Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers. Vol. 13, No. 4, pp. 337~342, 2000.

논 문 13-4-11

저항형 초전도 한류기에서의 퀜치 전파

Quench propagation in resistive SFCL

김혜림*, 현옥배*, 최효상*, 황시돌*, 김상준*

(Hye-Rim Kim*, Ok-Bae Hyun*, Hyo-Sang Choi*, Si-Dole Hwang* and Sang-Joon Kim*)

Abstract

We fabricated resistive superconducting fault current limiters based on $YBa_2Cu_3O_7$ thin films and investigated their quench propagation characteristics. The $YBa_2Cu_3O_7$ film was coated with a gold layer and patterned into 1 mm wide meander lines by photolithography. The limiters were tested with simulated fault currents of various fault angles and amplitudes. The quench was concluded to start locally and propagates until completed. The quench propagation characteristics were explained based on the heat transfer within the film as well as between the film and the surrounding liquid nitrogen. The quench completion time depended strongly on potential fault current amplitude and not significantly on fault angle, which indicates that the quench propagation speed is affected more by heat dissipation rate than by fault current increase rate. The quench completion time was 1 msec at the fault current of 65 A_{peak}.

Key words(중요 용어) : $YBa_2Cu_3O_7$, quench(퀜치), fault current limiter(한류기), superconductivity(초전도)

1. 서 론

초전도체는 임계전류 이하에서 임피던스가 제로이고 과도전류가 흘렀을 때 임피던스가 충분히 높으며 교류 전류 1/2 cycle 이내에 전류를 제한할 수 있고 전류가 임계전류 이하로 감소하였을 때 초전도상태로 회복되는 등 이상적인 한류기의 조건을 모두 만족한다. 초전도 한류기 중 저항형 한류기는 구조와 원리가 간단하여 소형화할 수 있는 장점이 있어 독일의 Siemens AG 그룹 등에서 활발한 연구가 진행되고 있다[1,2]. 초전도 한류기를 연구개발하는 데에 있어서 퀜치 특성에 관한 연구가 필요한데 퀜치 특성이 초전도 한류기의 성능을 결정하기 때문이다. 더욱이 퀜치는 케이블, 변압기와 같은 다른 초전도 기기의 안정성에도 큰 영향을 미친다. 이 때문에 저온초전도체의 퀜치 특성에 관한 연구는 많이 수행되어 온 반면, 고온초전도체의 퀜치 특성에 관한 연구는 많이 되어 있지 않다[3,4]. 퀜치 특성 중 퀜치전파 특성은 특히 중요한데 퀜치전파 속도가 저항형 한류기의 한류속도를 결정하기 때문이다.

본 연구의 목적은 고온초전도 박막의 퀜치전파 특성을 조사하여 고온초전도 저항형 한류기의 한류속도 성능을 향상시키고 고온초전도 한류기 설계의 기초 자료로 사용하는데 있다. 이를 위하여 $YBa_2Cu_3O_7$(YBCO) 박막으로 폭 1 mm의 meander line 모양의 저항형 초전도 한류소자를 제작하여 퀜치전파 특성을 측정하고 측정 결과를 설명할 수 있는 메카니즘을 제시하였다.

2. 실 험

저항형 초전도 한류소자는 직경 2 인치의 $LaAlO_3$ 기판 위에 성장된 두께 0.4 μm의 YBCO 박막을 바탕으로 제작하였다. YBCO 박막은 독일 Prima

* : 한전 전력연구원 전력계통연구실
(대전광역시 유성구 문지동 103-16,
전화: 042-865-5973, FAX: 042-865-5804,
email: hrkim@kepri.re.kr)

2000년 1월 14일 접수, 2000년 2월 23일 심사완료

Tech 사에서 구입하였다. YBCO는 공기 중의 수분과 반응하여 비초전도체를 형성하는 성질이 있는데 이 비초전체는 초전도체와 전류도입선 사이의 전류 흐름을 방해하여 접촉저항을 증가시키기 때문에 최소화하여야 한다. 이를 위하여 구입한 YBCO 박막을 dry box에 보관하였고 한류소자를 제작하기 직전에 고순도 산소분위기, 500 ℃에서 annealing하였다.

Annealing 즉시 YBCO 박막 위에 금 박막을 증착하여 YBCO 표면을 공기로부터 차단하였다. YBCO는 제조공정 특성상 일반적으로 불균일한데 금박막은 이러한 불균일성으로 인하여 생기는 hot spot에서 국소적으로 발생하는 열을 분산하는 역할을 하기도 한다. 또한, 박막층은 상전도 상태의 YBCO보다 비저항이 훨씬 작기 때문에(각각 2 $\mu\Omega$ cm와 200 $\mu\Omega$cm) 전류를 퀜치된 hot spot으로부터 우회시켜서 hot spot에서 발생하는 열의 양을 줄이기도 한다. 금 박막이 초전도 퀜치에 미치는 영향을 보기 위하여 일부 meander line은 금 박막으로 덮지 않고 YBCO 박막을 노출시켰고, 몇 개의 meander line은 line의 대부분은 금 박막으로 덮고 일부분은 YBCO 박막을 노출시켰으며 나머지 meander line은 YBCO가 노출된 부분이 없이 line 전체를 금 박막으로 덮은 상태에서 실험을 하였다. YBCO가 노출되어 있는 부분이 있는 meander line은 임계전류를 넘는 거의 즉시 용단되어 퀜치된 상태를 1 ms도 유지하지 못하였다. 금 박막으로 덮힌 meander line은 임계전류 이상의 전류를 통하였을 때에 용단되지 않았으며 퀜치된 상태에서 3 사이클 이상 유지하였다.

이렇게 금이 증착된 YBCO 박막을 photolithography를 이용하여 폭 1 mm의 meander line 모양으로 식각하였다. 그 다음 금박막과 YBCO 박막 표면의 접착력을 증가시켜 양자 간의 접촉저항을 줄이기 위해 위에서와 같이 고순도 산소분위기, 500 ℃에서 annealing하였다. 제작한 저항형 한류소자는 그림 1과 같다.

이와 같이 제작한 한류소자를 이용하여 퀜치특성 측정 실험을 수행하였으며 실험 장치는 그림 2와 같다. V_0는 전원전압, R_0는 회로의 전류를 측정하고 회로를 보호하기 위한 저항, SFCL은 초전도 한류소자, CT는 회로의 전류를 측정하는데 사용한 변류기이다. 초전도 한류소자는 냉각효과를 높이기 위하여 액체질소에 담근 상태에서 실험을 수행하였다. 사고전류는 스위치 S_2를 닫아 발생시켰는데 위상제어기를 사용하여 사고각을 조정하였고 차단기가 보통 3 주기에 작동하는 점을 고려하여 3.5 주기에 스위치 S_1을 엶으로써 초전도체를 불필요하게 사고전류에 노출시키지 않도록 하였다. 전원전압을 변화시켜 사고전류의 크기를 조절하였다.

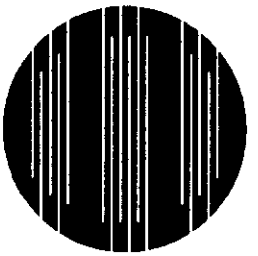


그림 1. YBCO 박막 한류 소자
Fig. 1. YBCO thin film fault current limiter

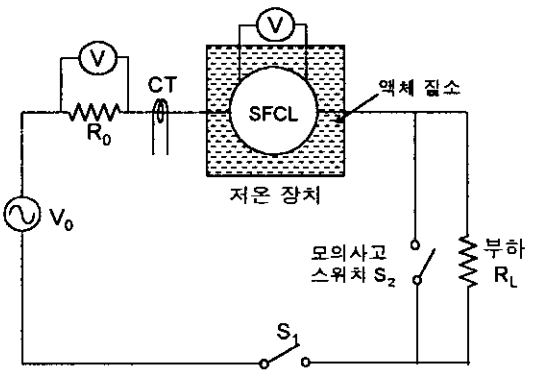


그림 2. 퀜치특성 측정 회로
Fig. 2. A quench characteristics measurement circuit

3. 결과 및 토의

그림 3은 인가전압 V_0를 65 V_{peak}, 저항 R_0과 부하 저항 R_L을 각각 1 Ω, 7.7 Ω으로 하였을 때의 초전도 한류소자에 흐르는 전류의 파형을 보여준다. 스위치 S_2를 닫음으로써 사고전류를 회로에 흘렸을 때, 한류소자가 없을 때에는 회로에 흐르는 전류가 65 A_{peak}로 올라가나 한류소자를 삽입하였을 때에는 최대전류 13 A_{peak}로 제한되었고 3 주기 후에는 8 A_{peak}로 감소하였다. 즉 한류소자를 사용함으로써

사고전류를 효과적으로 정상전류 수준으로 제한할 수 있었다. 이 한류 현상은 회로에 초전도체의 임계전류를 넘는 사고전류가 흘렀을 때 한류소자의 초전도체 YBCO 박막이 퀜치되어 저항이 발생하여 일어난다.

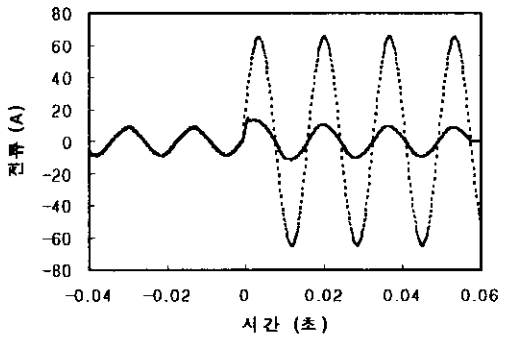


그림 3. YBCO 한류소자의 한류 특성.
실선: 한류기가 있을 때.
점선: 한류기가 없을 때.

Fig. 3. Current limitation characteristics of a YBCO fault current limiter.
Solid line: with an SFCL.
Dotted line: without an SFCL.

그림 4(a)는 34 A_{peak}의 예상사고전류가 흘렀을 때(즉 R_o = 1 Ω에서 V_o = 34 V_{peak}일 때)의 시간에 따른 한류소자 저항의 변화를 나타낸다. 여기서 예상사고전류(potential fault current)란 그림 2의 스위치 S_2를 닫아 모의 사고를 일으켰을 때 한류기가 회로에 없을 경우 예상되는 사고전류를 말한다. 전류가 10 A일 때 퀜치가 시작되어(A점) 저항이 4 Ω까지 증가하였다. 사고전류 발생 후 11 msec 시점까지는 저항이 3.3 Ω 이내인데(A-B점 사이) 그림 4(b)에서 보면 한류소자의 온도가 균일할 때 임계온도 부근을 제외하고는 한류소자의 저항이 3.3 Ω 이내가 될 수 없으므로, 이는 한류소자 굽은 선의 일부만이 퀜치되고 나머지는 초전도 상태로 남아 있음을 의미한다. 따라서 3.3 Ω 이내의 저항 범위에서 저항이 증가하는 것은 초전도 상태로 남아 있던 부분이 일부 퀜치되어 저항체로 바뀌기 때문인 것으로 볼 수 있고, 저항이 3.3 Ω에 이른 시점에서 한류소자 전역이 퀜치되어 퀜치가 완료된 것으로 추정할 수 있다. 퀜치가 일어날 수 있는 요인 중 하나는 한류소자에 흐르는 전류가 임계전류를 넘는 것인데 사고전류 발생 5 msec 이후에 전류가 퀜치전류보다 작은데도(그림 4(a)의 두 번째 그래프) 저항이 계속 증가하는 것으로 보아 이 경우에 해당이 되지 않는다. 다른 요인은 퀜치된 부분에서 발생한 열의 일부분이 옆으로 전달되어 옆부분을 퀜치시키는 것이다. 새로이 퀜치된 부분에서 열이 발생하고 위 과정이 반복된다. 즉 퀜치가 발생한 지점에서 옆으로 전파하는 것이다.

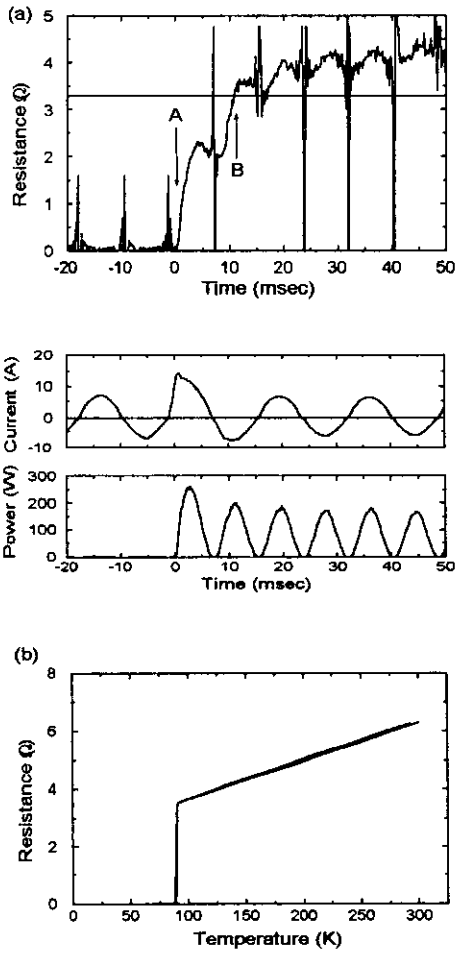


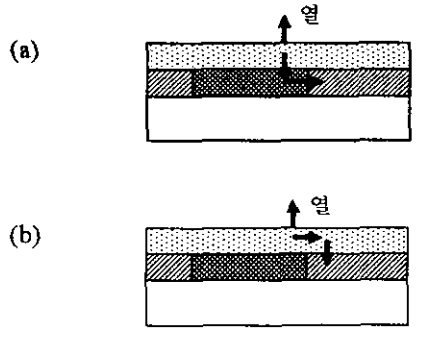
그림 4. 예상사고전류 34 A_{peak}에서의 퀜치특성.
(a) 저항, 전류 및 소비전력
(b) 한류소자 저항의 온도에 따른 변화

Fig. 4. Quench characteristics of an SFCL at potential fault current of 34 A_{peak}.
(a) Resistance, current and dissipated power, (b) Temperature dependence of resistance.

이와 같은 퀜치 전파 현상은 다음의 열균형 방정식으로 잘 이해할 수 있다.

$$P = C\frac{\partial T}{\partial t} + G(T - T_b) - \nabla(K\nabla T) \quad (1)$$

여기서 P는 소비전력, C는 YBCO 초전도체의 열용량, K는 열전도도, G는 액체 질소로의 열전달계수, T_b는 액체질소의 온도이다. 퀜치된 부분에서 전력 P가 소비되어 발생한 열이 일부 자신의 온도를 올리는데 사용되고(우변의 첫째 항), 일부 주변의 액체질소와 $LaAlO_3$ 기판으로 전달되고(둘째 항), 나머지가 옆부분으로 전달된다(셋째 항). 퀜치된 부분에서 발생한 열이 전달되는 경로는 두 가지를 생각할 수 있다. 한 경로는 퀜치된 YBCO 박막의 열이 옆으로 전달되어 옆부분의 YBCO 박막을 퀜치시키는 경로이고(그림 5(a)), 다른 경로는 금 박막에서 발생한 열이 옆의 금 박막으로 전달되고 그 열의 일부가 그 밑의 YBCO 박막으로 전달되어 밑의 YBCO 박막을 퀜치시키는 것이다(그림 5(b)). 전류는 새로이 퀜치된 YBCO 부분을 우회하여 금박막으로 흐르고 이에 따라 새로이 퀜치된 부분에서 Joule 열이 발생하게 되고 위의 과정이 반복되어 퀜치가 전파된다. YBCO 박막에서보다 금 박막에서의 열전도도가 더 크므로(상온에서 금: 3.1 W/cmK [5], YBCO: c∥축 방향으로 0.0026 W/cmK, c⊥ 방향으로 0.02 ~0.05 W/cmK [6]) 두 경로중 주로 두 번째 경로로 열이 전달되어 퀜치가 전파될 것으로 생각된다. 그림 4(a)에서 4.5 ~ 8.5 msec에서는 저항이 감소하고 있는데 이는 발생하는 열이 적은 반면 한류소자의 온도가 이미 많이 올라가 있어서 주변으로 열을 빼앗겨(위 방정식 (1) 우변의 둘째 항) 퀜치된 YBCO의 일부가 초전도 상태로 돌아갔기 때문이다. 이 경우의 열의 전달 경로는 그림 5(c)에 보인 바와 같다.



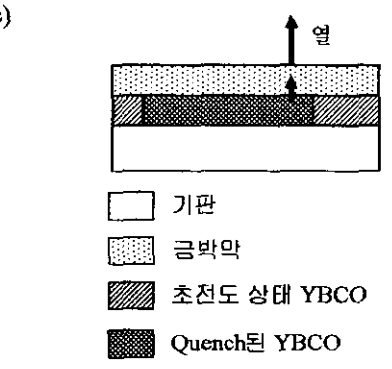


그림 5. 한류소자의 (a)(b) 퀜치 전파 시, (c) 퀜치로부터의 복귀 시 열전달 경로.

Fig. 5. Heat transfer path in SFCLs (a)(b) during the quench propagation and (c) during the recovery to the superconducting state.

저항형 한류기의 한류속도를 결정하기 때문에 기술적으로 중요한 의미를 갖는 퀜치완료시간은 예상사고전류가 34 A_{peak}인 경우 그림 4(a)에서 나타낸 바와 같이 11 msec이다(A점에서 시작하여 B점에서 완료). 퀜치전파 속도를 단위 시간당 퀜치가 일어난 부분의 길이로 정의한다면 이에 상응하는 퀜치 전파 속도는 4.3 m/s이다. 그림 6(a)는 사고각 0°에서 사고전류를 변화시켜 측정한 한류소자 저항의 시간에 따른 변화이다. 이 그림으로부터 퀜치완료 시간, 즉 저항치가 한류소자 전역에 퀜치가 일어났을 때의 저항치(그림 6(a)에 수평한 선으로 표시한 값)에 이르는 데에 걸리는 시간은 예상사고전류에 따라 많은 차이가 있음을 볼 수 있다. 예상사고전류가 65 A_{peak}인 경우에는 1.1 msec에 퀜치가 완료되어 퀜치전파 속도가 43 m/sec에 달하는 반면, 12 A_{peak}인 경우에는 실험한 3.5 주기(58 msec) 이내에 퀜치가 완료되지 않았고 퀜치전파 속도는 40 cm/s에 그쳤다. 예상사고전류에 따른 퀜치완료 시간과 그에 상응하는 퀜치전파속도의 변화는 그림 6(b)에 요약되어 있다.

그림 7(a)는 예상사고전류가 34 A_{peak}인 경우 사고각에 따른 한류소자 저항의 변화를 나타낸다. 사고각 90°에서는 사고전류가 순간적으로 퀜치전류 10 A_{peak}을 넘어서면서 순간적으로 저항이 발생하여 사고각 0°에 비해 퀜치가 1 msec 이상 빨리 시작하였다(그림 7(a)에서 사고 시점은 사고각 0°, 90°에서

각각 A, B이다). 그러나 발생한 저항의 크기는 사고각 0°에서와 비슷하여 퀜치완료시간 또한 사고각 0°에서와 비슷하다. 이는 초기의 사고전류 증가율이 퀜치완료시간에는 큰 영향을 미치지 않음을 뜻한다. 그림 7(b)는 예상사고전류가 34 A_{peak}인 경우 사고각 0°, 90°에서 한류소자에 소비된 전력을 나타내며 두 사고각에 대한 소비전력이 대동소이함을 보여준다. 이 결과와 위 그림 6에 나타낸 결과를 종합하면 퀜치완료시간은 사고전류의 증가속도보다 한류소자의 전역으로 퀜치를 전파시키기에 충분한 열의 공급 속도에 더 영향을 받음을 알 수 있다.

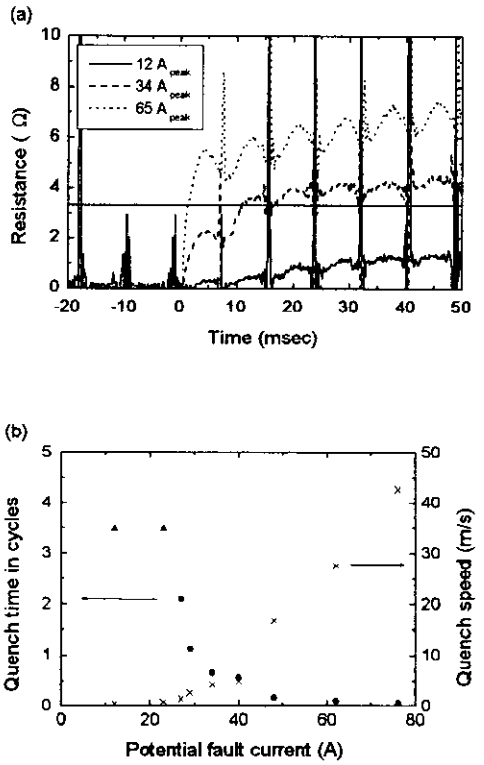


그림 6. 퀜치완료 시간(사고각 0°)
(a) 예상사고전류에서의 한류소자 저항.
(b) 퀜치완료 시간 및 퀜치전파속도(위를 향한 삼각형은 퀜치완료 시간이 표시된 값보다 큼을 뜻한다.)

Fig. 6. Quench completion time (fault angle 0°)
(a) Resistance of an SFCL at some potential fault currents
(b) Quench completion time and quench propagation time

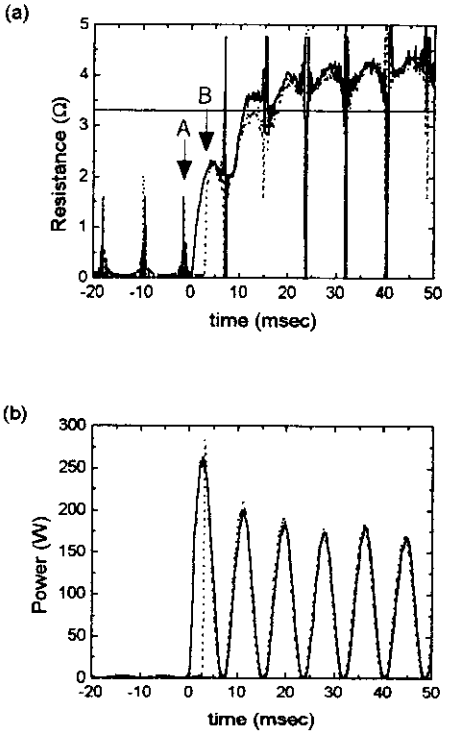


그림 7. 퀜치전파 특성(예상사고전류 34 A_{peak}). 실선: 사고각 0°, 점선: 사고각 90°. (a) 한류소자의 저항, (b) 소비 전력

Fig. 7. Quench propagation characteristics (potential fault current 34 A_{peak}). solid line: fault angle 0°, dotted line: 90°. (a) Resistance and (b) dissipated power

위의 결과는 방정식 (1)로 이해할 수 있다. 방정식에 나타나 있는 변수들(온도 T와 소비전력 P)의 실험 측정치는 국소적인 값($T(x)$, $P(x)$)들의 한류 소자 전체에서의 평균치이다. 방정식 (1)을 위치에 대하여 평균하면 아래 방정식 (2)와 같아진다. 이 방정식에는 방정식 (1)의 세 번째 항을 평균하면 한류소자의 각 부분에서 서로 주고받는 열이 상쇄되어 무시할 수 있다는 점도 반영하였다.

$$C\frac{\partial T_{av}}{\partial t} \approx P_{av} - G(T_{av} - T_b) \qquad (2)$$

여기서 아래 첨지 av는 해당 변수의 평균값임을 나타낸다. 앞에서 제시한 열전달 모델에 의하면 퀜

치가 완료되는 때의 T_{av}는 대략 YBCO 박막의 임계 온도이므로 위 방정식 (2)의 두 번째 항은 대략 일정하다. 좌변의 항이 퀜치전파속도와 대략 비례하므로 위 방정식에서 퀜치전파속도가 한류소자에서의 소비전력, 즉 한류소자에의 열 공급 속도에 의해 결정됨을 알 수 있다.

4. 결론

금박막을 입힌 YBCO 박막으로 제작한 굽은 선 모양의 저항형 초전도 한류소자의 퀜치전파 특성을 조사하였다. 퀜치의 전파는 열균형 방정식으로 설명할 수 있는데 금 박막에서 발생한 Joule 열 중 일부가 옆의 금 박막으로 전도되고 이 중 일부가 다시 YBCO 박막으로 전도됨으로써 전파되는 것으로 생각된다. 퀜치완료 시간은 예상사고전류에 따라 큰 차이를 보였으나 사고각은 별 영향을 미치지 않았고 퀜치는 사고전류가 65 A_{peak}인 경우 1 msec 이내에 완료하였다. 이는 퀜치전파속도가 사고전류 증가 속도보다 한류소자로의 열 공급 속도에 의해 결정됨을 말해주며 열균형 방정식으로 설명할 수 있다.

감사의 글

본 연구의 일부는 과학기술부 중점국가연구개발사업의 지원으로 수행되었습니다. 또한 박막의 식각에 도움을 준 한국표준과학연구원의 김인선, 임해용 연구원에게 감사드립니다.

참고 문헌

[1] B. Gromoll, G. Ries, W. Schmidt, H.-P. Kraemer, B. Seebacher, B. Utz, R. Nies and H.-W. Neumueller, Appl. Superc. Conf, 1998, Palm Desert, CA, USA, Paper LJA01

[2] R. Wordenweber, J. Schneider, A. I. Zaitsev, R. Kutzner, T. Konigs and P. Lahl, IEEE Trans. Appl. Superc. 7, 1021 (1997)

[3] M. Lindmayer and H. Mosebach, IEEE Trans. Appl. Superc. 7, 1029 (1997)

[4] T. Kiss, M. Inoue, K. Hasegawa, K. Ogata, V. S. Vysotsky, Y. Ilyin and M. Takeo, Appl. Superc. Conf. 1998, Palm Desert, CA, USA, paper LTA-02

[5] N. Ashcroft and N. Mermin, Solid State Physics, Holt, Rinehart and Winston, p.21, 1976.

[6] L. Shaw-Klein, S. Burns, A. Kadin, S. Jacobs and D. Mallory, "Anisotropic thermal conductivity of YBCO thin films", Superc. Sci. Tech. 5, pp. 368-372, 1992