IGBTを用いた高速高電圧スイッチの試作

中野 人志^{1,2}, 岡本 明², 藤本 恭史¹, 山田 誠^{1,2}

¹近畿大学 理工学部電気電子工学科 (〒577-8502 大阪府東大阪市小若江3-4-1)

²近畿大学大学院 総合理工学研究科 (〒577-8502 大阪府東大阪市小若江3-4-1)

A Fast High-Voltage Switch with IGBTs

Hitoshi NAKANO,^{1,2} Akira OKAMOTO,² Yasufumi FUJIMOTO,¹ and Makoto YAMADA^{1,2}

¹School of Science and Engineering, Kinki University, 3-4-1 Kowakae, Higashi-osaka, Osaka 577-8502

²Graduate School of Science and Technology, Kinki University, 3-4-1 Kowakae, Higashi-osaka, Osaka 577-8502

(Received June 6, 2008)

A fast high-voltage switch has been developed by using insulated gate bipolar transistors (IGBTs). The IGBTs are connected in series to achieve a high voltage rating. An avalanche transistor is used as the gate driver. The fast pulse generated by the avalanche transistor quickly charges the large input capacitance of the IGBT, resulting in a switch out of a fast high-voltage pulse. An output amplitude of 2.5 kV with a rise time of 8 ns has been achieved; this characteristic is applicable to operating a plasma generator, a high-voltage switch for a discharge-pumped laser, and a Pockels cell driver.

Key Words: Fast high-voltage switch, Avalanche transistor, IGBT

1. はじめに

固体素子を用いた高速高電圧スイッチは古くからレーザー用ポッケルスセルの駆動¹⁻⁶⁾や電子銃グリッドパルサー等に用いられている。近年では、パワーMOSFET、絶縁ゲートバイポーラトランジスタ(IGBT)等の半導体パワーデバイスの技術革新により、ガスレーザーの励起、放電プラズマの発生等が全固体のスイッチで制御可能となっている⁷⁻¹⁰⁾。

パワーMOSFETは、素子単体で1 kV、20 A程度の物が安価で市販されており、マイクロ秒からナノ秒に至る高速動作が可能であるが、数kV以上の電圧が必要な場合は縦列接続が必須となる。ポッケルスセルのような電圧駆動型の素子に対する使用においては問題無いが、大電流動作が必要な応用においてはオン抵抗の影響を無視できなくなる。一方でIGBTはオン抵抗の制限が無く、電流密度を高く設定できるので、縦列接続による高電圧・大電流動作が容易である。IGBTを用いて小型で安価な高速高電圧スイッチを実現すれば、プラズマ発生、放電励起レーザー等の応用において優れた成果を生み出すものと期待できる。

本研究では、上記の応用を念頭とし、市販のIGBTを用いて高速高電圧スイッチを試作した。小型で安価なものを作成するため、IGBTを縦列接続し、単一ゲート回路からのトリガパルスでIGBTを順に多段動作させる方式を採用した。

2. ゲート回路の構成

IGBTを高速動作させるためには、低出力インピーダンスのゲート回路が有効である。電流駆動能力を高めることにより、IGBTの入力容量を急速に充電することで高速オンが可能になる¹¹⁾。我々は1990年にBakerらが報告しているアバランシェトランジスタスイッチ回路をMOSFETのゲートに接続する方式¹²⁾をIGBTに適用した。アバランシェトランジスタとIGBTを組み合わせたスイッチ回路の報告は、我々の知る限り未だなされていない。アバランシェトランジスタ²⁾は、種々選択できるが、安価で最も手に入りやすい2SC458を用いた。2SC458は100 V以上の逆電圧においてアバランシェ降伏が生じる。120 Vの印加電圧において、スイッチングスピード5 ns以下を容易に得ることができる。

3. 縦列接続IGBTの高速スイッチング特性

まずは3 kV程度の出力電圧ドライブを目標として、IGBT高速高電圧スイッチを試作した。耐圧600 V程度で安価、且つ入手しやすいIGBT (IRGB8B60K, 600 V, 34 A)を6段縦列接続し、スイッチング特性の測定を行った。IGBTの多段動作では、通常、各IGBTにゲート回路を付加し同期トリガさせる方式が用いられる¹³⁾。しかしながら、この方式では必要なパーツ類が多くなり、回路の大型化・コスト上昇をまねく。ここでは単一ゲート回路でIGBTを多段動作させる方式を採用した¹⁴⁾。

Fig. 1に基板上に試作した回路の構成図を示す。IGBTの等価入力容量は約920 pFである。アバランシェトランジスタ回路のコレクタに接続されたキャパシタ (Fig. 1中の C_1)の大きさは、原理的に、IGBTの入力容量の大きさと同等かそれより大きいことが要求される。ここでは4700 pFとした。回路全体の製作コストは、高圧電源を除き、約2,400円であった。

多段スイッチ動作の基本原理は、以下の通りである。アバランシェトランジスタのゲート回路に接続された最下段のIGBT(T_1)がオンになった際、その上段にある T_2 のエミッタとグラウンドとの間に電位差 V_2 が発生する。 V_2 は T_2 の入力容量とゲートに接続された C_2 によって分圧され、 C_2 の両端の電位がゲートをオンするのに十分な値であれば、 T_2 はオンとなる。これを繰り返すことによって、 T_3 、... T_6 と順にオンとなっていく。

各IGBTのエミッタとグラウンドとの電位差は $T_2 \sim T_5$ と上段になる程順に大きくなる。 $C_2 \sim C_6$ の容量は、過剰なゲート電圧でIGBTが破壊されるのを防ぐため、適切な値に選ぶ必要がある。各IGBTのゲートに加わる電位が出来るだけ一定の値となるように、 $C_2 \sim C_6$ の値をそれぞれ、680, 470, 330, 220, 100 pFと上段になる程小さくなるように設定した。また、各IGBTのゲートエミッタ間にはゲート保護用のツェナダイオードを接続した。

Fig. 2に T_6 のコレクタにおいて測定したIGBT縦列接続回路のスイッチング特性を示す。印加電圧2500 V時の電圧の立下りは10-90 %において8 nsであった。データシートによると、今回使用したIGBTの立ち上がり時間は、標準時の単体動作において、22 nsと示されている¹⁵⁾。アバラン

Fig. 1 A fast high-voltage switch produced by IGBTs connected in a cascade configuration.

Fig. 2 Switching waveform obtained when 2500 V is applied.

シェトランジスタをゲート回路に使用することで、縦列接続にも関わらず、高速のスイッチング特性を得られることが示された。従って多段動作時における各IGBTの動作タイミングのばらつきは非常に小さいものと考えられる。

高速高電圧スイッチでは、一般的に、回路の残留インダクタンスや浮遊容量が回路の低速化や誤動作を生じさせる。今回試作した回路はそれらの積極的な低下対策を行っていない。各素子の足を短くし、プリント基板上にコンパクトに回路を構成することで、さらなるスイッチング特性の改善がみられるものと考えている。

今回試したIGBTは許容電流が中程度に位置するものであるが、100 Aを超えるものにおいても同一原理にて高速スイッチ化が可能である。許容電流の大きいIGBTの入力容量は極端に大きくなるが、アバランシェトランジスタ回路の容量を大きくとることで、容易に対応可能である。今後、大電流動作時における動作特性の基礎データを蓄積していく予定である。また、プラズマ発生、放電励起レーザーへの応用においては10 kV以上の高電圧を高速ドライブする必要がある。高電圧化には、縦列接続数の増加で簡単に対応できる。

本研究により、IGBTを用いて高速・高電圧スイッチの作成が安価、且つ簡便に行えることを示した。種々のIGBTにおける同一の実験、誘導ノイズの影響、各素子の最適化等、調べなければならない課題は多くあるが、今後検討する。

参考文献

- 1) T. Kanabe, M. Nakatsuka, Y. Kato, and C. Yamanaka: Tech. Rep. Osaka Univ. **32** (1982) 349.
- 2) B. Cunin, J. A. Mische, B. Sipp, M. Ya. Schelev, and J. N. Serduchenko: Rev. Sci. Instrum. **51** (1980) 103.
- 3) I. Matsushima, T. Kasai, and M. Yano: Rev. Sci. Instrum. **52** (1981) 1860.
- 4) S. M. Oak, K. S. Bindra, B. S. Narayan, and R. K. Khardekar: Rev. Sci. Instrum. **62** (1991) 308.
- 5) D. M. Benzel and M. D. Pocha: Rev. Sci. Instrum. **56** (1985) 1456.

- 6) Fast Pulse Technology, Inc., LASERMETRICS社製品マニュアル: HIGH VOLTAGE PULSE GENERATOR, MODEL 8025RS (2008).
- 7) 岩田 明彦, 鈴木 弘一, 殖栗 成夫: 電気学会論文誌 D **23** (1993) 113.
- 8) H. Hatanaka, H. Tanaka, M. Obara, K. Midorikawa, and H. Tashiro: J. Appl. Phys. **68** (1990) 1456.
- 9) W. Jiang, K. Yasui, K. Takayama, M. Akemoto, E. Nakamura, N. Shimizu, A. Tokuchi, S. Rukin, V. Tarasenko, and A. Panchenko: *Proc. IEEE* **92** (2004) 1180.
- 10) K. Lin, Q. Hu, J. Qiu, and H. Xiao: IEEE Trans. Plasma Sci. **33** (2005) 1182.
- 11) パワーMOSFET/IGBT入門 (日刊工業新聞社, 2002年) p. 12.
- 12) R. J. Baker and M. D. Pocha: Rev. Sci. Instrum. **61** (1990) 2212.
- 13) P. R. Palmer, H. S. Rajamani, and N. Dutton: *IEE Proc.-Electr. Power Appl.* **151** (2004) 576.
- 14) R. J. Baker and B. P. Johnson: Rev. Sci. Instrum. **64** (1993) 1655.
- 15) Data sheet: PD94545D, IRGB8B60K (International Rectifier, 2003).