

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 EVALUATING THE MULTI-LAYER THIN-FILM SUPERCONDUCTOR USING THE THIRD HARMONIC VOLTAGE METHOD

片山 領^{*A)}、岩下 芳久^{A)}、頓宮 拓^{A)}、及川 大基^{B)}、久保 毅幸^{C)}、
佐伯 学行^{C)}、早野 仁司^{C)}、日野 正裕^{D)}、永田 智啓^{E)}、伊藤 亮平^{E)}

Ryo Katayama^{*A)}, Yoshihisa Iwashita^{A)}, Hiromu Tongu^{A)}, Hiroki Oikawa^{B)}, Takayuki Kubo^{C)},
Takayuki Saeki^{C)}, Hitoshi Hayano^{C)}, Masahiro Hino^{D)}, Tomohiro Nagata^{E)}, Ryouhei Ito^{E)}

^{A)} Kyoto University, ICR, ^{B)} Utsunomiya University, ^{C)} KEK, ^{D)} Kyoto University, ^{E)} ULVAC, inc.

Abstract

In recent years, it is pointed out that the maximum accelerating gradient of the superconducting cavities can be increased more by coating inner surfaces with multilayer-thin film superconductor. In the method, critical magnetic field, H_{c1} , is a principal parameter to achieve the sufficient performance. We therefore constructed a system to measure critical magnetic field of superconductive material using the third harmonic voltage method. In this paper, we will report on the current status of the system and preliminary results.

1. INTRODUCTION

超伝導加速空洞は常伝導のそれよりもはるかに効率的に電磁エネルギーを蓄積できる特徴があるため高電界を容易に実現できるが、空洞内面の表面磁場の強さが臨界磁場を超えない範囲までしか加速電界を上げられない制限が存在する。一般に、超伝導加速空洞の母材にはニオブが用いられており、今現在ニオブ製加速空洞で電界を維持できる典型的な表面磁場の強さは ~ 200 mTとなっている。この加速勾配の制限は避けがたいと思われたが、近年、ロンドン長以下の厚さの超伝導薄膜を積層して母材であるニオブへの到達磁場を大幅に低減する方法により、ニオブ製の超伝導加速空洞の最大表面磁場を現在の 200 mTよりも向上できる可能性が示された [1-3]。仮に本技法により加速勾配向上が実現できれば、次世代電子陽電子加速器実験においてマルチ TeV の物理を狙える可能性があるため、その実現可能性の詳細な検討が望まれる。

超伝導薄膜の積層化による性能向上を指標する最も重要なパラメータの一つに下部臨界磁場がある。我々は、超伝導薄膜の試料の下部臨界磁場を評価できる専用のシステムを京都大学宇治に構築した。試料の評価には、非破壊・非接触で測定が行える実績ある手法である三次高調波電圧誘導法が用いられている [4,5]。絶縁基板上に成膜した超伝導薄膜の試料の温度を変えながらコイルで発生させた交流磁場を照射し、コイルのインダクタンスの非線形成分を測定することにより、下部臨界磁場の温度依存性を決定している。以下では、京都大学宇治に構築した三次高調波測定システムの概略とその preliminary result について報告する。

2. 三次高調波誘導電圧法の測定原理

コイルが発する交流磁場を対向する第二種超伝導体の試料に掛けている状況を考える。この場合、以下の三つのパターンにおいてコイルの自己インダクタンスが固有の値をとる。

- 試料が超伝導状態にあり、下部臨界磁場より小さい磁場が掛けられている場合には、マイスナー効果により磁場は試料中から排斥される。磁場分布はこの状態では電流に比例し、コイル側には電流値の微分に比例した線形の誘導起電力が生じる。
- 試料が臨界温度以上となり、超伝導状態が破れている場合には、磁場は試料を貫く。磁場分布は電流に比例し、コイル側には線形の誘導起電力が生じる。この場合、境界条件の関係上、コイルを通過する磁束の絶対量が増加し、超伝導状態の時よりインダクタンスが大きくなる。
- 試料が超伝導状態にあり、下部臨界磁場より大きな磁場が掛けられている場合には、磁場は周期的に試料に侵入する。これは上記二つの状態の間にあるため、インダクタンスに時間変化が生じ、それがコイル側に非線形の三次高調波電圧の誘導成分となって現れる。

したがって、超伝導薄膜の試料に下部臨界磁場以下の交流磁場を掛け、温度を臨界温度まで徐々に上げるとある温度で三次高調波電圧の立ち上がり観測できる。温度変化に関しては高温側からも同様に三次高調波の落ち下がりが観測できる。この作業を様々な温度に対して網羅的に行うことにより、超伝導薄膜の試料の下部臨界磁場の温度依存性を把握できる。これが本研究で使用した三次高調波誘導電圧法の測定原理となる。

* katayama@kyticr.kuicr.kyoto-u.ac.jp

3. システムの概要

三次高調波測定システムは Cryogenic System と Electric Circuit の二つから構成される。以下ではこの二つの装置の概略について説明する。

3.1 Cryogenic System

Figure 1 に回路とクライオスタット内部の schematic diagram を示す。クライオスタット内部のステージは二つの銅製のプレートとコイルから成る。サンプル板を 2 枚の銅円板で挟む構造になっており、プレートの側面から伸びるタブでクライオスタットの底に溜まった液体ヘリウムによる冷却がなされる仕様である。測定ステージはクライオスタットの上部からステンレスパイプに吊るされた三本の棒に固定されている (Figure 2 左参照)。upper plate にはコイルとセラミックボールが埋め込まれており (Figure 2 右参照)、それは表面から 0.2 mm 突き出された状態にある。一方、bottom plate 表面には超伝導薄膜のサンプルが直置きされている。このようにして、upper plate と bottom plate を重ね合わせた状態でステージとして使用することにより、測定においてコイル磁場が 0.2 mm 離れた試料に正確に照射されることとなる。試料の温度はサンプルの裏面に直付けされたセルノックスセンサーで常時モニターされており、測定値はリアルタイムでデータとしてストレージされている。温度はヒーターへの電力量やステージの上下を調整することによって制御可能である。コイルとプレートはサファイアリングにより電氣的に絶縁されており、銅板にはフラックスのリターンを確保するために溝が彫り込まれている。図示されていないものの、外部熱が測定に影響を与える可能性が排除する目的で、ステージの周囲をアルミカバーで覆い、また、ヒーターとコイル以外の全てのデバイスをサーマルアンカーを通じて配線している。

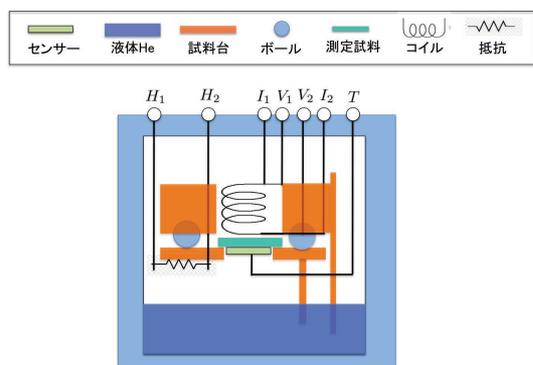


Figure 1: Schematic illustration of inner side of the cryostat.

3.2 Electric Circuit

Figure 3 と Figure 4 に三次高調波測定に実際に使用しているボードの写真とその block diagram を示す。

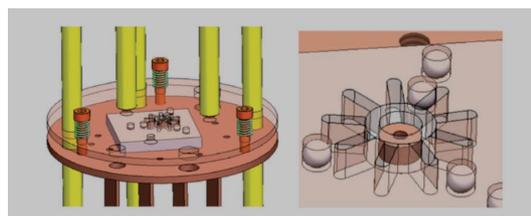


Figure 2: Schematic illustration of the experimental stage. (Left) Overall view of the experimental stage (Right) Enlarged view of the center. The stage hung from the top of the stage, and coil and ceramic balls are embedded in the center.

三次高調波誘導電圧測定系に使用される回路は、信号増幅用アンプ (Power Amp)、コイル、電圧/電流読み出し増幅用アンプ (Instrm Amp and VGA)、電圧/電流読み出し用 HPF、電圧/電流読み出し用 A/D コンバータ (ADC)、FPGA、USB コネクタから構成されている。Figure 4 には明示されていないが、コイルはクライオスタットの内部に格納されている。本回路では、交流電源として、8 次のローパスフィルタを使用したスイッチドキャパシタフィルタ (SCF) にクロックフィードスルー軽減のためさらにローパスフィルタ (LPF) を追加した回路を使用している。具体的には、FPGA が生成する矩形波を SCF と LPF に通すことにより、矩形波の高次の周波数成分を落として正弦波へと変換している。ただし、オペレーション時にコイルが発生する熱を抑えるため、本システムでは duty 10% でコイルに電流を流している。このようにして生成した交流電圧でコイルを励起した磁場を試料へと照射する。コイルに流れる電流と電圧は 4 端子法でモニターされており、電流に関しては 50 mΩ 抵抗の両端に発生した電圧値を、電圧に関しては Butterworth 型の 8 次のハイパスフィルタ (HPF) に通したコイルの誘導電圧を信号として 20-Bit の A/D コンバータで読み出している。A/D コンバータのサンプリングレートは 250 kpsps である。本回路で取得したデータは USB を通じて PC 側に送信される。PC 側でフーリエ変換処理が施され、測定データとして保存される。

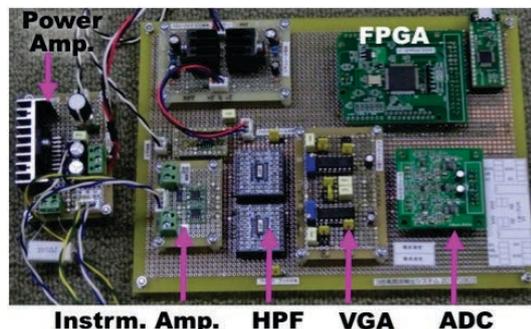


Figure 3: Photograph of the board used in measurement.

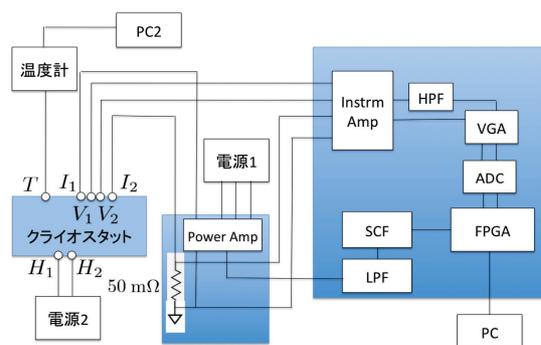


Figure 4: Block diagram of the electric circuit.

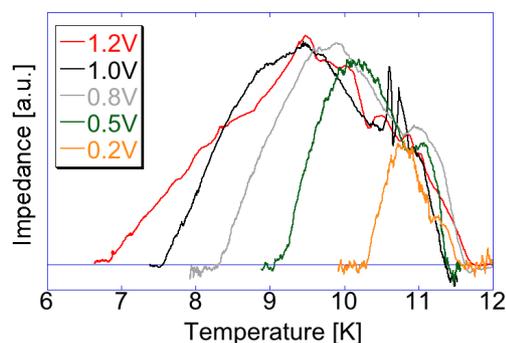


Figure 5: Preliminary result of the third order harmonic measurement.

4. PRELIMINARY RESULT

本システムの試験を現在までに数回実施した。試験では、NbN を酸化膜付きシリコン基板に 100 nm ほどマグネトロンスパッタリングした超伝導薄膜の予備的試作品を試料として用いた。本試料に関しては、KEK で行われた RRR 測定により、その臨界温度測定が 11.5 K であることが判明している。

以下に本試験で使用した測定プロシーダを示す。

1. 周波数 5 kHz で FPGA からのクロックを SCF と LPF に供給して正弦波を生成
2. アンプのゲインを調整してある電圧波高に設定した正弦波をコイルへと供給
3. ヘリウムによる冷却やヒーターによる加熱によって試料に対して温度変化を起こす
4. コイル側の電流と電圧を 4 端子法で測定する
5. 測定データを解析して三次高調波信号の温度変化を抽出する

コイルに対して 0.2 V, 0.5 V, 0.8 V, 1.0 V, 1.2 V の電圧を印加した時の三次高調波測定の preliminary result を Figure 5 に示す。縦軸がインピーダンス、横軸が試料温度、線の色がコイルへの印加電圧を表している。事前の予想通り、低温側で三次高調波信号が立ち上がる温度はコイル電流に依存した固有の値となっている。各々の三次高調波曲線と X 軸との交点はその温度における下部臨界磁場を意味する。また、全ての印加電圧において 11.5 K 以下で曲線が立ち上がる事象が確認できる。この点が臨界温度に相当するため、RRR 測定と consistent な結果が得られている。以上から明らかのように、三次高調波信号が立ち上がる点の電流値からコイルが発する下部臨界磁場を計算できる。コイルを流れる電流と磁場の対応関係のキャリブレーションは間もなく行われる予定であり、その暁には NbN の試料の持つ下部臨界磁場の温度依存性が明らかになるはずである。

5. SUMMARY

超伝導薄膜試料の下部臨界磁場を評価する目的で、京都大学宇治において三次高調波測定システムの構築を行った。本システムにおいて、シリコンウェハ上に成膜した 100 nm 厚の NbN の試料を用いた試験を行った結果、実際に三次高調波信号を検出できることを確認できた。コイルへの入力電圧と磁場の対応関係のキャリブレーションは間もなく行われる予定であり、その暁には複数の試料に対する下部臨界磁場の温度依存性の評価が実施できるようになるはずである。

6. 謝辞

本測定系の構築の際に助言いただいた CEA-Saclay の Claire Antoine 博士に感謝いたします。本研究は、JSPS 科研費 JP26600142、光・量子融合連携研究開発プログラム、センターオブイノベーション (COI) プログラム、日米共同研究プログラム、京都大学化学研究所の共同利用・共同研究プログラム (2016-8) の助成を受けています。

参考文献

- [1] A. Gurevich, "Enhancement of rf breakdown field of superconductors by multilayer coating", *Appl. Phys. Lett.* 88, 012511 (2006)
- [2] T. Kubo *et al.*, "Radio-frequency electromagnetic field and vortex penetration in multi-layered super-conductors", *Appl. Phys. Lett.* 104, 032603 (2014).
- [3] T. Kubo, "Multilayer coating for higher accelerating fields in superconducting radio-frequency cavities: a review of theoretical aspects", *Supercond. Sci. Tech-nol.* 30, 023001 (2017)
- [4] G. Lamura, M. Aurino, A. Andreone, and J.-C. Villégier, "First critical field measurements of superconducting films by third harmonic analysis", *J. Appl. Phys.* 106, 053903 (2009)
- [5] C. Z. Antoine, J.-C. Villégier, and G. Martinet, "Study of nanometric superconducting multilayers for RF field screening applications", *Appl. Phys. Lett.* 102, 102603 (2013)