

文章编号: 1005-5630(2021)06-0058-06

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2021.06.010

## 基于温控系统的太赫兹可调谐滤波器

付陈忠, 谢静雅

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 集成太赫兹滤波器是实现集成太赫兹通信系统的基本器件之一, 为了使太赫兹滤波器实现片上可调, 提出了基于温控系统的太赫兹可调谐滤波器。相比于其他的太赫兹滤波器, 提出的片上可调谐滤波器的调谐方法简单, 尺寸小, 可以很好地与其他太赫兹器件集成到晶片上。利用温控系统改变晶片的温度, 再利用硅材料的热光效应改变折射率, 使得微环耦合状态发生变化, 从而让太赫兹滤波器的谐振峰发生漂移。在将加热片从 30 °C 逐渐加热到 90 °C 的过程中, 太赫兹可调谐滤波器在 180 GHz 附近的谐振峰中心频率从 180.453 GHz 逐渐减小到 180.224 GHz, 变化范围为 0.229 GHz, 谐振深度从 -68 dB 逐渐变化为 -44 dB, 半高宽由原来的 0.040 GHz 逐渐变为 0.246 GHz。

**关键词:** 太赫兹波; 滤波器; 温控系统; 集成太赫兹器件

**中图分类号:** TN 252 **文献标志码:** A

## Terahertz tunable filter based on temperature control system

FU Chenzhong, XIE Jingya

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Integrated terahertz filter is one of the basic components of integrated terahertz communication system. In order to make the terahertz filter adjustable on chip, a terahertz tunable filter based on temperature control system is proposed. Compared with other terahertz filters, the proposed tunable on chip filter has the advantages of simple tuning method and small size, and can be well integrated with other terahertz devices on the chip. The temperature of the wafer is changed by the temperature control system, and the refractive index is changed by the thermo-optical effect of the silicon material, so that the coupling state of the microloop is changed, and the resonant peak of the THZ filter is shifted. In the process of heating the heating plate from 30 °C to 90 °C, the center frequency of the resonant peak near 180 GHz of the terahertz tunable filter decreases gradually from 180.453 GHz to 180.224 GHz with a range of 0.229 GHz, the resonant depth changes gradually from -68 dB to -44 dB, and the half-height width changes gradually from the original 0.04 GHz to 0.246 GHz.

收稿日期: 2021-03-15

作者简介: 付陈忠(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为集成光电子器件。E-mail: 179587282@qq.com

通信作者: 谢静雅(1987—), 女, 副教授, 研究方向为太赫兹芯片互连。E-mail: xiejy@usst.edu.cn

**Keywords:** terahertz; filter; temperature control system; integrated terahertz devices

## 引 言

太赫兹波是一种介于红外和微波之间的电磁波, 通常定义其频率在 0.1~10 THz 之间。目前, 由于太赫兹波波长短、光子能量低、透射性强和对某些极性分子具有很强的吸收作用等特点, 已经被广泛用于分子光谱、高速通信和活体检测<sup>[1-3]</sup>等领域。随着 5G 通信<sup>[4-5]</sup>的快速发展, 太赫兹通信作为下一代通信系统已受到越来越多的关注。太赫兹滤波器作为太赫兹通信的基本器件之一, 在复用/解复用和信号处理等方面有着重要作用。到目前为止, 许多太赫兹滤波器的解决方案已经被使用, 例如平行平板波导<sup>[6]</sup>、超表面<sup>[7]</sup>、超材料<sup>[8-9]</sup>、回音壁模式谐振器<sup>[10-12]</sup>和光子晶体<sup>[13]</sup>等。2010 年, Mendis 等<sup>[6]</sup>提出了基于平行平板波导的可调谐通用太赫兹滤波器方案, 从理论和实验上证明了在 0.3~0.7 THz 的频率范围内可以实现 3 dB 截止频率的连续可调。2014 年, Han 等<sup>[9]</sup>提出了一种可重构的超材料, 通过表面未加工技术在低损耗石英衬底上的开发, 将其用于可调谐太赫兹滤波器上, 并且在 480 GHz 时表现出 16.5 dB 的高对比度开关性能。2018 年, Chang 等<sup>[7]</sup>采用级联多层双层超表面减反射结构做出了高性能窄带太赫兹滤波器, 在太赫兹波段上可以实现几乎零反射, 同时近乎统一的单频带传输。2018 年, Vogt 等<sup>[10]</sup>提出并实现了集成硅光子晶体在太赫兹滤波器上的应用。然而, 这些解决方案大多都不能解决太赫兹滤波器集成到芯片上的问题。目前只有回音壁模式谐振器和基于光子晶体的太赫兹滤波器能集成到芯片上, 但是这两种滤波器都不能被调谐, 这些器件制备后只能处理特定的频率。相比之下, 可调谐太赫兹滤波器可以极大地增强信号处理的灵活性。因此, 实现简单可调的片上太赫兹滤波器具有重要意义, 本文为此提出了基于温控系统的太赫兹可调谐滤波器方案。

## 1 可调谐温控太赫兹滤波器结构及原理

带有加热片的温控太赫兹可调谐滤波器结构示意图如图 1 所示, 它包含一块晶片和一块陶瓷材料加热片。

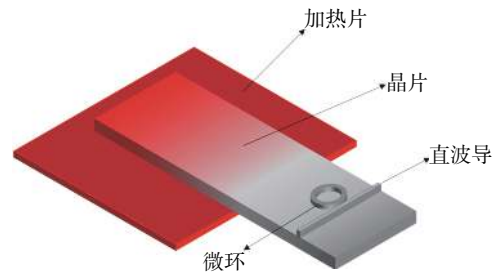


图 1 温控可调谐太赫兹滤波器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a temperature-controlled tunable terahertz filter

陶瓷材料加热片是由陶瓷和金属共同烧结而成的陶瓷发热体, 其中陶瓷部分由 92%~96% 氧化铝和 4%~8% 的烧结助剂在 1700 °C 高温下烧结而成, 金属部分由高熔点的金属发热电阻浆料, 按照发热电路设计的要求印刷于陶瓷材料上。陶瓷材料加热片的介电常数为 9.8, 电阻率约为 1 kΩ·cm, 长度为 5 cm, 宽度为 5 cm, 厚度为 17 mm。晶片由纯硅材料加工制成, 硅材料的介电常数为 11.7, 电阻率随温度变化而变化, 常温下电阻率约为 5 kΩ·cm。晶片长度为 7 cm, 宽度为 4 cm, 晶片上刻蚀有一个圆环波导和一个直波导。其中晶片衬底厚 130 μm, 微环和直波导高度为 340 μm, 直波导宽 500 μm, 微环半径为 6900 μm, 直波导与微环之间的距离为 50 μm。

为了避免陶瓷材料与晶片上的滤波器结构直接接触而影响到太赫兹波在波导内的传输效果, 选择晶片上没有结构的一侧与陶瓷加热片直接接触。晶片上有滤波器结构的一侧与加热片之间的距离为 3 cm, 通过硅的热传导效应<sup>[14-16]</sup>, 改变微环滤波器结构的温度。图 2 是微环谐振腔的示意图, 标出了太赫兹波在直波导和微环波导内的

传输情况，并标出了直波导和微环波导之间的耦合区域。

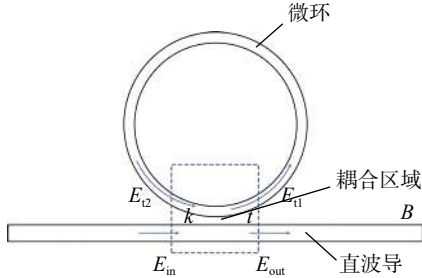


图 2 微环谐振腔示意图

Fig. 2 Schematic diagram of microring resonator

在直波导的一端输入光信号，当入射光传输到图中虚线区域即直波导与微环谐振腔的耦合区域时，就会有能量从直波导耦合到微环谐振腔中。为使能量从直波导耦合进微环谐振腔中<sup>[17]</sup>，还应满足微环谐振腔的谐振条件，即

$$m\lambda_m = n_{\text{eff}}L \quad (1)$$

式中： $m$  为模式阶数（为整数）； $\lambda_m$  为第  $m$  阶模式对应的谐振波长； $n_{\text{eff}}$  为有效折射率； $L$  为微环的周长。假设直波导入射光场振幅为  $E_{\text{in}}$ ，直波导输出光场振幅为  $E_{\text{out}}$ ，从直波导耦合进微环的光场振幅为  $E_{t1}$ ，从微环耦合到直波导的光场振幅为  $E_{t2}$ ，则各参数满足以下关系：

$$\begin{bmatrix} E_{\text{out}} \\ E_{t1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t & k \\ -k^* & t^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{\text{in}} \\ E_{t2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： $k$  为直波导与微环波导之间的光场振幅耦合比率； $t$  为直波导与微环波导之间的光场振幅透射率。所以  $k$  和  $t$  满足能量守恒式  $k^2 + t^2 = 1$ 。在微环中，光场振幅变化可以表示为

$$E_{t2} = E_{t1}e^{-\alpha L}e^{j\varphi} \quad (3)$$

$$\varepsilon = e^{-\alpha L} \quad (4)$$

式中： $\alpha$  为损耗系数； $\varepsilon$  为太赫兹波在微环谐振腔中传输一周后产生的传输损耗； $\varphi$  为太赫兹波在微环谐振腔中传播一周产生的相位变化。在理想情况（微环无损耗）的情况下，微环传输损耗系数  $\alpha = 0$ ，此时  $\varepsilon = 1$ 。式(3)中的  $\varphi$  又可表示为

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}n_{\text{eff}}L \quad (5)$$

由式(2)、式(3)和式(4)可以得到直波导输

出端的传输系数  $T$ ，如下所示：

$$T = \left| \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}} \right|^2 = \frac{\varepsilon^2 + t^2 - 2\varepsilon t(\varphi)}{1 + \varepsilon^2 t^2 - 2\varepsilon t(\varphi)} \quad (6)$$

当  $\varphi = 2m\pi$  ( $m$  为整数) 时，即满足微环谐振条件，则有

$$T = \frac{(\varepsilon - t)^2}{(1 - \varepsilon t)^2} \quad (7)$$

直波导与微环谐振腔的耦合分为三种方式，分别是欠耦合、过耦合和临界耦合。从式(7)中可以得出：当  $\varepsilon < t$  时，器件处于欠耦合状态； $\varepsilon > t$  时，器件处于过耦合状态； $\varepsilon = t$  时，即  $T = 0$ ，器件处于临界耦合状态，此时输出端对应的光场强度为 0，即光波在微环里传输一周的损耗等于通过耦合进入微环的能量。

本文提出的新型温控太赫兹可调谐滤波器，利用了硅的热光效应原理<sup>[18-19]</sup>。通过加热片对晶片加热，改变硅材料的温度。当硅的介电常数发生变化时，微环谐振器的谐振频率也会随之发生变化，从而实现对太赫兹滤波器中心工作频率的动态调节。单晶硅的热光系数可以表示为：

$$2n \frac{dn}{dT} = (n^2 - 1) \left( -3\beta - \frac{1}{E_{\text{eg}}} \frac{dE_{\text{eg}}}{dT} \frac{E_{\text{ig}}^2}{E_{\text{ig}}^2 - E^2} \right) \quad (8)$$

式中： $n$  和  $\frac{dn}{dT}$  分别为常温下硅的折射率及其随温度的变化率； $\frac{dE_{\text{eg}}}{dT}$  为硅激发能带的温度系数； $E$  为光子能带； $E_{\text{ig}}$  为硅在紫外光谱区的等熵能带，该能带位于导带与禁带之间，决定硅折射率  $n$  的分布。式(8)可以用归一化色散波长  $L$  表示为：

$$2n \frac{dn}{dT} = K^2 \left( -3\beta - \frac{1}{E_{\text{eg}}} \frac{dE_{\text{eg}}}{dT} L^2 \right) \quad (9)$$

$$G = -3\beta K^2 \quad (10)$$

$$H = -\frac{1}{E_{\text{eg}}} \frac{dE_{\text{eg}}}{dT} K^2 \quad (11)$$

式中： $G$ 、 $H$  分别是与硅膨胀系数  $\beta$ 、激发能带  $E_{\text{eg}}$  有关的光学常数； $L = \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_{\text{ig}}^2}$ ； $K^2 = (n^2 - 1)$ 。

由式(9)、式(10)和式(11)可得

$$n^2 = (GL + HL^2)T + C \quad (12)$$

式中  $C$  为常数。

## 2 实验结果分析

在实验中, 我们利用网络分析仪分析测试样品的频谱。将测试的晶片放置在陶瓷加热片上, 并使带有结构的一侧悬空放置, 避免加热片影响到太赫兹波在滤波器结构中的传输效果。

首先, 在常温状态下测试太赫兹滤波器的透射谱。在直波导的一端输入 140~220 GHz 的太赫兹波信号, 在直波导的另一端接收信号并分析, 得到如图 3 的结果。我们先测试了在常温状态下太赫兹滤波器的透射谱, 在直波导的一端输入 140~220 GHz 的太赫兹波信号, 在直波导的另一端接收信号并分析, 得到结果如图 3 所示。

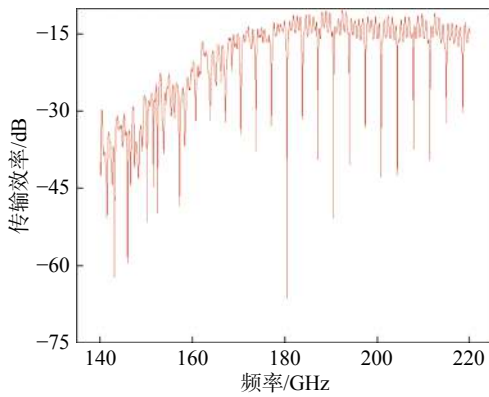


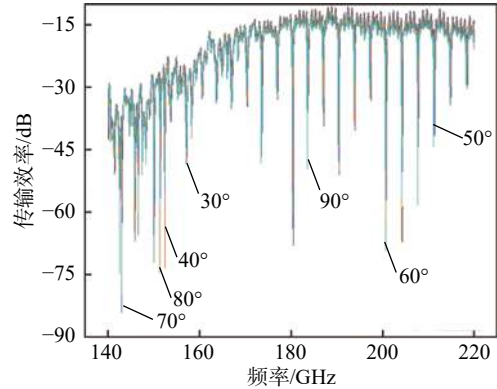
图 3 常温下太赫兹滤波器透射谱

Fig. 3 Transmission spectrum of terahertz filter at room temperature

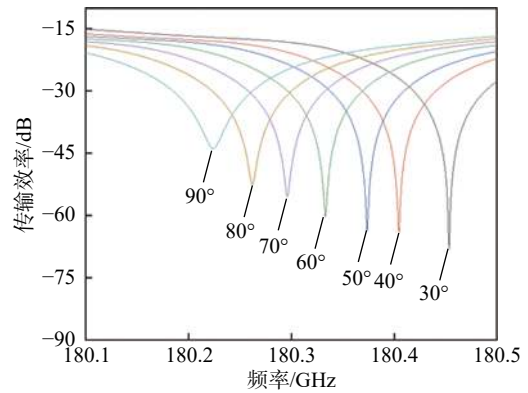
根据图 3 可以看出, 所设计的太赫兹滤波器在 180~220 GHz 频段传输效率较高, 而且每个谐振峰深度都比较深, 半高宽较窄, 证明我们设计的滤波器性能较好。

然后, 利用温控系统改变加热片的温度, 对晶片进行加热。设定温度每升高 10 °C 就对太赫兹滤波器做一次透射谱测试, 即在 30~90 °C 范围内每隔 10 °C 测一组数据。根据式(12)可以知道, 当太赫兹滤波器材料温度改变时, 折射率产生非线性变化, 从而影响太赫兹滤波器谐振峰中心频率的漂移。实验得到的结果如图 4 所示。

由图 4(a)可以看出, 在 140~220 GHz 范围



(a) 140~220 GHz 不同温度对应的传输效率



(b) 180.1~180.5 GHz 不同温度谐振峰的传输效率

图 4 不同温度下太赫兹滤波器的传输效率

Fig. 4 Terahertz filter transmission efficiency at different temperatures

内, 设计的太赫兹滤波器在不同温度下都有较深的谐振峰深度, 改变晶片的温度可以使谐振峰发生漂移。图 4(b)截取了 180.1~180.5 GHz 之间的一个谐振峰, 从图上可以清楚地看到: 当温度从 30 °C 变化到 90 °C 时, 谐振峰的中心频率在逐渐减小。在温度变化的过程中, 不仅谐振峰中心频率发生了红移, 而且谐振峰深度也发生了变化; 随着温度的升高, 谐振峰深度逐渐变浅同时半高宽逐渐变大。在加热片温度由 30 °C 变化为 90 °C 的过程中, 谐振峰深度由 -68 dB 变为 -44 dB, 半高宽由 0.040 GHz 变为 0.246 GHz。这是由于随着晶片温度的升高, 直波导和微环波导之间的耦合状态逐渐发生了变化所致。

不同中心频率的谐振峰随着温度的升高产生的变化不同, 图 5 是截取的 183.4~183.9 GHz 之间的透射谱曲线。当温度在 30 °C 时, 太赫兹滤波器的谐振峰深度最浅, 为 -31 dB, 随着温度逐渐升高, 谐振峰的深度逐渐变深, 当温度变



为 90 °C 时，谐振峰深度最深，为 -50 dB。谐振峰的半高宽从 30 °C 的 0.469 GHz 变化到了 90 °C 的 0.153 GHz。在调节温控系统从 30 °C 变化到 90 °C 的过程中，谐振峰中心频率变化范围最大为 0.258 GHz。由此可见，183 GHz 附近谐振峰深度和半高宽的变化规律与之前讨论的 180 GHz 附近谐振峰的变化规律完全相反，但是谐振峰中心频率变化范围大小相差无几。这是因为不同频率位置的谐振点所处的耦合状态不同导致的，部分谐振峰频点处于欠耦合状态，部分谐振峰频点处于过耦合状态，或者部分谐振峰频点处于临界耦合状态。当调节温控系统改变温度时，处于不同耦合状态的谐振峰随着温度变化而变化的规律也不一致。我们对 180 GHz 附近的谐振峰中心频率与温度的关系做了曲线图，结果如图 6 所示。

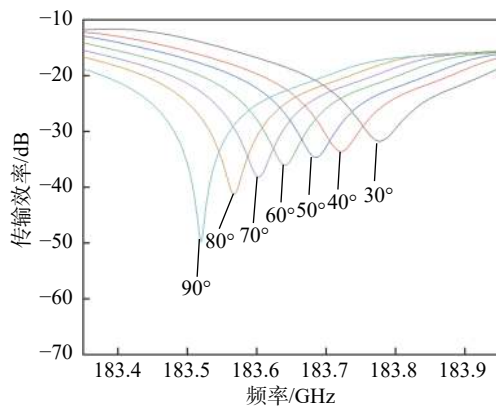


图 5 183.4~183.9 GHz 不同温度谐振峰的传输效率  
Fig. 5 Transmission efficiency of resonant peaks at different temperatures from 183.4 to 183.9 GHz

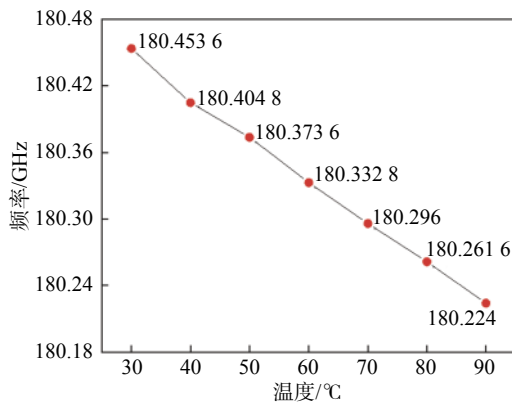


图 6 不同温度下谐振峰频率  
Fig. 6 Resonant peak frequency at different temperatures

由图 6 可以看出，随着调节温控系统使加热片的温度升高，谐振峰中心频率变化与温度变化

呈线性关系，此时谐振峰中心频率最大可变化范围为 0.229 GHz。在实验中，为了避免陶瓷材料加热片与带有微环滤波器结构的一侧直接接触而影响太赫兹波在波导内传输的效果，将晶片没有结构的一侧与加热片直接接触。通过硅的热传导效应改变滤波器结构的温度，但是在热传导过程中热量损耗太大，所以晶片实际改变温度与加热片变化的温度有一定的差距。

### 3 结 论

本文将温控系统与太赫兹滤波器相连，通过调节加热片来改变晶片的温度，从而达到改变硅材料折射率的效果，设计出了温控可调谐太赫兹滤波器。利用网络分析仪分析测试了温控可调谐太赫兹滤波器透射谱，验证了随着晶片温度的升高，透射谱谐振峰的频率会发生红移，变化范围在 0.229 GHz 左右，同时谐振峰深度也会由 -68 dB 变为 -44 dB，半高宽由 0.040 GHz 变为 0.246 GHz。本文提出的温控可调谐太赫兹滤波器可以与其他太赫兹器件同时被集成到晶片上，增加了处理信号的灵活性，可为未来太赫兹通信的研究提供参考。

#### 参考文献：

- [1] FEDERICI J, MOELLER L. Review of terahertz and subterahertz wireless communications[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107(11): 111101.
- [2] MARKELZ A G, ROITBERG A, HEILWEIL E J. Pulsed terahertz spectroscopy of DNA, bovine serum albumin and collagen between 0.1 and 2.0 THz[J]. *Chemical Physics Letters*, 2000, 320(1/2): 42 – 48.
- [3] 蒋林华, 王尉苏, 童慧鑫, 等. 太赫兹成像技术在人体安检领域的研究进展 [J]. *上海理工大学学报*, 2019, 41(1): 46 – 51.
- [4] KATSALIS K, NIKAEIN N, SCHILLER E, et al. Network Slices toward 5G communications: slicing the LTE network[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(8): 146 – 154.
- [5] BOURSISANIS A D, GOUDOS S K, YIOULTSIS T V, et al. MIMO antenna design for 5g communication systems using salp swarm algorithm[C]//Proceedings of

- 2020 International Workshop on Antenna Technology. Bucharest: IEEE, 2020.
- [ 6 ] MENDIS R, NAG A, CHEN F, et al. A tunable universal terahertz filter using artificial dielectrics based on parallel-plate waveguides[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(13): 131106.
- [ 7 ] CHANG C C, HUANG L, NOGAN J, et al. Invited article: narrowband terahertz bandpass filters employing stacked bilayer metasurface antireflection structures[J]. *APL Photonics*, 2018, 3(5): 051602.
- [ 8 ] NIKITIN A Y, LOW T, MARTIN-MORENO L. Anomalous reflection phase of graphene plasmons and its influence on resonators[J]. *Physical Review B*, 2014, 90(4): 041407.
- [ 9 ] HAN Z L, KOHNO K, FUJITA H, et al. MEMS reconfigurable metamaterial for terahertz switchable filter and modulator[J]. *Optics Express*, 2014, 22(18): 21326 – 21339.
- [10] VOGT D W, JONES A H, LEONHARDT R. Thermal tuning of silicon terahertz whispering-gallery mode resonators[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(1): 011101.
- [11] YUAN S X, CHEN L, WANG Z W, et al. Mode coupling in a terahertz multi-mode whispering-gallery-mode resonator[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(8): 2020 – 2023.
- [12] WANG Z W, YUAN S X, DONG G N, et al. On-chip single-mode high-Q terahertz whispering gallery mode resonator[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(11): 2835 – 2838.
- [13] WITHAYACHUMNANKUL W, FUJITA M, NAGATSUMA T. Integrated silicon photonic crystals toward terahertz communications[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(16): 1800401.
- [14] HAN Y F, LIU H D. Size effects of heat conduction for silicon nanograins[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 633-634: 34 – 37.
- [15] ZHANG D Y, LUO W T, BAO Y, et al. Thickness effect and etching implement of silicon substrate of LiTaO<sub>3</sub> thin film infrared detector[C]//Proceedings of SPIE 7658, 5th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optoelectronic Materials and Devices for Detector, Imager, Display, and Energy Conversion Technology. Dalian: SPIE, 2010: 319 – 322.
- [16] SVERDRUP P G, JU Y S, GOODSON K E. Sub-continuum simulations of heat conduction in silicon-on-insulator transistors[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2001, 123(1): 130 – 137.
- [17] HOLZWARTH C W, BARWICZ T, POPOVIĆ M A, et al. Accurate resonant frequency spacing of microring filters without postfabrication trimming[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 2006, 24(6): 3244 – 3247.
- [18] CORTE F G D, MONTEFUSCO M E, MORETTI L, et al. Temperature dependence analysis of the thermo-optic effect in silicon by single and double oscillator models[J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, 88(12): 7115 – 7119.
- [19] HOHLFELD D, ZAPPE H. An all-dielectric tunable optical filter based on the thermo-optic effect[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2004, 6(6): 504 – 511.

(编辑: 刘铁英)