光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021072905

一种用于 CO_2 气体传感器的新型 MEMS 红外光源

杨　靖[1,2]，李小飞[1]，李中洲[3]，余　隽[3]，
唐祯安[3]，梅　勇[1]，张灵舒[1]，袁宇鹏[1]*

（1. 中电科技集团重庆声光电有限公司，重庆 401332；2. 电子科技大学 自动化工程学院，成都 611731；
3. 大连理工大学 生物医学工程学院，辽宁省集成电路与生物医学电子系统重点实验室，辽宁 大连 116024）

摘　要： 基于 CO_2 红外气体传感器微型化、智能化、低功耗的发展要求，创新性地提出一种中心温度为 407 ℃的 CO_2 检测用微电子机械系统（MEMS）红外光源芯片。采用 X 型悬空桥式微热板结构，内部发热区域以环形走线的钨（W）电极为加热丝，以 SiO_2 和 Si_3N_4 双层薄膜作为机械支撑保护层，可防止钨电阻丝氧化并提高寿命。电热耦合有限元仿真分析显示，该光源芯片具有发热区温度分布均匀、热响应时间短、功耗低的优点。采用 10.16 cm（4 inch）MEMS 工艺完成了芯片的流片制造。测试结果表明，该光源芯片在 24 ms 内即可快速升温至工作温度 407 ℃，功耗低至 46 mW，工作电压为 2.85 V，工作电流为 16.2 mA，具有热响应时间快、功耗低、集成度高的特点。

关键词： CO_2；MEMS 红外光源；微热板；功耗；热响应时间

中图分类号： TN384；TP212　**文章编号：** 1001－5868(2021)05－0635－06

A New Design of MEMS Infrared Source for CO_2 Gas Sensor

YANG Jing[1,2], LI Xiaofei[1], LI Zhongzhou[3], YU Jun[3],
TANG Zhen'an[3], MEI Yong[1], ZHANG Lingshu[1], YUAN Yupeng[1]

(1. Chongqing Acoustic-Optic-Electronic Co. Ltd. of China Electronics Technol. Group, Chongqing 401332, CHN; 2. School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technol. of China, Chengdu 611731, CHN; 3. Key Lab. of IC & BME System of Liaoning Province, School of Biomedical Engin., Dalian University of Technol., Dalian 116024, CHN)

Abstract: Based on the requirements of miniaturization, intelligence and low power of CO_2 infrared gas sensor, a special MEMS infrared source chip for CO_2 detection is innovatively proposed with the center temperature of 407 ℃. The chip is a micro hot plate with X-type suspending bridge structure. And the internal heating area is tungsten heater with ring routing structure, SiO_2 and Si_3N_4 dielectric thin films as the mechanical support film. The infrared source chip is optimized with uniform temperature distribution in heating zone, short thermal response time and low power by the finite element simulation analysis. The chip is fabricated by 10.16 cm (4 inch) MEMS process. The results show that, the temperature of this chip can quickly rise to 407 ℃ within only 24 ms, the power consumption is as low as 46 mW, the working voltage is 2.85 V, and the current is 16.2 mA. The chip has the advantages of fast thermal response, low power dissipation and high integration.

Key words: CO_2; MEMS infrared source; micro-hot plate; power; thermal response time

收稿日期：2021－07－29.
基金项目：国家重点研发计划项目(2017YFB0406404).
* **通信作者：**袁宇鹏

0 引言

CO_2 作为大气的重要组成部分之一，对工农业生产、医疗卫生、环境保护、航空航天等各个领域都有重要的影响。尤其是随着现代社会的高速发展，CO_2 排放急剧增多，导致全球气候不断变化，对 CO_2 浓度进行实时高效的检测也愈加重要[1]。当前，针对 CO_2 气体浓度进行检测的手段主要有电化学法、电子捕获法、紫外线电离法以及非分散红外吸收法等[2]。其中，非分散红外吸收法凭借其测量范围宽、灵敏度高、精度高、反应快、寿命长、抗干扰性强等优点，在 CO_2 气体检测领域受到广泛的应用。随着 MEMS 技术、集成电路技术的发展，在物联网、可穿戴设备及智能移动终端飞速发展的需求牵引下，CO_2 红外气体传感器急需进一步减小体积和降低功耗，朝微型化、集成化、智能化的方向发展。

红外气体传感器主要由 4 个元件组成：红外光源、热释电红外探测器、气室和窄带滤光片。其中，光源作为传感器结构的核心部件[3]，主要负责提供合适波段的红外光，其性能很大程度上影响着气体传感器的体积、功耗、分辨率和探测极限[4-5]。MEMS 光源是红外气体传感器的常用光源，它是利用脉冲电信号对电阻丝制热，红外辐射增加，实现光源调制[6]。与传统光源相比，MEMS 光源所产生的红外光波段区域易于选择和调控，无需机械斩波轮即可满足特定窄波段的需求，同时采用微加工技术，体积小、质量轻、成本低，可以有效满足微型化、集成化的设计要求。

MEMS 红外光源作为热辐射型光源，其辐射特性基本上由器件的材料和结构决定[7]。它的输出性能如辐射强度、辐射效率、调制特性等严重影响着气体传感器探测的准确性和灵敏度。基于此，本文设计了一种特征谱段发光强度大、功耗低、易集成的高性能 MEMS 红外光源芯片。

1 基本原理

MEMS 红外光源属于黑体辐射，其工作机理是辐射体通电致自加热效应，激发光源辐射层辐射红外光[8]，它受温度影响会产生不同波段的光谱。根据普朗克辐射定律(Planck's Law)，可推导出黑体辐射能力与波长和温度的关系：

$$I(\lambda,T)=\frac{2\pi hc^2}{\lambda^5}\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda KT}}-1} \tag{1}$$

式中，I 为光谱辐射率，λ 为辐射波长，T 为绝对温度，c 为光速，h 为普朗克常数，K 为波尔兹曼常数。

对式(1)中的 I 进行积分，得到斯特藩-玻尔兹曼定律(Stefan-Boltzmann Law)，表示一个黑体表面单位面积在单位时间内辐射出的总能量：

$$W=\int_0^{\infty} w_\lambda \mathrm{d}\lambda=\frac{2\pi^5 k^4}{15c^2h^3}T^4=\delta T^4 \tag{2}$$

式中，δ(5.67×10^{-8} W·m^{-2}·K^{-4})为斯特潘-波尔兹曼常数。

由式(2)可以得出黑体辐射能量与温度的四次方成正比，温度每提高 1 倍，黑体的辐射能量将提高 16 倍，温度是决定辐射量的关键因素。

对式(1)两边求导，得到维恩位移定律(Wien Displacement Law)：

$$\lambda_m T=b \tag{3}$$

式中，b 为维恩常量(2 897.6 μm·K)。

由式(3)可以得出黑体辐射场的能量密度取极大值处的波长 λ_m 与热力学温度 T 的乘积为一常数。通过测出对应辐射通量密度极大值的 λ_m，由上式可计算出辐射体的最佳温度。

根据 HITRAN 开源数据库可查得 CO_2 气体在室温、标准大气压环境条件下的 3～5 μm 红外谱段吸收线，如图 1 所示，纵坐标吸收强度的有效面积 A_{eff}，是吸收系数 x_i 与吸收线强度(Line Strength)的乘积；横坐标为波长 λ 或波数 σ。其中 4.26 μm 附近的吸收线较强，因此常被用作 CO_2 气体定量检测的特征谱段。

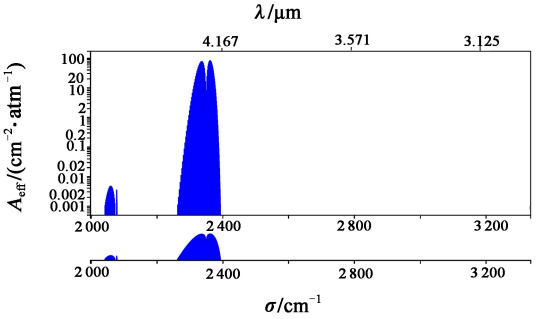


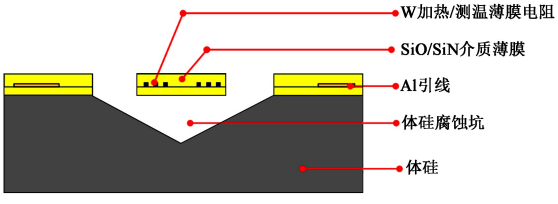
图 1 CO_2 在 3～5 μm 红外谱段的吸收光谱

将 CO_2 红外特征谱段 λ_m=4.26 μm 代入式(3)计算出最优工作温度为 407 ℃。根据最优工作温度的需求，本文提出中心工作温度为 407 ℃时的专用黑体辐射 MEMS 红外光源，其具有发热区温度分布均匀、热响应快、散热性能好的特点。

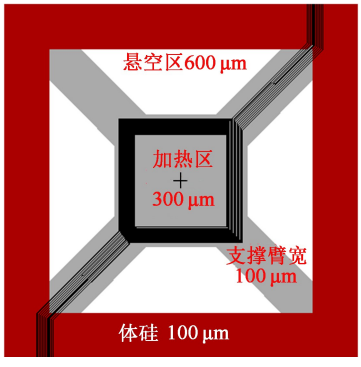
2　MEMS 光源结构设计与仿真

2.1　结构及尺寸设计

MEMS 红外光源基本结构如图 2 所示，具体设计参数如表 1 所示。光源采用具有“X”型四臂支撑悬空的微热板结构，中心区域为有效加热区，四周通过悬空空气隙和桥腿支撑结构形成隔热区域。微热板硅片总体尺寸为 2 mm×2 mm×0.3 mm，其加热辐射区域尺寸为 300 μm×300 μm，悬空区域尺寸为 600 μm×600 μm，支撑悬臂梁宽度为 100 μm。光源热响应时间设计值低于 30 ms，功耗不超过 100 mW。其发热结构为通过光刻方法制备的图形化钨(W)电极，电极图案为环形走线结构，这种走线方式能在有限区域内提高电阻进而提高发热区温度，同时保证温度分布更加均匀。由于发热区的温度较高，为了保护钨电阻丝不受氧化并提高寿命，在钨发热丝表面形成 SiO_2 和 Si_3N_4 双层薄膜构成的保护层。



(a)　纵向剖面图



(b)　俯视图

图 2　MEMS 红外光源总体结构

表 1　MEMS 红外光源设计参数

参数名称	设计值
微热板发热面积/μm^2	300×300
微热板硅片尺寸/mm^3	2×2×0.3
工作温度/℃	407±3
功耗/mW	＜100
热响应时间/ms	＜30

2.2　有限元仿真分析

利用有限元仿真软件 COMSOL5.0 对 MEMS 红外光源结构进行电热耦合仿真，分析其温度分布和电学特性。为减少计算量，只取光源加热区域和支撑结构进行建模分析。图 3，4 为求解后的光源器件加热区的典型温度分布图，仿真结果表明中心加热区(300 μm×300 μm)温度分布均匀，热耗散较低，热量比较集中，因此中心加热区的辐射能量高、发光强度大。加热区温度主要集中在 410 ℃左右，与理论设计的 407 ℃的工作温度符合。

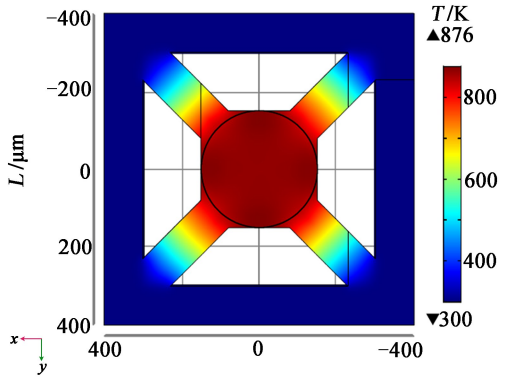


图 3　MEMS 红外光源典型温度分布

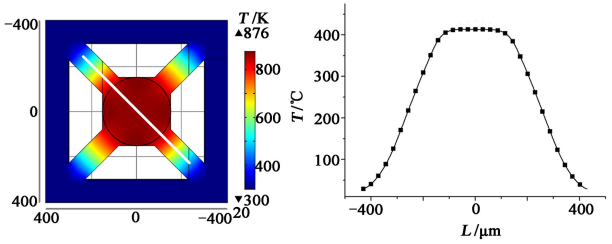


图 4　对角线上温度分布(白线所示为对角线)

图 5 为光源中心处的热响应曲线，从图中可以看出辐射区中心温度随时间逐渐升高，在 0～20 ms 的时间内，温度上升趋势显著，t＝20 ms 后温度变化较慢，最后趋于平缓。t＝20 ms 为热响应时间，此时辐射区中心处温度达到 750 K(477 ℃)左右，接近工作温度为 407 ℃的设计要求。

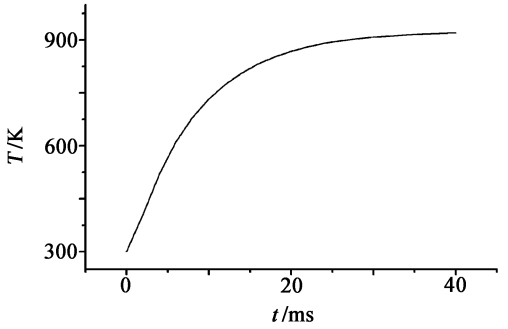


图 5　MEMS 红外光源热响应曲线

仿真分析温度分布和电学参数统计结果如表 2

所示。通过仿真分析得出 MEMS 红外光源在 407 ℃的工作温度下，加热功耗为 38 mW，远优于设计值(小于 100 mW)，加热电压为 1.63 V，加热电阻为 76 Ω，热响应时间为 20 ms，远优于设计值(小于 30 ms)。因此，本文设计出的 MEMS 红外光源微热板结构理论上满足加热区辐射强度大、热响应时间短、功耗低的设计要求。

表 2 MEMS 红外光源参数统计表

参数名称	仿真结果
平均温度 T_{ave}/℃	407
中心部分直径 300 μm 内的温度标准差 δ/℃	6.0
加热功耗/mW	38
加热电流/mA	21
加热电压/V	1.63
加热时间/ms	20
加热电阻/Ω	76

3 MEMS 光源制作工艺

图 6 所示为 MEMS 红外光源芯片版图(对称结构)，芯片中部为“X”型悬空红外光源，四周有 22 个焊盘，其中连接红外光源电阻的焊盘有 8 个，通过对角线上键合 Al 引线连通焊盘与钨电阻丝。

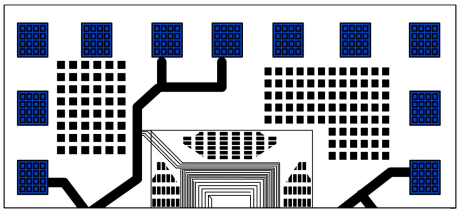


图 6 MEMS 红外光源版图(对称结构)

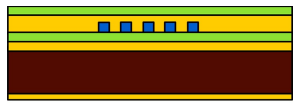
选用 10.16 cm(4 inch)n 型〈100〉硅片加工，其 MEMS 光源微热板工艺流程如图 7 所示，采用正面腐蚀工艺制备悬空桥式微热板。首先在硅片表面上干法氧化生成 SiO_2 薄膜，PECVD 制备 Si_3N_4 薄膜，然后通过射频溅射制备 W 金属薄膜，剥离形成环形走线的 W 加热丝，再利用 PECVD 制备 SiO_2 薄膜和 Si_3N_4 薄膜，干法刻蚀去除腐蚀窗区域介质层，露出体硅[9]。最后使用 8%TMAH 腐蚀液腐蚀体硅，形成悬空的微热板，如图 8 所示。



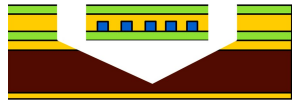
(a) 制备 SiO_2/Si_3N_4 绝缘层



(b) 剥离工艺制备 W 电极



(c) PECVD 制备钝化保护层



(d) TMAH 湿法腐蚀体硅



图 7 MEMS 红外光源工艺流程图

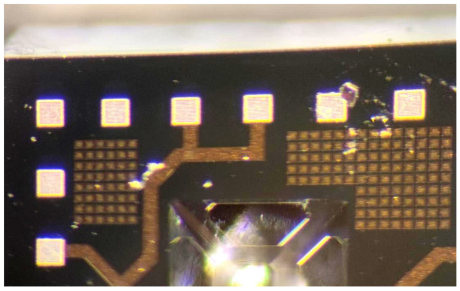


图 8 MEMS 红外光源芯片实物图

4 MEMS 光源性能测试与分析

MEMS 光源是一个电阻 R_s，通电后产生焦耳热，从而温度升高，并发出中红外光。同时 R_s 也是温敏电阻，本文针对 MEMS 光源芯片开展了一系列性能测试。

4.1 温阻特性测试

在室温 20 ℃下，用万用表直接测量 MEMS 光源芯片阻值，其冷态阻值为 $R_0=(103\pm3)\ \Omega@T_0=20$ ℃。随后将芯片置于马弗炉中，设置马弗炉温度，当其达到设计温度 407 ℃并稳定 20 min 后，用万用表测试 R_s，测试结果如图 9 所示。

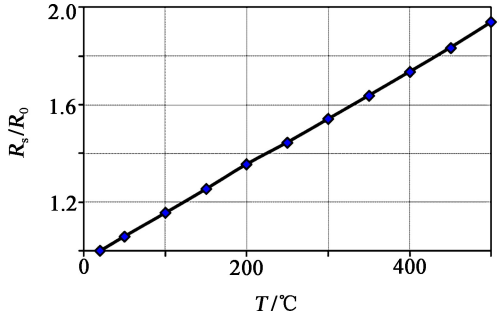


图 9 MEMS 光源芯片在工作温度下的加热丝阻值变化

从上图可以观察到在测量温度区间内温度和阻值存在线性关系，用直线公式拟合得到如下公式：

$$T=T_0+\frac{R_s-R_0}{\alpha R_0} \tag{4}$$

式中，$\alpha=(2\pm0.1)‰$，$R_0=(103\pm3)\ \Omega$，$T_0=20\ ℃$。

根据上述温阻特性曲线公式通过测量加热丝的阻值可得到微热板芯片的平均温度[9]。

4.2　功耗测试

电流源表为 MEMS 光源芯片（R_s）提供加热电压，直接读取电流源表显示的电阻、电压、功率。根据电阻值和由式(4)计算出的工作温度，可得其加热电压、功率与温度之间的关系，如图 10～11 所示。结果表明加热电压与工作温度成正比。当达到近 600 ℃高温时，芯片需要的最大加热电压为 3.9 V，最大功率为 72 mW，满足设计要求。尤其是仅以 46 mW 的功耗达到工作温度 407 ℃，说明所设计的 MEMS 光源微热板具有低功耗特性。

图 10 用直线公式拟合得到如下公式：

$$T=T_0+P_h/G \tag{5}$$

式中，T_0 为环境温度 20 ℃，红外光源等效热导 $G=0.13\ mW/℃$。

因此 MEMS 光源微热板功率与温度存在良好的线性关系，表明其热稳定性良好。

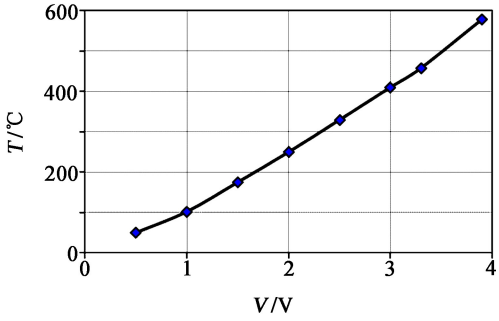


图 10　MEMS 光源芯片加热电压与工作温度的关系

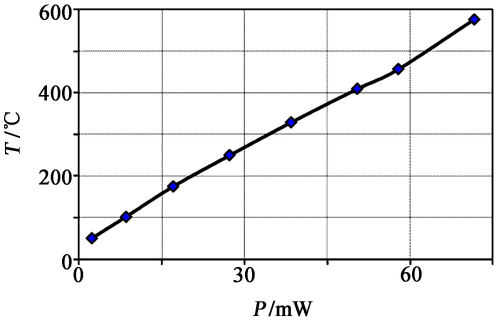


图 11　MEMS 光源芯片功率与工作温度的关系

4.3　热响应测试

将 MEMS 光源芯片（R_s）与标准电阻 r 串联，脉冲电压源加在串联电路两端，示波器通道 1 测量脉冲电压源波形 V_1，示波器通道 2 测量 r 分压波形 V_2。观测上升沿曲线获得热响应特性。由式(6)计算 R_s，然后根据 R_s 和式(4)计算工作温度。

$$R_s=\frac{r(V_1-V_2)}{V_2} \tag{6}$$

图 12 为热响应特性曲线，对其进行拟合，结果如图中虚线所示，得到如下公式：

$$T=T_0+D(1-e^{\frac{-t}{\tau_r}}) \tag{7}$$

式中，D 为 MEMS 光源热流系数，τ_r 为响应时间常数，$\tau_r=(12\pm1)$ ms。

热响应时间作为衡量 MEMS 光源微热板性能的重要指标[10-11]，是指从脉冲上升沿起始时间到达温度幅值的 90％所需时间。图中显示热响应时间 $t_r=(24\pm2)$ ms，满足小于 30 ms 的设计要求。这是因为小尺寸 MEMS 微热板的悬空结构，导致微热板的总体功耗非常低，薄膜等效热容也非常小，从而具有非常快的热响应时间[10]。

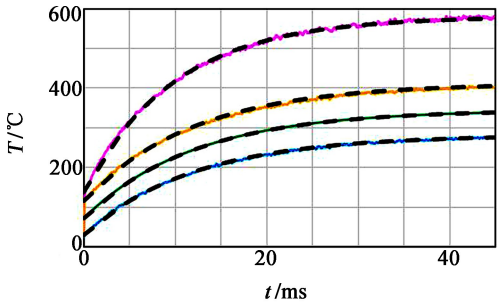


图 12　MEMS 光源芯片的热响应特性曲线（测试曲线为彩色，拟合曲线为黑色虚线）

4.4　性能测试结果

上述性能测试的阻温特性和电学参数统计结果如表 3 所示。MEMS 光源芯片发热总面积为 0.3 mm×0.3 mm，在常温下芯片阻值为 103 Ω，通电后在 24 ms 内即可快速升温至工作温度 407 ℃，此温度下电阻值可达 176 Ω，功率低至 46 mW，工作电压为 2.85 V，工作电流为 16.2 mA。

表 3　MEMS 光源芯片性能参数统计表

参数	典型值
冷态阻值 R_0/Ω	103@T_0=20 ℃
工作温度/℃	407
功率/mW	46
热态阻值 R_s/Ω	176
工作电压/V	2.85
工作电流/mA	16.2
时间常数/ms	12
升温时间/ms	24
发热面积/mm^2	0.3×0.3

5 结论

针对物联网、移动终端等领域对 CO_2 红外气体传感器微型化、集成化的迫切需求，本文研制出一款X型悬空桥式微热板结构的MEMS红外光源，其总体尺寸为2 mm×2 mm×0.3 mm。其内部加热丝走线方式采用温度分布均匀性更优的环形走线，具有功耗低(46 mW)、热响应时间快(24 ms)、特征谱段发光强度大的特点，可为 CO_2 红外气体传感器提供微型化、低功耗、辐射特性好的光源芯片。

参考文献：

[1] 郑玲娇，牛新涛，王嘉宁，等. 中红外二氧化碳传感器的研制及在农业中的应用[J]. 光子学报，2017，46(8)：150-157.
Zheng Lingjiao，Niu Xintao，Wang Jianing，et al. Development and agricultural application of a mid-infrared carbon dioxide sensor system[J]. Acta Photonica Sinica，2017，46(8)：150-157.

[2] 裴 昱，张加宏，李 敏，等. 恒温NDIR二氧化碳气体传感器研究[J]. 激光与红外，2021，51(2)：189-195.
Pei Yu，Zhang Jiahong，Li Min，et al. Research on constant temperature NDIR carbon dioxide gas sensor[J]. Laser & Infrared，2021，51(2)：189-195.

[3] Barth A. Infrared spectroscopy of proteins[J]. Biochimica et Biophysica Acta，2007，1767(9)：1073-1101.

[4] 田 英，熊继军，关新锋，等. MEMS红外光源研究及应用[J]. 微纳电子技术，2012，49(9)：607-612.
Tian Ying，Xiong Jijun，Guan Xinfeng，et al. Research and application of MEMS infrared source[J]. Micronanoelectronic Technology，2012，49(9)：607-612.

[5] Yang J，Cheng Y，Yuan Y，et al. Design and optimization of an integrated MEMS gas chamber with high transmissivity [J]. Digital Communications and Networks，2021，7(1)：82-91.

[6] 李世超. 微型化CO气体分析仪关键技术研究[D]. 邯郸：河北工程大学，2021.
Li Shichao. Research on key technology of miniaturized CO gas analyzer[D]. Handan：Hebei University of Engineering，2021.

[7] 关新锋. 基于MEMS红外光源阵列的光电标识技术研究[D]. 太原：中北大学，2013.
Guan Xinfeng. Photoelectric identification technology based on MEMS infrared source array[D]. Taiyuan：North University of China，2013.

[8] 张 鹏，丑修建，刘 立，等. MEMS红外光源光谱特性及温度特性测试研究[J]. 红外技术，2017，39(3)：288-291.
Zhang Peng，Chou Xiujian，Liu Li，et al. Research on spectral and temperature characteristic test of MEMS infrared light source[J]. Infrared Technology，2017，39(3)：288-291.

[9] 李中洲，余 隽，周君伟，等. 用于气体传感器的微热板工艺流程与性能对比[J]. 仪表技术与传感器，2018，42(1)：17-20.
Li Zhongzhou，Yu Jun，Zhou Junwei，et al. Comparison on process and performance of microhotplate for gas sensors[J]. Instrument Technique and Sensor，2018，42(1)：17-20.

[10] Li Y，Yu J，Wu H，et al. Design and fabrication of a CMOS compatible MHP gas sensor[J]. AIP Advances，2014，4：031339.

作者简介：

杨 靖(1981—)，男，山东郓城人，博士，研究员级高级工程师，主要从事智能传感器及微系统研究；

袁宇鹏(1989—)，男，湖南新化人，博士，高级工程师，主要从事传感器及感知微系统研究。

(上接第634页)

[15] Chiu W H，Huang Y H，Lin T H. A dynamic phase error compensation technique for fast-locking phase-locked loops [J]. IEEE J. of Solid-State Circuits，2010，45(6)：1137-1149.

[16] Zahra G K，Seyed A I A. Fully integrated fractional-N phase-locked loop for GNSS standards[J]. IET Microwaves，Antennas & Propagation，2019，13(13)：2391-2395.

[17] Amourah M，Whately M. A novel switched capacitor filter based low-area and fast-locking PLL [C]// 2015 IEEE Custom Integrated Circuits Conf.，2015：1-6.

[18] 冯国林，常玉春，马艳华. 一种应用于图像传感器的全数字锁相环设计[J]. 半导体光电，2021，42(1)：106-109.
Feng G L，Chang Y C，Ma Y H. Design of an all-digital phase-locked loop applied to image sensor [J]. Semiconductor Optoelectronics，2021，42(1)：106-109.

作者简介：

邓智耀(1997—)，男，广西桂林人，硕士研究生，主要研究方向为低功耗快速锁定模拟、数字锁相环及其应用系统；

刘 博(1982—)，男，辽宁锦州人，博士，副教授，主要研究方向为混合信号/低功耗模拟/射频集成电路设计及优化算法。