

DEVELOPMENT OF A 150 MW S-BAND KLYSTRON

S. Anami

National Laboratory for high Energy Physics

ABSTRACT

The research and development of a 150 MW klystron is now under progress at Stanford Linear Accelerator Center since April 1981, which is based on the Japanese-U.S.A. collaborative research project. This report summarizes the work accomplished at the SLAC Klystron Department.

1. まえがき

150 MW クライストロンの開発は日米科学技術協力事業に基づいて昭和56年4月より3ヶ月の計画で開始された。既存するSバンドパルスクライストロンの内で最大のもめはSLACのXK-5 クライストロンであり、その最大出力は30 MWである。通常のパルス中30 μs の運転ではほとんど問題がないが、SLED IIでパルス中5 μs の時には、このXK-5もそれほど信頼性の高いものでは無い。主なトラブルは電子銃や出力空洞での放電、RF窓の破損などである。この様な現状の中で、最大出力が今まで約4倍近い150 MWのクライストロン (Table 1) を開発するには相当に困難な問題を解決しなければならぬ。

この開発の日米協力は米国側がSLAC、日本側はKEK、東芝、三菱電機の三者である。開発は全てSLACに於いて行われており、現在日本側からは渡辺氏(三菱)及び岡崎氏(東芝)の二人が技術研究員として派遣されており、それぞれRF Windowの開発、Test Diodeの設計及び出力空洞の計算機シミュレーションを担当している。SLAC側はG. T. Komrad

以下5名のスタッフが参加している。ここで報告される内容はすべてSLACで行われた開発研究の成果であり、毎月送られて来るMonthly Report 及び四半期ごとのQuarterly Report をまとめたものである。

2. 電子銃

150 MW クライストロンの電子銃の基本設計はSLACのスタンダード クライストロンであるXK-5を基とし、又、Varianの1/4W クライストロン(ビーム電圧1 MV, パービアンス 2×10^6 A/V^{1/2})を参考としている。パービアンスはXK-5と同様 2×10^6 A/V^{1/2} であり、印加電圧は450 kV と非常に高い。この為、如何にしてアノードや集束電極表面の電界を下げるかにその設計の主要な点がおかれている。Table 2 はその最終結果を示すものであり、比較のためにXK-5や他

RF Power (peak)	150 MW
Voltage (peak)	450 kV
Beam Current (peak)	600 A
Microperveance	1.98
Beam Power (peak)	270 MW
RF Pulse Width	1.0 μs
PRF	180 pps
RF Duty Factor	0.00018
Average RF Power	27 kW
Beam Pulse Risettime (90%)	0.6 μs
Beam Pulse Falltime (90%)	1.2 μs
Beam Pulse Width (90.7%)	1.8 μs
Average Beam Power	77.8 kW (87.5 kW)
RF Gain	50 db (Min)

Table 1 150 MW klystron specifications

のクライストロンの電子銃も共に記載されている。電極表面の最大電界は $\ll 50$ kV印加の150 MWクライストロンの方が270 kV印加のXK-5よりもむしろ低くなっていることが著しい成果である。形状の違いは図1に示されている。Low Gradient Gunと云われる今回の電子銃はアノードや集束電極の尖がりか相当丸くゆるやかになっていることが分かる。

	SLAC SK-5	SLAC 50 MW	60 MW	150 MW	
Peak Beam Voltage	KV	270	315	338	450
Peak Beam Current	A	280	393	393	604
Cathode Radius	cm	4.000	3.982	4.502	5.194
Cathode Loading	A/cm ²	5.57	7.11	6.17	6.95
Cathode Loading Uniformity (from edge to center)		1.2:1		1.44:1	1.44:1
Drift Tube Radius	cm	1.429	1.429	1.624	1.875
Max. E on Anode	KV/cm	270	208	192	222
Max. E on Focus Electrode	KV/cm	292	225	180	208

Table 2 Characteristics of the 150 MW klystron gun combined with other gun designs for comparison

3. テスト ダイオード

テストダイオードを製作する主な目的は電子銃そのもののラスト、特に耐圧に対するチェック及び新規モジュレータのラストを行うためのものである。電子銃は前回の設計値に従っている。コレクターは新しく設計されたもので、コレクター表面での平均単位損失は 167 W/cm^2 、最大単位損失は 220 W/cm^2 以下に抑えられている。設計が10月に終了し、本年の2月から組立が始められた。カソードアセンブリの温度測定がbell jar内で行われ、ヒータ電力360 Wで 780°C 、480 Wで 840°C となり、熱の均一性は 50°C 以下であった。真空加熱及びカソードのオキサイドコーティング後、真空シールされ $400 \sim 550^\circ\text{C}$ のベキングプロセスを経て5月にテスト用ダイオードとして完成した。既に完成した新モジュレータを用いてエージング及びテストが現在進行している。ビーム電圧250 kVでの測定ではパービアンスは $2.2 \times 10^{-6} \text{ A/V}^{3/2}$ であり、設計値より高い値であった。7月現在、ビーム電圧350 kVまで印加され、真空度は $1 \times 10^{-8} \text{ torr}$ 、ビームのアノード透過率は99%以上である。しかし、360 kV印加でガンオシレーションの徴候が現われてきており、これ以上の電圧が掛けられない状態である。現在色々の検討と対策が講じられている所である。

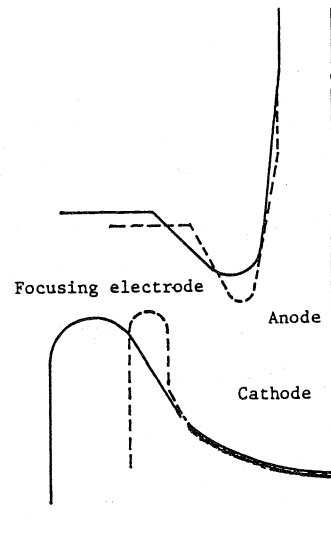


図1. 電子銃の断面図。実線：低電界型、破線：XK-5

4. モジュレータ

150 MWクライストロンをテストするためのモジュレータはSLACの標準テストスタンドとほとんど同じタイプのものである。交流入力 480 V 3相で、variable voltage transformerによって $0 \sim 560 \text{ V}$ 連続可変となっている。高圧トランスは Δ -Y結線 560 V 入力に対して 17.5 kV であり、整流器には6Aダイオードをスタックしたものを、平滑用には5Hのインダクターを使用し、直流出力は 23 kV である。チャージングチョークは 0.75 H で、PFNのコルデンカー

には $0.026\mu\text{F}$ を 20 個用い、出力インピーダンスは約 2 Ω である。又、サイラトロンは ITT-CH1191 (KV-275C 相当品) を 2 本並列で使っている。パルストランスの設計値は Table 3 に示されている。モジュラーの部品、キャビネットなどは外注であるが、その組立、配線及び調整は SLAC の Electronics Department と Klystron Department で行われた。組立は今年の 9 月より開始され、今年の 3 月からテストが進められている。その結果、PFN のコンデンサ容量の良くなるものは取替され、配線を短くするために配置変更などを行って波形調整をしている。現在の所、負荷であるテストダイオードの戻係上出力電圧は 350KV までしかテストされてはいない。観測された出力波形は、立ち上がり時間 $1.0\mu\text{s}$ 、flat top の巾 $1.0\mu\text{s}$ 、立ち下り時間 $2.0\mu\text{s}$ であった。

Turn ratio	1:20
Voltage (100% to 90%)	450 KV
Rise time (10% to 90%)	0.4 μs (max.)
Flat top duration (100% amplitude)	1.0 μs
Pulse top ripple	$\pm 0.5\%$ (max.)
Droop of flat top	2.5% (max.)
Pulse fall time (90% to 10%)	1.2 μs (max.)
Pulse repetition rate	240 pps (max.)

Table 3 Specifications of the pulse transformer

5. 出力空洞

150MW クライストロンの出力空洞のギャップ電圧は 450KV 程度が予想され、Transit angle が 1 rad の single gap の場合、その gap 間隔は 1.4cm とになり、平均電界が 320 KV/cm となる。通常、ギャップの先端では多少とも平均値の 2 倍以上の電界となるため 640 KV/cm 以上となってしまい、放電を避けることがほとんど出来なくなってしまう。この問題を解決する一つの方法として double gap の空洞が考えられた。二つの gap の impedance と phase とを適当に選ぶことによって、電界を single gap の半分にするということが可能となる。double gap の空洞は π -mode を用いており、二つの空洞は約 90 度に広がる coupling slot によって結合している。この 150MW クライストロン用出力空洞を実際のクライストロンでテストするため、30MW 出力用に設計した空洞が XK-5 に組込まれた。最初のもものは single gap に比べて効率、利得とも余り良くはなかったが、次の改良型では single gap とほとんど同程度の性能を得ることが出来、ほぼ満足するものであった。しかしここで大きな問題として、coupling slot の近傍の gap で放電という現象が起ってきた。最初 RF の出力波形で観測されたが、クライストロンを分解することによって判明した。この原因は coupling slot を流れる電流によって電界の軸対称性がくずれ、強い径方向電界を生じ、ビームが曲げられ、壁面に当り、放電を起すものと考えられた。このことは、cold test の結果、slot の近くの gap では他の所に比べて電界の強さが 2 倍もあり、又、出力空洞の集束磁場を強化することによって放電を止めることが出来ることと云うことで実証された。この放電と云う現象は、当初 double gap の最大のねらいである gap 電界の低減に及ぶこととあり、致命的なことである。軸対称性を良くするために色々は検討やテストが行われたが、現在、未解決のまゝである。一つの策として π -mode を 2π -mode にすれば coupling slot での電流が互いに打消し合うため軸対称性がくずれなくなるとは思いが、 π radian が長くなってしまい、又、ビームのベンチを最良の状態に 2π radian にわたって保つことは難しく、その分だけ効率が下がってしまうのでは無いかとも思われる。この様な事柄から、最初の試作クライストロンには double gap を用いること

が出来ず, conventional の single gap が採用されることになった。使用される空洞の構造は図2に示されている。gapの先端は5Rでかなり大きくなっており, LALAを用いたコンピュータ シミュレーションによると, 最大表面電界はgap電圧1kVに対して0.59kV/cmとになっている。ビームと空洞との相互作用を計算するシミュレーションの結果では, 空洞のインピーダンス1314Ωに対してギャップ電圧548kV, 効率46.5%であり, gap表面での電界は325kV/cmとなり, single gapでも何とか使用出来るようである。

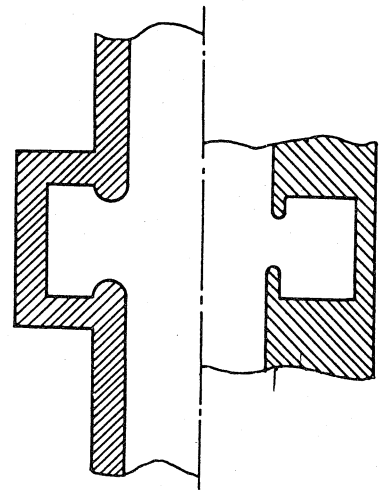


図2. 出力空洞断面図. 左側: 150 MWクライストロン, 右側: XK-5クライストロン

6. RF Window

RFセラミック窓は150MWクライストロンを開発する上で最も重要なものの一つである。XK-5に用いられているセラミックは直径85φ, 厚み3.2mmであり, タタンコーティングによって30MW, 3μsの使用に充分耐えているが, 5μsのパルス巾に対しては多少のトラブルがある様である。又, Resonant Ringの実験の結果では120MW 2μsでセラミック表面での放電がかなりの温度上昇が観測され, 絶対射負荷に対しても120MW以上で使用することが出来ないことが示されている。

今回の開発では, 窓の形状を変えて耐大電力用とする方法とセラミックの材質及びコーティングによって耐大電力用とする方法とが進められている。形状を変える方法としては, セラミックの直径を125φにする Large Pillbox Window, 窓の両側に reactive element を挿入してセラミックの所で局部的に電界を下げる Enhanced H-Field (Weakened E-Field) Window 及び窓の部分で電波を円偏向させて発熱の均一化を図り, fieldの強さを effective に $1/\sqrt{2}$ にしようとする Circular Polarized Field Window など考えられている。これらの窓はそれぞれ試作や測定が繰り返えされ, 一部は Resonant Ring で大電力テストが行われている。図3は Large Pillbox type と Polarized Field type とを組合せた窓の構造と特性を示すものである。図の矩形導波管のポスト及び125φ円形導波管のアイリスはそれぞれ整合のための素子であり, 85φ円形部のポストは直線偏向を円偏向に, 円偏向を直線偏向に変換する変換器である。この窓は現在, 大電力テスト用の

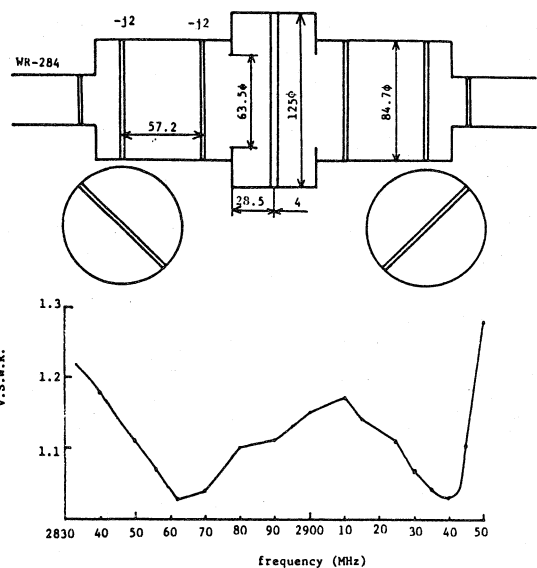


図3. 円偏波型 large pillbox window

ものが製作中である。又、セラミックの熱的考察も進められ、厚さや直径を変えに場合の温度上昇変化、平均電力や周囲温度による影響などが研究されている。

7. Coating System

セラミック面のコーティングは二次電子放出による multipactor を押えるために行われる。コーティングの材質としてはチタンが、厚さとしては 50 Å 程度が良いと云うことが今までに分っている。今まで XK-5 用として使用してきた sputtering system は 150 MW 用として充分だったため新しい装置が製作された。この新しい sputtering system では相当に大きな窓でもコーティングが可能である。真空ポンプには cryopump を用いて 10^{-8} torr のオーガーの真空度に到達することが出来、コーティング材 (Ti_xO_y , TiN など) に不純物が混入しない様になっている。RF sputtering (周波数 13.56 MHz) も出来る様になっているが、現在は DC sputtering (が行われている)。

sputtering は $15 \sim 20 \times 10^{-3}$

Torr の Ar と O_2 または N_2 の混合ガス (混合比は 10:1) 中で直

流電圧 2~4 kV を掛けて、セラミック表面に Ti_xO_y または TiN と coating している。この新しい装置を使って XK-5 の窓に色々な条件のもとで coating が試みら

れ、Resonant Ring でその評価

を行った。その結果、Table 3 に示されるように TiN の方が Ti_xO_y よりも充分 multipactor を押えていることが明らかになった。この Table には記載されていないが、最近 TiN の coating で 200 MW、50 kW 時にセラミックセンターの温度が $70^\circ C$ であったと云うことが報告されている。

Window No.	Coating Material	Pulse Length (μ sec)	Peak Power (MW)	Average Power (kW)	Window Edge Temp ($^\circ C$)	Window Center Temp ($^\circ C$)	Observations and Comments
705C	Ti_xO_y	2	143	34.3	85	98	Red Glow
		2	204	49	102	120	Glow, Flashing
		6	85	61	112	144	Bright Glow
711B	TiN	6	88.5	64	140	150	Dark
788A	TiN	2	204	49	75	92	Very Faint Glow
		6	136	98	122	145	Dark
787A	TiN	2	184	44.1	105	150	Dark

Table 4 Coating test results of XK-5 klystron window

8. Resonant Ring

この resonant ring は 1960 年代に行われた SLAC の window 開発時に製作されたものである。今回の 150 MW クライストロン開発に合わせて overhaul を行い、真空系や測定系などが強化された。入力結合器には 14 dB の方向性結合器を用いており、loaded Q は約 5000 で、power gain は 13 dB である。最大到達 power は phase shifter の放電のため 160 MW であったが、short plunger の後面に電波吸収体を付けることによって 200 MW まで上げられる様になった。運転中の真空度は約 10^{-8} torr であり、 5×10^{-7} torr 程度まで悪くなる場合はセラミックの breakdown threshold が下がってくる。放電は X 線のモニターによって検出され、又、運転中のセラミックの様子は view port より観測されている。