

論文の内容の要旨

論文題目 マイクロギャップにおける放電現象

氏名 岩淵 大行

数 μm 以下の微小なギャップ（以下マイクロギャップと記す）における絶縁破壊現象の解明は、マイクロデバイスなどの信頼性を確保するうえで重要な課題である。しかしながら、マイクロギャップ間における放電現象は、通常の気体中における放電と異なる様相を呈する複雑な物理現象であることが知られており、放電機構には未だに解明されていない点が多く残されている。マイクロギャップにおける放電現象は電気機器の信頼性に直結するのみならず、微小な表面加工技術など幅広い分野で応用されており、マイクロギャップ放電機構解明の要請は強い。

近年の MEMS 技術の発達に伴い、気体中や絶縁物表面の微小ギャップにおける絶縁破壊現象が大きな問題とされるようになり、マイクロギャップ間の絶縁破壊現象に関する研究が盛んにおこなわれるようになってきている。特にマイクロアクチュエータに代表されるようなトルク出力が要求されるデバイスでは、出力が電界強度によって決定されるため、 $\mu\text{m}\sim\text{nm}$ オーダのギャップ間の絶縁の把握が重要な鍵となる。また、微小ギャップにおける絶縁破壊現象は、対象としているギャップ長と電子の平均自由行程を比較すると、真空中の放電に類似する部分が多い。真空は優れた絶縁性能を持つ材料として長年注目されてきた。特に現在電力機器のガス絶縁として広く用いられている SF₆ ガスが削減対象に指定されてからは有力な代替手段の一つとみなされ、真空遮断器の大容量化、高電圧化への期待も大きい。マイクロギャップ間放電機構に関する研究成果は、未だ統一した見解の得られていない真空放電のメカニズム解明にも新たな知見を供するものであると考えられる。

このように、マイクロギャップ間における放電現象は広範な応用範囲を持ち、研究例は数多く報告されているが、その結果や提唱されるモデルは報告者ごとに異なるものになっている。さらに、これまでの研究報告はもっとも単純な平等電界を仮定した電極構成で実施されたものであり、実際のデバイスで見られるような誘電体上に電極を配置したマイクロ沿面ギャップにおける放電機構に関する検討はほとんどなされていないのが現状である。以上を踏まえ、本研究においては MEMS デバイスを模擬した SO ウェハ上のマイクロ沿面ギャップにおける前駆現象、絶縁破壊特性の測定、シミュレーションによりマイクロ沿面ギャップにおける放電進展機構の構築を行い、マイクロ沿面ギャップを有するデバイスのギャップ長、電界の絶縁破壊に対する許容範囲を明らかにすることを目的とする。

以下、本研究で得られた成果を章ごとに述べる。

第3章ではマイクロギャップにおける絶縁破壊特性について報告した。本研究で使用するマイクロギャップは MEMS デバイスを模擬し、SO 基板上に金属電極対を作製したものである。SO 基板は $525\ \mu\text{m}$ 厚の p-Si 層と $2\ \mu\text{m}$ 厚の SiO₂ 層（熱酸化膜）で構成される。この SO 基板上の金属膜に対して、ホームベース上のマイクロギャップ電極対を加工した。電極材料として Al、W、Ti を用いた。また、電極厚みは 100nm のものに加えて 500nm のサンプルを作製した。電極間のギャップ長は $1\sim 50\ \mu\text{m}$ である。正負インパルス電圧印加時のマイクロギャップにおける絶縁破壊電圧を測定した結果、ギャップ長、電極材料、電極厚みにかかわらずほぼ一定の値であった。正極性の絶縁破壊電圧は負極性の絶縁破壊電圧の約 1.5 倍であった。絶縁破壊時の発光は、ギャップ長にかかわらず同じ傾向がみられ、陽極はエッジ全体、陰極は局所的に発光がみられた。発光の見られた箇所で電極の破壊もみられた。前駆放電時には発光は観測されず、電極の破壊も起こらなかった。正極性印加時の放電経路は誘電体界面に沿っていたのに対し、負極性印加時の放電経路は陰極から上方に発光がみられた。放電時間遅れに対しては、雰囲気気体を 1/100 まで減じた場合、正極性の短時間破壊電圧に上昇がみられた。

第4章ではマイクロギャップ間における粒子シミュレーションの結果を報告した。本研究ではマイクロギャップ間における放電現象の解明の為、PIC-MCC 法による放電シミュレーションを併せて実施した。モデルはマイクロギャップを 2 次元 xy 系で模擬し、実験環境と同じく大気圧 N₂-O₂ 環境下、陰極表面からの電界電子放出、誘電体表面からの 2 次電子放出を考慮する。陰極表面からの電界電子放出を陰極側面、陰極上面に分けて考えると、陰極側面からの電子放出のみを考慮した場合、放出された電子は陰極と誘電体表面の間に集中し、両電極間を橋絡しない。それに対して陰極上面からの電子放出を考慮した場合、上面から放出された電子は誘電体界面に至り、界面で増倍しながら陽極に至ることが分かった。正極性インパルス印加時の場合、陽極近傍の誘電体界面から放出された電子は他の粒子と衝突しながら陽極に至る。この際衝突によって生じたイオンは初期速度をもつため、より広範囲の誘電体界面に衝突する。この過程を繰り返すことで、ギャップ間が荷電粒子で橋絡される。

第5章ではマイクロギャップ陰極表面突起における熱解析の結果を報告した。有限要素法を用いて、マイクロギャップ陰極先端に nm オーダの微小な突起があると仮定し、表面突起の熱解析を行った。表面突起先端に一定の電流密度を与え、熱伝導、輻射を考慮する。周囲は真空に近いと仮定し、対流効果は無視する。有限要素解析の結果、輻射による損失は温度が 20000K 以下の範囲では陰極表面突起の温度上昇に影響を与えないことが分かった。また、表面突起の形状を変化させると、突起先端部が融点に達するまでの時間は ns \sim μs オーダで変化しうることが分かつ

た。

以上の結果からマイクロ沿面ギャップにおける絶縁破壊機構を第 6 章に示した。マイクロギャップ間の絶縁破壊電圧と破壊遅れ時間のばらつきは、端部の微小突起の融解によっても、陰極表面からの電界放出電流の増幅によっても説明することができる。低気圧環境下での放電特性を考えると、陰極上面先端から放出された電子が誘電体界面で増幅しながらギャップ間を橋絡し、空間電荷により増幅される効果により放電が発生するものと考えられる。V-t 特性で得られた放電遅れ時間は、表面状態の差による電界放出電子の増倍に要する時間の差によるものと考えるのが妥当であると考えられる。