

金属腔量子阱红外探测器共振波长的角度依赖性

聂晓飞^{1,2}, 尹伊哲^{1,3}, 甄红楼^{1,2*}, 董天阳^{1,4}, 黄高山⁵, 梅永丰⁵, 陆卫^{1,2*}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 红外物理国家重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院大学 北京 100049;

3. 上海师范大学 数理学院, 上海 200234;

4. 上海科技大学 物质科学与技术学院, 上海 201210;

5. 复旦大学 材料科学系 ASIC 与系统国家重点实验室, 上海 200433)

摘要: 测量了金属腔量子阱红外探测器在斜入射条件下的光电流谱, 斜入射条件分为入射面垂直于器件长轴和平行于器件长轴两种情形。从实验和理论上研究了金属腔共振模对入射角度的依赖性。实验结果表明: 入射面垂直于器件长轴时, 腔模共振波长不随入射角度变化; 入射面平行于器件长轴时, 腔模共振波长随入射角度变大而向短波移动。测试结果和推导出的共振波长与入射角度的关系式所计算的结果符合的很好。同时也对比、分析了 Fabry-Pérot 滤波器和等离激元滤波器的透射峰值波长与入射角度的关系, 结果表明金属腔量子阱红外探测器具有相对较好的角度稳健性, 并且利用三维金属腔的限制作用有望开发出响应波长对入射角度完全不敏感的量子阱红外探测器。

关键词: 金属微腔; 红外探测器; 量子阱; 共振波长

中图分类号: TN362

文献标识码: AA

Angular dependence of resonance wavelength in metallic cavity quantum well infrared photodetector

NIE Xiao-Fei^{1,2}, YIN Yi-Zhe^{1,3}, ZHEN Hong-Lou^{1,2*}, DONG Tian-Yang^{1,4}, HUANG Gao-Shan⁵,
MEI Yong-Feng⁵, LU Wei^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China;

3. Mathematics and Science College, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China;

4. School of Physical Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China;

5. Department of Materials Science and State Key Laboratory of ASIC and system, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: The photocurrent spectra of metallic cavity quantum well infrared photodetectors under oblique incidence have been measured with incident plane being perpendicular to or parallel to the long axis of the device. The dependence of the resonant mode of the metallic cavity on the incident angle is investigated experimentally and theoretically. The experimental results show that the resonant wavelength of the cavity mode does not change with the incident angle when the incident plane is perpendicular to the long axis of the device, while it moves to shorter wavelength with the increase of the incident angle when the incident plane is parallel to the long axis of the device. The measured results are in good agreement with the calculated results of the derived formula which describes the relationship of the resonant wavelength and the incident angle. The angle dependences of the Fabry-Pérot filter and the plasmonic filter are also analyzed and compared. The results show that the metal cavity quantum well infrared detector has relatively good angle robustness,

收稿日期: 2020-10-06, 修回日期: 2021-04-21

Received date: 2020-10-06, Revised date: 2021-04-21

基金项目: 上海市自然科学基金(19ZR1465600)

Foundation item: Supported by the Science and Technology Commission of Shanghai Municipality (19ZR1465600)

作者简介 (Biography): 聂晓飞(1986-), 男, 河南南阳人, 博士研究生, 主要研究领域为量子阱红外探测器。

E-mail: nxflx@mail.sitp.ac.cn

*通讯作者 (Corresponding author): E-mail: zhenhl@mail.sitp.ac.cn, luwei@mail.sitp.ac.cn

and it is expected to develop a quantum well infrared photodetector whose response wavelength is completely insensitive to the incident angle by using three-dimensional metal cavity.

Key words: metallic microcavity, infrared photodetector, quantum well, resonance wavelength

PACS:42. 55. Px, 78. 55. Cr, 78. 67. De, 68. 65. Fg

引言

红外光谱成像技术不仅能够获取目标辐射的强度信息,还能获取目标辐射的光谱信息,因而对目标的识别能力更强,目前片上集成光谱探测功能的红外探测器在仪器小型化和低功耗等方面显示出明显的优势,是发展新一代红外探测器的重点^[1-5]。为了能够提供准确、稳定的光谱信息,探测器的光谱单元最好对入射角度不敏感,使探测器的响应波长和/或响应值不会随入射角度变化而改变。目前所开发的能与探测器像元集成的滤光器,例如 Fabry-Pérot 滤光器^[6-11]和等离子体滤光器^[12-15]等,其透射光谱大多都是与角度相关的,而且通常这些滤光器还需要与探测器敏感元结合才能实现光谱选择探测,所以还可能存在材料匹配问题。

量子阱红外探测器(quantum well infrared photodetector, QWIP)具有均匀性好、工艺成熟、可用于大面阵红外焦平面、探测波长可通过能带工程调节以及容易实现多色探测等优点。量子效率低和只能吸收正入射光的偏振选择性是量子阱红外探测器的主要缺点,曾被认为会阻碍量子阱红外探测器的进一步发展。不过随着量子阱红外探测器技术的发展,在很多应用场景中,研究人员发现量子阱红外探测器技术具有独特的功能优势,比如片上集成的具有偏振探测和/或多光谱探测功能的量子阱红外探测器^[16-21]。这些探测器可以直接利用特殊的台面结构对入射光进行偏振耦合或共振耦合,然后利用内嵌的量子阱对耦合光进行探测,从而实现片上集成的偏振或多光谱探测。其中直接利用敏感元台面作为共振结构的金属谐振腔型量子阱红外探测器(metal cavity quantum well infrared photodetector, MC-QWIP)已经在光谱选择性和工艺集成上显示出明显优势^[21],为了研究这种谐振腔结构量子阱红外探测器的光谱响应对入射角度的敏感性,本文设计制备了不同尺寸(对应不同谐振模式和谐振波长)的金属腔量子阱红外探测器,通过测试不同入射角度下的响应光谱,从实验和理论上分析、研究了金属腔的谐振模式对入射角度的依赖关系。同时作为对比,本文还给出了以 Fabry-Pérot 滤光器

以及等离子体滤光器作滤光元件时光谱响应对入射角度的依赖关系。结果表明相对于 Fabry-Pérot 滤光器和等离子体滤光器,金属腔量子阱红外探测器光谱响应对入射角度具有相对较好的稳健性,并且具有对入射角度完全不敏感的开发潜力。

1 器件制备与测试方法

金属腔量子阱红外探测器的结构如图 1 所示,量子阱材料由 GaAs 上、下电极层以及多量子阱层组成,其中每个量子阱周期包含一个 40 nm 厚的 $\text{Al}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{As}$ 势垒和一个 5.2 nm 的 GaAs 势阱,势阱中间 Si 掺杂密度 $n_d = 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$,上、下电极层的 Si 掺杂浓度均为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。

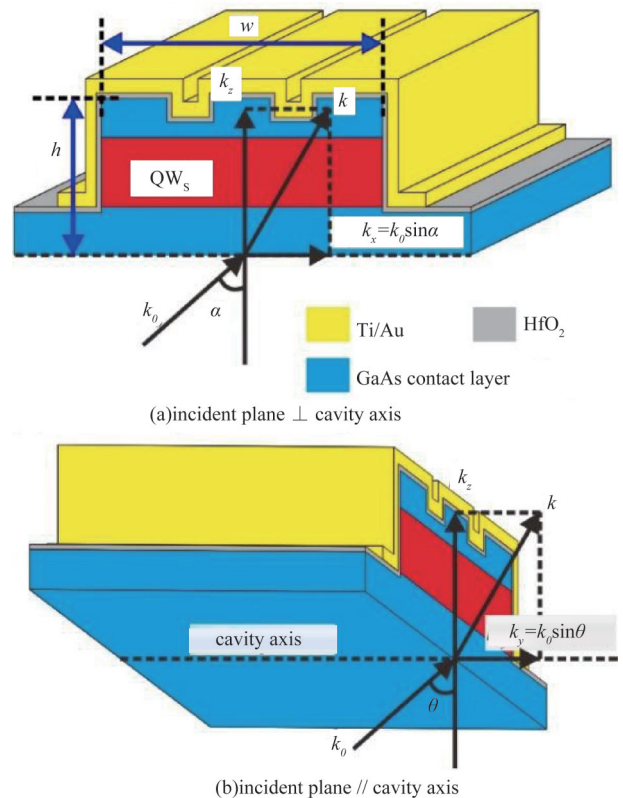


图 1 金属腔量子阱红外探测器结构以及斜入射光示意图 (a)入射面垂直于腔轴,(b)入射面平行于腔轴

Fig. 1 Schematic diagram of the MC-QWIP and the oblique incident light (a) The incident plane is perpendicular to the cavity axis, (b) the incident plane is parallel to the cavity axis

本文所测器件是用两片具有不同下电极层厚度的量子阱材料外延片加工而成,其中一片下电极层厚度为 500 nm,另一片 700 nm,分别标记为 M1 和 M2。通过刻蚀工艺将量子阱材料刻蚀出台面和光栅结构,这一步工艺确定了探测器的台面尺寸,其中台面宽度 w 和材料厚度 h 决定了最后所形成金属腔的尺寸。在蒸镀 Ti/Au 以包裹台面形成金属腔前,还需要在台面上镀一层绝缘介质膜包裹台面侧壁,这是为了防止台面侧壁的 Ti/Au 膜短路上、下电极,这里采用 ~50 nm HfO_2 作为绝缘膜。

本文所制备的器件是长条形,长度 200 μm 远大于入射光波长,因而可以将器件的金属腔看作宽为 w 、高为 h 的二维金属腔。制备好的器件封装在真空制冷杜瓦内进行光电流谱测试,正入射光沿 z 轴从金属腔底部入射到腔内,将真空制冷杜瓦沿水平方向旋转一定角度,入射到器件的光就是斜入射光,这时就可以测量器件对斜入射光的光谱响应特性^[22]。入射面垂直于长轴(即 y 轴)或短轴(即 x 轴)的这两种情况显然是不一样的,因此有必要分别在这两种情况下测量,方法就是将器件长轴沿水平或

垂直方向安装在杜瓦内,入射角度通过水平旋转杜瓦调节。

2 测试结果与分析

2.1 斜入射条件下 MC-QWIP 的光电流谱测试与分析

图 2 给出了斜入射光下金属腔量子阱红外探测器的归一化光电流谱,从各器件的光电流谱可以看到明显的共振峰,并且不同台面尺寸的器件,共振峰的峰值波长各不相同,这些共振峰反映了金属腔的共振模式(由于 M2 器件是安装在氦循环制冷杜瓦内测试的,该杜瓦体积较大,在傅里叶红外光谱仪内的转动角度有限,斜入射角度最大只能测到约 25°,所以实验上没有得到器件大角度斜入射下的实验数据)。对于正入射光,金属腔模的共振波长可由下式估算^[21]:

$$\lambda = \frac{2n_{\text{eff}}}{\sqrt{\left(\frac{M}{w}\right)^2 + \left(\frac{N}{h}\right)^2}}, \quad (1)$$

其中 M, N 是腔模在 x, z 方向上的模数, n_{eff} 是腔内材

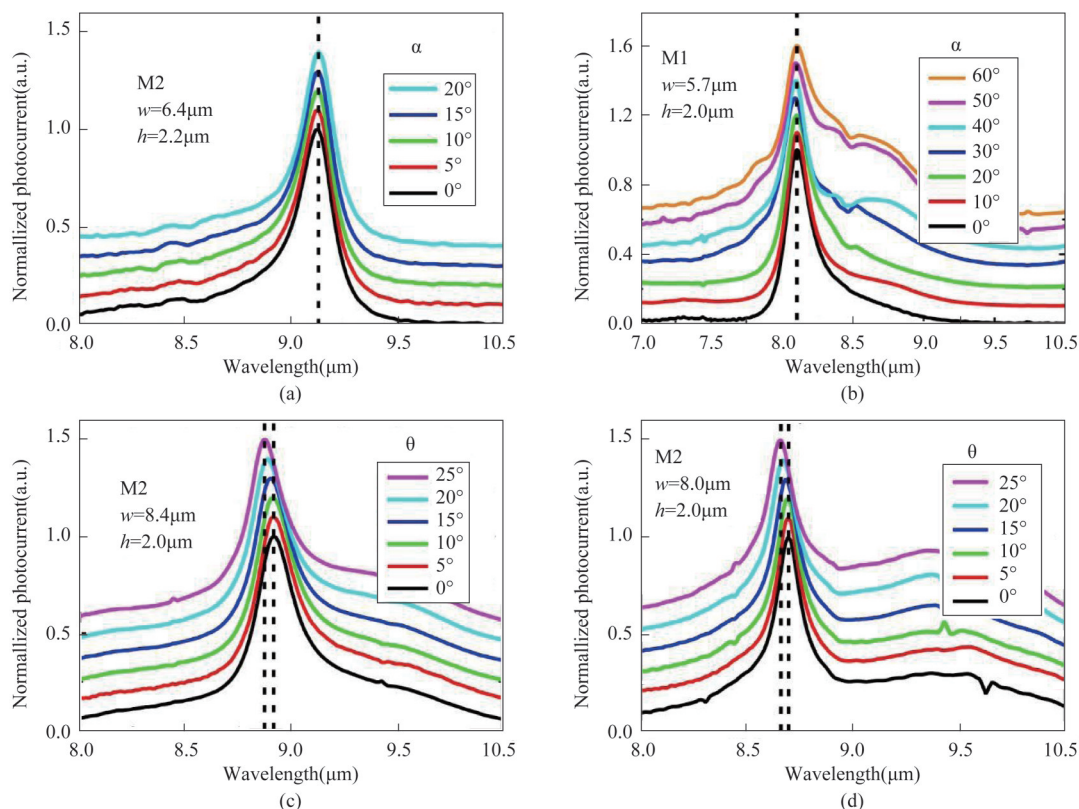


图 2 金属腔量子阱红外探测器在斜入射条件下的光电流谱(a)、(b)入射面垂直于腔轴,(c)、(d)入射面平行于腔轴

Fig. 2 The photocurrent spectra of the MC-QWIP under oblique incidence (a), (b) The incident plane is perpendicular to the cavity axis, (c), (d) The incident plane is parallel to the cavity axis

料的有效折射率。对于斜入射光,从图2的测试结果可以看出:当入射面垂直于腔轴时,共振波长是不随入射角变大而改变的;当入射面与腔轴平行时,随着入射角的增大,共振波长向较短波长移动,下面将对斜入射条件下的腔模模式做进一步分析。

当入射面垂直于腔轴(y 轴)时,入射光波矢如图1(a)所示,在腔轴方向上没有波矢分量(即 $k_y = 0$)。因此,所有波矢分量都贡献给了二维腔模:

$$k_{MN} \equiv \sqrt{\left(\frac{M\pi}{w}\right)^2 + \left(\frac{N\pi}{h}\right)^2} = k = k_0 n_{\text{eff}}, \quad (2)$$

其中 k 和 k_0 分别是入射光在腔内材料和空气中的波矢。将波长 $\lambda = 2\pi/k_0$ 代入上式即可得式(1),这种情况下腔模的共振波长与入射角 α 无关,图2(a-b)的测试结果也证实了这一点。

当入射面平行于腔轴时,入射光波矢如图1(b)所示,这时斜入射光的波矢 k 在腔轴方向有波矢分量 k_y ,而只有垂直于腔轴的波矢分量才会对二维腔模有贡献:

$$k_{(M,N)} = \sqrt{k^2 - k_y^2} = \sqrt{(k_0 n_{\text{eff}})^2 - (k_0 \sin \theta)^2} \\ = k_0 \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - \sin^2 \theta}, \quad (3)$$

其中 $k_y = k_0 \sin \theta$ 是由于波矢在界面处的切向分量守恒。根据上式可得腔模的共振波长为:

$$\lambda = \frac{2\sqrt{n_{\text{eff}}^2 - \sin^2 \theta}}{\sqrt{\left(\frac{M}{w}\right)^2 + \left(\frac{N}{h}\right)^2}}, \quad (4)$$

在 $\theta = 0^\circ$ 时,式(4)就变为式(1)。式(4)表明,当入射面与腔轴平行时,腔模的共振波长随入射角 θ 的变大而变小,这与器件的光电流谱测试结果符合,如图2(c-d)所示。

2.2 MC-QWIP与滤光器的角度依赖性分析和对比

图3显示了从光电流谱提取的不同入射角度下的金属腔模的共振波长,图中的曲线是根据式(1)和式(4)计算所得到的,计算中腔内的有效折射率 n_{eff} 取在3~3.05之间,以使 0° 时的计算数据与实验数据更符合。从图中可以看到入射面平行于腔轴时,式(4)所预测的共振波长随入射角度的变化与实验所测结果符合较好。当入射角从 0° 变化到 25° 时,对于 $w = 8.0 \mu\text{m}$ 和 $w = 8.4 \mu\text{m}$ 的两个器件,实验所测的共振波长偏移量分别为 $0.034 \mu\text{m}$ (0° 共振波长为 $7.69 \mu\text{m}$)和 $0.036 \mu\text{m}$ (0° 共振波长为 $7.92 \mu\text{m}$),因此相对偏移分别为 0.44% 和 0.45% 。从图3可以看出实验所测的共振波长偏移量略小于式(4)所预

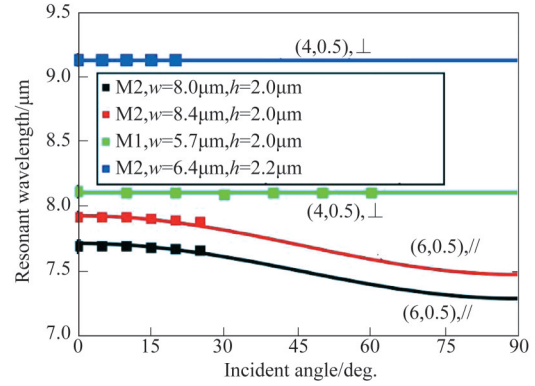


图3 MC-QWIP腔膜共振波长与入射角度的关系,散点数据是从实验所测的光电流谱中提取出来的,曲线数据是根据式(1)和(4)计算出来的

Fig. 3 Resonant wavelength versus the incident angle for the MC-QWIP. The scatter data are extracted from measurements and the solid lines are calculated according to Eq. 1 and 4

测的波长偏移量,该偏差可以从两方面分析:首先是测量所用光源并不是严格的平行光,而是有大约 5° 的发散角,这为入射角的测量引入了误差;其次,计算共振波长的式(4)是利用半开放的等效矩形金属腔建立的,实际器件的腔内包含绝缘膜和衍射光栅槽,这些影响因素在式(4)中是用一个有效折射率常数简单概括,这必然与实际器件存在差异。从式(4)的导出过程可以看出斜入射光的波矢分量损失(k_y)是造成共振波长偏移的原因,这会导致共振波长随入射角变大而向短波移动,图3中的实验数据随入射角度的变化趋势也验证了这一点,因此可以推断,对于 25° 以上的斜入射角,共振波长会随着波矢分量的损失(k_y)变大而继续向短波偏移。

图4也给出了Fabry-Pérot滤光器和等离子激元滤

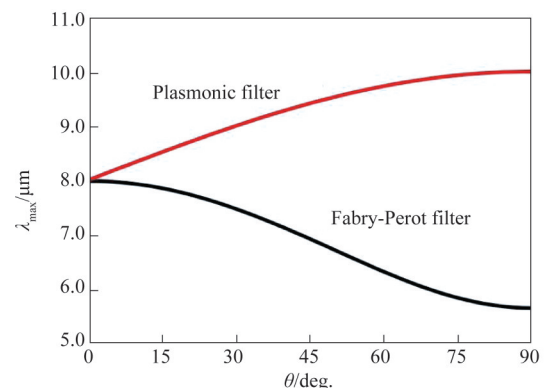


图4 Fabry-Pérot滤光器和等离子激元滤光器的透射峰值波长与入射角度的关系

Fig. 4 Transmission peak wavelength versus the incident angle for Fabry-Pérot filter and plasmonic filter

光器的透射峰值波长和入射角度的关系。对于 Fabry-Pérot 滤光器,计算透射峰值波长的式为^[6]

$$\lambda_{\max} = \frac{2\pi nd \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{n^2}}}{N\pi + \varphi(\lambda)}, \quad (5)$$

其中 N 为干涉级, n 为 Fabry-Pérot 腔中介质的折射率, d 为腔体间隙, 以及 $\varphi(\lambda)$ 为反射相变。计算所采用的参数值为 $N = 1$, $n = 2$, $d = 2 \mu\text{m}$, 以及 $\varphi(\lambda) = 0$ 。对于等离子激元滤光器, 计算透射峰值波长的式为^[12]

$$\lambda_{\max} = \frac{p}{N} \left(\sqrt{\frac{\varepsilon_m \varepsilon_d}{\varepsilon_m + \varepsilon_d}} + \sin \theta \right), \quad (6)$$

其中 N 为衍射阶数, ε_m 和 ε_d 分别为金属和介质的介电常数, p 为等离子激元滤波器的光栅周期。计算所采用的参数值为 $N = 1$, $\varepsilon_m = -2100 + 1600i$, $\varepsilon_d = 16$, $p = 2 \mu\text{m}$ 。

从计算结果可以看到 Fabry-Pérot 滤光器的入射角度依赖性与 MC-QWIP 在平行入射时的情况类似, 波长随入射角度的偏移率在 0° 附近和 90° 附近都很小, 而在中间角度时偏移率较大。对于等离子激元滤光器, 波长偏移率在较小角度时较大, 随着角度增加而逐渐减小。值得注意的是, 同样的入射角度变化下, MC-QWIP 的波长偏移量远小于两种滤光器的波长偏移量。比如入射角度从 0° (峰值波长 $8 \mu\text{m}$) 变化到 25° 时, 等离子激元滤光器和 Fabry-Pérot 滤光器的波长偏移量分别为 $0.85 \mu\text{m}$ 和 $0.37 \mu\text{m}$, 相对偏移分别为 10.5% 和 4.6% , 远大于 MC-QWIP 在斜入射面平行于腔轴时的波长偏移, 表明 MC-QWIP 器件具有相对较好的角度稳健性。

令 $\sin \theta \equiv x$, 将式(4)右边在 $x = 0$ 处展开并取二级近似, 可得与角度相关项的表达式为

$$\delta\lambda(x) = \frac{\lambda(0^\circ)x^2}{2n_{\text{eff}}^2}. \quad (7)$$

从上式可以看出 0° 附近的波长偏移量与折射率平方成反比。同样的, 式(5)也有类似的表达式。由于 Fabry-Pérot 腔中的介质折射率小于金属腔内量子阱材料的折射率, 所以其波长偏移在同一斜入射角度下要大于金属腔的波长偏移, 而实际 Fabry-Pérot 腔中的介质通常为空气, 所以其波长偏移会更大。从式(6)可以直接得出等离子激元滤光器的波长偏移为

$$\delta\lambda(x) = \frac{\lambda(0^\circ)x}{n_d}, \quad (8)$$

这里用到了近似条件 $\sqrt{\frac{\varepsilon_m \varepsilon_d}{\varepsilon_m + \varepsilon_d}} \approx n_d$, n_d 是等离子激元

滤光器中介质的折射率。对比式(7)和(8)可知, 在同一条件下, 等离子激元滤光器的波长偏移要大于 Fabry-Pérot 滤光器的波长偏移。

3 结论

金属谐振腔型量子阱红外探测器具有良好的谐振选频能力, 因此是实现片上集成多光谱探测器的理想选择。本文针对光谱探测器中普遍关注的光谱响应对入射角度的敏感性问题, 研究了金属谐振腔型量子阱红外探测器光谱响应与入射角度的依赖关系。器件的测试结果以及计算分析表明: 当入射面垂直于腔轴方向时, 腔模共振波长不随入射角度变化; 而当入射面平行于腔轴时, 腔模共振波长随入射角度变大而向短波偏移。不过在同样斜入射角度下, 金属谐振腔型量子阱红外探测器响应光谱的峰位变化远小于 Fabry-Pérot 滤光器和等离子激元滤光器的峰位变化。而且从金属腔对入射波矢的限制作用可以推断出金属侧壁在消除角度依赖性方面起着重要作用, 如果在腔轴方向上也制备出金属侧壁(即形成 3D 金属腔), 那么即使入射面平行于腔轴, 共振波长也不会随入射角变化而改变, 从而可以获得对入射角度完全不敏感的窄带光谱探测器。

References

- [1] Talghader J J, Gawarikar A S, Shea R P. Spectral selectivity in infrared thermal detection [J]. *Light: Science & Applications*, 2012, **1**(8): e24.
- [2] Bhargava R. Infrared spectroscopic imaging: The next generation [J]. *Applied Spectroscopy*, 2012, **66**(10): 1091-1120.
- [3] Hinnrichs M, Massie M A. Image multispectral sensing: A new and innovative instrument for hyperspectral imaging using dispersive techniques [J]. *SPIE*, 1995, **2480**: 93-104.
- [4] Hinnrichs M. Imaging spectrometer for fugitive gas leak detection [J]. *SPIE*, 1999, **3853**: 152-161.
- [5] Rogalski A. Next decade in infrared detectors [J]. *SPIE*, 2017, **10433**: 104330L.
- [6] Neumann N, Hiller K, Kurth S. Micromachined mid-infrared tunable Fabry-Perot filter [J]. *IEEE*, 2005, **1**: 1010-1013.
- [7] Neumann N, Ebermann M, Kurth S, et al. Tunable infrared detector with integrated micromachined Fabry-Perot filter [J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2008, **7**(2): 021004.
- [8] Enomoto T, Tanemura T, Yamashita S, et al. Multi-gas sensor by infrared spectrometer [C]. Proceedings of the FIS-ITA 2012 world automotive congress: Volume 6: Vehicle

- electronics, 2013, Berlin: Springer, 2013: 611–620.
- [9] Mao H, Silva K K M B D, Martyniuk M, *et al.* MEMS-Based Tunable Fabry – Perot Filters for Adaptive Multispectral Thermal Imaging [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2016, **25**(1): 227–235.
- [10] Mao H, Tripathi D K, Ren Y, *et al.* Large-area MEMS tunable Fabry – Perot filters for multi/hyperspectral infrared imaging [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, **23**(2): 45–52.
- [11] Xu D, Wang Y, Xiong B, *et al.* MEMS-based thermoelectric infrared sensors: A review [J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2017, **12**(4): 557–566.
- [12] Liang Y, Zhang S, Cao X, *et al.* Free-standing plasmonic metal-dielectric-metal bandpass filter with high transmission efficiency [J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1): 4357.
- [13] Wang A, Dan Y. Mid-infrared plasmonic multispectral filters [J]. *Scientific Reports*, 2018, **8**(1): 11257.
- [14] Dao T D, Ishii S, Doan A T, *et al.* An on-chip quad-wavelength pyroelectric sensor for spectroscopic infrared sensing [J]. *Advanced Science*, 2019, **6**(20): 1900579.
- [15] Xu J, Wang A, Dan Y. Plasmonic micropipe spectral filters in mid-infrared [J]. *Optics Letters*, 2019, **44**(18): 4479–4482.
- [16] Choi K K, Lin C H, Leung K M, *et al.* Broadband and narrow band light coupling for QWIPs [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2003, **44**(5–6): 309–324.
- [17] Mitra P, Case F C, McCurdy J H. LWIR multispectral quantum well infrared photodetectors [J]. *SPIE*, 2003, **5074**: 725–734.
- [18] Mitra P, Case F C, McCurdy J H, *et al.* Multispectral long-wavelength quantum-well infrared photodetectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, **82**(19): 3185–3187.
- [19] Choi K K, Dang G, Little J W, *et al.* Quantum grid infrared spectrometer [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **84**(22): 4439–4441.
- [20] Zhou Y W, Li Z F, Zhou J, *et al.* High extinction ratio super pixel for long wavelength infrared polarization imaging detection based on plasmonic microcavity quantum well infrared photodetectors [J]. *Scientific Reports*, 2018, **8**(1): 15070.
- [21] Nie X, Zhen H, Huang G, *et al.* Strongly polarized quantum well infrared photodetector with metallic cavity for narrowband wavelength selective detection [J]. *Applied Physics Letters*, 2020, **116**(16): 161107.
- [22] Jing Y, Li Z, Li Q, *et al.* Angular dependence of optical modes in metal-insulator-metal coupled quantum well infrared photodetector [J]. *AIP Advances*, 2016, **6**(4): 045205.