

氏 名	佐 藤 秀 隆
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 7 年 2 月 8 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 56 年 3 月 岩手大学工学部電子工学科卒業
学 位 論 文 題 目	通信用半導体雷サージ防護素子の設計法と その性能向上に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 高木 相 東北大学教授 佐藤 徳芳 東北大学教授 大見 忠弘

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

本論文は、有線電気通信装置を雷サージ等の異常高電圧から守り、電気通信の信頼性を高めることを目的に、通信用半導体雷サージ防護素子を提案し、その設計法及び性能を向上させる技術について研究した結果をまとめたものである。まず、近年の通信装置の半導体 LSI 化・低電圧動作化による著しい過電圧耐量の低下動向および、雷害に関する被害状況を明らかにし、雷サージ防護技術の重要性を述べた。また、通信の高速・広帯域伝送技術の動向をふまえて、通信用雷サージ防護素子として必要とされるサージ防護特性・伝送特性等の研究課題を明らかにした。続いてこれらの課題を実現するために、通信用半導体雷サージ防護素子の低伝送損失に着目して、シリコンサージ防護素子および PNP 型半導体サージ防護素子を提案し、その基本設計法として多段防護回路における過渡応答解析法および PNP 型素子の構造解析法を確立した。さらにサージ防護性能を向上させる検討として、その故障限界は発熱温度に依存することから、過渡熱設計による温度の低域および、熱自体の発生を抑えるエネルギー損失の低減に関する技術を確立した。

第 2 章 通信線に誘導される雷サージと通信設備の雷防護技術に関する従来の研究経緯

本章では、有線電気通信装置の雷サージ防護として、その過電圧対象である通信線に誘導される雷サージの諸特性、通信設備の雷サージ防護技術および、半導体素子のサージによる故障に関する研究歴史について述べた。さらに近年の通信装置の高速・広帯域化伝送技術の動向をふまえて、雷サージ防護素子として必要とされるサージ防護特性・伝送特性等の研究課題を明らかにした。

第3章 通信用多段防護回路の基本設計

本章では、多段防護回路の動作原理および、過渡回路解析による設計法を述べた。雷サージの過電圧を十分小さな電圧レベルに抑圧して通信装置を保護するためには、抵抗による直列素子および避雷管や定電圧素子による並列素子で構成される多段防護回路が用いられていた。しかし避雷管の過渡応答特性が考慮されていなかったため、放電開始電圧－放電開始時間（V-t）特性を考慮した、雷サージ応答時における多段防護回路の過渡解析法を提案し、実験結果と良く一致することを示すとともに、回路構成部品に加わる過渡的な電圧値および電流値を明らかにすることで、そのサージ耐量を保証する設計法を確立した。さらに避雷管の放電開始電圧、定電圧素子の動作電圧および雷サージ電圧値により、多段防護回路の応答が4つのモードに分類できることを示すとともに、定電圧素子のエネルギー損失は、低電圧サージが入力されて避雷管が放電しないモードが最も大きいことを明らかにした。

第4章 雷サージに対する過電圧防護素子の過渡熱応答解析

本章では、雷サージ防護素子として高速応答特性・定電圧抑圧特性に優れるアバランシダイオードを対象に、雷サージストレスと故障の関係を明らかにした。半導体デバイスの故障率は、例えばMIL-Hand Book217Dに、述べられているように、接合温度の上昇により指数関数的に増加する。しかしこれらは定常的な使用条件でのデータであり、雷防護素子のように短時間のストレス印加については整流用のダイオードおよびサイリスタにおける50Hzの半波正弦波が印加された場合について報告がなされているだけである。このため、雷サージに対して高信頼化設計に資すること目的に、雷サージ応答時の過渡熱解析を行った。解析結果は赤外線放射温度測定装置による実測値と良く一致することを確認した。2種類の標準雷サージ波形（10/200） μ sおよび（10/1000） μ sにおける数値解析の結果、ピーク温度は雷サージの半値減衰時間近くに現れることおよび、サージ耐量を明らかにするステップストレス実験においてもこの時間で故障することを確認した。またその故障温度は雷サージ波形に依存せずほぼ同じであることから、故障はピーク温度に依存し、その故障限界温度は約500度であることを示した。

第5章 通信用過電圧防護素子の過渡熱設計

本章では、デジタル伝送方式用過電圧防護素子の過渡熱設計について述べた。既設のメタリック加入者線路設備を使用してデジタルサービスを提供するINSネット64の2線時分割伝送方式では、最高ビットレートが320kb/sであり、0.3~3.4kHzの帯域で通信を行うアナログ回線用の多段防護回路は、その回路構成部品の酸化亜鉛バリスタは静電容量が大きく、適用することができない。このためアバランシダイオードを順・逆方向それぞれ4素子交互に直列接続して静電容量の低減を図ったシリコンサージ防護素子を提案した。本素子の過渡熱設計によるサージ耐量の向上を目的に、雷サージ応答時における過渡熱解析を行い、入力サージ波形に対する金属ヒートシンクの有効領域を示した。ヒートシンクとして、熱伝導率・熱容量の異なる各種金属材料およびヒートシンク無しの構造について解析を行った結果、通信線に誘起する標準雷サージ波形領域である（10/200）

μs -(10/1000) μs において、金属ヒートシンクは熱時定数は小さくできるがサージ防護素子の故障を左右するピーク温度の低減には効果が小さいことを示した。さらに実験の結果、金属ヒートシンク有・無の素子において、故障率の有意差が認められなかったことおよび、通信線に誘起する雷サージの観測結果による多重雷を考慮してもその効果が小さいことから、ヒートシンク無しの構造で十分な特性を有することを示した。

第6章 PNP型雷サージ防護素子の提案と基本設計

本章では、加入者線伝送方式のアナログ伝送方式(0.3~3.4kHz)およびデジタル伝送方式(320kb/s)を共用化できる半導体雷サージ防護素子の実現を目的に、PNPN型雷サージ防護素子を提案し、その動作原理、設計法、雷防護特性および伝送特性について述べた。本素子は、アパランシトランジスタとオープンゲートサイリスタの複合素子である2端子性双方向サイリスタ構造であり、高速応答特性、低オン電圧特性から雷サージ防護特性に優れ、かつエネルギー損失を多段防護に比べて1/300と低減できることから小型にしてサージ防護特性にも優れ、単位面積当たりのサージ耐量が大いことから静電容量の低下による低伝送損失化が図れる。PNPN型雷サージ防護素子はその負性抵抗を有するV-I特性およびフローティングポテンシャル層を有するため、従来の構造解析手法では解が収束せず、詳細な素子のプロフィール設計と雷サージ応答特性の関係が把握できなかったが、電圧境界条件と電流境界条件を切り替える解析手法および、フローティング領域の物理モデルの追加により解の収束を可能とし、基本設計手法を確立した。PNPN雷サージ防護素子は、多段防護回路に比べて1/50の小型化を実現することができた。

第7章 PNP型雷サージ防護素子の高性能化に関する検討

本章では、サージ防護性能を向上させる検討として、その故障限界は発熱温度に依存することから、過渡熱設計による温度の低減および、熱自体の発生を抑えるエネルギー損失の低減に関する技術を述べた。低エネルギー損失化に関する検討として、PNPN型雷サージ防護素子の雷サージ試験による故障解析を行い、高サージ耐量化に関する検討を行った。通信用雷サージ防護素子は、雷サージ消滅後すみやかに通信状態に回復することが必要であり、通信電流による継続を遮断するためには120mA以上の高い保持電流特性が要求される。保持電流を高く設計するために、Nベース層の不純物濃度を高くした素子および、Nベース幅を広くした素子の2種類について、サージ耐量、応答特性評価および故障解析を行った。その結果Nベース不純物濃度高い素子はスイッチング時のエネルギー損失が大きく、ポットスポットにより一部の接合面が故障して著しくサージ耐量の低下がおこることを明らかにした。薄い基板を用い、Nベース層を広く、Pベース層を狭い構造としてスイッチング時間の高速化およびオン電圧の低減によるスイッチング時および全エネルギー損失の低減が有効であることを示すとともに、実験によりサージ耐量の向上を確認した。過渡熱設計の検討として、近年、近傍雷による立ち上がり峻度の速い雷サージの故障が多くなっており、近傍雷に対するサージ耐量の向上を目的に、PNPNセル分割構造を提案した。本素子を対象に非定常熱解析を行い、近傍雷(1.5/30) μs および従来の遠方雷(10/1000) μs に対して、セルサイズとピー

ク温度の低減効果を明らかにした。近傍雷に対するセル分割構造においては、過渡熱拡散距離と同以下のセルサイズ $700\mu\text{m}$ 以下に設計することで、発熱源の分散による熱集中の緩和効果および発熱部である順方向部に隣接する逆方向部がヒートシンクとして有効に作用し、ピーク温度を約50%以下と大幅に低減できることを明らかにした。セルサイズ $320\mu\text{m}$ の素子試作による雷サージ試験の結果、近傍雷で1.8倍、遠方雷で1.3倍のサージ耐量の向上が確認でき、近傍雷に対するセル分割構造の有効性を示した。

第8章 結 論

本章では、本研究の内容を総括し、今後の課題について述べた。

審 査 結 果 の 要 旨

有線通信装置を雷サージ等の異常電圧から守り、高い信頼性をもつ通信を確保することは、極めて重要な課題であり、古くから雷防護素子の研究がなされて来た。しかし、近年の通信装置の半導体化により、装置のサージ耐量が低下し、加えて情報信号伝送の高速化によって、高周波特性をも考慮に入れた新しい雷サージ防護素子の開発が緊急の課題となっていた。著者はこの課題に取り組み、PNPN素子を導入することを試み、極めて小形で高い防護能力をもつ半導体雷サージ防護素子を開発した。本論文はこれらの設計法と性能実験の結果をとりまとめたもので全編8章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、通信線に誘導される雷サージと通信設備の雷防護に関する従来の研究を概観している。

第3章では、従来より用いられていた通信用多段サージ防護回路に使用される、シリコン半導体サージ防護素子 (SSPD) の具備すべき諸特性を明らかにしている。とくに、雷サージ波高値に対する、サージ耐量設計法を明らかにしている。これは有用な知見を与えたものと言える。

第4章では、SSPDとしてアバランシダイオードを用いたときの、雷サージに対する過渡熱応答解析と実験の結果について述べている。ここで素子の故障はピーク温度によること、そしてその臨界温度は約490℃であることを明らかにしている。次いで第5章では、アバランシダイオード素子の過渡熱設計について述べている。

第6章では、SSPDとしてPNPN素子を用いることを提案している。PNPN素子はスイッチオン時すなわちサージ電圧吸収時にほとんど短絡状態となるため、サージ耐量は大きくなり得るとの着想から、SSPDとしての構造と通信路の周波数特性をも考慮した詳細な解析と実験を行い、PNPN素子がサージ防護素子として十分使用可能であることを明らかにしている。

第7章では、PNPNサージ防護素子の高性能化について述べている。すなわち、SSPDの挿入に伴う通信伝送損失を最小にして単位面積当たりのサージ耐量を上げることを目的に、素子構造、故障率とその原因、動作時のピーク温度などについて詳細な理論的実験的検討を加え、従来の多段形に比して約50分の1の大きさで、高周波特性が50倍程度広帯域となる素子が実現でき、約5000万加入者端末に実用して、大きい効果を上げていることを述べている。これは注目に値する成果である。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は、有線通信における雷害対策として、半導体サージ防護素子に詳細な検討と新しい提案をして、高速伝送特性と弱いサージ耐量をもつ通信装置を雷害からほぼ完全に防護し得る、極めて小形の素子の開発に成功したもので、有線通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。