

特邀专稿

DOI:10.19453/j.cnki.1005-488x.2023.03.001

具有多层带隙结构的半导体pin结光谱探测性能的研究*

李 青^{1,5**}, Omolola E. Fayemi², 徐 俊³, 吴 琨³, 周建明⁴, 雷 威^{1,5}

(1. 东南大学 电子科学与工程学院, 信息显示与可视化国际合作实验室, 南京 210018; 2. Department of Chemistry, Faculty of Natural and Agricultural Sciences, North-West University (Mafikeng 5 Campus), Private Bag X2046, Mmabatho 2735, South Africa; 3. 南京普爱医疗设备股份有限公司, 南京 211111; 4. 苏州奕赫光电子科技有限公司, 江苏 苏州 215100; 5. 石城实验室 南京 210024)



作者简介: 李 青(1964—), 博士, 教授, 博士生导师, 从事纳米材料探测器件及液晶光电子器件的研究。(E-mail: liqing@seu.edu.cn)

摘 要: 深入研究了宽谱入射光的吸收、光生载流子产生, 以及光生载流子的输运和复合的物理过程, 提出在pin半导体结中设置若干不同能量带隙的半导体层。通过这些不同能量带隙半导体层调节不同波长入射光的吸收区域, 并利用偏置电压控制不同区域光生载流子的传输和复合, 进而改变探测器的光谱响应特性。根据研究结果, 如果设置4层带隙梯度分布的本征层, 不同偏置电压下探测器光谱响应曲线的Pearson相关系数从0.99下降到0.68, 为后续的探测器光谱重构提供了有效的宽谱探测数据。

关键词: 波分复用算法; 光谱重构; 非线性相关; 能量带隙

中图分类号: TN304 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2023)03-0191-07

Research on Spectral Detection Performance of Semiconductor pin Junction with Multilayer Bandgap Structure

LI Qing, Omolola E. Fayemi, XU Jun, WU Kun, ZHOU Jianming, LEI Wei

(1. School of Electronic Science and Engineering, Joint International Research Laboratory of Information Display and Visualization, Southeast University, Nanjing 210018, CHN; 2. Department of

收稿日期: 2023-06-18

* 基金项目: 国家重点研究计划国际合作专项(2021YFE0105900, 2022YFE0139100); 南非-中国国际合作项目(UID: 132796); 国家自然科学基金(62175028, 51879042, 61674029); 江苏省国际合作项目(BZ2022008); 江苏省基础研究领先技术计划(BK20192003); 国家111-2.0引智计划(BP0719013)

作者简介: Omolola E. Fayemi(1976—), 男, 副教授, 从事纳米材料研究及绿色能量材料的制备研究; 雷 威(1967—), 男, 博士, 教授, 从事光电探测、高能射线探测及纳米材料光电子器件的研究。(E-mail: lw@seu.edu.cn)

** 通讯作者

Chemistry, Faculty of Natural and Agricultural Sciences, North-West University (Mafikeng 5 Campus), Private Bag X2046, Mmabatho 2735, South Africa; 3. Nanjing Perlove Medical Equipment Corporation, Nanjing 211111, CHN; 4. Suzhou Yi He Photoelectron Science and Technology Ltd., Suzhou Jiangsu 215100, CHN; 5. Shi-Cheng Laboratory for Information Display and Visualization, Nanjing 210024)

Abstract: It was thoroughly investigated for the absorption of broadband incident light, photogenerated carrier generation, and the physical process of photogenerated carrier transport and compounding, and a number of semiconductor layers with different energy bandgaps were proposed to set up in the pin semiconductor junction in this paper. Through different energy bandgap semiconductor layers, the absorption region of incident light of different wavelengths could be adjusted, and the bias voltage could be used to control the transport and compounding of photogenerated carriers in different regions. Then the spectral response characteristics of the detector was improved. According to the results of the study, the Pearson correlation coefficient of the detector spectral response curve decreased from 0.99 to 0.68 at different bias voltages when four layers of intrinsic layers with bandgap gradient distributions were set up, providing effective broad-spectrum probing data for the subsequent spectral reconstruction of the detector.

Key words: wavelength division multiplexing algorithm; spectral reconstruction; nonlinear correlation; energy bandgap

引 言

光谱成像将成像技术与光谱技术有机地结合,通过推扫等工作方式获得每一个空间像素点的光谱数据,并将获得的二维几何空间信息以及一维光谱信息组合成三维数据立方体^[1-4]。成像空间信息给出了探测目标的形貌表征,而光谱信息则包含探测目标的材料成分等信息,因此光谱成像在军事应用以及民用遥感、航天、医疗卫生、农产品质量安全监测等方面具有重要的应用。

在光谱成像过程中,空间各点光谱信息的分离和采集是关键。通常研究人员采用色散光学元件,例如棱镜和光栅等,将不同波长通道的入射光在空间分离,再利用光电探测器获得不同光谱通道的强度信息。棱镜或光栅等需要有足够的空间对光谱通道进行分离,它还需要配合机械扫描的方式获取二维空间的光谱图像^[5],因此光谱成像系统结构复杂,体积较大。由于航天器和无人机等平台对载荷有苛刻的限制,因此发展集成化光谱成像技术具有重要的应用需求。

针对光谱成像的技术难题,近年来研究人员将波分复用技术(Wavelength division multiplexing)用于光谱信息重构。在该方法中,研究人员采用宽带

滤波片将入射光分离为若干光谱通道。由于滤波片的带宽较大,所以每一个通道并不是只对应单一波长的信息,而是包含相对宽谱的光信息。同样因为滤波片带宽大,因此对应的探测器单元所获得的探测响应度也比较大。研究人员事先利用单色光标定传感器响应度和每一个波长通道的映射关系,再根据测量得到的宽谱通道探测信息和波分复用算法,比较准确地重构入射光的光谱信息。2015年清华大学和美国MIT研究组在Nature^[2]报道了采用胶体量子点构建系列宽谱滤波片,最终获得高光谱图像。2019年University of Wisconsin - Madison研究组采用类似的研究思路报道了芯片集成的光谱成像器件^[6]。该研究组采用微米级厚度的介质层,通过微加工技术制备周期性图案,构成光子晶体结构。通过控制光子晶体的周期性结构,即可改变透射谱的光谱特征,再通过波分复用算法重构入射光谱,重构光谱的半峰宽为1.5 nm左右。采用波分复用算法重构入射光谱,并且获得光谱图像的另外一个代表性工作是剑桥大学研究组2019年在Science上报道的成果^[7]。波分复用算法重构入射光谱的核心是编码后获得随机的光电响应,前面的研究大都是利用吸收谱(或者透射谱)随机分布的滤波片获得所需要的光谱响应,而剑桥大学研究组则利用能

带结构梯度分布的纳米线获得不同波长入射光的随机响应。剑桥大学研究组利用具有38对电极的纳米线,通过步进电机机械扫描的方式获取二维空间的光谱图像。

采用宽谱光谱通道编码和波分复用重构算法,是光谱成像器件小型化,并且提高探测响应度的有效方法。现有报道的研究方案,大都是将光谱信号在空间横向展开并编码,这增加了每一个成像像素的空间尺寸,因此光谱分辨率和成像空间分辨率存在矛盾。如果能够采用偏置电压在时间维度上对宽谱探测响应进行编码,则可以解决光谱分辨率和成像空间分辨率的相互矛盾。偏置电压对宽谱探测响应进行编码的核心是探测器在不同的偏置电压作用下,其光谱响应曲线的线性相关度很低。有研究表明,为了获得有效的光谱重构曲线,不同编码下的光谱响应 Pearson 线性相关系数应该小于0.7。针对这一核心问题,深入研究了宽谱入射光的吸收、光生载流子产生,以及光生载流子输运和复合的物理过程,提出在pin半导体结中设置若干不同能量带隙的半导体层,进而降低不同偏置电压下探测器光谱响应曲线的线性相关 Pearson 系数。

1 理论模型

半导体光电探测器的主要物理过程包括入射光的吸收、光生电子/空穴对产生、光生载流子的复合和输运等。文中主要关注不同波长的入射光被不同带隙半导体所吸收的过程。图1是入射光被直接带隙半导体吸收的简单物理模型,当入射光子能量 $h\omega_0$ 高于带隙 E_g ,价带电子将发生跃迁。

为了分析吸收光子以后电子从价带向导带的跃迁,用哈密顿算子描述电子在电磁场中运动^[8],见式(1):

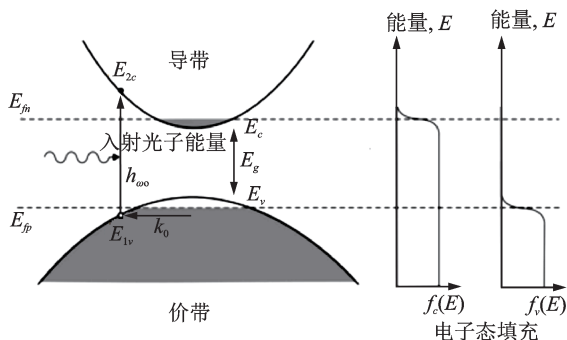


图1 能量为 $h\omega_0$ 入射光子的吸收

Fig.1 Absorption of incident photons with energy of $h\omega_0$.

$$H = \frac{1}{2m_0} (\mathbf{p} - q\mathbf{A})^2 + V \tag{1}$$

式中, \mathbf{A} 是矢量位, m_0 是电子质量。考虑到探测器应用的实际情况,有 $|q\mathbf{A}| \ll |\mathbf{p}|$ ^[9], 因此可以将哈密顿算子简化为:

$$H = -\frac{\hbar^2}{2m_0} \nabla^2 + V + \frac{i\hbar q}{2m_0} \mathbf{A} \cdot \nabla = \frac{1}{2m_0} \mathbf{p}^2 + V + \frac{e}{2m_0} \mathbf{A} \cdot \mathbf{p} \tag{2}$$

当能量为 $h\omega_0$ 的光子入射到图1所示的直接带隙半导体,光子能量被吸收导致价带电子从状态2跃迁到状态1的速率 ($1/\text{m}^3/\text{s}$) 可以表示为:

$$G_{h\omega_0}^{1 \rightarrow 2} = \iiint \frac{2\pi}{h} |H_{12}^{av}|^2 g(k) f_v(1 - f_c) \delta(E_{2c} - E_{1v} - h\omega_0) d^3k \tag{3}$$

式中 $g(k)$ 是 k 空间态密度,它可由公式(4)得到:

$$g(k) = \frac{2N_c}{\Omega \xi_{BZ}} \tag{4}$$

公式(4)中 ξ_{BZ} 是布里渊区体积。

f_c 和 f_v 是导带和价带的电子填充因子,它们由公式(5)给出:

$$\begin{cases} f_c = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E_{2c} - E_{fn}}{k_B T}\right)} \\ f_v = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E_{1v} - E_{fp}}{k_B T}\right)} \end{cases} \tag{5}$$

公式(5)中 E_{fn} 和 E_{fp} 分别是电子和空穴的准费米能级。假设 E_c 和 E_v 是 $k=0$ 时导带底和价带顶能量, E_{1v} 和 E_{2c} 可以表示为入射光子能量 $h\omega_0$ 的函数,如公式(6)所示:

$$\begin{cases} E_{1v} = E_v - \frac{\hbar k_0^2}{2m_h} \\ E_{2c} = E_c + \frac{\hbar k_0^2}{2m_e} \\ h\omega_0 = E_{2c} - E_{1v} \end{cases} \tag{6}$$

2 不同类型光电探测器光谱响应特性比较

根据第一节所讨论的理论模型,采用 Matlab 编制程序分析探测器光子吸收的物理过程,并结合 Comsol 软件对光生载流子的复合和输运进行分析,最后获得不同类型的光电探测器的光谱响应性

能。分析了单一带隙光电导探测器、单一带隙 pin 结探测器、两层带隙 pin 结探测器、三层带隙 pin 结探测器,以及四层带隙 pin 结探测器的光谱响应性能,从中找到了提高光谱响应非线性相关性的方法。

2.1 单一带隙光电导型探测器

光电导探测器是结构非常简单的一种探测器,当入射光照射时,光子吸收体的电导率增大,从而产生对应的光电探测信号。图 2 是光电导探测器的能带结构以及电场分布。

在图 2(a)所示的光电导探测器中,含有多个波长分量的入射光从探测器左端照射,光电导体通过光电效应产生光生电子/空穴对。如果忽略探测器两个端面电极形成的势垒,偏置电压在探测器中形成均匀的电场分布,如图 2(b)所示。入射光所产生的光生载流子在电场作用下漂移,形成探测电流。

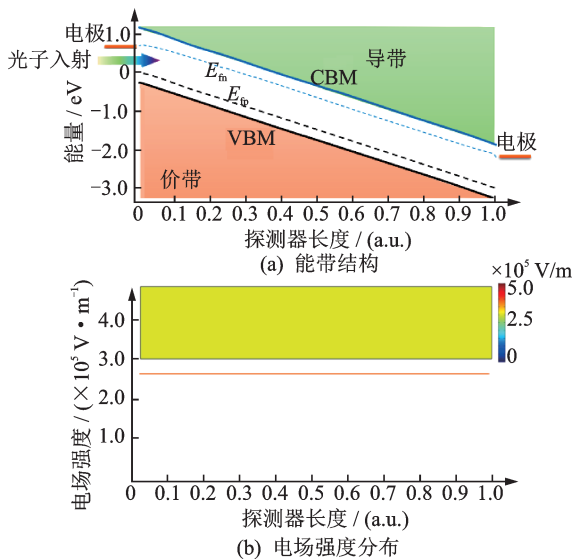


图 2 光电导探测器能带结构及电场强度分布

Fig.2 Energy band structure and electric field intensity distribution of photoconductivity detectors

图 3 是光电导探测器的光谱响应性能,其中图 3(a)是光生载流子产生率的空间分布,图 3(b)是探测器光谱响应曲线。

由于所讨论的光电导探测器只有一种能量带隙(1.92 eV),所以不同波长的入射光照射到光电导体后就被吸收,并产生对应的光电流。由于图 3(a)中不同波长入射光在探测器中产生光生载流子的位置差异不大,所以探测器在不同偏置电压

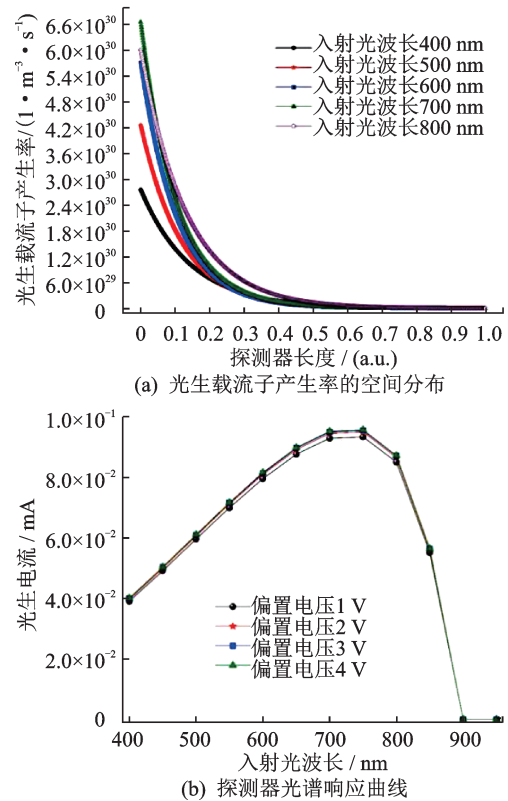


图 3 光电导探测器光谱特性

Fig.3 Spectral properties of photoconductive detectors

下获得的光谱响应曲线相差不大,如图 3(b)所示。探测器的这种光谱响应特性说明利用光电导探测器不能够通过波分复用算法重构入射光谱信息。

2.2 单一带隙 pin 结探测器

由于光电导探测器的暗电流比较大,严重抑制了探测度从而导致探测性能下降,因此通常采用 pn 结或者 pin 结探测器以提高探测性能。图 4 是一个 pin 结探测器示意图,其能带结构如图 4(a)所示,电场分布如图 4(b)所示,半导体层的能量带隙仍然为 1.92 eV。

在图 4 所示的 pin 探测器结构中,探测器的左端是 p 型层,右端是 n 型层,中间为本征层。从图 4(b)所示的电场分布可以看出,由于在探测器左端和右端分别存在 p/i 和 n/i 结区,所以与图 2(b)的光电导探测器电场分布相比较,左右两个结区的电场强度大幅度降低,进而抑制了暗态电流的注入。图 5 是 pin 结探测器的光谱响应性能。图 5(a)为光生载流子产生率的空间分布;图 5(b)是探测器光谱响应曲线。

从图 5 所示曲线可以看出,由于 pin 结探测器

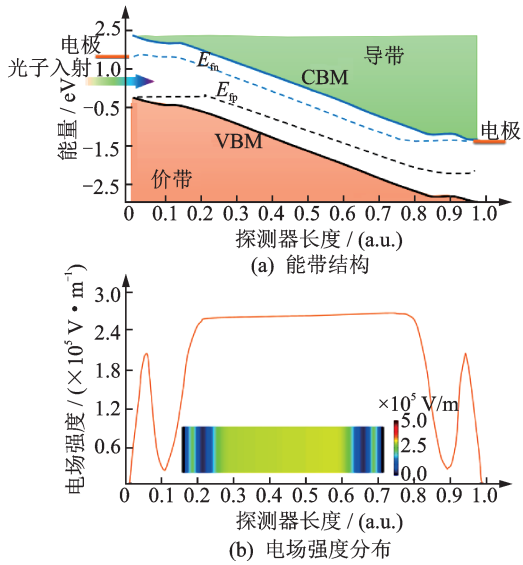


图4 pin结探测器
Fig. 4 pin junction detector

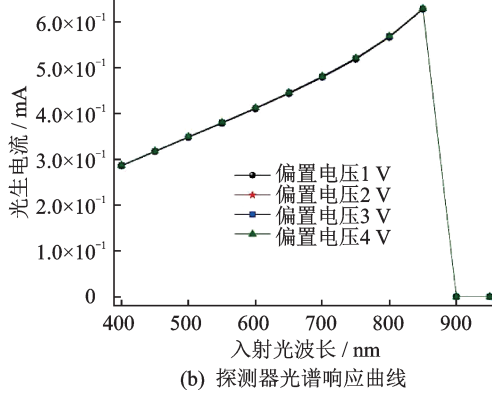
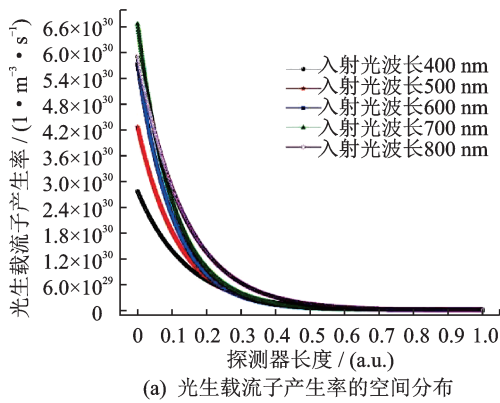


图5 pin结探测器光谱特性
Fig. 5 pin junction detector spectral properties

半导体层的能量带隙没有发生改变,所以不同波长入射光照射后光生载流子空间产生位置与光电导探测器几乎相同,探测器在不同偏置电压下获得的光谱响应曲线相差也不大。因此,pin结探测器也不能够通过波分复用算法重构入射光谱信息。

2.3 两层带隙探测器

为了降低探测器光谱响应曲线的线性相关性,探索在探测器中设置两层带隙的半导体层,探测器能带结构如图6所示。图6(a)为能带结构,图6(b)为电场强度分布。在探测器的左端(入射光照射端)能量带隙较宽,设置为2.42 eV。在探测器的右端,能量带隙仍然维持1.92 eV。同时,保留探测器左端的p型和右端的n型层。

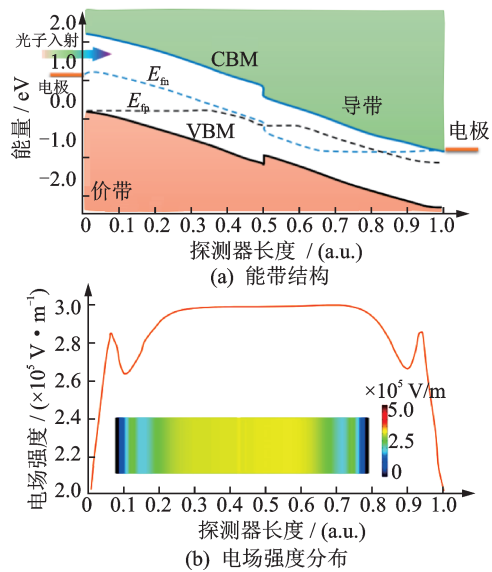


图6 两层带隙探测器
Fig.6 Two-layer bandgap detector

从能带结构和电场分布可以看出,在探测器两端仍然存在一定的耗尽层,所以两层带隙探测器的暗电流比光电导探测器小很多。

图7是两层带隙探测器的光谱响应性能,图7(a)为光生载流子产生率的空间分布;图7(b)为探测器光谱响应曲线。

从图7(a)可以看出,由于探测器左端的带隙比较宽,所以长波入射光,如波长700 nm和800 nm的入射光,可以穿过探测器的宽带隙层,进入窄带隙层被吸收并产生光生载流子。由于不同波长的入射光在探测器不同空间位置产生光生载流子,有可能改变偏置电压调控光生载流子的复合和输运。如图7(b)所示,偏置电压为1 V的光谱响应曲线和偏置电压2 V、3 V、4 V的光谱曲线已经出现明显差异。

2.4 三层带隙和四层带隙探测器

为了进一步增强不同偏置电压下探测器光谱响应曲线的差别,设计了三层带隙和四层带隙探测

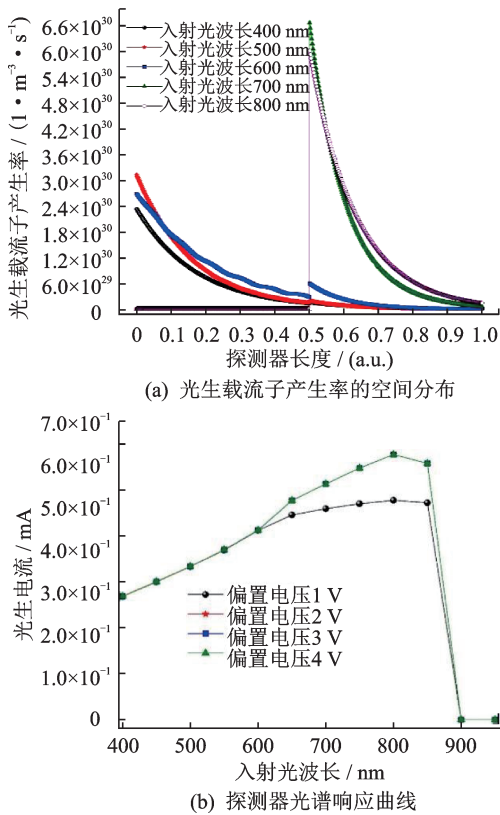


图 7 两层带隙探测器光谱特性

Fig. 7 Spectral properties of two-layer bandgap detectors

器。在三层带隙探测器中,不同区域的能量带隙分别为 2.92 eV、2.42 eV 和 1.92 eV;在四层带隙探测器中,不同区域的能量带隙分别为 3.42 eV、2.92 eV、2.42 eV 和 1.92 eV。这两种探测器的能带结构如图 8 所示。图 8(a)为三层带隙探测器能带结构;图 8(b)为四层带隙探测器能带结构。

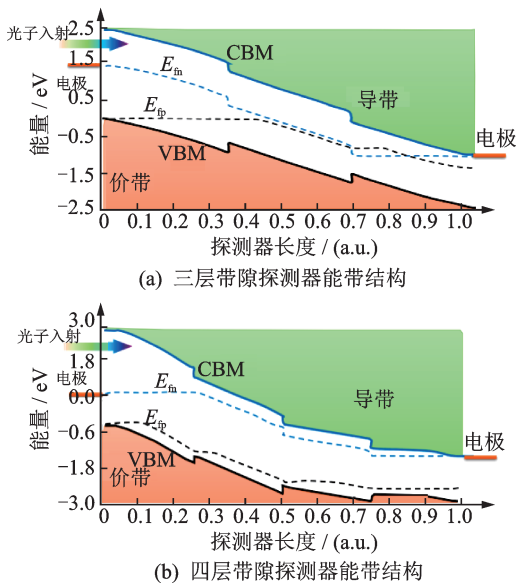


图 8 多层带隙探测器能带结构

Fig.8 Energy band structure of multilayer bandgap detector

图 9 给出了三层带隙探测器(图 9(a))和四层带隙探测器(图 9(b))的光生载流子产生空间分布,从中可以看出,随着探测器带隙层数的增加,不同波长入射光产生光生载流子空间位置差异更大,有可能获得更加非相关的光谱响应曲线。

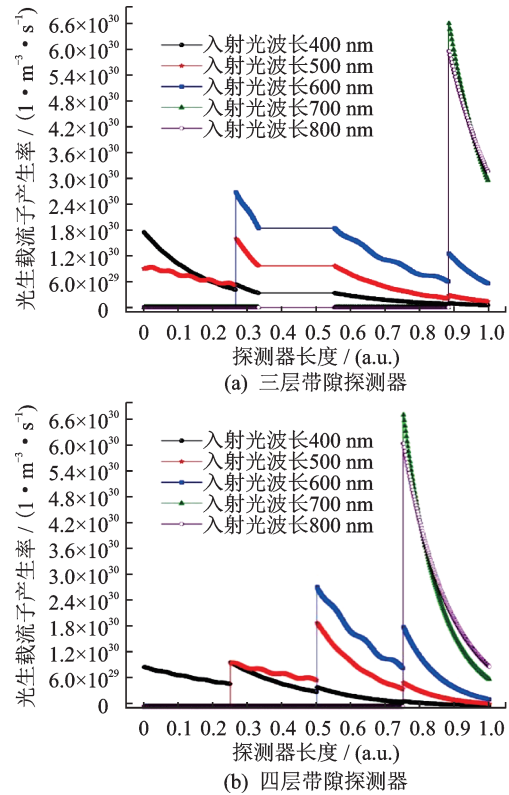


图 9 多层带隙探测器光生载流子产生率分布

Fig.9 Distribution of photogenerated carrier production rates for multilayer bandgap detectors

三层带隙探测器(图 10(a))和四层带隙探测器(图 10(b))的光谱响应曲线如图 10 所示。可以看出,随着探测器能量带隙层数的增加,不同偏置电压下探测器光谱响应曲线的差异明显增大。因此,通过优化设计探测器结构,有可能获得足够非相关的光谱响应特性,从而通过波分复用重构实现光谱探测。

根据以上的数据,计算了 Pearson 系数表述探测器偏置电压与光谱响应特性的相关性。比较数据如表 1 所示。

从上述相关性分析可以看出,利用多层能量带隙探测器结构,可以有效地降低偏置电压和光谱响应的线性相关性。为了获得有效的光谱重构曲线,不同编码下的光谱响应 Pearson 线性相关系数应该小于 0.7,这里采用 4 层能带带隙结构的 pin 半导体结探测器的 Pearson 系数为 0.68,如表 1 所示,可以

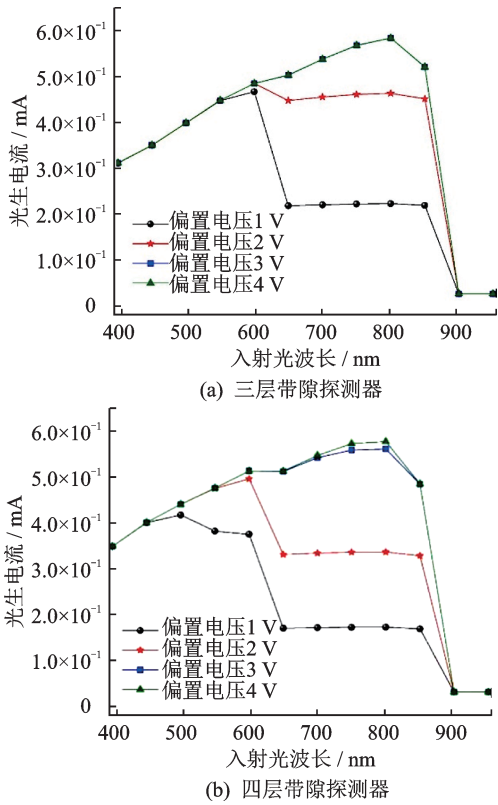


图10 多层带隙探测器光谱响应曲线

Fig.10 Spectral response curves of multilayer bandgap detectors

表1 探测器偏置电压与光谱响应特性线性相关性

Tab.1 Linear correlation between detector bias voltage and spectral response characteristics

	光电导	pin结	二层能 量带隙	三层能 量带隙	四层能 量带隙
Pearson系数	0.91	0.99	0.87	0.75	0.68

在不同偏置电压下获得相关性不高的光谱响应,从而提高波分复用算法重构光谱信息的准确性。

3 结 论

采用波分复用算法重构入射光谱是实现微型化光谱探测的重要手段。但是常规的光电导型探

测器以及pin结光电探测器,其光生载流子的产生与偏置电压无关,所以探测器的光谱响应电流与探测器偏置电压严重线性相关。因此,不能通过偏置电压对光谱通道编码,进而获得准确的光谱重构。

提出在pin半导体结中设置若干不同能量带隙的半导体层。通过这些不同能量带隙半导体层调节不同波长入射光的吸收区域,并利用偏置电压控制不同区域光生载流子的传输和复合,进而改变探测器的光谱响应特性。研究结果显示,如果设置4层带隙梯度分布的本征层,不同偏置电压下探测器光谱响应曲线的Pearson相关系数从0.99下降到0.68,为后续的探测器光谱重构提供了有效的宽谱探测数据。

参 考 文 献

- [1] Yesilkoy F, Arvelo E R, Jahani Y, et al. Ultrasensitive hyperspectral imaging and biodetection enabled by dielectric metasurfaces [J]. Nat. Photon., 2019, 13(6):390.
- [2] Bao J, Bawendi M G. A colloidal quantum dot spectrometer [J]. Nature, 2015, 523:67.
- [3] Adao T, Hruska J, Padua L, et al. Hyperspectral imaging: A review on UAV-based sensors, data processing and applications for agriculture and forestry [J]. Remote Sensing, 2017, 9(11):1110.
- [4] Kerry J A, Maurizio D, Nicola S, et al. Making sense of complex carbon and metal/carbon systems by secondary electron hyperspectral imaging [J]. Adv. Sci., 2019, 6:1900719.
- [5] Emadi A, Wu H, de Graaf G, et al. Design and implementation of a sub-nm resolution microspectrometer based on a linear variable optical filter [J]. Opt. Express, 2012, 20:489.
- [6] Wang Z, Yi S, Chen A, et al. Single-shot on-chip spectral sensors based on photonic crystal slabs [J]. Nat. Comm., 2019, 10:1020.
- [7] Yang Z Y, Owen T A, Cui H X, et al. Single-nanowire spectrometers [J]. Science, 2019, 365: 1017.
- [8] Chuang S L. Physics of Photonic Devices [M]. New Jersey: John Wiley and Sons Inc., 2009.
- [9] Yariv A. Quantum Electronics [M]. New Jersey: John Wiley and Sons Inc., 1989.