

S バンド 7.5MW パルスクライストロンの高効率化

THE EFFICIENCY ENHANCEMENT OF S-BAND 7.5 MW PULSED KLYSTRON

鈴木健一郎[#], 田中敏文, 藤井令史, 大久保良久

Kenichiro Suzuki, Toshifumi Tanaka, Satoshi Fujii, Yoshihisa Okubo

Toshiba Electron Tubes & Devices Co., Ltd.

Abstract

Some developments are being carried for increase of efficiency of klystrons in Toshiba Electron Tubes & Devices (TETD). COM, BAC and Kladystron are known as methods for efficiency improvement, all of them aiming to decrease the electrons which are accelerated at the output cavity of the klystron. The possibility for increase of the efficiency by exploiting these methods was investigated, and it turned to be able to evaluate by replacing the interaction section of the one of our conventional klystron. A 2856MHz, 7.5MW peak output power pulsed klystron model was chosen as a target, and the result of simulation showed the efficiency would be 60%. Two prototype tubes were evaluated, and they showed higher efficiency than the conventional; the first one was 58%, second one was 59%. In this paper, detailed design and test results are reported.

1. はじめに

東芝電子管デバイス株式会社では高周波源の省電力化を目指していくつかの施策を実施している。クライストロンは高周波源を構成する機器のうち、電力の大半を消費する一方で効率が低く、これの効率を向上させることが非常に有効である。

クライストロンの効率は概ね 40-70%程度であり、電子の集群を妨げる空間電荷効果のために電子ビームのバンチ当たりの電荷密度と相関を持っている[1]。効率を向上させる手法の一つとして低パービアンスの電子ビームを複数使用するマルチビームクライストロン(MBK)[1]が知られている。

一方で高パービアンス・単ビームの構成でも効率を向上させられる手法が近年研究されている[2-4]。これらの手法を検討した結果、当社の既存クライストロンの相互作用部を置き換えることで評価が可能であることが分かった。パービアンスは 1.8uP で、シミュレーションを実施し 60%を超える効率が期待できる結果が得られた。2017年に試作1号管の評価を行い[5]、2018年に改良した試作2号管の評価を行った。

本報告では設計結果と試作クライストロンの動作試験結果の詳細について述べる。

2. 設計結果

2.1 設計方針

クライストロンはマイクロ波(RF)の増幅器であるが、電子ビームが相互作用部に設けられた高周波空腔でRFと相互作用してバンチングし、出力空腔でRF電力が取り出されることによって増幅動作を実現している。クライストロンの効率を向上させるためには、出力空腔を通過した後の電子のエネルギーがなるべく小さくなるように相互作用部を設計する必要がある。出力空腔を加速位相で通過する電子は出力空腔からエネルギーを奪うため、こ

れは少ない方が望ましい。

また、バンチした電子からより多くのエネルギーを取り出そうとして出力空腔の電圧が高すぎると、バンチした電子がエネルギー分散を持っているために、エネルギーの大きい電子は出力空腔を通過する一方でエネルギーの小さい電子は出力空腔にトラップされて逆行してしまうことがある。同様のことが、空腔の電界が半径方向の分布を持っているために起こることがある。電子が逆行するとフィードバックループを形成して発振等の動作異常の原因となるため、通常は全ての電子が逆行しない余裕を確保しつつ出力空腔のインピーダンスを高くするように設計する。以上をまとめると、高効率化の手段として以下のような手段が考えられる。

- 出力空腔で加速される電子を少なくする。
- 電子のエネルギー分散を小さくする。
- 出力空腔の相互作用領域の電界分布を均一にする。

従来の設計では、特に高パービアンスのクライストロンにおいて出力空腔を加速される位相で通過する電子が多く残っており、これを減速位相に集めることが非常に効果的である。

クライストロン高効率化の手法として提案された Core Oscillation Method (COM)[1] は、加速位相にある電子を徐々に減速位相に集めることによって効率を向上させている。電子が空腔で速度変調を受けると、バンチ中心の電子は空間電荷効果が高いために集まりにくいバンチの外側の電子は空間電荷効果が低く中心に集めることができる。そのため、電子を長い距離走行させることでバンチ中心の電子は広がり始めるのに対し、外側の電子は集束し続ける状態になり(コアオシレーション)、次の空腔による変調でさらに多くの電子をバンチ中心に集めることができる。近年の研究では、シミュレーションで90%以上の効率を得られたことが報告されている[6]。しかし、電子の走行距離が長くなるためにクライストロンの全長も長くなるという欠点がある。

COMの発展形として提案された Bunch Align Collect (BAC)[2] 法は高調波空腔を含む3個1組の空腔を使用

[#] kenichiro2.suzuki@etd.canon

して COM の効果を短い距離で実現する手法である。第1の空洞で電子を変調し(bunch)、第2の空洞でバンチ中心の集群を止め(alignment)、高調波空洞である第3の空洞でバンチ外側の電子をバンチ中心に集める(collect)。第2、3の空洞で意図的にコアオシレーションと同じ作用を発生させることで相互作用長の短縮を可能としている。

COM の特長は、空間電荷効果による電子の拡散作用を利用しており、高パービアンスのクライストロンに対して効果が高いことである。COM には相互作用長が長くなるという欠点があるが、第2高調波空洞を使用することで短縮することができる。そこで、COM に第2高調波空洞を組み合わせる方法の可能性を検証するため、当社の既存クライストロンに高効率設計を適用することを検討した。既存クライストロンの選定にあたっては、高効率設計の検証のため下記のような条件を考慮した。

- 第2高調波空洞が搭載可能であること
- 量産実績があり、性能比較が容易であること

2.2 詳細設計結果

高効率設計を適用する既存クライストロンとして、S バンドパルスクライストロン E3772A を選定した。RF 周波数は 2856MHz、ピーク RF 出力電力は 7.5MW、パービアンスは 1.8uP である。電子銃部や出力回路部等はそのままに、相互作用部にのみ高効率設計を適用した。そのため、外形寸法と電子ビーム軌道設計が同一となり、既存の集束コイルを使用することができた。Figure 1 に E3772A と高効率設計の相互作用部の断面図を示す。

従来は5空洞構成であったものを10空洞に増やし、そのうち第4空洞と第6空洞の2つを第2高調波空洞としている。設計には PIC シミュレーションコードの FCI[7]を使用した。従来設計と高効率設計のシミュレーション結果を Fig. 2 および Fig. 3 に示す。

Figure 2 は位相図であり、従来設計ではコアオシレーションを電子ビームの下流側で1段階発生させているのに対し、高効率設計では上流側で2段階発生させている。さらに、従来設計では第4空洞から第5空洞にかけて急激にバンチングを進めているが、高効率設計では第7～出力空洞で徐々にバンチングを進行させている。第7～9空洞は他の空洞よりも大きく離調されており、低い電圧で徐々に電子を集めている。出力空洞手前の位相線の傾きは従来設計と比較して緩やかであり、バンチ内電子のエネルギー分散が小さいことがわかる。

Figure 3 はビームプロファイルであり、軸方向と半径方向の電子分布を表している。この図から従来設計では出力空洞で加速される電子がバンチ内に集めきれず多数残っているのに対し、高効率設計ではほとんど残っていないことが分かる。

Table 1 に既存クライストロンの E3772A および高効率設計の目標と結果のパラメータを示す。期待される効率は、ビーム電圧が 145kV のときに 62%となり、従来設計よりも 13%上昇することが見込まれた。動作安定性に関しては、エネルギーが一旦マイナスになる電子はビーム電圧が 145kV 以上で発生するため、この電圧より高い領域では動作異常が懸念された。そこで、動作異常の発生しない条件で期待通りの効率が得られるかを確認するため、試作クライストロンを製作して評価を行うこととした。

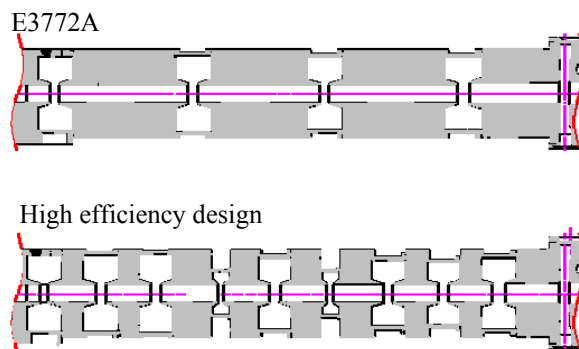


Figure 1: Cross section drawing of E3772A and high efficiency design.

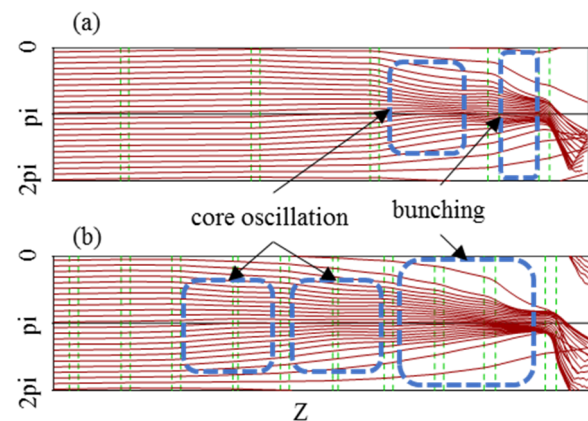


Figure 2: Phase diagrams of FCI simulations. The upper (a) is E3772A, the lower (b) is high efficiency design.

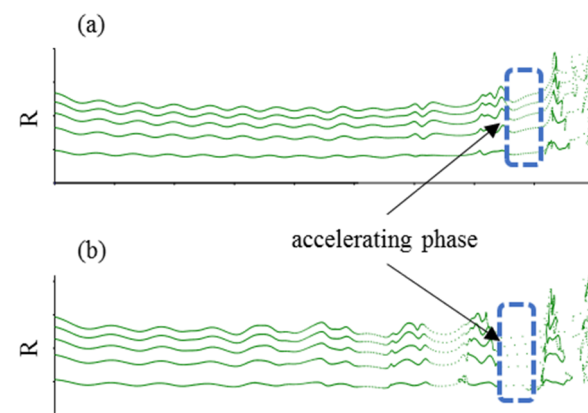


Figure 3: Beam profiles of FCI simulations. The upper (a) is E3772A, the lower (b) is high efficiency design.

Table 1: The Parameters of E3772A, Design Target and Design Result

Parameter	Unit	E3772A design	Design target	Design result
Frequency	MHz	2856	2856	2856
Output power	MW	8.1	7.5	8.9
Efficiency	%	48	>60	62
Beam voltage	kV	155	145	145
Perveance	$\mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$	1.8	1.8	1.8
Drive power	W	80	<160	130

3. 評価試験結果

高効率設計を適用した試作1号管と、効率向上の対策を施した試作2号管を製作した。試作管の外観を Fig. 4 に示す。設計結果から効率の目標を 60%以上とし、ビーム電圧や集束磁場等の設定は効率が最高になるように調整して評価を行った。ここではそれぞれの評価試験の結果について述べる。

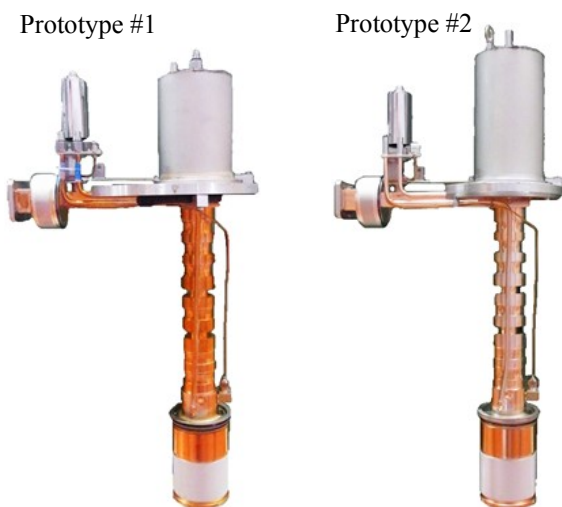


Figure 4: Appearance of prototype klystrons.

3.1 試作1号管

前述の通り相互作用部以外は既存クライストロンと共通であり、組立工程も共通として製作した。評価試験についても既存クライストロンと同様に実施し、結果を Table 2 および Fig. 5, Fig. 6 に示す。ビームパルス幅は 6.5 μs 、RF パルス幅は 4.0 μs である。ピーク RF 出力電力 6.9MW の際に効率が 58%となった。E3772A では出力 7.5MW の際に効率は 46%であり、12%効率が上昇する結果となった。ただし、ビーム電圧が高い場合にはパルスの途中で出力電力が変動する異常現象が発生し、RF パルス出力波形が欠ける現象として観測された。出力波形異常のためにビーム電圧と効率が制限され、これを抑制するために集束磁場の微調整が必要であった。集束コイルは4つのコイルから構成されており、このうち3つを直列に接続して電子ビーム軌道設計時の磁場分布を標準磁場として生成している。既存管ではこの磁場分布を定数倍して動作指定値を決定するのに対して、試作管ではそれぞれのコイル電流を独立に微調整して磁場分布を変化させた。このため、コイルを駆動する直流電源が4台必要であった。出力波形異常の原因は、ビーム電圧と集束磁場の相関を分析した結果コレクタからの反射電子で

Table 2: Test Results of Prototype Tubes

Parameter	Unit	Test target	Prototype #1	Prototype #2
Frequency	MHz	2856	2856	2856
Output power	MW	>6	6.9	7.3
Efficiency	%	>60	57.8	59.2
Beam voltage	kV	-	136	140
Beam current	A	-	88.3	88.0
Perveance	$\mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$	(1.8)	1.76	1.68
Drive power	W	<160	60	72
Gain	dB	-	50.6	50.1

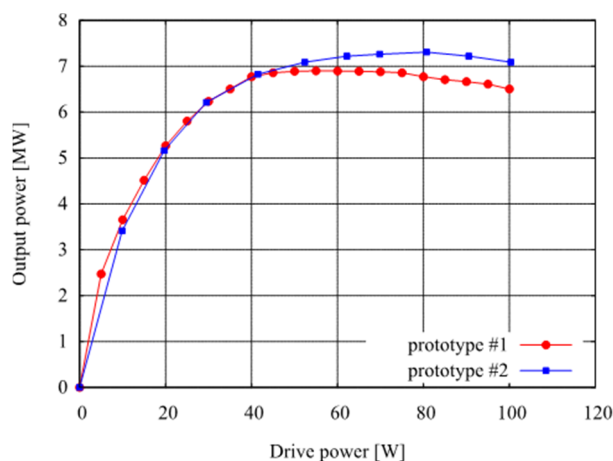


Figure 5: Transfer characteristics of prototype klystrons.

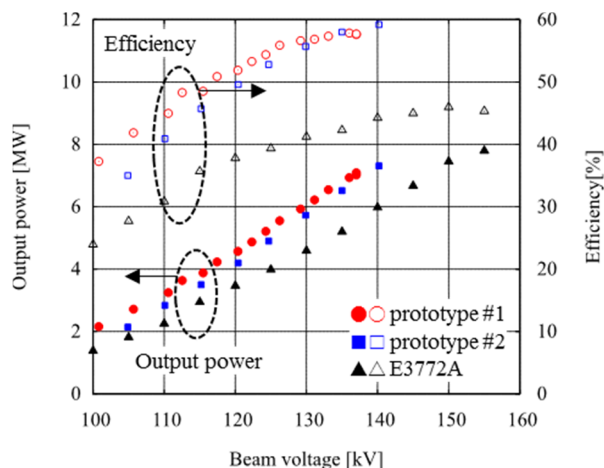


Figure 6: Saturated characteristics of prototype klystrons and E3772A.

であると推測された。そこで、出力波形異常の抑制による効率の向上と磁場に対するロバスト性向上を図った試作2号管を製作した。

3.2 試作2号管

試作2号管はコレクタを大型化するとともに、相互作用部も利得最適化のために空洞の共振周波数を僅かに変更して製作した。評価結果を Table 2 および Fig. 5, Fig. 6 に示す。出力 7.3MW の際に効率は 59%となった。ビーム電圧は1号管よりも 4kV 高い 140kV まで出力波形に異常の発生しない領域が拡大した。集束磁場に関し

でも既存管と同様に4つのコイルのうち3つを直列に接続する通常の調整方法の範囲内で動作し、磁場に対するロバスト性も向上した。安定動作のためのマージンを考慮すると、出力 6MW のときにビーム電圧は 132kV で出力波形異常に対して十分な余裕があり、このときの効率は 56%と高く良好な動作条件となった。

4. 今後の展望

4.1 既存クライストロンへの展開

試作クライストロンの評価を通して高効率設計による効率向上を確認した。前述の通り今回の設計は相互作用部を置き換えることで高効率化しているため、既存のクライストロンに容易に展開することができる。磁場に対するロバスト性も確認できたため、既存の高周波源装置のクライストロンを置き換えて省電力化することもできる。

他の用途のクライストロンでは、第2高調波空洞を搭載することができる S バンド 50MW クライストロンの E37306 に今回の設計を応用することができる。外観図を Fig. 7 に、高効率設計を適用したシミュレーション結果を Table 3 に示す。効率は 55%、ピーク RF 出力は 65MW となる結果が得られている。

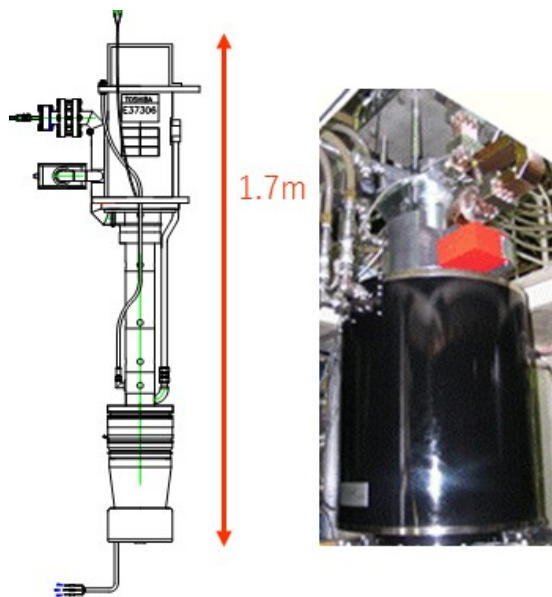


Figure 7: Outline drawing and appearance of E37306.

Table 3: Simulation Results of E37306 and High Efficiency Design

Parameter	Unit	E37306	HE design
Frequency	MHz	2856	2856
Output power	MW	50	65
Efficiency	%	42	55
Beam voltage	kV	360	360
Beam current	A	330	330
Perveance	$\mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$	1.53	1.53

4.2 高効率設計と高出力化

今回の高効率設計の設計結果から出力波形異常が発生しないビーム電圧は 145kV 程度と予測されるため、さらにビーム電圧を上げてピーク RF 電力の高出力化を

図る場合には逆行電子等を生じないようにする設計変更が必要となる。

また、試作2号管の評価試験の過程では、出力波形異常の原因のひとつであるダイオード発振があることが分かった。この発振はビーム電圧が高い場合に RF を入力しないダイオード運転の状態を観測され、その周波数スペクトルを Fig. 8 に示す。他の高効率クライストロンの研究例においても発振が報告されており[8]、安定動作のためには空洞数の増加によって生じる寄生共振モードの影響の解析が今後必要になるとと思われる。

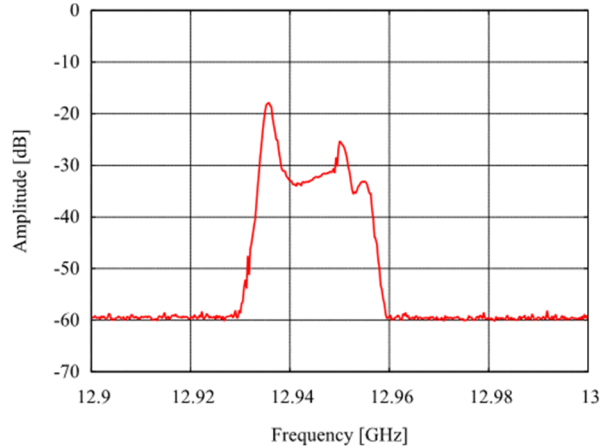


Figure 8: Oscillation spectrum of diode operation.

5. おわりに

COM の手法を取り入れた高効率設計を既存クライストロンに適用し、評価試験を行った。効率は試作1号管で 58%、2号管で 59%に達し高効率設計の有効性を確認できた。従来設計よりも 10%以上の効率向上を達成し、特に 1.8uP と高いパーベアンスのクライストロンで実現できたことが特徴的である。今回の設計は 6MW クライストロンとして良好な動作と効率であり、相互作用部の置き換えで高効率化を可能としている。

参考文献

- [1] A. Beunas *et al.*, "A high power long pulse high efficiency multi-beam klystron", presented in the 5th MDK Workshop, 2001.
- [2] A.Y. Baikov *et al.*, "Simulation of conditions for the maximal efficiency of decimeter-wave klystrons." *Technical Physics* 59.3 (2014): 421-427.
- [3] I. A. Guzilov, "BAC method of increasing the efficiency in klystrons," 2014 Tenth International Vacuum Electron Sources Conference (IVESC), St. Petersburg, 2014, pp. 1-2.
- [4] F. Peauger, "High Efficiency — High Perveance Klystron (X-band)", *EnEfficiency RF sources Workshop*, June 2014.
- [5] Y. Okubo *et al.*, "Status of high efficiency klystron development in TETD" *IPAC'18, 9th International Particle Accelerator Conference*.
- [6] A. Y. Baikov *et al.*, "Toward high power klystrons with RF power conversion efficiency on the order of 90%", *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 62, No. 10, 2015.
- [7] T. Shintake, "FCI field charge interaction program for high-power klystron simulation", *Prc. 1989 PAC*, March 1989, Chicago, USA.
- [8] R. Kowalczyk *et al.*, "Test of a BAC Klystron", *IVEC2017, 18th International Vacuum Electronics Conference*.