

平成 30 年 8 月 31 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2017

課題番号：26600142

研究課題名(和文)積層薄膜構造導入による超伝導加速管性能の飛躍的向上

研究課題名(英文)Dramatic improvement of superconducting accelerating cavity performance by introduction of laminated thin film structure

研究代表者

岩下 芳久(Iwashita, Yoshihisa)

京都大学・化学研究所・准教授

研究者番号：00144387

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：超伝導加速空洞の性能を飛躍的に向上させる可能性のある超伝導薄膜構造の研究を進めた。極低温下での超伝導薄膜の特性を交流磁場印加時の3次高調波発生を測定することによって評価するシステムの整備が完了し、世界で初めて超伝導薄膜構造でNbの限界を超える測定データを得ることに成功した。高純度バルクニオブ板に薄いSiO₂絶縁層を挟んでNbN超伝導薄膜を載せた体系のサンプルにおいて、Nbの下部臨界磁場を超える磁場に耐える世界初の測定結果を得た。この測定により、今後の薄膜製作に於ける指針の策定が可能になり、超伝導加速空洞の性能向上に向けて一層の拍車を掛けることが可能になった。

研究成果の概要(英文)：The superconducting laminated thin film structure may dramatically improve the performance of superconducting acceleration cavities. In order to study the laminated thin film structure, characteristics of the superconducting thin film structure under cryogenic temperature were investigated. They were evaluated by measuring third harmonic distortions (THD) on induced voltages of an excitation coil of a magnetic field applied to the sample. We have developed the THD measurement system. In the sample of the system with NbN superconducting thin film coated on a high purity bulk niobium plate with a thin SiO₂ insulation layer in between, we obtained the world's first measurement result withstanding the magnetic field exceeding the lower critical field of Nb. By this measurement, it becomes possible to formulate guidelines for future thin film fabrication, and it has become possible to accelerate further efforts to improve the performance of the superconducting acceleration cavity.

研究分野：ビーム物理

キーワード：超伝導 薄膜 高周波 積層薄膜 超伝導加速管 超伝導空洞

1. 研究開始当初の背景

超伝導加速空洞は現在殆どがバルクのニオブ製である。ニオブは比較的加工性が高く空洞の製作に適していることに加え、下部臨界磁場 H_{c1} が大きく、磁束侵入によるエネルギー散逸を伴うことなく高い加速電場を実現できるためである。しかし、ニオブ製超伝導空洞の加速電場向上は限界に達しつつある。これに代わる次世代超伝導空洞開発は緊急の課題である。

2006年、A. Gurevich は、一様高周波磁場中の超伝導薄膜(数 nm~100nm)の H_{c1} がバルクの超伝導体よりも大きくなることに注目し、超伝導薄膜と絶縁層を交互に積層することで空洞壁のニオブを空洞内の大きな高周波磁場から遮蔽・保護することを提案した。これにより、大幅な加速電場の向上が期待される。臨界温度の高い超伝導薄膜を用いれば、表面抵抗の低減も可能である。この提案以降、各国は実証実験に乗り出したが、確かな成功例はなかった。

常伝導に於ける積層薄膜構造導入の経験から、申請者達は実証実験に成功していない理由が理論的理解の不足にあると考えた。そこで最も簡単な場合としてニオブ上に絶縁層と超伝導層が1枚ずつ積層されている系を取り上げ、電磁場分布と磁束侵入開始磁場の自己無撞着な解析により各層の最適な厚みの評価方法を明らかにした。これにより、これまでの手探りの実験に対し明確な理論的指針を与えた。日本は、これまで超伝導積層薄膜構造の研究に関し、世界から大きく遅れている。申請者達は理論的研究により得た優位性を足掛かりに、日本における超伝導積層薄膜技術による次世代超伝導加速空洞の実証実験の推進を行った。

2. 研究の目的

バルクのニオブ材による超伝導空洞の加速電場は限界に達しつつあり、加速管の飛躍的性能向上のために、ブレークスルーに至る研究開発が必要である。

超伝導積層薄膜構造の導入により、加速電場の大幅な向上と表面抵抗の低減を目論む。最近、申請者達はニオブ上の積層薄膜構造の自己無撞着な電磁場解析を行い、世界で初めて各層の最適な厚みの評価方法を明らかにした。本研究では、各層の厚みを変えた試料の磁束侵入開始磁場を測定することで理論を検証するとともに、最適膜厚に基づくピンポイントの実験により、磁束侵入開始磁場を大幅に向上させる。これにより、超伝導積層薄膜の技術を空洞に応用する基礎を確立する。

3. 研究の方法

まず、超伝導積層薄膜構造を有する試料作成の準備をする。並行して、第3高調波誘導法を用いた磁束侵入開始磁場の測定技術の習得、及び測定装置の設計のためコイル形状の最適化を進める。また、実験データとの精密な比

較を目指しつつ、理論的研究も継続して推進する。並行して様々な超伝導層及び絶縁層の厚みの組み合わせを持った試料の作成を行う。これらの試料の磁束侵入開始磁場を測定し、比較することで新理論が示す膜厚依存性を実証する。この結果を受けて、新理論の予言する最適値に基づいた試料で実験を行い、磁束侵入開始磁場の大幅向上の可能性を検証する。

4. 研究成果

超伝導加速空洞の性能を飛躍的に向上させる可能性のある超伝導薄膜構造の研究を進めた。極低温下での超伝導薄膜の特性を交流磁場印加時の3次高調波発生を測定することによって評価する測定系の構築を完成させ、はじめて、NbN 超伝導薄膜構造で Nb の限界を超える測定データを得ることに成功した。具体的には、高純度バルクニオブ板に薄い SiO_2 絶縁層を挟んで NbN 超伝導薄膜を載せた体系のサンプルにおいて、Nb の下部臨界磁場を超える磁場に耐える世界初の測定結果を得た。この測定により、今後の薄膜製作に於ける指針の策定が可能になり、超伝導加速空洞の性能向上に向けて一層の拍車を掛けることが可能になった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計12件)

R. Katayama, Y. Iwashita, H. Tongu, A. Four, C. Z. Antoine, H. Hayano, T. Kubo, T. Saeki, Hayato Ito, R. Ito, T. Nagata, H. Oikawa, EVALUATION OF SUPERCONDUCTING CHARACTERISTICS ON THE THIN-FILM STRUCTURE BY NbN AND INSULATOR COATINGS ON PURE Nb SUBSTRATE, Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference, 査読無、2018、<http://ipac2018.vrws.de/papers/thpal015.pdf>

C. Z. Antoine, M. Aburas, H Hayano, S Kato, T. Kubo, T. Saeki, Y. Iwashita, Progress on Characterization and Optimization of Multilayers, Proceedings of the 18th International Conference on RF Superconductivity, 査読無、2018、368-373、<https://doi.org/10.18429/JACoW-SRF2017-TUYBA01>

Y. Iwashita, R. Katayama, H. Tongu, H. Hayano, T. Kubo, T. Saeki, M. Hino, H. Oikawa, R&D OF THIN FILM COATING ON SUPERCONDUCTORS, Proceedings of the 18th International Conference on RF Superconductivity, 査読無、2018、877-890、

<http://vrws.de/srf2017/papers/thpb058.pdf>
片山 領, 岩下 芳久, 頼宮 拓, 及川 大基, 加藤 茂樹, 久保 毅幸, 佐伯 学行, 早野 仁司, 日野 正裕、三次高調波電圧誘導法による多層膜コーティング超伝導薄膜の評価、Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan、査読無、2017、27-29、http://www-linac.kek.jp/mirror/www.pasj.jp/web_publication/pasj2017/proceedings/PDF/TUOL/TUOL04.pdf
Y. Iwashita, Y. Fuwa, H. Tongu, H. Hayano, T. Kubo, T. Saeki, M. Hino, H. Oikawa、Measurement of Thin Film Coating on Superconductors、Proceedings of the 8th International Particle Accelerator Conference、査読無、2017、1043-1045、<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2017/papers/mopva076.pdf>
Takayuki Kubo、Multilayer coating for higher accelerating fields in superconducting radiofrequency cavities: a review of theoretical aspects、Superconductor Science and Technology、査読有、30 巻、2017、230001
<https://doi.org/10.1088/1361-6668/30/2/023001>
Takayuki Kubo、Flux trapping in superconducting accelerating cavities during cooling down with a spatial temperature gradient、Progress of Theoretical and Experimental Physics、査読有、2016 巻、2016、053G01、<https://doi.org/10.1093/ptep/ptw049>
Shichun Huang, Takayuki Kubo, and R. L. Geng、Dependence of trapped-flux-induced surface resistance of a large-grain Nb superconducting radio-frequency cavity on spatial temperature gradient during cooldown through T_c、Physical Review Accelerators and Beams、査読有、19 巻、2016、82001
<https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.19.082001>
T. Saeki, H. Hayano, T. Kubo, Y. Iwashita, H. Oikawa、Construction of Measurement System for Superconducting Characteristics on Thin-film Samples at KEK、Proceedings of IPAC2016、査読無、2016、2167-2169、<http://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2016-WEPMB021>
及川 大基, 東口 武史, 岩下 芳久, 日

野 正裕, 久保 毅幸, 加藤 茂樹, 佐伯 学行, 早野 仁司、薄膜超伝導体の高周波臨界磁場評価のためのニオブ製 マッシュルーム型空洞の設計研究、Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan、査読無、2016、372-376、http://www-linac.kek.jp/mirror/www.pasj.jp/web_publication/pasj2016/proceedings/PDF/MOP0/MOP021.pdf
岩下 芳久, 頼宮 拓, 不破 康裕, 早野 仁司, 佐伯 学行, 久保 毅幸、超伝導薄膜の特性測定、Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan、査読無、2016、851-852、http://www-linac.kek.jp/mirror/www.pasj.jp/web_publication/pasj2016/proceedings/PDF/TUP0/TUP014.pdf
Y. Iwashita, Y. Fuwa, M. Hino, T. Kubo, T. Saeki、EVALUATION OF SC PROPERTY COATED ON A SURFACE、Proceedings of the 17th International Conference on RF Superconductivity (SRF2015)、査読無、2016、723-725、<http://srf2015proc.triumf.ca/prepress/papers/tupb062.pdf>

[学会発表](計 13 件)

R. Katayama, Y. Iwashita, H. Tongu A. Four, C. Z. Antoine, H. Hayano, T. Kubo, T. Saeki, Hayato Ito, R. Ito, T. Nagata, H. Oikawa、EVALUATION OF SUPERCONDUCTING CHARACTERISTICS ON THE THIN-FILM STRUCTURE BY NbN AND INSULATOR COATINGS ON PURE Nb SUBSTRATE、9th International Particle Accelerator Conference(IPAC18)、2018 年
片山 領, 岩下 芳久, 頼宮 拓, 及川 大基, 加藤 茂樹, 久保 毅幸, 佐伯 学行, 早野 仁司, 日野 正裕、三次高調波電圧誘導法による多層膜コーティング超伝導薄膜の評価、第 14 回日本加速器学会年会、2017 年
Y. Iwashita, Y. Fuwa, H. Tongu, H. Hayano, T. Kubo, T. Saeki, M. Hino, H. Oikawa、Measurement of Thin Film Coating on Superconductors、8th International Particle Accelerator Conference(IPAC17)、2017 年
C. Z. Antoine, M. Aburas, H. Hayano, S. Kato, T. Kubo, T. Saeki, Y. Iwashita、Progress on Characterization and Optimization of Multilayers、18th International Conference on RF Superconductivity(SRF2017)、2017 年
Y. Iwashita, R. Katayama, H. Tongu,

H. Hayano, T. Kubo, T. Saeki, M. Hino, H. Oikawa, R&D OF THIN FILM COATING ON SUPERCONDUCTORS, 18th International Conference on RF Superconductivity(SRF2017)、2017年 Takayuki Kubo, The next technologies, GARD-SRF Roadmap Workshop (招待講演) 2017年 Takayuki Kubo, The next SRF technologies, The International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS2016) (招待講演) 2016年 Takayuki Kubo, Reaching higher gradients in bulk Nb with nano-layer coating, TESLA Technology Collaboration (TTC) meeting (招待講演) 2016年 岩下 芳久, 頓宮 拓, 不破 康裕, 早野仁司, 佐伯 学行, 久保 毅幸, 超伝導薄膜の特性測定, 第13回日本加速器学会年会, 2016年 及川 大基, 東口 武史, 岩下 芳久, 日野正裕, 久保 毅幸, 加藤 茂樹, 佐伯 学行, 早野 仁司, 薄膜超伝導体の高周波臨界磁場評価のためのニオブ製マッシュルーム型空洞の設計研究, 第13回日本加速器学会年会, 2016年 T. Saeki, H. Hayano, T. Kubo, Y. Iwashita, H. Oikawa, Construction of Measurement System for Superconducting Characteristics on Thin-film Samples at KEK, The seventh International Particle Accelerator Conference(IPAC '16), 2016年 Takayuki Kubo, Magnetic fields in bulk, film, and multilayer superconductors in front of a multi-turn coil, The seventh International Particle Accelerator Conference(IPAC '16), 2016年 Y. Iwashita, Y. Fuwa, M. Hino, T. Kubo, T. Saeki, EVALUATION OF SC PROPERTY COATED ON A SURFACE, SRF2015, 2015年

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩下 芳久(IWASHITA, Yoshihisa)
京都大学・化学研究所・准教授
研究者番号：00144387

(2) 研究分担者

佐伯 学行(SAEKI, Takayuki)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器
研究機構・加速器研究施設・准教授
研究者番号：70282506

久保 毅幸(KUBO, Takayuki)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器
研究機構・加速器研究施設・助教
研究者番号：30712666
(平成27年度に追加)

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者