

金属-无机半导体-金属光电探测器的研究进展

高琳华, 崔艳霞, 梁强兵, 刘艳珍, 李国辉, 范明明, 郝玉英

(太原理工大学物理与光电工程学院 新型传感与智能控制教育部重点实验室, 山西太原 030024)

摘要: 金属-半导体-金属光电探测器 (MSM-PDs) 本身固有的高速、高响应率、易集成等特性使其在光纤通信、传感、制导等多个领域受到广泛关注。文中围绕金属-无机半导体-金属光电探测器展开综述。首先介绍了 MSM-PDs 的基本结构, 包含共面和垂直两种类型。紧接着, 介绍了 MSM-PDs 具体的工作原理, 除了常见的光电导型及肖特基型工作原理, 还介绍了以金属作为吸光层的热载流子光电探测器的工作原理。随后, 详细介绍了以 GaAs、InGaAs、Si/Ge 等无机材料作为半导体层的 MSM-PDs 在过去所取得的研究进展。此外, 还介绍了利用金属微纳结构拓展较宽带隙半导体材料 MSM-PDs 在红外波段响应特性的研究进展。最后, 总结全文并对 MSM-PDs 未来的发展做出了展望。

关键词: 金属-半导体-金属; 光电探测器; 肖特基; 红外; 金属微纳结构

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20201025

Research progress in metal-inorganic semiconductor-metal photodetectors

Gao Linhua, Cui Yanxia, Liang Qiangbing, Liu Yanzhen, Li Guohui, Fan Mingming, Hao Yuying

(Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System (Ministry of Education), College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The metal-semiconductor-metal photodetectors (MSM-PDs) have received great attention in areas of optical fiber communication, sensing, missile guidance, etc., due to their inherent merits of high speed, high responsivity, and easy integration. This review focused on MSM PDs with the semiconductor layer made of inorganic materials. Firstly, the basic structures of MSM-PDs was introduced, including the planar and vertical configurations. Then, the working principles of MSM-PDs were introduced. In addition to the common photoconductive and Schottky principles, the principle of hot carrier photodetectors with the metal layer as the light absorbing part was also introduced. Subsequently, the research progresses of MSM-PDs made of inorganic materials such as GaAs, InGaAs, Si/Ge was described in detail. Additionally, the research progress of using metallic micro/nano structures to extend the response of wide energy band semiconductor based MSM-PDs in infrared wavelength range was presented. Finally, the full text was summarized and the future development of MSM-PDs was prospected.

收稿日期: 2020-02-13; 修订日期: 2020-03-30

基金项目: 国家自然科学基金 (61775156, 61475109, 61605136, 61705155); 山西省自然科学基金优秀青年基金 (201701D211002); 山西省青年拔尖人才, 青年三晋学者, 山西省重点研发 (国际合作) 项目 (201603D421042); 山西省平台基地专项 (201605D131038)

作者简介: 高琳华 (1993-), 女, 硕士生, 主要从事微纳光电子器件方面的研究工作。Email: 907480873@qq.com

导师简介: 崔艳霞 (1984-), 女, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事微纳光子与光电子学领域的研究, 包括表面等离子体纳米器件、有机及钙钛矿光电探测器及钙钛矿激光器等。Email: yanxiacui@gmail.com

Key words: metal-semiconductor-metal; photodetectors; Schottky; infrared; metallic micro/nano structures

0 引言

随着光纤通信^[1]、传感系统^[2-3]、跟踪制导^[4]等多个领域的不断发展,人们对光电探测技术的要求越来越高。为了满足不同领域的应用需求,出现了如 PN 结光电二极管^[5]、PIN 光电二极管^[6-7]、雪崩光电二极管 (APDs)^[8-9]、金属-半导体-金属光电探测器 (MSM-PDs) 等不同结构的光电探测器。不同光电探测器的性能差别很大。如 PN 结光电二极管结构简单易于制备,但光电转换效率低、响应速度较慢, PIN 光电二极管结构较复杂,但结电容小、响应率高,雪崩光电二极管结构也较复杂,但响应速度较快^[10-13]。相比而言, MSM-PDs 由于其本身结构固有的高速、低电容、高响应率等特性而倍受关注。此外, MSM-PDs 的器件制作工艺相对简单,易实现产业化。

共面肖特基型 MSM 结构器件概念于 1971 年被 Sze 等人提出^[14],此后为适应于光纤通信、传感等不同领域对于探测器工作波段、响应速度、响应率等性能的不同需求,人们对基于不同半导体材料的 MSM-PDs 开展了大量研究。MSM-PDs 的探测范围覆盖了从紫外到红外波段,其中基于 GaAs、InGaAs、Si/Ge 等材料的 MSM-PDs 常用于探测可见光和红外光,而紫外 MSM-PDs 常用 GaN、ZnO 等直接宽带隙半导体材料制作。GaAs 材料具有大的禁带宽度、高的电子迁移率且属于直接带隙,适用于制作超快大功率光电器件^[15-16]。早期研究的 MSM-PDs 以 GaAs 材料为主,其主要工作波长在 0.8 μm 左右^[17-18]。为了使 MSM-PD 工作波段向长波段扩展,人们开始研究 InGaAs 材料,通过调节其各组分的含量可以调控其响应波长范围,但 InGaAs 材料与金属接触势垒高度较低,低的势垒

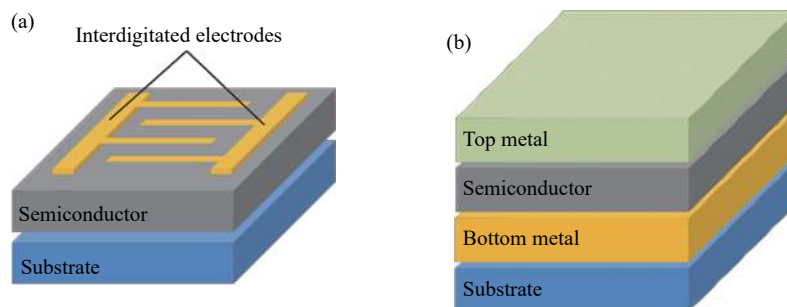
高度会导致较大的暗电流,所以常在 InGaAs 材料与金属中间引入势垒增强层来降低暗电流^[19-20]。Si/Ge 材料与 GaAs 相比禁带宽度较窄、电子迁移率较低,但其制备成本较低,易于大规模集成^[21],因此基于 Si/Ge 材料的 MSM-PDs 也受到了较大关注,但在性能方面较 GaAs 存在明显劣势^[22]。在紫外探测方面, GaN、ZnO 等直接宽带隙半导体材料本身具备优良的光电特性、抗辐射、耐高温特性,可用于制备大功率、高温、高频器件,具有极其广泛的应用前景^[23-24]。近年来,也有不少报道展示了以无机钙钛矿^[25]等新材料为半导体层的 MSM-PDs 的独特性能,也引起了人们的极大关注。

文中围绕可见及近红外波段的金属-无机半导体-金属光电探测器为主题展开综述。首先介绍了 MSM-PDs 的基本结构及工作原理。随后,详细介绍了以 GaAs、InGaAs、Si/Ge 等无机材料作为半导体层的 MSM-PDs 在过去所取得的研究进展。此外,还介绍了利用金属微纳结构拓展较宽带隙半导体材料 MSM-PDs 在红外波段响应特性的研究进展。最后,总结了全文并对 MSM-PDs 未来的发展做出了展望。

1 MSM-PDs 基本结构及原理

1.1 基本结构

MSM-PDs 是在半导体表面制作金属电极形成金属-半导体接触的器件。器件基本结构分为两种。第一种器件结构为共面器件^[17],电极通常由分立的两组金属条构成(即叉指电极),两组电极处于同一平面,即位于半导体的一侧,结构如图 1(a)所示。第二种器件具有垂直形的结构^[26],半导体层夹在上下两个金属电极中间,结构如图 1(b)所示。在此,笔者将两种器



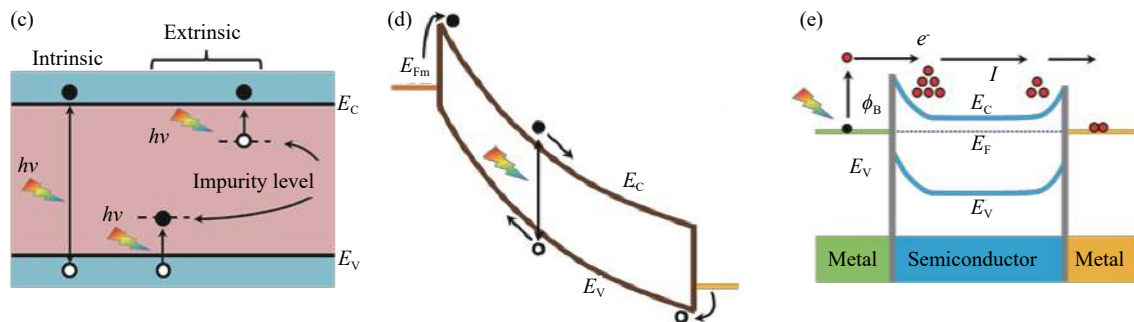


图 1 (a) 和 (b) 分别为平面型 MSM 和垂直型 MSM 结构示意图; (c) 半导体材料本征和非本征光激发过程; (d) 肖特基 MSM-PDs 在 $V_{FB} < V < V_B$ 下的工作原理示意图; (e) 热载流子发射 MSM-PDs 的工作原理示意图, 图中仅展示了左侧金属吸光发射热电子产生电流的过程

Fig.1 (a) and (b) Schematic diagrams of the planar and vertical MSMs, respectively; (c) Intrinsic and extrinsic light excitation processes of semiconductor materials; (d) The diagram illustrating the principle of Schottky MSM-PDs at $V_{FB} < V < V_B$; (e) The diagram illustrating the principle of hot carrier Schottky MSM-PDs with the hot electrons and the corresponding current produced due to the absorption of light by the left metal film left metal film

件分别简称为共面 MSM-PD 和垂直 MSM-PD。在共面 MSM-PD 中, 半导体层直接暴露在光照下, 而在垂直 MSM-PD 中, 顶部金属电极必须做到足够薄以利于光吸收或载流子传输。与共面 MSM-PDs 相比, 垂直 MSM-PDs 的两电极之间的距离更容易控制地比较小, 这有利于降低器件寄生电容, 从而获得更高的响应速度。

1.2 基本原理

根据金属电极与半导体材料接触形成的异质结类型不同, 可将 MSM-PDs 分为光电导型和肖特基型。虽然通常所说的 MSM-PDs 具有肖特基型异质结接触, 而近年来一些具有光电导特性的 MSM-PDs 也表现出优异的特性^[15, 27], 因此文中也涵盖了对光电导型 MSM-PD 的进展介绍。

1.2.1 光电导型 MSM-PDs 的工作原理

对于光电导型 MSM-PDs, 半导体材料与两端金属电极形成的是两个背靠背的欧姆接触, 当光入射到半导体区域时, 由于本征吸收和杂质吸收 (见图 1(c)), 产生光生载流子 (电子、空穴), 引起半导体的电导率发生变化, 光生载流子在外加电场的作用下漂移, 被两端电极收集, 从而在输出回路中产生光电流。

光电导探测器的主要优点是内部的光电子增益较高, 光电流增益 (G) 代表光生载流子对光电流的贡献情况, 定义为自由载流子寿命与渡越时间之比, 计算方法见公式 (1):

$$G = \frac{I_l}{I_p} = \frac{(\mu_n + \mu_p)\tau\varepsilon}{L} = \tau\left(\frac{1}{t_m} + \frac{1}{t_{rp}}\right) \quad (1)$$

式中: I_l 为两电极之间流过的光电流; I_p 初始光电流; L 电极间距; μ_n 电子迁移率; μ_p 空穴迁移率; τ 载流子寿命; ε 为光电导的内部电场; t_m 和 t_{rp} 分别为电子和空穴通过两个电极的渡越时间。当载流子寿命长, 而多子渡越时间快时, 光电流增益可以大于 1。

1.2.2 肖特基型 MSM-PDs 的工作原理

第一个肖特基型 MSM-PDs 由 Sugeta 等人于 1979 年报道, 是由两个背靠背串联的金属-半导体肖特基二极管组成的^[28]。早在 1971 年, Sze 等人就给出了肖特基型 MSM 器件在无光照情形下的基本工作原理^[4]。例如, 对于一个以 N 型硅为肖特基型 MSM-PD, 可以等效为如图 2(a) 所示的两个肖特基二极管。该器件的半导体区可以分为三部分, 除了构成两个肖特基结的耗尽区以外, 位于中间的区域在图 2(a) 中用一段平的能带来表示, 这部分区域载流子浓度相对较高。在此, 假设两端的肖特基结具有不同的电子势垒高度, 分别为 ϕ_1 和 ϕ_2 , 它们形成了方向相反的电场强度。左端的肖特基结形成的电场强度由右指向左, 定义为反偏, 而右边的肖特基结形成的电场强度方向指向右, 定义为正偏, 它们的电场强度分布如图 2(f) 所示, 图中还标出了两个肖特基结相应的耗尽区宽度, 分别为 W_1 和 W_2 。

该器件在施加不同偏压时, 器件的工作状态不同。当施加一个很小的反向偏压时, 器件的能带结构

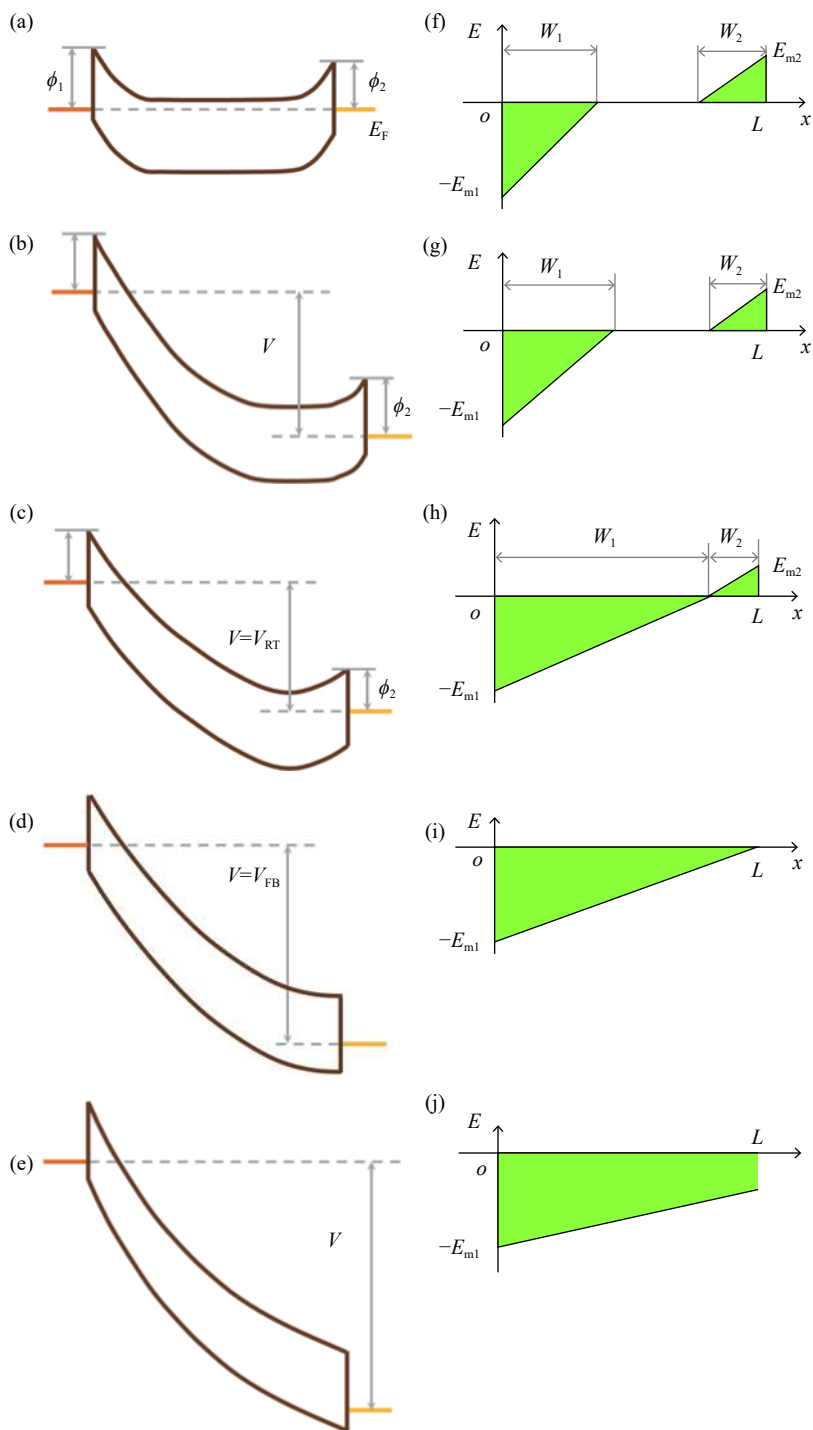


图 2 MSM 结构在不同偏压下的能带图 (a-e) 及相应的电场分布图 (f-j)。 (a)(f) 无电压; (b)(g) 为 V 小于穿透电压 V_{RT} ; (c) 和 (h) 为 V 等于穿透电压 V_{RT} ; (d) 和 (i) 为 V 等于平带电压 V_{FB} ; (e) 和 (j) 为 V 大于平带电压 V_{FB} 但小于雪崩电压 V_B

Fig.2 (a-e) Energy band and (f-j) electric field distribution diagrams of a typical MSM structure. (a) (f) without applied voltage; (b)(g) V is lower than V_{RT} ; (c)(h) V is equal to V_{RT} ; (d)(i) V is equal to V_{FB} ; (e)(j) V is greater than V_{FB} but smaller than V_B

和电场分布如图 2(b) 和 2(g) 所示, 此时, 反偏的肖特基结耗尽区略有展宽, 而正偏的肖特基结耗尽区稍稍变窄, 但只要两个耗尽区的宽度之和还小于两金属电极之间的指间距, 回路中的暗电流就非常微弱, 器件

性能与不加偏压时接近。

继续增加反偏电压, 处于反偏状态的耗尽区宽度持续增大, 而正偏下的耗尽区宽度不断减小, 外加电压大部分降在反偏置下的肖特基结上。当外加偏压

达到某一临界值,即拉通电压 (reach through voltage, V_{RT}) 时,正向偏置的耗尽区与反向偏置的结耗尽区相遇,如图 2(h) 所示,此时,接触点处电场强度为 0,相应的能带结构如图 2(c) 所示。

随着外加偏压的进一步增加,空穴要从右端电极注入回路的势垒不断下降,回路中的暗电流明显上升,直到右端处于正偏状态的耗尽区完全消失,半导体最右端处能带变平,如图 2(d) 所示,此时所加的偏压定义为平带电压 (flat band voltage, V_{FB})。从图中可以看出,在平带电压下,整个器件工作在反偏状态,耗尽区的宽度与两金属电极之间的指间距相等,电场由右指向左,且其强度由右向左线性增加,如图 2(i) 所示。此时,空穴势垒达到高度接近其极限值,进一步增大电压,空穴势垒只会由于镜像力^[29]缓慢降低,因而,电流增速较 $V_{RT} < V < V_{FB}$ 区间明显变缓。

当电压继续增加,会引起器件击穿,该电压定义为击穿电压 (break down voltage, V_B)。击穿是器件中的载流子在强电场作用下与晶体原子发生连锁碰撞,产生的电流雪崩式倍增效应。击穿电压不依赖于耗尽区宽度的变化而变化^[30]。在 $V_{FB} < V < V_B$ 区间,器件的能带结构与电场强度如图 2(e) 及 2(j) 所示。值得一提的是,有机半导体中由于激子束缚能比较高,只能通过陷阱载流子在界面处积累引发的载流子隧穿行为实现光电倍增,该效应也被用来制备高性能光电探测器^[31-33]。

在肖特基型 MSM-PDs 中,常见的器件是利用半导体材料进行感光的。在图 2(a)-(c) 中所示正偏肖特基结没有消失的情形下,位于两个肖特基结区的半导体层均吸收光,产生与肖特基内建电势相反的光生电势,在回路中产生两个相反方向的光电流。当器件处于图 2(d)-(e) 的情形下时,即 $V_{FB} < V < V_B$ 时,器件只包含一个反偏肖特基结,此时回路中只有单方向的光生电流,如图 1(d) 所示。通常,用于光电探测时,所加偏压位于这一区间,但是此时器件的暗电流较高。为了降低暗电流,可以在金属和半导体之间引入一个薄势垒增强层^[34-35]。相比于光电导型 PDs,由于肖特基结增强了半导体区的电场强度,所以载流子传输性能被进一步改善,器件的响应速度得以提升^[36]。

在肖特基型 MSM-PDs 中,也可利用金属吸收光产生光电流^[37-38],这样便可在半导体不吸光的波段实

现光电探测。例如,笔者可以使用 ZnO 等宽带隙半导体实现对可见光的探测,使用 Si 半导体实现 1.30 μm 和 1.55 μm 两个光纤通信波段的光信号检测^[39]。这类器件的工作原理如图 1(e) 所示。当光照射到器件上时,两端的金属吸收光子后会激发热载流子^[40],部分热载流子传输到金属与半导体之间的界面处,具有足够动能的热载流子可以隧穿通过顶部金属与半导体界面之间形成的肖特基势垒,进入半导体层,随后这些热载流子传输到达半导体与对向金属电极构成的界面时,会再一次隧穿进入对向金属电极,产生光电流。由于两端金属吸光所产生的两个光电流方向相反,这两个电流分别记为 I_1 和 I_2 ,当操控这两个光电流的大小不等时,就会在外电路中产生净电流实现光电探测^[41-43]。当一侧金属半导体界面是欧姆接触时,就构成了通常所说的金属-半导体二极管型光电探测器^[44]。因为这种器件是利用了金属中的热载流子来实现光电探测的,所以又被叫做热载流子光电探测器,包括了热电子和热空穴两种类型^[45-46],其中以热电子型光电探测器更为常见。

1.3 主要性能参数

在此罗列了半导体光电探测器的一些主要性能参数,随后将着重探讨这些相关性能指标。

外量子效率 (EQE): 指光入射到器件中每一个光子所产生的电子-空穴对数目。计算公式如下:

$$EQE = \frac{I_{ph}/e}{P_{in}/h\nu} \quad (2)$$

式中: I_{ph} 为光生电流,实际应用中为光照下所测电流 (I) 减去暗电流 (I_d); e 为单位电子所带电荷量的绝对值; h 为普朗克常量; ν 为入射光频率; $h\nu$ 为光子能量; P_{in} 为入射光功率。

响应率 (R): 定义为光照下所产生的平均光电流与入射光功率的比值,单位为 A/W。计算公式如下:

$$R = \frac{I_{ph}}{P_{in}} \quad (3)$$

响应时间: 探测器对入射光的响应速度快慢,一般定义为在脉冲光照射下,信号由最高值的 10% 上升至 90% 所需要的时间,或者从信号最高值下降到最高值的 10% 所经过的时间。对于肖特基型共面 MSM-PD 而言,其时间常数包含了光生载流子渡越时间常数和电路 RC 时间常数两个方面。其中,光生载

流子渡越时间与叉指电极的间距成正比,间距越大,响应时间越长。而电路 RC 时间常数与叉指电极的间距及电极的厚度成反比,与指宽成正比。电极指间距越大或电极厚度越厚,电路 RC 时间常数越小;指宽越小,电路时间常数越小^[47]。要获得尽可能低的响应时间,在设计时如何选取合适的电极指间距需要综合考虑。相应地,器件的频率响应带宽与其响应时间常数成反比。

明暗电流比:光电流 I_l 与暗电流 I_d 的比值。只有当比值大于 1 的时候,光信号才能被探测到。在实际中,我们希望器件具有强的信号电流及弱的暗电流。光电流相同的情况下,暗电流越低,器件的信噪比越高,器件对弱光的检测能力也越高。对于光电导型 MSM-PDs,暗电流主要来源于热噪声和散粒噪声,其中热噪声与半导体材料的电导率有关^[48]。而肖特基型 MSM-PDs 的暗电流包含电子暗电流和空穴暗电流两部分。电子暗电流主要是金属电极热电子发射并越过肖特基势垒所形成的电流。空穴电流在低电压下主要来源于空穴扩散,这是因为空穴要穿越的势垒高度远大于其平均自由程,空穴在穿越势垒途中被散射,造成大量积累,这样半导体内空穴的浓度呈现不均匀,而出现扩散。当 $V > V_{FB}$ 时,空穴越过势垒的几率大大增加,空穴电流由扩散电流为主转变为热发射电流为主。具体地,MSM-PDs 的暗电流与偏压、掺杂浓度及电极间距有关,详细的公式参见参考文献 [49]。实际中,为了获得尽可能低的暗电流,测试时控制偏压接近平带电压。在固定偏压的条件下,降低掺杂浓度,选择较大的电极间距,均有利于降低暗电流^[50]。

探测率 (D^*) 通常用以下公式表示:

$$D^* = \frac{\sqrt{A \cdot \Delta f}}{NEP} \quad (4)$$

式中: A 为探测器器件的面积; Δf 为测量带宽; NEP 为噪声等效功率; D^* 的单位是 $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ 。

2 MSM-PDs 研究现状

1979 年, Sugeta 等人^[28] 在第 11 届固体器件会议上发表了题为“适于高速光电子电路的金属-半导体-金属光电探测器”的报告,从此 MSM-PDs 逐渐成为了光电子领域的热门研究方向。早期 MSM-PDs 研究主要围绕 GaAs 材料开展,后来在光纤光通信技术、

传感系统等领域的发展带动下,人们也开始研究基于 InGaAs、Si/Ge、GaN、ZnO 等其它无机半导体材料的 MSM-PDs 器件性能。接下来,我们将详细介绍上述 MSM-PDs 在近些年所取得的研究进展。

2.1 GaAs 材料 MSM-PDs

1980 年, Sugeta 等人提出的 GaAs 基 MSM-PDs 公开发表,该器件为肖特基型共面 MSM-PD,其光电响应速度小于 100 ps^[28]。1983 年, Wang 和 Bloom 报道了带宽达到 100 GHz 的 GaAs 基 MSM-PDs^[51]。1985 年,德国的 Roth 等人将叉指电极应用于肖特基型共面 GaAs MSM-PDs (指间距 1.5 μm , 指宽 0.5 μm),将上升沿和下降沿响应时间缩短为约 10 ps,在波长为 820 nm 处器件的外量子效率为 25%,受仪器设备的限制,他们并未测到器件的频率响应极限^[17]。调整叉指电极的几何参数可以进一步优化 GaAs MSM-PDs 的响应带宽。1988 年, Van Zeghbroeck 等人报道了叉指电极指间距为 0.5 μm 、指宽为 0.75 μm 的 GaAs MSM-PDs,结果表明器件的响应时间可进一步降低至 4.8 ps, 3dB 带宽为 105 GHz,具体脉冲响应时间曲线见图 3(a)^[52]。1992 年, Chou 等人研究了当指宽和指间距从 100 nm 变化到 300 nm 时 GaAs MSM-PD 器件的性能,他们发现在指宽和指间距为 300 nm 时得到最快的响应速度,响应时间为 0.87 ps,如图 3(b) 所示,3 dB 带宽达到 510 GHz^[53]。而光电导型 MSM-PDs 的响应也可以非常快,它们的响应时间完全由材料的载流子寿命来决定。1991 年, Chen 等人低温生长的 GaAs 制备了指宽和指间距为 0.2 μm 的光电导型 MSM-PDs,其响应时间为 1.2 ps, 3 dB 带宽为 375 GHz,响应率为 0.1 A/W^[15]。

传统的共面 GaAs MSM-PD 器件中,光吸收层深处电场较弱,产生的光生载流子到达电极前在弱电场作用下要传输很长的距离。载流子收集时间长造成了一个长的下降时间拖延,一定程度上影响了器件的频率响应带宽。为了克服这一影响,研究者们提出在 AlGaAs 缓冲层上方制备器件^[18, 54]。但是这种方法却导致器件量子效率的下降。1997 年, Nikolic 等人提出在 AlGaAs 缓冲层下方,如图 3(c) 所示引入布拉格反射镜以改善器件的量子效率^[54]。同年, Yuang 等人制备了指宽和指间距分别为 3 μm 的具有凹凸形状电极的 GaAs MSM-PD,结构如图 3(d) 所示^[18]。这种凹

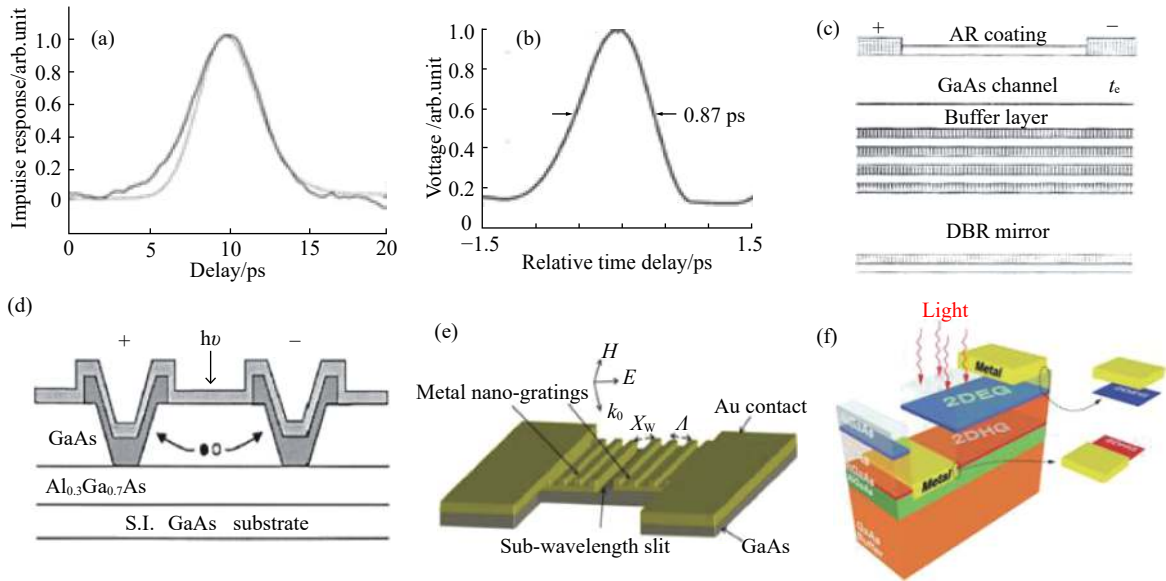


图 3 (a) GaAs MSM-PD 的脉冲响应实验与数值结果对比图^[52]; (b) 指宽和指间距均为 300 nm 的 GaAs MSM-PDs 的脉冲响应图^[53]; (c) 谐振腔增强型 GaAs MSM-PD 结构示意图^[54]; (d) 具有凹陷阳极和阴极的 GaAs MSM-PD 的结构示意图^[18]; (e) 表面等离子元增强的 MSM-PD 的结构示意图^[55]; (f) 基于二维电子气和空穴气的 GaAs MSM-PD 的结构示意图^[56]

Fig.3 (a) Experimental and calculated impulse response of a GaAs MSM-PD^[52]; (b) Impulse response of a GaAs MSM-PD with both finger spacing and width of 300 nm^[53]; (c) Schematic diagram of a resonant cavity enhanced GaAs MSM-PD^[54]; (d) Schematic diagram of GaAs MSM-PD with recessed anode and cathode^[18]; (e) Schematic diagram of the plasmonic MSM-PD structure^[55]; (f) Structure diagram of a GaAs MSM-PD based on 2D electron gas and 2D hole gas^[56]

凸形状的电极可增强光吸收区域的电场, 缩短载流子到达电极的距离, 从而可以有效地收集载流子, 使其具有更优越的直流和速度性能, 器件在 5 V 偏压下响应率为 0.24 A/W, 较参比器件提高了 0.1 A/W, 所测得的下降沿时间为 13 ps, 较参比器件缩短了 45 ps。

光电探测器件在经过一段时间的使用后, 性能衰退难以避免, 表面钝化可以保护器件免受环境污染的影响, 有效抑制这些不利因素对器件性能的影响, 从而提高器件的稳定性。2005 年, Lee 等人使用光电化学氧化的方法直接在两电极之间的半导体感光区域增加了一层氧化钝化膜, 将器件暗电流从 70.0 pA 降低为 13.7 pA, 并且氧化钝化层减少了表面态, 降低了表面击穿的概率, 使其击穿电压从 42.5 V 提高到 52.5 V^[57]。

早期的共面 MSM-PD 中, 金属电极形貌简单, 由相邻金属条所夹的单缝区域感光。但是金属条表面的反射及其对半导体区域的遮挡使得 MSM-PD 实际外量子效率比理想状态低了很多。2011 年, Karar 等人报道了一种高响应率的金属电极含有光栅结构的

共面 GaAs MSM-PD, 结果如图 3(e) 所示, 含光栅器件测量到的光电流与无光栅器件相比, 增强了 4 倍^[55]。2015 年, Sharaf 等人进一步从理论上研究了包含金属光栅电极的 GaAs MSM-PD 器件的性能^[58], 结果表明该结构比传统的只有亚波长狭缝 MSM-PD^[49] 的吸收增加了 42 倍, 外量子效率提高了 10 倍。他们还从理论上预测了这种设计可以实现 909 GHz 的频率响应特性。此外, Neutens 等人利用 GaAs MSM-PDs 实现了对金属纳米波导表面等离子元模式的检测, 他们还计算了该器件由渡越时间限制的频率响应带宽, 该参数在电极间距为 40 nm 时可以达到 1470 GHz^[59]。

区别于载流子在体半导体材料中三个空间维度均可运动的传输方式, 二维电子气或空穴气 (2DEG or 2DHG) 特指载流子的传输被约束某个特定平面内的情形。当 n 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 与不掺杂 GaAs 接触时, 由于重掺杂 n 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的费米能级距离导带底很近, 远高于位于禁带中部附近的 GaAs 费米能级, 使得电子聚集在结处 GaAs 区, 在 GaAs 近结处形成势阱, 势阱中的电子在与结平行的二维平面内作自由电子

运动,即形成了 2DEG。其优点在于电子供给区是在 n 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 中,而电子传输过程是在不掺杂 GaAs 中进行,由于二者在空间中是分离的,所以消除了电子在传输过程中所受的电离杂质散射作用,从而大大提高了电子的迁移率^[60]。基于 2DEG 晶体管的频率响应带宽已经达到 640 GHz,研究者们寄希望于 GaAs 2DEG 或 2DHG 光电探测器能够实现频率响应特性的进一步优化。1992 年, Litvin 等人基于掺杂 n 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 与不掺杂 GaAs 复合结构实现了具有 40GHz 频率响应的 MSM-PDs^[61]。1997 年, Nabet 制备了类似的器件,并利用二维电子气模型对该器件的工作原理进行了解释^[62]。2014 年,他们同时利用 2DEG 和 2DHG,制备了如图 3(f) 所示的复合 MSM-PDs,实现了 2 ps 左右的时间响应特性^[56]。

2.2 InGaAs 材料 MSM-PDs

随着光纤通信向长波长方向发展,人们自 80 年代后期开始开展 InGaAs 材料 MSM-PD 的相关研究^[20]。InGaAs 通过调节其各组分的含量,其有效工作波长范围可覆盖 0.8 ~ 3.5 μm ^[63-64]。1987 年, IBM 公司的 McIntuff 等人报道了第一个 InGaAs MSM-PD,该器件生长在 GaAs 衬底上,在 1.3 μm 波长光照下的响应速度为 48 ps^[20]。随后,基于 InP 衬底的 InGaAs MSM-PD 也被相继报道,与 GaAs 衬底上生长的样品相比,减小了薄膜应力,降低了工艺难度。1996 年, Böttcher 等人报道了基于亚微米的 InGaAs MSM-PD,响应带宽达到 40 GHz 以上^[65]。1997 年, Hurrn 等人成功实现了 InGaAs MSM-PD 的单片集成光电接收放大器,其响应率为 0.32 A/W, 10 V 时的暗电流为 10^{-7} A 量级^[66]。

但 InGaAs 材料与金属接触势垒高度较低,低的势垒高度会导致较大的暗电流^[19]。因此,通常在 InGaAs 材料与金属中间增加一层带隙超过 InGaAs 的外延层作为势垒增强层,如非掺杂 InP 层^[67-68]、Fe 掺杂 InP 层^[69]、InAlAs 层^[70]、AlGaAs 层、InGaP 层^[71]、介质层^[72]、其它金属膜^[73]等。例如,1991 年,史常忻等人利用低温 MOVPE 技术,成功研制出具有非掺杂 InP 肖特基势垒增强层的 InGaAs MSM-PD^[68],在 1.5V 下其暗电流小于 60 nA (光敏面积 100 $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$),

在 6 V 下上升响应时间小于 30 ps,其响应率为 0.42 A/W。1992 年, Kim 等人对比研究了以 InAlAs 为势垒增强层的 InGaAs MSM-PD 器件在前照式和背

照式下的性能差异^[70],他们发现使用如图 4(a) 所示的背照模式,虽然降低了响应速度,但却实现了响应率的大幅度提高,该器件在在波长 1.3 μm 、5V 偏压下响应率达到 0.96 A/W,由于势垒增强层的引入该器件展现出较低的暗电流 5.6×10^{-5} A/cm²,具体性能见图 4(b) 所示。1995 年, Yuang 等人制备了含 InGaP/InP 双势垒增强层的 InGaAs MSM-PD 器件^[74],使得暗电流较单势垒增强层器件^[67-69]进一步降低。随后他们在此器件的基础上,进一步对比研究了金属电极的厚度变化对器件性能的影响^[71],结构如图 4(c) 所示。他们发现金属电极厚度从 100 nm 降低为 10 nm 时,即电极从不透明变为半透明时,并不会改变器件的暗电流及时间响应特性,却可以将波长 1.55 μm 下的响应率从 0.4 A/W 提高到 0.7 A/W,提高了 75%,具体性能如图 4(d) 所示。1994 年, Klockenbrink 等人发现在 InGaAs 材料与金属电极间引入薄 Al_2O_3 介质层后器件的热稳定性会变好^[72]。他们的工作表明虽然在室温条件下两种器件的暗电流相当,均为 10^{-9} A 数量级,但是当退火温度从 250 $^{\circ}\text{C}$ 上升到 350 $^{\circ}\text{C}$ 时,具有薄 Al_2O_3 介质层器件的暗电流只上升了 4 倍,而没有 Al_2O_3 介质层器件的暗电流增加了将近 100 倍。

需要指出的是,所引入势垒增强层的表面态有时会造成不同器件性能迥异,因此研究者们提出对势垒增强层的表面进行钝化以提高器件性能的可重复性。1999 年, Pang 等人介绍了一种硫钝化 InP 势垒增强层表面的高性能 InGaAs MSM-PD^[75],实现了器件性能的稳定且可重复,该器件有一个极低的电容值 200 fF,暗电流在 10V 偏压下约 200 nA,其击穿电压约为 20 V,响应率最大为 0.75 A/W,截止频率为 20 GHz。2005 年, Chiu 等人利用苯并环丁烯 (BCB) 侧壁钝化的方法改善了 InGaAs MSM-PD 器件的性能^[76],相应的器件结构如图 4(e) 所示。他们利用 BCB 钝化过程在不影响亮电流的前提下,使暗电流密度从 11 nA/ μm^2 降低到 5.7 pA/ μm^2 ,如图 4(f) 所示。

为了得到较快的响应速度,一般都把 MSM-PDs 的感光区域做到微米尺度。另一方面,具有大感光区域的光电探测器在空间光通信中有广泛的需求。2004 年, Kim 等人制备了 1 mm \times 1 mm 的大面积 InGaAs MSM-PDs^[77],当金属叉指电极宽度为 2 μm 、间距为 15 μm 时得到器件的响应率为 1.02 A/W,带宽为

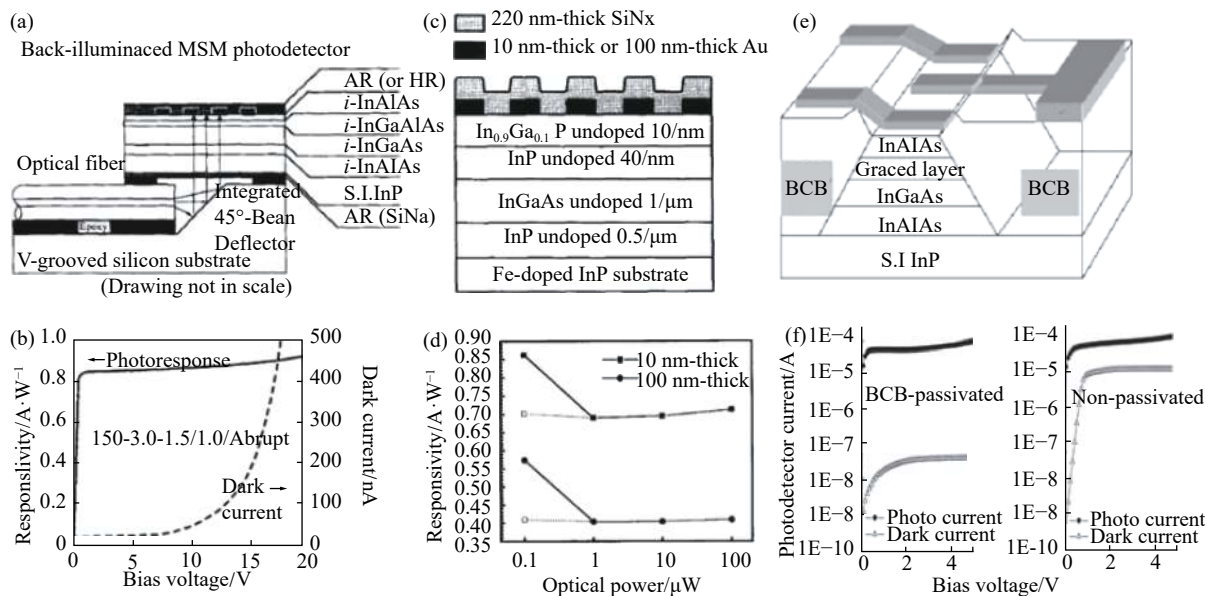


图 4 背照射式 InGaAs MSM-PD 的结构示意图 (a) 及光响应和暗电流曲线 (b)^[70]; 具有透明肖特基接触的 InGaAs MSM-PD 结构示意图 (c) 及不同金属电极厚度下器件响应率随入射光功率变化的关系曲线图 (d)^[71]; BCB 侧壁钝化 InGaAs MSM-PD 的结构示意图 (e) 及钝化前后器件的亮暗电流电压曲线 (f)^[76]

Fig.4 Schematic diagram of a back-illuminated InGaAs MSM-PD (a) and its photo response and dark current characteristics (b)^[70]; Schematic diagram of an InGaAs MSM-PD with semi-transparent Schottky contacts (c) and curves of responsivity versus optical power for the devices with different contact thicknesses^[71]. The structural diagram of the BCB passivated InGaAs MSM-PD (e) and the I-V characteristics in dark and under illumination for devices before and after passivation (f)^[76]

210 MHz, 并且该器件中利用 InP/InGaAsP 传输层代替 InGaAs 与 InAlAs 之间的 InGaAlAs 缓变层, 在 10 V 偏压下得到了较低的暗电流 45 nA, 相应地暗电流密度低至 45 fA/μm²。

2.3 Si/Ge 材料 MSM-PDs

基于 GaAs、InGaAs 材料的长波段 MSM-PDs 已经被大量研究, 而在 800 nm 的光通信波段, GaAs 和 Si MSM-PDs 是可以相互替代的, 并且 Si MSM-PDs 与 GaAs MSM-PDs 相比, 制备成本更低, 更容易实现大规模集成。关于 Si MSM-PDs 最早报道见于 1991 年^[21]。1993 年, Si MSM-PDs 被期刊正式报道时, 频率响应带宽在 465 nm 波长下已经达到 75 GHz^[22]。该工作还表明受硅本身吸收深度的影响, 器件在 800 nm 附近响应速度明显变慢, 相应地频率响应带宽为 38 GHz。同年, 他们通过优化叉指电极的几何参数, 又将频率响应带宽进一步优化到 110 GHz^[78], 该性能是在 400 nm 短波长下测得的, 他们并没有提供长波段的测试结果。

注意到硅在 800 nm 波长附近的吸收深度达 10 μm

量级, 一定程度上制约了器件的响应速度后, Lee 等人提出利用 3~7 μm 厚的硅薄膜 (远远小于其在 830 nm 波长下的吸收深度, 即 12.7 μm) 制备 Si MSM-PD, 为了尽可能的不影响响应率, 他们在硅薄膜的背面制作了如图 5(a) 所示的纹理, 以改善硅薄膜的陷光性能, 最终, 他们所设计的器件较传统器件在响应率牺牲不大的前提下明显改善频率响应特性^[79]。1996 年, Ho 等人提出另一种方法来改善 Si MSM-PD 在长波段的响应速度, 即利用图 5(b) 所示的脊形硅结构^[80]。该结构中硅脊的高度为 9 μm, 保证了 63% 的 790 nm 波长入射光被器件吸收, 他们提出在这一设计中, 光吸收区域的电场分布十分均匀, 在硅脊下方的体硅区域吸收光产生的光生载流子可以被脊与脊之间夹着的金属电极迅速收集, 从而大大提高了响应速度。该探测器在 5 V 偏压下测得的 3 dB 频率响应带宽为 2.2 GHz, 较他们所制作的平面型器件提高了约 5 倍。

III-V 族光电探测器虽然在 1.3 ~ 1.55 μm 的通信波段取得了极大的成功, 但是它们与硅半导体工艺的集成始终是一个难题。在这样一个背景下, 研究者们

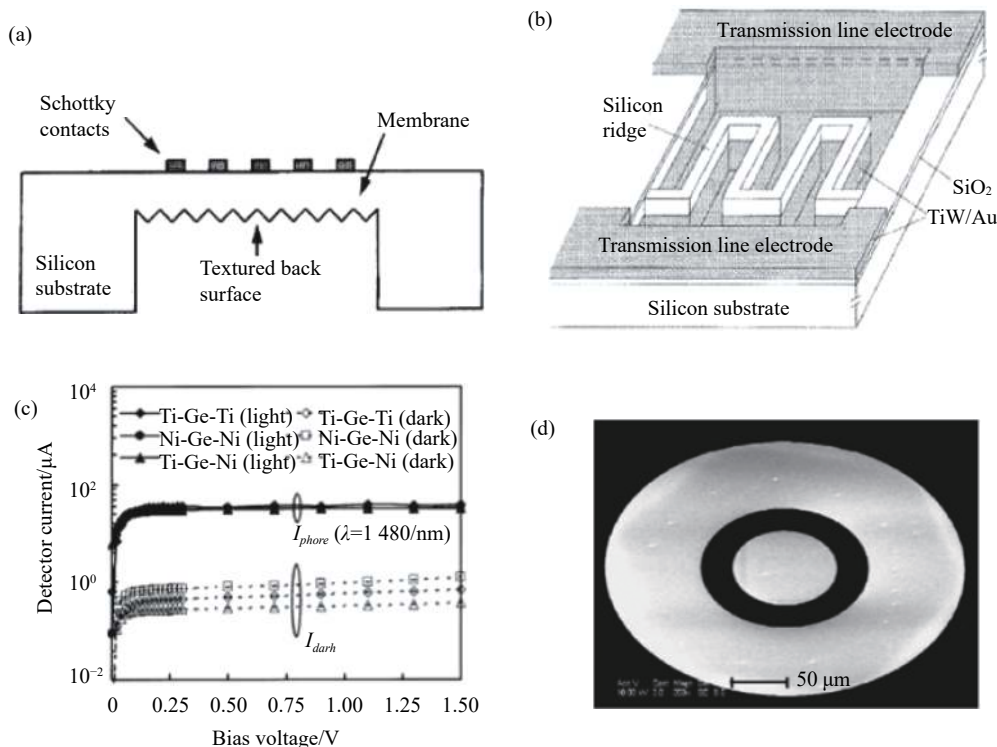


图 5 (a) 基于有纹理的硅薄膜上制作的 MSM-PD 的截面图^[79]; (b) 具有脊形硅结构的 MSM-PD 的结构示意图^[80]; (c) 具有对称电极和不对称电极的 Ge MSM-PDs 的光响应和暗电流曲线^[81]; (d) Si MSM-PD 的非对称电极 SEM 图^[82]

Fig.5 (a) Cross-sectional diagram of an MSM detector based on a textured silicon membrane^[79]; (b) Schematic diagram of an MSM-PD based on silicon trenches^[80]; (c) Photo response and dark currents measured for both symmetric and asymmetric MSM-PDs on Ge substrate^[81]; (d) SEM image of an asymmetric contact for a Si MSM PD^[82]

开始探究 SiGe 结构的光电探测器。1998 年, Colace 等人报道了在 Si 衬底上外延生长 Ge 制备 MSM-PD^[83], 为了将晶格失配引起的位错影响降到最低, 他们在 Si 和 Ge 之间引入了一层低温生长的 Ge 缓冲层。该探测器在波长 1.3 μm 和 1.55 μm 下均展现了较好的响应率, 偏压为 1 V 时, 响应率为 0.24 A/W, 这种在硅衬底上外延 Ge 材料来研制高速光电子器件可以充分发挥 Si 和 Ge 各自的优势。2006 年, Okyay 等人^[84] 利用多步氢退火异质外延生长技术制备了高效的 SiGe MSM-PD, 该探测器在波长 1.55 μm, 外加偏压 2 V 下, 响应率高达 0.85 A/W, 相应的外量子效率为 68%。在该工作中, 他们还对比了 Ti、Cr 与 Ni 三种不同金属电极对器件性能的影响, 他们发现相比于 Ti 和 Cr, Ni 电极器件肖特基势垒较低, 导致其暗电流较高。

为了降低 Si/Ge MSM-PDs 器件的暗电流, 除了可以使用与 2.2 节中 InGaAs 类器件类似的势垒增强技术外^[85-86], 还可以采用非对称电极。实际中, 实现非对称电极的手段主要有材料不对称^[81,87] 及图案不对

称^[82,88-89] 两种。如图 1(d) 所示, 使用不同功函数的金属电极可以分别优化两端的肖特基势垒高度, 从而降低暗电流, 而亮电流的大小与势垒高度并无关系。2003 年, Chui 等人^[81] 理论结合实验证实了这一点, 他们对比研究了 Ti、Ni 电极及其组合对 Si 及 Ge MSM-PDs 器件性能的影响规律, 结果如图 5(c) 所示, 由图可知, Ti/Ge/Ni 结构与其它结构相比, 亮电流几乎相同, 而暗电流却明显下降。上述研究是针对共面型器件展开的, 2007 年, Hwang 等人针对垂直型 MSM-PDs 也进行了类似的研究^[87]。在这项研究中, 他们所选取的器件是在 SiGe/Si 双层半导体膜的上下表面分别镀电极的结构, 具体探讨了 Ni、Cr、Au 三种电极材料两两组合对器件性能的影响, 综合所有情况, 他们发现 Ni/SiGe/Si/Au 器件具有最低的暗电流, 该器件的明暗电流比达 364.2, 而 Ni/SiGe/Si/Ni 器件的明暗电流比仅为 4.63。利用不对称图案金属电极降低暗电流是由 2006 年 Okyay 等人首次提出的^[82], 他们设计的电极图案如图 5(d) 所示, 测试表明, 电极图案的不

对称性越明显,相应器件的暗电流越低。在这种设计中,面积较大的电极附近电流密度较小,相应地电场强度较小,反之则反。肖特基势垒在不同电场强度下,镜像力降低不同^[29]。因此,电极图案的不对称性本质上还是导致了势垒高度的不对称性,最终带来暗电流的降低。而 2011 年, Park 和 Yu 的研究表明这种电极图案的不对称性带来的暗电流降低与所选用金属电极的材质有关^[89]。他们制作了基于 Ti 的图案不对称电极器件,发现与对称器件的暗电流几乎相同,而基于 Er 的两种器件性能却大不相同,具体地, Er 的图案不对称电极器件在反向偏压下可以有效地降低暗电流。

除此之外,也有人提出使用原子植入的方法来有目的性的改变肖特基势垒的高度以降低暗电流^[90-91]。例如, 2008 年, Ang 等人通过在单个 NiGe/Ge 界面处选择性地植入硫原子^[90],把空穴肖特基势垒高度从 0.1 eV 提高到 0.49 eV,暗电流在 1 V 偏压下从 2.45 mA 下降到 0.92 μ A。并且,未植入硫的参比器件明暗电流响应曲线几乎重叠,而植入硫的器件在 1550 nm 波长、1 V 偏压下的明暗电流比约为 100,响应率为 0.36 A/W,相应的量子效率 34%, -3 dB 频率响应带宽为 15 GHz。他们进一步的研究表明在电极两端分别植入两种不同特性的原子更有利于改善 SiGe MSM-PD 器件的性能^[91]。

2.4 其他无机材料 MSM-PDs

除了前文所综述到的 GaAs、InGaAs、Si/Ge 等一些半导体材料外,人们对利用其他无机半导体材料制作的可见及近红外 MSM 光电探测器也展开了一定的研究,其中包括无机钙钛矿^[25, 92-94]、石墨烯^[95-96]、MoS₂^[97-98]等。

钙钛矿材料具有理想的直接带隙、高的光吸收系数、高载流子迁移率、平衡的载流子传输距离、带隙可调^[92],是一种非常有潜力的光电材料。基于有机无机杂化钙钛矿的光电探测器被广泛研究^[99-100],而基于纯无机钙钛矿的光电探测器的报道却较为稀少。2013 年, Zhou 等人制备了具有高探测率的 SrTiO₃ MSM-PDs,研究了不同的金属电极对器件光电性能的影响^[25]。当金属电极为银时,与 SrTiO₃ 有一个较高的肖特基势垒,器件的暗电流低至 2.215×10^{-11} A,探测率也达 10^{12} cm \cdot Hz^{1/2}/W。此外,瞬态光响应测试表明

器件拥有一个较快的响应速度,上升时间为 360 ps。近期,出现了少量关于无机钙钛矿量子点探测器的报道。2016 年, Ramasamy 等人介绍了一种基于 CsPbX₃ (X 为卤素)量子点的 MSM-PDs^[93],器件的开关电流比高达 10^5 。2017 年, Liu 等人报道的类似器件在 1.5 V 偏压下,器件响应率高达 34A/W,相应的 EQE 将近 10000%^[92]。

石墨烯是一种零带隙的二维半导体材料,也是目前已发现电阻率最小的材料,具有优异的光电性能,自 2004 年被发现以来便以其优异的性能而引起了广泛关注^[101]。此外,石墨烯可吸收较大波长范围的光,具有极高的载流子迁移率,成为超快光电探测的理想材料^[102]。2011 年, Urich 等人报道的金属-石墨烯-金属光电探测器^[95],该器件有一个很快的响应时间 2.1 ps,相应的带宽为 262 GHz。2017 年, Xu 等人报道了一种石墨烯异质结构的 MSM-PDs^[96],器件表现了一个较低的暗电流,1 V 偏压下,暗电流密度约为 10^{-7} A/cm²数量级,峰值光响应为 0.43 A/W。

MoS₂也是一种研究较为广泛的二维半导体材料,具有良好的光学性能和优异的机械性能,这些特点使 MoS₂在光电子器件及柔性可穿戴器件方面倍受关注。例如, 2013 年, Tsai 等人报道了基于多层 MoS₂薄膜的 MSM-PDs^[97],器件在 10 V 偏压下,光电导增益高达 13.3,相应的响应率为 0.57 A/W。该器件的上升时间约为 70 μ s,下降时间约为 110 μ s。此外,即使在高达 200 $^{\circ}$ C 的环境下,该器件的明暗电流比也超过 10。

3 金属微纳结构改善 MSM-PDs 的红外响应

通常的光电探测器件以半导体作为光吸收层,当入射光子能量低于半导体材料带隙时,半导体材料不能吸收光,这限制了一些较宽带隙半导体材料在光通信以及红外探测领域的应用^[103]。利用热载流子发射机制^[37-38]可以突破这一限制。最早的关于热载流子 MSM-PDs 的报道见于 20 世纪 70 年代^[104]。平直型金属薄膜的吸光能力较弱,发射热载流子的效率比较低。2011 年, Wang 与 Melosh 将棱镜耦合激发的表面等离子激元模式作为 Au/Al₂O₃/Au 垂直型三层结构的入射光,相比于直接照射,大大提高了器件的响应率^[41]。此外,金属微纳结构也可高效激发表面等离子激元^[105-106],

使入射光在金属结构的周围被高效捕获,这相比于平直型金属薄膜而言,有利于产生更多的热载流子,而且还可以实现对入射光的选择性吸收^[107]。当然,热载流子发射机制除了应用于 MSM-PDs 中以外,也可用于单肖特基^[107-111]或其它类型的探测器中。

最直接的激发表面等离激元方式是将电极做成光栅形状,包含一维光栅^[26, 42, 103, 112]和二维光栅^[113-115]两种类型。例如,对于 Au/Al₂O₃/Au 垂直型三层结构,Chalabi 等人将接收光的电极做成百纳米的阵列条^[42],当条形金属电极的宽度不同,所激发的表面等离激元共振模式不同,相应的器件响应率不同。由于条形阵

列电极是一维光栅,所以该器件还具有很好的偏振选择性^[42],若要消除偏振敏感性,可将金属电极制作成二维光栅。如果把条形电极进一步变形,做成扭曲形状,则可以实现对圆偏振光旋转方向的感知^[114]。Ge 等人仿真了一种具有不对称金属纳米叉指电极的共面型 Si MSM-PD,通过优化金属纳米叉指电极的宽度,实现了波长 1310 nm 和 1550 nm 处达 0.45 mA/W 和 0.25 mA/W 的响应率^[103]。2015 年, Wang 等人则在 MoS₂ MSM-PD 叉指电极中的一组叉指上引入金属纳米天线^[112],如图 6(a) 所示,含有金属纳米天线的电极较不含天线的电极吸收光能力强,产生较多的热

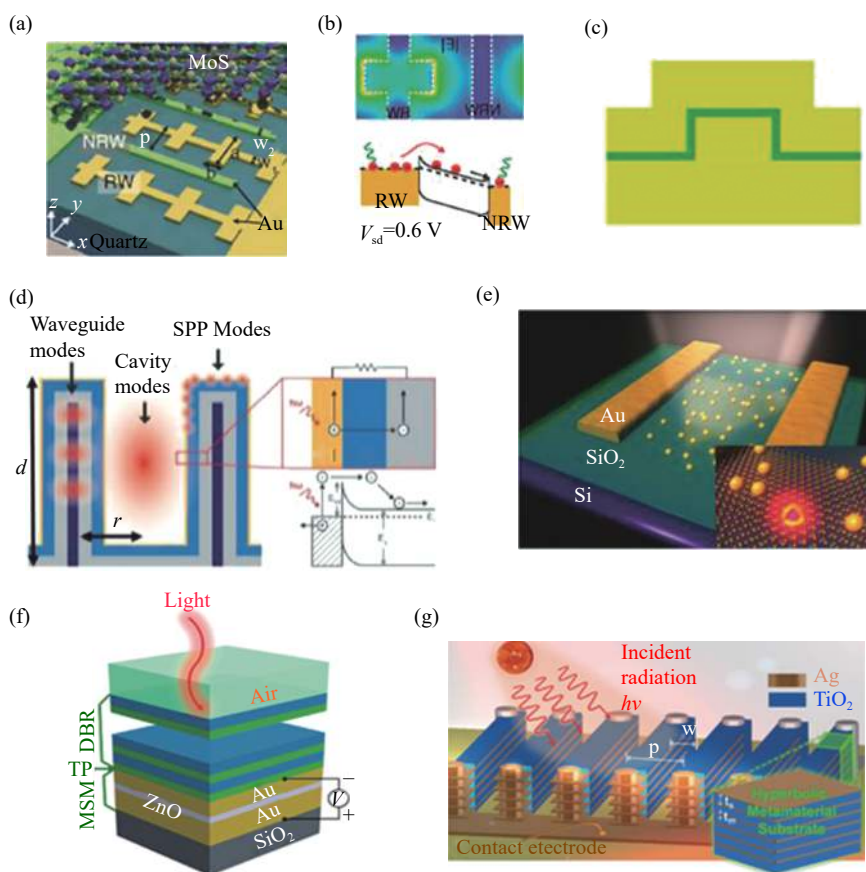


图 6 (a)~(b) 叉指电极的一组引入了金属纳米天线阵列的 MoS₂ MSM-PD 结构示意图及电场分布图与能带示意图^[112]; (c) 具有一维保形光栅的垂直型 ZnO MSM-PD 结构示意图^[26]; (d) 具有二维保形光栅结构的 Au/TiO₂/ITO 光电探测器结构及原理示意图^[115]; (e) 含金属纳米颗粒的 MoS₂ MSM-PD 结构示意图^[116]; (f) Tamm 表面等离激元热电子 ZnO MSM-PDs 结构示意图^[119]; (g) 基于慢波吸光原理的宽谱高效多 MSM 光电探测器结构示意图^[121]

Fig.6 (a)~(b) Schematic diagram of structure, electric field distribution and energy band of the MoS₂ MSM-PD with one of the finger electrode including an optical antenna array^[112]; (c) Schematic diagram of the vertical type ZnO MSM-PD with the conformal grating structure^[26]; (d) Schematic of structure and principle of Au/TiO₂/ITO photodetector with two dimensional conformal grating^[115]; (e) Schematic diagram of the MoS₂ MSM-PD dressed with metallic nanoparticles^[116]; (f) Schematic diagram of the Tamm plasmon based hot electron ZnO MSM-PD^[119]; (g) Structural diagram of broadband and efficient photodetectors composed of multiple MSMs based on the slow light absorption principle^[121]

载流子,如图 6(b)所示,相同偏压大小下,含有金属纳米天线的电极接正较相反情况可以实现较高的响应率。除了在平整半导体表面引入金属以外,还可以将半导体本身也光栅结构化^[109, 113, 115],再在其上方保形蒸发金属电极。苏州大学李孝峰团队还提出另外一种结构,即将底部金属电极首先图案化,再在上方保形制作半导体和顶部金属电极,如图 6(c)所示^[26],与传统光栅结构相比,这种保形结构器件顶层金属光吸收率大于 99%,有利于净电流的提高。2016 年,Chou 等人实验制备了具有二维保形光栅的 TiO₂ 热电子光电探测器^[115],结构示意图参见图 6(d),实现低于带隙的宽光谱光电探测。

金属纳米颗粒也可以激发表面等离激元模式,他们也同样被用在热电子探测器中^[111, 116-117]。例如, Sobhani 等人还在 MoS₂ MSM-PD 中引入了二氧化硅包覆的金属纳米颗粒,实现了器件性能的显著提升,结构示意图如图 6(e)^[116]。对于前文所述 Sun 等人制备的具有周期性三维纳米结构的 ZnO MSM-PD 器件^[118],他们还将金纳米颗粒引入 ZnO 薄膜中制备了 MSM-PD,不仅提高了 ZnO 薄膜的紫外光响应,还将可探测范围扩展到可见光区域。2017 年, Wen 等人将一层随机分布的金纳米颗粒作为表面等离激元吸收体,引入到 Si 和 TiO₂ 两个电子接受半导体层中间,这种同时结合光吸收和电子发射/收集的 MSM-PD 器件,在通信波长 1500 nm 处实现了高的光响应率 3.3 mA/W^[117]。

除了使用上述激发表面等离激元的经典结构,还可通过 Tamm 模式及慢波模式设计性能更加优异的光电探测器。例如,2017 年, Zhang 等人理论研究了如图 6(f)所示的含布拉格反射镜的垂直 ZnO MSM-PDs 的性能^[119],由于 Tamm 表面等离激元共振模式的激发,使得入射的光被强烈限制在顶部金属和相邻介质层之间的局部区域,这样超过 87% 的 813 nm 红外光就会被顶部金属吸收,从而形成一个强的净光电流。这种器件也展示了窄带可调以及对入射光角度不敏感的特性。2016 年, Sakhdari 等人基于慢波吸光原理^[105, 120]提出了如图 6(g)所示的热电子发射光电探测器件,该结构实际上是多个 MSM 器件并联在一起,不同位置的 MSM 元件实现了对不同波长光信号的感知,并且基于慢波原理可以实现对入射光的高效

捕获,多个 MSM 组合在一起便实现了宽谱范围的高效光电探测性能^[121]。

4 总结与展望

在 21 世纪这样一个信息技术飞速发展的时代,光电子技术正逐渐成为信息高技术的关键支柱。光电子器件经过近几十年的快速发展,也由分立转向集成,应用到如光纤通信、光电传感等光电子系统中。而 MSM-PDs 由于其本身结构固有的高速、低电容、高响应率等特性,受到科研人员极大的关注,并且 MSM-PD 从材料生长到器件工艺全部过程可以与高速晶体管-集成电路工艺相容,具有工艺简单、易实现探测器阵列的特点,是一种非常有应用前景的光电探测器。

文中综述了自 1971 年肖特基型 MSM 结构器件概念提出以来,研究者在金属-无机半导体-金属光电探测器领域所取得的一些进展。半导体材料是光电子器件中最核心的部分,不同的半导体材料具有不同的物理特性,如迁移率、光学吸收、电阻率、热特性和机械特性等,并且它们在制备工艺、成本等方面也表现迥异。过去的几十年间,研究者们针对不同半导体材料制备的 MSM-PDs 开展了一系列系统深入的研究,以满足不同应用的需求。较早研究的 GaAs、Si/Ge 类 MSM-PDs 主要用于探测可见及近红外波段的光信号,为了使工作波段向长波段扩展,人们研究了组分可调谐的 InGaAs MSM-PDs。之后,随着宽禁带 GaN、ZnO、SiC 等新兴材料的快速发展,MSM-PDs 的研究逐渐向短波(即日盲紫外)探测波段拓展。近年来,基于石墨烯等二维材料的 MSM PDs 称为研究的热门方向,它们的响应速度可以与传统的 GaAs 类器件相媲美,有望取代传统材料在通信领域获得广泛应用。概括来看,针对 MSM PDs 的研究主要包含降低暗电流、提高响应速度、改善响应率三个方面。研究者们提出使用势垒增强层、非对称电极等手段来降低器件暗电流。通过调节金属叉指电极的指宽和指间距参数则可以实现响应速度的优化。另外,金属电极对活性区域遮蔽带来的效率损失可以通过使用透电极、表面等离激元模式激发、光学谐振腔等一些光学操控手段来改善,从而实现响应率的提高。此外,基于金属微纳结构的热载流子光电探测器

也引起了关注,因为它们打破了传统半导体光电探测器受材料禁带宽度的限制,通过激发表面等离激元模式,实现了较宽带隙半导体在红外波段的检测。

总而言之,MSM-PDs 在材料、结构及性能等多个方面均取得了非常大的进展。长远看来,高速率、高响应率、多元阵列、集成电路化以及低成本仍是 MSM-PDs 光电探测器的主要发展方向。此外,随着应用的多元化涌现,研究者们应当针对具体的应用去开发相应的 MSM-PDs 器件,以实现实验室成果向市场化商品的快速转化。例如,导弹制导、火焰探测等特殊应用对器件在高温、高功率、耐恶劣环境等条件下的性能提出了更加极端的需求,而大多数探测器无法承受高温。提升器件的耐高温能力是 MSM-PDs 所面临的一项重要难题。我们也期待一些新兴的半导体材料能够在性能上更加优异,在成本上更加低廉,从而在未来有望取代传统材料去制备 MSM-PDs 器件,推动光电子器件领域的发展迈向新的纪元。同时,金属微纳结构的超常光捕获能力及其热电子发射机制在 MSM-PD 中的应用值得研究者们赋予更高的关注。

参考文献:

- [1] Tsai S L, Wu J S, Lin H J, et al. Simulation and design of InGaAsN metal-semiconductor-metal photodetectors for long wavelength optical communications [J]. *Physica Status Solidi (c)*, 2008, 5(6): 2167-2169.
- [2] Park H, Dan Y P, Seo K, et al. Filter-free image sensor pixels comprising silicon nanowires with selective color absorption [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(4): 1804-1809.
- [3] Xue Li, Zhai Dongsheng, Li Zhulian, et al. Signal-to-noise ratio analysis on APD arrays in laser ranging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(3): 0306001. (in Chinese)
薛莉, 翟东升, 李祝莲, 等. 激光测距中 APD 阵列探测信噪比分析[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(3): 0306001.
- [4] Rao G A, Mahulika S P. New criterion for aircraft susceptibility to infrared guided missiles [J]. *Aerospace Science & Technology*, 2005, 9(8): 701-712.
- [5] Chiou Y Z, Su Y K, Chang S J, et al. High detectivity InGaN-GaN multiquantum well p-n junction photodiodes [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2003, 39(5): 681-685.
- [6] Dehlinger G, Koester S J, Schaub J D, et al. High-speed Germanium-on-SOI lateral PIN photodiodes [J]. *Photonics Technology Letters IEEE*, 2004, 16(11): 2547-2549.
- [7] Shi Yanli, Guo Qian, Li Long, et al. Visible-extended InP/InGaAs wide spectrum response infrared detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3177-3180. (in Chinese)
史衍丽, 郭骞, 李龙, 等. 可见光拓展 InP/InGaAs 宽光谱红外探测器[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(11): 3177-3180.
- [8] Song Hailan, Huang Hui, Cui Hailin, et al. InGaAs/Si avalanche photodiodes [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2010, 31(5): 702-704. (in Chinese)
宋海兰, 黄辉, 崔海林, 等. InGaAs/Si 雪崩光电二极管[J]. *半导体光电*, 2010, 31(5): 702-704.
- [9] Reine M B, Marciniak J W, Wong K K, et al. HgCdTe MWIR back-illuminated electron-initiated avalanche photodiode arrays [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2007, 36(8): 1059-1067.
- [10] Zhang Jianliang, Chen Kangmin. The principle process and manufacturing of PIN junction photodiode [J]. *China Integrated Circuit*, 2004(9): 72-74. (in Chinese)
张健亮, 陈康民. PIN 结光电二极管的工艺原理和制造[J]. *中国集成电路*, 2004(9): 72-74.
- [11] Yang Chengzhu, Li Qingwen. Silicon photodetector [J]. *Semiconductor Technology*, 1983, 6: 57-63. (in Chinese)
杨成珠, 李庆文. 硅光电探测器[J]. *半导体技术*, 1983, 6: 57-63.
- [12] Omnès F, Monroy E, Reverchon J L. Wide bandgap UV photodetectors: a short review of devices and applications[C]// Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2007, 6473: 6473E.
- [13] Wei Jiatong, Chen Liwei, Hu Haifan, et al. An advanced integrated avalanche photodiode with Si and Ge material [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(s1): S120002. (in Chinese)
魏佳童, 陈立伟, 胡海帆, 等. 基于硅与锗材料的改进集成雪崩光电二极管[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(s1): S120002.
- [14] Sze S M, Coleman D J, Loya A. Current transport in metal-semiconductor-metal (MSM) structures [J]. *Solid-State Electronics*, 1971, 14(12): 1209-1218.
- [15] Chen Y, Williamson S, Brock T, et al. 375-GHz-bandwidth photoconductive detector [J]. *Applied Physics Letters*, 1991, 59(16): 1984-1986.
- [16] Smith F W, Le H Q, Diadiuk V, et al. Picosecond GaAs-based photoconductive optoelectronic detectors [J]. *Applied Physics*

- Letters*, 1989, 54(10): 890-892.
- [17] Roth W, Schumacher H, Kluge J, et al. The DSI diode-A fast large-area optoelectronic detector [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1985, 32(6): 1034-1036.
- [18] Yuang R H, Shieh J L, Chyi J I, et al. Overall performance improvement in GaAs MSM photodetectors by using recessed-cathode structure [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, 9(2): 226-228.
- [19] Li Yong, Li Gang, Shen Hongbin, et al. Design and simulation research of InGaAs-MSM photodetector [J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(5): 651-656. (in Chinese)
李勇, 李刚, 沈洪斌, 等. InGaAs-MSM光电探测器设计与仿真研究[J]. *应用光学*, 2016, 37(5): 651-656.
- [20] Rogers D L, Woodall J M, Pettit G D, et al. VIA-8 high-performance GaInAs interdigitated-metal- semiconductor-metal (IMSM) 1.3- μm photodetector grown on a GaAs substrate [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1987, 34(11): 2383-2384.
- [21] Bassous E, Scheuermann M, Kesan V P, et al. A high-speed silicon metal-semiconductor-metal photodetector fully integrable with (Bi) CMOS circuits[C]//International Electron Devices Meeting 1991[Technical Digest], 1991: 187-190.
- [22] Alexandrou S, Wang C C, Hsiang T Y, et al. A 75 GHz silicon metal - semiconductor - metal Schottky photodiode [J]. *Applied Physics Letters*, 1993, 62(20): 2507-2509.
- [23] Mondia J P, Sharma R, Schaefer J, et al. An electro-dynamically confined single ZnO tetrapod laser [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(12): 121102.
- [24] Özgür Ü, Alivov Y I, Liu C, et al. A comprehensive review of ZnO materials and devices [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 98(4): 041301.
- [25] Zhou W J, Jin K J, Guo H Z, et al. Electrode effect on high-detectivity ultraviolet photodetectors based on perovskite oxides [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114(22): 224503.
- [26] Wu K, Zhan Y H, Zhang C, et al. Strong and highly asymmetrical optical absorption in conformal metal-semiconductor-metal grating system for plasmonic hot-electron photodetection application [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 14304.
- [27] Zhai T Y, Li L, Wang X, et al. Recent Developments in One-Dimensional Inorganic Nanostructures for Photodetectors [J]. *Advanced Functional Materials*, 2010, 20(24): 4233-4248.
- [28] Sugeta T, Urisu T, Sakata S, et al. Metal-semiconductor-metal photodetector for high-speed optoelectronic circuits [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1980, 19(S1): 459-464.
- [29] Sze S M, Ng K K. *Physics of Semiconductor Devices*[M]. Translated by John Wiley, Sons, The third edition, Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2008.(in Chinese)
施敏, 伍国珏. *半导体器件物理*[M]. 耿莉, 张瑞智, 译. 第3版. 西安: 西安交通大学出版社, 2008.
- [30] Gibbons G, Sze S M. Avalanche breakdown in read diodes and pin diodes [J]. *Solid-State Electronics*, 1968, 11(2): 225-232.
- [31] Katsume T, Hiramoto M, Yokoyama M. Photocurrent multiplication in naphthalene tetracarboxylic anhydride film at room temperature [J]. *Applied Physics Letters*, 1996, 69(24): 3722-3724.
- [32] Li L L, Zhang F J, Wang J, et al. Achieving EQE of 16, 700% in P3HT:PC71BM based photodetectors by trap-assisted photomultiplication [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 9181.
- [33] Wang W B, Zhang F J, Bai H T, et al. Photomultiplication photodetectors with P3HT:fullerene-free material as the active layers exhibiting a broad response [J]. *Nanoscale*, 2016, 8(10): 5578-5586.
- [34] Schumacher H, Leblanc H P, Soole J, et al. An investigation of the optoelectronic response of GaAs/InGaAs MSM photodetectors [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 1988, 9(11): 607-609.
- [35] Soole J B D, Schumacher H, Esagui R, et al. Waveguide integrated MSM photodetector for the 1.3 μm -1.6 μm wavelength range[C]//Electron Devices Meeting 1988 [Technical Digest], 1988: 483-486.
- [36] Zhang Y, Deng W, Zhang X, et al. In situ integration of squaraine-nanowire-array-based Schottky-type photodetectors with enhanced switching performance [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2013, 5(23): 12288-12294.
- [37] Li Wei, Valentine J G. Harvesting the loss: surface plasmon-based hot electron photodetection [J]. *Nanophotonics*, 2016, 6(1): 177-191.
- [38] Brongersma M L, Halas N J, Nordlander P. Plasmon-induced hot carrier science and technology [J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(1): 25-34.
- [39] Casalino M, Coppola G, La Rue R M, et al. State-of-the-art all-silicon sub-bandgap photodetectors at telecom and datacom wavelengths [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10(6): 895-921.
- [40] Sze S M, Crowell C R, Carey G P, et al. Hot-Electron Transport in Semiconductor-Metal-Semiconductor Structures

- [J]. *Journal of Applied Physics*, 1966, 37(7): 2690-2695.
- [41] Wang F M, Melosh N A. Plasmonic energy collection through hot carrier extraction [J]. *Nano Letters*, 2011, 11(12): 5426-5430.
- [42] Chalabi H, Schoen D, Brongersma M L. Hot-electron photodetection with a plasmonic nanostripe antenna [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(3): 1374-1380.
- [43] Gong T, Munday J N. Angle-independent hot carrier generation and collection using transparent conducting oxides [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(1): 147-152.
- [44] Kosonocky W F. Review of Schottky-barrier imager technology[C]//Infrared Detectors and Focal Plane Arrays. International Society for Optics and Photonics, 1990, 1308: 2-27.
- [45] Boriskina S V, Zhou J W, Hsu W C, et al. Limiting efficiencies of solar energy conversion and photo-detection via internal emission of hot electrons and hot holes in gold[C]//Infrared Remote Sensing and Instrumentation XXIII. International Society for Optics and Photonics, 2015, 9608: 960816.
- [46] Munday J N, Gong T. Materials for hot carrier plasmonics[Invited] [J]. *Optical Materials Express*, 2015, 5(11): 2501-2512.
- [47] Li Zhiqi, Wang Qingkang, Li Xiaoming, et al. DC photoelectric properties of new type GaAs MSM photodiode [J]. *Shanghai Semiconductor*, 1990(1): 1-4. (in Chinese)
李志奇, 王庆康, 李晓明, 等. 新型GaAs MSM结构光电二极管的直流光电特性[J]. 上海半导体, 1990(1): 1-4.
- [48] Rao M V, Bhattacharya P K, Chen C Y. Low-noise In_{0.53}Ga_{0.47}As:Fe photoconductive detectors for optical communication [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2005, 33(1): 67-71.
- [49] Huang H L, Xie Y N, Yang W F, et al. Low-dark-current TiO₂ MSM UV photodetectors with Pt Schottky contacts [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2011, 32(4): 530-532.
- [50] Wang Qingkang, Feng Sheng. Dark current property of GaAs MSM photodetectors [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 1995(4): 336-338. (in Chinese)
王庆康, 冯胜. GaAs MSM光电探测器暗电流特性[J]. 半导体光电, 1995(4): 336-338.
- [51] Wang S Y, Bloom D M. 100 GHz bandwidth planar GaAs Schottky photodiode [J]. *Electronics Letters*, 1983, 19(14): 554-555.
- [52] Van Zeghbroeck B J, Patrick W, Halbout J M, et al. 105-GHz bandwidth metal-semiconductor-metal photodiode [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 1988, 9(10): 527-529.
- [53] Chou S Y, Liu Y, Khalil W, et al. Ultrafast nanoscale metal-semiconductor-metal photodetectors on bulk and low-temperature grown GaAs [J]. *Applied Physics Letters*, 1992, 61(7): 819-821.
- [54] Nikolic P L, Gvozdic D M, Radunovic J B. Pulse response of a resonant cavity enhanced metal-semiconductor-metal photodetector[C]//21st International Conference on Microelectronics. IEEE, 1997, 1: 327-330.
- [55] Karar A, Das N, Tan C L, et al. High-responsivity plasmonics-based GaAs metal-semiconductor-metal photodetectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99: 133112.
- [56] Nabet B, Currie M, Dianat P, et al. High-speed, high-sensitivity optoelectronic device with bilayer electron and hole charge plasma [J]. *ACS Photonics*, 2014, 1(7): 560-569.
- [57] Lee C T, Lee H Y. Surface passivated function of GaAs MSM-PDs using photoelectrochemical oxidation method [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(2): 462-464.
- [58] Sharaf R, Daneshmandi O, Ghayour R, et al. A new GaAs metal-semiconductor-metal photodetector based on hybrid plasmonic structure to improve the optical and electrical responses [J]. *Plasmonics*, 2015, 11(2): 441-448.
- [59] Neutens P, Van Dorpe P, De Vlaminck I, et al. Electrical detection of confined gap plasmons in metal-insulator-metal waveguides [J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(5): 283-286.
- [60] Liu Enke, Zhu Bingsheng, Luo Jinsheng. The Physics of Semiconductors[M]. The 7th edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011: 256-266. (in Chinese)
刘恩科, 朱秉升, 罗晋生. 半导体物理学[M]. 第7版. 北京: 电子工业出版社, 2011: 256-266.
- [61] Litvin K I, Burm J, Woodard D W, et al. High-speed MSM photodetectors for millimeter waves[C]//Optical Technology for Microwave Applications VI and Optoelectronic Signal Processing for Phased-Array Antennas III. International Society for Optics and Photonics, 1992, 1703: 313-321.
- [62] Nabet B. A heterojunction metal-semiconductor-metal photodetector [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, 9(2): 223-225.
- [63] Pan Qing. 2.6 μm InGaAs photodetector [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 1999, 20(2): 79-82. (in Chinese)
潘青. 用InGaAs材料制作的2.6 μm 光电探测器[J]. 半导体光电, 1999, 20(2): 79-82.

- [64] Hoogeveen R W M, Goede A P H. Extended wavelength InGaAs infrared (1.0-2.4 μm) detector arrays on SCIAMACHY for space-based spectrometry of the Earth atmosphere [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2001, 42(1): 1-16.
- [65] Böttcher E H, Pfitzenmaier H, Dröge E, et al. Millimetre-wave coplanar waveguide slow wave transmission lines on InP [J]. *Electronics Letters*, 1996, 32(15): 1377-1378.
- [66] Hurm V, Benz W, Bronner W, et al. 20 Gbit/s long wavelength monolithic integrated photoreceiver grown on GaAs [J]. *Electronics Letters*, 1997, 33(7): 624-626.
- [67] Shi C X, Grutzmacher D, Stollenwerk M, et al. High-performance undoped InP/n-In_{0.53}Ga_{0.47}As MSM photodetectors grown by LP-MOVPE [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1992, 39(5): 1028-1031.
- [68] Shi Changxin, Heime K. Long-Wavelength low dark current high speed In_{0.53}Ga_{0.47}As MSM photodetectors [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1991, 12: 767-770. (in Chinese)
史常忻, Heime K. 长波长低暗电流高速 In_{0.53}Ga_{0.47}As MSM 光电探测器[J]. *半导体学报*, 1991, 12: 767-770.
- [69] Böttcher E H, Kuhl D, Hieronymi F, et al. Ultrafast semiinsulating InP:Fe-InGaAs:Fe-InP:Fe MSM photodetectors: modeling and performance [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1992, 28(10): 2343-2357.
- [70] Kim J H, Griem H T, Friedman R A, et al. High-performance back-illuminated InGaAs/InAlAs MSM photodetector with a record responsivity of 0.96 A/W [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1992, 4(11): 1241-1244.
- [71] Yuang R H, Chyi J I, Chan Y J, et al. High-responsivity InGaAs MSM photodetectors with semi-transparent Schottky contacts [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1995, 7(11): 1333-1335.
- [72] Klockenbrink R, Wehmann H H, Schlachetzki A. Improved thermal stability of In_{0.53}Ga_{0.47}As metal-semiconductor-metal photodetectors with Al₂O₃ interfacial layer [J]. *Photonics Technology Letters IEEE*, 1994, 6(10): 1213-1215.
- [73] Davidson A C, Wise F W, Compton R C, et al. High-performance MSM photodetectors using Cu Schottky contacts [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, 9(5): 657-659.
- [74] Yuang R H, Shieh H C, Chien Y J, et al. High-performance large-area InGaAs MSM photodetectors with a pseudomorphic InGaP cap layer [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1995, 7(8): 914-916.
- [75] Pang Z, Song K C, Mascher P, et al. Sulfur passivation of InP/InGaAs metal-semiconductor-metal photodetectors [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 1999, 146(5): 1946-1951.
- [76] Chiu W Y, Huang F H, Wu Y S, et al. Improvement of mesa-sidewall leakage current using benzocyclobuten sidewall process in InGaAs/InP MSM photodetector [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 44(4): 2586-2587.
- [77] Kim J, Johnson W B, Kanakaraju S, et al. Improvement of dark current using InP/InGaAsP transition layer in large-area InGaAs MSM photodetectors [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2004, 51(3): 351-356.
- [78] Hsiang T Y, Alexandrou S, Wang C C, et al. Picosecond silicon metal-semiconductor-metal photodiode[C]//Photodetectors and Power Meters. International Society for Optics and Photonics, 1993, 2022: 76-83.
- [79] Lee H C, Van Zeghbroeck B. Novel high-speed silicon MSM photodetector operating at 830 nm wavelength [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 1995, 16(5): 175-177.
- [80] Ho J Y L, Wong K S. Bandwidth enhancement in silicon metal-semiconductor-metal photodetector by trench formation [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1996, 8(8): 1064-1066.
- [81] Chui C O, Okyay A K, Saraswat K C. Effective dark current suppression with asymmetric MSM photodetectors in group IV semiconductors [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(11): 1585-1587.
- [82] Okyay A K, Chui C O, Saraswat K C. Leakage suppression by asymmetric area electrodes in metal-semiconductor-metal photodetectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(6): 063506.
- [83] Colace L, Masini G, Galluzzi F, et al. Metal-semiconductor-metal near-infrared light detector based on epitaxial Ge/Si [J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 72(24): 3175-3177.
- [84] Okyay A K, Nayfeh A M, Saraswat K C, et al. High-efficiency metal-semiconductor-metal photodetectors on heteroepitaxially grown Ge on Si [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(17): 2565-2567.
- [85] Ciftcioglu B, Zhang J, Sobolewski R, et al. An 850-nm normal-incidence Germanium metal-semiconductor-metal photodetector with 13-GHz bandwidth and 8- μA dark current [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(24): 1850-1852.
- [86] Li B J, Li G Z, Liu E K, et al. Monolithic integration of a SiGe/Si modulator and multiple quantum well photodetector for 1.55 μm operation [J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 73(24): 3504-3505.

- [87] Hwang J D, Chang W T, Chen Y H, et al. Suppressing the dark current of metal-semiconductor-metal SiGe/Si heterojunction photodetector by using asymmetric structure [J]. *Thin Solid Films*, 2007, 515(7-8): 3837-3839.
- [88] Zhang Shiyu, Hong Xia, Fang Xu, et al. Design of silicon based Germanium metal-semiconductor-metal photodetector with asymmetric area electrodes [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, 42(1): 84-88. (in Chinese)
张诗雨, 洪霞, 方旭, 等. 非对称面电极硅基锗金属-半导体-金属光电探测器的设计[J]. *光电工程*, 2015, 42(1): 84-88.
- [89] Park J H, Yu H Y. Dark current suppression in an erbium-Germanium-erbium photodetector with an asymmetric electrode area [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(7): 1182-1184.
- [90] Ang K W, Yu M B, Zhu S Y, et al. Novel NiGe MSM photodetector featuring asymmetrical schottky barriers using sulfur co-implantation and segregation [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2008, 29(7): 708-710.
- [91] Zang H, Lee S J, Loh W Y, et al. Application of dopant segregation to metal-germanium-metal photodetectors and its dark current suppression mechanism [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(5): 051110.
- [92] Liu X H, Yu D J, Cao F, et al. Low-voltage photodetectors with high responsivity based on solution-processed micrometer-scale all-inorganic perovskite nanoplatelets [J]. *Small*, 2017, 13(25): 1700364.
- [93] Ramasamy P, Lim D H, Kim B, et al. All-inorganic cesium lead halide perovskite nanocrystals for photodetector applications [J]. *Chemical Communications*, 2016, 52(10): 2067-2070.
- [94] Wang A F, Yan X X, Zhang M, et al. Controlled synthesis of lead-free and stable perovskite derivative Cs₂SnI₆ nanocrystals via a facile hot-injection process [J]. *Chemistry of Materials*, 2016, 28(22): 8132-8140.
- [95] Urich A, Unterrainer K, Mueller T. Intrinsic response time of graphene photodetectors [J]. *Nano Letters*, 2011, 11(7): 2804-2808.
- [96] Xu Y, Ali A, Shehzad K, et al. Solvent-based soft-patterning of graphene lateral heterostructures for broadband high-speed metal-semiconductor-metal photodetectors [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2017, 2(2): 1600241.
- [97] Tsai D S, Liu K K, Lien D H, et al. Few-layer MoS₂ with high broadband photogain and fast optical switching for use in harsh environments [J]. *ACS Nano*, 2013, 7(5): 3905-3911.
- [98] Khadka S, Wickramasinghe T E, Lindquist M, et al. As-grown two-dimensional MoS₂ based photodetectors with naturally formed contacts [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(26): 261109.
- [99] Ahmadi M, Wu T, Hu B. A review on organic-inorganic halide perovskite photodetectors: device engineering and fundamental physics [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(41): 1605242.
- [100] Tian W, Zhou H P, Li L. Hybrid organic-inorganic perovskite photodetectors [J]. *Small*, 2017, 13(41): 1702107.
- [101] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films [J]. *Science*, 2004, 306(5696): 666-669.
- [102] Song S C, Chen Q, Jin L, et al. Great light absorption enhancement in a graphene photodetector integrated with a metamaterial perfect absorber [J]. *Nanoscale*, 2013, 5(20): 9615-9619.
- [103] Ge J Y, Luo M L, Zou W H, et al. Plasmonic photodetectors based on asymmetric nanogap electrodes [J]. *Applied Physics Express*, 2016, 9(8): 084101.
- [104] Heiblum M, Wang S H, Whinnery J, et al. Characteristics of integrated MOM junctions at dc and at optical frequencies [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1978, 14(3): 159-169.
- [105] Cui Y X, Fung K H, Xu J, et al. Ultrabroadband light absorption by a sawtooth anisotropic metamaterial slab [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(3): 1443-1447.
- [106] Cui Y X, He Y R, Jin Y, et al. Plasmonic and metamaterial structures as electromagnetic absorbers [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(4): 495-520.
- [107] Sobhani A, Knight M W, Wang Y M, et al. Narrowband photodetection in the near-infrared with a plasmon-induced hot electron device [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 1643.
- [108] Wen L, Chen Y F, Liang L, et al. Hot electron harvesting via photoelectric ejection and photothermal heat relaxation in hotspots-enriched plasmonic/photonic disordered nanocomposites [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(2): 581-591.
- [109] Li W, Valentine J. Metamaterial perfect absorber based hot electron photodetection [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(6): 3510-3514.
- [110] Lin K T, Chen H L, Lai Y S, et al. Silicon-based broadband antenna for high responsivity and polarization-insensitive photodetection at telecommunication wavelengths [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 3288.
- [111] Lu Y H, Dong W, Chen Z, et al. Gap-plasmon based broadband

- absorbers for enhanced hot-electron and photocurrent generation [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 30650.
- [112] Wang W Y, Klots A, Prasai D, et al. Hot electron-based near-infrared photodetection using bilayer MoS₂ [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(11): 7440-7444.
- [113] Arquer F P G D, Mihi A, Konstantatos G. Large-area plasmonic-crystal hot-electron based photodetectors [J]. *ACS Photonics*, 2015, 2(7): 950-957.
- [114] Li W, Coppens Z J, Besteiro L V, et al. Circularly polarized light detection with hot electrons in chiral plasmonic metamaterials [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8379.
- [115] Chou J B, Li X H, Wang Y, et al. Surface plasmon assisted hot electron collection in wafer-scale metallic-semiconductor photonic crystals [J]. *Optics Express*, 2016, 24(18): A1234-A1244.
- [116] Sobhani A, Lauchner A, Najmaei S, et al. Enhancing the photocurrent and photoluminescence of single crystal monolayer MoS₂ with resonant plasmonic nanoshells [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(3): 031112.
- [117] Wen L, Chen Y F, Liu W W, et al. Enhanced photoelectric and photothermal responses on silicon platform by plasmonic absorber and omni-schottky Junction [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, 11(5): 1700059.
- [118] Sun M W, Xu Z, Yin M, et al. Broad-band three dimensional nanocave ZnO thin film photodetectors enhanced by Au surface plasmon resonance [J]. *Nanoscale*, 2016, 8(16): 8924-8930.
- [119] Zhang C, Wu K, Giannini V, et al. Planar hot-electron photodetection with tamm plasmons [J]. *ACS Nano*, 2017, 11(2): 1719-1727.
- [120] Lin Y Y, Cui Y X, Ding F, et al. Tungsten based anisotropic metamaterial as an ultra-broadband absorber [J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(2): 606-617.
- [121] Sakhdari M, Hajizadegan M, Farhat M, et al. Efficient, broadband and wide-angle hot-electron transduction using metal-semiconductor hyperbolic metamaterials [J]. *Nano Energy*, 2016, 26: 371-381.