

氏 名 大 竹 雄 次

学位（専攻分野） 博士(工学)

学 位 記 番 号 総研大乙第43号

学位授与の日付 平成9年9月30日

学位授与の要件 学位規則第4条第2項該当

学 位 論 文 題 目 リニアークライダ-の為のXバンド大電力高周波窓の開発

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 福 田 茂 樹
教 授 高 田 耕 治
教 授 山 崎 良 成
助 教 授 齊 藤 芳 男
助 手 下 妻 隆
教 授 水 野 元 (高エネルギー加速器研究機構)
教 授 佐 藤 勇 (日本大学)
助 教 授 陳 榮 浩 (高エネルギー加速器研究機構)

リニアークライダでは、非常に高い電界（ 100MeV/m 以上）を使って高効率に加速しなければ、現実的な加速器の長さや建設・運営費を実現できない。その為に高周波源は高い周波数である必要があり、大電力で、電源から高周波への変換効率の高い、安定なものを必要とする。早期にリニアークライダ用高周波源の技術を確認する為には、既存技術を延長することが有効な手段であると考えた。その理由から、現在、大電力クライストロンを中心とした高周波源を開発しようとしている。リニアークライダ用Xバンド試験高周波源のR&Dは、以上の目的のために始まり、この計画に沿って本研究の大電力クライストロン用高周波窓の開発研究を行った。研究当初、一般的であったショートピルボックス高周波窓を、Xバンド用として開発・使用した。しかしその窓の許容高周波電力は、クライストロンの開発目標である高周波出力に及ばなかった（高周波電力 65MW 、パルス幅 800ns に対して $20\text{--}30\text{MW}$ 、 200ns 程度）。この状況の打開する為には、さらなる高い許容電力を示す高周波窓が必要となり、新しいアイデアの窓開発に着手した。

この時点では既に、高周波電界に起因した放電によるセラミック破壊の研究が、KEKの斉藤等によりSバンド大電高周波窓を使って進んでいた。破壊要因の主なるものは、セラミック内部における欠陥（空孔等）の絶縁破壊や誘電損失による加熱から引き起こされた溶融である。またその破壊が、印可される電界強度に依存していることも明らかにされていた。その値は、近年の高品質セラミックで 8kV/mm 程度である。このような研究成果から許容電力の高い高周波窓を実現するためには、耐電界強度の高いセラミック材料を開発すること、又はセラミック部で低電界に出来る窓が有効であると考えた。そして前者は、メーカーへの依存度が高くなることと時間の問題で研究対象から外し、後者の方向による窓の研究・開発を行った。

Xバンドで開発された高周波窓は大きく分けると3種類あり、それぞれロングピルボックス型、進行波型、TE₁₁モードホーン型である。この開発された窓のセラミック部の電界強度は、多少の差は存在するが、どれもショートピルボックス型の半分くらいの値を達成できた。

この開発の過程で未知な高周波窓構造を模索する為には、既存の窓の設計手法を再考しなければならないと思われた（設計作業時間の短縮や高周波伝送理論からの説明を強化する。）。この再考の理由は、近年発達した電磁界解析コードにより、開発開始時点に於いて高周波窓の本質的な伝送特性が解明されつつあったことに強く依存している（例えばKEKの山口等の研究、ピルボックス型窓の伝送モードがTE₁₁とTM₁₁モードで構成されていること。）。そしてそのことにより、設計手法を改善する余地が残っていることを予想でき、低電界型窓実現も含めたピルボックス型以外の伝送特性の存在が見え隠れしていたからである。既存の設計法では、a)低電力モデルを使って特性インピーダンスを測定し、それから等価回路を構築した。b)窓の寸法決定の為には、低電力モデルで寸法を少しずつ変えて高周波特性を取得し、最適な伝送特性になる寸法を追い込んでいくカットアンドトライの手法を取ることが多かった。この方法は窓の機械加工等に非常に時間を必要とした。さらに電磁界解析コードを併用して、シミュレーションにより最適寸法に近い値まで追い込み加工回数を減らしたとしても、まだ多くの計算時間が必要であった。この研究のよう

に多くの未知な高周波特性を扱う場合には、モデルの製作回数を減らして計算時間を短縮できる、設計の時間短縮が望まれた。

この研究で展開した等価回路による窓の工学的設計法は、米国のシェルクノフによって研究された導波管の特性インピーダンスの概念を利用し、いままでばらばらに存在していた導波管デバイス等の等価回路素子の知識を、高周波窓設計のために簡便で解析的な計算のみで構成出来るように、構築し直したものである。このような等価回路を使用しての高周波窓の設計は、電磁界解析に比較して伝送特性の計算時間を短縮できる。この時間の短さを利用し数多くのシミュレーションを行うことは、開発した各々の窓の大まかな伝送特性を理解して、セラミック部で低電界を実現するための高周波特性を見出すために非常に有効であった（この手法の寸法決定精度は良くない、最終的には電磁界シミュレーションと低電力モデルにより最適寸法を決定する。）。

セラミック部で低電界を実現する方法は、以下の2種類のものがある。a)セラミックの挿入された導波管径をテーパ導波管により大きくし、セラミック部に於ける通過高周波電力密度を下げる。b)ロシアのカザコフ氏により基本的な概念が示されたもので、セラミック部で進行波を実現出来る高周波構造または定在波強度を下げる構造。その構造は、セラミック表面での反射を窓の導波管途中のサセプタンス成分（セラミックを挟んで両側にある。）で整合させる機能をもち、スミスチャート上でセラミック部が中心にインピーダンス変換される進行波型（進行波解）である。進行波型窓の伝送特性の追求に付随して、ピルボックス型窓を含めた窓の基本的な高周波特性も明らかにした。それは以下の点である。a)セラミック表面から円筒導波管の角・丸変換部のようなサセプタンス成分までの電気長（サセプタンス成分の移相も含む）が $1/4$ か $1/2$ 管内波長である時に、伝送特性の良好な解が存在する。b) $1/2$ 管内波長の解は、スミスチャート上に於いてセラミック部が中心付近に変換されるので、その部分の定在波強度（電界強度）をさげることが可能である。特にこの研究では $1/2$ 管内波長の解を準進行波解と名付けた。

開発されたXバンド大電力高周波窓の試験は、クライストロンの出力導波管に窓を挿入したり、周回状に閉じた短形導波管に進行波の大電力高周波を蓄積可能なレゾナントリングと呼ばれる装置を利用して行われた。結果としては、3つの高周波構造を持ったTE₁₁モードホーン型窓中の一つが、レゾナントリングの試験によりパルス幅が700nsで84MWの最大周回電力を記録した。これはXバンド試験高周波源のクライストロン窓に必要な65MW、800nsを上回る許容電力である。この大電力試験の過程で明らかになったことは、a)低電界型高周波窓の許容電力向上に対する有効性や、b)セラミック表面のマルチパクタによる発光の様子および発光スペクトルに代表される大電力特性、c)その大電力特性がSバンド高周波窓と大きく変わらないこと等である。d)さらにXバンド窓のコンディショニング時間がSバンドと比較して短いことや、e)セラミックの破壊電界強度である8kV/mmの値は、周波数が2.856GHzから11.424GHz変わっても、高周波構造が変化してもほぼ同じ値であること等である。

以上のような開発過程を経て現段階では開発した各種Xバンド高周波窓の中からレゾナントリングで最高周回高周波電力を記録したTE₁₁モードホーン型窓を、Xバンド試験加速器のための大電力クライストロン用として採用する予定である。

論文の審査結果の要旨

大竹雄次氏の学位申請論文は、将来の電子／陽電子リニアコライダー、加速用マイクロ波源のキーコンポーネントである大電力マイクロ波窓に関する研究である。リニアコライダーは必要な高エネルギーを得るために大電力クライストロンの開発に大きな力が注がれている。ピーク電力50～100MWクラスのクライストロンを2000本以上使用するという計画においては、このマイクロ波源に要求される信頼性は非常に厳しいものがある。マイクロ波窓はクライストロン内部を真空に保ちながら、内部で発生した大電力マイクロ波を、ここを通過させて外部に取り出すものであり、大電力マイクロ波の高電界、発熱問題等に絡んで昔から技術的に難しい部分とされてきた。特に高エネルギー加速器研究機構やスタンフォード線形加速器センター（SLAC）で開発しているX帯のクライストロンではその波長が短く、従って窓自身も小さいため単位面積当たりのエネルギーが大きく従来品よりも難しさは格段大きくなる。

本論文では論文申請者により、実用化され使用に供されている。TE₁₁モードホーン型窓を中心にして、関連したいくつかの窓についても設計手法、解析手段及び試験とその結果を述べている。本論文の第1章－序論ではリニアコライダーの概説からマイクロ波源、そしてその中のマイクロ波窓の位置付けについて述べている。第2章で論文申請者は、高周波窓の設計手法について述べているが、設計手法における方法論として、計算機シミュレーションにのみ依存せず、従来マイクロ波窓では一部研究者が試算的に用いてきた等価回路法を、設計の最初の段階として積極的に位置付け、設計手法の手順を明確にしている。ここに論文申請者の問題意識が提示されている。第3章ではTE₁₁モードホーン型窓以外の著者が携わった各種の窓の特徴－すなわちショートピルボックス型窓、ロングピルボックス型窓、進行波型窓－について、第4章では本論文の中心であるTE₁₁モードホーン型窓について、等価回路法的設計、不安定を起こすもととなるゴーストモード等の考察、計算機シミュレーションによる電磁界と伝送特性の解析等について延べ、各種の窓に関する比較を行っている。ここで、この窓は検討した6種類の窓の中でセラミック部での電界強度は低く、帯域幅は最も広いことが示された。第5章において共振リングを用いた、大電力試験の概略を述べ、その後TE₁₁モードホーン型窓を含む各種窓の大電力試験結果を述べている。この窓では当面目標とする使用を満足する値（パルス幅300nsでピーク電力133MW、パルス幅700nsではピーク電力84MWまでの透過に成功）を得た。本論文では実用的な優れたマイクロ波窓を開発したということのみならず、設計手法について一つの方法論を明示したところに異議がある。特にTE₁₁モードホーン型窓のように本来であれば分布定数回路的な構造を持つものにも、他のマイクロ波窓と同様な、単純な等価回路が適応でき、そこから非常に有効な結果が示された。これは、計算機のみにも頼る方法に比べると物理的に優れ、時間的にも早く全体像が理解できる優れた方法である。もちろん論文申請者は、計算機による定量的な計算とも比較しており、この両者を結びつけた設計法の確立と、優れたマイクロ波窓の開発に成功した点で博士（工学）論文に値すると判定した。