

[P 30–7]

## CALCULATIONS ON KINETIC CONVERSION EFFICIENCY IN OUTPUT CAVITY OF HIGH POWER KLYSTRONS

Takamichi AMAOKA and Toshio ONODERA

Division of Electricity and Electronics,  
Graduate School of Kumamoto Institute of Technology  
4-22-1 Ikeda, Kumamoto, 860

### Abstract

This paper considers the griddless single gap output cavity and describes a dependency on the operating frequency for the energy conversion in the klystron gap. The efficiencies of two S-band and two X-band klystrons with published experimental results are calculated by computer simulations. It is concluded that high power klystron efficiency calculations based on the author's methodology, which uses the analytical expression of Kosmahl et al on the fringing fields in the griddless gap and neglects the space-charge effects in the interaction region, agree well with the measured efficiencies and show a clear dependence on operating frequency.

### 高出力クライストロンの単間隙出力空洞における変換効率

#### 1. はじめに

クライストロンの主要部は利得に関するバンチャー空洞とエネルギー変換に関する出力空洞である。色々のタイプの出力空洞が考えられるが、この論文では出力空洞は単間隙の無格子空洞に限定する。

Hechtel [1] は無格子クライストロン間隙の軸対称RF電界を2つの円筒間の静電界で近似することにより、出力空洞のエネルギー変換を計算し、その変換効率を決める量は正規化ドリフト管径  $\gamma a$ 、正規化間隙長  $\beta e d$  および正規化RF間隙電圧  $V_{RF}/V_0$  であり、周波数には寄らないことを結論した。

Kosmahl [2] 等はクライストロン相互作用間隙の電界を間隙長、間隙の平均径、形状係数、間隙電界、および共振周波数の5つのパラメータで決まる無限級数の形の解析式を求めた。更に彼はこの解析式を使った3次元コードを作成したが、非相対論仮定のため100MW級

の大電力クライストロンには応用できなかった。

この論文はクライストロンのエネルギー変換の周波数依存性を述べる。周波数が4倍になり、間隙電界がより高いXバンドクライストロンのエネルギー変換を計算するためには、間隙電界を解析的に計算出来る Kosmahl 等の式を使い相対論的に厳密な効率計算を行うことは有意義であると思われる。特性が公表されている2本のSバンド管と2本のXバンド管の変換効率が次節で記述される計算法によって計算され、実験値と比較される。

CONDORやFCIなどの数値シミュレーションコードは間隙電磁界の計算精度が不明確である故にここでは触れなかった。

#### 2. 計算法

図1はこの論文の研究対象である単間隙出力空洞の形状を示す、空間電荷の効果は図1の作

用間隙内では無視されるが、この間隙に入射するRFビームの特性には一次元ディスクモデルとして含まれる。表1はHechtelのモデルと比較しながら筆者の計算モデルの要点を示す。両者の大きな違いは以下の2点である。

第1の違いは作用空間の電磁界で、Hechtelのモデルでは周波数に依存しないのに、筆者のモデルでは周波数に依存する。更に相対論運動方程式を厳密に解くためにKosmahl等により導出されていなかった $B_\theta$ が作用空間の電界 $E_z$ ,  $E_r$ に追加された。

第2の違いは実際の有限集束磁界を使うことで、運動方程式が3次元になり、これを6元1階の常微分方程式の数値解法に対応したルンゲクッタギル法で解いた。また図1に示すようにHechtelの論文に出てくる反転電子だけでなく、衝突電子も発生する。

効率計算に対する入力データである入射RFビームの特性は一次元ディスクモデルを使った既存のコードで計算され、図1の入口での1サイクル中の電子の1組の位相角と入射速度で記述されている。

変換効率は図1の入口と出口の間の運動エネルギーの変化から計算され、反転電子や衝突電子に対しても標準的な場合と同じ方法で計算される。

### 3. 計算と実測の比較

効率計算は表2に示す2つのSバンド管と2つのXバンド管について実行された。

HechtelはRF間隙電圧の振幅と位相を独立変数として、それ等の最適値を試行錯誤で決めた。従って与えられた $\gamma_a$ と $\beta_e d$ に対して、最大効率 $\eta_{opt}$ と最適正規化負荷コンダクタンス $(GL/G_0)_{opt}$ が与えられ、逆に最適正規化RF間隙電圧が次式で与えられる。

$$V_{RF}/V_0 = \sqrt{2\eta_{opt}/(GL/G_0)_{opt}} \quad (1)$$

また出力空胴の設計パラメータから求めた負荷抵抗 $RL$ とRF出力の実測値 $P_{out}$ を使い $V_{RF} = \sqrt{2P_{out}PL}$ を求めることができるが、最終的にはHechtelと筆者の計算値を比

較することが目的であるから、効率計算には振幅は(1)式の値を使い、位相は試行錯誤で決めた。

表3は、計算と実測の比較を示す。Xバンド管の測定された効率は明らかにSバンド管より15%低い。前節の計算モデルから分かるように、Hechtelの効率は周波数に寄らず一定であるのに対して、筆者の計算値は実測値と良く一致し、且つ周波数に依存している。

### 4. 結論

単間隙単一空胴の大電力クライストロンの効率に関する以上の検討から、無格子間隙の電磁界計算にKosmahl等の解析式を用い、効率計算に作用空間内の空間電荷効率を無視する以外は厳密に3次元運動方程式を解く筆者の計算法は実測値と良く一致することが分かった。

### Reference

- [1] J.R.Hechtel, "DC-to-RF Energy Conversion in Ungridded Klystron Gaps", IEEE Trans on ED, vol.ED-16, pp.212-217, Feb.1969.
- [2] H.G.Kosmahl et al, "Generalized Representation of Electric Fields in Interaction Gaps of Klystrons and Traveling-Wave Tubes", IEEE Trans on ED, vol.ED-20, pp.621-629, July 1973.

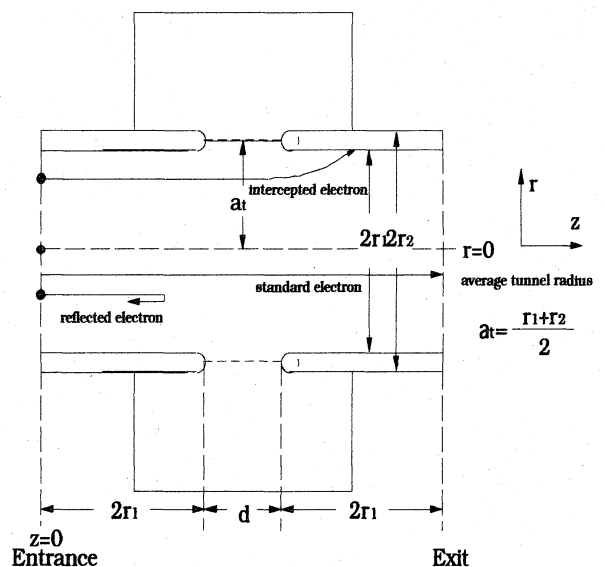


Fig.1 Output cavity geometry

**Table 1 Computational Models**

	Hechtel's model	The author's model
EM fields in interaction region	Electrostatic fields between two cylinders	Analytical expressions of Kosmahl et al
Focusing magnetic field	Infinitely high	Actual finite value
Equation of motion	1D	3D
Electron beam	16(or32) electrons per cycle and 4 in radial direction	24 electrons per cycle and 4 in radial direction
Space-charge effects	Neglected	Neglected
Relativistic effects	Neglected	Solved exactly
Efficiency	Kinectic conversion	Kinetic conversion

**Table 2 parameters of four high power klystrons**

Tube name	$V_0$ (kV)	$I_0$ (A)	b/a	f (GHz)	$\gamma a$	$\beta_e d$	$P_{out}$ (MW)
XK-5	270	293	0.70	2.856	0.741	0.95	37
5045	350	414	0.69	2.856	0.702	1.21	67
XC1	440	511	0.69	11.424	0.732	1.42	65
XB72K	580	530	0.73	11.424	0.584	2.17	93

**Table 3 Comparison of calculations and measurements**

Tube name	Measured efficiency (%)	Hechtel's calculations		The author's calculations		
		$V_{RF}/V_0$	$\eta_K$ (%)	m (rad/m)	$E_0$ ( $10^7 V/m$ )	$\eta_K$ (%)
XK-5	47	1.38	62	160	2.11	47.5
5045	46	1.41	61	104	1.89	49.6
XC1	29	1.45	58	163	6.74	32.7
XB72K	30	1.62	50	106	5.00	29.2