

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 岩 渕 大 行

数  $\mu\text{m}$  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、マイクロ電子デバイスなどの電気絶縁設計法を確立し、また絶縁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、放電機構は未だに解明されていない点が多く残されている。本論文は、マイクロ電子デバイスを模擬したシリコン基板上のマイクロ沿面ギャップにおける前駆現象や絶縁破壊特性の測定、および電子およびイオンの粒子シミュレーションを行い、マイクロ沿面ギャップの絶縁破壊機構を検討したもので、「マイクロギャップにおける放電現象」と題し、全7章から構成されている。

第1章「序論」では、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つことから、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こと、また、これまでの研究報告の多くは、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ことが述べている。

第2章「放電基礎理論」では、マイクロギャップの放電に関連するタウンゼント放電理論、Paschen の法則、電界放出現象、Fowler-Nordheim の式、ラウエプロットなどについて解説を行っている。

第3章「マイクロギャップにおける絶縁破壊特性」では、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、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 倍であり、絶縁破壊電圧はギャップ長、電極材料、電極厚みにかかわらずほぼ一定の値であること、発光から推測される放電経路は、正極性印加時において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向かうことを明らかにしている。

第4章「PIC-MCC 法による放電シミュレーション」では、マイクロギャップを2次元座標系で模擬し、実験環境と同じく大気圧  $\text{N}_2\text{-O}_2$  環境下、陰極表面からの電界電子放出、絶縁物表面の帯電現象を考慮して解析を行っている。その結果、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、両電極間の橋絡、増倍が起こらないことを明らかにしている。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がギャップ間で絶縁物表面に至り表面を負に帯電させ、電子は絶縁物表面から浮いた経路で中性粒子と衝突しながら陽極に至ること、また、このときに陰極近傍の正イオンによって電界放出電流そのものが増幅され、ギャップ間の絶縁破壊に至ることを明らかにしている。

第5章「陰極加熱理論に基づく絶縁破壊機構の検討」では、陰極先端に微小な突起が存在すると仮定し、その突起先端が電界放出電流によって溶解し、金属蒸気が発生した段階で絶縁破壊

が生じると考え、マイクロギャップ先端の電界強化係数を考慮して破壊電圧を求めると、その値はギャップ長によらず一定となり、実験結果とよく一致することを明らかにしている。また、マイクロギャップ陰極先端の微小突起をモデリングし、有限要素法を用いて微小突起の温度上昇シミュレーションを行った結果、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 $\sim\mu$ s オーダで変化しうることを明らかにしている。最終的に、マイクロギャップ間の破壊遅れ時間は陰極先端部の突起の溶解によっても説明できることを示している。

第 6 章「検討」では、マイクロギャップ間における放電現象は、ギャップ間を荷電粒子が橋絡し、陰極近傍の正イオンによって電界放出電流に正のフィードバックがかかる機構により発生すること、また、絶縁破壊電圧は電界放出電流の特性で判定できること、さらに、絶縁破壊までの遅れ時間は電極の表面状態によって大きくばらつきが生じることを明らかにしている。一方、マイクロギャップ放電に対する面積効果についても実験を行い、マイクロギャップにおける絶縁破壊電圧に対しては、面積効果と比較して、陰極表面の電界強度が大きな影響を与えていることを明らかにしている。

第 7 章「結論」では、以上の成果をまとめ、内容を総括すると共に今後の展望を行っている。

以上これを要するに、本論文は電子デバイスの微細化で重要課題とされながら未解明な点が多かったマイクロギャップ放電を対象として、マイクロデバイスを模擬したシリコン基板上のマイクロ沿面ギャップにおける体系的な実験と荷電粒子の運動シミュレーションに基づき、絶縁破壊機構を明らかにしている点で、電気工学、特に高電圧、放電工学に貢献するところが少なくない。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。