

# サイリスタのアバランシェモードを用いた高電圧・高電流パルス電源の開発[III]

## DEVELOPMENT OF A HIGH VOLTAGE AND HIGH CURRENT PULSER USING AVALANCHE THYRISTOR[III]

内藤孝<sup>#</sup>, 明本光生

Takashi Naito<sup>#</sup>, Mitsuo Akemoto

KEK, High Energy Accelerator Research Organization

### Abstract

A high voltage and high current pulse switch has been developed using the avalanche mode thyristor (AMT) for the high voltage pulse source. AMT has a fast switching characteristics compare to the normal gate switching mode. However, the current rise rate of the AMT limits the steep current change and the minimum pulse width. Magnetic switch (MS) is used to make the delay of the current pulse from the AMT switching timing. Consequently, the stable high current pulse is generated by using MS. The output pulse of 11 stages of the AMT has a 65 kV peak voltage, 43 A peak current, the fall time of the pulse 100 ns and the pulse width 300 ns, respectively. The detail of the test results and the future prospects are discussed in this paper.

### 1. はじめに

短パルスによる電子銃の加速電圧を生成することを目的とした高電圧パルススイッチを開発している。通常、電子銃用の高電圧パルスではサイラトロンスイッチが使われている。これを半導体化し、コンパクトなパルス電源とすること、また、パルスを短パルスにすることによって放電の閾値が下がり、高電界を作ることが可能となる[1][2]。

短パルス高電圧の候補として、サイリスタの Avalanche モードを使ったパルス電源を開発している[3][4]。バイポーラ半導体の Avalanche モードを使ったスイッチは既に多くの研究がある[5]。Avalanche モードは耐圧ギリギリの電圧を印加した状態でさらに電圧を印加すると Avalanche 降伏により急激に電流が流れる効果を利用したもので、通常の入力電流によるスイッチより高速の特性が得られる。また、複数の半導体を直列に接続すると最下段をスイッチさせることにより上位の半導体が連続的にスイッチするために各段に入力トリガー信号を必要としない。このため回路構成は非常にシンプルに出来る。レーザー用ポッケルセルドライバーのような応用では製品化もされている[6]。かつては熱電子銃のグリッドパルサーとして短パルスビームの生成に使用された。これらの用途に使われた半導体は 300mW 程度のバイポーラトランジスタであり、1 個あたりの耐圧が 200V 程度と低く、電流も多くとることは不可能である。サイリスタは耐圧、ピーク電流ともに高く大電力化出来る可能性がある。しかし、小電力のトランジスタに比べサイリスタはスイッチング特性も違うため回路構成に工夫が必要なことが解ってきた[2]。さらに高電圧を生成するためにパルストランスを用いた昇圧も行った。その測定結果と回路特性について報告する。

<sup>#</sup>takashi.naito@kek.jp

Table 1: Specification of IXHX40N150V1HV (IXYS)

Max. Voltage	1500V
Max. Current (1 $\mu$ s)	7.6kA
Gate delay	50ns
Rise time	100ns

### 2. Avalanche mode thyristor (AMT) の 1 段のスイッチング特性

Table1 に今回試験に使用した IXYS 社製 IXHX40N150V1HV サイリスタの主なパラメータを示す。サイリスタの選択としては比較的スイッチング速度が速いこと、パルスモードでのピーク電流が大きいことから選択した。

Figure 1 に AMT 1 段の試験回路を示す。AMT はサイリスタの Gate を Cathode と同電位にし、Anode-Cathode 間に過大電圧を印加すると Gate に電流を流さなくても電流が流れオン状態へ移行する。この電圧はブレークオーバー電圧と呼ばれる。初段のサイリスタを通常のゲート入力でスイッチさせるとその上の段の AMT にブレークオーバー電圧を超える電圧が印加されスイッチする。AMT はゲート入力回路を必要としない。外部回路のコンデンサに蓄積された電荷はサイリスタをスイッチさせることによって負荷抵抗を流れる。Figure 2 にアノード電圧と負荷電流の変化を示す。負荷電流は高速の部分とあまり高速でない部分があるが、高速の部分が AMT のスイッチによる電流と推測される。50ns 以下であり仕様で示された値より高速でスイッチしている。他方、初段のサイリスタは通常モードでスイッチしているため、100ns 程度の時間では十分にオン抵抗が下がっていないように見える。アノード電圧も一度下がってから、負荷電流が流れると盛り上がっている。

る。これはオン抵抗が十分に下がっていないため、オン抵抗による電圧降下であると思われる。

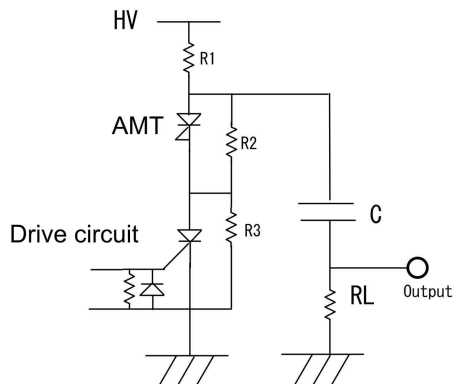


Figure 1: Test circuit of the AMT.

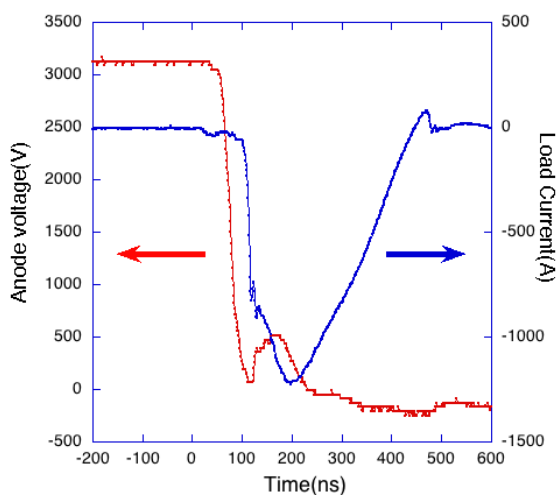


Figure 2: Switching characteristics of single stage AMT  
Anode voltage : 3.1kV, Load register(RL): 0.5 Ω ,  
Storage capacitor(C2): 66nF.

### 3. 多段接続 AMT のスイッチング特性

AMT を多段接続した場合の回路を Figure 3 に示す。Figure 2 の回路を単純に多段にただけでは 1kA を超える電流を流すことが出来なかった[3]。原因はサイリスタのスイッチング特性がゲート入力回路と同じようにサイリスタがオンになりアノード電圧が下がってもオン抵抗は十分に下がっていないことだった。オン抵抗が下がる過渡状態で大電流を流すためには負荷電流がゆっくり増えるようにしなければならない。AMT のスイッチ特性に於いても同様にアノード電圧が下がった後、オン抵抗が十分に下がるまで待つ必要がある。負荷にインダクタンスを入れて負荷電流がゆっくり立ち上がるようにすることは可能であるが、結局高速のスイッチング特性を犠牲にしてしまうことになるため、マグネチックスイッチ(MS)を入れることとした。MS は磁化特性が急激に飽和するコアを用いて、コイルに流れる電流によってコアが飽和するまでは高インダクタンスとして働き、コアが飽和すると低インダクタンスとし

て働くもので、コアが飽和するまでの時間は急激な電流変化を妨げる働きをする。MS を使用することで AMT がオンになってから負荷電流がピークに達するまでの時間を遅らせることが出来る。

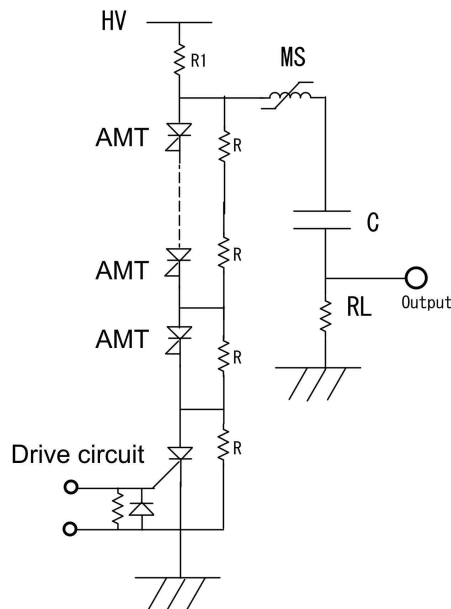


Figure 3: Test circuit of the multi-stage AMT with Magnetic Switch.

MS には日立金属製 FINEMET FT-3H を用いた。MS の非飽和領域を広く使用するためにコアには直流のバイアス電流を流しておき、パルス電流によってコアが飽和するまでの時間を約 2 倍にしている。

Figure 4 に AMT11 段回路のアノード電圧と負荷電流の変化を示す。アノード電圧は 50ns 以下で 19kV をスイッチしている。AMT は下段のスイッチ電圧で次の AMT をスイッチさせるため、多段接続してもほとんどスイッチング速度が遅くならない。負荷電流はアノード電圧がスイッチしてから約 200ns 遅れて MS が飽和し電流が流れ始める。スイッチング速度は約 100ns でピークに達している。負荷電流の

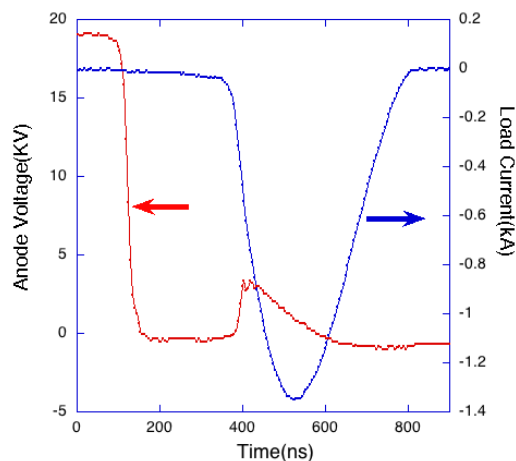


Figure 4: Switching characteristics of multi-stage AMT and a drive thyristor at the condition of Anode voltage: 19kV, Load register(RL): 8Ω, Storage capacitor: 17nF.

遅れ時間とスイッチング速度は負荷容量と飽和時のインダクタンスで決まり、コイルの巻き数を増やすと遅れ時間を増やすことが出来るが、インダクタンスが増えスイッチング速度も遅くなる。

#### 4. パルストランスによる昇圧

AMT11 段回路の出力にパルストランスを接続することで高電圧生成試験を行った。構成図を Figure 5 に、パルストランスの波形を Figure 5 に示す。パルストランスのコアには MS と同じ FT-3H を用いた。巻数比 1:12 とし、ピーク電圧 65kV を得た。抵抗負荷に比べて波形が少し変形しているように見える

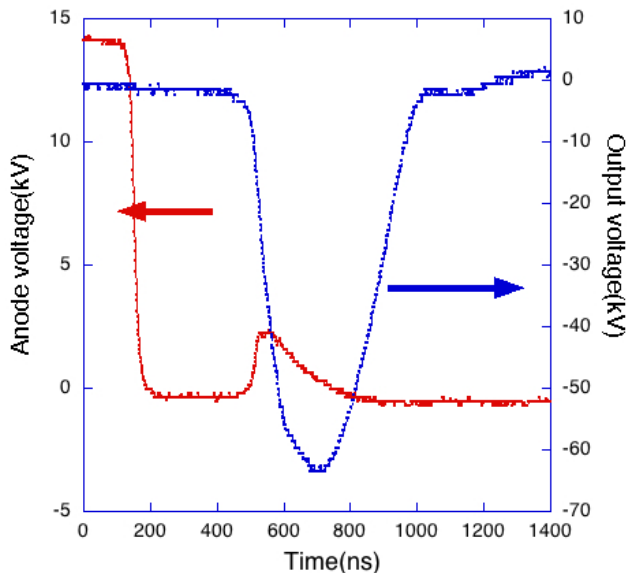


Figure 5: Test circuit of the multi-stage AMT with a pulse trans.

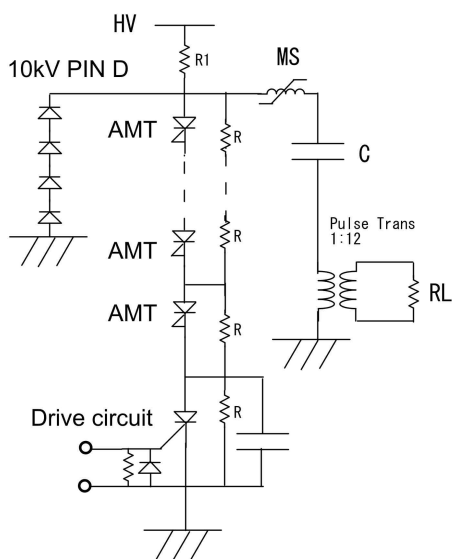


Figure 6: Waveform of the pulse trans output and the Anode voltage of AMT at the condition of Anode voltage: 14kV, Load register: 1.5kΩ, Storage capacitor: 17nF.

がコアはまだ飽和していないと思われる。

#### 5. 今後の展望

今回の試験では電子銃の加速電圧として使用する上で実用レベルの 65kV のパルスを実現することが出来た。今後、AMT を使ったパルス電源がサイラトロンや他の半導体スイッチと比較して優位性があるかを評価してゆく予定である。特に、放電などの負荷変動に対して、十分な耐性があるかを評価する必要がある。また、長期の使用に対して寿命があるかも評価する必要がある。回路構成に関しても、今回使用した IXHX40N150V1HV の他にも候補となるサイリスタもあるのでそれらも評価する予定である。

#### 謝辞

本研究は科研費 JP16K05034 の助成を受けたものです。本研究の一部は、共同研究体「つくばパワーエレクトロニクスコンステレーション(TPEC)」の事業として行われました。本研究を支援していただきました山口施設長、道園主幹に感謝致します。

#### 参考文献

- [1] G.J. Caporaso *et. al.*, LLNL-JRNL-416544, SEP. 2009.
- [2] K. Hasegawa *et. al.*, “パルス高電圧を用いた電子銃の実験”, PASJ2005 pp. 361-363, Jul (2005).
- [3] T.Naito *et. al.*, PASJ2018 FROM09, Aug (2018).
- [4] T.Naito *et. al.*, PASJ2019 THPH030, Aug (2019).
- [5] D.M. Benzel and M.D. Pocha, “1000-V, 300-ps pulse-generation using silicon avalanche devices”, Rev. Sci. Instrum. 56(7), July 1985.
- [6] <http://www.kentech.co.uk/index.html>