

The Reseach of MEMS Infrared Radiation Source Characteristics Based on Two-Dimensional Metallic Sub-Wavelength Hole Arrays*

YAO Xiang¹, XIAO Gongli², JI Xinming^{1*}, ZHOU Jia¹,
BAO Zongming¹, HUANG Yiping^{1*}

(1. The State Key Laboratory of ASIC & System, Department of Microelectronics, Fudan University, Shanghai 200433, China;
2. Information and Communications College, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: In this work, a novel tunable narrow-band infrared emitter based on two-dimensional metallic sub-wavelength hole arrays is reported and the relationship between the transmission spectrum of the emitter and the thickness of SU-8 layer of metal/dielectric/metal (M/D/M) structure in mid-infrared waveband has been studied. The emitter is structured by Au/SU-8/Au, in which the thickness of Au layer is 20 nm, and the SU-8 layer is between 0.2 to 1.2 micron. The transmission spectrum has been tested out with Varian 4 100 FT-IR. The experimental data have been compared and analyzed with simulation results from finite-difference time-domain (FDTD) calculation. It is found out that the structure with SU-8 layer thinner than 1 micron has much larger transmission peak strength than the ones with thicker SU-8 layer, with the largest transmission peak strength found when the thickness of SU-8 layer is 360 nm, and the red-shift of the wavelength of the transmission peak is also observed.

Key words: two-dimensional metallic sub-wavelength hole arrays; SU-8 layer thickness; transmission

EEACC: 2810E

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2010.11.007

基于二维金属亚波长孔阵列结构的 MEMS 红外辐射源特性研究*

姚翔¹, 肖功利², 纪新明^{1*}, 周嘉¹, 包宗明¹, 黄宜平^{1*}

(1. 复旦大学微电子学系 ASIC 与系统国家重点实验室, 上海 200433;
2. 桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

摘要:以 MEMS 红外气敏传感器为应用目标, 采用 MEMS 技术设计和制作一种二维金属亚波长孔阵列结构红外辐射源。探讨了不同厚度 SU-8 膜对金属/电介质/金属 (M/D/M) 二维金属亚波长孔阵列结构在中远红外波段透射特性的影响。设计并制作了 Au/SU-8/Au 的 M/D/M 结构, 测试采用傅里叶变换红外光谱仪器。同时对 M/D/M 结构不同电介质层情况下的中远红外波段透射特性进行了模拟。实验结果表明, SU-8 厚度在小于 1 μm 时, 透射强度远大于厚度 1 μm 以上的结构, 且有透射强度最大值出现 (SU-8 厚度为 360 nm), 同时, 随着 SU-8 厚度的增加, 透射谱峰值呈现规律性红移。

关键词: 关键词: 表面等离子体共振效应; 二维金属亚波长孔阵列结构; SU-8 膜的厚度; 透射增强特性

中图分类号: TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2010)11-1550-05

MEMS 红外气敏传感器利用气体的特征光谱进行测量, 因此具有优越的选择性、灵敏度和稳定性。而对系统中的关键部件, 即红外辐射源的研究不断引起了人们的关注。常规的 MEMS 辐射源存在两个问题: (1) 辐射谱较宽, 通常在 2 μm ~ 14 μm 之间, 除了在气体特征光谱附近的辐射有效, 其他绝大部分的辐射功率都损失了; (2) 由于是广谱辐射, 在

应用波段的辐射能量不强, 影响了测量系统的灵敏度。本文以 MEMS 红外气敏传感器为应用目标, 采用 MEMS 技术研究一种新型基于二维金属亚波长孔阵列结构的红外辐射源。

1998 年, T. W. Ebbesen 等人在《科学》杂志上首次发表了光在通过金属亚波长孔阵列结构时产生强透射效应的论文, 关于各种金属亚波长结构的透光

特性以及探讨透射增强效应机理的研究开始成为光学、光电子学界最热门的话题之一。1999 年, D. E. Grupp 等人首次发现, 当在双层 Ag 膜中间再加入另外一层金属镍时, 其透射效率远远大于 Ag 镍双层金属膜, 这个奇特的现象立刻引起了国际上的广泛关注。2005 年, 台湾的 Yong-Hong Ye 等人第一次设计了由 Ag/SU-8/Ag 构成的金属/电介质/金属 (MDM) 结构 (SU-8 是一种负性光刻胶), 发表在《Optic Letter》。实验发现此结构的透射强度远远大于单层 Ag 膜或者 Ag/SU-8 双层膜, 且在实验中该结构的透射强度随着电介质层的厚度从 $5.4\mu\text{m}$ 到 $2.2\mu\text{m}$, 呈现单调的上升趋势, 该小组认为是上下两层 Ag 膜感应出的表面等离子体相互耦合, 加强了透射。但是, 该小组的实验中, 金属膜 Ag 的厚度较厚, 大于该波段的趋肤深度, 同时, SU-8 膜的厚度较大, 该文没有讨论金属层和 SU-8 膜厚度较薄时, 该结构影响透射效率的情况。

本文研究了金属厚度在趋肤深度以内以及不同厚度 SU-8 膜对金属/SU-8/金属 (M/SU-8/M) 表面等离子体共振结构的透射特性影响。首先针对目前常用的几种电介质 SiO_2 、 Si_3N_4 、 SiO_xN_y 、SU-8, 在较薄的厚度 ($200\text{ nm} \sim 1.2\ \mu\text{m}$) 时, 应用了 FDTD 软件 R-soft, 对其在中远红外波段了透射特性进行了模拟。在模拟结果的基础之上, 采用了 Au 为表面金属, 设计并制作了 Au/SU-8/Au 的 M/D/M 结构, 并控制单层 Au 膜的厚度在 Au 的趋肤深度以内, 为 20 nm , SU-8 膜的厚度从 $0.2\ \mu\text{m}$ 到 $1.2\ \mu\text{m}$ 。采用傅里叶变换红外光谱仪器测试了该表面等离子体共振结构的透射特性。探讨了 SU-8 膜厚度对透射特性的影响。结果表明实验与模拟的结果十分吻合。

1 表面等离子体共振原理

目前, 对于光在通过各种金属亚波长亚结构时产生的增强和窄带效应, 人们常用表面等离子体共振理论来加以解释。

光在入射到金属表面时, 金属中的自由电子会和光子相互作用, 从而在金属表面上产生电子气密度的涨落, 被量子化后称之为表面等离子体 (Surface Plasmons), 也称为表面等离子激元 (SPP)。作为光子与自由电子相互作用而产生的 SPP, 是沿着金属表面传播的电磁模, 所以, 当金属的表面结构发生变化的时候, SPP 的性质、耦合方式、色散关系等等都会发生相应的变化。这样, 通过控制金属的表面结构, 可以有效地控制 SPP, 进而达到控制光的目的。

SPP 电磁模的特征是被限制于金属表面传播,

在垂直表面的两个方向上, 电磁场呈指数式衰减。通过求解麦克斯韦方程, 可以得到 SPP 的电磁模的波矢:

$$k_{\text{spp}} = k_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_d \varepsilon_m}{\varepsilon_d + \varepsilon_m}} \quad (1)$$

其中, $k_0 = \frac{\omega}{c}$, ω , c , ε_d , ε_m 分别是光频率, 真空中的光速, 电介质的介电常数, 金属的介电常数。

在通常的光频区, 金属的 $\varepsilon_m < 0$, 但是 $|\varepsilon_m| \gg 1$, 所以有 $|\varepsilon_m + \varepsilon_d| < |\varepsilon_m|$, 故而 $k_{\text{spp}} > k_0$, 导致 SPP 的动量与入射光子的动量不匹配, 所以在一般情况下, 不能激发出 SPP。只有采用特别的方法, 如提供一个光栅动量来满足动量守恒, 才能成功激发出 SPP, 而 MDM 结构的两维亚波长金属孔阵列, 就能很好地做到这一点。我们考虑的是二维正方形晶格光栅的金属表面, 其动量守恒方程为,

$$k_{\text{spp}} = k_0 \sin \theta_0 + m \frac{2\pi}{a_0}, \quad |g_x| = |g_y| = \frac{2\pi}{a_0} \quad (2)$$

其中, a_0 是一个光栅的周期, g_x 和 g_y 是布拉格波矢。式(2)可以预测入射光同二维金属光栅表面的 SPP 共振耦合波长位置方程。把式(2)代入式(1), 就可以得出下面一个方程:

$$\lambda_{\text{spp}} = a_0 (i^2 + j^2)^{-\frac{1}{2}} [\varepsilon_m \varepsilon_d / (\varepsilon_m + \varepsilon_d)]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

由此, 人们可以计算出入射光在二维金属光栅表面激发耦合出 SPP 时的共振峰的位置。

2 FDTD 数值模拟

采用 FDTD 数值模拟方法作为理论分析工具, 应用专业软件 R-soft 进行实验模拟。模拟波段为中远红外波段, 电介质的厚度选择为较典型的 200 nm 、 360 nm 、 560 nm 和 $1\ 200\text{ nm}$ 。

通常情况下, MDM 结构中的电介质层, 其光学特性主要由其相对介电常数或者折射率来体现。目前, 最常使用的电介质一般有 SU-8、 SiO_2 、 Si_3N_4 、 SiO_xN_y 等。 SiO_xN_y 由于配比不同, 其折射率一般从 1.58 到 1.9 不等, 根据实际试验条件, 采用 1.7 为其模拟参数值。

图 1 所示为含有四种不同电介质的 MDM 结构其 SPP 共振峰位置的 FDTD 模拟结果。可以看到, 四种不同电介质层的 MDM 结构, 其 SPP 共振峰的位置, 随着电介质层厚度的增加, 都产生了一定的红移。比较厚度为 200 nm 和 $1\ 200\text{ nm}$ 的情况发现, 含有 SiO_2 、 Si_3N_4 、 SiO_xN_y 的 MDM 结构, 其红移量比较小, 只有 10 nm 左右。而相对的, 含有 SU-8 层的 MDM 结构, 其红移量有超过 22 nm 之多, 明显好于前三者。

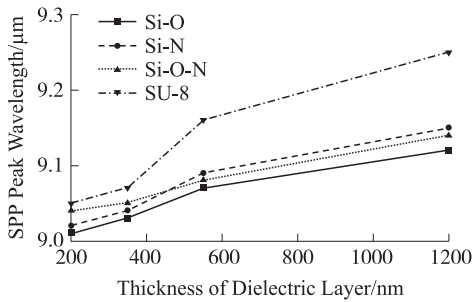


图 1 含四种不同电介质的 MDM 结构 SPP 共振峰位置 FDTD 模拟结果

图 2 所示为含有四种不同电介质的 MDM 结构的 SPP 共振最大透射值的 FDTD 模拟结果。由图所示,随着电介质层厚度的逐渐增加,含有四种不同电介质的 MDM 结构的 SPP 共振透射峰值都在 360 nm 附近出现了最大值,其后,呈现出单调下降的趋势。其中,电介质层为 SU-8 的 MDM 结构的透射峰值高出含有其他三种电介质结构近 20%,且不同厚度情况下的峰值差异明显。

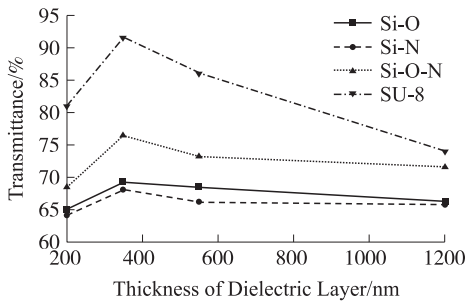


图 2 含四种电介质的 MDM 结构 SPP 共振最大透射值与电介质层厚度关系 FDTD 模拟结果

综上,从 FDTD 模拟的结果看,采用 SU-8 作为电介质层的 MDM 结构,其中远红外波段的透射特性远好于使用 SiO_2 、 Si_3N_4 、 SiO_xN_y 为电介质层的 MDM 结构。

3 结构设计与加工

根据实际条件,实验设计为在硅衬底上通过溅射金属、旋涂电介质等工艺制作 MDM 结构,其剖面示意图和正面实物图如图 3(a) 所示。

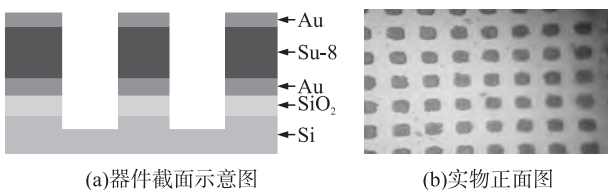


图 3

SPP 的产生,对金属的要求很高,本实验采用表面等离子体效应好的贵金 Au,因为它不但在可见光

和红外波段内光吸收很小,同时能够有效地激发出 SPP。而且,暴露在空气中的情况下,相比在 SPP 研究中同样被广泛应用的金属 Ag, Au 显然有着更好的化学稳定性和惰性。

实验中,在 Si 衬底上热氧化 650 nm 的 SiO_2 ,其上再溅射 20 nm 的 Au,然后旋涂上 SU-8,样品 A ~ D 厚度分别为,0.2 μm ,0.32 μm ,0.56 μm ,1.2 μm ,经过光刻工艺,再溅射一层 20 nm 的 Au,然后用 Ion Beam 和 ICP 刻蚀技术刻蚀出阵列周期为 9 μm ,深度为 7 μm 的圆孔阵列,样品 E 为对比样,无电介质层。图 3 给出了 MDM 器件的剖面示意图和实物照片,具体结构参数如表 1 所示:

表 1 结构参数 单位 μm

样品	周期	圆孔深度	介质厚度 h
A	9	7	0.2
B	9	7	0.36
C	9	7	0.56
D	9	7	1.2
E	9	7	0

4 结果与讨论

本文测试样品时,采用了傅里叶变换红外光谱仪器 (Varian 4100 FT-IR: 测量的波数范围为 $8\,000\text{ cm}^{-1} \sim 200\text{ cm}^{-1}$,最小分辨率为 0.3 cm^{-1} ,测量时,光束垂直入射。根据能量守恒定律,

$$T = 1 - R - A \quad (4)$$

其中, A 是红外光的吸收率, R 是红外光的反射率, T 是透射率。

一般情况下,金属在红外波段对光的吸收可以忽略,因此,近似得到 $T = 1 - R$ 。由基尔霍夫定律,辐射源的辐射率等于吸收率 A 与温度为 T 的黑体辐射 $K(v, T)$ 的乘积,即 $E(v, T) = A(v)K(v, T)$ 。上式可知,辐射源的辐射率基本上反比于反射率,所以可以用辐射源的反射谱来得到透射谱。

图 4(a)、(b)、(c)、(d) 分别是测试得到的样品 A、B、C、D 的透射谱。测试结果表明,样品的 SPP 共振峰额峰值,分别为 9.09 μm ,9.14 μm ,9.19 μm ,9.32 μm ,都在 9 μm 附近,说明当表面结构孔阵列的周期为 9 μm 时,波长为 9 μm 的红外光能有效地在其表面激发出 SPP,与理论推导符合。同时,可以发现,在 13 μm 附近,也有明显的强透射,这是由 Au/空气界面激发的退化共振模式和 Au/SU-8 界面激发出的退化共振模式共同形成。

(1) 半波宽 (FWHM, Full-Width Half-Maximum)

对于 SPP 器件的光学特性,其透射谱的半波宽

FWHM 是标志性参数。图 3 为样品 E 的测试透射谱,作为没有介质层的对比样片,其 FWHM 为 2.156 μm 。而图 4 中可以看到,样品 A、B、C、D 的 FWHM 分别为 0.532 μm ,0.567 μm ,0.583 μm ,0.597 μm ,都远远小于对比样品,说明 MDM 结构能够更好的激发出 SPP。同时,可以发现,随着 SU-8 层厚度的增加,FWHM 呈现出增大的趋势,这是因为介质层的厚度增加逐渐影响上下两层金属的共振耦合效应,使得其 FWHM 增大。

(2)透射共振峰值与介质厚度的关系

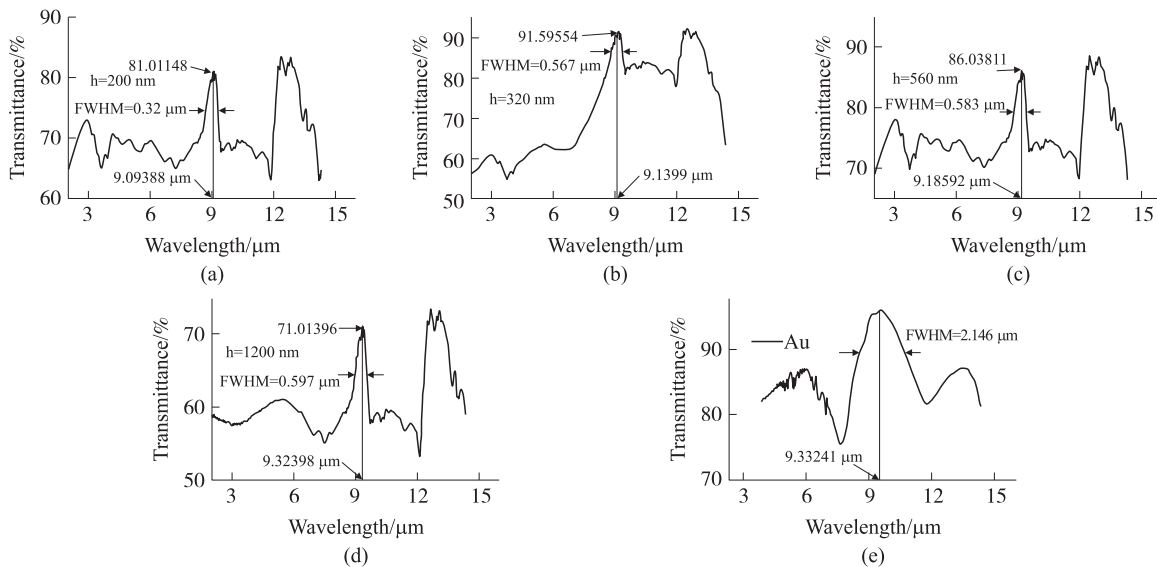


图 4

随着介质层厚度的逐渐增加,器件的透射峰值呈现出一定规律的变化,如图 5 所示。透射峰值在介质厚度为 360 nm 时,出现了最强值,达到 91.6%。其后,随着 SU-8 层厚度的增加,上下两层金属的共振耦合逐渐受到影响,所以透射峰值明显下降,此结果与模拟结果相吻合。

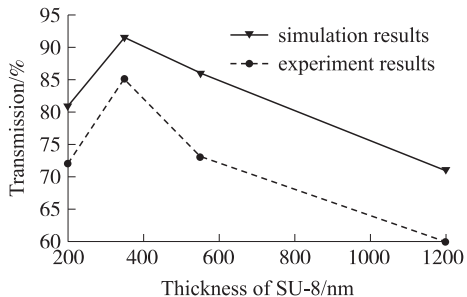


图 5 透射率与介质厚度关系图

(3)SPP 共振峰位置与介质层厚度的关系

从图 4 所示的测试谱中可以发现,A、B、C、D 四样品的 SPP 共振峰位置,与经典的表面等离子体理论相符,都在器件表面结构周期的附近,但是,仍然出现了新的变化——共振峰红移,如图 6 所示。随

由于本文中的 SU-8 层厚度较薄,上下两层金属间的共振耦合效应较强,使得器件的透射峰值较大,样品 A、B、C、D 的透射共振峰值分别为 81.01%,91.59%,86.04%,71.01%,相比较 Yong-Hong Ye 等的实验结果,有了较明显的增强。

图 4(a),(b),(c),(d),分别为 SU-8 介质层的厚度 h 为 200 nm,360 nm,560 nm,1 200 nm 时测得的透射谱。(e)为比较样片,只有 Au,没有 SU-8 介质层,测得的透射谱测量仪器为 Varian 4100 FT-IR。

着器件 SU-8 厚度的逐步增加,SPP 共振峰的位置,从 9.09 μm ,逐步移动到了 9.32 μm ,产生了明显的红移。此现象的产生,可以用 MDM 结构中的电介质的有效折射率 n_{eff} 的概念来解释。

$$n_{eff} = \frac{k_x}{k_0} = \sqrt{\epsilon_d} \left(1 + \frac{\lambda}{\pi t_d \sqrt{-\epsilon_m}} \sqrt{1 + \frac{\epsilon_d}{-\epsilon_m}} \right)$$

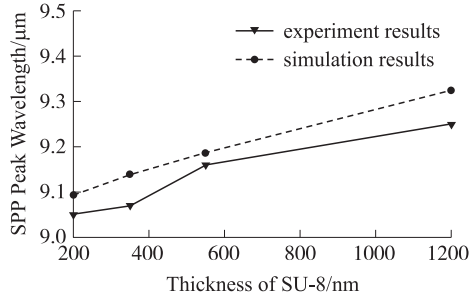


图 6 SPP 共振峰位置与介质层厚度关系图

其中, t_d 是中间夹层电介质膜厚度, λ 是入射光波长, ϵ_d 和 ϵ_m 分别是电介质和金属的介电常数。实验中,在其它参数一定的条件下,只是增加了中间电介质层 SU-8 膜的厚度,即: t_d 变大, n_{eff} 会变小。然后再根据式(3)就能够解释这个共振透射峰红移现象。

5 总结

本文研究了一种基于二维金属亚波长孔阵列三层结构的红外辐射源,探讨了不同厚度 SU-8 膜对金属/电介质/金属(M/D/M)表面等离子体共振结构在中远红外(2~14 μm)波段透射特性的影响。针对常用的四种电介质, SU-8、SiO₂、Si₃N₄、SiO_xN_y, 采用 FDTD 数值模拟软件 R-soft, 模拟了应用这四种电介质的 MDM 结构在中远红外波段的透射特性, 得出以 SU-8 为最佳电介质的结论。

采用了 MEMS 技术, 设计制作了由 Au/SU-8/Au 三层膜组成的 MDM 结构。系统研究了由 Au/SU-8/Au 三层膜组成的 MDM(Metal/Dielectric/Metal)结构, 讨论了电介质的厚度变化对 MDM 结构在 Au/空气界面中的 SPP 共振特性的影响。采用了 MEMS 技术, 设计制作了由 Au/SU-8/Au 三层膜组成的 MDM 结构。对实验样品和对比样品的透射光谱进行了测量。

比较了 MDM 结构与无 SU-8 的 Au 膜的透射特性, 发现 MDM 结构的 FWHM 更窄, 说明三层膜之间的共振耦合起了关键作用。实验和模拟结果表明: SU-8 层厚度变化对器件的 SPP 共振透射峰值有明显影响, 在 360 nm 时出现最大值, 其后, 随着 SU-8 膜厚的增加, SPP 的共振耦合效应逐渐退化, 峰值降低; SU-8 层厚度的变化, 也使得 SPP 共振峰的位置发生明显红移。

光通过 MDM 结构时, 在特定波长展现出的透射特性与介质材料的厚度有很大的关系, 可以通过优化膜厚来获得最佳的窄带共振透射特性。这些研究结果将能为研制高效的等离子体 MEMS 红外辐射源提供重要的参考, 同时, 也能成为制作可调谐的光滤波器和生物化学传感器的新思路。

参考文献:

- [1] Ebbesen T W, Lezec H J, Ghaemi H F, et al. Extraordinary Optical Transmission Through Sub-Wavelength Hole Arrays[J]. Nature, 1998, 391: 667-669.
- [2] Kong Secong-Ho, Orreia Jose Higinio, de Graaf Ger, et al. Integrated Silicon Microspectrometers[J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2001, 9: 34-38.
- [3] Daniel E Grupp, Henri J Lezec, Tineke Thio, et al. Beyond the Bethe Limit: Tunable Enhanced Light Transmission Through a Single Sub-Wavelength Aperture[J]. Adv. Mater, 1999, 11(10): 860-862.
- [4] Ye Yong-Hong, Zhang Jia-Yu. Enhanced Light Transmission Through Cascaded Metal Films Perforated with Periodic Hole Arrays[J]. Opt. Lett, 2005, 30(12): 1521-1523.
- [5] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface Plasmon Sub-wavelength Optics[J]. Nature, 2003, 424: 824-830.
- [6] Xiao Gongli, Yao Xiang, Ji Xinming, et al. Transmission Enhancement Properties of Double-Layered Metallic Hole Arrays[J]. Chinese Optics Letters, 2008, 6(10): 791-793.
- [7] Xiao Gongli, Yao Xiang, Ji Xinming, et al. Effect of the Ratio of Hole Radius to Lattice Spacing on Transmission Characteristics for Metal/Dielectric Photonic Crystal[C]//Beijing 2008 9th international conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology, IEEE press Vol. III. PP. 1025-1028.
- [8] Chang S H, Gray S K, Schatz G C. Surface Plasmon Generation and Light Transmission by Isolated Nanoholes and Arrays of Nanoholes in Thin Metal Films[J]. Opt. Express, 2005, 13: 3150-3165.
- [9] Kovacs G J, Scott G D. Optical Excitation of Surface Plasma Waves in Layered Media[J]. Phys Rev B, 1977, 16, 1297-1311.
- [10] Visser T D. Surface Plasmons at Work[J]. Nature Phys, 2006, 2: 509-510.
- [11] Worthing P T, Barnes W L. Efficient Coupling of Surface Plasmon Polaritons to Radiation Using a Bi-Grating[J]. Appl Phys Lett, 2001, 79: 3035-3037.
- [12] Barnes W L, Kitson S C, Preist T W, et al. Photonic Surfaces for Surface Plasmon Polaritons[J]. Opt Soc Am A, 1997, 14: 1654-1661.
- [13] 王建国, 纪新明, 吴飞蝶, 等. MEMS 光声气体传感器光声腔的研究[J]. 传感器技术, 2006, 25(2): 86-88.
- [14] Grupp D E, Lezec H J, Ebbesen T W, et al. Crucial Role of Metal Surface in Enhanced Transmission Through Subwavelength Apertures[J]. Appl Phys Lett, 2000, 77(11): 1569-1571.
- [15] St' ephane Collin, Fabrice Pardo, Jean-Luc Pelouard, et al. Waveguiding in Nanoscale Metallic Apertures[J]. Opt Express, 2007, 15(7): 4310-4320.

姚翔(1982-), 男, 汉族, 江苏扬州人, 复旦大学微电子系硕士研究生, 主要研究方向为 MEMS 红外辐射源研究, 072052023@fudan.edu.cn;



纪新明(1978-)男, 汉族, 山东青岛人, 复旦大学微电子系讲师, 主要研究方向为 MEMS 工艺和器件方面的研究, xmji@fudan.edu.cn;



黄宜平(1946-)男, 汉族, 上海人, 复旦大学微电子系教授, 博士生导师, 主要研究方向为 MEMS 工艺和器件方面的研究, yphuangi@fudan.edu.cn。

