

TE011 モード高周波空洞電力合成器を使用した 100 kW 半導体パルス高周波増幅器の設計

DESIGN OF A 100 KW SOLID-STATE RF PULSE AMPLIFIER WITH A TE011 MODE RF COMBINER AT 476 MHZ

大竹雄次、安積隆夫、稲垣隆宏

Yuji Otake, Takao Asaka and Takahiro Inagaki

RIKEN SPring-8 Center, RIKEN, 1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, Japan

Abstract

Solid-state rf amplifiers with a long lifetime and small failures, are the recent trend of medium-power rf sources for particle accelerators. Therefore, we designed a 100kW solid-state amplifier having a TE011 mode cavity ($Q_0=100,000$) type rf power combiner with extreme low-loss. This amplifier is operated at 476 MHz with a 50 μ s pulse width. The final amplification module and combiner of the amplifier are for realizing a high efficiency of over 60 %, like a klystron, and reducing a number of rf solid-state amplification devices, respectively. Development of this amplifier is to replace an induction output tube, IOT, in the X-ray free-electron laser, SACLA. In SACLA, highly rf phase and amplitude stabilities of less than 0.01 deg. and 10^{-4} in rms are necessary to stable lasing within a 10 % intensity fluctuation, respectively. The amplifier comprises a drive amplifier, a reentrant cavity type rf-power divider, 100 final amplification modules having a 1 kW output each and a TE011 mode cavity type rf power combiner. A DC power supply with a noise level of less than -100 dBV at 10 Hz for the amplifier is necessary to obtain the above-mentioned stabilities. Based on the experiment results using a 1 kW test amplification module with an 60 % efficiency and combiner cavities, possibility to realize an output rf-power of 100 kW, the extreme low-loss and the very stable rf characteristics is large. We report the detail and performance of the amplifier.

1. はじめに

従来の加速器技術では、MW 級の加速用高周波大電力高周波源と比較した場合の中電力源は、5 極管[1]やクライストロード[2]などの真空管が主に使用されている。それらの高周波出力電力は、10~100kW であり、パルス高周波の場合の繰り返しは 60pps 程度である。中電力高周波源の多くは、低エネルギー電子を加速する線型加速器の入射部加速空洞や陽子線型加速器用空洞、超伝導加速空洞[3,4]などの駆動用に主に使用されている。このような真空管は、半導体素子と比較して管内放電などによる頻繁なインターロック停止がある。多い場合は 1 日 1 回以上の動作停止が生じる。また管の寿命も数万時間で、半導体と比較して 1/3 以下と長いとは言えない。このような高周波源は、X 線自由電子レーザー SACLA の場合でも例外なく、入射部の電子を 1MeV まで加速する 476MHz ブースター空洞[5]を駆動するために使用されている。それはクライストロード(IOT)で、60pps の繰り返しで 100kW、50 μ s 幅のパルス高周波を出力する。この種の真空管は伝統的に放送用であり、近年はその半導体化によりメーカーからの供給が細くなりつつある。それと共にその価格も高騰を続けている。このような理由に加えて、現在の SACLA の IOT の 1台が寿命を迎えつつあるので、我々は IOT を半導体増幅器に置き換えることを始めた。

近年、中電力高周波増幅用の Field Effect Transistor (FET)デバイスが著しい発達を遂げ、その単体の出力は

連続波において最大で 1kW[6]にも到達している。もしこれらのデバイスの出力電力を 100 個合成すれば、現状使用している 100kW 出力の IOT の置き換えも十分な可能性がある。しかしながら、このような高周波半導体デバイスの価格は安くない。そのために高周波増幅器の製造コストを下げるためには、少しでも使用する半導体の数を減らすことが重要になる。このような理由から、この 1kW デバイスを増幅器にした場合の 100kW 出力高周波への電力合成手法の低損失化は必須であり、それが増幅器の価格に直結することになる。理由は、低損失化で使用する半導体素子の数を減らせるからである。増幅器のコスト低減には、低損失の電力合成手法を採用する一方、個々の半導体の出力電力が大きく高効率なものを採用することも効果的である。この観点から我々は、先に述べた現状で最大出力を持った 1kW 出力の高周波増幅素子の採用を考えている。以上の IOT 代替の高周波増幅器の設計に対する基準に加えて我々は、この増幅器を X 線自由電子レーザー用線型加速器で使用するための基準を考慮しなければならない。このため、安定な XFEL の強度を得るために、増幅器の出力高周波が非常に安定である必要がある[5]。これも増幅器の設計に考慮されなければならない。以上の基本路線に基づいて我々は、476MHz の非常に低損失の TE011 モード空洞電力合成器を採用した 100kW パルス増幅器を開発した。本論文では、開発している増幅器の基本設計と電力合成器前段の最終段増幅モジュールの予備的な試験結果を述べる。そして、本増幅器の実現可能性を評価する。

#otake@spring8.or.jp

2. 設計

2.1 増幅器の設計基準

高出力の高周波電力増幅器を設計する場合、数が多い最終段増幅モジュールの出力合成をどのように低損失で行うかは、その価格や大きさを決める上で非常に重要な要素となる。従来より放射状高周波電力合成器[7]や TM010 モード空洞電力合成器[8]が、その低損失特性を利用して最終段増幅モジュールの出力電力合成器として使用されてきた。しかしながら前に述べた手法も数%の合成損失が存在し、もし 100kW 出力を得ようとするとその損失は数 kW にも相当する。この損失は、例えば 1kW 出力のデバイスを想定すると、その数個分に相当してしまう。これは無視できる値ではなく、デバイスの価格である数万から数十万円を考えると、高価な損失と言える。このような理由から我々は、より超低損失な高周波電力合成器を考える必要があった。これにより、無駄な高周波増幅デバイスを限りなく少なくを試みる必要があった。ちなみにこのような 100kW 級高周波増幅器は、非常に広い設置スペースを取ることが一般的である。それは、100 個よりかなり多い増幅デバイスを使用して、電力合成器もそれなりの大きさを持つからである。そしてそれらの機器を支える架台の大きさも無視出来ないものとなっている。今回開発する増幅器は、既に述べたように SACLA の入射部の IOT の代替えであるので、既存のそれが設置されている面積である 2m 四方に設置できる大きさでなければならない。加えて、増幅素子の数や運用コストを減らすためには、AC 入力に対する高周波電力への変換効率も重要で、最低限、それが既存の IOT に近い 60%~70%以上である必要がある。もちろん、その高周波出力安定度は既存のものに匹敵せねばならず、XFEL のレーズング強度の安定度を 10% 以内に納めるためには、位相で 0.01 度、電力で 10^{-4} の安定度[5]を満足しなければならない。以上の事が、より低価格で設置面積のなるべく少ない増幅器を実現するために要求される項目である。

2.2 増幅器設計

上記に述べた基準に沿って我々は 476MHz、100kW 出力の半導体パルス高周波増幅器を開発した。その出力パルス幅は 50 μ s である。開発した増幅器の仕様を Table 1 に、また構成を Figure 1 に示す。この増幅器では、超低損失な高周波電力合成を実現するために TE011 モード空洞を採用した。この空洞は、損失の指標であるクオリティーファクター、Q 値が 100,000 以上になる。この Q 値は、先に述べた TM010 空洞電力合成器より数倍大きい。しかしながら高周波技術者は、伝統的に半導体高周波増幅器の設計で、この程度の損失には大きな注目を払って来なかった。それは、今までの半導体素子の出力レベルの技術的な制限から、増幅器の出力がせいぜい数~数十 kW 程度であったことである。それ故、空洞合成器の数%損失が絶対値として数百 W であることから、設計者がいる程度は無視出来るレベルであった。であるが、これが 100kW を超える出力になると数 kW レベルになり、熱的にも、失う電力に相当する半導体

Table 1: Specifications of the 476 MHz, 100 kW Amplifier

Frequency	476 MHz
Output Power	90 ~ 100 kW
Pulse Width	50 μ s
Repetition	60 pps
Amplification Class	A or AB

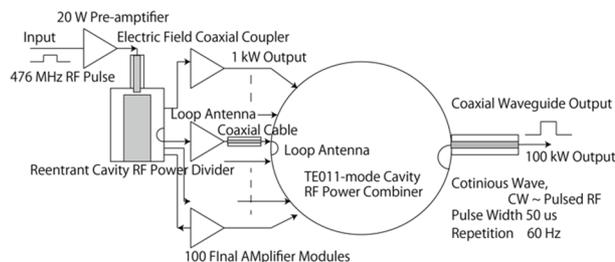


Figure 1: Block-diagram of the amplifier.

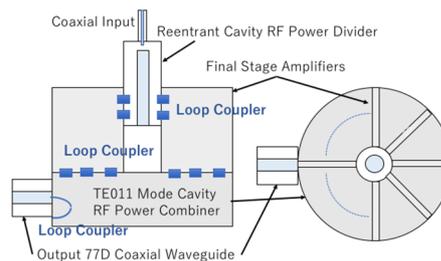


Figure 2: Mechanical configuration of the amplifier.

数にしても、技術者が設計において無視出来る領域ではなくなって来ている。一方、最終段増幅モジュールを駆動する入力高周波の電力量は大きくないので、従来はその損失を考慮する増幅器の設計は行われてこなかった。しかしながら 100kW 級の増幅器の場合、現状では FET などの増幅素子を最低でも 100 個は使用するので、最終段増幅モジュールの利得を仮に 40dB と仮定しても、数十 W の駆動電力が必要になる。それ故に、この駆動電力に付随した損失にも、我々は高出力化に伴い注意を払う必要が出てきた。そのため、今までの回路基板上のウィルキンソン電力合成器を何段も使用したような、損失が全部で数 dB もあるような回路構成は避けねばならない。この理由から我々は、100 個の入力電力分配には小型の半同軸空洞を使用することにした。その理由は、TE011 合成器の寸法が大きいので他の構成要素は小さいのが理想であることと、他のモードの空洞サイズと比較した場合に半同軸モード空洞の大きさが最も小さいからである。ちなみに、もし入力空洞電力分配器も大きい物を使用すれば、今回開発する増幅器は非常に大きい物になってしまう。

一方、TE011 空洞合成器が大きいことは、視点を変えれば以下の利点がある。それは、図 2 に示すように空洞電力分配器と最終段増幅モジュールを支える架台として使えると言うことである。このことは、架台を省略することで本増幅器の大きさを小さく出来ることを意味している。そして、現状の広くない SACLA の IOT の設置面積に本増幅器を設置することが可能となる。

次に、増幅器の価格と設置面積を低減するためには、最終段増幅モジュールの数を減らすことも重要な要素となる。このために我々は、市販の高周波増幅素子から、なるべく最大の許容電力を持つ物を本 100kW 増幅器用として選択する必要がある。加えて、AC 入力に対する高周波電力への変換効率も、既存の IOT に近い 60% ~ 70%以上を確保する必要がある。もちろん、選択する素子は、安定に流通しているものでなければならない。以上の制限となるべく最近の技術を使用した素子から、我々は LDMOS と GaN の電界効果トランジスタ(FET)デバイスを候補とした。そして、素子の規格表の性能評価から 1 パッケージに 2 個の FET 素子がプッシュプル増幅用として納められた、デバイスを選択した。このデバイスは 1kW の許容電力を持ち、100 個強のデバイスで本増幅器が構成できる。Table 2 には、このデバイスの代表的な性能を載せる。

最後に FEL 駆動リニアックである SACLA の現状性能に対応する高周波出力の安定度であるが、安定レーザリングに必要な高周波電力安定度が $\sim 2 \times 10^{-5}$ で、位相安定度が ~ 0.01 度である[5]。これを実現するためには、現状で我々が SACLA で使用している超低ノイズ電源技術を採用することを考えている。この技術は、X 線自由電子レーザーを実現するために開発されたもので、直列接続された直流電源間にノイズ緩衝器である電池または大容量のコンデンサーを入れたものである。この電圧ノイズレベルは -100 dBV@10 Hz で、電圧安定度は $\sim 2 \times 10^{-5}$ である[9]。

Table 2: Specifications of the LDMOS FET (MRFE6VP61K25H, NXP)

Frequencies	1.6 ~ 500 MHz
Handing Power	1250 W (CW or Pulse)
Gain	27 dB at Maximum
Efficiency	84 % at 81 MHz, Maximum,

3. 実現可能性の確認

前に述べた基準に基づいて設計した 476MHz、100kW のパルス増幅が十分な実現可能性を持つかを、我々は、以下の鍵となる TE011 モード空洞高周波電力合成器や最終段増幅モジュールの数値シミュレーションおよび試作・実験で確認した。ここで確認しなければならない重要な点は、空洞合成器の原理的な動作確認と低い損失、最終段増幅モジュールの FET デバイスが単体で 1kW 以上の出力が取れて、効率が 60%以上であるかということである。ちなみに、この出力と効率は、LDMOS-FET を使用した試作基板の動作で確認した。以上の項目は、最終的な増幅モジュールの数を決め、増幅器の価格と大きさを左右するので重要である。

図 3-(a)、(b)、(c)には、TE011 モード空洞電力合成器のシミュレーション結果を載せる。このシミュレーションは HFSS (High-frequency structure simulator) [10]を使って行われた。使用したモデルは、前述した本増幅器用の 100 入力のものではなく、1 出力 4 入力のものである。その理由は、図形のシミュレーションへの入力時間や現状

の所有する計算機の能力が、100 入力のシミュレーションに耐えられないと判断したからである。であるが、1 出力 4 入力でも、我々が開発する空洞合成器の動作証明や低損失の確認には十分に役立つと考えた。シミュレーションの結果は、図 3 の(a)が空洞の磁場分布、(b)が出力を入力と見立て空洞合成器を分配器と使用した場合の反射損失、(c)は分配器として使用した場合の入出力間(4 出力の内の一つ)の伝送損失を示す。

以上結果から考察出来ることは、TE011 モード高周波電力空洞合成器が、空洞内にアンテナなどの邪魔者があってもほぼ純粋な電磁界分布を示していること、

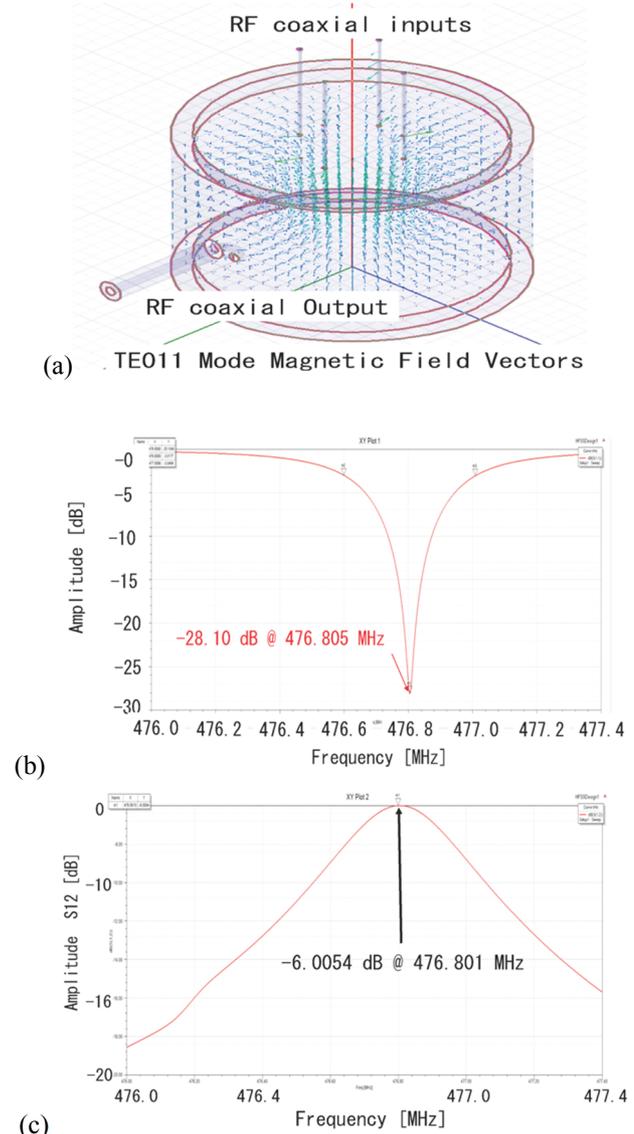


Figure 3: (a) Magnetic field vectors of the TE011 mode cavity combiner, (b) an rf-return loss of the S11 value of the combiner output and (c) rf-power transmission, S12 from one of the inputs to the output. A transmission ratio of -6.0054 dB is close to an ideal value of -6 dB (meaning low loss).

反射損失が-28dB でほぼ想定通りであること、損失が想定通りに通常の TM010 空洞などより遙かに小さいこと、高周波電力分配比が 4 分配器(合成器)として理想的な -6dB 近いことである。

図 4-(a), (b), (c)は、おのおの LDMOS-FET を使用した最終段増幅器モジュールの試験回路、その入出力増幅特性、増幅効率について示す。図の測定で使用した LDMOS-FET は、NXP-MRF6VP61K25HR6 である。増幅素子の評価は、Ampleon と NXP [6,11]の 2 つの FET を使用して、増幅利得や効率を測定することで行った。両 FET とほぼ 1kW の出力を得られたが、出力は NXP の方が Ampleon のものより大きく、それを選定した。理由は、素子を少しでも減らせること、本増幅器の運転パラメータに対する余裕が多少あることなどである。ちなみに、効率は Ampleon の物が NXP よりも良く要求する運転条件において 60%を超えていたが、本増幅器がパルス運転であり効率は非常に重要では無いことから、出力の大きい方を選択した。

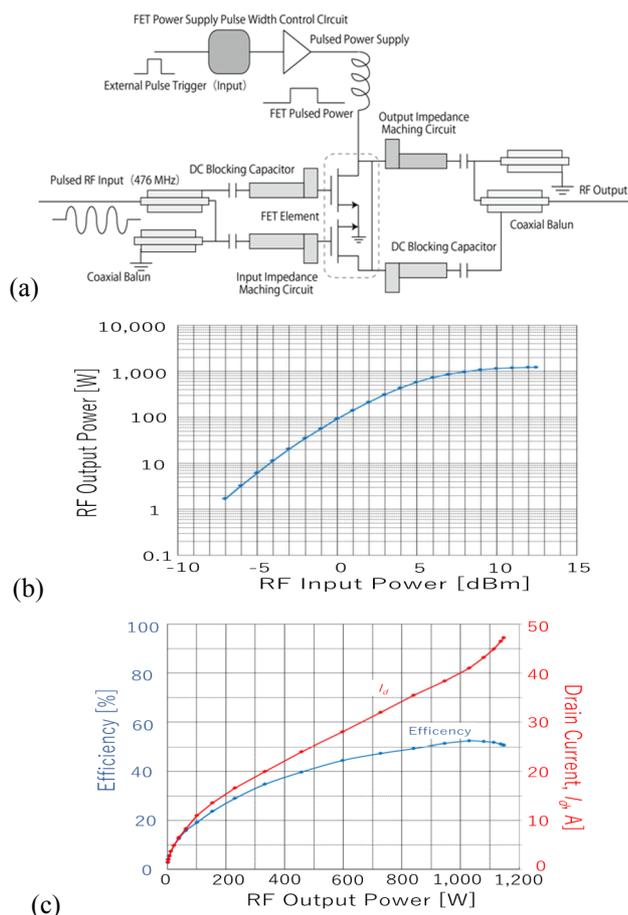


Figure 4: (a) Block-diagram of the final stage amplifier module, (b) the input-to-output characteristic of the final stage amplifier (NXP, MRF6VP61K25HR6) and (c) the efficiency and drain current of the amplifier, as functions of the input/output power.

4. まとめ

我々は以上に述べたように、現状の SACLA 入射部の IOT 増幅器の代替えとなる、476MHz、100kW 出力のパルス高周波増幅器を設計した。そして数値シミュレーションと試験回路の評価で、鍵となる構成要素である TE011 モード空洞高周波電力合成器と最終段増幅器の特性から、本増幅器の実現可能性を探った。この評価結果である TE011 モード空洞分配器の基本動作や非常に低い損失、評価回路での 1kW 出力と 60%近い効率から、設計した増幅器の実現性は非常に高いことが判った。加えて、TE011 モード合成器の大きさは、増幅器の架台の代替えとして十分であり、架台として機能する効用として通常架台を除去し、大きくない SACLA の現状の設置面積に本増幅器が設置できることも確認した。

将来的に設計した増幅器は、SACLA に使用する実機として製作される予定である。加えて、使用した素子は連続高周波にも使用できるものであり、機器の冷却を強化すれば、放射光リングの高周波源としても使用可能である。特に TE011 モード空洞は、高エネルギー加速器研究機構の KEKB リングで使用されている ARES システム[12]と同様の高周波モードで、これを本手法で駆動することで、高周波源をリングトンネル中に入れることになるが、大電力サーキュレータや導波管系を除く高周波システムの構築も可能となる。これは、加速器建設費の大きな節約につながる。

謝辞

筆者らは、本研究を行うにあたっての支援に対して、理化学研究所の放射光科学総合研究センターの石川センタ長と XFEL 研究開発部門の田中部門長に感謝いたします。加えて、この開発品の製作を依頼している日本高周波(株)の面々の支援にも感謝いたします。

参考文献

- [1] A. S. Gilmour, Jr, Microwave Tubes, Chap. 8, 191 (1986).
- [2] A. S. Gilmour, Jr, Microwave Tubes, Chap. 8, 196 (1986).
- [3] W. Pirkl, Choice of rf Frequency, CAS -CERN Accelerator School: Radio Frequency Engineering, 336-350 (2005).
- [4] R. G. Cater, Review of rf Power Sources for Particle Accelerators, CAS -CERN Accelerator School: Radio Frequency Engineering, 107-145 (2005).
- [5] H. Hanaki *et al.*, Injector System for X-ray FEL at Spring-8, Proc. of EPAC08, MOPC010, 85-87 (2008).
- [6] E.g.; <http://www.nxp.com/products/rf/rf-power-transistors/rf-broadcast-and-ism/1.8-600-mhz-1250-w-cw-50-v-wideband-rf-power-lmos-transistors:MRFE6VP61K25H>
- [7] A. Jain *et al.*, High-power, Low-loss, Radial rf Power Divider/Combiner, Proc. of APAC2007, WEPMA143, 520-522 (2007).
- [8] Yuji Otake *et al.*, Cavity Combiner for S-band Solid-state Amplifier for The High-power Klystron at SLAC. SLAC-PUB-5197, March (1990).
- [9] Y. Otake *et al.*, PRAB, 19, 022001-1-22001-20 (2016).
- [10] E.g.; <http://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>
- [11] E.g.; <http://www.ampleon.com/products/broadcast/0-500>
- [12] Kageyama *et al.*, Development of High-power ARES Cavities, Proc. of PAC1997, 2092-2094(1997).