

空洞型合成器を用いた 509MHz 固体化電力増幅器の開発

DEVELOPMENT OF 509 MHz SOLID STATE AMPLIFIER WITH A CAVITY-TYPE POWER COMBINER

春松和孝^{#,A)}, 寺田晃^{A)}, 宮川敏^{A)}, 山本恭敬^{A)}, 林和孝^{A)},
大竹雄次^{B)}, 稲垣隆宏^{B)}, 櫻井辰幸^{C)}, 恵郷博文^{B),C)}

Kazutaka Harumatsu^{#,A)}, Akira Terada^{A)}, Satoshi Miyagawa^{A)}, Yasunori Yamamoto^{A)}, Kazutaka Hayashi^{A)},
Yuji Otake^{B)}, Takahiro Inagaki^{B)}, Tatsuyuki Sakurai^{C)}, Hiroyasu Ego^{B),C)}

^{A)} Mitsubishi Electric TOKKI Systems Corporation

^{B)} RIKEN SPring-8 Center

^{C)} JASRI

Abstract

A high power solid state amplifier (SSA) has been developed for a future replacement of the RF source of the SPring-8-II storage ring. In order to obtain a 100 kW RF power, we should combine RF power from 160 LDMOS (Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductor) outputs. Therefore a power combiner with low loss and an amplifier module are important for better power efficiency and cost reduction. We designed an 80-way power combiner using a TM010 mode cavity with 80 input loop couplers attached on the cylinder inner surface of the cavity. The design simulation shows the power loss of the combiner is less than 2% in the ideal case. We also designed an amplifier module which consists of four high-power LDMOS-FETs (Field-Effect Transistors) as the main-amplifier and a high-efficient GaN-HEMT (Gallium Nitride High-Electron-Mobility Transistor) as the pre-amplifier. We made a prototype combiner and a prototype amplifier module and measured those RF characteristics. A 4-way power combining with a 94% combined efficiency, which was consistent with our designed value, was confirmed. In addition, we demonstrated the power combining from the amplifier module with a 635W combined power, a 94% combined efficiency.

1. はじめに

現在 SPring-8 など多くの電子蓄積リングでは、高周波源として 1MW 級の CW クライストロンが使用され、高周波電力を分配し多数の加速空洞に供給されている[1]。

近年の半導体素子の発展により、350MHz 帯では、1 台の空洞で使用する 100kW 程度の高周波電力を供給できる SSA が開発され[2]、電子蓄積リングの運転供与が現実的となった[3]。SSA は、多数の半導体素子出力を並列合成した構成であり、素子故障に対して十分に余裕が有る。さらに、各加速空洞に SSA を 1:1 で接続する構成をとることで、加速空洞毎の電力制御が可能となり、高周波源の冗長化が図られる。また SSA はクライストロンにおいて必要な高電圧回路を持たないため、動作安定性、精密な電圧制御および保守性の向上が期待される。しかしクライストロンと同等な RF 変換効率を得るためには多くの開発要素が有る。

今回、国内の加速器で主流の 500MHz 帯に向けた SSA を検討した。出力合成部位での電力損失を減らすことを目的とし、多数の結合用アンテナを配置した空洞型合成器を採用し、設計検討、試作を行った。また出力段に高出力で高効率な LDMOS-FET、前段に高効率な GaN-HEMT を用いた増幅モジュールを試作し、空洞型合成器との組合せ試験を行った。

2. 100kW 級固体化電力増幅器の設計

多数の RF トランジスタの出力を並列合成して 100kW 級の出力電力を得る。RF トランジスタを並列構成したモジュール化を行い、生産性の向上、組立、交換の作業性向上、冗長性確保を図る。一素子当りの出力電力を大きく取ることが、合成数の削減に繋がり、低コスト化が図れる。現在、500MHz 帯ではプッシュプル方式の LDMOS-FET が 800W 以上の CW 出力を可能としており、現時点で最大 200W 程度に留まる GaN-HEMT に比べ、一素子当りの出力電力が高い。またワット単価(出力電力 1W 当りの単価)は GaN-HEMT に比べ LDMOS-FET は大幅に安価である。

一方、多数のトランジスタ出力を合成するために、従来は、トーナメント型の合成器や、ラジアル型合成器を多段に使用しており、合成器、コネクタ、ケーブル、導波管、導波管変換器といった多くの構成部品を必要としていた。空洞型合成器を採用することで、ケーブル、コネクタ、変換器類の部品点数を削減でき、シンプルで省スペース、且つ低熱損失による高効率が可能となる[4]。

筆者らは 100kW 級の出力電力を得るための構成として、80 合成器を 2 台、4 出力増幅モジュールを 40 台用いたシステムを検討した (Figure 1)。

[#] ka-harumatsu@west.melos.co.jp

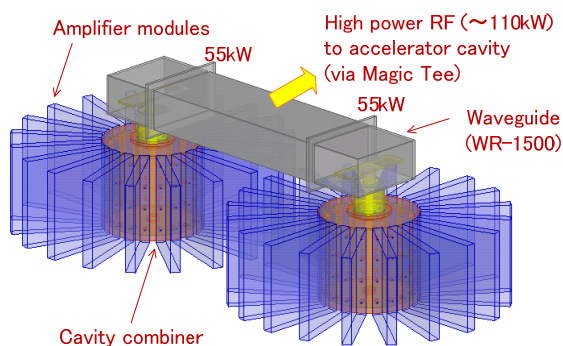


Figure 1: Concept of the solid state Amplifier.

2.1 80 合成器設計

設計した 80 合成器の特徴を示す (Figure 2)。円筒空洞の TM010 モード共振を利用した。合成器の高さは所望モードのみが共振するよう高さを抑え 400mm に設定した。共振周波数を微調整できるよう、合成器の下端面中央にチューナ (可動機構) を設けた。円筒面には入力ポートとして縦 4 段、20 列で 80 個のループアンテナを設け、結合量の調整はループ寸法とアンテナ角度で行う。出力ポートは同軸管で電界結合とし、結合量の調整は内部導体の挿入量を調整できる構造とした。また導波管への出力は、T 型モード変換器にて、同軸管/導波管変換を行う構造とした。設計条件を Table 1 に示す。

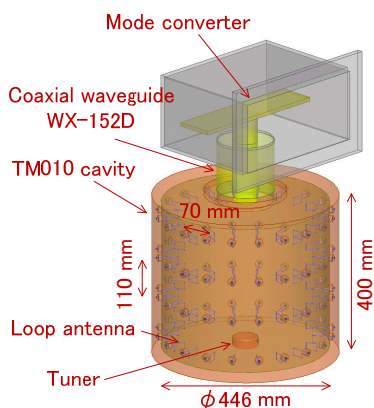


Figure 2: Image view of the cavity Combiner.

Table 1: Cavity Combiner, Design Parameters

Resonant Frequency	508.762 MHz
Input power	800 W
Output power	64 kW
Combining efficiency	99 % over
-3dB band width	5.1 MHz
Number of input	80
Cavity size	D:446 x H:400 (mm)

2.2 4 出力増幅モジュール設計

モジュールの構成を以下に示す。入力信号を 100W 級出力の GaN-HEMT にて増幅し、ウィルキンソン型分配器にて 4 分配した信号を 800W 級出力のプッシュプル型 LDMOS-FET にて増幅する。なお負荷側の全反射から LDMOS-FET を保護するため、2kW 用サーキュレータと 1kW 用終端器を LDMOS-FET の出力に配置した。水冷銅板に構成品を実装し、発熱部位であるトランジスタ、サーキュレータ、終端器の裏面に水管を配置した。

Table 2: Amplifier Module, Design Parameters

Frequency	508.762 MHz
Input Power	1 W
Output Power	800 W
Number of output	4
Module size	W:67 x L:568 x H:498 (mm)

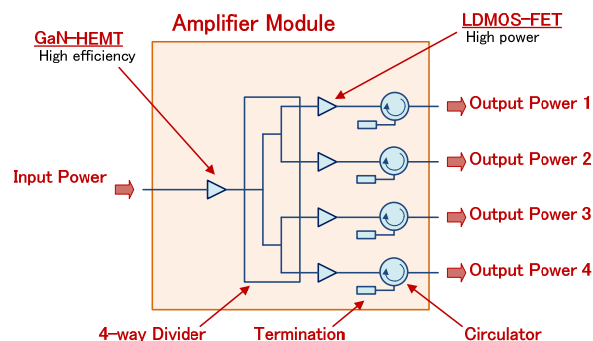


Figure 3: Concept of amplifier Module.

3. 試作・評価

3.1 80 合成器試作

空洞合成器の原理検証を目的として、合成器 1 台、増幅モジュール 1 台を試作した。今回は原理検証用の試作機であるため、製品を想定した条件 (材質: 銅、入力アンテナ数: 80 ポート) とは異なり、材質: アルミ、入力アンテナ数: 4 ポートにて試作を行った (Table 3)。

入力アンテナを軸対称に 4 本配置した場合、合成器単体の電力効率は設計値 (電磁界解析) で 95% であった。チューナによる周波数調整と入力アンテナ回転角調整後の小信号評価結果は、94% であり、概ね設計値通りの測定結果が得られたといえる。

なお、80 ポートに比べ効率が落ちた原因は、入力アンテナ数を減らしループサイズを見直したことにより、結合度に変化し、原理的に Q0 (無負荷 Q) / QL (負荷 Q) の比が小さくなったことで、空洞内の損失が増えたためである。

Table 3: Cavity Combiner, Design and Test Result

	Cavity combiner, design Target.	Prototype combiner, Design.	Prototype combiner, Measured.
Cavity material	Copper	Aluminum (AL5052)	
Output coax.	WX-152D	WX-77D	
Input antenna	80	4	
Combining efficiency	>99 %	95 %	94 %
-3dB band width	5.1 MHz	0.7 MHz	0.8 MHz

3.2 4 出力増幅モジュール試作

前段の AB 級 GaN-HEMT は、出力整合及びドレインバイアス回路にて高調波整合 (2、3 倍波) を行った結果、出力電力 117W、ドレイン効率 87%以上となる高効率を実現した (Figure 4)。出力段の B 級プッシュプル型 LDMOS-FET は、メーカ提供の評価ボードにて 800W 強の飽和出力電力を確認した (Figure 5)。

4 出力増幅モジュールの評価結果を Figure 6 および Table 4 に示す。出力が上がらなかった原因は、出力側整合基板の上の同軸バランのメーカ推奨品が入手難のため、国産品に変更した際、パラメータの違いからインピーダンス不整合となったためと考えている。

今回の試作評価では、このまま増幅モジュールを製作し、合成器との接続評価を進めることとした。

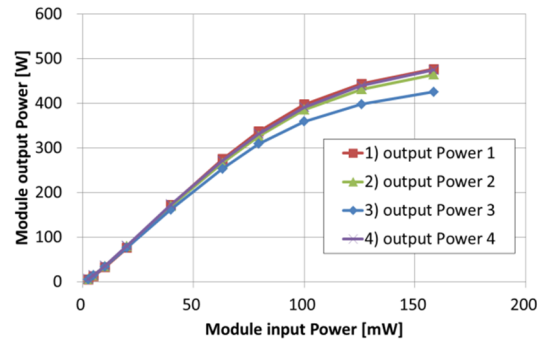


Figure 6: The input-output characteristic of the prototype amplifier Module.

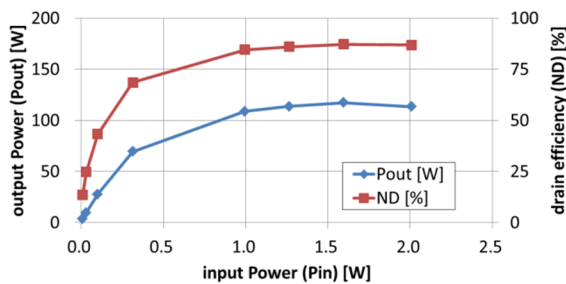


Figure 4: The output Power (Pout) and the drain efficiency (ND) of the GaN-HEMT.

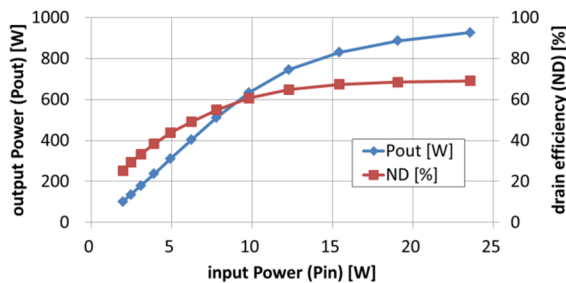


Figure 5: The output power (Pout) and the drain efficiency (ND) of the LDMOS-FET, with a vendor's demonstration amplifier circuit Board.

Table 4: Performance of the Prototype Amplifier Module

Frequency	508.762 MHz
Input Power	0.16 W (22.0 dBm)
Output Power	426 W (56.3 dBm) min. 476 W (56.8 dBm) max.
Power deviation	50 W (0.5 dB)
Efficiency	58 % min. to 61 % max.

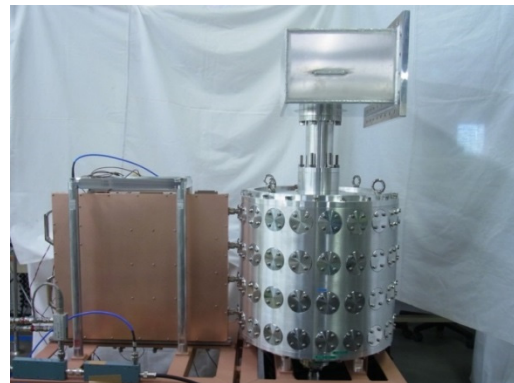


Figure 7: Photograph of the prototype power combiner and the amplifier Module.

3.3 組合せ評価

SPring-8 RF テストスタンドにて、合成器と増幅モジュールを接続し、合成後の出力導波管を 1MW ウォーターロードに接続して、組合せ試験を実施した (Figure 8)。合成器効率は増幅モジュールの 4 出力の合計電力に対する合成器出力の割合で算出した。

合成器出力を数 10W から約 600W まで変化させたときの合成器効率を確認した。モジュールの 4 出力を合成器軸対称に 4 か所から入力した場合の合成効率は 94% であり、小信号試験と同等の結果を得た。一方、縦 4 段の入力では、結合偏差により効率が若干悪いが、計算による想定通りであった (Figure 10, 11)。ただし、合成器入力電力レベルによって効率変動が見られた点は、今後の調査が必要となった。

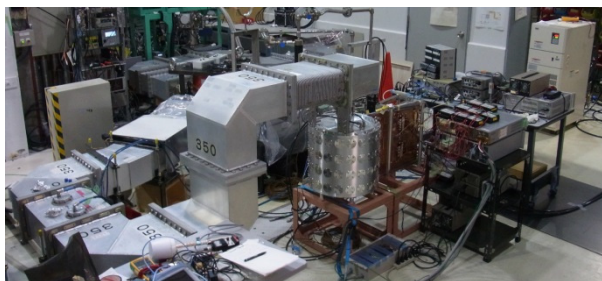
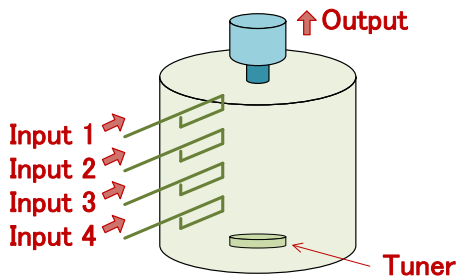
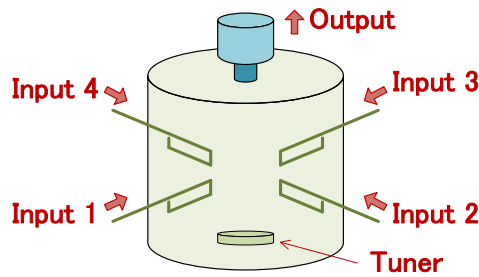


Figure 8: Photograph of the high power combining test at SPring-8 RF test Stand.



(1) Vertically Aligned.



(2) 90 degree rotationally Symmetric.

Figure 9: Location of the input Antennas.

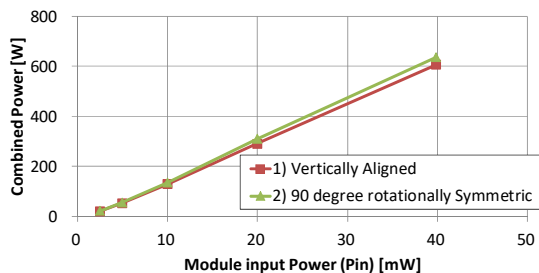


Figure 10: Comparison of the combined power with different location of the 4 input antennas; 1) vertically aligned, 2) 90 degree rotationally Symmetric.

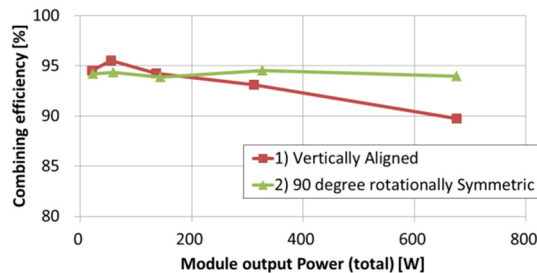


Figure 11: Comparison of the combining efficiency with different antenna configuration, same as the Figure 10.

4. まとめ

大電力・高効率 SSA の実現には、低損失な大電力合成器が欠かせない。今回、円筒空洞 TM010 モードを利用した 80 個のループアンテナ入力、同軸導波管出力の空洞型合成器を試作した。試作機にて動作原理検証を行い、電磁界解析結果、低電力測定結果とも効率 94% と、良い一致を見せた。加えて、4 出力増幅モジュールを試作し、空洞型合成器との組合せ評価を行い、電力 635W にて効率 94%の結果が得られ、低損失にて電力合成することを確認できた。

参考文献

- [1] M. Hara *et al.*, "RF Stations of the Spring-8 Storage Ring", in Proc. PAC'97, Vancouver, Canada, May 1997, paper 4P028, pp. 2971-2973.
- [2] P. Marchand *et al.*, "High-power 352-MHz solid-state amplifiers developed at Synchrotron SOLEIL," Phys. Rev. ST Accel. Beams 10, 112001(2007).
- [3] J. Jacob *et al.*, "RF operation, HOM damped cavities and 150 kW solid state amplifiers at the ESRF," Eighth CW and High Average Power RF workshop, Trieste, Italy, 2014.
- [4] M. Langlois *et al.*, "SSA using a cavity combiner," Eighth CW and High Average Power RF workshop, Trieste, Italy, 2014.