

# 激光与光电子学进展

## 具有 3~5 $\mu\text{m}$ 宽带光吸收特性的超导纳米线单光子探测器设计

赵雨辰, 赵博洋, 郑家欢, 原艳宁, 席晓莉\*

西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

**摘要** 与成熟的近红外波段设计相比, 3~5  $\mu\text{m}$  波长范围内较低的光子能量对于超导纳米线单光子探测器 (SNSPD) 宽带光吸收特性设计提出了更高的要求。为此, 提出了一种中红外波段 SNSPD 宽带光吸收特性设计方法。以加载  $\text{SiO}_2/\text{Au}$  反射腔的超窄纳米线结构 SNSPD 为例, 在通过优化上下腔 3 层介质层厚度实现 2 个目标波长处阻抗匹配的基础上, 引入介质层总厚度与谐振波长之比作为评价每个谐振波长处带宽特性的指标, 更好地取得了阻抗匹配精度与带宽特性之间的平衡, 从而达到了双宽带耦合谐振以拓展总体吸收带宽的目的。数值结果表明, 所提 SNSPD 在 2928~4856 nm 波长范围内对电场分量平行于纳米线的入射光能够吸收至少 50%。

**关键词** 探测器; 超导纳米线单光子探测器; 宽带光吸收; 中红外; 3~5  $\mu\text{m}$

中图分类号 TN215

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0104001

### Design of Superconducting Nanowire Single-Photon Detector with Broadband Light Absorption Characteristics in 3-5 $\mu\text{m}$

Zhao Yuchen, Zhao Boyang, Zheng Jiahuan, Yuan Yanning, Xi Xiaoli\*

College of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology,  
Xi'an, Shanxi 710048, China

**Abstract** Compared with the mature design in near-infrared band, the lower photon energy in the 3-5  $\mu\text{m}$  wavelength range puts forward higher requirements for the design of broadband optical absorption characteristics of superconducting nanowire single-photon detector (SNSPD). Therefore, a design method of broadband optical absorption characteristics of SNSPD in mid infrared band is proposed. Taking the ultra narrow nanowire structure SNSPD loaded with  $\text{SiO}_2/\text{Au}$  reflective cavity as an example, on the basis of realizing impedance matching at two target wavelengths by optimizing the thickness of three dielectric layers in the upper and lower cavities, the ratio of total dielectric layer thickness to resonant wavelength is introduced as an index to evaluate the bandwidth characteristics at each resonant wavelength, so as to better achieve the balance between impedance matching accuracy and bandwidth characteristics, thus, the purpose of double broadband coupling resonance to expand the overall absorption bandwidth is achieved. The numerical results show that the proposed SNSPD can absorb at least 50% of the incident light whose electric field component is parallel to the nanowires in the wavelength range of 2928-4856 nm.

**Key words** detectors; superconducting nanowire single-photon detector; broadband light absorption; mid-infrared; 3-5  $\mu\text{m}$

收稿日期: 2021-02-02; 修回日期: 2021-04-27; 录用日期: 2021-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(61971346)、西安理工大学科研基金(103-451319009, 103-451420002)

通信作者: \*xixiaoli@xaut.edu.cn

# 1 引言

单光子探测器 (SPD) 作为一种非常灵敏的光子记录装置, 为光学量子信息、激光测距等系统提供了重要的技术支撑<sup>[1-2]</sup>。与传统的半导体 SPD 相比, 超导纳米线单光子探测器 (SNSPD) 因探测效率高、暗计数低、时间抖动低和响应速度快等优点受到了越来越多的关注<sup>[3-5]</sup>。

自从 2001 年工作在 0.81 μm 波长的 SNSPD 被发明以来, 研究人员就一直致力于从材料、结构等多方面对其进行优化以得到更高的器件性能。得益于这些研究, SNSPD 在近红外波段的量子效率已经能够接近于 1。但在中红外波段, 由于单个光子能量的降低, 现有 SNSPD 的探测效率受到了很大挑战<sup>[6]</sup>。为此, Korneeva 等<sup>[7]</sup>采用线宽约为 50 nm 的超窄氮化铌 (NbN) 纳米线结构来应对光子能量的降低。而后, 这种方法得到了进一步的发展和应用, 如能够探测 0.5~5 μm 波长范围光子的 30 nm 线宽 SNSPD<sup>[8]</sup>, 工作在 2.3 μm 波长的 60 nm 线宽 SNSPD<sup>[9]</sup>等。但相比于在近红外波段取得的成功, 如何进一步提高中红外波段的量子效率与灵敏度仍然是制约 SNSPD 发展与应用的重要问题。

在近红外波段, 纳米天线<sup>[10-11]</sup>、抗反射层与光学腔<sup>[12]</sup>、光子晶体<sup>[13]</sup>等结构都被用来提高对入射光子能量的吸收能力。同时, 诸如基于非周期多层介质结构 (DML) 的吸收带宽<sup>[14]</sup>、偏振不敏感<sup>[15-16]</sup>和多波段<sup>[17]</sup>等其他重要特性也得到了广泛研究。而在中红外波段, 尽管有背腔式 SNSPD 与一维金光栅的集成设计<sup>[18]</sup>等工作, 但总的来说, 用相对简单的器件结构来达到宽带高吸收、极化不敏感等特性仍然

是一个有待进一步研究的问题, 特别是对于 3~5 μm 或者 8~12 μm 此类具有重要用途的波段。

为此, 本文以加载 SiO<sub>2</sub>/Au 反射腔的超窄 NbN 线宽的 SNSPD 为对象, 提出了一种基于双谐振点耦合的 3~5 μm 宽带光吸收特性设计方法。在匹配 2 个谐振波长处阻抗的基础上, 通过器件介质层厚度与谐振波长之比来评估每个谐振波长的宽带特性, 从而更好地促进不同谐振点之间的耦合, 以得到具有宽带光吸收特性同时结构相对简单的 SNSPD 设计。结果表明, 所提 SNSPD 上下半腔仅需 3 层介质层, 而通过优化这 3 层介质层的厚度即可在 2928~4856 nm 波长范围内对电场分量平行于纳米线的入射光实现 50% 的吸收。所提方法为 SNSPD 在中红外波段的宽带光吸收特性设计提供了一种可借鉴的思路。

## 2 基本原理

### 2.1 模型与方法

具有上下腔结构的 SNSPD 及等效传输线模型如图 1 所示。上半腔由 Si/SiO<sub>2</sub> 双层介质组成, 下半腔为一层 SiO<sub>2</sub> 和 Au 反射镜构成的光学腔结构。纳米线层由 NbN 和作为填充的 SiO<sub>2</sub> 组成。从上至下每一层介质层的厚度、折射率和特性阻抗分别记为  $d_p, n_p$  和  $Z_p, p=1, 2, 3, 4$ 。对于呈现周期结构的纳米线层, 折射率  $n_3$  可由等效媒质理论得到。

$$n_3^2 = gn_{\text{NbN}}^2 + (1-g)n_{\text{SiO}_2}^2, \quad (1)$$

式中;  $n_{\text{NbN}}$  和  $n_{\text{SiO}_2}$  分别是 NbN 和 SiO<sub>2</sub> 的折射率;  $g$  是 NbN 纳米线的占空比。入射光垂直入射到器件上半腔的上表面。

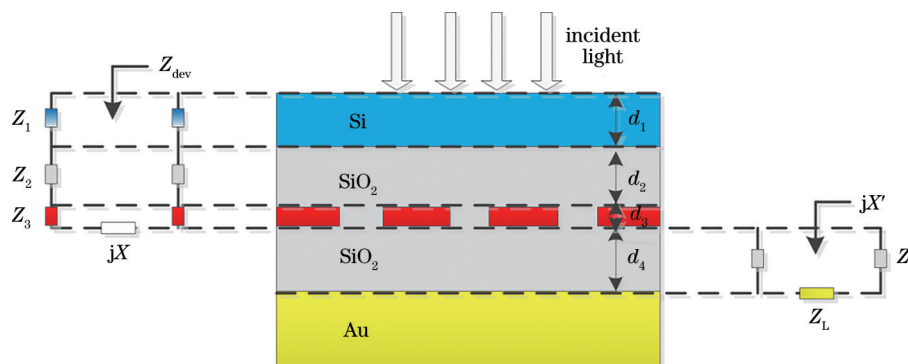


图 1 SNSPD 及其等效传输线模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SNSPD and its equivalent transmission line model

采用一种基于双谐振点耦合的设计方法, 通过优化上下半腔仅有的 3 层介质层厚度来实现

3~5 μm 宽带光吸收特性。该方法有 3 个步骤: 1) 匹配谐振点处器件表面输入阻抗  $Z_{\text{dev}}$  与自由空间波阻

抗 377  $\Omega$ ; 2) 评估每个谐振点处的宽带特性以更好地促进不同谐振点之间的耦合; 3) 设定综合考虑阻抗匹配与带宽特性的目标函数以达到最优的设计结果。

$$F_1 \left[ d_1, d_2, jX(\lambda_q) \Big|_{q=1,2} \right] = \text{Min} \left[ \sum_{q=1}^2 \left| Z_{\text{dev}}(\lambda_q) / 377 - 1 \right| \right], \quad (2)$$

式中:  $jX$  表示下半腔的期望输入阻抗;  $F_1$  是步骤 1 过程中的数学函数表达式的记号。然后优化下半腔的一层  $\text{SiO}_2$  的厚度, 以满足

$$F_2(d_4) = \text{Min} \left[ \sum_{q=1}^2 \left| jX'(\lambda_q) - jX(\lambda_q) \right| \right], \quad (3)$$

式中:  $jX'$  表示下半腔的实际输入阻抗。需要指出的是, 在(2)、(3)式的计算过程中, 所有阻抗均对 377  $\Omega$  取归一化。

对于步骤 2), 由于文献[17]中缺乏相应的方法, 需要引入额外的指标来评价谐振波长处的带宽特性。通过推导可知, 器件厚度的增加会导致相邻谐振点间距的缩短和单个谐振点带宽的减小, 因此以优化对象 3 层介质层的总厚度与谐振波长之比作为指标来评估每个谐振波长处的宽带特性。该指标越小说明带宽越宽, 表达式为

$$s_q = \sum_{p=1,2,4} \left( n_p d_p / \lambda_q \right). \quad (4)$$

对于步骤 3), 最佳阻抗匹配和最佳带宽特性对应的 3 层介质层厚度往往并不一致, 因而需要设定合适的目标函数以达到最优的设计结果。目标函数的表达式为

$$F_3(d_1, d_2, d_4) = \text{Min} \left\{ \sum_{q=1}^2 s_q \right\}, F_1 < \Gamma_0, \quad (5)$$

式中:  $\Gamma_0$  为预设的上半腔匹配阈值。只有当上半腔的输入阻抗与自由空间阻抗之间的误差小于该阈值时, 才进一步优化下半腔介质层厚度并评估带宽特性, 以确定最终设计结果。

## 2.2 光吸收特性计算

完成器件结构优化后, 采用文献[19]中的传递矩阵法(TMM)对宽带光吸收特性进行计算。唯一需要注意的是, 对于加载  $\text{SiO}_2/\text{Au}$  反射腔的 SNSPD 来说, 总的光吸收来源于两个部分: NbN 纳米线的吸收和 Au 反射镜的吸收, 而前者才是对实现光探测真正有用的。NbN 纳米线的介电损耗可由等效折射率得到。

$$Q = \frac{1}{2} \omega \text{Im}(n_3^2) |\mathbf{E}|^2, \quad (6)$$

对于步骤 1), 可参考文献[17], 通过建立如图 1 所示的 SNSPD 等效传输线模型来完成。即在期望的两个谐振波长处, 即  $\lambda_q, q=1, 2$ , 首先通过优化上半腔  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  双层介质各自的厚度, 以满足

式中:  $\omega$  和  $\mathbf{E}$  分别是入射光的角频率和在纳米线层的电场;  $\text{Im}(n_3^2)$  为纳米线层等效折射率的虚部。

## 3 结果与讨论

NbN 纳米线的厚度、宽度、占空比分别设为 4 nm、30 nm、1/3, 其中红外波段的折射率取自文献[20]。Si 和  $\text{SiO}_2$  折射率分别设为 3.478 和 1.444, 待优化的介质层厚度  $d_1, d_2, d_4$  的优化范围分别设为 0~700 nm、0~1500 nm、0~5000 nm。期望的 2 个谐振波长分别设为 3134 nm 和 4418 nm, 阻抗匹配阈值  $\Gamma_0 = 0.42$ ,  $X$  的取值范围设为  $[-40, 40]$ 。计算得到的上半腔匹配误差及经过下半腔优化后的最佳带宽设计在所有满足上半腔匹配要求结果中的相对位置如图 2 所示。

从图 2(a) 中可以看出, 在期望的 2 个谐振波长处, 阻抗匹配较好的区域都近似为一个椭圆环, 且都随着上半腔 Si 层和  $\text{SiO}_2$  层的厚度变化呈现出周期性分布, 对应的谐振波长越长该椭圆环的尺寸越大。这种现象可以由传输线理论进行解释, 在谐振波长  $\lambda_q$  处探测器上半腔从上至下每一层介质层的输入阻抗  $\eta_p$  的表达式为

$$\eta_p = Z_p \frac{\eta_{p+1} + jZ_p \tan \left( 2\pi n_p d_p / \lambda_q \right)}{\eta Z_p + j\eta_{p+1} \tan \left( 2\pi n_p d_p / \lambda_q \right)}. \quad (7)$$

从(7)式中可以看出: 一方面, 由于  $\tan$  函数自身周期性, 输入阻抗随介质层厚度呈现出周期性变化; 另一方面, 随着谐振波长的增加,  $\tan$  函数遍历一个周期所对应的介质层厚度也会增加, 同时相对于较小的波长, 更大的介质层厚度才能保证其与谐振波长的比值, 即介质层的电尺寸保持不变。而对于 2 个不同的谐振波长来说, 最佳的匹配区域就是两个椭圆环的相交区域。根据  $\Gamma_0 = 0.42$  的上半腔匹配误差要求, 将所有满足要求的设计结果按从小到大的顺序排列, 即可得到图 2(b) 中的误差曲线。上半腔匹配误差最小的设计结果编号记为 1 号, 误差

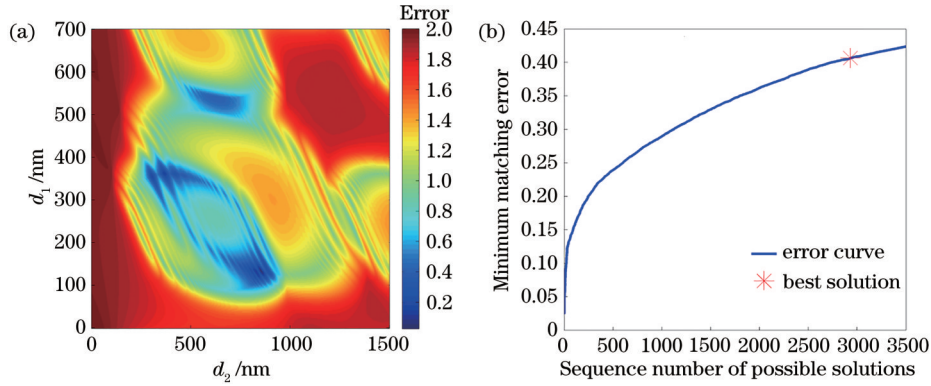


图 2 上半腔计算结果: (a)匹配误差; (b)最优设计的相对位置

Fig. 2 Calculation results of upper half cavity: (a) Matching error; (b) relative position of best solution

为 0.024。但经过下半腔介质层厚度优化并评估所有设计结果的带宽特性后,上半腔匹配误差为 0.406 的第 2931 号设计具有最小的带宽指标,大小为 1.99,而第 1 号设计的则为 2.82。造成这种现象的原因主要是下半腔介质层厚度的差异。具体来说,为了满足(3)式的要求,前者的下半腔 SiO<sub>2</sub> 层厚度  $d_4$  达到了 2389 nm,后者则仅为 603 nm。更直观的对比如表 1 和图 3 所示。

表 1 代表性设计的介质层厚度与带宽指标比较

Table 1 Comparison of dielectric-layer thicknesses and bandwidth indicators between representative solutions

Solution No.	$d_1$ /nm	$d_2$ /nm	$d_4$ /nm	$s_1$ @3134 nm	$s_2$ @4418 nm
1	132	856	2389	1.64	1.18
2931	534	624	603	1.16	0.83

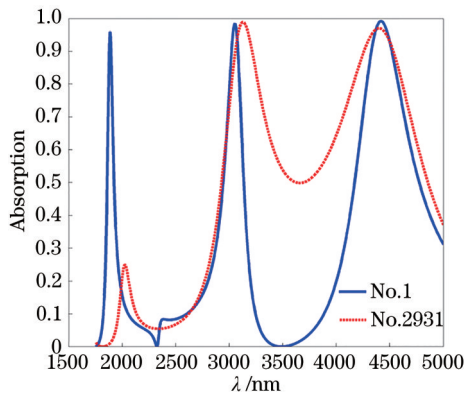


图 3 代表性设计的吸收曲线对比

Fig. 3 Comparison of absorption curves between representative solutions

表 1 对比了 2 个代表性设计结果的介质层厚度与带宽指标,图 3 对比了两者的吸收曲线。从表 1 中可以看出,第 1 号设计的 3 层介质总厚度为 3377 nm,大大超过了第 2931 号设计的 1761 nm,这

是造成第 1 号设计谐振波长处带宽明显下降的主要原因,也说明对于 3~5 μm 的宽带光吸收设计来说,在谐振点的阻抗匹配误差和带宽特性之间取得平衡才能更好地达到设计目的。而从图 3 中可以进一步看出:对于第 1 号设计,由于每个谐振波长处带宽较小,2 个不同的谐振波长处的光吸收特性难以有效耦合,显著影响了器件在 3~5 μm 范围内的整体带宽;相反,由于每个谐振波长处的带宽都较宽,第 2931 号设计在两者之间实现了有效耦合,展宽了光吸收的带宽,实现了在 2928~4856 nm 波长范围吸收率大于 50%。

为了更好地说明在匹配误差与带宽特性之间取得平衡的重要性,图 4 进一步给出了满足上半腔匹配误差要求的所有设计结果对应的下半腔匹配误差和 2 个谐振波长处带宽指标之和的变化曲线,并标注出了第 1 号和第 2931 号设计在其中的位置。从图 4(a)中可以看出,和上半腔匹配误差一样,第 1 号设计的下半腔匹配精度同样要高于第 2931 号设计,因此如果仅仅以匹配精度来衡量所有可能的设计结果,那必然很难选择出带宽真正满足需求的设计结果。从图 4(b)中可以看出,第 1 号设计的宽带特性指标明显大于第 2931 号设计。再结合表 1 中的数据可知,第 2931 号设计的每一个谐振波长处的带宽都优于具有更高匹配精度的第 1 号设计,而这无疑将有利于利用 2 个谐振波长之间的耦合来进一步展宽器件整体的吸收带宽。

图 5 对比了 TMM 计算结果和时域有限差分法(FDTD)的仿真结果,其中 FDTD 的结果包括了入射光场垂直于和平行于纳米线 2 种情况。从图中可以看出:一方面,不同计算方法之间的良好吻合验证了所提宽带设计方法的正确性;另一方面,超窄纳米线结构显示出了较强的极化依赖特性,当入射

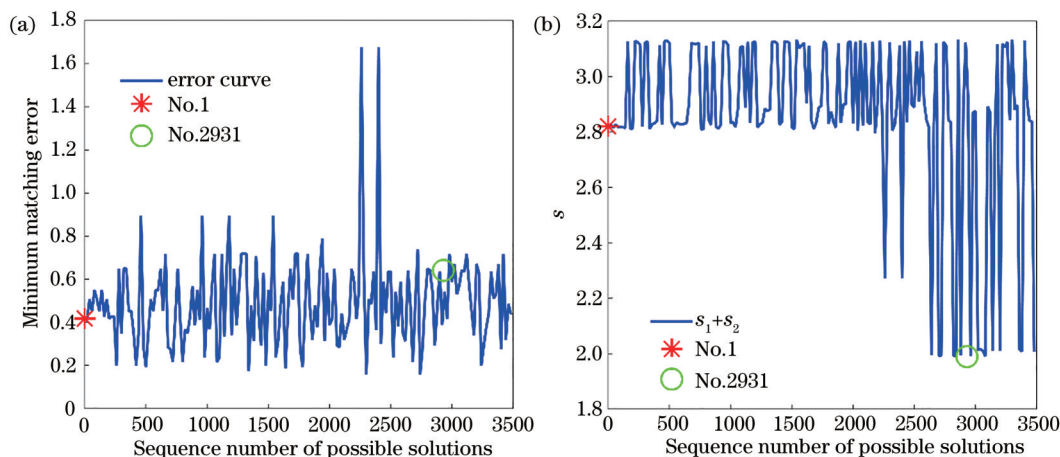


图 4 所有可能方案的性能对比。(a)下半腔匹配误差；(b)两个谐振波长处宽带指标之和

Fig. 4 Performance comparison of all possible solutions. (a) Matching error of lower half cavity; (b) sum of broadband indicators of two resonant wavelengths

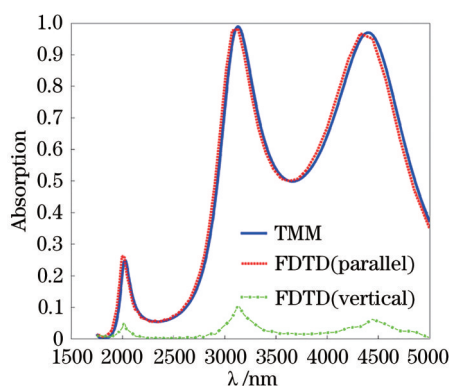


图 5 TMM与FDTD计算结果的对比

Fig. 5 Calculation results comparison between TMM and FDTD

光场垂直于纳米线时,吸收很弱,这对于极化不敏感设计带来了一定的挑战。

最后,为了进一步分析超窄纳米线结构的极化

响应特性,图 6 给出了第 2931 号设计在第 1 个匹配波长(3134 nm)处入射光电场分量平行和垂直于纳米线时,纳米线内部的电场强度分布。从图中可以看出:当入射光电场分量平行于纳米线时,入射光和下半腔的反射光在纳米线处较好地实现了同相叠加,整个纳米线内部的电场强度均大于 1.6 V/m,显著高于入射光 1 V/m 的电场强度;当入射光电场分量垂直于纳米线时,除了纳米线的 4 个角处很小一部分的场强较大,最大可达 10.6 V/m,内部大部分区域的电场强度都保持在一个较低的水平,最低仅有 0.18 V/m,这就造成了探测器吸收效率的急剧下降。另一个谐振波长 4418 nm 处纳米线内部的电场强度分布情况是类似的。因此,未来的极化不敏感设计可以从器件结构的角度入手,以提高入射光电场分量垂直于纳米线时纳米线内部的电场强度,例如借

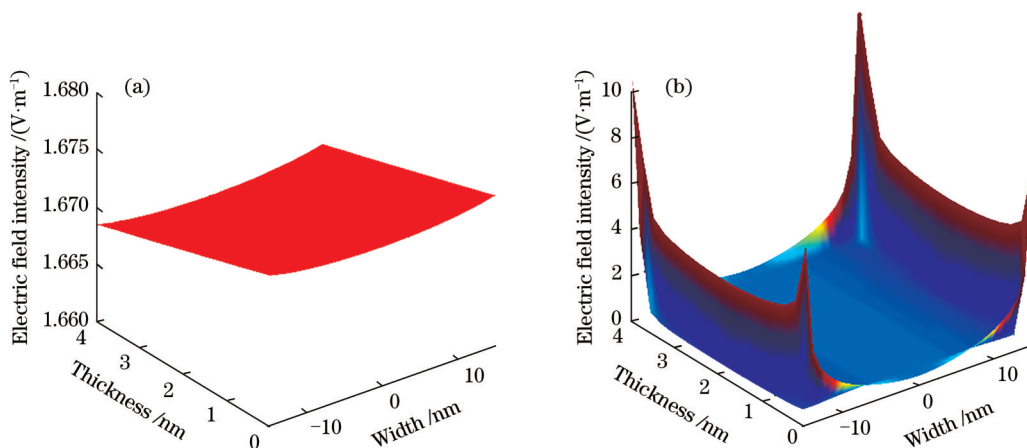


图 6 纳米线内部的电场强度分布。(a)平行于纳米线；(b)垂直于纳米线

Fig. 6 Electric field intensity distribution in nanowires. (a) Parallel to nanowire; (b) vertical to nanowire

鉴近红外波段所采用的高折射率材料补偿法<sup>[21]</sup>等。

## 4 结 论

提出了一种基于双谐振点耦合的 SNSPD 中红外波段宽带光吸收特性设计方法,在匹配谐振波长处器件输入阻抗的基础上,引入评价每个谐振波长处带宽特性的指标更好地取得了阻抗匹配精度与带宽特性之间的平衡,从而达到了双宽带耦合谐振以拓展总体吸收带宽的目的。以加载 SiO<sub>2</sub>/Au 反射腔的 SNSPD 在 3~5 μm 的宽带光吸收特性设计为例,在器件结构相对简单的条件下,通过优化上下腔 3 层介质层的厚度实现了 2 个不同波长处吸收峰之间的有效耦合,从而达成了既定的设计目标。结果表明,所得 30 nm 线宽 SNSPD 在 2928~4856 nm 波长范围内对电场分量平行于纳米线的入射光能够实现至少 50% 的吸收。此外,进一步的 FDTD 仿真结果显示超窄纳米线结构的光吸收具有较强的极化依赖特性,极化不敏感设计将是后续研究的重要方向之一。

## 参 考 文 献

- [1] Fathpour S. Heterogeneous nonlinear integrated photonics[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2018, 54(6): 1-16.
- [2] Shao Y, Wang D J, Zhang D, et al. Research progress of single photon laser ranging technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(10): 1011020.  
邵禹, 王德江, 张迪, 等. 单光子激光测距技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(10): 1011020.
- [3] Geng R X, Li H, Huang J, et al. Self-aligned superconducting nanowire single photon detector[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(10): 1011022.  
耿荣鑫, 李浩, 黄佳, 等. 自对准超导纳米线单光子探测器[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(10): 1011022.
- [4] Zhou H, Zhang C J, Lü C L, et al. Recent progress of imaging applications based on superconducting nanowire single-photon detectors[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(10): 1011005.  
周慧, 张成俊, 吕超林, 等. 基于超导纳米线单光子探测技术的成像研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(10): 1011005.
- [5] le Jeannic H, Verma V B, Cavailles A, et al. High-efficiency WSi superconducting nanowire single-photon detectors for quantum state engineering in the near infrared[J]. Optics Letters, 2016, 41(22): 5341-5344.
- [6] Maingault L, Tarkhov M, Florya I, et al. Spectral dependency of superconducting single photon detectors[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(11): 116103.
- [7] Korneeva Y, Florya I, Semenov A, et al. New generation of nanowire NbN superconducting single-photon detector for mid-infrared[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, 21(3): 323-326.
- [8] Marsili F, Bellei F, Najafi F, et al. Efficient single photon detection from 500 nm to 5 μm wavelength[J]. Nano Letters, 2012, 12(9): 4799-4804.
- [9] Taylor G G, Morozov D, Gemmell N R, et al. Photon counting LIDAR at 2.3 μm wavelength with superconducting nanowires[J]. Optics Express, 2019, 27(26): 38147-38158.
- [10] Hu X L, Holzwarth C W, Masciarelli D, et al. Efficiently coupling light to superconducting nanowire single-photon detectors[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2009, 19(3): 336-340.
- [11] Hu X L, Dauler E A, Molnar R J, et al. Superconducting nanowire single-photon detectors integrated with optical nano-antennae[J]. Optics Express, 2011, 19(1): 17-31.
- [12] Rosfjord K M, Yang J K W, Dauler E A, et al. Nanowire single-photon detector with an integrated optical cavity and anti-reflection coating[J]. Optics Express, 2006, 14(2): 527-534.
- [13] Vetter A, Ferrari S, Rath P, et al. Cavity-enhanced and ultrafast superconducting single-photon detectors[J]. Nano Letters, 2016, 16(11): 7085-7092.
- [14] Yamashita T, Waki K, Miki S, et al. Superconducting nanowire single-photon detectors with non-periodic dielectric multilayers[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 35240.
- [15] Zheng F, Xu R Y, Zhu G H, et al. Design of a polarization-insensitive superconducting nanowire single photon detector with high detection efficiency[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 22710.
- [16] Redaelli L, Zwiller V, Monroy E, et al. Design of polarization-insensitive superconducting single photon detectors with high-index dielectrics[J]. Superconductor Science and Technology, 2017, 30(3): 035005.
- [17] Zheng F, Xu R Y, Chen Y J, et al. Design of a superconducting nanowire single-photon detector with dual-broadband and high detection efficiency[J].

- IEEE Photonics Journal, 2017, 9(4): 1-8.
- [18] Hu X L, Marsili F, Najafi F, et al. Mid-infrared single-photon detection using superconducting nanowires integrated with nano-antennae[C]//Quantum Electronics and Laser Science Conference 2010, May 16-21, 2010, San Jose, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2010: QThD5.
- [19] Sunter K A, Berggren K K. Optical modeling of superconducting nanowire single photon detectors using the transfer matrix method [J]. Applied Optics, 2018, 57(17): 4872-4883.
- [20] Hu X L. Efficient superconducting-nanowire single-photon detectors and their applications in quantum optics[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2011: 111-117.
- [21] Xu R Y, Zheng F, Qin D F, et al. Demonstration of polarization-insensitive superconducting nanowire single-photon detector with Si compensation layer[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(21): 4707-4713.