

# 同轴电缆温度稳相材料的新进展

## Recent Developments in Coaxial Cable Materials to Minimize Temperature Induced Phase Errors

作者：David Slack，美国时代微波系统公司

**特**氟龙（PTFE）作为传输电缆的介质材料已经有几十年的历史。但在室温条件下，PTFE会发生状态改变，使其体积产生阶跃突变，以及相对介电常数的变化，并呈现电长度变化的“滞后”效应。2004年同轴电缆产品开始使用TF4<sup>®</sup>介质材料以解决该问题。2015年进一步优化和改进了工艺，开发了更新的TF4材料，与PTFE介电材料相比，其在相位敏感的应用中拥有非常明显的优势。

### 典型微波电缆的性能

目前及未来相当一段时期内，PTFE是最常见的用于微波和毫米波电缆的电介质材料。它有两个基本大类，全密度（ $\epsilon_r=2.01$ ）和低密度（ $\epsilon_r=1.73$ ）。

另外还有超低密度（ $\epsilon_r=1.42$ ），其被优化用于构成相位稳定的电缆。这些电缆由于超低密度结构提供极少的机械支持，极易受到机械损坏。低密度PTFE电介质长度方向上密度一致性的差异，会直接导致相位跟踪性能的差异，这在达到电缆额定温度时尤其明显。图1叠加显示了一些高性能同轴电缆的相位随温度变化的“足迹”。

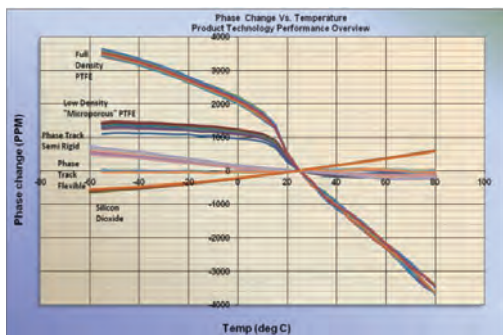


Figure 1. Phase vs. Temperature "Signature" of Various Coaxial Constructions.

**A：**全密度PTFE介质。刚性核心、全密度PTFE电缆有非常坚固的介质核心，其相位温度斜率为最大，分子相位变化效应也最为明显。

**B：**低密度微孔PTFE介质。低密度PTFE介质核心可以用不同的方法来制成，这些方法都有着类似的工艺。把刚性PTFE材料置于可控的拉力拉伸并逐渐升高温度。接着在保持张力的情况下冷却，就会产生一个“拉伸的”PTFE材料，可用于构成电缆的绝缘体。大多数相位敏感微波应用的电缆都会用到这些低密度PTFE。在相位随着温度变化时，低密度材料会使相位温度斜率最小，同时使电缆电长度的“阶梯跃变”变小。

PTFE的一系列特性使之成为目前最佳的电缆介质材料。但它有一个明显的缺点：在18-20摄氏度之间会经历分子相位变化。这个相位变化导致了1.5%的体积变化与对应的介电常数变化，从而导致了电长度的突然改变。这种影响可以通过使用低密度PTFE介质减少，但是不能消除。

此外，这种相位突变在温度上升和温度下降时开始变化的温度点是不一样的。这种滞后效应大大降低了相位跟踪性能。

### PTFE的替代品

目前已经开发出了几款能替代PTFE的产品，并且在系统级性能上面有了显著改善。由于改进了导体和介质对相位影响的平衡性，从而提高了电缆的相位温度性能，所有这些替代品已经消除了相位温度拐点。图2和图3表明了PTFE和TF4<sup>®</sup>之间的形状和跟踪性能的对比。

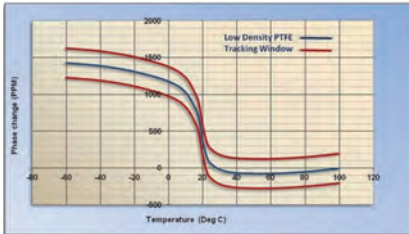


Figure 2. Typical Phase vs. Temperature PTFE Coaxial Products.

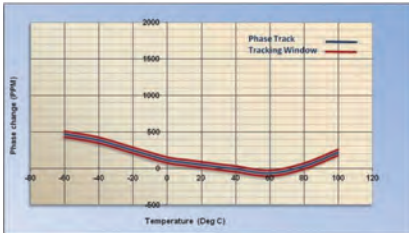


Figure 3. Typical Phase vs. Temperature TF4™ Coaxial Products.

**A: 二氧化硅半刚性电缆组件**

二氧化硅被用作电缆的绝缘介质材料已经有许多年。二氧化硅材料非常易吸湿。因此它必须用于完全气密的电缆组件中（泄漏率小于  $5 \times 10^{-8}$  Atm-cc/sec He）。这种电缆组件在结构上属于半刚性电缆，外护套是铜包钢，并且直接和不锈钢连接器外壳进行焊接。由于电缆结构的一致性和绝缘介质的无机性，该电缆表现出极优异的温度相位重复性和跟踪性。

基于这些材料的使用，便能做出非常牢固的电缆组件。除此之外，由于介质有类似于压紧的沙子的特性，所以能在电缆受到挤压时对外导体提供很好的机械支持。

不锈钢和二氧化硅材料都具有极优异的抗辐射和抗腐蚀性能。可以在绝对零度到超过600摄氏度的范围内使用。它们在航空航天应用中是当之无愧的。

**B: TF4半刚性电缆组件**

时代微波系统最新开发出了一款基于氟聚合物的介质材料TF4。该材料有与PTFE类似温度等级并且消除了介电常数的突变效应。因为其制作工艺是熔化挤出，所以可以得到比

一般低密度PTFE在长度方向上更均匀一致的结构从而提供了更优秀的相位跟踪和重复性能。此外，半刚性结构和二氧化硅组件一样都是均匀的管状结构，所以该结构可以提供匹敌二氧化硅组件的重复性能且无需使用不锈钢导体及特殊设计的连接器。TF4半刚性电缆组件可以采用通常有现货的连接器来生产，事实上，它可以用于普通PTFE介质半刚性电缆组件的连接器。

该材料的另一个优点是具有“微孔”结构。为了平衡电缆导体和介质对相位的影响，介质材料需要降低密度，但是这样会同时降低机械强度。超低密度 ( $V_p=84\%$ ) TF4介质有着和标准密度 ( $V_p=76\%$ ) 拉伸型PTFE带同样的硬度值。这样就能够做出足够机械强度的电缆且不再需要沉重而昂贵的结构来保证机械强度。图4和图5比较了用二氧化硅介质和TF4介质的半刚性电缆的温度相位性能。

**C: TF4柔性电缆组件**

正如TF4介质可以直接替代PTFE介质的半刚性电缆，对柔性电缆来

说其介质也是可以直接被TF4所替代的。TF4柔性电缆和PTFE介质的电缆在尺寸上很接近，另外它们的外观和使用起来的感觉也与PTFE介质的电缆几乎相同。TF4柔性电缆的优越性来自显著改进的相位、相位跟踪和重复性随温度变化的性能。

**稳相性能比较**

**A: 相位变化与温度的关系**

图6和图7比较了柔性PTFE电缆和TF4电缆之间的温度相位特性。每种电缆包含10个相位完全匹配的组件，既表现出了相位温度特性同时又表现出了跟踪特性。这五种电缆在相位温度曲线中的表现有很明显的差异。

刚性PTFE介质的电缆在温度相位曲线图上明显表现出一条很陡的斜率曲线，尤其在室温区间内更为陡峭。在15°C至25°C的室温区间内其相位温度斜率大概是-130 PPM/°C。这样的电长度变化率是低于15°C时的变化率的4倍多。低于室温时的电长度温度系数是-30 PPM/°C。这种相位温度大斜率的变化会发生在所有以

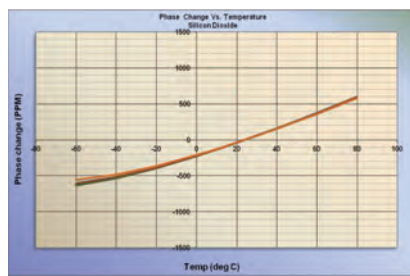


Figure 4. Phase vs. Temperature Silicon Dioxide Coaxial Products.

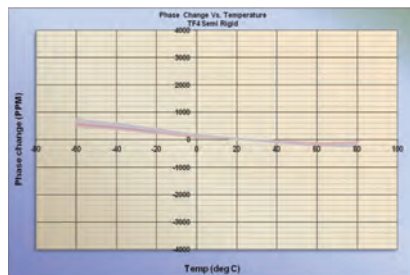


Figure 5. Phase vs. Temperature TF4™ Semi Rigid Coaxial Products

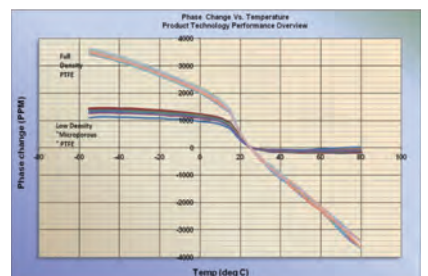


Figure 6. Phase vs. Temperature Comparison Full Density and Low Density PTFE products

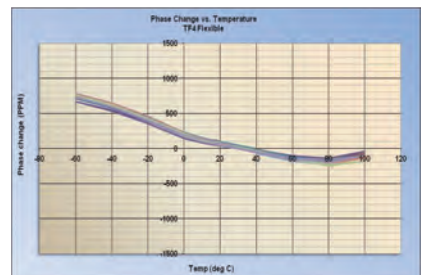


Figure 7. Phase vs. Temperature "Signature" of TF4™ Flexible Coaxial Products.

MEDs Technologies focusing in creating values for our partners. With our professional technical sales team and in-house design team, we will be a valuable resources to your company. Our aim is to provide the best value added services in the industry we served.

MEDs致力于提供合作伙伴全方位的高价值服务。我们有专业的业务、技术团队以及设计研发人员，可以成为您最佳的服务资源。我们的目标是在服务的产业中提供最好的加值服务。

### Processes Provided through MEDs

#### 2016/2017 GaAs MPW Fabrication Schedule

Scheduled multi-project wafer fabrication runs

Process	July	August	September
0.15 $\mu$ m LNA	15 <sup>th</sup>		15 <sup>th</sup>
0.15 $\mu$ m PA		15 <sup>th</sup>	
0.10 $\mu$ m PA	20 <sup>th</sup>		20 <sup>th</sup>
0.25 $\mu$ m PA		20 <sup>th</sup>	

Process	October	November	December
0.15 $\mu$ m LNA	15 <sup>th</sup>	15 <sup>th</sup>	
0.15 $\mu$ m PA		15 <sup>th</sup>	
0.10 $\mu$ m PA	20 <sup>th</sup>	20 <sup>th</sup>	
0.25 $\mu$ m PA		20 <sup>th</sup>	

Process	January	February	March
0.15 $\mu$ m LNA	15 <sup>th</sup>		15 <sup>th</sup>
0.15 $\mu$ m PA		15 <sup>th</sup>	
0.10 $\mu$ m PA	20 <sup>th</sup>		20 <sup>th</sup>
0.25 $\mu$ m PA		20 <sup>th</sup>	

Process	April	May	June
0.15 $\mu$ m LNA	15 <sup>th</sup>		15 <sup>th</sup>
0.15 $\mu$ m PA		15 <sup>th</sup>	
0.10 $\mu$ m PA	20 <sup>th</sup>		20 <sup>th</sup>
0.25 $\mu$ m PA		20 <sup>th</sup>	

1. MPW size is 4 x 5 mm, 20 tiles will be supplied.
2. If singular die needed, layout in the 4x5mm area should be in grid form. Additional cost may apply for pick and place into gelpak.
3. The date shown is the Tape out date and GDSII need to be submitted 1 week before.
4. Interested customer need to book the space one month in advance. Term and conditions apply.

#### 2016 TSMC CyberShuttle Service Plan

Processes: RF HPC Plus (0.9/1.8V, 0.9/2.5V); RF HPC (0.9/1.8V, 0.9/2.5V); RF LP (1.05V/1.8V); RF HPL (1.0/1.8V, 1.0/2.5V)

Schedule: Jul-20/Aug-17/Sep-28/Oct-19/Nov-16/Dec-21

\* Other CyberShuttle schedule can be provided upon request.

#### 2016 AMS MPW Shuttle Service

Process	Technology	Schedule	Schedule
H18	0.18 $\mu$ m HV-CMOS	Aug-29	Dec-5
C18	0.18 $\mu$ m CMOS	Aug-29	Dec-5
H35	0.35 $\mu$ m HV-CMOS	Aug-22	Nov-7
C35	0.35 $\mu$ m CMOS	Oct-3	
C35	0.35 $\mu$ m CMOS-Fraunhofer	Aug-1	Nov-21
S35	0.35 $\mu$ m SiGe-BiCMOS	Sep-19	Dec-19

#### Other Available Processes

IBM 0.13 $\mu$ m / 0.18 $\mu$ m 7SW SOI processes available upon request

上海励仕电子有限公司 (MEDs上海办事处)  
 Web Site: <http://www.meds-tech.com>  
 Contact: 张新华先生  
 Email: [Zhangxh.cn@meds-tech.com](mailto:Zhangxh.cn@meds-tech.com)  
 Phone: +86-21-5674-8687 | Mobile: +86-137-0189-7519

## Technical Feature 技术特写

PTFE为介质的电缆中。斜率的大小可以通过降低介质的密度来得到改善，但是由于PTFE材料的性质，这种斜率突变是无法从根本上消除的。

图6显示了经过改进的“微孔”PTFE的斜率。介质的影响经过这样的改善平衡了金属涨缩的影响，在室温范围内其相位温度曲线会低于一般PTFE材料的曲线。其相位温度曲线斜率在室温范围外也会相对平坦。虽然有所减少，但是在15℃至25℃的范围内仍旧表现出一个非常明显的相位温度曲线斜率：大约-85 PPM/℃。

一些厂商已经可以提供“超”低密度的PTFE介质，其传播速率可以超过85%，这样就更进一步改进了室温时的相位温度变化。这些产品通过过度补偿介质导体间的相位平衡使之形成稍许偏正向的相位温度斜率，斜率线会位于原PTFE“拐点”曲线的上方和下方，并进一步减少材料位于相变温度带时的电长度斜率。这些产品的特性并没有在本文中加以阐述，因为它们绝缘介质已经变得很脆弱，在很多场合是不适用的，除非用在一些不需施加（或极小的）机械应力的应用中。由于介质只能提供如此微弱的机械支持，这些电缆往往表现出机械性能的退化和结构引起的回损及稳定性的问题。

用二氧化硅和TF4作为电缆介质能解决这些问题且不用增加电缆尺寸或重量。Phase Track<sup>®</sup>和二氧化硅电缆产品经过合理优化导体和介质之间的相位平衡使之在运行温度范围内消除了斜率的突变，并且在机械强度和可操作性上达到或优于低密度微孔PTFE产品。

### B：相位追踪和温度的关系

另一个同轴互联产品所需具备的重要特性是在整个系统运行温度范围内多组信号通路间保持相对电长度的稳定，这个多组电缆组件间相位保持“跟踪”的特性在一些不能够进行校验的硬件体系结构应用中尤为关键。

总的来说，同轴电缆组件关系到相位跟踪这一关键特性是由电缆长度方向上的一致性来决定的，这个一致性是指电缆的介质密度、导体单位长度、材料特性、导体几何尺寸和加工工艺条件这些因素上都要做到一致。

再回到图1，便可以得到一些合理且清晰的经验推论。这五种介质的样品，每一种都包含10个完全一致的电缆组件，并在室温环境下进行相位匹配。可以看出，刚性介质的跟踪性能要优于密度较低的介质，半刚性电缆的跟踪性能要优于柔性结构的电缆（又一个证明超低密度PTFE不切实际的例子）。

比较图6和图7可以看出改进跟踪性能的TF4材料和微

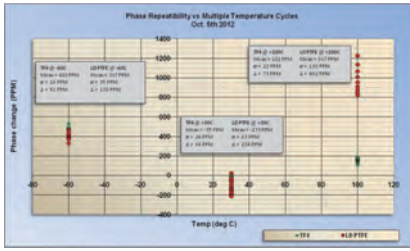


Figure 8. Phase Repeatability vs. Temperature Comparison of TF4™ and PTFE Coaxial Products

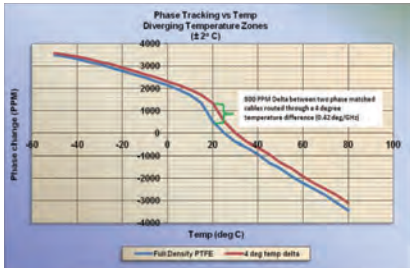


Figure 9. Phase Tracking Under Mildly Diverging Temperature Zones

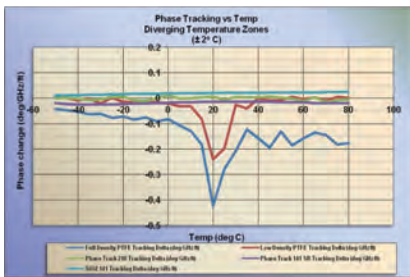


Figure 10. Product Comparison of Tracking Under Divergent Temperature Zones

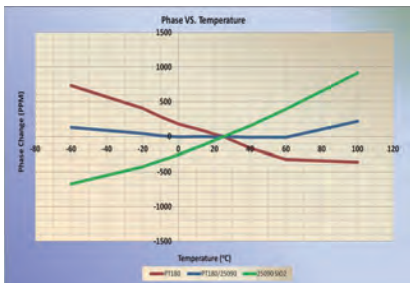


Figure 11. Example of Product Technology "Blending" PTFE材料之间的差异。两幅图所展示的数据都是由结构完全相同的电缆得出的，唯一区别就是介质的不同。且这两种电缆都是标准的柔性电缆。PTFE这一组电缆的跟踪性能是±200 PPM，而结构完全相同的TF4组电缆可以达到±100 PPM。

如果把外导体从柔性电缆常用的编织结构变成刚性管结构，跟踪性能可以进一步达到±50 PPM。二氧化硅

产品，由于其刚性几何结构、无机介质材料和全焊接结构，可以提供极优异的跟踪性能，可以达到±25 PPM。

**C: 相位的重复性和温度的关系**

另一个相似但略有不同的温度相位属性是相位的重复性。它用于表征电缆在多次往返经过一个给定的温度范围能恢复到给定电长度的特性。该特性与相位跟踪密切相关。事实上，跟踪性能很好但重复性能却不好的情况是不太可能存在的。

图8比较了超低密度PTFE电缆和采用相同电缆结构但使用TF4介质的相位重复性能。该图绘出了在-60至+100摄氏度范围内这两种电缆的电长度的变化。红色点是PTFE电缆，绿色点是TF4电缆。可以看出，TF4的变动范围仅为PTFE的四分之一。这一组电缆组件在相位跟踪温度性能方面的进步是贡献巨大的。

**D: 相位跟踪性能和环境温度变化之间的关系**

到目前为止所有的讨论都基于电缆组件处于完全相同温度下。从实际来说，这是不可能达到的。通常电缆在设备中分布的区域会有稍许不同，而这些区域的温度也会不同。再看一下图1来了解这会怎样影响系统性能，刚性PTFE电缆的跟踪性能比低密度的要好很多。

只要电缆是完全匹配好的就会保持跟踪。但是一旦它们所处的环境温度有些许变化，跟踪性能会下降的很快。相位温度曲线斜率越大，相位跟踪性能就下降的越厉害。图9显示了两根刚性PTFE电缆在±2℃环境温度变化下相位温度响应。

假设系统经历了整个温度区间的变化，而系统硬件环境在两根电缆间产生了4℃的温度变化，这就会导致两根电缆间800PPM的电长度差

异。对于低密度PTFE电缆这个数值会减少到大约500PPM。当然最大差异会发生在相位温度曲线斜率最陡的温度范围内。图10提供了所有种类电缆在4度温度变化下的相位跟踪性能的比较。

**E: 产品“混用”**

有些情况，只允许有极小的绝对温度相位改变，而且绝对相位跟踪性能也十分重要。对于这些特殊的要求，一种称为“混用”的技术可以得到很好的结果。TF4介质表现出来的相位温度特性曲线有极小的负向斜率，而二氧化硅介质有极小的正向斜率。当同时使用这两种组件：一端用TF4半刚性电缆，另一端用二氧化硅半刚性电缆并用转接器连接起来，其结果就是相位斜率的相互抵消。这两者的影响和它们所占组合电缆长度的比率有关。通过调整两者的电长度，可以完全平衡并有效消除相位温度曲线的斜率。

从图11可以看出，负向斜率的TF4介质半刚性电缆若和正向斜率的二氧化硅介质半刚性电缆相连接，则在-40℃至60℃的温度区间内相位温度响应曲线是完全水平的。

**结语**

对于相控阵天线和其他系统应用，优秀的相位温度性能是不可或缺的。而对于实验室环境的应用则更为重要，因为实验室的环境温度范围往往就是PTFE拐点产生的温度范围。而且从一个较冷的房间去到较暖的房间过程中，之间的温度差异对相位敏感的测试来说会有极大的影响。不管在何种应用中，只要用到相位敏感的设备，一定要考虑哪怕是最基本的元器件对整体性能的影响。■