エキシマレーザガスの放電開始機構に関する検討

正員 齊 藤 善 夫 (三菱電機)

正員 稲 永 康 隆 (三菱電機)

正員 佐 藤 行 雄 (三菱電機)

Study of the Breakdown Mechanisms in the Excimer Laser Gas

Yoshio Saitoh, Member, Yasutaka Inanaga, Member, Yukio Sato, Member (Mitsubishi Electric Corporation)

キーワード：エキシマレーザ，放電開始機構，電子増倍， α 作用， γ_i 作用，予備電離，Paschen 曲線

1. ま え が き

エキシマレーザ放電は，気圧 0.2～0.4 MPa 程度，電極間隔 1～5 cm 程度の高 Nd 放電 (N : 原子数密度， d : 電極間隔) である。放電開始に先立ち行われる予備電離による生成電子を電圧印加速度 $100 \text{ kV}/\mu\text{s}$ 以上の急峻な立上りの電圧で増倍し，安定した放電開始を実現する。予備電離から放電開始までは 100 ns 程度の時間領域にあり，この間の正イオンの移動 (ドリフト) 距離は数 $10 \mu\text{m}$ 程度⁽¹⁾と電極間隔に対し非常に小さく，正イオンによる陰極からの二次電子放出 (γ_i 作用) は，ほとんど期待されないと考えられる。

そこで著者らは既報⁽²⁾において，電圧印加速度 $100 \text{ kV}/\mu\text{s}$ 以上の放電開始過程について，予備電離電子密度を初期条件とし電子衝突増倍 (α 作用) のみを考慮したモデリングを行い，測定結果と良好な一致を確認した。

一方，数十 μs 以上の長い電圧印加時間の放電開始過程は，上記モデルでは説明できないことを確認している。そこで今回， $0.1 \text{ kV}/\mu\text{s}$ 程度の通常の動作条件に対し極めて緩慢な電圧印加による放電開始特性を測定し，これらには γ_i 作用を考慮したモデルが妥当であることを確認した。

本レターは，電圧印加速度による放電開始機構の相違を差別化し，エキシマレーザガスにおける放電開始機構を体系化するうえでの基礎情報を整理することを目的とする。

2. 電圧印加速度と放電開始機構

本レターでは，既報⁽²⁾の実験装置を対象に測定および解析を行った。放電条件は， $\text{Kr}/\text{F}_2=1.5/0.1\%$ ，緩衝ガス Ne ，気圧 $0.1\sim 0.4 \text{ MPa}$ ，電極間隔 1.2 cm (一定) である。

(1) 放電開始電圧の測定特性 電圧印加速度の相違による電極間電圧波形と放電開始電圧の相違を図 1 に示す。(a) 図は $0.1 \text{ kV}/\mu\text{s}$ 程度の緩慢なパルス電圧を印加した場合 (予備電離なし) の電圧波形を示し， 7.0 kV の放電開始電圧が観察された。この電圧印加速度の条件での

放電開始電圧特性を測定特性 a とする。またこの程度の電圧印加速度の領域では，放電開始電圧は電圧印加速度にほとんど依存しないことを確認した。

(b) 図は通常のエキシマレーザ動作時に得られる $100 \text{ kV}/\mu\text{s}$ 以上の電圧印加速度による電圧波形を示す。前述のように放電開始に先立つ予備電離により初期電子を供給している。放電開始電圧は， $10\sim 12 \text{ kV}$ と測定特性 a より高く，かつ電圧印加速度が早いほど放電開始電圧は高くなることが観察された。これらの電圧印加速度条件での放電開始電圧特性を，(b) 図の電圧波形の電圧印加速度に応じて測定特性 $b1$, $b2$ とする。

(2) 放電開始電圧の理論特性 初めに α 作用と γ_i 作用のつり合いによる放電開始機構を考える。すなわち，Townsend の放電開始理論に基づきエキシマレーザガスの Paschen 曲線を算出する⁽³⁾。ここで，Townsend の火花条件は，電離係数 α ，正イオンによる二次電子放出係数 γ_i を用いて次式で与えられる。

(a) 緩慢なパルス，(b) 急峻なパルス (エキシマレーザ動作)

図 1 電圧印加速度と放電開始点 (測定特性)
Fig. 1. Rise of applied voltage and the breakdown points (measured characteristics).

図 2 放電開始電圧の電圧印加速度依存性
(測定特性と理論特性の比較)

Fig. 2. Dependence of the voltage impressing speed on the breakdown voltage (comparison of the measured and calculated characteristics).

$$\exp(ad) = 1 + 1/\gamma_i \dots \dots \dots (1)$$

(1)式が時間に依存しないのは、正イオンがドリフトするのに十分な時間が与えられていることを前提とするためである。そこで、(1)式左辺の電離係数はNe, Krの電離係数の和からF₂の付着係数を減じた実効的な電離係数を考え、右辺の二次電子放出係数は、Ne, Krの二次電子放出係数⁽⁴⁾を正イオンの生成割合、すなわち電離係数で比例配分した実効的二次電子放出係数を考える⁽³⁾。このようにして、(1)式を満たす電圧-Nd特性がPaschen曲線を与える。これを理論特性aとする。

次に、測定特性b1, b2のような、急峻パルス印加では前述のようにγ_i作用は期待されないと思われる。そこで予備電離電子密度を初期条件とし、電極間電圧の時間変化に対するα作用にのみ依存する電子増倍モデルにより、放電開始特性を定量化した⁽²⁾。本モデルは、放電開始前後ではプラズマ状態を連続と仮定し、放電抵抗の急峻な減少に伴う電極間電圧の変化を検出するものである。これらを図1(b)の電圧印加速度に対応して理論特性b1, b2とする。

(3) 放電開始機構の検討 以上の方法で測定または計算された放電開始電圧のNd依存性を図2に示す。測定特性と理論特性にはそれぞれ良好な一致が観察され、本解析の妥当性が確認される。

ここで、理論特性a (Paschen曲線)は高Nd部では換算電界E/N=5.5Td (1Td=10⁻¹⁷V・cm²)に漸近する。これは、本ガス組成において実効的電離係数が零になる条件(α=η, η:付着係数)であり、E/N<5.5TdではF₂による解離性電子付着が支配的となり、電子増倍が起こり得ないことに対応する。すなわち、絶縁耐力を与える条件である。

また、エキシマレーザ放電の動作領域のNd値は、Paschen極小値を与えるNd値より3桁以上大きく、この領域での放電開始電圧は、Ndが大きくなるほどγ_iの

値に依存しなくなることを理論特性aの計算の過程で確認した。

以上の結果、正イオンのドリフトにより陰極からの二次電子放出が期待されるような緩慢な電圧印加速度による放電開始機構は、α作用とγ_i作用により支配されるが、高Ndになるほどγ_i作用の寄与の程度は小さくなること、および通常のエキシマレーザ動作時のような急峻な電圧印加速度による放電開始機構は、α作用とそれを補助する予備電離生成電子密度により支配されることが確認された。

3. 今後の課題

本レターでは、ほぼ均質と仮定できるプラズマモデルによる放電開始機構を電圧印加速度により大別化した。今回は通常のエキシマレーザ動作条件に対し、極めて緩慢な電圧印加速度の条件を対比させた。今後両条件および両条件の間に位置する電圧印加速度に対しても、今回解析された放電開始機構の寄与の割合、光子・電界ひずみなどの関与する電離機構の寄与の程度、更に繰返しパルス動作時に問題となる残留電荷などの放電生成物の影響を定量化する必要がある。

(平成7年10月2日受付)

文 献

- (1) J. S. Chang・R. M. Hobson・市川・金田：電離気体の原子・分子過程 p.290~303 (平元) 東京電機大学出版局
- (2) 齊藤・佐藤・殖栗：電学論A, 115, 1180 (平7-12)
- (3) 松崎：同上A, 113, 345 (平5-4)
- (4) 松崎：同上A, 111, 971 (平3-11)

齊藤 善夫 (正員) 1991年3月北海道大学大学院工学研究科電子工学専攻博士課程修了。同年4月三菱電機(株)入社。現在、同先端技術総合研究所にてエキシマレーザの開発、プラズマモデリングに従事。工学博士。レーザー学会、応用物理学会会員。

稲永康隆 (正員) 1992年3月京都大学大学院工学研究科電気工学第二専攻修士課程修了。同年4月三菱電機(株)入社。現在、同先端技術総合研究所にて銅蒸気レーザの開発、プラズマモデリングに従事。応用物理学会会員。

佐藤 行雄 (正員) 1980年慶應義塾大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月三菱電機(株)入社。現在、同先端技術総合研究所勤務。大出力CO₂レーザ、エキシマレーザ、銅蒸気レーザの研究開発に従事。1991年レーザー学会奨励賞受賞。レーザー学会、応用物理学会会員。