

雪崩光电二极管特性与测量

张逸斐

(山西应用科技学院 山西省太原市 030062)

摘要: 本文首先介绍了雪崩光电二极管的应用特性及工作原理,随后在不同通信速率及不同偏压条件下对 APD 的灵敏度进行了即时测量,对光通信领域的接收性能提升提供了较好的理论指导及技术支持。

关键词: 雪崩光电二极管; 器件结构; 灵敏度测量

随着世界范围内经济水平的快速发展和科学技术的进步,传感器相关技术在各行各业中占据着越来越重要的地位。雪崩光电二极管 (APD) 凭借其响应速度快、体积较小、灵敏度高等诸多优势,在空间光通信、光电检测等场景中应用广泛。通常,在激光通信链路中,雪崩光电二极管用作接收单元中的核心器件,实现了捕捉光信号并进行光电转化及输出等功能,在上下游系统发挥着不可替代的作用。

1 APD简介

1.1 APD实现原理

在光通信链路中,雪崩光电二极管 (APD) 通常作为光信号接收单元中的光电转化媒介,该元件中的核心元组为 P-N 结, P-N 结需在适宜的偏压下工作,输入该元件的光在被其中的 P-N 结吸收后生成电信号,随后电信号输入后续电路中。在一定范围内,随着对该器件输入偏压的增大, APD 输入的电信号也会成倍激增,这一光放大过程类似于雪崩现象,因此该器件得名雪崩光电二极管。

APD 的具体性能主要由四大因素决定:雪崩增益系数、增益带宽积、过剩噪声因子和温度特性。雪崩增益系数也被称为倍增因子,该系数由材质、APD 结构及入射光信号频率共同决定,该系数通常在 1~3 的范围内。增益带宽随着离化系数比缓慢变化,若需要较高的增益带宽,需选择较大的电子离化系数、较小的空穴离化系数,并使具有较高离化系数的载流子注入到雪崩区。过剩噪声因子与噪声直接相关,通过降低该系数可得到较高的系统灵敏度。温度特性对器件性能也有较大影响,温度直接对离化系数、倍增因子、击穿电压造成影响,离化系数与温度成反比,而其他两参数与温度成正比。

雪崩光电二极管进入工作状态后,环境温度会直接影响到 APD 的偏压点,进而其光电增益效果。为了保证接收模块的正常运作,工程师们会采用温度控制法或温度补偿法来进行调节,在工业制品中温敏电阻和 TEC 结合来实现的闭环温控方案最为常见。

1.2 APD制造工艺

工业场景及科研场景下的 APD 多为硅基结构,其规格通常为 1064nm,向 APD 输入高压后,APD 内部会发生明显的边缘场效应,使得该器件有一定几率出现提前击穿现象,进而影响器件的光电转化效率和工作稳定性。工业界对此进

行了深入研究,提出了多种方案及工艺进行降低边缘电场。工业设计者在原有的设计基础上,扩大了像元间间距,像元间的四周形成了多处较大的探测盲区,从而弱化了上述的边缘场效应。

在具体设计中,APD 被设计为四象限的结构,管芯结构采用正入光式平面型结构,而材料结构采用吸收区、倍增区渐变分离的 APD 结构,在对响应时间、暗电流和响应度等参数进行计算与分析的基础上,优化了器件结构参数。根据专业评测,改进工艺后的 APD 响应时间小于 1.5 ns,响应度大于 9.5 A/W,可靠性设计时使 PN 结和倍增层均在器件表面以下,可有效抑制器件表面漏电流,提高器件的可靠性。

1.3 APD结构

通常情况下,APD 器件结构是在 PN 结的基本结构基础上,对 P 区和 N 区都进行了重掺杂,在邻近 P 区或 N 区引进 n 型或 p 型倍增区,以产生二次电子和空穴对,从而实现输入光电流的放大作用。对于 InP 系列材料来说,由于空穴碰撞电离系数大于电子碰撞电离系数,通常将 N 型掺杂的增益区置于 P 区的位置。在理想情况下,只有空穴注入到增益区,所以称这种结构为空穴注入型结构。

目前商品化的 APD 器件大都采用 InP/InGaAs 材料,InGaAs 作为吸收层,InP 在较高电场下而不被击穿,可以作为增益区材料。对于该材料,所以这种 APD 的设计是雪崩过程由空穴碰撞而在 n 型 InP 中形成。考虑到 InP 和 InGaAs 的带隙差别较大,价带上大约 0.4eV 的能级差使得在 InGaAs 吸收层中产生的空穴,在达到 InP 倍增层之前在异质结边缘受到阻碍而速度大大减少,从而这种 APD 的响应时间长,带宽很窄。这个问题可以在两种材料之间加 InGaAsP 过渡层而得到解决。

在传统的器件结构中,吸收层的厚度和量子效率无法同时体现出优异指标,二者的效率往往互相影响。随着吸收层厚度降低,其器件内部光电渡越时间也会随之降低,带宽性能因此大大提升。但吸收层过薄会导致量子效率过低,因此吸收层厚度需要慎重设计。针对这一现象,工程师们提出了多种方案,经过验证在器件内部加入谐振腔结构最为有效,即在器件的底部和顶部设计 DBR。目前这种结构的器件以 GaAs/AlGaAs 材料居多,增益-带宽积 300GHz 以上。这种 DBR 反射镜在结构上包括低折射率和高折射率的两种材料,二者交替生长,各层厚度在半导体中入射光波长的 1/4。这种谐振腔结构的探测器在速率要求的前提下,吸收层厚度可

以做得很薄，而且电子在经过多次反射后，量子效率大大增加。这种结构的器件可以获得小于 10 nA 的低暗电流，在单位增益的条件下，可以获得 70% 的峰值量子效率。噪声测量表明该器件具有低的噪声特性，这一指标比基于 InP 材料制备的 APD 参数高很多，该材料在光电探测领域内的优势极为明显。

1.4 APD研究现状

目前提高雪崩光电二极管性能的方式主要分为两种，一种选择低碰撞电离系数比的半导体材料，另一种是实现雪崩光电二极管器件微型化、集成化发展。随着研究不断深入、技术进步，雪崩光电二极管将向着高性能、低噪音、低成本、高速等方向发展。在材料方面，雪崩光电二极管材料可分为硅、锗硅、碲镉汞、铟镓砷等，其中硅雪崩光电二极管技术相对成熟，是市场主流产品。但硅光谱响应有限，为实现更高的带宽和集成度，市场对雪崩光电二极管的碰撞电离系数、相应速度等提出了更高要求，在此背景下，锗硅雪崩光电二极管市场关注度提升。

2021 年，经市场权威机构调查，全球范围内硅基 APD 市场规模达到惊人的 8000 万美元，预计 2026 年市场规模将增长至 1.0 亿美元以上。随着技术突破及工艺改善，APD 器件应用场景日益增多，随着智能家居、自动驾驶、光通信等产业发展，雪崩光电二极管市场需求将进一步释放。雪崩光电二极管制备难度大，国外企业占据市场主要份额，相比之下，我国光电企业在 APD 方面产能产量均较弱，未来需进一步提高研发能力及产能。

2 仿真

2.1 仿真工具

在本工程中，我们的仿真工具选用 Matlab，和其他仿真工具相比，Matlab 具备以下三大优势：快速的仿真过程、高效的团队协作及突破性的用户体验。该编译器内置了高级开发工具，向用户提供了调试、数据库及创新功能，用户体验极佳，采用该平台的用户可以快速创建设计电路并进行仿真。

我们采用该仿真工具的 2018 版本，该版本和之前的版本相比，加入了可视化仿真器、针对电路设计的集成工具包等使用功能和许多工具包及解决方案的支持，此外该版本还对处理多种场景的仿真进行了功能性强化。值得注意的是，该版本编译器实现了在同一环境内创建多个面向不同框架版本的仿真应用。除此之外，该版本的编译器提供了 Libsvm、Simulink、Pandas 等多种第三方工具包，为使用者带来更强的交互体验和更为高效的工作效率。在内置了诸多算法架构及常用模拟装置的基础上，设计人员能够十分便捷地基于设定逻辑完成多种复杂场景下的光电仿真、电路仿真、算法预测等多项任务。

2.2 仿真结果

在光通信中，通信速率与探测灵敏度息息相关，通信速

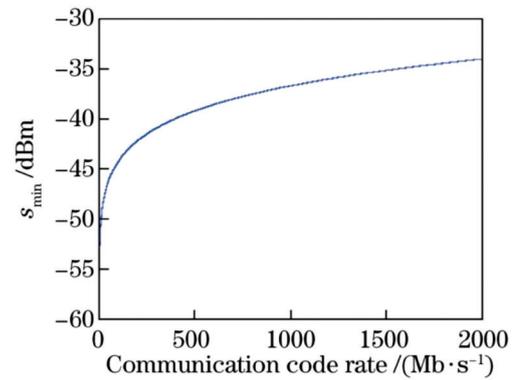


图 1: 通信速率与探测灵敏度的仿真曲线

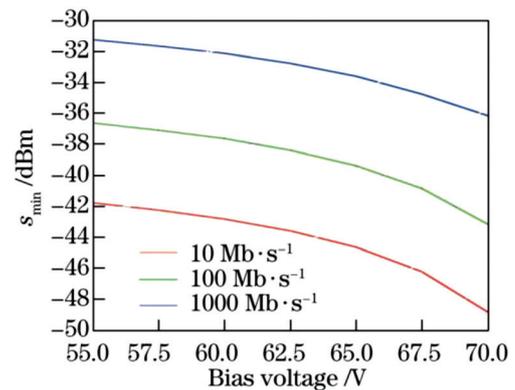


图 2: 不同通信速率下偏压与探测灵敏度的仿真曲线

率越高则单位时间内接收模块收到的信号越强，系统灵敏度也会越高，因此在一定范围内通信速率与系统灵敏度大致呈正相关关系。在此理论基础上，我们设定 APD 基础电阻为 1.38 欧、倍增因子为 1.9、环境温度为 270K 的条件下，通信速率与探测灵敏度的仿真曲线如图 1 所示。

在雪崩光电二极管中，输入偏压直接影响倍增因子，进而对 APD 灵敏度造成影响。在一定范围内，灵敏度随着偏压的增大而增大，而偏压超过临界值后，系统灵敏度会随着偏压的增大而减小。我们在上述设定条件下，针对通信速率分别为 10 Mb/s、100 Mb/s、1000 Mb/s 三种条件下，在 55-70 V 的范围内进行仿真流程，得到的仿真结果如图 2 所示。由该结果可知，系统的最佳偏压点低于 55 V，因此在该输入偏压范围内，随着偏压增大，系统灵敏度随之降低。此外，相同偏压下，通信速率越高，系统的接收灵敏度越高，印证了我们的理论推导。

3 实验

3.1 实验装置介绍

我们在不同的通信速率和偏压条件下进行灵敏度探测实验，搭建的实验平台如图 3 所示，最左测的光源为稳频激光器，输出波长为 1550 nm，激光器后设有可调节的光衰减器，我们可根据输入端及接收端的具体情况进行适当的光功率衰减。光信号在经过衰减后进入准直器生成平行度较好的光束，

表 1: 电路设计通用要求表

编号	级别	条目内容	备注
1	规定	单板网络的连接必须正确无误。(个人自查)	
2	规定	器件之间的接口电平匹配。	
3	规定	PECL 到 LVPECL 的接口使用交流耦合(直流平衡情况)或 3 电阻端接。采用交流耦合作热拔插时需注意防止因电容积累电荷放电导致器件损伤,可在电容与单板输入/输出接口采用大电阻下拉。	
4	规定	单板热拔插对外接口器件选型必须能够满足热拔插要求。	
5	规定	热拔插接口设计,选用的器件内部不允许有从端口对电源的二极管钳位保护网络。	
6	提示	在不同电平接口时利用钳位二极管实现接口,需要考虑限制电流。	
7	规定	差分信号应考虑 Failsafe 功能。	
8	提示	了解 CMOS 器件的闩锁现象,选用不易发生闩锁的器件。(一般要求 Latch-Up Performance Exceeds 100 mA Per JESD 78, Class II。)	
9	规定	器件工作速率符合设计要求。	
10	推荐	在满足系统性能要求的情况下,尽量降低信号的速率,采用慢速器件。	
11	规定	凡公司、事业部、部门有模块电路、通用电路,能够满足设计要求者,无特殊原因一律采用模块电路。优先选用公司级模块电路。	

准直器后还设有功率检测器,可即时查看当前光路中的光功率,避免功率过大对其他设备造成损坏。

在上述实验步骤不变的情况下,改变 APD 的偏压值,分别测试不同通信速率下偏压与探测灵敏度的关系。实验中探测器选用德国 Sowel 公司生产的 SDW 型 ADP 探测器,其接收面直径为 85 微米,对波长范围在 1545-1555 nm 的光谱响应度为 1.72 A/W,探测器通过 ASD 4324 模块来输入偏压,该模块针对环境温度变化具备自适应功能,可使得探测器处于最佳工作状态,该探测器光电转化效率较高,其倍增因子最高可达 23。探测器中的 APD 模块在完成光电转化后,光电流还会经过二次放大电路进行信号放大,方便后续的分析。该探测器内部还配备了恒温装置,通过温敏二极管、制冷器等器件完成闭环恒温调控,从而使得接收模块处于温度较为稳定的环境中。

3.2 系统电路设计

APD 系统中的滤波电路主要用于滤除多阶谐波,来获得成为更为纯净的电流。根据是否包含谐波补偿装置,滤波电路可分为有源滤波电路和无源滤波电路,本文设计的滤波电路中的 CM1457 是一种基于电感器的(L-C)EMI 滤波器阵列,带有 ESD 保护,以 CSP 形式集成四个、六个或八个滤波器系数为 0.40 mm 节距。CM1457 的每个 EMI 滤波器

通道组件值为 6 pF 时执行-35 nH-4.7 pF-35 nH-1.8 pF。截止频率为-3 dB 衰减为 300 MHz,在真实情境中的数据速率为高达 160 Mbps,同时提供-35 dB 衰减。在 800 MHz 至 2.7 GHz 的频率范围内。部件包括 ESD 每个输入/输出引脚上的二极管,并提供高级别的保护静电放电(ESD)。ESD 保护二极管已连接外部过滤器端口的设计和特点是安全消除超过最大值±15 kV 的 ESD,同时也符合冲击 IEC61000 的要求(A4-2 国际标准)。

系统中的稳压电路用于将输入的交流电成分处理为直流电成分并进行稳定输出,因此该电路在整体系统中发挥着至关重要的作用。本文采用桥式整流电路方案来完成这一设计预期,该电路由变压器和主整流桥以及负载组成。整流电路之后往往会与一个较大容量的电容进行并联,目的即是电容滤波,由于电容的充放电作用以及电容两端电压的存在,使得整流电路输出电压 U_L 的脉动程度大为减弱,波形近于平滑,起到了滤波的作用。在这种电容滤波电路中,电容的容量越大或负载电阻越大,电容放电就越慢,输出电压也就越平滑。该电路符合切换行为基准,且具备无反向恢复/无正向恢复特性和高浪涌电流能力,符合 RoHS、JEDEC1 标准,击穿电压最高可达 360V,能够在多种场景下完成整流作用,因此可在系统中稳定发挥相应作用。本文设计出的整流电路转化效率高,输出成分中谐波比例低,各电子器件承受的最

表 2: 逻辑器件应用设计规范表

编号	级别	条目内容	备注
1	规定	不带内部上下拉和总线保持功能的 CMOS/BiCMOS 器件, 未用输入端严禁悬空, 必须通过电阻进行上拉或下拉处理。	
2	规定	单板带有可以裁减部分, 原理图中部分器件可能不焊接时, 需要确保这些器件不焊接不会导致其他器件的输入端悬空。	
3	规定	逻辑器件不用的引脚或者固定电平的信号如需预置电平处理, 必须通过电阻上拉或者下拉, 不允许直接接电源或地。	
4	规定	对器件未用输入端进行上拉或下拉处理, 必须满足可测试性设计要求。	
5	规定	中断信号要通过上拉或下拉来使中断信号处在默认的非触发态。	器件手册 规定优先
6	规定	多级具有上电 3 态的器件级联驱动信号时, 如果信号上电过程要求确定电平, 则各级输入端都必须采用上拉或下拉电阻确定状态。	
7	规定	采用具有上电 3 态的器件驱动背板输入控制信号, 如果该信号上电后立刻需要读取且不受上电复位控制 (例如单片机 ISP 模块中的背板复位信号和下载使能信号), 则必须采用电阻置初始电平。	
8	规定	信号线上的上拉或下拉电阻能够满足可靠预置电平要求。	
9	推荐	对于 CMOS 器件, 如无特殊要求单个管脚的上拉或下拉可以取 10k, 多个管脚或其他具体情况可以参见下面的条目和以及进行计算确定。	
10	规定	对使能内部上拉的 ISP MACH 4000 型 EPLD, 以及和 Cyclone 型 FPGA 通用 IO 管脚连接的网络, 下拉电阻采用 1K, 上拉电阻可选择 10K。	
11	推荐	数据总线的下拉不宜使用太大的电阻, 推荐使用 1K。	
12	规定	OSC 的 ST_N 管脚应该加上拉电阻 (推荐值为 1k, 建议直接调用晶振滤波模块电路)。	
13	规定	对背板输出的驱动器, 如果其 OE 端需要控制, 应采用电阻设置为输出无效状态。对于常见的 244 器件, OE* 应该采用电阻上拉。	
14	规定	参照器件的 Datasheet 将所有控制脚通过电阻进行上拉或下拉, 特别是芯片的 OE /CE 端。	
15	规定	Enable、Set、Reset、Clear 和三态器件输出的上拉、下拉正确	

大反向电压也较低, 在装置的正、负半周内都有电流供给负载, 各个元件都得到充分利用, 整体效率较高。

3.3 电路设计规范

在实际的电路设计中, 也有诸多通用的设计规范需要遵循, 应当严格遵照相应的规则来组织和进行, 明确了通用的电路设计规范, 我们才能够制备出合格且美观的原理图, 本

文结合相关资料整理的原理图制图规范如表 1 所示。

在 APD 器件的具体设计与制造中, 与或门等逻辑器件应用广泛, 这些逻辑单元的加入与排布也需遵循既定的设计规范, 本文结合相关资料整理的原理图制图规范如表 2 所示。

3.4 不同通信速率下 APD 灵敏度测量

我们的实验都是在实验室中进行, 因此实验结果不会受

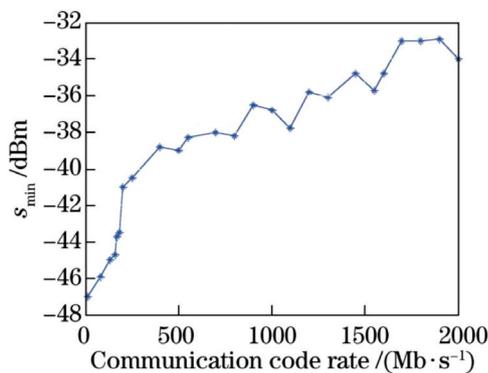


图 3: 通信速率与探测灵敏度实测曲线

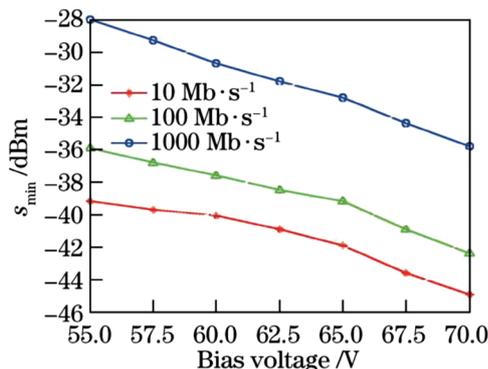


图 4: 不同通信速率下偏压与探测灵敏度的实测曲线

到背景光等外界影响。在完成光路搭建后，我们开启各个模块，此时 APD 的偏压初始值为 75 V，我们在 0-2000 的通信速率范围内，以 100 为步距逐步改变通信速率，同时记录各个实验节点下的 ADP 灵敏度。实验结果如图 3 所示，整体曲线呈现为上升状态，但在通信速率范围的末端却出现了与仿真相反的结果，经过逐节点排查我们得知，光源模块在通信速率处于该范围的情况下散热量大大增加，恒温器功率有限无法及时将热量排出，散发的热量对 APD 灵敏度产生了不良影响，进而导致了实验结果和仿真结果出现偏差。

3.5 不同通信速率下偏压与 APD 灵敏度探究

随后，我们在同一光路下研究了不同通信速率下偏压和 APD 灵敏度的影响，设定的通信速率为 10 Mb/s、100 Mb/s、1000 Mb/s 三种，在各个通信速率下我们在 55-70 V 的偏压范围内以 2.5 V 为步距进行改变，得到的实验结果如图 4 所示：在同一偏压条件下，通信速率越高对应的系统灵敏度越高；在同一通信速率的条件下，偏压越高对应的系统灵敏度越低。实验结果与仿真结果十分接近，由实验结果我们还可得知针对该 APD 模块，当偏压超过 65 V 后，灵敏度曲线变化更为剧烈，因此需避免工作偏压过大导致的不良影响。

4 结论

本文对雪崩光电二极管的底层运行机理进行了推导，并在此基础上进行了关于通信速率和输入偏压对 APD 灵敏度的仿真分析，随后搭建实验台针对通信速率和输入偏压对

APD 灵敏度进行探究，实验结果表明：在相同的偏压条件下，一定范围内通信速率越高对应的系统灵敏度越高；在相同通信速率的条件下，一定范围内偏压越高对应的系统灵敏度越低。该探究对光通信领域中的 APD 具有重大科研指导意义和实践价值。

参考文献

- [1] 李彬, 陈伟, 黄晓峰, 等. InGaAs/InP 单光子雪崩光电二极管 InP 顶层掺杂研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2017 (04).
- [2] 侯丽丽, 韩勤, 王帅, 等. InGaAs/InP 盖革模式雪崩光电二极管阵列性能一致性研究 [J]. 半导体光电, 2018 (03).
- [3] Zhou Dengwang, Dong Yongkang, Wang Benzhang, Jiang Taofei, Ba Dexin, Xu Pengbai, Zhang Hongying, Lu Zhiwei, Li Hui. Slope-assisted BOTDA based on vector SBS and frequency-agile technique for wide-strain-range dynamic measurements. [J]. Optics express, 2017, 25 (3).
- [4] Voskoboinik, A. et al. Frequency-domain analysis of dynamically applied strain using sweep-free Brillouin time-domain analyzer and sloped-assisted FBG sensing. Opt. Express 20, B581-F586 (2012).
- [5] 焦泓玮, 黄永清, 赵康, 等. 叉状光电探测器阵列电极的设计与优化 [J]. 光子学报, 2019 (11)
- [6] 黄志伟, 汪建元, 黄巍, 等. 锗近红外光电探测器制备工艺研究进展 [J]. 红外与激光工程, 2020 (01).
- [7] Mengling Xiong, Huaping Gong, Ziheng Qian, Chun-Liu Zhao, Xinyong Dong. Simultaneous measurement of liquid level and temperature based on spherical-shape structures and long period fiber grating [J]. Sensors & Actuators: A. Physical, 2016, 239.
- [8] Zhengrong Tong, Panpan Luan, Ye Cao, Weihua Zhang, Jun Su. Dual-parameter optical fiber sensor based on concatenated down-taper and multimode fiber [J]. Optics Communications, 2016, 358.
- [9] Yong Zhao, Lu Cai, Xue-gang Li. In-fiber modal interferometer for simultaneous measurement of curvature and temperature based on hollow core fiber [J]. Optics and Laser Technology, 2017, 92.

作者简介

张逸斐 (2000-), 男, 山西省忻州市人。大学本科学历。研究方向为电子信息工程。