

# 金属丝微结构光纤的研究进展

严皓哲 戴能利 彭景刚 蒋作文 李海清 杨旅云 李进延\*

(华中科技大学武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 金属丝微结构光纤是指具有沿石英光纤轴向均匀分布着直径为纳米量级的金属丝的光纤。这种特殊结构的光纤具有传输光波以及表面等离子体波的特性,潜在用途十分广泛。介绍了金属丝微结构光纤的性质、制备方法及其研究进展。

**关键词** 光纤光学;金属丝微结构光纤;表面等离子体;激发波长;红外传输

**中图分类号** TN25      **文献标识码** A      **doi**: 10.3788/LOP48.110605

## Progress of Metallic Core Microstructured Fibers

Yan Haozhe Dai Nengli Peng Jinggang Jiang Zuowen Li Haiqing  
Yang Lüyun Li Jinyan

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology,  
Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract** Homotaxial wires with nanoscale diameter embedded in quartz glass fibers constitute the metallic core microstructured fibers. The fibers with special structure have the characteristics of transmitting lights and surface plasma waves which enable a wide range of potential uses. Here the properties, preparation methods, and research progress of metallic core microstructured fibers are reviewed.

**Key words** fiber optics; metallic core microstructured fibers; surface plasmon; excitation wavelength; infrared transmission

**OCIS codes** 060.2310; 060.5295; 060.2280; 240.6680; 250.5403

## 1 引言

以光纤通信为主要支柱的下一代互联网接入技术已经彻底改变了信息的传输方式。光纤作为光纤通信技术的信息载体,近年来得到了迅猛的发展。各种各样的光纤已广泛应用于通信、高功率激光器、图像传输和传感器等多个领域。世界上普遍采用的石英光纤,具有损耗低、传输频带宽、结构简单和抗干扰能力强等特点。随着纳米光电子学的发展,光电子器件的集成度越来越高,光电子集成芯片的尺寸越来越小。目前电子电路的尺寸已经发展到 100 nm 以下,而传统光纤的尺寸一般都在微米量级,两者尺寸差别的悬殊使其无法兼容。由于光学衍射极限的存在<sup>[1]</sup>,当光纤的直径减小到跟波长相当量级时,光会出现衍射现象,损耗急剧增大,造成光波无法在其中传输。传统光纤的局限性使其无法应用于纳米光电子集成器件。

金属丝微结构光纤(metallic wire microstructure fiber)是近年来发展起来的新型光纤,它不但是解决上述问题的理想工具,而且还具有许多新颖的光学特性。金属丝微结构光纤可以定义为包含直径为纳米量级的金属丝的一种光纤,其中金属丝沿光纤纵轴均匀分布。改变金属丝的直径、分布位置或者金属的种类可以得到不同的光学特性。从结构上看,金属丝微结构光纤要求包含的金属丝轴向均匀连续,直径在亚波长量级。怎样在石英光纤中得到符合条件的金属丝,是一个很重要的工艺问题。早在 1923 年, G. F. Taylor<sup>[2]</sup>

**收稿日期**: 2011-05-26; **收到修改稿日期**: 2011-07-18; **网络出版日期**: 2011-09-30

**作者简介**: 严皓哲(1989—),男,硕士研究生,主要从事微结构光纤方面的研究。E-mail: shangmoyan@gmail.com

**导师简介**: 杨旅云(1978—),男,博士,副教授,主要从事发光学和光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: luyunyang@gmail.com

\* **通信联系人**。E-mail: ljy@mail.hust.edu.cn

就已经可以制作出微米量级的玻璃包层金属丝,并且指出了可以在玻璃包层中用物理拉制的方法制作金属丝的金属种类,之后人们不断对制作工艺和设备进行改进<sup>[3]</sup>。但早期对金属丝的研究都集中在其电学和热力学方面的性质,而对光学方面的性质并没有过多关注。在金属丝微结构光纤产生之前,人们主要研究的是基于金属薄膜的微结构光纤<sup>[4~9]</sup>,这种光纤是选择性地在光子晶体光纤的空气孔内壁镀金属膜制成,其构成材料与金属丝微结构光纤相同,因此它们的光学性质有很多相似之处。基于金属薄膜微结构光纤的光学性质和应用方面的研究成果,促进了金属丝微结构光纤的研究和发展。当光波在金属丝微结构光纤中传播时,光子被束缚在金属表面,与金属表面的自由电子发生共振,产生沿着金属与电介质分界面上传播的平面电磁波,其振幅随离开分界面的距离按指数衰减,这种平面电磁波就称作表面等离子体波。表面等离子体波是沿着金属与电介质表面传播的,因此具有很强的束缚能力,光载信号可以通过这样的方式直接传递给金属,而金属又是电导体,金属丝微结构光纤的这种特殊结构使它有望解决亚波长量级的光电子互联问题<sup>[10,11]</sup>。

## 2 金属丝微结构光纤的制备方法

金属丝微结构光纤中的金属丝直径在亚波长量级,不同光纤中所包含的金属丝的数量和排列的结构也不同,从而有着不同的特性。制备金属丝微结构光纤的困难在于,要保证金属丝的直径达到纳米量级又要保持轴向方向直径的均匀,同时要实现所需要的排列结构,在需要对称结构时,要保证结构很高的对称性。在常见的金属丝微结构光纤中,一般所用的金属为金、银两种金属,这两种金属中已经检测到了表面等离子体波,其化学性质比较稳定,便于光纤的制备。

在金属丝微结构光纤的研究过程中,发展出了几种制备方法,有堆叠-拉制法(stack-and-draw method)、压力盒法(pressure cell)和拼接法(splicing technology)等,这些方法都有各自的特点。

### 2.1 堆叠-拉制法

堆叠-拉制法是基于光子晶体光纤的堆叠-拉制制备工艺,光子晶体光纤的制备有以下几个步骤:1) 毛细管和玻璃棒的拉制。将石英玻璃管(或者玻璃棒)拉制成外径约为 1 mm 的毛细管(或玻璃棒)。2) 把制好的毛细管或玻璃棒排列成一定的结构。3) 将结构排列好的毛细管插入合适的石英套管中,在 1850 °C~2100 °C 之间进行拉制。通过控制进棒速度和拉制速度,可以得到不同直径的中间体,一般约为几厘米。4) 将得到的中间体再放入新的玻璃套管中进行拉制,最终得到外径约为 125  $\mu\text{m}$  的光子晶体光纤。排列好的毛细管在直径减小到微米量级时,他们的结构并没有发生变化,如图 1 所示<sup>[12]</sup>。

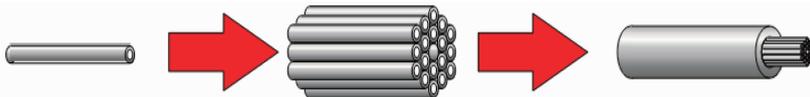


图 1 堆叠-拉制法制备光子晶体光纤

Fig. 1 Schematic of using the stack-and-draw method to prepare a preform

堆叠-拉制法制作金属丝微结构光纤时,在上述步骤 1) 中除了制备需要的中空的毛细管和玻璃棒以外,还要制备金属芯毛细管。在制备金属芯毛细管时,将金属丝放入厚壁的石英玻璃套管中,金属丝直径与套管内径尽量吻合。将得到的金属芯毛细管与中空毛细管以及玻璃棒排列成所需要的结构,然后放入套管中拉制,可以省去中间体的拉制过程而直接拉制出最终的金属丝微结构光纤。较低的拉制温度和较快的拉制速度可以使得到的金属丝微结构光纤的直径更均匀,金属丝连续性更好。

使用堆叠-拉制法可以得到任意长度的金属丝微结构光纤,而且很容易调整光纤的结构,如图 2 所示<sup>[13]</sup>。由于一般用到的金属,如金、银、铜的熔点都约为 1080 °C,而毛细管的拉制温度在 1850 °C 以上,两者相差

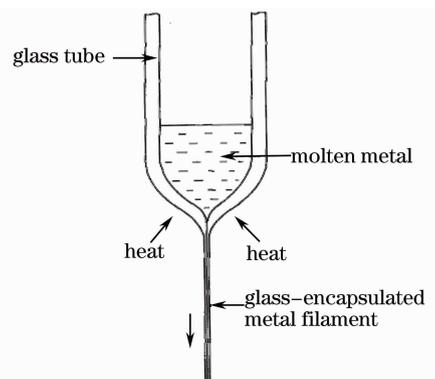


图 2 金属芯毛细管的制备

Fig. 2 Schematic of the preparation of metallic core capillaries

很大,从而增加了实验的难度。J. C. Knight<sup>[14]</sup>小组用这种方法拉制出金属丝直径最小为  $2.1 \mu\text{m}$  的金属丝微结构光纤,所用金属是铜,光纤纤芯是高掺锗的石英棒,周围有 6 根成六边形排列的金属丝,外面还排列了 5 层空气孔。外层空气孔有减小光纤泄露损耗的作用,但对总损耗的减小没有显著效果,因为总损耗由欧姆损耗决定<sup>[15]</sup>。

## 2.2 压力盒法

压力盒法是将熔融的金属用气压压入制备好的光子晶体光纤的空气孔中从而得到金属丝微结构光纤。一般的金属熔点较低是这种方法能够实现的前提。此方法中,只有首先制备出高质量的光子晶体光纤才能得到优良的金属丝微结构光纤。在拉制出光子晶体光纤后,第二步要做的是在光子晶体光纤中选择出需要填充金属的空气孔,这就要使不需要填充的空气孔在光纤的一端塌陷,需要填充的空气孔保持敞开<sup>[16,17]</sup>。空气孔的选择可由下述方法实现。首先,用紫外固化胶(由丙烯酸酯类预聚物、活性单体和紫外线光引发剂构成,在紫外光照射下会固化)滴在光子晶体光纤的一个端面,将紫外光聚焦照射选择填充的空气孔使其内部的胶固化。然后,将这个端面浸入紫外固化胶中,在光纤的相反端面施加真空,使紫外固化胶进入未选择的空气孔中  $8\sim 10 \text{ cm}$ ,经紫外光充分照射后,胶全部固化。切去一小段光纤使选择填充的空气孔重新敞开而未选择的空气孔依然密闭,用加热的方法使光纤的相反端面气孔全部塌陷。其次,用氩气在光纤的胶填充端施压,在光纤的中间部位加热,由于气压作用,选择填充的空气孔在加热部位膨胀,其余小孔则塌陷。将光纤在加热部位切断,切除另一端的胶填充部分,得到的光纤一端气孔全部敞开,另一端选择的空气孔敞开而未选择的空气孔闭合,至此完成了空气孔的选择。其示意图如图 3 所示<sup>[16]</sup>。

接下来将上述光纤放置在如图 4 所示<sup>[12]</sup>的填充装置中,将气孔部分敞开部分塌陷的一端伸入装置中,金属熔化后,用氩气向装置中施加气压并保持适当的时间便可制备出特定结构的金属丝微结构光纤。

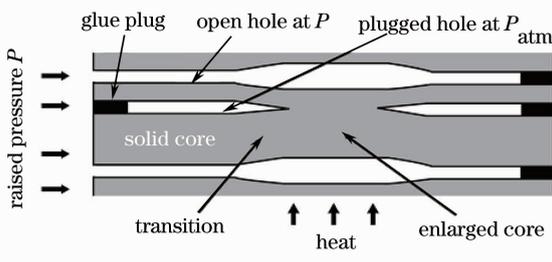


图 3 空气孔的膨胀和塌陷示意图

Fig. 3 Schematic of expansion and collapse of air holes

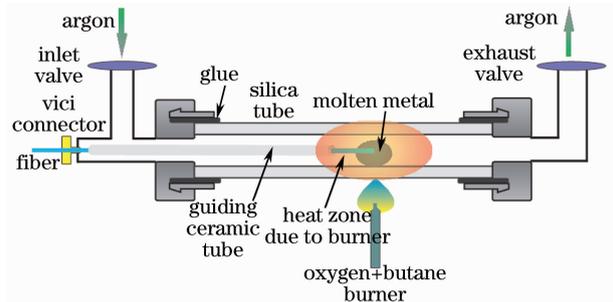


图 4 填充装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of pressure filling equipment

Russell<sup>[18,19]</sup>实验组用压力盒法对光子晶体光纤的空气孔进行全部填充和选择性的填充,得到金属丝直径最小为  $500 \text{ nm}$  的微结构光纤。在偏振保持光子晶体光纤中,选择性地填充了最内层的一个小空气孔,得到的光纤可以做成光纤滤波器和偏振器,也可用于亚波长成像的近场探针。使用压力盒法可以避免向金属丝中引入杂质,得到的金属丝具有很好的连续性,而且实验温度很低,石英玻璃在这个温度下没有软化,避免了熔融金属向玻璃中渗透以及与石英的反应。但是随着需要填充的空气孔的直径越来越小,填充所需的压力就越大,耗费的时间也越长,填充装置所能承受的最大压力有限,存在着爆炸的隐患,这就限制了金属丝直径的进一步缩小。目前,这种方法已被广泛地应用并且在不断地改进。

## 2.3 拼接法

拼接法也是一种将熔融金属填充到制作好的光子晶体光纤从而来制备金属丝微结构光纤的方法。因此,此方法也要求首先制备出优良的光子晶体光纤,另外还需要一根填充毛细管,它的外径和要填充的光子晶体光纤相同,内径根据填充的结构不同而变化,一般为几十微米。将光纤的涂覆层除去,在光纤切割机上切割端面,平整的光纤端面是此方法可以实现的关键。将直径为几十微米的金属线手动放入填充毛细管中,金属线一端距离毛细管端面约  $1 \text{ cm}$ ,这是为了避免在熔接光纤和毛细管时金属线被加热,放入的金属线的体积由需要填充的空气孔的体积决定。其次,将光子晶体光纤和填充毛细管的端面熔接,熔接过程在显微镜下由专门的熔接机完成。接下来把熔接好的光纤放入加热炉中加热,在填充毛细管的另一端施加气压,金属

熔化后就被压入光子晶体光纤的空气孔中,如图 5 所示<sup>[12]</sup>。不在加热区域的金属就会凝固,因此光纤的填充长度由加热区域的长度决定。

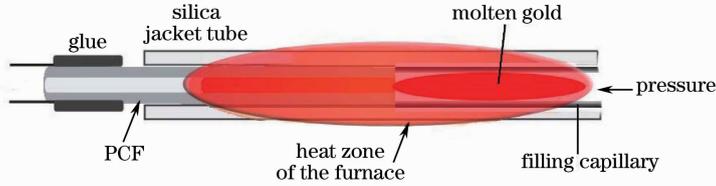


图 5 拼接法示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the splicing technology

如果需要选择填充空气孔,例如只对最内层的空气孔进行填充,则可以缩小填充毛细管的内径到适当的长度。也可以在填充毛细管和光子晶体光纤之间加入一段 mask 毛细管从而实现空气孔的选择,如图 6 所示。

拼接法所能承受的最大压力比压力盒法大得多,没有了爆炸隐患,而且步骤简单。但是拼接法中,切割端面、熔接和放入金属丝等过程都需要很精细的操作。拼接法是一种很有发展潜力的金属丝微结构光纤制作方法。

金属丝微结构光纤的制作方法多种多样,除了上述介绍的以外,目前受到关注的还有电子束平版印刷术 (electron beam lithography)<sup>[20]</sup>、化学合成法 (chemically synthesized method)<sup>[21]</sup>、直接拉制法<sup>[22]</sup>等方法。已有的方法在不断完善之中,新的方法又层出不穷。金属丝微结构光纤的制作方法必将走向工艺化和工业化。

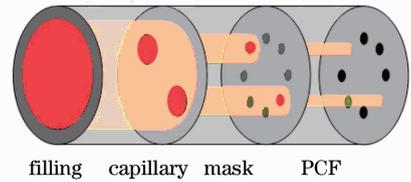


图 6 填充毛细管、mask 毛细管和光子晶体光纤拼接在一起,选择填充了光子晶体光纤中的两个空气孔

Fig. 6 PCF, mask, and filling capillary are welded together and two air holes of the PCF are selected

### 3 金属丝微结构光纤的性质

研究光纤特性时用到的光学常数并不是真正意义上的常数,而是入射光频率的函数,光学常数和频率的关系叫做色散关系。经典的色散理论有洛伦兹色散理论<sup>[23]</sup>和德鲁德 (Drude) 色散理论<sup>[24~27]</sup>。洛伦兹色散理论适用于电介质,德鲁德色散理论是基于金属自由电子的近似,适用于金属。德鲁德模型阐述了金属的介电常数  $\epsilon_M$  与频率  $\omega$  的关系

$$\epsilon_M = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\gamma}, \quad (1)$$

式中  $\epsilon_\infty$  是频率值无限大时对应的介电常数; $\omega_p$  称为等离子体频率,它相应于  $\epsilon_M$  从负值转变为正值过程中在零点处的频率; $\omega_r$  称作共振频率。由(1)式得到,在可见光和近红外光频率处金属的介电常数是复数,有一个大的为负数的实部和一个相对较小的虚部。石英玻璃的介电常数为正值。因此,金属和玻璃交界面两侧的介电常数符号相反,这是表面等离子体产生的必要条件。一定频率的光波经过金属和玻璃交界面时,会引发金属表面自由电子的谐振,激发等离激元现象<sup>[28,29]</sup>。所谓“等离激元”,实际就是等离子体量子化后的称谓。表面等离子体波的特性和效应在金属的尺寸在亚波长量级时才会显露出来。金属丝微结构光纤无论是在结构尺寸方面还是介电常数方面都满足表面等离子体的产生条件,它是优秀的表面等离子体波载体,也因此具有了许多独特的光学特性。

#### 3.1 表面等离子体共振特性

表面等离子体共振是指在满足表面等离子体产生条件并具有一定结构的光波导中,特定波长的光波能够在金属-电介质表面激发强烈的表面等离子体波的现象。当光子频率与固有等离子体频率接近时,大部分光子能够与等离激元发生耦合,发生等离子体共振<sup>[30,31]</sup>。光波在金属丝微结构光纤中传播时,能够激发表面等离子体波,而激发光波波长与光纤的结构、金属丝直径的大小以及金属的种类都有关系。能够确定特定结构的金属丝微结构光纤对应的激发波长,是了解其特性的一个重要方面。表面等离子体波是光子和自由电子发生共振而产生的,它的损耗也主要来源于这个共振过程中产生的欧姆损耗,损耗值很大。可以利用这

个特点测出金属丝微结构光纤的传输谱,传输谱中的损耗峰对应的波长就是激发波长。光波在激发表面等离子体波时会激发高阶模式,每个模数的表面等离子体波分别对应着传输谱中的各个损耗峰。损耗越大则表明激发的表面等离子体波的强度越大,模数越高对应的强度越弱,损耗峰值也就越小<sup>[18,22,32]</sup>。

通过求解麦克斯韦方程组可以得到金属丝微结构光纤中表面等离子体的色散特性<sup>[33,34]</sup>,它的有效折射率  $n_m = n_{mR} + in_{mI}$  是个复数,  $m$  表示阶数。在普通光纤中光被束缚在纤芯中需要满足纤芯的折射率大于包层的折射率,而在金属丝微结构光纤中,表面等离子体的有效折射率是复数,虚部代表着损耗,虚部的存在使  $m > 1$  的模式折射率并没有在二氧化硅线(玻璃的折射率曲线)处截止,而是延续到二氧化硅线下方。基模和一阶模式分别被称作短程和长程表面等离子体模式,它们无法耦合到纤芯模式中去。对于  $m > 1$  的高阶模式折射率可以小于周围电介质的折射率,而此模式依然为束缚模式,仍被束缚在金属表面向前传播。对于  $m = 0$  和 1 的模式,其折射率没有截止状态,而是无限地逼近二氧化硅线。

图 7 所示<sup>[33]</sup>是由直径为 500 nm 的银线和玻璃包层构成的金属丝微结构光纤中表面等离子体有效折射率实部的曲线图,图中  $m$  代表模数,虚线是玻璃的折射率曲线。可以看出  $m > 1$  的模式折射率都在二氧化硅线以下截止, $m = 0$  和 1 的模式折射率则没有出现截止。

模拟计算金属丝微结构光纤的表面等离子体波激发波长时,首先将光纤中的金属丝用空气代替,计算出这种情况下的基模折射率曲线,然后计算玻璃介质包围的单根金属丝表面的各阶等离子体波折射率曲线,它们的交点对应的波长就是激发波长。2008 年 Rusell 实验组用金纳米线填充偏振保持光子晶体光纤中最内层的一个空气孔制成金属丝微结构光纤。通过测量传输谱得到的损耗峰值所对应的波长与模拟得到的表面等离子体波激发波长相符合<sup>[19]</sup>。这一结果印证了以上模拟方法确定表面等离子体波激发波长的正确性。

### 3.2 相邻表面等离子体波之间的耦合特性

表面等离子体波是沿金属-玻璃介质表面传播的电磁波,振幅随着离开分界面的距离成指数衰减。由于欧姆损耗的作用,表面等离子体波在金属中的趋肤深度只有 10 nm 左右,而在玻璃介质中的损耗较小,渗透长度则是金属中的数百倍。所以两个相距较近的表面等离子体波在玻璃介质中会发生耦合,从而使能量增强,出现能量局域化。金属丝微结构光纤中,相邻金属丝之间距离约为 1  $\mu\text{m}$ ,两金属丝表面的等离子体耦合,使能量高度限制在中间的玻璃介质中。这种性质和平板波导中的 MIM 模型<sup>[35]</sup>类似。在 MIM 模型中,相距数百纳米、厚度为纳米量级的两层金属薄膜之间存在着电介质,当两金属膜表面同时激发等离子体波时,两等离子体波耦合,能量被束缚在电介质中。金属丝微结构光纤的巨大优势在于,它能利用相邻表面等离子体波的耦合作用使能量局域化,限制性很强,能够将尺寸做得很小,增加集成密度。但是耦合作用使表面等离子体波增强,这意味着光子与自由电子的共振加强,也就使欧姆损耗增加。对能量限制性的提高是以增加损耗为代价的。限制与损耗是两个相互关联的因素,高限制性总是伴随着高损耗,低损耗则使限制性减弱。金属丝微结构光纤可以通过改变光纤结构来调节这两个因素之间的平衡点。Zhang 等<sup>[36]</sup>模拟出了含有 6 根金属纳米线的金属丝微结构光纤中,金属丝直径、间距等参数与表面等离子体的有效折射率以及传输距离之间的关系,研究表明,当金属丝间距为 200 nm 时,金属丝直径为 125 nm 的光纤对表面等离子体的限制性最弱,而损耗最小,传输距离最远。A. Manjavacas 等<sup>[37,38]</sup>的研究结果显示,金属丝的横截面形状对表面等离子体的限制性也有影响,当相邻金属丝横截面为正方形时,限制性最强。而相邻金属丝形状不对称性对限制性的影响很小。相邻表面等离子体波发生耦合后,就具有了很强的抗串扰性能,不容易受到临近的表面等离子体波的干扰。鉴于上述特征,金属丝微结构光纤可以同时传播多路信号,有望在多路复用生物传感器中大显身手。

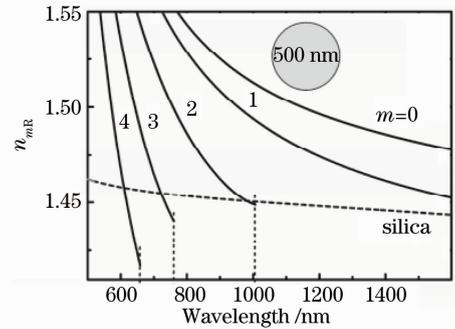


图 7 直径为 500 nm 的银线和玻璃包层构成的光纤中表面等离子体有效折射率实部的曲线图  
Fig. 7 Real part of the modal refractive index for guided modes of a single silver nanowire embedded in silica for  $a = 500$  nm

### 3.3 金属丝微结构光纤的偏振特性

金属丝微结构光纤中表面等离子体的激发对入射光的频率有很高的依赖性,而入射光的偏振特性也会影响表面等离子体的激发强度<sup>[19,39]</sup>。换言之,当入射光满足激发频率时, $x$ 偏振和 $y$ 偏振的入射光所对应的激发强度会有差异,这种差异的大小与金属丝在光纤中的排列结构有关。用金属丝选择性地填充光子晶体光纤中的空气孔,能得到不同结构的金属丝微结构光纤,具有不同的偏振特性。

Akira Nagasaki 小组<sup>[39]</sup>应用有限元法模拟探究了用金属丝选择性地填充光子晶体光纤中的空气孔得到的光纤的偏振特性,结果显示,通过在 PCFs 中引入数根相邻的金属丝,可以得到高偏振相关的传输特性,而且这种特性在一个较宽的频率中都得以体现。在图 8(a)中<sup>[39]</sup>,3根相邻的金纳米线填充了空气孔,图 8(b)显示了图(a)中光纤的偏振特性,在 $1.5\sim 2.0\ \mu\text{m}$ 波段范围内, $x$ 偏振的入射光的损耗都在 $5\ \text{dB/cm}$ 以上, $y$ 偏振的入射光损耗则保持在 $5\ \text{dB/cm}$ 以内。模拟研究的光纤中,得到的最大损耗差可达 $294\ \text{dB/cm}$ 。利用金属丝微结构光纤这种高偏振消光比的特性,可以制作成光纤偏光器,使某一偏振态的光通过,而其他偏振态的光波则因激发出很强的等离子体波而损耗较大,致使透过量很小。

### 3.4 红外波的传输特性

红外光波在短程无线电通信、热敏传感器、天文学等领域有着广泛的应用,对于红外波的传输研究有着重要的意义。由于一般的光波导材料在红外光波段的透明度很差,所以用空心光波导代替实心波导来传输红外波。目前的空心光波导主要有两类。一类是内壁镀有金属薄膜的波导<sup>[40]</sup>,利用金属反光来传导红外波,但是由于金属对红外波有欧姆吸收,影响反射效率,传输损耗很大。另一类是光子带隙光波导<sup>[41]</sup>,纤芯是空气,包层是成周期结构排列的光子晶体,利用光子带隙传输红外波,这种波导对光子晶体的周期性结构依赖性很大。基于纳米金属丝的异向介质可以用来制作空心光波导的包层,这种异向介质由周期性排列的纳米金属丝和周围的电介质构成<sup>[42]</sup>。这种金属丝超材料空心光纤传播 TM 红外波时,需要满足的限制条件为

$$\frac{\epsilon_z}{\epsilon_t} (k_0^2 \mu_t \epsilon_t - \beta^2) < 0, \quad (2)$$

传播 TE 波时需要满足的限制条件为

$$\frac{\mu_z}{\mu_t} (k_0^2 \mu_t \epsilon_t - \beta^2) < 0, \quad (3)$$

式中定义 $\epsilon_z$ 为包层 $z$ 轴介电常数张量, $\epsilon_r = \epsilon_\theta \equiv \epsilon_t$ 和 $\mu_r = \mu_\theta \equiv \mu_t$ , $\beta$ 为限制模式的传播常数。可以通过改变金属丝的直径、占空比从而改变传输损耗。2009年,Min Yan 和 Niels Asger Mortensen<sup>[42]</sup>的研究表明,金属丝超材料对 TM 波有很高的反射率,可以降低 TM 波传输损耗两个数量级,用金属丝超材料制成的空心光纤传播 TE 光时损耗也很低,这种材料有着很大的发展潜力。

### 3.5 隐形的异向介质传输特性

电磁隐形指的是光通过物体时,没有散射、扭曲、吸收的现象<sup>[43~48]</sup>。当基于纳米金属丝的异向介质光纤的折射率与周围相匹配时,可以得到电磁隐形,这里的异向介质也是由电介质包围的纳米金属丝构成。用总散射截面 $\sigma_T$ 来评价隐形光纤,当异向介质的有效折射率实部与周围相匹配时, $\sigma_T$ 的值最小,说明隐形效果最好。通过改变金属丝的占空比可以改变异向介质材料的有效折射率,从而影响隐形效果。当二维金属丝阵列被 TE 光波照射时,可以将其看作均匀介质,且有效介电常数 $\epsilon_{\text{eff}} = f\epsilon_m + (1-f)\epsilon_d$ ,在特定波长下可以求解 $\epsilon_{\text{eff}} = 1$ 时

$$f = \frac{1 - \epsilon_d}{\epsilon_m - \epsilon_d}, \quad (4)$$

式中 $f$ 为异向介质中金属丝的占空比,满足(4)式时可以实现特定波长下的电磁隐形。2010年 Alessandro

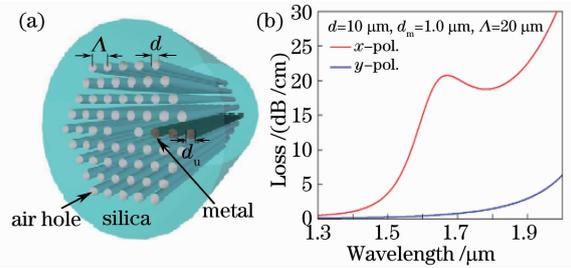


图 8 (a) 模拟的金属丝微结构光纤示意图,

(b) 是图(a)中所示光纤的损耗谱

Fig. 8 (a) Schematic diagram of the simulated metallic wire microstructured fibers structured by a PCF,

(b) loss spectra of fibers showed in (a)

Tuniz 等<sup>[49]</sup>模拟得出,用 361 根直径为 13.5 nm 的银丝排列成六边形,节距  $d=100$  nm,周围的电介质是石英玻璃,光纤的总直径为  $R=1$   $\mu\text{m}$ ,在波长  $\lambda=633$  nm 下得到  $\sigma_T/2R=-12.6$  dB,在带宽为 10 nm,入射角为  $\pm 10^\circ$  的范围内其可见性减少了 95%,在 100 nm 的带宽范围内可见性仍很小。隐形光纤可以吸收特定波长的光波,用作完美吸收器。

金属丝微结构光纤中亚波长直径的金属丝结构以及其独特的光学特性使它在许多领域有广泛的应用。对石英光纤施加局部电压使其极化可以得到很强的非线性效应<sup>[50]</sup>,金属丝微结构光纤可以用作极化电极,对光纤进行极化。光子晶体光纤中填充向列型液晶<sup>[51]</sup>,用加电压的金属丝微结构光纤来调节液晶的排列方向,可以得到可调偏光器、可调偏振操作、可调双折射光纤等。金属丝微结构光纤在生物传感器<sup>[52]</sup>、亚波长近场成像、非线性等方面都有很好发展前景。

## 4 结 论

金属丝微结构光纤,作为有望实现纳米量级的光电互联并在多个领域有着极大应用潜力的新型光纤,目前正受到科学家们越来越多的重视。近些年来,对金属丝微结构光纤的研究还在初步的发展中,研究热点主要集中在:制备工艺的完善;利用模拟来研究其光学性质<sup>[53~55]</sup>;设计不同结构的金属丝微结构光纤来实现不同的特性;探讨损耗补偿来增加表面等离子体的传播距离的途径<sup>[56]</sup>;实现红外波的低损耗传输;以及其在光纤传感器领域的应用。随着金属丝微结构光纤制作工艺的逐渐成熟,光学性质研究的不断完备,金属丝微结构光纤必将为促进纳米光电子的发展,推动新一轮信息技术革命发挥巨大作用。

## 参 考 文 献

- 1 Junichi Takahara, Suguru Yamagishi, Hiroaki Taki *et al.*. Guiding of a one-dimensional optical beam with nanometer diameter[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(7): 475~477
- 2 G. F. Taylor. A method of drawing metallic filaments and a discussion of their properties and uses[J]. *Phys. Rev.*, 1924, **23**(5): 655~660
- 3 I. W. Donald, B. L. Metcalfe. The preparation, properties and applications of some glass-coated metal filaments prepared by the Taylor-wire process[J]. *J. Mater. Sci.*, 1996, **31**(5): 1139~1149
- 4 Xia Yu, Ying Zhang, Shanshan Pan *et al.*. A selectively coated photonic crystal fiber based surface plasmon resonance sensor[J]. *J. Opt.*, 2010, **12**(1): 1~4
- 5 S. Zhang, X. Yu, P. Shum *et al.*. Highly sensitive pressure-induced plasmon resonance birefringence in a silver-coated photonic crystal fiber[J]. *J. Phys. : Conf. Ser.*, 2011, **276**(1): 1~7
- 6 Boris T. Kuhlmeiy, Karrnan Pathmanandavel, Ross C. McPhedran. Multipole analysis of photonic crystal fibers with coated inclusions[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(22): 10851~10864
- 7 A. Hassani, M. Skorobogatiy. Design of the microstructured optical fiber-based surface plasmon resonance sensors with enhanced microfluidics[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(24): 11616~11621
- 8 Alireza Hassani, Maksim Skorobogatiy. Photonic crystal fiber-based plasmonic sensors for the detection of biolayer thickness[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2009, **26**(8): 1550~1557
- 9 X. Zhang, R. Wang, F. M. Cox *et al.*. Selective coating of holes in microstructured optical fiber and its application to in-fiber absorptive polarizers[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(24): 16270~16278
- 10 Ekmel Ozbay. Plasmonics; Merging photonics and electronics at nanoscale dimensions[J]. *Science*, 2006, **311**(5758): 189~193
- 11 Rashid Zia, Jon A. Schuller, Anu Chandran *et al.*. Plasmonics; the next chip-scale technology[J]. *Mater. Today*, 2006, **9**(7-8): 20~27
- 12 Tyagi, Hemant Kumar. Germanium and Gold Wire Arrays Embedded in Silica Photonic Crystal Fibers[D]. Nürnberg: University of Erlangen-Nürnberg, 2011. 1~207
- 13 I. W. Donald. Production, properties and applications of microwire and related products[J]. *J. Mater. Sci.*, 1987, **22**(8): 2661~2679
- 14 Jing Hou, David Bird, Alan George *et al.*. Metallic mode confinement in microstructured fibres[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(9): 5983~5990
- 15 C. G. Poulton, M. A. Schmidt, G. J. Pearce *et al.*. Numerical study of guided modes in arrays of metallic nanowires[J].

- Opt. Lett.*, 2007, **32**(12): 1647~1649
- 16 A. Witkowska, K. Lai, S. G. Leon-Saval *et al.*. All-fiber anamorphic core-shape transitions[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(18): 2672~2674
- 17 W. J. Wadsworth, A. Witkowska, S. G. Leon-Saval *et al.*. Hole inflation and tapering of stock photonic crystal fibres [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(17): 6541~6549
- 18 M. A. Schmidt, L. N. Prill Sempere, H. K. Tyagi *et al.*. Waveguiding and plasmon resonances in two-dimensional photonic lattices of gold and silver nanowires[J]. *Phys. Rev. B*, 2008, **77**(3): 033417
- 19 H. W. Lee, M. A. Schmidt, H. K. Tyagi *et al.*. Polarization-dependent coupling to plasmon modes on submicron gold wire in photonic crystal fiber[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**(11): 111102
- 20 G. Schider, J. R. Krenn, A. Hohenau *et al.*. Plasmon dispersion relation of Au and Ag nanowires[J]. *Phys. Rev. B*, 2003, **68**(15): 155427
- 21 Matthew Pelton, Mingzhao Liu, Sungnam Park *et al.*. Ultrafast resonant optical scattering from single gold nanorods: Large nonlinearities and plasmon saturation[J]. *Phys. Rev. B*, 2006, **73**(15): 155419
- 22 H. K. Tyagi, H. W. Lee, P. Uebel *et al.*. Plasmon resonances on gold nanowires directly drawn in a step-index fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(15): 2573~2575
- 23 James W. Fleming. Dispersion in GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> glasses[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(24): 4486~4493
- 24 Gao Xingyu, Ning Lihua. Optical properties research on surface plasmons excited by metallic nanostructure waveguides[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(4): 042401  
高兴宇, 宁黎华. 金属纳米结构波导激发表面等离子体的光学特性[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(4): 042401
- 25 Yuan Xiaodong, Liu Ken, Ye Weimin *et al.*. Study on extraordinary optical transmission through arrays of holes metal films based on scattering matrix method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0131001  
袁晓东, 刘肯, 叶卫民等. 基于散射矩阵方法的金属光子晶体薄膜异常光学透射研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(1): 0131001
- 26 M. A. Ordal, Robert J. Bell, R. W. Alexander *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]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(24): 4493~4499
- 27 P. B. Johnson, E. W. Christy. Optical constants of the noble metals[J]. *Phys. Rev. B*, 1972, **6**(12): 4370~4379
- 28 Liu Wei, Hou Jing, Lu Qisheng *et al.*. Anti-resonant reflecting optical waveguide model for metallic photonic crystal fibers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s1): 369~372  
刘伟, 侯静, 陆启生等. 金属光子晶体光纤的反共振反射光学波导模型[J]. 中国激光, 2009, **36**(s1): 369~372
- 29 Zhou Lin, Zhu Yongyuan. Propagation characteristics of surface plasmon polaritons in a metal heterowaveguide array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1047~1050  
周林, 朱永元. 金属异质波导阵列中的表面等离子体传播特性[J]. 光学学报, 2008, **28**(6): 1047~1050
- 30 Jean-Claude Weeber, Alain Dereux, Christian Girard *et al.*. Plasmon polaritons of metallic nanowires for controlling submicron propagation of light[J]. *Phys. Rev. B*, 1999, **60**(12): 9061~9068
- 31 Zeng Jie, Liang Dakai, Du Yan *et al.*. Quasi-distributed optical fiber sensor based on surface plasmon resonance[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 243~248  
曾捷, 梁大开, 杜艳等. 准分布式光纤表面等离子体波传感器[J]. 中国激光, 2007, **34**(2): 243~248
- 32 L. N. Prill Sempere, M. A. Schmidt, H. K. Tyagi *et al.*. Metal nanowire arrays in photonic crystal fibers [C]. *IEEE/LEOS Winter Topical Meeting Series*, 2008. 206~207
- 33 M. A. Schmidt, P. St. J. Russell. Long-range spiralling surface plasmon modes on metallic nanowires [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(18): 13617~13623
- 34 Ron Spittel, Denny Hoh, Sven Bruckner *et al.*. Selective filling of metals into photonic crystal fibers[C]. *SPIE*, 2011, **7946**: 79460Z
- 35 Arthur R. Davoyan, Ilya V. Shadrivov, Sergey I. Bozhevolnyi *et al.*. Backward and forward modes guided by metal-dielectric-metal plasmonic waveguides[J]. *J. Nanophoto.*, 2010, **4**: 043509
- 36 Zhongxiang Zhang, Minglie Hu, Kamtai Chan *et al.*. Plasmonic waveguiding in a hexagonally ordered metal wire array[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(23): 3901~3903
- 37 A. Manjavacas, F. J. Garcia de Abajo. Robust plasmon waveguides in strongly interacting nanowire arrays[J]. *Nano Lett.*, 2009, **9**(4): 1285~1289
- 38 A. Manjavacas, F. J. Garcia de Abajo. Coupling of gap plasmons in multi-wire waveguides[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(22): 19401~19413

- 39 Akira Nagasaki, Kunimasa Saitoh, Masanori Koshiba. Polarization characteristics of photonic crystal fibers selectively filled with metal wires into cladding air holes[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(4): 3799~3808
- 40 James A. Harrington. A review of IR transmitting, hollow waveguides[J]. *Fiber Integr. Opt.*, 2000, **19**(3): 211~217
- 41 B. Temelkuran, S. D. Hart, G. Benoit *et al.*. Wavelength-scalable hollow optical fibres with large photonic bandgaps for CO<sub>2</sub> laser transmission[J]. *Nature*, 2002, **420**: 650~653
- 42 Min Yan, Niels Asger Mortensen. Hollow-core infrared fiber incorporating metal-wire metamaterial[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(17): 14851~14864
- 43 J. Ward. Towards invisible glass[J]. *Vac.*, 1972, **22**(9): 369~375
- 44 Andrea Alù, Nader Engheta. Achieving transparency with plasmonic and metamaterial coatings[J]. *Phys. Rev. E*, 2005, **72**: 016623
- 45 A. Alù, N. Engheta. Plasmonic materials in transparency and cloaking problems: mechanism, robustness, and physical insights[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(6): 3318~3332
- 46 B. Edwards, A. Alù, M. G. Silveirinha *et al.*. Experimental verification of plasmonic cloaking at microwave frequencies with metamaterials[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **103**(15): 153901
- 47 D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice *et al.*. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. *Science*, 2006, **314**(5801): 977~980
- 48 T. Ergin, N. Stenger, P. Brenner *et al.*. Three-dimensional invisibility cloak at optical wavelengths[J]. *Science*, 2010, **328**(5976): 337~339
- 49 Alessandro Tuniz, Boris T. Kuhlmeiy, Parry Y. Chen *et al.*. Weaving the invisible thread: design of an optically invisible metamaterial fibre[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(17): 18095~18105
- 50 Niklas Myrén, Håkan Olsson, Lars Norin *et al.*. Wide wedge-shaped depletion region in thermally poled fiber with alloy electrodes[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(25): 6093~6099
- 51 Slawomir Ertman, Tomasz R. Wolinski, Dariusz Pysz *et al.*. Low-loss propagation and continuously tunable birefringence in high-index photonic crystal fibers filled with nematic liquid crystals[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(21): 19298~19310
- 52 D. A. Stuart, A. J. Haes, C. R. Yonzon *et al.*. Biological applications of localised surface plasmonic phenomena[C]. IEE. Proc. Nanobiot., 2005, **152**(1): 13~32
- 53 T. P. White, B. T. Kuhlmeiy, R. C. McPhedran *et al.*. Multipole method for microstructured optical fibers. I. Formulation[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(10): 2322~2330
- 54 Boris T. Kuhlmeiy, Thomas P. White, Gilles Renversez *et al.*. Multipole method for microstructured optical fibers. II. Implementation and results[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(10): 2331~2340
- 55 Boris T. Kuhlmeiy, Karrnan Pathmanandavel, Ross C. McPhedran. Multipole analysis of photonic crystal fibers with coated inclusions[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(22): 10851~10864
- 56 Maziar P. Nezhad, Kevin Tetz, Yeshaiahu Fainman. Gain assisted propagation of surface plasmon polaritons on planar metallic waveguides[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(17): 4072~4079