

●上海研究生教育用书

金属-半导体-金属 光电探测器

史常忻 著

上海交通大学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

金属—半导体—金属光电探测器

史常忻 著

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书介绍了金属—半导体—金属光电探测器的理论、设计、工艺和测试。本书内容系统全面,可作为研究生和高年级本科生教学用书,也可供该领域的研究设计和生产技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属—半导体—金属光电探测器/史常忻著. —上海:
上海交通大学出版社, 2000
ISBN 7-313-02414-2

I. 金… II. 史… III. 光电器件: 探测器
IV. TM571

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 15838 号

金属—半导体—金属光电探测器

史常忻 著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:张天蔚

常熟市印刷二厂印刷 全国新华书店经销

开本:850mm×1168mm 1/32 印张:4 字数:100 千字

2000 年 5 月第 1 版 2000 年 5 月第 1 次印刷

印数:1~1200

ISBN 7-313-02414-2/TM·115 定价:8.00 元

版权所有 侵权必究

谨献给三位女性

——我的母亲、妻子和女儿

前 言

金属—半导体—金属光电探测器,是一种结构新颖、性能优异的平面型光电探测器。由于它具有光电响应速度快,工艺简单,特别是平面结构便于与高速 FET-IC 实现单片集成的优点,以及超高速、大容量光纤通信发展和 OEIC 的需要,近年来,对其研究十分活跃,性能不断改善,应用领域逐渐拓展,是一种极有前途的光电探测器。同时作为一种新型的平面器件结构,也可为其他器件所广泛采用。

上海交通大学从 80 年代后期以来在国家自然科学基金支持下开始了“金属—半导体—金属光电探测器及集成技术”的研究,并开展了国际合作,取得了可喜的成果和经验。1993 年“高性能 InGaAs MSM 光电探测器”获得国家发明奖。本书总结了近十年来我们在此领域中研究、教学成果。

本书内容如下:

第一章简述金属—半导体—金属(MSM)光电探测器的发展和特点;

第二章系统介绍了器件原理的经典理论,以及各参量的物理意义和与器件的物理、结构参量之间的关系,使读者对该器件有一个完整的认识;

第三章着重讨论了具有势垒增强层的 MSM 光电探测器的设计理论和实践,这是长波长 MSM 光电探测器中的重要问题。

后面几章分别介绍了 MSM 光电探测器的制造工艺和特性测试,特别阐述了工艺参量与器件性能之间的关系,对 MSM 结构器件的展望也做了探讨。本书可供有关专业教学参考,也可供从事相关领域研究、生产的人员阅读。

作者感谢高立华女士在文稿工作中给予的帮助。

本书出版得到国家科学技术学术著作出版基金和上海市教育发展基金会资金的资助。

作 者

1999年8月25日

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 高速大容量光纤通信中光电探测器的发展	1
§ 1.2 金属—半导体—金属(MSM)光电探测器的 发展和特点	4
第二章 金属—半导体—金属光电探测器原理和设计	12
§ 2.1 MSM 光电探测器的器件结构和工作原理	12
§ 2.2 直流电流—电压特性和光电流响应	16
§ 2.2.1 直流电流—电压特性	16
§ 2.2.2 电容—电压特性	24
§ 2.2.3 光电流响应	26
§ 2.3 MSM 光电探测器的主要参量及其物理意义	28
§ 2.3.1 量子效率	28
§ 2.3.2 直流光电响应(光电灵敏度)	29
§ 2.3.3 平带电压和击穿电压	29
§ 2.3.4 暗电流	30
§ 2.3.5 响应波长	30
§ 2.3.6 电容	30
§ 2.3.7 截止频率	32
§ 2.4 MSM 光电探测器的等效电路和噪音特性	33
§ 2.5 MSM 光电探测器结构与各参量的关系	36
§ 2.5.1 电极结构与时间常数的关系	36
§ 2.5.2 量子效率	38
§ 2.5.3 有源层厚度的影响	40
§ 2.6 MSM 光电探测器特性的数值分析	46
§ 2.6.1 交叉指状电极结构器件中的电场分布	46

§ 2.6.2 电流传输特性·····	48
第三章 具有肖特基势垒增强层的 MSM 光电探测器 ·····	55
§ 3.1 长波长 MSM 光电探测器的问题和解决 ·····	55
§ 3.2 肖特基势垒增强理论和技术·····	57
§ 3.2.1 采用高浓度的薄反型层提高有效势垒高度·····	57
§ 3.2.2 介质薄膜对有效肖特基势垒的增高·····	62
§ 3.3 具有肖特基势垒增强层的 MSM 光电探测器的特性·····	65
§ 3.3.1 直流特性·····	65
§ 3.3.2 瞬态特性·····	67
§ 3.4 双重势垒增强技术·····	71
第四章 金属—半导体—金属光电探测器的工艺和测试 ·····	76
§ 4.1 器件的一般工艺流程·····	76
§ 4.1.1 基片外延生长工艺·····	76
§ 4.1.2 器件制造工艺·····	80
§ 4.2 器件测试·····	82
§ 4.2.1 直流参量测试·····	82
§ 4.2.2 工艺对器件特性的影响·····	86
§ 4.2.3 瞬态特性测量·····	88
第五章 金属—半导体—金属光电探测器的发展前景 ·····	91
§ 5.1 新型器件结构的发展·····	91
§ 5.2 OEIC 中的 MSM 光电探测器 ·····	98
§ 5.3 MSM 器件结构在其他领域中的应用 ·····	109
附录 ·····	113
附录 1 $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 合金的物理特性 ·····	113
附录 2 不同组分的 III-V 和 II-VI 族半导体禁带宽度与晶格常数的关系(300K) ·····	115
附录 3 一些金属的电阻率及温度的关系 ·····	116

第一章 绪 论

§ 1.1 高速大容量光纤通信中光电探测器的发展^{[1],[2]}

1964年英国标准电信研究所的华裔科学家高锟(Charles Kao)首先提出在电话网络中以光代替电流,以玻璃纤维代替导线的设想。1966年又指出,若能把玻璃光纤中含杂量降低,从而使其衰减水平由当时的1000dB/km下降到20dB/km则有可能用于光通信。四年后美国康宁公司研制出损耗为20dB/km的石英光纤。加之AlGaAs化合物半导体激光器室温连续工作的实现,解决了光纤通信中实用的光源,从而开始了崭新的光纤通信新时代。

由于光纤通信容量大、价格低、保密性好等因素,随着它的技术发展日趋成熟,自20世纪80年代以来进入了高速发展时期。技术逐年提高,设备不断更新。对其中光电信号接收转换的重要器件——光电探测器(或称光电二极管)也不断提出更高的要求。特别是长距离(如海底越洋光缆),大容量(如语音、数据、图像等信息)通信的需要,迫切要求高灵敏度、快光电响应速度,低暗电流,适于单片集成可靠性高的廉价长波长光电探测器。因此,大力推动了光纤用光电探测器的研究和探索,新的性能优异的探测器不断出现,金属—半导体—金属光电探测器也就应运而生。

光电探测器是光纤通信系统接收端的重要器件。对它的基本要求是:

1. 对特定工作波长有良好的响应;
2. 量子效率或光电响应灵敏度要高;
3. 响应速度要快,保证有需要的频带宽;

4. 噪声低;

5. 价格低。

适于光纤通信用的半导体光电探测器,从材料上分为 Si, Ge, GaAs 和 InGaAs 等。其中 Si 和 GaAs 适用于短波长, Ge 和 InGaAs 适用于长波长。从器件结构上分为雪崩二极管(APD), PIN 光电二极管 (PIN - PD) 和金属—半导体—金属光电二极管 (MSM - PD)。

光纤通信波长的选择取决于所用光纤材料中的损耗和色散。石英基光纤的损耗特性如图 1.1 所示。可以看出其中有三个损耗最低,也就是最宜于光纤通信使用的波长,分别为 $0.89\mu\text{m}$ 、 $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 。而良好设计的光纤,可以在上述使用的波长范围内,获得平坦色散度。

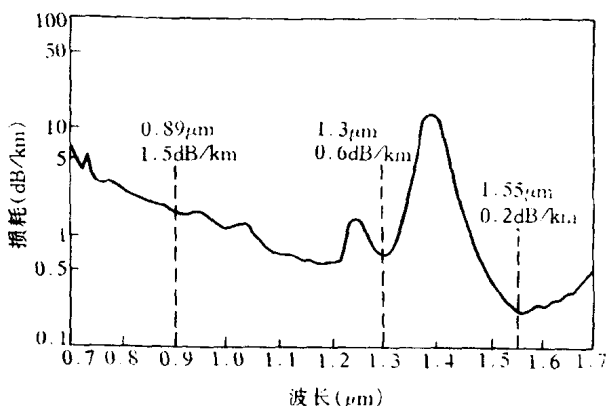


图 1.1 光纤中的损耗和波长的关系

在初期的短波长($0.85\mu\text{m}$)光纤通信中,使用 Si 雪崩管作为光电探测器,加之 III - V 族 AlGaAs 半导体激光器光源和石英光纤,构成了所谓第一代光纤通信系统。随着光纤通信向石英光纤低损耗波段 $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 波长推进,由 InGaAsP III - V 族半导体激光器或发光二极管作为光源,多模光纤和 InGaAsPIN - PD

或 APD(以 GaAs FET 作放大器)光电探测器构成了 1.3 μm 长波新一代的光纤通信系统。而它的进一步发展则为 1.55 μm 波长,单模光纤。在接收端采用外差式代替直接光电信号的检测也是提高光纤通信性能的重要技术方向。这不仅要求光电探测器具有更长的波长响应,也更需要便于双管集成的器件结构和工艺技术。

表 1.1 给出在光纤通信不同发展阶段时使用的光电探测器。表 1.2 给出世界光纤通信市场的巨大发展变化。从表 1.3 中的亚太市场比例中可以看出,我国的光纤通信产业正处在蓬勃发展的时期。

表 1.1 不同阶段光纤通信中使用的光电探测器

光纤通信 发展阶段	波 长	光 源	探 测 器	应 用
第一代	0.85 μm	AlGaAs LD, LED	Si PIN, APD	市内,短距离
第二代	1.3 μm	InGaAsP LED, LD	INGaAs PIN/FET	中距离
第三代	1.3 μm	InGaAsP LED, LD	InGaAs PIN/FET	
第四代	1.55 μm	InGaAsP - LD	InGaAsP APD	长途
第五代(予)	1.55 μm	InGaAsP - LD	InGaAsP PIN(双管) InGaAs MSM - PD	市内,长途

表 1.2 世界光纤通信市场的发展 (单位:亿美元)

	1992	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000 年
光缆 + 设备	55	65	78	93	112	124	161	194
光纤入户	1	4	11	21	38	62	84	102

表 1.3 亚太市场比例 (%)

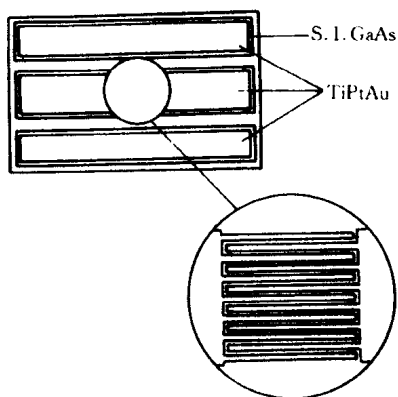
	日本	澳大利亚	中国	新西兰	其他
1992	56	14	13	3	14
1998	46	13	19	4	19

§ 1.2 金属—半导体—金属 (MSM) 光电探测器的发展和特点

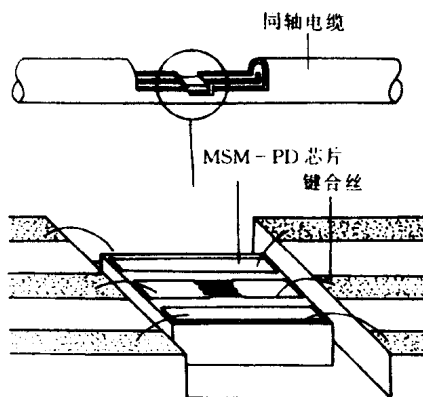
1971 年 S. M. Sze 等发表了题为:“MSM 结构中的电流传输”一文^[3],提出了一种新型的在一块半导体两面分别形成金属—半导体肖特基接触(即 MSM)结构的器件,并对其电流—电压特性作了系统的理论分析。同时将以 PtSi—Si—PtSi MSM 结构制成的实验器件与理论作了比较。该文为 MSM 结构光电探测器打下了理论基础。

1979 年日本电报电话公司(NTT)T. Sugeta 等在东京举行的第 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”报告,报道了他们在半绝缘 GaAs 衬底上,研制成功的横向结构并有共平面微带耦合的 MSM 光电探测器,简称 MSM—PD。器件的光电响应速度小于 100ps。同时指出,这种结构的器件将比具有垂直结构的 PIN 和 APD 更适于高速单片光电集成。文章还对光电流特性作了分析。随后,他们的论文发表在 1980 年日本应用物理杂志上^[4]。图 1.2 中给出了这一器件结构(a)和在同轴电缆上的装架图(b)。

六年以后,德国亚琛工业大学 W. Roth 等^[5]也作出了具有交叉指状电极,平面结构的 MSM 光电探测器。器件做在用 MOCVD 技术生长在(100)Si 衬底上的 GaAs 外延层中。铝电极的宽度和间隔均为 $0.5\mu\text{m}$,对波长为 820nm 的光响应速度为 10ps 量级。随后,日本富士通(Fujitsu)公司先后报道了 GaAs MSM—PD+MESFET 单片集成光电接收放大器的研究成果^{[6]~[8]}。他们在半绝缘 GaAs 衬底上制成四通道光电接收放大器,每一接收放大器由一支 MSM—PD 和六支 MESFET 构成。工作电压为 $\pm 6\text{V}$,探测器电压为 10V。其中 MSM—PD 直流灵敏度为 $0.22\text{A/W}(820\text{nm})$ 。放大器速度达 2Gb/s,等效噪音电流为



(a)



(b)

图 1.2 GaAs MSM-PD(a), 和装在同轴电缆上的 MSM-PD 管芯(b)
 $10\text{pAHz}^{-1/2}$ ($10 \sim 500\text{MHz}$)。各通道间的串扰在 1.2GHz 时为 27dB 。同期日本还报道了用两个 GaAs MSM-PD 组成的光信号输入, 电信号输出的光电子半加器逻辑门, 其输出延迟时间小于 $100\text{ps}^{[9]}$ 。这表示作为 GaAs 短波长 MSM-PD, 已经可以实现在

光纤通信和光电子集成电路(OEIC)中的应用。

但是随着光纤通信向长波长方向发展,人们自 80 年代后期开始转向长波长 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 材料 MSM-PD 的研究。因为 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 系材料迁移率高,对于 $x = 0.47$ 的材料,其禁带宽度为 0.75eV ,在 $1.0 \sim 1.65\mu\text{m}$ 内具有良好的光电响应。1987 年美国 IBM 公司 McIntuff 首先报道了在 GaAs 衬底上生长 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 异质外延层,然后在其上制成的 MSM-PD^[10]。对 $1.3\mu\text{m}$ 波长光的响应速度为 48ps ,光电灵敏度达 0.5A/W 。但是由于 GaAs 与 InGaAs 晶格常数的差异,故在衬底和 InGaAs 层中间需要生长一层组分变化的缓冲层以减少薄膜间的应力,因而增加了工艺难度。由于 InP 衬底与 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 的晶格常数相互匹配,均为 0.3565nm 。所以美国贝尔实验室等相继报道了在 InP 衬底上研制成功的 InGaAs MSM-PD 和光电集成接收放大器^{[11]~[13]}。最近,德国弗朗霍夫(Fraunhofer)研究所,报道了他们在 GaAs 衬底上成功地制成了 InGaAs MSM-PD + AlGaAs/GaAs HEMT 的长波长单片集成光电接收放大器。在 $1.3 \sim 1.55\mu\text{m}$ 波长范围内, -3dB 带宽为 16.5GHz ,肉眼可分辨的速率为 $20\text{Gb/s}(1.55\mu\text{m})$ 。其中 MSM-PD 的灵敏度为 0.32A/W , 10V 时的暗电流 $I_d = 5 \times 10^{-7}\text{A}$ ^[14]。而且 E. H. Böttcher 等人^[15]报道了利用亚微米 ($0.5\mu\text{m}$) 的电极,研制成功超宽带 ($>40\text{GHz}$) 的 InGaAs MSM 光电探测器。

上海交通大学于 1989 年研制成功 GaAs MSM-PD。速度达 110ps ,暗电流仅 1.1nA ^[16]。并于 1990 年与德国亚琛工业大学合作研究成功长波长的 InGaAs MSM-PD,其速度达 48ps ,暗电流 60nA 以下^[17]。

但是 InGaAs 材料对 MSM 结构器件而言,其较大的缺点为它与金属形成的肖特基势垒高度过低,仅 0.2eV 左右^[18]。导致其暗电流较大,难以实现在放大器中的实际应用。所以人们一直致力于提高 InGaAs 上金属的势垒高度的研究。目前均采用所谓“势

垒增强技术”制成实用的 MSM - PD。同时为了解决由于交叉指状金属电极的遮光效应,使受光面积下降,导致光电流响应降低的问题,也发展了各种新技术。此外,在 OEIC 中的单片集成放大器和探测器阵列的研究也方兴未艾,并均取得很大进展。

MSM - PD 的迅速发展与其本身特点分不开的。MSM - PD 的基本特征可以归结如下。

1. 平面器件结构。图 1.3 中给出了 APD, PIN 和 MSM - PD 三种器件结构的比较。可以看出,对于 MSM - PD,它的电极均由上面引出,形成平面型的器件结构。不仅工艺简单,而且从材料生长到器件工艺全部过程可以与高速 FET(或 HEMT) - IC 工艺相容,便于实现全单片的光电接收放大器。图 1.4 中给出了 MSM - PD + FET 的单片集成示意图。这样不仅大大提高了器件、电路的可靠性,而且为单片光电子集成的发展打下良好的工艺基础。

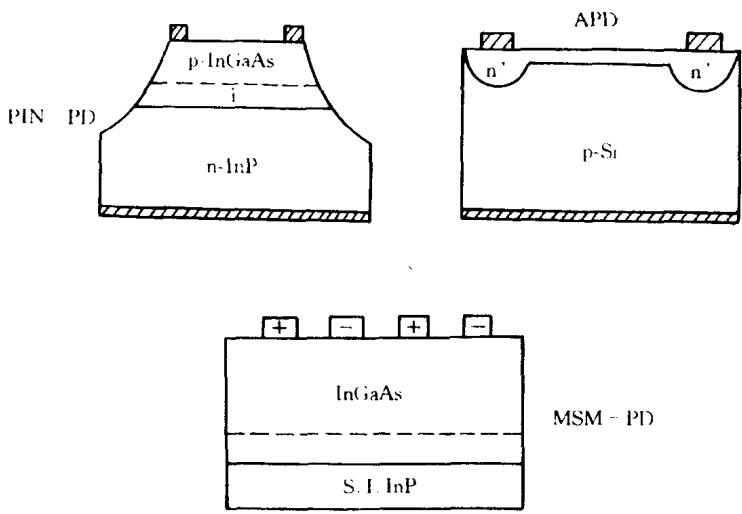


图 1.3 APD, PIN 和 MSM - PD 三种器件结构之比较

2. 速度快。由于 MSM - PD 的器件结构为两个背对背的二极管。工作时,总有一支二极管为反向偏置。所以器件本征电容

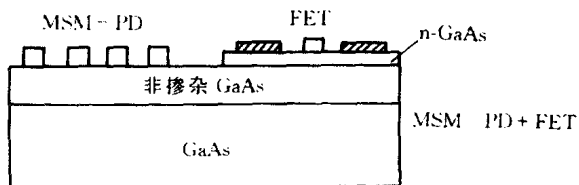


图 1.4 MSM-PD+FET 集成示意图

小,而且随电压变化不大。图 1.5 中给出了 PIN 和 MSM-PD 器件电容的比较,以及随偏压的变化关系。可以看出,对相近的有源受光面积的器件,MSM-PD 的电容远比 PIN 的要小,而且不随电压变化。同时 MSM-PD 为金属—半导体结构器件,没有少子

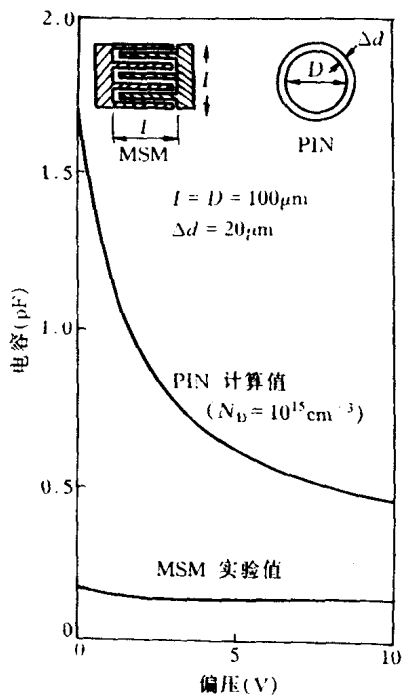


图 1.5 PIN 和 MSM-PD 器件电容之比较

效应,串联电阻小,RC 时间常数也小。其速度主要取决于光生载流子在两电极之间的渡越时间(即与电极间距成反比),所以响应速度高。

3. 适宜于阵列探测器。由于金属—半导体结构的平面工艺,所以从工艺上更容易实现探测器阵列(线阵列,面阵列)。而这无论在波分复用(WDM)光纤通信中或其他阵列探测技术中均是十分需要的。

表 1.4 给出不同器件结构的光电探测器性能的比较。

表 1.4 各种结构光电探测器的比较

器件结构	APD	PIN	MSM
器件工艺简单性	差	优	优
工作偏压	高	低	低
暗电流	高	低	低
倍增噪声	高	低	低
光电单片集成性	差	中	优

参考文献

- [1] 张煦, 光纤通信技术, 北京: 中国科学技术出版社, 1992
- [2] S. M. Sze "Physics of Semiconductor Devices", New York, John Wiley, 1981
- [3] S. M. Sze, D. J. Coleman, JR and A. Loya, "Current Transport in Metal-Semiconductor-Metal (MSM) Structures", Solid-State Electronics, Vol. 14, P1209, 1971
- [4] T. Sugeta, T. Urisu, S. Sakata and Y. Migushima, "Metal-Semiconductor-Metal Photodetector for High-Speed Optoelectronic Circuits", Proceeding of the 11th Conference on Solid-State Devices, Tokyo, 1979. or Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 9, Supplement 19-1, P459, 1980
- [5] W. Roth, H. Schunacher, J. Kluge, H. Geehen and H. Beneking, "The