

# 極低温下における高周波対応の測定治具の開発

澤木弘二

名古屋大学 工学部・工学研究科技術部

## 1. はじめに

コンピュータ用の半導体演算素子は、50年足らずの間にその速度を約50億倍にまで発展させてきた。これからもSi系半導体を中心に進歩していくことは間違いないが、限界に近づいているという考えが主流になっている。

次世代高速素子の一つとして、ジョセフソン接合を用いた超伝導素子があげられる。ジョセフソン接合は、高速（スイッチ遅延時間：数ps）かつ低消費電力（一ゲートあたり：数 $\mu$ W）な超伝導素子である。近年は、接合の特性を最も引き出す論理方式「単一磁束論理（SFQ）」を中心にデジタルフィルタ、A/D変換器等の研究が進みSFQ回路の超高速動作実証が行われている。しかし、超伝導体は依然極低温で動作するものであり、常温と極低温間のインターフェイスは、熱という1つの点をとってみても大変重要な問題になっている。また、高速化にともなって信号線路の誘電損の問題、反射などといった現象に影響され信号が歪みを起こしたりもする。高速な入出力を可能にするため、超伝導素子・線路がのった単結晶基板、セラミックス基板、高周波コネクタ、セミリジット・ケーブルの特性インピーダンスを50にし、極低温下（液体ヘリウム温度 4.2 K）における基板間の接続はフリップチップとすることで全てにマッチングを取れるようにし、極低温下（液体ヘリウム温度 4.2 K）で信号速度が1GHzを超えることができる高周波対応の測定治具を設計・製作し、高周波特性を調べることとする。

## 2. 治具

図1に治具全体の外観を、図2に超伝導素子・線路がのった単結晶基板、セラミックス基板が収まるヘッド部外観を示す。



図1 治具外観

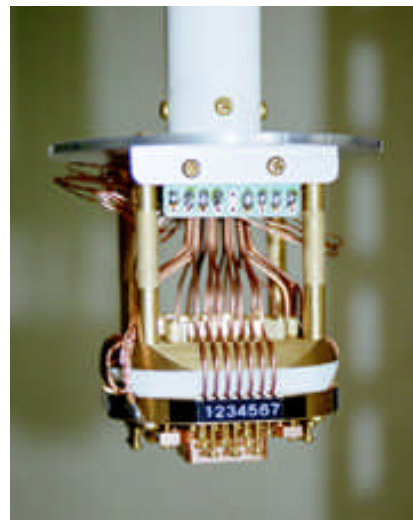


図2 ヘッド部外観

治具製作にあたり、超伝導体は周囲に磁束があると超伝導転移のときその磁束をピン止めしてしまうため、強磁性体の材料は使用できない。したがって、必ず非磁性の材料を使用しなければならない。

今回製作した治具は、ヘッド部に関しては一切磁性材料を用いず、全体としても、上部接続用BOXのSSMAコネクタの金メッキの濡れ性を良くするために下地に用いられているニッケルだけと考えている。

治具構造としては、上部接続用BOX、BOXよりヘッドにつながるFRPパイプ、フランジ、ヘッド部から成る。

上部接続用BOXは、測定装置へつなぐための28個のSSMAジャックコネクタが取り付けられている。FRPパイプの中には入出力用の1.2セミリジット・ケーブルが入っており、一端はSSMAジャックコネクタに、もう一端はヘッド部へつながる。フランジは、液体ヘリウムデューワー（液体ヘリウムが入った容器）にヘッド部を入れた後デューワー内を密閉する。また、FRPパイプの上下動で温度特性の変化をさせる。最後にヘッド部は、セラミックス基板を取り付けパッドをフリップチップで接続できる機構を有する。液体ヘリウム（4.2K）に直接浸かる部分でもあり収縮変化が一番大きな場所でもある。

### 3. 測定準備

RFネットワーク・アナライザを用いた高周波測定の準備手順を次に示す。

1. 超伝導素子・線路がのる単結晶基板とセラミックス基板間を接続する。超伝導素子・線路がのった単結晶基板とセラミックス基板間は、通常直径30 $\mu\text{m}$ のアルミワイヤーを用いたボンディングによる結線を行う。1GHzの波長は300mmに相当し、線路長は2分の1波長以下にすることを考えるとボンディングによる結線は、アルミワイヤー自身がアンテナとなりノイズを拾う恐れは少ないが、線路インピーダンスの変化は避けられない。

2. ボンディング結線したセラミックス基板をヘッド部に固定及びセラミックス基板のパッドとセミリジット・ケーブルの芯線をフリップチップで接続する。

3. 上部接続用BOXのSSMAジャックコネクタとRFネットワーク・アナライザを変換アダプター、BNCケーブルで接続する。

### 4. 高周波測定

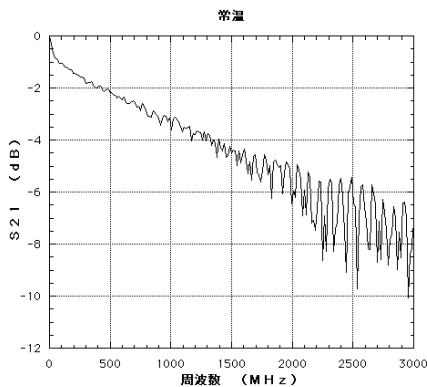


図3 測定機 - 治具間の線路透過

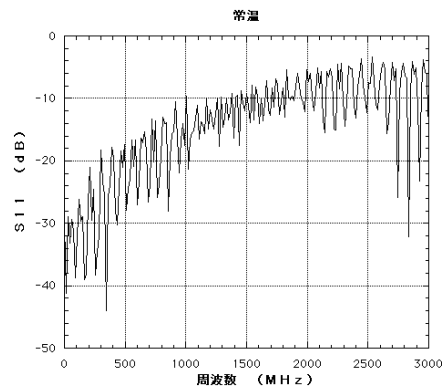


図4 測定機 - 治具間の線路反射

RFネットワーク・アナライザを用いたS21順方向伝送とS11反射測定の結果を次に示す。

解釈として、S21順方向伝送（透過）は、横軸に表示されている値は周波数（MHz）、縦軸に表示されている値は、素子等を通して伝送された信号と入射電力との電力比（dB単位）で、対数振幅で表す場合、式としては、 $\text{伝送 (dB)} = 10 \log (P_{\text{trans}} / P_{\text{inc}})$ となる。P<sub>trans</sub>は素子を通して伝送された電力、P<sub>inc</sub>は入射電力を指す。

S11反射測定は、横軸に表示されている値は周波数（MHz）、縦軸に表示されている値は、反射信号と入射電力との電力比（dB単位）で、対数振幅で表す場合、式としては、反射

$(dB) = 10 \log(P_{refl} / P_{inc})$ となる。 $P_{refl}$ は素子から反射された信号の電力、 $P_{inc}$ は入射電力を指す。

図3、図4は、常温にてRFネットワーク・アナライザから、N-BNC変換アダプタ、BNCケーブル、2.2 セミリジット・ケーブル、BNC中継アダプタを用いた線路の透過と反射を測定した。

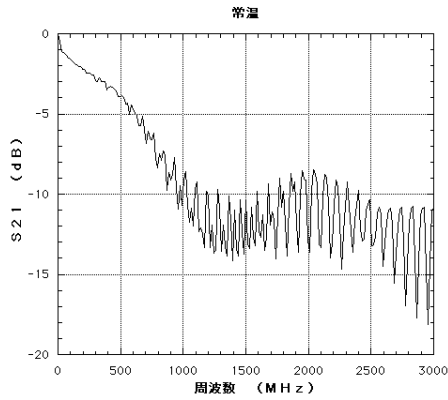


図5 常温下における治具の透過

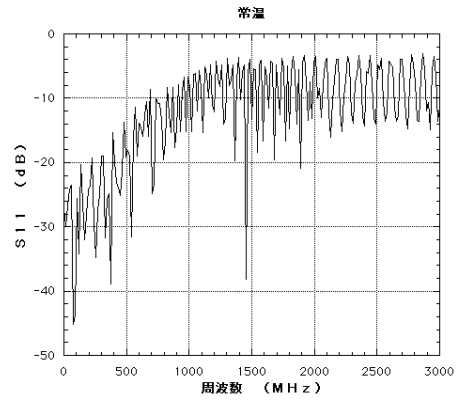


図6 常温下における治具の反射

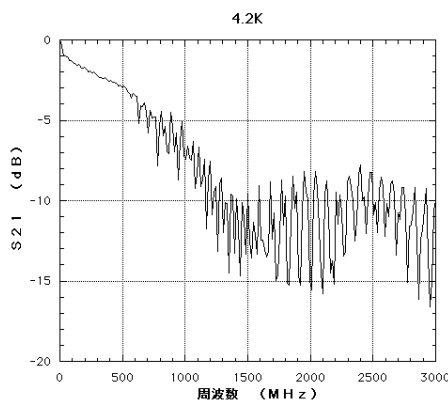


図7 液体ヘリウム温度下における治具の透過

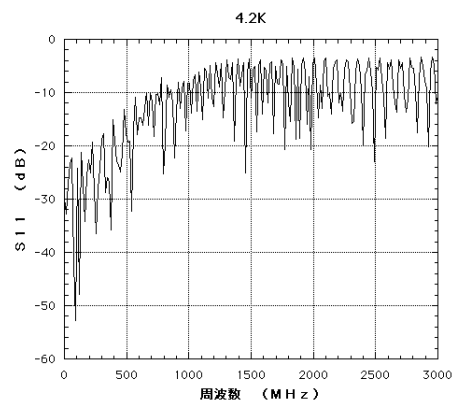


図8 液体ヘリウム温度下における治具の反射

図5、図6は、マイクロストリップライン設計のセラミック基板の信号ピン先端2カ所を短絡させ、常温にてRFネットワーク・アナライザから、N-BNC変換アダプタ、BNCケーブル、SMA-BNC変換アダプタ、高周波測定治具を用い統合された透過と反射を測定した。

図7、図8は、同じマイクロストリップライン設計のセラミック基板を、液体ヘリウム温度(4.2K)にて測定したものである。



図9 ライン幅2.0 μmの超伝導線

図9は、Si基板上にスパッタリングによりNbを堆積させ、ホトリソグラフィーによりライン幅20μmの超伝導線路を作製した。この超伝導線路を、マイクロストリップライン設計のセラミック基板にのせボンディングによる結線を行う。

図10は、超伝導線路をのせたセラミック基板を高周波測定治具に取り付け、同じく液体ヘリウム温度(4.2K)にて、Nbの超伝導線路が超伝導特性を示したとき高周波測定治具の統合された透過の測定をしたものである。図11は、他の透過の図と振幅対数のスケールを合わせたものである。

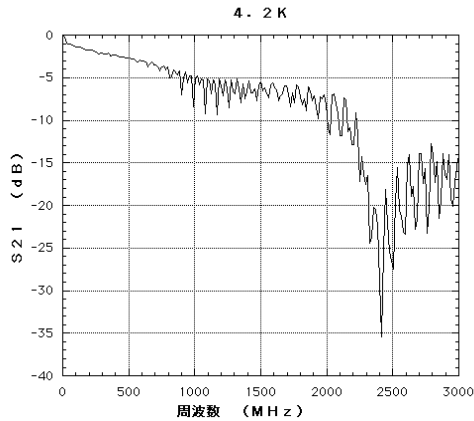


図10 液体ヘリウム温度下における超伝導線路の透過

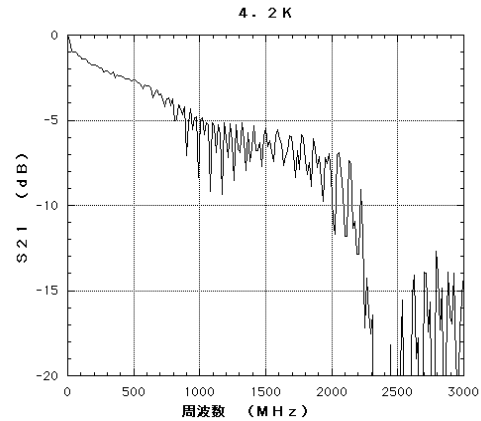


図11 液体ヘリウム温度下における超伝導線路の透過(拡大)

## 5. 考察

測定結果は、先にもの述べた通り振幅対数(スカラ)で表示されている。本来、知り得たい治具の伝送損失は位相がわからないため特定できないが、それぞれの振幅対数からかなりの減衰があるというがわかる。図5、図7、図10のS21伝送特性は10倍ほどの減衰がある。しかし、低周波から減衰が起きており、これは、治具そのものというよりBNCケーブル、BNCコネクタ、変換アダプタに問題があると考えられる。極低温下での測定では熱損失が減少し-2dB程度減衰が改善されている。

## 6. 今後の課題

デジタルネットワーク・アナライザ等でベクトル量を調べ、治具の伝送損失を特定する。今回のNbの超伝導線路は、特性インピーダンスが50Ωに設計されていないので、コプレーナ構造で特性インピーダンスを50Ωに設計し、伝送損失を抑えた超伝導線路にて高周波測定を行いたい。

また、線路損失を抑えるため、測定装置までの線路を全てセミリジット・ケーブルを用い、変換アダプタ使用箇所を減らし、コネクタ類は数十GHz対応のものを用いたい。

## 7. おわりに

今回、技術部より機器・分析技術研究会に参加させて頂き、2日間という短い時間の中で発表、他研究機関の方々の講演の聴講、交流、施設見学と有意義な時間が持てましたこと深く感謝致します。また、お世話を頂きました実行委員の皆様には厚くお礼申し上げます。

## 8. 参考文献

- |                  |      |      |           |
|------------------|------|------|-----------|
| 1) 高周波計測         | 森屋倅昌 | 関 和雄 | 東京電機大学出版局 |
| 2) 高周波・マイクロ波測定   | 大森俊一 | 他    | コロナ社      |
| 3) マイクロ波回路の基礎と応用 | 小西良弘 |      | 総合電子出版社   |