

## 纳米多孔氮化铌薄膜红外宽带光响应特性

赵雨辰 郑家欢 王勇 席晓莉 宋海智

## Infrared broadband photoresponse characteristics of nanoporous NbN film

Zhao Yu-Chen Zheng Jia-Huan Wang Yong Xi Xiao-Li Song Hai-Zhi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 058501 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211694

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211694>

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

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

Ag@SiO<sub>2</sub>耦合结构设计及其对薄膜太阳电池的响应调控

Ag@SiO<sub>2</sub> coupled structure's design and regulation and control of response to thin film solar cells

物理学报. 2020, 69(18): 188801 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200334>

基于微孔板与折曲通道的亚波长宽带吸声结构设计

Design of subwavelength broadband hybrid sound absorption structure based on micro-perforated plate and coiled channels

物理学报. 2020, 69(13): 134303 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200368>

氮化铌纳米线光学特性

Optical properties of niobium nitride nanowires

物理学报. 2018, 67(24): 248501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181646>

极化控制的双波段宽带红外吸收器研究

Polarization-controlled dual-band broadband infrared absorber

物理学报. 2018, 67(10): 107801 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172716>

基于矢量像差理论的离轴反射光学系统初始结构设计

Initial configuration design of off-axis reflective optical system based on vector aberration theory

物理学报. 2019, 68(13): 134201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190299>

基于等离激元纳米结构非线性响应的超快光开关及脉冲激光器

Ultrafast optical switches and pulse lasers based on strong nonlinear optical response of plasmon nanostructures

物理学报. 2020, 69(18): 189101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200456>

# 纳米多孔氮化铌薄膜红外宽带光响应特性\*

赵雨辰<sup>1)</sup> 郑家欢<sup>1)</sup> 王勇<sup>2)†</sup> 席晓莉<sup>1)‡</sup> 宋海智<sup>3)††</sup>

1) (西安理工大学先进导航与电磁技术研究所, 西安 710048)

2) (电子科技大学电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 成都 610054)

3) (西南技术物理研究所, 成都 610041)

(2021 年 9 月 10 日收到; 2021 年 10 月 25 日收到修改稿)

具有超导绝缘相变特性的纳米多孔超导薄膜在红外光电探测领域有着潜在的应用价值, 而其在红外波段的宽带光响应特性研究目前尚未见报道. 为此, 本文以纳米多孔氮化铌 (NbN) 薄膜为主要对象, 研究了其在 780—5000 nm 的近、中红外波长范围内的光响应特性. 首先, 采用 Drude 模型拟合的方法, 不仅将对实验数据拟合的精度提高了约 17%, 而且得到了中红外波段的 NbN 光学参数; 进而, 采用时域有限差分法分析了加载纳米多孔 NbN 薄膜的背面对光器件的光响应特性, 并给出了能够将纳米多孔薄膜简化为均匀薄膜的 Bruggeman 等效模型, 从而可以将纳米多孔 NbN 薄膜光响应特性的仿真维度由三维降为一维; 最后, 基于等效模型和传输矩阵法, 对加载纳米多孔 NbN 薄膜的背面对光器件在近、中红外波段内的光吸收特性进行了优化设计. 结果表明: 一方面, 使用 Bruggeman 等效模型简化设计过程并不会影响最终结果的正确性; 另一方面, 仅仅是加载较为简单的光学腔, 即可使得探测器的薄膜光吸收率在近、中红外宽带设计时均大于 82%, 在近红外双波长设计时均大于 93.7%, 并且多孔薄膜结构具有天然的极化不敏感特性.

**关键词:** 纳米多孔 NbN 薄膜, 红外宽带光响应, Bruggeman 等效模型, 器件结构设计

**PACS:** 85.25.Am, 85.25.Pb, 85.60.Gz, 07.57.Kp

**DOI:** 10.7498/aps.71.20211694

## 1 引言

自从 1917 年 Case 在美国军方支持下利用硫化铊 (thallium sulphide,  $Tl_2S$ ) 研制的第一个光导型红外探测器问世以来, 现代红外光电探测器已经广泛应用于生物医学、安防监控、自主导航和红外遥感等诸多军用和民用领域<sup>[1]</sup>. 从历史上看, 每当有一种新型红外光电探测材料被发现和使用, 往往就会标志着新型乃至新一代红外探测器的出现. 典型的例子除了上述的  $Tl_2S$ , 还包括 20 世纪 30 年代由德国柏林大学 Kutzscher 等使用的同属于铅盐

半导体材料的硫化铅 (lead sulfide, PbS)<sup>[2]</sup>, 1959 年英国皇家雷达研究院 Lawson 等<sup>[3]</sup> 发明并人工合成的碲镉汞 (mercury cadmium telluride, HgCdTe), 1970 年美国 IBM 研究中心 Esaki 和 Tsu<sup>[4]</sup> 提出并实现的超晶格半导体材料, 2001 年俄罗斯莫斯科国立师范大学 Gol'tsman 等<sup>[5]</sup> 使用的氮化铌 (niobium nitride, NbN) 超导纳米线, 以及 2004 年英国曼彻斯特大学 Novoselov 等<sup>[6]</sup> 利用微机械剥离法成功从石墨中分离出来的石墨烯等. 近年来, 随着美国普渡大学对基于量子相变 (quantum phase transition, QPT) 的弱光探测理论研究的进展<sup>[7–9]</sup>, 具有 QPT 特性的量子材料将有望开启光电探测的

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61971346) 和西安理工大学科学基金 (批准号: 103-451319009, 103-451420002) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ywang@uestc.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: xixiaoli@xaut.edu.cn

†† 通信作者. E-mail: hzsong1296@163.com

新途径.

二维体系的超导绝缘相变 (superconductor-insulator transition, SIT) 作为 QPT 的经典范例, 是一种在绝对零度下调节磁场、掺杂、压强、无序度等非热力学参量而发生的从超导态到超导绝缘态的相变<sup>[10]</sup>. 电子科技大学李岚<sup>[11]</sup>通过控制反应离子刻蚀 (reactive ion etching, RIE) 时长的方式来调节纳米多孔 NbN 薄膜上纳米蜂巢孔径的大小, 使得纳米多孔 NbN 薄膜在低温下的电阻呈现明显的 SIT 特性, 并指出超导薄膜由超导绝缘态向量子金属态的相变过程为光电探测器的制备提供了一种新的思路.

在二维超导体系的 SIT 过程中, 除超导态和绝缘态两种基态外, 是否存在实验上曾经观测到的量子金属态一直是争论的焦点<sup>[12]</sup>. 2019 年, 电子科技大学等单位同样通过调节 RIE 的时长, 在 12 nm 厚度的纳米多孔钇钡铜氧 (yttrium barium copper oxide, YBCO) 薄膜中实现了超导态-量子金属态-绝缘态的相变过程, 一方面证实了量子金属态的存在, 另一方面也揭示出库珀对玻色子对于量子金属态的形成起到了主导作用<sup>[13]</sup>. 而后, 通过不同方式调控不同体系超导特性的工作进一步支持并扩展了对量子金属态的研究<sup>[14,15]</sup>. 随着对纳米多孔超导薄膜物理性质研究的不断深入, 其在红外光电探测等领域的应用潜力也逐渐显现, 但相比于其他已经较为成熟的红外光电探测材料, 仍有许多相关的研究工作亟需开展, 薄膜的红外光响应特性便是其中之一.

和基于其他材料的探测器一样, 光电材料区域的光吸收效率是影响探测器探测效率的关键因素之一<sup>[16]</sup>. 从光响应建模的复杂度上可以将目前已经较为成熟的高吸收率设计方法分为如下两类: 一是诸如等离子体激元增强、波导集成等主要借助各类全波分析软件的设计方法<sup>[17,18]</sup>; 二是通过等效媒质理论将复杂结构等效为一定参数的均匀薄膜, 再使用较为简单的传输线法等方法来优化多层光学薄膜结构的设计方法<sup>[19,20]</sup>. 同时, 对于低温超导红外光电探测器来说, 尽管实际上工作在低温状态, 但在理论设计过程中所用到的光学参数通常都是常温下的数据. 以 NbN 超导纳米线为例, 南京大学的实验研究显示, 低温下和常温下纳米线区域的光吸收率相差很小, 并且低温下的光吸收率相对常温下甚至还提高了一点<sup>[21]</sup>. 而对于红外波段纳米

多孔超导薄膜区域的高光吸收率设计, 虽然尚未见报道, 但可以借鉴上述的成熟设计经验进行初步探索.

为此, 本文以文献<sup>[11]</sup>中报道的 11.5 nm 厚的纳米多孔 NbN 薄膜为主要研究对象, 对其在 780—5000 nm 波长范围内的近、中红外宽带光响应特性进行了研究. 首先通过使用 Drude 模型来拟合实验测得的 270—1750 nm 波长范围 NbN 薄膜复介电常数, 在提高拟合精度的同时, 进一步计算得到了更长的波长范围内 NbN 薄膜的光学参数. 其次, 采用时域有限差分法 (finite difference time domain method, FDTD) 对加载纳米多孔 NbN 薄膜的背面对光器件的光响应特性进行了仿真分析. 进而, 通过对比不同形状参数下 Bruggeman 等效理论表达式的误差, 给出了适用于描述纳米多孔 NbN 薄膜光响应的等效模型. 最后, 以 1200—1600 nm 近红外波段和 3000—5000 nm 中红外波段的宽带设计、1310 和 1550 nm 的双波长设计为例, 基于所给出的等效模型和传输矩阵法 (transfer matrix method, TMM) 设计了一种通过加载光学腔来提高纳米多孔薄膜光吸收率的器件结构. 上述研究可以为基于量子材料的红外光电探测器高吸收率结构设计提供一定的理论参考.

## 2 纳米多孔 NbN 薄膜

### 2.1 薄膜结构

文献<sup>[11]</sup>中制备得到的纳米多孔 NbN 薄膜结构如图 1 所示. 均匀的 NbN 薄膜首先通过直流磁控溅射法生长于氧化镁 (magnesium oxide, MgO) 衬底之上, 薄膜厚度约为 11.5 nm. 再通过 RIE, 将多孔氧化铝 (anodized alumina oxide, AAO) 模板上的孔阵列结构转移到 NbN 薄膜上, 得到了孔直径  $D$  约为 70 nm, 孔中心间距  $p$  约为 100 nm 的多孔纳米 NbN 薄膜.

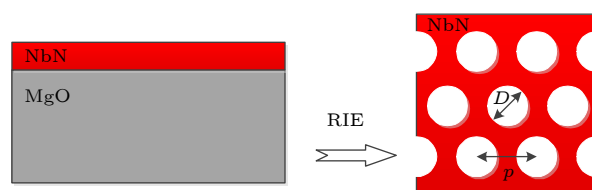


图 1 纳米多孔 NbN 薄膜结构示意图

Fig. 1. NbN film with nanoporous structure.

## 2.2 光学参数

对于 NbN 来说, 其在近红外波段的光学参数可以较为方便地由椭偏仪测得, 但当波长增加至中红外波段时, 直接测量会变得困难<sup>[22]</sup>. 可供借鉴的方法是首先使用 Drude 模型来拟合近红外波段 270—1750 nm 波长范围内的测量结果, 然后再外推至 4000 nm 左右的中红外波段<sup>[22,23]</sup>. 计算 NbN 复介电常数的 Drude 模型表达式为

$$\tilde{\varepsilon}(\omega) = \varepsilon_r \left[ 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\Gamma)} \right], \quad (1)$$

式中  $\omega$  表示角频率; 介电常数  $\varepsilon_r$ , 等离子体频率  $\omega_p$  和碰撞频率  $\Gamma$  是需要拟合的 3 个参数. 复折射率  $\tilde{n}$  和复介电常数  $\tilde{\varepsilon}$  的关系满足  $\tilde{n}^2 = \tilde{\varepsilon}$ .

图 2 给出了 NbN 复介电常数的拟合结果, 测量值和 Drude 模型的计算值符合良好. 拟合参数  $\varepsilon_r = 9.8$ ,  $\omega_p$  和  $\Gamma$  则满足  $\hbar\omega_p = 3.98$  eV 和  $\hbar\omega_p = 2.85$  eV,  $\hbar$  为约化普朗克常数. 需要指出的是, 上述拟合参数和文献<sup>[22]</sup>中给出的拟合参数之间略有差距, 因而这里计算了基于两套参数所得到的复折射率与实验数据之间的均方根误差. 结果显示, 文献中的参数对于复折射率实部和虚部进行拟合的均方根误差分别为 0.427 和 3.0, 而图 2 中所用参数的拟

合误差则分别下降到了 0.355 和 2.498, 两者的提升均达到了 17% 左右. 借由该模型, 可以进一步外推得到 1750—5000 nm 范围内的 NbN 的复介电常数和复折射率. 以 4000 nm 处为例, NbN 的复介电常数和复折射率分别为  $-9.087 + 173.24i$  和  $9.066 + 9.554i$ ,  $i$  表示虚数单位.

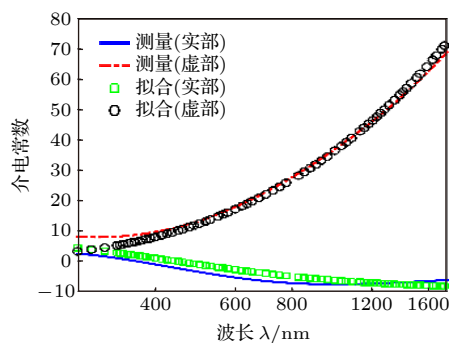


图 2 使用 Drude 模型拟合 NbN 复介电常数的结果

Fig. 2. Fit of the measured results of complex dielectric constant of NbN using Drude model.

## 3 光响应特性仿真与分析

纳米多孔 NbN 薄膜的三维 FDTD 仿真模型示意图如图 3(a) 所示, 虚线框内为仿真区域, 上下

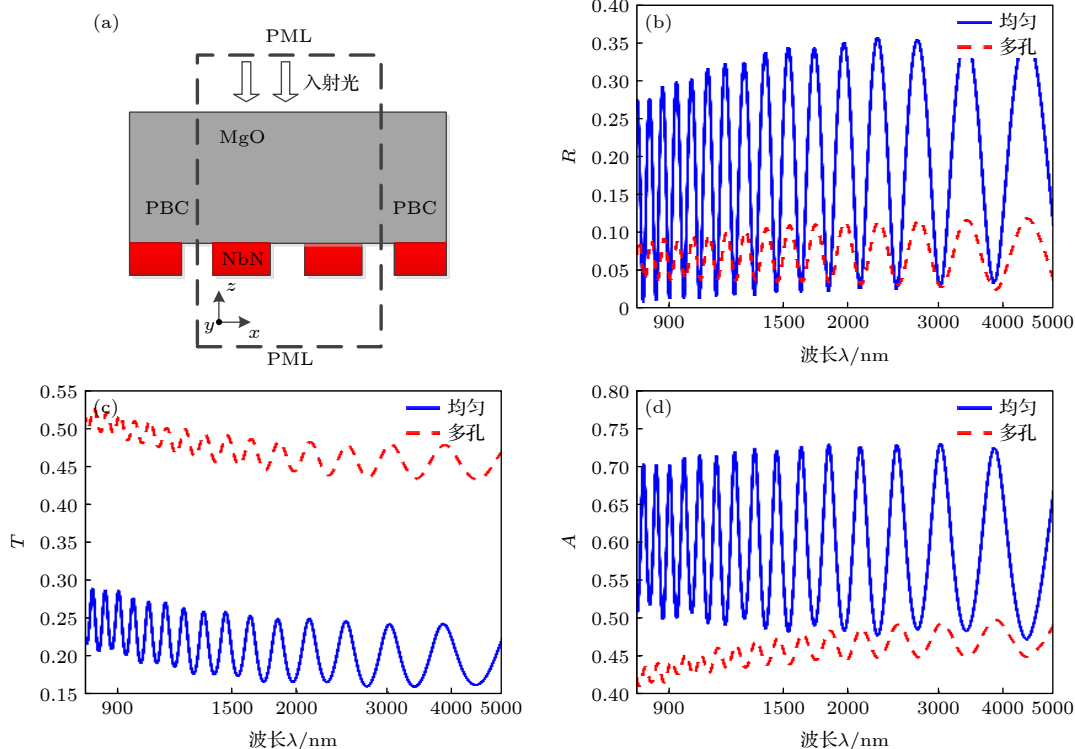


图 3 NbN 薄膜光响应特性仿真 (a) 仿真模型示意图; (b) 反射; (c) 透射; (d) 吸收

Fig. 3. Simulation of optical response characteristics of NbN film: (a) Simulation model sketch; (b) reflection; (c) transmission; (d) absorption.



两个边界采用完美匹配层 (perfect matching layer, PML), 其余 4 个边界设置为周期性边界条件 (periodic boundary conditions, PBC). MgO 衬底厚度为 4000 nm, 纳米多孔 NbN 薄膜结构参数如 2.2 节所述, 光源设置于仿真区域的衬底上方, 由衬底一侧背向入射到薄膜上, 模拟 780—5000 nm 波长范围内背面对光器件的传输反射特性和薄膜区域的光吸收特性. 图 3(b)—(d) 中对比了加载相同厚度纳米多孔 NbN 薄膜和均匀 NbN 薄膜的器件光响应特性, 分别为器件的反射 (reflection,  $R$ ) 和传输 (transmission,  $T$ ), 及薄膜的吸收 (absorption,  $A$ ), 考虑到 MgO 衬底在目标波长范围内没有损耗, 三者之间的关系满足

$$R + T + A = 1. \quad (2)$$

从图 3 可以看出, 在目标波长范围内, 不论加载的是纳米多孔薄膜还是均匀薄膜, 器件整体的光响应都表现出了明显的随着波长变化而不断重复出现的谐振特性, 更重要的是可以观察到两种薄膜的每个谐振峰值对应的波长几乎是一致的, 只是在数值上均匀薄膜的反射较强透射较弱, 多孔薄膜则反之, 且整体上均匀薄膜的光吸收要强于多孔薄膜. 上述现象表明, 尽管通过刻蚀产生了周期为

100 nm 直径为 70 nm 的孔阵列, 但在目标波长范围内, 上述周期性孔结构对于薄膜的光学性质并没有颠覆性的改变, 利用等效媒质理论将纳米多孔薄膜等效为一定参数的均匀薄膜仍然应该是可行的, 只是需要寻找较为合理的等效方法.

通过不断的尝试, 这里给出了能较好地描述纳米多孔薄膜光响应的等效媒质理论模型. 对于两相复合媒质, 设背景媒质的体积分数和介电常数分别为  $v_1$  和  $\varepsilon_1$ , 填充粒子的体积分数和介电常数分别为  $v_2$  和  $\varepsilon_2$ , 且满足  $v_1 + v_2 = 1$ , Bruggeman 等效媒质理论的表达式为<sup>[24]</sup>

$$v_1 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_e}{\varepsilon_1 + (d-1)\varepsilon_e} + v_2 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_e}{\varepsilon_2 + (d-1)\varepsilon_e} = 0, \quad (3)$$

其中,  $\varepsilon_e$  是复合媒质的等效介电常数; 参数  $d$  反映了填充粒子形状, 球形粒子填充时  $d = 3$ , 长圆柱粒子填充时  $d = 2$ . 计算时, 背景媒质设为 NbN, 填充粒子设为空气, 并由前述薄膜结构参数计算两者各自的体积分即可.

图 4(a) 中以纳米多孔薄膜等效前后吸收率之间的绝对误差为例对不同形状参数的 Bruggeman 等效模型误差进行了分析, 结果显示,  $d = 3$  时描述球形粒子的标准 Bruggeman 模型已经具有较高

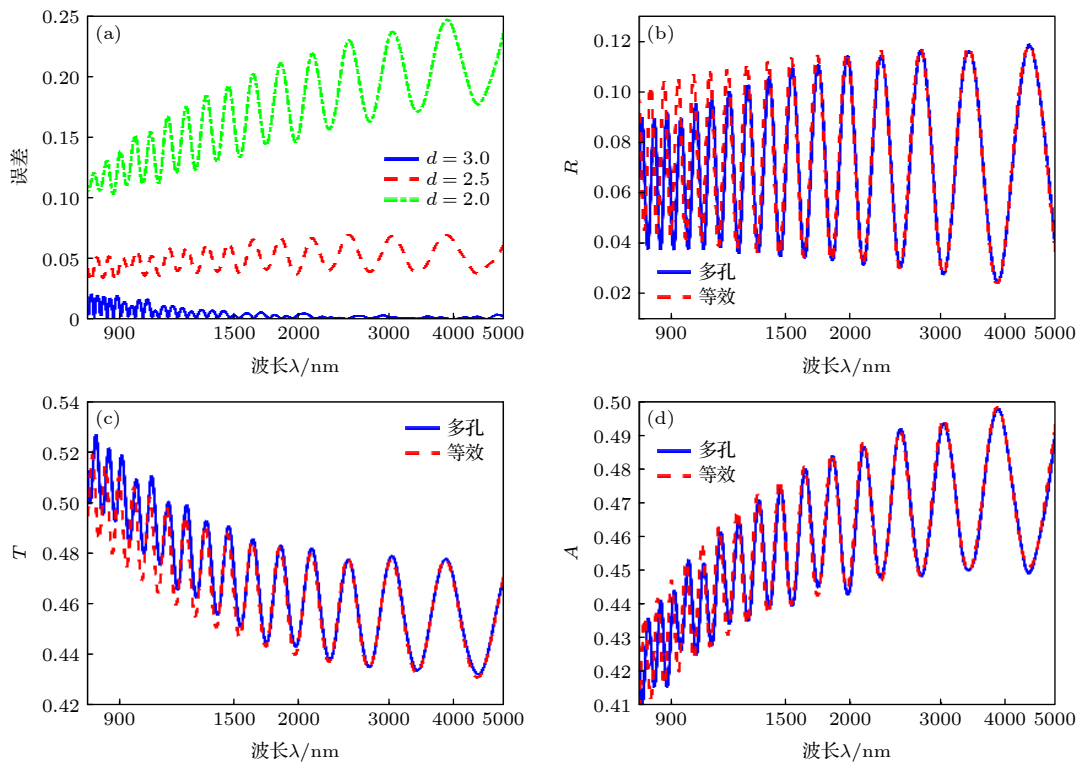


图 4 等效模型的效果分析 (a) 不同形状参数  $d$  的吸收率误差; (b) 反射 ( $d = 3$ ); (c) 透射 ( $d = 3$ ); (d) 吸收 ( $d = 3$ )

Fig. 4. Effect analysis of equivalent model: (a) Error; (b) reflection ( $d = 3$ ); (c) transmission ( $d = 3$ ); (d) absorption ( $d = 3$ ).

的精度,但并不能保证所有波段计算误差都保持恒定水平,比如总体上看中红外波段的等效精度就要明显高于近红外波段的等效精度.图4(b)—图4(d)对比了形状参数 $d=3$ 时等效前后的光响应特性,结果同样显示标准 Bruggeman 等效模型能够较为精确地描述器件整体的反射和传输,以及薄膜的光吸收,特别是在中红外波段.

在获得了精度较高的等效模型之后,可以利用下式计算均匀 NbN 薄膜和纳米多孔 NbN 薄膜的趋肤深度 $\delta$ :

$$\delta = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\varepsilon''}}, \quad (4)$$

这里的 $\varepsilon''$ 是薄膜介电常数的虚部, $\lambda$ 是波长.

如图5所示,在目标波长范围内,均匀 NbN 薄膜的趋肤深度最小约为 34.4 nm,纳米多孔 NbN 薄膜的趋肤深度最小约为 58.67 nm,两者分别约为薄膜厚度 11.5 nm 的 3.0 倍和 5.1 倍.这说明,尽管作为金属性超导材料的 NbN 具有和一般金属类似的可以用 Drude 模型描述的介电常数,但由于薄膜的厚度要远小于其趋肤深度,所以入射光可以顺利地透过薄膜.而当薄膜厚度增加到一定程度后,则可以像常用的金属反射镜那样,阻止光波的透过.

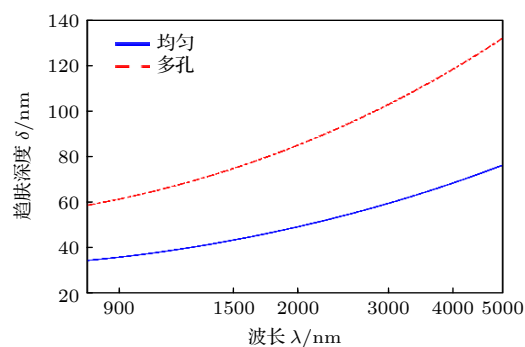


图5 NbN 薄膜的趋肤深度

Fig. 5. Skin depth of NbN film.

## 4 高光吸收率背面对光器件结构设计

得益于等效模型的便利性,可以直接将原本三维的平面周期结构设计问题简化为一维的多层膜设计问题,那么在设计具有较高光吸收率纳米多孔 NbN 薄膜器件结构时,可以直接采用 TMM 来对其光响应特性进行建模<sup>[19]</sup>.参考诸如文献<sup>[20]</sup>等的多层结构设计方案,图6(a)给出了待优化的背面对光器件结构模型,该器件由 MgO 衬底、纳米多孔 NbN 薄膜(孔内填充二氧化硅( $\text{SiO}_2$ ))以及  $\text{SiO}_2$ -氮化硅( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )-金(Au)光学反射腔结构

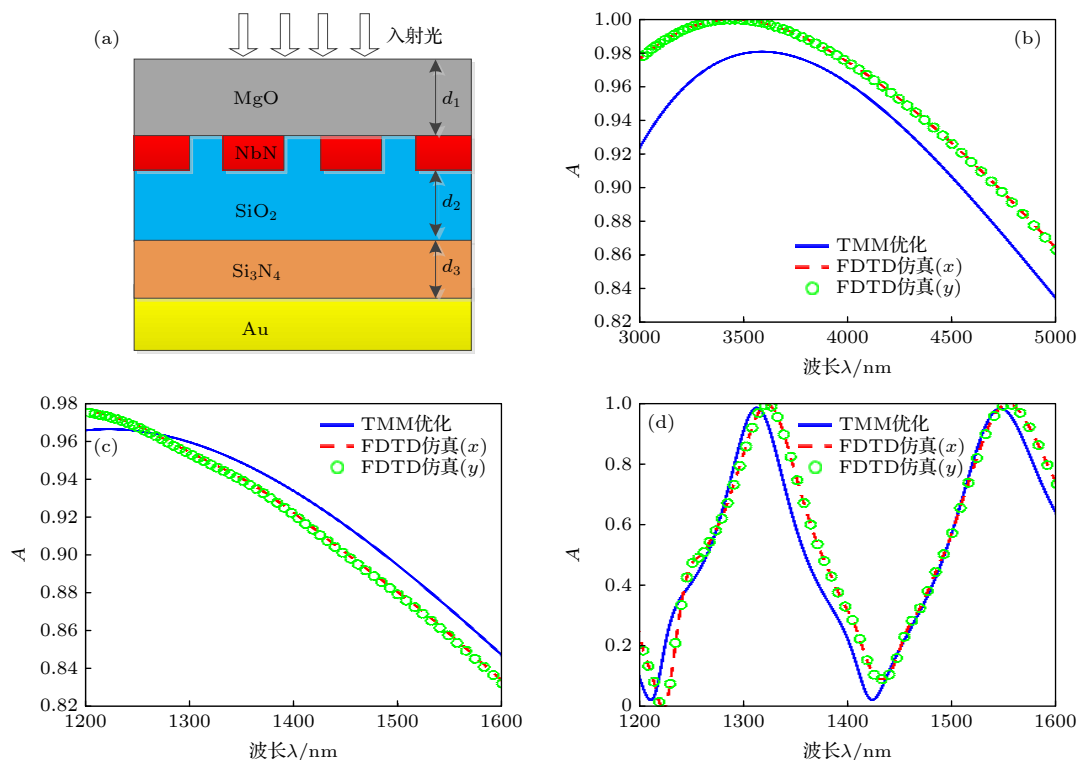


图6 背面对光器件结构优化 (a) 待优化模型; (b) 中红外宽带; (c) 近红外宽带; (d) 近红外双波长

Fig. 6. Devices structure optimization of incident light: (a) Device model; (b) broadband in mid-infrared; (c) broadband in near-infrared; (d) dual-wavelength in near-infrared.

3 部分组成. 薄膜厚度保持不变, 仍然为 11.5 nm, 通过优化 MgO 衬底的厚度  $d_1$ 、光学腔 SiO<sub>2</sub> 层和 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 层的厚度  $d_2$  和  $d_3$  来达到增强纳米多孔薄膜区域光吸收的目的. SiO<sub>2</sub> 和 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的折射率分别取 1.444 和 2<sup>[20]</sup>, MgO 的折射率取自文献 [25], 待优化的各层厚度上限设为 4000 nm. 优化算例分为宽带和双波长两类, 宽带光吸收算例入射光波长范围选取 1200—1600 nm 的近红外波段和 3000—5000 nm 的中红外波段, 双波长光吸收算例选取 1310 和 1550 nm 两个常用的光纤波长. 优化过程基于粒子群算法, 而且为了使优化算法能够更好地兼顾对未知区域的探索能力和对已知区域的挖掘能力, 这里采用了可变惯性系数  $w$ , 即

$$w = w_{\max} - \frac{(m-1) \times (w_{\max} - w_{\min})}{M-1}, \quad (5)$$

其中  $w_{\max}$  和  $w_{\min}$  为惯性权重的最大值和最小值, 分别取 0.9 和 0.4;  $m$  和  $M$  为当前的迭代次数和最大的迭代次数.

对于宽带光吸收, 在所关注的波长区间内选取  $N_\lambda$  个离散的波长, 其中光吸收小于期望值  $A_0$  的波长点个数记为  $P_\lambda$ , 则目标函数可定义为

$$ob = P_\lambda / N_\lambda. \quad (6)$$

通过优化算法在解空间中寻找上述目标函数的最小值即可, 这里取  $A_0 = 0.9$ .

对于双波长光吸收, 目标函数可定义为

$$ob = \sum_{q=1}^2 A_{\lambda_q}, \quad (7)$$

其中取  $\lambda_q$  表示吸收峰所在的期望波长, 优化时使该目标函数取最大值即可.

优化得到的结果为: 中红外宽带算例  $d_1 = 65$  nm,  $d_2 = 522$  nm,  $d_3$  厚度较小故取 0 nm 以减少层数; 近红外宽带算例  $d_1 = 47$  nm,  $d_2 = 93$  nm,  $d_3 = 32$  nm; 近红外双波长算例  $d_1 = 2673$  nm,  $d_2 = 2485$  nm,  $d_3 = 305$  nm. 从图 6(b)—图 6(d) 中的光吸收率曲线对比可以看出, 通过较为简单的多层结构和光学腔加载的设计, 既可以分别得到在 1200—1600 nm 的近红外波段和 3000—5000 nm 的中红外波段内纳米多孔薄膜光吸收率均大于 82% 的探测器结构, 也可以得到在 1310 和 1550 nm 波长处光吸收均大于 93.7% 的探测器结构, 并且与三维器件模型的 FDTD 仿真结果之间的良好符合也验证了这些设计的正确性. 同时可以注意到,

不论入射电场分量是沿  $x$  方向还是  $y$  方向极化, 所得到的薄膜光吸收率几乎完全一致, 主要原因是纳米多孔薄膜本身在结构上就具有天然的极化不敏感特性, 这和本身结构就具有极化敏感性的纳米线正好相反. 此外, 尽管这里所用的 Bruggeman 公式足够简单且计算精度也比较好, 但在上述算例中等效误差还是存在的并且会带来一定的问题, 比如图 6(d) 中等效前后谐振波长在 1310 nm 处发生了一定的偏移, 使得设计的 98.3% 吸收率掉到了仿真的 93.7%. 因此, 如何在尽可能保持等效模型简便性的基础上, 进一步提高其计算精度仍然是一个可以研究的问题.

## 5 结 论

本文研究了纳米多孔 NbN 薄膜在 780—5000 nm 近、中波长范围内的光响应特性. 首先通过使用 Drude 模型对近红外波段内实验测得的 NbN 介电常数进行拟合, 在将拟合精度提高了约 17% 的基础上, 计算得到了中红外波段内的 NbN 光学参数. 进而通过研究加载纳米多孔 NbN 薄膜的背面对光器件的传输反射特性, 给出了能较好地描述纳米多孔薄膜的 Bruggeman 等效媒质理论模型. 进而, 将等效模型与 TMM 相结合, 在近、中红外波段对加载光学腔的背面对光器件结构进行了宽带光吸收和双波长光吸收的优化. 结果显示: 一方面, 一维优化结果和三维验证结果符合良好; 另一方面, 纳米多孔 NbN 薄膜的光吸收率在近、中红外宽带设计时均大于 82%, 在近红外双波长设计时均大于 93.7%, 并且薄膜结构本身就具有天然的极化不敏感特性. 此外, 鉴于目前等效模型还存在一定的误差, 后续研究可以考虑进一步提高其精度.

## 参考文献

- [1] Hu W D, Li Q, Chen X S, Lu W 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 120701 (in Chinese) [胡伟达, 李庆, 陈效双, 陆卫 2019 物理学报 **68** 120701]
- [2] Lovell D 1969 *Am. J. Phys.* **37** 467
- [3] Lawson W, Nielsen S, Putley E, Young A 1959 *J. Phys. Chem. Solids* **9** 325
- [4] Esaki L, Tsu R 1970 *IBM J. Res. Dev.* **14** 61
- [5] 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
- [6] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, Jiang D, Zhang Y, Dubonos S V, Grigorieva I V, Firsov A A 2004 *Science* **306**

666

- [7] Yang L, Jacob Z 2019 *Opt. Express* **27** 10482
- [8] Yang L, Jacob Z 2019 *J. Appl. Phys.* **126** 174502
- [9] Yang L, Jacob Z 2020 *NPJ Quantum Inf.* **6** 76
- [10] Sondhi S L, Girvin S M, Carini J P, Shahar D 1997 *Rev. Mod. Phys.* **69** 315
- [11] Li L 2018 *M. S. Thesis* (Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China) (in Chinese) [李岚 2018 硕士学位论文 (成都: 电子科技大学)]
- [12] Kapitulnik A, Kivelson B, Spivak B 2019 *Rev. Mod. Phys.* **91** 011002
- [13] Yang C, Liu Y, Wang Y, Feng L, He Q M, Sun J, Tang Y, Wu C C, Xiong J, Zhang W L, Lin X, Yao H, Liu H W, Fernandes G, Xu J, Valles J M, Wang Jian, Li Y R 2019 *Science* **366** 1505
- [14] Chen Z Y, Wang B Y, Swartz A G, Yoon H, Hikita Y, Raghu S, Hwang H Y 2021 *npj Quantum Mater.* **6** 1
- [15] Chen Z, Liu Y, Zhang H, Liu Z R, Tian H, Sun Y Q, Zhang M, Zhou Y, Sun J R, Xie Y W 2021 *Science* **372** 721
- [16] Wu Y, Chen Q, Xu R Y, Ge R, Zhang B, Tao X, Tu X C, Jia X Q, Zhang L B, Kang L, Wu P H 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 248501 (in Chinese) [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 2018 *物理学报* **67** 248501]
- [17] Echtermeyer T, Milana S, Sassi U, Eiden A, Wu M, Lidorikis E, Ferrari A C 2016 *Nano Lett.* **16** 8
- [18] Hu X L, Cheng Y H, Gu C, Zhu X T, Liu H Y 2015 *Sci. Bull.* **60** 1980
- [19] Sunter K A, Berggren K K 2018 *Appl. Opt.* **57** 4872
- [20] Zheng F, Xu R Y, Chen Y J, Zhu G H, Jin B B, Kang L, Xu W W, Chen J, Wu P H 2017 *IEEE Photonics J.* **9** 4502108
- [21] Wu Y 2018 *M. S. Thesis* (Nanjing: Nanjing University) (in Chinese) [吴洋 2019 硕士学位论文 (南京: 南京大学)]
- [22] Hu X L 2011 *Ph. D. Dissertation* (Cambridge: Massachusetts Institute of Technology)
- [23] Hu X L, Marsili F, Najafi F, Berggren K K 2010 *Proceedings of Quantum Electronics and Laser Science Conference* San Jose, USA, May 16–21, 2010 pQThD5
- [24] Khardani M, Bouaïcha M, Bessaïs B 2007 *Phys. Status Solidi C* **4** 1986
- [25] Stephens R E, Malitson I H 1952 *J. Res. Nat. Bur. Stand.* **49** 249



# Infrared broadband photoresponse characteristics of nanoporous NbN film<sup>\*</sup>

Zhao Yu-Chen<sup>1)</sup> Zheng Jia-Huan<sup>1)</sup> Wang Yong<sup>2)</sup><sup>†</sup>

Xi Xiao-Li<sup>1)</sup><sup>‡</sup> Song Hai-Zhi<sup>3)</sup><sup>††</sup>

1) (*Institute of Advanced Navigation and Electromagnetics, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*)

2) (*State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China*)

3) (*Norla Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China*)

( Received 10 September 2021; revised manuscript received 25 October 2021 )

## Abstract

Nanoporous superconducting films with superconductor-insulator transition characteristics have potential application in the field of infrared photoelectric detection, but their broadband optical response characteristics in infrared band have not been reported. Therefore, taking nanoporous niobium nitride (NbN) films as the main object, the optical response characteristics in the near and medium infrared wavelength range of 780–5000 nm are studied in this paper. Firstly, the Drude-model fitting accuracy of measured NbN permittivity is improved by about 17%, and the NbN optical parameters in mid-infrared band are obtained. Furthermore, the optical response characteristics of the back-illuminated device with nanoporous NbN film are analyzed by finite difference time domain method, and a Bruggeman equivalent model which can simplify the nanoporous film into a uniform film is given, thereby reducing the three-dimensional simulation of nanoporous NbN film into one dimensional simulation. Finally, based on the equivalent model and the transfer matrix method, the light absorption characteristics of the back-illuminated device in near-/mid-infrared wavelength ranges are optimized. The results indicate that, on the one hand, simplifying the design process by using Bruggeman equivalent model will not affect the correctness of the final optimization results, and, on the other hand, a relatively simple optical cavity can make the detector achieve polarization-independent film absorption greater than 82% for near-/mid-infrared broadband design and 93.7% for double-wavelength design.

**Keywords:** nanoporous NbN film, infrared broadband photoresponse, Bruggeman theory, device structure design

**PACS:** 85.25.Am, 85.25.Pb, 85.60.Gz, 07.57.Kp

**DOI:** 10.7498/aps.71.20211694

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61971346) and the Science Foundation of Xi'an University of Technology, China (Grant Nos. 103-451319009, 103-451420002).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [ywang@uestc.edu.cn](mailto:ywang@uestc.edu.cn)

<sup>‡</sup> Corresponding author. E-mail: [xixiaoli@xaut.edu.cn](mailto:xixiaoli@xaut.edu.cn)

<sup>††</sup> Corresponding author. E-mail: [hzsong1296@163.com](mailto:hzsong1296@163.com)