ミニチュアマルクス発生装置の開発と マイクロプラズマジェットへの応用

寿*,¹, 佐久川 崇 男**. 野 貴志***, 秋 亚 E Ш 雅 裕***, 浪 隆 曲*** 淳**. 秋 鴌 勝 木 Ш (2008年6月28日受付; 2008年9月8日受理)

Development of Miniaturized Marx Generator and Its Application to

Takahisa UENO^{*,1}, Takashi SAKUGAWA^{***}, Masahiro AKIYAMA^{***}, Takao NAMIHIRA^{**}, Sunao KATSUKI^{**} and Hidenori AKIYAMA^{***}

Micro-Plasma Jet

(Received June 26, 2008; Accepted September 8, 2008)

The micro-plasma jet has been used in various fields such as materials processing, chemical analysis, short-wavelength light source, and biomaterials treatment. The miniaturized electric power generator has been requested to produce these plasmas in the micro-scale area, because the present large size generator limits the use of these small plasmas. Under such background, a miniaturized Marx generator which has Bipolar Junction Transistors (BJTs) as closing switches has been developed to generate micro-plasma jet. In the miniaturized Marx generator, BJTs were operated in avalanche mode to obtain a faster switching speed with nanosecond regime. In this paper, three kinds of BJTs which have different collector current are evaluated as closing switch, and the micro-plasma jet is generated by the miniaturized Marx generator. The generator is able to output -2.5kV voltage, 38ns pulse-width by series BJTs for cutting load current. It has been found that the dependence of length of micro-plasma jet was different from load current.

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産業の基盤技術とし て必要不可欠なものになっている.一般的にそれらのプラズ マには大容量かつ均一であることが要求されている.一方, プラズマの大容量化とは逆に,微小空間におけるマイクロプ ラズマも,大きな表面積/体積(S/V)比に起因する高効率な

キーワード:マルクス発生装置,バイポーラ接合トランジス タ,降伏現象,マイクロプラズマジェット

 * 大分工業高等専門学校電気電子工学科(870-0152 大分市 大字牧 1666 番地)
 Department of Electrical and Electronics Engineering, Oita

National College of Technology, Maki 1666, Oita 870-0152, Japan

** 熊本大学バイオエレクトリクス研究センター (860-8555 熊 本市黒髪 2-39-1)

Bioelectrics Research Center, Kumamoto University, Kurokami 1-39-1, Kumamoto 860-8555, Japan

****熊本大学自然科学研究科(860-8555 熊本市黒髪 2-39-1) Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, Kurokami 1-39-1, Kumamoto 860-8555, Japan
¹ ueno@oita-ct.ac.jp 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⁾. なかでも, ガス流に よりマイクロプラズマをジェット状に噴射するマイクロプ ラズマジェットは, その発生部と反応部が独立しているため, 制御性の容易さや局所的な高い反応性といった特徴を持っ ており, マイクロプラズマの実用化を進めるものとして注目 を集めている. 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, 様々な応用に使うためには, 電源もできる限り小さくする必 要がある.

ミ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

小型化を実現するためには、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、マルクス発生装置のギャップスイッチにあ たる部分を半導体素子であるバイポーラ接合トランジスタ (Bipolar Junction Transistor: BJT) に置き換えたミニチュア マルクス発生装置の開発を行ってきた.先行研究により,最 大電圧波高値-2.5kV,電圧立ち下がり時間 3 ns の出力を得た ⁶. この装置は BJT の降伏現象(アバランシェブレイクダウ ン)を用いている. BJT の通常状態での使用では, 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 ノ秒オーダのスイッチングが可能となり,立ち上がりの高速 なパルスを出力することができる.

しかしながら,降伏現象には,BJT のコレクターエミッタ 間に降伏電圧以上の電圧を印加させなければならず,市販の BJT のデータシートから,その特性を把握することは困難で あり,明らかにされていない.降伏特性を解明することで, 出力電圧の増加,損失の減少,立ち下がり時間の減少といっ た装置の性能の向上を図ることができる.

そこで、本研究では、ミニチュアマルクス発生装置開発の 一環として、スイッチング素子として用いた BJT の降伏現象 に関する特性試験を行った.その後、特性試験結果を反映し たミニチュアマルクス発生装置を製作し、マイクロプラズマ ジェットの生成を試みた.

2. ミニチュアマルクス発生装置

マルクス発生装置とは、充電抵抗を介して並列に充電さ れた複数のコンデンサを短絡スイッチをオンする事で瞬時 に直列へ接続変換する。損失がない場合の出力は「コンデン サの個数×コンデンサの充電電圧」にて算出される電圧波高 値を有し、低い充電電圧にて比較的容易に高電圧を発生させ ることが可能である.マルクス発生装置の短絡スイッチとし ては、通常自己放電型のギャップスイッチが採用されている. しかしながら、産業応用を目指したマイクロプラズマジェッ ト用マルクス発生装置としては、小型化に加えて長寿命化が 必須要件として挙げられるため、放電ギャップスイッチの使 用は困難である。そこで、マルクス発生装置の短絡スイッチ として、図1に示すようにBJTを適用した.

BJT の通常状態におけるスイッチング速度は遅いため,高 速な立ち上がりを目指したパルスパワーの発生には不適で ある.そのため,本発生装置ではBJT のコレクタ - エミッタ 間の降伏現象を利用することで,高速ターンオンを実現して いる.すなわちBJT のコレクターエミッタ間に降伏電圧以上 の電圧を印加することで,降伏を生じさせ,高速なコレクタ ーエミッタ間の導通を短絡スイッチとして利用することで ある.この時,BJT への電流を制限せずに流し続けると,素 子は破壊に至るが,その電流を制限することで安定した繰り 返し動作が可能である.



図1 小型マルクス発生装置の回路図



3. BJT の降伏特性

3.1 降伏特性試験回路

BJT の降伏現象を起こさせるためには、コレクターエミッ タ間に降伏電圧を印加するといった特殊な方法であるが故 に、降伏特性はメーカのデータシートからでは読み取ること が極めて困難である. そこで、市販されている BJT の降伏特 性の把握を行った. 図2にBJTの容量変化に対する降伏特性 把握のための試験回路を示す. 今回, 2SC2655, 2SC5076, 2SC5000⁷⁾の3種類のBJTを試験に用いた. これらのBJTは コレクターエミッタ間の定格電圧が等しく、定格コレクタ電 流がそれぞれ, 2,5,10A と異なる. 試験では直流電源からの 印加電圧(V_{ch})を電圧上昇率1 V/sec にて増加させ、充電抵 抗(R_{ch}=20kΩ)を通し、コレクターエミッタ間のコンデンサを 充電する. 充電が完了したのち, 信号発生器(33220A, Agilent) から BJT のベースへ TTL 信号を送り,降伏を生じさせる. この時, コンデンサ容量を 0.1uF から 1uF まで変化させコレ クターエミッタ間の電圧(V₀)及びコレクタ電流(Ic)を計測し た. 電圧電流の測定機器には、オシロスコープ(TDS3034B、 Tektronix), 高圧プローブ(PHV641, PMK), カレントモニタ (Model 2877, Pearson, Electronics)をそれぞれ使用した.



図 2 降伏特性試験回路 Fig. 2 Evaluation circuit of BJT.

3.2 漏れ電流特性

図3にBJT 2SC2655を試験回路に使用し、Vchを増加させた時のVcの変化を表す.Vchが165Vに達するまでは、Vc との関係は正比例を示し、Vch=Vcとなる.しかし、Vchが 165Vを超えると、Vch≠Vcとなり、電位差が生じる.この 電位差は、BJTがオフ状態にも関わらず、コレクターエミッ タ間に流れる電流、即ちBJTの漏れ電流によって生じるもの と考えられる.

つまり、本BJT に加えられる電圧が 165V を超えるとコレ クターエミッタ間に漏れ電流が生じ、その電流値は、Vch に 依存する.他の2種類のBJTにおいては、Vch=200Vの時から漏れ電流が生じる.漏れ電流はエネルギー効率の低下となるので、できる限り小さい方が好ましい.従って、2SC2655を使用する場合、漏れ電流が小さく、確実に降伏現象を起こすことが可能な電圧、即ちVch=Vc≧165~175Vで降伏現象を起こさせることが適当である.



Fig. 3 Dependence of Vc on V_{ch}(2SC2655).

3.3 スイッチング時の電圧電流波形

BJT 2SC2655 のスイッチング時の Vc 及び Ic の波形を図4 に示す.

図4(a)と(b)は、それぞれ Vc が 50V と 140V における電圧・ 電流波形である. この時, コンデンサ容量はいずれも 0.1uF とした. 図 4(a)の波形において, Vc の立ち下がり時間は約 0.5us, Ic の最大値は 6A であった. これは定常状態における 定格コレクタ電流の 3 倍にあたる. なお, 立ち下がり時間と は電圧最大値の 90%から 10%に要するスイッチング時間と 定義する. 図4(b)の波形では, Vc の立ち下がり時間は約0.1us, Ic の最大値は 90A であった. Vc=140V の時の波形は, 50V の場合と比較して, 電圧の立ち下がり, 電流パルス幅共に極 めて短くなっており, 電流 Ic の最大値も増加していることが 分かる. 図 5 に BJT 2SC500 の Vc を 140V, 160V, 180V と 変化させた時の Ic の波形を示す.

Vc=140Vの Ic 波形では, t=0 から電流が流れ始め t=0.17us の時を境にして Ic の時間変化率 di/dt が大きく増加している ことが伺える. Vc=160V では t=0.05us, Vc=180V におい ては, 極めて短く t=0.01us の時, di/dt の大きな増加が見られ た. よって Vc を増加することで, di/dt が変化するまでの時 間が減少し, 電流パルス幅が短く波高値の大きな電流パルス を得ることができる.

3.4 電流特性

BJT 2SC2655 を用いた時の Vc 変化時の電流特性を図6 に 示す. コンデンサ容量を 0.1uF から 1uF まで変化させ, Vc 変化に対する Ic の最大値をプロットした. 降伏状態における Ic が減衰振動波形を示し、C の平方根及び Vc に比例することから、Ic と Vc の関係は下式に従う.

$$I_c = V_c \sqrt{\frac{C}{L_c}} \tag{1}$$

Cは試験回路におけるコンデンサ容量, Lcは回路インダク タンスを表す.

次に BJT の種類に対する電流特性を図7に示す.通常状態 においては、各 BJT の Lc は定格通りであり、その最大値と 最小値との間で5倍の違いが見られる.しかし、降伏状態に おいて、違いは無く、Lc はほぼ同値となる.つまり、降伏状 態における Lc の最大値は、BJT の種類によらず同じであり、 BJT スイッチング時のインピーダンスが試験回路の回路イン ピーダンスより極めて小さいことを示している.このことは、 式(1)からでも同様に説明が可能である.

従って,降伏状態における Lc の最大値は, BJT のスイッチ ング時のインピーダンスが極めて小さいため,回路インピー ダンスによって一意に定まるといえる.





current waveform (Ic). (a) When BJT was operated in normal mode. (b) When BJT was operated in avalanche mode.



図5 Vc変化時のIc波形







Fig. 6 Current characteristic as a function of Vc.



図7 各種BJTによる電流特性

Fig. 7 Comparison of the current characteristic as a function of Vc.

3.5 スイッチング時間特性

図8にBJT 2SC2655を変化させたときのスイッチング時間 特性を示す.通常状態では、Vc 及びCの増加に伴い、スイ ッチング時間も増大する.この時の電荷量はVcとCとの積 で表されるので、電荷量に比例してスイッチング時間も増加 すると言える.

降伏状態においては、Cに従ってスイッチング時間も増加 しているが、Vcが増加するとスイッチング時間は減少してい ることがわかる.これは、Vcの増加によって通常状態から降 伏状態へ移行する時間が減少するという、3.3の研究結果と 一致する.

続いて、3 種類の BJT を使用し、C を同一とした場合のス イッチング時間の変化を図 9 に示す.通常状態においては、 定格コレクタ電流の値が大きいほど、スイッチング速度は早 くなっている.一方、降伏状態においては、その傾向は逆転 し、定格コレクタ電流の小さいほどスイッチング時間は減少 する傾向にあるため、定格コレクタ電流が最も小さい 28C2655 のスイッチング速度が早くなっていることが伺える.



図 8 コンデンサ容量変化時のスイッチング時間特性 Fig.8 Switching time characteristic as a function of Vc.



図9 各種 BJT によるスイッチング時間特性

Fig. 9 Comparison of the switching time characteristic as a function of Vc.

4. 定パルス幅ミニチュアマルクス発生装置の開発

上述の結果に基づき, BJT 2SC2655 を短絡スイッチとして 採用したミニチュアマルクス発生装置の開発を行った.今回, 発生器の出力部分に,段数に応じたBJTを直列接続し,負荷 によらず一定のパルス幅を出力することが可能な回路を作 成した.図10にその回路構成を示す.回路は14段構成とし, 各段におけるコンデンサ容量は0.1uF とした.出力部には, 発生器の段数分にあたる14 個のBJTを直列接続している. 発生器の出力が最大に達した瞬間,直列接続したBJTで構成 されたクロージングスイッチがオンするため,強制的に負荷 へのエネルギーを引き抜き,数+ナノ秒オーダの定パルスを 負荷に出力することができる.

図 11 には、製作した小型マルクス発生装置を充電電圧 18 0V とし負荷を開放として動作させた場合の出力波形を示す. 最小値-2.5kV の波高値及びパルスの半値全幅 35ns を有する パルス電圧が得られていることが確認される.また、この場 合の電圧利用率は 99%であった.



図10 小型マルクス発生装置の回路図



Fig. 10 Circuit diagram of Miniaturized Marx generator.

図 11 小型マルクス発生装置出力波形(負荷開放) Fig. 11 Output voltage of Miniaturized Marx generator.

5. マイクロプラズマジェットの生成

開発したミニチュアマルクス発生装置を用いてマイクロ プラズマジェットの生成を試みた.そのリアクタの形状を図 12 に示す.リアクタ形状はペン型とし,直径 1mm のセラミ ックチューブ内中心部に直径 0.025mm のタングステン線を 電極として配置し,出口の銅平板との間に小型マルクス発生 装置を接続した.ペン内には流量 2.5L/min の空気を流し,プ ラズマは銅平板に空けた直径 1mm の穴より大気中に放出さ れる.

定パルス幅の状態でのジェットの様子を図 13(a), 直列スイ ッチを外した状態でのジェットの様子を図 13(b)と(c)に示す. 撮影にはカメラ(D40, Nikon)を使用し,シャッター時間を 30 秒とした.図 13(a)の上部ではチューブ内での放電による白色 がかった発光がみられ,下部には赤みがかった放電がみられ るが,その伸びは小さい.一方,直列スイッチを外し,負荷 へのエネルギーの引抜きを無くした場合,プラズマの伸長が 確認できる(図 13(b)). 色反転した図 13(c)からその伸長がより 鮮明に視認できる.この時のプラズマジェットの長さは約3 mm であった.

続いて電圧電流波形を図 14, 15 に示す.図 14 は直列スイ ッチを接続し強制的に負荷へのエネルギーを引き抜いた状 態であり,最小波高値-2.5kV,-2.1A,パルス半値全幅 38ns の 電圧電流共に幅の短いパルスを出力している.直列スイッチ を外した場合では,最小波高値-2.5kV,パルスの半値全幅 40 ns の電圧パルスが発生した瞬間に,電流が-2.1A に達し,そ の後,電流は緩やかに減少する.この場合の電流パルスの半 値全幅は 28us である.

最小波高値に達した瞬間,即ち放電が起こった瞬間に負荷 への電流を強制的に遮断した場合,プラズマジェットの伸び は小さく,反対に負荷への電流を連続して与えることで,そ の伸長が確認できる.

従って、プラズマジェットの伸びは、放電に達した後の電 流に起因し、その電流値によって伸びが変化していると思わ れる.



図 12 マイクロプラズマジェットリアクタ写真 Fig.12 Photograph of micro-plasma jet reactor.



(a)直列BJT有
(b)直列BJT無
(c)色反転
図 13 マイクロプラズマジェット写真,色反転図
Fig. 13 Photograph of micro-plasma jet.



図 14 リアクタ電圧電流波形(直列 BJT 有)





図 15 小型マルクス発生装置出力波形(直列 BJT 無)

Fig. 15 Voltage and current waveforms of micro-plasma jet reactor (non series BJT).

6. まとめ

ミニチュアマルクス発生装置の開発並びにマイクロプラ ズマジェットの生成を行った.先行研究にて開発した,BJT を採用したミニチュアマルクス発生装置をマイクロプラズ マジェットの生成に用いる場合,エネルギー容量の増加が必 要となる.そこで容量増加を目的として,定格コレクタ電流 が異なる3種類のBJTの特性試験を行い,通常状態と降伏状 態との間でスイッチングの特性が大きく変化することを確 認した.降伏状態においては定格コレクタ電流によらず,流 れる電流がほぼ同一となり,スイッチング時間は定格コレク タ電流が大きいほど短くなる.これはスイッチング時のイン ピーダンスの大小が関係しており,降伏状態においては回路 インピーダンスが支配的になるためであると思われる.従っ て,今回試験した3種類の内,スイッチング時間が最も小さ いBJT 2SC2655が小型マルクス発生装置に向いていると言 える.

次に特性試験の結果をもとに、2SC2655 を使った定パルス 幅の出力も可能な小型マルクス発生装置を開発し、プラズマ ジェット生成を試みた.その結果、プラズマジェットの伸び は、放電に達した後の電流によって変化することが判った.

今後は、直流電源や商用周波数電源等の既存電を用いたマ イクロプラズマジェット生成特性の比較やミニチュアマル クス発生装置を生体や材料加工といった様々な応用分野に 適用する予定である.

参考文献

- K. Tachibana: Journal of Plasma and Fusion Research, 76 (2000) 435
- K. Tachibana: Journal of Plasma and Fusion Research, 80 (2004) 825
- K. Terashima, T. Ito, H. Fujiwara, K. Katahira, A. Kono, J/ Wang, M. Aramaki and T. Ichiki: Journal of Plasma and Fusion Research, 80 (2004) 845
- T. Namihira, S. Tsukamoto, D. Wang, S. Katsuki, R. Hackam, K. Okamoto, H. Akiyama: IEEE Transactions on Plasma Science, 28 (2000)109
- 5) 秋山秀典: O plus E, 26 (2004)1324
- T. Heeren, T. Ueno, D. Wang, T. Namihira, S. Katsuki, H. Akiyama: IEEE Transactions on Plasma Science, 33 (2005) 1205
- 7) Toshiba Semiconductor Corporation: Datasheet for 2SC2655/5076/5000