

YBCO 박막형 선재의 개발현황

홍계원, 이희균

한국원자력연구소 원자력재료기술개발팀

Abstract - 초전도 재료는 선재의 형태로 가공하면 송전선이나 변압기, 발전기 그리고 전력 저장장치 등에 사용되어 전력계통의 효율을 극대화시킬 수 있는 재료로서 실제 응용 기기의 개발을 위해 많은 연구가 수행되고 있다. 더욱이 1980년대 후반에 개발된 고온초전도 산화물 재료는 액체질소의 비등점인 77K 이상에서 초전도현상을 나타내어 초전도 현상의 응용에 대한 기대를 고조시켜 이에 대한 연구를 더욱 활성화시키고 있다. 초전도선재 연구는 그간 PIT (Powder in Tube) 공정을 이용한 Ag/Bi-2223 ($\text{Ag/Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}$) 선재가 높은 전기적 성질과 장선 가공상의 잇점으로 인해 많은 연구와 성과가 있었다. 그러나 Ag/Bi-2223 선재는 강한 자기장 하에서 통전 능력이 현저하게 저하되는 성질 때문에 높은 자기장하에서 사용하기 위해서는 사용온도를 액체질소 온도보다 상당히 낮은 20K 부근까지 낮추어야 한다는 점 때문에 전력기기 개발에 제한이 따르는 단점이 있다. 이에 반해 최근에 개발된 금속/YBCO 박막 복합선재는 높은 전기적 특성 이외에 특히 높은 자장에서도 통전 능력의 저하가 적어 제한 없이 전력기기의 모든 분야에 사용할 수 있는 특징이 있다. 따라서 1993년에 일본에서 Ni 금속기판에 물리적 증착방법으로 YBCO($\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}$) 박막을 증착시킨 선재제조에 성공하고 이어 1996년에 Oak Ridge National Laboratories (ORNL)에서 Rolling Assisted Biaxially Textured Substrate (RABiTS) 라는 집합조직을 형성시킨 금속기판이 개발되어 연속적인 가공의 가능성이 확인된 후의 특성향상 및 가공기술 개발을 위한 많은 연구가 수행되고 있다. 이 글에서는 이제 까지 개발된 금속기판을 사용한 YBCO계 초전도 박막형 선재의 제조기술 중에서 최근 가장 가능성 있는 것으로 평가되는 RABiTS 방법을 위주로 그 외에 IBAD와 ISD 방법에

관하여 소개하고 현재까지의 개발현황 및 앞으로의 전망에 대하여 간략하게 기술하고자 한다.

1. RABiTS 기술

ORNL에 의해 개발된 새로운 초전도선재는 전력분야 응용에 필요한 실용적인 Y-계 또는 Tl-계 선재에 대한 향후의 생산에 관한 지평을 열었다. ORNL의 연구진에 따르면 roll-texture, metal buffer, oxide buffer, 초전도 박막 제조 기술을 조합한 선재는 액체질소 온도에서 $J_c = 1,000,000 \text{ A/cm}^2$ 이상의 우수한 전기적 특성을 나타낸다. 참고로 표준 가정용으로는 $J_c = 1,000 \text{ A/cm}^2$ 의 전기선을 사용한다. ORNL은 초전도 선재를 제조하기 위해서 소위 RABiTS라 불리는 집합조직이 발달된 금속기판을 제조하는 공정을 개발하였다. 이 모재의 개발로 인해 이 기판 위에서 초전도체를 전류가 잘 흐를 수 있는 방향으로 증착시키는 것이 가능해졌으며, 이는 초전도체에서 전류의 흐름을 보다 효과적으로 하기 위한 필수 조건이다.

고체물리, 금속 및 세라믹, 화학 및 분석 과학 분야의 연구원으로 구성된 ORNL팀은 고온초전도체와 화학적으로 안정적이며 강한 biaxial texture를 나타내는 모재를 개발하였다. 우선 Nickel과 같은 금속 tape를 특별히 개발된 압연 및 열처리 공정에 의해 제조하였으며 연마와 같은 더 이상의 표면처리는 행하지 않았다. 다음으로 이 집합조직을 갖는 금속모재를 위해 특별히 개발된 buffer layer 제조기술에 의해 texture를 유지하며 nickel금속과 초전도체 사이에 화학적으로 안정된 barrier를 입혔다. 이를 위해 electron beam evaporator 또는 sputter를 이용하여 Palladium금속 박막을 입힌후 그위에 pulsed laser deposition(PLD)에 의해 cerium oxide(CeO_2)와 Yttrium-stabilized zirco-

nia(YSZ)를 입혔다. 이렇게 준비된 금속복합기판을 RABITS 이라 하며 이위에 PLD방법으로 YBCO 초전도체 박막을 증착시켜 선재로 사용한다.

그림 1은 ORNL에서 발표한 RABITS의 사진으로 유연한 금속기판에 증착된 초전도선재가 roll에 감겨진 모습을 보여주고 있다.

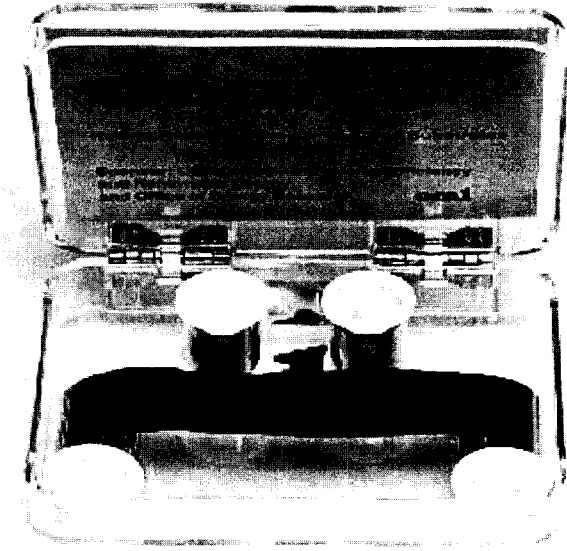


그림1. ORNL이 발표한 RABITS 의 형태

1) RABITS개발의 배경

1990년 초 ORNL의 John Budai는 집합조직을 갖는 은 foil, 은 단결정 그리고 은 buffer layer에 잘 배열된 epitaxial YBCO 박막을 성장시킬 수 있음을 발견하였다. Epitaxy는 YBCO의 결정립 방위가 모재의 그것과 일치하는 것을 의미한다. Epitaxy와 관련하여 J_c 가 향상되는 것을 발견한 Budai는 압연에 의해 집합조직을 갖는 금속 strip을 제조한 후 이 위에 초전도박막을 증착시켜 결정립 배향성이 우수한 초전도 장선재를 제조하는 공정을 제안하였다.

세계적으로 많은 연구진이 biaxially texture를 이루는 strip을 제조하고자 노력하였다. 그러나 은의 고유한 변형특성으로 인해진 strip 형상의 금속재에서 10도 이내의 결정학적 면의 배열을 얻는 것은 매우 어려운 일이다.

단결정에 가까운 장선의 금속 strip을 제조하는 중요한 진보는 Amit Goyal에 의해 이루

어졌다. Goyal은 초전도체와 화학적으로 안정한 noble metal 층을 기저 금속 표면에 epitaxially 입히면 된다고 생각하였다. Goyal과 동료는 다른 금속에서 강한 biaxial texture를 개발하였으며 이위에 화학적으로 안정하며 epitaxial orientation을 갖는 금속층을 증착하였다. Q. He는 sputtering을 이용하여 기저금속 strip위에 금속 및 산화물 층을 epitaxially 증착시켰으며 M. Paranthaman은 Electron beam evaporation을 이용해 기저금속 strip위에 금속층을 epitaxially 증착시키는 다양한 공정 조건을 개발하였다. F. List와 P. Martin은 자체 제작한 evaporator를 이용해 기저금속 strip위에 은을 고속으로 성장시켰다. 금속 표면으로부터 초전도체 사이에는 초전도체의 화학적 열화를 피하면서 기저금속의 texture를 그대로 유지시키기 위해서 oxide buffer layer라 불리는 몇 가지 중간 물질이 필요하다. 초전도체에 가장 적합한 strip을 만들기 위해서 이들 금속위에 ceramic buffer layer를 입힘으로써 생기는 물리적, 화학적 양상에 관해 대부분의 노력을 경주하였다. ORNL의 연구팀은 PLD와 sputtering을 이용해 금속 tape와 초전도체 사이에서 화학적 barrier로 작용하며 금속의 biaxial texture를 유지하는 다양한 oxide buffer layer를 개발하였다. 기저금속/금속 buffer/ oxide buffer layer로 구성된 이 strip을 RABITS이라고 부른다. RABITS을 제조하는데 있어 선의 길이에겐 아무 문제가 없다. ORNL은 금속의 순도와 관련된 연구를 통해 모재의 두께를 25 μm 까지 감소시킬 수 있게 되었으며 이는 선재의 상용화에 공학적인 임계전류밀도를 높이는 데 매우 중요한 역할을 한다. 잘 제조된 RABITS에서 결정학적 배향성의 차이는 tape면으로부터 7°보다 적다.

2) Buffer층 제조

YSZ/CeO₂ 이중박막으로 이루어진 완충층(buffer layer)이 먼저 Ni 테이프위에 증착되어 졌다. 이러한 완충층이 필요한 이유는 Ni이 계속적으로 산화되는 것을 방지하는 것과 YBCO와 Ni간의 격자상수의 불일치를 완화하는 것, 그리고 Ni원자들이 YBCO층으로 확산하는 것을 방지하려는 것이다. 금속

재료 및 소자특집

위에 산화물박막을 배향성있게 성장시키는 것은 쉽게 이루어지는 것이 아니므로, 초기에는 CeO_2 와 Ni사이에 Pd완충층을 첨가하는 시도를 하기도 했으나, 그것은 불필요함이 밝혀졌다. 첫 완충층인 CeO_2 가 배향성을 가지며 증착되는 조건을 얻는 것이 어려운 편이다. 이때 Ni-테이프표면의 산화를 줄이기 위하여, 4% H_2 + 96%Ar으로된 1Torr의 가스안에서 1시간 동안 700°C로 열처리하였다. 그 후 기판온도를 300~400°C 정도로 낮추고, 같은 조성의 혼합기체의 압력을 2×10^{-5} Torr로 낮춘 후, Ce 금속을 e-beam으로 증발법으로 증착시킨다. 이렇게 비교적 낮은 온도에서 증착하는 이유는 Ni, Ce, 그리고 O의 상호 확산을 줄이기 위함이다. NiO는 10^{-8} 이상의 수소분위기에서는 매우 넓은 온도범위에서 환원되므로 NiO의 형성을 막을 수 있다. 그러나 Ce는 반응용기내의 약간의 산소로도 충분히 산화되었다. 200nm 두께의 CeO_2 박막을 증착후 같은 혼합기체의 압력을 1 Torr 로 증가시켜 700°C에서 1시간 열처리를 하여 충분히 결정상태가 이루어지도록 하였다. 이때 CeO_2 에 약간의 균열이 발생하는데 이것은 CeO_2 와 Ni의 열팽창계수의 차이로 발생한다. CeO_2 를 초기에는 300°C에서 증착하다가 온도를 점차로 높여 나머지부분을 700°C에서 증착하면 균열이 현저히 줄어든다. 가스압력을 다시 낮추고 기판온도 약700°C에서 200nm 두께의 YSZ 박막을 증착시킨다. 이 때 YSZ박막에도 약간의 균열이 생길 수 있는데, 이러한 균열을 통하여 Ni이 확산되어 YBCO층에 불순물이 들어가면 초전도특성이 나빠지는 원인이 된다. 따라서 CeO_2 박막과 YSZ박막의 두께가 두꺼울수록 초전도체의 특성면에서는 유리하다.

3) YBCO박막 제조

높은 J_c 를 얻기 위해 PLD 공정을 통해 강한 biaxial texture를 갖는 초전도체 층을 제조하였다. 초전도체 층은 0.5 - 2 μm 두께였으며 평면 크기는 3-mm 폭에 15-mm 길이였다. X선 분석을 통한 초전도 층의 texture는 tape면으로부터의 결정학적 분산이 8° 정도였다. 최초로 발표된 RABiTS위에 제조한 YBCO박막의 J_c 는 77K, self field에서 300,000 A/cm²였으며, 77 K, 1 tesla에

서 100,000 A/cm²였다. 이 값은 PIT법으로 제조한 Ag/BSCCO선재보다 월등한 값이며 특히 자장하에서의 특성이 매우 우수한 결과이다.

4) RABiTS선재 개발의 의미

이전에 개발된 선재의 경우 실질적으로 필요한 자장의 크기를 고려해 볼 때 35K이상의 온도에서는 사용이 제한되어 진다. ORNL에서 개발된 기술을 사용하면 motor, 발전기, 변압기, 그리고 한류기와 같은 초전도 전력기기를 액체질소 온도에서 사용할 수 있게 개발할 수 있다. 이는 액체 헬륨, 또는 기체 헬륨을 사용한 냉동기를 사용하지 않아 경제적으로 유리하며 또한 낮은 자장이 발생하는 송전선의 경우에도 이 기술에 의해 제조된 선이 보다 높은 임계전류값을 갖으며 제조 단가가 낮아 더 유리하다. 또한 이 기술은 일단 기판에 texture가 형성된 buffer층이 증착된 후에는 PLD 방법외에도 MOCVD, 전자빔증발법, sputtering등 여러 가지 방법으로 YBCO 초전도박막을 증착할 수 있으므로 활용성이 커서 앞으로 Ag/BSCCO 복합선재를 대체할 수 있는 기술로 평가되고 있다.

2. IBAD 기술

이 방법은 원래 일본 Fujikura회사의 Ijima에 의하여 1994년에 제안된 기술이나 발표당시에는 크게 주목받지 못하다가 RABiTS 방법이 제안된 후 미국의 Los Alamos National Laboratories (LANL)에서 다시 개발된 것으로 Ion Beam Assisted deposition (IBAD) 공정을 이용하여 misaligned 결정의 성장을 억제하여 방향성 있는 zirconia를 제조하고 이 위에 초전도체를 성장시키는 방법이다. IBAD공정은 두 개의 Ar ion gun을 사용한다.

첫번째 gun을 yttrium stabilized zirconia (YSZ)에 조사시켜 원자를 target으로부터 hastelloy 모재기판에 증착시킴으로써 hastelloy 모재위에 YSZ 박막을 형성시킨다.

두번째 gun을 이용하여 증착되는 박막층에 Ar ion을 조사시킨다.

모재위에 증착된 zirconia 결정의 특정

면은 Ar 원자를 쉽게 통과(channel)시키며 이로 인하여 계속 성장한다. 그러나 channel 방향으로부터 어긋난 zirconia결정은 입사이온과 반응하여 제거된다. 즉 mis-aligned 결정은 ion etching 되어 제거되고 한 방향의 결정면만이 계속 성장한다. 따라서 궁극에는 두 직교 방향으로 집합조직을 형성하고 high-angle 입계를 갖지 않는 cubic zirconia가 생성된다. 일단 cubic zirconia 층이 형성된 후에는 RABiTS 기판을 사용하는 경우와 같이 pulsed laser deposition (PLD)방법을 이용하여 YBCO박막을 epitaxially 증착시킨다. LANL의 연구진은 이 방법의 조건을 잘 맞추어 액체질소온도에서 4 Tesla이상의 자장을 가했을 때 $J_c > 10^5 \text{ A/cm}^2$ 을 갖는 우수한 초전도 전도체를 개발하였다. RABiTS 방법과의 차이점은 RABiTS은 집합조직이 발달된 금속모재를 사용하여 이위에 중간층을 epitaxially 증착시켜 배향성을 갖게 하는 방법이고 IBAD 방법은 집합조직이 발달하지 않은 금속모재를 사용하고 중간층의 증착과정에서 집합조직을 발달시켜 결과적으로는 집합조직이 발달된 최종적인 기판을 준비하여 그위에 YBCO층을 배향성있게 증착시키는 것이다.

3. ISD 기술

ISD 방법은 일본의 sumitomo사에서 사용한 방법으로 LANL의 방법과 비슷한 것으로 역시 hastelloy 금속모재에 textured YSZ를 증착시킨 후 YBCO를 PLD로 의 재료로 사용한다. IBAD와의 차이는 Buffer 층을 증착시킬 때 IBAD 방법을 사용하는 대신에 Inclined Substrate Deposition 방법을 사용하여 hastelloy 에 집합조직이 형성된 중간층을 증착시킨다.

그림2는 위의 세 가지 방법을 알기 쉽게 그림으로 나타낸 것이다.

4. 최근의 연구개발현황

이와 같이 여러 가지 방법에 의하여 YBCO 박막선재의 제조방법이 개발되었고 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. RABiTS 기술이 발표된 이후 대부분의 연구기관이 이에 대한 연구를 시작하였으며 특히 미국의 American Superconductor Corporation (ASC), OXFORD, Midwest Superconductivity Inc. (MSI) 등은 ORNL과 특허 사용 계약을 맺고 연구를 수행중이다. 이외에도 Intermagnetic General Co. (IGC)와 독일의 Prime Tec, 일본의 Sumitomo, Fujikura 등에서 연구

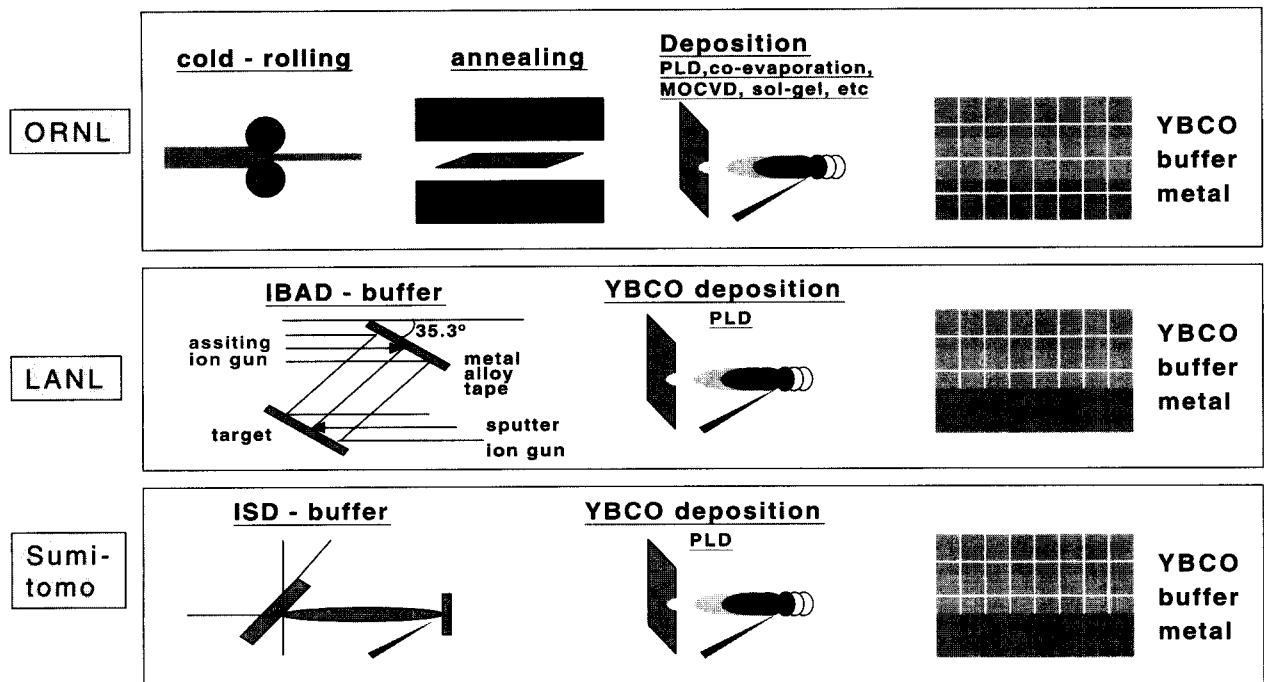


그림2. YBCO 박막선재의 제조공정 비교

재료 및 소자특집

가 활발하게 진행되고 있다. 세계적인 연구의 방향은 우선 현재 1m 정도에 머무르고 있는 선재의 길이를 늘리고 PLD 법의 약점인 느린 증착속도를 극복하기 위한 장치개발

착시켜서 얻어지는 필름은 정상상태의 안정된 YBCO상 조건에서 형성되는 것이 아니다. 따라서 두께가 1 μ m 이상에서는 표면상태가 급격히 나빠져서 2 μ m이상의 필름제

표 1. YBCO 박막선재의 주요연구결과

연구 기관	모재	산화물 buffer	Jc (A/cm ² , self field)	비고
Oak Ridge National Laboratory(미국)	Ni 금속	CeO ₂ /YSZ	1 x 10 ⁹	RABiTS법
Los Alamos National Laboratory(미국)	Hastelloy	YSZ/CeO ₂	1 x 10 ⁹	IBAD법
Fujikura Ltd.(일본)	Hastelloy	YSZ/CeO ₂	1 x 10 ⁹	IBAD법
Muechen Univ.(독일)	8" YSZ, LaAlO ₃	CeO ₂ , MgO, YSZ	1 x 10 ⁹	Co-evaporation법
Sumitomo Elec. Ltd.	Hastelloy	YSZ	1.5 x 10 ⁹	PLD법

연구를 수행중이며, 이와 함께 CVD나 BaF₂ process 등 증착속도가 빠른 다른 공정을 적용하려는 시도도 활발하다. 다음 표1은 현재 까지 발표된 중요한 연구결과를 정리한 것이다.

5. 앞으로의 전망

RABiTS방법으로 제작된 YBCO 박막형 선재는 Ag/BSCCO 복합선재에 비하여 액체질소 분위기에서 고자기장에서의 임계전류밀도는 월등히 우수하지만 YBCO필름의 두께가 1.5~2 μ m이상 되게 하는 경우 임계전류밀도가 감소하는 경향이 있으므로 단일 테이프당 총 임계전류는 그리 높은 편이 아니다. 따라서 이러한 테이프를 여러겹 묶어야한다. 그러나 더욱 어려운 문제점은 전체 단면적에 대한 임계전류밀도, 즉, engineering 임계전류 밀도가 작다는 점이다. 이를 계산해보면 Ni의 두께가 125 μ m이므로 임계전류밀도는 100분의 1로 감소한다. 이것은 필름을 이용한 방법의 중대한 단점이 된다.

임계밀도를 증가시키려면 Ni 모재기판의 두께를 더욱 줄이고 YBCO층의 두께를 늘려야 한다. 그러나 이에 대하여 증착방법이 갖는 근본적인 한계가 있다. YBCO를 구성하는 원소들의 증기가 혼합되어 과포화된 증기를 700°C 정도의 낮은 온도에서 증

작은 불가능한 것으로 알려져 있다. 그러나 YBCO를 950도 온도의 액체상태에서 LPE방법으로 얻어지는 필름은 그 두께가 10 μ m이상도 가능하지만 너무 고온이기 때문에 금속기판 위에는 어려운 문제가 있는 것으로 보인다. 다른 해결방법으로 Ni테이프를 수 μ m까지 두께를 줄일 수 있는 기술이 요구 된다. 한편 테이프의 두께는 고온초전도 테이프를 굽힐 수 있는 곡률 반경의 한계치에 크게 영향을 준다. Ni층이 얇을 수록 굽힘에 대하여 유리하다. 현재 10cm 정도의 곡률 반경이 가능할 것으로 보인다. 물론 여러번 굽혔다 폈다하면 피로에의하여 YBCO 증착층에 crack이 발생한다.

RABiTS방법에 의한 고온초전도 테이프는 아직까지 수십 cm정도의 본보기를 위한 시료만이 시험제작 되어졌다. 그러나 실제 실용적으로 요구되는 테이프의 길이는 수백 m 이상 수Km에 이른다. 그리고 전체적인 최종의 임계전류 값은 각 부위 마다의 임계전류값이 아니고 그것들의 최소치이다. 고온초전도 테이프의 나쁜 부분을 찾아 잘라낸 후 연결해서 붙이는 것은 더욱 어려우므로, 오직 완벽한 재현성을 갖는 기술이 개발되어야만 한다.

ORNL에서 YBCO 박막 증착에 사용한 방법은 pulsed laser 증착법이다. 그러나 이러한 증착방법은 결코 긴 테이프를 위한

연속적 대량생산 방법이 아니다. 또한 스퍼터링방법은 너무 느리고, 동시증발방법도 특수 산소분압을 유지하기 위한 기관의 운용방식 때문에 긴 테이프의 연속증착이 매우 어렵다. 한편 IBAD법은 RABiTS법에 비해서 공정이 더욱 복잡하며 buffer층의 제조조건에 많은 제약이 따른다. Sumitomo 전기에서 laser ablation 시 laser plume의 기관에 대한 입사각을 조절하여 buffer층 제작에 성공하였으나 이 또한 생산성이 낮은 PVD법이라는 점이 문제가 된다. Munich 대학에서 개발한 coevaporation 법은 YBCO 초전도체의 대면적화에는 성공하였으나 이를 장선재 제조에 응용하기 위해서는 많은 해결해야 할 점이 남아있다. 현재 가장 유망한 방법으로 대두되고 있는 테이프 양면에 균일하게 증착시킬 수 있으며 장선의 테이프를 특별한 기술적 어려움 없이 가열할 수 있는 화학증착법이 해결책으로 제시되고 있으나 아직 확인 가능한 우수한 연구 결과가 발표되지 않았다. 또 한가지 박막 선재 개발을 위하여 해결해야 할 점은 기관 재료에 대한 문제이다. 최초에 개발된 순수한 Ni은 집합조직은 잘 형성되나 기계적인 강도가 낮고 변형이 약하여 다루기가 매우 어려웠다. 또한 Ni이 강자성체이므로 전력기에 사용시 이에 따른 손실이 발생한다. 이를 해결하기 위하여 Ni에 합금원소를 첨가하는 경우 집합조직의 형성이 저하되는 경향이 있으므로 적절한 합금원소를 찾는 것이 필요하다. 현재까지의 결과로는 Ni에 Cr을 첨가하는 경우 액체질소 온도에서 비자성체가 되며 기계적인 강도도 증가하며 Inconel 600에서도 집합조직이 잘 형성되어 적절한 후보재료로 생각되고 있으나 더 많은 연구가 필요한 분야이다.

참고문헌

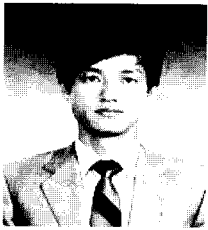
1. M. Makita, S. Hanada and O. Izumi, "Recrystallization in Cold-rolled Pure Nickel", *Acta Metall.* vol.36, No.2, pp403-412, 1988
2. Y. Iijima, K. Onabe, N. Futaki, N. Tanabe, N. Sadakata and O. Kohno, "Structural and Transport Properties of Biaxially aligned YBCO Films on Polycrystalline Ni-based alloy with Ion-beam-modified Buffer Layer", *J. Appl. Phys.*, vol.74, No.3, pp.1905-1911, 1993
3. M. Paranthaman, A. Goyal, F. A. List, E.D. Specht, D.F. Lee, P. M. Martin, Qing He, D.K. Christen, D. P. Norton, J. D. Budai and D. M. Kroeger, "Growth of Biaxially Textured Buffer Layer on Rolled-Ni Substrates by Electron Beam Evaporation", *Physica C*, vol.275, pp266-272, 1997.
4. Qing He, D.K. Christen, J.D. Budai, E.D. Specht, D.F. Lee, A. Goyal, D.P. Norton, M. Paranthaman, F.A. List and D.M. Kroeger, "Deposition of Biaxially-oriented Metal and Oxide Buffer-Layer Films on Textured Ni Tapes: New Substrates for High-current, High-temperature Superconductors" *Physica C* vol.275, pp155-161, 1997.
5. A. Goyal, D.P. Norton, J.D. Budai, M. Paranthaman, E.D. Specht, D.M. Kroeger, D.K. Christen, F.A. List, D.F. Lee, P.M. Martin, C.E. Klabunde, E. Hatfield and V.K. Sikka, "High Critical Current Density Superconducting Tapes by Epitaxial Deposition of YBCO Thick Films on Biaxially Textured Metals", *Appl. Phys. Letts*, vol.69, p1795, 1996.
6. Y. Iijima, M. Hosaka, N. Tanabe, N. Sadakata, T. Saitoh, O. Kohno and K. Takeda, "Processing and Transport Characteristics of YBCO Tape Conductors Formed by IBAD Method", to be appeared for the special issue of *Applied Superconductivity*, 1997
7. E.D. Specht, A. Goyal, D.F. Lee, F.A. List, D.M. Kroeger, M. Paranthaman, R.K. Williams and D.K. Christen, "Cube textured Nickel substrate for high temperature superconductor", *Supercon. Sci. Technol.*, vol.11, pp945-949, 1998
8. C. Park, D.P. Norton, D.K. Christen, D.T. Verebelyu, R. Feenstra, J.D. Budai, D.F. Lee, A. Goyal, E.D. Specht, D.M. Kroeger, M. Paranthaman, "Long length fabrication of YBCO on RABiTS using pulsed laser deposition", presented at the ASC 98 confer-

재료 및 소자특집

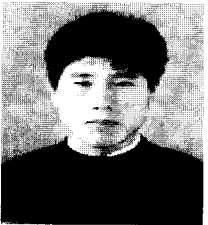
ence, Palm Desert, CA. U.S.A. Sep.13-18, 1998

9. M.Hasegawa, Y.Soshida, M.Iwata, H.Akata, K. Higashiyama, "Preparation of Y123 thin films on the textured metallic tape by hot wall MOCVD", 1998 International Workshop on superconductivity, July 12-15, 1998, Okonawa, Japan. pp203-204

저자이력



홍계원
1956년 4월 3일 생
1978년 서울대 공과대 요업공학과 졸업, 1980년 KAIST 재료공학과(석사), 1983년 KAIST 재료공학과(박사), 현재 한국원자력연구소 원자력재료기술개발팀



이희균
1958년 3월 1일 생
1981년 서울대 공과대 금속공학과 졸업, 1983년 KAIST 재료공학과(석사), 1986년 KAIST 재료공학과(박사), 현재 한국원자력연구소 원자력재료기술개발팀