

## 審査の結果の要旨

氏名 塚本 直之

電力供給システムや情報通信システムの信頼性向上の観点から、雷サージなどの過電圧抑制方策として避雷器の性能向上が求められている。現在、避雷素子として酸化亜鉛素子(ZnO 素子)が多用され、作製条件や試験条件による電気性能の違いに関する研究もなされているが定性的なものに留まっている。本論文は、電気性能を決める主要因を解明し、また、電気性能と材料組成配合やセラミックス作製方法との関連性を明らかにすることで、ZnO 素子の性能向上および最適な設計につなげることを目的としたもので、「酸化亜鉛バリスタ素子の電気特性に影響する因子とそのメカニズムに関する研究」と題し、6 章から構成されている。

第1章「緒論」では、研究の背景として、ZnO 素子の構造、役割、技術の進展を概説し、また、ZnO 素子の重要な基本的電気性能は、動作開始電圧、非オーム性、サージ(インパルス耐量)特性、長期課電寿命特性、であることを示し、そして、研究の進め方として、材料科学的アプローチおよび作製工法的アプローチがあることを述べ、最終的に目的を提示している。

第2章「繰り返しのインパルス耐量及び各種破壊モード」では、先行研究で使用されたインパルス電流波形(主に規格で規定されている  $4/10\mu\text{s}$ 、 $8/20\mu\text{s}$  及び方形波波形)に加え、新たに  $10/350\mu\text{s}$  を追加して、インパルス電流による素子の破壊モードやバリスタ電圧(動作開始電圧)の劣化挙動を詳細に調査することで、その傾向を把握し原因の推定を行っている。 $2\text{ms}$  の長波尾波形では貫通破壊、 $4/10\mu\text{s}$  波形では、機械的破壊及び沿面フラッシュオーバーが発生、 $10/350\mu\text{s}$  波形では貫通破壊と機械的破壊が印加エネルギーに応じて発生するという、波形依存度の大きいことを明らかにしている。繰り返しの耐量回数は単位体積当たりのエネルギーと関連すること、また、機械的破壊が主である  $4/10\mu\text{s}$  波形では、平均耐量回数とエネルギー値とのその相関は直線的で、ZnO 素子の初期欠陥が非常に小さい場合全体的な ZnO 素子のサイズによって説明できること、一方、ピンホール破壊である  $2\text{ms}$  波形の関係は指数関数的であり、インパルス中の ZnO 素子の温度と温度係数によって説明できること、を述べている。

第3章「単発インパルス耐量及びその電流分布」では、 $4/10\mu\text{s}$  や  $8/20\mu\text{s}$  の短波尾インパルス電流では、バリスタ電圧の低下は単一インパルス電流における単位面積当たりの通過電荷量に依存し、またその挙動は、同じ通過電荷量の  $10/350\mu\text{s}$  や  $2\text{ms}$  方形波のような継続時間の長い電流波形におけるバリスタ電圧変化の挙動とは異なることを明らかにしている。挙動が異なる原因は、素子の焼成条件により、素子表面と内部で  $V-I$  特性にわずかな差が生じることを挙げ、印加電圧波形による電流分布の変化が、最終的にバリスタ電圧の変化となって現れると推定している。

第4章「交流及び直流課電性能に関する研究」では、ZnO 素子の課電寿命(長期安定性)に着目して実験を行った結果、直流課電と交流課電の違いによる素子の劣化に与える影響は実用的には大きな差はないこと、直流課電では漏れ電流の方向に対して劣化が非対称に進行すること、

熱処理を最適化することで漏れ電流の経時的な増加を防止できること、劣化に関しては漏れ電流が数  $\mu$  A～数 mA の範囲でのバリスタ電圧の変化が鋭敏に劣化傾向を反映すること、を明らかにしている。

第 5 章「素子特性に影響を与える因子とその影響」では、マクロな視点での微細構造 (ZnO 粒子、粒界及び粒界多重点のサイズや分布状態) に着目して検討を行っている。ZnO 素子における Al 添加による大電流域での非オーム性の向上について、Al 添加量と焼成温度を変えて ZnO 素子を作成し、V-I 特性と静電容量値の測定並びに微細構造観察を行っている。その結果、Al 添加によって ZnO の粒成長が抑制されることで、必然的に粒界層厚みの薄層化が進み、全体的に微細構造が均質化され、そして、これらの微細構造の変化は、いずれも ZnO 素子内部の高抵抗成分の体積減少につながることから、これによって大電流域での非オーム性が向上することを明らかにしている。

ZnO 素子の性能向上は、上記のような組成配合に関する因子以外に、主にセラミック作製技術を主体とした作製プロセスの因子も重要な項目であることを指摘している。

第 6 章「結言」では、本論文を総括している。

以上これを要するに、本論文は、避雷器の要となる酸化亜鉛素子の電気性能を対象として、作製条件や試験条件を変えて詳細な実験を行うことにより、性能を決定する要因を抽出して重要な素子設計パラメータを明らかにし、また、性能と材料組成やセラミックス作製方法との関連性を見出すことで、酸化亜鉛素子の性能向上および最適な設計につなげている点で、電気工学、特に高電圧、誘電絶縁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。