

A High Power RF Window

Kazutaka Hayashi, Hiroshi Iyeki
Mitsubishi Electric Corporation, CEW

1-1, Tsukaguchi Honmachi 8-chome, Amagasaki, Hyogo, 661 JAPAN

The breakdown of RF window is tough problem to develop high power microwave tubes. It is important to suppress RF discharge in or on ceramics. A pill-box type window is commonly used in high power tubes. The VSWR and electric field distribution of pill-box type window are numerically calculated using a method treated as a typical boundary value problem for microwave circuits. The ghost modes are identified to TE₁₃ and TE₂₁ resonant modes in ceramics.

大電力高周波気密窓

1. まえがき

高エネルギー物理学では、より高いエネルギーの加速器を必要としており、その高周波源であるクライストロンの大電力化が要請されている。その大電力化に対して高周波出力窓の耐電力が大きな障害である。図1に示されるようなピルボックス型高周波窓は、高周波反射を少なくできる、セラミックスが円形のため機械的に信頼性が高い、セラミック面積が広く電界強度が緩和される等の特長を持つため、大電力高周波窓として広く採用されている。窓の破壊には、熱による応力破壊のほか、マルチパクタを含む高周波放電による破壊があり、特に高いピーク電力の場合、高周波放電の抑制が重要であることが、斉藤等によって指摘されている¹⁾。しかし高周波窓の設計は、もっぱら経験やカットアンドトライで行なわれており、高周波放電による破壊の根本的な解決には至っていない。その基礎である窓内部の電界についての検討²⁾、³⁾が始まったばかりである。今回、新井等の解析的手段²⁾を用いてピルボックス型の高周波窓について計算し、窓内部の電磁界の解析、ゴーストモードと呼ばれる高周波窓の共振状態等、高周波窓の性質を調べたので報告する。

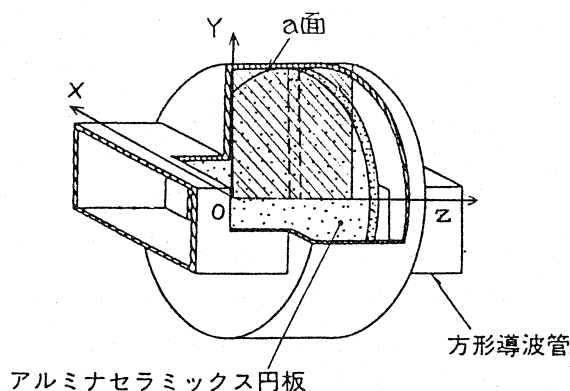


図1. ピルボックス型窓の構造

2. 解析方法

ピルボックス型高周波窓は、方形・円形の各導波管の組み合わせにより構成されている。その各導波管内の電磁界はラプラスの方程式を解くことによって解析的に厳密に求められる。よって問題は、各媒質の境界値、特に、方形・円形の導波管の接続部での高次モード結合の計算の実現にある。本解析においては、正規化直交モードで展開表現されたダイアディックグリーン関数を用い、方程式をモーメント法により数値的に解いている²⁾。一般の3次元問題を扱う有限要素法による計算方法に対し、この解析方法の利点は、計算時間が短いこと、プログラムが小さいこと等の他に、電磁界を直接解いているために、何よりも解が正確であることが上げられる。

ここで取り扱う窓は以下の寸法構成である。方形導波管はWRJ-3 (72.1mm x 34.0mm)、セラミックス直径84.7mm、厚さ3.2mm、ピルボックス長28mmである。セラミックスは誘電損失の少ない高純度アルミナ (例えば、日本特殊陶業社製UHA99比誘電率9.9) である。

3. 結果

3.1 VSWR

周波数を変化させたときのVSWRの測定値と、計算値を図2に示す。現実の窓では、方形・円形導波管変換部にR取りしてあるために、ピルボックス長は実効的に長くなる。その分計算値と測定値の差が生ずる。動作周波数(f_0 :2856MHz)付近でのVSWRは低く、マイクロ波は反射することなく伝送される。周波数 f_1, f_2 ではVSWRの急激な変化が見られる。さらに、ピルボックス長と周波数を変化させたときのVSWR計算値を図3に示す。図

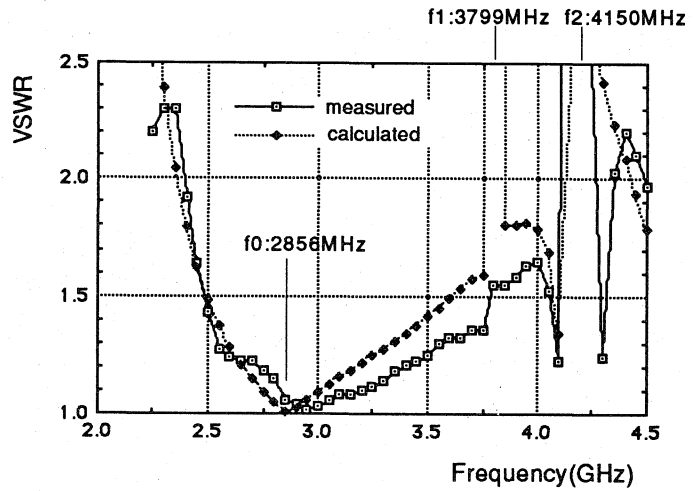
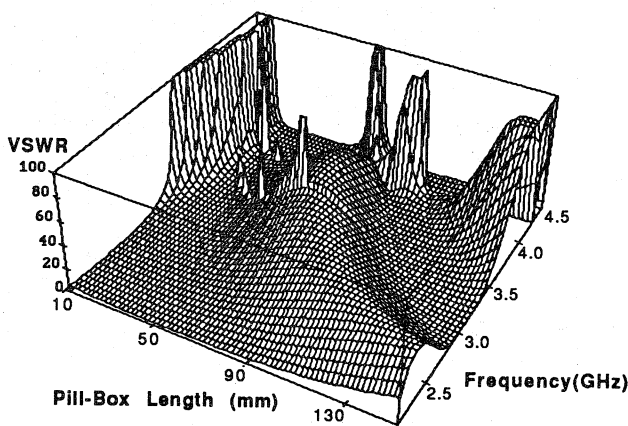
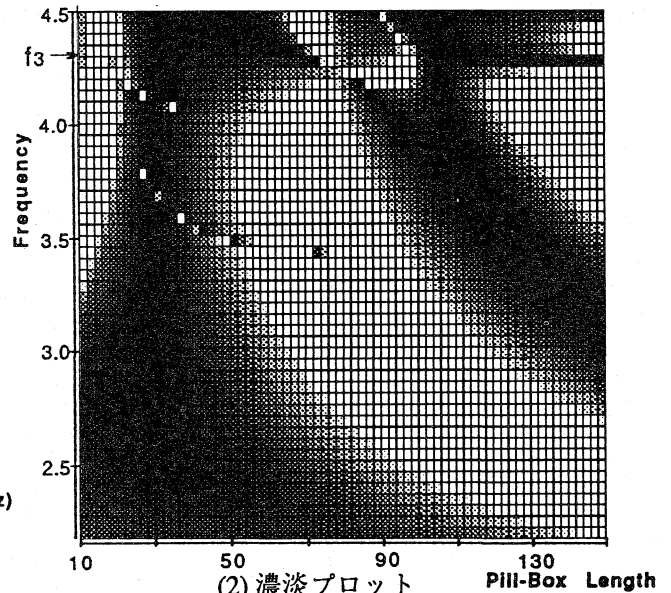


図2. VSWRの実測値と計算値

3(1)は、横軸がピルボックス長、縦軸が周波数、高さ軸がVSWRを示す。同じ結果を図3(2)ではVSWRを濃淡プロットしている(白がVSWR>20、黒がVSWR<2を示す)。図中 f_3 は、円形導波管の二つ目の伝送モードである TM_{11} モードの遮断周波数を示す。 f_3 以下の周波数では、円形導波管内では TE_{11} モードのみが伝送モードであり、 f_1, f_2 相当の周波数以外、VSWRがピルボックス長と共に緩やかに変化する。 f_3 以上の周波数では、円形導波管内では TE_{11} モードと TM_{11} モードが(周波数が高くなればさらに高次のモードも)伝送するため、VSWRの様相がかなり異なる。



(1) 3次元プロット



(2) 濃淡プロット

図3. ピルボックス長と周波数に対するVSWR

3.2 電界分布

図4には、円形導波管内の TE_{11} モードの対称面(図1のa面)における各時刻の電界強度の分布を示した。 T_0 はマイクロ波の周期である。 $T=T_0/4$ の時刻では TE_{11} モードが確認できるが、 $T=0$ の時刻では、

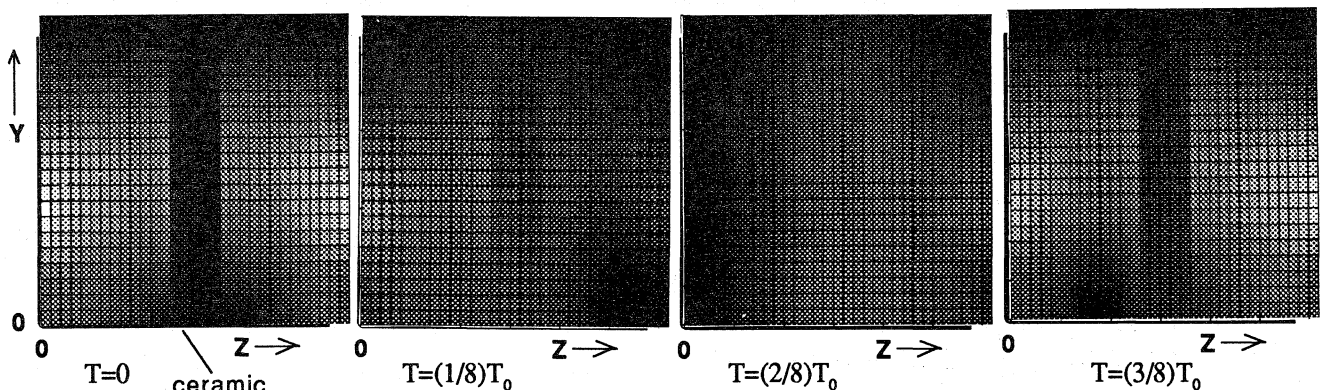


図4. ピルボックス内の各時刻の電界強度分布

TM₁₁モードの電界が、遮断モードであるにもかかわらず円形導波管長が短いために伝送に寄与している。このためマルチパクタを誘起するセラミックスに垂直な電界を発生しているが、窓の広帯域化を実現していると考えられる。

3.2 ゴーストモード

図2のVSWRの急激な変化が見られる周波数f₁,f₂でのピルボックス内の電界分布を求めた。図5(1)には、f₁:3799MHzの場合のセラミックス表面の電界強度分布を示す。セラミックス部で大きな電界も図5(2)に示す様にセラミックスから離れると減衰する。セラミックス中では伝送モードで円形導波管の真空領域では遮断モードであるこのモードは、その減衰定数と電界分布パターンからTE₃₁モードと確認できた。同様にf₂:4150MHzの場合には、TE₁₂モードが確認できた。ゴーストモードは、図3でVSWRの鋭いピーク列として、2つしか観測されていないが、セラミックス部で共振条件を満足している場合に於いて、ゴーストモードがいくつも窓内部に存在し得る。ゴーストモード共振時にはセラミックス部に強い電界が生ずるため、高周波放電を避けることができない⁴⁾。セラミックスの径を大きくしたい場合や、セラミックスの厚みを厚くしたい場合には、ゴーストモードの周波数域が動作周波数と重なるので、ゴーストモード共振条件を調べ、ゴーストモードを必ず避けるよう窓の寸法を選ぶ必要がある。

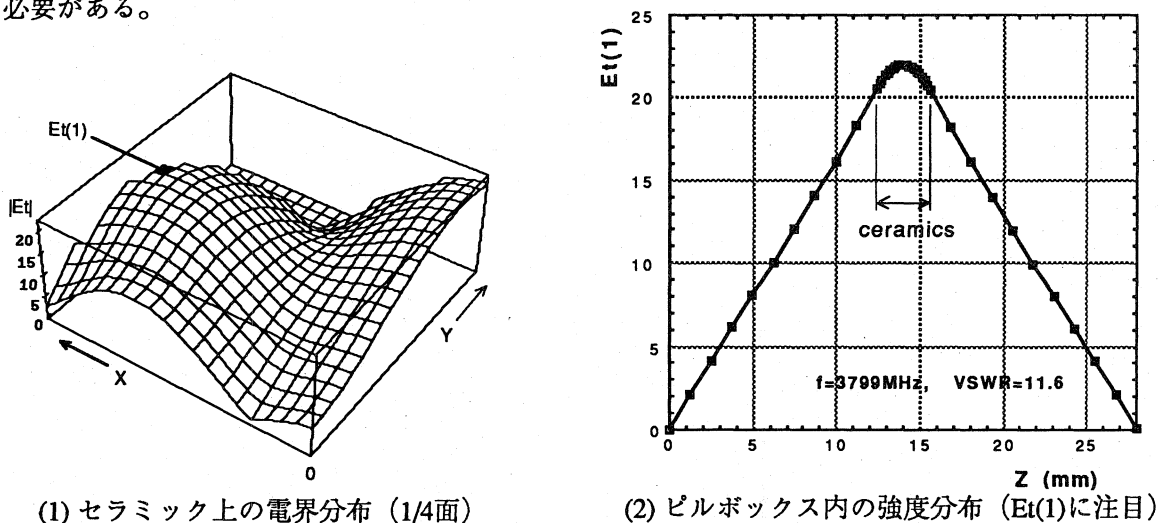


図5. ゴーストモード時の電界分布

4. まとめと今後の課題

ピルボックス型高周波窓を、方形・円形の導波管を組み合わせたマイクロ波回路の問題として解析的に求める方法は、VSWRが実験値と良く一致するため有用であり、窓設計の大部分を計算で行なうことができることが確認できた。また、ピルボックス内の電界分布を求めることにより、ゴーストモードの同定ができた。例えばXバンド帯の小型で大出力の窓では、ゴーストモードの解析が特に重要となる。

今後、ピルボックス窓の高周波損失量の評価やマルチパクタ等の高周波放電のメカニズムの究明を行ない、高周波出力窓の耐電力の向上を目指して行きたい。

参考文献：

- (1) Y. Saito, N. Matsuda, S. Anami, A. Kinbara, G. Horikoshi and J. Tanaka, IEEE Trans. on Electri. Insul., vol. 24, No. 6, Dec. (1989) 1029
- (2) H. Arai, N. Goto, Y. Ikeda, T. Imai: "An Analysis of a Vacuum Window for Lower Hybrid Heating", IEEE Trans. on Plasma Science, vol PS-14, No. 6, Dec. (1986) 947-954
- (3) 齊藤芳男、山口誠哉、穴見昌三、道園真一郎、金原繁、松田七美男: "アルミナ高周波窓の破壊" 電気学会放電研究会資料 ED-90-107, (1990)
- (4) K. Hayashi, T. Tanaka, K. Hemmi, H. Iyeki, T. Onodera: "A High Power X-band Klystron", IEEE IEDM Tech. Digest, (1989) 371-373