

doi:10.3788/gzxb20174603.0323001

# 一种基于不平坦基底结构的混合等离子体波导

刘燕, 钟任斌, 丁红, 刘盛纲

(电子科技大学 太赫兹协同创新中心, 成都 610054)

**摘要:**提出了一种工作于太赫兹波段的、基于半圆柱形“不平坦”InSb 基底结构的混合等离子体波导. 分析了半导体材料 InSb 的相对介电常量随工作频率的变化特性, 重点研究了该混合波导以及两种不同形变结构的有效模场面积、传播长度、品质因数、能量分布等随波导工作频率、波导尺寸的变化情况. 结果表明, 本文提出的“不平坦”基底结构波导可以达到与传统结构几乎相同的传播长度, 有效模场面积较传统结构减小了一个数量级以上, 具有非常强的模场约束性, 适合于太赫兹频段高密度集成电路中的应用.

**关键词:**物理电子学; 表面等离子体波; 太赫兹; 波导; 传播长度; 有效模场面积

中图分类号: O43

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)03-0323001-7

## A Kind of Hybrid Surface Plasmonic Waveguide Based on Un-flat Substrate Structure

LIU Yan, ZHONG Ren-bin, DING Hong, LIU Sheng-gang

(Terahertz Research Centre, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, 610054, China)

**Abstract:** A kind of hybrid surface plasmonic waveguide working in the terahertz frequency range and based on un-flat substrate structure was proposed. The relative permittivity of InSb changed with the working frequency was investigated. The mode properties of the proposed structure and two other un-flat substrate structures, such as the effective mode area, propagation length, figure of merit and energy ratio, were investigated in detail by varying with the working frequency and geometrical parameters. The results show that the proposed structure can reach the same propagation length with the traditional structure, while the mode area of the proposed structure is smaller by more than an order of magnitude compared with that of the traditional hybrid waveguide, which indicates stronger mode confinement. The proposed waveguide satisfies the requirement of the application in high density circuits in the terahertz range.

**Key words:** Physical electronics; Surface plasmons; Terahertz; Waveguide; Propagation length; Effective mode area

**OCIS Codes:** 230.7370; 240.6680; 350.6980; 060.3510

## 0 引言

表面等离子体激元(Surface Plasmon Polaritons, SPPs)是一种存在于导体/半导体与介质界面的电荷集体振荡现象,它能够突破衍射极限实现亚波长量级的模场限制.以此为基础,人们提出了一系列等离子体

**基金项目:**国家自然科学基金(Nos. 61231005, 11305030)和国家重点研究发展计划(No. 2014CB339801)资助

**第一作者:**刘燕(1990-),女,博士研究生,主要研究方向为新型太赫兹波导器件. Email: yanliu0923@163.com

**导师:**刘盛纲(1933-),男,院士,教授,博士,主要研究方向为电子回旋脉塞、自由激光、微波电子学、微波等离子体电子学及太赫兹科学技术等. Email: liusg@uestc.edu.cn

**通讯作者:**钟任斌(1973-),女,副教授,博士,主要研究方向为太赫兹传输以及相关元器件. Email: rbzhong@uestc.edu.cn

**收稿日期:**2016-08-19; **录用日期:**2016-11-24

<http://www.photon.ac.cn>

波导结构,如金属-介质-金属结构<sup>[1-2]</sup>、介质-金属-介质结构<sup>[3]</sup>、金属楔型结构<sup>[4]</sup>、金属 V 型槽结构<sup>[5]</sup>等,在激光光学、高密度集成电路等方面有着广泛的应用。

2008 年, X. Zhang 等提出一种混合等离子体波导<sup>[6]</sup>,将圆柱形硅纳米线嵌入二氧化硅薄膜覆盖的银金属平板上,由于波导中存在的 SPPs 模式与介质波导模式的耦合效应,使该结构相比于普通 SPPs 波导具有更强的模场局域性、更低的传输损耗且易于集成,2009 年该研究组在实验上实现了亚微米尺寸的超小激光器设计<sup>[7]</sup>. 此后一系列基于 SPPs 的硅基混合波导结构被提出<sup>[8-13]</sup>,但这些研究大多集中在红外波段和可见光波段. 2012 年, X. Y. He 等人利用半导体材料碲化铟(InSb)实现了该结构在太赫兹波段(Terahertz, THz)的应用<sup>[14]</sup>. 除 InSb 之外,重掺杂 n-Si、n-GaAs、多孔 Si、InN 等材料均可应用于太赫兹波段 SPPs 波导结构。

为了进一步提高波导结构对电磁模式的局域性,本文提出一种基于“不平坦”半导体基底表面的新型混合等离子体波导结构,利用有限元软件 COMSOL 深入分析了工作在不同频率时,混合波导结构尺寸对传播长度、有效模场面积、品质因数、电磁能量分布率等特性的影响。

## 1 物理模型

本文在传统混合等离子体波导(图 1(a))基础上,提出了一种基于“不平坦”半导体基底的混合等离子体结构. 在一个或多个半圆柱形凸起的半导体基底 InSb 表面涂覆厚度为  $g$  的低介电常量材料  $\text{SiO}_2$  间隙层(图 1(b)、(c)),并将一半径为  $R$  的高介电常量材料 Si 纤芯放置于  $\text{SiO}_2$  层表面上方. 由于半导体与介质界面作用产生的等离子模式与高低介电常量介质界面的介质波导模式间的耦合作用,使混合模式在低介电常量材料  $\text{SiO}_2$  层具有显著的模场增强效应,如图 1(d)~(f)所示。

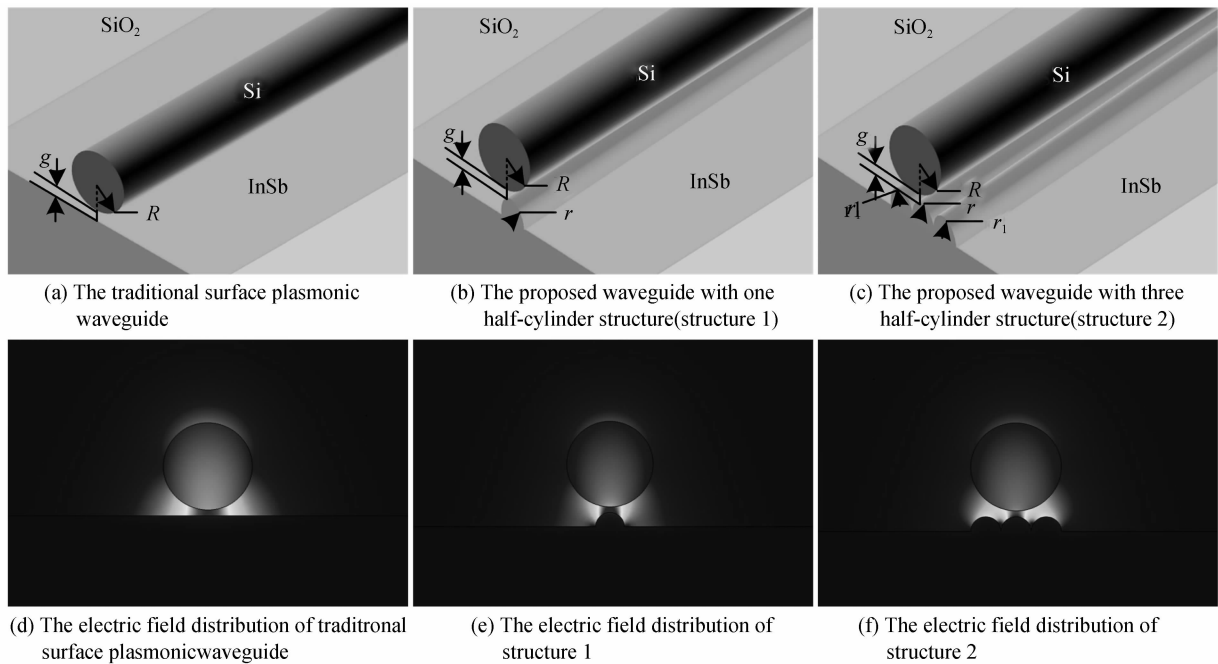


图 1 三种等离子体波导结构的三维示意图与其相对应的场分布图,模拟计算参量均为: $R=30 \mu\text{m}$ ,  
 $g=4 \mu\text{m}$ , $r=r_1=10 \mu\text{m}$ , $f=1 \text{ THz}$

Fig. 1 The 3D schematic of three traditional surface plasmonic waveguides and the corresponding electric field distributions with the simulation parameters:  $R=30 \mu\text{m}$ ,  $g=4 \mu\text{m}$ ,  $r=r_1=10 \mu\text{m}$ ,  $f=1 \text{ THz}$

Si、 $\text{SiO}_2$  的相对介电常量分别取 12.25、2.25,而 InSb 的相对介电常量可采用 Drude 模型来表征为<sup>[15]</sup>

$$\epsilon(\omega, T) = \epsilon_{\infty} \left( 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \tau^{-2}} + \frac{i\omega_p^2 \tau^{-1}}{\omega(\omega^2 + \tau^{-2})} \right) \quad (1)$$

式中,外界电磁频率趋于无限大时 InSb 相对介电常量  $\epsilon_{\infty} = 15.75$ ,  $\omega$  为入射电磁波角频率,  $\tau$  为弛豫时间,它与载流子迁移率  $\mu$  之间的关系可表述为  $\mu = \tau e / m^*$ ,  $m^* = 0.014m_e$  为 InSb 中电子有效质量,  $e$  为元电荷电量<sup>[16]</sup>. 等离子体角频率  $\omega_p$  可定义为

$$\omega_p^2 = \frac{Ne^2}{\epsilon_0 \epsilon_\infty m^*} \quad (2)$$

式中,  $N=5.76 \times 10^{14} T^{1.5} e^{-0.129/k_B T}$  为载流子浓度<sup>[17]</sup>. 当温度  $T=300\text{K}$  时, 载流子迁移率和载流子浓度对应数值分别为:  $\mu=7.7 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ <sup>[18]</sup>,  $N=2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . 由以上分析可知, InSb 的相对介电常量主要由载流子浓度、载流子迁移率决定, 而这两者又可通过改变温度、化学掺杂等方式进行调节. InSb 的相对介电常量随频率变化特性如图 2 所示, 它的实部为负数、虚部为正数, 随工作频率的升高, 两者的绝对值越来越小且逐渐趋近于 0, 其等离子体频率  $\omega_p/2\pi=2.58 \text{ THz}$  恰好位于太赫兹频段. 因此, 半导体材料 InSb 在 THz 频段与金属材料在可见光到紫外波段, 拥有十分相似的性质. 类似于光滑金属表面在可见光到紫外波段可实现局域 SPPs 共振特性, 半导体材料 InSb 亦可在 THz 波段实现 SPPs 共振以支持 THz 频段 SPPs 的高效传输<sup>[19-20]</sup>.

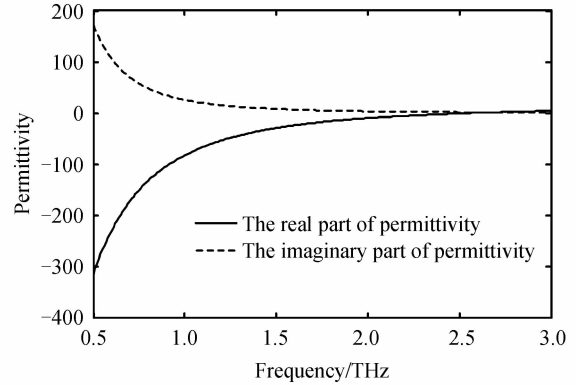


图 2 InSb 的相对介电常量的实部和虚部随工作频率的变化  
Fig. 2 The real part and imaginary part of permittivity of InSb changed with the working frequency

## 2 数值仿真与结果分析

### 2.1 工作频率对混合等离子体波导特性影响分析

为研究分析工作频率对混合等离子体波导特性的影响, 选择固定波导尺寸: Si 圆柱芯半径  $R=30 \mu\text{m}$ ,  $\text{SiO}_2$  层间隙厚度  $g=4 \mu\text{m}$ , 半导体基底 InSb 的半圆柱形凸起半径  $r=r_1$  分别取  $10 \mu\text{m}$ 、 $20 \mu\text{m}$ 、 $30 \mu\text{m}$  三个值, 以分析不同尺寸的基底“不平整”凸起对混合波导传输特性的影响, 如传播长度  $L_m$ , 有效模场面积  $A_m$ , 以及品质因数 (Figure of Merit, FOMs), 分别描述为

$$L_m [\mu\text{m}] = \lambda / 4\pi \text{Im}(N_{\text{eff}}) \quad (3)$$

$$A_m = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{P}(x, y) dx dy}{\max[\mathbf{P}(x, y)]} \quad (4)$$

$$\text{FOMs} = \frac{1}{l_m \times \sqrt{A_m}} \quad (5)$$

式中, 混合波导自由空间波数  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ , 有效折射率  $N_{\text{eff}} = k/k_0$ ,  $\text{Im}(N_{\text{eff}})$  则为有效折射率虚部, 能流密度  $\mathbf{P}(x, y) = \mathbf{E}(x, y) \times \mathbf{H}(x, y)$ . 此外, 研究了能量分布率即 Si 层、 $\text{SiO}_2$  层所分布能量占总能量的比率, 以说明结构及参量变化导致的电磁场能量分布变化情况.

图 3 是有效模场面积在  $0.5 \sim 2 \text{ THz}$  范围内的变化情况. 随频率升高, 三种混合结构的有效模场面积值均逐渐减小, 混合波导结构对电磁场约束性增强. 当工作频率较低时, 如图 3 中  $0.5 \sim 0.8 \text{ THz}$  范围内, 有效模场面积迅速减小; 而在较高频段, 如图 3 中大于  $0.8 \text{ THz}$  的频段, 有效模场面积保持一个较小数值且变化缓慢. 这就意味着, 混合结构工作在较高频段时, 拥有良好的局域特性. 在某一固定频率下, “不平整”基底结构 1 的有效模场面积约是传统结构的  $1/2$ , 且由图中可以看出, InSb 基底“不平整”凸起半径  $r$  越小, 该波导结构的有效模场面积越小, 约束性越强. 改进后的“不平整”结构 2 对比结构 1, 在尺寸参量完全相同时, 由于增加的“不平整”凸

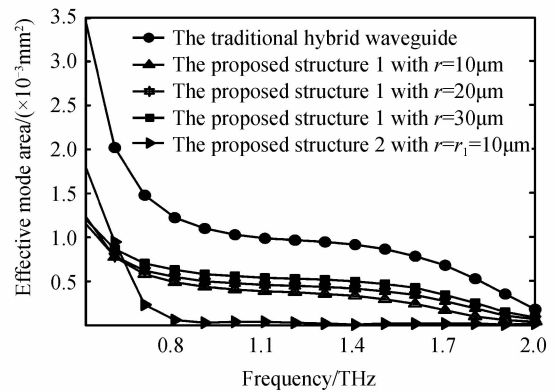


图 3 三种混合结构波导有效模场面积随工作频率的变化  
Fig. 3 The effective mode area of three kinds of hybrid waveguides changed with the working frequency

起结构使得波导对电磁场的横向约束能力提高,有效模场面积值约减小了一个数量级以上,对混合模式的局域性得到大大增强.

图4为三种混合SPPs波导工作在不同频率时传播长度的变化情况.波导工作于一个较宽的低频带范围内(0.5~1.6 THz),传播长度的变化趋于平坦,当频率大于1.6 THz时,波导传播长度迅速减小.这主要是由于随工作频率增加,波导结构对场的约束性增强,分布在InSb凸起结构中的能量越多,传输损耗随之增加.当工作在某一固定频率时,三种波导结构在上述提到的较宽低频段范围内的传播长度非常接近.

可以利用品质因数 FOMs 衡量波导的约束性和传播长度,如图4所示.可以看出,混合结构2的品质因数几乎是同尺寸下结构1的5倍左右(0.8~1.6 THz).综合以上数据看来,本文所提出的混合SPPs结构波导2相对于传统的混合结构波导、单一凸起的不平坦基底结构波导具有非常明显的传输特性优势.

### 2.2 结构参量对混合等离子体波导特性影响分析

由2.1节分析可知,当工作于0.8 THz~1.6 THz时,本文提出的“不平坦”基底结构相对于传统结构在不增加传输损耗的前提下,具有非常好的模场约束性.本节主要研究工作在固定频率1 THz时,“不平坦”基底结构波导的传输特性随波导结构尺寸包括“不平坦”凸起半径 $r$ 、介质纤芯半径 $R$ 和纤芯与半导体基底

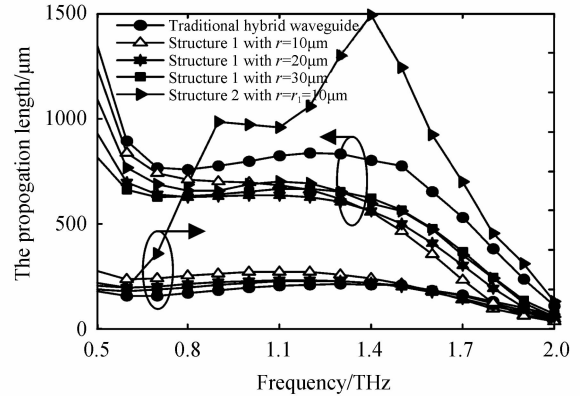


图4 三种混合结构波导品质因数和传输长度随工作频率的变化  
Fig. 4 The propagation length and FOM of three kinds of hybrid waveguides changed with the working frequency

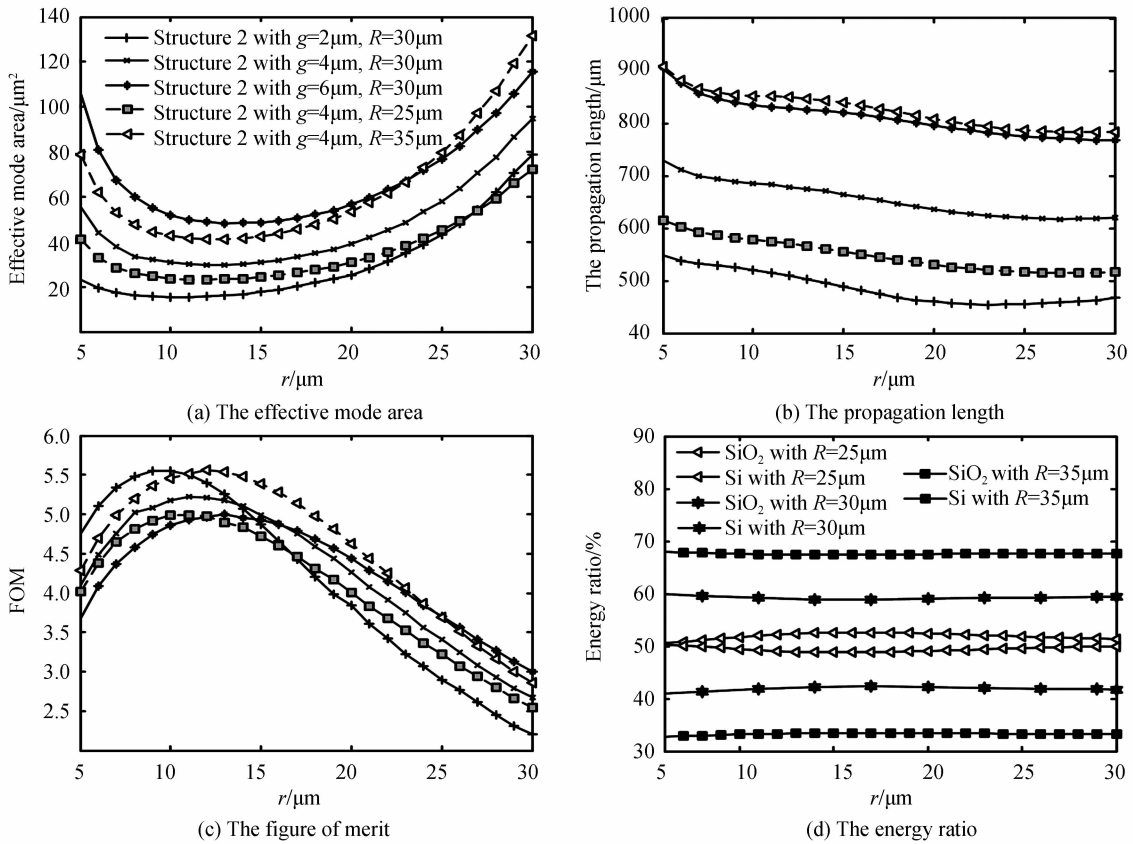


图5 混合等离子体波导结构2的传输特性随“不平坦”半圆柱形凸起半径 $r$ 、介质纤芯半径 $R$ 和纤芯与半导体基底间距 $g$ 三种参量的变化  
Fig. 5 The propagation properties of the proposed structure 2 changed with the radius  $r$  of the half-cylinder structure, the radius  $R$  of the dielectric cylindrical fiber and the separation distance  $g$  of the dielectric fiber with the semiconductor substrate

间间距  $g$  三种参量的变化情况.

首先研究混合波导结构 2 的有效模场面积随波导尺寸参量的变化情况,如图 5(a)所示.由图中可以看到随  $r$  的增加,有效模场面积先减小后增大,即波导结构的“不平整”凸起半径增大到某一值时,拥有最小的有效模场面积,波导对混合模场的约束性最强;取相同“不平整”凸起半径  $r$  和固定 Si 纤芯半径  $R=30\ \mu\text{m}$ ,介质纤芯与半导体基底间的不同间隙  $g$  分别为  $2\ \mu\text{m}$ 、 $4\ \mu\text{m}$ 、 $6\ \mu\text{m}$  时,可以发现间隙越大,混合模式的有效模场面积越大,表明结构的局域性越差;而对于相同“不平整”凸起半径  $r$  和固定间隙  $g=4\ \mu\text{m}$ ,Si 纤芯半径  $R$  分别取  $25\ \mu\text{m}$ 、 $30\ \mu\text{m}$ 、 $35\ \mu\text{m}$  时,有效模场面积的值逐渐增大,即混合波导对传输模式的局域性越来越弱.这主要是由于随 Si 纤芯半径的增加,  $\text{SiO}_2$  层中的能量分布越来越少,更多的能量分布于 Si 纤芯中如图 5(d)所示,也就意味着随纤芯半径增大,波导的传输模式逐渐由 SPPs 模式向波导模式转换.

接下来研究传播长度随波导结构尺寸的变化情况.在图 5(b)中可以看到,随“不平整”凸起半径  $r$  增大,传播长度先逐渐减小后略有增大,与图 5(a)中有效模场面积的变化趋势保持一致;在波导其余尺寸固定的情况下,纤芯半径  $R$  越大,混合波导结构 2 中的传播长度越大;当波导其余尺寸固定时,间隙层  $g$  越小,波导的传播长度越小,这主要是因为: $g$  越小波导对传输模式的局域性越强,分布在半导体基底中的能量较多,而传输损耗主要来源于 InSb 基底的耗散.

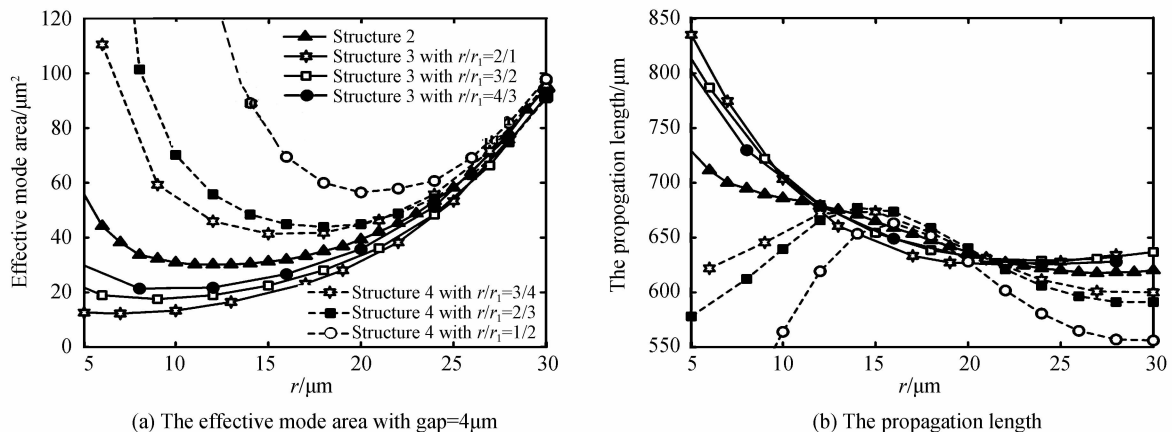
对比图 5(a)、(b)结合上文分析,可以看出模场约束性与传播长度存在一种“矛盾”关系,为了综合衡量几种结构的局域性和传播长度,在图 5(c)给出了品质因数的变化情况.由图中可以看出,随半圆柱形不平整凸起半径  $r$  增加,波导的品质因数先增大后减小,对于几种不同参量情况下的波导结构,当凸起半径  $r$  变化于  $10\ \mu\text{m}$  到  $15\ \mu\text{m}$  之间时,品质因数取得最大值.

### 2.3 结构形变对混合等离子体波导特性的影响分析

在研究了波导参量和工作频率对混合结构传输特性的影响以后,考虑到实际加工过程中波导结构可能存在着一定程度的形变,本节对波导工作在固定频率  $1\ \text{THz}$  时,围绕“不平整”基底结构大小不均匀的情况作了分析:一种是三个“不平整”半圆柱形凸起结构中间大两边小(即  $r > r_1$ ),称之为形变结构 3;另外一种则相反,“不平整”半圆柱形凸起结构中间小两边大(即  $r < r_1$ ),称之为形变结构 4.以结构 2 作为对比,固定 Si 纤芯半径  $R=30\ \mu\text{m}$ ,间隙  $g=4\ \mu\text{m}$ ,研究两种形变结构的有效模场面积、传播长度、品质因数、能量分布率随“不平整”凸起半径  $r$  的变化情况.

图 6(a)为形变结构 3、4 的有效模场面积.可以看到:在  $5\ \mu\text{m} < r < 13\ \mu\text{m}$  范围内,对比形变结构 3、4 与混合结构 2,在其余相关尺寸相同的条件下,形变结构 3 具有更好的模式约束性,这主要是由于相对于其它两种结构,结构 3 的  $\text{SiO}_2$  层(低介电常量材料间隙区域)拥有更高的能量分布率,这一点可以由能量分布图(图 6(d))中看出.且对于固定半径  $r$  值, $r$  与  $r_1$  的比值越大,有效模场面积越小;而当  $r > 13\ \mu\text{m}$  时,几种形变结构的有效模场面积值与混合结构 2 越来越接近.这主要是因为波导中心处“不平整”凸起半径增大到接近介质纤芯半径时,混合模场主要集中于两者的间隙区域,波导两侧凸起结构对场的影响相对较弱.

传播长度随“不平整”凸起半径  $r$  的变化情况如图 6(b)所示,尺寸相同情况下,两种形变结构除在半径较小时( $r < 13\ \mu\text{m}$ )与混合结构 2 值有较大差距外,随半径增大传播长度非常接近.图 6(c)给出了品质因数的变化情况.由图中可以看出,随半圆柱形“不平整”凸起半径  $r$  增大,波导的品质因数先增加后减小.当



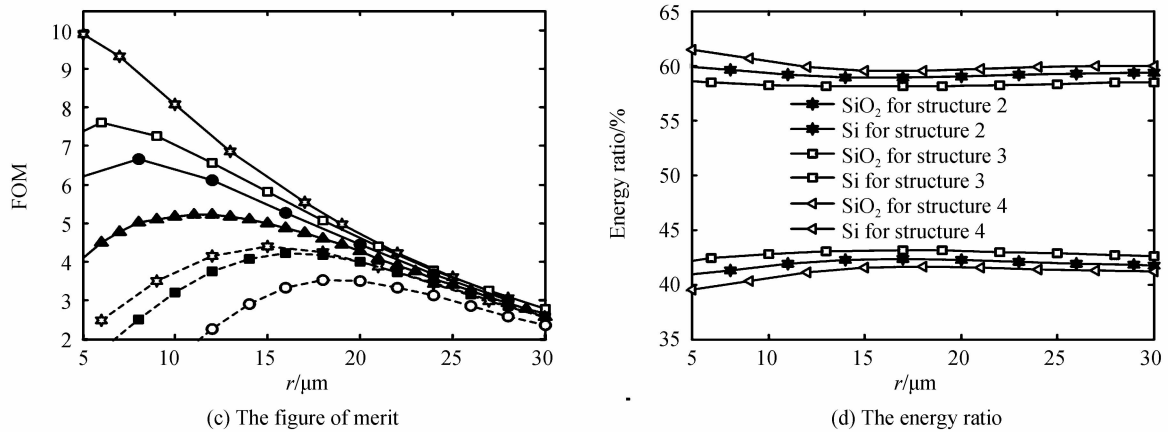


图 6 混合等离子体波导形变结构 3、4 传输特性随“不平坦”半圆柱形凸起半径  $r$  的变化

Fig. 6 The propagation properties of the proposed structure 3 and 4 changed with the radius  $r$  of the half-cylinder structure.  $r < 13 \mu\text{m}$  时,  $r$  值越小形变结构 3 的优势越明显; 而随之半径值不断增加, 几种结构品质因数值的区别越来越小. 当不平坦凸起结构的半径值较大 ( $r > 13 \mu\text{m}$ ) 时, 加工形变引起的波导传输特性的变化很小, 几乎可以忽略不计.

此外, 对于  $r$  与  $r_1$  不同的比值, 当中心处“不平坦”凸起半径较小时 ( $r < 13 \mu\text{m}$ ), 保持间隙一定, 随着比值  $r/r_1$  的增大, 波导的有效模场面积逐渐减小 (图 6(a)), 传输长度逐渐增加 (图 6(b)), 品质因数随之提升 (图 6(c)), 这说明随着比值  $r/r_1$  的增大, 波导的传输性能有所提高, 且注意到波导在有效模场面积与传输长度的优势变化随着比值的增大越来越不明显, 说明比值无限增大并不能有效提高波导性能, 甚至会导致波导性能的减弱 (如临界状态  $r/r_1$  无限大, 回归到结构 1 的状态). 而当  $r > 13 \mu\text{m}$  时, 随着  $r$  的增大波导的传输性能越来越接近, 品质因数趋于某一相同值. 另一方面, 在图 6(c) 中, 对于一组固定的  $r/r_1$  比值, 随着“不平坦”凸起半径  $r$  的增大, 品质因数先增大后减小, 因而波导的传输性能在某一固定值  $r$  处可取得最优.

### 3 结论

本文提出的基于半圆柱形“不平坦”结构基底的混合等离子体波导, 相较于传统结构波导的传输特性, 在不增加传输损耗的前提下, 具有非常好的模场约束性, 有效模场面积较传统结构约减小了一个数量级以上, 且随工作频率的增大, 模式约束性逐渐增强, 在  $0.8 \sim 1.6 \text{ THz}$  范围内可取得近 5 倍于传统结构的波导品质因数. 考虑到实际加工过程中可能产生的形变, 针对“不平坦”基底结构可能发生的两种形变结构做了分析. 结果发现半圆柱形凸起中间大两边小时, 可进一步提高波导对混合模式的局域性, 且当半径  $r$  较小时,  $r$  与  $r_1$  的比值越大, 结构的约束性越好; 当  $r > 13 \mu\text{m}$  时, 形变结构的传输特性与混合结构 2 非常接近. 综上所述, 本文所提出的混合 SPPs 波导, 在保持一定传播长度的前提下, 具有非常好的模场约束性和传输特性, 适合于太赫兹频段高密度集成电路中的应用.

#### 参考文献

- [1] FENG Ning-ning, BRONGERSMA M L, DAL NEGRO L. Metal dielectric slot-waveguide structures for the propagation of surface plasmon polaritons at  $1.55 \mu\text{m}$ [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2007, **43**(6): 479-485.
- [2] PILE D F P, OGAWA T, GRAMOTNEV D K, *et al.* Two-dimensionally localized modes of a nanoscale gap plasmon waveguide[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, **87**(26): 261114.
- [3] BERINI P. Plasmon-polariton waves guided by thin lossy metal films of finite width: Bound modes of asymmetric structures[J]. *Physical Review B*, 2000, **61**(15): 10484-10503.
- [4] BOLTASSEVA A, VOLKOV V S, NIELSEN R B, *et al.* Triangular metal wedges for subwavelength plasmon-polariton guiding at telecom wavelengths[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(8): 5252-5260.
- [5] BOZHEVOLNV S I, VOLKOV V S, DEVAUX E, *et al.* Channel plasmon-polariton guiding by subwavelength metal grooves[J]. *Physical Review Letters*, 2005, **95**(4): 046802.
- [6] OULTON R F, SORGER V J, BARTAL G, *et al.* A hybrid plasmonic waveguide for subwavelength confinement and long range propagation[J]. *Nature Photonics*, 2008, **2**(8): 496-500.
- [7] OULTON R F, SORGER V J, ZENTGRAF T, *et al.* Plasmon lasers at deep subwavelength scale[J]. *Nature*, 2009, **461**(7264): 629-632.

- [8] ALAM M Z, AITCHISON J S, MOJAHEDI M. Compact and silicon-on-insulator-compatible hybrid plasmonic TE-pass polarizer[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(1): 55-57.
- [9] BIAN Yu-sheng, GONG Qi-huang. Deep-subwavelength light confinement and transport in hybrid dielectric-loaded metal wedges[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, **8**(4): 549-561.
- [10] ZHENG Kai, ZHENG Xin, SONG Zu-xun. Analysis of convex rib hybrid surface plasmon waveguide with ultralong propagation distance and tight mode confinement[J]. *Journal of Nanophotonics*, 2016, **10**(1): 016005.
- [11] CHANG Ken-wei, HUANG Chia-chien. Ultrashort broadband polarization beam splitter based on a combined hybrid plasmonic waveguide[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 19609.
- [12] LI Zhi-quan, FENG Si-yu, SUN Yu-chao, *et al.* Design of a silicon-based slot surface plasmonic waveguide[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(2): 0213002.  
李志全, 冯思远, 孙宇超, 等. 一种硅基金属狭缝表面等离子体波导的设计[J]. 光子学报, 2014, **43**(2): 0213002.
- [13] DING Li, QIN Jin, XU Kai, *et al.* Long range hybrid tube-wedge plasmonic waveguide with extreme light confinement and good fabrication error tolerance[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(4): 3432-3440.
- [14] HE Xiao-yong, WANG Qi-jie, YU S F. Numerical study of gain-assisted terahertz hybrid plasmonic waveguide[J]. *Plasmonics*, 2012, **7**(3): 571-577.
- [15] GOMEZ R J, JANKE C, BOLIVAR P, *et al.* Transmission of THz radiation through InSb gratings of subwavelength apertures[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(3): 847-859.
- [16] BHATT S R J, BHATT P, DESHMUKH P, *et al.* Resonant terahertz InSb waveguide device for sensing polymers [J]. *Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves*, 2016, **8**(37): 795-804.
- [17] SHOURIE R J, BHATT P, SURDI H, *et al.* Bio-interfacing of resonant transmission characteristics of InSb-based terahertz plasmonic waveguide[J]. *Biomaterials*, 2015, **1**(2): 305-308.
- [18] PARTHASARATHY R, BYKHOVSKI A, GELMONT B, *et al.* Enhanced coupling of subterahertz radiation with semiconductor periodic slot arrays[J]. *Physical Review Letters*, 2007, **98**(15): 153906.
- [19] GIANNINI V, BERRIER A, MAIER S A, *et al.* Scattering efficiency and near field enhancement of active semiconductor plasmonic antennas at terahertz frequencies[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(3): 2797-2807.
- [20] LIU Sen-bo, FU Hao, LI Xiao-long, *et al.* Characteristics of polymer waveguide sensor based on local surface plasmon resonance[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, **37**(1): 112-116.  
刘森波, 付浩, 李小龙, 等. 基于局域表面等离子体共振效应的聚合物波导传感器特性研究[J]. 发光学报, 2016, **37**(1): 112-116.