

氮化铌纳米线光学特性

吴洋 陈奇 徐睿莹 葛睿 张彪 陶旭 涂学凑 贾小氢 张蜡宝 康琳 吴培亨

Optical properties of niobium nitride nanowires

Wu Yang Chen Qi Xu Rui-Ying Ge Rui Zhang Biao Tao Xu Tu Xue-Cou Jia Xiao-Qing
Zhang La-Bao Kang Lin Wu Pei-Heng

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 67, 248501 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20181646

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181646>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I24>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

洞态 Ar 原子 K_α 和 K_β 伴线和超伴线的理论计算

Theoretical calculation of K_α and K_β X-ray satellite and hypersatellite structures for hollow argon atoms
物理学报.2018, 67(17): 173201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180553>

不同电荷态的 $^{129}\text{Xe}^{q+}$ 激发 Au 的 X 射线发射研究

Study of X-ray spectrum emitted due to the impact of $^{129}\text{Xe}^{q+}$ on different ion's charge on Au
物理学报.2015, 64(5): 053201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.053201>

不同动能的 $^{129}\text{Xe}^{26+}$ 与 Au 表面作用产生的 X 射线谱

X-ray spectrum emitted by the impact of $^{129}\text{Xe}^{26+}$ of the different kinetic energies on Au surface
物理学报.2014, 63(16): 163201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.163201>

Eu^{20+} 入射 Au 靶发射 Eu L-X 射线产额与动能的相关性

Correlation of Eu L X-ray yield with kinetic energy based on the impact of Eu^{20+} on solid Au target
物理学报.2014, 63(16): 163202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.163202>

重离子轰击 Ta 靶引起的多电离效应

Multiple ionization effect of Ta induced by heavy ions

物理学报.2012, 61(19): 193201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.193201>

氮化铌纳米线光学特性*

吴洋 陈奇 徐睿莹 葛睿 张彪 陶旭 涂学凑 贾小氢
张蜡宝[†] 康琳 吴培亨

(南京大学电子科学与工程学院, 南京 210093)

(2018年9月3日收到; 2018年10月12日收到修改稿)

氮化铌(NbN)纳米线是超导纳米线单光子探测器(SNSPD)常用的光敏材料,其光学性质是影响SNSPD性能的关键因素.本文结合实验数据和仿真结果,系统研究了多种NbN超导纳米线探测器器件结构的光学特性,表征了以下四种器件结构下的反射光谱以及透射光谱:1)双面热氧化硅衬底背面对光结构;2)双面SiN硅衬底背面对光结构;3)硅衬底上以金层+SiN缓冲层为反射镜的正面对光结构;4)以分布式布拉格反射镜(DBR)为衬底的正面对光结构.并在上述四种器件结构基础上,生长了不同厚度的NbN薄膜,观察不同厚度NbN薄膜的吸收效率.经分析,发现在不同器件结构下的最佳NbN厚度与光吸收率的关系如下:双面热氧化硅衬底上的NbN层在1606 nm处最大吸收率为91.7%,其余结构在最佳NbN厚度条件下吸收率都能达到99%以上.其中双面SiN的硅衬底结构中最大吸收率为99.3%,Au+SiN为99.8%,DBR为99.9%.最后,将DBR器件实测结果与仿真结果进行了差异性分析.这些结果对高效率SNSPD设计与研制具有指导意义.

关键词: 超导, 吸收率, 氮化硅, 布拉格反射镜

PACS: 85.25.Pb

DOI: 10.7498/aps.67.20181646

1 引言

超导纳米线单光子探测器(SNSPD)^[1]因其高探测效率^[2]、低暗计数^[3]、低时间抖动^[4]、宽响应光谱^[5]等诸多优点而在量子通信^[6,7]、卫星激光测距^[8,9]、深空激光通信^[10]、光时域反射仪^[11]、海雾测量^[12]、大气探测激光雷达^[13,14]等领域有着重要应用.SNSPD的系统效率(SDE)是重要的性能指标之一,其定义为 $\eta_{SDE} = \eta_{\text{quant}} \times \eta_{\text{couple}} \times \eta_{\text{abs}}$,其中 η_{quant} 是纳米线上脉冲产生的量子效率, η_{couple} 是入射光和探测面积的耦合效率, η_{abs} 是纳米线中的吸收效率.提高SDE的关键^[15,16]在于增强光子吸收率 η_{abs} 和光耦合 η_{couple} .

本文的主要任务是分析现有的多种SNSPD器件结构的光学特性,通过增强光吸收效率(η_{abs})来实现高SDE.图1所示为用基于时域有限差分方法的FDTD软件仿真的周期为200 nm的NbN纳

米线以及NbN薄膜在分布式布拉格反射镜(DBR)结构上的吸收率曲线,其中纳米线线宽分别为50, 75, 100和150 nm, DBR结构是在Si衬底上交替生长13对Ta₂O₅和SiO₂层形成的,目标波长为1550 nm,各层厚度均为1/4中心波长, Ta₂O₅折射率为2.10,厚度为185 nm, SiO₂折射率为1.46,厚度为265 nm, NbN折射率为5.23–5.82i,厚度为6 nm.在仿真模型中,光源为平行光源,从结构正面入射,电场强度为1 V/m.模型x方向两侧设周期边界,y方向两侧设PML层.从图1中可以发现:当占空比较高时,NbN薄膜的吸收曲线与NbN纳米线对TE波的吸收曲线几乎相同.因此可以用NbN薄膜的光学特性来研究NbN纳米线对TE波的光吸收效率,进而研究其对器件系统效率的影响.

设计SNSPD结构时,最主要的因素是结构的光吸收效率,其次需要考虑的是材料的选择,最后

* 国家自然科学基金(批准号: 61471189, 11227904)和国家重点研发计划(批准号: 2017YFA0304000)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: lzhang@nju.edu.cn

是NbN薄膜的厚度对光吸收的影响. 根据入射光方向可将SNSPD结构分为基于入射光背面入射和正面入射的结构, 背面入射结构常用材料有SiO₂和SiN, 正面入射结构常用材料有DBR和Au反射镜. 目前, SNSPD常用基于入射光背面入射的结构[17,18], 这种背面对光的结构有利于器件的制备和对光, 因此很多科研机构都使用这种背面对光的结构. 背面对光器件的优点是工艺成熟, 衬底表面平整度高, 方便后续工艺制备, 可以在光学腔上层制备均匀的高质量NbN薄膜. SNSPD中的膜厚需要良好的表面质量和晶格匹配来保证薄膜的均匀性, 背面对光器件中的光学谐振腔结构可以极大地提高NbN薄膜的吸收效率, 从而提高器件的系统效率. 背面对光器件的缺点是由于光学腔的高Q值, 器件的吸收效率带宽比较窄, 无法获得宽带的器件响应.

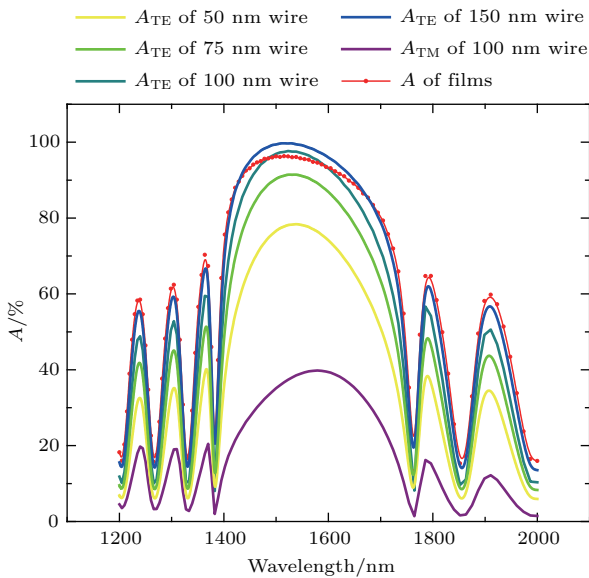


图1 FDTD 仿真软件模拟的DBR 器件结构中NbN 纳米线和NbN 薄膜的吸收率随波长变化的曲线图, 其中NbN 纳米线的厚度为6 nm, 周期为200 nm, 线宽分别为50, 75, 100 和150 nm

Fig. 1. Simulation results of curves of the absorption rate of NbN nanowires and NbN films under various conditions in the structure of DBR devices. The thickness of NbN nanowire is 6 nm, periodicity is 200 nm, the width are 50, 75, 100, and 150 nm, respectively.

近年来, 正面对光结构的SNSPD器件取得了很多突破[19,20]. 正面对光结构的器件, 制备工艺相对简单, 器件的光学耦合相比背面对光结构更加容易, 因此在提高光耦合效率的同时也使得片上光子电路成为可能[21]. 因为不需要制备光学腔来提高吸收效率, 因此可以获得宽带的器件响应.

2 样品制备

图2展示了制备的四种器件的结构, 目标波长设计为1550 nm. 最常用的背面对光结构如图2(a)所示, 首先对Si基片做双面热氧化处理, 让Si基片的两侧均生成约260—270 nm的SiO₂层, 约为目标波长的1/4. 下侧的SiO₂层是用于减小反射的阻抗匹配层, 上侧的SiO₂层则作为谐振腔的一部分用于增强NbN薄膜的光吸收率. 之后在这种双面热氧化的硅衬底上用磁控溅射生长NbN薄膜, 然后用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)沉积SiO₂反射层, 最后再用磁控溅射生长200 nm Au层. 图2(b)所示的是双面SiN的硅衬底背面对光结构, 与图2(a)的区别在于用SiN层替代了SiO₂, 在阻抗匹配上优于SiO₂. 图2(c)所示是常用的正面对光器件的结构, 是以Au+SiN为反射镜的正面对光器件. 首先在Si基片上用磁控溅射生长了约200 nm的Au层, 再通过PECVD在Au层上方生长了约200—210 nm的SiN, 最后再用磁控溅射生长了NbN薄膜. 图2(d)则是以DBR为衬底的新型正面对光器件, DBR由上海趋瑞光电科技有限公司制备而成, 在Si基片上交替生长13对Ta₂O₅和SiO₂层, 每层厚度均为目标波长的1/4, 基片Si厚度0.5 mm, 粗糙度小于0.5 nm.

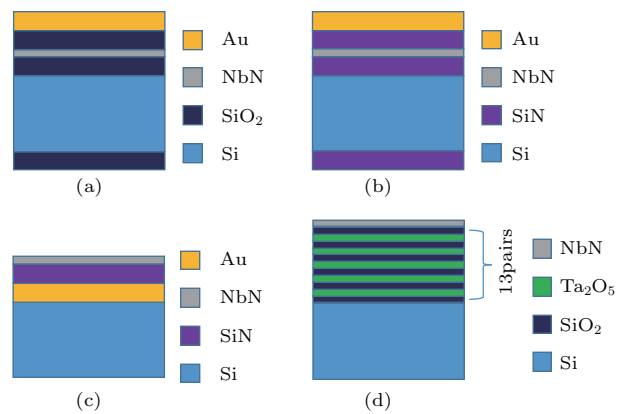


图2 器件结构 (a) 双面热氧化的硅衬底背面对光结构; (b) 双面SiN的硅衬底背面对光结构; (c) 硅衬底上以金层+SiN缓冲层为反射镜的正面对光结构; (d) 以DBR为衬底的正面对光结构

Fig. 2. Device structures: (a) Backside optical devices with SiO₂ as the antireflection layer; (b) backside optical devices with SiN as the antireflection layer; (c) front-facing optical devices with Au+SiN as a mirror; (d) front-facing optical devices with distributed Bragg reflector (DBR) as a mirror.

我们只需在DBR上生长NbN薄膜即可完成器件制备, 工艺流程少, 磁控溅射生长NbN薄膜^[22]条件为: Ar 80 sccm (1 sccm = 1 mL/min), N₂ 10 sccm, 工作电流 1.15 A, 工作电压 380 V, 工作气压 0.2 Pa, 2 mTorr (1 Torr = 133 Pa), 溅射速率 1.3 nm/s.

3 光谱分析

本实验在各器件制备过程中使用PerKin Elmer公司的lambda750S光谱仪实时测量了它们的光谱特性, 以动态分析各因素对器件光谱的影响及其变化规律.

3.1 背面衬底

为了更直观的研究减反层的作用, 实验制备了无减反层的单层SiO₂和SiN衬底及器件. 图3所示为实验制备的背面衬底, 在没有减反层的情况下, SiO₂和SiN衬底的反射率分别为35.8%和32.5%. 在有减反层的情况下, SiO₂的反射率降低至12.6%, SiN的反射率更是降低至了0.9%, 可见减反层的作用明显. 根据阻抗匹配条件, 如果想让入射光在空气和Si衬底界面无反射的进入器件, Si基片和空气之间的阻抗匹配层的折射率需要满足 $n^2 = n_{vac} \cdot n_{Si}$, 厚度为目标波长 λ 的1/4. 在 $\lambda = 1550$ nm处Si的折射率为 $n = 3.478$, 根据阻抗匹配条件, 介于Si和空气之间的阻抗匹配层

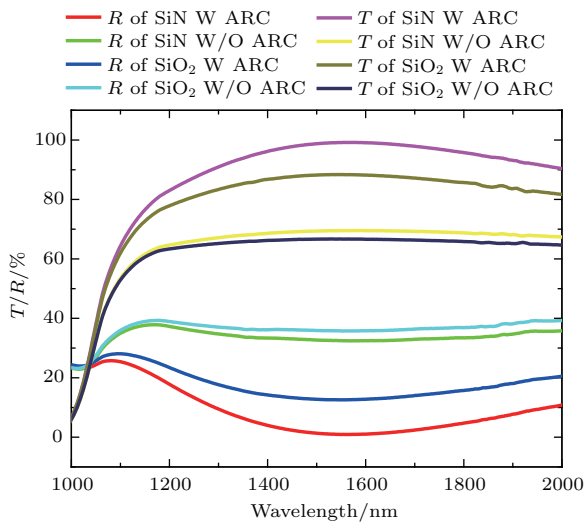


图3 实验制备的有/无减反层时SiN和SiO₂衬底的透射率和反射率随波长变化的曲线图

Fig. 3. Curves of the transmittance and reflectivity of SiN and SiO₂ substrates with/without the antireflection layer.

介电常数应该为 $n = 1.865$, 而SiO₂在 $\lambda = 1550$ nm处的折射率为1.444, 所以利用SiO₂做减反层并不能完全消除反射作用. 而SiN的介电常数 $n = 1.8695$, 与要求的数值 $n = 1.865$ 十分接近, 因此利用SiN做减反层可以使反射率降低至0.9%, 基本消除反射作用. 图3的光谱对比图很好地验证了这一点.

3.2 背面器件

在背面衬底上生长NbN薄膜及反射腔做成背面器件, 图4所示为实验制备的背面器件的吸收率, 当NbN薄膜厚度为5 nm时, 在没有减反层的情况下, SiO₂和SiN器件的吸收率分别为64.5%(@1642 nm)和67.2%(@1658 nm); 在有减反层的情况下, SiO₂的吸收率在1624 nm提升至84.6%, SiN的吸收率更是在1630 nm提高到了99.3%. 因此采用双面SiN的硅衬底结构的背面器件, 其NbN的吸收效率比双面热氧化的硅衬底结构的背面器件要高很多. 另外, 测试光谱的中心波长较目标波长偏移了大约80 nm, 可能是由于在使用PECVD沉积谐振腔时厚度控制不当所致, 但这并不影响对光谱特性的分析, 后面将进一步优化PECVD沉积谐振腔的工艺来解决这个问题.

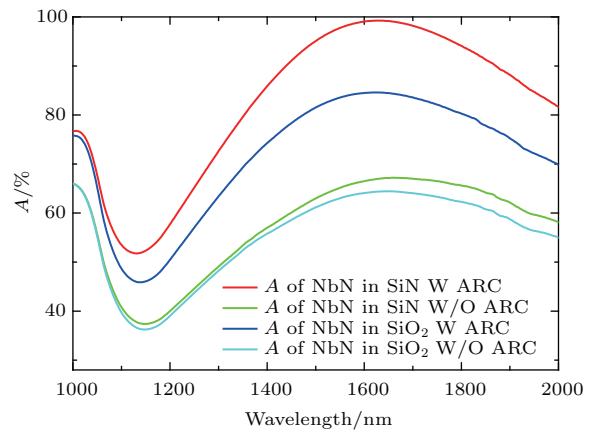


图4 实验制备的NbN厚度为5 nm时, 有/无减反层时SiN和SiO₂背面器件结构中NbN的吸收率随波长变化的曲线图

Fig. 4. Curves of the absorption rate of NbN in the device structure of SiN and SiO₂ with/without substrate antireflection when the thickness of NbN is 5 nm.

3.3 正面衬底

上面讨论的器件结构均是基于入射光背面入射的, 并且分析了减反层对器件光吸收效率的影

响,而在实际的实验中,为了让入射光更好地汇聚到有效面积上,会使用聚光透镜,其本身也会存在反射、透射等效应损耗入射光的能量,可以测得损耗约为5%—7.5%。因此想要使探测效率 > 90%,背面对光实现难度很大,同时背面对光还存在带宽限制的问题。下面将对 Au 镜和 DBR 这两种正面对光衬底进行分析。图 5 所示为实验制备的正面对光衬底的透射率和反射率情况,在 Si 基片上依次生长 Au 和 SiN 层形成 Au 镜后,测得其反射率在 1000—2000 nm 波长范围内均接近 95%,有着很宽的反射带宽,但反射率并没有达到 100%,因为在光学波段 Au 的介电常数不能认为是 ∞ 而当作 PEC 处理(负载 $Z_L = 0$),所以在 Au 内部会存在很小一段电场,这将损耗一部分入射能量,以 Au 为反射镜会有大约 3%—5% 的能量被 Au 吸收。由于反射机理不同,相比于 Au 镜, DBR 在目标波长带宽内的反射率相对更高,在 1400—1700 nm 波长范围内,其反射率可达 99.9%,但反射带宽相对 Au 镜较窄。DBR 从理论上讲反射率为 1,但是实际加工时每一层的厚度都会有很小的偏差,所以实际上也有极少一部分能量发生透射。从反射效果上看,两者都是对入射能量进行全反射,但是 DBR 在牺牲带宽宽度的情况下可以获得更高的反射效果。

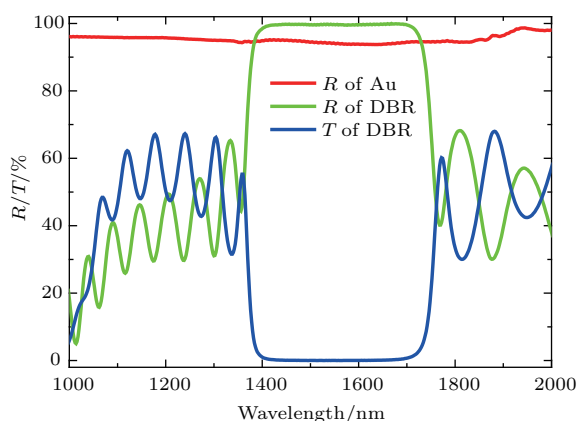


图 5 实验制备的以 Au 层 + SiN 缓冲层为反射镜的反射率和 DBR 的透射率及反射率随波长的变化
Fig. 5. Curves of the reflectivity of Au+SiN reflector and the transmittance and reflectivity of DBR with change of wavelength.

3.4 正面器件

在正面衬底上生长 NbN 薄膜制成正面器件之后这种差异可以明显地显现出来,图 6 所示为在 Au+SiN 缓冲层为反射镜和 DBR 为衬底的正面对

光结构中的吸收率曲线,可以看出,实验制备的 Au 器件在目标波长处的吸收峰十分平缓,而实验制备的 DBR 器件则比较陡峭。说明用 Au 镜制备目标波长下的 SNSPD 对 SiN 层厚度的精度要求可以稍微降低,减少工艺制作上的难度,也适合宽波段器件的制备。在最佳 NbN 厚度条件下, DBR 器件结构上的 NbN 薄膜的吸收率可达 99.9%,虽然正面 Au 器件结构的吸收率也可达 99.7%,但是这其中约有 3%—5% 是被 Au 镜本身吸收的。因此在 DBR 工艺成熟的情况下,为了制备高效率的 SNSPD 器件, DBR 将是首选。

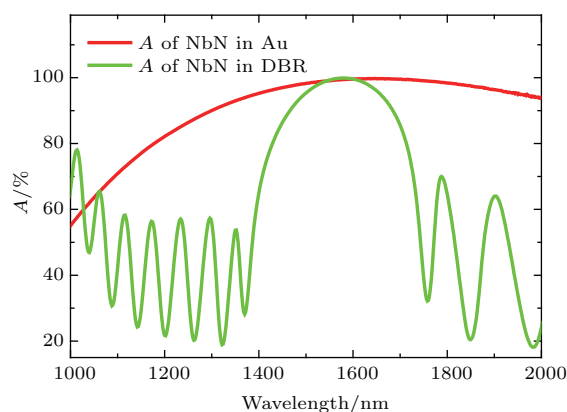


图 6 实验制备的 NbN 厚度为 4 nm 时,以 Au 层 + SiN 缓冲层为反射镜和 DBR 上 NbN 的吸收率随波长变化的曲线图
Fig. 6. Curves of the absorption rate of NbN in the device structure of Au+SiN and DBR when the thickness of NbN is 4 nm.

3.5 NbN 厚度影响

在分析完各器件之间的优劣之后,实验还针对各器件,对 NbN 厚度这一条件进行了优化分析。图 7—图 10 分别是实验制备的不同 NbN 厚度时各器件的吸收率随波长的变化曲线,分析发现 NbN 厚度为 4 nm 时, SiO₂ 器件在峰值波长处的吸收率最高,最高值为 91.7%, NbN 厚度为 5 nm 时, SiN 器件在峰值波长处的吸收率最高,最高值为 99.3%, NbN 厚度为 5 nm 时, Au 器件在峰值波长处的吸收率最高,最高值为 99.8%, NbN 厚度为 4 nm 时, DBR 器件在峰值波长处的吸收率最高,最高值为 99.9%。与此同时还发现了一个共同点,当 NbN 厚度从 5 nm 开始逐渐增加时,各器件的吸收率都会随之下降。同时 NbN 的折射率比较大,当 NbN 薄膜厚度增加时,会影响上层腔的等效腔长,因此当 NbN 薄膜的 T_C 条件满足实验需求时应使生长的

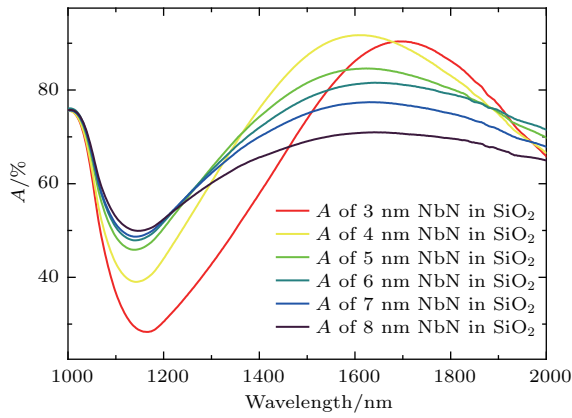


图7 实验制备的有减反层时SiO₂背面器件结构中不同厚度NbN薄膜的吸收率随波长变化的曲线图

Fig. 7. Curves of the absorption rate of NbN films with different thickness in the structure of backside optical devices with SiO₂ as the antireflection layer.

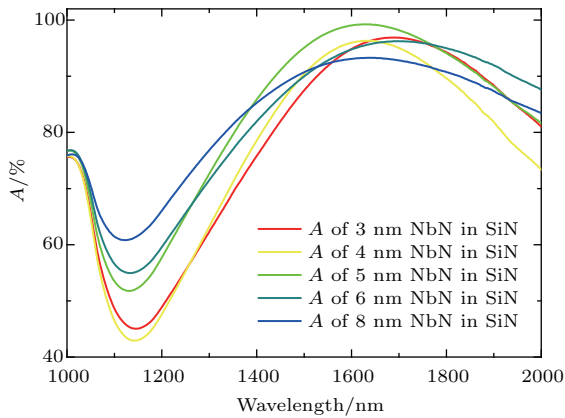


图8 实验制备的有减反层时SiN背面器件结构中不同厚度NbN薄膜的吸收率随波长变化的曲线图

Fig. 8. Curves of the absorption rate of NbN films with different thickness in the structure of backside optical devices with SiN as the antireflection layer.

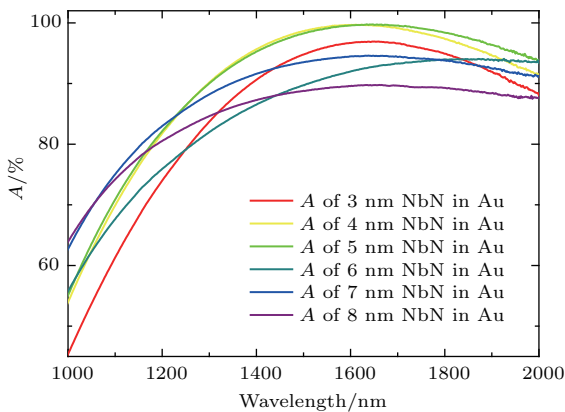


图9 实验制备的以Au层+SiN缓冲层为反射镜的结构中不同厚度NbN薄膜的吸收率随波长变化的曲线图

Fig. 9. Curves of the absorption rate of NbN films with different thickness in the structure of front-facing optical devices with Au+SiN as a mirror.

NbN 薄膜尽量薄, 且需要优化上层腔的厚度, 在今后的实验中会做进一步的分析. 此外, 由于制备过程中各层厚度控制不能保证完全精确, 峰值波长与目标波长会有一定偏差, 后续会进一步优化工艺过程.

— A of 4 nm NbN in DBR — A of 5 nm NbN in DBR
— A of 6 nm NbN in DBR — A of 7 nm NbN in DBR
— A of 8 nm NbN in DBR

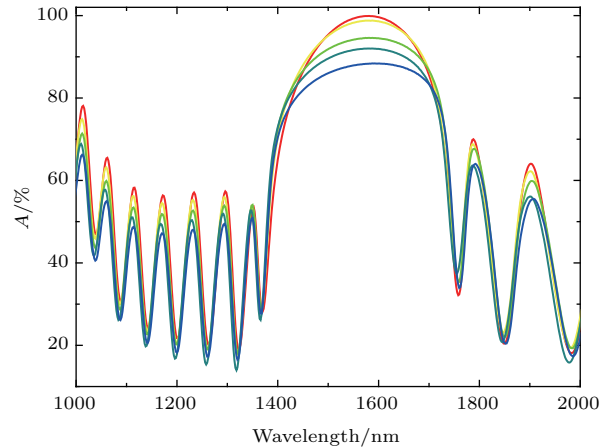


图10 实验制备的DBR结构中不同厚度NbN薄膜的吸收率随波长变化的曲线图

Fig. 10. Curves of the absorption rate of NbN films with different thickness in the structure of front-facing optical devices with DBR as a mirror.

3.6 DBR 仿真拟合

综合以上数据分析, 为了在后续的实验制备出高达95%以上探测效率的SNSPD, 选择DBR作为衬底. 相比于传统的金属反射镜, DBR光损耗几乎为零, 因此用DBR代替金属Au, Ag用在SNSPD中将成为趋势. 本实验使用了Lumerical FDTD solutions软件对DBR器件进行了仿真. 图11所示是DBR衬底的仿真结果与实测结果, 反射率 > 99%的波长范围是1400—1700 nm (波长带宽为300 nm). 仿真计算中的各层界面是光滑的理想介质界面, 而实际界面均有一定的粗糙度, 会造成光线入射角度的改变以及散射现象, 因此会使反射率出现起伏, 并且相邻界面处会存在一定程度的组分扩散和混合生长, 导致两种材料的折射率差减小使带宽变窄. 图12是对生长不同厚度NbN的DBR器件的仿真结果, 当NbN厚度为4 nm时, 器件吸收率达到最高, 可高达99.99%, 并且随着NbN厚度的增加, 吸收率显著下降, 这与实际测量结果完全符合, 由于工艺上的细微误差是不可控的, 因此相同条件下真实的吸收率会比仿真结果略低一

点, 这种微乎其微的差异基本可以忽略, 并不影响高探测效率 SNSPD 的制备.

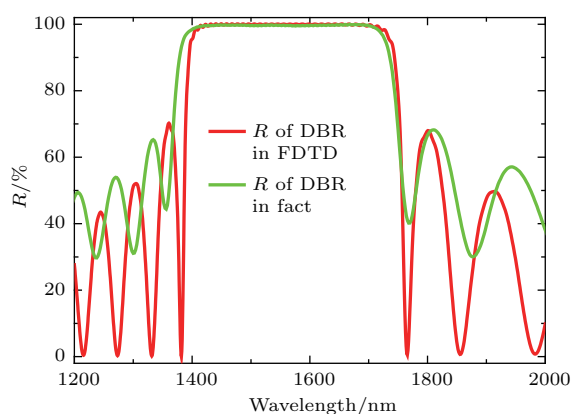


图 11 DBR 反射率的模拟值和实测值随波长的变化
Fig. 11. Curves of the measured and simulated reflectivity of DBR mirror with the change of wavelength.

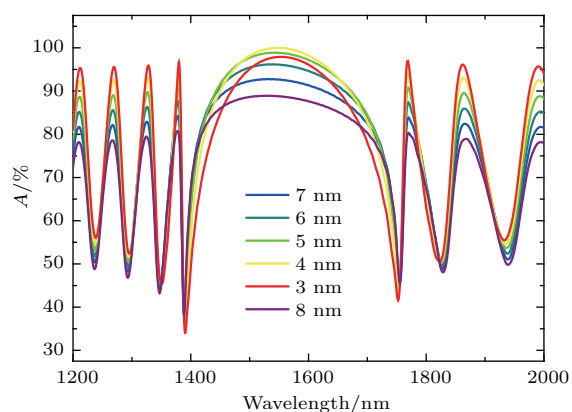


图 12 FDTD 仿真软件模拟的 DBR 上不同厚度 NbN 薄膜的吸收率的模拟值随波长的变化
Fig. 12. Curves of the absorption rate of NbN films with different thickness on DBR.

表 1 各 SNSPD 结构的特点

Table 1. Characteristics of each SNSPD structure.

SNSPD 结构	最高吸收率/%	带宽宽度/nm	最佳 NbN 厚度/nm
背面 SiO ₂	91.7	10—20	4
背面 SiN	99.3	10—20	5
正面 DBR	99.9	50—100	4
正面 Au	99.8	100—200	5

4 结 论

综上所述, 本文制备了四种 SNSPD 器件结构, 分析了各自的优点和适用场景, 研究了不同条件下各器件结构的光学特性. 表 1 列出了各 SNSPD 结

构的特性, 可以看出, 在背面对光结构中, 采用双面 SiN 的硅衬底结构的背面器件, 其 NbN 的吸收效率比双面热氧化的硅衬底结构要高很多, 可达 99.3%, 但与正面对光结构相比, 带宽都较小, 不适用于宽谱响应. 正面对光结构中, 与 Au 镜为反射镜的正面器件相比, 以 DBR 为衬底的正面器件在牺牲部分带宽宽度的情况下可以获得更高的吸收效果, 吸收率高达 99.9%. NbN 薄膜厚度从 5 nm 开始逐渐增加时, 各器件的吸收率均随之降低.

参考文献

- [1] Gol'tsman G N, Okunev O, Chulkova G, Lipatov A, Semenov A, Smirnov K, Voronov B, Dzardanov A, Williams C, Sobolewski R 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 705
- [2] Marsili F, Verma V B, Stern J A, Harrington S, Lita A E, Gerrits T, Vayshenker I, Baek B, Shaw M D, Mirin R P, Nam S W 2013 *Nat. Photon.* **7** 210
- [3] Zhang L, Kang L, Chen J, Zhong Y, Zhao Q, Jia T, Cao C, Jin B, Xu W, Sun G, Wu P 2011 *Appl. Phys. B* **102** 867
- [4] Wu J, You L, Chen S, Li H, He Y, Lv C, Wang Z, Xie X 2017 *Appl. Opt.* **56** 2195
- [5] Korneeva Y, Florya I, Semenov A, Korneev A, Goltsman G 2011 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **21** 323
- [6] Hadfield R H, Habif J L, Schlafer J, Schwall R E, Nam S W 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 241129
- [7] Takesue H, Nam S W, Zhang Q, Hadfield R H, Honjo T, Tamaki K, Yamamoto Y 2007 *Nat. Photon.* **1** 343
- [8] Li H, Chen S, You L, Meng W, Wu Z, Zhang Z, Tang K, Zhang L, Zhang W, Yang X, Liu X, Wang Z, Xie X 2016 *Opt. Express* **24** 3535
- [9] Xue L, Li Z, Zhang L, Zhai D, Li Y, Zhang S, Li M, Kang L, Chen J, Wu P, Xiong Y 2016 *Opt. Lett.* **41** 3848
- [10] Grein M E, Kerman A J, Dauler E A, Shatrovoy O, Molnar R J, Rosenberg D, Devoe C E, Murphy D V, Robinson B S, Boroson D M 2011 *Design of a Ground-Based Optical Receiver for the Lunar Laser Communications Demonstration* Santa Monica, CA, USA, May 11–13, 2011 p78
- [11] Zhao Q, Xia L, Wan C, Hu J, Jia T, Gu M, Zhang L, Kang L, Chen J, Zhang X, Wu P 2015 *Sci. Rep.* **5** 10441
- [12] Zhu J, Chen Y, Zhang L, Jia X, Feng Z, Wu G, Yan X, Zhai J, Wu Y, Chen Q, Zhou X, Wang Z, Zhang C, Kang L, Chen J, Wu P 2017 *Sci. Rep.* **7** 1
- [13] Qiu J, Xia H, Shangguan M, Dou X, Li M, Wang C, Shang X, Lin S, Liu J 2017 *Opt. Lett.* **42** 4454
- [14] Shangguan M, Xia H, Wang C, Qiu J, Lin S, Dou X, Zhang Q, Pan J W 2017 *Opt. Lett.* **42** 3541
- [15] Li H, Zhang L, You L, Yang X, Zhang W, Liu X, Chen S, Wang Z, Xie X 2015 *Opt. Express* **23** 17301

- [16] Anant V, Kerman A J, Dauler E A, Yang J K W, Rosfjord K M, Berggren K K 2008 *Opt. Express* **16** 10750
- [17] Rosfjord K M, Yang J K W, Dauler E A, Kerman A J, Anant V, Voronov B M, Gol'tsman G N, Berggren K K 2006 *Opt. Express* **14** 527
- [18] Zhang L, Yan X, Jiang C, Zhang S, Chen Y, Chen J, Kang L, Wu P 2016 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **28** 2522
- [19] Zhang W J, You L X, Li H, Huang J, Lü C L, Zhang L, Liu X Y, Wu J J, Wang Z, Xie X M 2017 *Sci. China Phys. Mech. Astron.* **60** 120314
- [20] Cristiano R, Parlato L, Nasti U, Ejrnaes M, Myoren H, Taino T, Sobolewski R, Pepe G P 2016 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **26** 3
- [21] Akhlaghi M K, Schelew E, Young J F 2015 *Nat. Commun.* **6** 8233
- [22] Wang Z, Kawakami A, Uzawa Y, Komiyama B, Wang Z, Kawakami A, Uzawa Y, Komiyama B 1996 *J. Appl. Phys.* **79** 7837

Optical properties of niobium nitride nanowires*

Wu Yang Chen Qi Xu Rui-Ying Ge Rui Zhang Biao Tao Xu Tu Xue-Cou
 Jia Xiao-Qing Zhang La-Bao[†] Kang Lin Wu Pei-Heng

(School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

(Received 3 September 2018; revised manuscript received 12 October 2018)

Abstract

Niobium nitride (NbN) nanowires are commonly used as photosensitive materials for superconducting nanowire single-photon detectors (SNSPDs). Their optical properties are the key factors influencing the performance of SNSPD. According to the experimental data and simulation results, in this paper we systematically study the optical properties of various niobium nitride nanowire detector device structures, and characterize the reflection spectra and transmission spectra of the following four device structures: 1) Backside optical devices with SiO₂ as the antireflection layer, 2) backside optical devices with SiN as the antireflection layer, 3) front-facing optical devices with Au+SiN as a mirror, and 4) front-facing optical devices with distributed Bragg reflector (DBR) as a mirror. The NbN films with different thickness are grown on the basis of the four device structures, and the absorption efficiencies of the NbN films with different thickness are observed. The relationships between the optimal NbN thickness and the optical absorption rate for different device structures are found as follows: The maximum absorption rate of NbN on the SiO₂ antireflection layer is 91.7% at 1606 nm, while the absorption rates of the remaining structures at the optimal thickness of NbN can reach 99% or more. The absorption rate of the SiN device, the Au+SiN device and the DBR device are 99.3%, 99.8% and 99.9%, respectively. The measured results and simulation structure of DBR device are analyzed. These results are of significance for guiding the design and development of high efficiency SNSPD.

Keywords: superconducting, absorption rate, silicon nitride, Bragg reflector

PACS: 85.25.Pb

DOI: 10.7498/aps.67.20181646

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61471189, 11227904) and the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2017YFA0304000).

† Corresponding author. E-mail: lzhang@nju.edu.cn