

场助光电阴极研究进展*

岳江楠¹, 李禹晴¹, 陈鑫龙², 徐鹏霄², 邓文娟¹, 彭新村¹, 邹继军^{1**}

(1. 东华理工大学核技术应用教育部工程研究中心, 南昌 330013;
2. 中国电子科技集团公司第五十五研究所, 南京 210016)

摘 要: 对场助光电阴极的发展进行回顾, 介绍了场助光电阴极的工作原理, 系统总结了三种具有代表性的阴极结构, 分别是 InP/InGaAsP/InP、InP/InGaAs、InGaAs/InAsP/InP 光电阴极。InP/InGaAsP/InP 双异质结结构是场助光电阴极研究的热点, 这种结构大多用于长波阈值达到 1.3 μm 的场助光电阴极; InGaAs 异质结结构相对于其他结构具有很高的灵敏度, 响应时间快, 有利于在条纹变像管中应用; InGaAs/InAsP/InP 结构的光电阴极在 InP 和 InGaAs 之间提供一层 InAsP 渐变层, 对延长波长阈值非常有利, 通过分析不同结构的特点及应用, 讨论了场助光电阴极的发展方向以及难点。

关键词: 场助光电阴极; 转移电子光电阴极; 镓砷; 磷化铟

中图分类号: TN362 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2022)04-0248-06

Development of Field Assisted Photocathode

YUE Jiangnan¹, LI Yuqing¹, CHEN Xinlong², XU Pengxiao²,
DENG Wenjuan¹, PENG Xincun¹, ZOU Jijun¹

(1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, School of Mechanical and Electronic Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, CHN; 2. The 55th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210016, CHN)

Abstract: The development of field-assisted photocathode was reviewed, and the working principle of field-assisted photocathode was introduced. Three representative cathode structures were summarized systematically, which were InP/InGaAsP/InP, InP/InGaAs and InGaAs/InAsP/InP photocathode. InP/InGaAsP/InP double heterojunction was a research highlight in field-assisted photocathode research, and this structure was mostly used in 1.3 μm field-assisted photocathode; InGaAs heterojunction structure had high sensitivity and fast response time compared with other structures, which was conducive to the application of fringe image converter tube; the photocathode with InGaAs/InAsP/InP structure provided a graded InAsP layer between InP and InGaAs, which was very beneficial to prolong the wavelength threshold. By analyzing the characteristics and applications of dif-

收稿日期: 2022-06-15

* 基金项目: 国家自然科学基金(11875012, 61961001, 62061001); 江西省自然科学基金(20192ACBL20003, 20181BAB202026, 20202BAB202013); 江西省“双千计划”项目(jxsq2019201053)

作者简介: 岳江楠(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事场助光电阴极方向的研究;

李禹晴(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事场助光电阴极方向的研究;

陈鑫龙(1988—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事光电阴极及真空光电探测器研究。

** 通讯作者: 邹继军(1973—), 男, 博士, 教授, 主要从事光电阴极方向的研究。(E-mail: jjzou@ecut.edu.cn)

ferent structures, the development direction and difficulties of field-assisted photocathodes were discussed.

Key words: field-assisted photocathode; transfer electron photocathode; InGaAs; InP

引 言

目前,光电探测广泛应用于夜视装备、传感器、光纤通信等领域。研制能在近红外波长范围内工作的器件是光电探测器研究的热点之一。传统光电阴极的有用灵敏度的长波阈值约为 $1.1\ \mu\text{m}$,在NEA光电阴极发展的早期,人们认为可以用禁带宽度低至 $0.70\ \text{eV}$ 的半导体研制高效的阴极。但是很快就发现对于NEA阴极,有一个大约 $1.2\ \text{eV}$ 的电子势垒,这阻止了能量低于这个势垒的光子的有效光电发射^[1-2]。为了实现突破,人们开始通过施加反向偏置电压降低真空能级来克服这一限制,不断提出利用PN结、MOS结构、肖特基势垒、场发射和异质结的偏置辅助光电阴极,并进行了实验研究,但在转移电子光电阴极(TE电子光电阴极)出现之前,在有效光电发射和低暗电流发射方面,没有一个具有实际意义。

对于加反向偏置电压的辅助光电阴极研究始于1960年,Simon和Spicer对反偏置Si和Ge PN结进行了研究^[3],这比第一个NEA光电阴极被发明还要早5年,但是这些光电阴极都没有成功地将阈值延长到 $1.1\ \mu\text{m}$ 以上。然而,在1974年,Bell^[4]等人通过实验证明了Ag/InP肖特基势垒光电阴极的场辅助光电发射,并首次提出转移电子光电发射原理,这成为后期研究场助光电阴极的基础。而后,Escher、Bell、Gregory等人不断改变材料结构,对场助光电阴极进行了大量的研究,将光电阴极的波长阈值扩展到 $2.1\ \mu\text{m}$ ($150\ \text{K}$)^[5],并在 $1.55\ \mu\text{m}$ 处实现8%的量子效率^[6]。1997年,日本M.Niigaki等人提出第一个成功利用PN结的光电阴极,在 $1.3\ \mu\text{m}$ 处达到5%的量子效率^[7];在2014年,他们又采用PN结结构将阈值延伸到 $2.3\ \mu\text{m}$ ^[8],这是迄今为止场助光电阴极延长波长的最大阈值。

国内也从20世纪80年代开始了对场助光电阴极的研究,这一时期主要是中国科学院西安光学精密机械研究所在进行理论实验。李晋闽、王存让^[9]等人对场助光电阴极的量子效率^[10]、响应时间^[11]和能带^[12]进行了计算,对 $1.25\ \mu\text{m}$ 近红外场助光电阴极

材料的液相外延技术进行研究^[13];李相民、侯洵等人介绍了转移电子光电阴极的工艺^[14],并对转移电子光电阴极进行了调制传递函数的理论计算^[15];2008年深圳大学的牛憨笨课题组曾公开发表了场助多碱红外光电阴极,阈值波长可达到 $1.06\ \mu\text{m}$ ^[16];2014年孙巧霞等人对InP/InGaAs/InP光电阴极的响应时间和量子效率进行了理论计算,响应时间达到 $40\ \text{ps}$ ^[17];随后北方夜视科技集团也进行了相关研究,2015年刘峰、石峰等人研究了场助电压对PP型异质结能带结构和对短波红外透射式光电阴极的影响^[18];蔡志鹏在2017年对InGaAs/InP场助阴极的能带结构进行了设计与仿真^[19];2018年蔡宸提出了场助式GaSb光电阴极,并进行了仿真计算^[20]。

文中将对场助光电阴极提出以来的国内外研究进展进行讨论,重点分析不同结构场助光电阴极的基本原理以及主要的实验结果。

1 场助光电阴极原理

所谓场助光电阴极,即对于某些III-V半导体,例如InP、GaAs、InGaAs、InGaAsP合金等,在发射层和表面覆盖层之间施加大于 $10^4\ \text{V/cm}$ 的电场,在肖特基势垒表面形成耗尽层,电子可以在大于 $10^4\ \text{V/cm}$ 的电场中上升到导带谷,成功转移到上导带谷的电子然后通过表面势垒发射到真空中。这里以InP/InGaAs/InP结构为例,如图1(b)所示,施加的反向偏压可以使表面能带向下弯曲,使表面真空能级低于导带底能级,更有利于电子的发射。

而转移电子光电发射包括六个步骤,分别是:(1)入射光子通过表面金属传输;(2)在p-InGaAs内产生电子空穴对;(3)导带的热激发电子扩散到表面耗尽区;(4)这些电子经过反向偏压加速到更高的能谷,如在 Γ 、L或X能谷;(5)通过表面金属层;(6)电子通过Cs-O激活的金属表面势垒进入真空。转移电子光电阴极来自步骤(4),其中相当一部分光激发载流子将转移到一个更高的能谷(或在 Γ 导带内加热)^[4]。

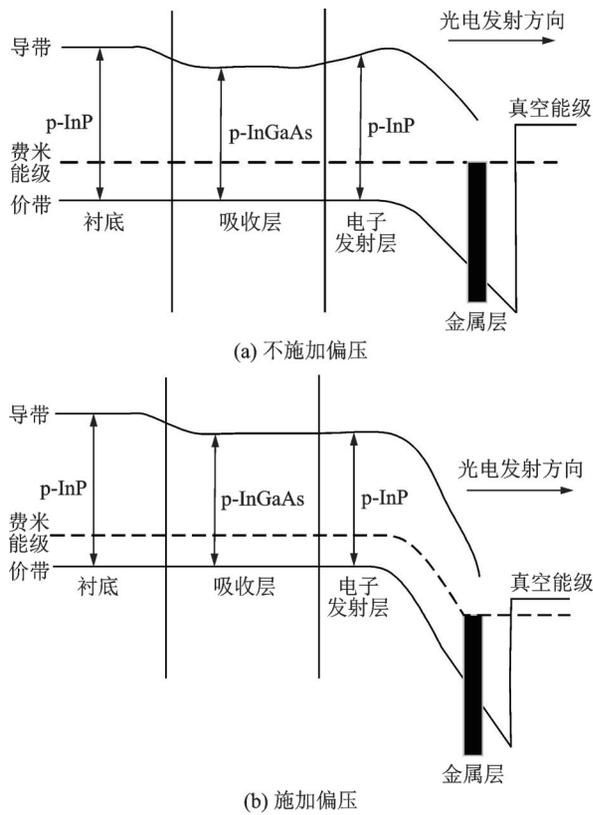


图 1 转移电子光电阴极的能带图

Fig.1 Band diagram of the transferred electron photocathode

2 目前研究进展及讨论

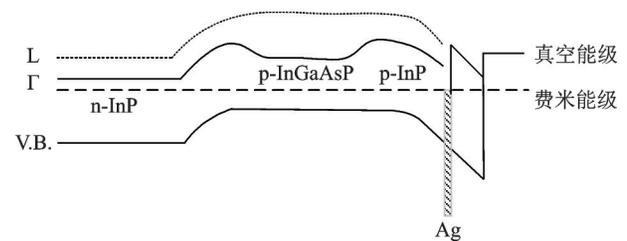
回顾六十年来场助光电阴极的研究,大多是基于 InP、InGaAs、InGaAsP 等材料来进行。晶格失配会在界面处引入大量的复合中心,从而影响光电子在半导体材料体内传输效率,而晶格匹配会减小这种影响。经过工艺技术的发展,可以生长出晶格匹配的阴极半导体材料,推动了场助光电阴极的研究。除此之外,还有其他材料的一些研究,但改善效果都不是很明显,例如 Parker 等人在 1995 年提出的 AlGaAs 场助光电阴极^[21]。接下来将主要介绍不同结构场助光电阴极的基本原理以及主要的实验结果。

2.1 InP/InGaAsP/InP 双异质结光电阴极

为了最小化暗电流发射,吸收层的带隙决定了阴极的长波光电发射阈值。InP/InGaAsP/InP 双异质结光电阴极将吸收层与发射层分开,由于 InGaAsP 层不涉及电子发射过程,其带隙可尽量向长波阈延伸,而由于 InP 的 L 能谷带边高出真空能级 0.2 eV,用 InP 作为表面发射层可提高电子的逃逸几率。所以 InP/InGaAsP/InP 双异质结光电阴极

是这些年来场助光电阴极研究的热点,这种结构大多用于 1.3 μm 的场助光电阴极。

异质结光电阴极的概念是 Milnes 和 Feucht 在 1971 年提出的^[22]。1975 年,Escher、Fairman 等人实验出了第一个成功的异质结光电阴极,采用的就是 InP/InGaAsP/InP 结构,如图 2 所示,在 InP 衬底上液相外延生长 InGaAsP 吸收层,气相外延生长 InP 发射层,表面覆盖一层银薄膜,然后进行清洗和 Cs、O 激活。实验结果表明,吸收层光电子能够有效地从低带隙材料转移到高带隙材料并发射到真空中,量子效率大于 1%^[23]。

图 2 InP/InGaAsP/InP 光电阴极能带示意图^[23]Fig.2 Schematic of the energy bands of the InP/InGaAsP/InP photocathode^[23]

1991 年 Kenneth、Costello 等人在发射层与吸收层之间增加了一个过渡层,提出一个在 0.95~1.65 μm 波长范围内工作的高灵敏度传输光电阴极,在 1.3 μm 处量子效率达到 1%,并给出了真空管的实验结果,发现相对于以往使用的银氧铯光电阴极,转移电子阴极可以显著改善暗电流性能,但是在这种结构中光电阴极量子效率随着光强的增加或阴极的冷却而降低,因为它与肖特基电极的高薄膜电阻有关^[24]。1992 年,李晋闽等人首次对场助光电阴极的时间响应进行了计算,分析了场助偏压与时间响应的关系,同时对 InP/InGaAsP/InP 双异质结光电阴极的能带进行了计算,发现场助光电阴极的长波响应主要取决于光电子在吸收层与发射层之间异质结交界处的传输效率,而异质结界面的能带结构决定了电子在交界处的传输效率,且与发射层的厚度、界面渐变区宽度以及掺杂浓度等参数有直接关系^[16],这为场助光电阴极的研究提供了理论依据。

1997 年,日本 M.Niigaki 等人提出第一个成功利用 PN 结的光电阴极,光电阴极表面为网状金属电极,如图 3 所示,并在 1.3 μm 处达到 5% 的量子效率^[7]。在这之前,大家基本使用的都是肖特基薄膜电极,但是肖特基电极高薄膜电阻会影响量子效

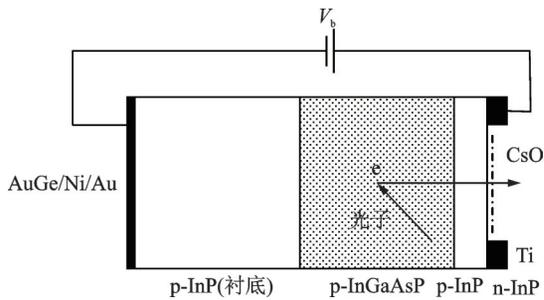


图3 p/n结的InP/InGaAsP异质结构场助光电阴极的横截面示意图^[7]

Fig.3 Cross-sectional schematic of a p/n junction InP/InGaAsP heterostructure field-assisted photocathode^[7]

率,而增加电极厚度,量子效率又会受到金属肖特基电极性能退化的限制,表面热处理温度限制在300℃以下^[15]。相比于传统的肖特基电极,PN结光电阴极允许提高热处理温度,使表面清洁度提高,从而有较低的功函数,比肖特基电极量子效率高出一个数量级。

2.2 InP/InGaAs异质结光电阴极

相比于其他场助光电阴极结构,InP/InGaAs异质结结构具有很高的灵敏度,响应时间快,有利于在条纹变像管中的应用。同时在1.2~1.7 μm波长范围内,属于量子效率很高的光电发射器件。

Escher等人在1980年使用InP/InGaAs结构在1.55 μm达到了8.0%的量子效率,如图4所示,采用InGaAs做吸收层,InP为发射层,讨论了最佳光电发射参数和暗电流发射源^[6]。对于InP/InGaAs结构的暗电流来源,Musatov和李晋闽等人分别在1982年和1989年也进行了计算分析^[25-26]。他们认为对于具有肖特基势垒的偏置异质结构,主要有两个暗电流发射源:与低带隙InGaAs层的热电子生成有关的扩散分量,以及由热孔的冲击电离或隧道效应决定的场分量。而这些热电子生成有关的扩散分量强烈地依赖于工作温度。当工作温度降低到180 K时,热电子生成有关的扩散分量与在较低温度下的冲击电离的影响相比,都可以忽略不计。所以,在较低工作温度下,来自阴极的暗电流发射的一个主要来源是在肖特基势垒范围内的热孔的冲击电离分量。将电子加速到更高能谷,也加速了肖特基势垒区中的空穴。如果这些空穴获得了足够的能量,就会快速产生新的电子空穴对,从而产生暗电流。

而室温下InGaAs光子吸收层耗尽区中的热激发电子所引起的暗电流是场助光电阴极的主要缺点。由于热发射电流与发射面积成正比,一个发射

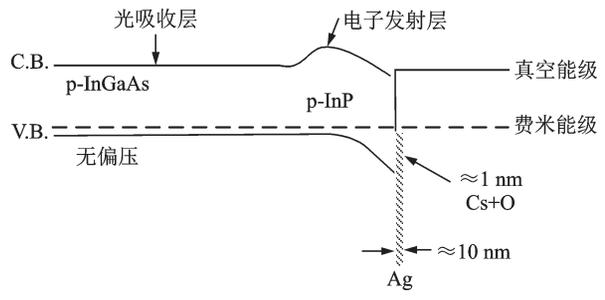


图4 InP/InGaAs光电阴极能带示意图^[6]

Fig.4 Schematic of the energy bands of the InP/InGaAs photocathode^[6]

面积较小的光电阴极可能会有较低的暗发射电流。所以Niigaki等人在InP衬底上生长了InGaAs吸收层和InP发射层,同时采用PN结,并改变了电极形状,采用纳米尺度光栅天线^[27]。结构如图5所示,铝膜电极的厚度为200 nm,被蚀刻成厚度为100 nm的条纹光栅,并设计了周期性约为1 200 nm的纳米级光栅结构。在光栅结构部分,每十个光栅周期形成条纹状的纳米孔,孔径的宽度小于600 nm。在此基础上,讨论了现有光电阴极的光电发射机理。在纳米尺度金属光栅上产生了具有入射共振波长的表面等离子体,在偏振光照射下,产生了与纳米级光栅共振波长对应的入射光子通量。然后通过纳米级光栅天线将入射光子通量和耦合的表面等离子体引导到光电阴极的纳米级孔径中。在这个光电阴极中,暗电流可以大大减少,因为电子只是从较小的光电阴极区域发射出来的。整个p-InGaAs光子吸收层中的大部分热激发电子不能发射到真空中,而在p-InGaAs光子吸收层中被引导入射光子通量和表面等离子体激发的光电子可以发射到真空中。这是一种具有高灵敏度和低暗电流的场助光电阴极实现方案,特别是在近红外区域。

Nolle等人1998年使用InP/InGaAs/InP结构,在InP衬底上通过气相外延生长了InGaAs吸收层和InP发射层,制造并采用一个超高真空三室系统,将退火、沉积薄膜、激活进行一体化操作,首次证明肖特基金势垒代替肖特基银势垒可以提高稳定性和灵敏度,并提出降低金属薄膜的厚度也能提高灵敏度^[28]。Escher提出大多数光电子的损失是由于它们在银或金薄膜中的吸收^[6],为了尽量减少这些损失,薄膜必须尽可能变薄,这意味着在金属沉积之前必须清洗阴极表面。由于热退火时材料会在360℃分解,所以会产生很难去除的碳元素,表面的碳的存在导致了电子逃逸概率的降低,所以应该使用其他的清洗方法来获取更有效的光电阴极。

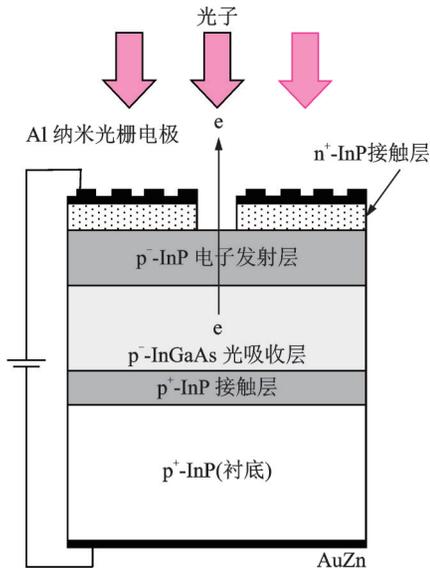


图 5 纳米级光栅天线的光阴极的横截面示意图^[27]

Fig.5 Cross-sectional view of the photocathode of the nanoscale grating antenna^[27]

Smirnov 等人提出了三步化学蚀刻法结合真空热清洗法,产生了一个疏水表面,并允许在退火过程中使用较低的温度^[29]。

同样,孙巧霞也采用了这种结构,如图 6 所示,还在光入射窗口与 InP 缓冲层之间增加一层 Si₃N₄ 增透膜,研究了 InP/InGaAs/InP 透射式红外光电阴极的时间响应特性和光谱响应特性。通过计算发现,光电阴极的响应速度与场助偏压成正比,与吸收层厚度和掺杂浓度成反比,光谱响应范围 0.95 μm ~ 1.7 μm。计算表明,在吸收层厚度为 0.2 μm、掺杂浓度为 10¹⁶ cm⁻³ 时,在 λ=1.55 μm 处阴极的内量子效率最大且整个光谱响应特性也较好,阴极的响应时间达 40 ps^[17]。周振辉在孙巧霞基础上进行了改进,将 InGaAs 吸收层设计成多层变掺杂结构,利用杂质浓度梯度形成的均匀内建电场驱动体内光电子输运,模拟了该阴极吸收层浓度厚度和阴极外置偏压三种因素对量子效率的影响,在响应时间为 49 ps 的情况下测量 1.55 μm 入射光的量子效率达到 8.4%^[30]。

刘峰等人在 InGaAs 吸收层和 InP 发射层设计了一层渐变层,这个渐变层对异质结传输效率有一

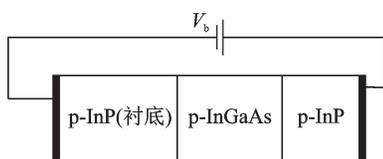


图 6 InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP 阴极结构图^[17]

Fig.6 InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP cathode structure^[17]

定影响,如图 7 所示,结构主要由 6 部分构成:抗反层,窗口层 InP,光子吸收层 In_xGa_{1-x}As 和电子发射层 InP、CsO 层及电极。它与三代 GaAs 光阴极和普通近红外光阴极的显著不同之处在于采用了分离的光子吸收层和电子发射层。同时分析了肖特基势垒偏压对异质结的能带和漏电流的影响,发现偏压的增加会消除异质结的势垒,也会使漏电流增加^[18]。

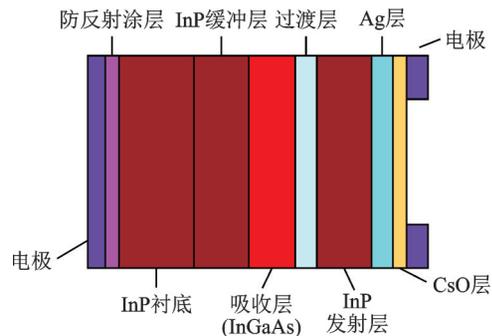


图 7 TE 光阴极结构^[18]

Fig.7 Schematic of the TE photocathode structure^[18]

2.3 InGaAs/InAsP/InP 光电阴极

InGaAs/InAsP/InP 结构的光阴极在 InP 和 InGaAs 之间增加一层 InAsP 渐变层,以缓解光电阴极和 InP 衬底之间晶格失配导致的应变,从而获得高质量的外延生长。事实证明,这种结构在延长波长阈值方面非常有利。

1980 年,Escher、Gregory 提出一种 Ag/p-In_{0.77}Ga_{0.23}As 光电阴极结构,在 125 K 下长波阈值延长到 2.1 μm,具体结构如图 8 所示^[5]。InAsP 和 In_{0.77}Ga_{0.23}As 采用气相外延生长在 InP 衬底上,在 H₂ 中用 10% HCl 的混合物通过 In 和 Ga 金属源形成金属氯化物,然后与 10% AsH₃ 和 10% PH₃ 进行反应沉积外延层。

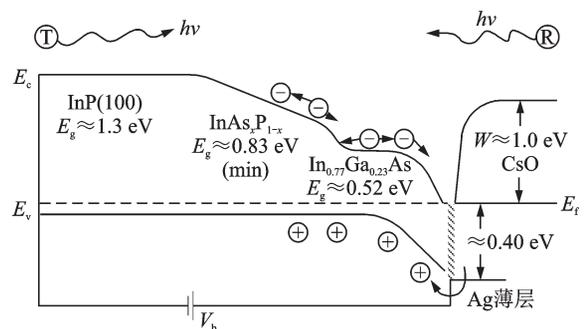


图 8 InGaAs/InAsP/InP 光电阴极能带示意图^[5]

Fig.8 Schematic of the energy bands of the InGaAs/InAsP/InP photocathode^[5]

2014年,Niigaki等人在Escher的基础上使用PN结 $n\text{-InAs}_{0.4}\text{P}_{0.6}/p\text{-InAs}_{0.4}\text{P}_{0.6}/p\text{-In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ 结构获得了在室温下波长阈值高达 $2.3\ \mu\text{m}$ 的光电发射阴极,结构如图9所示。而且提出在室温下暗电流很可能是由InGaAs光子吸收层的耗尽区中的热激发电子所主导的,证明具有PN结的场助光电阴极不仅适合实现高量子效率,而且适用于扩展阈值波长^[8]。在此之前,由于暗电流较大,场助光电阴极必须在低温环境下进行工作,实际应用非常困难,Niigaki的实验可以说在场助光电阴极的发展上前进了一大步。

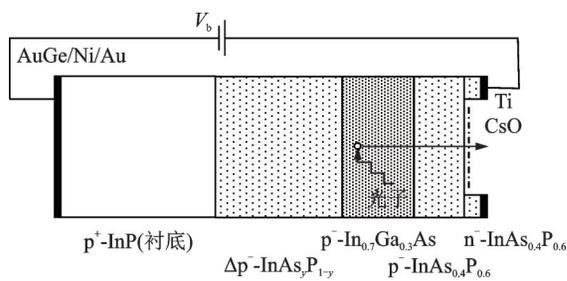


图9 $n\text{-InAs}_{0.4}\text{P}_{0.6}/p\text{-InAs}_{0.4}\text{P}_{0.6}/p\text{-In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ 场助光电阴极截面示意图^[8]

Fig.9 Cross-sectional view of $n\text{-InAs}_{0.4}\text{P}_{0.6}/p\text{-InAs}_{0.4}\text{P}_{0.6}/p\text{-In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ field-assisted photocathode^[8]

3 总 结

过去的场助光电阴极的研究,主要是在延长波长阈值,减少暗电流,提高量子效率、灵敏度以及响应时间方面进行。由于应用范围涉及军事敏感领域,很多国家公开发表的文章年代久远,最新的研究成果比较少,同时研究内容大多数为理论模型、表征情况和模拟测试结果,而对实际研究工作具有指导意义的生长工艺、清洗工艺和激活工艺鲜有报道。

有效的场助光电阴极要求生长出晶格匹配的材料,且精确到材料的厚度以及掺杂浓度,材料生长工艺复杂,制造成本高;而且在实验过程中不能精确控制材料的刻蚀速率,激活和清洗等一些实验步骤轻微的差别也会影响到光电阴极的量子效率以及其它特性,对测试仪器要求较高,导致实验难度很大。同时场助光电阴极器件需要在真空低温环境下工作,在实际应用上有很大的难度,难以将场助光电阴极器件与现有的器件和系统相结合,而且暗电流过大和关键波长处量子效率低还未得到有效解决,因此鲜少有人研究,实际应用也很少。

现代材料生长工艺的进步,实现了材料组分以及厚度的精确控制,在一定程度上促进了场助光电阴极的研究。未来可以选用合适的场助光电阴极材料,优化材料的组分厚度、阴极结构以及电极等,完全有希望进一步提高阴极的量子效率及其他性能。场助光电阴极在夜视设备、光探测设备以及条纹相机领域发展潜力很大,相信随着工艺的进步,场助光电阴极将会促进近红外光电探测技术的发展。

参 考 文 献

- [1] James L W, Uebbing J J. Long-wavelength threshold of CS_2O -coated photoemitters [J]. Applied Physics Letters, 1970, 16 (9): 370-370.
- [2] Fisher D G, Enstrom R E, Escher J S, et al. Photoelectron surface escape probability of (Ga, In) As: Cs - O in the 0.9 to [inverted lazy s] 1.6 μm range [J]. Journal of Applied Physics, 1972, 43(9): 3815-3823.
- [3] Simon R E, Spicer W E. Photoemission from Si induced by an internal electric field [J]. Physical Review, 1960, 119(2): 621.
- [4] Bell R L, James L W, Moon R L. Transferred electron photoemission from InP [J]. Applied Physics Letters, 1974, 25 (11): 645-646.
- [5] Gregory P E, Escher J S, Saxena R R, et al. Field-assisted photoemission to 2.1 microns from a Ag/p-In_{0.77}Ga_{0.23}As photocathode [J]. Applied Physics Letters, 1980, 36 (8): 639-640.
- [6] Escher J S, Bell R L, Gregory P E, et al. Field-assisted semiconductor photoemitters for the 1~2 μm range [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1980, 27(7): 1244-1250.
- [7] Niigaki M, Hirohata T, Suzuki T, et al. Field-assisted photoemission from InP/InGaAsP photocathode with p/n junction [J]. Applied Physics Letters, 1997, 71(17): 2493-2495.
- [8] Niigaki M, Hirohata T, Mimura H. Room temperature photoemission up to a wavelength threshold of 2.3 μm from $n^+\text{-InAs}_{0.4}\text{P}_{0.6}/p\text{-InAs}_{0.4}\text{P}_{0.6}/p\text{-In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ field-assisted photocathode [J]. Applied Physics Express, 2014, 7 (11): 112201.
- [9] 王存让,郭里辉,李晋闽,等. 1.3 μm 场助 TE 光阴极 $\text{In}_{(1-x)}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{(1-y)}/\text{InP}$ 的能带计算及外延层的设计 [J]. 光子学报, 1992, 21(1): 73-78.
- [10] 李晋闽,郭里辉,侯 洵. 场助 InP/InGaAsP 半导体光电阴极量子效率的理论计算 [J]. 物理学报, 1992, 10: 1672-1678.
- [11] 李晋闽,郭里辉,侯 洵. 场助 InP/InGaAsP/InP 半导体光电阴极时间响应的计算 [J]. 科学通报, 1992, 7: 598-601.
- [12] 李晋闽,郭里辉,王存让,等. 场助 InP/InGaAsP/InP 半导体光电阴极异质结能带的计算 [J]. 光学学报, 1992, 12(9): 830-834.
- [13] 李晋闽,郭里辉,侯 洵,等. 场助 InGaAsP/InP 异质结半导体光电阴极的研究 [J]. 光学学报, 1992, 6: 528-532.

(下转第 266 页)