InP/InGaAs/InP 红外光电阴极时间响应特性的模拟研究

孙巧霞[1],徐向晏[1],安迎波[1],曹希斌[1],刘虎林[1],田进寿[1],董改云[1],郭 晖[2],李燕红[2]

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所,陕西 西安 710119;
2. 微光夜视技术重点实验室,陕西 西安 710059)

摘 要: 文中理论研究了 $InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP$ 异质结透射式红外光电阴极的时间响应特性,光谱响应范围 1.0~1.7 μm。在场助偏压的作用下,模拟计算了光激发的电子在阴极内部的传输特性。模拟计算表明,光电阴极的响应速度随场助偏压的增大而加快;随光吸收层厚度的增大而减慢;随光吸收层掺杂浓度的增大, 光电阴极的响应速度变慢。发射层厚度及掺杂浓度的增大都会使得阴极的响应时间加长。经过对阴极结构参数和掺杂浓度的优化,得到在吸收层和发射层厚度分别为 2 μm、0.5 μm,掺杂浓度分别为 $1.5\times10^{15}\,cm^{-3}$、$1.0\times10^{16}\,cm^{-3}$ 时,在适当场助偏压下光电阴极的响应时间可优于 100 ps。

关键词: 红外光电阴极; $InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP$; 时间响应特性

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)12-3163-05

Numerical study on time response characteristics of InP/InGaAs/InP infrared photocathode

Sun Qiaoxia[1], Xu Xiangyan[1], An Yingbo[1], Cao Xibin[1], Liu Hulin[1], Tian Jinshou[1], Dong Gaiyun[1], Guo Hui[2], Li Yanhong[2]

(1. Xi′an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi′an 710119, China;
2. Science and Technology on Low-Light-Lever Night Vision Laboratory, Xi′an 710059, China)

Abstract: The time response characterisitics of $InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP$ heterojunction infrared photocathode was studyed in this paper, such photocathode worked at transmission mode with a wide spectral response range from 1.0-1.7 μm. Under certain field-assisted bias voltage, the transmission characteristics of photo-excited electrons inside the phococathode were simulated. The results show that the response speed of the photocathode are accelerated with the increasing of the field-assisted bias voltage. While P-InGaAs photo-absorbing layer is thickened, the response speed gets slow. The response speed also gets slow when increasing the doping concentration of InGaAs photo-absorbing layer. When increasing the thickness and doping concentration of P-InP photoelectron-emitting layer, the respose time will be prolonged. Based on all these conclusions, the structure parameters and doping concentration of each layer were optimized. The optimization results show that when the thickness of the photo-absorbing layer and the photoelectron-

收稿日期: 2013-04-09; **修订日期:** 2013-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(11274377)

作者简介: 孙巧霞(1987-),女,硕士生,主要从事光电成像技术方面的研究。Email:sunqiaoxia@opt.cn

导师简介: 徐向晏(1973-),男,副研究员,博士后,主要从事物理电子学、微电子学及光电成像技术方面的研究。Email:xuxy@opt.ac.cn

emitting layer are about 2 μm and 0.5 μm respectively, and the doping concentration of photo-absorbing layer and photoelectron-emitting layer are about 1.5×10^{15} cm^{-3} and 1.0×10^{16} cm^{-3} respectively, the response time of photocathode can be reduced to less than 100 ps.

Key words: Infrared photocathode; InP/$In_{0.53}Ga_{0.47}As$/InP; time response characterisitics

0 引 言

场助 III-V 族化合物光电阴极与 GaAs NEA 光电阴极相比,具有可延伸光电探测的长波阈值,提高红外波段的响应速度等优点,因此在光纤通信、微光夜视以及超快诊断等领域有广泛的应用。1974 年 Bell 等人首次提出并用实验证明了第一个长波阈值场助阴极[1]。之后,俄罗斯、日本和美国的工作者已对场助 III-V 族化合物半导体红外光电阴极进行了广泛的研究[2-5],特别是俄罗斯物理研究院的工作者,对应用到超快诊断技术(如条纹相机)的 III-V 族化合物半导体红外光电阴极进行了大量的研究。国内科研工作者对 GaAs 光电阴极的研究已有很多成果[6-8],李晋闽等人曾理论计算了阈值波长为 1.25 μm 的 InP/InGaAsP/InP 异质结光电阴极[9-10]。目前尚未有阈值波长在 1.70 μm 左右的红外光电阴极的研究报道,对 III-V 族化合物红外阴极时间响应特性的研究也鲜有报道;而时间响应特性作为判断光电阴极性能的主要物理参量,具有重要的研究意义。光在半导体中被吸收产生光生载流子,其中部分能量较高的电子输运至半导体-真空界面处,克服表面势垒逸出半导体界面形成光电子。利用半导体软件 Apsys 理论模拟计算阈值波长为 1.7 μm 的 InP/$In_{0.53}Ga_{0.47}As$/InP 异质结红外光电阴极的时间响应特性。通过优化吸收层、发射层厚度和掺杂浓度,将响应时间压缩在100 ps 左右;该异质结红外光电阴极将有望应用于条纹相机等超快探测成像器件。

1 InP/$In_{0.53}Ga_{0.47}As$/InP 异质结红外光电阴极的物理模型

InP/$In_{0.53}Ga_{0.47}As$/InP 异质结红外光电阴极的结构如图 1(a)所示。

这种异质结结构阴极由一个窄带隙的光吸收层和一个宽带隙、高发射效率的电子发射层组成,表面 Ag 与发射层 InP 接触形成的肖特基势垒高度为 0.78 eV[10]。对 $In_xGa_{1-x}As$ 变组分,当 In 含量 x 增加时,禁带宽度变窄,可进一步提高阈值波长,例如 $In_{0.77}Ga_{0.23}As$ 的阈值波长可达 2.1 μm。由于$In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 与衬底 InP 晶格匹配且波长范围覆盖光通信的重要波段,因此吸收层选用 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$。研究的 InP/$In_{0.53}Ga_{0.47}As$/InP 双异质结结构阴极,光子吸收和电子发射在两个独立的层内完成,通过对各层参数的优化,有助于提高阴极的整体性能。光子吸收层 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 的禁带宽度为 E_{g1}=0.75 eV(阈值波长为 1.7 μm),衬底 InP 的禁带宽度为 E_{g2}=1.3 eV(阈值波长为 0.95 μm)。光辐射从衬底 InP 入射,决定了入射光的短波限 λ=0.95 μm,而长波限 1.7 μm 是由 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 的禁带宽度决定。当光子能量大于 1.3 eV 时,能量被衬底吸收,只有当光子的能量在 0.75 eV≤$h\nu$≤1.3 eV 时,才被吸收层吸收。为了减小在零偏压下光电阴极的热电子发射,衬底以及吸收层和发射层都采用 P 型掺杂。

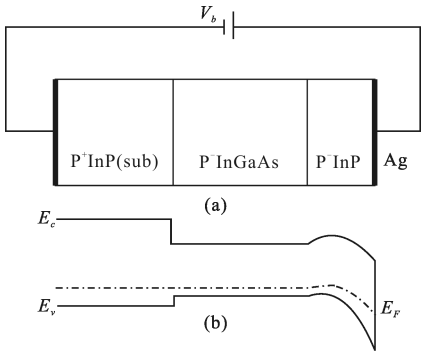

图 1 InP/$In_{0.53}Ga_{0.47}As$/InP 异质结场助红外光电阴极结构和 InP/$In_{0.53}Ga_{0.47}As$/InP 红外光电阴极在适当偏压下的能带

Fig.1 Schematic of InP/$In_{0.53}Ga_{0.47}As$/InP heterostructure field-ssisted infrared photocathode and energy band diagram of InP/$In_{0.53}Ga_{0.47}As$/InP infrared photocathode at a proper bias voltage

根据能带理论,在平衡条件下,由于光吸收层和电子发射层之间能带的差异,在异质结界面处存在约为 E_g(InP)−E_g($In_{0.53}Ga_{0.47}As$)=0.65 eV 的导带势垒,这个势垒对于光电子的传输是非常不利的。如图 1(b)所示,在适当反向偏压的作用下,可以通过在阴极表

面肖特基势垒区形成的耗尽场耗尽 InP 发射层,同时在异质结界面处提供足够高的电场将界面处势垒降低,减小异质结界面势垒对电子的散射。

2 阴极响应时间的计算及结果分析

在超快诊断技术(如条纹相机)的应用中,阴极响应时间需要在 100 ps 左右甚至更短。因此,作为关键技术指标之一,研究红外光电阴极的时间响应特性具有现实应用意义。

在场助偏压的作用下,光电阴极的响应时间由吸收层 d_1 和发射层厚度 d_2 及电子向阴极表面运输的平均漂移速度 v 决定,而速度 v 由电场强度及电子迁移率决定,电子迁移率与各层掺杂浓度又有密切的关系。因此,需要计算异质结结构参数及掺杂浓度等对阴极时间响应特性的影响。在文中暂且没有考虑衬底界面、阴极-真空界面的表面复合情况,在进一步的研究中将包含这些情况。

2.1 吸收层厚度对阴极响应时间的影响

选取光纤通信低损耗窗口波长 λ=1.55 μm 作为入射光波长,为了模拟研究阴极的响应时间(100 ps 左右),入射光的峰值半宽值(FWHM)必须要远小于阴极的响应时间 (100 ps),文中选用 10 ps 的高斯脉冲入射光。而各层结构参数的选用是通过多次模拟计算后得到的较为合理的值:吸收层掺杂浓度 Na_1=1.5×10^{15} cm^{-3}、发射层厚度 d_2=0.5 μm、发射层掺杂浓度 Na_2=1.0×10^{16} cm^{-3},分别模拟计算了不同偏压及不同吸收层 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 厚度下阴极的响应时间,模拟结果如图 2、图 3 所示,其中电流作了归一化处理。

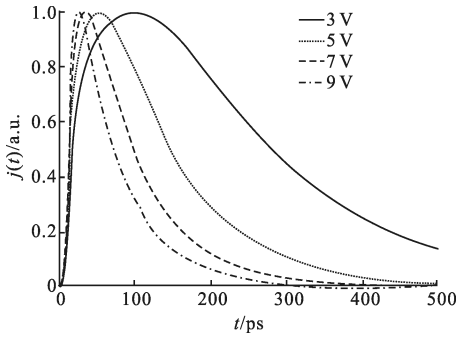

图 2 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 光吸收层厚度 d=3 μm,不同偏压下阴极的归一化时间响应曲线

Fig.2 Photocathode normalized time response pulse at different bias voltage while $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ photo-absorbing layer thickness d=3 μm

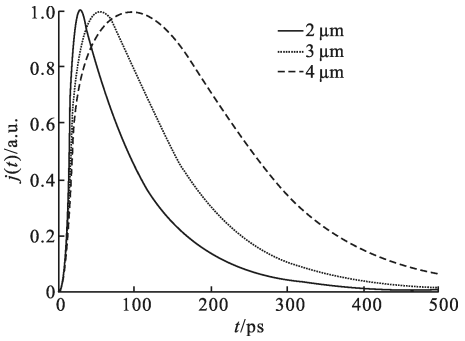

图 3 5 V 偏压、不同吸收层厚度时阴极的归一化时间响应曲线

Fig.3 Photocathodes normalized time response pulse at different photo-absorbing layer thickness while the biae voltage U=5 V

从图 2、图 3 计算结果可知,在其他条件一定的情况下,随场助偏压的增大,响应时间越短;随吸收层厚度的增大,响应时间越长。

为了更清楚的说明吸收层厚度对阴极响应时间的影响,又分别模拟了在不同偏压下,吸收层厚度 d=2 μm 及 d=4 μm 时阴极的响应时间,设 ΔT 为脉冲响应时间半宽值,则吸收层厚度对响应时间的影响如图 4 所示。

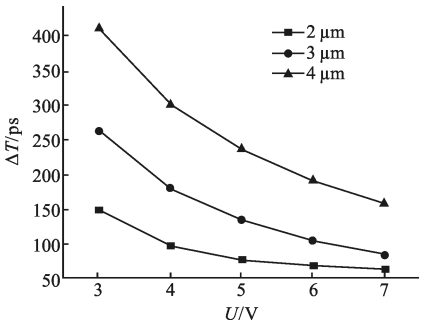

图 4 不同吸收层厚度下响应时间与偏压的关系

Fig.4 Function relationship between response time and bias voltage at different photo-absorbing layer thickness

如图 4 计算结果,在厚度为 2 μm 时,4 V 的偏压可使响应时间峰值半宽值缩短到 100 ps 左右;厚度为 3 μm 时,6 V 偏压下阴极的响应时间峰值半宽值为 100 ps 左右;当吸收层厚度为 4 μm 时,7 V 偏压下的响应时间峰值半宽值约为 160 ps。这主要是由于吸收层越厚,光激发的电子在阴极内的渡越时间越长,从而电子要经过较长的时间到达阴极表面;而外加场助偏压能够提供高的电场作用使电子的平均漂移速度增大,从而使得阴极的响应时间变短。所以为

了提高光电阴极的响应时间，吸收层的厚度不宜过大，从以上的计算可知，吸收层的厚度小于 3 μm。同时从图 4 可知，当吸收层的厚度为 2 μm，场助偏压超过 6 V 时，响应时间基本不随场助偏压发生变化，这主要是由于当吸收层厚度较小时，在一定的偏压下，异质结界面处的势垒被减小到零，且电场完全穿透吸收层，此时电子的迁移速率达到饱和，电子输运速率几乎不再随场助偏压的升高而加快。因此，当吸收层的厚度较小时，偏压不宜太大，以免影响阴极的其它性能，如暗电流；而厚度较大时，为了提高响应速度可适当增大场助电压。

2.2 吸收层掺杂浓度对响应时间的影响

入射光波长 λ=1.55 μm，吸收层厚度 d_1=3 μm，发射层厚度 d_2=0.5 μm，发射层掺杂浓度 Na_2=1.0×10^{16} cm^{-3} 及 FWHM 为 10 ps 的高斯脉冲光照射下，计算了不同吸收层掺杂浓度下阴极的响应时间，结果如图 5 所示。

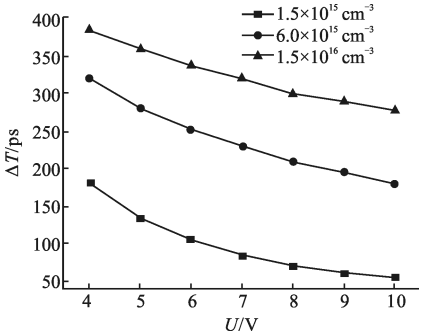

图 5 不同吸收层掺杂浓度下响应时间与偏压的关系

Fig.5 Function relationship between response time and bias voltage at different doping concentration of photo-absorbing layer

从图 5 可知，在其他条件一定，吸收层掺杂浓度较低为 1.5×10^{15} cm^{-3} 时，光电阴极的响应速度随偏压的增大明显加快，在 6 V 偏压下就能将脉冲响应时间半宽值减小到 100 ps 左右，而当掺杂浓度较高为 1.5×10^{16} cm^{-3} 时，10 V 偏压下的响应速度也很慢且随偏压的变化不明显。从图 6 更加清楚的看到吸收层掺杂浓度对阴极响应时间的影响。

这主要是由于在一定的偏压下，光激发电子的迁移率随掺杂浓度的增大而降低，故电子的平均漂移速度降低，从而电子到达阴极表面需要更长的时间。另一方面，外加电压形成的耗尽层主要在阴极表面肖特基势垒区，并向阴极体内扩散。在低掺杂时，随偏压的增大，耗尽层宽度向体内扩展的很快，使得光电子受电场作用的范围也就越大，因此光电子的漂移速度随偏压的增大明显加快。当掺杂浓度较高为 1.5×10^{16} cm^{-3} 时，外加偏压很难消除异质结界面处的导带势垒，电场作用的范围也很小且随偏压的变化不大，从而使得光电子的传输速度很慢且随偏压的变化不大。因此，为了提高阴极的响应速度，吸收层的掺杂浓度同样不能过高，从以上的计算可知一般应小于 10^{16} cm^{-3}。

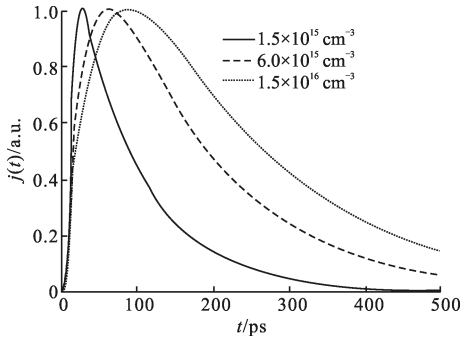

图 6 5 V 偏压，不同吸收层掺杂浓度下阴极的归一化时间响应曲线

Fig.6 Photocathodes normalized time response pulse at different doping concentration of photo-absorbing layer while the bias voltage U=5 V

2.3 发射层参数对响应时间的影响

在吸收层光激发的电子穿越发射层向外发射电子，发射层的厚度及掺杂浓度对阴极响应时间也有很大影响。模拟计算得到发射层厚度及掺杂浓度对时间响应特性的影响如图 7、图 8 所示。

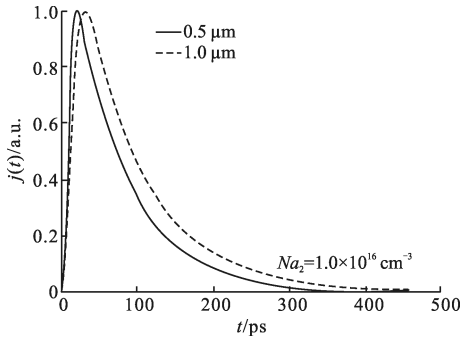

图 7 5 V 偏压，不同发射层厚度下阴极的归一化时间响应曲线

Fig.7 Photocathodes normalized time response pulse at different thickness of photoelectron-emitting layer while the bias voltage U=5 V

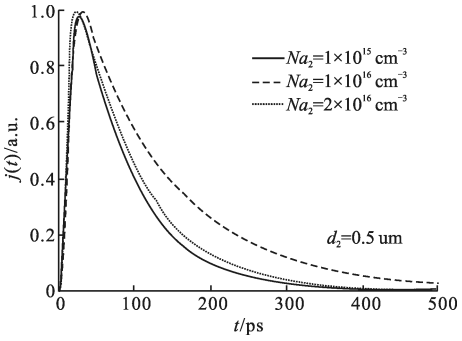

图 8 5 V 偏压,不同发射层掺杂浓度时阴极的归一化时间响应曲线

Fig.8 Photocathodes normalized time response pulse at different doping concentration of photoelectron-emitting layer while the bias voltage U=5 V

从图 7 可知,随着发射层厚度的增加,响应速度变慢,这主要是由于随厚度增加,电子的渡越时间变长;同样从图 8 得到,随着掺杂浓度的增大,响应速度也会变慢,且当发射层掺杂浓度在 10^{15}~10^{16} cm^{-3} 时,对时间响应特性的影响不大;当发射层掺杂浓度超过 10^{16} cm^{-3} 时,对阴极的响应时间影响增大。这主要是在低掺杂浓度下,一定偏压下的表面耗尽层向阴极内扩展的快,使得电子受到电场的加速范围大,从而阴极的响应速度快,当掺杂浓度增加时,外加偏压在肖特基势垒区形成的耗尽层向内扩展的很慢,使得电子在输运时受电场加速的范围减小。另一方面,电子的迁移率随发射层掺杂浓度的增大也会降低,因而电子的平均漂移速度减慢。同时掺杂浓度的增大,部分电子在发射层被复合,这不仅影响响应时间,还会影响阴极的其他性能,如量子效率,暗电流等。因此,发射层的厚度及掺杂浓度越小越好。

3 结　论

文中用Apsys 半导体软件,模拟计算了光激发电子在阴极内部的传输特性,分析了InP/$In_{0.53}Ga_{0.47}As$/InP 异质结红外光电阴极光吸收层、电子发射层厚度及掺杂浓度对响应时间的影响。由以上计算可知,吸收层和发射层厚度及掺杂浓度共同决定了阴极响应速度的快慢。为了得到响应速度优于 100 ps 的快响应红外光电阴极,吸收层和发射层的结构参数都有一定最佳范围,通过以上的计算可知吸收层的厚度在 2~3 μm,掺杂浓度在 10^{15}~10^{16} cm^{-3},发射层的厚度约为 0.5 μm,掺杂浓度在 10^{15}~10^{16} cm^{-3}。上述结论将为进一步优化半导体光电阴极的结构和材料参数的设计提供必要的依据,同时为实验设计及应用快响应异质结结构红外光电阴极提供必要的理论依据。

参考文献:

[1] Bell R L, James L W, Moon R L. Transterred electron photoem-ission from InP[J]. ***Appl Phys Lett***, 1974, 25(11): 645-646.

[2] Sachno V, Dolgyh A, Loctionov V. Image intensifier tube(I^2) with 1.06 μm InGaAs photocathode [C]//SPIE, 2005, 5834: 169-175.

[3] Noll Eduard L. Photocathodes based on semiconductor superlattices for seak tubes for IR region of 0.9-1.0 μm [C]// SPIE, 1995, 2513: 74-80.

[4] Noll Eduard L, Prokhorov M, Schehev Ya, et al. Field-assisted semiconductor photocathodes for streak tubes[J]. ***Opt Eng***, 1998, 37(8): 2233-2237.

[5] Niigaki M, Suzuki T, Kan H, et al. Field-assisted photoemission from InP/InGaAsP photocathode with p/n junction[J]. ***Appl Phys Lett***, 1997, 71(17): 2493-2495.

[6] Chen Huailin, Chang Benkang, Zhang Junju, et al. Varying doping GaAs photocathode by high temperature activation [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2008, 37(S): 756-761. (in Chinese)

[7] Jia Zhenggen. Study of the InGaAs photocathode image intensifiers [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 1999, 28(6): 64-67. (in Chinese)

[8] Tang Weidong, Yang Wenzheng, Cai Zhipeng, et al. The time response of exponential doping NEA InGaAs photocathode applied to near infrared streak cameras [C]// Advanced Marerials, 2012, 415-417: 1403-1406.

[9] Li Jinmin, Guo Lihui, Hou Xun, et al. Field-assisted semiconductor photocathode with InGaAsP/InP heterojunction [J]. ***Acta Optica Sinica***, 1992, 12(6): 528-532. (in Chinese)

[10] Li Jinmin, Guo Lihui, Wang Cunrang, et al. Calculation of hetero-junction band for a field-assisted InP/InGaAsP/InP semiconduct-or photocathode [J]. ***Acta Optica Sinica***, 1992, 12(9): 830-834. (in Chinese)