

次世代放射光源に向けた 500MHz 150kW 級半導体アンプシステムの R&D

R&D EFFORT ON THE 500-MHz 150-kW CLASS SOLID-STATE AMPLIFIER SYSTEM FOR THE NEXT-GENERATION LIGHT SOURCES

坂中章悟^{#, A)}, 山本尚人^{A)}, 高橋毅^{A)}, 日原禎彦^{B)}, 居石利昇^{B)}, 野口卓志^{B)}

Shogo Sakanaka^{#, A)}, Naoto Yamamoto^{A)}, Takeshi Takahashi^{A)}, Sadahiko Hihara^{B)}, Toshinori Sueishi^{B)},

Takashi Noguchi^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)} R&K Co. Ltd.

Abstract

Solid state amplifiers (SSAs) are very promising for RF sources in the next-generation synchrotron light sources. To develop the SSAs for such applications, we have conducted R&D effort on the SSA which can deliver an output RF power of 150 kW (CW) at a frequency of 500 MHz. First, we developed a prototype 1-kW SSA using which we assessed the performance of an LDMOS device which is used for the 150-kW SSA. Then, we designed a 150-kW SSA system which consists of four 40-kW SSA racks and one power-combiner rack. As a result, we have completed a practical design of the 150-kW SSA.

1. はじめに

ビームエミッタンス 100 pm-rad 程度を目指す次世代放射光源の建設やアップグレード計画が世界各地で進められている[1]。次世代放射光源の高周波 (RF) 源としては、高周波出力の安定度に優れ、保守が容易で、故障率の少ない半導体アンプが有望である。クライストロンなどの大電力電子管は、加速器に長年用いられてきて、高い信頼性や高い電力変換効率の点で十分な実績がある。しかし高電圧を扱うため保守に手間がかかる事や、高圧電源やクライストロンが故障した場合に復旧に時間がかかる事などの短所がある。このため、出力電力が比較的低い高周波源から、半導体アンプに置き換わってゆく傾向が世界的に見られる。放射光源においても、第3世代放射光源 SOLEIL において周波数 352 MHz, RF 出力 180 kW の半導体アンプシステム [2]が約 11 年間運転に用いられているのを始め、BESSY-II, SESAME, MAX-IV などの RF システムで半導体アンプが用いられている [2]。建設中の次世代光源 Sirius においても 500 MHz, 60 kW 出力の半導体アンプ 4 台で空洞 1 台を駆動する計画である[3]。自由電子レーザー光源においても、SLAC で建設中の LCLS-II において 1.3 GHz, 3.8 kW 出力の半導体アンプが 284 台使われる予定である[4]。

大電力高周波源として半導体アンプを使う長所としては、(1) 高圧電源を用いないため電源リップルに由来する RF 出力の変動が小さい、(2) 10 MHz 以上の広いバンド幅が可能、(3) 絶縁油を用いる必要がない、(4) 電子銃を用いないためウォームアップ時間が短い、(5) 多数のアンプユニットを用いるためその一部が故障しても運転を継続できる、などが挙げられる。また半導体技術の進歩により、今後の性能向上が期待できる点も魅力的である。RF 出力電力についても、連続 (CW) 出力で 100~200 kW 程度までは可能になっており、さらに大電力化が進められている。従来、半導体アンプはクライストロンに

比べて電力変換効率が低めであると言われてきたが、最近では AC から RF への変換効率が 50~56% (周波数 500 MHz) のものも製作されるようになってきており[2]、電力効率についてもクライストロンに迫ってきている。

次世代放射光源では、momentum compaction factor が小さいこと、高調波空洞を使う場合が多いこと、の為、ビームの縦方向振動 (シンクロトロン振動) の振動数が数 kHz 以下と低い。このシンクロトロン振動数に近い周波数での RF 位相変動は特に小さく抑える必要があり、半導体アンプを使うメリットが顕著である。また高い availability が求められる次世代放射光源においては、適度な冗長性を持ち、運転中断が少ない半導体アンプは魅力的である。

我々は、次世代放射光源で用いることを想定した、周波数 500 MHz で 1 台当たり 150 kW (CW) の RF 出力が可能な半導体アンプシステムを目標に R&D を行ってきた。まず大電力の増幅素子として実績のある LDMOS (Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductor) を用いて、出力 1 kW の半導体アンプを試作し、増幅特性や電力変換効率を評価した。次に、この LDMOS 素子を使用した多数の SSA モジュールからの出力を合成し 150 kW の RF 出力が可能な、半導体アンプシステムの設計を行った。設計においては、既に開発された技術をベースにし、早期に実機が製作できる事を目標とした。

2. 1 kW 半導体アンプの試作

大電力アンプシステムで用いる増幅素子の性能を評価するため、出力 1 kW の半導体アンプ (型番 R&K CA500BW2-2060M) を設計、製作した。増幅素子としては、1 素子で最大 1.25 kW まで出力できる LDMOS を用いた。1 kW 半導体アンプの仕様を Table 1 に、簡易ブロック図を Fig. 1 に示す。完成した 1 kW 半導体アンプを Fig. 2 に示す。

[#] shogo.sakanaka@kek.jp

Table 1: Specifications of the 1-kW Solid State Amplifier

| | |
|-------------------|------------------------------|
| Frequency range | 500.07 ± 1 MHz |
| Output RF power | > 1 kW (CW) |
| Gain | 20 dB (typical) |
| Operating mode | class AB |
| Cooling | water, 10 liters/min., 1 MPa |
| Device | LDMOS from NXP |
| Power consumption | 2 kVA (typical) |



Figure 1: Block diagram of the 1-kW solid state amplifier.

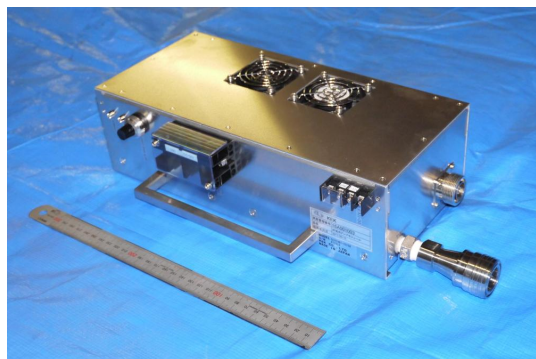


Figure 2: Picture of the 1-kW solid state amplifier.

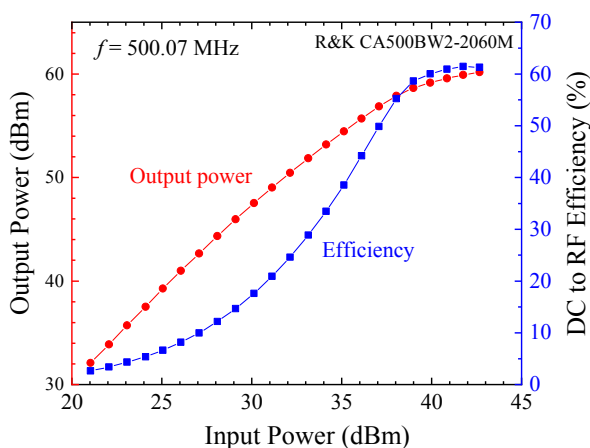


Figure 3: Measured gain curve (red symbols) and DC to RF efficiency (blue symbols) of the 1-kW solid state amplifier.

次に試作した 1 kW 半導体アンプの性能試験を行った。Figure 3 に、周波数 500.07 MHz において測定した

半導体アンプのゲインカーブと電力変換効率(DC to RF)を示す。出力 RF 電力 1 kW の時、ゲインは 17.5 dB、電力変換効率は 61.3%であった。ここで変換効率 $\eta_{DC \rightarrow RF}$ は次式で定義した:

$$\eta_{DC \rightarrow RF} = \frac{P_{out} - P_{in}}{P_{DC}} \quad (1)$$

ここで P_{in} , P_{out} , P_{DC} はそれぞれアンプの入力 RF 電力、出力 RF 電力および供給 DC 電源電力である。1 kW 出力時の 2 次高調波は -33.85 dBc と十分小さかった。1 kW 出力時の LDMOS デバイスの温度は 91.4°C であり、問題ない温度であった。また、周波数 499.07 MHz と 501.07 MHz においても同様の試験を行い、Fig. 3 とほぼ同じ結果を得た。これらの試験により、使用した LDMOS 素子は、150 kW アンプシステムで使用する為に十分な性能を有することが実証された。

3. 150 kW 半導体アンプシステムの設計

3.1 150 kW 半導体アンプシステムの設計

KEK で設計研究が行われている次世代放射光源 KEK-LS [5,6]では、RF 周波数 500.07 MHz が用いられる。5 台の加速空洞を用いて合計 2.5 MV の加速電圧を発生し、空洞 1 台当たり約 130 kW の RF 電力を供給する必要がある(高調波空洞を用いる場合)。この KEK-LS の高周波源を想定し、中心周波数 500.07 MHz、最大 RF 出力 150 kW の半導体アンプシステムの設計を行った。設計上の目標仕様を Table 2 に示す。

Table 2: Specifications of the 150-kW Solid State Amplifier System

| | |
|---------------------|-------------------------------|
| Frequency range | 500.07 ± 1 MHz |
| Output RF power | > 150 kW (CW) |
| Gain | 72 dB (typical) |
| AC to RF efficiency | > 40% |
| Operating mode | class AB |
| Cooling | water, 415 liters/min., 1 MPa |
| Device | LDMOS from NXP |
| Input AC | 3φ200V (main), 1φ100V (aux.) |

RF 源を光源加速器に組み込んで使用する際には、信頼性が高く故障率が少ないこと、部分的な故障があっても運転が継続できること、保守作業が行い易いことなどが重要である。これらを考慮しながら、できるだけ電力変換効率が高い設計を目指した。設計したアンプシステムの全体構成を Fig. 4 に示す。RF 出力 40 kW のシステムラックを 4 台用意し、各々から WX-152D 同軸給電線で RF を出力する。これらの出力を radial combiner で 4 合成し、WR-1500 導波管で 150 kW の出力を得る構成とした。システム全体の配置図を Fig. 5 に示す。設置面積として 4.15 m × 3.03 m が必要である。

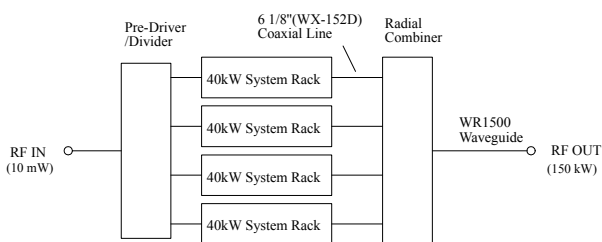


Figure 4: Configuration of the 150-kW SSA system.

増幅器の基本ユニットとなる半導体アンプ(SSA)モジュールのブロック図を Fig. 6 に示す。各 SSA モジュールには前章で評価した LDMOS 素子を 2 個組み込み、RF を 2 合成して出力する構成とした。各 SSA モジュールは 2 kW までの出力が可能であるが、これを 1 台あたり約 1.38 kW の出力で使い、冗長性を持たせる。これにより、SSA モジュールのうち幾つかが故障しても運転を継続できるようにする。

40 kW システムラックのブロック図を Fig. 7 に示す。1 台の 40 kW システムラックには、メインアンプとして上記の SSA モジュールを 32 台組み込む。各 SSA モジュールからの出力を 4 合成した後、8 合成し、約 40 kW の RF 出力を得る。4 合成器と 8 合成器には radial combiner を用いる。電源については、必要な電源電圧の種類に応じて A~E の 5 種類の電源モジュールを用いる。主 SSA モジュールに電源を供給する方式を Fig. 8 に示す。DC 50 V、2.5 kW の電力を供給する E 型電源モジュール 6 台を束ね、4 台の SSA モジュールに電源を供給する。これにより電源に約 20% の余裕度ができ、1 台の電源モジュールが故障しても運転を継続できる。

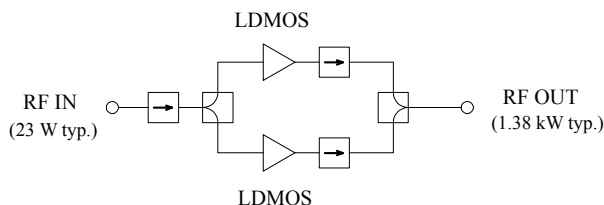


Figure 6: Block diagram of the SSA module.

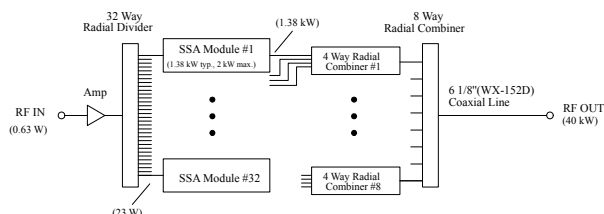


Figure 7: Block diagram of the 40-kW system rack.

40 kW システムラックの正面図を Fig. 9 に示す。中央部に電源モジュールを配置し、両側に SSA モジュールを 33 台(1 台は前段用)設置する。SSA モジュール、電源モジュールとも、保守の際にはモジュールを素早く入れ替えることができる設計とした。特に SSA モジュールの RF コネクタはスナップオン対応とし、コネクタを手で締める必要がない設計とした。システムラック下部には熱交換器ユニットを配置し、ラック内の空気を水により冷却するため、周囲への放熱はほぼ無い。RF 出力はラック後方から WX-152D 同軸給電線で出力される。なお、本設計では、LCLS-II 向け半導体アンプの経験もふまえ、保守

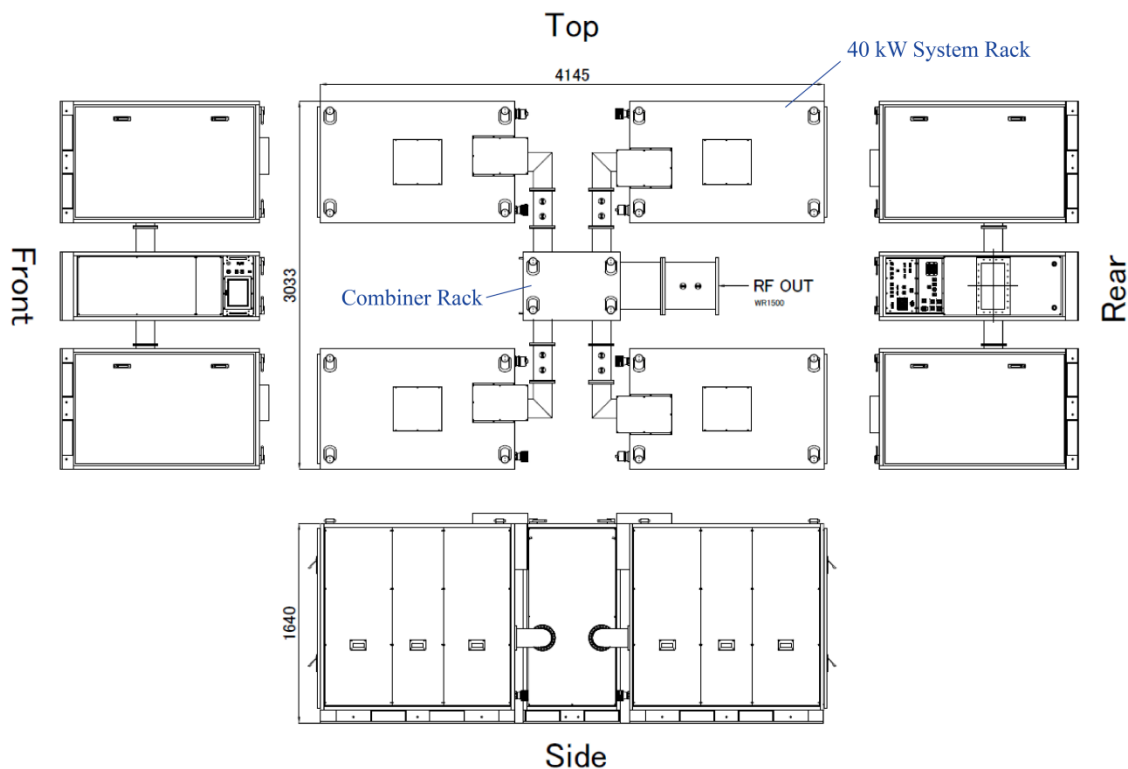


Figure 5: Layout of the 150-kW SSA system.

性や信頼性に優れた実用的な設計を採用している。

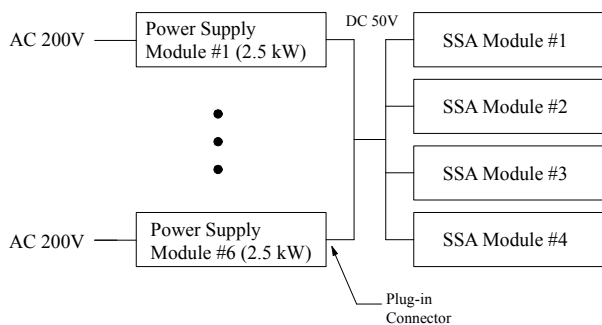


Figure 8: Block diagram of the power supply for the SSA modules.

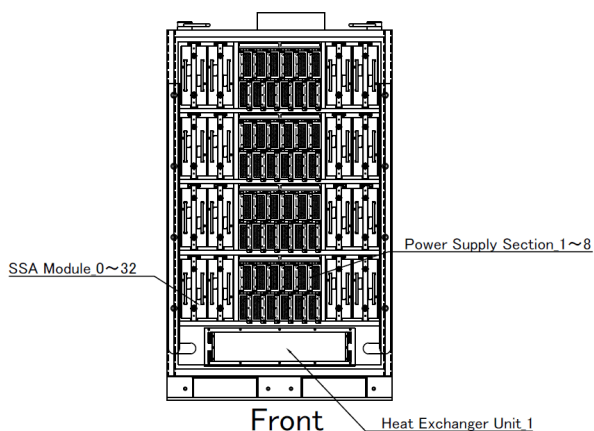


Figure 9: Front view of the 40-kW system rack.

電力変換効率については、次のように見積もられる。増幅素子単体(サーキュレータ含む)の効率が実測値で61.3%、SSA モジュール内での損失が-0.30 dB、SSA モジュール出口から 40 kW ラック出口までの損失が-0.49 dB、40 kW ラック出口から 150 kW 合成器後までが-0.14 dB と評価され、DC to RF 変換効率が約 49.4%と見積もられる。直流電源の AC to DC 変換効率を 95%と仮定すると、システム全体での AC to RF 変換効率は約 47%と見積もられる。

3.2 変換効率の向上の見通し

文献[2]では、放射光源 SESAME 向け 500 MHz, 80 kW 半導体アンプにおいて、AC to RF の変換効率として、56% (nominal power において)および 50% (nominal power の半分の出力において)を達成したと報告されている。これと比較して、我々が設計検討を行った 150 kW アンプシステムでは変換効率がやや低めであるが、RF 合成の方式を改善することで、変換効率の向上が可能である。現時点で、AC to DC 変換効率として 50.6%~54.5%まで改善できる目処がついている。直流電源については、ここで仮定した変換効率 95%の製品が入手可能であり、その評価も進める予定である。

本開発研究で評価したように、AC to DC 変換効率として、47%(Figs. 4-9 の設計通りの場合)~54.5%(RF 合成の見直しを考慮した場合)が得られれば、放射光源用の高周波源として十分実用的である。

なお、ここで評価した変換効率は、デバイス保護のための SSA モジュール内のサーキュレータでの損失に加えて、空洞からの反射 RF から装置を保護するためのサーキュレータでの損失(約-0.25 dB)を含んだ値である。クライストロンでの変換効率と比較するため、後者のサーキュレータを含まない AC to RF 変換効率を示すと、RF 合成の見直し後で、53.6~57.7%が見込まれる。このように、半導体アンプでもクライストロンと遜色ない変換効率が見通しできる見通しである。

4. まとめ

次世代放射光源への応用を目標に、周波数 500 MHz、出力 150 kW の半導体アンプシステムの開発研究を行った。まず 1 kW の RF 出力が可能な半導体アンプを開発し、増幅素子の性能を評価した。1 kW 出力時にゲイン 17.5 dB、DC to RF 変換効率 61.3%(サーキュレータ含む)が得られた。次に、評価した LDMOS を 2 素子組み込んだ SSA モジュールからの出力を多数合成し、出力 150 kW が可能な半導体アンプシステムの詳細設計を行った。RF 出力 40 kW のシステムラックを 4 台用意し、電力合成する方式とした。設計に際しては、高い availability が得られること、機器配置に無理がなく保守が容易であること、高い電力変換効率が得られることを目標とした。現時点で見積もられた変換効率は DC to RF で約 49.4%、AC to RF で約 47%(電源の AC to DC 変換効率が 95%の場合)である。さらに RF 合成の方式を見直すことで、変換効率を 54.5%程度まで改善できる見通しである。本開発研究により、次世代放射光源に応用できる実用的な 500 MHz、150 kW 級半導体アンプシステムを、早期に製作できる見通しがついた。

謝辞

本開発研究を進めるにあたり、株式会社アールアンドケーの小花利一郎氏、長谷川貴俊氏に有益な助言を頂きました。深く感謝致します。

参考文献

- [1] L. Liu and H. Westfahl, Jr., "Towards diffraction limited storage ring based light sources", Proceedings of the 8th International Particle Accelerator Conference, IPAC'17, Copenhagen, Denmark, 2017, pp. 1203-1208.
- [2] P. Marchand, "Review and prospects of rf solid state power amplifiers for particle accelerators", Proceedings of the 7th International Particle Accelerator Conference, IPAC'17, Copenhagen, Denmark, 2017, pp. 2537-2542.
- [3] R.H.A. Farias, A.P.B. Lima, L. Liu, and F.S. Oliveira, "Design and status of Sirius light source rf systems", Proceedings of the 8th International Particle Accelerator Conference, IPAC'18, Vancouver, BC, Canada, 2018, paper WEPMF011.
- [4] A.D. Yeremian, C. Adolphsen, J. Chan, G. DeConteras, K. Fant, and C. Nantista, "LCLS-II high power rf system overview and progress", Proceedings of the 7th International Conference on RF Superconductivity, SRF2015, Whistler, BC, Canada, 2015, pp. 562-565.

PASJ2018 THP061

- [5] 高エネルギー加速器研究機構・放射光科学研究施設,
“KEK 放射光 Conceptual Design Report (CDR) ver.1.1”,
2017年5月22日;
http://www2.kek.jp/imss/notice/assets/2017/05/22/KEKLS_CDR_170522.pdf
- [6] N. Yamamoto, T. Takahashi, S. Sakanaka, “Reduction and compensation of the transient beam loading effect in a double rf system of synchrotron light sources”, *Phys. Rev. Acc. Beams* 21 (2018) 012001.