高温超電導体のマイクロ波・ミリ波デバイスの基礎と応用

大嶋 重利[†], 楠 正暢

山形大学工学部電気電子工学科 米沢市城南 4-3-16 ([†]E-mail: ohshima@yz.yamagata-u.ac.jp)

(2002 年 10 月 15 日受理)

Fundamentals and Applications of High-temperature Superconducting Microwave and Millimeter Wave Devices

Shigetoshi OHSHIMA and Masanobu KUSUNOKI

Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Yamagata University, 4-3-16, Jonan, Yonezawa 992-8510

(Received October 15, 2002)

Synopsis: This paper discusses the microwave and millimeter wave fundamentals and applications of high-temperature superconductors. First, a high-temperature superconducting filter subsystem for a base station is described as an example of microwave devices. In the USA, over 1,000 systems are already working as filter subsystems in 2 G mobile telephone base stations. In Japan, a field trial was carried out for a filter subsystem of an IMT-2000 base station. As the result, the effectiveness of the superconducting filter subsystem was clarified. Therefore, the demand for superconducting filter subsystems for base stations will increase in the future. A SIS mixer and superconducting calorimeter were described as examples of millimeter and sub-millimeter wave devices. Using a Nb/AlO_x/Nb SIS junction and X-ray calorimeter, which utilized micromachine technology, the resolution of such devices was quite high compared to that of conventional devices.

Keywords: HTS, HTS microwave device, superconducting filter, SIS mixer, X-ray calorimeter

1. はじめに

超電導デバイスは「極低温に冷却をしなければなら
ないので扱いにくい」という先入観のために、民間に
出回るようなデバイスはなかなか出現しなかった。高
温超電導が発見され、冷却が容易になったといわれ
ても、一般人をすぐに納得させるのはまだまだ困難で
ある。そのような状況で、少しずつ民間で使用できる
(ここで言う民間での使用とは、大学・研究所等で使用
される研究機器ではないという意味) デバイスが世に
出るようになってきた。その代表的なものは、非破壊
検査用高温超電導 SQUID^{1,2)}と高温超電導フィルタサ
ブシステムであろう³⁻⁵⁾。特に高温超電導フィルタは、
移動体通信基地局用のフィルタサブシステムとして、
米国ではすでに 1,000 台以上が稼動し、今後も伸びる
ような状況になっている。第 2 世代の携帯電話が主流
を占める米国では、その通話品質の向上のために、超
電導フィルタシステムが不可欠だからである。

最近の携帯電話の普及はすさまじい伸びを示して
いる。Fig. 1 に、世界における携帯電話使用台数を示
す。2002 年には、8 億台を超えている。米国、日本で
は既に飽和状態になっており、今後は第 2 世代から第
3 世代へと切り換えをするような状況である。しかし
ながら、中国での伸びはすさまじく、2002 年の台数で
はすでに米国を抜いている。このような伸びに対応す
るために、また世界同一仕様の携帯電話とするために、
第 3 世代の携帯電話 IMT-2000 (International Mobil
Telecommunications-2000) が提案され、現在世界中で
そのシステム、端末等が検討されている。IMT-2000 用
携帯電話は高速通信が売り物で、動画、ムービーメー
ル等の機能を有し、今後の携帯電話の主流になるもの
と期待されている。IMT-2000 に対応する携帯電話を
初めて実用化したのは日本である。現在まだ 400 万台
程度しか普及していないが、今後の進展が世界から注
目されている。日本における第 3 世代の携帯電話の普
及にも超電導フィルタサブシステムが絡んでくるので

Fig. 1 Change in number of mobile telephones used.

ある。それに関しては、次節で紹介したい。

ミリ波・サブミリ波超電導デバイスは残念ながらまだ民間的な実用化素子はない。しかしながら、超電導ミリ波・サブミリ波デバイスは「低雑音、高 S/N、高分解能」等の機能を有するために、古くから電波天文学、宇宙探査にはなくてはならないデバイスになっている。最近では、高温超電導体の高いギャップエネルギーを利用し、テラヘルツ領域まで動作できるミキサー、検出器も報告されている。今後、民間での実用化デバイスも期待できる。

高温超電導体のマイクロ波・ミリ波デバイスの基礎と応用と題して、最近話題となっている超電導フィルタサブシステムの開発状況とミリ波・サブミリ波検出素子として注目されている SIS ミキサー、X 線カロリメータについて、その概要を述べる。

2. マイクロ波デバイス-超電導フィルタサブシステムの実用化状況-

2.1 移動体通信用超電導バンドパスフィルタとは

日本における携帯電話のカバー領域が98%以上となり、ほとんどの地域で携帯電話による通話が可能になってきた。時々、Fig. 2 に示すようなアンテナが、ビルの屋上や空き地に立っているのが目に付く。(a)は PHS 用アンテナであり、(b)は PHS 以外の携帯電話用アンテナである。この (b) に対応する受信システムにおいて、超電導フィルタシステムが開発されようとし

ている。その超電導基地局の受信モデルを Fig. 3 に示す。この中で超電導で作製するデバイスは、デュプレクサー (DP) とバンドパスフィルタ (BF) であり、低温に冷やして使用されるのが低雑音増幅器 (LNA)

Fig. 2 Pictures of base station.

(a) for PHS

(b) for mobile telecommunication (PDC)

Fig. 3 The basic configuration of a base station.

である。DP は携帯から基地局へ行く信号（上り）と基地局から携帯に行く信号（下り）を分離するものであり、通常は単独の機器として設計されている。損失を小さくするために DP も超電導化が検討されている。我々が対象としているのは BF と LNA を一体化したシステムである。バンドパスフィルタの特性は通常 Fig.

Fig. 4 The characteristic parameter of the filter.

Lp : Lipple

BW: Bandwidth

Am: Rejection outside of band

I·L: Insertion loss

R: Minimum desirable rejection at δf

4 で示されるようなパラメータで性能比較される。中心周波数 f_0 (MHz), バンド幅 BW (MHz), 帯域外遮断特性 Am (dB), 挿入損失 I·L (dB), リップル Lp (dB), スカート特性を決めるしゃ断特性 R (中心周波数から δf 離れた周波数での減衰量) である。ここで最も注目される特性は、I·L, Am, Lp と R である。超電導フィルタは、I·L を殆どゼロにすること、帯域外遮断特性 Am を 70 dB 以上にする、スカー特性を 20 dB/MHz 以上に急峻にすることなどが可能である。超電導バンドパスフィルタは、マイクロストリップ線路を用いた平面型回路で実施される。その形状は、チェビシェフ型と楕円関数型に分類されるが、現在実用化されているものはチェビシェフ型が多い。フィルタ特性の評価は、フィルタの反射特性 (S_{11}) と通過特性 (S_{21}) を測定すれば良い。特に S_{21} の特性が重要視される。

Fig. 5 に、今まで報告されている幾つかの超電導バンドパスフィルタの S_{11} , S_{21} を示す^{6,7)}。極めて急峻なスカー特性、大きな帯域外遮断特性等、従来のフィルタでは実現できない特性を持っている。

このような優れた特性を有する超電導バンドパスフィルタシステムの実用化が世界中で検討され、米国ではすでに実用化が始まっている。

Fig. 5 Characteristics of superconducting filter produced.
 (a) 24-pole hairpin-type filter⁶⁾
 (b) 32-pole J-type filter⁷⁾

2.2 米国での実用化の状況

米国での携帯電話は未だ第2, 2.5世代のものが広く普及されており, 主に850MHz帯の周波数が利用されている。その周波数帯は, A社が824-835, 845-846.5 (MHz), B社が835-845, 846.5-849 (MHz)を使用している。そのために, A社, B社のユーザー間には遮断や通話品質の低下が生じ, ユーザーからの苦情が絶えなかった。しかしながら, **Fig. 6**で示されるようなA社, B社の信号を確実に区別できる超電導フィルタが出現し, 通話品質が格段に向上した。また, 超電導フィルタサブシステムの低損失性により, 1基地局のカバーエリアが従来の基地局よりも40%以上拡大することも明らかとなり, 超電導フィルタを用いた基地局の優位性が実証された。その結果, ハイウエーの周りにある基地局から超電導フィルタシステムの実用化が始まり, その後市内の基地局も超電導化が進められて

Fig. 6 Superconducting filter property of the 850 MHz band used in USA.

いる。現在まで1,000台以上が稼動するようになった。また今年の3月までには, 新たにもう1,000台設置されるという情報もある。

米国での超電導フィルタサブシステムは, Superconductor Technologies Inc (STI) 社⁸⁾が最も大きなシェアを有し, 次が Conductus 社⁹⁾であった。しかし, 2002年12月にSTI社とConductus社が合併し, ほぼ100%のシェアを持つようになった。

2.3 日本での状況

日本での第2世代の携帯電話の普及は, **Fig. 1**に示されるようにほぼ飽和状況になりつつある。第2世代の携帯電話に替わる第3世代の携帯電話 (IMT-2000対応) の実用化が始まり, 携帯電話の新たな利用方法が始まっている。第2世代の携帯電話の通信速度は9.6 kbpsであり, 通話, メール, 静止画像伝送が主である。しかしながら, 第3世代での通信速度は100 kbps以上となり, 動画やムービーメールが送れるようになる。IMT-2000用第3世代の携帯電話は2001年10月にNTT DoCoMoから, 2002年4月からKDDI系のauから発売され, 着実にその台数を増やしている。特に, auの第3世代の携帯電話の伸びが大きく, 第2世代から第3世代へと買い替えが進んでいる。2002年11月には, 390万台を突破している。また, J-フォンも2002年12

Fig. 7 PHS and IMT-2000 frequency band.

月には第3世代の携帯電話を発売すると発表している。しかしながら、Fig. 7 に示されるように、IMT-2000 用の周波数帯域は PHS 通信帯域と極めて近い¹⁰⁾。そのために、PHS と IMT-2000 との通話に混信が危惧されている¹¹⁾。それを防ぐために、暫定的に各企業間の使用周波数間に 5 MHz のガードバンドを設けている。第3世代の携帯電話が普及し、特に au の第3世代の携帯電話が更に伸びれば、ガードバンドを取り外すような状況になってくる。その時に、超電導フィルタシステムの有効性が生かされるものと思われる。

3. 超電導ミリ波・サブミリ波超電導デバイスの状況

高速情報通信を可能にする無線技術として、ミリ波通信が検討されている。例えば、ミリ波超高速無線 LAN システムやミリ波映像多重伝送システム、成層圏プラットフォームミリ波通信等である。特に成層圏プラットフォームミリ波通信¹²⁾は、赤道上に浮かぶ静止衛星と違い、伝搬距離が 100 km 程度であるために伝搬損失が各段に小さくなる利点があり、今後期待される新技術である。そのためには低損失のデバイスが必要であり、超電導デバイスのニーズが高まるであろう。

サブミリ波の領域では、すでに幾つかの超電導デバイスが実用化されている。残念ながら民生的な実用化ではないが電波天文学や地球環境センシングではなくてはならない素子として活躍している。また最近、マイクロマシンの技術を駆使し、極めて高感度の X 線カロリメータも報告されている。以下に、SIS ミキサーと X 線カロリメータについて簡単に紹介する。

地球環境をセンシングするためには、大気中に存在する多様な分子の輝線スペクトルを観察する必要がある。特に、オゾン層を破壊するフロン系のガスをチェックすることが重要である。Fig. 8 に 650 GHz 帯のスペ

Fig. 8 The spectrums of atmosphere molecules.

Fig. 9 Cooling system for SIS mixer and HEMT of the spectrum analyzer.

クトルを示す。フロンガスの観察には 649.45 GHz 付近に発光する CIO 分子の輝線を精度良く観察することが必要である。その為に、低温超電導の SIS ジャンクションが用いられている。Fig. 9 に宇宙開発事業団の稲谷グループが開発した地球環境をセンシングするための SIS ミキサーと HEMT 増幅器を冷やす冷凍機システムの写真を示す¹³⁾。低温超電導の SIS (Nb/AlOx/Nb) ミキサーや HEMT 増幅器を冷却するために、4 K 冷凍機が用いられている。宇宙の進化や状況を把握するためには、精度の高い X 線検出器が必要である。最近、マイクロマシンの技術を用いて、熱容量の小さいマイクロカロリメータが開発され、従来では考えられないような分解能を有するデバイスが報告されている。

Fig. 10 X-ray calorimeter utilizing micromachine technology.

Fig. 11 X-ray spectrum detected by the micro calorimeter shown in Fig. 10.

Fig. 10 は文部科学省宇宙科学研究所の満田教授らのグループにより報告されたX線カロリメータの写真である¹⁴⁾。Si ウェハの上の素子が浮くような TES (Transition Edge Sensor) 型である。そのために素子の熱容量が極めて少なくなっている。その結果、Fig. 11 に示されるように、Mn の K_{α} 線を分離できる分解能を持つことが可能となった。超電導 X 線カロリメータが 2004 年に打ち上げられる衛星に載る可能性が高い

とも聞いている。宇宙の進化を議論するのに、超電導デバイスが不可欠になる時代がもうじき訪れようとしている。

4. まとめ

高温超電導体のマイクロ波、ミリ波、サブミリ波のデバイスの基礎と応用に関して、基地局用超電導バンドパスフィルタシステム、SIS ミキサー、X 線マイクロカロリメータを例に取り、簡単に紹介した。従来の超電導デバイスは、研究用に利用されるものが多く、一般の人には馴染みが薄かった。超電導フィルタサブシステムの実用化が起こり、やっと民生的な機器が登場した。しかしながら、一般の人に目に付くような応用ではない。超電導が真に工学的応用に向いているという実感を抱いてもらうためには、もっとアピールする必要がある、そのための我々の責務は大きい。

参考文献

- 1) S. Tanaka, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. **11** (2001) 665
- 2) R. Hohmann, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. **11** (2001) 1279
- 3) B.C. Min, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. **11** (2001) 485
- 4) 楢橋祥一ら: NTTDoCoMo テクニカルジャーナル **8** (2000) 65
- 5) R.W. Simon: Proc. 7th International Superconductive Electronics Conference (ISEC'99) USA (1999) 6
- 6) G. Tsuzuki, et al.: IEEE Trans. Microwave Theory Tech. **48** (2000) 2519
- 7) F. Aiga, et al.: Proc. Appl. Supercond. Conf. (ASC'2002) (2002)
- 8) <http://www.suptech.com>
- 9) <http://www.conductus.com>
- 10) 安達文幸: 日本学術振興会超伝導エレクトロニクス第 146 委員会第 7 回「マイクロ波～光」分科会研究会資料(2000) 1
- 11) 天野良晃ら: 電子情報通信学会 秋季学術講演会 予稿集 (2000)
- 12) 長谷良裕: 日本学術振興会超伝導エレクトロニクス第 146 委員会第 6 回「マイクロ波～光」分科会研究会資料(2000) 12
- 13) 稲谷順司: <http://smiles.tksc.nasda.go.jp/>
- 14) 満田和久: <http://www.astro.isas.ac.jp/~mitsuda/>