

DEVELOPMENT OF STABLE SOLID-STATE RF AMPLIFIER FOR SCSS-XFEL PROJECT

Tsumoru Shintake^{1 A)}, Yuji Otake^{A)},
Yasuo Suzuki^{B)}, Shun Kuwabara^{B)}, Kenji Nagatsuka^{B)}

^{A)} RIKEN Harima Institute,
1-1-1, Kouto, Mikazuki-cho, Hyogo, 679-5148, Japan

^{B)} NIHON KOSHUHA Corp.
1119 Nakayama-cho, Yokohama, 226-0011, Japan

Abstract

Solid-state rf amplifiers have been developed for the SCSS XFEL project at RIKEN/SPring-8 Japan. In order to realize X-ray laser at 1 Å based on SASE-FEL (Self-Amplified Spontaneous Emission mode Free Electron Laser), a high intensity and high quality electron beam has to be generated and transferred through a long undulator line along a fairly straight trajectory. Required peak beam current is as high as 2 to 4 kA, while the normalized beam emittance has to be lower than 1 π .mm.mrad. To generate such a beam current, we extract relatively low current from electron gun, which uses thermionic cathode made by single crystal CeB₆, and compress bunch-length by factor 40 in the injector and another 15 in the first chicane type bunch compressor and 6 in the second bunch compressor, finally the peak current reaches to 2 to 4 kA. Such a high compression system requires very stable accelerating field. To realize this system, we started R&D on stable rf power supply, which includes HV inverter charger for pulse modulator, low power rf driving system, the solid state rf amplifier, and digital feedback system. In this paper we report result of solid state RF amplifier development.

高安定ソリッドステート高周波アンプの開発

1. はじめに

理研播磨研究所にてX線FEL (SCSS計画) を推進中である^[1]。SASE型自己増幅型の自由電子レーザーは、次世代の放射光源として、生命科学、物性物理、ナノテクノロジーなどの分野で期待されている。コヒーレントで非常に強力なレーザー光が波長 1 Å の真の意味の X 線領域にて得られるからである。

しかし自由電子レーザーにおいて、目的とする共振波長が短くなるにつれて、光の増幅率が小さくなるので、これを補うために、高密度かつ低エミッタンスの電子ビームが必要となる。高密度、すなわち数キロアンペアに及ぶ大電流の電子ビームをカソードから直接発生することは出来ない (電流は得られたとしても 1 π .mm.mrad という低エミッタンスは実現できない)。空間電荷効果、バンチ圧縮過程での CSR 効果などを回避して上記の困難なパラメータを達成するには、「断熱圧縮」すなわち、加速とともに Velocity Bunching する手法が必須である。エネルギーの低い電子銃からは Long pulse、Low current にて引き出し、これを低い周波数から加速とバンチ圧縮とを行い、電子系から見て一定の電子密度となるようにプリバンチャー、バンチャーと加速、圧縮を加えてゆく方法がベストと考えこの方針で技術開発を行っている。SCSS XFEL では、約 1 アンペアの電子ビームを電子銃から取り出し、最終的に 2-4 kA に

まで圧縮する。電子入射器での速度変調による圧縮が 40 倍、上流シュケインにて 15 倍、下流シュケインにて 6 倍に圧縮する。

このような、高い圧縮率の加速器では、加速電場の変動が、圧縮率分だけ増倍される。たとえば、電界強度の変動が 1% とし、圧縮率 100 倍とすると、単純には圧縮後のバンチのピーク電流の変動は 100% となってしまう。これは最悪条件であり実際には低エネルギー部での相対論効果、シュケイン圧縮用のバンチ内のエネルギー勾配などを考慮すると、いくぶんゆるい条件となる。SCSS-XFEL においては、加速電界の安定度 10^{-4} 、位相安定度 10^{-3} rad (0.1 度) が目標である。パルス運転の電子加速器においては、現状の安定度はこれより 10 倍程度悪いのが現状である。

上記の安定度を得るために、加速電界をパルスごとにモニターして、次のパルスに補正を加えるデジタル・RF フィードバックシステムを開発しており、これによって、時間的にゆるやかな変動が要求安定度以下に抑えられる。またパルス内変動 (パルスごとには再現するが、パルス内にて変動) は、空洞の Q と加速管の群遅延によって平均化されて電子ビームにはほとんど観測されない。残る問題はジッタ成分であり、これが上記の安定度でなくてはならない。すなわち、solid-state rf amplifier の出力のジッタ 10^{-4} が要求される。

¹ shintake@spring8.or.jp

SCSS試験加速器プレバンチャ空洞向けに238 MHz 10 kWアンプ、ブースター用476MHz IOTドライブ 2 kWアンプ、C-band klystronドライブ 500 Wアンプを同時に開発した。

2. 設計方針

2.1 ジッタ対策

高純度の入力信号に対して、アンプ出力のRFベクトルに含まれるジッタ成分の主な原因は、回路部品の機械的振動と電源のリップルによる混変調である。UHF帯の増幅器として以前は真空管が使われることがあったが、グリッドが機械的に振動しやすく安定性に劣る。ソリッドステートはこの問題はまったくない。また共振回路にタンクコイルを使用すると、これも機械振動の原因となるので、すべて基板上のストリップラインの設計とした。

電源のリップルとして最も注意が必要なのは、スイッチング電源を使用した場合の、スイッチングにともなうスパイク状の回りこみであり、これは無視できない量となる場合が多く、今回は電源効率は劣るがシリーズレギュレータ方式を採用した。

SCSS加速器の電磁石の電源や、476 MHz系のIOT用の高電圧電源などは、スイッチング方式を採用する必要から加速器のパルス周波数60 Hzに同期させる方式としており、仮にスイッチングノイズが回り込んだとしても、パルスごとに一定となり、ジッタに寄与しない設計となっている。

2.2 パルス幅内のゲイン、位相のダイナミックな変動対策

パルス性のRF信号が入力されると、半導体の動作点がスイッチするために、発熱量がパルス的に変化し、これによって接合容量等がパルス的に変化するために、出力の位相が流れることがソリッドステート・アンプでしばしば問題となり、数々の工夫が行われている。半導体をDC的に余熱し相対変動を小さくする方法、メインのパルスが来る前にダミーのパルスを送って半導体を余熱する方法などである。これらの対策は、ある程度の効果は期待できるが、余剰の発熱や、トリガー回路系の複雑さなど問題が多い。

幸いなことに、この種の変動はパルスごとに同じ現象を正確に繰り返すために、習い制御方式のフィードバックの採用によって、ほぼ完全に補正可能であり、積極的な対策は行わないこととした。

2.3 水冷方式

習い制御方式のRFフィードバックが安定に動作する条件として、変動パラメータの数を出来るだけ少なくしておくことが上げられる。そこで半導体アンプの増幅素子の温度を出来る限り一定にしておくことが重要である。冷却能力不十分の場合、RFの信号レベルを変化させたとき内部消費のために増幅素子の温度が上昇し、これに伴って位相が流れる。

表1 SCSS試験加速器向けアンプ

Operation Frequency	238	476	5712	MHz
Peak Output Power	10	2	0.5	kW
Pulse Length	100	50	5	μsec
Repetition Frequency	60	60	60	pps
Input Power	0	0	0	dBm

冷却方式として空冷か水冷かの選択があるが、空冷は冷却能力に制限があること、空冷ファンに寿命があること、エアフィルターのメンテナンスを要すること、取り込み外気の温度変動を受けやすいことなどから採用しなかった。一方、水冷は大きな冷却能力が得られ、また、加速器の温調された循環水を使用すると増幅素子の温度をかなり一定にできるという大きなメリットがあるが、反面、「水漏れ事故」の不安がつきまとう。

従来の加速器で採用されていた冷却水システムでは、吐出圧力が10 kg/cm²近くもあり、これをそのまま使用すると水漏れの危険が非常に大きい。ちなみにレーザー業界では、一般にゲージ圧力2 kg/cm以下の冷却水をローカルにチラーを通して流している。このように独自の冷却システムを持てば自由に圧力を変えられるがシステムが複雑となる。また閉ループの水のメンテナンスも必要となり、多数の増幅器を使用する加速器では非現実的であろう。

我々の加速器では、冷却水の過大な圧力供給に伴う水流ポンプの回転羽からの振動を低く抑えるために、吐出圧力を5 kg/cm²としており、これをそのまま増幅器の冷却に使用するには圧力は高いが、シンフレックスチューブの許容最高圧力が8 kg/mm²となっていることから、一応、安全範囲と考えられる。ただし、人為的なミスによる配管アダプターの閉め忘れ、インナーの入れ忘れによるチューブの抜けなどは避けがたいので、慎重なる施工、立ち上げの実施を前提とする。

冷却板は銅板に銅パイプをロウ付けによって固定し、高い熱伝達率を確保している。銅パイプの経路は、出来るだけ増幅素子に近い場所をつらぬくようにした。

3. 238 MHz 増幅器

今回のSCSS試験加速器向けに表1に示すように3種類のソリッドステートRFアンプを日本高周波株にて開発した。それぞれ動作周波数と出力のスペックは異なるが、基本設計思想は同じであり、ここでは238MHz増幅器について詳細を説明する。

図2に回路のブロックダイアグラムを示す。増幅器内部は4つのパワーアンプモジュールが用意しており、一般にはひとつに合成して出力するが、ここでは、4並列独立に出力し、負荷となる238MHzのプレバンチャー空洞にて合成している。これによって、合成器を不要とし、ケーブル、コネクタの負荷を4分の1に低減することができる。ただし、空洞の設計と製造、そして調整に、4並列ドライブの最適整合についての正しい理解が求められる。これに

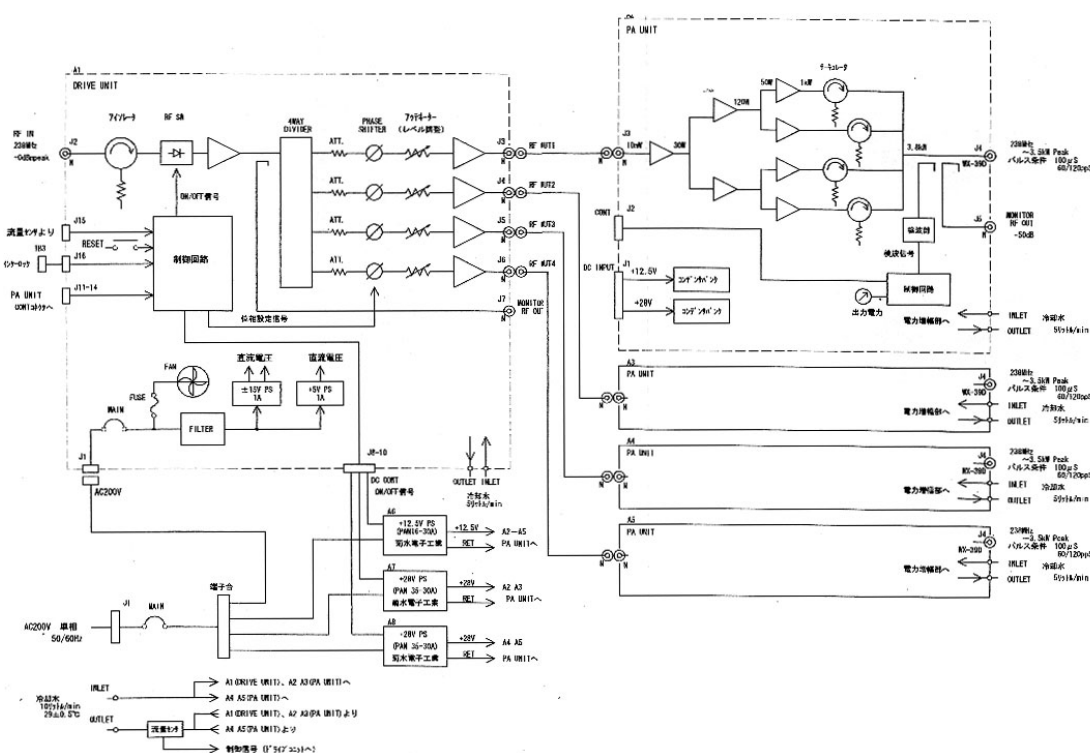


図1. 238 MHz、10 kWアンプ、回路構成

については、柱野が本会にて発表しているので参照していただきたい^[2]。

図2にパワーモジュールのパルス出力特性を示す。3.5 kWにて100 μ secのパルスを安定に出力できることが示された。これは238 MHzプレバンチャー空洞のQLが2600であり、1/e時定数が10 μ secであることを考慮して十分な能力と判断できる。

図3に位相応答を示す。パルス内にて位相の流れは1度以内であり、十分な性能が得られている。また8時間のランニング試験では、初期2時間にわたって、位相が5度程度流れるが、その後は安定となり、 ± 1 度の範囲にはいっている。

なお、1度弱の位相ジッタが観測される場合があ

り、これが真のジッタなのか、測定回路の問題なのかは、これからの調査を待たなくてはならない。

古い制御方式のRFフィードバックがRFベクトル検出に依存しているので、加速器に実装する場合に信頼できる「RF計測」システムを構築してゆかなくてはならない。これが大きな課題である。

なおここでは、X線FEL向けの設計の基本方針のみを述べた。アンプの詳細については、製造メーカーに問い合わせ願いたい。

参考文献

- [1] 新竹 積、ほか、「理研X線FEL、SCSSプロジェクトの現状」、本研究会
- [2] 柱野竜臣、他、「SASE-FEL用238MHz空洞の開発」、本研究

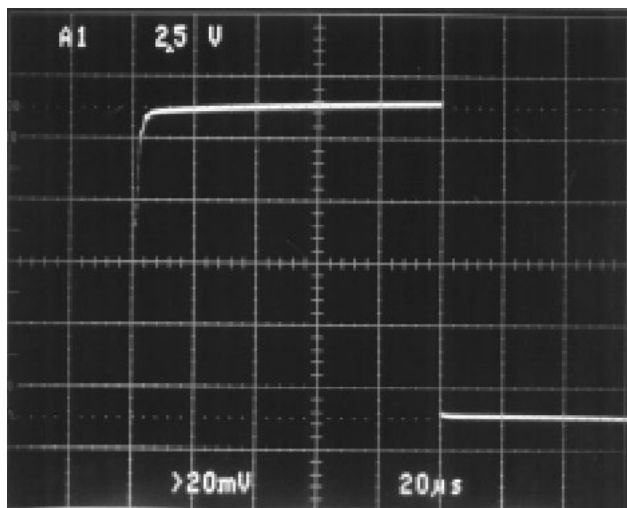


図2 パルス電力出力特性 (検波器使用)

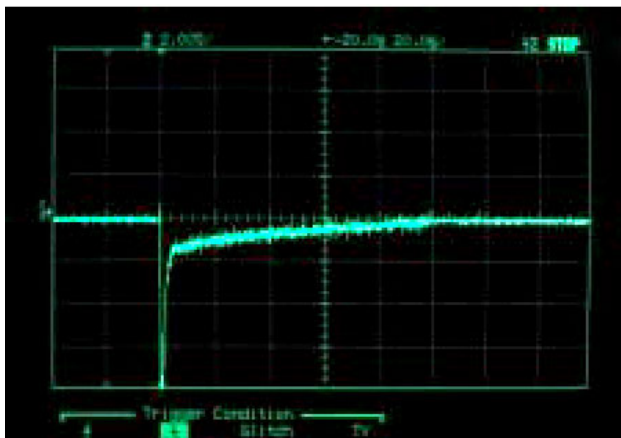


図3 パルス位相応答 (1°/DIV)