

GaAs 样品对太赫兹微带线频谱特性的影响

张米乐, 李依涵, 何敬锁, 崔海林, 张存林

(太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京市太赫兹波谱与成像重点实验室,
首都师范大学 物理系, 北京 100048)

摘要: 太赫兹片上系统是近年来太赫兹研究的热点, 是太赫兹系统集成的关键技术。太赫兹微带线(MSL)是太赫兹片上系统的关键, 微带线设计的合理性, 直接影响着太赫兹片上系统的灵敏度和准确度, 为了更好地制作片上系统, 以理论模型为参照, 利用 HFSS(High Frequency Structure Simulator)软件对太赫兹传输线及带阻滤波结构进行了系统的仿真研究。首先研究了微带线结构、微带带阻滤波结构的传输特性, 并从应用的角度首次将样品引入仿真模型, 研究了以 GaAs 为例的介电样品对微带滤波结构的滤波特性的影响。设计了 358 GHz 的微带滤波器结构, 并通过改变放置在其上的 GaAs 样品参数, 发现样品对微带滤波结构的中心滤波频率有明显影响。为太赫兹微带线的设计制作提供了精确的理论数据。

关键词: 太赫兹; 片上系统; 微带线; 微带滤波结构

中图分类号: O433 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1225001

Influence of GaAs on spectrum characteristic of terahertz microstrip

Zhang Mile, Li Yihan, He Jingsuo, Cui Hailin, Zhang Cunlin

(Key Laboratory for Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: Terahertz(THz) Microstrip Line(MSL) is the key to THz system on chip. The rationality of the design of THz MSL affects the sensitivity and accuracy of THz on-chip system directly. To make the on-chip system better, the THz MSL and the MSL band stop filter were simulated by using the software HFSS (High Frequency Structure Simulator) by reference the theoretical model. The transmission characteristics of THz MSL and the MSL band stop filter were researched by simulation. From the point of view of application, the sample, such as GaAs, was introduced into the simulation model to research the effect of GaAs sample on the filter characteristic of band stop filter for first time. Finally, a 358 GHz MSL band stop filter was designed, and the effect of GaAs sample on the center frequency of band stop filter was discovered by changing the size of the GaAs sample putting on the band stop filter. The results of this paper provide accurate theoretical data for the design and fabrication of THz MSL.

Key words: terahertz; system on chip; microstrip line; microstrip band stop filter

收稿日期: 2016-04-20; 修订日期: 2016-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(61675138, 61675131)

作者简介: 张米乐(1991-), 男, 硕士生, 主要从事太赫兹光谱方面的研究。Email: mile0131@gmail.com

导师简介: 何敬锁(1971-), 男, 副教授, 博士, 主要从事于太赫兹技术方面的研究。Email: hejingsuo@263.com

0 引言

太赫兹(Terahertz, THz)是指频率在 0.1~10 THz 之间的电磁波,与生物分子的振动频率相近,所以太赫兹光谱技术成为分辨物质的手段之一。太赫兹时域光谱系统(THz-TDS)是太赫兹光谱技术中最为成熟的测量系统。利用这种技术,可以对大量的物质进行频谱分析,例如药品、生物分子、有机物等^[1-3]。然而它也有许多局限性^[4],例如水分会对太赫兹在一定程度上产生吸收和衰减。同时 THz-TDS 系统体积较大,对稳定性要求较高,难以便携。而片上太赫兹时域光谱系统可以很好地解决这些问题,是未来 THz-TDS 系统发展方向之一。片上太赫兹时域光谱系统是指太赫兹时域光谱系统的单片集成技术,该技术可以使太赫兹波的产生与探测在一个毫米级的集成器件上完成。因此,相比于传统 THz-TDS 系统,片上系统不仅易于携带,传输过程中太赫兹波损失较小,而且只需要极少量的待测样品,就可以实现对微量样品和液态样品的测试^[5]。

片上太赫兹时域光谱系统是近期太赫兹光谱学研究的热门,是使太赫兹时域光谱系统小型化,集成化的关键技术,英国和日本已经研究出了片上太赫兹时域光谱系统,并且已经做了测试^[6-7],由于系统只有几个毫米,这可以在样品量很少的情况下,增加相互作用的长度,提高对样品的探测灵敏度^[8]。该系统使用中具有很高的灵敏度,对微弱信号有着很好的响应,可用于微量测量;可以进行振动测量^[9]、微量毒品测量^[10];液态生物样品测量^[11-12],还可以制作用于通信的滤波器和倍频器^[13]。但是目前所研究出来的片上太赫兹时域光谱系统都处于早期阶段,很多关键技术还有待解决,尤其是连接 THz 产生与探测端的微带传输线。对于片上系统来说,微带传输线的性能直接影响着片上系统的工作频率和分辨率,所以研究 THz 微带传输线的传输特性,就显得尤为重要。但是目前国内外对微带线的研究还处于初级阶段,又由于微带线制作工艺要求较高,需要在制作前进行详细的分析与设计。

图 1 为片上太赫兹系统的原理示意图,当泵浦飞秒激光脉冲打到泵浦端低温 GaAs 将产生 THz 波。THz 波沿微带线传输,传输过程中经过样品区

域,与样品发生相互作用,携带信息的太赫兹波沿微带线到达探测区域。探测飞秒激光脉冲与太赫兹波打到探测端的 GaAs,会产生与 THz 波强度成正比的电流,通过改变探测飞秒激光脉冲到达 GaAs 的时间,就可以得到不同时刻的电流值,即可得到 THz 波形与相应频谱,进一步分析样品。

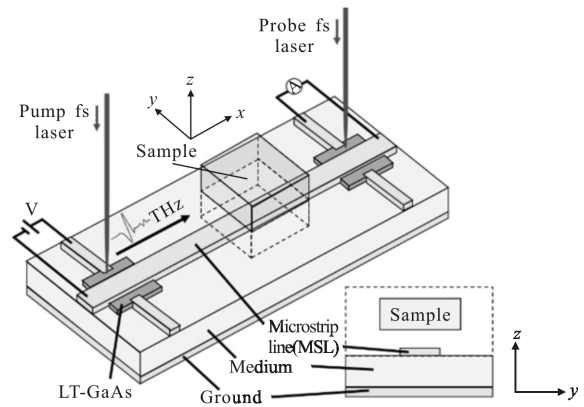


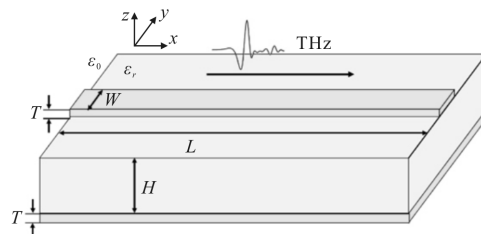
图 1 片上 THz 系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of on chip THz system

综上所述,文中对太赫兹微带线进行了系统的仿真研究,设计了微带线,微带滤波结构。最后在应用层面,首次将实际应用中的样品引入仿真之中,以 GaAs 为例,研究了介电样品(具有介电常数的物质)对微带滤波结构的滤波特性影响,对后续片上系统的设计与制作具有指导意义。

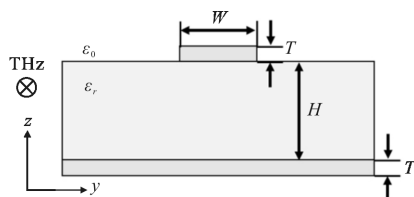
1 太赫兹微带线仿真原理

微带线结构是常见的一种微带传输线结构,结构如图 2 做所示,其主要结构参数包括金属微带线宽度 W 、金属微带线长度 L 和金属接地板厚度 T 、介质层介电常数 ϵ_r 、介质层厚度 H 。太赫兹波沿 X 轴传播。



(a) 微带线结构示意图

(a) Schematic diagram of microstrip line



(a) 微带线横截面图及各参数定义

(b) Cross section of microstrip line and parameters

图 2 微带线结构图

Fig.2 Structure of microstrip line

由于微带线结构区域不是一个纯介质结构,是一种介质与真空(空气)混合的结构,如图 2(b)所示,金属微带线上下介质的介电常数分别为 ϵ_0 和 ϵ_r 。所以无法直接利用介质的介电常数 ϵ_r 来描述整个微带线结构区域的介电常数,此时引入等效介电常数 ϵ_{eff} ,将整个微带线结构等效为一个纯介质结构,将微带线包裹在其中,以便来进行数学分析。

微带线中传输的电磁场为准 TEM 模式,在准 TEM 模式下,电磁波在微带线中传播的相速度为:

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad (1)$$

式中: c 为真空中光速。

对于微带线,等效介电常数 ϵ_{eff} 与金属微带线宽度 W 、介质层介电常数 ϵ_r 、介质层厚度 H 都有关系^[14],一般写成:

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12H/W}} \quad (2)$$

这样,特征阻抗可以写成:

$Z_0 =$

$$\begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \ln \left(\frac{8H}{W} + \frac{W}{4H} \right), & \frac{W}{H} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}} \left[\frac{W}{H} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{H}{W} + 1.444 \right) \right]}, & \frac{W}{H} \geq 1 \end{cases} \quad (3)$$

一般使用时,为了更好地阻抗匹配,特征阻抗一般为 50Ω 。

利用微带线结构还可以设计微带带阻滤波结构,以实现某一频率的滤波。

在准 TEM 模式下,电磁波在微带线中传播的相速度为 v_p 。波长 λ 与传播速度 v 的关系为:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi v}{\omega} = \frac{v}{f} \quad (4)$$

一般认为电磁波的频率是不变的,所以波长会

随着传播相速度的变化而变化,前文已经提及介质中相速度和真空中光速的关系:

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad (5)$$

这样就可以得到真空中实际波长 λ_0 、实际频率 f 与在微带线中等效波长 λ_{eff} 之间的关系:

$$\lambda_0 = \lambda_{\text{eff}} \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}} \quad (6)$$

$$f = \frac{c}{\lambda_0} = \frac{c}{\lambda_{\text{eff}} \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad (7)$$

这样就可以完成真空中实际波长 λ_0 、实际频率 f 与在微带线中等效波长 λ_{eff} 间的相互计算,从而确定滤波结构尺寸。

微带滤波结构种类很多,文中选择了一种较为简单有效的带阻滤波结构,如图 3 所示,只有一个滤波 Bar 完成滤波工作,其滤波结构 Bar 的长度 l 决定着实际的滤波频率,由于这是 $1/4$ 波长的带阻滤波模型。所以滤波结构的长度 l 与等效波长的关系为:

$$l = \frac{\lambda_{\text{eff}}}{4} \quad (8)$$

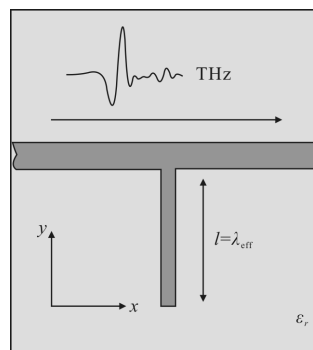


图 3 微带带阻滤波结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of band stop filter by microstrip line

在完成了上述微带线带阻滤波器研究后,进一步面向应用层面,以 GaAs 样品为例,进一步通过仿真的方法研究介电样品对微带带阻滤波结构滤波特性的影响。根据研究发现:影响带阻滤波器中心滤波频率的因素有滤波结构长度 l ,以及等效介电常数 ϵ_{eff} 。一般情况下,由于滤波结构固定不变,那么等效介电常数的变化,将引起滤波频率的变化。通过改变 GaAs 样品的尺寸、距微带线位置等因素,改变等效介电常数的大小。具体方案如图 4 所示,将厚度为 t ,边长为 a 的 GaAs 样品放在滤波结构上,距离为 d ,分别改变 t 和 d 来模拟介电物质尺寸大小以及距离

结构远近对滤波结构的影响。

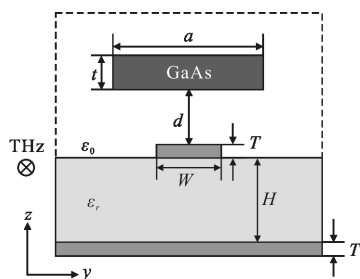


图 4 GaAs 样品对微带带阻滤波结构的滤波特性影响的示意图

Fig.4 Schematic diagram of the effect of GaAs sample on the filter characteristic of band stop filter

2 太赫兹微带线仿真结果

文中主要针对仿真结果中的 S_{21} 参数进行分析, S_{21} 参数可以很好地说明结构的传输特性,它是一个结构电磁波的输出端口 Port2 与输入端口 Port1 相比较得到的值。

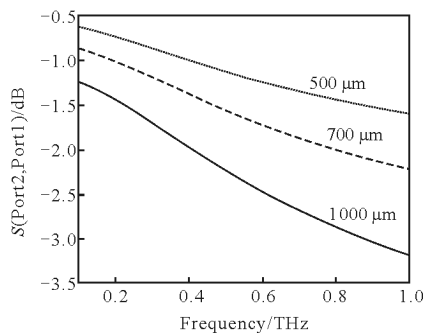
2.1 微带线仿真结果

根据上述理论设计了两组微带线尺寸:

i 微带线金属采用金(gold),宽度 W 为 $30 \mu\text{m}$,厚度 T 为 228 nm ,介质采用 BCB(Benzocyclobutene)相对介电常数 $\epsilon_r=2.6$,厚度 H 为 $6 \mu\text{m}$,长度为 L ,分别模拟了 L 为 500 、 700 、 $1000 \mu\text{m}$ 的情况;

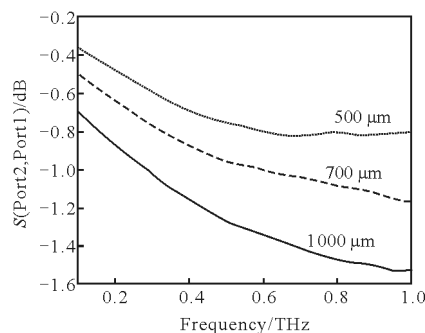
ii 微带线金属采用金(gold),宽度 W 为 $20 \mu\text{m}$,厚度 T 为 200 nm ,介质用 BCB, 相对介电常数 $\epsilon_r=2.6$,厚度 H 为 $20 \mu\text{m}$,长度为 L ,分别模拟了 L 为 500 、 700 、 $1000 \mu\text{m}$ 的情况。

微带线 i 的 S_{21} 参数如图 5(a)所示,微带线 ii 的 S_{21} 参数如图 5(b)所示。



(a) 微带线 i 的 S_{21} 参数

(a) $S_{21}(S(\text{Port2}, \text{Port1}))$ parameter of microstrip line i



(b) 微带线 ii S_{21} 参数

(b) S_{21} parameter of microstrip line ii

图 5 微带线的 S_{21} 参数

Fig.5 S_{21} parameter of microstrip line

从图 5 中可以看到, 两条微带线 i、ii 的 S_{21} 参数,随电磁波频率的增高而下降,随传播距离的增加而下降,对比微带线 i、ii,微带线 i 在 $L=1000 \mu\text{m}$ $f=1 \text{ THz}$ 时 S_{21} 参数最低点为 -3.6 dB ,而微带线 ii 在 $L=1000 \mu\text{m}$ $f=1 \text{ THz}$ 时, S_{21} 参数最低点为 -1.7 dB ,但是有一些微小的抖动,在可容忍范围之内,所以从传输特性上看,后者好于前者。所以,之后将采用微带线 ii 的尺寸进行滤波结构的仿真。

2.2 微带带阻滤波结构仿真结果

根据上面结果,采用微带线 ii 的结构,设计了带阻滤波结构,滤波结构 $l=140 \mu\text{m}$,利用前文理论推导出滤波频率为 353 GHz ,微带带阻滤波结构 S_{21} 参数如图 6 所示。

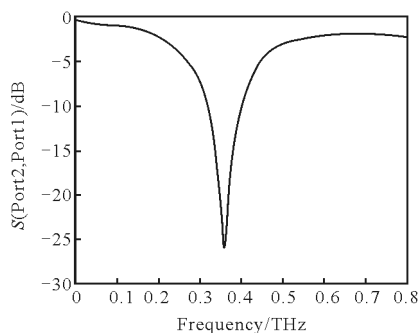


图 6 $l=140 \mu\text{m}$ 微带带阻滤波结构 S_{21} 参数

Fig.6 S_{21} parameter of band stop filter with $l=140 \mu\text{m}$

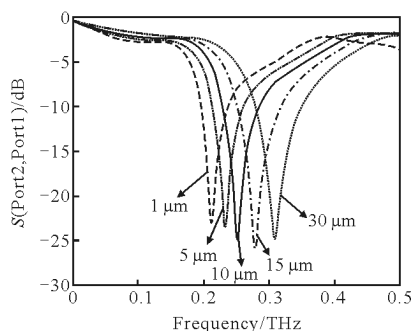
从图 6 可以看到:带阻滤波中心频率在 358 GHz ,与计算值 353 GHz 十分接近。并且在 358 GHz 的最低点为 -25.8 dB ,可以完成很好的滤波作用,滤波带宽可以到 $\pm 50 \text{ GHz}$ 。

2.3 GaAs 样品对微带带阻滤波结构影响

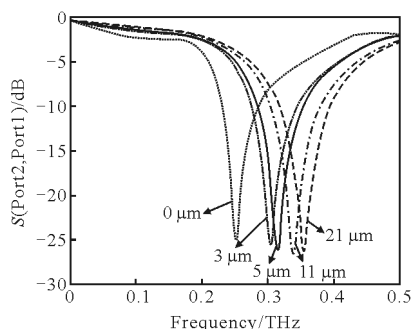
在仿真中设计介电样品(以 GaAs 为例),边长 $a=0.4\text{ mm}$, 体积为 $0.4\text{ mm}\times 0.4\text{ mm}\times t$, 厚度为 t , 距离滤波结构距离为 d , 通过改变 t 模拟样品厚度的不同, 改变 d 模拟样品与微带线距离的不同的情况。

当 GaAs 距离微带结构距离 $d=0\text{ }\mu\text{m}$ 时, 分别模拟了 t 为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 、 $5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $10\text{ }\mu\text{m}$ 、 $15\text{ }\mu\text{m}$ 、 $30\text{ }\mu\text{m}$ 时, 对微带带阻滤波结构的影响的 S_{21} 参数如图 7(a) 所示。

当 GaAs 厚度 $t=10\text{ }\mu\text{m}$ 时, 其距离微带结构距离 d (d 取 $0\text{ }\mu\text{m}$ 、 $3\text{ }\mu\text{m}$ 、 $5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $11\text{ }\mu\text{m}$ 、 $21\text{ }\mu\text{m}$) 对微带带阻滤波结构的影响的 S_{21} 参数如图 7(b) 所示。



(a) 样品不同厚度 t 对微带带阻滤波结构的影响的 S_{21} 参数
(a) S_{21} parameter for effect of GaAs sample with different thicknesses on the band stop filter



(b) 距离 d 对微带带阻滤波结构的影响的 S_{21} 参数
(b) S_{21} parameter for effect of GaAs sample with different distances on the band stop filter

图 7 放置不同尺寸样品对微带带阻滤波结构的影响的 S_{21} 参数
Fig.7 S_{21} parameter for effect of GaAs sample with different sizes on the band stop filter

从图 7(a)、(b) 可以看出: 厚度和距离的改变并没有影响滤波功能, 只是改变了滤波频率。图 7(a) 中可以看到: 随着厚度的增加, 样品体积变大, 故滤波

频率变小, 发生红移, 这说明随着样品体积的增加, 介电样品影响整个空间的介电常数, 使整个空间内的等效介电常数变大。根据公式(7), 滤波频率与等效介电常数成反比, 所以当样品体积变大, 滤波频率变小, 发生红移。从图 7(b) 可以看出: 随着距离 d 的增加(即样品从微带线上移走), 滤波频率变大, 发生蓝移, 这说明随着介电样品逐渐远离微带线表面, 整个空间恢复微带线上空气下基底的原本结构, 使得等效介电常数变小, 所以随着距离的增加, 滤波频率变大, 发生蓝移。

3 结 论

文中根据片上太赫兹时域光谱系统对微带线结构的应用, 利用 HFSS 软件, 首先设计并仿真了两种尺寸的微带线结构并进行了比较优选。根据结果选择合适的微带线设计: 金属采用金(GOLD), 介质选择 BCB, $W=20\text{ }\mu\text{m}$, $T=200\text{ nm}$, $H=20\text{ }\mu\text{m}$ 。在此基础上, 设计了滤波中心频率为 358 GHz 的微带带阻滤波结构。最后在应用层面, 研究了介电样品对微带滤波结构的滤波特性的影响。首次在仿真中看到了介电样品对微带滤波结构滤波特性的影响。结果表明: 介电样品的加入改变了微带滤波结构的中心滤波频率, 当样品厚度增加时, 滤波中心频率发生红移, 当样品逐渐远离微带结构表面时, 滤波中心频率发生蓝移。文中的结论为太赫兹微带线的实验设计提供了精确的理论数据, 对实物片上系统设计与制作有着重要的指导意义。

参 考 文 献:

[1] Xu W, Xie L, Ye Z, et al. Discrimination of Transgenic rice containing the Cry1Ab protein using terahertz spectroscopy and chemometrics[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 11115.
[2] Bao Rima, Dong Chen, Lan Xingying, et al. Content measurement of hydrocarbons in alkylate gasoline based on terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1823-1826. (in Chinese)
宝日玛, 董晨, 蓝兴英, 等. 烷基化汽油中烃类物质含量的太赫兹时域光谱研究 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(6): 1823-1826.
[3] Zhu Siyuan, Zhang Man, Shen Jingling. Terahertz fingerprint spectra of sulbenicillin, sultamicillin, mezlocillin, and

- ticarcillin [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 626–630. (in Chinese)
- 朱思原, 张曼, 沈京玲. 磺苄西林、舒他西林、美洛西林、替卡西林的太赫兹指纹谱研究 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(3): 626–630.
- [4] Cunningham J M, Byrne M B, Wood C D, et al. On-chip terahertz systems for spectroscopy and imaging [J]. *Electronics Letters*, 2010, 46(26): 34–37.
- [5] Wood C D, Mistry D, Li L H, et al. On-chip terahertz spectroscopic techniques for measuring mesoscopic quantum systems[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(8): 085101.
- [6] Wu J, Mayorov A S, Wood C D, et al. Excitation, detection, and electrostatic manipulation of terahertz-frequency range plasmons in a two-dimensional electron system[J]. *Scientific Reports*, 2015: 15420.
- [7] Li Dazhang. On-chip pulsed terahertz systems [D]. UK: The University of Leeds, 2010.
- [8] Li Cheng, Shin' ichiro Hayashi, Adrian Dobroiu, et al. Terahertz-wave absorption in liquids measured using the evanescent field of a silicon waveguide [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(18): 181104.
- [9] Byrne M B, Cunningham J E, Khanna S P, et al. Terahertz vibrational absorption resonances observed using on-chip terahertz circuits [C]//33rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, IEEE, 2008.
- [10] Lu J Y, Chen L J, Kao T F, et al. Terahertz microchip for illicit drug detection[J]. *Photonics Technology Letters IEEE*, 2006, 18(21): 2254–2256.
- [11] Mante P A, Chen C C, Wen Y C, et al. Probing hydrophilic interface of solid/liquid-water by nanoultrasonics [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 6249–6249.
- [12] Tang Qi, Liang Min, Wilmink Gerald J, et al. Development of terahertz (THz) microfluidic devices for "Lab-on-a-Chip" applications [J]. *International Society for Optics and Photonics*, 2013, 8585:10.1117/12.2010270.
- [13] Miao Li, Deng Xianjin, Xiong Xiangzheng, et al. Design and simulation of 0.14 THz frequency doubler[J]. *Information & Electronic Engineering*, 2012, 6: 689–694. (in Chinese)
- 缪丽, 邓贤进, 熊祥正, 等. 0.14 THz 倍频器的设计与仿真 [J]. *信息与电子工程*, 2012, 6: 689–694.
- [14] Wood C D. On-chip THz systems [D]. UK: University of Leeds, 2006.