

論文の内容の要旨

論文題目

Development of High Power Microwave Semiconductor Switches for Pulse Compression Systems of Linear Colliders

リニア・コライダのパルス圧縮系のための大電力マイクロ波半導体スイッチの開発

氏名

田村文彦

この研究では、リニアコライダのパルス圧縮系のための X-band マイクロ波半導体スイッチの開発について検討した。ライナックにおいて、パルス圧縮はたいへん重要な技術である。特にリニアコライダの主ライナックは巨大なシステムであり、高効率で、かつできる限りコンパクトなパルス圧縮系が必要とされている。アクティブパルス圧縮と呼ばれるパルス圧縮の方法は、高効率かつ比較的コンパクトな方法として提案されている。アクティブパルス圧縮を実現するためには、大電力に耐えるマイクロ波スイッチが必要であるが、しかし現在までにそのような大電力を扱うマイクロ波スイッチは存在しなかった。

この研究では、まず大電力のマイクロ波を扱うスイッチの構成として、複数のアクティブエレメントと2つの3dBハイブリット結合器を組み合わせた構成について検討した。スイッチの構成について2つの選択肢、すなわち SPST array と cascaded phase shifter とよばれる構成を検討した。どちらの場合についても、マイクロ波電力の負荷は分散され、ひとつのアクティブエレメントが扱う電力は小さくなることが特徴である。アクティブエレメントは、対称的な導波管ティー結合、ショート、そしてアクティブ窓によって構成される。

アクティブ窓とは、外部からの入力によって反射係数を変化させる導波管窓である。アクティブ窓の反射係数を変化させることにより、アクティブエレメントの S 行列を変化させることで、大電力マイクロ波スイッチを実現するものである。SPST array、cascaded phase shifter のそれぞれについて、動作のための条件を明らかにした。また、重要な特性であるアクティブ窓での電界強度、ロスについての表式を厳密に導いた。

大電力のマイクロ波スイッチを構成するにあたって、ある電力を扱うためにいくつのアクティブエレメントが必要であるかを知ることはたいへん重要である。この研究では、先に導かれたアクティブ窓の電界強度とロスについての表式を利用し、電界強度とアクティブエレメントの数の関係を表すスケールリング則を導いた。このスケールリング則によれば、必要なアクティブエレメントの数は、アクティブ窓が耐えうる最大電圧の 2 乗に反比例し、窓の表皮の抵抗に反比例する。すなわち、アクティブエレメントの数を少なく抑えるためには、より高電界に耐えうるアクティブ窓が必要であることが示された。

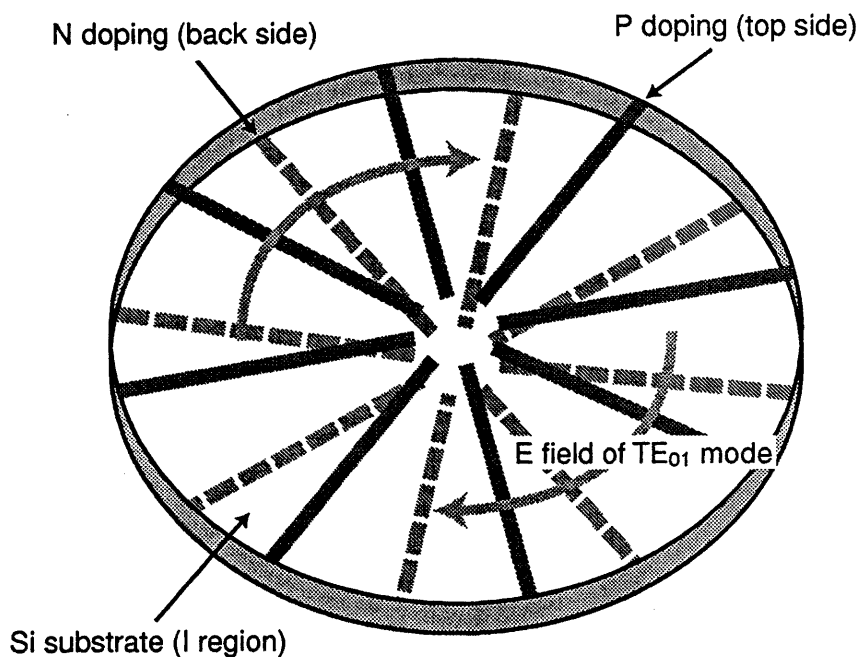


Figure 1: Conceptual view of PIN/NIP diode active window

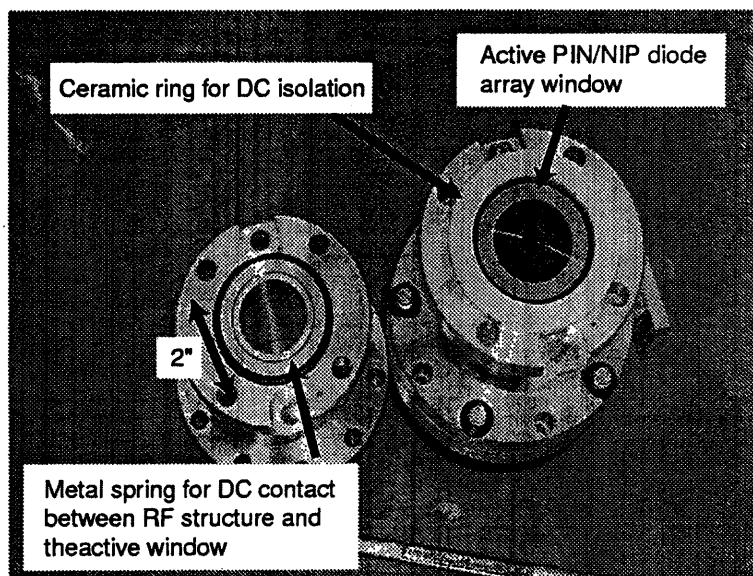


Figure 2: PIN/NIP diode active window

大電力のスイッチを構成するにあたって、最も重要な要素はアクティブ窓の開発である。この研究では、あらたに PIN/NIP diode array active window と呼ばれる新しいアクティブ窓の開発を行った。この窓は、multi-megawatt 級のマイクロ波を扱うことができることを目指して開発された。この窓は純粹シリコンでできた円形の窓であり、表面に径方向に走る線状の PIN/NIP ダイオード構造を配置した窓である。線の数は各面で 400 本ずつである。この窓は TE_{01} モードの円形導波管中に置かれる。PIN/NIP ダイオードの線はすべて円形導波管の TE_{01} モードの電場と直交するため、ダイオード構造は順方向バイアス電圧がかかっていないときには TE_{01} モードのマイクロ波に影響をあたえない。すなわち、バイアス電圧がかからないときには、このアクティブ窓は透過の状態にある。順方向バイアス電圧がかかったおきには、アクティブ窓の純粹なシリコン中に多数のキャリアが入射され、アクティブ窓は導電体となる。すなわち、このアクティブ窓は完全反射の状態になる。このアクティブ窓の設計および製作は筆者によっておこなわれた。アクティブ窓の直径は 1.3 インチであり、厚さは 220 ミクロンである。それぞれのダイオード構造は、幅 25 ミクロンから 2.5 ミクロンへいたるテーパ構造をもっている。製作は一般的な IC 製作の手順を応用しておこなわれた。また、このアクティブ窓を保持するためのマイクロ波構造も開発された。

このアクティブ窓の小電力試験および大電力試験がおこなわれた。小電力試験においては、バイアスによる反射係数の変化と、スイッチの状態変化の速さについて注目して実験を行った。バイアス電圧なしの時と 115 アンペアの順方向電流を流したときでは、反射と透過は、 -2.2429 dB から -0.6 dB へ、および -4.17 dB から -22 dB へそれぞれ変化した。115 アンペアの順方向電流を流したときのロス率は 11.5% であった。スイッチング時間は、順方向電圧をかけ終わったあとに逆方向電圧をかけなかったときにおよそ 50 マイクロ秒であったのに対し、130 ボルトの逆方向電圧をかけたときには 20 マイクロ秒であった。このように、このアクティブ窓は基本的な動作としては良好であった。しかしながら、ロスが大きいことや、スイッチングにかかる時間が期待したより遅いことなどの課題も残された。

大電力試験は、X-band の大電力クライストロンと SLED-II とよばれるパルス圧縮を用いて、SLAC において行われた。大電力試験の目的は、この PIN/NIP diode array active window にバイアスをかけずに大電力による高電界をかけたときの限界がどこにあるかを知るためと、このアクティブ窓が multi-megawatt 級の X-band のマイクロ波をスイッチできることを実験的に示すことにある。バイアスをかけない時には、このアクティブ窓は入力電力約 5 メガワットに耐えた。シリコン内部でのアバランシェブレイクダウンをおこす徴候はまったくなかった。しかし、ダイオードに電流を流すために窓の表面を走る金属の線が真空放電をおこした。この放電のため、5 メガワット以上の大電力での実験をおこなうことができなかった。順方向電流を流してのスイッチングの実験においては、入力電力 1.7 メガワットにおいて、透過電力を 10 dB 変化させることができた。この大電力試験の結果から、この PIN/NIP diode array active window はメガワット級の能力を持つことが実証された。しかしながら、表面での金属の線における放電の問題が残った。

本研究の最後として、実験の結果あきらかになった課題、すなわちロスが大きいこと、スイッチング速度が十分でないこと、そして高電界における表面の金属線が放電をおこすことについての改善策を検討した。ロスは、ダイオードを 3 次元的に配置することで減らすことができることが示された。また、回路の抵抗を減らすことで、速度を改善することができる。そして、放電については、表面に絶縁体の層を形成することで、性能の改善がはかれることがわかった。これらの改善点をくみあわせた、新しい PIN/NIP array active window の構造が提案された。