

21-P12

DEVELOPMENT OF SOLID-STATE COAXIAL SWITCH FOR KEKB

Hiroaki KATAGIRI and Yuji OTAKE
National Laboratory for High Energy Physics (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305

ABSTRACT

A fast solid-state switch using FETs to be used for observing S-band rf waveforms, such as klystron or SLED cavity outputs, is under development for realizing real time and accurate monitoring of the KEKB rf system. This paper describes requirements, design and tests for evaluation of it. Results of the tests showed that the amplitude/phase stability was 0.05 dB and 0.5 deg, respectively, at the room temperature ± 0.5 °C.

KEKB用半導体同軸スイッチの開発

1. はじめに

KEKB計画に伴い2.5GeVリニアックの8GeVへの増強が進められている。マイクロ波源としては50MWクライストロンやSLEDの様な電力増倍装置の導入を予定している[1]。SLEDを用いたシステムの場合、出力波形が複雑でピーク電力も高くなることから、安定に運転するためにマイクロ波の波形監視システムの開発を進めている。このシステムではクライストロン出力、SLED出力など多数の波形の振幅及び位相を常時監視するため、波形選択用の同軸スイッチを頻繁に切り替える必要がある。現在リニアックで使用している機械式同軸スイッチは寿命の問題があり、この様な用途には向いていないため、新たに半導体素子を用いた同軸スイッチを開発することにした。

2. 要求される性能

マイクロ波の振幅や位相を精度良く測定するため、同軸スイッチが入出力間でパルス波形を正確に再現し、それ自身の変動はマイクロ波源に要求される安定度より充分小さくなければならない。KEKBリングからの要求でビームエネルギーの変動を $\pm 0.2\%$ 以内に抑えなければならないことから、マイクロ波源にも同様の安定度が求められる。実際には大電力クライストロンは60台設置する予定でありその出力が互いに無相関に変動すると仮定すれば、全体に対する個々の変動は多少マージンを取り $\pm 1\%$ 程度まで許容されると考えることができる。これを実現するには、マイクロ波電力振幅の変動を $\pm 2\%$ 程度に抑える必要がある。一方、8台設置予定である大電力クライストロン励振用サブスタの位相の場合は $\Delta V/V = -1/2(\Delta \theta)^2$ の近似式から ± 3 度程度の変動に抑えなければならない。波形監視システムでの測定にはこれ以上の

精度が必要になり、当然半導体スイッチにも同様の安定度がなければならない。実際に波形監視システムを使用するクライストロンギャラリーの温度 $25^{\circ}\text{C} \sim 28^{\circ}\text{C}$ の範囲内でこの性能を上回ることを目標とした。また、このシステムではリニアックのパルスレートである50PPSのパルス毎に波形を取り込み処理することを考えており、その処理速度を考慮すると、スイッチの切り替え時間は数ms以下でなければならない。

その他に求められる点として以下のものがある。

- 1) 周波数帯域はSLED出力の立ち上がり部分を考慮し、 $2856 \pm 100\text{MHz}$ 程度必要である。
- 2) ポート間のアイソレーションは、振幅の変動と同じ理由から45dB程度が要求される。
- 3) インサクションロスとは特別低損失である必要はなく、各ポート間で特性の偏りが少ないことを重視する
- 4) 波形監視システムによるマイクロ波の振幅、位相の測定に必要なとされる電力は数十mW程度で、スイッチの許容電力は100mWあれば充分である。

これらの点を満足した上で、制御回路等をできるだけ既存の同軸スイッチと互換性を持たせる方向で開発を進めている。

3. スwitchの選定と特性試験

既存の機械式同軸スイッチと類似した4~6入力1出力で双方向のスイッチを製作するため、多入力のスイッチを構成できることが条件となる。半導体スイッチとしてPINダイオードスイッチとFETスイッチの2つを特性の評価のため、カタログ[2],[3]から仕様を比較してそれぞれ1種類を選定した。FETスイッチは2入力のものを選んだが、複数台組み合わせることで多入力を実現できる。

どちらのスイッチもRFのコネクタ (SMA) つきで、TTLコンパチブルのドライバを内蔵している。表1に各スイッチの仕様を示す。

表1. 各スイッチの特性

PINダイオードスイッチ (4入力1出力)			
Alpha社MT3894A-P3-1			
Frequency Range	0.5~4GHz		
Insertion Loss	Max. 1.3dB		
Isolation	Min. 45dB		
VSWR	Max. 1.6		
Switching Time	Max. 2 μ s		
FETスイッチ (2入力1出力)			
Mini-Circuits社ZYSW-2-50-DR			
Frequency Range	DC~5GHz		
Insertion Loss	Typ. 1.4dB	Max. 2.1dB	
Isolation	Typ. 24dB	Min. 22dB	
VSWR(ON)	Typ. 1.4	Max. 2.0	
Switching Time	Typ. 3ns	Max. 5ns	

PINダイオードスイッチはアイソレーションが高いこと、FETスイッチはDCから使用できる点など、それぞれ利点があるが、今回は後者の理由により用途が広くしかも安価であることから、性能に大差が無ければFETスイッチを採用する方向で検討することにした。性能評価のため、ネットワークアナライザを使用してPINダイオードスイッチ1台、FETスイッチ8台のSパラメータを測定した。その結果を表2に示す。

表2. スイッチ測定結果

PINダイオードスイッチ				
	Max.	Min.	Ave.	σ
Insertion Loss[dB]	1.165	0.940	1.065	0.102
Isolation[dB]	76.61	62.59	68.48	5.872
Reflection[dB]	25.25	19.13	21.82	2.658
Phase Shift[deg.]	6.23	5.55	5.85	0.32
Frequency	2856MHz			
FETスイッチ				
	Max.	Min.	Ave.	σ
Insertion Loss[dB]	1.164	1.119	1.139	0.014
Isolation[dB]	23.38	22.74	23.20	0.194
Reflection[dB]	29.17	20.62	25.35	2.338
Phase Shift[deg.]	44.89	41.42	43.12	0.96
Frequency	2856MHz			

どちらも我々の要求を満足し得るが、表から分かるようにPINスイッチはポートによって特性のばらつきが大きいことが判明した。このことから最終的にFETスイッチの採用を決め、7台を図1の様に接続し、4入力の構成として使用することにした。各ポート入力段のスイッチはアイソレーションを改善するために使い、約50dB確保できることを確認した。切り替え速度の試験の結果は表1に近い値になり、先に述べた要求は充分満たされたと判断した。

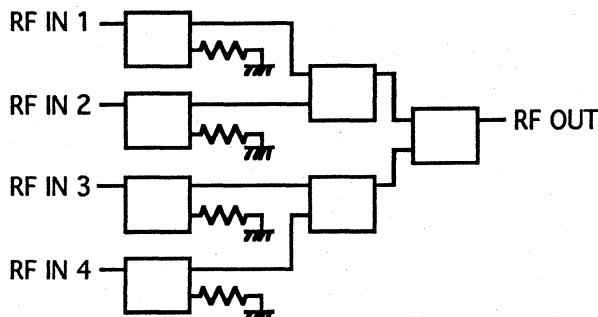


図1. FETスイッチによる4入力回路の構成

4. モジュールの試作と試験

FETスイッチとPINダイオードスイッチを組み込んだ半導体同軸スイッチユニットの試作品を既存の同軸スイッチのシャーシと制御回路を使用し製作した。完成後、次の試験を行った。

1) 各ポートの特性試験。

ネットワークアナライザで各ポート (図1のRF IN1~4とRF OUTの間) のSパラメータを測定した。先に述べたスイッチ単体での試験と同等の結果を得た。

2) 長時間での変動測定

図2の方法で各ポートそれぞれ40時間程度動作させ振幅と位相の変動を測定し、図4のデータをレコーダで記録した。この間の温度は21.5 \pm 0.5 $^{\circ}$ Cで、FETスイッチ、PINダイオードスイッチとも振幅の変動は約0.05dB、位相の変動は約0.5度であった。

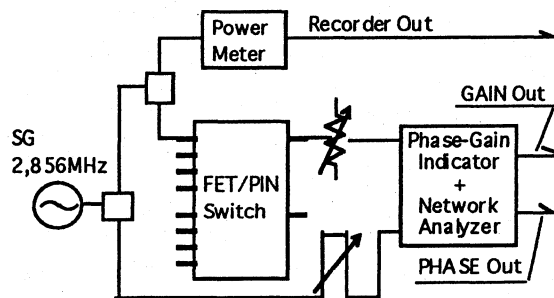


図2. 長時間での変動測定

3) パルス応答試験

図3の方法でパルス変調されたマイクロ波をスイッチに入力し、出力側で振幅及び位相検波波形が正確に inputs を再現するか観測した。入力と出力の波形を図5に示す。次に位相調整システムで実際に使用しているRFパルスで、同様に振幅波形を観測した。スイッチによる波形の変形は無く、どちらも良好な結果が得られた。

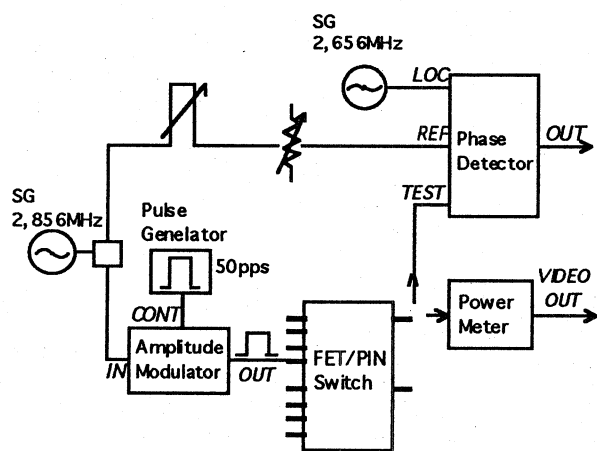


図3. パルス応答試験

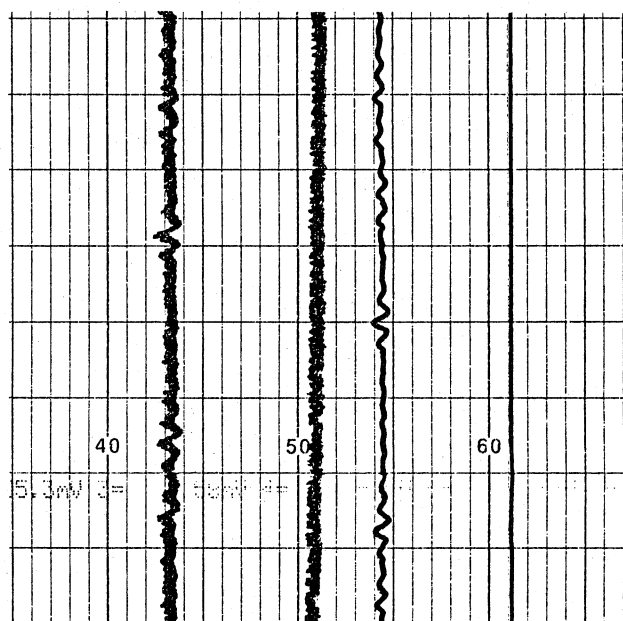
5. 試作品の評価と今後の開発予定

これまでの試験で、採用したFETスイッチは長時間の変動、パルスRFの応答とも温度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ の範囲では非常に良好な結果が得られたが、次の段階としてより広範な温度変化に対する安定度を測定する必要がある。

今後の開発としては、試作品ではスイッチ本体はコネクタ付きのモデルを使用し、セミリジッドケーブルで配線しているが、量産化に向けマイクロストリップライン上にスイッチのチップを配置してマイクロ波回路を組み、コストダウンを図ることを検討している。

参考文献

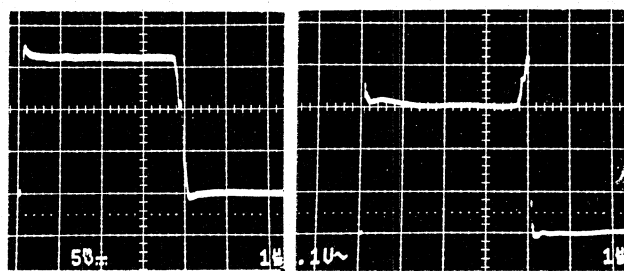
- [1]花木博文ほか,"パルス圧縮法によるP F リニアック高周波源の増強", Proceedings of The 18th Linear Accelerator Meeting in Japan
- [2]"RF/IF Designer's Handbook 1992/1993", Mini-Circuits.
- [3]"PIN DIODE SWITCHカタログ", 総合電子株式会社



縦軸は1cm/hで、グラフは左から温度、出力RFの振幅、出力RFの位相、入力電力。それぞれ1目盛り当たり、 0.5°C 、0.02dB、 0.2° 、0.67%に相当する。

図4. 長時間測定の結果

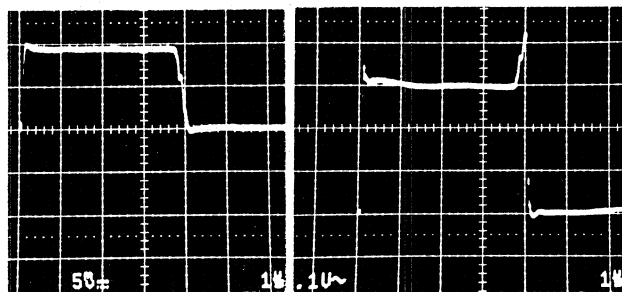
入力パルスの振幅波形 (左) と位相検波波形 (右)



0.5mV/div. $1\mu\text{s/div.}$ 0.1V/div. $1\mu\text{s/div.}$

FETスイッチの出力パルス

振幅波形 (左) と位相検波波形 (右)



0.5mV/div. $1\mu\text{s/div.}$ 0.1V/div. $1\mu\text{s/div.}$

図5. パルス応答試験の結果