

Twin-Gap Output Cavity for High Power and High Efficiency X-band Klystron

O. Azuma, T. Nakashizu and Y. Hoshi
Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.

ABSTRACT

Klystron efficiency mainly depends on bunch length and mode beam currents at the output cavity region, and on output cavity configuration. This article proposes a new output cavity configuration, called Twin-Gap Output Cavity, for high power and high efficiency x-band klystron. It consists of two identical cavities, which are placed as close as possible in beam direction. It aims to extract RF power without any serious beam reformation, i.e. rebunching and debunching.

80% efficiency is obtained with this output cavity. This efficiency is higher than previous ones.

高出力高効率Xバンドクライストロンのための二段出力空洞構成

1.はじめに

線形加速器の小型化、高電界化を実現するにはマイクロ波源の出力増強が必要条件である。出力増強の手段として(1)マイクロ波源の大型化(2)マイクロ波源の効率の改善(3)新しい高出力高効率マイクロ波源の発明、が考えられる。本報告では(2)に焦点を絞り検討を行う。マイクロ波源にはもっとも汎用的に使われているクライストロンを考える。効率の研究はこれまでも[1][2][3][4]により検討されている。効率を決定する要因は出力空洞を通過するビームの性質(バンチ幅、モードビーム電流)、及び出力空洞構成(空洞長、空洞数、空洞間結合方法など)に依存する。本論文では二段出力空洞構成(Twin-Gap Output Cavity)を提案する。出力空洞領域での1次元シミュレーションを行い同領域でのビーム電力からRF電力への変換効率を計算する。さらにこれまでにに行われている研究と比較検討を行う。

2.二段出力空洞構成

空洞構成をFig.1に示す。通常の単一出力空洞を二個、隣接させた形である。ダクト直径9.5mm、ノーズの曲率R1.25mmは[5]を参照している。ギャップ距離4mmは空洞表面最大電界がXバンドでの実験達成値303MV/m[6]以下となる範囲で狭めている。二空洞間距離はマイクロ波的に独立である範囲で近づけている。

この空洞の特徴は(1)二空洞構成であることにより単空洞の場合よりギャップ電圧を低減でき放電を抑えることができること(2)二空洞がマイ

クロ波的に結合していないことより空洞間距離を短くでき第一空洞で減速され第二空洞に到達するビームのR、Z方向での再編成(debunching, rebunching)を最小に抑えることが出来ること(3)構成が簡単で設計、製作、試験が簡単、また多出力で装置特性の把握が容易なこと(4)空洞間結合用スロットなどが不要なこと(5)導波管、スロットによる空洞内電場、磁場の歪みが小さいこと、等である。

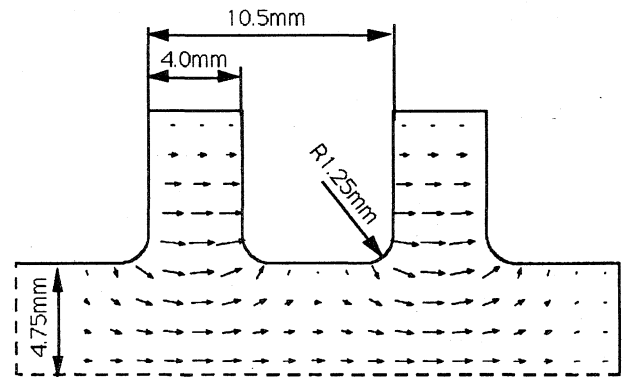


Fig.1 Twin-Gap Output Cavity Geometry

3.空洞間距離

空洞間にマイクロ波的結合がある場合、位相の異なる第一空洞、第二空洞のRFエネルギーの混合が起こり効率の低下を起こす。本シミュレーションでは空洞間距離を10.5mmと定めた。根拠はFig.2による。図中4mm長の太線はギャップ位置を表す。曲線は電磁場解析コードURMELより求めた軸上電場分布である。片方の空洞の電場のしみだが他空洞のギャップ上で最大値の10%以下になるよう空洞

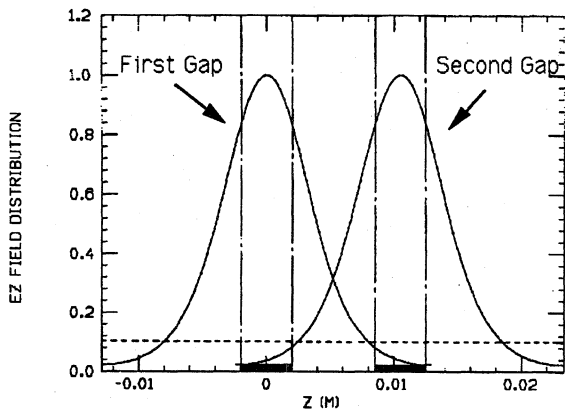


Fig.2 E-Field Distribution on the Axis

間距離をとった。この距離は440kV,11.424GHzの場合では171degに相当する。

4.シミュレーションの概要

シミュレーションは出力空洞領域に限定する。空間電荷効果は考慮していない。ビーム電圧は440kVとする。出力空洞を通過するビームのバンチ構造はFWHM70.6degのガウス分布とする。このバンチ幅は任意に決めた値である。一波長(360deg)を180分割し、それぞれの電荷につき空洞電場との干渉を計算する。ビーム電力からRF電力への変換効率は下式による。

$$1 - \frac{\text{出射電子総エネルギー}}{\text{入射電子総エネルギー}}$$

空洞の作る電場はFig. 2に示したURMELによる解析結果を使用する。第一空洞、第二空洞の電場振幅は同一とし、その振幅及びそれぞれの位相を調整し最大変換効率を求める。電場振幅が大きすぎる場合、入射されたビームが減速され一部の電荷は負の速度をもつ。本検討ではその電場振幅でのシミュレーション結果は不採用とする。即ち、いかなる電荷も負の速度をもたない。

5.シミュレーション結果

Fig.3に結果を示す。三角印は二段出力空洞、丸印は単一出力空洞の場合の変換効率を表している。横軸にはピーク電場をビーム軸上で積分した値をとる。特に二段出力空洞の場合、二つの空洞の電場積分値の和を横軸にとる。Fig.3からわかるように単一空洞の場合、ギャップ電圧800kV付近で飽和しそれ以上では効率は減少する。それに対し二段出力空洞では1200kVまで効率は増加し最高79.6%の高効率を得る。この差はFig.4a,bに示すよう単一空

洞ではバンチ中央部から集中的にエネルギーが取り出され電場を上げていくこの傾向が増長されるのに対し、二段出力空洞の場合、第一空洞でバンチ前半から、第二空洞でバンチ後半からエネルギーが取り出されることによる。

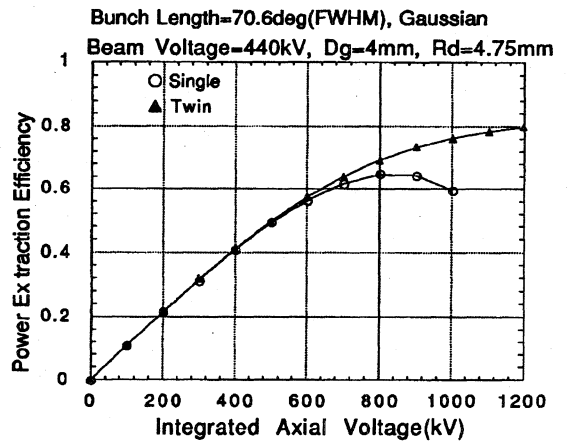


Fig.3 Efficiency Characteristics of Single-Gap Output Cavity and Twin-Gap Output Cavity.

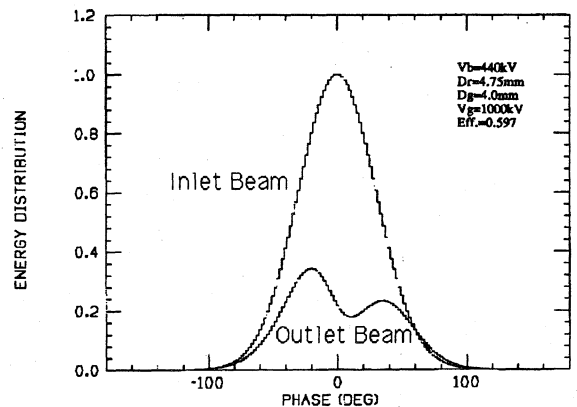


Fig.4a Energy Extraction Characteristic of Single-Gap Output Cavity.

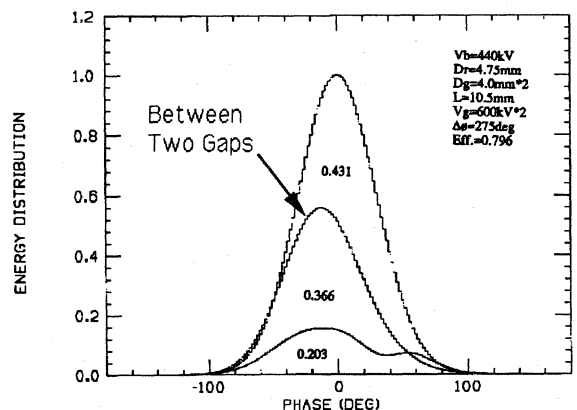


Fig.4b Energy Extraction Characteristic of Twin-Gap Output Cavity.

6.他シミュレーションとの比較

これまでに行われている出力空洞における効率の検討[2][3][4]、及び上記結果をTable 1に示す。WelchのXK-5及びFarkasらのX-100KLYは単一出力空洞である。Eppleyらは単一出力空洞及び二出力空洞(Double-Gap Output Cavity)を検討している。Doubleの二空洞はスロットで結合され 2π モードで運転される。最高の効率はJames Welchの83.9%である。本論文のTwinとの条件上の差異はパンチ幅である。パンチ幅20degと70.6degのビームはフーリエ展開した場合、基本モードのビーム電流は約1.2倍違う。即ち83.9%は70%程度に換算される。これら結果を比較したときまず多出力空洞構成は単一出力空洞構成より効率がよい、さらに二出力空洞では従来のDoubleに比べTwinがより高効率を得ることがわかる。

7.まとめ

一次元シミュレーションの結果、Twin-Gap Output Cavityはこれまでに検討された出力空洞構成より高い効率を得ることがわかった。出力空洞領域に限定すれば効率は80%に達する。本空洞に対する今後の課題は(1)三次元シミュレーションを実施すること(2)空洞間結合係数をコールドモデル実験により求めること(3)バンチング過程を含めたクライストロン全体の効率を求めること(4)高効率を得るためのバンチング過程を研究すること、等である。

8.参考文献

- [1] D. H. Preist et al, "Experiments with High-Power CW Klystrons Using Extended Interaction Catchers," IEEE Trans. on Electron Devices, vol. ED-10, pp.201-211; May 1963
- [2] James J. Welch, "The Maximun Efficiency of A Conventional Klystron Output Cavity," SLAC-PUB-3976 (May 1986)
- [3] Z. D. Farkas and P. B. Wilson, "Dynamics of An Electron in An RF Gap," SLAC-PUB-4898Rev (June 1989)
- [4] K. R. Eppley et al, "Improving the Efficiency of Microwave Devices with A Double Output Cavity," SLAC-PUB-3984 (1986)
- [5] T. G. Lee (SLAC), Private Communication
- [6] J. W. Wang, "RF Properties of Periodic Accelerating Structures for Linear Colliders," SLAC-Report-339 (July 1989)

Table 1. Simulation Specifications of Previous and Present Studies

	Welch(1986)[2]		Farkas(1989)[3]		Eppley(1986)[4]		Azuma
Cavity Type	XK-5	XK-5	X100KLY	X100KLY	Single	Double	Twin
Frequency(GHz)	2.856	2.856	11.424	11.424	2.856	2.856	11.424
Axial Voltage(kV)	450	450	1500	600		295*2	600*2
Beam Voltage(kV)	400	400	1000	1000	400	400	440
Bunch Length(deg)	20	20	20	60	61.7	61.7	70.6
			Uniform	Uniform	Gaussian (FWHM)	Gaussian (FWHM)	Gaussian (FWHM)
Code	MASK	1D	1D	1D	MASK	MASK	1D
Efficiency(%)	81.4	83.9	72	53	63	76.5	79.6