C_{60}	19
1.2.6. Các hợp chất siêu dẫn hữu cơ	20
1.2.7. Các hợp chất siêu dẫn nhiệt độ cao	20
1.3. Lịch sử phát hiện và nghiên cứu vật liệu siêu dẫn	21
Chương 2: Chất siêu dẫn loại I	23
2.1. Lý thuyết cổ điển về điện trở không	23
2.2. Phương pháp xác định điện trở không	24
2.3. Vòng dây không có điện trở	24
2.4. Sự phân bố dòng điện trong mạch siêu dẫn	25
2.5. Mẫu hai chất lỏng điện tử và ảnh hưởng của dòng xoáy chiều lên tính chất siêu dẫn	26
2.6. Tính chất từ của dây dẫn lý tưởng	27
2.7. Hiệu ứng Meissner	29
2.8. Độ từ thẩm và độ cảm từ của chất siêu dẫn	30
2.9. Độ thâm sâu London (λ_L)	31
2.10. Một số tính chất nhiệt của chất siêu dẫn	33
2.10.1. Nhiệt dung	33
2.10.2. Độ dẫn nhiệt	34
2.10.3. Các hiệu ứng (ảnh hưởng) cơ học	34
2.10.4. Các hiệu ứng nhiệt điện	34

Chương 3: Một số lý thuyết bán thực nghiệm về siêu dẫn.....	36
3.1. Lý thuyết nhiệt động học về chất siêu dẫn.....	36
3.1.1. Hệ quả liên quan tới điện trở không	36
3.1.2. Lý thuyết London.....	38
3.1.3. Ứng dụng lý thuyết London.....	41
3.2. Từ trường tới hạn của chất siêu dẫn	42
3.2.1. Năng lượng tự do của chất siêu dẫn.....	42
3.2.2. Sự thay đổi theo nhiệt độ của từ trường tới hạn	44
3.2.3. Độ từ hóa của các chất siêu dẫn.....	44
3.3. Nhiệt động học của sự chuyển sang trạng thái siêu dẫn	46
3.3.1. Entropi của trạng thái siêu dẫn	46
3.3.2. Chuyển pha loại I và chuyển pha loại II trong chất siêu dẫn	47
3.3.3. Nhiệt dung mạng tinh thể và nhiệt dung điện tử	48
Chương 4: Dòng điện trong chất siêu dẫn.....	51
4.1. Dòng tới hạn	51
4.2. Cường độ dòng điện trong dây dẫn	52
4.3. Phương pháp xác định dòng tới hạn (J_C)	54
4.3.1. Phương pháp đo J_C	54
4.3.2. Phương pháp mẫu Bean.....	55
4.4. Sự lan truyền nhiệt	56
4.5. Trạng thái trung gian tạo bởi dòng điện.....	58
Chương 5: Lý thuyết vi mô về siêu dẫn.....	59
5.1. Tổng hợp các tính chất của trạng thái siêu dẫn.....	59
5.1.1. Điện trở không	59
5.1.2. Cấu trúc tinh thể.....	60
5.1.3. Nhiệt dung điện tử	60
5.1.4. Trật tự xa.....	61
5.1.5. Hiệu ứng đồng vị	61
5.2. Khái niệm khe năng lượng	61
5.3. Lý thuyết Bardeen–Cooper–Schrieffer (BCS).....	62
5.3.1. Các vấn đề cần giải thích	62
5.3.2. Tương tác điện tử – mạng tinh thể.....	62
5.3.3. Bài toán Fröhlich.....	63
5.3.4. Cặp Cooper	64
5.3.5. Trạng thái cơ bản của siêu dẫn	68
5.3.6. Các tính chất của trạng thái cơ bản BCS	70
5.3.7. Khe năng lượng và hệ quả	70
5.3.8. Lý thuyết BCS giải thích các tính chất vĩ mô của chất siêu dẫn	72

Chương 6: Chất siêu dẫn loại II.....	78
6.1. Các đặc tính của chất siêu dẫn loại II.....	78
6.2. Năng lượng mặt của các chất siêu dẫn	78
6.3. Trạng thái hỗn hợp (trung gian)	80
6.4. Mô tả chi tiết hơn về trạng thái trung gian của siêu dẫn loại II	81
6.5. Hằng số Ginzburg-Landau của kim loại và hợp kim	83
6.6. Từ trường tới hạn dưới và từ trường tới hạn trên của chất siêu dẫn loại II	84
6.6.1. Từ trường tới hạn dưới H_{C1}	84
6.6.2. Từ trường tới hạn trên H_{C2}	84
6.6.3. Từ trường tới hạn nhiệt động H_C	85
6.6.4. Giá trị H_{C2}	86
6.6.5. Giới hạn thuận từ	86
6.7. Từ độ của siêu dẫn loại II	86
6.8. Cách xác định κ	87
6.9. Hiện tượng trễ của đường cong từ độ và cảm ứng từ	88
6.10. Nhiệt dung của chất siêu dẫn loại II.....	88
Chương 7: Hiện tượng xuyên ngầm trong chất siêu dẫn	90
7.1. Các quá trình xuyên ngầm.....	90
7.2. Sơ đồ mức năng lượng của chất siêu dẫn.....	91
7.3. Xuyên ngầm giữa kim loại thường và chất siêu dẫn.....	92
7.4. Xuyên ngầm giữa hai chất siêu dẫn giống nhau	94
7.5. Xuyên ngầm giữa hai chất siêu dẫn khác loại.....	95
7.6. Hiệu ứng Josephson	96
7.6.1. Các dạng tiếp xúc Josephson	96
7.6.2. Hiệu ứng Josephson một chiều (dừng)	97
7.6.3. Hiệu ứng Josephson xoay chiều (không dừng).....	99
7.6.4. Giao thoa lượng tử siêu dẫn (SQUID).....	101
7.6.5. Sơ đồ thực nghiệm của SQUID	103
Chương 8: Các chất siêu dẫn nhiệt độ cao	105
8.1. Mở đầu.....	105
8.2. Các nhận xét về vật liệu siêu dẫn nhiệt độ cao (HTS)	106
8.3. Các hợp chất siêu dẫn 5 thành phần.....	108
8.3.1. Cấu trúc tinh thể.....	109
8.3.2. Cấu trúc và nhiệt độ T_C	111
8.4. Chất siêu dẫn nhiệt độ cao 4 thành phần $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO).....	112
8.4.1. Cấu trúc tinh thể.....	112
8.4.2. Sự thay đổi T_C của YBCO theo nồng độ oxy	113

8.4.3. Các HTS chứa nguyên tố đất hiếm	115
8.5. Các hạt tải pha tạp trong HTS	116
8.5.1. Pha tạp lỗ trống trong La_2CuO_4 (2.1.4)	116
8.5.2. Pha tạp điện tử trong Nd_2CuO_4 (2.1.4)	117
8.5.3. Nhận xét chung	117
8.6. Trật tự từ trong HTS.....	119
8.7. Một số thông số vật lý cơ bản của HTS	121
8.8. Chất siêu dẫn MgB_2	122
Chương 9: Các ứng dụng của vật liệu siêu dẫn	124
9.1. Mở đầu.....	124
9.2. Sử dụng hiệu ứng điện trở không.....	127
9.2.1. Chế tạo nam châm siêu dẫn có từ trường cao.....	127
9.2.2. Các nam châm siêu dẫn trong nghiên cứu cơ bản	129
9.2.3. Các nam châm siêu dẫn dùng trong lò phản ứng nhiệt hạch	130
9.2.4. Phổ cộng hưởng từ hạt nhân và ảnh cộng hưởng (MRI)	130
9.2.5. Các máy tuyến từ siêu dẫn.....	132
9.2.6. Ứng dụng trong công nghiệp điện	133
9.3. Ứng dụng hiệu ứng Meissner: hiệu ứng nâng.....	136
9.3.1. Hệ vận tải nâng bằng từ	136
9.3.2. Các giá đỡ từ	137
9.3.3. Các màn chắn từ.....	137
9.3.4. Động cơ điện không tiếp xúc	138
9.4. Ứng dụng hiệu ứng lượng tử: điện tử học siêu dẫn	139
9.4.1. Cảm biến giao thoa lượng tử siêu dẫn (SQUID)	139
9.4.2. Điện tử học lượng tử từ thông	141
9.4.3. Thiết bị thu phát sóng viba	141
9.5. Một số ví dụ về ứng dụng siêu dẫn nhiệt độ cao trong lĩnh vực công suất lớn	142
Phụ lục I. Các kí hiệu dùng trong sách.....	145
Phụ lục II. Định nghĩa một số từ và cụm từ liên quan đến siêu dẫn	149
Phụ lục III. Các hằng số vật lý thường dùng.....	157
Phụ lục IV. Một số đại lượng vật lý qui đổi.....	159
Tài liệu tham khảo.....	160

CHƯƠNG 1

HIỆN TƯỢNG SIÊU DẪN VÀ CÁC VẬT LIỆU SIÊU DẪN

1.1. HIỆN TƯỢNG SIÊU DẪN

1.1.1. Khái niệm

Vật liệu có điện trở suất bằng không ($\rho = 0$) ở nhiệt độ trên nhiệt độ không tuyệt đối (0 K) gọi là vật liệu siêu dẫn. Hiện tượng vật liệu chuyển từ trạng thái $\rho \neq 0$ sang trạng thái $\rho = 0$ tại nhiệt độ $T = T_C (\neq 0 \text{ K})$ gọi là hiện tượng siêu dẫn.

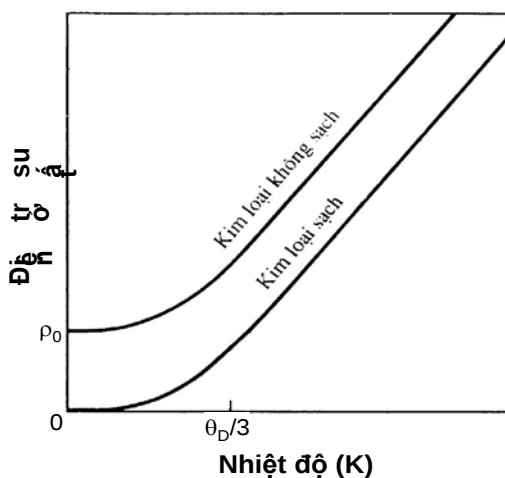
Một vật liệu được coi là siêu dẫn khi phải đồng thời thỏa mãn hai tính chất sau:

- + Điện trở suất $\rho = 0$ ở nhiệt độ $T \leq T_C$, T_C gọi là nhiệt độ tới hạn hay nhiệt độ chuyển pha siêu dẫn.

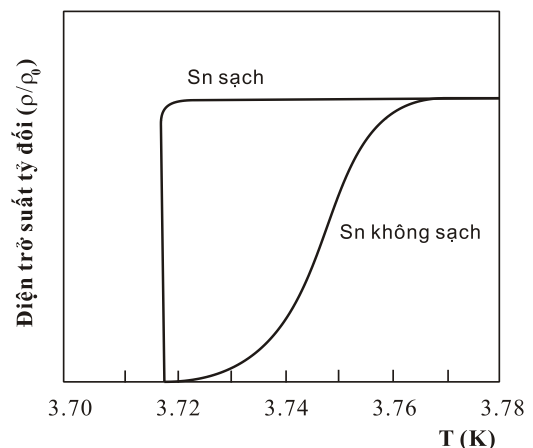
- + Cảm ứng từ bên trong chất siêu dẫn bằng không ($B = 0$) đối với chất siêu dẫn sạch (loại I)

1.1.2. Điện trở không

Với kim loại không sạch, khi hạ nhiệt độ, điện trở giảm và tại $T = 0 \text{ K}$ điện trở suất dư (ρ_0) khác không.



Hình 1.1. Sự phụ thuộc của điện trở vào nhiệt độ của các kim loại.



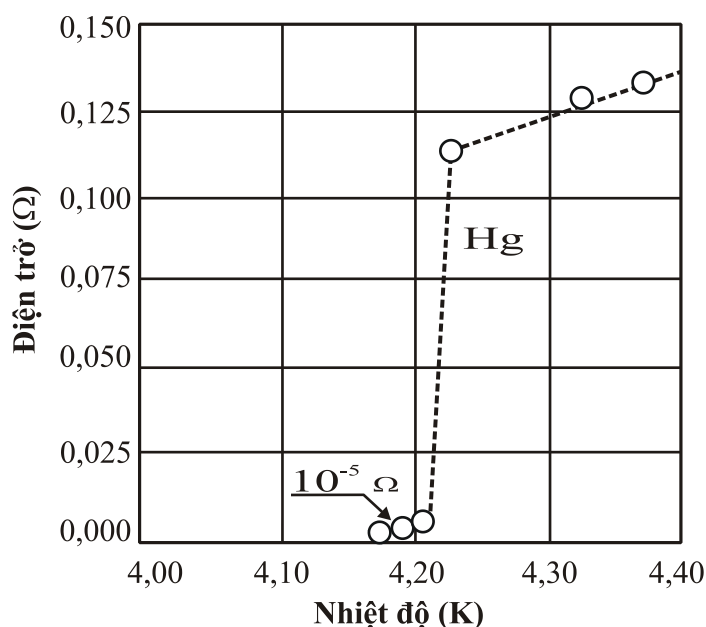
Hình 1.2. Nhiệt độ chuyển pha siêu dẫn của kim loại thiếc (Sn).

Song, với kim loại có độ sạch tuyệt đối, tại $T = 0 \text{ K}$ thì $\rho_0 = 0$ (hình 1.1). Tuy nhiên, kim loại có độ sạch tuyệt đối không phải là chất siêu dẫn ở 0 K. Đó là chất dẫn điện lý tưởng. Với chất siêu dẫn, tại $T \leq T_C$ thì $\rho = 0$. Hình 1.2 là sự chuyển trạng thái từ trạng thái thường sang trạng thái siêu dẫn của kim loại thiếc (Sn) sạch và không sạch.

- Nhiệt độ T_C gọi là nhiệt độ chuyển pha của vật liệu: trạng thái thường $\Leftrightarrow$ trạng thái siêu dẫn. Thông thường đây là chuyển pha loại II.

- $T > T_C$, đường cong $\rho(T)$ có các dáng điệu khác nhau, tùy thuộc vào vật liệu.

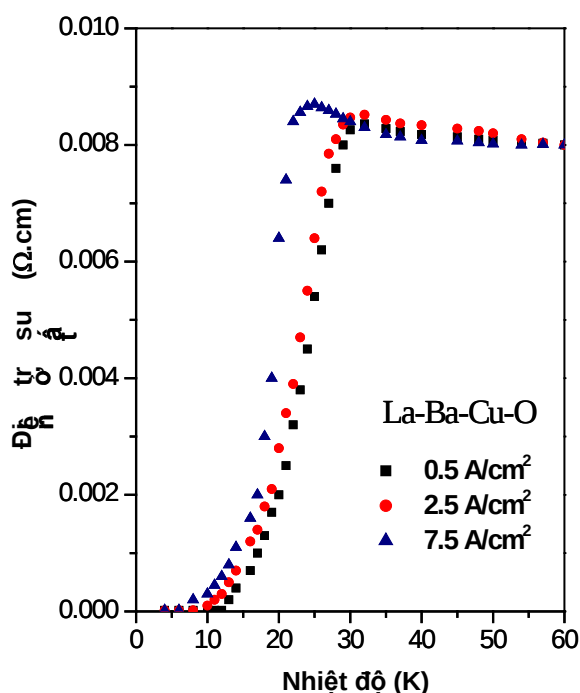
Năm 1911, Kamerlingh-Onnes (Leiden-Hà Lan) phát hiện ra hiện tượng siêu dẫn ở Hg ($T_C = 4,2 \text{ K}$) khi hạ nhiệt độ xuống dưới 4,2 K (hình 1.3).



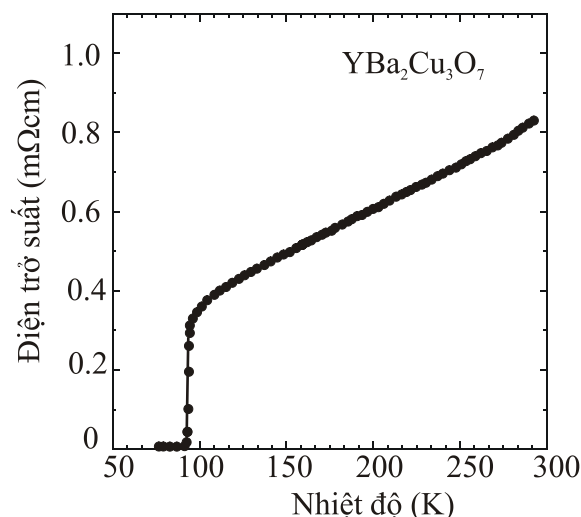
Hình 1.3. Mẫu siêu dẫn Hg với nhiệt độ chuyển pha siêu dẫn $T_C = 4,2 \text{ K}$ được phát hiện bởi Kamerling-Onnes (Hà Lan) năm 1911.

- Tại $T \leq T_C$ giá trị ρ bằng không, không phụ thuộc vào độ chính xác của thiết bị sử dụng đo. Bằng phương pháp đo độ suy giảm của dòng cảm ứng trong một vòng dây siêu dẫn kín Pb hay Hg ngâm trong He lỏng (4,2 K) thấy rằng, dòng điện không suy giảm trong khoảng thời gian 2,5 năm. Ngoài ra, người ta đã tìm được giá trị của điện trở suất của mẫu Hg tại nhiệt độ $T < T_C$ là $\rho_{T < T_C} = 10^{-25} \Omega \cdot \text{mm}$ (nhỏ hơn điện trở suất của kim loại Cu sạch ở 300 K khoảng 10^{17} lần).

Hình 1.4 và hình 1.5 là sự phụ thuộc vào nhiệt độ của điện trở suất của các chất siêu dẫn nhiệt độ cao, được phát hiện cách đây hơn 20 năm.



Hình 1.4. Gốm siêu dẫn nhiệt độ cao La-Ba-Cu-O với nhiệt độ chuyển pha $T_C = 30\text{ K}$ được phát hiện năm 1986 bởi G. Bednorz và A. Muller.



Hình 1.5. Hợp chất siêu dẫn nhiệt độ cao $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ với nhiệt độ chuyển pha $T_C = 92\text{ K}$ được phát hiện năm 1987 bởi P. Chu.

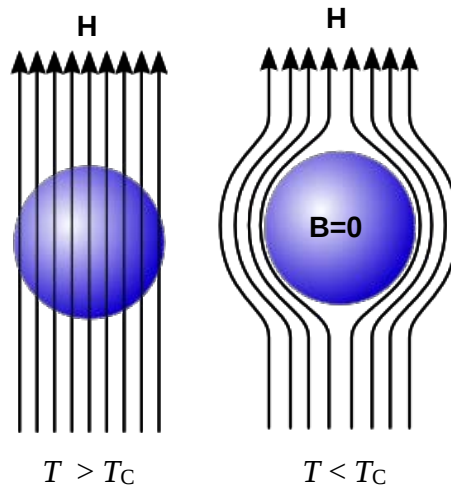
1.1.3. Cảm ứng từ bên trong chất siêu dẫn $B = 0$

Năm 1933, Meissner và Ochsenfeld đã tiến hành đo từ trường trong lòng một quả cầu siêu dẫn bằng Pb ở trạng thái siêu dẫn ($T < 7\text{ K}$) được đặt trong từ trường tĩnh có cường độ yếu. Kết quả cho thấy, ở trạng thái siêu dẫn các đường sức từ bị đẩy ra ngoài quả cầu (hình 1.6).

Từ trường trong lòng chất siêu dẫn bằng không. Hiện tượng này được gọi là hiệu ứng Meissner. Do có đặc tính này, chất siêu dẫn là một chất nghịch từ lý tưởng. Thực vậy:

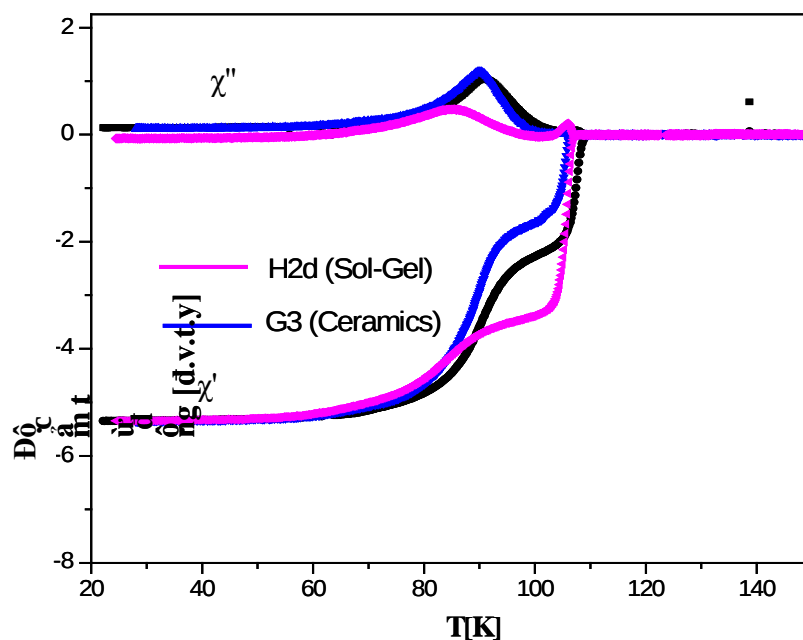
$$B = H_0 + 4\pi I = 0 \quad (1.1)$$

$$\chi_{s.d} = -1/4\pi \text{ (CGS)} \quad (1.2)$$



Hình 1.6. Từ trường bị đẩy ra ngoài chất siêu dẫn ở $T < T_c$.

Hình 1.7 là độ cảm từ động của chất gốm siêu dẫn nhiệt độ cao Bi-2223. Phần thực của độ cảm từ có giá trị âm (đơn vị tùy ý). Các mẫu Bi-2223 đo được chế tạo tại Viện Đào tạo Quốc tế về Khoa học Vật liệu (ITIMS), Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.



Hình 1.7. Độ cảm từ động của chất siêu dẫn nhiệt độ cao Bi- 2223.

Các đường sức từ bị đẩy ra ngoài chất siêu dẫn nên tạo ra lực nâng nam châm khi đặt nó lên trên chất siêu dẫn (hình 1.8). Người ta đã sử dụng tính chất này của chất siêu dẫn để làm đệm từ, vòng bi từ... không có ma sát.