

22a-1

DEVELOPMENT OF TE₁₁ MODE X-BAND RF WINDOW

Y. OTAKE, J. ODAGIRI, S. TOKUMOTO AND H. MIZUNO

KEK, National Laboratory for High Energy Physics
Oho 1-1, Tukuba-shi, Ibaraki-ken, 305, Japan

ABSTRACT

Development of a TE₁₁ mode X-band RF window capable above RF pulses of 100 MW, 1μs, is underway to realize a X-band high-power klystron for JLC. This paper describes design and a high-power test for the window which comprises TE₁₀(WRJ-10)-TE₁₁ mode(WC-5) converters, circular waveguide tapers and a alumina ceramic with a circular wave guide frame. Evaluation circuit method and numerical calculations were used for the design. The result of the test using a resonant ring has been successfully carried out with the circulating power of "100 MW, 300ns".

TE₁₁モードXバンド高周波窓の開発

1、はじめに

SLAC, KEK, BNIP (RUSSIA) 等の研究所では将来のリニアコライダーの為に、100MW級Xバンドクライストロンの開発をおこなっている。この様な大電力のクライストロンを開発する時に、真空管として使用するためのアルミナセラミック高周波窓が技術的に困難な点の一つであり、目標とする高周波電力を通過出来る窓を開発することが、そのクライストロンを成功させるキーポイントになっている。

クライストロン用高周波窓の場合ピルボックス窓が一般的であり、本所におけるXバンド高周波源の開発過程で製作されたクライストロン(XB-72K等)もそれを使用している。現在までに30MW級2本、100MW級2本のクライストロンの大電力試験を終了しているが、その試験段階で発生電力を制限しているのがセラミック高周波窓で、"30MW、50-100ns"程度までは許容する物が実現されている。1)

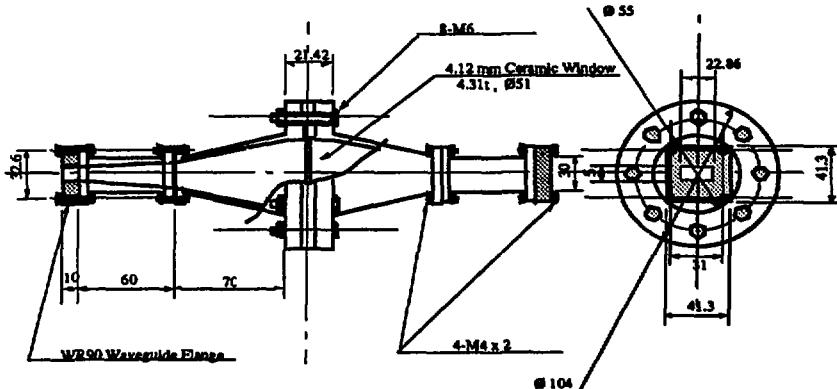
高周波窓の場合、そのセラミック内の高周波電界による放電現象により、破壊に到ることが定

説になっている。KEKの齊藤氏らのSバンド高周波窓に関する研究2)によると、セラミック表面(日特、UHA99の場合)の電界強度が約8kV/mm程度に達すると破壊が多いと言う結果が出ている。

この様な状況からより耐電力の高い窓を開発するためには、セラミック内の高周波電界強度を下げる構造の窓を作ることが一つの解であると考え、図1の円形テーパーでセラミック口径を大きくし、通過高周波電力密度を下げる本論文の窓を開発した。

2、設計及び低電力測定

設計の基本方針として、製造の容易さを重視する事から円形セラミックを選択した。またセラミック部の口径を大きくすることで、円形導波管部のモード選択が問題になるが、我々はTE₁₁、TE₀₁等のモードを候補とした。その中からモード変換の容易さやそれに伴う変換器構造の単純さからTE₁₁モードを選択し、図1に示す様なTE₁₀角形(WRJ-10)-TE₁₁円形(18φ)モードコンバーター、円形テーパー及びセラミック付き導波管(51φ、WC-5)

図1 TE₁₁ Mode X-Band RF Window

で構成される真空用高周波窓を設計した。

この窓の場合、通常のビルボックス窓と異なりそのセラミック（日本特殊陶業製UHA-99、4nmのTiNコーティング）で満たされた部分の遮断周波数（1.125GHz）が、使用周波数（11.424GHz）よりもかなり低くなっている。その為にセラミック壁面やテーパで発生した高次モードが、図1に示した構造の中央円形部を伝搬したりセラミック内にトラップする現象で、伝送特性が阻害される等の通常のビルボックス窓にはない可能性が考えられた。また設計段階では、このような構造の周波数応答等の伝送特性があまり明確でなかったため、次の4点の設計手法を取った。1、等価回路法3)により、窓の寸法の変化に対するSパラメータの大まかな振る舞いを探ること。2、フィールドマッチング法4,5)によるセラミック部トラップモードやテーパのサセプタンス成分の解析を行うこと。3、MAFIAやHFSS（ヒューレットパッカード製）等の数値計算による電磁場の解析と、1、2の結果の追確認及び窓の大まかな寸法を決定する事。4、低電力モデルにより解析の結果を確認及び修正し、大電力モデルの最終寸法を決定することである。

等価回路及び電磁界解析

窓の等価回路として図2の物を構築及び解析した。この等価回路で使用した導波管特性アドミタンスの定義は、

シエルクノフの電力/電圧定義6)で

$$Y = P / V^2 \quad \text{である。}$$

ここでVは導波管断面での電界最大の線を、導波管両端間の積分で定義した電圧、Pは導波管の高周波通過電力である。

窓の周波数応答は、この定義の特性アドミタンスと等価回路から伝送方程式

$$\frac{Y_L}{Y_0} = \frac{Y(L) + jY_0 \tan \beta L}{Y_0 + jY(L) \tan \beta L}$$

(Y_{in} :入力アドミタンス、 Y_{eWR-90} の特性アドミタンス)

を解いて求めた。等価回路上のサセプタンス成分はHFSS及びテーパの低電力測定から求め、また平行してHFSSやMAFIAによる電磁界解析も行った。この解析から明らかになったのは、1-最適解を与えるセラミックの厚さは、テーパのサセプタンスの補正分だけ1/2波長より薄い。2-セラミック面からテーパまでのシリンダー部の長さが、図3のスミスチャートに示した1/4波長解と、1/2波長解で良い通過特性が得られる。3-セラミック部のインピーダンスが中心近傍に変換される1/2波長解が、1/4波長解より通過周波数帯域が広くセラミック内の電界が低い。（HFSSの計算からセラミック内の電界は、角型導波管部での電界に対して1/4波長解で約4割、1/2波長解で約2割程度に軽減されることが分かった。）4-その各々の解が1/2波長おきの周期解であること等が明確になった。図4に1/4波長解でのS11の周波数応答の例を示す。

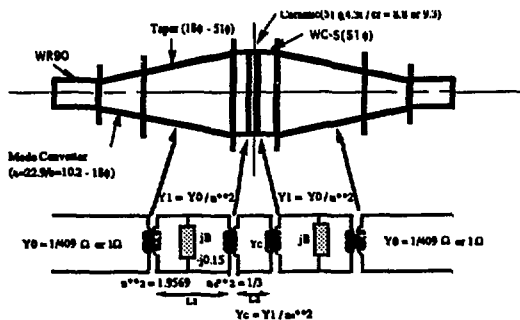


図2 窓の等価回路

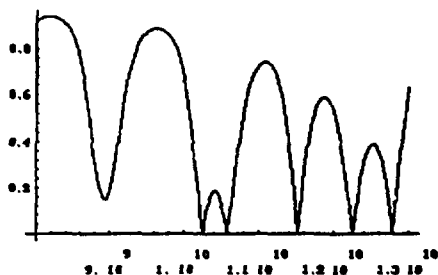


図4 窓の周波数応答 (1/4波長解、等価回路計算)

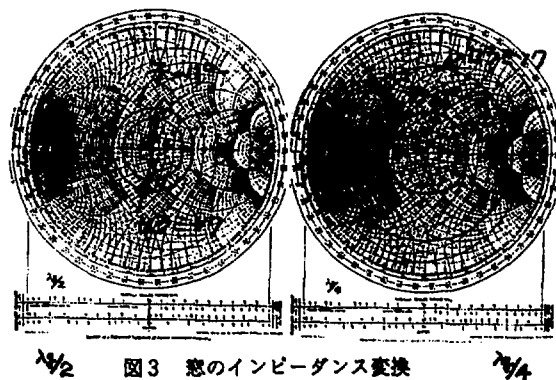


図3 窓のインピーダンス変換

トラップモード

トラップモードは一般的にセラミックとテーパ間の両方にあると予想されるので、その周波数、モード等を得る計算を行った。セラミックの場合、初期にMAFIAを使用して計算を行ったが、低電力測定からトラップされる電磁場の強度が低いことが明確になった。そのため計算の精度を上げるべく円形導波管とセラミックの境界面での電磁界の連続性を保ち、セラミック内のみ伝搬するモードを探るフィールドマッチング法を使用した。結果として両方の計算方法で一致したモードが、

セラミック両端に解放円形導波管及び電界結合のアンテナを付けて行った低電力測定の結果と合った。またテーパーのトラップモードに関してはMAFIAを使用し、次項の低電力測定の結果とほぼ一致した。計算の詳細は紙面の都合上のべず、結果のみを表1に示す。

低電力試験

大電力モデルを製作する前段階として、設計によって求めた寸法から真鍮により低電力モデルを製作した。しかしこの窓が導波管の管内波長から比較するとオーバーサイズなので、HFSS等の数値計算の周波数精度が2%程度と不足し、この為セラミック面からテーパーまでのシリンダー長の異なる物を数種類製作し、低電力での周波数特性を測定した。この測定からシリンダー長を変更したときの窓の通過帯域の変化は、テーパー間の

表1 11.424GHz近傍のセラミック、
テーパーのトラップモード (計算)

*テーパー間、 (モード決定不可能)	11.3GHz 付近 11.7 GHz 付近
*セラミック、	TE221 like mode, 10.1GHz 付近 TM131 like mode, 11.5GHz 付近

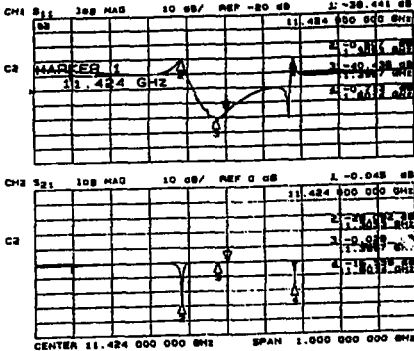


図5 大電力モデルの周波数特性 (測定)



Resonant ring circular power
200 ns/Div. 102 MW
(レゾナントリング実験、矢印：周回電力)

図6 窓の通過電力

シリンダー全長を1mm変化させる毎に約50MHz程度で、等価回路、MAFIA等の計算結果とよく一致した。

以上の設計から2つの解の大電力での比較をするために、第1段階として図1のシリンダー長が1/4波長の大電力モデルを、無酸素銅(日立電線クラス1)により製作した。図5に大電力モデルの周波数特性を示す。

3、大電力試験

大電力試験は窓をXバンドのレゾナントリングに装着して行った。約7倍の電力増幅率のレゾナントリングに"15MW、300ns"程度のクライストロン出力を入力し、ピーク電力"100MW、300ns"の高周波パルス窓に通すことに成功した。その後パルス幅をのばし、"70MW、700ns"で窓は放電による破壊に到った。図6に100MW時のレゾナントリング周回電力のモニター波形を示す。

4、まとめ

この窓の耐電力に関しては基本的に満足いき、100MWクライストロンの実現に対して一歩近づいたと言える。しかしながら100MW通過時でのセラミック表面の電界強度は約8kV/mm程度であり、Sバンドの窓での実験事実と良く合致していることから、現在のセラミック材及び構造では限界と思われる。この事から次の段階としては、セラミック材料をより緻密な日特のHA-997で、またセラミック内の電界強度の低下を図るべく1/2波長解の採用を予定している。

謝辞、この窓を開発するにあたって助力及び助言をしていただいたKEK、加速器系の肥後、坂井両氏、また放射光実験施設の斎藤、道面両氏に深く感謝します。

参考文献

- 1) J. Odagiri et al., "Development of X-Band High Power Klystrons", Proc. of 18th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, 21-23 July 1993.
- 2) Y. Saito et al., "Surface Flashover on Alumina rf Window for High-power Use", IEEE Transaction on Electrical Insulation, Vol. 28 No. 4, August 1993.
- 3) W. R. Fowkes, SLAC, (private communication).
- 4) M. P. Forrer and E. T. Jaynes, "Resonant Mode in Waveguide Windows", IRE Trans. of Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-8, Number 2, March 1960.
- 5) C. C. H. Tang, "Optimization of Waveguide Tapers Capable of Multimode Propagation", IRE Trans. of Microwave Theory and Techniques, P 442-452, September 1961.
- 6) S. A. Schelkunoff, "Impedance Concept in Wave Guides", Quarterly of Applied Mathematics, Vol. II, April 1944.
- 7) S. Yu. Kazakov, "Increased Power RF-Window", BNIP Preprint 92-2, Protvino 1992.