研究論文

酸化物超電導体のクエンチ電流の周波数依存性

西 脇 忍, 水野 幸男, 内藤 克彦

名古屋工業大学電気情報工学科 名古屋市昭和区御器所町

(1995年12月26日受理)

Frequency Dependence of Quenching Current of Oxide High- T_c Superconductor

Shinobu NISHIWAKI, Yukio MIZUNO and Katsuhiko NAITO

Department of Electrical and Computer Engineering, Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466

(Received December 26, 1995)

Synopsis:

Understanding of basic physical properties of oxide superconductors is very important for the development of electric power apparatus. A lot of studies have been mainly carried out with DC or AC. However, the frequency dependence of physical properties of oxide superconductors seems not to have been reported except for AC loss. In the present study, a power source was constructed which can supply 10 A up to 150 kHz. The frequency dependence of the quenching current of bulk and thin-film oxide superconductors was measured using this power source. The results are discussed in terms of heat balance between generation due to hysteresis loss and dissipation to coolant.

Keywords: oxide superconductors, quenching current, frequency dependence

1. はじめに

酸化物超電導体の電力機器への適用を考える上で、多くの特性について詳しく調べることが必要である。現在までに、臨界温度、臨界磁界、臨界電流密度の向上を目指して、主な対象となる直流や商用周波数において物性面から鋭意行われてきた。酸化物超電導体の特性の周波数依存性に関し実験研究を行うことは、この種の材料の物性の理解のために極めて重要であると考えられる。こうした考えに基づいて、例えば、交流損失については様々な研究が行われ、バルク材においては量子磁束の熱による活性化と臨界状態におけるフラックスピンニングとの相互作用は、交流場におけるヒステリシス損に大きな影響を与えることなどが研究されている¹⁾。また交流損失が周波数依存性を持つ測定例も報告されている²⁾。しかし、高周波電流通電時の特性に関する報告は事実上皆無だったと思われる。

本論文では、高周波領域における酸化物超電導体の電気特性に関する実験結果を述べ、考察する。

2. 実験方法

2.1 試料

試料として短冊状と薄膜の Bi 系酸化物超電導体を用いた。Fig.1 に示す短冊状の超電導体は、長さ 10 mm、断面積 0.4~0.8 mm² で、両端をそれぞれ通電用電流リード線を取り付けた銅板上にインジウムではんだ付けをして橋渡しした。5×5 cm の 2 枚の銅板の間には、厚さ 5 mm のガラスの板をはさみ絶縁してある。銅板は超電導体と金属との接合部におけるジュール発熱の除去にも有効であり、超電導体の正確な特性を得ることができる³⁾。

薄膜の超電導体は Fig.2 に示すように、厚さ約 100 μm、幅 10 mm、長さ 50 mm で、厚さ 3 mm の MgO の基盤上に生成してある。短冊状試料の場合と同様にリード線をインジウムではんだ付けしてある。

2.2 電源

広い周波数範囲における電気特性を測定するために大電流電源を必要とする。単一電源使用が望ましい

Fig. 1 Bulk sample and auxiliary parts.

が、これは極めて困難であることが判明したので止むくなく周波数帯に応じて次のように3種類の大電流電源装置を使用した。

40 Hz~1 kHz 用: 高砂製作所製の AA500F を使用した。基準周波数を水晶振動子により得ている。50 A まで通電することができる。

500 Hz~50 kHz 用: Fig. 3 に筆者らが作製した電源回路を示す。これは、発振器の正弦波を出力を電力増幅器により増幅して出力する方式である。電力増幅器には Apex Microtechnology 社製の集積回路素子型番 PA05 を用いた。PA05 は MOSFET を使用し、大出力、高帯域幅、のものである。電源の出力用として 3.9 kVA、電力増幅器の内部素子を動作させるために 1.5 kVA の変圧器の出力電圧をそれぞれ整流して直流電源として使用した。出力の直流分の除去および過電流制限対策を行った。この電源は 50 kHz において 10 A 流すことができる。

10~150 kHz 用: 筆者らが作製した電源回路を Fig. 4 に示す。汎用演算増幅器に、ダーリントン接続された補償出力回路を付加したものである。フィードバック量の多い増幅はリアクタンス負荷で発振する場

Fig. 2 Thin layer sample and auxiliary parts.

Fig. 3 Current supply source for frequency range from 500 Hz to 50 kHz.

合があるため、位相補償コンデンサを入れて閉ループ周波数特性を調整してある。この電源は 100 kHz において 10 A 通電することができる。500 Hz~50 kHz 用と同様に電源の出力用として 3.9 kVA の出力電圧を整流したものを直流電源として用い、また電力増幅器の内部素子を動作させるために 12 V の直流電圧を使用した。

2.3 実験方法

交流電源に試料と電流測定用シャント抵抗を直列に接続した。試料の電圧値は、増幅器を用いて約 1,500 倍に増幅しオシロスコープで観測した。試料を液体窒素に浸漬し、周波数 40 Hz~150 kHz の交流上昇電流を上昇率 0.1 A/s あるいは 1 A/s で通電し、試料の電圧が 100 μ V に達したときの電流値を測定した。電圧は 4 端子法により測定した。

3. 実験結果および考察

後述するように、試料に発生する電圧は交流上昇電

Fig. 4 Current supply source for frequency range from 10 to 150 kHz.

Fig. 5 Dependence of quenching current on frequency.

流通電時に、ヒステリシス損失に伴う発熱と熱放散のバランスが破れた場合に発生するものである。本論文では、このときの通電電流をクエンチ電流と称する。

3.1 クエンチ電流の周波数依存性

断面積の異なる試料の電流上昇率 0.1 A/s 時のクエンチ電流の周波数依存性を Fig. 5 に示す。ここでは長さ 10 mm、断面積 0.8×1.0 mm の試料における 60 Hz のクエンチ電流値を 1 として規格化してある。試料を一度液体窒素に浸漬した後、それを取り出し大気中に数時間放置するとクエンチ電流値は 5 % 程度低下するという現象がみられた。これは試料を液体窒素から取り出した後に表面に結露する水が影響しているとみられる。一方、浸漬したままの試料では数 10 回クエンチ電流を求めてもこのような低下現象は見られなかった。本実験では、一度液体窒素に浸漬した試料は用いていないので、クエンチ電流値の再現性は良い。どの試料にも 7~10 kHz まではクエンチ電流の周波数依存性はほとんど認められないが、10 kHz 以上ではクエンチ電流が低下することがわかる。

超電導体に電流を流した場合、電流による自己磁界が生ずるためヒステリシス損失が生ずる。厚さ $2d$ の超電導体にクエンチ電流 $2J_c d$ を流したときに生ずる 1 サイクルあたりの電力損失 P は、

$$P = \frac{2\mu_0 J_c^2 d^2}{3} [\text{J/m}^3] \quad (1)$$

で表される⁴⁾。ここで J_c は臨界電流密度、 μ_0 は真空透磁率を表す。ヒステリシス損失による発熱が液体窒素への熱放散を上まわると超電導体の温度上昇が生じ、常電導転移するものと考えられる。伝熱体よりの熱流を Q 、伝熱体の表面積を A とすると、熱流速 q との間の関係は

Fig. 6 Calculated temperature rise.

$$q = Q/A [\text{W/m}^2] \quad (2)$$

で表される。 Q としてヒステリシス損失による単位時間 (1 秒) 当たりの発熱を考慮して得られた熱流束 q と液体窒素の沸騰曲線⁵⁾ から試料の温度上昇を求めた結果を Fig. 6 に示す。

本来、(1) 式の J_c には各周波数における値を使用しなければならないが、ここでは周波数依存性がないものと仮定し、60 Hz で測定したクエンチ電流密度の値を用いた。電力損失 P の値を周波数倍して単位時間当たりのヒステリシス損失とした。クエンチ電流密度の周波数依存性は不明であるが、周波数は 40 Hz~100 kHz の間で 4 桁変化するため、クエンチ電流密度がこの周波数範囲で 2 桁減少しない限り、単位時間当たりのヒステリシス損失は周波数とともに上昇することになる。従って、周波数が高くなると試料温度が上昇してクエンチ電流が低下する原因の一つになると考えられる。

本実験では、銅ブロックを使用しているため周波数の低い領域では熱放散がヒステリシス損失による発熱を上回り、クエンチ電流の周波数依存性は認められな

Fig. 7 Dependence of quenching current density on cross section of superconductor.

Fig. 8 Effect of current increasing rate on quenching current density.

い。しかしながら、約 10 kHz 以上では発熱が大きくなるため周波数が高いほど試料温度が上昇し、クエンチ電流は低下するものと考えられる。

3.2 クエンチ電流密度の試料断面積依存性

電流上昇率 0.1 A/s 時のクエンチ電流密度の試料断面積依存性を Fig. 7 に示す。ここでは長さ 10 mm、断面積 0.8×1.0 mm の試料における 1 kHz のクエンチ電流密度を 1 として規格化してある。どの周波数においてもクエンチ電流密度の試料断面積依存性はほとんど認められない。電流は試料断面に均一に流れているものと推定される。

3.3 クエンチ電流の通電電流上昇率依存性

薄膜状の試料の 40 Hz～1 kHz 用におけるクエンチ電流の通電電流上昇率依存性を Fig. 8 に示す。この周波数領域では、薄膜状の試料も短冊状の試料と同様にクエンチ電流値は周波数依存性をほとんど示さない。しかしながら、電流上昇率 0.1 A/s 時には 1 A/s 時より 3 % 低い電流値でクエンチすることが分かる。ヒステリシス損失に伴う温度上昇速度に比べて電流上昇速度が大きいほどクエンチ電流値は上昇するものと考えられる。

また、通電電流を上昇率 0.1 A/s でクエンチ電流値より低い電流値まで上昇させて、その一定電流を薄膜状の試料に通電し、試料の電圧が 100 μ V に達するまでの時間を測定した。電流上昇率 1.0 A/s におけるクエンチ電流を 1 として電流を規格化した結果を Fig. 9 に示す。

クエンチ電流に近い電流を通電すると数分以内でクエンチすることがわかる。これは、クエンチ電流に近い定電流を通電している時には、徐々にヒステリシス損失に伴う発熱を放散できなくなるためと考えられ

Fig. 9 Dependence of time to quenching on current.

る。この結果も、熱的要因による温度上昇のためにクエンチが起こることを示唆する。

また、電流上昇率 0.1 A/s 時のクエンチ電流の 99 % 以下の一定通電電流では、クエンチが極めて起こりにくいことから、本実験で使用した電流上昇率 0.1 A/s は、発熱に伴う試料の温度上昇速度にほぼ等しいと考えられる。

4. ま と め

酸化物超電導体のクエンチ電流の周波数依存性を 40 Hz～150 kHz で調べた。得られた結論は次の通りである。

(1) クエンチ電流は、10 kHz 程度まではほとんど周波数依存性を示さないが、それ以上の周波数領域では周波数の上昇とともに低下する。これは、ヒステリシス損失による発熱と放熱とのバランスから説明できる。

(2) クエンチ電流密度の試料断面積依存性はほとんど認められない。電流は試料断面を均一に流れているものと推定される。

(3) クエンチ電流は、通電電流上昇率に依存する。発熱に伴う温度上昇に要する時間と電流上昇速度との兼ね合いによるものと考えられる。

(4) 本研究で得られた結果は、酸化物超電導体の電力用機器などへの適用に対しての参考資料になると考えている。

電源作製にあたりご示唆・ご教示をいただいた本学電気情報工学科 常廣 謙教授、塚本三千夫技官に、また試料作製に際しご示唆をいただいた名古屋大学清水教之助教授に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Y. Yang, et al.: Cryogenics, 1994 ICEC Suppl. **34** (1994) 789
- 2) 木稲博之ら: 電気学会全国大会 (1994) 1030
- 3) N. Shimizu, et al.: Jpn. J. Appl. Phys. **28** (1989) L1955
- 4) 電気学会通信教育会: 超電導工学, オーム社, 東京 (1974) 125
- 5) 低温工学協会・関西支部: 低温工学ハンドブック, 内田老鶴圃新社, 東京 (1982) 214