光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022100201

基于标准 CMOS 工艺的片上太阳敏感器研究

范柚攸[1,2*]，王红义[3]，权海洋[2]

（1. 北京大学 集成电路学院，北京 100871；2. 北京微电子技术研究所，北京 100076；
3. 西安交通大学 微电子学院，西安 710049）

摘　要： 微纳卫星对于载荷的苛刻要求使得太阳敏感器的微型化研究具有重要意义。为了解决光学器件和处理电路的集成兼容问题，文章基于标准 CMOS 工艺提出一种新型片上太阳敏感器，以金属走线层构建微型墙结构，两侧均匀分布 pn 结构成光电传感器，通过检测两侧光电流比例解算出入射光角度。文章从工艺实现、模型建立、数值仿真和实验测试等方面验证了器件的合理性和可行性。最终，片上太阳敏感器阵列芯片质量为 1.5 g，尺寸为 304.2 mm^3，检测精度为 ±1.6°，视场范围为 80°，可满足微型化需求。

关键词： 标准 CMOS 工艺；太阳敏感器；阵列结构

中图分类号： TN15　**文章编号：** 1001－5868(2023)01－0018－07

Research on On-chip Sun Sensor Based on Standard CMOS Process

FAN Youyou[1,2], WANG Hongyi[3], QUAN Haiyang[2]

(1. School of Integrated Circuits, Peking University, Beijing 100871, CHN;
2. Beijing Microelectronics Technology Institute, Beijing 100076, CHN;
3. School of Microelectronics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, CHN)

Abstract: It is important to study the miniaturization of sun sensors used in the micro-nano satellites whose load requirement is rigorous. In order to solve the integration compatibility problem of optical devices and processing circuits, a novel on-chip sun sensor based on standard CMOS process is proposed in this paper. The micro-wall structure was constructed by metal layers, and the pn junctions were uniformly distributed on both sides as photoelectric sensors. The angle of incident light was calculated by detecting the ratio of photocurrents on both sides. The rationality and feasibility of the device were verified by the process realization, model establishment, numerical simulation and experimental testing in this paper. Finally, the on-chip sun sensor array chip is designed and fabricated whose mass is 1.5 g, size is 304.2 mm^3, the detection accuracy is ±1.6° and the field of view range is 80°, which can meet the requirements of miniaturization.

Key words: standard CMOS process; sun sensor; array structure

0　引言

随着微纳加工和微电子技术的进步，质量小于 100 kg 的微纳卫星[1-3]将进一步降低探索宇宙的准入门槛并激发商业市场热情。因此，卫星系统中各模块和器件的微型化也就成为科研人员的研究热点。太阳敏感器[4-6]由于应用限制少、姿态检测精度高和成本低等优点被最广泛地应用于卫星姿态控制系统，国内外均已开展了对太阳敏感器微型化和智能化的研究。Kim 等[7]研究了一种双轴式模拟型太阳敏感器，入射光经过带有狭缝的光学探头后在

收稿日期：2022－10－02.
基金项目：北京微电子技术研究所高校专项计划项目(TX-Z22-01).
* 通信作者：范柚攸　E-mail：15209228315@163.com

两片光电池上形成光条纹，根据入射光角度的不同，两片光电池产生的光电流也发生相应变化，光电流经放大电路、采样电路和模数转换电路等处理后输出入射光角度信息。该太阳敏感器有两个狭缝相互垂直的光学探头，器件尺寸为 80 mm×80 mm×30 mm，质量为 150 g，检测视场为±60°，检测精度为 1.2°。Boom 等[8]利用方形孔作为光学探头将入射光引导到底部的光电池上，底部光电池采用四象限阵列布局，通过差分计算太阳光斑在四象限中分布情况检测入射光的高度角和方位角，器件尺寸为 46 mm×45 mm×17 mm，质量为 60 g，检测视场为±64°，检测精度小于 2°。Delgado 等[9]利用 MEMS 工艺设计生产了一种二维太阳传感器，利用在硅衬底上生长的氧化层形成窗口和光学传输层，通过光在底部光电二极管上感应的光电流差值得到入射光方向。这种光方向传感器被应用于航天器的定位和调姿，尺寸约为 30 mm×30 mm×12 mm，检测视场为±60°，在一定检测范围内检测精度可达 0.1°，但是需要外接必要的控制电路检测入射光的信息。目前主流的微型化方式是采用 MEMS 或硅光子集成工艺[10]等对光学探头进行微型化处理，再结合光电传感器和外围处理电路实现微型化设计。但是这种设计方案面临光学探头和光电传感器的安装对准问题，需要采用复杂的补偿算法进行修正。MEMS 或硅光子集成工艺与标准 CMOS 工艺在兼容性上还存在一些困难，无法利用集成电路的强大信号处理功能，虽然将集成电路和微型化的前端检测结构进行合封[11]是一种可行的方案，但是由于光电信号不得不经过较长的路径才能被处理从而信噪比成为一个非常棘手的问题。本文针对上述问题提出一种基于标准 CMOS 工艺的太阳敏感器，且其可与处理电路实现真正的单片集成，该解决方案可以为微纳卫星提供一种微型化、低成本和低功耗的太阳敏感器。

1　器件结构及原理

1.1　工艺实现

片上全集成太阳敏感器各结构中难度最大的就是如何构建光学探头将入射光投射到光电传感器上，应用于传统光学探头中的透镜和棱镜等结构由于加工工艺的限制不在研究范围之内，本文重点研究孔隙、挡板等工艺可实现结构。根据障碍物的尺寸大小，入射光发生衍射的程度不同，直线传播是衍射的一种极限情况。利用 CMOS 工艺构建的微结构关键尺寸一般在微米量级，与可见光波长相近，可能会发生衍射而造成检测偏差。引入菲涅耳数作为判定衍射区域的参数，菲涅耳数的定义如式(1)所示：

$$N=\frac{\rho^2}{\lambda}\left(\frac{1}{l_0}+\frac{1}{r_0}\right) \tag{1}$$

式中，ρ 为孔隙或挡板尺寸，λ 为入射光波长，l_0 为光源到孔径的距离，r_0 为接收屏到孔径的距离。实际太阳敏感器工作时 $l_0 \gg r_0$，式(1)可以改写为

$$N=\frac{\rho^2}{\lambda}\frac{1}{r_0} \tag{2}$$

当孔径尺寸不变时，根据接收屏到孔径距离 r_0 的不同可以将衍射情况分为几个不同的区间：几何区($N \gg 1$)、菲涅耳衍射区($N>1$)和夫琅禾费衍射区($N<1$)。同时，孔径尺寸和入射光波长也会影响光学探头的衍射状态。文献[12]中设计的基于 MEMS 的光学探头具有如下光学参数：孔径尺寸为 50 μm，接收屏到孔径的距离为 4 mm，入射光波长为 1 μm，根据上述理论分析计算其菲涅耳数 $N=0.125$，处于夫琅禾费衍射区具有较强的衍射效应，对于太阳敏感器的检测结果有影响，该太阳敏感器需要复杂的算法对于衍射造成的影响进行补偿。

光学探头加工的关键是如何利用工艺实现孔隙、狭缝或挡板等障碍物。标准 CMOS 工艺中的金属层既可以挡光也可以在金属表面刻蚀不同的图形，因此可以利用金属层构建光学探头结构。随着 CMOS 工艺的进步和超大规模集成电路的实际需求，金属连线的层数在不断增加。不同金属层的加工工艺类似，但厚度不同，越顶层的金属厚度越大。第一层金属和器件端口之间需要通过引线孔进行电学连接，不同金属层之间还需要通孔实现电学互连，同时，金属层之间填充二氧化硅进行绝缘处理。金属层、引线孔和通孔的厚度构成了光学探头垂直方向上的尺寸，即衍射屏到接收屏的距离。表 1 列出了 1P3M CMOS 工艺中金属层相关材料的实际加工厚度。

根据表 1 的数据，可以估算在 CMOS 工艺中加工的光学探头垂直方向的尺寸是微米级的，随着金属层数的增加尺寸会增大。金属层表面刻蚀图形尺寸可以达到几十甚至上百微米，如果图形孔径尺寸为 20 μm，入射光波长为 1 μm，接收屏到孔的距离为 4 μm，菲涅耳数 $N=100$，与文献[12]中的光学系统相比，衍射效应的影响被大大降低。因此通过合

理设计可以使得基于 CMOS 工艺的光学探头的衍射效应得到抑制。

表 1 1P3M CMOS 工艺中金属材料厚度

不同材料层	厚度/nm
引线孔	730
第一层金属	520
第一与第二层金属之间通孔	730
第二层金属	600
第二与第三层金属之间通孔	730
第三层金属	725

1.2 模型建立

本文基于标准 CMOS 工艺设计了集成有光学探头和光电传感器的三维结构(如图 1 所示),该器件和信号处理电路都集成在同一个 p 型衬底上,由数层金属及其通孔堆叠而成的金属墙位于器件中央,由 Pdiff 电阻构建而成的光电二极管对称分布在金属墙两侧,空白部分在实际器件中是 SiO_2 等介质材料,既作为器件的支撑材料也作为光学传输通道。其中,D_L 和 D_R 是用来检测的左右光电二极管,这两个光电二极管面积相同。入射光和金属墙之间的夹角 θ 为入射角,当入射光垂直照射到金属墙上表面即 $\theta=0°$时,金属墙两侧光电二极管 D_L 和 D_R 接收相同的光功率,产生相同的光电流。当入射光从金属墙右侧照射即 $\theta<0°$,金属墙左侧产生阴影,D_R 接收的光功率多,产生的光电流大。当入射光从金属墙左侧照射即 $\theta>0°$,金属墙右侧产生阴影,D_L 接收的光功率多,产生的光电流大。故光电二极管的光电流和入射光的方向、角度存在相关性。

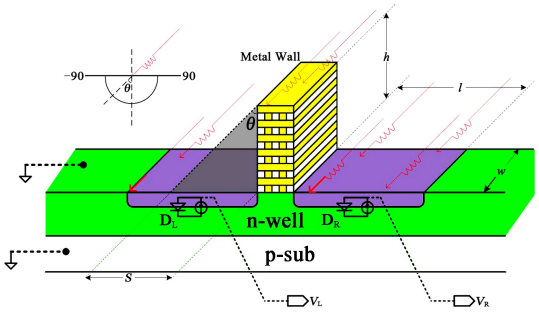


图 1 基于标准 CMOS 工艺的太阳敏感器结构

根据上文分析,入射光在该模型中看作沿直线传播,不考虑衍射的影响。光电二极管上产生的光电流和入射光功率以及光接收面积成正比,因此光电二极管上产生的光电流表达式如式(3)所示:

$$I_{DIO}=kP_0A_{EFF}=kP_0wl_{EFF} \tag{3}$$

式中,k 为吸收系数,P_0 是单位面积上的入射光功率,A_{EFF} 是入射光照射到光电二极管上可以产生光电流的有效区域面积,w 是光电二极管的宽度,l_{EFF} 是光照有效区域的长度。根据入射光角度不同,分为三种情况对光电二极管的光电流进行讨论。

当 $\theta=0°$时,入射光垂直于光电二极管的接收表面,且两侧光电二极管的接收面积相同,均为其设计面积。此时,两侧光电流的表达式为

$$I_{D_L}=I_{D_R}=kP_0wl \tag{4}$$

当 $\theta<0°$时,入射光在左侧光电二极管区域形成阴影造成两侧光电流的差异。右侧光电二极管产生的电流表达式为

$$I_{D_R}=kP_0(wl\cos\theta-\alpha h\sin\theta+\beta wl\cos\theta) \tag{5}$$

式中,α 表示照射到金属墙右侧的入射光的反射系数,β 表示入射光在材料层中经过多次反射和透射后的透射系数。光电流由三部分组成,第一部分是入射光直接照射在二极管上产生的光电流,第二部分是经金属墙反射后被二极管吸收产生的光电流,第三部分是在金属层、扩散材料层和衬底层之间经过多次反射和透射过程后最终被二极管吸收产生的光电流。需要注意的是,第三部分的负号表示入射光从右侧照射的入射角为负数。

左侧光电二极管的光电流只包括第一和第三部分光电流,其中第一部分光电流要考虑阴影面积的影响,左侧二极管产生的光电流表达式为

$$I_{D_L}=kP_0[(wl\cos\theta+wh\sin\theta)+\beta wl\cos\theta] \tag{6}$$

当 $\theta>0°$时,左侧光电二极管被完全照射,右侧光电二极管上有部分阴影区域。类比 $\theta<0°$情况,可以得到这种情况下左右两个光电二极管的光电流表达式分别是式(7)和式(8):

$$I_{D_L}=kP_0(wl\cos\theta+\alpha h\sin\theta+\beta wl\cos\theta) \tag{7}$$

$$I_{D_R}=kP_0[(wl\cos\theta-wh\sin\theta)+\beta wl\cos\theta] \tag{8}$$

根据式(5)~(8),整理得到左右光电二极管的光电流比值如下所示:

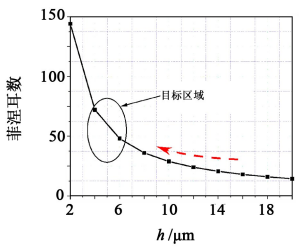
$$f(\theta)=\frac{I_{D_L}}{I_{D_R}}=\begin{cases}\dfrac{(1+\beta)l\cos\theta+\alpha h\sin\theta}{(1+\beta)l\cos\theta-h\sin\theta}\\[2ex]\dfrac{(1+\beta)l\cos\theta+h\sin\theta}{(1+\beta)l\cos\theta-\alpha h\sin\theta}\end{cases}=$$

$$\begin{cases}\dfrac{(1+\beta)l+\alpha h\tan\theta}{(1+\beta)l-h\tan\theta}, & \theta\geqslant 0°\\[2ex]\dfrac{(1+\beta)l+h\tan\theta}{(1+\beta)l-\alpha h\tan\theta}, & \theta<0°\end{cases} \tag{9}$$

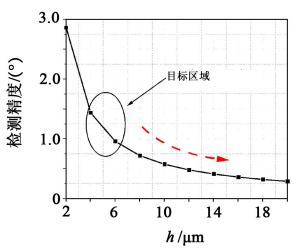
1.3　参数设计

检测视场范围是太阳敏感器重要参数指标，式(9)中数值计算应该满足$(1+\beta)l-h\tan\theta>0$的条件，代入阴影区域参数尺寸，阴影部分长度满足$s<(1+\beta)l$的条件。其物理意义在于定义了入射光的视场范围，当入射光角度大于$\arctan[(1+\beta)l/h]$时，阴影一侧的光电二极管由于全部位于阴影区域内，能检测到的光电流极其微弱，此时无法准确检测出入射光的角度信息。在金属墙高度一定的情况下，增大光电二极管的有效长度l可以增加检测视场范围，但是器件面积也会随之增大。

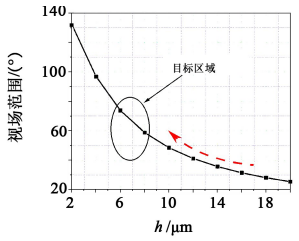
光方向传感器的另一项重要参数指标是检测精度，本文采用商用 CMOS 工艺加工器件，无法通过改变掺杂浓度等方式提高光电二极管的灵敏度，器件尺寸是主要设计自由度，通过分析可知增大金属墙高度可以提高检测精度。因此，在设计时需要综合考虑实际工艺条件、菲涅耳数、光电二极管的接收面积、视场范围和检测精度等，对于不同的应用条件设计相适应的器件参数，其中最重要的参数就是金属墙高度h。图 2 给出了金属墙高度和不同性能指标之间的关系。根据 CMOS 工艺提供的金属层参数可知，堆叠形成的金属墙高度约为几微米到几十微米之间，因此金属墙高度计算区间确定为 2～20 μm。图 2(a)给出了菲涅耳数与金属墙高度之间的关系，菲涅耳数可以表征光学衍射的发生程度，随着金属墙高度的增加，菲涅耳数逐渐减小，入射光在金属墙处发生的衍射现象越明显。图 2(b)是检测精度与金属墙高度之间的关系，检测精度随着金属墙高度的增加而提高，当金属墙高度大于 6 μm 时，检测精度优于 1°。图 2(c)描述了视场范围与金属墙高度之间的关系，视场范围随着金属墙高度的增加而减小。图 2(d)是在保证视场范围相同情况下，不同金属墙高度对应的两侧光电二极管长度，光电二极管的长度可以间接表征芯片面积。从图中可以看出，增加金属墙高度会增加光电二极管长度从而增大芯片面积。



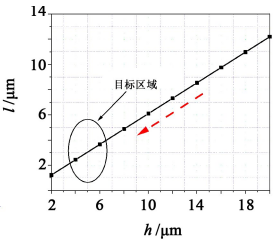
(a) 菲涅耳数与 h 的关系



(b) 检测精度与 h 的关系



(c) 视场范围与 h 的关系



(d) 光电二极管宽度与 h 的关系

图 2　金属墙高度与各参数之间的关系

所以，金属墙高度的设计需要在工艺条件、菲涅耳数、检测精度、视场范围和面积等指标中进行折中。根据设计目标，图 2 中圈出了金属墙高度的目标区域。金属墙宽度则会影响菲涅耳数和芯片面积。最终，器件金属墙高度和宽度的设计值分别为 4.6 和 10 μm。

式(9)中，α 和 β 两个物理量尚未确定，为了求解这两个物理量需要建立相应的电磁模型。α 是入射光在金属(铝线)和介质(包括 SiO_2、硼磷硅玻璃等)分界面的反射系数，β 是入射光在不同材料层(包括衬底、扩散层和钝化层等)之间经过多次反射和透射后的透射系数。为了研究基于 CMOS 的光方向传感器的光学性质，需要对工艺中各种材料的折射率进行分析。由于色散效应，同一材料的折射率会随着入射光频率发生变化，本文入射光波长范围为 400～700 nm。利用 Matlab 和 FDTD Solutions 分别进行数值仿真和电磁仿真，图 3 和图 4 分别是 α，β 与入射光角度的关系，两者趋势吻合较好。根据上述分析可知，h 和 l 是器件的尺寸参数，当器件加工完成后这两个参数是固定不变的。在确定的工艺条件下，α 和 β 是仅与入射光角度有关的物理量。因此，当器件加工完成后，两个光电二极管的光电流比值可以看作是仅与入射角有关的函数，测试光电流并计算其比值就可以得到角度信息。

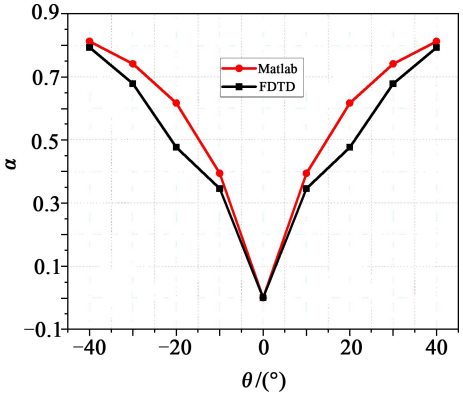


图 3　α 与入射光角度的关系

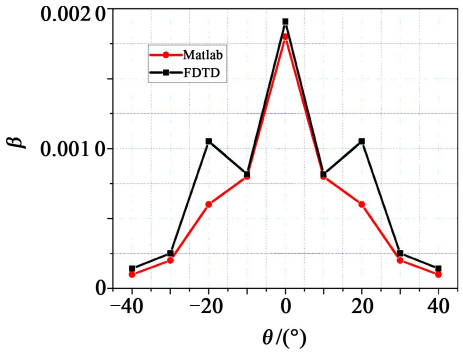


图 4 β 与入射光角度的关系

利用 Matlab 求解入射光角度和光电二极管光电流比值之间的关系，并与 FDTD Solutions 的仿真结果进行比较，比较结果如图 5 所示。从图 5 可知，入射光角度和光电流比值之间具有单调函数关系。而且，模型数值计算结果和电磁仿真结果也比较接近，说明本文建立的器件模型是可信的。

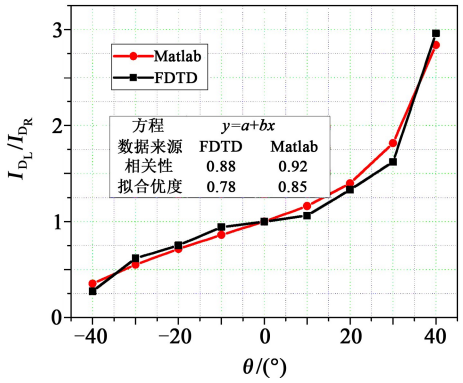


图 5 入射光角度和光电流比值的数值和电磁仿真比较

2 阵列结构设计

上节详细研究了单个器件特性，但是由于单个光电二极管的感光面积有限，产生的光电流很小，不利于后端电路的检测和处理。因此，本文设计了一组器件阵列，一方面增大入射光的接收面积，增大光电流，降低后端电路的设计难度；另一方面，在设计时采用两组相互垂直的阵列结构，可以检测二维入射光信息。图 6 是二维太阳敏感器阵列的芯片照片，图中标示了不同方位两组阵列结构。

传感器阵列是一个周期性阵列，可以视作一种特殊的“光栅”，入射光波长与其周期（两个金属墙之间的距离）可相比拟时，会发生衍射现象。为了降低衍射对结果的影响，阵列周期长度应被设计为大于 10 倍入射光波长。同时，这种表面金属周期性排列的结构类似于雷达天线罩中的频率选择表面，当其结构参数满足一定要求时会对某一特定频率入射光产生响应，其作用类似于电路中的滤波器。图 7 所示为不同阵列周期时入射光的频率响应的仿真结果，随着阵列周期增大频率响应的波动减小。所以，根据仿真结果和工艺条件，金属墙的阵列周期设计为 20 μm。

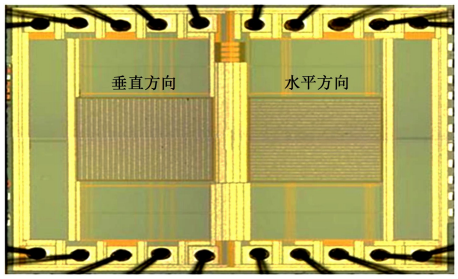


图 6 二维太阳敏感器阵列芯片

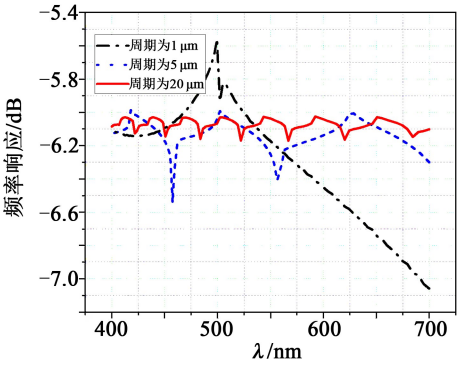


图 7 不同阵列周期时的入射光频率响应

3 实验结果

太阳敏感器采用 DIP 陶瓷封装形，方便入射光直接照射到传感器上。为了验证光方向传感器芯片性能，搭建如图 8 所示的测试平台。

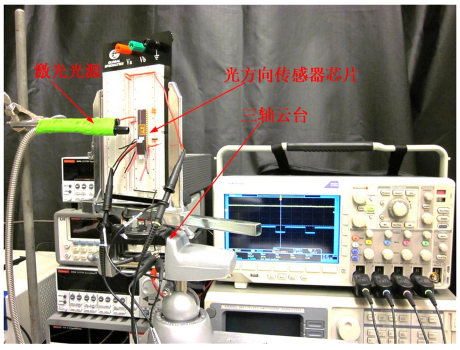


图 8 光方向传感器芯片测试平台

调节激光二极管使其输出光功率为 83 mW/cm^2，测试不同角度下金属墙左右两侧光电二极管的输出电流，并计算其电流比值，测试结果如图 9 所示。

由测试结果可知，当入射光垂直照射到芯片上，

即入射角 θ 近似为零时，左右两边光电二极管输出光电流相等。当入射光从右向左照射到芯片上，右侧光电二极管输出的光电流大。当入射光从左向右照射到芯片上，左侧光电二极管输出的光电流大。两个光电二极管的光电流比值与入射光角度具有单调函数关系，与仿真结果一致。

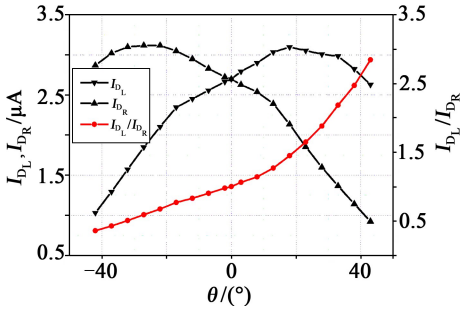


图 9　入射光角度与光电流关系测试结果

太阳敏感器误差是由输入和输出角度的差值决定的，如图 10 所示输入输出角度具有较好的一致性，其误差约为 ±1.6°。采用入射光波长分别为 450，520 和 680 nm 的激光二极管作为光源进行测试，如图 11 所示，不同频率入射光对于测试结果的一致性没有影响。

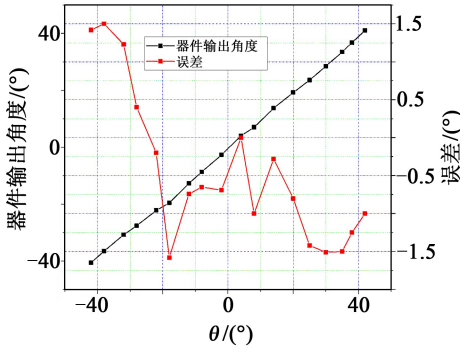


图 10　输入输出角度及其误差比较

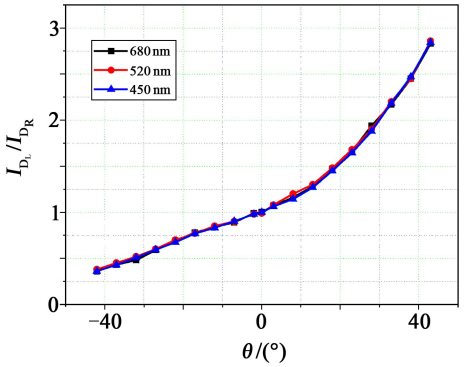


图 11　入射光波长的影响情况

表 2 比较了不同文献中太阳敏感器的关键技术指标，包括质量、尺寸、检测精度、视场范围和功耗等。从表 2 可以看出，本文提出的片上太阳敏感器在质量和尺寸方面具有明显优势。检测精度和视场范围一方面可以通过金属墙和光电二极管的尺寸设计进行优化，另一方面由于尺寸和质量的优势明显可以在微纳卫星表面多角度贴装以此进行补偿。

表 2　不同文献中太阳敏感器指标比较

文献	工艺	尺寸/mm^3	质量/g	精度/(°)	视场范围/(°)
本文	CMOS	304.2	1.5	1.6	80
[7]	分立器件	192 000	150	1.2	120
[8]	分立器件	34 425	60	＜2	128
[13]	MEMS	1 980	5	＜0.5	114
[13]	MEMS	1 210	2.2	＜2	120

4　结论

本文基于标准 CMOS 工艺，提出一种新型的片上太阳敏感器，利用金属层构建微米尺寸的金属墙，金属墙两侧是对称分布的光电二极管，可以将入射光转换为电信号，以便后续电路处理。针对器件原型建立数学模型，并对光电特性进行了数值计算和电磁仿真，并对传感器阵列周期进行了理论计算和仿真验证，研究了入射光频率对于两侧光电流比值的影响。经测试，器件检测精度为 ±1.6°，视场范围为 80°，质量为 1.5 g，尺寸为 304.2 mm^3，满足微型化的需求。由于该器件完全基于标准 CMOS 工艺设计加工，后续可与处理电路完美兼容，实现更高集成度的智能化微型太阳敏感器。

参考文献：

[1] Xuan M. Analysis of China's nano and microsatellite industry development[J]. Aerospace China, 2019, 20(1): 40-46.

[2] 马定坤. 微纳卫星发展现状与趋势[J]. 空间电子技术, 2017, 14(3): 42-45.
Ma Dingkun. Development status and trend of micro-nano satellites[J]. Space Electronics, 2017, 14(3): 42-45.

[3] Poghosyan A, Golkar A. CubeSat evolution: Analyzing CubeSatcapabilities for conducting science missions [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2016, 88(1): 59-83.

[4] Pelemeshko A, Kolesnikova A, Melkov A, et al. High-precision CubeSat sun sensor coupled with infrared earth horizon detector[J]. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2020, 734: 012012.

[5] 梁　斌, 朱海龙, 张　涛, 等. 星敏感器技术研究现状及发展趋势[J]. 中国光学, 2016, 9(1): 16-29.
Liang Bin, Zhu Hailong, Zhang Tao, et al. Research status and development trend of star sensor technology[J]. Chinese Optics, 2016, 9(1): 16-29.

[6] Zhang H, Niu Y X, Lu J Z, et al. Accurate and autonomous star acquisition method for star sensor under complex

conditions[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2017, 2017: 1-12.

[7] Kim S J, Kim S O, Moon B Y, et al. Development of ultra-light 2-axes sun sensor for small satellite[J]. J. of Astronomy & Space Sciences, 2005, 22(6): 47-58.

[8] Boom K, Leijtens J. Mini and micro sensor systems: Where small does not mean immature [C]// AIAA Guidance, Navigation and Control Conf. and Exhibit. 2008.

[9] Delgado F J, Quero J M, Garcia J, et al. Accurate and wide-field-of-view MEMS-based sun sensor for industrial applications[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2012, 59(12): 4871-4880.

[10] 郭 进, 冯俊波, 曹国威. 硅光子芯片工艺与设计的发展与挑战[J]. 中兴通讯技术, 2017, 23(5): 7-10.
Guo Jin, Feng Junbo, Cao Guowei. The progress and challenges of silicon photonics and design[J]. ZTE Technol., 2017, 23(5): 7-10.

[11] Xie N, Theuwissen A J P. An autonomous micro digital sun sensor by a CMOS imager in space application[J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 2012, 59(12): 3405-3410.

[12] 魏新国, 江 洁, 温志明, 等. 基于 MEMS 的数字式太阳敏感器光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(8): 1361-1366.
Wei Xinguo, Jiang Jie, Wen Zhiming, et al. Design of optical system of digital solar sensor based on MEMS[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(8): 1361-1366.

[13] Liebe C C, Murphy N, Dorsky L, et al. Three-axis sun sensor for attitude determination[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2016, 31(6): 6-11.

作者简介:

范柚攸(1991—),男,江苏省启东市人,2013 年于西安交通大学获微电子学专业学士学位,2020 年获西安交通大学电子科学与技术专业博士学位,目前在北京大学进行博士后研究,主要研究方向为光电传感器、MEMS 传感器及其处理电路。