

宇宙通信用大電力クライストロン

根 本 忠 雄*
設 楽 昌 吉**
渡 辺 頴 一***
石 崎 浩 章****
上 田 勲****

1. 緒 言

近年、マイクロ波による宇宙通信の研究、開発が活発になってまいり、これに伴い送信装置の心臓部ともいうべう大電力マイクロ波送信管の研究、開発も盛んに行なわれております。宇宙通信用のマイクロ波送信管としては、大きな出力が必要であることはもちろんであります。が、広い周波数帯域幅を有することも強く要求されております。

従来大電力マイクロ波送信管としては直進形クライストロンが広く使用され大きな成果をあげておりますが、これは直進形クライストロンが高利得、高能率で安定に動作するなど多くの特徴を持っているためであります。しかしながら一方クライストロンは帯域幅が狭いという欠点を持っており、この点が宇宙通信に使用する場合に大きな問題となります。

このため当社においては、今回宇宙通信用として大電力クライストロンの広帯域化の研究、開発を行ない、2 G C帯においては LD-624 を開発し、出力 10 kW 以上で帯域幅 20MC (-3db) を得、また 6 G C 帯においては LD-618 を開発し、出力 2kW 以上で帯域幅 60MC (-3db) をうることに成功致しました。そして LD-624 はすでに製品化され、衛星通信の地上局用として試験中

* 電子部品事業部電子管工場技術部開発課長
** // 開発課設計主任
*** // 開発課員

であります。そこで今回これらのクライストロンについて概要を説明しご参考に供したいと思っております。

2. 設 計 の 概 要

2-1 大電力クライストロンの広帯域化の方法について

宇宙通信用大電力クライストロンには、広帯域であることが要求されます。しかし空洞という集中定数を使用したクライストロンは元来狭帯域増幅器であって、これを広帯域化するには設計上多くの問題があります。

能率をなるべく落さずに広帯域化するためには

I パービアンスを大きくする。

II 電子ビームを細くする

ことが必要です。

ところがこの二つは全く相反する性質のもので、どちらも最適にするというわけにはゆきません。したがってこれだけでは一般には要求される帯域幅はとれないことが多く、利得能率を犠牲にしなければなりません。

この場合には更に

III 空洞の Q を下げる。

IV 空洞のインピーダンス R/Q を極力大きくするような設計を行なう。

V 複同調空洞を使用する。

等の方法があります。しかしこれらの方法にはそれぞれ欠点があり、うまく利用しないと逆効果になります。

すなわちⅢについては取扱う電力が大きいためQを低下させることにより熱が発生し、冷却の問題が新たに生じてきます。Ⅳについては、R/Qなる定数は空洞の構造で定まるものでむやみに大きくできるものではなく限度があります。

したがって R/Q を大きくするような設計を行なうというよりも R/Q を小さくしないように設計するといった方が適切かもしれません。

Vは今回説明するような周波数の高い内部空洞型クライストロンでは構造的に無理をきたすと同時に調整がはなはだ面倒になります。

1000 Mc/s 程度の周波数で使用する比較的大型の、しかも空洞外付型のクライストロンではⅣおよびⅤの方法は割合簡単に利用できます。見通し外TV回線として有名なフロリダキューバ間の装置に使用されたクライストロンにはこの方法が使用されています。

以上クライストロンの広帯域化の方法について説明しましたが、それでは当社の宇宙通信用大電力クライストロンにはどのような設計を行なったかを以下に説明致します。

2-2 LD-624 の設計

LD-624 はすでに見通し外通信で活躍しているVA-800を母体とし、それに広帯域化の設計を施したものです。VA-800とLD-624(目標値)の仕様は下記の通りです。

	VA-800	LD-624
カソード	電子衝撃型トリ エーテッドタン グステン	含浸型
帯域巾	8 Mc/s (3db) (高能率同調)	14 Mc/s 以上 (1db) (広帯域同調)
出力	10 kW	10 kW 以上
利得	45 db	30 db 以上
周波数	1,700 Mc/s ~2,400 Mc/s	1,700 Mc/s ~1,800 Mc/s
ビーム集束	VA-1520型	同 左

電磁石

2-2-1 電子銃

カソードには、電子衝撃加熱型トリエーテッドタングステンカソードにくらべて、構造が簡単で、取扱が容易であり、しかも消費電力が少なくすむ含浸型カソードを採用しました。2-1 項に述べたごとく、広帯域化のためには、パービアンスが大きいことが望ましいのですが空洞構造、ビーム集束条件をVA-800の場合と大幅に変えないこととすると、ビーム透過率の関係であまり大きくすることは困難です。ピアースの理論により計算しますと、集束磁界はそのままで、パービアンスを $1.25 \times 10^{-6} \text{A/V}^{1/2}$ 程度にできることがわかりました。ただ実際には、陽極孔の影響で計算からはずれますので、カソード付近の電極形状を調整する必要があります。

2-2-2 空洞部

2-1 項に述べたごとく広帯域にするためにはいろいろの方法があります。

空洞に外部負荷を結合してQを下げる方法は外部空洞型のクライストロンでは割合に容易であり、結合度も自由に変えられるため研究的にも興味があります。しかし中間空洞に下げる負荷の電力損失がこの程度の球では数百Wにもなることがあり、空洞内蔵型の場合は真空気密で大電力を取り出す構造が問題となり、実用上からも好ましくありません。

空洞の内面に特殊な損失物を塗付してQを下げる方法は二、三行なわれています。この方法は複雑な形状の空洞では製作がむずかしく、またガス放出などの問題があります。

結局LD-624では、空洞の材料として銅よりも損失が大きく、熱伝導率が比較的に良好で非磁性の材料を用い、空洞のQを下げることにしました。

2-2-3 入出力回路

入力結合回路は入力電力が数W程度であるので円筒セラミックを用いた同軸構造としループで空洞に結合します。空洞のQを下げる点からはなるべく密結合にして、external Qを下げた方がよいのですが、入力回路の整合

が悪くなります。入力回路の整合はビームの条件、集束磁界の状態で変化するので結合度が可変でない空洞内蔵型では特に設計上問題であります。ここではビーム電圧 16 kV の標準使用状態付近で、電圧定在波比が 2 を越えることなく、しかもなるべく密結合になるよう決めました。

出力回路は導波管の途中に円筒部を入れ円板状セラミックによるシール構造になっています。出力回路の結合度は能率および帯域幅に大きく影響しそのクライストロンの性能を左右するほど重要です。VA-800における実験をもとに、パービアンスを上げることによるビーム負荷の増加および出力空洞のQが帯域幅におよぼす効果等を検討した結果ある程度能率を犠牲にして結合度を大きくとることにしました。各空洞のQを以下に示します。

第 1 空洞	280
第 2 空洞	490
第 3 空洞	590
第 4 空洞	85

2-3 LD-618 の設計

LD-618は通産省の応用研究補助金を受けて開発したもので、目標値は下記の通りです。

帯域幅 (-3 db)	50 Mc/s 以上
出力	2 kW 以上
利得	30 db 以上
周波数	6,000 Mc/s 帯

2-3-1 電子銃

先に説明したごとく、パービアンスは大きい方が良いのですが、ビームを細く出来なくなります。したがってここでは今までこの周波数帯において一般に使用されているパービアンスの 1.5~2 倍である $1.5 \times 10^{-6} \text{A/V}^{3/2}$ を採用することとしました。

また直流入力は 10 kW とします。これは広帯域化のため能率が低下することを考えに入れたためです。したがって目標値は下記のごとくなります。

ビーム電圧	8.5 kV
ビーム電流	1.2 A

カソードにはカソード電流密度が大きいので含浸型を使用することにしました。

2-3-2 空洞部

いろいろ検討を行なった結果 5 空洞にすれば 50 Mc/s (約 1%) の帯域幅をとることは、特に空洞を複調同にしたたり、Q を低下させたりしないでも可能であるという結論に達したので、各空洞はごく一般的な形をしています。ただし支障のない範囲でQを低下させる方法はとってあります。同調法は空洞のインピーダンスを低下させないため、C を変化させる方法を避け、L による方法すなわち空洞の側壁を動かす方法を取りました。また周波数が高いため空洞外付型ははじめから考慮せず内蔵型に決定して設計を進めました。

2-3-3 入出力回路

入出力結合用の窓にはすでに 2000 Mc/s 帯で好結果を得ている円板状セラミックを用いる方法を採用しました。この窓は広い周波数範囲にわたって整合が比較的良くとれかつ通過電力容量が大きいという長所を持っています。製造がむずかしいという欠点もありますが当社ではこれを克服して、安定に生産することに成功しています。

出力回路の結合度は能率を大幅に左右する重要な要素です。特に空洞内蔵型のクライストロンでは、あとで調節することができませんので設計の良し悪しは、球の性能を決めてしまいます。

一方出力空洞の周波数特性は、球の周波数特性を決定してしましますが、これがやはり結合度で左右されます。一般に kW 程度の出力の広帯域クライストロンでは能率、帯域幅の両方から要求される結合度にはかなりの差があって、一致させることは出来ません。これを両立させる方法として複調同出力回路を使用することが考えられますが、いろいろ欠点もあり、この場合には採用しませんでした。LD-618 では電子銃のパービアンスが $1.5 \times 10^{-6} \text{A/V}^{3/2}$ と比較的大きいこと、帯域幅が約 1% であることによりこの差は 2 倍程度になります。そこで能率を若干犠牲にして帯域巾を重点に設計し、出力空

のQが110になるよう結合度を定めました。

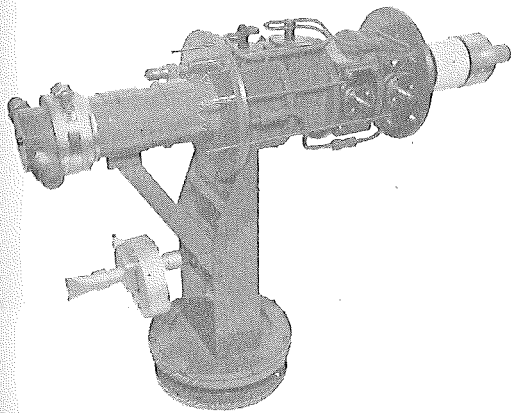
入力回路の結合度は整合の点から決定されます。

各空洞のQを以下に示します。

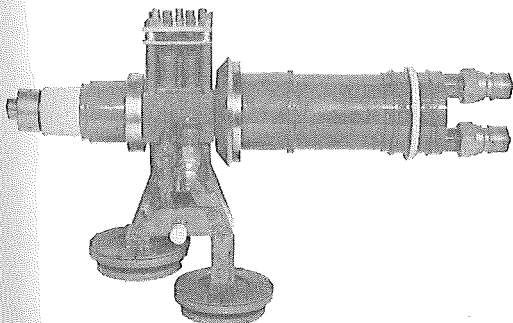
第1空洞	220
第2空洞	570
第3空洞	570
第4空洞	570
第5空洞	110

3. LD-624, 618 の構造

第1, 2図にそれぞれLD-624, LD-618の外観を示します。外観的には一般の大電力クライストロンと特に変わった点はなく、電子ビームを作り出す電子銃部、高周波と電子ビームとが相互作用を行なう空洞部、使用済の電子を集めるコレクタ部、および高周波入出力部の4部



第1図 LD-624



第2図 LD-618

分からできています。

電子銃部にはカソード、ヒーター、ビーム形成電極等の多数の部品が組み込まれていますが、LD-624, 618ではこれらの部品の形状、配置を十分検討し、バイアス電源等を使用しなくても良好な電子ビームが得られるようになっています。したがって外部的には、単なる二極管となっており、使用法が簡単で、クライストロン用電源はヒーター電源とビーム加速電源のみでこと足ります。絶縁部分はすべてセラミックでメタル-セラミック封止による強固な構造になっています。

空洞部にはLD-624は4個、LD-618は5個の空洞が組込まれ、更に一切の同調機構まで組込まれています。したがってクライストロンの付属装置として必要なものは集束用電磁石のみです。

コレクタ部は円錐状のコレクタ本体と、コレクタを空洞部と絶縁するためのセラミック部と、冷却溝およびそのアダプタとから構成されています。コレクタが円錐状になっているのは、電子ビームが当たる面積をなるべく広くし、単位面積当たりの電力損失を減らすためです。またコレクタを空洞部から絶縁することにより、ビーム透過率を測定し、クライストロンを保護することができます。

これらの3部分の境界には鉄製のポールピースがろう付されており、集束用電磁石に取付けた時に、ビーム集束のための磁気回路を構成すると同時に、クライストロンの支持物をかねるようになっています。

入出力回路は、電力の大きい出力側にはどちらも導波管を使用しています。入力側は電力が小さく数W程度ですから、2000 Mc/s帯のLD-624では同軸管を使用し、スペースを節約していますが、6000 Mc/s帯のLD-618では周波数が高いので、同軸管では問題が多く、また導波管もさして大きくないので出力回路と同様導波管を使用しました。

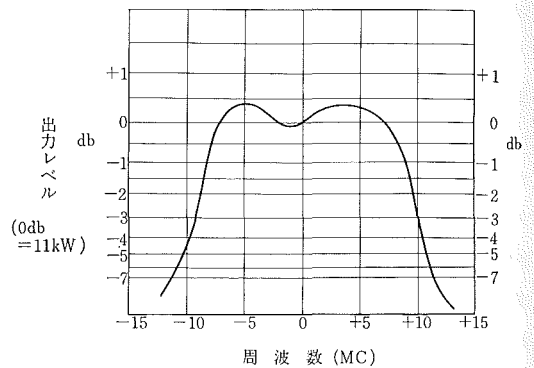
4. 特 性

LD-624, LD-618の特性は次の通りで目標を十分満

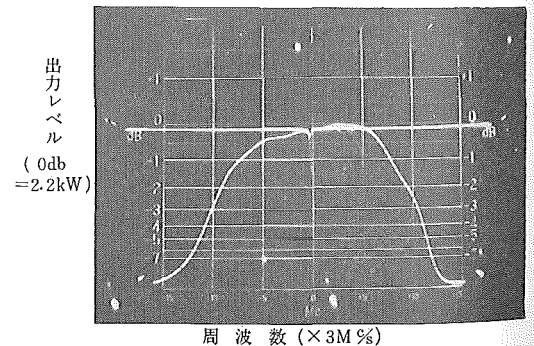
足する結果が得られました。

	LD-624	LD-618
電気的特性		
最大周波数	1800MC	6500MC
最小周波数	1700MC	6100MC
ビーム集束	専用電磁石	専用電磁石
機械的特性		
陰極の種類	含浸型	含浸型
冷却方式	水冷および強制空冷	水冷
冷却水量	コレクタ 30 l/min ボデー 2.5 l/min	10 l/min 1.0 l/min
冷却水圧力	コレクタ 5 kg/cm ² ボデー 5 kg/cm ²	2 kg/cm ² 2 kg/cm ²
冷却風量(カソード封入部)	800l/min	—
最大寸法	675×450	460×280mm
重量	約 25 kg	約 10 kg
空洞数	4	5
取付位置	垂直(カソード端下)	同 左
イオンポンプ		
排気速度	1 l/sec	—
動作例	広帯域同調	同 左
周波数	1725MC	6180MC
出力	11.0kW	2.2kW
入力	5.0W	600mW
周波数特性	第3図	第4図
バンド巾 (1db)	17MC	45MC
(3db)	20MC	60MC
ビーム電圧	16.0kV	8.5kV
ビーム電流	2.4A	1.25A
ボデー電流	90mA	50mA
ヒータ電圧	3.5V	7.0V
ヒータ電流	16.5A	9.0A
負荷 VSWR	1.1	1.1
入力 VSWR	1.8	1.5
集束電磁石電流		

上部コイル	6.0A	16A
中央コイル	3.5A	—
下部コイル	0.5A	15A



第3図 LD-624 周波数特性



第4図 LD-618 周波数特性

5. あとがき

以上最近当社において開発された広帯域大電力クライストロンの概要をご説明致しましたが宇宙通信の分野は今後更に大きく発展してゆくことが予想されますので、これに使用されるマイクロ波送信管も今後更に出出力広帯域化への研究、開発が続けられてゆくことと思います。終わりに本開発に当たりご指導をたまわった西尾事業部長代理、池沢工場長、見目技術部長に深謝するとともに製作にご協力をいただいた関係諸氏に深く感謝する次第であります。

参 考 文 献

1. 根本他：6 G C 帯広帯域大電力クライストロンの
試作
電気通信学会マイクロ波真空管研究会資
料 1963-7-15

2. J.R. Pierce: Theory and Design of Electron
Beams
D. Van Nostrand Co.
3. E.L. Ginzton: Microwave Measurements
McGraw-Hill Book Co.

