

S. Fukuda, J. Tanaka, I. Sato, H. Baba, S. Anami and H. Matsumoto

National Laboratory for High Energy Physics

Abstract

To investigate the high-power and high-efficiency klystron for the Photon Factory Injector Linac, computer simulation is made. One-dimensional disk model with a confined flow assumed is applied to the analysis of the latest SLAC klystron (XK-5). This model also includes space charge force and relativistic effects. The interaction between each intermediate gap and beam is treated as lumped coupling including a beam loading conductance. Calculation is performed at the saturation output point with the various parameters of XK-5. The computed results indicate that the conversion efficiency is about 58 %, the peak output power more than 40 MW, and the gain about 53 dB. This shows that the specifications of the klystron desired for the Photon Factory Linac are attainable by using the design values of XK-5.

§1 序

現在進行中の放射光実験施設・入射器用 2.5 GeV ライナックの大電力マイクロ波源としてのクライストロンについて、計算機による、効率や利得のシミュレーションを行った。ここではその結果について報告する。

一般に電子線型加速器のマイクロ波源であるクライストロンに要求される事は多岐に渡っている。即ち (i) 位相変調の振巾変調が極力小さい事(エネルギー値及び広がりへの影響), (ii) RF 利得が大きく且つ安定である事(共振系の負担を軽くする), (iii) 寿命が長く且つ信頼性が高い事(枚々の場合、40 台使用), (iv) 高効率である事(性能向上, 省電力化等), 等の要求に答える必要がある。従来日本で使われて来たクライストロン(例へば RCA-8568, 三菱電気 PD-2014 etc.) は最高出力 27 MW クラス程度の物であり、放射光実験施設・入射器で用いるクライストロンとしては、上記の要請に従い、表 1 の様な仕様に従って検討及び試作を行う予定である。事実 SLAC に於ける長年のクライストロンの改良の結果、現在

表 1

型式	五空洞内蔵形
最大ビーム電圧	270 KV 以上
最大ビーム電流	295 A 以上
パービアンス	2.10 ± 0.1 μA/V ²
最大出力電力	30 MW 以上
効率	40 % 以上
利得	57 dB 以上
集束方式	永久磁石集束

に於て、尖頭出力384W, 効率約50%, 飽和出力で利得50dBという高性能のものが実現している。しかも全長やパービヤンスを変えず(従って周辺装置や電源には互換性がある)、ドリフト長を変えるだけで高能率化をはかっている。又集束に用いる軸方向磁場も同一の形で良い様になっており、永久磁石と棒磁石を用いたカソード面上の若干の磁場補正で互換性が保てる様になっている。以上の観点から今回の仕様を定め、そのクライストロンの構造の各種パラメータ(例へば、各空洞の同調周波数やドリフト長等)から果してどれだけの性能が得られるか否か、簡単なシミュレーションを行った。

§2 クライストロンの高能率化について

従来、クライストロンの設計に当っては、如何に効率を上げるか、及び直接加速器とは関係は存いが、如何に広帯域化を実現するかに重点がおかれ、計算機の発展と共に、大信号時の非線形な電子運動の振舞のシミュレーションが盛んになった。(文献[1]) その結果、高能率化(80%以上)や広帯域化が実現されて来た。前者だけに話を限ると、そのアプローチの方法としては次の様なものがある。(i)第2高調波に同調するバンチー空洞(第2空洞)を設け、それにより出力空洞のバンチ状態を強化する(文献[2])。 (ii) (i)の代わりにバンチー空洞(第2空洞)後のドリフト長(l_{d3})を長くとり、空間電荷の効果を用いて同一の効果をも上げる(文献[2][3])。 (iii) (ii)と同じ働きであるが、SLACの様に第3・第4空洞間のドリフト長(l_{d4})を長く取る事で高能率化をはかると(文献[4])。ここでは拙々と関連する(iii)の方法についてのみ考える事にする。文献[4]によると l_{d4} を長くすればする程効率が上がるため、最近の50%近い効率のものは今の全長からしてほぼ限度に近い状態にまで長くしている。その結果効率は、1963年の32%から1970年には51%迄上昇している。今回のシミュレーションとしては上記(iii)の方法による最新のクライストロン(型名XK-5)に関する、飽和出力時の効率及び利得について行った。

§3 大信号時クライストロンの理論と計算結果

(a) 理論 ; 計算は、軸方向だけの一次元ディスク模型(文献[1])に基づいている。更にコンパウンド・フローの電子流を仮定し、空間電荷効果及び相対論を考慮している。独立変数は、入力空洞へ入射する各ディスクの位相 φ_j ($j=1\sim m, \varphi_j = \frac{2\pi}{m}$)及び距離変数 $y = \frac{1}{2} \frac{\omega}{v_0} z$ (但し $\alpha = \frac{M\sqrt{V_0}}{V_0}$ は変調指数, V_0 は間隙電圧, V_0 は直流電圧, v_0 は直流速度, z は軸方向長)で

ある。計算は Los Alamos の P.J. Tallerico (文献[3]) と同じ手法を用いたが、ここでは空間電荷を考慮した理論式は紙面の都合上省略する。プログラムのチェックは文献[3]の数値例で確かめた。各中間空洞でのビームとRFの相互作用は間隙が点であるとし、有限間隙長の効果はビーム結合係数 M を用いて補償した。従って、各間隙で

$$\Delta p_j = \alpha (p_0 - 1) \sin(\varphi_j + \phi_0 - \theta_j)$$

だけビームの運動量に変化し速度変調を受ける。(但し $p_0 = 1/\sqrt{1 - (u_0/c)^2}$, φ_j は j 番目のディスクの間隙での位相, ϕ_0 は各空洞アドミッタンスの位相, θ_j はビームの有する基本波成分の位相)。故にこの計算では、変調指数 α 及び位相 ϕ_0 を各空洞毎に計算又は仮定して、全長の振舞を調べる事になる。ここで間隙電圧 V_g 及び位相 ϕ_0 は

$$V_g = I_c / Y = \frac{(R/Q) Q_L I_c}{\sqrt{1 + Q_L^2 (f_0/f_m - f_m/f_0)^2}}$$

$$\phi_0 = -\arctan \{ Q_L (f_0/f_m - f_m/f_0) \}$$

である。(但し I_c は誘導電流, Q_L はビームローディング時の負荷 Q , $f_0 = 2856 \text{ MHz}$, f_m は各空洞の同調周波数)。この場合若干の曖昧さを伴うのは、ビームローディングを図7の様な等価回路に於て、ビームローディングコンダクタンス $G_B = \frac{1}{(R/Q) Q_L}$ として扱うが、この G_B をどの程度に取るか、又大信号時に図7の様な等価回路の取扱いが正しいかという点

である。又クライストロンの効率 η は T.G. Mirman によって提唱され広く用いられている merit figure をもち、効率を代表した (文献[5])。この merit figure は

$$MF = \frac{1}{2} \left| \frac{z_1}{I_0} \right| \left(\frac{E_{min}}{E_{max}} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} \left| \frac{z_1}{I_0} \right| \left(\frac{P_{min}}{P_{max}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

で与えられ、 (z_1/I_0) (ビームのもつ基本波成分) は計算で求められ図2に示してある。

(b) 計算結果; 計算機によるシミュレーションでは、飽和出力時に於ける振舞を中心に行った。図2に XK-5 に関する SLAC のデータが示されている。この図から飽和出力は 150 ~ 200 W 入力の時である事が分る。(但し $V_0 = 270 \text{ kV}$, $I_0 = 306 \text{ A}$) 従ってここでは $P_{in} = 200 \text{ W}$ とした。この計算に用いたクライストロンのパラメータは表2に示した。実際にはドリフト

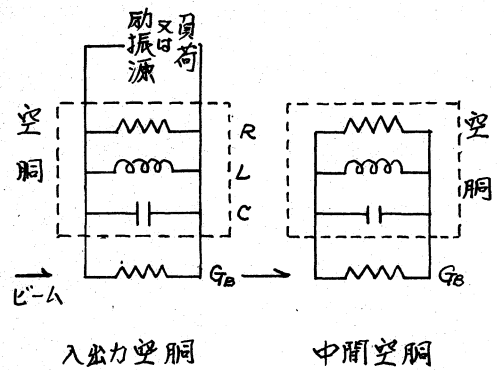
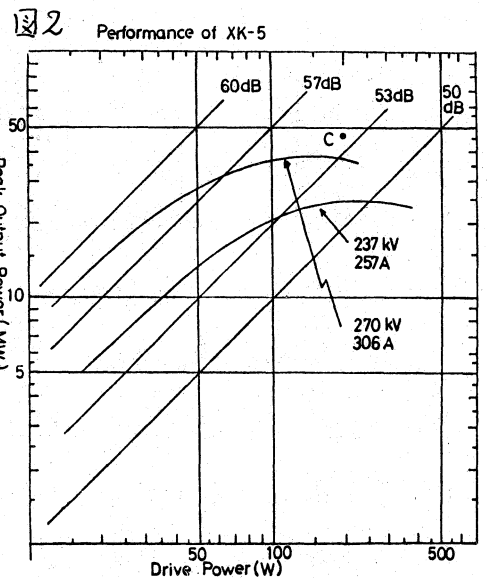


図1 等価回路



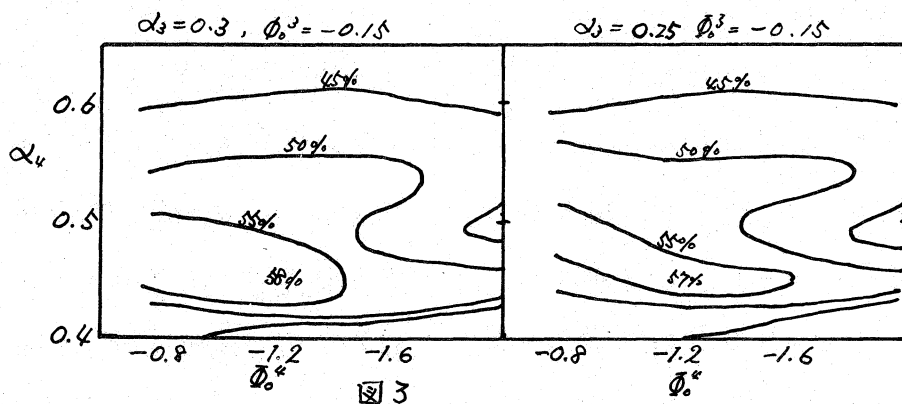
管径は第3空胴と第4空胴の間で広くなっているが、今回の計算では無視した。又入力空胴と第2空胴は直接大信号理論を用いるのを避け小信号理論で決め、 α_1, α_2 を用いた。前述の通りビームローディング時の不確かさが残るので、特にその効果が著しい第4空胴では α_4 及び ϕ_4^* を変えて最大効率に関するマップを取った。この際第3空胴の等価的 G_3 としては0.2~0.4の範囲(即ち $\alpha_3 = 0.25 \sim 0.3$)を取った。出力空胴の効率は第4空胴間隙中心から $l_{os} = 0.1 \lambda_g$ (λ_g は遅減プラズマ波長)の所での merit figure で示した。図3の map より最大の効率は、この範囲で58.2%であり、 $\alpha_4 = 0.45$, $\phi_4^* = -1.2 \text{ rad}$ の時成立する。以上の計算は α_4, ϕ_4^* を独立に取ったため、考えられる最大の効率とみられ、動作時はこれより低くなると思われる。以上より最大効率58.2%、先端出力(出力回路の損失は含まず)で48 MW, 利得で53.8 dB という結果を得た。これらの計算はかなり長時間かかるため、ディスク数 $m = 16$ (cf. optimum $m = 22$ が望ましい。(文献[1]))で行った。又入力電力を変化した場合、及びドリフト長 l_{dc} を次第に長くした時の効果については、同じ理由でまだ調べていないが文献[4]にその傾向について述べてある。なお計算結果と実際との比較のため、図2の中のC点に計算結果を示した。飽和出力時の電子位相図(通常よく用いられる applegate 図から直流的変化分を除いたもの)、ビームに含まれる基本波成分及び第2高調波成分、それら merit figure の軸方向による変化を図4に示した。

表2 計算パラメータ

周波数	2856	MHz
直流ビーム電圧	270	KV
直流ビーム電流	306	A
パービアンس	2.18	$\mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$
励振電力	200	W
正規化ドリフト管径	0.74	rad.
正規化ビーム半径	0.52	"
ドリフト長 l_{12}	~6.1	cm
l_{23}	~5.4	"
l_{34}	~16.7	"
l_{dc}	~10.6	"
空胴周波数 f_1, f_2	2856	MHz
f_3	2857	"
f_4	2860	"
f_5	2916	"

§4 最後に

計算機による飽和時のシミュレーション結果は現実より大きめであるが(図2)前述の理由及び一次元解析の一般的傾向(Mikran et al.)等によるものと思われる。



しかしながらXK-5の設計はかたより高効率を
 与える事がシミュレーションより結論づけられる。
 放射光実験施設に用いる予定のクライストロン
 の仕様である先端出力の MW以上は十分に
 達せられる設計と思われる。今後、計算機の
 シミュレーションを行うとすると、より現実的
 な方向即ちビームローディングをシミュレーションで
 自動的に決める(例へば文献[6])とか、磁場
 の束束効果を調べる事ができる二次元解析が
 望ましい。放射光実験施設の建設と並行して
 進めるつもりであり、前者については今準備中である。

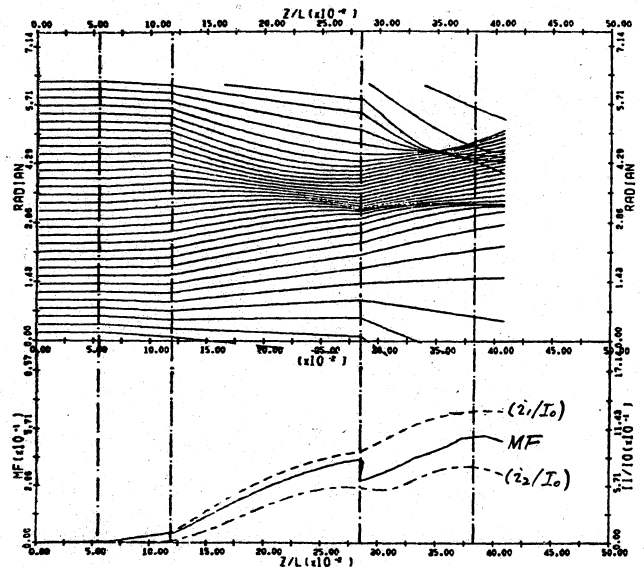


図4

文 献

- 1) J.E. Rowe, "Non-linear Electron-Wave Interaction Phenomina", New York, Academic Press (1965).
- 2) E.L. Lien, "High Efficiency Klystron Amplifiers", 8th Int. Conf. on MOGA, Amsterdam (1970) 11-21.
- 3) P.J. Tallerico, "Design Considerations for the High Power Multicavity Klystron", IEEE Trans. Electron Device, ED-18 (1971) 374.
- 4) R.L. Stringall and J.V. Lebacqz, "High Power Klystron Development at the Stanford Linear Accelerator Center", 8th Int. Conf. on MOGA, Amsterdam, (1970) 14-13.
- 5) T.G. Mihran, "The Effect of Drift Length, Beam Radius, and Perveance on Klystron Power Conversion Efficiency", IEEE Trans. Electron Device, ED-14 (1967) 201.
- 6) T. Kageyama, Y. Morizumi and E. Watanabe, "A Large Signal Analysis of Broad-Band Klystrons with Design Applications", IEEE Trans. Electron Device, ED-24 (1977) 3.