

氏 名	野 口 卓 也
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 5 1 年 9 月 8 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 3 9 年 3 月 東北大学大学院工学研究科電気及び通信工学専攻修士 課程修了
学 位 論 文 題 目	光照射による放電ギャップスイッチの制御
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 麻生 忠雄 東北大学教授 八田 吉典 東北大学教授 長尾 重夫 東北大学教授 稲場 文男 東北大学助教授 後藤 幸弘

論 文 内 容 要 旨

二個の電極間に電圧を印加した場合、電圧がある値に達すると、一般には光と音と発して電極間の絶縁物は急激に変化し導体となる。この電極対を放電ギャップという。本論文では光照射で制御された放電ギャップを電気回路のスイッチとして用いる場合について論じた。スイッチにもいろいろあるが、放電ギャップは他のスイッチより大電力用に適し、スイッチ速度も速いのが特長である。

過去においても大電力用スイッチ技術は、高電圧工学や電力工学における重要技術の一つとして多くの研究がなされてきた。しかしながら、制御熱核融合や高エネルギー物理で用いるスイッチはこれらの技術水準をはかるかに上まわる苛酷な要求が課せられる場合が多い。つまり制御エネルギー量が極めて大きく制御時間精度も極めて高いことである。

従来放電ギャップは主として、電氣的に制御されていたが、ここでは光照射で制御する方式を論じた。そしてこの方式では、スイッチ始動時間のばらつきが小さく、動作電圧範囲が極めて広く制御方式およびギャップ構造が簡単であり、遠隔操作も容易である。光照射でこのようなことが可能になったのは、レーザが発明され、光のエネルギー密度が極めて大きくすることができるので、光の非線型効果が利用できるようになったからである。

放電ギャップは動作機構より二種類考えられる。一つはギャップ間電圧がある値に達すると動作するスイッチでこれを受動スイッチといい、もう一つはトリガ系をもつスイッチ、つまりある所定の時刻に強制的に動作されるスイッチで、これを能動スイッチと呼ぶことにする。

本論文では受動スイッチとして水銀灯照射放電ギャップをとりあげた。この場合重要な特性はギャップの破壊電圧のばらつき、つまりフラッシュオーバー確率である。ここではこの確率を統計時間遅れに関する Laue の理論から誘導し、照射により定量的に制御できることを明らかにした。従来はこの確率は累積正規分布するだけでいわれ、この確率に影響するパラメータについては検討されていなかった。

能動スイッチとしては、レーザ光照射放電ギャップ（レーザトリガギャップともいわれ LTSG で略記する）をとりあげ、そのトリガ機構、特性および応用について論じた。従来の LTSG に関する論文は主として特性に関するもので、トリガ機構は本論文において始めて解明された。また特性や応用に関する従来の論文では、高電界における使用を対象としていたが、ここでは低電界における特性と応用についても論じた。

電極間に自己破壊電圧 V_{SB} （照射などの外的作用をしないで、直流電圧を極めてゆっくり上昇した場合の破壊電圧）以下の電圧をギャップに印加した場合にも電流は流れる。これを初期電流という。破壊電圧はこの初期電流に影響される。つまり照射による放電ギャップ制御とは、照射による初期電流制御である。

初期電流密度が小さい場合 ($< 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) は破壊の統計時間遅れが無視できなく、破壊電圧の平均値は自己破壊電圧より大きい。この領域は受動スイッチとして用いられる。初期電流密度が 10^{-7} A/cm^2 以上になると、ギャップの電界はその影響を受け、破壊電圧は自己破壊電圧以下となる。この領域は能動スイッチとして用いることができる。

第 2 章では、受動スイッチとして水銀灯照射放電ギャップをとりあげ、そのフラッシュオーバー確率について論じた。この確率を誘導するにあたり、1 個の電子が破壊をおこす確率 W は過電圧率 Δ に比例するとした。つまり

$$W = \alpha \Delta \quad (1)$$

とした。この仮定の妥当性は理論と実験結果との一致により確認された。インパルス電圧の波尾長が波頭長より極めて長い場合は、この仮定のもとに Laue 理論を用いてフラッシュオーバー確率 F

(Δ_{∞}) は次式で与えられる。

$$F(\Delta_{\infty}) = 1 - \exp\left(-\frac{\alpha N \Delta_{\infty}^2 t_t}{1 + \Delta_{\infty}}\right) \quad (2)$$

ここで Δ_{∞} は、 V_m をインパルス電圧の最大値とすると $\Delta_{\infty} = (V_m - V_{SB}) / V_{SB}$ である。 α は気体の破壊しやすさを示す定数で、 N_2 、 Ar 、 SF_6 ガスに対してそれぞれ0.08、0.2、 5×10^{-4} である。 N は毎秒あたり放電空間に現われる初期電子数で、これは照射量に依存する。つまり照射効果を示す。 t_t は印加電圧の波尾長である。

受動スイッチは使用条件として、ある電圧波形と過電圧率に対してそのスイッチの重要度からフラッシュオーバー確率がある値以上になるように要求される。したがって α 、 t_t 、 Δ_{∞} 、 F が与えられるので(2)式より必要な N が求まる。

第3章では、能動スイッチとしての光照射の必要条件を検討した。その結果コヒーレンスのよい光で照射し、しかもその光で電子だけを発生させるのではなく、ショックプラズマを発生させる必要があることを明確にした。そのためには 10^9 W/cm^2 以上の照射が必要であり、現在ではレーザー光照射以外にない。

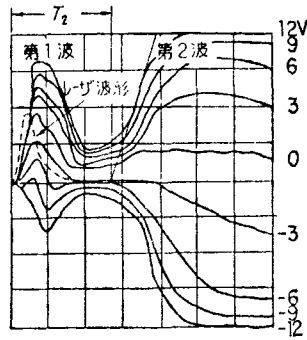
第4章以後はレーザトリガギャップ(LSTG)を能動スイッチとして用いる場合について論じた。LSTGの種類は多く、それらすべてを論ずることはできない。そこで第4章では、利用範囲が広く効率のよいLSTGのタイプについてその大わくを決定した。つまり(1)可視光の単一パルスのQスイッチパルスレーザー光がよい。Qスイッチの方法は同期の必要性による。(2)気中照射より電極面照射の方がよい。(3)照射方向はギャップ軸に沿って一方の電極の穴を通して対向電極を照射するのがよい。(4)電極はなるべく平等電圧となるようにし、絶縁物は気体で使用電圧に応じて気圧を変えるのがよい。

第5章ではLSTGのトリガ機構について論じた。まず金属にレーザー光を照射した場合2個のプラズマ(ショックプラズマ、放射波プラズマと名づけた)が生ずることを指摘し、ショック波理論を用いて解明した。次にこれらのプラズマがどのようにトリガ作用するかを論じた。つまり低電界ではショックプラズマが、高電界では放射波プラズマがトリガ作用することを指摘した。

LSTGのギャップ電流を第1図に示した。つまりレーザー光パルスとはほぼ同時に現われる持続時間の短いパルスとそれに続く持続時間の長いパルスとからなる。これらを各々第1波、第2波と名づけた。この電流はプラズマがギャップを橋絡したために流れた電流である。

レーザー光を電極に照射すると、電極の加熱、蒸発、電離により金属蒸気プラズマが生じ、これがピストン作用しショックプラズマを形成する。こゝでは第2波がこのショックプラズマに起因する電流であることを実験とショック波理論より確認した。

このプラズマの進展距離 R_B は次式で近似的に与えられる。



$$R_{\text{B}} = \xi_0 \left(\frac{E_L}{\rho_0} \right)^{1/5} t^{2/5} \quad (3)$$

ここで E_L はレーザー光のエネルギーで、 ρ_0 はショック波前方の気体の密度である。 ξ_0 は気体の比熱で決る定数である。

ショックプラズマが音波に転移するまでに進展した距離がこのプラズマの最大到達距離 R_{Max} であり、次式で与えられる。

$$R_{\text{Max}} = \xi_1 P_0^{-1/3} E_L^{1/3} \quad (4)$$

ここで P_0 はショック波前方の気体の気圧である。

ショックプラズマは初期は極めて高温 ($10^5 \sim 10^6$ °K) なので、紫外線を放射する。したがってこの紫外線によりショックプラズマの前方の気体は電離されてプラズマとなる。これを放射波プラズマと名づけたが、これによる電流が第1波である。

放電型は電界の小さい方から四つに分類される。放電型(I)とは、ショックプラズマが対向電極に達した後、ギャップは一時的に短絡されるが電氣的破壊が生じない場合である。したがって利用できる電荷量はプラズマの電荷量以内であり、ギャップの導通時間はプラズマの寿命以内である。100 MWのレーザー光の場合、それらはそれぞれ数 μC 、数 μs である。

放電型(II)とは、ショックプラズマがギャップを短絡した後アーク放電が生ずる場合である。この場合はプラズマの再生作用があるので、電流として取り出せる電荷量もギャップの導通時間も外部電源で決定される。この型では100 V程度の低い電圧でもアーク放電が点火できるので、クローバスイッチとして用いることができる。

放電型(III)とは、ショックプラズマが対向電極に達する前に電氣的破壊が生ずる場合である。この型は長ギャップの場合に特徴的に現われるので、高圧開閉に用いることができる。

放電型(IV)とは、放射波プラズマが存在している間に電氣的破壊が生ずる場合である。この場合放電時間遅れを10 ns以下にもできるので、高速度制御に適している。

第6章ではLTSGの基本特性について論じた。それらは、最小火花誘起電圧 V_{SM} 、第2波の時

間遅れ τ_2 , 電氣的破壊の時間遅れ τ_E に関するものである。またギャップ長を d とすると, $V_{SM} - d$ 特性において V_{SM} が急上昇するギャップ長 d_2 も重要である。この d_2 は(4)式の R_{MAX} であり, τ_2 は(3)式の t に相当する。

第7章ではLTSGの応用について論じた。まず始めにLTSGの長所を論じ従来指摘されなかった長所を挙げ, しかもその長所がどのように応用されるかを検討した。また各放電型を利用する場合の必要条件を明確にした。従来は放電型(IV)の応用についてのみ報告されていたが, ここでは各放電型について具体的応用例を示した。つまり放電型(I), (II), (III)の応用例として, 低電圧パルス発生, クローバスイッチ, 高電圧波形制御について論じた。放電型(IV)の応用としては大電流発生つまり複数LTSGの同時トリガを論じた。

審査結果の要旨

一般に火花放電ギャップは、高電圧制御用としてスイッチ速度が高く、また大電力用に適することから、高電圧、電力分野ではかなり古くより利用されているが、高峻度高電圧インパルスの成形や熱核融合制御の研究に用いるスイッチとしては、さらに改良を要する多くの技術的問題が残されている。本論文は放電ギャップスイッチについてレーザー光照射を中心に、紫外線を含む光照射によるスイッチ制御を体系的に論述したもので、全編8章より成る。

第1章は序論で、放電ギャップスイッチの分類と本論文の位置付けを与えている。第2章では、受動スイッチとしての紫外線照射ギャップについて、従来定性的な域を出なかった統計的時間遅れの理論を拡張し、各種のパラメータに対して定量的に火花遅れの確率と放電率を導出する手法を確立している。

第3章では、放電ギャップの能動ギャップとしての条件を論じ、引金となる初期光電流密度の臨界値を与えている。また火花放電による光照射ではその値が不足であるが、集光性の高い強力レーザー光照射によれば、電子放出のみならずショックプラズマの発生も可能であることを指摘している。

第4章では、レーザトリガギャップの構成について述べ、可視域のQスイッチパルスレーザー光を電極面に照射する方式が高効率であることを示している。第5章では、レーザトリガギャップのトリガ機構について論じ、金属面のレーザー光照射によって生じるギャップ電流に第1波と第2波の存在する現象を見出して、これらが金属面より放出されたショックプラズマと、これに起因する気体の放射波プラズマによることを明らかにしている。これは、重要な新しい知見である。この現象を基として筆者は、レーザトリガギャップの放電形式を4種に分類し、それぞれの特長に触れている。

第6章では、レーザトリガギャップの基礎的諸特性を述べ、動作電圧範囲およびスイッチ遅れ時間を取纏めて、適用上の指針を与えている。

第7章では、第5章において分類した4種のレーザトリガギャップ放電形式それぞれに対する応用例を示し、低電圧パルス発生、クローバスイッチ作用、高電圧波形成形および大電流複数発生の何れにおいても、それらが在来の放電ギャップスイッチよりはるかに高性能となることを実証している。第8章は結論である。

以上要するに、本論文は放電ギャップの光照射によるスイッチ制御についてレーザトリガ方式を主体に火花確率およびトリガ機構を論じたもので、高電圧工学ならびに電力工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。