

氏 名 筒 井 裕 士

学位（専攻分野） 博士(理学)

学 位 記 番 号 総研大甲第365号

学位授与の日付 平成11年3月24日

学位授与の要件 数物科学研究科 加速器科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 Two Dimensional Modeling of Klystron Traveling

Wave Type Output Structure and its Empirical

Justification

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 絵面 栄二
教 授 山崎 良成
教 授 高田 耕治
教 授 福田 茂樹
助 教 授 陳 栄浩
教 授 水野 元（高エネルギー加速器研究機構）
教 授 小野寺 俊男（熊本工業大学）

論文内容の要旨

ほとんどの線形加速器や円形加速器では、陽子や電子などの粒子を加速するために大電力の高周波(RF)を用いる。その RF 電力源として主にクライストロンが使われている。クライストロンは電子銃、高周波入力部、集群部、出力部、コレクタ、集束磁石からなっている。電子銃で作られた電子ビームは高周波入力部で速度変調を受ける。集群部は速度変調した電子ビームを集群化する部分で、そこにはいくつかの RF 空洞と呼ばれる金属製の空洞があり、それらは集群化を助ける作用がある。集群化した電子ビームは出力部を通る。出力部も RF 空洞であり、そこにはカップラーというアンテナもしくは穴があり、それを通じて大電力の RF が外部に取り出される。出力部を通りすぎた電子ビームはその後コレクタによって捕獲される。また、電子同士の反発力(空間電荷力)で電子ビームが途中で広がってしまうのを避けるために電磁石もしくは永久磁石で軸方向の集束磁場を作る。

現在、TeV 領域の高エネルギー物理学実験のために、電子と陽電子を線形加速器で加速して衝突させる装置(JLC/NLC)の研究が日本の高エネルギー加速器研究機構(KEK)や、米国の Stanford Linear Accelerator Center(SLAC)で進んでいる。今までの電子線形加速器では S-Bnad(2.856GHz)が使われており、これに使われるクライストロンは主に SLAC で開発された。周波数を高くすると単位長さあたりの電子や陽電子の加速電圧を高くすることが出来ることが知られているので、JLC/NLC では敷地面積やコストを下げるために S-Band より 4 倍の周波数の X-Band(11.424GHz)の線形加速器の研究がなされており、それに使われる X-Band クライストロンの開発が進んでいる。

X-Band では S-Band と同程度の電流の電子ビームを数分の 1 のサイズでコレクタまで通さなくてはならないので、より強くなった空間電荷力で電子ビームが広がるのをどう押さえ込むかが大きな問題となる。さらに、X-Band では電界強度も高めになり放電の可能性も高い。S-Band での設計は主に 1 次元のシミュレーションコードを用いられており、微妙な部分は経験で補ってきたが、X-Band では電子ビームの振る舞い、電界強度や出力を精度よく見積もる 2 次元ないし 3 次元のシミュレーションが求められる。3 次元のシミュレーションは 2 次元に比べて計算時間がはるかにかかるので、現在は 2 次元のシミュレーションが現実的である。2 次元のシミュレーションコードはいくつかあるが、それらは軸対称性を破っているカップラーをモデル化するために‘ポート近似’という手法を用いている。X-Band のクライストロンの出力空洞は電界強度を下げるために多セル構造になっておりポート近似では取り扱うことができないので新しい手法が必要になる。われわれはその手法を開発した。この論文は多セル構造を 2 次元モデル化するその手法を述べたものである。

まず、近似的にカップラーが空洞のモードと出力する矩形導波管の TE₁₀ モードとのモード変換器と考えて、その変換係数として S 行列を定義した。空洞のモードは動径方向に広がっていくモードでありポートの断面が一定でないため、HFSS などの通常のシミュレーションコードでは直接 S 行列を計算することができない。そのため、周波数領域で解く方法を考え出した。

その方法は、進行波は 2 つの定在波の重ねあわせで書け、逆に定在波は 2 つの進行波の重ねあわせで書けることを用いている。元々進行波に関する変換係数である S 行列に関

する式を定在波に関する式に書き直した。矩形導波管内の定在波は、ある面でショートすることによって得られる。定在波の位相はショート面の位置を変えることにより変化できる。空洞のセル内の定在波はセル間の穴を閉じてセルの中心部に無損失の誘電体を入れることによって得た。位相は誘電率を変化させることにより変化できる。周波数領域のシミュレーションコードを用いて定在波を立たせ、その共振周波数を用いて S 行列を求めた。

次に、S 行列に対応する 2 次元構造を抵抗体を配置することにより作った。シミュレーションでの出力は抵抗体の手前でポインティングベクトルを使って計算した。

現存する KEK8、9 号機のシミュレーションでは、電子銃から出力部まですべて MAGIC2D という 2 次元のシミュレーションコードを用いて計算し、飽和出力に関して最大で 10% の精度で測定と合うことが確かめられた。ロシアの 1 次元シミュレーションコードでは数 10% ずれていたため、シミュレーションの精度がかなり上がったことになる。SLAC の XL-4 のシミュレーションも行ったが、この場合も 5% の精度で実験と合った。

次に、このシミュレーション方法を用いて 10 号機の設計を行った。集群部と出力部を 9 号機から変更することにした。集群部に関しては、RF 空洞をひとつ増やして集群化がさらに進むようにした。さらに RF 空洞の共振周波数を振ることによってクライストロンのバンド幅を 100MHz 程度に広げた。出力部に関しては 8 号機、9 号機や SLAC の XL-4 では $\pi/2$ というモードを使っていたが、10 号機では $2\pi/3$ というモードを使うことにした。こうすると出力空洞の体積を大きくすることができて最大電界強度が小さくなる。MAGIC2D のシミュレーション結果では 10 号機は出力 120MW、最大電界強度が 85MV/m であり、SLAC の XL-4 の 75MW、100MV/m より出力が高く最大電界強度が低い。この通り動作すれば世界で最大出力の X-Band クライストロンができることになる。

論文の審査結果の要旨

筒井裕士君の博士論文の内容は、大電力 Xバンド・クライストロンの多セル構造出力空洞の二次元モデル化手法の開発、およびそれに基づいた世界最高出力の Xバンド・クライストロンの設計に関するものである。

将来の高エネルギー物理学実験のために、TeV 領域の電子/陽電子リニアークライダの研究が国際協力の下に進められている。中でも Xバンド (11.424GHz)・リニアークライダは最も有望な方式の一つであり、これを実現するためには高周波源である大電力 Xバンド・クライストロンの開発が不可欠である。Xバンド・クライストロンの開発研究の中で、残された最大の問題点は出力空洞に関するものである。出力空洞から取り出される最大電力は空洞部における放電によって制限されるため、電界強度を下げるべく多セル構造の出力空洞が採用されるようになった。さて、Xバンドの領域では粒子密度の増加に伴い空間電荷力が格段に増えるので、各セルを通過する間にも粒子密度は大きく変化する。従って、厳密にビームと空洞の相互作用を計算する電磁界コードが是非必要になる。

従来の線形加速器に使用されていた Sバンド(2.856GHz)等の低い周波数帯のクライストロン設計では、一次元や二次元のシミュレーションコードが使われてきたが、それらはビームと空洞の相互作用を計算する上で一部に等価回路近似を入れたものであって、上記の要求を完全には満たさない。そこで空洞全域を直接解くシミュレーションコードを導入して設計を始めた。その際、軸対称性が破れている出力ポートを厳密に扱うためには、三次元シミュレーションを行う必要があるが、二次元のシミュレーションに比べ膨大な計算時間がかかるために現実的ではない。そこで筒井君は、三次元出力ポートをビームから見た時に電磁気学的に等価な二次元構造体で置き換える新たな手法を創案した。この手法の有効性は世界でも高く評価され、SLAC では標準的に採用されるに至っている。

マイクロ波素子を扱う場合に有用な散乱行列 (S 行列) は進行波に関する変換係数であるが、筒井君はこれを定在波についての式に書き直し、周波数領域で解くという新しい方法を考案した。出力導波管および出力セルの境界条件を変えて定在波の位相を変えることにより、3組のパラメータを求め、これを用いて出力結合部の S 行列を求めたものである。このように、ある場所に定在波を立てて周波数領域での計算からその場所の S 行列を求めるという着想は斬新であり、軸対称性のない素子の二次元モデル化に新しい道を拓いたものと高く評価できる。これにより従来のシミュレーションコードでは不可能であった多セル空洞出力部の S 行列を計算する手法が確立された。飽和出力電力の見積りは、出力結合部に抵抗体を配置してその抵抗率を変化させ、先に求めた S 行列に対応させるという巧妙な方法で行われた。この方法により既存のクライストロンの飽和出力のシミュレーションを行った結果、実験値との差 5 ~ 10 % を得た。これまでの一次元シミュレーションでは数 10 % の差があったことを考えると、格段の改良であり、開発した手法の妥当性を証明するものである。

この二次元モデル化手法の開発により、電子銃から出力部まで一貫して二次元コードでのシミュレーションが可能となり、これを駆使して飽和出力 120 MW の Xバンド・クライストロンの設計を行った。まず集群空洞の追加、空洞周波数および空洞間距離の最適化等を行い、電子流中の基本波成分の大きさを従来の 1.35 倍まで高めた。その結果 120 MW

以上の高周波出力が得られることをシミュレーションにより確認した。また空洞の体積を増せば電界強度が下げられることに着目して、出力空洞の動作モードとして $2\pi/3$ モードを選択すると共に、多セル空洞の設計に数々の工夫を凝らし、120MW 動作時の空洞内の最大電界を 85MV/m 以下に押さえることに成功した。これは従来の設計で得られた最大電界（75MW 時に 98MV/m）より遥に小さな値であり、これにより目標の 120 MW出力が得られることが十分期待できるようになった。

以上のように本研究では、従来困難とされていた軸対称性を有しない多セル構造の二次元モデル化手法の開発が骨子となっており、その手法を編み出した独創性は高く評価されるとともに、その成果はこの研究分野に新しい貢献をしたものと評価できる。また開発したシミュレーション法を用いてクライストロンの詳細な設計を行い、これまでに得られた電力を 40 %以上も上回る目標飽和電力が達成できる設計を成し得たことは大きな成果であり、申請者の優れた研究遂行能力を示す証左でもある。本論文は明解な英文で書かれている。

これらの結果をもとに、提出された論文は数物科学研究科加速器科学専攻の博士学位論文に値すると判断した。