

激光与光电子学进展

基于非对称法布里-珀罗腔结构的 3~5 μm 高光吸收率超导纳米线单光子探测器优化设计

赵雨辰, 田浩, 豆建华, 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 与特定波长处的高吸收率设计不同, 3~5 μm 宽波长范围内超导纳米线单光子探测器的光吸收设计需要更好地兼顾吸收率的峰值大小和带内平坦度。为此, 一方面采用超窄 NbN 纳米线/SiO₂腔/分布式布拉格光栅(DBR)来构建基于非对称法布里-珀罗(F-P)腔结构的正面对光器件初始模型; 另一方面将 SiO₂腔、DBR 的高折射率层和低折射率层这 3 个厚度作为优化对象, 以 3~5 μm 波长范围内光吸收率的最小值作为优化目标, 使用粒子群算法对初始模型进行优化。结果显示, 相比于上下腔双谐振波长耦合的思路, 基于非对称 F-P 腔结构并采用了高折射率差 DBR 的单层 NbN 纳米线探测器设计, 在目标波长范围内光吸收率的最小值提高了 40.2%, 带内平坦度提高了 59.2%。在此基础上的双层 NbN 纳米线探测器结构不仅可以进一步提高光吸收率的最小值, 而且可以在不追求特定波长处高吸收率的情况下将吸收率的最大值提升至 0.97 以上, 达到与双谐振波长耦合方法相当的水平。

关键词 探测器; 超导纳米线单光子探测器; 宽带光吸收; 非对称法布里-珀罗腔; 分布式布拉格光栅; 3~5 μm

中图分类号 TN215

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1704002

Optimal Design of Superconducting Nanowire Single-Photon Detector with High Light Absorptivity in Wavelength Range of 3-5 μm Based on Asymmetric Fabry-Pérot Cavity Structure

Zhao Yuchen, Tian Hao, Dou Jianhua, Yuan Yanning, Xi Xiaoli*

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

Xi'an 710048, Shaanxi, China

Abstract Unlike the high absorptivity design at a specific wavelength, the optical absorption design of superconducting nanowire single-photon detectors in a wide wavelength range of 3–5 μm necessitates an enhanced balance between the peak absorptivity and in-band flatness. Herein, first, an initial front-illuminated device model based on the asymmetric Fabry-Pérot (F-P) cavity structure is stacked using ultranarrow NbN nanowires, SiO₂ cavities, and distributed Bragg gratings (DBRs). Second, the three thicknesses of the SiO₂ cavities, a high refractive index layer and a low refractive index layer in the DBR are considered as the optimization variables, and the minimum light absorptivity in the wavelength range of 3–5 μm is set as the optimization objective. Finally, the initial device structure is optimized using the particle swarm optimization algorithm. Results show that compared with the design of double-wavelength coupling, the design of a single-layer NbN nanowire detector based on the asymmetric F-P cavity structure and high-contrast DBR can afford improved minimum optical absorption and in-band flatness by 40.2% and 59.2%, respectively. Based on this, a double-layer NbN nanowire layout can enable a further enhancement in the minimum optical absorptivity and increase the maximum absorptivity to more than 0.97, a value equivalent to that obtained using the double-wavelength coupling method.

Key words detectors; superconducting nanowire single-photon detector; broadband optical absorption; asymmetric Fabry-Pérot cavity; distributed Bragg grating; 3–5 μm

收稿日期: 2021-12-30; 修回日期: 2022-02-15; 录用日期: 2022-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(61971346)、陕西省创新能力支撑计划项目(2022TD-39)、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

自 2001 年由俄罗斯莫斯科国立师范大学和美国罗切斯特大学的研究人员联合报道以来,超导纳米线单光子探测器(SNSPD)因其所具有的暗计数低、响应频谱宽、时间抖动小、重复速度快等优点,已在过去的二十年中得到了飞速的发展并被广泛应用于各个相关的前沿技术领域,例如远距离量子通信、单光子成像等^[1-5]。而随着新需求的不断涌现,对于 SNSPD 的光子响应机制^[6]、极化不敏感结构设计^[7]等多个方面的研究也正在不断深入。具有中红外高探测效率的 SNSPD 在诸如光谱分析、天文观测等领域有着重要的应用价值,因而正受到越来越多的关注^[8]。

从概念上讲,在未明确限定的情况下,SNSPD 的探测效率一般既可以指系统探测效率(SDE),也可以指器件探测效率(DDE),且这两者又是直接相关的^[9]。具体来说,SDE 是耦合效率 η_c 和 DDE 的乘积,DDE 则是超导纳米线的阻态触发概率 P_R 和其光吸收率 A 的乘积。在这 3 个关键参量之中,光源与器件之间的 η_c 通常可以通过光路设计等方式较为直接地达到一个接近理想的水平,因而相对来说, P_R 和 A 才是制约 SNSPD 中红外探测效率的主要因素。对于 P_R ,较为成熟的近红外 SNSPD 通常采用线宽约 100 nm 左右的超导纳米线结构并且已经能够实现 $>90\%$ 的 SDE^[10-11]。但鉴于中红外波段单个光子能量的显著降低以及由此导致的热点难以触发纳米线阻态的情况,为了提高 P_R ,研究人员进一步发展出了线宽约 30~50 nm 左右的超窄纳米线结构^[12-14]。对于 A ,在近红外波段 SNSPD 的研究过程中,纳米天线^[15]、光学腔^[16-17]、多层介质结^[18]、高折射率介质^[19-20]、分形结构^[21]、波导集成^[22]、法布里-珀罗(F-P)腔结构^[23]等技术成功实践,为后续中红外波段高光吸收率 SNSPD 的开发及

其进一步的应用积累了丰富的经验^[24]。以具有 4 nm 厚 30 nm 宽 NbN 纳米线的 SNSPD 在 3~5 μm 波段的高光吸收设计为例,采用较为简单的上下腔双宽带耦合谐振的思路,已经可以在器件结构相对简单的情况下实现 2928~4856 nm 波长范围内对电场分量平行于纳米线的入射光能量 $>50\%$ 的吸收^[25]。但这种方法虽然在谐振波长处吸收率的峰值可以接近于 1,却难以获得较好的带内平坦度,最低的 5 μm 处光吸收率只有约 0.35。为此,需要进一步改进 SNSPD 结构设计,以期在保证光吸收率的峰值的同时,尽可能提高其在整个 3~5 μm 波长范围内的平坦度。

本文仍以使用超窄 NbN 纳米线的 SNSPD 在 3~5 μm 波长范围内的高光吸收率结构设计为主。首先基于非对称 F-P 腔结构,构建了由 NbN 纳米线/SiO₂ 腔/分布式布拉格光栅(DBR)构成的正面对光器件初始模型^[26]。进而,以目标波长范围内光吸收率的最小值作为优化目标,采用粒子群优化(PSO)算法来寻求初始模型中 SiO₂ 腔、DBR 的高折射率层和低折射率层这 3 个厚度的最优解。结果显示,相比于上下腔双谐振波长耦合的思路,基于非对称 F-P 腔结构并采用高折射率差 DBR 的单、双层纳米线 SNSPD 在 3~5 μm 波长范围内光吸收率的最小值分别提高了 40.2% 和 99.0%,带内平坦度分别提高了 59.2% 和 63.7%。而且采用双层纳米线的设计可以进一步将吸收率的最大值提升至 0.97 以上,达到与双谐振波长耦合方法相当的水平。

2 设计方法

2.1 非对称 F-P 腔的构建

根据文献中较为成熟的基础器件结构^[7,16,26,27],建立了基于非对称 F-P 腔的正面对光 SNSPD 仿真模型,如图 1 所示。图 1(a)中的器件模型采用的是单层 NbN

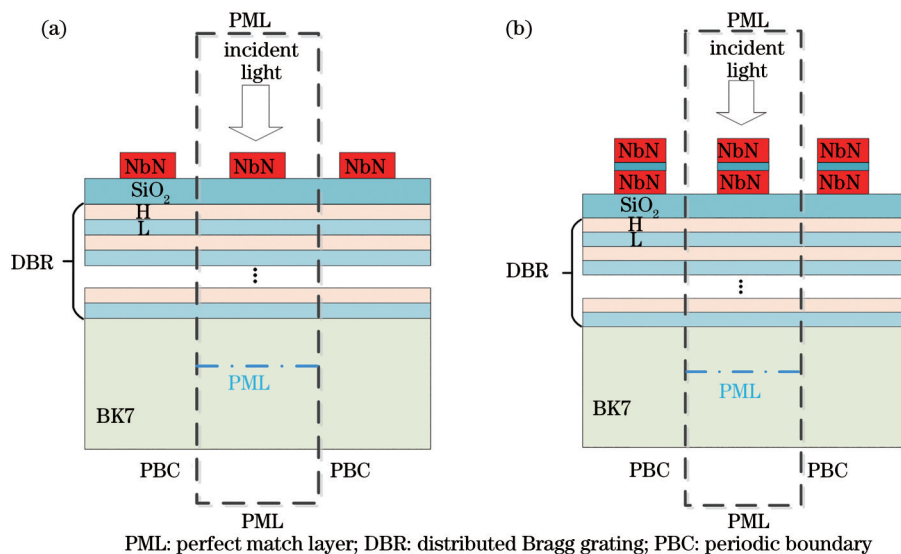


图 1 SNSPD 仿真模型示意图。(a)模型 1;(b)模型 2

Fig. 1 Simulation model diagram of SNSPD. (a) Model 1 (M1); (b) model 2 (M2)

纳米线,并构建了由 NbN 纳米线/SiO₂腔/DBR 组成的非对称 F-P 腔结构,其中的 DBR 由高折射率薄膜和低折射率薄膜交替构成,两者分别用 H 层和 L 层表示,衬底采用 400 μm 厚的 BK7 玻璃。图 1(b)中给出的是在图 1(a)的基础上发展而来的双层 NbN 纳米线 SNSPD,两层纳米线之间的隔离由 3 nm 厚的 SiO₂层完成^[7]。以上两种器件结构分别记为 M1 和 M2,其中单一纳米线层的等效折射率 n_e 由等效媒质理论通过下式得到

$$n_e^2 = gn_{\text{NbN}}^2 + (1-g)n_{\text{air}}^2, \quad (1)$$

式中: n_{NbN} 和 n_{air} 分别是 NbN 和空气的折射率; g 是 NbN 纳米线的占空比,取值为 1/3。

在使用时域有限差分(FDTD)方法进行仿真时,入射光从器件正面垂直入射,仿真区域上下为完美匹配层(PML),左右为周期边界(PBC)。此外,通过将 PML 下边界设置在 BK7 玻璃衬底的不同位置,可以模拟衬底有限大和无限大两种情况,如图 1 中虚线和点虚线所示。由于期望的 DBR 在目标波段内具有较高的反射率,因而本文采用了 PML 下边界在 BK7 内的无限大衬底设置以大幅减少仿真时间,并且这样做并不会显著影响到实际的仿真与设计精度。

2.2 基础结构的优化

除了作为基础的非对称 F-P 腔结构外,DBR 本身的反射特性对实现具有高带内平坦度的 3~5 μm 宽带光吸收特性也具有重要的作用。总的来说,这里的 DBR 设计需要解决两个主要问题:一个是如何实现能够覆盖 3~5 μm 波长范围的反射带宽;另一个是如何获得 H 层和 L 层各自的厚度以及 DBR 的周期数这三个关键参量的最优值。

对于第一个问题,高折射率差是达到目的的重要手段。DBR 的反射带宽可由下式得到^[28]:

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_0 \pi}{\pi - \arccos \left[-\frac{n_{\text{H}}^2 + n_{\text{L}}^2 - 6n_{\text{H}}n_{\text{L}}}{(n_{\text{H}} + n_{\text{L}})^2} \right]}, \quad (2)$$

$$\lambda_2 = \frac{\lambda_0 \pi}{\pi + \arccos \left[-\frac{n_{\text{H}}^2 + n_{\text{L}}^2 - 6n_{\text{H}}n_{\text{L}}}{(n_{\text{H}} + n_{\text{L}})^2} \right]}, \quad (3)$$

式中: λ_1 为反射带宽的上截止波长; λ_2 为反射带宽的下截止波长; λ_0 为设计波长; n_{H} 和 n_{L} 分别为 DBR 中两种交替生长的高/低折射率薄膜的折射率。

对于第二个问题,合适的优化算法是寻找解空间中最优解的可靠工具。这里以 3~5 μm 波长范围内光吸收率的最小值 A_{min} 作为目标函数,使用 PSO 算法对 SiO₂腔、DBR 的 H 层和 L 层的 3 个厚度进行优化,过程中的惯性权重采用了线性递减的方式进行动态更新,具体计算过程可由下式得到:

$$\omega = \omega_{\text{max}} - \frac{(t-1) \times (\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{min}})}{T-1}, \quad (4)$$

式中: ω 、 t 和 T 分别为惯性权重、当前迭代次数和总迭代次数; ω_{max} 和 ω_{min} 分别设置为 0.8 和 0。

此外,还有三点需要说明:其一,优化过程中并未将 DBR 的周期数作为优化对象,而是在大量结果分析的基础上直接设置为综合最优的 4,分析的过程和结果会在下一节中详述;其二,光响应的建模采用了传输矩阵法(TMM),该方法的细节可参考相关文献,这里不再赘述;其三,将 3~5 μm 波长范围内吸收率的最大值 A_{max} 与最小值 A_{min} 之差定义为平坦度(Flatness),以此衡量吸收率曲线平坦程度,表达式为

$$A_{\text{Flatness}} = A_{\text{max}} - A_{\text{min}}, \quad (5)$$

该值越小则吸收率曲线越平坦。

3 结果与讨论

3.1 DBR 结构的确定

在整个设计过程中,M1 和 M2 两种器件模型中每一层 NbN 纳米线的厚度和宽度均设为 4 nm 和 30 nm,其红外波段的折射率可以从文献[25]中得到。DBR 采用 SiO₂ 作为低折射率薄膜材料,并将五氧化二钽(Ta₂O₅)^[26]、Si、氧化钇稳定氧化锆(YSZ)^[29] 作为高折射率薄膜的备选材料,中红外波段 SiO₂、Ta₂O₅、Si、YSZ 的折射率分别为 1.444、2.000、3.478、5.000。在确定 DBR 周期数和高折射率薄膜材料的过程中,首先使用 3 种高折射率薄膜备选材料的折射率通过式(2)、式(3)分别计算其各自的反射带宽,反射带宽记为 $\Delta\lambda$,设计波长设置为 3.8 μm,观察理论计算结果是否满足本次设计需求的 2000 nm 反射带宽,并将不符合设计需求的材料剔除,再通过分析大量的设计实验结果来确定最佳的高折射率薄膜材料以及对应的 DBR 周期数。不同 H 层材料的反射带宽理论计算结果、初始取较大 DBR 周期数的光吸收率优化结果、不同周期数的设计结果分析分别如表 1、图 2(a)、2(b)所示。

表 1 DBR 反射带宽理论计算结果

Table 1 Theoretical calculation results of DBR reflection bandwidth

Material type	Ta ₂ O ₅	Si	YSZ
λ_1 /nm	4237	5214	6052
λ_2 /nm	3444	2989	2769
$\Delta\lambda$ /nm	793	2225	3283

依据表 1 中的计算结果,可以直接剔除 Ta₂O₅,并继续对 Si 和 YSZ 做进一步分析。图 2(a)是以初始周期数为 13 的 DBR 为例,通过使用不同高折射率薄膜材料,得到的两种模型优化后的吸收率曲线。从图中可以看出,M1、M2 无论使用 YSZ 还是 Si 作为高折射率薄膜,都能够在 3.8 μm 附近达到几乎相同的带内吸收率峰值,但明显的区别在于,使用折射率更高的 YSZ 能够显著提高带内吸收率的最小值,从而提高了带内平坦度。同时,具有双层纳米线的 M2 器件吸收

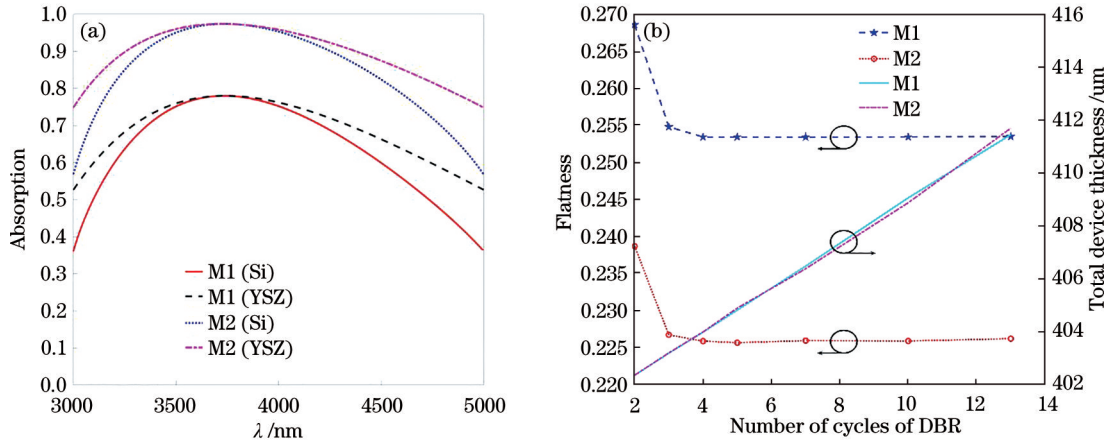


图 2 DBR 构建结果。(a)高折射率薄膜材料选择;(b)周期数选择

Fig. 2 Construction results for different DBRs. (a) High refractive index film material selection; (b) cycle number selection

率明显高于具有单层纳米线的 M1 器件,但也可以注意到两者的平坦度基本相当,说明增加纳米线层数并无法直接提高平坦度。进一步以 YSZ 作为 DBR 中高折射率薄膜,对 M1、M2 分别使用不同周期数的 DBR 进行优化设计,并取 5 个相互独立的设计结果的平坦度和器件总厚度来绘制均值曲线图,如图 2(b)所示。结果显示:当周期数大于 4 之后,M1、M2 的器件总厚度不断增加但平坦度变化几乎饱和,因此本文最终的设计结果中 DBR 将以 YSZ 作为高折射率薄膜材料,

且周期数设置为 4。

作为补充,图 3 给出了图 2(a)中 DBR 分别使用 Si 和 YSZ 作为高折射率薄膜时,在带内最低吸收的 $3\ \mu\text{m}$ 波长处,M1 器件结构纳米线内部的光场强分布。以 Si 或 YSZ 作为高折射率薄膜,纳米线内部的电场强度范围分别为 $1\sim 1.02\ \text{V/m}$ 和 $1.2\sim 1.22\ \text{V/m}$ 。显然,更高的折射率差可以使得纳米线内部的电场强度得到进一步的提升,这也是 YSZ 作为高折射率薄膜时带内吸收率最小值会有明显提升的主要原因。

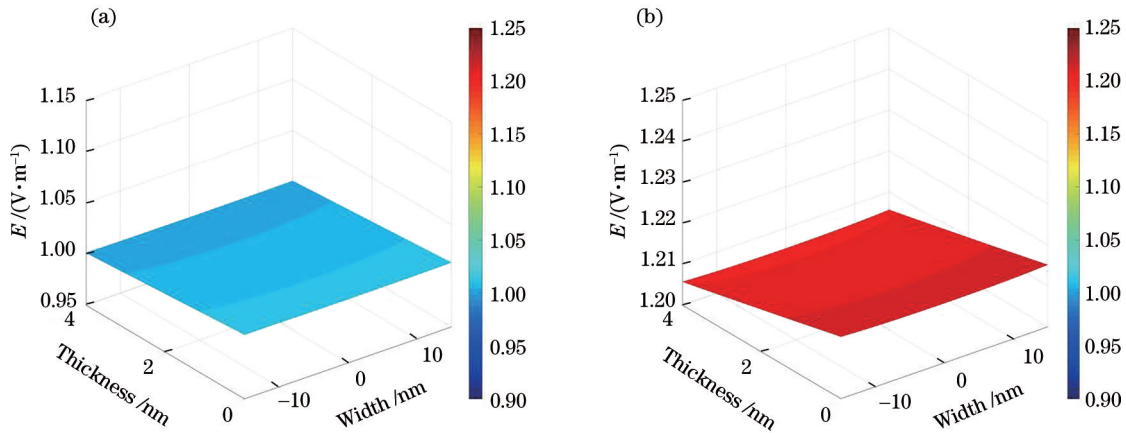


图 3 在 $3\ \mu\text{m}$ 波长处 M1 中纳米线内部光场强度分布。(a)Si 作为高折射率薄膜;(b)YSZ 作为高折射率薄膜

Fig. 3 Intensity distributions of light field inside nanowires in M1 at $3\text{-}\mu\text{m}$ wavelength. (a) Si as a high refractive index film; (b) YSZ as a high refractive index film

3.2 设计、验证与对比

完成关键材料和参数的选择后,可以再一次通过 PSO 算法对目标器件中的三个待定厚度进行优化。优化得到的 SiO_2 腔、YSZ 高折射率薄膜和 SiO_2 低折射率薄膜的厚度,分别记为 d_1 、 d_2 和 d_3 ,如表 2 所示。

图 4 中使用 FDTD 对 M1、M2 的优化结果进行了验证,不同曲线之间的良好吻合证明了提出设计的正确性。具体来说,在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波长范围内,优化后的 M1 的光吸收率最小值为 0.526,最大值为 0.779,M2

表 2 确定 DBR 结构后两种模型中待优化层厚度优化结果

Table 2 Optimization results of layer thickness to be optimized in two design models after defining DBR structure

Model number	d_1 / nm	d_2 / nm	d_3 / nm
1	650	187	663
2	658	187	636

的最小值和最大值则分别达到了 0.748 和 0.974。

最后,将所得光吸收率曲线与文献[25]中基于上下腔双谐振波长耦合的设计结果进行了对比,如表 3

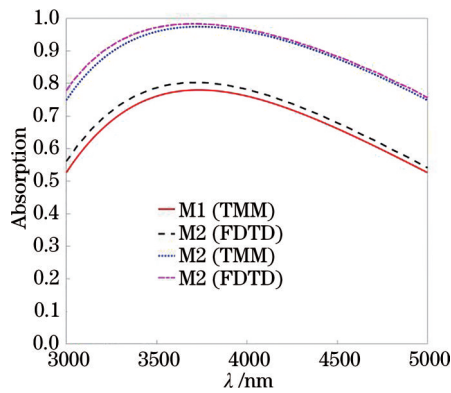


图4 TMM和FDTD仿真结果对比

Fig. 4 Comparison of TMM and FDTD simulation results

表3 提出设计与文献[25]的设计的带内平坦度结果对比

Table 3 Comparison of flatness results between proposed design and design in Ref. [25]

Model number	A_{\max}	A_{\min}	A_{Flatness}
Ref. [25]	0.997	0.374	0.623
1	0.779	0.526	0.253
2	0.974	0.748	0.226

和图5所示。相较双谐振波长耦合的思路,采用非对称F-P腔结合高折射率差DBR的设计方案能够使同为单层纳米线结构的M1模型在带内最低吸收率以及带内平坦度这两方面的指标上分别提高40.2%和59.2%。同时,若进一步采用具有双层纳米线的M2模型,则带内最低吸收率可提高99.0%,带内平坦度则可提高63.7%,而且还可以在不承担特定波长处高吸收的情况下将带内吸收率的峰值提升到与双谐振波长耦合方法相当的水平。

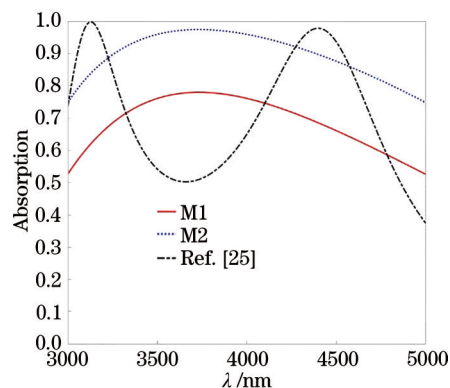


图5 提出设计与文献[25]的设计的吸收率曲线结果对比

Fig. 5 Comparison of absorption rate curve results of proposed design and design in Ref. [25]

4 结 论

提出了一种基于非对称F-P腔结构并结合高折射率差DBR的3~5 μm宽带高光吸收率SNSPD设计思路。一方面采用超窄NbN纳米线/SiO₂腔/DBR来构

建基于非对称F-P腔结构的正面对光器件初始模型;另一方面,在详细地对比分析确定了DBR的高折射材料和周期数之后,以3~5 μm波长范围内光吸收率的最小值作为目标函数,使用PSO算法优化了SiO₂腔、DBR中的H层和L层的三个厚度。结果显示,相比于双谐振波长耦合的思路,本文所得到的单层NbN纳米线设计的带内光吸收率最小值和平坦度分别提高了40.2%和59.2%。而采用双层NbN纳米线的话,不仅可以进一步提高光吸收率的最小值,而且可以将吸收率的最大值提升至与双谐振波长耦合方法相当的水平。

参 考 文 献

- [1] Gol'tsman G N, Okunev O, Chulkova G, et al. Picosecond superconducting single-photon optical detector [J]. Applied Physics Letters, 2001, 79(6): 705-707.
- [2] 林俊秀, 胡晨昱, 王鹏威, 等. 多路并行探测提高光子计数关联成像质量研究[J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0511001.
Lin J X, Hu C Y, Wang P W, et al. Improvement of photon-counting correlated imaging quality by multi-channel parallel detection[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0511001.
- [3] 梁晓磊, 蒋文浩, 刘建宏, 等. 用于高速量子密码系统的1.25 GHz InGaAs/InP单光子探测器的研制[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0818001.
Liang X L, Jiang W H, Liu J H, et al. A 1.25 GHz InGaAs/InP single-photon detector for high-speed quantum cryptography[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(8): 0818001.
- [4] 管焰秋, 鄢秋荣, 杨晟韬, 等. 基于残差编解码网络的单光子压缩成像[J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111022.
Guan Y Q, Yan Q R, Yang S T, et al. Single-photon compressive imaging based on residual codec network[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111022.
- [5] Chen J P, Zhang C, Liu Y, et al. Sending-or-not-sending with independent lasers: secure twin-field quantum key distribution over 509 km[J]. Physical Review Letters, 2020, 124(7): 070501.
- [6] 张彪, 陈奇, 管焰秋, 等. 超导纳米线单光子探测器光子响应机制研究进展[J]. 物理学报, 2021, 70(19): 198501.
Zhang B, Chen Q, Guan Y Q, et al. Research progress of photon response mechanism of superconducting nanowire single photon detector[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(19): 198501.
- [7] 张文英, 胡鹏, 肖游, 等. 高效、偏振不敏感超导纳米线单光子探测器[J]. 物理学报, 2021, 70(18): 188501.
Zhang W Y, Hu P, Xiao Y, et al. High-efficiency polarization-insensitive superconducting nanowire single photon detector[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(18): 188501.
- [8] Chen Q, Ge R, Zhang L B, et al. Mid-infrared single photon detector with superconductor Mo_{0.8}Si_{0.2} nanowire [J]. Science Bulletin, 2021, 66(10): 965-968.

- [9] Anant V, Kerman A J, Dauler E A, et al. Optical properties of superconducting nanowire single-photon detectors[J]. *Optics Express*, 2008, 16(14): 10750-10761.
- [10] Marsili F, Verma V B, Stern J A, et al. Detecting single infrared photons with 93% system efficiency[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(3): 210-214.
- [11] Chang J, Los J W N, Tenorio-Pearl J O, et al. Detecting telecom single photons with 99.5 – 2.07 + 0.5% system detection efficiency and high time resolution [J]. *APL Photonics*, 2021, 6(3): 036114.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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): 4502108.
- [17] Vetter A, Ferrari S, Rath P, et al. Cavity-enhanced and ultrafast superconducting single-photon detectors[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(11): 7085-7092.
- [18] Yamashita T, Waki K, Miki S, et al. Superconducting nanowire single-photon detectors with non-periodic dielectric multilayers[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 35240.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Chi X M, Zou K, Gu C, et al. Fractal superconducting nanowire single-photon detectors with reduced polarization sensitivity[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(20): 5017-5020.
- [22] 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.
- [23] Verma V B, Korzh B, Walter A B, et al. Single-photon detection in the mid-infrared up to 10 μm wavelength using tungsten silicide superconducting nanowire detectors[J]. *APL Photonics*, 2021, 6(5): 056101.
- [24] Wollman E E, Verma V B, Walter A B, et al. Recent advances in superconducting nanowire single-photon detector technology for exoplanet transit spectroscopy in the mid-infrared[J]. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2021, 7(1): 011004.
- [25] 赵雨辰, 赵博洋, 郑家欢, 等. 具有 3~5 μm 宽带光吸收特性的超导纳米线单光子探测器设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(1): 0104001.
- Zhao Y C, Zhao B Y, Zheng J H, et al. Design of superconducting nanowire single-photon detector with broadband light absorption characteristics in 3-5 μm [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(1): 0104001.
- [26] Erotokritou K, Heath R M, Taylor G G, et al. Nano-optical photoresponse mapping of superconducting nanowires with enhanced near infrared absorption[J]. *Superconductor Science and Technology*, 2018, 31(12): 125012.
- [27] Li D Z, Jiao R Z. Design of a low-filling-factor and polarization-sensitive superconducting nanowire single photon detector with high detection efficiency[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(8): 847-852.
- [28] 黄占超. 长波长垂直腔面发射激光器材料与物理研究[D]. 上海: 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 2006: 25.
- Huang Z C. Studies of long-wavelength vertical-cavity surface-emitting laser materials and physics[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, 2006: 25.
- [29] Xiao Q L, Hu G H, He H B, et al. Evolution of residual stress and structure in YSZ/SiO₂ multilayers with different modulation ratios[J]. *Chinese Physics Letters*, 2013, 30(2): 024206.