Hyperfine Structure of Positronium in Its Ground State — Technical Reports —

P2 Positronium Group

October 10, 2000

Abstract

前年度行われた同様の測定 (参照 P2 98 Report) では、電磁波の発生源としてマグネトロンを用いていた。我々は、そのマグネトロンという選択肢を捨て、代わりに SSG (Standard Signal Generator) を用いたことで、いくつかのマグネトロンに特有の難問を避け、結果として簡単ながら測定にいたるまでの、一通りのセットアップを組むことに成功した。このレポートでは、我々がどのようなセットアップを組上げたのかをテクニカルな側面から報告する。

はじめに —マグネトロンから SSG へ—

前年度用いた電磁波発生源である家庭用電子レンジは周波数固定 (2.45GHz) のマグネトロンである。それに対し、SSG はクリスタルを用いた周波数可変の電磁波発生源である。周波数が可変であると言うことは 2 つの大きな利点がある。

- 今までキャビティーに付属のチューナーを用いて押さえようとした電磁波の反射を、電磁波自体の周波数を微調整することで、押さえることが出来るようになる。

  物理的なチューナーの抜き差しから開放されると言うことは、その微調整が圧倒に簡単に出来ると言うことである。
  (キャビティーの気密性を保つため、チューナーはゲージポートで固定されている。また、チューナーからの電磁波の洩れを防ぐため、チューナーは、キャビティー壁と接触している。)
  そのため、時間的な共振周波数の変動に容易についていける。

  測定中のキャビティーに一切触れずにチューニングが出来き、セットアップ環境を誤って壊すことが無い。

  また、チューニング精度が圧倒的に良くなるため、著しく反射を押さえることが出来る。これは、電磁波出力系自体の安定化にも効果があるし、サーキュレータなどの補助的なパーツの削減にも利点がある。

  FM (Frequency Modulation) を用いた、自動チューニングの可能性にまで発展する。

- 今まで固執せざるを得なかった 2.45GHz という周波数帯自体から脱却できることである。

またパワーの面でも、マグネトロンのように大出力を殺すダミーロードが必要無いという利点がある。これにより実験に用いる測定器具の大枠が変わり、実験の練り直しからスタートした。

1 Decision of Frequency

最も始めに行ったのが利用する周波数帯の決定であった。我々が周波数を決定するにあたり以下のことが考慮された。

- 電磁波出力系にとって、都合の良い周波数帯であること
- この周波数で遷移に必要とする静磁場の大きさを計算すると妥当な値になること
- これらを踏まえた上で、理論的な見積もりをやり直した時に、どこも破綻しないこと。(例えば、周波数のファクターが変わると、キャビティーサイズもファクター変わることに注意。今回の周波数の半分あるいは 2 倍の周波数で実験を行った場合。キャビティーのマウントには間違いなく失敗していただろう。)

マグネトロン (2.45GHz)の場合、磁場は 8000 gauss を必要とした。P2 98 Report にあるようにこれは手持ちの電磁石にとってはかなりきつい要求である。もし、利用する周波数帯を下げることが出来るなら、これはマグネットの用意にとってもうれしいことである。そこで我々は、共振周波数をおよそ半分の 1.28GH z とすることにした。理由としては大出力アンプが低価格で手に入ること、(アマチュア無線用が利用できる。) その他のアクセサリ− 器具等も安く手に入ること (L バンド 帯である) 等である。

2 Cavity 設計の過程

キャビティーを設計するに当たり、我々は多くの難問にぶつかり、その結果、さまざまな点を考慮したキャビティーの製作に成功した。例えば、

- 気密性が保てる構造でありながら、外部からチューナやカップリングの調整は出来ないか?
- 反射をほぼ完全に押えるにはどのようなカップリングにすると良いか?
- 強い電磁波にさらすことなく放射線ソースを設置するにはどうすれば良いか?
- 取りはずしの出来る蓋を用いたいが、電気的な接触をしっかり取るにはどうしたら良いか?
- ·····

等である。ここでは Cavity が設計される過程について詳しく見て行く。

2.1 Cavity 本体の設計

Cavity の形状について　キャビティーの形状として候補に上がったのは次の二つである。

- 直方体型キャビティー

- 円筒形キャビティー

ともに、ジオメトリーに基づくモードや Q 値等の計算が容易にできるからである。今回は、対称性の観点から (加工や PMT のマウント等を考えて)、円筒形キャビティーを選択した。

半径について　実験に利用するのは TM110 モードであるから、この時点で、キャビティーの半径が決定する。(参考 P2 99 Report)

$$\text{半径} = \mathbf{0.14283\ m}$$

高さについて　高さ自体は共振周波数に依存しないため任意に設定できるが、設計の際には 2 つの要請がある。

- キャビティーは磁場中にマウントされるため、電磁石のギャップに入る必要がある。(ギャップは 10cm。)
  蓋や底の厚さを計算にいれる必要があるし、磁場測定用のプルーブ等を指しこむ余裕もほしい。電磁石にシムを付けるという可能性もある。
- ポジトロニウムが生成されのに十分な、高さが欲しい。
  ポジトロンの大半が、そのまま天井に当たってしまうのでは、意味が無い。

ポジトロンの飛程については P2 98 Report を参照。
これらをもとに高さを決定する。

$$\text{高さ} = \mathbf{42\ mm}$$

この時点で、このキャビティーに固有の全てのモードが分かることになる。参考までに我々の使う周波数付近に別のモードが無い確認してみると、(もしあると、違うモードで誤って測定してしまう可能性がある。) この" 高さ" 方向に比較的小さいジオメトリーにより、TE モードはずっと高い周波数の所に存在する。
　また最低周波数のモードは TM_{010} であり、これはおよそ 800MHz となる。
　これらのうち、特に最低次のモードは容易に確認出来るため、実際に電磁波をいれてこのモードがあることを確認した。

素材について　素材について考慮する点は、材料価格、加工性 (納期や加工費に関係する。)、強度等である。候補としてあがるのが、最も一般的に使われる銅、あるいはアルミニウムであるが、

- アルミの方が加工しやすい。(同じ形状でも加工法が全然違う事に注意。)
- 持ち運び、設置にアルミの方が軽くて便利。

上記のことをふまえて、アルミを採用した。また銅製に劣らない Q 値を得るために表面に銅メッキを施すことにした。(価格の面から無酸素銅のみでの製作や銀メッキといったことは出来ない。)
　これにより、入力電磁波による発熱で、どの程度キャビティーが膨張するかが大まかに見積もれるようになった。(この見積もりを甘くみてはならない。実際に熱膨張は共振周波数に大きく影響してくる。これは後で述べる。)

銅メッキについて　銅メッキを行うには、まずそのメッキ厚を決定しなければならない。銅メッキの厚さは銅槽につけ、流すチャージ量をコントロールすることで変えられるそうである。

P2 99 Report より銅のスキンデプスは 1.8×10^{-6}m となる。そこでメッキ厚は $5\mu m$ とすることにした。

Q 値　これらをもとに Q 値 (Intirinsic) を計算すると 1.9×10^4 となる。

しかし、この Q 値をもとに理論計算や見積もり計算等をおこなうと、後で痛いめにあうので注意が必要である。

参照：Q 値の測定

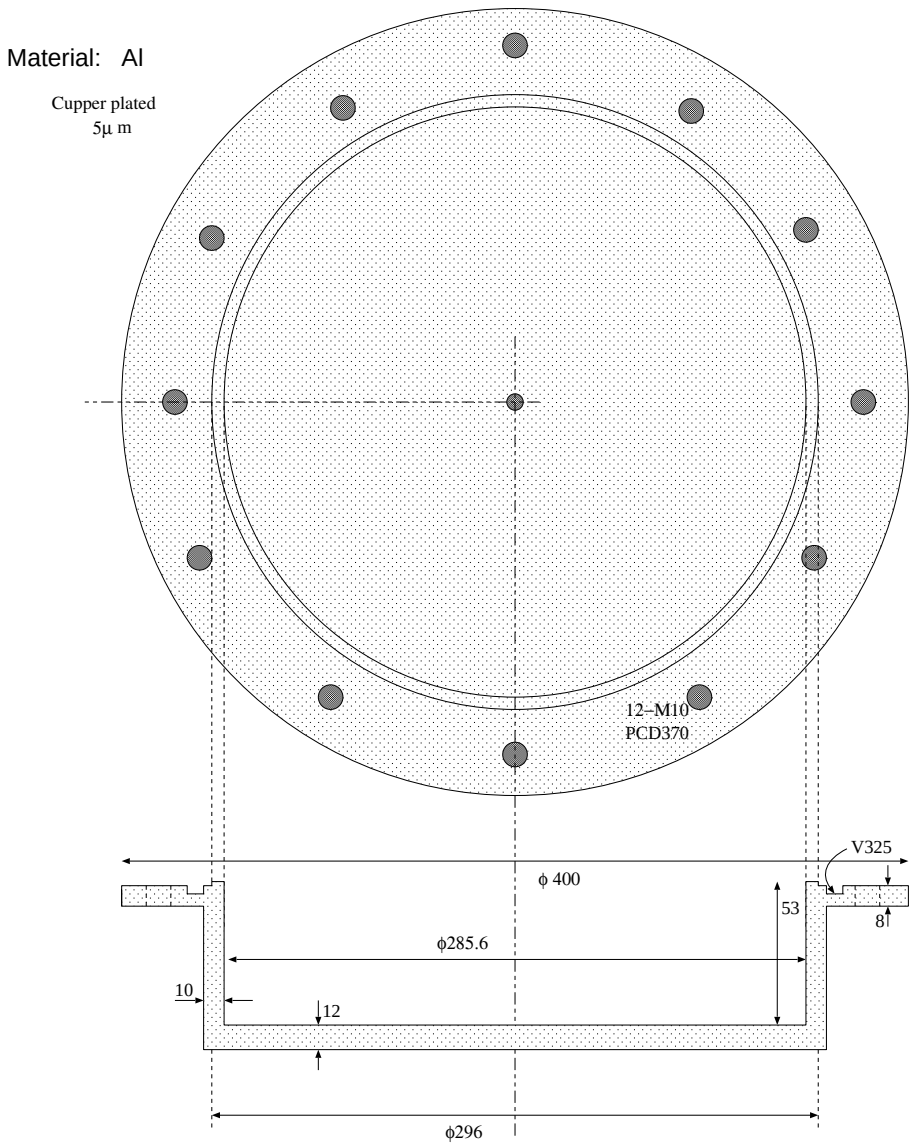
Cavity 壁の厚さ　壁の厚さとして要求されるのは次の 2 点

- 加圧、減圧 (0 ~ 2 atm) に耐えるだけの強度を持つような厚さであること
- 511KeV のフォトンを通すのに十分な薄さであること

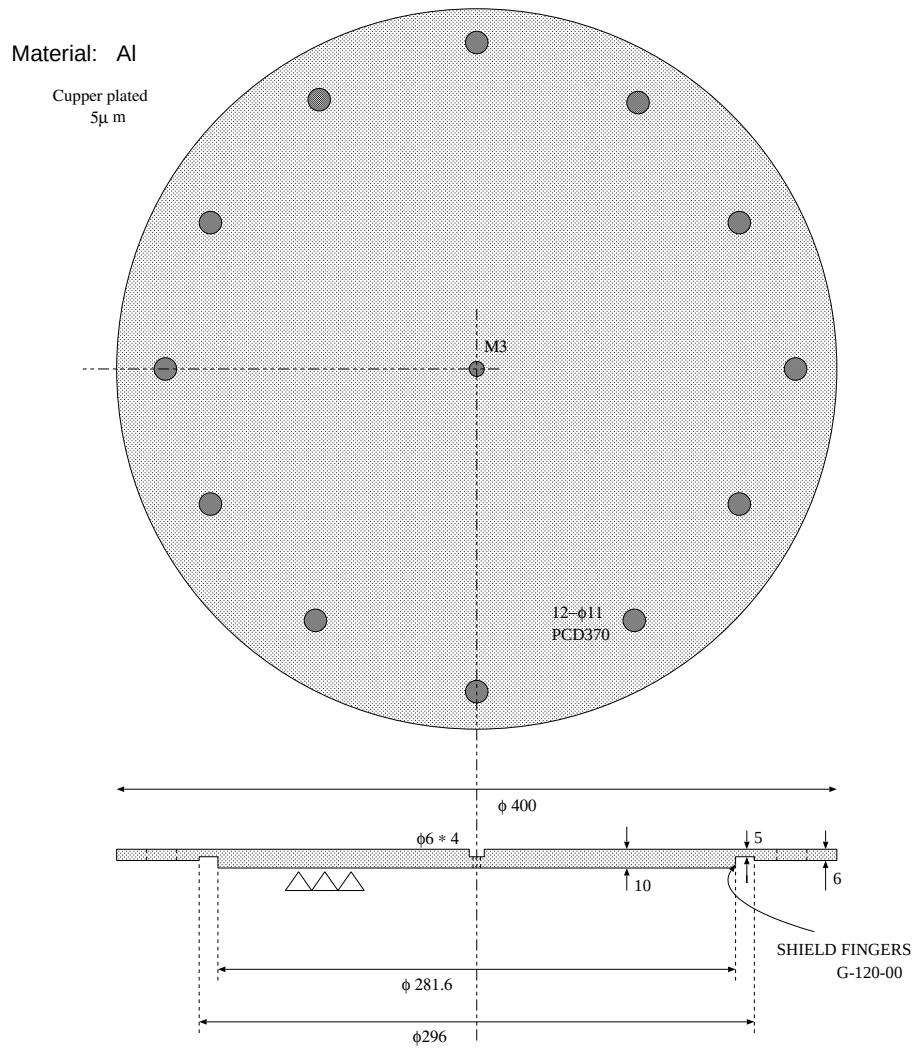
これらを考慮して 1cm とした。このときのフォトンの透過率は 80%となる。

設計各部の説明

以上により設計の大枠が決定されたので、これから各部を詳細に吟味する。まずは、以下に設計図を掲載するのでそれを見ながら各部位の説明を読まれたし。



2.2 蓋の設計



蓋の設計で最も重要なのは、キャビティー本体と十分な接触を取り、表面電流の流れを切らないような設計にする事である。中途半端な接触は、電磁波の洩れや、著しい Q 値の低下をもたらす。(局所的な部分接触では表面電流の通り道を大きく回り道させることになる。)
そこで要求したいのは

- 蓋と本体は全面的でしかもしっかりとした接触が欲しい。
- 何回か開け閉めが出来るようにしたい。

の 2 つである。上の条件だけを満たすには軟らかい金属を噛ませたり、あるいは完全に溶接したりするのが良いが、下の条件を満たしたいために、我々はシールドフィンガーを利用する事にした。また蓋と本体と位置固定の全てをフィンガーに頼ると、大きな力が加わった時にフィンガーを潰してしまう可能性があるので、規格上の潰し幅以上に動かないようにインローを設けた。

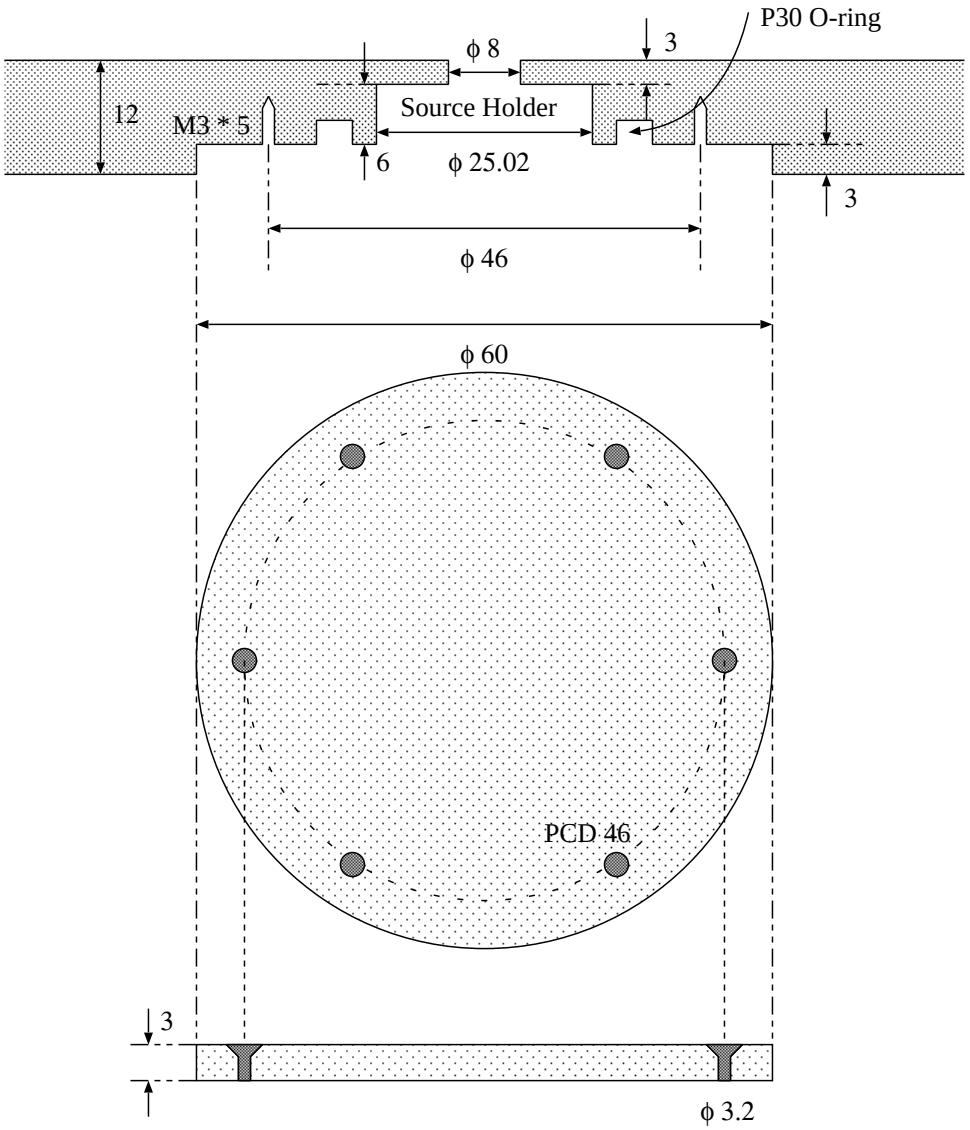
電流的接触以外に機械的接触も考慮する必要がある。気密性を保つために、O-リングを使用した。また O-リングを潰すためには大きな力がかかるので、アルミに切ったタップでは頼りなく、タップ部をヘリサートで保護した。

蓋の中心にある穴は、ビーズプル測定法で用いるストリングを通すためのものである。ビーズプル測定法とは、電磁場領域に小さい金属球 (ビーズ) を入れ、それによる共振周波数の摂動変化をみることで、内部の電磁場の大きさを推し量ろうと言うものである。ストリングはビーズを引っ張って (プル)、スキャンするために用いられる。

本実験中は気密性を保つため O-リングとネジで閉じてある。

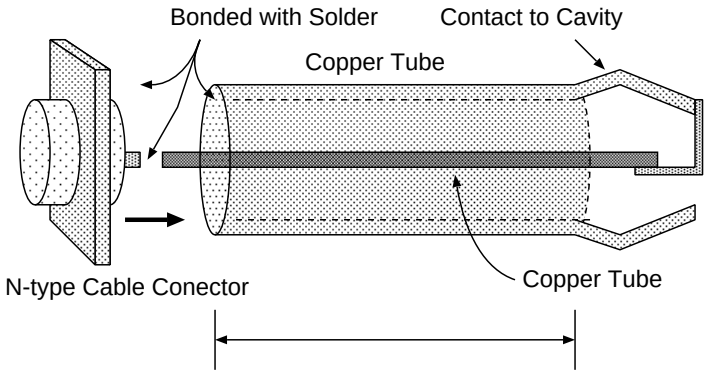
設計上の考慮が足りなくて、蓋を取り外す時の取手を取り付けるのを忘れてしまった。そのため蓋の取り外しには、蓋の一部に設けたすき間にくさび状のものを差し込んで、持ち上げられるようになっている。

2.3　ソースホルダーの設計



ソースホルダーは特定のチェッキングソースのサイズに合うように設計してある。今回の測定の性質上、ソースが動いてはいけないのでサイズはかなりシビアに作ってある。また、直接電磁波に触れて発熱したり、共振周波数を変えてしまうのはいやなので底に埋め込む構造になっている。また、底面を流れる表面電流を切りたくないので穴の大きさもシビアにとっている。当初、ソースに対する冷却が大丈夫かと心配されたが、試したところ大丈夫であった。キャビティーの温度も人が触れる程度にしか発熱しなかった。また、気密性を保つために O ーリングを使用してある。

2.4 カプラーの設計



入力用カプラーにとって最も重要なのは明らかにそのループ部である。ループ面積の見積もりの間違いは電磁波の反射にダイレクトに効いて来るので注意が必要である。見積もり方法は、次の通り。
まず、キャビティー内に我々の望むだけのエネルギーをもったモードが立っているとする。その中にループを入れると、誘導起電力が生じる。

$$V = -\frac{d}{dt}(BS)$$

Sはループ面積。これと入力電磁波がループに作る電圧が釣合うとよい。

$$V = \sqrt{PZ}$$

Zはインピーダンスである。これでループ面積が決定される。

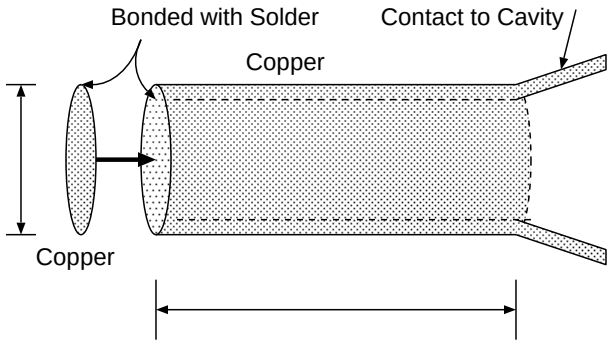
ループ面積は、わざと大きく見積もっても、カップリングを回し、有効面積を減らすことで対処できる。よって製作時はその方法をとったが、これは逆に仇となった。有効なループ面積には文字通りのループ部だけでなく同軸管端の内部もいくらかふくまれるので、かなりのオーバーカップリングとなってしまった。結局このあたりは、理論は大まかな見積もり程度にして、何回か試作を行うことで、ベストなループサイズをみつけた。

ループの接触はしっかりと半田付けされている必要がある。また、ループは十分な太さの銅である必要がある。なぜなら、そこには数十ワットの電力すべてが集中するからである。下手なことをすると、発熱でループが赤熱し半田を解かしてしまうかも知れない。

同軸管部は、インピーダンスが同軸ケーブル (50Ω) のそれと一致するように設計されている。

(補足) カップリングの挿入位置により、軸対称であるこのモードにおいて、θ 方向に回転されたモードとの縮退がとかれ、モードが一意に決定される。

2.5　チューナーの設計



共振周波数を大まかに調整するため、チューナーを挿入できる仕組みをとったが、設計どうりの共振周波数が得られたため、その必要性が無くなった。そこで、チューナの代わりとして、できるだけ電磁場に影響を与えず、しかも内部の気密性を保つようなアクセサリー (設計図参照) を製作し取り付けた。

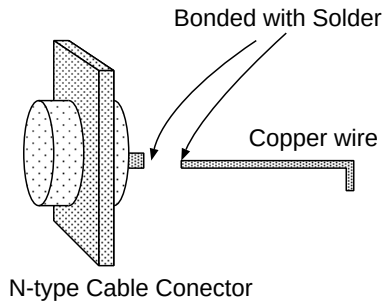
また、チューナーのホールドには、可動にする事と気密性を考えて、ゲージポートを利用した。

チューナー挿入位置は、電場あるいは磁場の大きい所に挿入されると、より大きな効果が望めるため図のような場所に決定された。つまりインプットカプラーのちょうど向かい側である。(電磁場分布を想像すると良い。)

チューナーを挿入する場合は、磁場領域に差し込むと、共振周波数を上げることができ、電場領域だと下げることができる。つまり今回のような挿入位置の場合、チューナーを少し差し込むと共振周波数を上げることができ、更に差し込むと逆に下げることができる。

しかし下手に挿入すると、電磁場分布をかえてしまったり、発熱してしまったりするので注意が必要である。

2.6　ピックアップの設計



ピックアップは、Cavity 内部の電磁場とあまり大きくカップルしてはならない。(内部のパワーを不必要に取り出してしまうためである。) そこで電場の弱い領域で電場カップリングをするという方針を取った。(電磁場分布図を参照) N 型コネクターの中心導体に針金を付け、その先を少し曲げる事で電場とカップルさせた。(設計図上は、先に示したように先端をすこし曲げてあるが、実際にピックアップから、電磁波を取り出したところ、十分カップルすると判明したので、利用時には先を曲げずに、一直線の棒状のまま使用した。しかし、これでも入力電力の 1 万分の 1 弱が取り出せた。)

ピックアップの設置により、Cavity 内部の stored energy がモニターできるようになった。

またここからサンプルしたマイクロウエーブと入力マクロウエーブの位相を比較することで、共振周波数の自動チューニングも可能である。(しかし、今回は用いなかった。)

3 Magnet

P2 99 Report 参照

4 Microwave System

以下に電磁波系統のセットアップ、および各部の詳細な説明を記す。この figure を見ながら各部の説明を読んでもらいたい。

4.1 Microwave 系のセットアップ

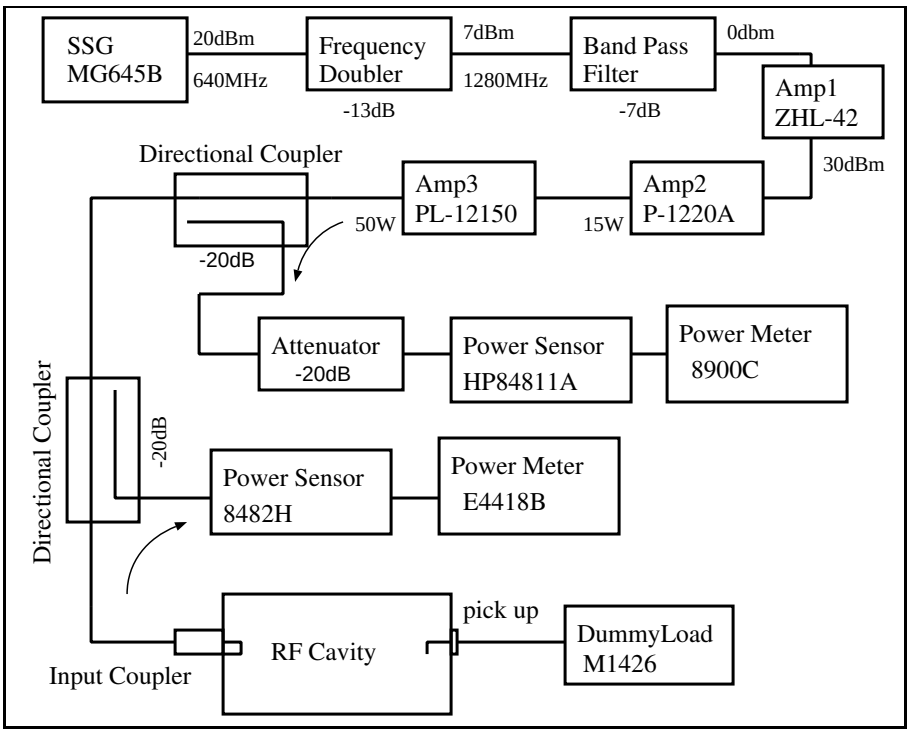


Figure 1: Setup （ マイクロウエーブ系 ）

大まかな流れを説明すると、まず SSG から出たマイクロ波は Frequency Doubler を経て周波数を 2 倍とした後、幾つかのアンプを通して望む出力にされ、最後にキャビティーへと入る。詳細は以下に記す。

4.2 Microwave 系機器の説明

SSG (Standard Signal Generator) 標準マイクロ波発生器 MG645B (Anritu 製)。発振可能周波数帯は 0.05 MHz - 1040 MHz のワイドレンジであり、最大出力は 20dbm となっている。もちろん、周波数、出力ともに可変である。フロントには周波数カウンターがついており、1 kHz のオーダーまで測定可能となっている。また、発信周波数の微調整は 1kHz 弱まで可能。

参考までに記すと、この SSG は FM (Frequency Modulation) 機能を備えており、FM 端子に電圧を加えるとその大きさに応じて周波数を大きくしたり、小さくしたりする事が出来る。

Frequency Doubler Hewlett Packard 製
入力電磁波の周波数を 2 倍にして出力する。利用可能な周波数帯は
INPUT: 0.05 - 1.3 GHz
OUTPUT: 0.1 - 2.6 GHz
である。また、最低入力電力として +10dbm が必要である。今回の場合、これを通すと出力パワーはおよそ 13db アテネーションされた。

Band Pass Filter 自作品。
BAND: 1255MHz - 1333MHz。 スペックは P2 99 Report を参照して欲しい。

1.28GHz 以外の電磁波は共振しないため、アンプで増幅しても無駄になる。また、狭帯器アンプについては、増幅できないばかりでなく、機械に悪影響を与える可能性があるので、カットをする。

Amp1 アンプ (ZHL-42) は宇治の化研から借用したものである。対応周波数 700-4200 MHz の広帯器であり、GAIN は 30db 得られるリニアアンプ。スペック上は
Maximun INPUT: +5dbm
Maximum OUTPUT: +28dbm
となっているが、安定に+30dbm の出力が得られるので今回は+30dbm 出力で運転した。また、必要とする電源は 15V, 0.88A である。この端子は入力、出力ともに SMA となっているので注意が必要である。

Amp2 P-1220A (プロコ製) アンプ。
対応周波数 1260-1300 MHz の狭帯器であり、入力電力は 1-2 W の固定型、出力電力も 15W-20W で一定出力。フロントに出力調整つまみがついているが、それは見せかけである。必要とする電源は 13.8V, 5.5A である。ところでこのアンプ、アマチュア無線用のものなので、端子には “入力” とか” 出力” とは書いていないので、どちらが入力でどちらが出力なのか分かりにくい。しかしどうやら、このアンプは送信用の物らしく、ANT(アンテナ) の所に出力用のケーブルを繋ぐと良い。冷却については後述する。

Amp3 PL-12150 (プロコ製アンプ) 対応周波数 1260-1300 MHz の狭帯器であり、入力電力は 15 W の固定型、出力電力は、モードによって選べ、High Mode で 120-150W (ただし 150W は瞬間最大値), Low Mode で 50W である。必要な電源は 13.8V, 42A(ハイモード時) である。同じくアマチュア無線用であるので、ハイモードでの連続使用は数分程度 (およそ 3 分)、ローモードでは数時間程度しか出来ない。

これを用いた連続運用の方法は後述する。

注意として記しておくが、これに付属の電源ケーブルは、プロコが誤って郵送して来たもので、42A のカレントには全く耐えられない。よって実験時には、自作したケーブルを用いた。なにぶん急ぎの仕事であったため、これにはヒューズをいれていない。運用時には十分気をつけてほしい。

Directional Coupler 方向性結合器 (DK-SJ-711)
運用可能周波数帯は 1300 MHz の狭帯器。結合度は 20 ± 0.5 db であり、方向性は 15db 以上であることが保証されている。

今回は 2 個の Directional Coupler を用いた。それぞれの結合度は
No. 524534.1 は 21 db
No. 524534.2 は 22.5 db
となっている。

Attenuator (NIHON KOSHUHA COAXIAL ATTENUATOR) MODEL FA-S-2120
最大許容入力電力は 25W であり、20db のアテネーション効果がある。しかし、このアテネーター値はいい加減なもので、キャリブレーションが必要である。

Digital Powermeter (Hewlett Packard 製 E4418B) Power Sensor は 8482H を使用する。 測定可能レンジは 1 μW - 1 mW である。キャビティーからの反射を測定するのに用いる。

Analog Powermeter (Hewlett Packard 製) 8900c Peak Power Meter
Power Sensor には HP 84811A を用いる。キャビティーへの入力電力を測定するのに用いる。

Dummyload (WEINSCHEL ENGINEERING 製) MODEL M1426
運用可能周波数帯は DC - 8 GHz の広帯器。最大許容入力電力は 50W。(この用途のみに使用した場合明らかにオーバースペックであるが、例えば、キャビティーなしで電磁波の発振テストをしたいときなどには、これを用いる事が出来たので重宝した。)

5 Measurement

5.1 Q 値の測定

キャビティーが完成したので、実際に Q 値を測定してみる。

測定方法　臨界結合における Q 値を測定する。
ネットワークアナライザーを周波数を振るスイープモードにして使用する。モニターするのは" 周波数 vs 反射率" カーブである。まず、反射が最小となる周波数を探す。これが共振周波数 f_0 である。次にカップリングを適当に回して調整して、この反射が更に小さくなるようにする。共振周波数において、反射がゼロになったら、これが臨界結合である。(ネットワークアナライザーのスクリーンに表示される反射率の波形から、キャビティーに入っていく透過率の波形を想像してみるとよい。) 透過率曲線における周波数半値幅 Δf が求まると、

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f}$$

から Q 値が得られる。

無負荷時の Q 値、すなわち unloaded Q (Q_u と記す) はちょうどこの 2 倍である。

結果

Q 値 = 6000

ただし、Q 値は表面の酸化等ですぐに悪くなったり、温度によって変化したりするため、常にこの値であると言うわけではなく注意が必要である。

保存時は、メッキの剥離や酸化に十分注意する必要がある。また、たまにメッキ表面を磨くのもよいであろう。磨くときは内部に立つモードを意識しておこなう。

ところで、この Q 値は理論値と大きく違うが一体どう受け止めればいいのだろうか? これ以外にキャビティーを設計したことの無い我々は、専門家の意見を求めた。それによると、理論値の 6 割と言うのは妥当な値だそうである。
まず表面の研磨による Q 値の向上はこれ以上望めないそうである。むしろ、過度の研磨はメッキをはがしてしまう危険があるので逆に勧められない。 では、素材等を変えたり (無酸素銅等を使う。)、メッキを銀にしたりしてはどうか? という話だが、これもコスト的にみて、学生実験レベルでは見合わないそうである。結局、この値一応満足の得られる物であるようだ。

参考までに記しておくが、$\frac{\triangle f}{2} = 100kHz$ である。つまり共振周波数から 100kHz ずれると半分は反射して来ると言うことである。我々は反射を取り除く装置を持たないため少なくともこの 1 桁下のレベルでコントロール出来ないと話にならない。実際の測定ではさらに 1 桁したの 1kHz のレベルで周波数をコントロールした。キャビティーのチューナーで反射を消すことがどれだけ難しいか想像できるであろう。マグネトロンを使うのはこういう意味で不可能であった。1,280,000 に対して 1 であるから、厳密にいうと周波数の指定は少なくとも 6 桁、またキャビティーの精度も 6 桁必要である。熱膨張が問題になるのも納得できるであろう。

その他の実験装置

p2 99 report を参照して欲しい。

6 Procedure

ここでは実験をやるにあたり、大事な手続きを詳しく記す。

1. 電磁石、フォトマル、キャビティー、マイクロ波出力系等の配置、配線を行う。
2. フォトマルに HV をかける。その他の安定化の必要な機材の電源を入れる。(この辺りは省略して記す。)
3. 電磁石の電源を入れ、冷却水を流し始める。

   この温度安定化作業を怠ってはいけない。というのは鉄の膨張によってギャップサイズがかわり、磁場の値もじょじょに変わって来るからである。

   我々の経験によると 1 時間程度の安定化時間が必要である。

4. ネットワークアナライザーを用いて、カップリングをあわす。(あわし方は前述してある。) 目安としては反射が $1/1000 \sim 1/10000$ になるようにする。

   カップリングの調整はキャビティーに直接さわるため、出来るだけ測定中は避けなければならない。

   このとき必ず共振周波数を確認しておく。なにも知らないところから、SSG のつまみを回しながら適当に共振周波数を探るなんて事は不可能である。

5. ベースラインの測定をする。このとき、磁場の値をモニターしておく。

   結論からいうと、2 時間の測定で測定中に磁場の大きさの変化は

   1 gauss 程度であった。

6. ここから、電磁波の入力及び安定化作業を行う。この部分を詳しく書く。

   まず周波数を共振周波数に合わすのだが、いきなり全てのアンプに電源を入れるようなまねをしてはいけない。反射ですぐに機材を壊してしまうだろう。1 段目のアンプのみに電源をいれ反射を最小になるようにする。2、3 段目はスルー状態にしておく。当然、発振周波数は前もって適度なところに当たりをつけておくこと。それが終ると、2 段目も電源をいれ同じことを繰り返す。このとき、2 段目のアンプの空冷を絶対に忘れてはいけない。3 段目も同様にするのだが、ここから忙しくなる。反射のメータが突然上がり出すのが分かるだろう。ここからひたすら、共振周波数を追っかけなければならない。周波数をどちらに動かすかははっきりしていて、下げる方向である。と言うのは最初の段階ではキャビティーの熱膨張がドメインであるからだ。(おもしろいことに十分時間がたつと安定化した後、今度は逆に上がり始める。なぜなら夜がきて気温が下るからである。)

   たまに 2 段目、3 段目となるとどうしても反射が減らないときがある。これは、おそらくカプラーのグランドとキャビティーの接触が弱いときと思われる。そういうときはもう一度カップリングの取り直しからすると良い。

   一時間程度すると共振周波数が安定し始める。このときには共振周波数がおよそ 500kHz 程度下がっている。(これはその時々による。) 余談だがこれでキャビティーのサイズ変化が計算できる。

   そうこうすると今度は段々、共振点における反射率が以前ほどさがらなくなってくる。これは、発熱等によりキャビティーの Q 値が変わり、臨界結合からずれて来るからである。これが気になるときはカップリングを調整し直すと良い。これもどちら方向に回すかははっきりしていてループ有効面積を増やす方向である。(理由は温度が上がることにより銅の抵抗値があがり、 unloaded Q が下がることによる。)

   余談となるが現実問題として反射は完全に 0 になるわけではない。では一体どの程度までなら反射が許されるのだろうか? それを表す指標が SWR である。良く見ると 3 つのアンプのスペックシートにはすべてに SWR をいくら以下にしてくださいと書いてある。今回の実験における反射は、この要求を十分満たすことができている。

7. マイクロ波ありの時の測定を開始する。

8. 測定が終ると、マイクロ波系統の電源を切って良いのだが、アンプは内部のファンを回し続けるため、電源を切っては行けない。

注意

フォトマルからのシグナル線をマグネット電源のそばにおいてはいけない。大きくノイズをひろってしまう。また幾つかの装置は多くのカレントを消費するので、(特にアンプ系やマグネット電源等)、測定系の装置をこれらと同じところから電源をとると、これらの ON,OFF に測定値が左右されるかもしれない。

7　参考

ここでは、この実験を行うにあたり参考になるであろうを思われる事柄について記す。

7.1　反射の抑え方の理論

反射を見積もるには朝永の式がすべてを語る。これによると位相を含めた振幅反射率は

$$r = \frac{\omega_0/Q}{(\omega - \omega_0) - i(\omega_0/2Q)} - i$$

となる。電力反射率に直すと、($\Delta\omega = \omega - \omega_0$ とする。)

$$R = \frac{(2\Delta\omega/\omega_0)^2 + (1/Q_u - 1/Q_c)^2}{(2\Delta\omega/\omega_0)^2 + (1/Q_u + 1/Q_c)^2}$$

である。

　よって反射を抑えるには、まず周波数を共振周波数に持って行くようにして、$\Delta\omega = 0$ となるようにしなければならない。これで反射率は、

$$R_0 = \left(\frac{1/Q_u - 1/Q_c}{1/Q_u + 1/Q_c}\right)^2$$

となる。次にカップリングをあわせて臨界結合になるようにする。すなわち $Q_c = Q_u$ となるようにカップリングの調整を行うと

$$R_0 = 0$$

すなわち反射をおさえるには、まず周波数を共振周波数に合わし、かつその上で、カップリングを臨界結合にするという、2 パラーメーターによるチューニングで行わなければならないという事である。

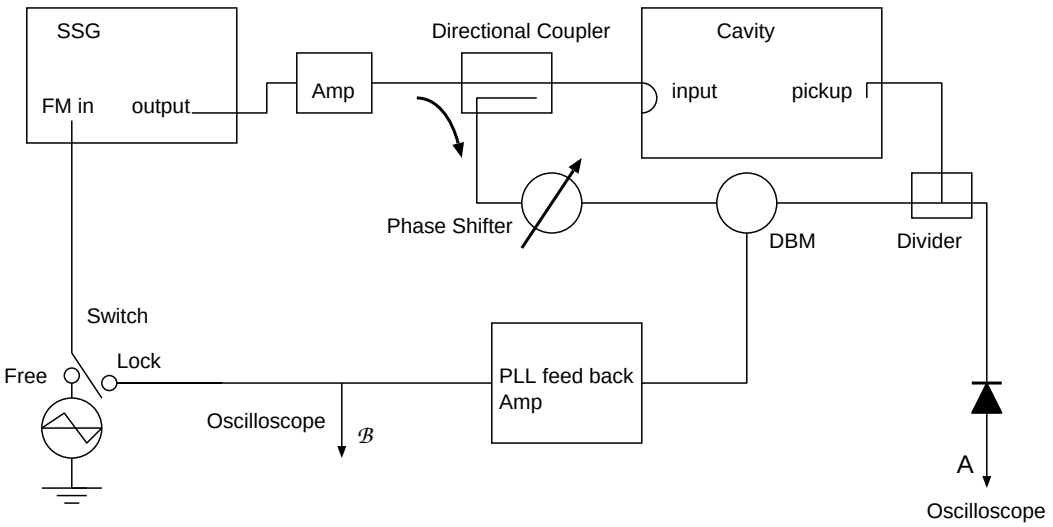
7.2　ハイモード におけるアンプの長時間運転方法

我々の用意したアンプはアマチュア無線用であるため、ハイモードでの連続運転は数分程度しかできない。そのため、ソース強度が何桁もあがらないとこの時間内に測定を終らすというのはまず不可能である。そこで問題になるのが、果たしてこのアンプを用いて、なにか工夫をすることで数時間 (出来れば十時間程度まで行くとよい。) の連続運転が出来ないのか? ということである。

　結論からいうとこれは可能である。方法はアンプのフィンの上一面に強力な空冷ファンを並べひたすら冷却することである。連続運転でまず問題になるのは熱である。それさえ克服すると後の連続運転にさしさわるような要素はあまりドメインにはならない。ではなぜ今年、ハイモードで運転しなかったかというと、まず第一にファンを買うお金が既に無くなっていたということと、第二にハイモードで動かすだけのアンプ用電源がどうにも手配出来なかったことによる。

7.3　自動共振周波数チューニングシステム

この実験では準備 1 時間、測定 2 時間の間ずっと、周波数の調整をしつづけなければならない。そこでこれを自動でする方法を紹介する。



概要としては入力信号の一部を取り出し、それとキャビティーからの出力信号とを比較することで、その位相差を求める。共振周波数と入力周波数がずれると、位相差が生じる。(参考 強制振動) あとはその位相差に応じた信号を SSG の FM 入力にいれて周波数を位相差が無くなる方向に変化させる。

各部の説明

DBM　位相比較器として用いている DBM を紹介する。これは 2 入力の積を出力するもので、2 入力をそれぞれ $\sin(\omega t+\phi)$ と $\cos\omega t$ とすると、(位相差 ϕ)、和積の公式より

$$\sin(\omega t+\phi)\cos\omega t=\frac{1}{2}\left(\sin(2\omega t+\phi)+\sin\phi\right)\rightarrow \qquad \sim\frac{\phi}{2}$$

となり、位相差が小さいところでは、位相差がダイレクトに見れる。高周波成分のほうはフィルターでカットする。

PLL feed back Amp　これには上で述べたフィルターおよび、積分回路とその信号を増幅するアンプが入っている。積分回路をいれることにより位相差が無くなるまで、すなわち、入力信号が 0 になるまで、出力電圧がどんどん上がり (下がり) つづける。

手順

まずオシロスコープをみながら信号 A が最大となる周波数を探す。これが共振周波数である。

この状態で、スイッチを Free の方にして鋸波をいれる。FM に入力した電圧に比例して SSG は周波数を変えるのでオシロスコープを X-Y モードにして、周

波数-位相差の関係を見てみる。(実際は FM に入力する電圧と B での積分回路を通さない信号をみる。もちろんフィルターは通す。)
最初から原点を通る分けではない。なぜならケーブルによる位相のずれがあるからである。これが原点を通るように Phase Shifter を使って調節する。
　FM 入力には極性を変えるボタンがついている。必ず負帰還がかかるようにセットしておかなければならない。
　ここまで出来ると、いよいよスイッチをロックにして積分回路が働くようにする。
以上。

Contents

1 Decision of Frequency **2**

2 Cavity 設計の過程 **2**
2.1 Cavity 本体の設計 2
2.2 蓋の設計 6
2.3 ソースホルダーの設計 8
2.4 カプラーの設計 9
2.5 チューナーの設計 10
2.6 ピックアップの設計 10

3 Magnet **11**

4 Microwave System **11**
4.1 Microwave 系のセットアップ 11
4.2 Microwave 系機器の説明 12

5 Measurement **13**
5.1 Q 値の測定 13

6 Procedure **14**

7 参考 **16**
7.1 反射の抑え方の理論 16
7.2 ハイモードにおけるアンプの長時間運転方法 16
7.3 自動共振周波数チューニングシステム 17