光子和光电子集成专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022032601

体声波谐振式日盲紫外光传感器研究

王笑怡[1,2]，林文魁[2,3]*，李海鸥[1]*，云小凡[3,4]，曾春红[2]，
陈体威[2,3]，刘义彰[2,3]，孙玉华[2]，崔　奇[2]，张宝顺[2]

（1. 桂林电子科技大学 广西精密导航技术与应用重点实验室，广西 桂林 541004；
2. 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所 纳米加工平台，江苏 苏州 215123；
3. 中国科学技术大学 纳米技术与纳米仿生学院，合肥 215123；4. 南京理工大学 材料科学与工程学院，南京 210000）

摘　要： 提出了一种并联体声波谐振器(BAWR)与 Ga_2O_3 基 MSM 紫外传感器的新型高灵敏度传感器结构，即体声波谐振式日盲紫外光传感器(BAWR-UV Sensor)。设计并制备了 MSM Ga_2O_3 紫外传感器和 BAWR 传感器，将实测的光、暗 S 参数在仿真软件中封装为 S1P 数据模型代替 MSM 等效电路，用 MBVD 模型代替 BAWR 等效电路，通过并联两种结构建立了 BAWR-UV 仿真模型；采用 ADS 软件仿真了 BAWR 核心参数对 BAWR-UV 传感器灵敏度的影响，研究了提高灵敏度的设计方案。仿真结果表明，在 0.5～4.5 GHz 频率范围内，BAWR-UV 的并联 Q 值越大，阻抗灵敏度越高，同时阻抗灵敏度随频率降低而增大，在并联谐振频率 f_p＝0.533 GHz 时获得最佳阻抗灵敏度为 100 kΩ/(μW/mm^2)；频率灵敏度随频率的升高而增大，在 f_p＝4.5 GHz 时获得最佳频率灵敏度为 1.4 MHz/(μW/mm^2)。最后，开展了高灵敏度日盲紫外传感器的探索。

关键词： 日盲紫外探测器；体声波谐振器；氧化镓；叉指传感器

中图分类号： TN23　**文章编号：** 1001－5868(2022)02－0303－08

Investigation on Bulk Acoustic Wave Resonant Solar Blind Ultraviolet Sensor

WANG Xiaoyi[1,2], LIN Wenkui[2,3], LI Haiou[1], YUN Xiaofan[3,4], ZENG Chunhong[2],
CHEN Tiwei[2,3], LIU Yizhang[2,3], SUN Yuhua[2], CUI Qi[2], ZHANG Baoshun[2]

(1. Guangxi Key Lab. of Precision Navigation Technol. and Application, Guilin University of Electronic Science and Technol., Guilin 541004, CHN; 2. Nanofabrication Platform, Suzhou Institute of Nanotechnol. and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, CHN; 3. School of Nanotechnology and Nano-Bionics, University of Science and Technol. of China, Hefei 215123, CHN; 4. School of Materials Science and Engin., Nanjing University of Science and Technol., Nanjing 210000, CHN)

Abstract: Proposed is a novel high-sensitivity sensor structure with a parallel bulk acoustic wave resonator (BAWR) and Ga_2O_3-based MSM UV sensor, namely the bulk acoustic wave resonance solar-blind UV sensor (BAWR-UV sensor). The MSM Ga_2O_3 UV sensor and BAWR sensor were designed and fabricated. The measured light and dark S parameters were packaged in the simulation software as S1P data model instead of MSM equivalent circuit, MBVD model was used instead of BAWR equivalent circuit, and the two structures were built in parallel to develop the BAWR-UV simulation model. The influence of the BAWR core parameters on the sensitivity of the BAWR-UV sensor was simulated by ADS software, and the design scheme to improve the sensitivity was studied. The simulation results show that in the frequency range of 0.5～4.5 GHz, the larger the Q_p of BAWR-UV, the higher the impedance sensitivity, and the impedance sensitivity increases with the decrease of frequency, and the optimal

收稿日期：2022－03－26.
基金项目：国家重点研发计划项目(2017YFA0305000).
* **通信作者：**林文魁；李海鸥
E-mail： wklin2007@sinano.ac.cn

impedance sensitivity is 100 kΩ/(μW/mm²) when f_p=0.533 GHz; the frequency sensitivity increases with the increase of frequency, and the best frequency sensitivity is 1.4 MHz/(μW/mm²) when f_p=4.5 GHz. And also the exploration of high-sensitivity solar-blind UV sensors was carried out.

Key words: solar blind ultraviolet detector; bulk acoustic wave resonator; gallium oxide; interdigital sensor

0 引言

紫外线根据波长的长短可分为四个波段,其中波长为 200～280 nm 的紫外线在辐射到地球的过程中被臭氧层完全吸收,在地球表面几乎不存在,故该波段被称为日盲紫外波段。工作在日盲禁区范围的传感器称为日盲紫外传感器,其具有精度高和抗干扰能力强等特点,因此被广泛应用在火箭发射、宇航和日盲紫外通信等领域[1-3]。工作在日盲波段的传感器常使用 AlGaN,BN 以及 Ga_2O_3 等宽带隙半导体材料,其中 Ga_2O_3 的禁带宽度为 4.9 eV,具有优异的光学特性和化学稳定性,是新发展起来的制备日盲紫外传感器的理想材料之一[4]。紫外传感器的器件结构通常采用 MSM 叉指结构,其工作原理可等效为两个背靠背的肖特基二极管,具有制备工艺简单、暗电流和结电容低及响应度高等优势,但该结构的灵敏度还有待提高。

在传感器领域,体声波谐振器(Bulk Acoustic Wave Resonator,BAWR)利用逆压电效应使压电层发生形变,产生谐振现象,进而实现电信号与声波信号的转化,具有体积小、工作频率高等优势。本文研究将 MSM 与谐振器件相结合,以期通过谐振现象实现对 MSM 紫外传感器灵敏度的提升。BAWR 器件压电层常采用 AlN 材料,它具有高 Q 值和物理化学性质稳定的特点,并且与 COMS 工艺相兼容[5],易于制备各种结构的谐振式传感器[6-9]。其中,谐振式光传感器是一种将光传感技术与谐振器件相结合的新型器件,这种传感器利用光致阻抗的变化转化为谐振器的谐振参数输出,从而实现对光信号的探测,目前业界已有不少相关工作报道。2009 年美国亚利桑那州立大学 Qiu 等[10]研究了 ZnO 基 FBAR 的紫外光响应特性,观测到 1.46 GHz 谐振频率的器件在 365 nm 紫外光照射下实现了 9.8 kHz 的频移。2011 年他们[11]又研究了该器件的红外特性,实现了 3 kHz/(μW/mm²)的红外灵敏度。2013 年清华大学的 Zhou 等[12]研究了 AlN 基 FBAR 的可见光响应特性,器件在 405 nm 紫外光照射下达到 1.313 MHz 的频移,并将探测机理解释为紫外光照射使 AlN 薄膜介电常数增加,导致声波在材料内部传播的声速增大,进而产生频移。2018 年重庆大学的陈聪等[13]研究了双模 AlN 基 FBAR 红外特性,在两种不同模态下得到了灵敏度为 81 kHz/(mW/mm²)和 1 069 kHz/(mW/mm²)的红外响应。目前,还未见基于谐振式日盲紫外传感器,以及相关机理研究的详细报道。

结合 BAWR 与日盲紫外传感器的优点,将两种结构进行集成,实现谐振式日盲紫外传感器,可进一步提高传统 MSM 日盲紫外器件的灵敏度。本文提出一种将 AlN BAWR 和 Ga_2O_3 MSM 叉指紫外传感器相结合的体声波谐振式紫外光传感器(BAWR-UV Sensor)结构。首先设计并制备了 MSM Ga_2O_3 叉指紫外传感器,用矢量网络分析仪和探针台表征其射频光、暗特性,将测试得到的 S 参数在仿真软件中封装为 S1P 数据模型。然后,采用 MBVD(Modified Butterworth-Van Dyke)电学等效模型代替 AlN BAWR,在 ADS 仿真软件中将其与光传感器的 S1P 数据模型并联得到 BAWR-UV 传感器等效电路,研究 BAWR 关键参数与灵敏度的关系。最后,总结并给出高性能器件的设计方案。

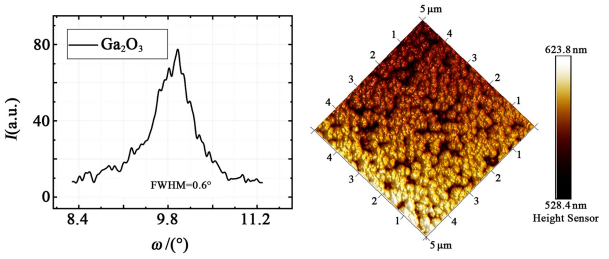
1 仿真模型构建

本文提出的 BAWR 与传统 MSM 紫外传感器结合的 BAWR-UV 新型器件结构,在电学角度体现为 MSM 等效电路与 BAWR 等效电路并联。本节主要介绍仿真模型的建立,其中 MSM 等效电路采用基于实验制备器件的实测结果,并通过 ADS 软件将测试结果转化为 S1P 数据模型;BAWR 采用该器件常见的电学模型,即 MBVD 等效电路模型,其参数通过实测器件的阻抗曲线提取得到,通过两者并联,得到 BAWR-UV 的仿真结构。

1.1 Ga_2O_3 MSM 紫外传感器模型构建

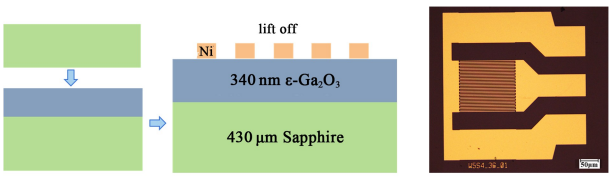
利用 TNSC MOCVD 设备在蓝宝石衬底上外延 340 nm ε-Ga_2O_3 薄膜[14-15],薄膜表面形貌由原子力显微镜(AFM)表征,得到的表面粗糙度(RMS)为

9.2 nm，同时通过高分辨 X 射线衍射仪（HR-XRD）对薄膜进行 Omega 扫描，得到 Ga_2O_3（001）晶面的半高全宽（FWHM）为 0.6°，表征结果如图 1 所示。基于光刻技术制备 MSM 叉指电极图形，通过电子束蒸发台（Ei-5z）制备 30 nm Ni/150 nm Au，用丙酮溶液剥离去除光刻胶及多余金属，制备出 MSM Ga_2O_3 叉指日盲紫外传感器。器件的工艺流程和实物如图 2 所示。为了测试器件的高频特性，采用共面波导作为馈电接口，阻值设计为射频通用的 50 Ω。



（a）　XRD Omega 曲线　　（b）　AFM 照片

图 1　Ga_2O_3 的 XRD Omega 曲线和 AFM 照片



（a）　制备流程图　　（b）　实物照片

图 2　器件制备流程图和实物照片

采用安捷伦 E5071C 网络分析仪（VNA）和 Formfactor 探针台测试器件的高频特性，测试的频率范围为 0.5～4.5 GHz，频率间隔为 $\Delta f=200$ kHz。用 VNA 测量有源/无源网络中的 S 参数。对于 n 端口网络，散射参量 S_{ij} 代表其他端口匹配负载时，i 端口测得的反射波与 j 端口入射波归一化电压的比值。本文制备的单端口 MSM 器件，S 参数与阻抗参数 Z 满足 $S=(Z-50)/(Z+50)$ 的关系，器件表征方法如图 3 所示。

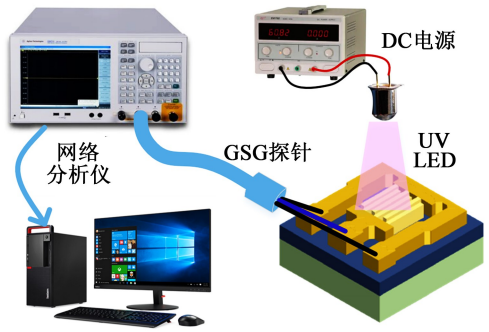
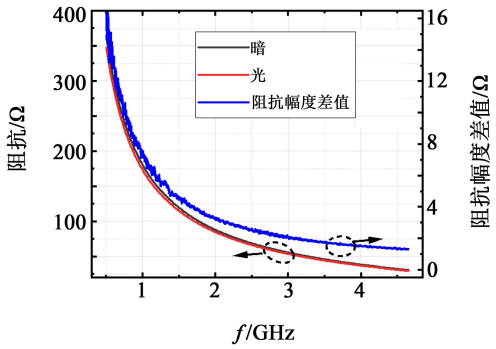
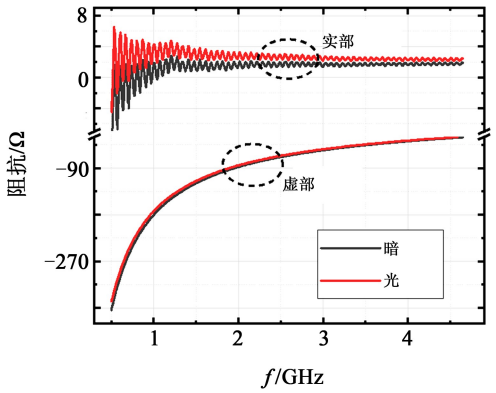


图 3　MSM 射频 S 参数表征方法

用天脉恒辉 MUV-01 紫外 LED 灯对器件施加 254 nm 的紫外光照射，光源的能量密度为 3.7 $\mu W/mm^2$，分别测试光、暗条件下的 S 参数，将测试结果在仿真软件中封装成射频 S1P 数据模型代替 MSM 等效电路，S1P 数据模型内部包含 1 端口 S 参数、Z 参数和 Y 参数的数据文件，在 ADS 中可对其直接调用，结果如图 4(a)所示。在紫外光的照射下，MSM 的阻抗幅度变小，且随频率的增加，光、暗阻抗的幅值差越小。为了进一步分析 MSM 器件的高频光响应特性，图 4(b)给出了阻抗的实部和虚部曲线。阻抗的实部代表电阻，由图可知电阻在低频部分存在较大扰动且个别频点对应电阻出现负值现象，这是由于网络分析仪校准误差导致。由图还可知 MSM 器件呈容性，光、暗条件下阻抗实部的变化远小于虚部，容抗值远大于电阻值，电阻扰动造成的阻抗幅值误差小于 2.7%，不会对后续的仿真结果造成影响。为了得到更高的频率响应，可以通过缩小 MSM 器件的叉指间距实现。接下来本文将在 MSM 器件基础上，通过并联 BAWR 器件等效电路来仿真其光、暗电学特性的变化，研究 BAWR 器件特性对 BAWR-UV 传感器灵敏度的影响。



（a）　阻抗幅值及差值

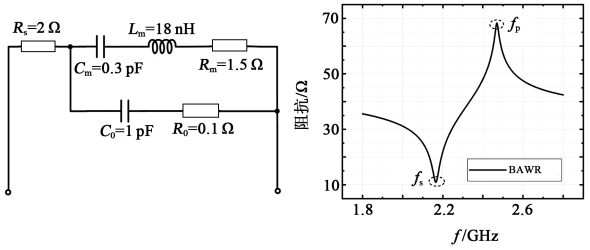


（b）　阻抗实/虚部

图 4　光暗阻抗幅值及差值和实/虚部

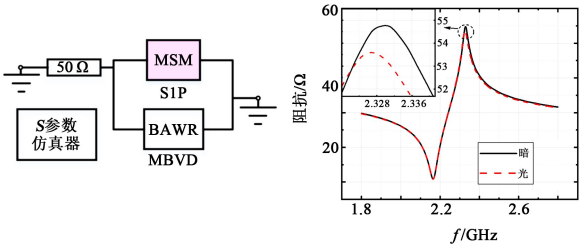
1.2 BAWR-UV 传感器模型构建

基于课题组制备的 AlN BAWR 器件，在实测曲线中通过公式[16]提取其 MBVD 初始参数，并在仿真软件中搭建成通用的 AlN BAWR 模型，如图 5(a)所示。其中，MBVD 初始参数 C_m，L_m，R_m 和 R_0 受器件的核心参数影响[17]，包括 R_s，f_s，f_p，Q_s，Q_p，C_0 和 k_t^2，分别对应 BAWR 的串联阻抗、串联谐振频率、并联谐振频率，串联点 Q 值、并联点谐振频率、静态电容和有效机电耦合系数。其中，k_t^2 可通过公式 $k_t^2=\pi^2\times(f_p-f_s)/f_p/4$ 计算得到。最终由 MBVD 模型得到器件典型的阻抗特性曲线如图 5(b)所示。将 AlN BAWR 模型和 MSM 的 S1P 数据模型并联得到 BAWR-UV 传感器模型，如图 6(a)所示。图 6(b)中给出了 BAWR-UV 传感器的阻抗特性曲线。Q_p 根据计算公式可表述为 f_p 与并联点−3 dB 带宽的比值，在图中体现为输出曲线越尖锐，Q_p 值越大。比较图 5 和图 6 可以发现，MSM 的加入导致 BAWR-UV 器件的 f_p 和 Q_p 值均远低于 BAWR，但 f_s 和 Q_s 基本保持不变。在紫外光照射下，器件的 f_p 和 Z_p 同时发生了变化，而 f_s 和 Z_s 基本保持不变。因此，接下来本文将以每单位光功率密度下器件能够产生的频率和阻抗的变化量，即光、暗并联谐振频率的变化量 Δf_p 和光、暗并联谐振点阻抗幅度的变化量 ΔZ_p 作为传感器灵敏度的探测指标，通过 ADS 软件仿真来研究 BAWR 核心参数对 BAWR-UV 传感器灵敏度的影响，仿真的频率范围和间隔与 MSM 器件测试条件保持一致。



(a) MBVD 模型 (b) 阻抗曲线

图 5 BAWR 的 MBVD 模型和阻抗特性曲线



(a) 模型 (b) 阻抗曲线

图 6 BAWR-UV 传感器的模型和阻抗特性曲线

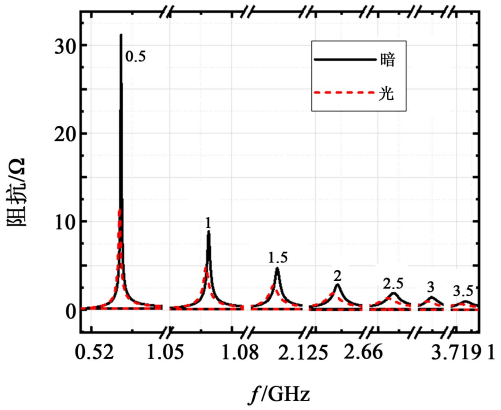
2 结果与分析

本节将分别仿真 BAWR 器件的核心参数对 BAWR-UV 器件灵敏度的影响，总结制备高灵敏度谐振式紫外传感器的设计规律。

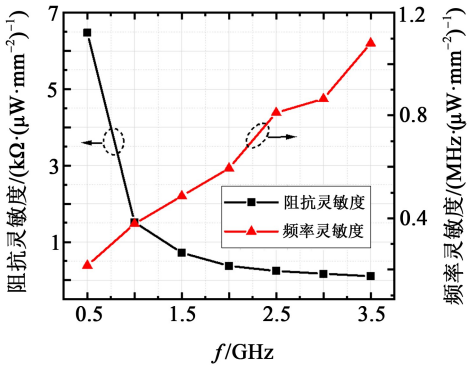
2.1 灵敏度与频率的关系

频率是 BAWR 的首要核心参数，对 BAWR-UV 器件的阻抗特性和灵敏度有重要影响。在保证 $k_t^2=20\%$，$C_0=1$ pF，$Q_s=Q_p=2\,000$ 一定的情况下，调整 f_s 数值仿真 BAWR-UV 器件的阻抗特性，分析阻抗和频率在有无紫外光照下的差异，计算器件的灵敏度，结果如图 7 所示。由 k_t^2 的定义可知，当器件的 k_t^2 和 f_s 一定时，可得到确定的 f_p。由图 7(a)可知，随着仿真频率的降低，BAWR-UV 暗态下的 Q_p 越大，越趋近于 BAWR，光、暗阻抗幅值差越大；随着仿真频率升高，BAWR-UV 光、暗情况下的频移增大，与 BAWR-UV 的 Q_p 未表现出明显的相关性。图 7(b)给出了器件阻抗和频率灵敏度，可以看出在 0.5～1 GHz 之间，阻抗灵敏度呈现急剧下降的趋势，频率在 1 GHz 以上时，阻抗灵敏度逐渐趋于平缓。将仿真结果与图 4(a)比较发现，谐振器的加入放大了 MSM 器件阻抗幅度的差值和灵敏度，并最终在仿真频率最小处得到最佳阻抗灵敏度，即 $f_s=0.5$ GHz、$f_p=0.533$ GHz 时阻抗灵敏度为 6.5 kΩ/(μW/mm²)。同时，还可以看出在仿真频率范围内，频率灵敏度与谐振频率呈现准线性增加的趋势，数值满足 $(0.28\times10^{-3})\cdot f_p$ MHz/(μW/mm²)的关系。

综上所述，提高 BAWR 器件的工作频率，有望进一步提高频率灵敏度，这是谐振式器件的特有优势。基于上述现象，后续仿真将通过降低工作频率提高阻抗灵敏度，提高工作频率和频率灵敏度。

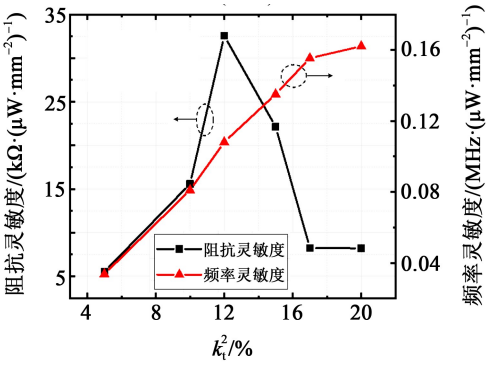


(a) 阻抗特性与频率的关系



（b）　灵敏度与频率的关系

图 7　阻抗特性和灵敏度与频率关系曲线



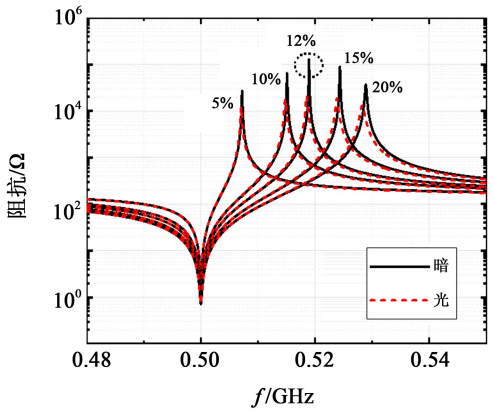
（b）　灵敏度与 k_t^2 的关系

图 8　阻抗特性和灵敏度与 k_t^2 关系

2.2　灵敏度与 k_t^2 的关系

谐振器的 k_t^2 代表器件电能与机械能的转化效率，是描述 BAWR 性能的重要参数之一[18]。由其定义可知，k_t^2 可用来描述 f_p 与 f_s 之间的差值，即带宽[19]。带宽越大，k_t^2 越大，因此仿真时可通过增大带宽来增大 k_t^2。

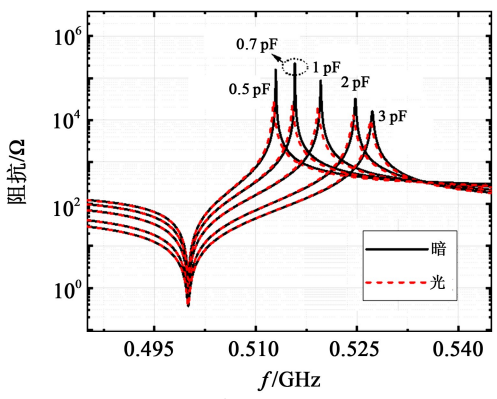
由上述仿真结果可知频率灵敏度与工作频率呈准线性关系，故后续仿真将以最佳阻抗灵敏度适用的工作频率为基准。由于 BAWR-UV 仿真的最低频率为 0.5 GHz，故选取 f_s 为 0.5 GHz，调整 f_p 的数值，使得 k_t^2 分别为 5%，10%，12%，15%和 20%。保持 $Q_s=Q_p=2\ 000$，$C_0=1$ pF 不变，仿真器件的光、暗阻抗特性随 k_t^2 的变化关系，分析器件的灵敏度，结果如图 8 所示。由图 8(a)可以看出，k_t^2 对阻抗灵敏度影响较大，并随 k_t^2 变化存在优值，此时 BAWR-UV 的 Q_p 最大，器件对微小的参数变化感应最灵敏，得到的光、暗阻抗幅值差最大。图 8(b)给出的是灵敏度与 k_t^2 的关系，可以看出当 k_t^2 为 12%时，阻抗灵敏度最高为 33 kΩ/(μW/mm²)；当保持 f_s 一定时，k_t^2 越大，使 f_p 越大，进而得到更高的频率灵敏度，符合上述仿真规律。AlN 材料的 k_t^2 约为 6.5%，并可采用 Sc 掺杂来提高 k_t^2。当 Sc 原子占比为 30%时 k_t^2 可达到 20%[20]。



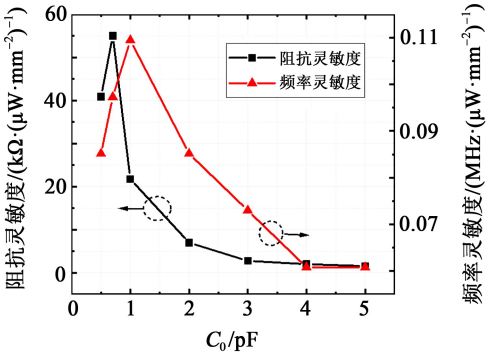
（a）　阻抗特性与 k_t^2 的关系

2.3　灵敏度与 C_0 的关系

电容是器件高频特性的主要影响因素，保持 $f_s=0.5$ GHz，$k_t^2=20\%$，$Q_s=Q_p=2\ 000$ 不变条件下，调整 C_0 来研究器件的光、暗特性，结果如图 9 所示。图 9(a)中，C_0 也会对 Q_p 造成影响，在 C_0 为 0.7 pF 附近时，Q_p 和阻抗幅度变化量出现最大值；图 9(b)示出为灵敏度与 C_0 的关系，阻抗灵敏度的最大值为 55 kΩ/(μW/mm²)，位于 0.7 pF 处；频率灵敏度的最大值为 0.11 MHz/(μW/mm²)，位于 1 pF 处。MSM 结构的等效电容通过计算约为 0.9 pF，灵敏度最大值在其附近出现。由仿真结果可知，高阻抗灵敏度需保证 C_0 的数值能够使 BAWR-UV 传感器获得高 Q_p 值，从而能够更好地保持 BAWR 的 Q 值，MSM 对 BAWR 阻抗特性的影响较小；当 C_0 与外置 MSM 的等效电容值相接近时，获得较高的频率灵敏度，MSM 电容的微小变化也能产生较大的频率偏移。BAWR 的静态电容 $C_0=\varepsilon s/d$，可针对 MSM 的需求对器件结构尺寸进行设计。



（a）　阻抗特性与 C_0 的关系

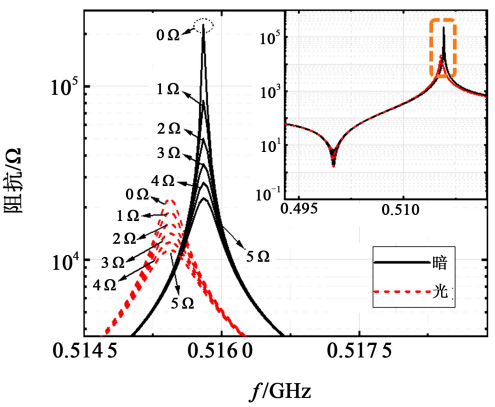


(b) 灵敏度与 C_0 的关系

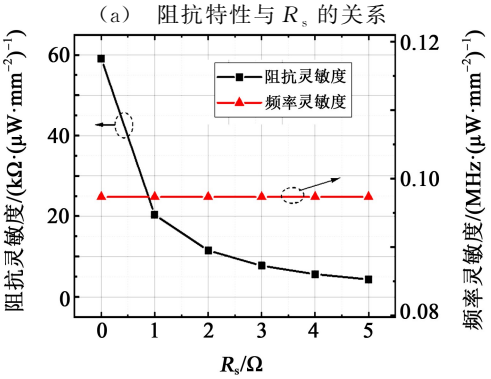
图 9 阻抗特性和灵敏度与 C_0 关系曲线

2.4 灵敏度与 R_s 的关系

从 BAWR 的电学阻抗公式 $Z=R_s+(1+s\tau_p)(s^2+s\omega_s/Q_s+\omega_s^2)/sC_0(s^2+s\omega_p/Q_p+\omega_p^2)$ 可知，R_s 是影响器件阻抗的重要因素[21]。在 $f_s=0.5$ GHz，$k_t^2=12\%$，$C_0=0.7$ pF，$Q_s=Q_p=2\,000$ 时，调整 R_s 的数值，分析其对器件灵敏度的影响，结果如图 10 所示。从仿真曲线中可以看出 R_s 影响器件的阻抗幅值，但不影响器件的频率特性。R_s 越小，器件的 Q_p 越大，具有更高的阻抗灵敏度。R_s 在 MBVD 中代表器件电极的欧姆接触与引线损耗，可以通过增加电极层厚度或缩短导线长度来降低。



(a) 阻抗特性与 R_s 的关系

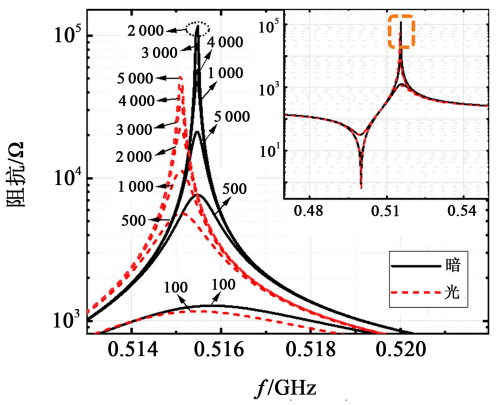


(b) 灵敏度与 R_s 的关系

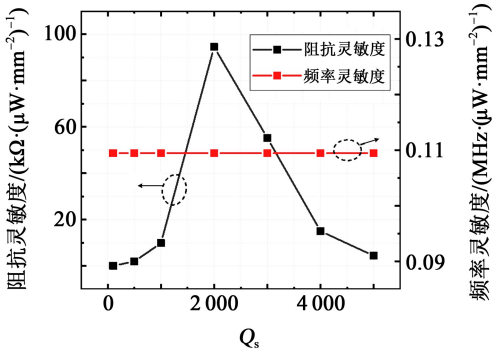
图 10 阻抗特性和灵敏度与 R_s 关系曲线

2.5 灵敏度与 Q 的关系

品质因数 Q 值是能量损耗的度量，定义为每个周期内储能与损耗之比，是表征谐振器性能的重要参数之一[22]。Q 值对器件的灵敏度和其他性能均产生很大影响。在接入 MSM 后，BAWR-UV 器件的 Q 值较 BAWR 衰减很大，阻抗灵敏度也因此降低。从灵敏度与 k_t^2 的关系可知，在合适的 k_t^2 条件下，调整 BAWR 的 Q 值有望获得最佳的 BAWR-UV 传感器的 Q 值，进而达到最佳阻抗灵敏度。在 $f_s=0.5$ GHz，$k_t^2=12\%$，$R_0=0\ \Omega$，$C_0=0.7$ pF，$Q_p=2\,000$ 条件下，Q_s 对灵敏度的影响如图 11 所示，从图 11(b)可知，随着 Q_s 值的增加，阻抗灵敏度增大，在 $Q_s=2\,000$ 处得到最优值，之后随着 Q_s 继续增大，阻抗灵敏度呈现下降趋势。保持其他条件不变，设置 $Q_s=2\,000$，继续仿真 Q_p 值对器件灵敏度的影响，结果如图 12 所示。由图 12(b)可知，器件的阻抗灵敏度随着 Q_p 值的增大而增大，并在 $Q_p=4\,000$ 处逐渐趋于饱和。由图 11(a)和 12(a)可知，二者的最优阻抗灵敏度均出现在 BAWR-UV 器件的 Q_p 值最大处。同时还可以发现，Q 值不影响器件的频率灵敏度。

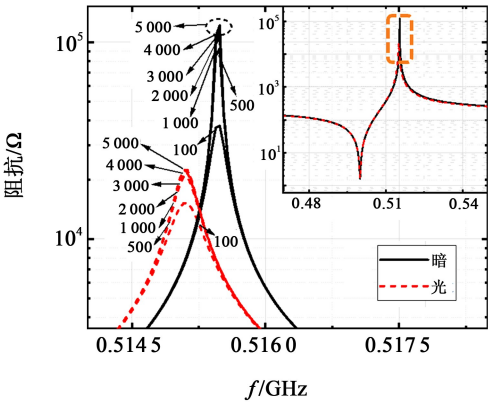


(a) 阻抗特性与 Q_s 的关系

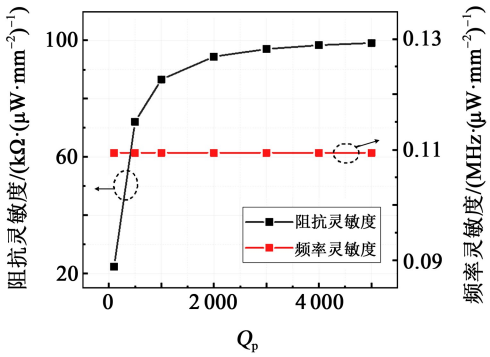


(b) 灵敏度与 Q_s 的关系

图 11 阻抗特性和灵敏度与 Q_s 关系曲线



（a）　阻抗特性与 Q_p 的关系



（b）　灵敏度与 Q_p 的关系

图 12　阻抗特性和灵敏度与 Q_p 关系曲线

综合以上优化参数可以得到 BAWR-UV 器件的最佳灵敏度。当 BAWR 的 $k_t^2=12\%$，$R_s=0$，$C_0=0.7$ pF，$f_s=0.5$ GHz，$f_p=0.533$ GHz，$Q_s=2\,000$，$Q_p=5\,000$ 时，器件获得了最佳阻抗灵敏度为 100 kΩ/(μW/mm²)，器件的阻抗变化较 MSM 提升了约 5 139 倍，此时对应的频率灵敏度为 0.1 MHz/(μW/mm²)；当 BAWR 的 k_t^2 为 20%，R_s 为 0 Ω，静态电容与 MSM 等效电容数值相近时，器件能获得最佳的频率灵敏度，满足 $(0.307\times10^{-3})\cdot f_p$，即当仿真频率 f_p 取最大值为 4.5 GHz 时，频率灵敏度可以达到 1.4 MHz/(μW/mm²)。

综合上述结果可以发现，提高 BAWR-UV 的 Q_p 值是提高器件阻抗灵敏度的关键。BAWR-UV 器件因 MSM 结构的存在，使得原本 BAWR 器件的 Q 值大幅降低。当采用阻抗幅值变化作为探测机理时，器件设计的重点在于调整 BAWR 器件的关键参数，使 MSM 和 BAWR 器件处于匹配状态，即在无紫外光照情况下具有高 Q_p 值。上述研究还表明，BAWR 的关键参数均对 BAWR-UV 有重要的影响，其中 k_t^2 和工作频率的影响最大。当器件工作于较低频率时，可获得更高的阻抗灵敏度；当器件工作于较高频率时，可获得更高的频率灵敏度。

在器件实际的制备过程中，可通过增加 BAWR 压电振荡堆厚度使器件具有较低的工作频率，有助于提高阻抗灵敏度；反之，降低振荡堆厚度，使器件具有较高的工作频率，有助于提高器件的频率灵敏度。实际应用过程中可通过 VNA 表征器件的阻抗特性，观察光、暗条件下 f_p 和 Z_p 的变化。利用光功率计测试得到紫外光功率密度，然后将得到的光、暗条件下的 Δf_p 与 ΔZ_p 分别除以紫外光功率密度，即可得到频率灵敏度与阻抗灵敏度。BAWR 器件的最佳工作频段为 1.5～6 GHz，更加适用基于频率读出的方式进行紫外传感。此外，采用频率探测还可以降低对 BAWR-UV 传感器 Q_p 值的要求，有利于提高 BAWR-UV 器件的综合性能。

3　结论

本文提出了一种体声波谐振式 Ga_2O_3 日盲紫外光探测器结构，通过实验和仿真相结合的方式研究了提高 Ga_2O_3 基 BAWR-UV 传感器性能的影响因素。在 Ga_2O_3 MSM 传感器测试得到的射频光、暗 S 参数的基础上，通过仿真研究了 BAWR-UV 传感器灵敏度的提升方法。BAWR-UV 传感器在紫外光照射下通过阻抗幅值与频率两种方式进行读出，结果显示，调整 BAWR 的静态电容使其接近 MSM 的等效电容值、降低 BAWR 器件的工作频率，以及适当调整有效机电耦合系数、串联点 Q 值和并联点 Q 值使两种结构保持匹配状态均能有效提高 BAWR-UV 传感器的并联点 Q 值，进而提高器件的阻抗灵敏度。当 BAWR 的静态电容与 MSM 的等效电容值相匹配时，增大并联频率可以得到最优的频率灵敏度，且频移与谐振频率成准线性关系。最后，通过优化 BAWR 的核心参数，使 BAWR-UV 传感器可以实现 5 个量级的阻抗变化和 6 个量级的频率变化。本文所得 BAWR-UV 日盲紫外传感器的设计规律，对设计抗干扰的高灵敏度紫外光传感器具有指导意义。

参考文献：

[1] Razeghi M. Short-wavelength solar-blind detectors-status, prospects, and markets[J]. Proc. of the IEEE, 2002, 90(6): 1006-1014.

[2] 周长祺. 非晶态 Ga_2O_3 薄膜及其日盲紫外探测器的制备和特性研究[D]. 长春：中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，2020.

Zhou Changqi. Preparation and characterization of amorphous Ga_2O_3 thin films and their solar-blind UV detectors[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020.

[3] 张军琴. 宽禁带半导体 MSM 结构紫外探测器的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
Zhang Junqin. Research on UV detector with wide bandgap semiconductor MSM structure[D]. Xi'an: Xidian University, 2009.

[4] 黄 璐. Ga_2O_3 基日盲紫外探测器特性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
Huang Lu. Study on the characteristics of Ga_2O_3 based solar-blind UV detectors[D]. Xi'an: Xidian University, 2018.

[5] Fei C, Liu X, Zhu B, et al. AlN piezoelectric thin films for energy harvesting and acoustic devices[J]. Nano Energy, 2018, 51: 146-161.

[6] Yun X F, Lin W K, Hu R, et al. Biaxial film bulk acoustic resonator magnetic sensor based on the $Fe_{80}Ga_{20}$ anisotropic ΔE effect[J]. J. of Phys. D: Appl. Phys., 2021, 55(13): 135002.

[7] Yun X F, Lin W K, Wang X Y, et al. Dual-mode temperature and magnetic sensor based on FBAR[C]// Proc. of IEEE 2020 15th Symp. on Piezoelectrcity, Acoustic Waves and Device Applications (SPAWDA), 2021: 248-252.

[8] Yun X F, Lin W K, Wang X Y, et al. FBAR magnetic sensor composed of CMOS compatible materials[C]// Proc. of IEEE 2021 5th Electron Devices Technol. & Manufacturing Conf. (EDTM), 2021: 1-3.

[9] Lin W K, Yun X F, Wang X Y, et al. Super-high sensitivity FBAR temperature sensor based on size effect of Ti insertion layer[J]. Materials Research Express, 2021, 8(9): 095701.

[10] Qiu X, Zhu J, Oiler J, et al. Film bulk acoustic-wave resonator based ultraviolet sensor[J]. Appl. Phys. Lett., 2009, 94(15): 151917.

[11] Wang Z, Qiu X, Chen S J, et al. ZnO based film bulk acoustic resonator as infrared sensor[J]. Thin Solid Films, 2011, 519(18): 6144-6147.

[12] Zhou C J, Yang Y, Shu Y, et al. Visible-light photoresponse of AlN-based film bulk acoustic wave resonator[J]. Appl. Phys. Lett., 2013, 102(19): 191914.

[13] 陈 聪. 氮化铝薄膜体声波谐振器 FBAR 的电场与红外频率调制特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
Chen Cong. Study on the electric field and infrared frequency modulation characteristics of aluminum nitride thin film bulk acoustic wave resonator FBAR[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.

[14] Hsu Y H, Wu W Y, Lin K L, et al. ε-Ga_2O_3 grown on *c*-plane sapphire by MOCVD with a multistep growth process [J]. Crystal Growth & Design, 2022, 22(3): 1837-1845.

[15] Chen T W, Zhang X D, Ma Y J, et al. Self-powered and spectrally distinctive nanoporous Ga_2O_3/GaN epitaxial heterojunction UV photodetectors[J]. Adv. Photonics Research, 2021, 2(8): 2100049.

[16] 黄裕霖. 射频微机电等效模型提取及应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
Huang Yulin. Research on the extraction and application of RF MEMS equivalent model[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.

[17] Larson J D, Bradley P D, Wartenberg S, et al. Modified Butterworth-Van Dyke circuit for FBAR resonators and automated measurement system[C]// 2000 IEEE Ultrasonics Symposium, 2000: 863-868.

[18] Lanz R, Muralt P. Bandpass filters for 8 GHz using solidly mounted bulk acoustic wave resonators[C]// IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2005: 938-948.

[19] 赵佳豪. 基于氮化铝的可调谐薄膜体声波谐振器研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2020.
Zhao Jiahao. Research on tunable thin film bulk acoustic resonator based on aluminum nitride[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2020.

[20] Zhou J, Liu Y, Xu Q W, et al. ScAlN/AlN film-based Lamé mode resonator with high effective electromechanical coupling coefficient[J]. J. of Microelectromechanical Systems, 2021, 30(5): 677-679.

[21] Uzunov I S, Terzieva M D, Nikolova B M, et al. Extraction of modified Butterworth-Van Dyke model of FBAR based on FEM analysis[C]// Proc. of 2017 XXVI Inter. Scientific Conf. Electronics (ET), 2017: 1-4.

[22] Ashraf N, Mesbah Y, Emad A, et al. Enabling the 5 G modelling and design of high *Q* film bulk acoustic wave resonator(FBAR) for high frequency applications[C]// Proc. of 2020 IEEE Inter. Symp. on Circuits and Systems (ISCAS), 2020: 1-4.

作者简介:

王笑怡(1996—),女,吉林省双辽市人,硕士研究生,主要研究方向为体声波谐振器件;

林文魁(1984—),男,福建省泉州市人,硕士,高级工程师,目前主要从事压电声波器件研发工作;

李海鸥(1974—),男,湖南省娄底市人,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为射频微波器件和新型器件。