

「極限環境状態における現象」  
平成 8 年度採択研究代表者

山下 努

(東北大学未来科学技術共同研究センター 教授)

## 「銅酸化物超伝導体単結晶を用いる超高速集積デバイス」

### 1. 研究実施の概要

高品位の高温超伝導体単結晶の微細加工技術を確立して、 $1\ \mu\text{m}^2$ 以下の微少なデバイスを作製することに成功した。この結果、サブミクロンの素子で単一超伝導電子トンネル効果が起きたことを発見すると共に、固有ジョセフソン効果における量子サイズ干渉効果を初めて観測した。

### 2. 研究実施内容

#### グループ A

微少単結晶接合を作成し、その特性を測定した。その結果、結晶中を運動する磁束量子の速度が光速の 1 % という速いものであることを確認し、THz 波帯周波数が発生することが予測できた。また固有ジョセフソン接合のフラウンホーハーパターンの観測に成功した

#### グループ B

銅酸化物超伝導体単結晶を用いた超高速集積デバイスを実現するため、本研究では、デバイス特性等の評価やデバイス作製に利用するための La214 系および Bi2212 系酸化物超伝導体単結晶を育成するとともに新規単結晶育成技術を開発し電子デバイス用高品質超伝導体単結晶を育成した。

#### グループ C

$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$  (BSCCO) 単結晶を用いて、その固有ジョセフソン接合積層系におけるジョセフソン・ボルテックス・ダイナミクスおよび高周波特性を明らかにすると共に、GHz ~ THz 帯超高速周波 (発振、伝送、検出等) デバイスの開発を目指した。

矩形および円筒形接合におけるボルテックスフローの速度は、4.2K では  $(1-5) \times 10^6\text{m/s}$  と見積もられ、同接合における電磁波の最高位相速度にほぼ対応することを明らかにした。

#### グループ D

異方性の大きな高温層状超伝導体単結晶が示す固有ジョセフソン効果を理解するため、報告者は主に理論及び数値シミュレーション手法を用いた研究を行なっ

た。その結果、特筆すべき成果として次の成果を上げることができたと考えている。

c軸に平行な輸送電流下でのジョセフソン磁束のダイナミクスを系統的に調べ、プラズマの超放射状態の安定な出現を予測し、かつ、その出現領域が固有ジョセフソン接合において広く現れることを指摘した。

## 2 - 1 . 類似研究の国内外の研究動向・状況と本研究課題の位置づけ

東大物性研、筑波大学ではジョセフソンプラズマの研究を、又、ドイツ・エアランゲン大学では我々と同じく、THz帯発振をめざす研究を行っている。

## 2 - 2 . 今後の研究の予定、研究成果の見通し

- 1 ) 磁束量子運動を用いる極小サイズ、省電力の単結晶素子でTHz帯の周波数動作とps以下のスイッチングの実現を目指す
- 2 ) 積層単結晶構造を用いる単電子トンネル素子は、サブミクロンの大きさで電子1個を出し入れするメモリー素子となりうる
- 3 ) 極小消費電力単電子トンネルトランジスターの実現を目指す
- 4 ) 省電力THz帯動作のスイッチ素子と単電子メモリー及びトランジスターの実現により、大規模情報ネットワークに対応する高速コンピュータと新しい量子コンピューティングに必要とされるデバイスを供給する

## 3 . 主な研究成果の発表 ( 論文発表 )

"Experimental evidence for Coulomb charging effects in submicron Bi-2212 stacks" Yu. I. Latyshev, S. - J. Kim and T. Yamashita JETP Letters, Vol. 69, No. 1, pp.84-90, January 1999

"Submicron stacked-junction fabrication from  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+}$  whiskers by focused-ion-beam etching" S. - J. Kim, Yu. I. Latyshev and T. Yamashita Appl. Phys. Lett, Vol.74, No.8, pp.1156-1158, Feb. 1999

"Intrinsic Josephson Effects and Vortex Dynamic Properties in Layered High-Temperature Superconductors" Gin-ichiro Oya and Akinobu Irie Recent research Developments in Applied Physics, Vol. 2, pp.429-452, March 1999

"Intrinsic Josephson junctions in oxygen-deficient  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ - film deposited on a substrate step" H. B. Wang, J. Chen, T. Tachiki, Y. Mizugaki, K. Nakajima and T. Yamashita J. Appl. Phys., Vol.85, No.7, pp.3740-3744, April 1999

"Intrinsic Josephson Junction Array with Typical Tunneling Characteristics in Oxygen-deficient  $\text{YBaCuO}$  Thin Films" H. B. Wang, J. Chen, K. Nakajima and T. Yamashita IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 9, No. 2, pp.3008-3011, June 1999

"YBCO SQUIDS Fabricated by Field-Emission Electron Beam Source" S. - J. Kim, J.

Chen, Y. Mizugaki, K. Nakajima and T. Yamashita IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 9, No. 2, pp.3089-3092, June 1999

"Focused Electron Beam Damaged YBCO Josephson Junctions for THz Device Applications" S. - J. Kim and T. Yamashita IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 9, No. 2, pp.4221-4224, June 1999

"Fabrication of Submicron BSCCO Stacked Junctions by Focused Ion Beam(FIB)" Yu. I. Latyshev, S. - J. Kim and T. Yamashita IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 9, No. 2, pp.4312-4315, June 1999

"Fabrication of Josephson Junctions on La-Sr-Cu-O Single Crystals" Y. Uematsu, H. Myoren, K. Nakajima, T. Yamashita, I. Tanaka and H. Kojima IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 9, No. 2, pp.4296-4299, June 1999

"Microwave-induced Current Steps in Intrinsic Josephson Junctions Patterned on  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$  Single Crystal" H. B. Wang, Y. Aruga, T. Tachiki, Y. Mizugaki, K. Nakajima, T. Yamashita and P. H. Wu Appl. Phys. Lett, Vol.74, No.24, pp.3693-3695, June 1999

"Submicron scale High-Tc superconducting stacks for single Cooper-pair tunneling" S. - J. Kim, Yu. I. Latyshev, T. Yamashita, N. Sato and S. Kishida Physica B, June 1999

"Interlayer Transport of Quasiparticles and Cooper Pairs in  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$  Superconductors" Yu. I. Latyshev, T. Yamashita, L. N. Bulaevskii, M. J. Graf, A. V. Balatsky and M. P. Maley Physical Review Letters, Volume 82, Number 26, 28 June 1999

"Three-Dimensional Intrinsic Josephson Junctions Using C-Axis  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$  Thin Film" S. - J. Kim and T. Yamashita Jpn. J. Appl. Phys., Vol.38, No.11, pp.5069-5070, 1999, Sep. 1999

"Single Cooper-pair tunneling junctions using high-Tc superconducting materials" S. - J. Kim, Yu. I. Latyshev and T. Yamashita IEEE Transactions on Magnetics, vol. 35, No. 5, pp.4094-pp.4096, Sep. 1999

"Harmonic frequency mixing in  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$  intrinsic Josephson junctions" H. B. Wang, Y. Aruga, T. Tachiki, Y. Mizugaki, J. Chen, K. Nakajima, T. Yamashita and P. H. Wu Appl. Phys. Lett. Vol.75, No.15, pp.2310-2312, Oct. 1999

"3D intrinsic Josephson junctions using c-axis thin films and single crystals" S. - J. Kim, Yu. I. Latyshev and T. Yamashita Superconductor Science and Technology, pp. 729-731, 1999

"RF responses of double-junction SQUID models" Yoshinao Mizugaki, J. Chen, Kensuke Nakajima and Tsutomu Yamashita Superconductor Science and Technology,

pp. 992-994, 1999

"Flux-flow resonant current steps in intrinsic Josephson junctions on  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$  single crystal" H. B. Wang, T. Tachiki, Y. Aruga, Y. Mizugaki, J. Chen, K. Nakajima, T. Yamashita and P. H. Wu *Superconductor Science and Technology*, pp.1004-1006, 1999

"Magnetically-Enhanced Terahertz Response of Josephson Junctions" Yoshinao Mizugaki, J. Chen, Kensuke Nakajima and Tsutomu Yamashita *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 1999

"Wide Band HTS Josephson Junction Detectors" Jian Chen, Kensuke Nakajima and Tsutomu Yamashita *Singapore Journal of Physics*, Vol. 15, No. 1, pp.67-75, December, 1999

"Fluxon and Single Electron Devices Based on Intrinsic Josephson Effect" Tsutomu Yamashita, Sang-Jae Kim, Yuri Latyshev and Kensuke Nakajima *Singapore Journal of Physics*, Vol. 15, No. 1, pp.77-85, December, 1999

"Growth of  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  Single-Crystalline Films by Liquid Phase Epitaxial Technique" Hideyosi Tanabe, Isao Tanaka, Satoshi Watauchi and Hironao Kojima *Physica C*, Vol.315, 1999

"Josephson Switching Device Utilizing the Quantum Transitions in a Superconducting Quantum interference Device Loop" Yoshinao Mizugaki, Kei Saito, A. I. Braginski and Tsutomu Yamashita *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 39, pp.55-60, Part 1, No. 1, January, 2000

"Two-Junction SQUID Controlled by Both DC and RF Magnetic Flux" Yoshinao Mizugaki, Kei Saito, Tadayuki Kondo, J. Chen, Kensuke Nakajima, A. I. Braginski and Tsutomu Yamashita *Advances in Superconductivity XII - Proceedings of the 12th International Symposium on Superconductivity (ISS'99)*, 2000

"Microwave Responses of BSCCO-2212 Intrinsic Josephson Junctions at Frequencies Up to 100 GHz" H. B. Wang, T. Tachiki, Y. Aruga, Y. Mizugaki, J. Chen, K. Nakajima, T. Yamashita and P. H. Wu *Advances in Superconductivity*, March 2000

"Single-electron tunnelling devices based on intrinsic Josephson junctions in Bi-2212" T. Yamashita, S. Kim and Y. Latyshev *Superconductor Science and Technology*, pp.99-102, March 2000