

# 太赫兹金属平行平板波导 TE<sub>1</sub> 模式有效折射率的近似表达式

李哲<sup>1</sup>, 滕达<sup>2\*</sup>, 白丽华<sup>1</sup>, 曹清<sup>1</sup>

<sup>1</sup>上海大学理学院, 上海 200444;

<sup>2</sup>郑州师范学院物理与电子工程学院, 河南 郑州 450044

**摘要** 对太赫兹金属平行平板波导的最低阶横电(TE<sub>1</sub>)模式进行理论研究,并且在真实金属参数的条件下,推导出一个适用于太赫兹金属平行平板波导 TE<sub>1</sub> 模式有效折射率的近似表达式。首先对 TE<sub>1</sub> 模式进行基于有限元方法的数值模拟,并且将模拟结果与近似表达式所得的数值进行对比,验证理论推导的可行性。接着由误差分析表明所推导的近似表达式在整个太赫兹波段具有很高的精确度,并且具有适用频率范围广的特点。模拟仿真结果表明,该近似表达式对 TE<sub>1</sub> 模式的分析具有高度的适用性,将对金属平行平板波导的研究和应用起到一定的促进作用。

**关键词** 光学器件; 波导; 太赫兹波; 金属光学; 远红外

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.192302

## Approximate Formula for Effective Refractive Index of TE<sub>1</sub> Mode in Terahertz Parallel-Plate Metal Waveguides

Li Zhe<sup>1</sup>, Teng Da<sup>2\*</sup>, Bai Lihua<sup>1</sup>, Cao Qing<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Sciences, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

<sup>2</sup>School of Physics and Electronics Engineering, Zhengzhou Normal University, Zhengzhou, Henan 450044, China

**Abstract** This paper describes a theoretical study of the lowest-order transverse electric (TE<sub>1</sub>) mode of a terahertz parallel-plate metal waveguide, and an approximate expression for the effective refractive index of the TE<sub>1</sub> mode of the terahertz parallel-plate metal waveguide is derived under the condition of real metal parameters. First, the TE<sub>1</sub> mode is numerically simulated based on the finite element method, and the simulation results are compared with the values obtain from the approximate expressions to verify the feasibility of the theoretical derivation. The error analysis shows that the deduced approximate expression has high accuracy in the entire terahertz band and exhibits the characteristics of a wide range of applicable frequencies. Simulation results show that this approximate expression has a high degree of applicability to the analysis of the TE<sub>1</sub> mode and will promote the research and application of parallel-plate metal waveguides.

**Key words** optical devices; waveguides; terahertz waves; metal optics; far infrared

**OCIS codes** 230.7370; 260.3910; 260.3090

## 1 引言

太赫兹(THz)波是频率在 0.1~10 THz 之间的电磁波,在通信、成像和传感等领域得到了广泛的

应用<sup>[1-6]</sup>。为了满足上述各类应用的需求,科研人员提出和研究了多种 THz 波导结构,如金属线<sup>[7-9]</sup>、石墨烯等激元波导<sup>[10-12]</sup>、光子晶体波导<sup>[13-15]</sup>、空芯波导<sup>[16-18]</sup>、金属矩形波导(RWG)<sup>[4,19-20]</sup>和平行平板

收稿日期: 2019-12-14; 修回日期: 2020-01-18; 录用日期: 2020-02-14

基金项目: 国家自然科学基金(61275103)、上海市自然科学基金(18ZR1413600)、河南省高等学校重点科研项目(21A140029)、郑州师范学院科研启动专项、郑州师范学院开放研究基金

\* E-mail: tengda@zznu.edu.cn

波导(PPWG)<sup>[21-23]</sup>等。其中金属 PPWG 由于具有简单的结构和较低的模式损耗,吸引了大量研究人员的研究兴趣。在 THz 波段,金属 PPWG 中的两个主要模式为最低阶横磁模(TM<sub>0</sub>)和最低阶横电模(TE<sub>1</sub>)<sup>[23]</sup>。TE<sub>1</sub> 模式因具有低欧姆损耗和腔共振现象等特性而得到了广泛的研究,并在传感和滤波等方面起到重要的作用<sup>[24-27]</sup>。基于金属 PPWG 的漏波天线,研究人员建立了 THz 波段的多通道无线通讯,这表明 TE<sub>1</sub> 模式在通信领域具有广泛的应用前景<sup>[1,28]</sup>。

目前,关于 THz PPWG 的理论研究主要基于经典微波波导理论,即在模式理论分析中采用完美电导体(PEC)边界,并且采用不同的方法分别研究模式的传播常数和衰减常数<sup>[22,29]</sup>。但是,由于 THz 波覆盖的频率范围较广,当研究的频率延伸到远红外波段时,基于微波理论的研究方法将不再适用,故采用真实金属参数来分析 PPWG 中的有效折射率。目前,研究人员对 THz 金属波导传输模式的有效折射率已有所研究,已建立一个简单有效的金属 RWG 的 TE<sub>01</sub> 模式与金属 PPWG 的 TE<sub>1</sub> 及 TM<sub>0</sub> 模式的关系<sup>[30]</sup>。另外, TM<sub>0</sub> 模式的有效折射率可以采用与金属狭缝中 TM 偏振性质类似的方法来计算获得<sup>[31]</sup>。根据上述背景,TE<sub>1</sub> 模式有效折射率的研究对于完善 PPWG 和 RWG 低阶模式之间的关系起到一定的作用。考虑到金属 PPWG 中 TE<sub>1</sub> 模式的重要应用价值,同时为了更深入地理解其物理机制,建立可用于描述 THz PPWG 中 TE<sub>1</sub> 模式有效折射率的表达式具有一定的研究意义。

本文对 THz PPWG 中 TE<sub>1</sub> 模式进行理论分析,并理论推导得到一个 TE<sub>1</sub> 模式复有效折射率的近似表达式。首先采用真实金属参数对表达式进行有限元方法(FEM)的数值仿真,然后对金属 PPWG 进行模式分析,从而测试该表达式的可行性和精确度,最后在不同的几何参数和频率下进行误差分析。仿真结果表明,该近似表达式可适用于整个 THz 波段,并且在中红外波段也具有良好的精确度。

## 2 理论分析

理论分析使用一个无限宽的金属 PPWG,即金属板可视为在 Y 方向无限延伸,结构如图 1 所示。其中  $\epsilon_m$  为金属的相对介电常数,坐标原点位于结构的几何中心,Z 方向为 THz 波的传输方向,板间距为  $a$ ,填充介质为空气,介质的相对介电常数  $\epsilon_d = 1$ 。

对于金属 PPWG 中的 TE<sub>1</sub> 模式,其模式场为与金属板平行的切向电场分量  $E_Y$ 。具体情况下,

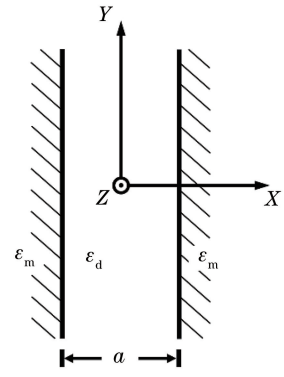


图 1 金属 PPWG 的结构示意图

Fig. 1 Schematic of metal PPWG structure

PPWG 中的切向电场在电介质中表现为余弦形式,在金属中的电场表现为指数衰减形式。因此,电介质和金属中的电场可分别表示为

$$E_{Y,d} = A \cos(k_{x,d}x), 0 \leq |x| \leq a/2, \quad (1)$$

$$E_{Y,m} = B \exp[-k_{x,m}(|x| - a/2)], |x| > a/2, \quad (2)$$

式中: $A$  和  $B$  均为待定系数; $k_{x,d}$  和  $k_{x,m}$  分别为电介质和金属中的电场在 Y 方向的分离常数。另外,TE<sub>1</sub> 模式的场分量还包含纵向传输因子  $\exp(jn_{\text{eff}}k_0z)$ ,其中  $n_{\text{eff}}$  为有效折射率, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ , $\lambda_0$  为真空波长, $z$  为纵向传输距离。根据标量亥姆霍兹方程可得

$$k_{x,d} = k_0 \sqrt{1 - n_{\text{eff}}^2}, \quad (3)$$

$$k_{x,m} = k_0 \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - \epsilon_m}. \quad (4)$$

考虑到在 THz 波段,  $|n_{\text{eff}}^2| \ll |\epsilon_m|$ , 则可将(4)式改写为

$$k_{x,m} \approx k_0 \sqrt{-\epsilon_m}. \quad (5)$$

设时间因子为  $\exp(-j\omega t)$ , 其中  $\omega$  为角频率, $t$  为时间,并根据麦克斯韦方程组,磁场分量  $H_{z,i}$  可表示为

$$H_{z,i} = -\frac{1}{j\omega\mu} \frac{\partial E_{y,i}}{\partial x}, \quad (6)$$

式中: $i$  为 d 或 m,分别对应电介质或金属中的场分量; $\mu$  为材料的磁导率。当考虑非磁性金属时, $\mu = \mu_0$ ,其中  $\mu_0$  为真空磁导率。在无源的情况下,根据  $E_{Y,i}$  和  $H_{z,i}$  在空气介质和金属边界上的连续关系,当  $x = a/2$  时,可得

$$k_{x,d} \sin(k_{x,d}a/2) = k_{x,m} \cos(k_{x,d}a/2). \quad (7)$$

根据金属具有的特性, $E_{Y,d}$  在空气介质-金属界面处接近于 0。并且根据(1)式,可以假设  $k_{x,d}a/2 \approx \pi/2$ ,并对其进行展开,表达式为

$$\sin \frac{k_{x,d}a}{2} \approx \sin \frac{\pi}{2} + \left( \frac{k_{x,d}a}{2} - \frac{\pi}{2} \right) \cos \frac{\pi}{2} = 1, \quad (8)$$

$$\cos \frac{k_{x,d}a}{2} \approx \cos \frac{\pi}{2} - \left( \frac{k_{x,d}a}{2} - \frac{\pi}{2} \right) \sin \frac{\pi}{2} = \frac{\pi}{2} - \frac{k_{x,d}a}{2}. \quad (9)$$

由(5)式和(7)~(9)式,可得

$$k_{x,d} \approx \frac{\pi}{a} \left( 1 - \frac{2}{2 + k_0 a \sqrt{-\epsilon_m}} \right) \approx \frac{\pi}{a} \left( 1 - \frac{2}{k_0 a \sqrt{-\epsilon_m}} \right). \quad (10)$$

最后根据(3)式,可得  $TE_1$  模式中  $n_{\text{eff}}$  的近似表达式为

$$n_{\text{eff}} \approx \sqrt{1 - \frac{\pi^2}{k_0^2 a^2} \left( 1 - \frac{2}{k_0 a \sqrt{-\epsilon_m}} \right)^2}. \quad (11)$$

### 3 模拟结果

为了验证理论推导的可行性和表达式的精确度,通过商业软件 COMSOL 对表达式进行 FEM 模拟仿真以求解 PPWG 的本征模式,得到  $TE_1$  模式场分布和有效折射率。模拟过程中使用的金属,其相对介电常数可通过拟合的 Drude 模型来获得<sup>[32]</sup>。

首先,将(1)式和(2)式计算所得的电场分布与模拟结果进行对比,使用的频率为 1 THz,模拟预设的光速  $c = 2.99792458 \times 10^8$  m/s,  $a = 0.6\lambda_0 \approx 179.88 \mu\text{m}$ 。当频率为 1 THz 时,相对介电常数分别为  $\epsilon_{\text{Cu}} = -5.49 \times 10^5 + 1.20 \times 10^6 j$  和  $\epsilon_{\text{Au}} = -1.20 \times 10^5 + 7.22 \times 10^5 j$ 。对铜和金分别进行模

中虚线表示空气-金属界面。根据 PPWG 结构和  $TE_1$  模式的对称性,选取  $x \geq 0$  一侧的空气介质中和金属内部的电场分布进行理论值和模拟结果的对比,空气和金属中的电场分布如图 2(b)和图 2(e)所示,其中虚线表示空气-金属界面。金属中的电场分布如图 2(c)和图 2(f)所示,分别对应图 2(b)和图 2(e)中虚线右侧的细节放大。由于理论值为代入(5)式和(10)式近似值计算的结果,从图 2(c)和图 2(f)可以看到理论值和模拟结果存在微小差别,但是两组结果整体相符,说明理论推导近似值的可行性。因为铜和金的相对介电常数的数量级相近,所以在进行模拟和计算的情况下,两种金属有相似的场分布。值得注意的是,模拟仿真使用的是真实的相对介电常数,电导率为有限值,所以在空气-金属界面上,切向电场分量不为零而是一个接近于零的场值,如图 2(c)和图 2(f)所示。在  $|\epsilon_{\text{Cu}}| > |\epsilon_{\text{Au}}|$  的情况下,铜模拟金属边界上的归一化电场值小于金。从图 2(c)和图 2(f)可以看到,金属中电场的衰减曲线不同于一般指数衰减的形式,并且理论值与模拟值的变化规律相符。通过理论分析,其原因在于由(4)式求得的  $k_{x,m}$  为复数,并且当频率为 1 THz 时,(2)式的指数部分中  $k_{x,m}$  的实数和虚数部分数量级相当,均为  $10^7$ ,从而由(2)式描述的金属内电场总体呈现快速衰减的趋势,但由于受到  $k_{x,m}$  虚部的影响,衰减曲线表现出一种类似“振荡”的变化趋势。

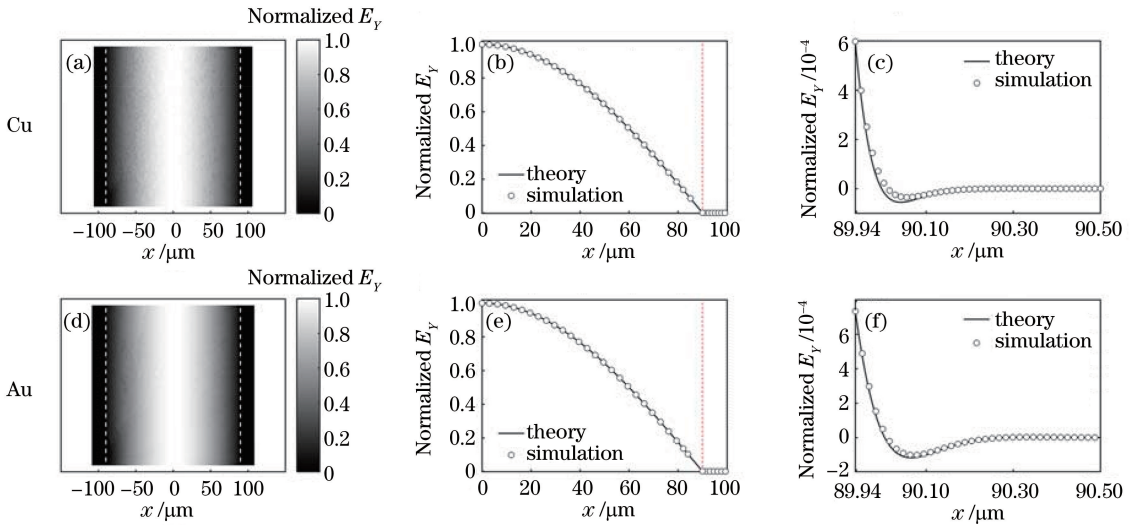


图2 金属 PPWG 中  $TE_1$  模式的归一化切向电场分布。(a)(d)模拟所得的归一化模式场分布;  
(b)(e)空气和金属中的电场分布;(c)(f)金属中的电场分布

Fig. 2 Normalized tangential electric field distribution of  $TE_1$  mode in metal PPWG. (a)(d) Normalized mode field distribution obtained by simulation; (b)(e) electric field distribution in air and metal; (c)(f) electric field distribution in metal

接着,在不同参数和频率的情况下,对近似表达式和模拟结果进行对比。考虑到金属铜和金具有相似的模拟结果,此时模拟和计算只选用金属铜。首先在频率为 5 THz 的情况下,对比有效折射率随板间距与波长之比  $a/\lambda_0$  变化的关系,有效折射率的实部和虚部分别记为  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  和  $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ ,结果如图 3(a)和图 3(b)所示。从图 3(a)和图 3(b)可以看到,通过推导得到(11)式的理论值与 FEM 模拟的结果符合得很好。随着  $a/\lambda_0$  值的增大, $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  值逐渐增大并趋近于 1, $\text{Im}(n_{\text{eff}})$  值逐渐减小。当  $a/\lambda_0=0.5$  时,  $\text{TE}_1$  模式已经接近于截止,因此将  $a/\lambda_0$  设置为 0.6 用来研究  $\text{TE}_1$  单模的情况,频率对有效折射率的影响情况,如图 3(c)和图 3(d)所示。从图 3(c)和图 3(d)可以看到,理论计算值与模拟结果依然相符,随着频率的增大,金属的相对介电常数逐渐减小,更多的电场可以进入金属,从而使得损耗逐渐增大,所以  $\text{Im}(n_{\text{eff}})$  值逐渐增大。PEC 边界是一种无耗表面,其介电常数可视为无穷大,因此当对 PEC 进行模拟时,有效折射率为实数。此外还分别

对比 PEC 的模拟结果随  $a/\lambda_0$  和频率的变化情况,结果如图 3(a)和图 3(c)所示。从图 3(a)可以看到,当  $a/\lambda_0=0.5$  时,PEC 的有效折射率为 0,根据经典波导理论,此时位于截止条件的临界状态。由于真实金属参数中具有有限的相对介电常数,金属中存在电场分布,所以当  $a/\lambda_0=0.5$  时,PEC 与金属的模拟值差异明显。当  $a/\lambda_0$  增加时,板间介质中的电场分布在模式场分布中起到主要作用,所以 PEC 的模拟结果与真实金属参数的模拟值的差别有所减小。从图 3(c)可以看到,由于  $a/\lambda_0$  值固定为 0.6,PEC 的模拟结果始终保持在 0.5528 左右,随着频率的增加,PEC 的模拟结果与真实金属参数差异增大。主要原因在于铜的相对介电常数的绝对值随着频率的增加而减小,因此在研究过程中,不能继续将铜视为理想金属,所以在低频段,二者的模拟结果差异较小,在频率较高的范围内,相比(11)式的计算值,PEC 的模拟结果与真实金属参数差异显著。这一结果说明相比于采用理想金属的假设,(11)式能够更好地描述金属的有效折射率。

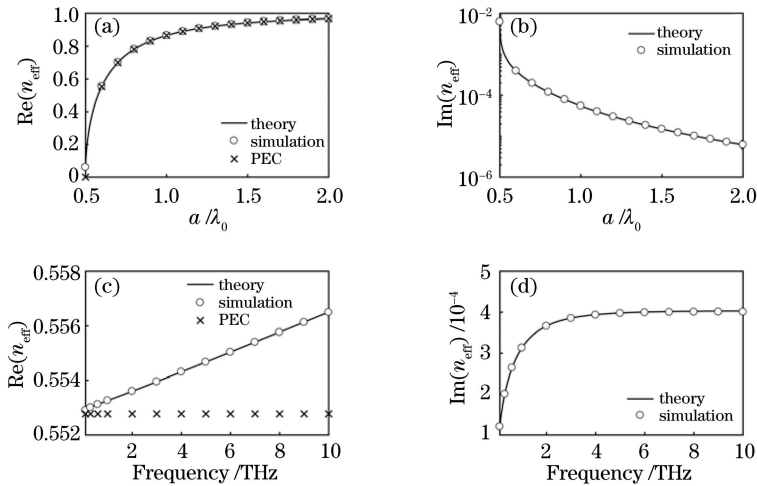


图 3 近似表达式和模拟结果的对比。(a)  $n_{\text{eff}}$  的实部随  $a/\lambda_0$  的变化;(b)  $n_{\text{eff}}$  的虚部随  $a/\lambda_0$  的变化;  
(c)  $n_{\text{eff}}$  的实部随频率的变化;(d)  $n_{\text{eff}}$  的虚部随频率的变化

Fig. 3 Comparison of approximate expressions and simulation results. (a) Real part of  $n_{\text{eff}}$  changes with  $a/\lambda_0$ ; (b) imaginary part of  $n_{\text{eff}}$  changes with  $a/\lambda_0$ ; (c) real part of  $n_{\text{eff}}$  changes with frequency; (d) imaginary part of  $n_{\text{eff}}$  changes with frequency

为了对近似表达式的精确度进行详细评估,所以对不同的因素进行误差分析。此时选用对金属铜进行 FEM 模拟所得的有效折射率  $n_{\text{sim}}$ ,可以利用近似表达式求得  $n_{\text{eff}}$  实部和虚部的相对误差,分别记为  $\Delta_R = |\text{Re}(n_{\text{eff}}) - \text{Re}(n_{\text{sim}})| / |\text{Re}(n_{\text{sim}})|$  和  $\Delta_I = |\text{Im}(n_{\text{eff}}) - \text{Im}(n_{\text{sim}})| / |\text{Im}(n_{\text{sim}})|$ 。当  $a=0.6\lambda_0$  时,计算所得的相对误差随频率的变化如图 4(a)所示。从图 4(a)可以看到,随着频率的增加, $n_{\text{eff}}$  实部

和虚部的相对误差均有所增加。这一现象可以由金属相对介电常数  $\epsilon_m$  的变化来理解。理论推导过程中,近似表达式利用电场在空气介质-金属界面的场值接近于零的特点。当  $\epsilon_m$  随着频率的增加而减小时,界面上的场值会略微增加,从而减小近似结果的精度。但值得注意的是,当频率达到 100 THz 时,  $\Delta_R=1.37 \times 10^{-3}$ ,  $\Delta_I=5.41 \times 10^{-2}$ ,这说明(11)式依旧具有较好的精确度,在中红外波段仍然可行。



随后,当频率为 5 THz 时,近似表达式在不同板间距的误差变化情况,如图 4(b)所示。模拟仿真中, $a$  值的变化范围设置为  $0.6\lambda_0 \sim 2.0\lambda_0$ 。随着  $a/\lambda_0$  值的增大, $\Delta_R$  和  $\Delta_I$  值均逐渐减小。通过模拟发现,当  $a/\lambda_0$  值接近于截止模式的条件时,相对误差会显著增大,这是因为板间介质中的电场分布会

偏离(1)式的表现形式,使得近似处理的误差增大。从图 4(b)可以看到,当频率为 5 THz, $a/\lambda_0=0.6$  时,(11)式的相对误差  $\Delta_R=4.97 \times 10^{-6}$ , $\Delta_I=3.00 \times 10^{-3}$ 。当  $a/\lambda_0=2.0$  时,实部的误差已经显著地减小到  $\Delta_R=1.34 \times 10^{-8}$ ,这表明该近似表达式对于描述  $TE_1$  模式的有效折射率具有高度的实用性。

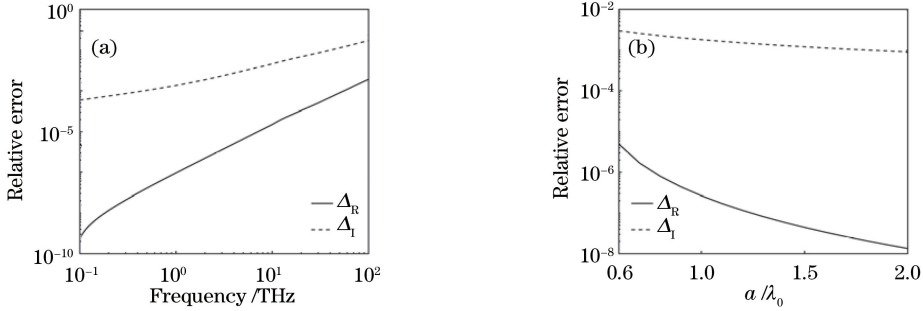


图 4 近似表达式的相对误差。(a)相对误差随频率的变化;(b)相对误差随  $a/\lambda_0$  的变化  
Fig. 4 Relative error of approximate expression. (a) Relative error changes with frequency;  
(b) relative error changes with  $a/\lambda_0$

### 4 讨 论

在第 3 节中验证(11)式计算有效折射率时的精确度,此外利用(11)式可对 PPWG 中的群速度色散(GVD)进行描述。此时考虑一个板间距为 1.5 mm 的金属铜 PPWG,填充介质为空气,GVD 可通过  $\partial^2 \beta / \partial \omega^2$  [33] 来获得,其中  $\beta = k_0 \text{Re}(n_{\text{eff}})$ 。频率的取值范围为 0.1~5.0 THz,PPWG 中  $TE_1$  模式的 GVD 和有效折射率实部的变化情况如图 5 所示。当  $a = 1.5$  mm 时,频率为 0.1 THz 的  $TE_1$  模式已非常接近截止状态,此时 GVD 的绝对值较大,且  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  值较小。随着频率的增大且远离截止频率,GVD 的绝对值迅速减小并接近于 0,如图 5 插图所示,并且  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  值增大至接近于 1。这一结果与文献[22]所描述的金属 PPWG 由模式截止引起的高色散性质和远离截止频率的低色散性质相符。

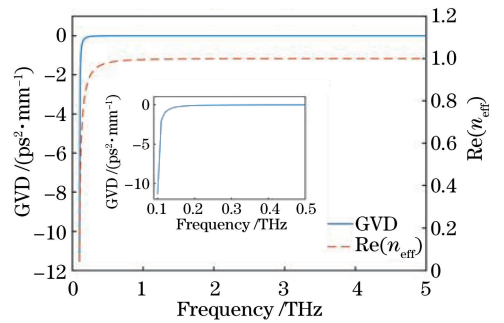


图 5  $TE_1$  模式的群速度色散和有效折射率实部随频率变化情况  
及局部放大图  
Fig. 5 Variation of group velocity dispersion and real part of effective refractive index with frequency and partial enlarged view of  $TE_1$  mode

(11)式除了适用于金属铜外,对于其他常见的非磁性金属,如金、银和铝等也是可行的。表1为几

种金属在频率为 1 THz 计算所得的  $n_{\text{eff}}$  和相对误差。根据文献[32],这些金属在太赫兹波段都具有较大的相对介电常数,满足理论推导过程中的假设,因此在使用类似金属的情况下,结果具有相似的误差表现。

表 1 不同金属的计算结果

Table 1 Calculation results of different metals

Metal	$n_{\text{eff}}$	$\Delta_R$	$\Delta_I$
Copper	$0.5532577949 + 0.0003129769633j$	$1.99 \times 10^{-7}$	$7.63 \times 10^{-4}$
Silver	$0.5532759638 + 0.0004017180656j$	$1.32 \times 10^{-7}$	$7.99 \times 10^{-4}$
Gold	$0.5533629323 + 0.0005066739629j$	$1.33 \times 10^{-7}$	$9.41 \times 10^{-4}$
Aluminum	$0.5533733957 + 0.0005720576528j$	$4.99 \times 10^{-8}$	$9.59 \times 10^{-4}$

在(7)式之后的推导中,采用的一阶泰勒展开会在一定程度上增加最终理论结果的误差。考虑更多

的阶次可能会减小近似的误差,但推导得到的(11)式具有比较简洁的形式,式中包含的相关参数及其

物理意义也更明显。另外,值得说明的是,虽然理论推导过程中的近似是基于金属相对介电常数在 THz 范围内的特点,但(11)式在中红外波段也表现出良好的精确度,表明推导公式具有比较广泛的适用频率范围。

## 5 结 论

在使用真实金属参数的情况下,推导出一个形式简单、可用于描述金属 PPWG 中  $TE_1$  模式有效折射率的近似表达式。通过对比理论推导和模拟仿真的结果,表明该近似表达式在 THz 范围内可以准确地描述有效折射率的变化情况。进一步对误差进行分析,验证该表达式在 THz 和中红外范围,以及不同的几何条件下都具有良好的精度。该近似表达式对 THz 和中红外波段中金属 PPWG 的研究和应用或有帮助。

## 参 考 文 献

- [1] Karl N, McKinney R W, Monnai Y, et al. Frequency-division multiplexing in the terahertz range using a leaky-wave antenna[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(11): 717-720.
- [2] Awad M M, Cheville R A. Transmission terahertz waveguide-based imaging below the diffraction limit [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86 (22): 221107.
- [3] Li J W, Nallappan K, Guerboukha H, et al. 3D printed hollow core terahertz Bragg waveguides with defect layers for surface sensing applications [J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 4126-4144.
- [4] Gallot G, Jamison S P, McGowan R W, et al. Terahertz waveguides [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2000, 17(5): 851-863.
- [5] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(2): 97-105.
- [6] Liang L, Wen L, Jiang C P, et al. Research progress of terahertz sensor based on artificial microstructure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(2): 0203001.  
梁丽, 文龙, 蒋春萍, 等. 人工微结构太赫兹传感器的研究进展 [J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(2): 0203001.
- [7] Wang K L, Mittleman D M. Metal wires for terahertz wave guiding [J]. *Nature*, 2004, 432 (7015): 376-379.
- [8] Cao Q, Jahns J. Azimuthally polarized surface plasmons as effective terahertz waveguides [J]. *Optics Express*, 2005, 13(2): 511-518.
- [9] Zhong R B, Liu W H, Zhou J, et al. Surface plasmon wave propagation along single metal wire [J]. *Chinese Physics B*, 2012, 21(11): 117303.
- [10] Huang Y X, Zhang L, Yin H, et al. Graphene-coated nanowires with a drop-shaped cross section for 10 nm confinement and 1 mm propagation [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(11): 2078-2081.
- [11] Teng D, Wang K, Li Z, et al. Graphene-coated elliptical nanowires for low loss subwavelength terahertz transmission [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9 (11): 2351.
- [12] Li Y, Zhang H F, Fan T X, et al. Theoretical analysis of double dielectric loaded graphene surface plasmon polariton [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36 (7): 0724001.  
李勇, 张惠芳, 范天馨, 等. 双介质加载石墨烯表面等离子体激元波导的理论分析 [J]. *光学学报*, 2016, 36(7): 0724001.
- [13] Bingham A L, Grischkowsky D R. Terahertz 2-D photonic crystal waveguides [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2008, 18 (7): 428-430.
- [14] Han H, Park H, Cho M, et al. Terahertz pulse propagation in a plastic photonic crystal fiber [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(15): 2634-2636.
- [15] Wang J L, Chen H M. Single-polarization single-mode rhombic-hole terahertz photonic crystal fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(9): 0906002.  
汪静丽, 陈鹤鸣. 菱形空气孔的单一偏振单模太赫兹光子晶体光纤 [J]. *光学学报*, 2014, 34 (9): 0906002.
- [16] Tang X L, Shi Y W, Matsuura Y, et al. Transmission characteristics of terahertz hollow fiber with an absorptive dielectric inner-coating film [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(14): 2231-2233.
- [17] Tang X L, Shi Y W. Characterization of terahertz hollow fiber with an absorptive inner-coating dielectric layer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29 (10): 2681-2685.  
汤晓黎, 石艺尉. 吸收介质膜/金属空芯光纤的太赫兹波传输特性 [J]. *光学学报*, 2009, 29(10): 2681-2685.
- [18] Yu S Y, Zhu X S, Shi Y W. Transmission characteristics of dielectric-coated metallic hollow waveguide at W-band [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0306001.

- 俞舒元, 朱晓松, 石艺尉. W 波段介质金属膜空芯波导的传输特性 [J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0306001.
- [19] Wang K, Cao Q, Zhang H F, et al. Cos-Gaussian modal field of a terahertz rectangular metal waveguide filled with multiple slices of dielectric [J]. Optics Communications, 2018, 417: 57-61.
- [20] D'Auria M, Otter W J, Hazell J, et al. 3-D printed metal-pipe rectangular waveguides [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2015, 5(9): 1339-1349.
- [21] Mendis R, Grischkowsky D. Undistorted guided-wave propagation of subpicosecond terahertz pulses [J]. Optics Letters, 2001, 26(11): 846-848.
- [22] Mendis R, Mittleman D M. An investigation of the lowest-order transverse-electric ( $TE_1$ ) mode of the parallel-plate waveguide for THz pulse propagation [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2009, 26(9): A6-A13.
- [23] Mendis R, Mittleman D M. Comparison of the lowest-order transverse-electric ( $TE_1$ ) and transverse-magnetic (TEM) modes of the parallel-plate waveguide for terahertz pulse applications [J]. Optics Express, 2009, 17(17): 14839-14850.
- [24] Astley V, Reichel K S, Jones J A, et al. Terahertz multichannel microfluidic sensor based on parallel-plate waveguide resonant cavities [J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(23): 231108.
- [25] Mendis R, Mittleman D M. Multifaceted terahertz applications of parallel-plate waveguide:  $TE_1$  mode [J]. Electronics Letters, 2010, 46(26): S40-S44.
- [26] Astley V, McCracken B, Mendis R, et al. Analysis of rectangular resonant cavities in terahertz parallel-plate waveguides [J]. Optics Letters, 2011, 36(8): 1452-1454.
- [27] Zhu Y M, Sun Q Y, Xu J M, et al. Transition from surface cavity mode to cavity mode in deep-grooved parallel plate waveguide [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 23(4): 16419942.
- [28] Ma J J, Karl N J, Bretin S, et al. Frequency-division multiplexer and demultiplexer for terahertz wireless links [J]. Nature Communications, 2017, 8(1): 72.
- [29] Pozar D M. Microwave engineering [M]. New York: John Wiley & Sons, 2009.
- [30] Shen P C, Cao Q, Bai L H, et al. Concise relation among the effective index of the  $TE_{01}$  mode of the metal rectangular waveguide and those of the  $TE_1$  and  $TM_0$  modes of the metal parallel-plate waveguide for terahertz waves [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2018, 35(5): 1173-1178.
- [31] Yang J, Lin G W, Niu Y P, et al. Propagation properties of the terahertz waveguide using a metallic nanoslit narrower than skin depth [J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(7): 072401.
- [32] Ordal M A, Bell R J, Alexander R W, et al. Optical properties of fourteen metals in the infrared and far infrared: Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Mo, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, V, and W [J]. Applied Optics, 1985, 24(24): 4493-4499.
- [33] Gao H, Cao Q, Teng D, et al. Perturbative solution for terahertz two-wire metallic waveguides with different radii [J]. Optics Express, 2015, 23(21): 27457-27473.