

The Research of MEMS Infrared Radiation Source Characteristics Based on Surface Plasmon Resonance Effect *

WANG Guo-xun, JI Xin-ming, ZHOU Jia, BAO Zong-ming, BAO Min-hang, HUANG Yi-ping *
(ASIC and system state Key lab, Department of Microelectronics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: In this work, a tunable narrow-band infrared emitters based on the surface plasmon resonance (SPR) technology is reported and the relation between reflection spectrum of infrared light emitters and structure of metallized surface 2D photonic crystal has been studied. The emitters are structured by Si-SiO₂ (650 nm)-Cr (100 nm)-Au (800 nm). Eight structures with different lattice constant a , diameter of holes D , D/a and the symmetry of the hole array are designed and fabricated. The effect of different parameters including a , D and D/a has been studied. The wavelength of reflection peak and strength of reflection peak of the emitters are characterized by infrared light reflection spectrum. The experimental data has been compared and analyzed with simulation results from finite-difference time-domain (FDTD) calculation. It is found that the peak wavelength was proportional to the lattice constant. For emitters with same lattice constant, the larger the ratio, the stronger the reflection. The emitters with hexagonal array among three different symmetries of hole array, has the best reflection spectrum.

Key words: photonic crystal; surface plasmon resonance; MEMS.

EEACC: 2810E

基于表面等离子体效应的 MEMS 红外辐射源特性研究 *

王国勋, 纪新明, 周 嘉, 包宗明, 鲍敏杭, 黄宜平 *

(复旦大学专用集成电路及系统国家重点实验室微电子学系, 上海 200433)

摘 要: 研究了一种新型的基于二维光子晶体结构的表面等离子体共振 SPR (Surface plasmon resonance) 效应的红外辐射源, 该辐射源基本结构为 Si-SiO₂ (650 nm)-Cr (100 nm)-Au (800 nm), 并在 Au 表面刻蚀 5 μm 的周期性排列的圆孔。设计加工了几种不同的结构, 包括三种不同的圆孔间距即晶格常数: 6 μm, 7 μm, 和 8 μm; 四种占空比 (圆孔直径与晶格常数之比): 3/8, 4/8, 9/16 和 11/16; 以及三种圆孔排列方式: 正方形排列, 六边型排列, 和带规则缺陷六边型排列。本文采用红外傅立叶测量设备对辐射源进行测试分析, 通过该辐射源的红外反射谱表征其辐射性能, 并利用 FDTD 软件进行模拟, 和实验数据作了比较。研究结果得出了红外辐射源反射谱波谷位置即 SPR 共振峰位置, 波谷强度即 SPR 共振峰强度与不同结构参数之间的关系。研究发现该辐射源 SPR 共振峰位置基本与圆孔间距即晶格常数成正比, 正方形排列基本接近于 1:1, 而六边型排列基本接近于 $\sqrt{3}/2$; 常规六边型排列比带缺陷六边型排列和正方形排列具有更窄的半波宽和更大的 SPR 共振强度; 随着占空比变大, 该辐射源的 SPR 共振峰强度变大。

关键词: 表面等离子体效应; MEMS 红外辐射源; 光子晶体

中图分类号: TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)08-1352-05

红外气敏传感器利用气体的特征光谱进行测量, 具有优越的选择性、灵敏度和稳定性, 已经得到广泛应用^[1-2]。然而常规的红外气敏传感器体积较大, 难以实现微型化、智能化和网络化, 因此采用 MEMS 技术研制微型化的红外气敏传感器越来越

受到人们的重视。MEMS 红外辐射源是红外气敏传感器的关键部件。

目前已经研制成功的 MEMS 红外辐射源具有低成本、可直接调制等特点^[1-6], 但其辐射光谱通常在 2 ~ 14 μm 之间的广谱范围, 不具有波长选择性。而在

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (90607015)

收稿日期: 2008-03-06 修改日期: 2008-05-13

实际测量气体时,只有和气体特征光谱相近的那部分辐射光有效,其他都是对辐射源辐射功率的浪费。本文基于二维光子晶体结构的表面等离子体共振 SPR (Surface plasmon resonance) 效应研究了一种新型的 MEMS 红外辐射源,实现了对辐射源发射光谱的选择性,有效提高了辐射源的辐射效率,进而可以提高 MEMS 红外气敏传感器的探测灵敏度。

表面等离子体效应研究已经有很长的历史,在 kretschmann 等人^[7]提出用金属薄膜来取代以往的无限半导体介质后,该效应引起人们关注。最近 Ion Optics 公司研究发现基于二维光子晶体结构的表面等离子体效应可以应用于红外辐射源^[8],并做了初步的研究。本文基于这种理论,设计了一种新型的红外辐射源,并系统地研究了这种辐射源表面各种参数,如晶格常数,占空比(圆孔直径与圆孔间距之比),圆孔排列形状等对该辐射源特性的影响,并可以通过改变晶格常数即圆孔间距控制 SPR 共振峰位置,通过改变表面占空比,圆孔深度,和金属薄膜厚度等结构参数来控制 SPR 共振峰的强度以及半波宽,得到最强的 SPR 效应,从而得出最理想的红外光源。

1 工作原理

SPR 是一种物理光学现象,当一束平行单色偏振光入射到镀有薄层金属膜(Au 或者 Ag)的表面发生全反射时,若入射光的波向量与金属膜内表面电子的振荡频率符合,光线即与金属膜发生耦合效应,引发电子共振,即 surface plasmon resonance 效应,该效应是金属自由电子的一种集团运动,代表了一种表面带电的量子振动。

该结构所引起的共振由 SP 模式引起,SP 的色散关系为^[9]:

$$k_{sp} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_d \epsilon_m}{\epsilon_d + \epsilon_m}} \quad (1)$$

入射光很难在光滑的表面直接产生 SPR 效应,但当入射光通过周期性圆孔的金属介面时,SPR 效应就很容易被激发,由量子动力守恒条件,得到薄金层和空气以及薄金层和介质层之间的 SPR 模式,如下所示^[9]:

$$k_{sp} = \frac{2\pi}{a} \sin \theta \pm nk_a \quad (2)$$

其中: k_{sp} 为波矢量, k_a 为表面倒格矢量,为红外光频率, c 为光速, ϵ_d 为介质的介电常数, ϵ_m 为金属介电常数的实部。

由式(1)和式(2)可以推出正方形排列和六边

型排列的反射谱波谷波长位置与晶格常数关系如下所示:

$$= a \sqrt{\frac{\epsilon_d \epsilon_m}{\epsilon_d + \epsilon_m}} (\sqrt{i^2 + j^2})^{-1} \quad (3)$$

$$= \frac{\sqrt{3}}{2} a \sqrt{\frac{\epsilon_d \epsilon_m}{\epsilon_d + \epsilon_m}} (\sqrt{i^2 + ij + j^2})^{-1} \quad (4)$$

i 和 j 都是整数,通常情况下取(1,0)或者(0,1),由于 ϵ_m 一般远远大于 ϵ_d ,所以当红外光从空气介质中入射时,其红外反射谱波谷位置,即 SPR 共振峰位置在正方形排列下基本等于晶格常数;在六边型排列下等于 $\sqrt{3}/2$ 倍的晶格常数。

2 结构设计与加工

SPR 效应的产生对金属和介质层都有很严格的要求: 介质层介电常数为正数; 金属薄膜的介电常数实部为负数; 金属薄膜的介电常数实部模远大于虚部,因为虚部决定了等离子体的衰减速度。适合 SPR 要求的金属主要为 Au,Ag,比较 Au 和 Ag 在中红外波段的介电常数,可知 Ag 相比 Au 有着稍大的实部与虚部之比,能得到更好的 SPR 效应^[7]。但由于高温时,暴露于空气中时,Au 比 Ag 有着更好的惰性和稳定性,所以本文选择金为表面金属。

在衬底 Si 上热氧化 6 500 A 厚的 SiO₂,再蒸发淀积 Cr-Au(100~900 nm),经过光刻工艺,并采用等离子刻蚀技术刻蚀 5 μm 深度的圆孔,得出各种表面结构的周期性排列的圆孔。设计加工了几种不同的结构,具体结构参数如表 1 所示:

表 1 结构参数 单位:μm

排列型式	晶格常数 a	圆孔直径 D	圆孔深度 h	金属薄膜厚度 T_m	介质薄膜厚度 T_s
正方形排列	6~8	3~5.5	5	800	6 500
六边型排列	6~8	3~5.5	5	800	6 500

其实物图和辐射表面结构如图 1 所示:

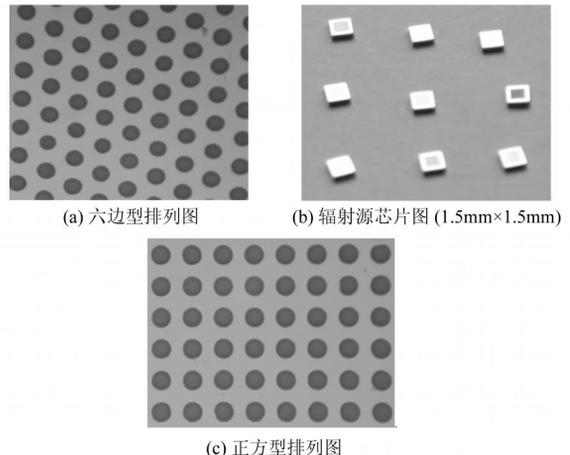


图 1 结构实物图

3 结果与讨论

根据能量守恒, $A = 1 - R - T$ (A 为红外光吸收率, R 为反射率, T 为透射率), 由于一般可以忽略透射率, 所以近似 $A = 1 - R$. 由基尔霍夫定律, 辐射源辐射率等于吸收率 A 乘以温度 T 的黑体辐射 $K(\nu, T) : E(\nu, T) = A(\nu) K(\nu, T)$, 得出辐射源辐射率基本反比于反射率^[10], 从而可以用辐射源反射谱来反映辐射源发射谱. 本文测试了辐射源的反射谱, 测试设备为红外傅立叶光谱仪 FTIR (Magna 550). 入射角控制在近似 90° , 以保证界面的全反射状态.

以正方形排列, 结构参数为 A8D5 (晶格常数为 $8 \mu\text{m}$, 圆孔直径为 $5 \mu\text{m}$) 的辐射源为例, 测量得到该器件的实验结果; 同时, 为了得到更高精度的结果, 利用 FDTD 软件 R-soft 进行模拟, 得出其模拟和实验结果, 如图 2 所示.

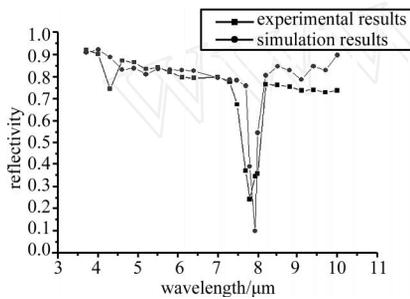


图 2 正方形排列的 A8D4 结构的模拟和实验红外反射谱

结果表明当晶格常数为 $8 \mu\text{m}$ 时, SPR 共振峰位置基本为 $8 \mu\text{m}$, 证明波长为 $8 \mu\text{m}$ 的红外光能对结构参数为 A8D4 的辐射源激发表面等离子体效应, 符合理论推导, 同时实验测量时可以发现在接近 $4.3 \mu\text{m}$ 波长处有小波谷, 这与 $4.3 \mu\text{m}$ 左右的圆孔有一定的概率透过一倍波长或者 $1/2$ 倍波长的圆孔有关. 在全反射区域, 反射率接近 90% , 也小于 100% , 即非完全反射, 这是由于金属层对红外光的吸收决定, 主要影响因素为金属介电常数的虚部和金属层的厚度^[11-12]. 相比实验结果, 模拟结果有着更窄的半波宽 FWHM (full-width half-maximum) 和更强的 SPR 效应, 因为模拟状态完全为理想状态, 而实验测量时, 实验结果会受到很多其他因素的影响, 如加工过程中造成尺度的误差等等.

(1) 晶格常数与 SPR 共振峰的关系

周期性结构引起周期性介电常数的变化, 对于不同的晶格常数 a , 引起的周期性势场也会不同, 从而导致 SPR 共振峰位置发生相应的变化, 通过模拟和实验测量圆孔排列为正方形排列, 晶格常数 a 分

别为 $6 \mu\text{m}$, $7 \mu\text{m}$ 和 $8 \mu\text{m}$ 的器件, 得出其共振峰位置基本与晶格常数之比为 $1:1$, 与理论推导一致, 其关系如图 3 所示:

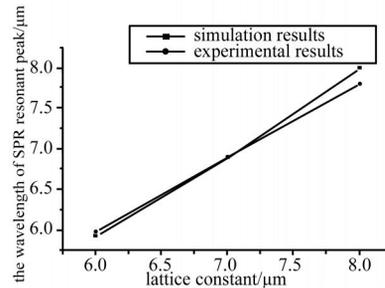


图 3 晶格常数与 SPR 共振峰位置的关系图

(2) 占空比与 SPR 共振峰强度的关系

当固定晶格常数为 $8 \mu\text{m}$, 改变圆孔直径, 从而改变占空比 D/a , 通过模拟和实际测量 D/a 为 $\frac{3}{8}$, $\frac{4}{8}$, $\frac{5}{8}$ 和 $\frac{5.5}{8}$ 的表面结构, 发现 D/a 越大的结构, 其反射峰越弱, 即共振峰强度越大, 如图 4 所示:

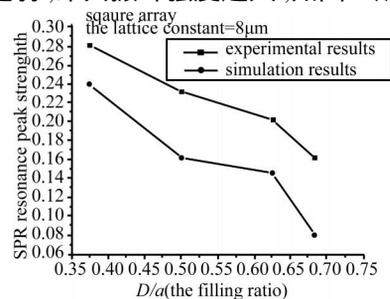
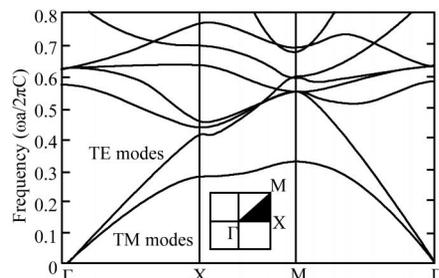
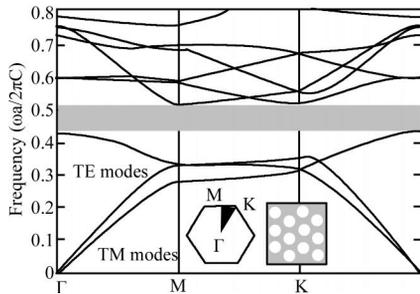


图 4 D/a (圆孔直径与晶格常数之比) 与 SPR 共振峰强度的关系

由光学原理可知, 光传播分为 TE 和 TM 两种传播模式, 而在占空比较小时, 从图 5(a) 可以看出, 能够制造能带禁带, 形成 SPR 共振的主要是 TM 传播模式, 此时 TE 传播模式影响基本可以忽略, 而当占空比变大, TE 传播模式也逐渐形成禁带, 当占空比达到 0.98 时, 两者禁带完全重合, 如图 5(b) 所示, 此时 TE 和 TM 传播模式都能制造能待禁带, 激发 SPR 共振, 从而可以得到最高强度的 SPR 共振峰.



(a) D/a 较小时 TE 和 TM 波的能带图



(b) D/a 等于 0.98 时 TE 和 TM 波的能带图
图 5 该类型辐射源的能带图^[13]

(3) 红外反射谱与圆孔排列形状的关系

表面圆孔周期性排列形状对 SPR 共振峰也有影响。图 6 给出了结构参数为 A8D4 (晶格常数为 $8 \mu\text{m}$, 圆孔直径为 $5 \mu\text{m}$), 圆孔排列形状分别为正方形和六边型的辐射源红外反射谱:

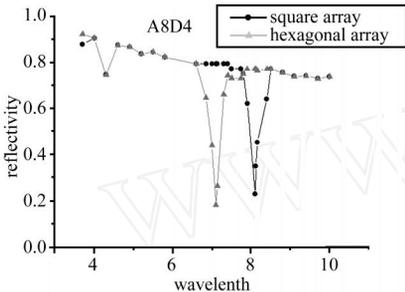


图 6 结构参数为 A8D4 (晶格常数为 $8 \mu\text{m}$, 圆孔直径为 $5 \mu\text{m}$), 圆孔排列形状分别为正方形和六边型的辐射源红外反射谱

从图中可以看到六边型排列比正方形排列有着更强的共振峰和更窄的半波宽。这是由两种排列所具有的不同周期性程度引起, 六边型排列比正方形排列有着更好的周期性, 其在六个方向上的晶格常数都相等, 而正方形排列只在两个方向的晶格常数相等, 这使得光波在六边型排列器件传输过程中更少的受到传输方向的影响, 所以其能激发更强和更窄的 SPR 共振。

(4) 缺陷对 SPR 共振峰的影响

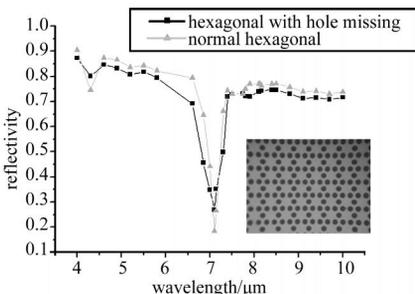


图 7 结构参数为 A8D4, 带缺陷六边型排列和正常六边型排列的辐射源红外反射谱

周期性排列中引入缺陷对 SPR 效应会有影响, 引入如图 7 所示的规则缺陷后, 不会破坏原来的周

期性排列, 进而破坏周期性势场, 但由于表面整体圆孔的填充比下降, 虽对整体的共振效应产生没有大的改变, 但会削弱这种共振效应, 使其共振峰强度变小, 半波宽变宽。

4 总结

本文系统地研究了表面等离子体效应 MEMS 红外光源辐射特性, 通过设计加工几种不同表面结构的辐射源, 并通过表征该辐射源对红外光的反射性能, 可以得出该辐射源实际的发射性能, 分别得出了晶格常数与反射谱波谷位置即 SPR 共振峰位置的关系, 占空比与 SPR 共振峰强度的关系, 圆孔排列形状与 SPR 共振峰强度和半波宽的关系, 并引入缺陷对 SPR 共振峰强度和半波宽的关系。

实验和模拟结果表明对于正方形排列, 晶格常数与 SPR 共振峰位置关系基本为 1:1, 随着占空比增大, SPR 共振峰强度将增大, 六边型排列比正方形排列的 SPR 共振峰更强并且半波宽更窄, 引入缺陷会减小 SPR 共振峰强度和增大半波宽。

在此基础上, 可以进一步制备用作 MEMS 红外气敏传感器中的实用的红外光源。

参考文献:

- [1] Frank J, Meixner H. Sensor System for Indoor Air Monitoring Using Semiconducting Metal Oxides and IR-Absorption [J]. Sensor and Actuators B. 2001, 78: 298-302.
- [2] Kong Seong-Ho, Correia Jose Higinio, de Graaf Ger, Marian Bartek, et al. Integrated Silicon Microspectrometers [J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. 2001, 9: 34-38.
- [3] Pellegrino Paul M, Polcawich Ronald G. Advancement of a MEMSPHOTOACOUSTIC CHEMICAL SENSOR [J]. Proc. Of SPIE. 2003, 5085:52-63.
- [4] 纪新明, 吴飞碟, 黄宜平. 光学精密工程, 2005, 13(2): 144-150.
- [5] 王建业, 纪新明, 吴飞蝶, 周嘉, 黄宜平. 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.
- [6] 纪新明, 吴飞蝶, 王建业, 周嘉, 包宗明, 黄宜平. 单膜红外微辐射单元的研制 [J]. 半导体学报, (2005) 34-38.
- [7] Heinz Raether Dr. Surface Plasmon on Smooth and Rough Surfaces and on Grating [D]. 1988, Bruhische University.
- [8] El-Kady I, Biswas R, Ye Y. Photonics. Nanostructures-Fundamentals and Applications I [M]. 2003:69-77.
- [9] 崔大付, 李向明, Modern Scientific instruments [J]. 2001, 6: 34-38.
- [10] Ignacy Gryczynski, Joanna Malicka, Zygmunt Gryczynski. Plasmonics in Biology and Medicine [M]. 2004:37-44.
- [11] Gornik E, Kock A, Physical Concepts of Materials for Novel Optoelectronic Device Applications II [M]. Device Physics and

Application, 1990:1-13.

[12] 赵晓君,陈焕文,分析仪器[J]. 2000,4:1-8.

[13] John D Joannopoulos, Robert D. Meade, Joshua N. Winn. Photonic Crystal[M]. Princeton University Press 1995.



王国勋(19-) ,男,汉族,江西九江人,复旦大学微电子系硕士研究生,研究方向为 MEMS 红外辐射源,0121174 @fudan.edu.cn



黄宜平(19-) ,男,汉族,上海人,复旦大学微电子教授,博士生导师,从事 MEMS 工艺和器件方面的研究工作, yphuang @fudan.edu.cn

www.cnki.net