材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021072802

# 基于玻璃纤维环氧树脂的双陷波宽频微带天线设计

张　扬[1,2*]，王二伟[1]，何　剑[1]

（1. 中北大学 仪器与电子学院，太原 030051；2. 山西职业技术学院，太原 030006）

**摘　要：** 设计了一种新型的宽频微带天线，天线基本结构为回字形，在两个正方环主辐射贴片之间通过四个长方形辐射贴片进行连接。天线基板材质选用玻璃纤维环氧树脂复合材料，大小为30 mm×45 mm，厚度为1.6 mm。天线结构采用电路板印制工艺进行图形化，参考地印制于基板背部。借助Ansoft HFSS 13.0进行仿真，在1～8 GHz范围内进行扫频，结果显示其可用频段为2.1～4.3 GHz，相对带宽为68%。给出了天线反射系数、电压驻波比、输入阻抗和增益方向图的仿真结果，分析了结构参数对天线辐射性能的影响，实际测量与仿真结果基本一致。

**关键词：** 微带天线；宽频带；HFSS

**中图分类号：** TN82　**文章编号：** 1001－5868(2021)06－0859－05

## Design of A Dual Band-Notched Broadband Microstrip Antenna Based on Glass Fiber Epoxy Resin

ZHANG Yang[1,2], WANG Erwei[1], HE Jian[1]

(1. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, CHN;
2. Shanxi Polytechnic College, Taiyuan 030006, CHN)

**Abstract:** Designed is a novel broadband micro-strip antenna with the shape similar to Chinese character '回'. The proposed antenna structure mainly consists of two square rings, and four rectangle radiation patches are printed to connect them. The material of the substrate is glass fiber epoxy resin, with the thickness of 1.6mm and area of 30 mm×45 mm. Printed circuit board technology is adopted to form the antenna structure, and the reference ground is printed on the back of the substrate. Sweeping frequency from 1～8 GHz, the designed antenna can cover the range of 2.1～4.3 GHz by Ansoft HFSS 13.0 with the relative bandwidth of 68%. The simulation results of reflection coefficient, voltage standing wave ratio, input impedance and gain pattern are given, and also the influence of structural parameter on radiation performance is analyzed. The actual measurement results are basically consistent with the simulation results.

**Key words:** micro-strip antenna; broadband; HFSS

## 0　引言

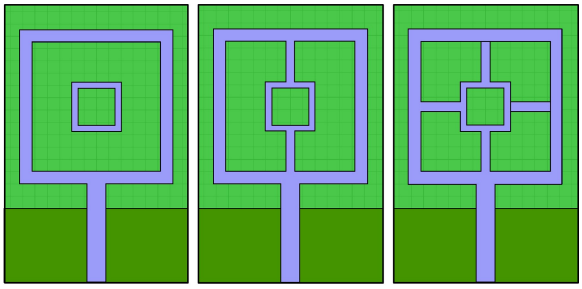
天线作为无信通信环节中电磁波传递信息的重要设备，是发信机与外界传播介质的直接接口，它的性能好坏直接影响着通信的质量[1]。在种类众多的天线中，微带天线以其造价低、体积小、重量轻、剖面低、散射截面小等独有优势而备受关注，但频带窄一直制约其发展速度[2]，而一些具有双频宽频特性的微带天线尺寸较大且结构复杂。早期的微带贴片天线相对带宽仅为0.5%～3%[3]，这在很大程度上限制了其在工程领域中的实际应用。面对现代无线通信系统的多元化，微带天线的小型化与宽频化必将成为其发展趋势。小型化可以节约整个通信系统所占的空间，宽频化可以充分利用有限的频谱资源，减少无线通信的干扰，降低成本，达到多个通信系统之间的兼容[4]。考虑到微带天线的小型化会造成频带变窄[5]，而天线介质板厚度增加或者介电常数减小

**收稿日期：**2021－07－28.
**基金项目：**国家高技术研究计划项目(2015AA042601).
*通信作者：张　扬

可以扩展天线频段，但过厚会增大损耗，相比结构的改进，基板新材料研究显然更加复杂[6]。基于此，本文设计了一种新型的微带天线，该天线印制于玻璃纤维环氧树脂复合材料基板表面，具有小型化与宽频化的特点，且易与电路集成。

## 1 天线结构设计

所设计的回形印制微带天线结构变化过程如图1所示，对应三种结构的辐射性能仿真结果见图2。最初设计的结构（结构1）可用频段很窄，并且回波损耗低；当在两个方环之间增加两个辐射贴片连接，即结构2时，天线谐振频点增多，可用频段得到扩展；当采用四个辐射贴片进行连接时（结构3），天线借助两个谐振频率，带宽进一步增加，其性能优于结构2。



（a） 结构1 （b） 结构2 （c） 结构3

图1 天线的三种设计结构

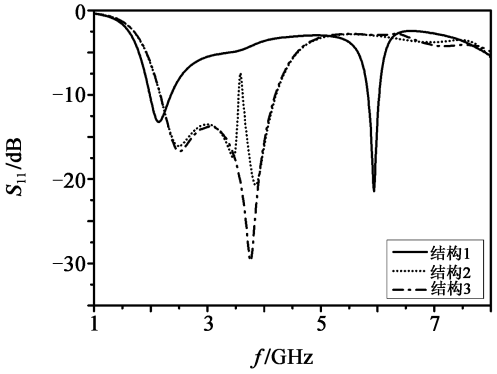



图2 三种天线结构对应的 $S_{11}$ 参数仿真结果

最终的微带天线模型如图3所示，电路板为双面结构，其中一面主要为回形天线的辐射贴片结构，并在两个正方环之间通过四个长方形的辐射结构进行连接，对应结构参数 $S_1=25$ mm，$S_2=8$ mm，$W_2=2$ mm，$W_3=1$ mm，$W_4=1.5$ mm，微带馈线长度 $L=16$ mm，宽度 $W_1=3$ mm；另一面为天线对应的参考地，与基板同等长度，高度 $H_1=12$ mm。基板尺寸规格为30 mm×45 mm×1.6 mm，材质为玻璃纤维环氧树脂复合材料，即电路板印制过程中所使用的FR-4，造价低，加工方便，易与电路集成，相对介电常数 $\varepsilon_r=4.4$，损耗正切 $\tan\delta=0.05$[7]。当电磁波在空气或者其他介质中传播时，电磁波的传播速度 $V_p$ 与频率 $f$ 和波长 $\lambda$ 有关：空气中 $V_p=\lambda f$，其速度近似为光速 $c=3\times10^8$ m/s；其他介质中 $V_p=c/\sqrt{\varepsilon_r}$，$\varepsilon_r$ 为对应介质的介电常数。由于选用的基板材质为FR-4，可以计算出电磁波在该介质中的传播速度为 $1.43\times10^8$ m/s，对应波长约122 mm。

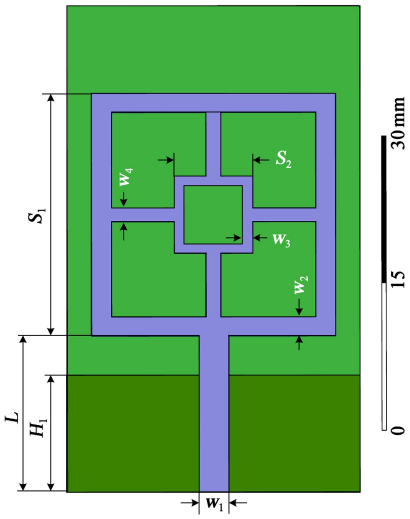



图3 微带天线的基本结构

## 2 天线辐射性能仿真

天线仿真选用Ansoft公司推出的三维电磁仿真软件HFSS（High Frequency Structure Simulator），采用版本为13.0。在终端驱动求解模式下，选取1～8 GHz进行扫频，迭代次数20，步长0.01 GHz，$S_{11}$ 参数的仿真结果如图4所示。根据仿真可知，天线可用频段为2.1～4.3 GHz[8]，该频段内出现两个谐振频率点，分别为2.5与3.76 GHz，所对应的回波损耗分别为15.86与28.4 dB，绝对带宽为2.2 GHz。根据相对带宽公式

$$BW=\frac{2(f_H-f_L)}{f_H+f_L}\times100\% \tag{1}$$

可知，该天线的相对带宽约为68%。其中，$f_H$ 和 $f_L$ 分别为天线工作频段的上、下截止频率。该天线可用频段不仅包含无线局域网WLAN频段中2.4～2.484 GHz，还可以供蓝牙（2.4～2.485 GHz）、ZigBee（2.4～2.483 5 GHz）以及全球微波互连接入WiMAX中的3.4～3.69 GHz频段使用[9]。对于

$S_{11}$ 参数中 $S_{11}\leqslant -10$ dB 的频段，应与电压驻波比（VSWR）小于等于 2 的频段相对应，如图 5 所示，通过仿真分析可知，该微带天线在电压驻波比小于 2 的频段与回波损耗仿真结果中可用频段基本一致。

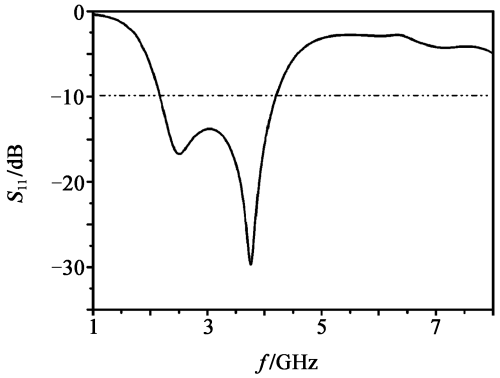



图 4　天线反射系数 $S_{11}$ 仿真结果

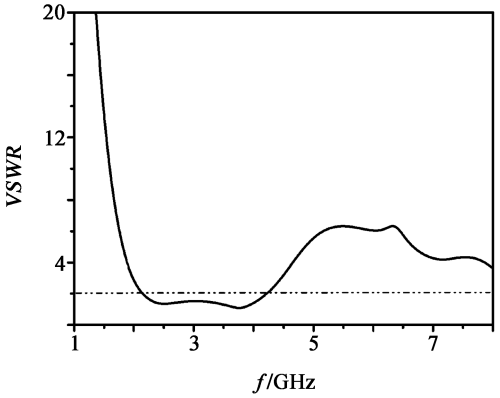



图 5　天线电压驻波比仿真结果

在射频微波频段，馈线通常使用 50 Ω 标准阻抗，这就要求所设计的天线输入阻抗最好接近 50 Ω，才能最大程度地减小电压驻波比[10]。通过仿真天线的输入阻抗，如图 6 所示，可以看出天线在中心频率 2.5 与 3.76 GHz 处的输入阻抗分别为 $(55.2-8.1j)$ Ω 与 $(53.8-j)$ Ω，基本接近纯阻性的 50 Ω。

在球坐标系中通过远场设置可以得到该天线的三维增益方向图，对于蓝牙、ZigBee 来说，实际工作的中心频率约为 2.45 GHz。因此，在该频率下仿真分析其三维增益特性，如图 7 所示，可以很直观地了解天线总体的辐射方向，最大增益为 2.52 dB。

为了进一步了解天线的辐射方向性，选取两个谐振点来仿真天线的二维平面增益，如图 8 所示。图中实线代表 $xoz$ 平面，虚线表示 $yoz$ 平面，通过分析可知天线在两个平面内的全向性都比较好，为典型的单极子天线二维增益图，未发生畸变，没有出现裂瓣[11-12]。

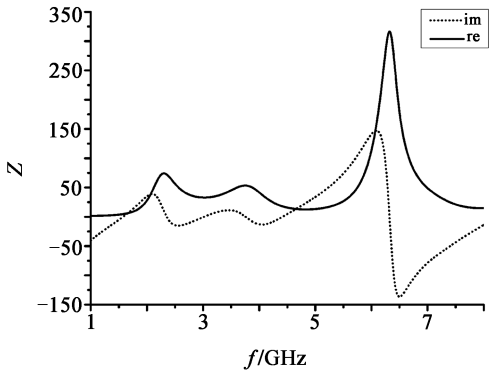



图 6　天线输入阻抗仿真结果

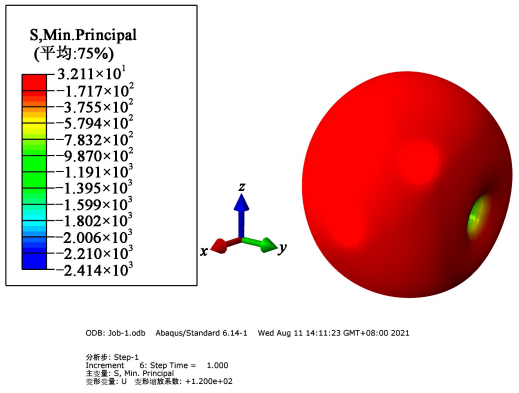
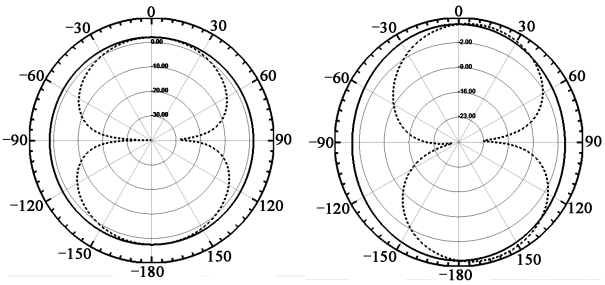



图 7　天线三维增益方向图

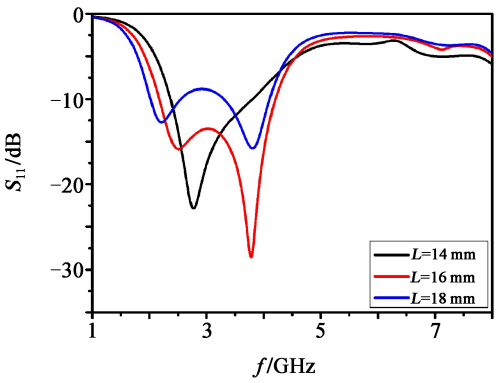



（a）　2.5 GHz　　（b）　3.76 GHz

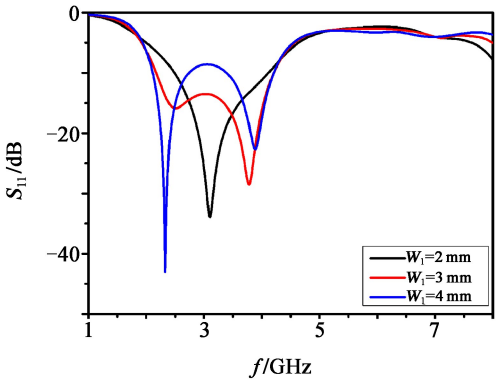
图 8　天线二维平面增益方向图

## 3　天线结构参量影响分析

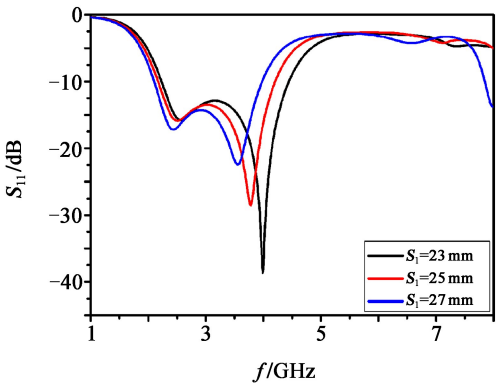
为了研究结构参量对天线带宽及回波损耗的影响，分别选取微带馈电线长度 $L$、宽度 $W_1$、外部方环边长 $S_1$ 和内部方环边长 $S_2$ 作为变量，对天线 $S_{11}$ 参数在 1～8 GHz 范围内进行仿真，如图 9 所示。由图 9(a)可见，随着 $L$ 的增加，天线谐振点增加，带宽增大，但是 $L$ 值过大又会在原来可用带宽内出现不可用频段。图 9(b)为结构参数 $W_1$ 对反射系数 $S_{11}$ 的影响，影响规律与 $L$ 相似。图 9(c)反映外部方环边长 $S_1$ 对天线带宽的影响，随着边长的增加，低频段受影响较小，高频谐振点均左移，可用带宽减小。在研究结构参数 $S_2$ 的影响时，如图 9(d)所示，



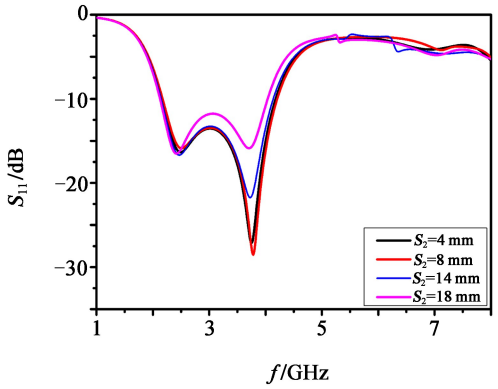

(a) 结构参数 $L$ 对反射系数 $S_{11}$ 的影响




(b) 结构参数 $W_1$ 对反射系数 $S_{11}$ 的影响




(c) 结构参数 $S_1$ 对反射系数 $S_{11}$ 的影响




(d) 结构参数 $S_2$ 对反射系数 $S_{11}$ 的影响

图 9 结构参量对天线 $S_{11}$ 参数的影响

采用插值的方法，在基板面积允许范围内，当内部方环边长越接近外部方环时，可用频段中高频部分的回波损耗会减小，带宽也会略微缩减。

## 4 天线加工及实际测量

采用电路板印制工艺，将增强材料浸以树脂，两面分别覆以铜箔，经过热压形成板状材料，通过腐蚀实现图形化，最后喷锡。利用网络分析仪 Agilent N5224A 对天线进行测试，经过开路校准、短路校准和负载校准步骤之后，对天线在 1～8 GHz 范围内进行扫频，实际测量 $S_{11}$ 参数[7]，测量结果如图 10 所示。经过多次实际测量，天线的可用频段基本保持在 2.3～4.35 GHz，虽然可能受实际加工以及实测环境的影响，与仿真结果存在一定误差，但总体来说与仿真结果保持一致。

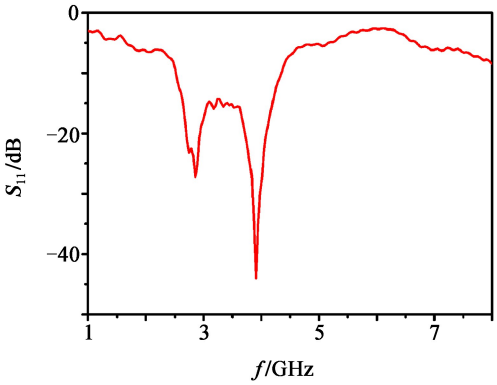



图 10 采用网络分析仪所得 $S_{11}$ 实测结果

## 5 总结

本文设计了一种回字形的宽频微带天线，通过四个长方形辐射贴片连接内外两个正方环辐射结构。通过仿真得到，其可用频段为 2.1～4.3 GHz，相对带宽为 68%，基本可用于 WLAN、蓝牙、ZigBee、WiMAX (3.4～3.69 GHz)等。天线结构采用电路板印制工艺进行图形化，实际加工尺寸为 30 mm×45 mm×1.6 mm。借助网络分析仪，实际测得该天线 $S_{11}$ 参数与仿真结果基本吻合，具备一定的宽频特性，可以实现无线通信在 2.3～4.35 GHz 频段的连续可用，具有实际应用价值。

**参考文献：**

[1] 彭木根，游思晴，胡春静，等. 无线通讯导论[M]. 北京：北京邮电大学出版社，2011：35-36.
Peng Mugen, You Siqing, Hu Chunjing, et al. Introduction to Wireless Communication[M]. Beijing: Beijing University of

Posts and Telecommunications Press，2011：35-36.

[2] 王扬智，张麟兮，韦　高. 基于 HFSS 新型宽频带微带天线仿真设计[J]. 系统仿真学报，2007，19(11)：2603-2606.
Wang Yangzhi，Zhang Linxi，Wei Gao. Simulation design of a new broadband microstrip antenna based on HFSS[J]. J. of System Simulation，2007，19(11)：2603-2606.

[3] 刘建霞，孙晓玲，席鑫鑫. 新型宽频带微带天线的设计与仿真[J]. 太原理工大学学报，2010，41(3)：248-250.
Liu Jianxia，Sun Xiaoling，Xi Xinxin. Design and simulation of a new broadband microstrip antenna[J]. J. of Taiyuan University of Technology，2010，41(3)：248-250.

[4] 邓　超. 小型_宽频带_多频段平面印刷天线的研究与设计[D]. 西安：西安电子科技大学，2010：2-3.
Deng Chao. Small_ broadband_ research and design of multi band planar printed antenna[D]. Xi'an：Xi'an University of Electronic Science and Technology，2010：2-3.

[5] 蒋　迪. 宽频带天线小型化技术研究[D]. 成都：电子科技大学，2006：1-5.
Jiang Di. Research on miniaturization technology of broadband antenna[D]. Chengdu：University of Electronic Science and Technology，2006：1-5.

[6] 张运启，王　亮，栗　曦，等. 一种新型宽频带全向天线的设计[J]. 西安电子科技大学学报，2014，41(4)：47-90.
Zhang Yunqi，Wang Liang，Li Xi，et al. Design of a new broadband omnidirectional antenna[J]. J. of Xi'an University of Electronic Science and Technology，2014，41(4)：47-90.

[7] 王二伟，丑修建. 基于 PCB 的三频高回波损耗印制单极子天线[J]. 压电与声光，2017，39(1)：149-152.
Wang Erwei，Chou Xiujian. Three frequency printed monopole antenna with high return loss based on PCB[J]. Piezoelectric and Acoustooptic，2017，39(1)：149-152.

[8] 钟顺时. 天线理论与技术[M]. 北京：电子工业出版社，2015：51-53.
Zhong Shunshi. Antenna Theory and Technology[M]. Beijing：Electronic Industry Press，2015：51-53.

[9] 朱先成，陈　明，陈　笛. 应用于 WLAN/WiMAX 的多频带印刷单极子天线[J]. 强激光与离子束，2015，27(11)：113003-1-113003-4.
Zhu Xiancheng，Chen Ming，Chen Di. Multi band printed monopole antenna for WLAN/WiMAX[J]. Intense Laser and Ion Beam，2015，27(11)：113003-1-113003-4.

[10] 李明洋，刘　敏. HFSS 天线设计[M]. 北京：电子工业出版社，2014：160-181.
Li Mingyang，Liu Min. HFSS Antenna Design[M]. Beijing：Electronic Industry Press，2014：160-181.

[11] 潘　勇，熊　江，李　潘. 一种新型宽频带多频微带天线设计[J]. 电讯技术，2015，55(4)：390-394.
Pan Yong，Xiong Jiang，Li Pan. Design of a new broadband multi band microstrip antenna[J]. Telecommunications Technology，2015，55(4)：390-394.

[12] 葛少雷，张斌珍，段俊萍，等. 小型宽频带六边形缝隙天线的设计[J]. 固体电子学研究与进展，2016，32(6)：132-135.
Ge Shaolei，Zhang Binzhen，Duan Junping，et al. Design of small broadband hexagonal slot antenna[J]. Research and Progress in Solid State Electronics，2016，32(6)：132-135.

**作者简介：**

**张　扬**(1983－)，男，辽宁省盖州市人，副教授，主要研究方向为可编程控制器的开发应用与无线通信技术。

(上接第 858 页)

[14] Zhang K，Hu C，Kang X，et al. Synthesis and thermoelectric properties of $Bi_2O_2Se$ nanosheets[J]. Materials Research Bulletin，2013，48(10)：3968-3972.

[15] Quhe R，Liu J，Wu J，et al. High-performance sub-10 nm monolayer $Bi_2O_2Se$ transistors[J]. Nanoscale，2019，11(2)：532-540.

[16] Tan C，Tang M，Wu J，et al. Wafer-scale growth of single-crystal 2D semiconductor on perovskite oxides for high-performance transistors[J]. Nano Lett.，2019，19(3)：2148-2153.

[17] Wu J，Qiu C，Fu H，et al. Low residual carrier concentration and high mobility in 2D semiconducting $Bi_2O_2Se$[J]. Nano Lett.，2019，19(1)：197-202.

[18] ChengChen M W，Wu Jinxiong，Fu Huixia，et al. Electronic structures and unusually robust bandgap in an ultrahigh-mobility layered oxide semiconductor，$Bi_2O_2Se$[J]. Sci. Adv.，2018，4(9)：eaat8355.

[19] Yin J，Tan Z，Hong H，et al. Ultrafast and highly sensitive infrared photodetectors based on two-dimensional oxyselenide crystals[J]. Nat. Commun.，2018，9(1)：3311.

[20] Ding D，Jiang Z，Ji D，et al. $Bi_2O_2Se$ as a novel co-catalyst for photocatalytic hydrogen evolution reaction[J]. Chemical Engineering J.，2020，400：125931.

[21] Li M Q，Dang L Y，Wang G G，et al. Bismuth oxychalcogenide nanosheet：Facile synthesis，characterization，and photodetector application[J]. Adv. Materials Technologies，2020，5(7)：202000180.

[22] Yang H，Chen W，Zheng X，et al. Near-infrared photoelectric properties of multilayer $Bi_2O_2Se$ nanofilms[J]. Nanoscale Res. Lett.，2019，14(1)：371.

**作者简介：**

**陈雨田**(1996－)，男，硕士生，主要从事铋基半导体材料 $Bi_2O_2Se$ 光电探测性能的研究；

**王金忠**(1970－)，男，博士，教授，博士生导师，主要从事二维Ⅵ族铋化物异质结宽波段光电探测材料方面的研究。