

基于锥形硅纳米线色彩分辨探测能力仿真

孙浚凯 王军转 施毅

Simulation of color discrimination and detection capability of coned silicon nanowire device

Sun Jun-Kai Wang Jun-Zhuan Shi Yi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 116103 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20202031

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202031>

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

基于石墨烯-钙钛矿量子点场效应晶体管的光电探测器

Field effect transistor photodetector based on graphene and perovskite quantum dots

物理学报. 2018, 67(11): 118502 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180129>

基于二维材料二硒化锡场效应晶体管的光电探测器

Field effect transistor photodetector based on two dimensional SnSe₂

物理学报. 2020, 69(13): 137801 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191960>

具有光电倍增的宽光谱三相体异质结有机彩色探测器

Organic color photodetectors based on tri-phase bulk heterojunction with wide spectrum and photoelectronic multiplication

物理学报. 2018, 67(19): 198503 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180502>

低维半导体偏振光探测器研究进展

Recent progress in polarization-sensitive photodetectors based on low-dimensional semiconductors

物理学报. 2019, 68(16): 163201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191002>

基于超导纳米线单光子探测器深空激光通信模型及误码率研究

Model of bit error rate for laser communication based on superconducting nanowire single photon detector

物理学报. 2017, 66(19): 198501 <https://doi.org/10.7498/aps.66.198501>

氮化物子带跃迁探测器材料结构对器件效率的影响

Effects of material structure on device efficiency of III-nitride intersubband photodetectors

物理学报. 2019, 68(22): 228501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190722>

基于锥形硅纳米线色彩分辨探测能力仿真

孙浚凯 王军转[†] 施毅

(南京大学电子科学与工程学院, 南京 210023)

(2020年12月2日收到; 2021年1月20日收到修改稿)

基于拜尔滤波片 (bayer filter) 彩色成像技术在集成度和分辨率都已经接近极限, 无滤波片 (filter-free) 的彩色成像单元得到广泛的关注和研究. 纳米线自身腔模式可以实现对不同能量的光空间分布, 通过对纳米线形貌调控实现色彩分辨探测. 本文使用有限元法构建了能依靠自身结构完成分光目的, 能够作为光探测器的锥形纳米线器件. 数值模拟结果显示, 能够根据器件的顶半径、底半径、长度和材料等相关参数调整器件涵盖的波长范围和分辨率等重要参数, 并具体分析了如何进行调控. 同时进一步分析了该结构在实际制备器件时以及不同角度入射光下的器件性能. 这些研究结果对于将锥形结构纳米线作为光探测器的实际应用有重要的参考意义.

关键词: 锥形纳米线, 光探测器, 腔模式**PACS:** 61.82.Fk, 85.30.De, 81.07.Gf**DOI:** 10.7498/aps.70.20202031

1 引言

在传统的硅工艺中, 电荷耦合器件 (charge-coupled device, CCD) 色彩探测实现模式中, 需要在感光层上覆盖一层滤波阵列才能实现对 RGB 三原色的选择性识别. 主要利用分色镜阵列, 也就是传统的 R, G, B 滤光片, 一般四个滤光片组成一组形成一个像素, 该层对光谱颜色进行区分, 并将不同颜色的光传递到下一层的 CCD 阵列中, 而最底层的 CCD 阵列层, 主要作用是用于感光、存储并转移光生电荷. 尽管其器件性能一直有所突破^[1], 但仍受制于传统 CCD 的结构. 到目前为止, 其集成度与分辨率都已经逼近极限, 而且受限于光波衍射效应已经很难再有突破.

随着微加工工艺的发展, 依靠一些纳米结构可以实现亚波长尺寸下的波长选择功能, 例如: 金属纳米结构通过等离子共振可以实现亚波长滤光^[2], 半导体纳米线依靠能带工程依靠禁带渐变可

以实现波长分析^[3,4]; 与此同时, 纳米线作为光探测器具有广阔的应用前景, 具有以形貌和几何尺寸调节吸收的出色能力^[5-9]. 与等离子激元相比, 硅纳米线 (silicon nanowires, SiNW) 具有的主要优势在于, 由于金属和掺杂半导体中的自由电子密度大, 等离子激元通常与高损耗相关, 在 SiNW 中未观察到这种高损耗^[10,11]. 目前使用较多的方法如利用径向结方式制备光电探测器, 多采用掺杂、涂覆、生长等方式在 SiNW 外再增加一层以形成径向 PN 结^[12-14], 或采用纳米线阵列^[6,12]及其他结构, 如谐振器、异质结等^[15-19], 大多需要较复杂的工艺. 而 Sumetsky^[20]发现, 小角度介电锥可以用作完全限制光的光学微谐振器. 通常沿圆锥形表面传播的射线在圆锥体的较窄侧上是有界的, 而在其较宽的侧面上是无界的, 因此任何不平行于圆锥体轴发射的射线最终都会移动到无穷远处. 但是, 对于小角度的介电锥, 由于回音壁模式 (whispering gallery modes, WGM) 效应, 可以约束光束在锥内的位置. 根据介电锥的这种特性, 利用锥形 SiNW

[†] 通信作者. E-mail: wangjz@nju.edu.cn

制备光电探测器, 由于其自身结构能够将不同波长的光约束在不同位置, 已经具备了分光能力, 而 SiNW 自身也具有良好的光吸收能力 [21–23]. 因此我们认为利用锥形 SiNW 自身的结构和性质就能够直接制备无滤波片 (filter-free) 的色彩分辨探测器件, 并进行了仿真验证, 展示了纳米线自身腔模式色彩分辨能力以及线上集成宽光谱探测的潜力.

2 锥形纳米线模型

首先构建的锥形硅纳米线结构是两端为平整端面, 顶半径 (r_1) 与底半径 (r_2) 分别为 20 nm 和 80 nm, 长度 (L) 为 2000 nm, 材料为单晶硅的锥形纳米线, 理想器件结构示意图如图 1(a) 所示, 当入射光从纳米锥尖端入射后, 由于 WGM 效应, 特定波长的入射光将会被拘束在锥形纳米线的特定位置, 如图 1(b) 所示. 为了进一步探讨锥形纳米线的结构及材料对纳米锥作为探测器性能的影响, 对顶半径、底半径、长度及材料进行了调整, 按照不同的组合方式得到不同的锥形纳米线结构. 同时考虑到纳米线实际作为器件的情况, 也对增加衬底以及电极的情况下进行仿真计算. 通过有限元法, 利用电场模拟光场, 调整入射光的波长、偏振方向和入射方向等因素, 仿真计算锥形纳米线器件在不同的外界条件下具体的工作状态及结果, 并依此讨论得出锥形纳米线器件的最佳使用条件.

3 数值仿真结果和讨论

首先验证了尺寸为 $r_1 = 20/r_2 = 80/L = 2000$ nm 的锥形硅纳米线器件. 沿纳米锥轴向从尖端给予不同波长的入射光, 入射波长分别为 450, 550 和 650 nm. Cao 等 [8] 已经证明粗细均匀的硅纳米线对光的吸收主要取决于半径. 观察不同波长入射光光场在器件 1 ($r_1 = 20$ nm/ $r_2 = 80$ nm/ $L = 2000$ nm) 内的分布, 如图 2(a) 分别为 450, 550 和 650 nm 的入射光在锥形纳米线内部的分布情况, 从图中可以明显地看到不同波长的入射光被约束在纳米线的不同位置, 同时它们的吸收区域也大致相同, 如图 2(b) 所示, 这证明锥形纳米线器件具备分光能力, 不同波长的光被约束在锥形纳米线的不同位置, 而这很可能是由不同位置半径不同所决定的. 因此通过改变器件的半径以及长度来进行验证, 如表 1 所列, 当入射波长为 550 nm 时, 对于三个尺寸不同的器件 (器件 1, 2, 3) 来说, 吸收峰值处的截面直径基本相同, 为 107 nm 左右. 而 500 和 550 nm 的吸收峰值所处位置的距离也差距较大, 器件 1, 2, 3 的半径随纳米线位置不同的变化速率分别为 3 nm/100 nm, 4 nm/100 nm, 2.4 nm/100 nm, 而 500 和 550 nm 的吸收峰值所处位置的距离同样是 $2 < 1 < 3$, 这说明锥体回音壁模式与其他微腔相同, 同样需要光程是波长的整数倍以满足其共振条件, 对于锥体来说, 条件 $2\pi Rn = m\lambda$ 中,

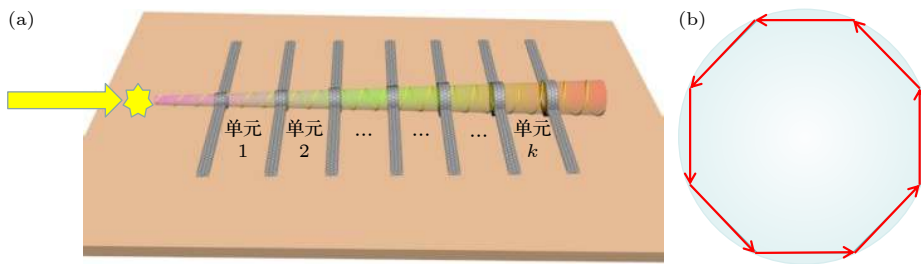


图 1 (a) 锥形纳米线器件结构示意图; (b) 回音壁模式原理示意图

Fig. 1. (a) Schematic diagram of the Si nano-cone device; (b) the whispering gallery mode.

表 1 在具有不同几何结构的器件中, 不同波长的入射光吸收最大值位置比较

Table 1. Comparisons of the max absorption position in different size devices with different geometry.

	器件1/nm			器件2/nm			器件3/nm		
	$r_1 = 20$	$r_2 = 80$	$L = 2000$	$r_1 = 20$	$r_2 = 100$	$L = 2000$	$r_1 = 20$	$r_2 = 80$	$L = 2500$
500 nm入射光吸收峰值直径/nm	92			94			90		
550 nm入射光吸收峰值直径/nm	106			107			107		
两峰值距离/nm	234			172			325		

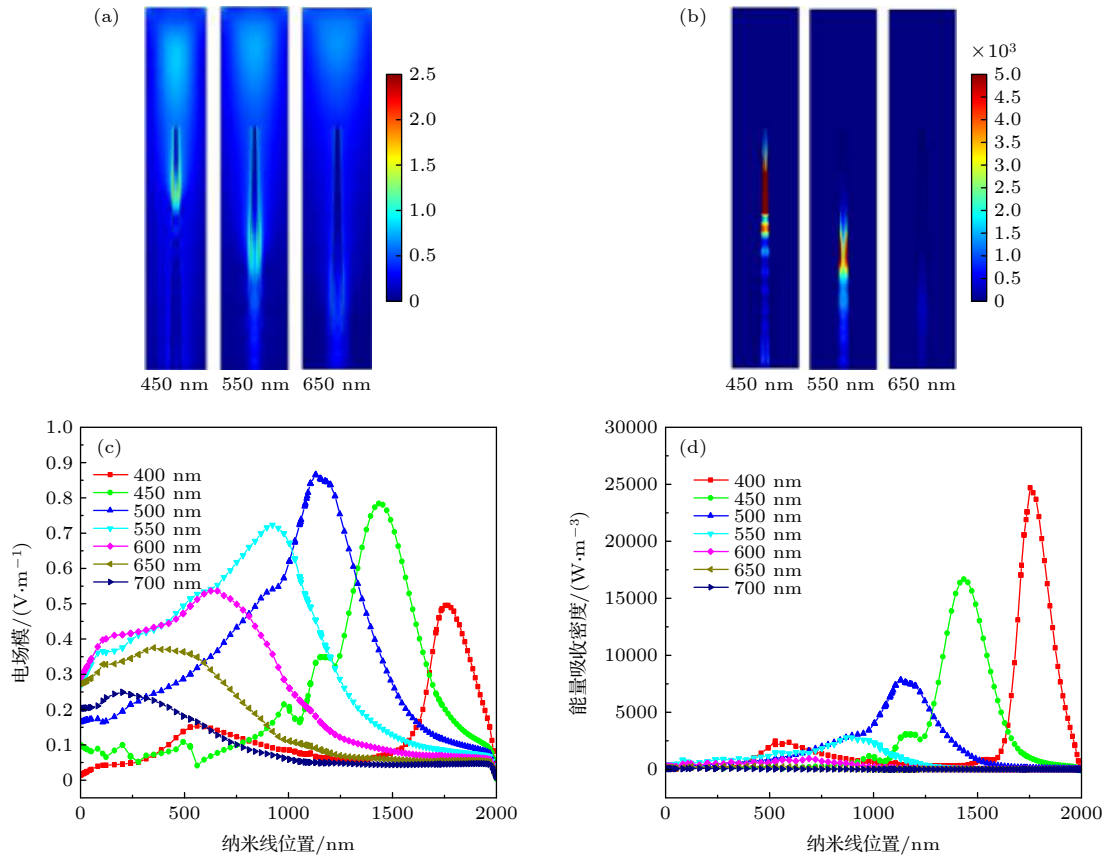


图 2 (a) 入射光为 450 nm/550 nm/650 nm 时的光场分布; (b) 入射光为 450 nm/550 nm/650 nm 时的吸收分布; (c) 不同入射光在器件轴线上的光场模分布曲线; (d) 不同入射光在器件轴线上的吸收密度分布曲线
 Fig. 2. The simulation results of the light field distribution (a) and the absorption (b) with the wavelength of 450, 550 and 650 nm, respectively. The light field distribution (c) and absorption (d) of the typical incident wavelength along the axial of Si nano-cone.

R 为吸收处所在截面半径, λ 为入射光波长, n 为对应波长折射率, m 为常数. 因此可以通过改变锥形硅半径的范围和变化速率, 进而改变器件的分辨率和覆盖波长范围, 得到我们需要的器件.

考虑到实际器件制备时需要制备在衬底上. 因此也考虑了增加衬底情况, 加入二氧化硅衬底后, 首先验证了入射光条件不变的情况并与无衬底器件进行比较. 在加入衬底后, 对于相同入射波长 (550 nm), 两个器件的吸收峰值位置并没有发生改变, 仍处于相同位置, 峰值处截面直径约为 107 nm. 但是衬底器件的吸收要好于无衬底器件, 如表 2 所列, 衬底器件的光场吸收约是无衬底器件的 1.08 倍, 能量吸收约是 1.16 倍, 证明加上衬底后, 纳米线对光的吸收和转化效率都更高了, 这可能是由于锥形纳米线与衬底之间的间隙反射了部分光入射纳米线, 这一部分超过了从衬底泄露的能量. 之后改变了入射光的偏振角度, 使入射光的偏振方向平行于衬底并与纳米线中心轴线垂直. 我们

发现, 带有衬底的器件, 当入射光偏振方向为水平方向时, 光场和能量吸收约是无衬底器件的 1.14 和 1.30 倍, 提高量相比垂直偏振增加了 1 倍, 这可能是由于偏振方向水平时, 衬底的光泄露减弱了, 从而使得其增量增加.

表 2 无衬底器件与有衬底器件对入射光能量吸收积分对比

Table 2. The total absorption of the nano-cone devices with or without substrate.

入射光波长 550 nm	无衬底器件	衬底器件(入射光偏振垂直衬底)	衬底器件(入射光偏振平行于衬底)
与无衬底器件 比值 (光场)	1	1.08	1.14
与无衬底器件 比值 (吸收)	1	1.16	1.30

同时也考虑了器件是否能应对不同角度的入射光, 因此通过旋转纳米锥器件来模拟入射光从不同角度入射的情况. 如图 3 以 500 nm 入射光为例, 当入射角度较小时, 无论对光场分布还是吸收分

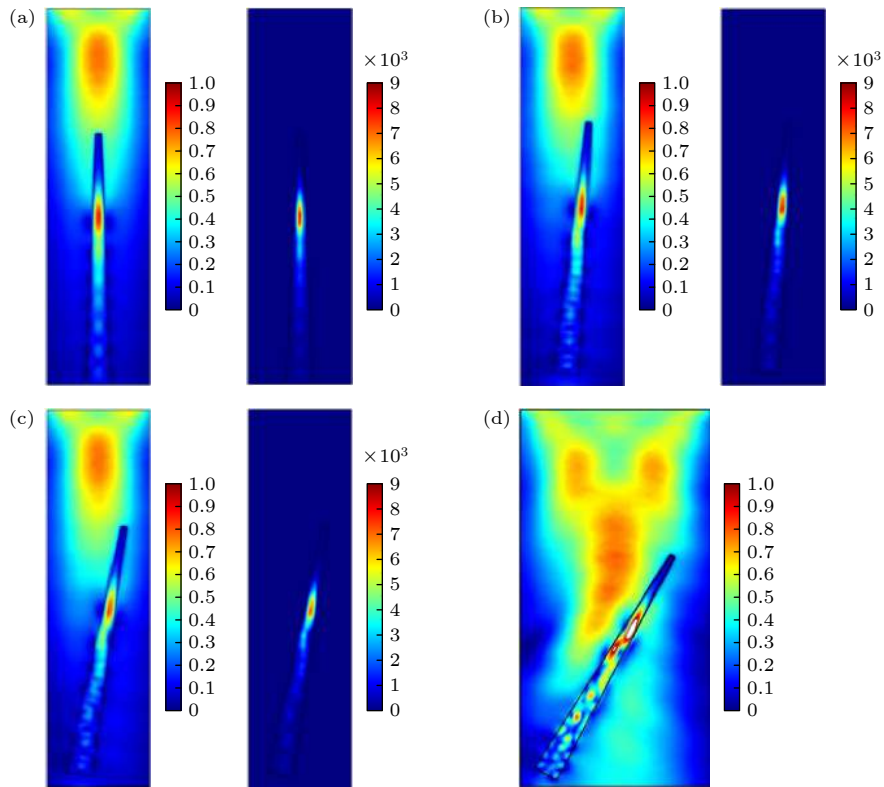


图 3 (a) 入射光沿轴线入射时光场分布 (左) 及吸收分布 (右); (b) 入射光 5° 入射时光场分布 (左) 及吸收分布 (右); (c) 入射光 10° 入射时光场分布 (左) 及吸收分布 (右); (d) 入射光 30° 入射时光场分布

Fig. 3. The simulation results of the light field distributions (left) and the absorption (right) with wavelength of 500 nm when the incident angle is (a) 0°, (b) 5° (c) 10°, and (d) 30°.

布, 影响都相对较小. 当角度逐渐增大时, 其对于光场分布的影响逐渐明显, 但是对于吸收来说, 纳米线的吸收中心区域并没有发生太大的变化, 对应波长的吸收位置在轴线上的相对位置几乎没有发生改变, 因此对于纳米锥器件的分辨率和精度影响较小. 但当入射角过大如达到 30° 的入射角度时, 可以明显地发现, 器件会几乎失去波长选择的能力. 因此当实际制备及使用器件时, 要控制入射光以一个相对较小的角度耦合入射以保证器件的正常工作.

改变入射光角度除了会改变入射光分布以外, 也会影响锥形硅器件对光的吸收. 图 4 探究了不同波长的入射光在不同入射角度的情况下其吸收强度密度的变化. 从图 4 可以观察到, 不同波长的入射光在不同角度下入射时, 其吸收强度的变化趋势基本完全相同. 以 500 nm 入射光为例, 当入射角度在 10° 以下时, 不同的入射角度对吸收强度的影响很小, 而一旦超过 10°, 其吸收强度会发生较大的变化. 尽管当入射角度增加时, 其吸收强度会增加, 但是同时其光场分布也会发生改变, 锥形硅也

失去了波长选择的能力. 而锥形硅器件作为具有色彩分辨探测能力的器件, 最核心和基本的能力就是其波长选择能力, 因此仍要保证入射光以 10° 以下小角度入射纳米锥器件.

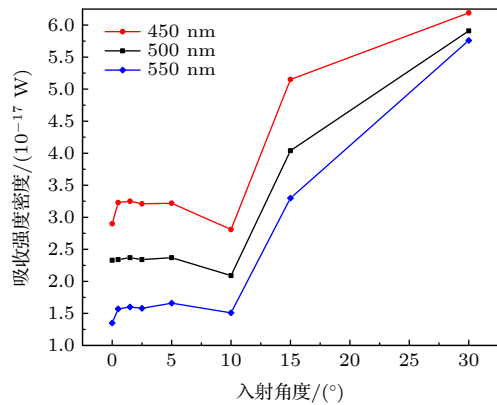


图 4 不同波长入射光在不同入射角度下锥形硅的能量吸收密度

Fig. 4. The energy absorption density of typical incident light with different incident angles.

单根纳米线做光电器件时, 使用金属电极往往会引起比较大的损耗, 因此模拟了石墨烯做电极

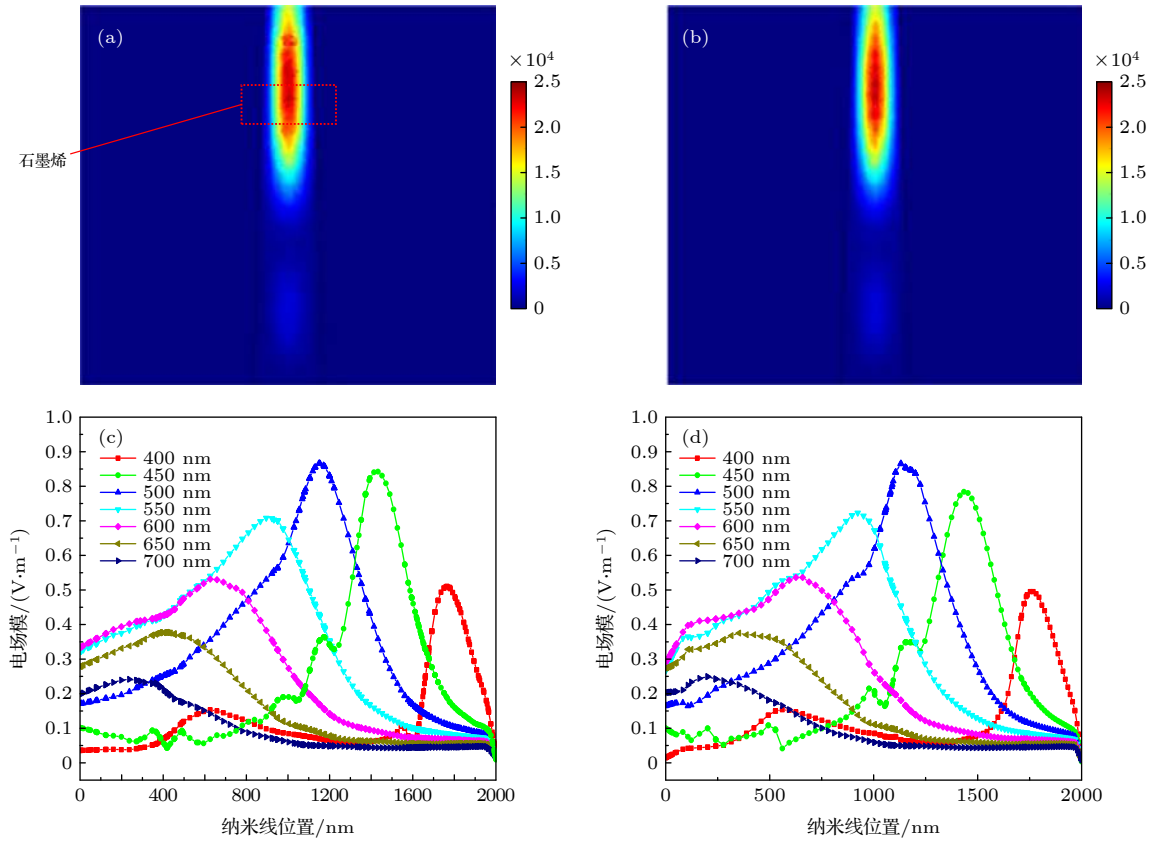


图 5 入射光波长为 420 nm 时有石墨烯电极器件 (a) 和无石墨烯电极器件 (b) 光场分布对比; (c) 不同入射光在有石墨烯电极器件轴线上的光场分布曲线; (d) 不同入射光在无石墨烯电极器件轴线上的光场分布曲线

Fig. 5. (a) Comparisons of light field distribution between devices with (a) and without (b) graphene electrodes under incident light of with 420 nm. Light field distribution with typical incident light along the axis of nano-cone devices with (c) and without (d) graphene electrodes.

的情况, 在尺寸为 $r_1 = 20 \text{ nm}/r_2 = 80 \text{ nm}/L = 2000 \text{ nm}$ 的锥形硅纳米线器件上, 距顶端分别为 1600 和 200 nm 处添加 20 nm 宽的石墨烯电极. 首先在光吸收的位置上, 增加石墨烯电极后位置并没有发生改变. 在能量吸收方面, 计算了所有波长的入射光在纳米线内部的能量吸收. 发现当且仅当吸收位置在石墨烯电极附近时, 能量吸收会略小于无石墨烯电极的能量吸收, 约 0.05% (如图 5). 那么即使制作较密集的石墨烯电极, 总吸收损耗影响也较小. 并且石墨烯电极对光吸收位置即器件分辨率等也没有影响, 可以认为石墨烯是合适的电极材料.

当制备获得实际器件后, 该锥形纳米线器件可以利用归一化吸收谱与实际测量得到的电流值 I_i (I_i 表示在不同位置实际测量光电流), 计算重构入射光谱 [24,25]. 归一化吸收谱 $R_i(\lambda)$ 如图 6 所示, 其中 ($i = 1, 2, 3, 4 \dots n$), 表示纳米线上不同位置对不同波长入射光的吸收能力. 可以发现, 在锥形纳

米线沿轴线方向, 不同位置的吸收峰有较大差别, 这样当未知光谱 $F(\lambda)$ 入射时, 通过测量不同电极间的光电流 I_i 并进行数据处理, 然后通过求解线性方程 $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \cdot R_i(\lambda) d\lambda = I_i, (i = 1, 2, 3 \dots)$, 以重建光谱 $F(\lambda)$.

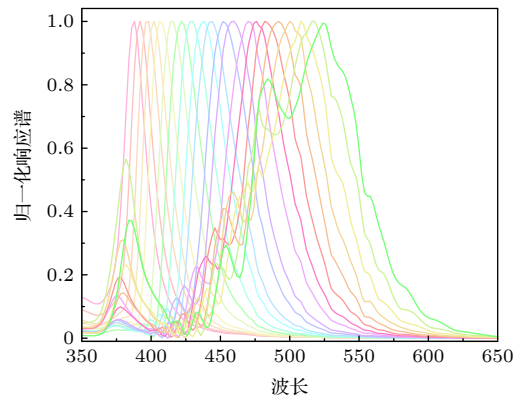


图 6 锥形纳米线器件归一化响应谱仿真结果

Fig. 6. The simulation results of normalized response spectrum of a nano-cone device.

不仅是硅,事实上其他材料也可以通过锥形结构实现自结构的光电探测器.为了探究不同材料带来的影响,仿真计算了锥形锗纳米线的情况.首先,由于 Ge 的 n/k 值与 Si 相差较大且禁带宽度更窄,因此我们猜想 Ge 能够吸收的光波长更长,并依此确定模型的基本尺寸 ($r_1 = 30 \text{ nm}/r_2 = 130 \text{ nm}/L = 2000 \text{ nm}$).仿真结果证明了我们的猜想,该尺寸的 Ge 纳米锥在靠近尖端的位置即可吸收 800 nm 的入射光,并且能够吸收波长更长的红外光,其光场分布曲线与吸收曲线与 Si 纳米线相似,主要区别在于吸收波段不同.这证明除了改变器件尺寸以外,还可以通过改变材料来覆盖不同波段的光,以更贴近我们的实际需求.

4 结 论

本文证明了锥形纳米线能够依靠自身结构完成分光,达到作为光探测器的基本要求.通过有限元法进行模拟,其结果显示,锥形器件的性能主要由自身结构决定,不需要进行复杂工艺.分析和探索了器件的尺寸包括顶半径、底半径、长度以及材料等对于器件性能的影响以及在实际工作情况下的性能.这些研究对于将锥形硅制备为光探测器具有一定的参考价值.

参考文献

- [1] Lim S J, Leem D S, Park K B, et al. 2015 *Sci. Rep.* **5** 7708
- [2] Kumar K, Duan H, Hegde R S, Koh S C, Wei J N, Yang J K 2012 *Nat. Nanotechnol.* **7** 557
- [3] Yang Z, Albrow-Owen T, Cui H, et al. 2019 *Science* **365** 1017
- [4] Zheng B J, Li L F, Wang J Z, Zhuge M H, Su X, Xu Y, Yang Q, Shi Y, Wang X M 2020 *Adv. Opt. Mater.* **8** 2000191
- [5] Park H, Dan Y, Seo K, Yu Y J, Duane P K, Wober M, Crozier K B 2014 *Nano Lett.* **14** 1804
- [6] Seo K, Wober M, Steinvurzel P, Schonbrun E, Dan Y, Ellenbogen T, Crozier K B 2011 *Nano Lett.* **11** 1851
- [7] Park H, Crozier K B 2013 *Sci. Rep.* **3** 2460
- [8] Cao L, Fan P, Barnard E S, Brown A M, Brongersma M L 2010 *Nano Lett.* **10** 2649
- [9] Meng J J, Cadusch J J, Crozier K B 2020 *Nano Lett.* **20** 320
- [10] Sherif S M, Elsayed M Y, Shahada L A, Swillam M A 2019 *Appl. Phys. A* **125** 769
- [11] Kim S K, Day R W, Cahoon J F, Kempa T J, Song K D, Park H G, Lieber C M 2012 *Nano Lett.* **12** 4971
- [12] Um H D, Solanki A, Jayaraman A, Gordon R G, Habbal F 2019 *ACS Nano* **13** 11717
- [13] Yu L, Misra S, Wang J, Qian S, Foldyna M, Xu J, Shi Y, Johnson E, Cabarrocas P R 2014 *Sci. Rep.* **4** 4357
- [14] Lu J, Qian S, Yu Z, Misra S, Yu L, Xu J, Shi Y, Roca i Cabarrocas P, Chen K 2015 *Opt. Express* **23** A1288
- [15] Jiang Y, Zhai H, Cao W, Yang H, Liu H 2016 *Electron. Mater. Lett.* **12** 841
- [16] Ming T, Schleusener A, Yermukhamed D, Dietzek B, Sivakov V 2019 *Mater. Res. Express* **6** 2053
- [17] Ling C, Guo T, Shan M, Zhao L, Sui H, Ma S, Xue Q 2019 *J. Alloys Compd.* **797** 1224
- [18] Liang F X, Zhao X Y, Jiang J J, Hu J G, Xie W Q, Lü J, Zhang Z X, Wu D, Luo L B 2019 *Small* **15** e1903831
- [19] Yu Z, Qian S, Yu L, Misra S, Zhang P, Wang J, Shi Y, Xu L, Xu J, Chen K, Rocai Cabarrocas P 2015 *Opt. Express* **23** 5388
- [20] Sumetsky M 2011 *Opt. Lett.* **36** 145
- [21] Solanki A, Gentile P, Calvo V, Rosaz G, Salem B, Aimez V, Drouin D, Pauc N 2012 *Nano Energy* **1** 714
- [22] Ajiki Y, Kan T, Yahiro M, Hamada A, Adachi J, Adachi C, Matsumoto K, Shimoyama I 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 151102
- [23] Dhyani V, Jakhar A, Wellington J J, Das S 2019 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **52** 425103
- [24] Bao J, Bawendi M G 2015 *Nature* **523** 67
- [25] Kurokawa U, Choi B I, Chang C C 2011 *IEEE Sens. J.* **11** 1556

Simulation of color discrimination and detection capability of coned silicon nanowire device

Sun Jun-Kai Wang Jun-Zhuan[†] Shi Yi

(*School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China*)

(Received 2 December 2020; revised manuscript received 20 January 2021)

Abstract

Filterless color discriminative imaging system is greatly demanded, with the pixel size shrinking to subwavelength. Nanowires have broad applications in photodetectors and have excellent ability to discriminate color by the cavity mode effect due to its well-controlled geometry. Here we use the finite element method to simulate a coned nanowire device which can split the light as well as serve as a photodetector array. The numerical simulation results show that the important parameters such as the wavelength range and resolution realized by the device can be modulated by the top radius, bottom radius, length, and material as well. And we also analyze how the surroundings and the incident angle affect the performance of the device. These results have important reference significance for the practical application of tapered nanowires as photodetectors.

Keywords: coned nanowire, photodetector, cavity mode

PACS: 61.82.Fk, 85.30.De, 81.07.Gf

DOI: [10.7498/aps.70.20202031](https://doi.org/10.7498/aps.70.20202031)

[†] Corresponding author. E-mail: wangjz@nju.edu.cn