

## THz 返波管圆波导梳状慢波结构的研究

王自成<sup>①</sup> 陆德坚<sup>①②</sup> 王莉<sup>①</sup> 李海强<sup>①</sup> 张世杰<sup>①</sup> 徐安玉<sup>①</sup> 郝保良<sup>①</sup> 宋培德<sup>①</sup> 戴志浩<sup>①</sup>  
<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)  
<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要:** 该文利用三维电磁仿真软件模拟计算了 THz 圆波导梳状慢波结构的负 1 次返波的色散和耦合阻抗。结果证实: 在 430-570GHz 频带内, 慢波结构内半径为 0.175mm, 约为中心频率波长的 0.292 倍; 在 760-940GHz 的频带内, 慢波结构内半径为 0.1mm, 是中心频率处波长的 0.392 倍。该结构较大的径向尺寸有利于提高电子注通过率。这种结构负 1 次返波的耦合阻抗较小, 基本上小于  $1\Omega$ , 很好解释了现有 THz 返波管的电子效率小于 0.01% 的事实。

**关键词:** 返波管; 太赫兹; 圆波导梳状慢波结构; 色散; 耦合阻抗

**中图分类号:** TN125

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2008)11-2792-03

## Investigation of Circular Comb Slow-Wave Structure of THz Backward-Wave Oscillators

Wang Zi-cheng<sup>①</sup> Lu De-jian<sup>①②</sup> Wang Li<sup>①</sup> Li Hai-qiang<sup>①</sup> Zhang Shi-jie<sup>①</sup> Xu An-yu<sup>①</sup>  
Hao Bao-liang<sup>①</sup> Song Pei-de<sup>①</sup> Dai Zhi-hao<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

**Abstract:** 3-D electromagnetic simulation software is used to calculate the dispersion and interaction impedance of circular comb Slow-Wave Structure (SWS) which works for Terahertz (THz) Backward-wave Oscillators (BWO). The results show that the inner radius of SWS is 0.175mm in the band of 430-570GHz, and the inner radius of SWS is 0.1mm in the band of 760-940GHz. The large radius of SWS is a great help for improving beam transmission. The interaction impedance of fundamental backward wave of the SWS is smaller than  $1\Omega$  is a good explain to the truth that the electronic efficiency of THz BWO is smaller than 0.01%.

**Key words:** Backward-Wave Oscillations (BWO); Terahertz; Slow-Wave Structure (SWS); Dispersion; Interaction impedance

### 1 引言

在几年前, THz 频段的电磁波还是人们研究得较少的领域, 因此有人把这个领域看作是未开拓的处女地。但是, 目前对 THz 领域的研究在国内外都引起了极高的热情, 相关文献很多。文献[1]对 THz 辐射源进行了综述, 文献[2]则着重对自由电子激光进行了综述。关于 THz 电磁波的应用前景散见于各种文献, 如文献[2]着重谈到 THz 电磁波在物质特性研究、化学动力学及原子或分子内能量划分与能量流动问题研究等方面可能大有机会。文献[3]报道了用 THz 传输和远红外频谱仪研究溶解的 HCl 的旋转吸收谱。至于毫米波和亚毫米波在气象、军事和通信等方面的运用则是早有定论, 如文献[4]报道了一种工作于 W 波段的星载成像雷达。

无论要把 THz 电磁波应用于何种场合, 紧凑高效的 THz 电磁波源是根本。目前正在研究中的 THz 辐射源有固

态振荡器、量子级联激光(QCL)、远红外气体激光、激光驱动 THz 辐射器、各类自由电子激光(FEL)、微制造技术 THz 辐射器及返波管等传统电真空器件。通过比较, 人们得出了返波管的功率重量比或功率体积比在所有器件中较高, 也就是说, 返波管是最有潜力实现小型化的 THz 源之一。事实上也是如此, 前苏联及现在的俄罗斯研制出了一系列返波管, 在 THz 波段具有 1-100mW 的功率, 工作电压在 1-10kV 之间, 电子注需要高达 1T 的磁场进行聚焦<sup>[1]</sup>。他们的产品在欧洲一些国家有售, 现在国内也有公司代理这些产品。

由于 THz 返波管具有体积小、功率适中、频率可调 and 适合于仪表使用等特点, 引起了世界领域的研究兴趣。美国的 CCR(Calabazas Creek Research, Inc)<sup>[5-8]</sup>、Utah 大学<sup>[9]</sup>、NASA 的 Lewis Research Center<sup>[10]</sup>及法国 Thomson CSF DET 等研究机构纷纷开展了 THz 返波管的研究。其中, 根据 2006 年的最新报道<sup>[8]</sup>, 由于电子注通过率不好, CCR 的第二只样管尚未得到成功的测试结果。而 Utah 大

学仅制造出了部件样品，还未见有对整管进行测试的报道。此外，法国 Thomson CSF DET 做过十分出色的工作，根据报道，他们早在 1988 年就制造出了输出功率为 2mW 的返波管样管<sup>[11]</sup>。

总之，目前对 THz 返波管的研究主要集中在制造工艺的研究上。由于返波管属于电真空器件的早期管型，作为振荡器，在微波波段已被固态器件所取代，因此关于返波管作用机理的理论仍停滞于早期阶段，处于定性论述或半定量估计的阶段。目前返波管在 THz 领域显示出了巨大的潜力，对返波管的研究需要更为深入地理解返波管的作用机理及需要更为准确的设计手段。

### 2 返波管理论回顾

返波管是一种工作于周期慢波结构的负 1 次返向空间谐波的振荡器。从大体上讲，返波管的相互作用机理与行波管的相互作用机理没有质的区别。但从细节上看，主要有如下区别：(1) 在行波管中，电子注与逐渐放大的电磁场发生相互作用；而在返波管中，电子注一开始就与已放大的电磁场发生相互作用。(2) 在行波管中，一般来说，前向波阻抗要比返波阻抗大得多，电子注主要与前向波发生相互作用；而在返波管中，尽管电子注主要与其同步的负 1 次返向空间谐波发生相互作用，但由于反射的存在，相互作用区存在与上述返波反向且基本等幅的反射波，并对相互作用有重要影响。由于第(1)点差别，可以预见返波管的相互作用效率应比行波管的高得多，这正是返波管在 THz 波段还能显示出巨大潜力的根本原因。由于第(2)点差别，讨论返波管的相互作用不能简单使用行波管的相互作用理论结果。另外，据我们所知，返波管也没有发展起像行波管那样的大信号理论。

尽管如此，可以通过修改行波管小信号理论的基本方程，来描述返波管的相互作用。在 THz 波段，一般来说，返波管的效率小于 0.01%<sup>[12]</sup>，预计小信号理论可在一定程度上对返波管的相互作用进行合理计算。而慢波结构的色散和耦合阻抗是返波管小信号理论基本方程中两个最重要的参数之一。在微波波段，这两个参数可以通过 HFSS、CST 等大型三维电磁仿真软件进行模拟计算得到，也可以通过“冷测”得到。而在 THz 波段，既没有报道过相关的“冷测”实验，也没有报道过对其进行计算机模拟，因此很有必要进行这样的工作。

本文将通过计算机模拟计算慢波结构的色散和耦合阻抗，为返波管的小信号理论方程提供基本的电路参数。并通过对这两个参数的计算，以尽可能大的结构尺寸和尽可能大的耦合阻抗为目标进行优化，探索最适合于 THz 返波管的慢波结构，从而有利于返波管的工艺实现。

根据文献[12]的报道，圆波导梳状慢波结构具有结构简单和径向尺寸较大等特点，这非常有利于降低返波管的工艺难度，特别是 THz 返波管。对文献[12]所设计的工作于 8mm 波段的圆波导梳状慢波结构，其内半径为 2.2mm，约

为波长的 1/3~1/4，是同一频段螺旋线慢波系统内半径的 5 倍左右。在 THz 频段，可预见这种慢波结构可能仍保持其径向尺寸较大等特点，本文将深入研究这种慢波结构并证明这一点。

### 3 THz 返波管慢波结构的计算机模拟

本文的目的是要获得一个适用于 THz 返波管的慢波结构，本文选择圆波导梳状慢波结构，如图 1 所示。设计可以工作在 400~500GHz 及 750~950GHz 的圆波导梳状慢波结构，结构尺寸分别对应为 A 尺寸和 B 尺寸。A 尺寸的内半径  $r_1=0.175\text{mm}$ ，周期长度  $p=0.09\text{mm}$ ；B 尺寸的内半径  $r_1=0.1\text{mm}$ ，周期长度  $p=0.06\text{mm}$ 。本文计算圆波导梳状慢波结构色散和耦合阻抗的方法与文献[12]所采用的方法完全相同。

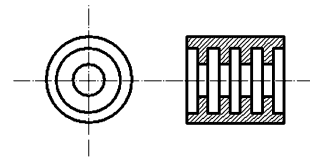


图 1 圆形波导梳状慢波结构示意图

色散的计算结果见图 2 和图 3 所示。由图 2 可知，在周期相移为  $180^\circ < \beta p < 360^\circ$  时， $d\omega/d\beta < 0$ ，即电磁波的群速度与相速度的方向相反，也就是负 1 次返波。图 2 还表明，A 尺寸的频带约为 430~570GHz，而 B 尺寸的频带约为 760~940GHz。

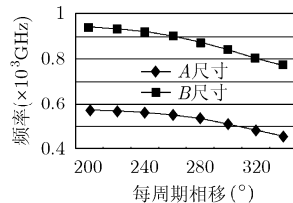


图 2 A 尺寸和 B 尺寸的负 1 次返波的频率相移曲线

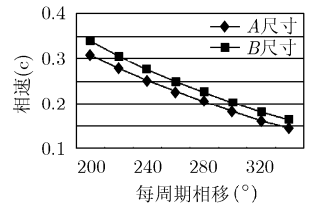


图 3 A 尺寸和 B 尺寸的负 1 次返波的频率相速

从图 3 可以看出，A 尺寸的相速在  $0.144c-0.31c$  ( $c$  为真空中的光速) 之间，换算出同步电压在 5.38~25.5kV 之间；而 B 尺寸的相速在  $0.16c-0.34c$  之间，换算出同步电压在 6.9~31.1kV 之间。

慢波结构为尺寸 A 和尺寸 B 时的耦合阻抗的计算结果示于图 4，图中分别给出了轴心处 ( $r=0$ ) 和距轴心为  $r=0.5r_1$  处的耦合阻抗。标号 A(0) 和 B(0) 标出尺寸 A 和尺寸 B 的满波结构在轴心处的耦合阻抗计算值，而 A(0.5) 和 B(0.5) 标出尺寸 A 和尺寸 B 的满波结构在  $r=0.5r_1$  处的耦合阻抗计算值。需要注意的是：耦合阻抗的值为负是返波的群速为负的特点所致。图 4 表明：不论尺寸 A 还是尺寸 B，耦合阻抗都比较小，在大部分频段都小于  $1\Omega$ ，尺寸 B

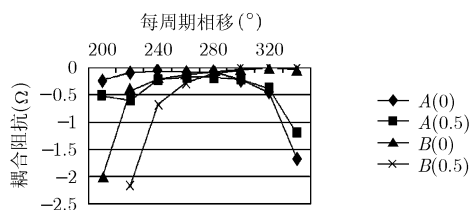


图4 A尺寸和B尺寸的负1次返波的频率耦合阻抗

的耦合阻抗在低频段还远小于  $1\ \Omega$ 。根据文献[13]的计算,圆波导梳状慢波结构的前向基波在  $8\ \text{mm}$  波段可以达到几个欧姆。同本文的计算结果相对比,这种结构负1次返波的耦合阻抗随着频率的升高已经大大降低。事实上,不论何种慢波结构,同次空间谐波的耦合阻抗随频率的升高而降低是普遍规律。而本文的计算结果不仅符合这个规律,而且耦合阻抗很小解释了现有 THz 返波管的电子效率小于 0.01% 的原因,这表明了本文的计算结果是可信的。

#### 4 结束语

计算了结构尺寸为 A 尺寸和 B 尺寸的两例圆波导梳状慢波结构的色散和耦合阻抗。前者的频带为  $430\text{--}570\text{GHz}$ , 内半径  $r_1=0.175\text{mm}$ , 是中心频率  $500\text{GHz}$  处波长的 0.292 倍。后者的频带为  $760\text{--}940\text{GHz}$ , 内半径  $r_1=0.1\text{mm}$ , 是中心频率  $850\text{GHz}$  处波长的 0.392 倍。文献[13]报道的一个工作于  $1\text{THz}$  的返波管慢波结构的内孔径为  $0.03\text{mm}$ , 仅为本文所计算的 B 尺寸的慢波结构的内半径的  $1/3$ 。这也再次证实了圆形梳状慢波结构具有结构径向尺寸较大特点,而这一特点在 THz 返波管的研制中具有重要的现实意义。因为在 THz 波段,电子注通过率已经成为能否成功研制返波管的关键。即使是美国的 CCR 也因为电子注通过率不好而尚未成功研制出返波管。而较大的径向尺寸意味着较容易实现更好的电子注通过率,并能大大降低研制 THz 返波管的工艺难度。

在计算机模拟方面, HFSS、CST 等大型三维电磁仿真软件在 THz 波段尚未得到充分的验证,理论预测也存在很大困难,因此本文的计算结果还有待于进一步的实验验证。实际上,在 THz 波段,目前尚未有相关的冷测方法,因此还没有成熟的办法立即通过实验的方法研制返波管。另一方面,研制 THz 返波管的关键还在于工艺实现,尽早开展 THz 返波管制造工艺的研究显得十分迫切。只有制造工艺取得突破,才能获得可供“冷测”或“热测”的部件或样品。而本文作为一种模拟研究,确定了一种较为理想的 THz 返波管的慢波结构及其大致的结构尺寸,为开展 THz 返波管制造工艺的研究打下了基础。

#### 参考文献

[1] Gallerano G P and Biedron S. Overview of terahertz radiation sources. Proceedings of the 2004 FEL Conference, Trieste, Italy, 2004: 216–221.

[2] Chattopadhyay S. Emerging concepts, technology and opportunities for mezo-scale terahertz and infrared facilities. Proceedings of EPAC 2004, Lucerne, Switzerland, 2004: 2454–2456.

[3] Flanders B N. The pure rotational spectrum of solvated HCl: Solute-bath interaction strength and dynamics. *The Journal of Physical Chemistry. A* 1999, 103(49): 10054–10064.

[4] Kempkes M A, Hawkey T J, and Gaudreau A P J, *et al.* W-band transmitter upgrade for the Haystack ultra-wideband satellite imaging radar(HUSIR). Eighth IEEE International Vacuum Electronics Conference, IVEC 2007, Kitakyushu, Japan, May 15–17, 2007: 439–440.

[5] Ives L, Neilson J, and Negirev A A, *et al.* Development of high efficiency backward wave oscillators for submillimeter applications. IEEE International Conference on Plasma Science, Nevada, USA, 2001: O1E7.

[6] Ives L, Kory C, and Read M, *et al.* Development of terahertz backward wave oscillators. 5Th IEEE International Vacuum Electronics Conference, Monterey, Apr 27–29 2004: 67–68.

[7] Ives L, Caplan M, and Kory C, *et al.* Design and test of a submillimeter-wave backward wave oscillators. The Joint 30th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 13th International Conference on Terahertz Electronics, Monterey, CA, USA, 2005(1): 93–94.

[8] Kory C, Neilson J M, and Ives L, *et al.* High efficiency, terahertz, backward wave oscillators. International Conference on Plasma Science, Aanttt, Alberta, Canada, May 26–30, 2002: 171.

[9] Vela G O, Miller M S, and Grow R W, *et al.* Terahertz backward wave oscillators with photonic crystal waveguides. 2006 IEEE International Vacuum Electronics Conference held jointly with 2006 IEEE International Vacuum Electron Sources, IVEC/IVESC 2006, Monterey, CA, USA, 2006: 425–426.

[10] Barnett L R, Stankiewics N, and Heinen V O, *et al.* Submillimeter-wave backward wave oscillators. International Electron Devices Meeting 1985–Technical Digest., Washington, DC, USA, 1985: 364–365.

[11] Garcin P, Grauleau D, and Gerber R, *et al.* New technologies used for 1 THz backward-wave oscillators. IEDM, 1988: 850–853.

[12] 王自成, 韩沛然, 王莉等. 圆波导梳状慢波结构的耦合阻抗. *强激光与粒子束*, 2007, 19(11): 1891–1895.

Wang Z C, Hang P R, and Wang L, *et al.* Coupling impedance of circular comb slow wave structure. *High Power Laser and Particle Beam*, 2007, 19(11): 1891–1895.

王自成: 男, 1966年生, 博士, 研究员, 硕士生导师, 主要从事微波、毫米波器件的研究与设计工作。

陆德坚: 男, 1980年生, 硕士生, 从事毫米波行波管及计算电磁学的研究。