

「放電用真空管製12MHz 高周波電源の製作」

金野茂男、板橋国明

Production of 12MHz High-Frequency Power Supplly applied Vacuum Tubes for Electric Discharge

KINNO Shigeo, ITABASHI Kuniaki

1. はじめに

現在、本研究室所有の高周波スパッタリング装置に使用されている自作のFET製500W高周波パワーアンプ⁽¹⁾は、約1100Vの高耐電圧のFETをメイン素子として使用しているが、マッチングがとれていなかったり、突発の放電開始及び停止時等による反射電力波による、FETの破損をおそれ、100Wから150W程度以下での稼働を余儀なくされている。そのため、形成される金属薄膜の付着強度、膜強度の不足が否めなかった。簡単に入手できそうな数千Vの耐電圧を持つ高周波パワーFETを探したが見つけれなかった。現有のスパッタリング装置の性能を十分に発揮させるためには、放電電気回路においてその耐久性、耐電圧特性がとくに優れている真空管の高周波電源に変更すべきであるが、購入するとしては専門メーカーで製作販売されている製品は非常に高価である。

ところで、「真空管とは時代遅れも甚だしい」と言われても、著者さえそれなりに納得がいく。真空管の占めていた役割を半導体で置き換えることが半導体部門の発展の重要な歴史の一つであった。かつては真空管が占めていた電子機器の部署を半導体が取って代わり、身の回りには全くと言っていいほど見あたらない。半導体の圧倒的な優位性はゆらぐことはなく、真空管は死語であることが一目両然のようである。真空管は半導体デバイスと比較すると容積が大きく、重く、機械的強度が弱く、消費電力が大きくて効率が悪い。どう考えても真空管に分がない。

が、実は真空管はいまだに健在である。身近な主たる活躍の場はテレビのブラウン管である。表示装置としては近年液晶やプラズマディスプレイが実用化されてきているが、像の解像度、鮮明度、動作速度、表示面積、販売価格などは真空管であるブラウン管にまだ及ばない。半導体素子は優れた点をもっているが、それと同じように真空管にも優れた点があり、半導体素

子では簡単に補えない特徴を有しているのである。テレビ以外に、一般の人が直接に見聞できない大型の送・受信機、各種の実験機器、強電機器などの分野では今もなお真空管は健在である。これらの分野では真空管の耐久性、耐電圧性が遺憾なく発揮されている。

本研究室では長年にわたり研究・教育用の電気・電子機器を自作してきている。古書ともなっている真空管に関する書籍を参考にし、今回この真空管製高周波電源を設計・製作し、発振周波数が12MHzで、300W以上の出力を有し、良好な性能を有する装置を完成させた。かかった費用は極めて安価である。

本論文で、この自作装置の設計及び製作の過程を報告する。この論文を参考すれば、読者でも出力1kW以上の高周波電源でも容易に自作できるであろう。

2. 設計・製作

2.1 装置の概要

本装置は薄膜成長用のスパッタリング装置に使用予定なので、発振周波数はメーカーから提供されている一般のスパッタリング装置でよく採用されている周波数帯の12MHzとすることにした。出力はできるだけ大きい方がよいことは当然であるが、少なくとも200W以上のものとする。周波数を12MHz、出力200W以上の設定のその他の理由として、現有のスパッタリング装置に付属しているマッチングボックスがこれらの帯域に対応していることにもある。周波数を大幅に変更し、出力を極端に大きくすると、現有のマッチングボックスでは対応できないからである。

これら周波数と出力の設定性能を満足するような真空管出力回路を探索した結果、中型RF3極送信管811Aを4本パラレルに用いたSSB用の出力250W～500Wリニア・アンプの回路⁽²⁾を見いだした。この出力回路を本装置のメイン回路とすることとし、この回路が正常に動作するように全体の構成をしていくこ



図1 高周波電源ブロック図

とした。

基準の12 MHz 発振回路は水晶振動子を用いた真空管発振回路とし、この発振回路の出力を適宜に増幅して、主アンプに入力させる。図1に設計した高周波電源のブロック図を示す。300 Wメインアンプが811 A真空管を用いた出力回路である。参考文献⁽²⁾によれば、811 AをGG回路として使用する場合にはグリットバイアス電圧を -4.5 V にし、B電圧を1500 Vとすると出力が500W、もしグリットを接地すれば、グリット電源が不要となるが、B電圧は1000 Vまでで出力はおおよそ250W以上とのことである。電源電圧が比較的低く、グリット電源が不要で安定性が充分に期待できる後者を選択することにした。本装置内部に負荷とのインピーダンスのマッチングのため π 型カップラー、及びVSWRモニター用のパワー・メータも組み込むことにした。

811A メインアンプを駆動するためには数十W以上の入力電力が必要なので、60W 程度の中ドルアンプを組み入れ、またこの中ドルアンプを駆動するために10W 程度のプリアンプを付加し、発振回路からの出力電圧を増幅することにした。

図2が設計・製作した本装置の全体回路図である。素子などのパラメータ値は各部の説明の項で表記する。発振部とプリアンプ部にはm T型5極真空管12 BY 7 A、中ドルアンプ部には5極ビーム出力管6 D Q 5、そしてメインアンプ部に811Aを使用する。表1にこれら使用する真空管の主な特性を、図3にはそれら真空管の接続及び外形長を示しておく。なを、表1中の「-」の欄はそのパラメータが規格表などに未記載であったことを示している。

2. 2 装置の各部

2. 2. 1 電源部

回路へ供給する電源部回路図を図4に示す。真空管のウォーミングアップ時間も考慮して、メインスイッチのほか、RFスイッチを付加している。参考文献⁽²⁾では811A 駆動用のB電源を最大定格一杯のDC 1500V、650mA とし、出力500Wを得ている。が、1次電圧がAC 100Vで2次電圧がこのように高压で、1 A近い出力電流のトランスは特注でなければ入手で

きない。同然その価格は非常に高価なものとなる。ところで、日本とヨーロッパの商業電圧の変換用絶縁トランス(200V $\leftrightarrow$ 100V)は一般の需要が大きいのて高容量のものでも簡単にしかも非常に廉価で購入することができる。そこで、容量1 KVAで200V $\leftrightarrow$ 100V変換絶縁トランスを1次側を100V、2次側を200V出力とし、この200Vの出力電圧をコッククロフト・ウオルトン回路を用い4段で1000Vまで昇圧し、811AのB電源とする方法を用いることとした。前述しているとおり、811Aをゼロバイアスで使用する時の電源電圧はDC 1000Vとなるからである。なを、使用するトランスには200V以外に220V、240Vのタップが付いていた。200Vタップを使い、4段のコッククロフト回路にしたのは、各段で500V、220 μ の電解コンデンサー1個の使用を考えてのことである。別の方法として、240Vタップを使用すれば、3段のコッククロフト・ウオルトン回路で済むが、平滑用コンデンサの耐圧は $240\text{ V} \times \sqrt{2} \times 2 \approx 670\text{ V}$ 以上必要となる。このような高耐圧で高容量の電解コンデンサは入手が困難であるうえに高価であるので、この場合には少なくとも耐圧400V以上の電解コンデンサー2個を直列に使用すればよい。この後者が悪いという訳ではないが、前者の方を採用した。

容量200VAのトランス1個で、発振・プリアンプ用のB電源(240V、100mA)、中ドルアンプ用のB電源(580V、0.2A)及び中ドルアンプのグリットバイアス用電圧を供給することにした。中ドルアンプ用B電源には倍圧整流回路を用いている。コンデンサの耐圧の低さをカバーするために2個を直列に用いて耐圧を稼いでいる。一般に市販されている大容量の電解コンデンサの最高耐電圧は450V $\sim$ 500Vが最大の様である。なをコンデンサの直列接続では耐圧は接続段数倍だけ大きくなるが、容量はその段数分の1に減少してしまう欠点を併せ持っていることに注意しておく必要がある。

表1に示しているように、3種の真空管のヒータ電圧はすべて6.3Vで使用できる。そのためのトランスを中古で格安で仕入れた。1次入力AC 100V、2次出力には6.3Vの出力端子の組が多数ある真空管ヒーター専用のものである。

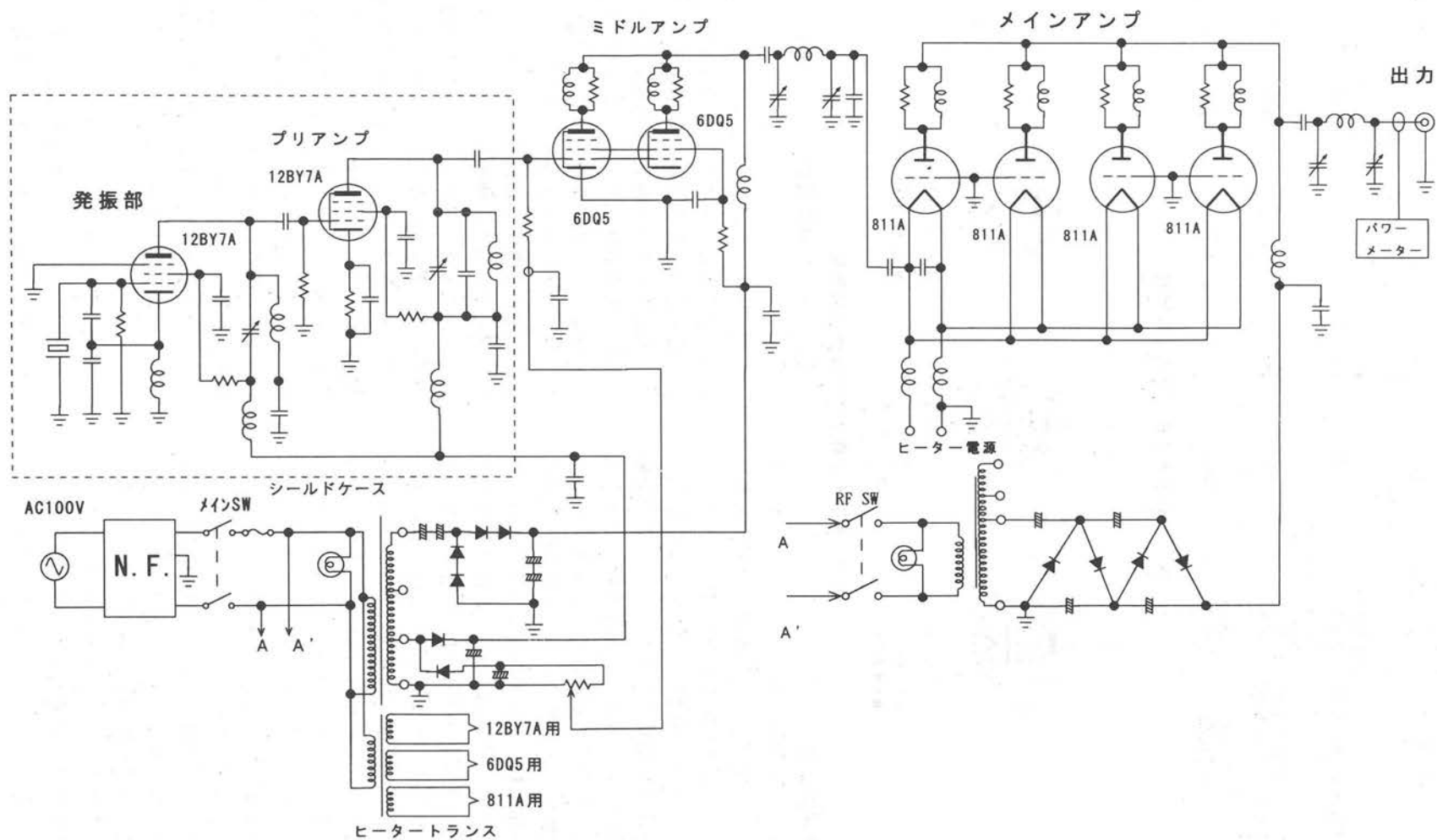


図2 高周波電源の全体回路図

「放電用真空管製12MHz高周波電源の製作」

	用 途	ヒーター 定 格	最大定格				出力	動作電力
			プレート 電 圧	グリッド 電 圧	カソード 電 流	プレート 損 失		
12BY7A	映像増幅用5極管	傍熱型 12.6V 0.3A 6.3V 0.6A	330V	(第2) 190V	—	6.5W	—	—
6DQ5	カラー用水平偏向 5極ビーム出力管	傍熱型 6.3V 2.5A	990V	(第2) 190V	315mA	24W	75W	—
811A	RF用中型 出力3極管	直熱型 6.3V 4A	1500V	-200V	175mA	45W	135W	10W

表1 使用する真空管の主な特性

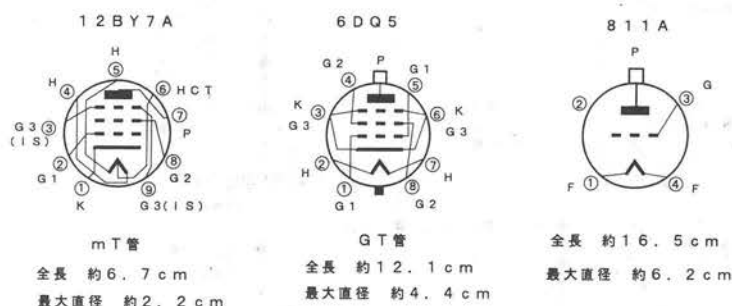


図3 使用する真空管の接続と外形長

2.2.2 発振回路部

図5中の左半分が5極管を用いたピアースGK式水晶発振回路である。使用した水晶振動子はKSS製7H09120であり、発振周波数は12.000kHz、メタルカンの大きさは高さ20mm×幅18mm×厚さ8mmの形状をしている。真空管は高相互コンダクタンスの電力増幅管で、比較的低いプレート電圧で大きな出力がえられる、映像出力用5極管である12BY7Aを用いている。プレートには240V、第2グリッドには15kΩ(2W)の直列電圧降下用抵抗により160Vを与えている。回路素子のパラメーター値のほとんどは12BY7Aと同程度の性能のmT型5極管を用いた既製のピアースGK回路のものをそのまま適用している。出力電圧振幅は、主に第1グリッドに取り付けるコンデンサー(15pF)の容量の大小、抵抗(51kΩ)の大小、及び第2グリッドの電圧を決める抵抗(15kΩ、2W)の大小で変化する。図中の値はトライアンドエラー方式で、真空管の最大定格以下で出力電圧振幅が最大になるように設定したものである。

陽極負荷回路に同調回路(LC並列共振回路)を用いており、余分な高調波成分が出力されてしまわないようにL、Cの値を発振周波数である12MHz近傍に共振するように調整する。水晶振動子を用いたこのピアース回路は性能の良い高調波発振回路としてもよく使用される回路である。少しのL、Cのパラメーター

の違いで簡単に高次発振するので留意しておく必要がある。

40pFのコンデンサーとしてエアバリコンを用いている。コイルL₁のパラメータ値は図中に表記している。読み方は、直径15mm、長さ20mmの円筒形に、太さ1.0mmのエナメル線を11回巻いて形成したコイルであることを意味している。このパラメータ値は最終的に確定したものであり、巻数が何種かのものを用意しトライ・アンド・エラーで決める。なを、高周波成分の伝搬する部分の抵抗やコンデンサーには当然ながら高周波用のものを使用しなければならない。

この回路もそうであるが、高周波回路においては高周波の出力電圧波形などのモニターのために通常のオシロスコープ等のプローブを直接回路に触れさせると、回路のパラメーターがずれてしまい、出力等の調整は全く不可能になってしまうことに留意しておく必要がある。高周波波形をモニターするためには、プローブの先端で伝搬線の周りにループをつくって測定する簡易方法を用いる。いわゆる、電界強度計としてオシロスコープを動作させ、出力電圧の相対強度を回路パラメーターに影響させることなく測定する方法である。

2.2.3 プリアンプ

図5中の右半分が5極管を用いた単一同調電圧増幅のプリアンプ回路である。単一同調電圧増幅回路は単

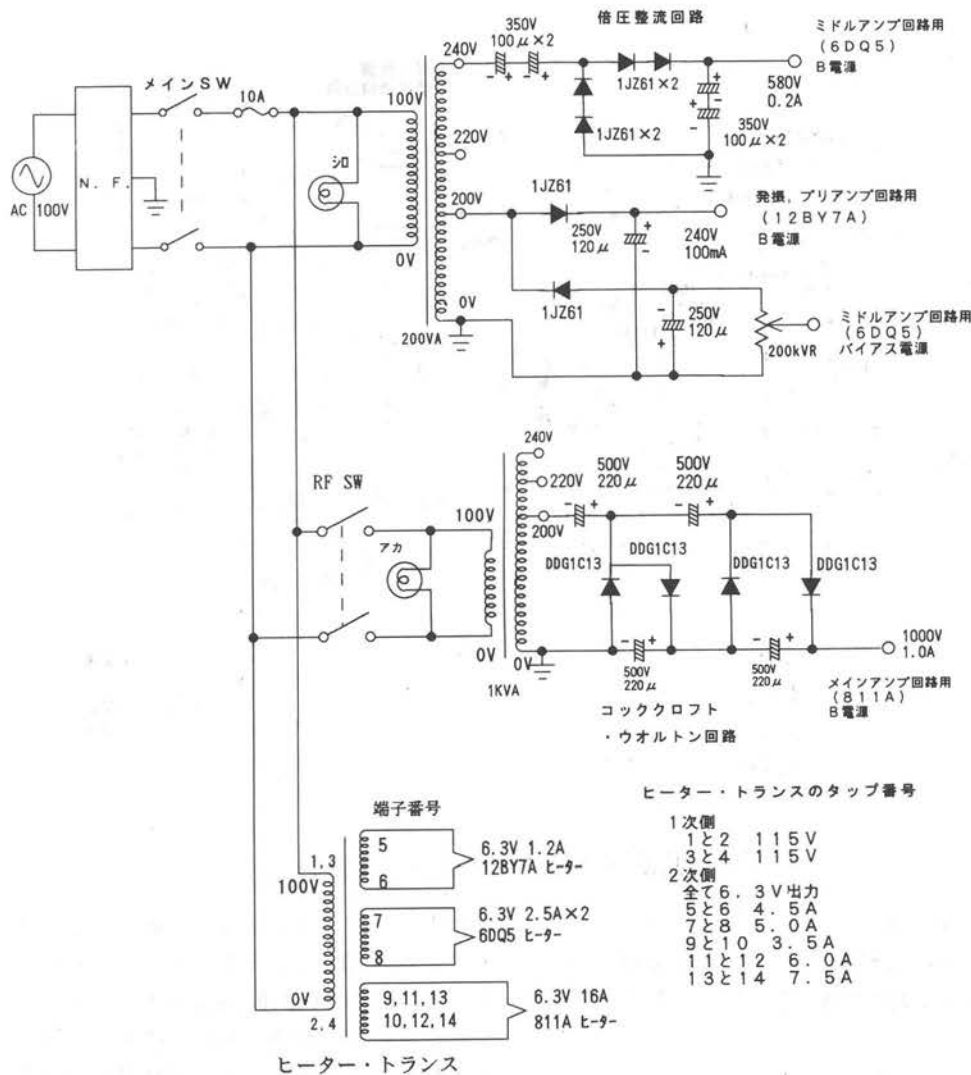


図4 電源部回路図

一の周波数あるいは非常に狭い周波数範囲を増幅するので、周波数特性をあまり問題とせず、増幅度を大きくすることができる。回路的には発振回路と同じである。真空管は発振回路と同じく 12BY7A を用いている。プレートには 240V を、第 2 グリッド電圧は $5\text{ k}\Omega$ (1 W) の直列電圧降下用抵抗により 190V 前後としている。高調波成分が出力されないように陽極負荷回路の同調回路の L と C の値を調整する。同調回路のコンデンサーとして 70 pF のエアバリコンだけでは容量不足であったので 120 pF のセラミックコンデンサーを並列接続し、 $120\text{ pF} \sim 190\text{ pF}$ の可変範囲を持たせている。最終的に確定した同調コイル L_2 のパラメータ値は図中に記してあり、読み方は L_1 と同じである。

発振・プリアンプ部の具体的な製作法について述べる。発振回路とプリアンプ回路を一枚の片面プリント基板上に構成する。真空管ソケットはこの基盤上にベタ付けする。この基板全体をシールドケースをかねた小型万能アルミ・シャーシ・ケース内に配置する。グリッド及びカソードに付ける抵抗、共振回路のコイル、コンデンサ類は、出力調整の際に変更が行えるようにプリント基板に金属端子ピンをたて、そこにハンダ付けを行う。このようにしておけば交換調整が容易である。共振用コイルの巻数の大小により極めて敏感に同調がずれるので、コイルは簡単には変形しないような程度の強度のエナメル線を使用し、各々のコイルについて何種類かの巻数のものを用意しておく。コイルの若干の伸縮でしの微調整を行う。なを、図中のこれら

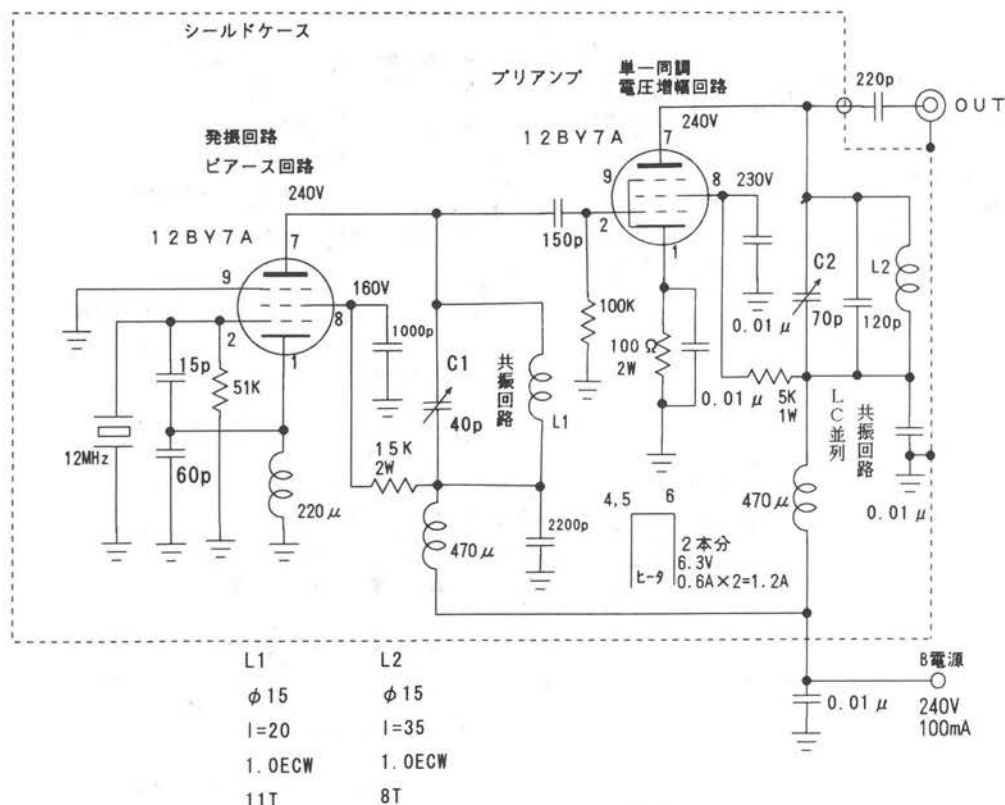


図5 発振回路及びプリアンプ回路図

L, Cの値は装置全体が組上がった時点で最終的に確定したものである。次段を接続していくと最適値(12MHzの波形の出力電圧振幅が最大になるときのL, Cの値)は若干ずれる。

共振回路の2つのエアバリコンC₁、C₂はシールド用シャーシケースに取り付け、シャーシ外からドライバーで調整できるようにしておく。発振器、プリアンプの最終的な微調整はこれらのエアバリコンで行う。特に、シャーシケースの底蓋を取り付けていない場合と取り付けの場合でも共振パラメーター値がずれる場合があることにも留意しておく必要がある。

2.2.4 ミドルアンプ部

回路図を図6に示す。後述する三極真空管811Aを4本用いたメインアンプを駆動するには、最低40Wの入力電力が必要である⁽²⁾。そのための電力増幅回路として、チョーク結合電力増幅回路を採用することとした。真空管はカラービジョン受像機の水平偏向出力管として設計された高パービアンスのビーム出力管である6DQ5を2本並列に用い、十分に余裕のある出力が得られるようにしている。プレートには580Vを、

第2グリッドには17kΩ(2W)の直列電圧降下用抵抗により120Vを与える。そして、グリッドバイアスを0V～240Vの範囲で与えることによりミドルアンプからの出力調整を行い、次段のメインアンプへの入力電力の増減を行って、最終的に本高周波電源の出力調整が行えるようにしている。プレートには、並列に真空管を接続したことによる、出力インピーダンスの低下にともなうパラスティック発振防止用のため、100Ω(2W)の抵抗の周りにエナメル線を巻いて形成した高周波チョーク(RFC、L₄)を接続している。その形状を図7に示しておく。このRFCの取り付け位置は6DQ5のプレートにできるだけ近接して取り付けられる。6DQ5のプレート端子はプレートキャップとなっているのでこれに直付けすればよい。

この回路では、陽極負荷回路にRFCのL₃を用いており、高周波出力のみを、結合コンデンサー470pFを通じて出力回路へと供給している。自作したL₃の概略図を図8に示す。このコイルのインダクタンスは大きいことにこしたことはないが、周波数12MHzで数十μH以上あればよさそうである。直径18mmのベークライトパイプ(肉厚1mm)に直径0.37mmエナメル

線を170回密着巻をして作り上げている。巻初めと終わりは、エポキシ接着剤を塗布してコイルがゆるまないようにする。そして、パイプの両端にフタをつけ、太さ3mmφ、長さ15cmボルトを貫かせ、コイルの固定用とした。コイルの両端には圧着端子を利用した入出力用の金属端子をベークライトパイプにしっかりと固定する。L₃の片方の金属端子に結合コンデンサの470pFを取り付ける。L₄とL₃の結線は空中配線で行えばよい。

出力回路には、 π 型カップラーを用いてメインアンプとの間でインピーダンスマッチングを行うこととした。このカップラーは耐圧1kV、容量250pFのエアバリコン2個と、線の太さ2.0mmのエナメル線を6回巻で、直径5cm、長さ6cmの円筒コイルとしたL₅からできている。キャパスタンス、インダクタンスの大きさは50 Ω 系の π 型カップラーに準じている。詳細については他に譲る^{(1),(3)}。なを、調整に際してLOAD側の容量が足らなかったため470pF(耐圧1.25kV)のセラミックコンデンサを並列接続した。このエアバリコンは最終調整終了後には動かす必要がないので、特に本装置の外部から調節できるようにしておく必要はない。コイルL₃も数種類の巻数ものを用意してコイルを伸縮させてコイル長を変え最適値を見つけ出せば良いだろう。

2.5 メインアンプ部

回路図を図9に示す。回路図のように三極管の格子を接地して入力回路と出力回路とを分離し、接地した格子と陰極との間に入力信号を加え、陽極と接地した

格子との間から出力を取り出す方式の増幅回路を格子接地型増幅器(GG回路)とよぶ。このようにすると、接地された格子がちょうど五極管における遮蔽格子の役割を果たし、高周波増幅作用を阻害する主因のプレート・カソード電極間容量C_{PK}は、通常の陰極接地型の場合に比べて非常に小さくなるので高周波帯域での増幅特性に優れた方式となっている。この増幅回路における特徴の一つとして、負荷に対し信号源と電力増幅間とが直列に入るので、入力インピーダンスが低く、このため陰極接地型の場合に比べて励振用電力がいくぶん大となることである。

811Aの最大出力電力は約150Wなので、811Aを4本パラレルに接続すれば、150W×4=600Wの出力が得られるはずである。が、前述したように811Aのグリッドは接地し、プレートに1000Vを与えることにしたので出力電圧は250V~300V程度となる。

直熱管である811AをGG回路にして使う場合、ヒーター・チョークが必要となる。ヒーター・チョークの役割は、陰極となるヒーターを高周波的に浮いた状態にしつつ、ヒーターに電力を供給し、かつ陰極に流れる直流電流の経路を作ることである。このチョークコイルを参考文献⁽²⁾とは少し変えて、簡単に購入できるフェライトコアに銅線をバイファイラー巻にして実現することにした⁽³⁾。バイファイラー巻とは電流の行きと帰りの両方の導線を2本密着させて(よじれば最高)コアに巻き付けることである。このように導線をコアに巻くと、巻線の中を流れる電流によって生じる磁界は大きさが等しく方向が互いに逆向きに発生するので、合成磁界はゼロとなり磁束は生じないことに

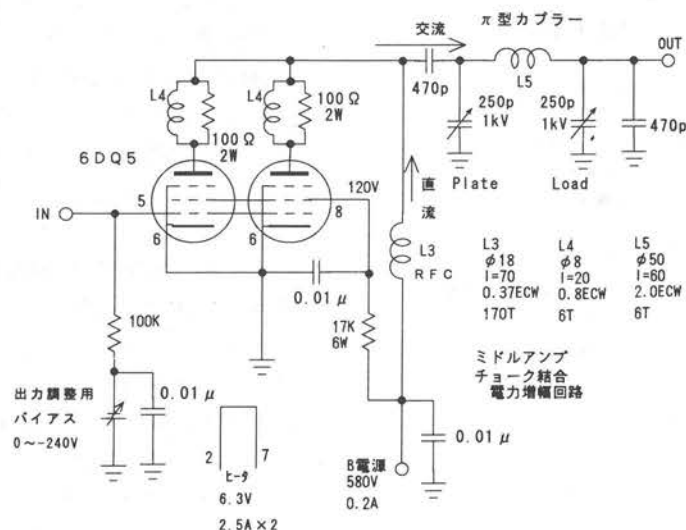


図6 ミドルアンプ回路図

なる。大電流をコアに流してもコアが磁気飽和する心配がなくなる。大電流の直流や低周波の交流は通過するが、高周波は遮断するので、電気的には RFC と同じ役割を果たしていることになる。自作したヒーター・チョークの概略図を図10に示す。この RFC の使用にあたってはヒーターに供給される大きな電流に対する配慮が必要である。銅の巻線の許容電流を 4 A/mm^2 とし、811A のヒーター電流値 16 A が流せるように $\phi 2.5\text{ mm}$ のエナメル線を用いることにした。

GG回路の入力インピーダンスは低いので、RFC として 12 MHz で $500\Omega \sim$ 数 $\text{k}\Omega$ 程度のインピーダンスを示すようにすればよい。アミドン社製のフェライトコア FT114-43 に導線を5回巻けば $15\mu\text{ H}$ となるので、このコアを3つエポキシ系接着剤で張り合わせて重ねたものに導線を5回巻けば、所定のインダクタンス程度となる。フェライトコアの呼称・規格・定数値などに関しては参考文献⁽³⁾ が詳しい。太いエナメル線を裸でコアに巻き付けると、エナメル・コート膜が破損してしまう可能性が大きいので、熱伸縮テープを各々のエナメル線にかぶせてからコアに巻き付けた。

2種のチョーク・コイル L_4 と L_3 の形状、作り方及び配線の方法は各々ミドルアンプのチョークコイル L_4 、 L_3 と同様である。 L_4 のインダクタンスは約 $80\mu\text{ H}$ と見積もっている。 100 W の電力をヒーターだけ

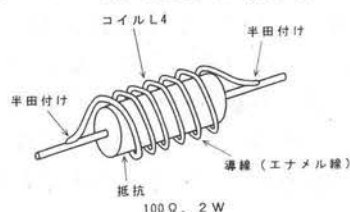


図7 RFC (L_4) の形状

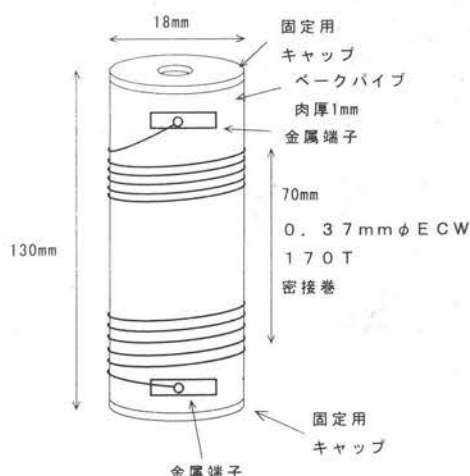


図8 ミドルアンプ用チョークコイル L_3 の形状

で消費してしまうので、真空管の配置は十分に排熱を考慮したものとするべきである。本装置では回路を収めるケースのリアパネルに AC 100V の小型換気ファン (縦 12 cm × 横 12 cm × 厚さ 2.5 cm) を2個取り付け付けた。

2.2.6 π 型カップラー

メインアンプの出力回路には、ミドルアンプ同様に π 型カップラーを用い、負荷との間で自由にインピーダンスマッチングがとられるようにした。プレートとロードのエアバリコンとして、耐圧 1.25 kV 、容量 800 p の同じエアバリコンを使用した。コイル L_5 は太さ 2.0 mm のエナメル線を約7回巻で直径 6 cm 、長さ 8 cm のソレノイドコイルとしている。コイル L_5 としては何種類かの巻数のものを用意しておき、トライアンドエラーで最適な巻数のものとする。実際の使用時に調整できるようにしておくため、ケースのフロントパネルにエアバリコンの回転用ツマミを出しておく。この π 型カップラーの詳細については同じく参考文献^{(1), (3)} にゆずる。

2.2.7 パワー・メーター

出力電力と反射電力をモニターするために、入出力インピーダンスがともに 50Ω で 20 dB のパワーメーターを装備させることにした。図9中の π カップラーからの電力をパワーメーターを通過させ、伝搬電力の100分の1を取り出し、電力の大きさを検出する。パワーメーターの回路は1つの独立した小型のシャーシケースに収めた。パワーメーターの詳細は参考文献^{(1), (3)} に譲る。

入出力インピーダンスを 50Ω としているが、前後の回路のインピーダンスが正確にわからないので、この 50Ω の値が適当であるかは問題のあるところである。負荷のインピーダンスは変化するので、あくまでもこの場合におけるパワーメーターの指示値は大まかであると考えておく必要がある。

2.2.8 調整及び性能試験

回路の調整は、発振・プリアンプ部、ミドルアンプ部、メインアンプ部の3部分に分離し、まず発振・プリアンプの調整を行う。出力電圧振幅が最大になるように素子の選択、LC共振回路の微調整を行う。その後、プリアンプの出力をミドルアンプに入力させる。ミドルアンプ部の π 型カップラーの出力にダミー用負荷抵抗として 60 W 白熱球を接続する。電球の明るさが最大になるように、第2グリッド抵抗値の選択、

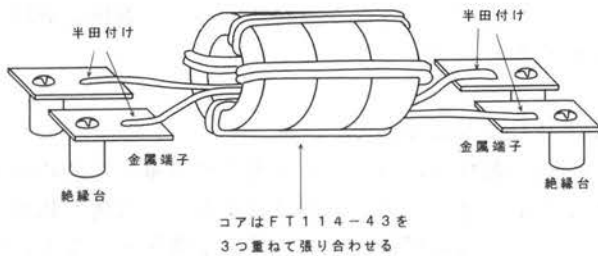


図10 ヒーター・チョーク外形

真空管について

発振・プリアンプ用の12BY7A、ミドルアンプの6DQ5の真空管は他の真空管で十分に代用できる。近年日本国内では真空管の生産は停止していると聞いているが、過去の真空管の互換品などは外国で生産され続けており、秋葉原で簡単に購入できる。

ケースについて

シャーシ類の専門メーカー株式会社リード製KR-5U45(幅48cm×高さ22cm×奥行き45cm)を用いたが、結果として少し小さすぎた感がある。もう少し余裕のあるケースの方が良かった。本装置の総重量は約35kgとなった。トランスがその大半を占めている。

出力アップについて

出力を増加させる方法としては、本文中で触れているように811AのB電圧を1500Vとし、グリッドバイアス電源を付加すればよいであろう。この場合1500Vの供給の仕方、平滑コンデンサの耐圧に若干の対策が必要である。

他の方法としては、811Aの並列接続する本数を4本以上と増やすことである。その場合ミドルアンプの6DQ5も増やす必要があろう。それに従って1kVAのトランスをもっと大きいものに換える必要があろう。が、後者の方法ならば、非常に簡単に出力アップがそのままではかれる。

費用について

使用した部品類で高価なものとして、811Aが1本2万円、1kVAのトランスが1万5千円、ケースは2万5千円があげられる。それ以外の部品は数千以下のものである。要した費用は概算で15万円以下である。

真空管の規格表などについて

かつて、各真空管メーカーから出版されていた真空管の規格表は絶版になっているようである。同じように真空管に関する書籍もオーディオ関係を除くと全く書店には見あたらない。図書館の書庫などで探し出すしかしょうがない。が、オーディオ関係者を対象にした真空管の規格表が2冊ほど現在でも出版されており入手が可能である。その書名を参考文献として付加しておく^{(4),(5)}。オーディオ関係の月刊誌は現役のものが有り、真空管アンプの関しての記事も掲載されている。どのような真空管がまだ販売されているかを確認する手がかりともなろう。

参考文献

- (1) 金野茂男;「高周波スパッタリング装置の製作」;
小山工業高等専門学校 研究紀要第24号、
p159~p166。
- (2)「無線と実験501回路集」、p183、誠文堂新光社
- (3)「トロイダイル・コア活用百科」 山村 英穂著、
p32、p173、p308、p382:CQ出版社
- (4)世界の真空管カタログ:1995年6月、編纂
山川正光、誠文堂新光社
- (5)「オーディオ用真空管マニュアル」:平成4年
発行、一木吉典、ラジオ技術社

(受理年月日 1996年9月25日)