ETH zürich

ETH Library

Low-field magnetic properties of the high-temperature superconductor $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$#{delta}

Doctoral Thesis

Author(s):
Nideröst, Marco

Publication date:
1996

Permanent link:
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-a-001760877

Rights / license:
In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

This page was generated automatically upon download from the ETH Zurich Research Collection.
For more information, please consult the Terms of use.

Diss. ETH ex. B

Diss. ETH No. 11812

Low-Field Magnetic Properties of the High-Temperature Superconductor $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by

MARCO NIDERÖST
Dipl. Phys. ETH
born on the 8th January 1966
citizen of Schwyz (SZ)

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. A. C. Mota, examiner
Prof. Dr. J. Blatter, co-examiner

Zürich 1996

ETH-BIBLIOTHEK ZÜRICH

Abstract

The starting point of this thesis was the design and the construction of a *dc*-SQUID magnetometer which allows to perform ultra sensitive inductive measurements in the temperature range $4\,\mathrm{K} \leq T \leq 200\,\mathrm{K}$ and for magnetic fields up to 1 T. All the measurements presented in this work have been taken on single-crystalline samples of the $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ (Bi2212) compound, which is a strongly anisotropic high temperature superconductor with maximal transition temperatures $T_c \simeq 95\,\mathrm{K}$. In account of the high anisotropy of this material the measurements have been taken both with the applied magnetic field H perpendicular and parallel to the superconducting CuO_2 layers.

In order to investigate flux dynamics in Bi2212 crystals we have measured the time relaxation of the remanent magnetization M_{rem} from the fully critical state for temperatures $0.1 \lesssim T/T_c \lesssim 1$. The measurements for the configuration with H perpendicular to the layers have been performed with a new experimental arrangement which allows to cover a time window of seven decades $10^{-2}\,\mathrm{s} \lesssim t \lesssim 10^5\,\mathrm{s}$. With this facility the current density j can be studied from values very close to j_c down to values considerably smaller than j_c. From the data we have derived: (i) the flux creep activation barriers U as a function of the current density j, (ii) the current-voltage characteristics $E(j)$ in a typical range of $10^{-7}\,\mathrm{V/cm}$ to $10^{-15}\,\mathrm{V/cm}$, and (iii) the $T = 0$ critical current density $j_c(0) \simeq 1 \cdot 10^6\,\mathrm{A/cm^2}$ at $H \simeq 0$. Three different regimes of vortex dynamics have been observed: For temperatures $T \lesssim 20\,\mathrm{K}$ the activation barrier $U(j)$ is logarithmic, no unique functional dependence $U(j)$ could be found for the intermediate temperature interval $20\,\mathrm{K} \lesssim T \lesssim 40\,\mathrm{K}$, and finally for $T \gtrsim 40\,\mathrm{K}$ the activation barrier $U(j)$ follows a power-law behavior $U(j) \propto j^{-\mu}$ with

an exponent $\mu \simeq 0.6$. From the analysis of the data within the weak collective pinning theory for strongly layered superconductors, it is argued that for temperatures $T \lesssim 20\,\mathrm{K}$ pancake-vortices are pinned individually, while for temperatures $T \gtrsim 40\,\mathrm{K}$ pinning involves large collectively-pinned vortex bundles. A description of the vortex dynamics in the intermediate temperature interval $20\,\mathrm{K} \lesssim T \lesssim 40\,\mathrm{K}$ is given on the basis of a new qualitative low-field phase diagram of the vortex state in Bi2212. This new phase diagram delivers also an interpretation for the occurrence of the frequently reported second peak in the magnetization curve. For Bi2212 crystals, such a second peak is observed for temperatures between 20 and 40 K. The time relaxation of the remanent magnetization M_{rem} for H parallel to the CuO_2 layers has been measured with a "standard procedure" which allows to investigate a time window of about four decades $10\,\mathrm{s} \lesssim t \lesssim 10^5\,\mathrm{s}$. An approximately logarithmic time dependence of M_{rem} (or j, respectively) is observed for all the measuring temperatures T, indicating that the activation barrier for vortex creep is of the form of $U(j) \simeq U_c(1 - j/j_c)$. The temperature dependence of the creep rate $S = -d\ln j/d\ln t$ displays a pronounced maximum at $T \simeq 65\,\mathrm{K}$. This maximum is interpreted as a crossover from a regime of individually pinned Josephson vortices to a regime of collectively pinned bundles of Josephson vortices. The observed low temperature saturation of the critical current density j_c in c-direction, supports recent results in the literature reporting that Bi2212 crystals behave like an array of Josephson junctions. The extrapolated $T = 0$ value of critical current density $j_c(0)$ in c-direction is approximately $300\,\mathrm{A/cm^2}$ at $H \simeq 0$.

The first flux penetration field H_p, of high temperature superconductors, has recently attracted the interest of several research groups in relation to the determination of the lower critical field H_{c1}. In the absence of activation barriers for vortex entry, the first flux penetration field H_p corresponds to the thermodynamic lower critical field H_{c1}. For typical HTSC single crystals, however, surface and geometrical barriers can lead to values of H_p which lie between the lower critical field $H_{c1} = (\Phi_0/4\pi\lambda^2) \cdot \ln\kappa$ and the critical field $H_c = \Phi_0/(2\sqrt{2}\pi\lambda\xi)$. This means that pinning barriers for vortex entry can preserve a $B \simeq 0$ state inside the specimen up to magnetic fields $H > H_{c1}$. Such configurations are metastable and bound to decay. In order to investigate the time dependence of H_p in Bi2212 crystals, we have measured isothermal dc-magnetization curves for different sweep rates of the

applied magnetic field dH/dt, ranging between 10^{-5} and 10^{-1} Oe/s. For both field orientations $H \perp ab$ and $H \parallel ab$, the penetration field H_p is found to strongly depend on the cycling rate of the magnetization curve dH/dt as a result of flux creep through surface barriers. However, for sufficiently low sweep rates dH/dt, the penetration field H_p saturates towards a constant value. We identify this value with the lower critical field H_{c1}. The obtained temperature dependence of H_{c1} has an approximately linear behavior below $T \simeq 30\,\mathrm{K}$ for $H \perp ab$ and $T \simeq 70\,\mathrm{K}$ for $H \parallel ab$. Such a temperature dependence of H_{c1} is in agreement with theoretical models assuming a superconducting state with line nodes in the energy gap on the Fermi surface. To our knowledge these are the first reliable data of the lower critical field H_{c1} in $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ crystals. For a relatively high fixed sweep rate dH/dt, the temperature dependence of H_p displays a marked upturn for $T \lesssim 40\,\mathrm{K}$. Similar low temperature upturns of H_p have been reported in the literature for strongly anisotropic HTSCs such as $Tl_2Ba_2CaCu_2O_{8+\delta}$, $Pb_2Sr_2R_{1-x}Ca_xCu_3O_{8+\delta}$(R = Y, Dy), and $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$. In this work we demonstrate that this upturn results from metastable configurations. The anisotropy parameter $1/\epsilon = \lambda_c/\lambda_{ab}$ deduced from the H_{c1} data has the value ~ 60, in good agreement with values from the literature for oxygen annealed Bi2212 crystals.

Kurzfassung

Der Startpunkt dieser Dissertation waren der Entwurf und die Konstruktion eines *dc*-SQUID-Magnetometers, welches sehr empfindliche induktive Messungen im Temperaturbereich $4\,\mathrm{K} \leq T \leq 200\,\mathrm{K}$ für Felder bis zu 1 T ermöglicht. Alle in dieser Arbeit gezeigten Messungen wurden an einkristallinen Proben der $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$-Verbindung (Bi2212) durchgeführt. Diese Verbindung ist ein stark anisotroper Supraleiter mit einer kritischen Temperatur $T_c \simeq 95\,\mathrm{K}$. In Anbetracht der grossen Anisotropie des Materials wurden die Messungen sowohl mit dem angelegten Feld senkrecht zu den supraleitenden CuO_2-Ebenen als auch parallel dazu durchgeführt.

Die zeitliche Relaxation der remanenten Magnetisierung M_{rem} des vollständig kritischen Zustandes in Bi2212-Kristallen wurde für Temperaturen im Bereich $0.1 \lesssim T/T_c \lesssim 1$ untersucht. Für die Messungen mit H senkrecht zu den CuO_2-Ebenen wurde ein neues experimentelles Verfahren entwickelt, welches erlaubt ein Zeitfenster von sieben Dekaden, $10^{-2}\,\mathrm{s} \lesssim t \lesssim 10^5\,\mathrm{s}$, abzudecken. Dank diesem Verfahren kann die Stromdichte j für Werte sehr nahe bei der kritischen Stromdichte j_c bis hinunter zu Werten, die erheblich kleiner als j_c sind, untersucht werden. Die Daten liefern folgende Informationen: (i) die Aktivierungsbarrieren U für das Flusskriechen als Funktion der Stromdichte j, (ii) die Strom-Spannungs-Charakteristik $E(j)$ in einem typischen Bereich von $10^{-7}\,\mathrm{V/cm}$ bis $10^{-15}\,\mathrm{V/cm}$ und (iii) die kritische Stromdichte $j_c(0) \simeq 1 \cdot 10^6\,\mathrm{A/cm^2}$ bei $T = 0$ und $H \simeq 0$. Drei unterschiedliche Bereiche der Vortexdynamik wurden beobachtet: Für Temperaturen $T \lesssim 20\,\mathrm{K}$ ist die Aktivierungsbarriere $U(j)$ logarithmisch, keine eindeutige funktionale Abhängigkeit $U(j)$ konnte hingegen im mittleren Temperaturintervall $20\,\mathrm{K} \lesssim T \lesssim 40\,\mathrm{K}$ gefunden werden, und schliesslich folgt die Aktivierungsbarriere $U(j)$ für Temperaturen $T \gtrsim 40\,\mathrm{K}$

einem Potenzgesetz $U(j) \propto j^{-\mu}$ mit einem Exponenten $\mu \simeq 0.6$. Auf Grund der Analyse der Daten im Rahmen der Theorie des schwachen kollektiven Pinnings für stark geschichtete Supraleiter wird argumentiert, dass für Temperaturen $T \lesssim 20\,\mathrm{K}$ "Pancake"-Vortices individuell gepinnt werden, während für Temperaturen $T \gtrsim 40\,\mathrm{K}$ grosse Vortex-Bündel kollektiv gepinnt werden. Eine Beschreibung der Vortexdynamik im mittleren Temperaturintervall $20\,\mathrm{K} \lesssim T \lesssim 40\,\mathrm{K}$ wird anhand eines qualitativen Phasendiagramms des Vortexzustandes in Bi2212 gegeben. Innerhalb dieser Beschreibung sollte ein zweiter Peak in der Magnetisierungskurve im Temperaturbereich zwischen 20 und 40 K auftreten, wie mehrfach in Magnetisierungsmessungen in der Literatur beobachtet wurde. Die zeitliche Relaxation der remanenten Magnetisierung M_{rem} mit H parallel zu den CuO_2-Schichten wurde mit Hilfe eines "Standard-Verfahrens" gemessen, das ein Zeitfenster von vier Dekaden, $10\,\mathrm{s} \lesssim t \lesssim 10^5\,\mathrm{s}$ abdeckt. Eine logarithmische Zeitabhängigkeit von M_{rem} (beziehungsweise j) wurde für alle untersuchten Temperaturen beobachtet, was darauf hinweist, dass die Aktivierungsbarriere für Vortexkriechen von der Form $U(j) \simeq U_c(1 - j/j_c)$ ist. Die Temperaturabhängigkeit der Kriechrate $S = -d\ln j/d\ln t$ zeigt ein ausgeprägtes Maximum bei $T \simeq 65\,\mathrm{K}$. Dieses Maximum wird als Übergang von einem Bereich von individuell gepinnten Josephson-Vortices zu einem Bereich kollektiv gepinnter Bündel von Josephson-Vortices interpretiert. Das charakteristische Temperaturverhalten, das für die kritische Stromdichte j_c in c-Richtung gemessen wurde, unterstützt neue Resultate in der Literatur, die berichten, dass Bi2212-Kristalle sich wie eine Folge von Josephson-Kontakte verhalten. Der nach $T = 0$ extrapolierte Wert für die kritische Stromdichte $j_c(0)$ in c-Richtung beträgt ungefähr $300\,\mathrm{A/cm^2}$ bei $H \simeq 0$.

Die Untersuchung des Feldes H_p, an dem magnetischer Fluss in die supraleitende Probe einzudringen beginnt, hat neulich das Interesse von verschiedenen Forschungsgruppen geweckt. Dies insbesondere in Zusammenhang mit der Bestimmung des unteren kritischen Feldes H_{c1} von Hochtemperatur-Supraleitern. Für stark anisotrope Materialien wie $Tl_2Ba_2CaCu_2O_{8+\delta}$, $Pb_2Sr_2R_{1-x}Ca_xCu_3O_{8+\delta}$(R = Y, Dy) und $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$, wurde für Temperaturen $T \lesssim 40\,\mathrm{K}$ ein anomales Ansteigen von H_p beobachtet. Um zu untersuchen ob dieses Ansteigen von H_p auf metastabile Zustände zurückzuführen ist, wurden isotherme dc-Magnetisierungskurven an Bi2212 Einkristallen durchgeführt, für Zyklierraten des angelegten Feldes H, die zwischen 10^{-5} und 10^{-1} Oe/s liegen. Für beide Orientierungen des magnetischen Feldes,

$H \perp ab$ und $H \parallel ab$, wurde gefunden, dass H_p stark von der Zyklierrate dH/dt abhängt, aufgrund von Vortex-Kriechen durch Oberflächen-Pinningbarrieren, die das Eintreten von Vortices behindert. Insbesondere sättigt das Feld H_p für genügend kleine Zyklierraten dH/dt gegen einen konstanten Wert. Wir identifizieren diesen Wert mit dem unteren kritischen Feld H_{c1}. Die erhaltene Temperaturabhängigkeit von H_{c1} zeigt ein näherungsweise lineares Verhalten unterhalb $T \simeq 30\,\mathrm{K}$ für $H \perp ab$ und $T \simeq 70\,\mathrm{K}$ für $H \parallel ab$. Ein solches Temperaturverhalten von H_{c1} stimmt mit theoretischen Modellen überein, die einen supraleitenden Zustand mit linienförmigen Nullstellen in der Energielücke an der Fermi-Oberfläche annehmen. Unseres Wissens sind dies die ersten zuverlässige Daten des unteren kritischen Feldes H_{c1} in Bi2212-Einkristallen. Für konstante und genügend hohe Zyklierraten dH/dt zeigt die Temperaturabhängigkeit von H_p ein deutliches Ansteigen für Temperaturen $T \lesssim 40\,\mathrm{K}$. Dies beweist, dass in stark anisotropen Hochtemperatur-Supraleitern das häufig beobachtete Ansteigen von H_p für Temperaturen $T \lesssim 40\,\mathrm{K}$ und $H \perp ab$ aufgrund metastabiler Konfigurationen resultiert. Der Anisotropieparameter $1/\epsilon = \lambda_c/\lambda_{ab}$, der aus den hier präsentierten Daten für H_{c1} abgeleitet wurde, hat den Wert ~ 60, in Einklang mit Werten in der Literatur für in Sauerstoff getemperte $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ Einkristalle.