

Measurement using Low-temperature Scanning Hall Probe Microscopy and Analysis of Local Current Distribution using Inversion Problem Technique

B. R. Cho, S. K. Park, H. Y. Park, H. -C. Ri*

Department of Physics, Kyungpook National University, Daegu, Korea

(Received 8 July 2011 revised 1 August 2011 accepted 3 August 2011)

저온 주사 홀소자 현미경과 역변환 방법을 이용한 국소적 전류 분포 분석

조보람, 박상국, 박희연, 이형철*

Abstract

We have performed measurements of the local magnetic field distribution of YBCO coated conductors using Low-temperature Scanning Hall Probe Microscopy (LT-SHPM). Distribution of stray magnetic field of various types of YBCO coated conductors in the superconducting state was measured in presence of external magnetic fields. We analyzed one dimensional and two dimensional local current distribution using inversion technique from the magnetic field distribution.

Keywords : Hall probe, YBCO, coated conductor, inversion problem

I. Introduction

초전도 선재를 이용한 대용량 초전도 응용기기를 제작하기 위해서는 높은 자기장 환경에서도 높은 임계 온도를 가지며 높은 임계 전류 밀도를 유지하는 물질을 이용하는 것이 유리하다. 특히 초전도체에 수직인 방향으로 자기장이 가해질 때 Bean의 임계 상태 모델(Bean's critical

state model) [1-2]을 사용하여 자기이력 손실을 계산하면, 단위 부피당 자기이력 손실은 초전도체의 넓이에 비례한다고 알려져 있다 [3-5]. 따라서 자기이력손실을 줄이기 위해서는 초전도체의 넓이를 줄여야 하므로 $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ [6] 초전도 선재를 평행하게 배열된 필라멘트 구조를 가진 형태로 제작하여 다양한 물성들을 연구하고 있다. 특히 임계 온도와 임계 전류 밀도의 공간적인 분포를 관찰 하는 실험들을 활발히 수행하고 있다.

본 연구에서는 액체 질소 환경에서 초전도 선

*Corresponding author. Fax : +82 53 950 5328
e-mail : hcric@knu.ac.kr

재 시료의 국소적인 특성을 관찰할 수 있는 저온 주사 홀소자 현미경(Low-Temperature Scanning Hall Probe Microscopy)을 활용하여 다양한 브릿지 형태를 가진 YBCO 초전도 선재의 임계 온도 및 전류 밀도의 공간적 분포를 관찰하였다.

II. 실험

본 연구의 목적은 YBCO 초전도 선재를 필라멘트 구조를 가지는 형태를 제작한 후 국소적 전류 밀도 분포를 분석하는 것이다. 저온 주사 홀소자 현미경 실험은 액체 질소 온도의 극저온 환경에서 실시 하였으며, 온도의 안정성을 위해서 시료를 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ Torr의 진공 내에 위치하도록 고정 시켰다. 그 결과 ± 2 mK의 온도 안정성을 얻을 수 있었다.

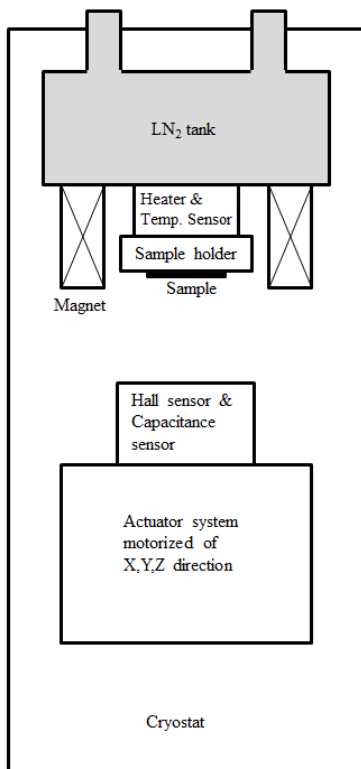


Fig. 1. Schematic diagram of the LTSHPM

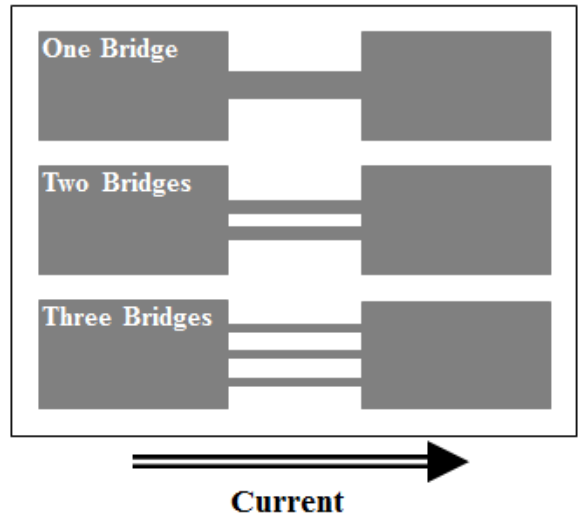


Fig. 2. Geometry of the samples

Fig. 1에 LTSHPM시스템을 도식적으로 표시하였다.

홀 센서와 정전 용량 센서의 높이 차이가 10 μm 미만이 되도록 장착하였다. 이 두 센서는 3.5 nm 스텝으로 세 개 축방향으로 이송할 수 있는 x, y, z 이송장치 위에 고정하였다. 시료와 홀센서 사이의 거리는 정전 용량 센서를 이용하면 5 ~ 60 μm 범위 내에서 측정 할 수 있다. 본 실험에서는 시료에 수직한 방향으로 자기장을 인가한 상태에서 시료와 홀 센서 사이의 거리를 20 μm 로 유지하면서 홀센서의 신호를 측정하였다. 홀센서의 민감도는 93.3 mV/T이며, 유효면적(active area)은 50 $\mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 이다. 지름이 0.5 mm인 원기둥모양의 코어를 지름이 1 mm인 원통으로 감싸고 있는 형태로 정전 용량 센서를 제작하였다.

본 실험에서는 Superpower 社의 상용 YBCO 초전도 선재를 사용하였다. 고온 초전도 선재의 폭은 12 mm, 두께는 95 μm 이며 이중 YBCO 층의 두께는 약 1 μm 이다. Ag층은 수산화 암모늄과 과산화수소의 혼합용액으로 제거하였다.

이렇게 해서 드러난 YBCO 층은 화학적인 애칭 공정을 통해서 Fig. 2에서 표시한 것과 같이 세가지 형태의 필라멘트 구조를 가지는 형태로 제작하였다.

III. 결과 및 분석

시료의 임계온도를 측정하기 위해서 4단자 법으로 저항의 온도 의존성을 측정하였다. 시료에 인가해 준 전류가 1 mA일 경우 세 가지 형태의 시료의 임계온도는 92.6 ~ 92.7 K임을 Fig. 3에서 볼 수 있다.

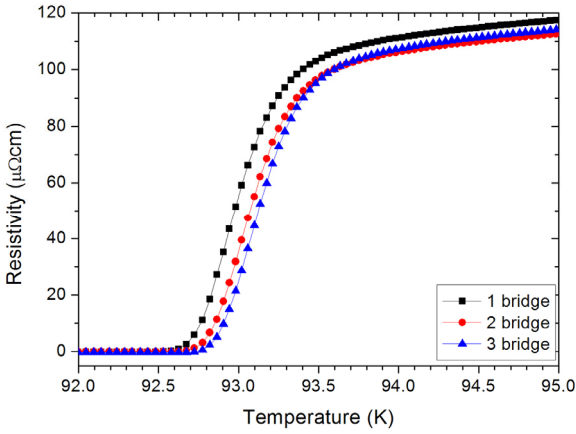


Fig. 3. Temperature dependence of the resistivity. (Bias current : 1 mA , Zero Field Cooled).

임계 온도보다 약 12 K 정도 낮은 $T = 81$ K에서 외부 자기장에 의한 차폐전류 분포를 분석 하였다. 필라멘트 구조로 제작된 시료는 길이가 2 mm이고 폭이 300 μm 의 단일 브릿지로 제작하였다. 시료와 홀센서 사이의 간격을 20 μm 로 유지하면서 stray field를 17.5 μm 의 스텝으로 linescan을 실시하였다.

시료의 온도는 81 K로 고정한 상태에서 전류를 흘려주지 않은 상태로 100 Oe의 외부 자기장을 걸어 linescan을 실시한 얻은 홀전압이 Fig. 4에 나타내었다. 측정된 홀 전압을 자기장으로 변환하고, 식 (1)에 자기장을 대입하여 계산하면 전류 분포 밀도를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \mu_o J(n) \\ &= \sum_{n'} \frac{n-n'}{\pi} \left\{ \frac{1 - (-1)^{n-n'} e^{n\pi d}}{d^2 + (n-n')^2} \right. \\ & \quad \left. + \frac{[d^2 + (n-n')^2 - 1][1 + (-1)^{n-n'} e^{n\pi d}]}{[d^2 + (n-n'+1)^2][d^2 + (n-n'-1)^2]} \right\} \\ & \times B_z(n') \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)은 실험에서 측정된 자기장의 분포로부터 전류 분포를 계산하기 위해 유도한 것으로 푸리에 역변환 기법을 활용하여 계산한 결과이다 [7]. 브릿지 단면 위치에 따른 자기장과 식 (1)을 사용하여 계산한 전류 밀도 분포를 Fig. 4에서 비교하여 분석하였다. Fig. 4의 홀 전압은 초전도 상태인 시료의 효과만을 나타내기 위해서 인가한 외부 자기장의 배경(background)을 제거하였다. 이를 위하여 초전도 상태인 81 K에서 측정된 결과에서 임계 온도 보다 높은 100 K에서 인가 자기장 분포를 빼주었다. 브릿지 단면의 중심을 기준으로 왼쪽과 오른쪽 영역에서 전류가 반대방향으로 흐르고 있음을 볼 수 있었고, 이것은 외부 자기장에 의한 차폐전류를 의미한다.

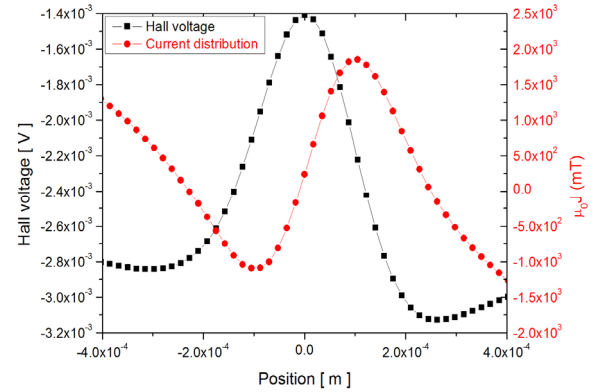


Fig. 4. Linescan of hall voltage and current density obtained by using inversion technique at external field 100 Oe, 81 K.

다양한 외부 자기장($H = 20$ Oe, 50 Oe, 100 Oe, 300 Oe, 600 Oe)에서 차폐 전류 분포 밀도의 경향성을 분석하였다. 시료를 정상상태인 100 K에서 외부 자기장을 인가하지 않은 상태로 $T = 81.0$ K으로 냉각한 후 솔레노이드에 흐르는 전류를 천천히 증가 시켜가며 우리가 원하는 외부 자기장에 도달 시켰다(zero field cooling).

자기장의 세기가 20 Oe \rightarrow 50 Oe \rightarrow 100 Oe으로 증가함에 따라 최대 전류밀도가 커진 후, 300 Oe \rightarrow 600 Oe으로 증가하면 감소하는 경향을 보인다. 국소적 초전도 특성과 포괄적(global) 특성을 비교 분석하기 위해서 MPMS(Magnetic Property Measurement System)를 이용하여 $T = 81$

K에서 외부 자기장에 따른 자기 모멘트를 측정된 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 외부 자기장이 0 Oe에서 1000 Oe까지 증가함에 따라 자기 모멘트의 절대값이 100 Oe부근에서 최대값을 가지며 커지다가 작아짐을 볼 수 있다. Fig. 6은 LT-SHPM을 이용해서 자기장을 증가시켜가며 브릿지의 전류 분포 밀도를 나타낸 것이다. 외부자기장이 100 Oe일 때 전류 분포 밀도가 가장 높게 나타났고, 100 Oe에서 외부자기장을 증가시키며 전류 밀도 분포를 분석해 보았을 때 전류 밀도 분포가 감소 하는 것을 Fig. 6에서 확인 할 수 있다. Fig. 5와 Fig. 6을 비교해 볼 때 외부 자기장에 의한 자기 모멘트 값과 전류 밀도 분포가 100 Oe에서 각각 최대값을 가지며, 같은 경향성을 가짐을 확인 할 수 있었다. 그리고 Fig. 5에서 100 Oe에서 자기 모멘트 값이 가장 큰 것은 외부 자기장에 의한 차폐전류가 가장 강하게 흐름을 의미한다.

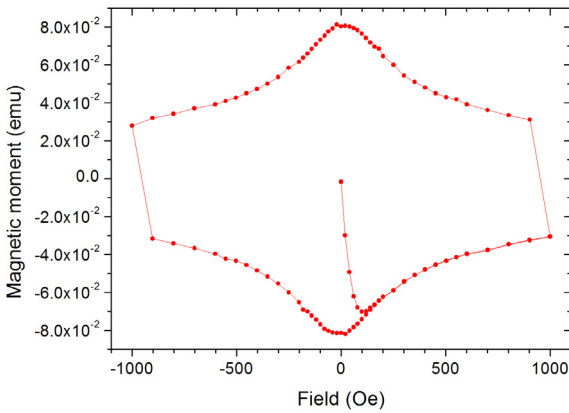


Fig. 5. Hysteresis loop of YBCO coated conductor measured by MPMS at $T = 81$ K.

지금까지 1차원에 대해서 자기장으로부터 전류 밀도 분포를 역변환 방법으로 계산하여 얻었고, 이를 이용해 차폐 전류를 자기장의 변화에 따라 분석하였다.

한 단계 더 나아가 2차원에 대한 역변환 방법으로 전류밀도분포를 분석하였다. 온도가 81 K, 외부 자기장이 300 Oe인 경우 2차원 공간에서의 세 가지 브릿지 형태의 자기장을 분석하면 Fig. 7로 표현된다. 1차원과 마찬가지로 임계 온도보다 높은 온도($T = 100$ K)에서의 자기장

배경 효과를 제거 하였다. 자기장의 2차원 분포를 역변환 방법을 이용하여 전류밀도로 나타내기 위해서

$$j_x(k_x, k_y) = -\frac{2i}{\mu_0} \frac{e^{kz_0}}{k} k_y b(k_x, k_y)$$

$$j_y(k_x, k_y) = -\frac{2i}{\mu_0} \frac{e^{kz_0}}{k} k_x b(k_x, k_y) \quad (2)$$

$$k \equiv \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$$

를 사용하여야 한다 [8]. 측정과정에서 발생하는 여러 노이즈를 제거하는 필터함수로 Hanning window인

$$W(k) = \begin{cases} 0.5 \left[1 + \cos\left(\frac{\pi k}{k_{max}}\right) \right], & k < k_{max} \\ 0, & k > k_{max} \end{cases} \quad (3)$$

을 적용시켜서 [9] 세가지 형태의 브릿지에 적용시키면 Fig. 8과 같은 결과를 얻을 수 있다.

2차원 역변환 방법으로 전류밀도를 분석한 결과로부터 1차원 실험에서 얻은 차폐전류를 다시 확인해 볼 수 있었고, 시료의 전류밀도가 2차원 공간에서 대체적으로 균질하다고 판단할 수 있다. 저온 주사 홀소자 현미경을 이용하여 초전도 선재의 단면을 통해 흐르는 전류 밀도 분포를 정량적으로 분석할 수 있다. 그리고 차폐 전류의 2차원적 분포도 정확히 재현할 수 있었다.

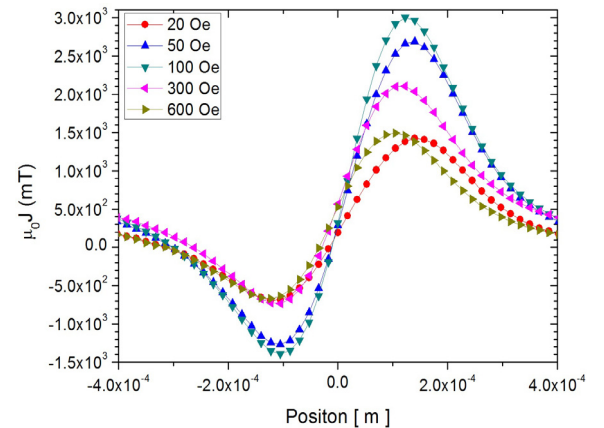
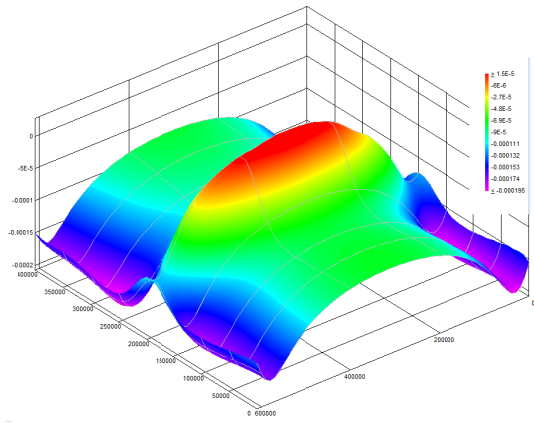
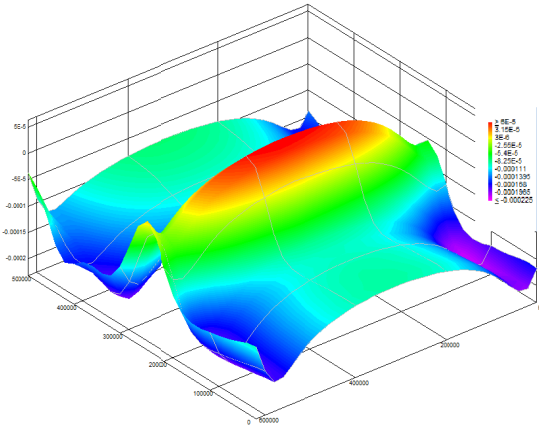


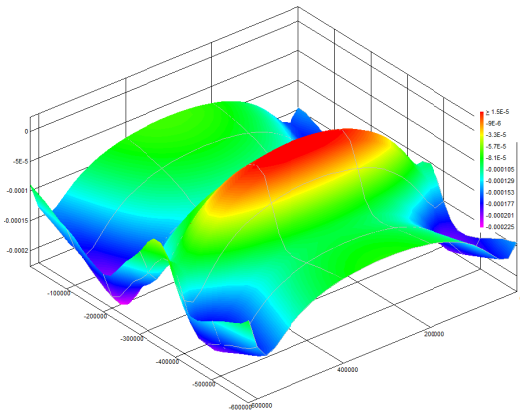
Fig. 6. Current density across the strip at various external field, 81 K.



(a) 1-bridge type

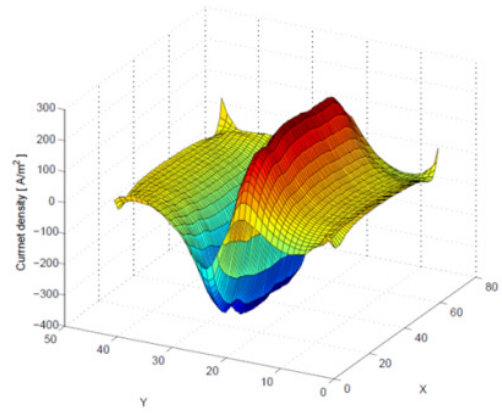


(b) 2-bridge type

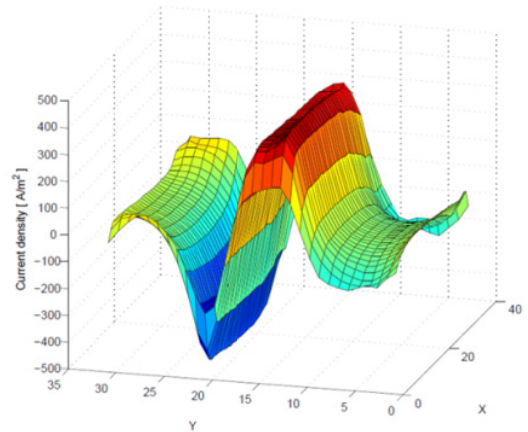


(c) 3-bridge type

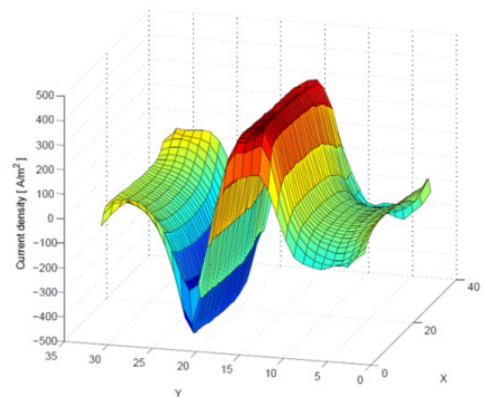
Fig. 7. Two dimensional images of local magnetic field distribution of YBCO at $H=300$ Oe and $T=81$ K.



(a) 1-bridge type



(b) 2-bridge type



(c) 3-bridge type

Fig. 8. Two dimensional images of local current density of YBCO at $H=300$ Oe and $T=81$ K.

본 연구에서는 단일 브릿지, 평행한 브릿지 두 개의 시료와 평행한 브릿지 세 개의 시료의 2차원적인 전류 밀도 분포를 분석하였다. 그 결과 Fig. 8에서 볼 수 있는 바와 같이 단일 브릿지에서는 브리지 양 끝부분에서 차폐전류 흐르는 것을 분석 할 수 있었다. 평행한 브릿지 두 개의 시료에서는 각 각의 브릿지 바깥쪽에서 전류의 방향이 반대로 차폐전류가 흐르며 각 브릿지의 안 쪽 부분에서는 전류 밀도 분포가 작음을 확인 할 수 있었다. 그리고 브릿지 세 개의 시료에서는 양 쪽의 브릿지의 바깥부분으로 차폐 전류가 흘렀고, 사이에 있는 브릿지의 전류밀도 분포는 바깥 두 개의 브릿지의 전류 밀도 분포보다 작음을 분석 할 수 있었다.

IV. 요약

본 연구를 통해서 초전도 선재 시료의 국소적인 영역에 대한 전류 밀도의 공간적인 분포를 시료의 손상 없는 비파괴적인 방법으로 LTSHPM을 통해서 1차원 2차원으로 형상화해 보았다. 그 결과 외부자기장에 의한 차폐전류의 흐름을 분석할 수 있었다. 또한 MPMS에서 외부자기장에 따른 자기모멘트를 측정 한 결과와 LTSHPM을 통해 전류 밀도 분포를 분석한 결과를 비교해 볼 때 외부자기장에 의한 반자성의 크기와 자기모멘트로 인해 생기는 차폐전류가 100 Oe에서 최댓값을 가지는 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 그리고 세 가지의 평행한 브릿지에 흐르는 차폐전류를 2차원적으로

분석해 본 결과 시료 전체적으로 가장 바깥쪽으로 차폐전류가 흐르는 공통점을 확인해 볼 수 있었다.

Acknowledgments

본 연구는 에너지 및 나노물리특성화 사업단의 BK21사업의 지원에 의하여 연구가 이루어졌음을 밝히며 그 지원에 감사드린다.

References

- [1] C. P. Bean. Phys. Rev. Lett **8**, 250 (1962).
- [2] C. P. Bean. Rev. Mod. Phys. **36**, 31 (1964).
- [3] E. Zeldov, J. R. Clem, M. McElfresh and M. J. Darwin, Phys. Rev. B **49**, 9802 (1994)
- [4] J. McDonald and J. R. Clem, Phys. Rev. B **53**, 8643 (1996).
- [5] E. H. Brandt and M. V. Indenbom, Phys. Rev B **48**, 12893 (1993).
- [6] M. K Wu, JR. Ashburn, C. J. Torng, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, V. Q. Wang and C. W. Chu, Phys. Rev. Lett., **58**, 908 (1987).
- [7] T. H. Johansen, M. Baziljevich, H. Bratsberg, and Y. Galperin, Phys. Rev B **54**, 22 (1996).
- [8] K. Koyanagi, T. Kiss, M. Inoue, T. Nakamura, K. Imamura, M. Takeo, Y. Shiohara. Physica C **445-448** 677-681 (2006).
- [9] Bradley J. Roth, Nestor G. Sepulveda, and John p. Wikswo, Jr, J. Appl. Phys. **65** 361-372 (1989).