

Supercurrent Flow in High Temperature Superconductors (HTS)



고온초전도내에서 초-전류 흐름

고-자기장 마그네틱의 제조 및 운전과 같은 초전도체의 실질적인 응용 영역에서, 고온초전도체를 다양하게 응용하는데 발생하는 수 많은 어려움을 감안하더라도 현재 진행되고 있는 연구는 흥미진진한 단계로 빠르게 접어들고 있다. 바꿔 말하면 케이블링과 교류손실 등의 문제점들이 해결되어, 시장 개척의 돌파구가 되고 있다는 것이다.

Atomic Institute, Vienna University of Technology | Harald W. Weber 교수

번역 : 전북대학교 송규정 교수

1. Introduction

The discovery of high temperature superconductivity in 1986 brought new challenges for the characterisation of superconductors, because they turned out to be sensitive to defects on the atomic (sub-nm) scale. Even one of the constituents of the cuprates - volatile oxygen - is able to drive the material from the superconducting to the insulating state! Furthermore, depending on the growth conditions, the physical properties, the nature of the grains and their alignment as well as the defect structures vary in such a significant way, that the "same" material could show differences in some of its properties by orders of magnitude, depending on the way it was processed (single crystal, thin film, bulk, etc.). Moreover, the defects artificially introduced into the metallic low temperature superconductors (LTS) to "pin" the magnetic micro-structure in the mixed state ("flux lines") and hence, to enable loss-free current transport, were certainly able to do so over almost the entire phase diagram (temperatures up to the transition temperature T_c , fields up to the upper critical field H_{c2}) - in marked contrast to HTS, where depinning and flux flow occur over wide parts of the H,T -plane ("irreversibility line" - IL) and a great variety of new "phases" in the mixed state was found. As a consequence, a general review of the characterising techniques devised for this new class of superconductors would greatly exceed the space

1. 서론

고온초전도체의 특성이 나노미터 이하 크기의 원자 단위 결함에 민감하기 때문에, 1986년 고온초전도현상의 발견이 초전도체의 특성평가 연구에 대한 새로운 도전을 불러 일으켰다. 산소가 구리산화물 초전도체를 구성하는 성분들 중 하나이지만, 변화가 심한 산소성분 함량에 따라 초전도상태에서부터 부도체상태로까지 유도될 수 있기 때문에 매우 놀라운 것이다. 더군다나 이와 같은 고온초전도체의 단결정, 박막, 혹은 벌크 등의 제조과정에 따라, 물리적 특성, 결정조직(grain)의 성질, 그리고 같은 물질이라도 일부 특성에서 매우 큰 차이를 보여 줄 수 있는 결정조직의 정렬뿐 만 아니라 결함(defect) 구조의 변화 등이 성장 조건에 의존한다. 이 외에 손실 없는 전류 수송과 자속선이 존재하는 혼합 상태(mixed state)에서 자기적 미세구조를 고정시키기 위해 금속성 저온초전도체에 도입된 인위적인 결함은 임계전이온도(T_c) 및 상부임계자기장(H_{c2})까지 거의 전체 상변화도(phase diagram)에 걸쳐서 성능향상을 위한 역할을 수행 할 수 있었다. 이와 반대로 고온초전도체는 자기장-온도 상변화도에서 비가역선(irreversibility line)을 초과한 넓은 영역에서 고정된 자속선의 이탈과 흐름이 일어나고, 또한 금속 저온초전도체에 비하여 매우 넓은 혼합 상태 영역에서 다양한 새로운 상변화가 발견되었다. 따라서 이와 같은 새로운 종류의 고온초전도체에 대하여 고안된 특성평가 기술에 대한 전체적인 논의는 이 논문에 할당된 지면을 훨씬 초과하게 될 것이다. 그러므로 산업적 응용이 가장 높은 고온초전도

ReBCO 화합물 중에서, 가장 보편적인 고온초전도 YBCO 박막선재에 관련된 몇 가지 관점에만 집중하여 논하고자 한다.

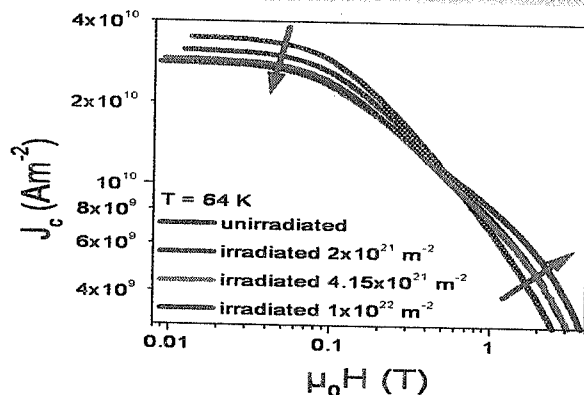
YBCO 고온초전도체는 액체질소 온도영역(64 ~ 77K)에서 다양한 응용이 가능한 92K 정도의 충분히 높은 임계전이온도를 가지며, 다른 여러 구리산화물 초전도체와 비교하여, YBCO 초전도체의 비가역선 특성이 급격한 지수함수(exponential) 변화보다는 다소 유연한 멱급수(power-law) 변화를 따르기 때문에 자기장 하에서 초전도체의 응용에 필수적인 ~ 7 정도의 다소 약한 비등방성(anisotropy)을 가진다. 이에 대한 결과로서, 초전도체의 결정학적 c-축에 자기장이 평행하게 인가되어, 최저의 경우에도 77K 온도에서 비가역 자기장이 5 ~ 6T 정도로 상당히 큰 값을 유지한다. 그러나 결정조직경계(grain boundary), 특히 상호 인접한 결정조직경계 각도가 10도 이상이 되는 결정조직은 초-전류 흐름에 방해가 되기 때문에 2축-배향성의 결정조직 정렬이 반드시 필요하다는 것이 밝혀졌다. 이는 RABiTS 방법으로 제조된 집합조직을 가지는 금속 기판, 즉 대부분 NiW 기판, 혹은 집합조직이 되어 있지 않은 스테인리스스틸(stainless steel)이나 하스텔로이(hastelloy) 합금위에 IBAD 방법으로 증착하여 집합조직을 갖는 완충층 등으로 부터 초전도층으로 2축-배향성 집합조직이 전이되어지는 고온초전도 박막선재 개발을 이끌었다. 지난 몇 년 동안 이와 관련된 기술의 발전은 거의 1km 길이 정도의 2세대 선재, 즉 박막선재의 상용화 가능성을 보여 주고 있다. 물론, 기본적인 특성 및 제조기술 등의 향상을 위한 연구가 아직까지 많이 남아 있다. 그 중 일부인 미래 핵심 연구개발에서 요구될 것으로 확실되는 목표들을 다음과 같이 간략하게 기술할 것이나, 많은 응용분야에서 케이블과 같이 낮은 교류손실 및 고-자기장에서 kA 크기의 전류를 통전할 수 있는 도체 구성물을 필요로 함을 잊지 말아야 한다.

2. 결정조직경계

위에서 언급한 것처럼 2축-배향 집합조직, 특히 결정학적 ab-평면 내 집합조직은 결정조직을 가로질러 흐르는 전류가 감소 없이 흐르게 하는데 필수적이다. 성능 좋은 박막선재가 낮은 각도의 결정조직경계만 함유하고 있음을 엑스레이(X-ray) 혹은 유사한 다른 분석 장치를 통해 알 수 있으나, 결정조직들이 어떤 온도와 어떤 자기장에 대하여 초-전류 흐름에 우선적인 영향을 주는지는 알 수 없다. 입자나 이온의 방사(radiation)는 유기되는 무질서(disorder)에 의하여 결정조직경계에 많은 영향을 주며, 전

allocated to this article. I will, therefore, focus on a few aspects related to the most promising material form for applications, i.e. "coated conductors" of the HTS compound RE-Ba-Cu-O, where RE stands for a rare earth element, most commonly Y.

YBCO has a sufficiently high transition temperature (~ 92K) for applications at liquid nitrogen temperatures (64 - 77K) and a rather "mild" anisotropy (~ 7) compared to many other cuprates, which is essential for in-field applications, since the IL follows a power-law (rather than an exponential dependence) in this case. As a consequence, H_{irr} is still around 5-6T at 77K in the worst case, i.e. for H_l||c. However, it turned out rather quickly¹ that grain boundaries, especially those with grain boundary angles exceeding ~ 10°, were detrimental for the supercurrent flow, thus making a "bi-axial" grain alignment mandatory. This led to the development of "coated conductors" (cc's), where the texture is transferred to the superconductor either from a textured metallic substrate, mostly NiW, (RABiTS) or from a textured buffer layer deposited by IBAD onto an untextured metallic substrate, e.g. stainless steel or hastelloy. Substantial technological progress over the past few years has led to the commercial availability of such "second generation" conductors in lengths of nearly 1km. Of course, there is still room for improvement, both on fundamental and on technical (processing) issues. Some of them will be briefly addressed in the following - but let's not forget that many applications require conductor configurations ("cables") that are able to carry currents in the kA range in high magnetic fields and with low ac losses, a goal that will certainly require substantial R&D in the future.

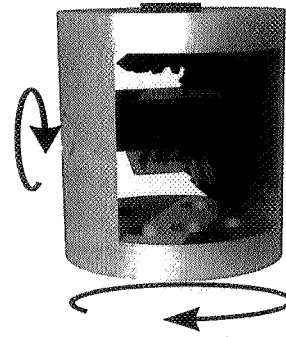


■ 그림 1: 자기장이 결정학적 c-축에 평행하고 T = 64 K 온도에서, 자기장 함수로서 상용화 박막선재의 통전 임계전류밀도들 그래프. 다양한 조사량의 연속적으로 빠른 중성자 방사

2. Grain boundaries

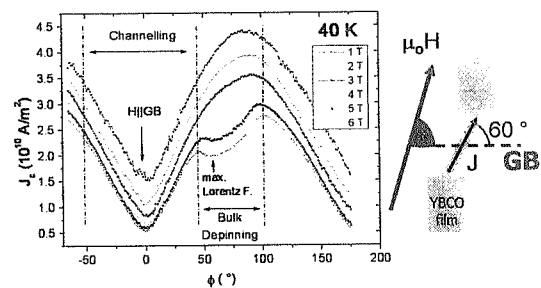
As mentioned above, bi-axial texture, especially in-plane texture, is essential for achieving "undisturbed" current transfer across the grains. We know of course from x-ray or similar analyses that a "good" cc only contains low-angle grain boundaries, but we don't know a priori whether they have an influence on the supercurrent flow and, if so, at what temperatures and magnetic fields. We found from earlier studies on Bi-2223 tapesⁱⁱ, that radiation significantly affects the grain boundaries by introducing disorder, thus reducing their current transfer ability at temperatures and fields where the current transfer is dominated by "inter-grain" currents. Similar experiments were recently made on commercial cc's, i.e. they were exposed to neutron irradiation and the critical current densities assessed at different fields, temperatures and field orientations ($H \parallel c$, $H \parallel a, b$). The resultsⁱⁱⁱ are shown in Figure 1 and clearly demonstrate that inter-grain currents also play a role in cc's, although only at relatively low fields. The field dependence of J_c shows distinctly different trends with increasing neutron fluence, i.e. a decrease of J_c at low fields, which is attributed to the above mentioned damaging of the grain boundary properties through disorder, and an increase of J_c at higher fields, which results from the introduction of highly efficient pinning centres^{iv} in the superconductor. All of this data show a "cross-over" at a certain magnetic field, which indicates that the supercurrent flow is changing from a "grain boundary dominated" regime to a "pinning dominated" regime at this field. Since the cross-over fields are rather low, typical high field applications will not be affected by this finding.

However, it's clearly worthwhile investigating the current transport across grain boundaries in more detail. This is preferably done by preparing "single grain boundary" films, e.g. by FIB, or vicinal films^v and then analyzing the current transfer across this grain boundary in a "two-axis goniometer" (Figure 2) operating in a transverse Helmholtz-type superconducting magnet, in order to assess the angular dependence of J_c in-plane and out-of-plane. Although these experiments are rather demanding, they are expected to shed light on various important features of flux line-grain boundary-current / field orientation relations (Figure 3) and their impact on the final current transfer across low angle grain boundaries^{vi, vii}.

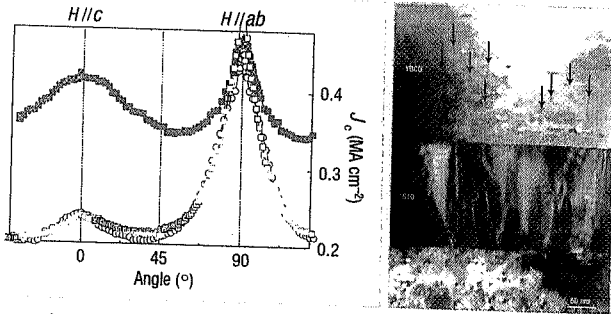


■ 그림 2 : 횡적 초전도 마그넷 내에 패턴 된 박막소재들 위에 4단자 통전전류를 측정하기 위한 2축-고니오미터

류 수송이 결정조직 간의 전류 흐름에 의하여 주도적으로 일어나는 온도 및 자기장에서, Bi-2223 테이프의 전류 수송 능력이 감소된다는 사실을 Bi-2223 테이프에 대한 초기연구에서 발견하였다. 상용화된 박막소재에 대해 유사한 실험들이 최근에 이루어졌는데, 박막소재를 증성자 방사에 노출시킨 후, 임계전류밀도를 다른 자기장, 온도, 그리고 자기장이 결정학적 c-축과 ab-축 방향에 평행한 방향에서 측정하였다. 그림 1에서 이러한 실험 결과들을 보여주고 있는데, 비록 상대적으로 낮은 자기장 영역일지라도 결정조직 간의 전류 흐름이 박막소재에서도 어떠한 역할을 함을 분명히 보여주고 있다. 임계전류밀도 J_c 의 자기장 의존성이 증성자 조사량 증가에 따라 분명히 다른 경향을 보여주고 있는데, 위에서 언급한 것처럼 무질서를 통한 결정조직경계 특성의 손상에 기인하여 낮은 자기장 영역에서 J_c 의 감소를 보여주고, 초전도체 내에 매우 효과적인 자속선고정 결함의 형성 결과로부터 높은 자기장에서 J_c 의 증가함을 보여준다. 이 모든 데이터는 어떤 자기장에서 교차점(cross-over)을 보여주고 있는데, 이는 교차점 자기장에서 초-전류 흐름이 결정조직경계 주도적(grain boundary dominated) 영역으로 부터 자속선고정 주도적(pinning dominated) 영역으로 변하는 것을 나타낸다. 이러한 교차점 자기장은 다소 낮은 자기장이기 때문에 보편적으로 높은 자기장 응용에서는 이런 교차점 자기장에 의한 영향이 없다.



■ 그림 3 : 결정학적 ab-평면 내에 자기장을 회전하여 단일 결정조직 경계 트랙에 기록된 임계전류밀도의 각도 의존성



■ 그림 4 : 결정학적 c-축에 따라 상관된 무질서가 있고(빨강) 없고(회색)에 따른 YBCO 박막소재의 임계전류밀도의 각도의존성과 미세구조 (Ref. ix에서 발췌)

그러나, 결정조직경계를 가로지르는 전류 수송을 좀 더 자세히 관찰하는 것이 반드시 필요하다. 이는 국소적인 박막 혹은 FIB에 의하여 단일 결정조직경계 박막을 준비함으로써 우선적으로 할 수 있는데, 결정학적 ab-축 평면 내 방향에, 그리고 그 평면으로부터 법선 방향으로 나오는 결정학적 c-축 방향에 따른 임계전류밀도 J_c 의 각도의존성을 측정하기 위하여 링-형태 헬름홀츠(Helmholtz) 초전도 마그넷 내에서 작동하는 2축 고니오미터(Goniometer; 그림 2) 내에 이러한 결정조직경계를 가로지르는 전류 수송을 분석하였다. 이러한 실험이 다소 작업량이 많긴 하지만, 결정조직경계와 전류 및 자기장 방향과의 관계(그림 3), 그리고 낮은 각도를 이루는 결정조직경계를 통과하는 최종적인 전류 수송에 대한 효과 등 자속선의 다양한 중요한 특성을 이해하는데 하나의 서광으로 기대된다.

3. 임계전류밀도의 각도의존성과 미세구조

위에서 언급한 상부임계자기장 H_{c2} 및 GL-결맞음 상관길이(GL coherence length)등의 YBCO 고유의 비등방성 때문에, 초-전류 흐름 또한 높은 비등방성이 되며, 판상 결정학적 구조의 ab-축 판상에 평행하게 자기장을 인가하였을 때 일반적으로 매우 높은 임계전류밀도 값을 보여주는데, 보통 이것은 구리산화물 평면 사이에 고유특성으로 자속선의 고정에 기인한 것으로 생각된다. 전체적인 분석은, 자기장 H가 결정학적 c-축 방향에 평행한 경우와 ab-축 방향에 평행한 경우 사이의 모든 결정학적 방향이 전체 로렌츠(Lorentz) 힘을 받도록 인가되는 자기장을 전류와 항상 수직이 유지되는 방법으로 박막소재 시편을 횡단 자기장 안에 넣고 시편을 회전하도록 하여, 최상으로 수행되는 임계전류밀도 J_c 의 각도의존성 실험이 필요하다. 이와 일치되는 결과들은 보통 자기장 H가 결정학적 ab-축 방향에 평행할 때의 최대값과 c-축 성분들이 나타나 달성하고자 하는 최대 자기장의 세기를 급격하게 제한하는 마그넷 응용에 대해 최악의 상황인 c-축 방향에 평

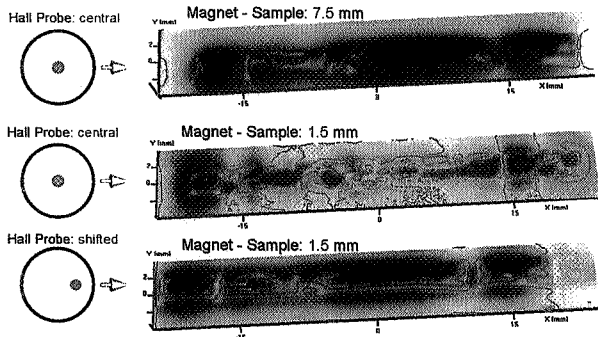
3. Angular dependence of J_c and micro-structure

Because of the above mentioned intrinsic anisotropy of YBCO (anisotropy of H_{c2} , the Ginzburg-Landau coherence length, etc.) the supercurrent flow also becomes highly anisotropic and generally shows very high critical currents densities when the field is applied parallel to the basal planes of the layered crystallographic structure, which is usually ascribed to "intrinsic" pinning of the flux lines in between the Cu-O planes^{viii}. A full analysis requires experiments on the angular dependence of J_c , which are done best by inserting the cc into a transverse field and rotating the sample in such a way that all crystallographic directions between H||c and H||a,b become accessible while always keeping the field perpendicular to the current (full Lorentz force). The corresponding results show in general a smooth variation of J_c between the maximum for H||a,b and the minimum at H||c, clearly an undesirable situation, e.g. for magnet applications, where c-components may appear and drastically limit the achievable maximal field strength.

Therefore, substantial efforts were made during the past few years to "tailor" the defect structure for flux pinning in such a way that preferential pinning occurs for H||c. As an example, Figure 4 highlights the beneficial effect of introducing "correlated disorder" by adding BaZrO₃ during processing^{ix}, which removes the anisotropy nearly completely due to the preferential growth of columnar defects parallel to the c-axis of the superconductor. Many reports on similar "tricks" are found in recent publications, in some cases even a "reversal" of anisotropy, i.e. with J_c being slightly larger for H||c. I believe that an important issue would be to transfer these ideas to systems with different RE ions, e.g. Sm or Gd instead of Y, in order to take advantage of their higher transition temperatures, which would immediately move the IL's



■ 그림 5 : 30cm까지 길이를 가지는 박막소재에 대한 Magnetoscan 장치 설치도



■ 그림 6: 짧은 길이의 박막선재에 대한 Magnetoscan 데이터; 결과들은 왼쪽에 나타난 것처럼 설치된 구성물의 다른 기하학적 형태에 따라 나타냄

of the material to significantly higher fields at 77K ($H \parallel c$).

4. Local supercurrent flow in long-lengths cc's

Apart from the rather "fundamental" issues addressed in sections 2 & 3, matters pertaining to the commercial fabrication of cc's, especially in long lengths up to the km range, are currently deserving increased attention. In view of the complexity and the costs of conductor processing, it is highly desirable to assess the "quality" of the product as quickly and completely as possible. Among several options, e.g. trapped field mapping^x or scanning laser microscopy^{xi}, the magnetoscan device, developed recently by my group originally for investigating the local supercurrent flow in bulk HTS^{xii} seems to be most simple and promising for analyzing the local distribution of critical currents in long length cc's^{xiii}. A schematic view of the device in its present form, which is used for scanning the magnitude of the supercurrents along and across tapes with lengths of up to 30cm, is shown in Figure 5. The idea here is to move a small permanent magnet across the surface of the cc to induce local shielding currents that are in turn associated with a certain local magnetic field which is picked up by a Hall probe situated in the immediate neighbourhood of the permanent magnet. Detailed theoretical studies of the electrodynamic of this configuration^{xiv} demonstrate firstly, that the signal picked up by the Hall probe is directly related to the local critical current density which can be calculated without any model assumptions; secondly, that the "central line" scan is representative of the current flow across the width of the entire tape; thirdly, that the local resolution is better than $500\mu\text{m}$; and finally, that different kinds of information can be obtained by selecting different distances between the permanent magnet and the

행할 때의 최소값 사이에서 임계전류밀도 J_c 의 완만한 변화를 보여준다.

그리하여 결정학적 c -축에 평행한 자기장에서 우선적으로 자속선고정이 일어나는 방법으로, 자속선고정을 위한 결함구조를 형성하기 위한 실질적인 노력들이 지난 수년 간 이루어졌다. 한 예로서, 그림 4는 초전도의 결정학적 c -축에 평행한 원통형 결함(columnar defect)의 선택적 성장에 기인하여 비등방성이 거의 완전히 제거된 제조 과정에서 BaZrO_3 를 첨가함으로써 유익한 효과를 내었다. 자기장이 결정학적 c -축에 평행한 경우에 약간 더 높은 임계전류밀도 J_c 값을 가지는 비등방성 반전의 일부 경우에서 나타나는 유사한 "트릭들"이 최근 많은 발표 논문들에서 보고되고 있다. 자기장이 결정학적 c -축에 평행하고 77K 온도에서 상당히 높은 자기장까지 초전도체의 비가역선이 즉시 이동할 수 있도록, 초전도체의 높은 임계전이 온도의 장점을 취하기 위한 중요한 결과는 Y 대신에 Sm 혹은 Gd 등의 다양한 Re 이온계에 이러한 아이디어를 반영할 수 있을 것으로 생각한다.

4. 장선화된 박막선재에서 국소적인 초-전류 흐름

앞의 2와 3절에서 언급한 다소 기본적인 논점들 외에, 특히 수 km 정도까지 장선화된 박막선재를 상업적으로 제조하는 것에 관심이 증가되는 것은 당연한 것이다. 박막선재 제조과정의 비용과 복잡성을 볼 때, 가능한 빠르고 완벽하게 생산물의 품질을 검증하는 것은 매우 중요한 일이다. 독일 THEVA의 일종의 상용화 장치로서 트랩된 자기장을 맵핑하는 TapeStar, 또는 일본 Kiss 교수 연구실의 Scanning Laser Microscopy, Magnetoscan 장치 등 여러 종류들 중, 벌크 고온초전도체 내의 국소 초-전류 흐름의 관찰을 위해, 처음으로 Magnetoscan 장치가 최근에 개발되었다. Magnetoscan 장치는 길이가 긴 박막선재에 대한 임계전류의 국소적 분포를 분석하기 위한 가장 간단한 장치이다. 30cm 길이까지 박막선재 테이프의 길이 및 폭에 따른 초-전류의 크기를 스캔하는데 사용된 장치에 대한 기본적인 모양은 그림 5에서 보여주고 있다. 여기서 관건은 영구자석의 바로 옆에 위치한 Hall 프로브에 의해 측정되는 특정 국소 자기장에 연관되어 초전도체내에서 국소적으로 방해하는 전류를 유도하기 위해, 박막선재의 표면을 가로 질러 작은 영구자석을 움직이는 것이다. 이런 구성의 전자기학적 이론 연구들이 상세하게 진행되었는데, 첫째로 Hall 프로브에 의하여 측정된 신호는 어떠한 모델의 가정들 없이 계산되어지는 국소적인 임계전류밀도와 직접적으로 연관되어 있고, 둘째로 중앙선 스캔은 전체 박

막선재 테이프의 폭을 통한 전류 흐름을 대표하며, 셋째로 국소적인 분해능은 $500\mu\text{m}$ 보다 좋으며, 마지막으로 다른 종류의 측정 데이터는 영구자석과 박막선재 표면사이의 거리를 다르게 선택함으로써 달성할 수 있다.

측정결과 보편적인 스캔의 예는 그림 6에서 보여주고 있으며, 보라색 및 빨강색은 높은 전류 영역을 표시하고, 노란색이나 녹색은 낮은 전류 영역을 표시하는데, 이 경우에 약 30%의 차이가 있다. 특히 중요한 점은 실험 결과들이 초-전류 흐름에 대한 국소적 전자기학의 이론적 설명에 의한 예측을 정확히 따른다는 것이다. 즉, 우리는 작은 거리 및 중앙 Hall 프로브 구성에 대해 좀 더 국소적인 정보와 비교하여, 자석과 박막선재 테이프 표면 사이의 거리를 크게 하거나, 혹은 Hall 프로브를 장치의 가장자리 부분에 장착하였을 때, 좀 더 전체적이고 포괄적인 측정 결과를 얻는다는 것이다. 물론, 다른 구성들도 모든 종류의 응용이 가능하도록 적합한 장치로 고안 될 수 있다.

5. 결론

고-자기장 마그네틱의 제조 및 운전과 같은 초전도체의 실질적인 응용 영역에서, 고온초전도체를 다양하게 응용하는데 발생하는 수 많은 어려움을 감안하더라도 현재 진행되고 있는 연구는 흥미진진한 단계로 빠르게 접어들고 있다. 바꿔 말하면 케이블링과 교류손실 등의 문제점들이 해결되어, 시장 개척의 돌파구가 되고 있다는 것이다. 이런 발전은 미세구조 자속선 상호작용, 집합조직 요구를 만족시켜주는 프로세싱 기술, 그리고 비록 상당한 비용 문제 하에 있더라도 최종 생산물의 필수적인 품질확보까지 도달할 수 있도록 주어진 새로운 진단 기술과 같은 기본적인 관점에 연관된 강도 높은 연구에 기반이 된다. ■

conductor surface.

A typical example of such scans is shown in Figure 6, where purple and red indicate areas of high current and yellow and green those of lower currents (the difference being about 30% in this case). Note in particular that the experimental results exactly follow the predictions of the theoretical description of the local electrodynamics for the supercurrent flow, i.e. we find a more "global" response when the distance between magnet and tape surface is large or when the Hall probe is mounted at the edge of the device, compared to the more local information for the small distance - central Hall probe configuration (middle panel). Obviously other configurations could also be devised which may be suitable for all kinds of application requirements.

5. Conclusions

Considering all the difficulties and obstacles on the way to applications of HTS in the genuine application area of superconductors, i.e. the construction and operation of high field magnets, we are certainly rapidly approaching the most exciting stage, viz. the breakthrough to the market, provided the issues of cabling and ac losses are solved. This development is based on intensive research on fundamental aspects, such as the micro-structure - flux line interaction, on processing techniques to master the texture requirements, although still under considerable costs, and, last but not least, on novel diagnostic techniques allowing us to arrive at the necessary quality assurance of the final product.

References

- i - D. Dimos, P. Chaudhari, J. Mannhart, F.K. LeGoues: Phys. Rev. Lett. 61, 219 (1988)
- ii - S. Tonies, H.W. Weber, Y.C. Guo, S.X. Dou, R. Sawh, R. Weinstein: Appl. Phys. Lett. 78, 3851 (2001)
- iii - R. Fuger, M. Eisterer, H.W. Weber: IEEE Trans. Appl. Supercond. (submitted, Aug. 2008)
- iv - M. Frischherz, M.A. Kirk, J. Farmer, L.R. Greenwood, H.W. Weber: Physica C 232, 309 (1994)
- v - J.H. Durrell, G. Burnell, Z.H. Barber, M.G. Blamire, J.E. Evetts: Phys. Rev. B 70, 214508 (2004)
- vi - K.R. Schoppl, H.W. Weber, J.H. Durrell: J. Phys. - Conf. Ser. 97, 012225 (2008)
- vii - T.D. Withnell, K.R. Schoppl, J.H. Durrell, H.W. Weber: IEEE Trans. Appl. Supercond. (submitted, Aug. 2008)
- viii - M. Tachiki, S. Takahashi: Solid State Comm. 70, 291 (1989)
- ix - J.L. MacManus-Driscoll et al.: Nature Mat. 3, 439 (2004)
- x - TapeStar, a commercial product by THEVA GmbH, Germany
- xi - T. Kiss. this journal, 2006-5, pp. 34-36
- xii - M. Eisterer, S. Haindl, T. Wojcik, H.W. Weber: Supercond. Sci. Technol. 16, 1282 (2003)
- xiii - R. Fuger, F. Hengstberger, M. Eisterer, H.W. Weber: IEEE Trans. Appl. Supercond. 17, 3753-3756 (2007)
- xiv - M. Zehetmayer, R. Fuger, M. Eisterer, F. Hengstberger, H.W. Weber: Appl. Phys. Lett. 90, 032506 (2007)