

15. テラヘルツ電磁波放射イメージングによる 超伝導薄膜ストリップラインへの磁束侵入の観測

大阪大学超伝導フォトンクス研究センター

科技団さきがけ研究 21

斗内政吉

tonouchi@rcsuper.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導体材料における電流分布の観測・評価は、その基本物性の解明ならびに応用展開において極めて重要な研究分野である。超伝導電流の観測はこれまでに多くの手法が提案・利用されてきており、空間分解能や感度など急速に進展してきた。その中で MO イメージングはその手法もほぼ確立し[1-3]、多くの観測例とそれを用いた詳細な研究が進められている。この手法は基本的には非破壊観測であるが、高分解能化には、EuSe 薄膜の直接成長なども要求され、万能ではない。また、最近では、走査型 SQUID 顕微鏡による磁束量子の観測や、電流分布観測も急速に展開されている[4,5]。これは、極めて高感度であるが、それゆえ、大電流が流れるような状況では利用が困難である。また両者ともに、磁界の観測をおこなうものであり、試料端では、その複雑な磁界分布を考慮する必要もある。電子ビーム・レーザーなどを用いた超伝導電流の高分解能観測なども研究されているが[6-9]、常伝導転移を用いた破壊観測であるため、磁束の振る舞いを観測する目的には適していない。

我々は、これまでに、フェムト秒レーザーを高温超伝導体に照射することで、常伝導転移を伴わない超伝導電流の高速変調によりテラヘルツ電磁波が放射される現象を発見し、その現象を応用することで、超伝導電流が可視化できることを報告していた[10-13]。本報告では、そのオリジナルな手法を、ボルテックスの超伝導薄膜中への侵入の評価に応用するための基本的なシステムの性能評価と観測例を紹介する。

2. フェムト秒レーザーを用いたテラヘルツ電磁波 放射イメージングシステム

図 1 にシステム構成例を示す。パルス幅約 50fs のパルスにより超伝導電流を変調することでテラヘルツ電磁波を外部に放射させ、その電磁パルス低温成長 GaAs 光スイッチによりロックイン検出することで放射振幅を測定する。このとき、LT-GaAs への光到達時間に時間遅延を与えることで、振幅の時間波形を得る。その例を図 2 に示す。検出アンテナとしてボータイ型を用いることで、ダイポール型に比べて約 10 倍の感度を得ることができる。この放射において、時間軸を 6.3ps に固定し、試料を移動することで得られる、2次元イメージの例を図 3 に示す。試料としては、厚さ 100nm の YBCO 薄膜から幅 100 μm 、長さ約 200 μm のブリッジを作製したものをを用い、200mA の電流を印加している。この例

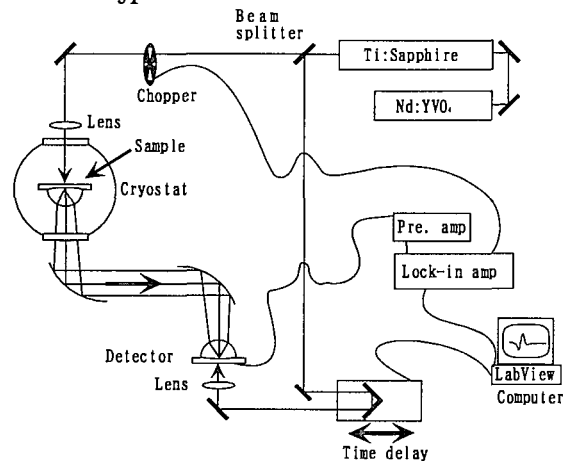


図 1 THz 電磁波放射イメージングシステム

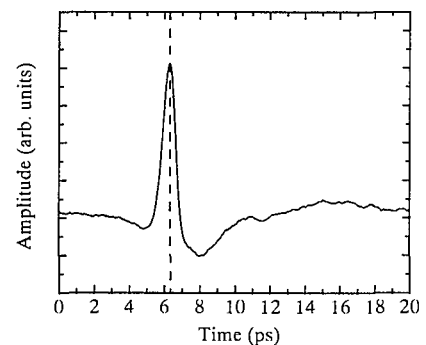


図 2 電磁波振幅波形

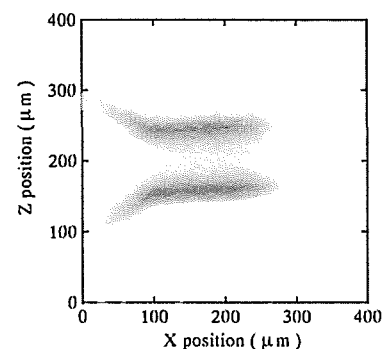


図 3 THz 波放射イメージング像の例

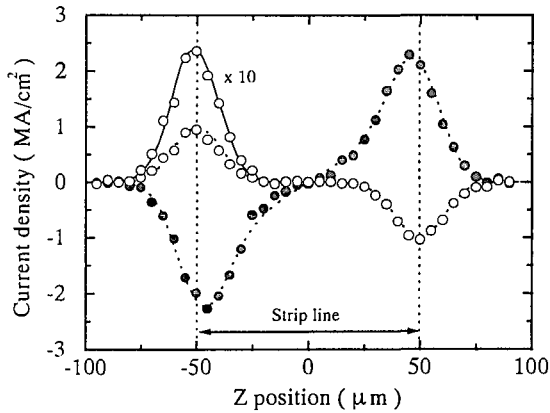


図4 磁場下および残留磁化状態における電流分布

では、感度を更に10倍大きくするため、試料の背面に、直径3mmのMgOレンズを取付けている。ブリッジのエッジに電流が集中して流れていることがわかる。

3. 定量評価と光励起効果[14]

図3に示す結果から得られるのは、電流分布の定性的評価のみである。これを定量的評価に拡張するため、外部バイアス電流と電磁波振幅ならびに分布の関係から検量線を作成し、振幅を電流密度に換算する手法をとる。先の試料に、零磁場冷却の後に、0.9mTの磁場を印加したときの電流密度分布（z方向の断面分布）を図4に示す。磁場中並びに残留磁化状態の分布が検出されている。この結果からビオサバールの法則を用いて、磁場分布に変化した結果を図5に示す。中心には磁界は侵入せず、印加前後で極性が反転している。0.9mT印加時において、ストリップライン遠方での磁場が約1mTと見積もられていることから、電磁波振幅の電流密度分布への変換が定量的に正しいことを示している。

観測に用いたレーザービームプロファイルの断面図を、図4に併せて示している。このプロファイルは、ほぼ正確に、残留磁化状態での電流分布に一致し、このことから、電流分布が、ストリップライン端の非常に小さな幅(0.5μm以下)を流れていることが判る。即ち、このイメージングシステムの分解能は、レーザービーム径で決まり、観測される分布は、レーザービームプロファイルと真の分布とのコンボリューションとなっている。図4に示すフィッティングカーブは、観測プロファイルと、図6に示す予想される関数とのコンボリューションであり、単純な構造・条件では、デコンボリューションにより、1μm以下の分解能が実現可能であることを示している。

本システムでは、レーザー励起を用いているため、ボルテックス分布が影響を受けている可能性がある。図7にイメージングで得られる最大振幅と電力の関係を示す。電流バイアス時に放射される電磁波の振幅は、"◆"で示すように、レーザーパワーと比例関係にある。ところが、残留磁化状態では、電力の小さな状態では、比例関係にあるが、大きくなるに従って、比例関係から逸脱している。また、1度目(黒塗りマーク)と2度目(白抜きマーク)の観測でその振幅も減少する結果がられた。即ち、レーザー照射により、ピン止めされたボルテックスが、光励起により移動することが示されており、ボルテックスの観測条件としては、レーザーパワーは5mW以下が要求されることが判明した。(このときの、格子温度上昇は1K程度と、無視できる条件である。)

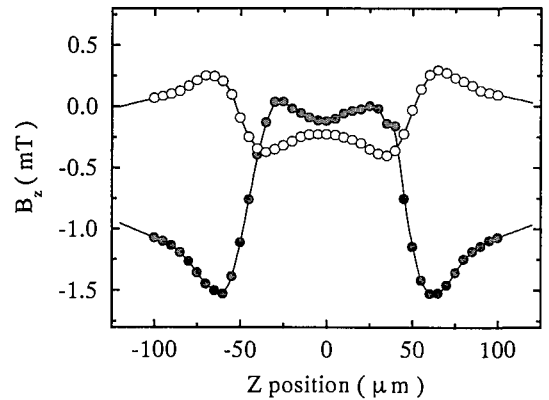


図5 図4に対する磁場分布

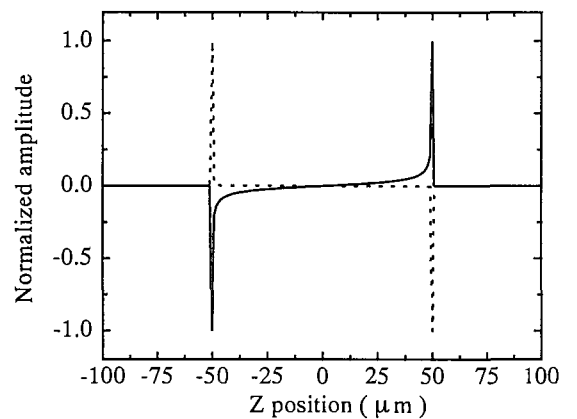


図6 予想される真の電流分布

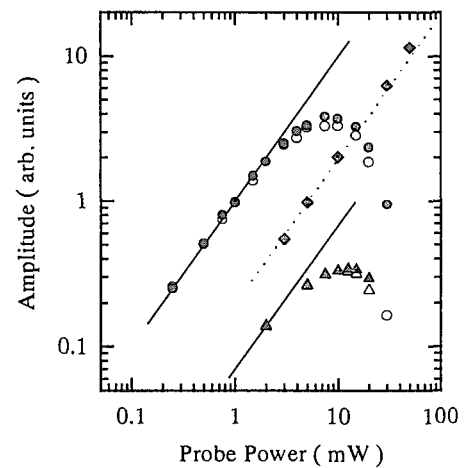
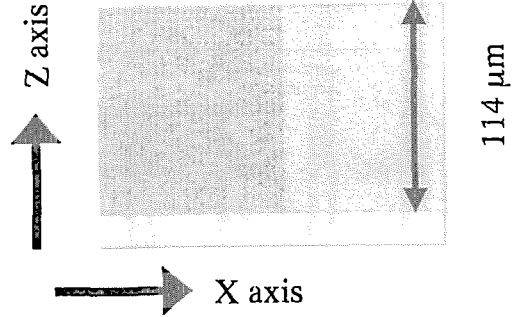


図7 最大振幅のレーザーパワー依存性

4. 様々な状態での磁束侵入観測の例

本システムを用いて様々な状態におけるストリップラインへのボルテックスの侵入を観測し、超伝導薄膜中の電流分布に対する理論 [15-18] により評価した。図 8 に今回用いた、ストリップラインの顕微鏡写真を示す。幅 $114\mu\text{m}$ のラインの半分領域に直径 $1\sim 2\mu\text{m}$ (試料により加工時のバラツキがある。) のアンチドットアレーを $4\mu\text{m}$ 間隔で形成している。この観測では MgO レンズは用いていない。また総て零磁場冷却下での実験である。



A) 電流印加によるボルテックスの侵入 (17K) [19]

図 8 アンチドット形成領域を持つ YBCO 薄膜ストリップライン

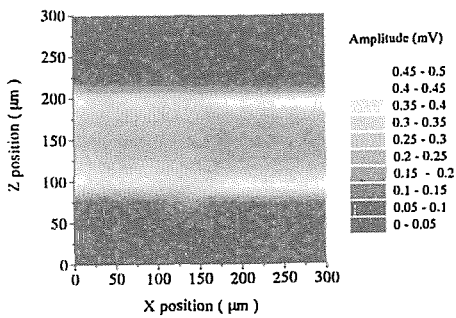


図 9 電流バイアス下の電流分布。

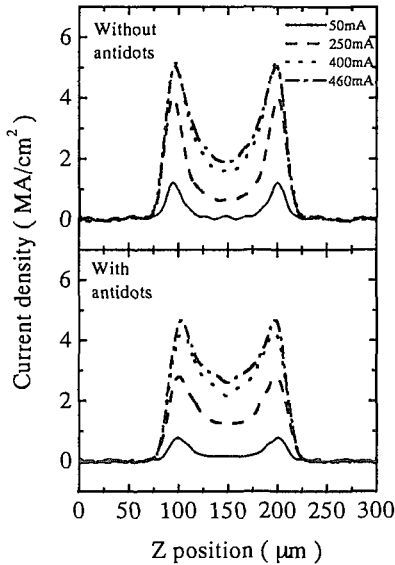


図 10 超伝導電流分布の印加電流依存性

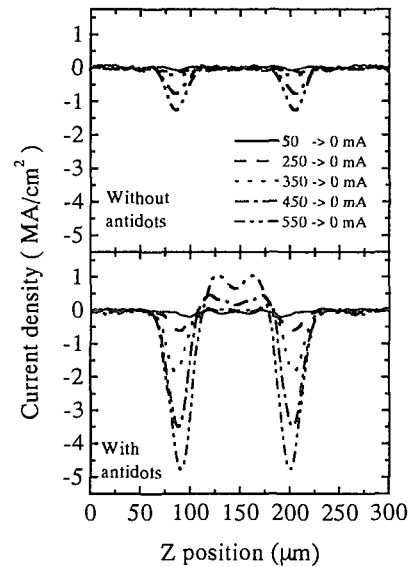


図 11 バイアス電流除去後のトラップ電流

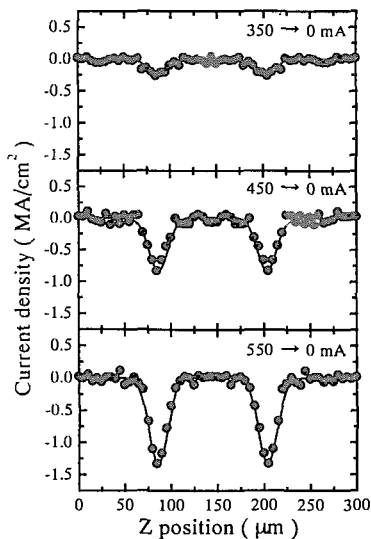


図 12 ストリップライン部におけるトラップ電流の理論との比較。(臨界電流を 7A と仮定した。)

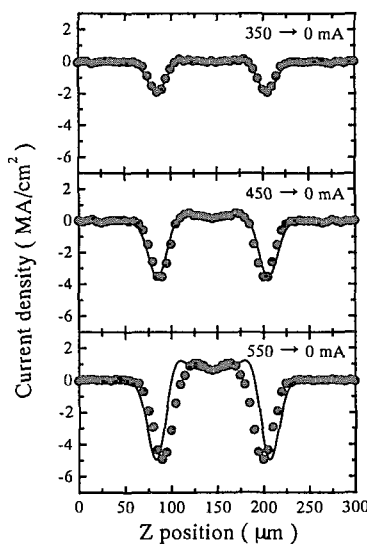


図 13 アンチドット形成部におけるトラップ電流の理論との比較。(臨界電流を 3.5A と仮定した。)

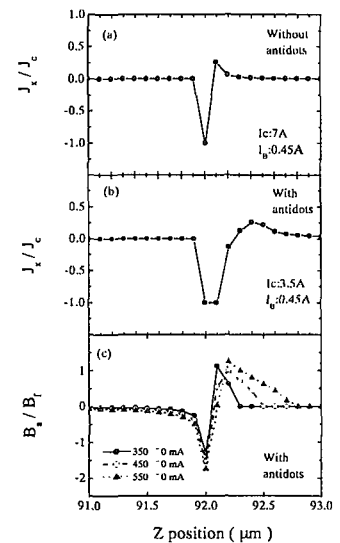


図 14 予想される真の電流分布と磁束侵入の様子。

B) 外部磁界印加時 (17K) [20]

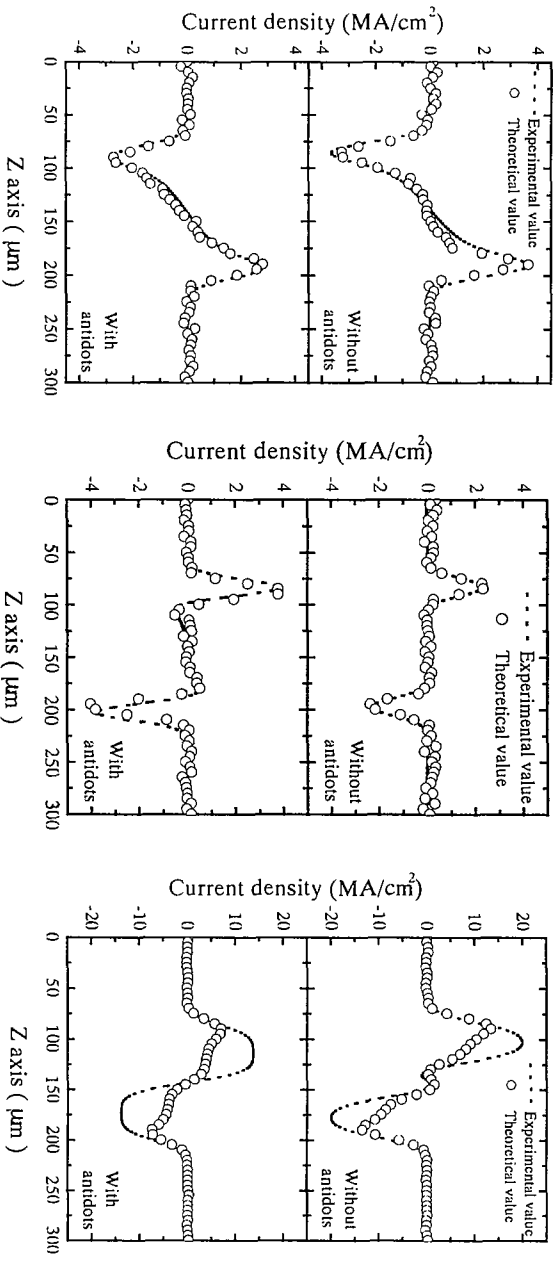


図 15 磁場 0.9mT 下、図 16 残留磁化状態、図 17 25mT 印加後の残留磁化状態の観測結果とフイッティングカーブ。
(外部磁場が大きな場合には、Zeldov 等の単純な理論では説明できない電流分布を持つ。

C) 温度依存性 [21]

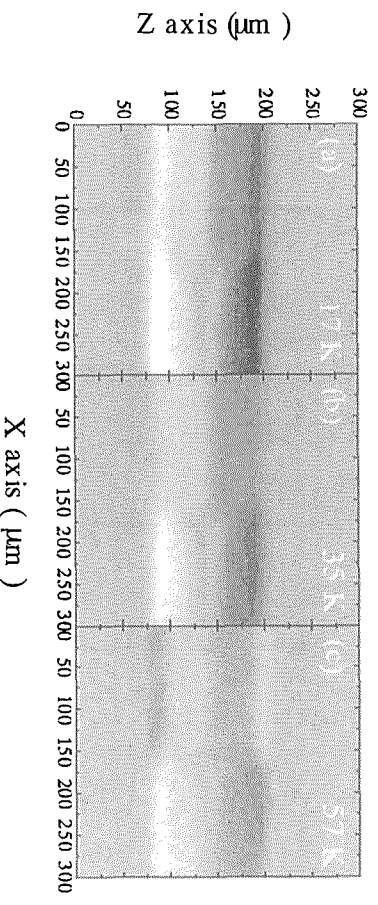


図 18 17K で 15mT 印加した後の残留磁化状態での電流分布。プローブ 2mW。

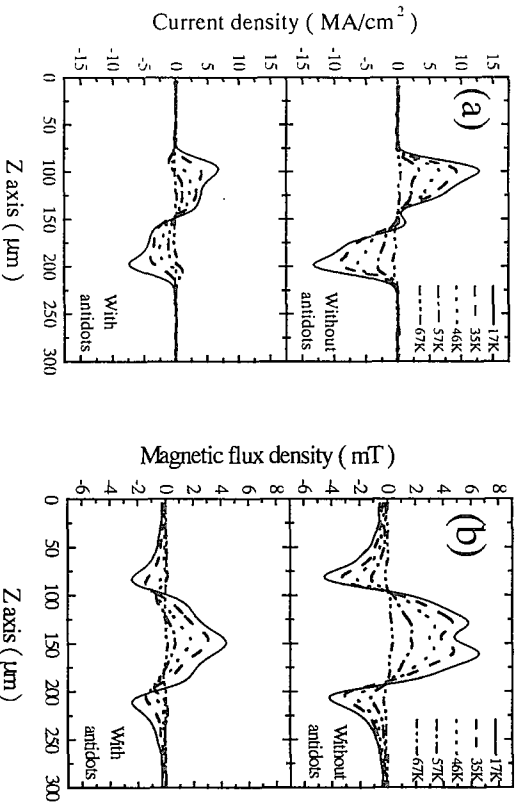


図 19 (a) 各温度での電流分布と (b) 磁場分布。アンチドットの有無で磁場分布が大きく異なる。

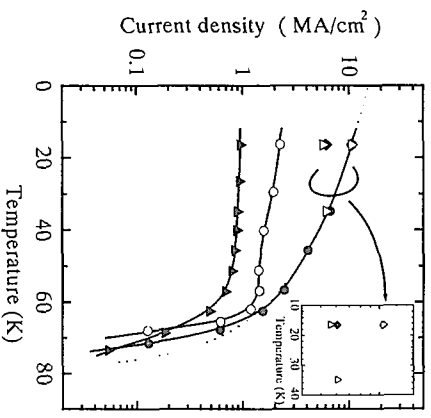


図 20 エッジ部の最大電流密度の温度依存性。▲は 0.9mT 印加後の残留磁化状態。○は 0.9mT 下。●は 25mT 印加後の残留磁化状態。

D) 印加磁場が強い場合に侵入するボルテックス分布の検討[21]

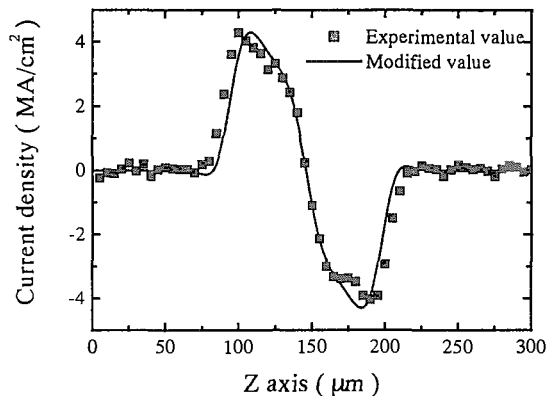


図 21 35Kで観測された電流分布へのフィッティング。内部の磁束が理論式より少ないと仮定した場合に比較的良い一致を得た。逆に多いとした場合には、観測分布は説明されなかった。

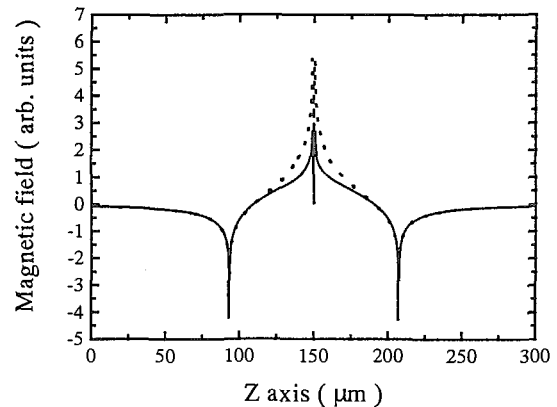


図 22 図 21 の用いた磁束分布 (実線) と Zeldov 等による磁場分布 (点線)。

5. まとめ

フェムト秒レーザー励起による高温超伝導体からのテラヘルツ電磁波放射現象を利用した超伝導電流イメージングシステムにたいして、ボルテックスの超伝導薄膜中への侵入の評価に応用するための基本的なシステムの性能評価を行い、様々な状態でのボルテックス侵入時の超伝導電流分布を観測した。その結果、新たに開発されたテラヘルツ電磁波放射イメージングシステムは磁束観測に有用なシステムであることが示された。

今後の課題として、現在フェムト秒ファイバーレーザーを用いた高感度化（現在の感度は、ビーム中に5~10個程度の磁束量子まで観測できる。）を計るとともに、ビーム整形による高分解能化を試みている。また、高周波電流検出システムも開発中である。

参考文献

- [1] H. -U. Habermeier and H. Kronmüller, *Appl. Phys.* **12**, 297(1977).
- [2] Th. Schuster, M. V. Indenbom, M. R. Koblishchka, H. Kuhn, and H. Kronmüller, *Phys. Rev. B* **49**, 3443 (1994).
- [3] Ch. Joss, R. Warthmann, A. Forkl, and H. Kronmüller, *Physica C* **299**, 215 (1998).
- [4] J. R. Kirtley, M. B. Ketchen, K. G. Stawiasz, J. Z. Sun, W. J. Gallagher, S. H. Blanton, and S. J. Wind, *Appl. Phys. Lett.* **66**, 1138 (1995).
- [5] A. Sugimoto, T. Yamaguchi, and I. Iguchi, *Appl. Phys. Lett.* **77**(19), Nov.1(2000).
- [6] Y. J. Feng, Q. H. Cheng, P.H. Wu, and H. M. Liu, *J. Appl. Phys.* **72**, 5350 (1992).
- [7] C. Díaz-Guerra and J. Piqueras, *Appl. Phys.* **71**, 2830 (1997).
- [8] P. M. Shadrin and Y. Y. Divin, *Physica C* **297**, 69(1998).
- [9] J. C. Culbertson, H. S. Newman, C. Wilker, *J. Appl. Phys.* **84**, 2768 (1998).
- [10] M. Hangyo, S. Tomozawa, Y. Murakami, M. Tonouchi, M. Tani, Z. Wang, K. Sakai, and S. Nakashima, *Appl. Phys. Lett.* **69**, 1948 (1996).
- [11] M. Tonouchi, M. Tani, Z. Wang, K. Sakai, S. Tomozawa, S., M. Hangyo, Y. Murakami, and S. Nakashima, *Jpn. J. Appl. Phys.* **35**, 2624 (1996).
- [12] S. Shikii, T. Kondo, M. Yamashita, M. Tonouchi, and M. Hangyo, *Appl. Phys. Lett.* **74**, 1317 (1999).
- [13] O. Morikawa, M. Yamashita, H. Saijo, M. Morimoto, M. Tonouchi, and M. Hangyo, *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 1317(1999).
- [14] M. Tonouchi, M. Yamashita, and M. Hangyo, *J. Appl. Phys.*, **87**, 7366(2000).
- [15] E. H. Brandt, *Phys. Rev. B* **46**, 8628 (1992).
- [16] E. H. Brandt and M. Indenbom, *Phys. Rev. B* **48**, 12893 (1993).
- [17] E. Zeldov, J. R. Clem, M. McElfresh, and M. Darwin, *Phys. Rev. B* **49**, 9802 (1994).
- [18] E. H. Brandt, *Phys. Rev. B* **52**, 15442 (1995).
- [19] M. Tonouchi, A. Moto, M. Yamashita, and M. Hangyo, submitted to *IEEE Tran. Appl. Supercond.*
- [20] A. Moto, M. Hangyo, and M. Tonouchi, to be published in *IEICE* (2001).
- [21] A. Moto, H. Murakami, and M. Tonouchi, to be published in *Physica C*