

# 金属光子晶体光纤的反共振反射光学波导模型

刘伟 侯静 陆启生 刘永贵

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 为了快速有效预测金属光子晶体光纤(MPCF)中表面等离子体激元模式和纤芯导模的耦合位置(即带隙),在光子晶体光纤的反共振反射光学波导模型(ARROW 模型)和表面等离子体激元模式的螺旋模型(Spiraling model)的基础上,拓展出金属光子晶体光纤的 Metallic ARROW 模型(MARROW 模型)。然后,利用该模型计算出金、银各两种金属光子晶体光纤中的模式耦合位置,所得结果与已发表的实验结果吻合较好。

**关键词** 光纤光学; 金属光子晶体光纤; 反共振反射光学波导模型; 表面等离子体激元模式; 模式匹配

**中图分类号** TN25; O43 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL200936s1.0369

## Anti-Resonant Reflecting Optical Waveguide Model for Metallic Photonic Crystal Fibers

Liu Wei Hou Jing Lu Qisheng Liu Yonggui

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** To predict effectively the coupling positions of surface plasmon polaritons modes and guided modes within metallic photonic crystal fibers (MPCF), in this paper anti-resonant reflecting optical waveguide model (ARROW) for metallic photonic crystal fibers has been put forward based on ARROW model for photonic crystal fibers and spiraling model for surface plasmon polaritons modes. Afterwards, we obtain the matching points of silver and gold metallic photonic crystal fibers using the model presented and the results we get is approximately equal to some experimental results that have been published.

**Key words** fiber optics; metallic photonic crystal fibers; anti-resonant reflecting optical waveguide model; surface plasmon polariton modes; modes matching

### 1 引言

金属光子晶体光纤(MPCF)是在传统光子晶体光纤(PCF)的空气隙里添加金属所形成的一种新型光子晶体光纤<sup>[1~5]</sup>。由于所添加的金属表面形成的各阶表面等离子体激元模式(SPP modes)和纤芯导模的耦合, MPCF 展现出一些不同于 PCF 的独特性质<sup>[1~3]</sup>。例如纤芯导模的能量转移, SPP modes 的超低能量损耗和基于此的 SPP modes 的长程传播等。MPCF 的数值模拟最先由 C. G. Poulton 完成<sup>[4]</sup>。侯静等<sup>[1]</sup>和 M. A. Schmidt 等<sup>[2]</sup>同时用不同的方法率先制成了 MPCF 的实物模型。前者在拉制 PCF 时直接加入金属丝,后者是在 PCF 成型后往空气缝隙加液态金属形成金属丝。由于 MPCF

中 SPP modes 的局域性(localization)<sup>[6~8]</sup>和耦合对 SPP modes 的能量补偿导致的 SPP modes 长距离传播<sup>[3]</sup>, MPCF 在表面等离子体传感器、探测器、光集成原件、光学缓冲器、光开关、光存储器件等众多领域有着重大的应用前景。

在 PCF 理论中,反共振反射光学波导模型(ARROW)是为了预测 PCF 中带隙的一种简单模型<sup>[9,10]</sup>。其基本原理是 PCF 中的波矢匹配和模式耦合。螺旋模型(Spiraling model)是模拟柱状金属表面 SPP modes 的一种简化模型<sup>[5]</sup>。Spiraling 模型假设柱状金属表面的 SPP modes 绕柱状表面螺旋状传播,这种 SPP modes 和平面界面的 SPP modes (PSPP modes)的不同之处在于它们在柱状

**基金项目:** 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-08-0142)资助课题。

**作者简介:** 刘伟(1985—),男,博士研究生,主要从事金属光子晶体光纤方面的研究。E-mail: qslwpku@126.com

**导师简介:** 侯静(1975—),女,博士,副教授,主要从事光子晶体光纤方面的研究。E-mail: houjing25@sina.com

界面的环向有波矢分量,且有多阶模式,而 PSPP modes 在沿界面且垂直于传播方向的方向上没有波矢分量且是单阶的<sup>[5~8]</sup>。

本文在 PCF 的 ARROW 模型和 SPP modes 的螺旋模型<sup>[5]</sup>的基础上,拓展出了 MPCF 中的 ARROW 模型(MARROW),并利用 MARROW 模型给出了金、银各两种金属光子晶体光纤中模式耦合位置。MARROW 模型能有效地预测 MPCF 中的波矢匹配即模式耦合位置,为 MPCF 其他相关研究奠定模型基础。

## 2 MARROW 物理模型

MPCF 添加金属的方式可以是多种多样的,最简单的 MPCF 是在纤芯周围第一层空气柱里添加金属。图 1 为在 PCF 纤芯周围第一层空气柱里加金属所形成的 MPCF 的截面图。金属丝直径为  $d$ ,介电常量为  $\epsilon_M$ 。MPCF 覆层材料和纤芯材料的折射率为  $n_{\text{core}} = n_{\text{cl}}$ 。光从一端入射 MPCF 时,在一定的波长范围之内,除了纤芯有导模之外,在金属丝表面还将激发不同阶数的 SPP modes。当纤芯导模和这些 SPP modes 波矢匹配时,模式之间将耦合产生超模(Super modes),SPP modes 可由螺旋模型模拟。为了使模型更加简化,仿照 ARROW 模型<sup>[11~13]</sup>,把纤芯导模的有效折射率近似为纤芯材料或覆层材料的折射率  $n_{\text{core}} = n_{\text{cl}}$ 。当波矢匹配时,SPP modes 的折射率实部  $\text{Re}(n_s) = n_{\text{cl}}$ 。由此可得 MARROW 模型方程为

$$\text{Re}(n_s) = \text{Re} \left[ \sqrt{\frac{n_{\text{cl}}^2 \epsilon_M}{n_{\text{cl}}^2 + \epsilon_M} - \left( \frac{2(m-1)}{k_0 d} \right)^2} \right] = n_{\text{cl}},$$

$$m = 1, 2, \dots$$

式中  $m$  对应 SPP modes 的不同阶数,当  $m=1$  时,方程无解,此时的 SPP modes 即为 PSPP modes,由于波矢不能匹配,此时不会出现耦合<sup>[7]</sup>。 $k_0$  为入射光在真空中的波矢。

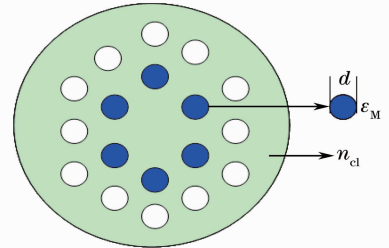


图 1 纤芯被单环金属环绕的 MPCF 截面图

Fig. 1 Sectional graph of MPCF with core surrounded by one circle of metal

MARROW 模型适用于各种纤芯导模和 SPP modes 可以发生耦合的 MPCF,此模型公式可直接预测各阶 SPP modes 和纤芯导模的耦合位置(MPCF 的带隙)。

## 3 基于该模型的相关计算和分析

下面利用 MARROW 模型预测不同直径、不同种类金属的 MPCF 的模式耦合位置(假设这些 MPCF 的覆层材料和纤芯材料均为硅)。实验中用到的硅的折射率、银和金的介电常量等由文献<sup>[14, 15]</sup>中发表的数据拟合得到的曲线求得。拟合后的银和金的介电常量曲线如图 2 所示。其中实线对应

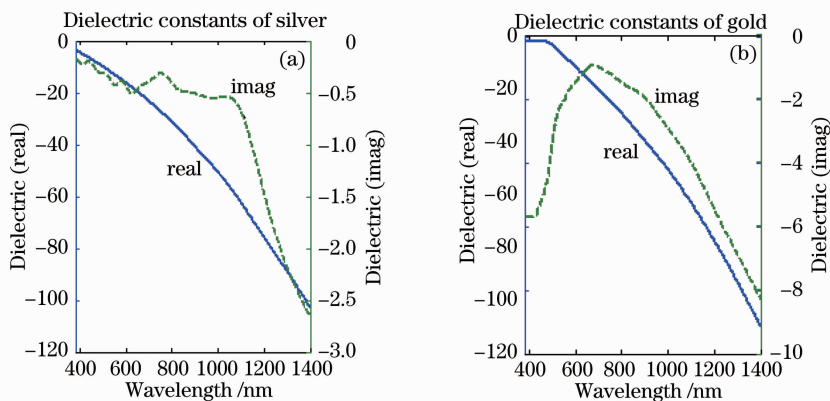


图 2 金属在不同波长时的介电常量。(a)银;(b)金。实线和左侧坐标轴对应介电常量实部,虚线和右侧坐标轴对应介电常量虚部

Fig. 2 Dielectric constants of metals at different wavelengths for (a) silver (b) gold. Continuous lines and coordinate axes on the left correspond to the real parts of the dielectric constants while dashed lines and the coordinate axes on the right to the imaginary ones

的是介电常量的实部,虚线对应的是介电常量的虚部。相对于银、金的介电常量虚部在考察的波长范围内有更大的波动。

### 3.1 银丝 MPCF, $d = 1000 \text{ nm}$ , $200 \text{ nm}$

图 3 是内含不同直径银丝的 MPCF 中的导模

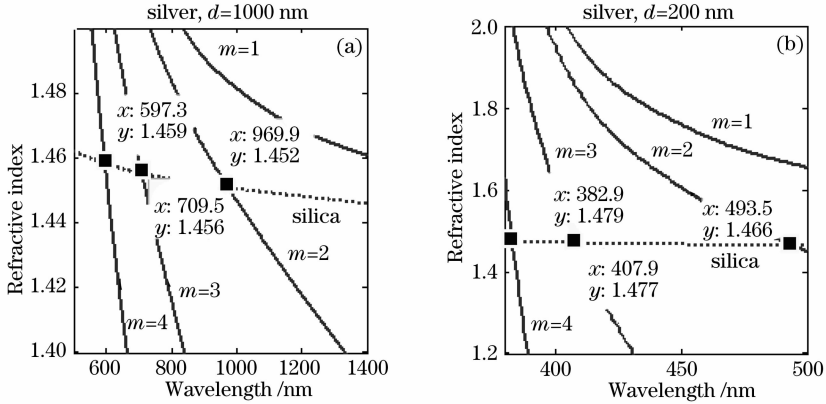


图 3 内含不同直径银丝的 MPCF 的波矢匹配图。(a)  $d = 1000 \text{ nm}$ , 匹配位置依次约为  $597 \text{ nm}$ ,  $710 \text{ nm}$ ,  $970 \text{ nm}$ ;  
(b)  $d = 200 \text{ nm}$ , 匹配位置依次约为  $383 \text{ nm}$ ,  $408 \text{ nm}$ ,  $494 \text{ nm}$

Fig. 3 Graphs of wave vectors matching for MPCF with silver wires of different diameters. (a)  $d = 1000 \text{ nm}$ , matching points are  $597 \text{ nm}$ ,  $710 \text{ nm}$ ,  $970 \text{ nm}$ ; (b)  $d = 200 \text{ nm}$ , matching points are  $383 \text{ nm}$ ,  $408 \text{ nm}$ ,  $493 \text{ nm}$

### 3.2 金丝 MPCF, $d = 900 \text{ nm}$ , $600 \text{ nm}$

图 4 是内含不同直径金丝的 MPCF 中的纤芯导模和 SPP modes 波矢匹配图。图 4 所得的波矢匹配(模式耦合)位置和文献[2, 3]中所给出的实验数据基本吻合,如对于  $d = 900 \text{ nm}$  的金丝 MPCF,

和 SPP modes 波矢匹配图。由于存在不同阶数 SPP modes,波矢匹配位置也有多个。图 3 中只画出了前四阶 SPP modes 的波矢匹配图。更高阶的 SPP modes 也会和纤芯导模耦合,只是高阶 SPP modes 和纤芯导模的耦合较弱,通常可以忽略<sup>[3]</sup>。

实验所得耦合位置约为  $630 \text{ nm}$ ,  $710 \text{ nm}$ ,  $908 \text{ nm}$ ; 对于  $d = 600 \text{ nm}$  的金丝 MPCF,实验中给出了三阶 SPP modes 的耦合位置为  $633 \text{ nm}$ ,和模型给出的数值完全一致,证实了 MARROW 模型的有效性。

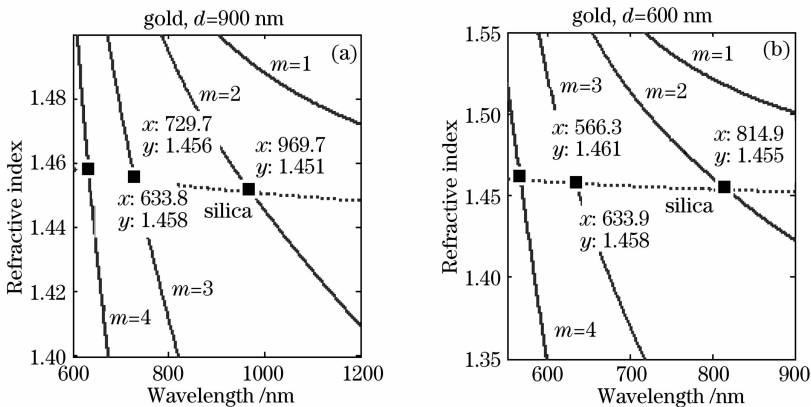


图 4 内含不同直径金丝的 MPCF 的波矢匹配图。(a)  $d = 900 \text{ nm}$ , 匹配位置依次约为  $634 \text{ nm}$ ,  $730 \text{ nm}$ ,  $970 \text{ nm}$ ;  
(b)  $d = 600 \text{ nm}$ , 匹配位置依次约为  $566 \text{ nm}$ ,  $634 \text{ nm}$ ,  $814 \text{ nm}$

Fig. 4 Graphs of wave vectors matching for MPCF with gold wires of different diameters. (a)  $d = 900 \text{ nm}$ , matching points are  $634 \text{ nm}$ ,  $730 \text{ nm}$ ,  $970 \text{ nm}$ ; (b)  $d = 600 \text{ nm}$ , matching points are  $566 \text{ nm}$ ,  $634 \text{ nm}$ ,  $815 \text{ nm}$

MARROW 模型中,用 Spiraling 模型拟合 SPP modes 模式,用纤芯材料的色散曲线代替纤芯导模的色散曲线,使计算大大简化,能迅速估测 MPCF 中模式耦合位置,为精确的带隙模拟确定计算区域。然而这种简化也有其不精确性。首先, Spiraling 模

型实际是一种平板近似(Planar approximation)<sup>[6]</sup>,其精确性随着 MPCF 中金属丝直径的减小而降低。其次,用覆层材料的色散曲线代替纤芯导模的色散曲线在某些频率范围有极大的误差。这两个因素是 MARROW 模型误差的主要来源。

## 4 结 论

MPCF 是近几年兴起的一个全新的研究领域, 由于 SPP modes 模式的介入和 MPCF 中导模与 SPP modes 的耦合, 对 MPCF 的研究有可能为光纤传感器、光探测器、光集成原件、光学缓冲器、光开关、光存储器件等众多领域奠定基础。MALLOW 模型为 MPCF 中模式耦合提出了一种初步可操作的简单模型。

### 参 考 文 献

- 1 Jing Hou, David Bird, Alan George *et al.*. Metallic mode confinement in microstructured fibres[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**: 5983~5989
- 2 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**: 033417~033420
- 3 H. W. Lee, M. A. Schmidt, H. K. Tyagi *et al.*. Polarization-dependent coupling to plasma modes on submicron gold wire in photonic crystal fiber[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**: 111102~111104
- 4 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**: 1647~1649
- 5 M. A. Schmidt, P. St. J. Russell. Long-range spiralling surface plasmon modes on metallic nanowires[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**: 13617~13623
- 6 C. A. Pfeiffer, E. N. Economou. Surface polaritons in a circularly cylindrical interface: surface plasmons[J]. *Phys. Rev. B*, 1974, **10**: 3038~3351
- 7 Anatoly V. Zayats, Igor I. Smolyaninov, Alexi A. Maradudin. Nano-optics of surface plasmon polaritons [J]. *Phys. Rep.*, 2005, **408**: 131~141
- 8 Ursula Schroter, Alain Dereux. Surface plasmon polaritons on metal cylinders with dielectric core[J]. *Phys. Rev. B*, 1974, **10**: 125420~125429
- 9 S. S. Martinos, E. N. Economou. Virtual surface plasmons in cylinders[J]. *Phys. Rev. B*, 1983, **28**: 3173~3181
- 10 H. Khoaravi *et al.*. Surface polaritons in cylindrical optical fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1991, **8**: 112~122
- 11 N. M. Litchinitser, A. K. Abeeluck, C. Headley *et al.*. Antiresonant reflecting photonic crystal optical waveguides[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**: 1592~1594
- 12 N. M. Litchinitser, S. Dunn, B. Usner *et al.*. Resonances in microstructured optical waveguides[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**: 1243~1251
- 13 G. Renversez, P. Boyer, A. Sagrini. Antiresonant reflecting optical waveguide microstructured fibers revisited: a new analysis based on leaky mode coupling[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**: 5682~5688
- 14 E. D. Palik. Handbook of Optical Constants of Solids [M]. London, San Diego: Academic Press, 1985. 350~357
- 15 G. P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics [M]. London, San Diego: Academic Press, 2007. 6