

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 [I]

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

内藤孝[#], 明本光生

Takashi Naito[#], 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 switches without the input gate trigger, when the break over voltage is applied between the anode and the cathode. The switching speed of the AMT is faster than the normal gate triggered thyristor. However, the current rise rate of the AMT limits the minimum pulse width. In order to overcome the problem, an inductance using amorphous saturation core is used. The switching characteristics of 10 stages of the AMT are that the peak pulse voltage 14kV, the peak current 1.4kA, the switching time 100s and the pulse width 200ns, respectively. The detail of the test results and the future prospects are discussed in this paper.

1. はじめに

高電圧パルス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]。DC-RF 電子銃などの応用では短パルスの高電圧パルスを使って高電界を作り高品質のビーム生成を試みている[2, 3]。我々は基礎研究として短パルスによる電子銃の開発を進めている。通常、高電圧パルス電子銃ではサイラトロンスイッチが使われ、パルス幅は数マイクロ秒でありパルス電源の大きさも大きくなる。サイラトロンスイッチでも 100 kV 前後までのパルスを直接生成することは出来ないためパルストランスを使って昇圧する。また、放電を避けるため大きな絶縁碍子で大気側を絶縁する必要がある。これをナノ秒のパルスにすることが可能であれば絶縁碍子も小さくすることが可能となる。パルス幅が数マイクロ秒から数十ナノ秒になると印加出来る電界は約一桁上がるというデータもある[1]。開発の手始めとして、Fig. 1 のような電子銃を用意し、短パルスの高電圧を印加してビーム試験を行う予定である。既に DC 50 kV で電子ビームが生成されることを確認している。パルス電圧では 100 kV を印加した場合 1 kΩ 負荷で 100 A, パルス幅 50 ns 程度を目指している。

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[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り[5]、製品化もされている。繰り返しが低い用途であれば、高速のスイッチ特性は有効である。レーザーのような応用では実用化されている。かつては熱電子銃のグリッドバルサとして加速器分野でも使用された。これらの用途に使われた半導体は 300 mW 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、電流も多くす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。既に 50 Ω 負荷で 20 kV を越す出力を得たが、多段接続で印加電圧を上げるとサイリスタのリーク電流が増え、印加出来る電圧が下がってゆく耐圧劣化が発生した。ついにはショート状態になり、使用出来なくなる事象が発生した。この原因を理解するためにいろいろな試験を行い、現在、出力 14 kV, 1.4 kV を得た。この開発状況について報告する。

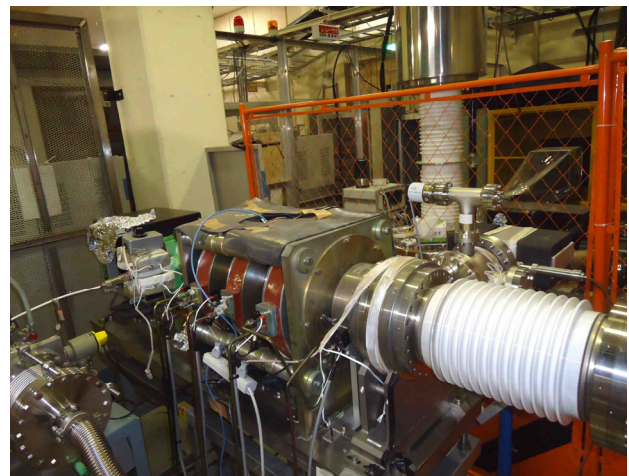


Figure 1: Picture of the test electron gun.

2. Avalanche mode thyristor (AMT) の動作と耐圧劣化の原因

Figure 2 に AMT の試験回路を示す。AMT はサイ

[#]takashi.naito@kek.jp

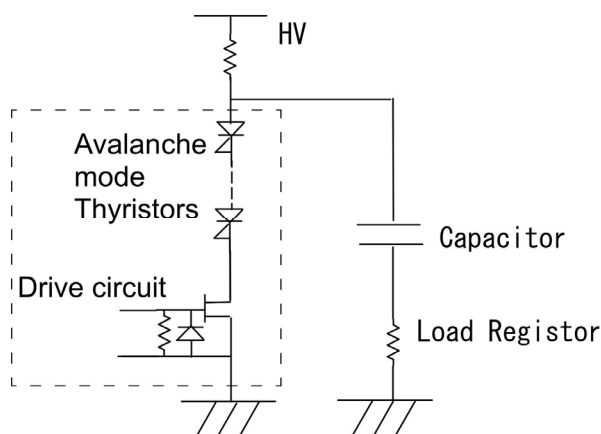


Figure 2: Test circuit of the AMT.

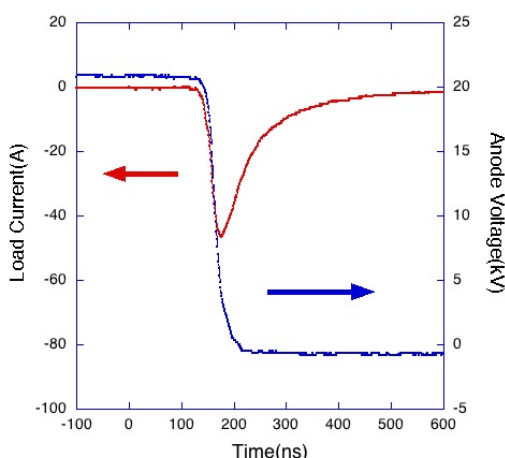


Figure 3: Switching characteristics of 13 stages of AMT
 Anode voltage: 22 kV, Load register: 1 k Ω , Peak current : 50 A.

リスタの Gate を Cathode と同電位にし、Anode-Cathode 間にブレイクオーバー電圧を超える電圧を印加することによってスイッチさせる。それぞれの AMT にはあらかじめブレイクオーバー電圧近くの電圧を印加しておくことによって、初段の回路がスイッチするとすぐにその上の段の AMT にブレイクオーバー電圧を超える電圧が印加されスイッチする。以降、最上位まで連鎖的にスイッチするため多段接続しても、gate の入力回路を必要としない簡単な回路となっている。直流電圧を印加し、外部回路のコンデンサに蓄積された電荷をスイッチさせることによって負荷抵抗を通して負荷電流を流す。負荷には微分波形の電流が流れる。Figure 3 に AMT を 14 段カスケード接続した時の波形を示す。アノード電圧は 20 kV 以上を 50 ns でスイッチしている。この時、負荷電流は同様に 50 ns 以下の立下がり時間で、ピーク電流約 50 A(負荷抵抗 1 k Ω)のデルタパルスを生成している。Figure 4 は、昨年ピーク電流約 450 A(負荷抵抗 50 Ω)を生成した時の波形である。さらに段数を増やし、印加電圧を上げれば大きな出力が得ら

れるのではないかと期待された。しかし、テストを繰り返すうちに次第にリーク電流が増え、AMT のアノード電圧は下がり、出力も下がってきた。さらにテストを続けるとついに AMT に電圧を印加出来なくなった。ピーク電流は 500 A 前後であり、サイリスタの最大電流には至っていないと思われたので原因を調べた。回路を作り直しいろいろな条件でテストを行うと、耐圧劣化の発生する閾値は 500 A 前後で変わること、耐圧劣化の発生するサイリスタは高電位の上段に集中していることが解った。

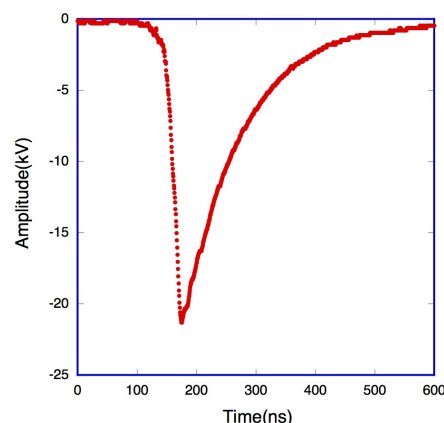


Figure 4: Switching characteristics of 16 stages of AMT
 Anode voltage: 26 kV, Load register: 50 Ω , Peak current : 450 A.

耐圧劣化したサイリスタを分解しチップの中を解析したところ、明らかな放電痕と思われる傷が発見された。Figure 5 に耐圧劣化したサイリスタの内部写真を示す。直流的には過大電圧を印加していないが、スイッチング時に Ldi/dt で発生する電圧がサイリスタの耐圧を超えたものと推測された。サイリスタは通常のゲートドライブでも臨界オン電流上昇率 (di/dt_{cr}) として、サイリスタを損傷しないオン電流の最大許容上昇率が定義されているものがあるが、今回使用した MMIX1H60N150V1(IXYS 社)の資料には示されていない。

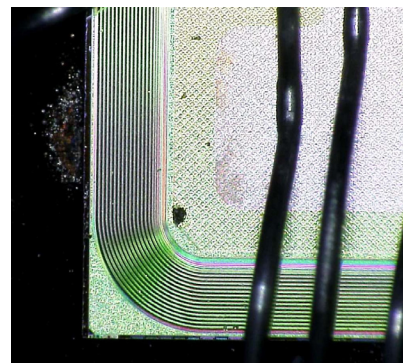


Figure 5: Picture of damaged thyristor – the discharge mark is seen at the edge of the cathode.

我々の試験でサイリスタの耐圧劣化の状況から AMT の di/dt_{cr} は 25 A/ns 程度と推測された。この値は回路のインダクタンス、カスケードに何段接続するか、接続のリード線の長さ等で大きく変わるものと思われる。この問題を回避するためには出力パルスの電流増加率を遅らせる必要がある。同様の問題は通常のゲートドライブ回路でもあり、Reference[4]では各サイリスタに磁気スイッチを入れて di/dt_{cr} を約 1 μ s に下げることによって 2.2 kA の負荷電流を流している。磁気スイッチは磁性コアにコイルを巻き通過電流が飽和するまでは高インダクタンスとして働き急激に電流が変化しようとするのを妨げる、磁性コアが飽和すると低インダクタンスとなり電流が変化するのを妨げなくなる。その結果、出力電流は遅れたタイミングで出力されるようになる。今回の試験では Fig. 6 に示すように、負荷に Amorphous core の磁気スイッチを入れ AMT がスイッチしても core が飽和するまで急激に電流が増加しないようにした。Figure 7 にその出力波形を示す。負荷コンデンサ 17 nF, 負荷抵抗 10 Ω , 印加電圧 18 kV の時、出力 14 kV, 1.4 kA, 立下がり時間 100 ns, 半値幅 200 ns を

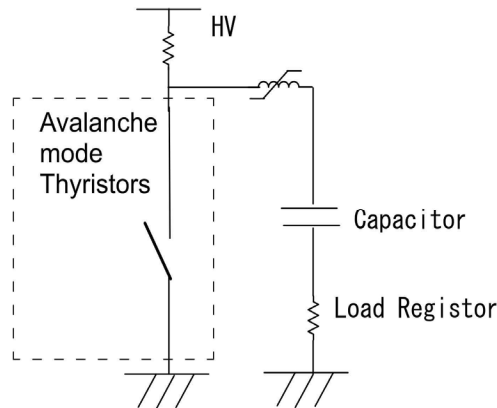


Figure 6: Test circuit of the AMT with a saturation core inductance.

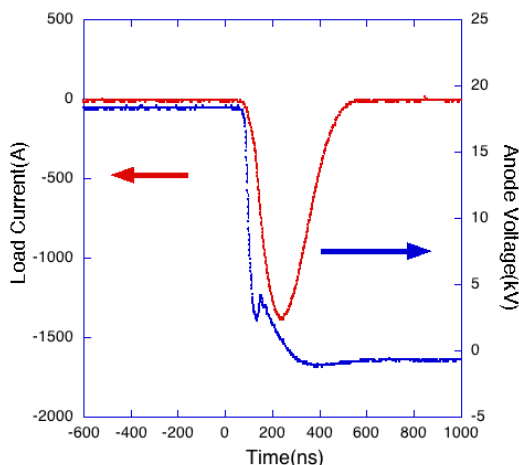


Figure 7: Switching characteristics of 10 stages of AMT
 Anode voltage: 18 kV, Load register: 10 Ω , Peak current: 1.4 kA.

得ている。パルス電流は PEARSON Model 110(Rise time 20 ns)で測定した。

3. 今後の展望

今回の試験では負荷抵抗 10 Ω 時に 14 kV, 1.4 kA のパルスを生成することが出来た。このパルスを昇圧することで 100 kV, 100 A のパルス生成の目処が立った。当初、50 ns 程度の短パルスの実現を期待したが急激な電流増加率にサイリスタが耐えられないことがわかり、半値幅 200 ns 程度となった。

AMT を使ったパルス電源は、まだパラメータの最適化がなされておらず、さらに高電圧、高電流の出力が得られる可能性がある。そのために 1)多段接続は何段まで可能なのか、2)負荷電流はどこまで取り出せるのか、3)繰り返しはどこまで上げられるのか、等々のことを調べる必要がある。また、今回の試験では初段にゲートトリガのサイリスタを用いたが初段を SiC-MOSFET にすることで繰り返しを上げられる可能性がある。

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] R. Ganter *et al.*, “Electron beam characterization of a combined diode rf electron gun”, PRST-AB 13, 093502 (2010).
- [3] 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).
- [4] T. Naito *et al.*, PASJ2018 FROM09, Aug (2018).
- [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.