

小型パルスパワー電源の開発を目的とした直列化したBJTの 降伏特性評価

上野 崇寿

電気電子工学科

局所的にマイクロ領域においてプラズマを生成し利用するマイクロプラズマは、プラズマ科学技術の新たな発展をもたらす研究領域として注目を集めており、これまでにない産業応用技術を創出する可能性を秘めている。マイクロプラズマを生成するためには、従来プラズマ生成に使用されている大容量かつ大型な電源ではなく、局所的にエネルギーを送り込むことが可能な小型の電源が必要となる。

先行研究にて、バイポーラ接合トランジスタ (Bipolar Junction Transistor : BJT) を利用したマイクロプラズマ生成用電源の開発を行っており、数百ボルト/ナノ秒オーダーの高速な立ち上がり時間を持ったパルスを出力することが可能である。これはBJTを電子なだれ降伏状態で使用することにより、高速なスイッチングを実現しているのであるが、その降伏特性は一般のデータシートからは読み取ることが困難であり、明らかになっていない点も多い。そこで本研究では、小型パルスパワー電源の開発を目的として、BJTを直列化した場合の降伏特性について評価を行った。その結果、BJTの直列接続数の増加によって、スイッチング時の電圧及びピーク電流を増加させることができるが、BJT1つ当たりの出力エネルギーは一樣な増加をせず、最適値を持つことが判った。マルクス発生器開発におけるエネルギーの増加及び出力エネルギーの効率化の向上のためには2直列接続が適当であった。

キーワード：マイクロプラズマ、バイポーラ接合トランジスタ、電子なだれ降伏

1. はじめに

近年、プラズマを利用した技術はめざましい発展を遂げ、各種薄膜の作成やエッチングといった半導体プロセスなどの分野において、大面積かつ均質なプラズマの生成を実現してきた。

一方、この大容量化の流れとは逆に、局所的にマイクロ領域においてプラズマを生成し利用するといった、マイクロプラズマと呼ばれる新たな分野の進展がみられる。このマイクロプラズマは、大きな表面積/体積 (S/V) 比に起因する高効率なマイクロ反応場形成や高密度媒質中におけるプラズマの新たな物性発掘等^{1, 2)}、その新規性により注目を集め、多くの研究が推進されるようになってきている³⁻⁵⁾。

マイクロプラズマをパルスで生成するための電源には、放電を開始できるような高電圧の発生とパルス発生のための高速なスイッチング素子が必要である。微小な寸法であるプラズマに効率良くエネルギーを送り込むため、電源もできる限り小さくする必要がある。小型化を実現するためには、スイッチング素子として従来用いられてきたギャップスイッチではなく、半導体スイッチを使用することが適当である。

著者らは、小型パルスパワー電源の1つとして、バイポ

ーラ接合トランジスタ (Bipolar Junction Transistor : BJT) を用いたマルクス発生器の開発を行ってきた⁶⁾。BJTの通常使用では、IGBTやSITといった他の大容量半導体素子と比較して、耐電圧やスイッチング速度等のスイッチング特性における優位性は殆ど持っていないが、BJTに降伏現象を発生させることで、ナノ秒オーダーの高速なスイッチングが可能となる。先行研究により、BJT単体での降伏特性試験を行っており、BJTへの印加電圧の増加に従いスイッチング時の漏れ電流が生じ、エネルギー損失が大きくなってしまったため、出力エネルギーが制限されてしまうことが判明した⁷⁾。

そこで、本研究では小型マルクス発生器の1段当たりのエネルギー増加及び高電圧化による段数削減を目的として、BJTを直列接続した場合のBJTの降伏特性について評価した。

2. 直列化BJTの降伏特性試験

(1) 特性試験回路

本試験では小型マルクス発生器の1段当たりのエネルギー増加と段数削減を目的として、BJTを直列接続した場合のBJTの降伏特性について評価した。

図-1にBJTの直列接続時の特性試験回路を示す。試験に用いたBJTは2SC2655とした。グランド側に最も近いBJTにはトリガ信号を送り、他のBJTは、ベース-エミッタ間を短絡した。また、充電中にBJTのコレクター-エミッタ間に均等に電圧が印加されるように、10MΩのバランス抵抗(R_B)を各BJTのコレクター-エミッタ間に並列接続した。直流電源(HAR-5R60 : Matsusada Precision Inc.)を用いてコンデンサCを充電し、グランド側のBJTのベース-エミッタ間に波形発生器からトリガ信号を印加することでBJTをターンオンさせる。この時、FET1がターンオフすることにより、BJT側に電源側からの直流成分の流れ込みを防止する。計測には、オシロスコープ(TDS3034B : Tektronix社製)、電圧測定は高電圧プローブ(PHV641 : PMK社製)、電流計測はカレントモニタ(Current Monitor Model 2877 : PEARSON社製)を使用し、直列接続した複数のBJTのコレクター-エミッタ間電圧V_{ce}及びコレクタ電流I_cを測定した。

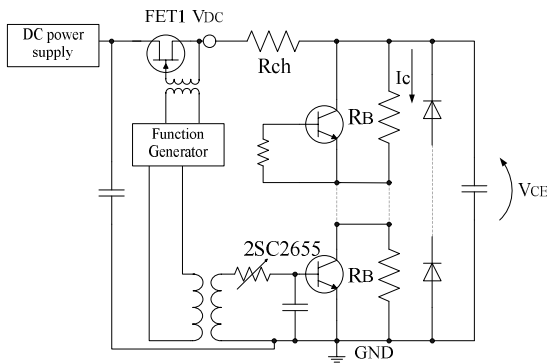


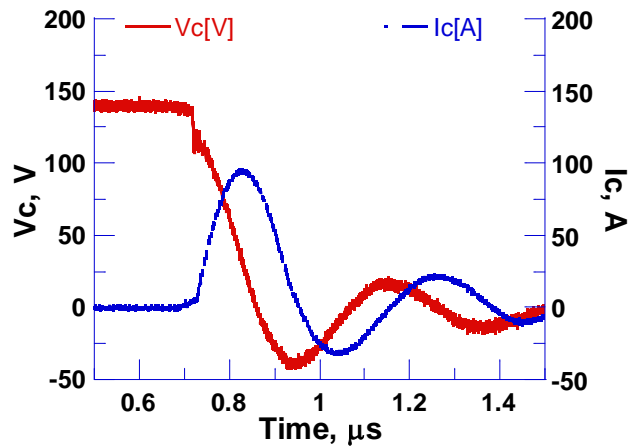
図-1 直列化 BJT 特性試験回路

(2) 電圧・電流波形

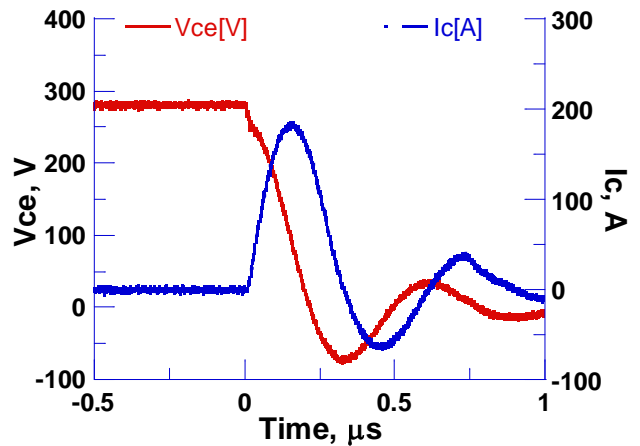
図-2に降伏状態におけるBJTの直列接続数変化時の電圧・電流波形を示す。同一のV_{ce}のもとでの比較ができないため、繰り返し動作可能な最大のV_{ce}で動作させた波形を示す。図-2より単体で用いた場合は、立ち下がり時間t_fが約90ns, 最大コレクタ電流I_cは100A, 2直列接続の場合ではt_f=180ns, I_c=185A, 3直列接続の場合ではt_f=200ns, I_c=205Aであった。BJTの直列接続数に応じて、印可電圧を増加でき、大電流のスイッチングが可能だが、電流の増加による立ち下がり時間の増加も見られる。

(3) 立ち下がり時間特性

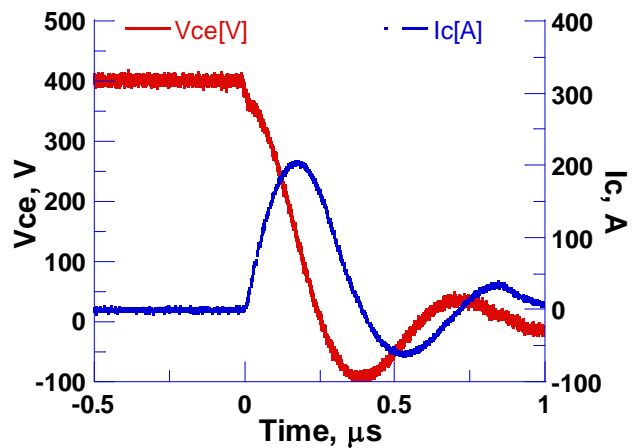
図-3にBJTの直列接続試験の立ち下がり時間特性を示す。V_{ce}を変化させ、コンデンサ容量を0.01から1.0μFとした場合の立ち下がり時間を確認した。BJT単体での特性試験においては、トリガ信号を印加することでBJTをターンオンさせ、通常状態と降伏状態の両方を観測することができた。しかし、BJTを複数個用いて特性試験を行う場合には、グランド側に最も近いBJTのみトリガ信号を印加するため、



(a) 2SC2655 単体



(b) 2SC2655 の2直列接続



(c) 2SC2655 の3直列接続

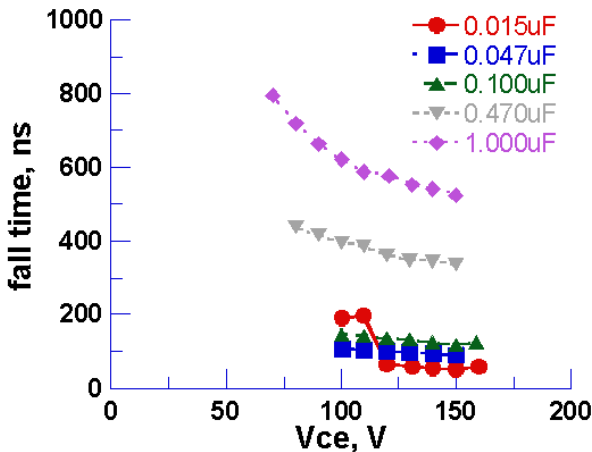
図-2 電圧・電流波形例(C=0.100μF時)

通常状態において他のBJTを同時に動作させることはできない。一方、グランド側のBJTが降伏状態を引き起こした場合、充電側の各BJTにも降伏状態を超える電圧が印加されるため、連鎖的にすべてのBJTの降伏状態を引き起こしターンオンさせることが可能となる。そこで、本試験ではBJTの降伏状態におけるスイッチング時間特性について示す。図-3(a), (b), (c)各グラフより、Vceの増加に伴い立ち下がり時間に僅かな減少がみられる。しかし、コンデンサ容量を減少させると、立ち下がり時間の減少の割合も小さくなり、一定値に近づく。

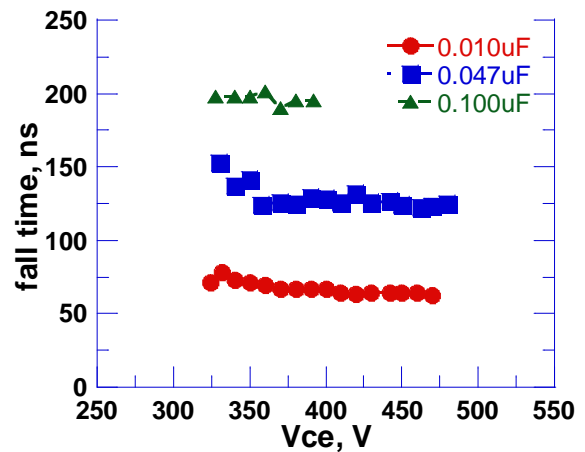
図-4は、コンデンサ容量を0.1μFとした時の2SC2655の立ち下がり時間をBJTの接続数別に比較したものである。BJTが降伏状態で動作可能なVceの範囲は、BJT単体の場合が約100Vから160V、2直列接続した場合が約160Vから280V、3直列した場合が330Vから430Vであるため、動作電圧の範囲がBJTの個数に従い増加している。

一方、BJTの立ち下がり時間については、BJTを単体から2直列とした場合の立ち下がり時間の増加率は最大2倍であるが、更に直列数を増やし3直列とした場合では、その立ち下がり時間に大きな増加は見られず、2直列時と比較すると最大1.1倍の立ち下がり時間の増加がみられた。

従って、BJTの直列接続数に従い立ち下がり時間が増加するが、その増加の割合は減少していく。しかし、個数の増加によって使用できるコンデンサ容量の制限、即ち、出力エネルギーが制限されてしまうため、マルクス発生器へのBJTの適用にあたっては、高速スイッチングと出力エネルギーの関係を考慮しながら、直列化の個数を定めなければならない。

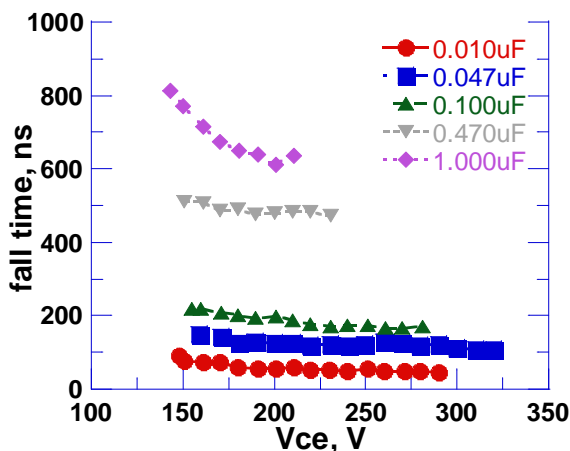


(a) 2SC2655単体



(c) 2SC2655の3直列接続

図-3 立ち下がり時間特性



(b) 2SC2655の2直列接続

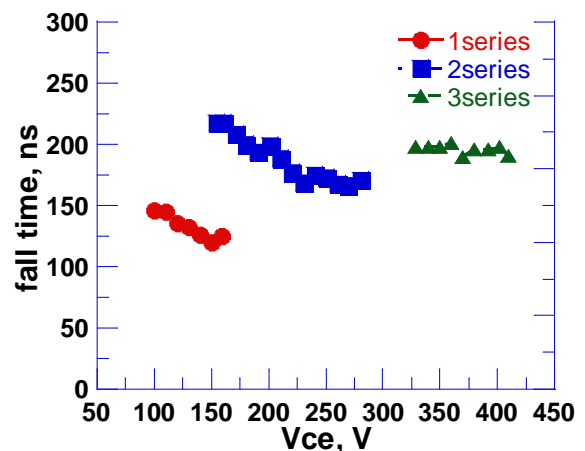


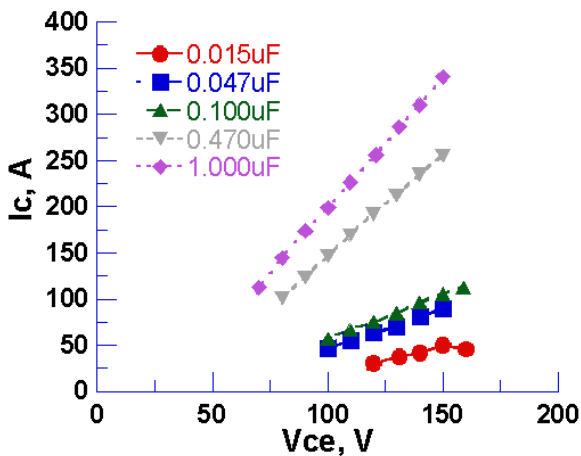
図-4 BJT接続数別スイッチング時間特性の比較 (C=0.1μF)

(4) コレクタ電流特性

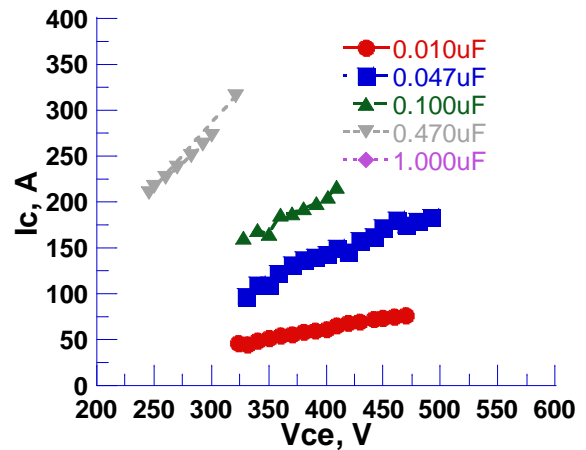
Vce変化時のIcの特性を図-5に示す。コンデンサ容量を変化させ、Vce変化に対するIcの最大値をプロットした。直列接続数の違いに関わらず、Vceの増加に応じてIcは正比例して増加する傾向にある。さらに同一のVceにおいてはコンデンサ容量を増加させることで、Icはコンデンサ容量の平方根に応じて増加する。これは、LCR直列回路において閉路に流れる電流がコンデンサ容量Cの平方根に比例するためであると考えられる。更に、コンデンサ容量の増加によって安定動作可能なVceやIcが増加するものの、3直列接続においては1.0μFのコンデンサ使用時に非可逆的な素子破壊に至り、使用できるコンデンサ容量が制限されてしまうといった、立ち下がり時間特性と同様の傾向が見られた。

図-6に、コンデンサ容量を0.1μFとしたときのコレクタ電流特性をBJTの直列接続数別に比較したものを示す。直列接続数の増加により、1段あたりに印加できるVceが増加するため、Icが正比例で増加する。

しかし、同一のVceで比較した場合には、BJTの接続数を増加させるとIcは減少する傾向にある。安定動作するVceの範囲が異なるため単純な比較は困難であるが、安定動作外でもVce、Icが同一の増加で変化すると仮定すると、Icのピーク値はBJT単体で使用した場合は2直列接続で使用した場合の約1.5倍、BJTを2直列接続した場合は3直列接続した場合の約1.8倍となり、直列接続数の増加に従いIcは減少する。

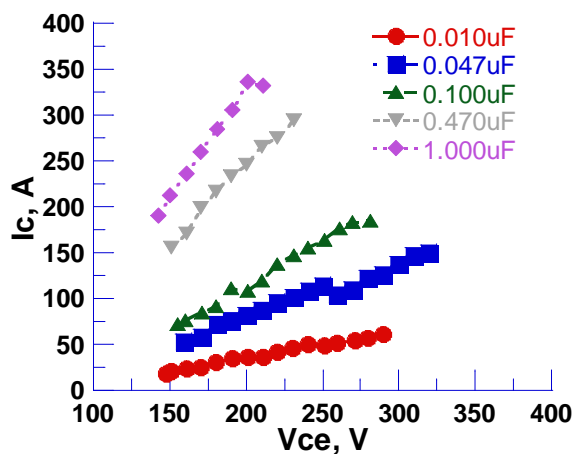


(a) 2SC2655 単体



(c) 2SC2655 の3直列接続

図-5 コレクタ電流特性



(b) 2SC2655 の2直列接続

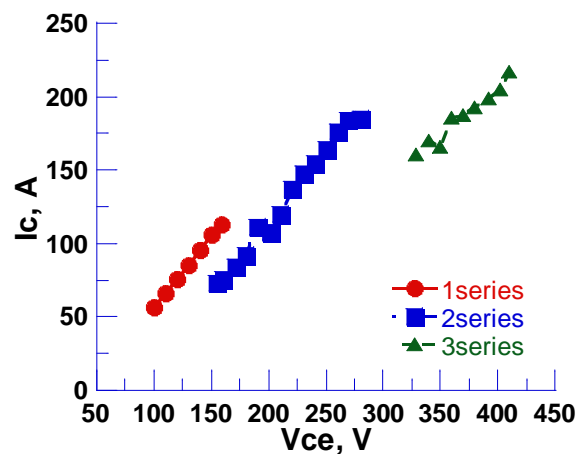


図-6 BJT 接続数別コレクタ電流特性の比較(C=0.1μF)

(5) スイッチングインピーダンス

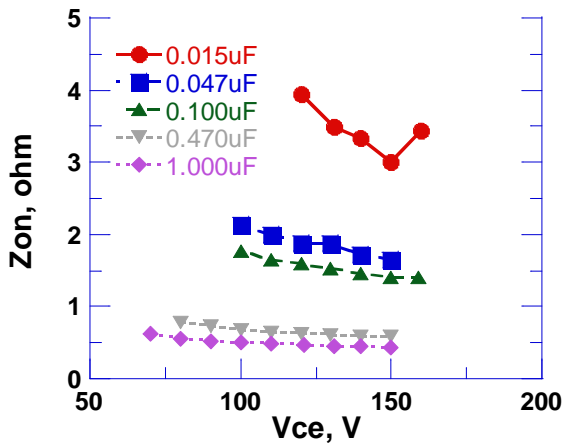
降伏時の電圧電流波形からインピーダンスを求め、各直列接続数における比較を行った。図-7に降伏状態におけるBJT1つ当たりのスイッチングインピーダンス Z_{on} を示す。どの直列接続数においても、 V_{ce} の増加によって Z_{on} が減少し、コンデンサ容量の増加により、 Z_{on} は減少し一定値に近づく。

図-8は、コンデンサ容量を $0.1\mu F$ 一定としたときのBJT単体の Z_{on} を比較したものである。各直列接続数における V_{ce} の安定動作範囲が異なるため、同一電圧での比較はできないが、 V_{ce} の増加によって Z_{on} が減少しBJTの直列接続数に関わらず、1本の近似曲線(破線)で表すことができる。 V_{ce} が約100Vから200Vにおいては、インピーダンス

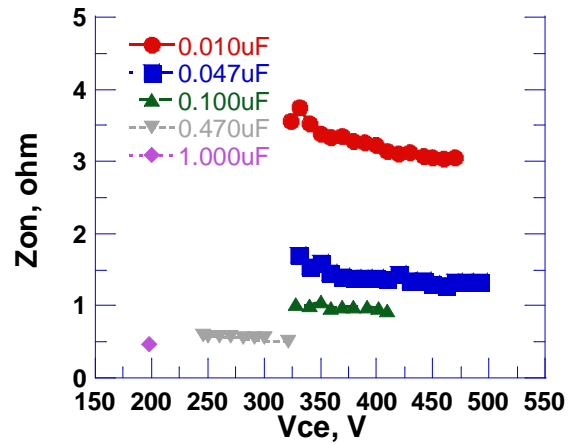
は急激に減少し、その後約 0.73Ω の一定値に近づいていく。

従って、1段あたりに印加する電圧を増加させると、スイッチングインピーダンスは減少し、一定値に近づく。マルクス発生器への適用を試みる場合、BJT1つ当たりではなく、1段あたりに含まれるBJTの直列接続数に応じたインピーダンスとして考慮する必要がある。

故に、インピーダンスが最小値に近い、3段直列及び一部の2段直列接続で利用することが適当であると考えられる。

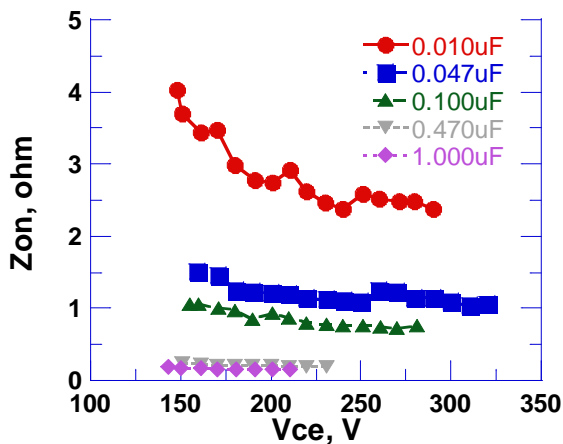


(a) 2SC2655 単体



(c) 2SC2655 の 3 直列接続

図-7 BJT1つ当たりのオン抵抗



(b) 2SC2655 の 2 直列接続

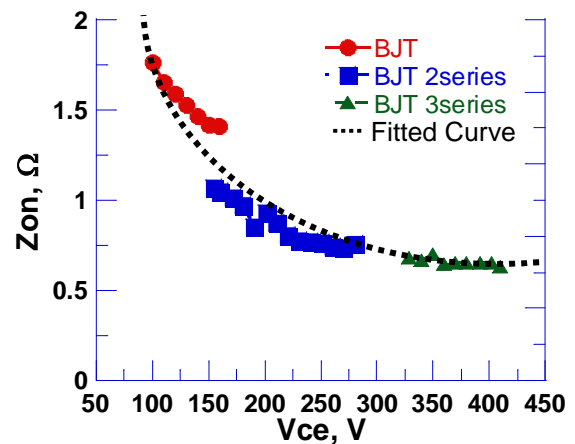


図-8 BJT1つ当たりのスイッチングインピーダンスの比較

(6) スイッチング時の出力エネルギー

立ち下がり時間特性やコレクタ電流特性の試験において、安定動作可能なコンデンサ容量に制限がある場合が存在した。そこで、本節では直列接続数に応じた出力エネルギーについて検討した。

表-1に試験回路で使用したコンデンサ容量と安定動作可能なVce及び1段あたりに蓄えられるエネルギーを示す。安定動作する最大のVceは、コンデンサ容量を増加させると減少していくが、その出力エネルギーは増加していく。本試験ではBJT1つ当たりのエネルギーにおいては、2直列時が最大であるという結果を得た。

マイクロプラズマを生成させるためには、出力電圧の増加に加え、数百mJオーダーのエネルギーの出力も不可欠となる。直列接続したBJTを小型マルクス発生器に用いることで、その段数の削減、回路インダクタンスの減少が可能となる。これらは、負荷としてプラズマを発生させる場合、エネルギーを効率よく送り込むという点において大きなメリットとなる。

本実験で用いた2SC2655をマルクス発生器に応用する場合、エネルギーの増加及び出力エネルギーの効率化の向上のためには2直列接続が適しているといえる。

表-1 BJT接続数別の1つ当たりのエネルギー

C[μF]	BJT		BJT 2series		BJT 3series	
	Vce[V]	E/stage[mJ]	Vce[V]	E/stage[mJ]	Vce[V]	E/stage[mJ]
0.015	120	0.108	155	0.18	325	0.792
	160	0.192	320	0.768	477	1.706
0.047	100	0.235	155	0.565	328	2.528
	150	0.529	320	2.406	480	5.414
0.100	100	0.5	152	1.155	329	5.412
	160	1.28	288	4.147	387	7.488
0.470	80	1.504	158	5.867	-	-
	150	5.288	262	16.131	-	-
1.000	70	2.45	-	-	-	-
	150	11.25	-	-	-	-

3. 総括

本研究では、小型マルクス発生器のスイッチングデバイスとして、2S2655を用いて複数のBJTを直列接続した場合の特性の評価を行った。その結果、以下の点が明らかになった。

- (1) BJTを単体、2直列、3直列接続して降伏特性試験を行った結果、直列接続数を増加させることで、スイッチング電圧を増加できるが、繰り返し動作のためには出力エネルギーを制限しなければならない。
- (2) 立ち下がり時間は、直列接続数の増加によりステップ状に増加するが、スイッチング電圧増加によって減少

させることが可能である。

- (3) スイッチングインピーダンスは、スイッチング電圧の増加によって減少し、一定値に近づく。
BJT1つ当たりの繰り返し動作可能なエネルギーの比較を行うと、2直列接続における場合が最大となった。
- (4) エネルギーの増加及び出力エネルギーの効率化の向上においては2直列接続が適当である。

謝辞

本研究の遂行にあたって、熊本大学地域共同研究センター准教授、佐久川貴志氏に多大なるご意見とご協力を頂いた。ここに記して厚くお礼申し上げる。

参考文献

- 1) K. Tachibana: Microplasmas: Overview from fundamental researches to applications, Journal of Plasma and Fusion Research, Vol.76, No.10, pp.435-436, 2000.
- 2) K. Tachibana : Generation of micro-scale reactive plasmas and development of their new applications -Present and future of research and development on microplasmas-, Journal of Plasma and Fusion Research, Vol.80, No.10, pp.825-826, 2004.
- 3) K. Terashima, T. Ito, H. Fujiwara, K. Katahira, A. Kono, D. Wang, M. Aramaki and T. Ichiki, "Application of microplasmas", Journal of Plasma and Fusion Research, Vol.80, No.10, pp.845-853, 2004.
- 4) T. Namihira, S. Tsukamoto, D. Wang, S. Katsuki, R. Hackam, K. Okamoto and H. Akiyama: Production of nitric monoxide using pulsed discharges. for a medical application, IEEE Trans. Plasma Science, Vol.28, No.1,2000.
- 5) 秋山秀典:マイクロプラズマの制御, O plus E, vol.26, 2004
- 6) T. Heeren, T. Ueno, D. Wang, T. Namihira, S. Katsuki, H. Akiyama: Novel Dual Marx Generator for Microplasma Applications, IEEE Transactions on Plasma Science, vol.33, pp.1205-1209,2005.
- 7) T. Ueno, T. Sakugawa, M. akiyama T. Namihira, S. KATSUKI and H. AKIYAMA : Portable Marx Generator for Microplasma Applications, Proceedings of International Congress on Plasma Physics, pp.386, 2008.

(2008.10.29受付)