光子和光电子集成专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022031002

集成化高速 APD 的研究进展

赵彦立*，李　倩，张和伟，丁文强，余旭镇，冯旭阳，林泽标，田　扬，曾　轩

（华中科技大学 武汉光电国家研究中心，武汉 430074）

摘　要： 理论分析了降低雪崩光电二极管（APD）噪声、提高其增益及带宽的一般方法。面向 APD 综合响应度与带宽之间存在的固有矛盾问题，提出了采用三维纳米化技术降低 APD 的噪声，以及采用集成光学技术提高 APD 的响应度的解决方案。在此基础上，从表面等离基元聚光结构与垂直光入射型 APD 的混合集成、超透镜与垂直光入射型 APD 的混合集成，以及阵列波导光栅（AWG）与光侧入射倏逝波耦合波导（EC）APD 的单片集成等三个方面，综述了集成化高速 APD 的研究进展，对该领域的发展趋势进行了展望。

关键词： InP 集成光子学；光通信；光电探测器；雪崩光电二极管

中图分类号： TN312　**文章编号：** 1001－5868(2022)02－0285－09

Research Progresses of Integrated High-speed APD

ZHAO Yanli, LI Qian, ZHANG Hewei, DING Wenqiang, YU Xuzhen,
FENG Xuyang, LIN Zebiao, TIAN Yang, ZENG Xuan

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, CHN)

Abstract: The general methods for reducing the noise of avalanche photodiode (APD) and improving its gain and bandwidth were analyzed. Aiming at the inherent contradict ion between the responsivity and bandwidth, the solutions were proposed in this paper, such as using three-dimensional nano-technology to reduce the noise of APD and using integrated optical technology to improve the responsivity. The research progresses of integrated high-speed APD were summarized, including the following three aspects: hybrid integration of surface plasmon focusing structure with APD of vertical light incidence, hybrid integration of super lens with APD of vertical light incidence, and monolithic integration of arrayed waveguide grating (AWG) and evanescent wave coupling waveguide APD of side optical incident. The development trends were prospected as well.

Key words: InP integrated photonics; optical communication; photodetedtor; APD

0　引言

由于存在内部增益，基于雪崩光电探测器（APD）的光接收机与普通光电探测器（PIN PD）接收机相比，APD 光接收机的灵敏度可以提高 5 dB 以上[1]。但同时，与 PIN PD 相比，APD 的带宽（响应速度）通常受限于其雪崩建立时间。提高 APD 的响应度、增益和带宽是该领域的热点问题[2]。面向高速光通信领域实际需求，APD 的“（综合）响应度-带宽积”（简写为 RBP）是衡量其性能的关键指标。在此，按照参考文献[2]，定义“综合响应度”为增益为 1 时 APD 的响应度与增益的乘积。为了提高 APD 的 RBP，需要同时提高 APD 的增益、带宽和响应度。McIntyre 等引入了载流子碰撞离化系数之比（K）作为衡量半导体材料碰撞离化性质的特征参数[3]。研究表明，K 值越远离 1，即电子和空穴碰撞离化系数差别越大，对提高 APD 的带宽和增

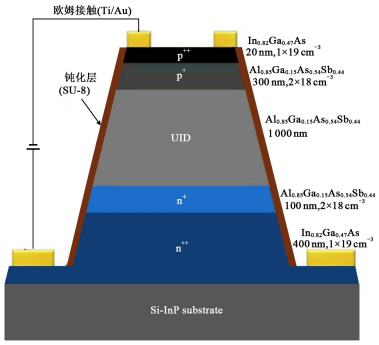
收稿日期：2022－03－10.
基金项目：国家重点研发计划项目（2018YFB2200204）.
* **通信作者：**赵彦立
E-mail： yanlizhao@mail.hust.edu.cn

益就越有利[3-4]。在此背景下，本文第1部分首先综述了APD的K值调控的几种技术，进一步提出采用三维(3D)纳米结构提高APD增益及带宽的一般方法。第2部分作者综述了通过集成技术提高APD的响应度及带宽的研究进展：包括表面等离基元聚光结构与垂直光入射型APD的混合集成方面的进展，超透镜与垂直光入射型APD的混合集成的研究进展，以及倏逝波耦合波导与光侧入射APD的单片集成芯片方面的研究进展。我们认为，通过采用K值调控与集成化相结合的技术方案，有望突破现有APD在RBP方面的瓶颈限制。

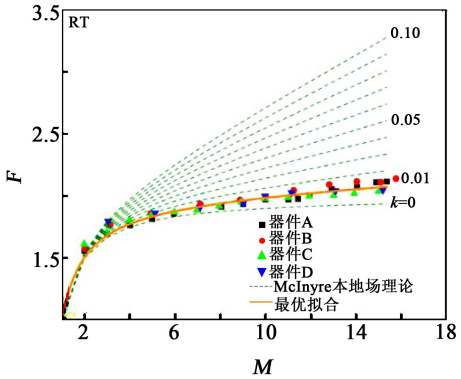
1 APD的K值调控

APD的理论发展可以概括为从最早的局域离化模型(McIntyre理论)[3]到非局域离化模型(见参考文献[5]及其引用文献)。McIntyre局域离化理论在厚倍增层APD的设计中取得了成功。但是，伴随着光通信系统对高速APD的实际需求，APD的倍增层必须越做越薄，此时McIntyre理论存在较大偏差。具体表现在：根据McIntyre局域离化理论，APD倍增层越薄，达到一定增益要求条件下所需的电场就要增加，这导致电子和空穴的离化系数差别减小。但后来的实验报道却给出了不同的结果(见参考文献[5]及其引用文献)。这说明当APD倍增层变薄到一定程度(对高速InAlAs APD的倍增层来说，一般在100 nm以下)时，McIntyre的局域模型并不适用。与厚倍增层APD相比，薄倍增层APD中的“dead space”效应更为显著。“dead space”效应决定了载流子在电场作用下需要经过一定的加速距离达到离化阈值能量后才能离化。这导致离化的非局域性，也降低了载流子离化的随机性，因此噪声会降低。综上所述，基于dead space效应的非局域碰撞离化模型能更好地解释高速APD的实验数据。与局域的McIntyre理论相对应，非局域碰撞离化模型在高速(薄倍增层)APD的设计和研制中起到了非常重要的指导作用。这个模型利用统计计数的方法，将载流子的碰撞离化用概率密度函数表达出来，通过积分的方式取统计平均，最终可以得到倍增区的增益、过剩噪声、带宽等参数的理论值。非局域碰撞离化理论启示我们：薄倍增层对降低APD的K值有利[5]，这就是近年来追求薄倍增层APD的理论依据。以1 550 nm波长Ⅲ-Ⅴ族APD为例：美国海军实验室[10-11]、弗吉尼亚大学[12-13]、加州大学洛杉矶分校[6-7]、(英国)谢菲尔德大学[14]、日本电报电话公司(NTT)[2]、台湾中央大学[15]、中国科技大学[16]、上海科技大学[17]、中科院技物所[18]、中科院半导体所[19]及中科院微系统所[20]、北京邮电大学[21]及华中科技大学[9,22]等单位都做出了具有各自特色的工作。但总地来说，由于各单位解决问题的侧重点不同，已报道APD的RBG仍需进一步提高。

图1给出了弗吉尼亚大学[13]报道的$Al_{0.85}Ga_{0.15}As_{0.56}Sb_{0.44}$(后文简写为AlGaAsSb)APD的器件结构及过度噪声-增益(F-M)曲线。如图1(a)所示，为了更清楚地分析AlGaAsSb材料本身的噪声特性，采用了p^+In^+外延结构；同时，在制作工艺上，采用了台面结构，以SU8做为钝化层。图1(b)给出了该APD的测试结果：对于不同外延结构，所报道的材料K值均为0.01左右，说明AlGaAsSb材料在高RBP APD方面具有广阔的应用前景。



(a) AlGaAsSb APD的外延结构示意图

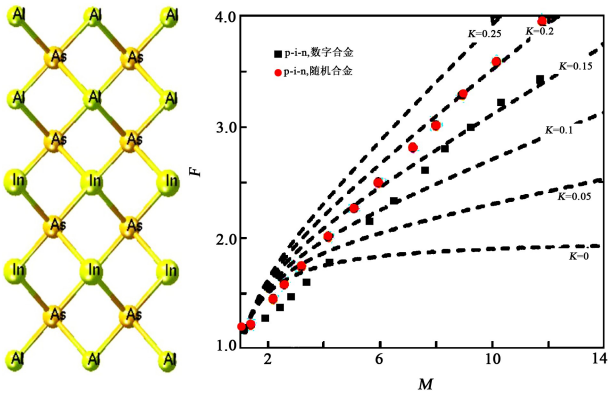


(b) AlGaAsSb APD的F-M曲线

图1 AlGaAsSb APD的外延结构示意图及其F-M曲线

图2给出了上海科技大学[17]报道的InAlAs数字超晶格APD的研究结果。图2(a)为InAlAs数字合金结构示意图，该图展示了合金中InAs和

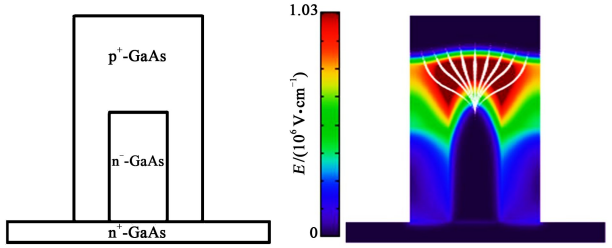
AlAs 的生长顺序。图 2(b)给出了 InAlAs 数字合金结构与随机合金 APD 的测试结果对比：在增益为 10 的位置，InAlAs 数字合金结构与随机合金 APD 的 K 值分别为 0.2 及 0.15，表明数字合金超晶格的确对降低 APD 的过剩噪声有一定的作用。



(a)　数字合金结构示意图　　(b)　数字合金与随机合金的 K 值比较

图 2　InAlAs 数字合金结构示意图及其与随机合金的 K 值比较

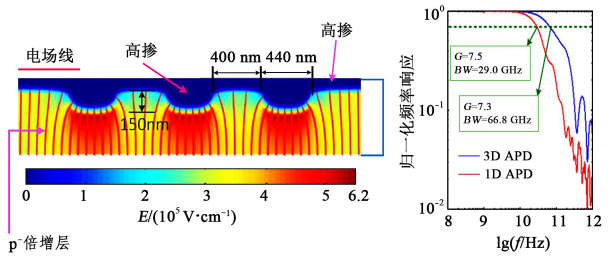
美国加州大学洛杉矶分校的 Pradeep Senanayake 等提出了一种纳米柱结构 APD，这种基于等离子体增强效应的 APD 阵列可以利用较小的有源区实现高效的光子吸收，从而实现低暗电流和高带宽，每一个单元 APD 的结构如图 3(a)所示[6-7]。由于这种包络形结构不同于以往的层状结构，所以其电场分布也与常见的一维电场不同，如图 3(b)所示，不仅电场线方向不是直线，而且电场强度沿着电场线也处处不同。这种倍增区电场呈三维分布的 APD 叫做三维(3D)APD，它们的优化设计与传统的一维 APD 有着很大不同。



(a)　结构示意图　　(b)　电场分布示意图

图 3　纳米柱型 APD 结构示意图及电场分布示意图

如前文所述，美国海军实验室采用级联倍增结构调控 APD 的 K 值[11]，但这种级联倍增结构的倍增层非常厚，没办法实现高速光通信应用。弗吉尼亚大学[12-13]、谢菲尔德大学[14]及上海科技大学[17]采用锑化物新材料或者采用数字超晶格技术降低 APD 的 K 值，但目前碲化物材料与数字超晶格结构在外延生长上面临很大的挑战。加州大学洛杉矶分校[6-7]采用纳米尺度 3D APD 新结构，但纳米尺度 APD 的光耦合问题尚未解决，同时所报道 APD 的带宽低，仍需进一步探索。3D 倍增区指的是倍增区的形状或电场分布为三维的情况[6-7]。在 3D 倍增区中，必须将电场强度 $\vec{E}(x,y,z)$ 的三个分量都考虑进去。因此，必须首先确定载流子的行进路线以及路线上各点的电场强度。在计算 3D APD 的 dead space 效应时，可以先计算每条路线各自的特性，最终将这些计算结果进行统计平均。2014 年，来自美国新墨西哥州立大学的 El-Howayek G 等[8]建立了初步的 3D 非局域碰撞离化模型，但只考虑了增益和噪声性能。本课题组在已有工作的基础上，建立了 3D APD 的非局域碰撞离化模型，报道了调控 3D APD 的 K 值、提高 RBP 的新方案[9]。图 4(a)为本课题组提出的 3D APD 的电场分布示意图，图中显示 3D APD 的倍增区单元为纳米尺度，这是为了更好地进行电场调控；图 4(b)为传统 APD (1D APD)与 3D APD 性能参数的比较：在增益大致相同的前提下，3D APD 的带宽明显增加，表明本文提出的 3D APD 在提高 RBP 方面具有优势。不难推断，这种优势的来源为 K 值的降低，本课题组前期已报道的优化结果表明，对 InAlAs 3D APD，K 值从 0.2 下降到 0.12，降幅达 40%[9]。



(a)　3D APD 电场示意图　　(b)　传统 APD 和本文 3D APD 比较

图 4　3D APD 的电场示意图及传统 APD 和本文提出的 3D APD 的比较

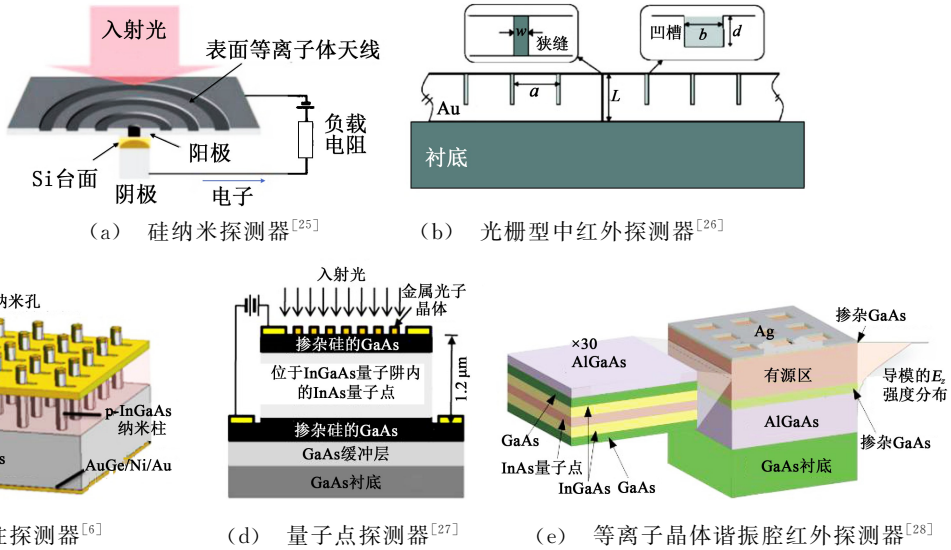
2　如何提高 APD 的响应度-带宽积

本节进一步讨论采用集成光学结构提高 APD 响应度的各种方案。通信用集成化高速 APD 主要包括基于 Si 和Ⅲ-Ⅴ材料两类 APD。对于 Si 基 APD 近期已经有了详尽的综述报道[23]，因此本文主要聚焦集成化高速Ⅲ-Ⅴ族 APD 的研究进展，包括以下三个方面的内容：1)表面等离基元聚光结构与垂直光入射型 APD 的混合集成；2)超透镜与垂

直光入射型 APD 的混合集成；3）阵列波导光栅（AWG）与光侧入射倏逝波耦合波导（EC）APD 的单片集成。

2.1 表面等离基元聚光结构与垂直光入射型 APD 的混合集成

表面等离子体结构可以突破传统光学器件的衍射极限，实现深亚波长尺寸内的光场限制，这种特性推动了等离子体在纳米光子学领域的各种应用。等离子体光汇聚（Light Concentration）结构（如等离子体天线、透镜和谐振器等）可以结合衍射受限介质光学器件和纳米光子结构。利用表面等离基元光汇聚技术可以大幅减小探测器的有源区体积，由此得到更高的带宽、更低的暗电流以及更低的功耗[24]。图 5 展示的是各种等离子体探测器。Ishi 等提出了一种带有表面等离子天线的硅纳米探测器[25]，如图 5(a)所示。器件的阳极金属中央是一个亚波长孔径，孔径周围是同心周期光栅，有源区在孔径下方。该器件可以将大面积的入射光通过阳极的金属周期结构转化为沿其表面传播的表面等离激元布洛赫波（SPP-BW）。因此可以在阳极中央孔径内获得光场增强。借助聚光特性，可以有效降低探测器有源区的尺寸，并能改善其电学性能、降低暗电流。Yu 等提出了一种利用光栅结构的表面等离子体中红外探测器[26]，如图 5(b)所示。金的中央是一个很窄的条形狭缝，内部填充的是有源材料碲镉汞（HgCdTe），金的两侧是凹槽组成的周期光栅结构。该器件的工作原理是：通过调节狭缝宽度改变金属-狭缝-金属波导的模式特性，结合狭缝厚度可以调节 FP 效应的谐振波长，通过优化增大归一化吸收截面（Normalized Absorption Cross Section）。同时，通过优化两侧光栅结构，利用入射光耦合到光栅表面的 SPP-BW，进一步增强中央有源区的光吸收。相比于传统探测器同样体积的有源区，该器件的光吸收增强了 250 倍，波长不变。Senanayake 等提出并制作了纳米柱等离子体增强探测器，如图 5(c)所示[6]。该结构的 InGaAs 纳米柱通过选择外延生长得到。在 Au 的制备过程中，蒸发台的 Au 源和探测器之间采用了一定的倾斜角度，就可以实现该探测器周期纳米孔的制作。该周期结构可以实现 SPP-BW 的激发，进而实现光场增强吸收。Lee 等利用金属周期结构激发 SPP-BW 实现了 InAs 红外量子点探测器的吸收增强[27]，其器件结构如图 5(d)所示。该器件通过分子束外延技术在 GaAs 衬底上生长，有源区由 15 个周期的量子点栈组成，每个量子点栈在 11 nm 厚的 InGaAs 量子阱中掩埋。器件上部集成有二维周期金属结构用于激发 SPP-BW。在没有金属周期结构时，垂直入射光的电场分量主要平行于该器件平面，该平行分量不利于量子点吸收。在集成金属周期结构并激发 SPP-BW 后，入射光的能量转移到了平面内传播的 SPP-BW，因此可以增加光场与量子阱的相互作用，而 SPP-BW 的垂直电场分量较大，也促进了量子阱的光吸收。因此，这种等离子结构明显增强了量子点探测器的吸收效率。Rosenberg 等提出了等离子光子晶体谐振腔的设计



（a） 硅纳米探测器[25]　（b） 光栅型中红外探测器[26]

（c） 纳米柱探测器[6]　（d） 量子点探测器[27]　（e） 等离子晶体谐振腔红外探测器[28]

图 5 应用 SPP-BW 的等离子体探测器

方案，并用于构建偏振选择红外探测器，其结构如图 5(e)所示[28]。该工作分析了二维金属光子晶体的能带特性，对单层金属等离子体结构和双层结构(包括下层金属)分别研究讨论，其内容包括平面内不同等离子模式和波导模式与光吸收增强的关系。

本课题组前期对等离基元结构探测器进行了系统研究，提出了高 RBP SPP PD。在优化条件下，该 SPP PD 响应度可以达到 0.7 A/W 以上，带宽可以达到 140 GHz[29]。在已有工作的基础上，本文进一步提出了一种新型 SPP APD。尽管 Ag 是一种高效的 SPP 材料(低光损耗)，但由于 Ag/InGaAs 电接触问题导致 RC 时间常数变大，影响探测器带宽。选择合适的金属做为等离基元材料，保证在实现高响应度的前提下，同时实现与Ⅲ-Ⅴ族材料良好的欧姆接触特性，对高速 APD 的研制是十分必要的。在前期理论与实验工作的基础上，选择经优化的 Ti/Pt/Au/Ag 取代 Ag。选择这种复合金属的理由是 Ti/Pt/Au 是成熟的欧姆接触材料，与高掺杂 InGaAs 形成良好的欧姆接触已经在前期研制的器件中得以实现[22]；同时 Ag 作为低损耗等离基元金属材料，预期同时能保证 APD 的响应度。图 6 给出了不同等离基元材料及不同结构 SPP APD 的光吸收率与波长的关系。SPP 具体结构参数及其仿真结果在表 1 中进行了总结。如表 1 所示，APD Ⅳ采用了垂直结构及选择 Ag 作为等离基元材料，获得了最高吸收率。相比之下，APD Ⅰ-Ⅲ中引入了三台面结构，吸收率有所降低。考虑到 SPP APD 的光电综合性能，本文光吸收率优化的目标是优于同等厚度体材料 InGaAs 探测器的光吸收率。进一步优化 Ti/Pt/Au 复合金属以改善欧姆接触，保证在实现良好欧姆接触特性的前提下，同时提高 APD 的光响应度。相比于 APD Ⅱ，APD Ⅰ中 Pt 的引入是为了增加SPP APD的可靠性。根据前期APD的制

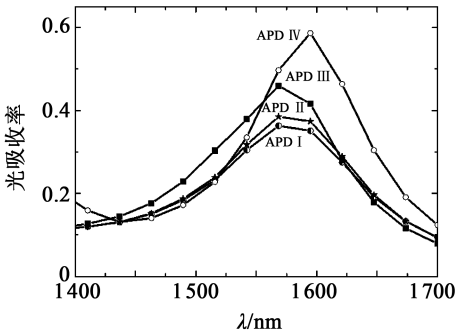


图 6　本文提出的 SPP APD 光吸收率与波长的关系

表 1　本文提出的 SPP APD 的结构及性能评价

参数	APD Ⅰ	APD Ⅱ	APD Ⅲ	APD Ⅳ
SPP 材料*	Ti/Pt/Au/Ag	Ti/Au/Ag	Ag	Ag
台面结构	三台面	三台面	三台面	垂直
电接触及可靠性	优	良	差	差
光吸收率(响应度 A/W)	36%(0.46)	39%(0.49)	46%(0.58)	59%(0.75)
峰值波长	1 568	1 568	1 568	1 595
带宽/GHz	几十	几十	几	几
RBP/(GHz·A·W^{-1})	优	良	差	差
综合评价	优	良	差(欧姆接触性能制约)	

* APD Ⅰ-Ⅳ中金属的总厚度保持不变。

作经验，Pt 的引入可避免 Ti 与 Au 互扩散对 SPP APD 器件稳定性的影响。引入复合金属等离基元材料，在保证欧姆接触性能的同时，提高光吸收效率，是本文提出的新型 SPP APD 的主要特色。

2.2　超透镜与垂直光入射型 APD 的混合集成

随着量子通信技术和 3D 激光雷达探测技术的快速发展[30-31]，低噪声 APD 的研究已逐步成为研究热点。通过减小 APD 的有源区尺寸，可以有效降低 APD 的暗电流及噪声，这是因为暗电流和噪声大小在一定程度上与 APD 的面积成正比。但 APD 的有源区尺寸降低会导致光耦合过程变得困难，也就会导致 APD 量子效率的降低[32-33]。因此，在 APD 小型化的同时，如何最大限度地提高其量子效率，这已成为光探测技术发展的重要问题。

基于表面微纳结构的光汇聚效应以提高光电探测器的量子效率一直是近年来的热门研究方向。上节提到的表面等离基元周期结构的劣势为其固有的金属损耗。2016 年，Thomas Lopez 等将相位菲涅耳透镜集成于 CMOS 图像传感器，提高了其探测效率[34]。2017 年，Wen 等把金属-绝缘体-金属微结构集成于光电探测器阵列，在 1 550 nm 波长下实现了约 60%的光学透射率[35]。最近几年来，超表面的研究得到了越来越广泛的关注[36-38]。等离子体超表面可用于相位调制，但其在等离子体共振工作波长附近的强本征吸收会导致较低的透射率[39]。虽然传统的微透镜阵列也可以提高光学系统的性能[40]，但传统微透镜的尺寸一般很大，不适合小尺寸 APD 的光学聚焦。由高折射率介电单元(如硅，二氧化钛等材料)组成的介质超透镜已被证明具有非衍射限制的聚焦和高传输效率[41-45]。

Mikheeva 等报道了超透镜与光电探测器集成芯片的研究成果[46]，该团队制造出的超透镜样品如图 7 所示。采用五氧化二铌材料，该团队研制的超

透镜可达到 5 倍的聚光系数。2021 年，Xiao 等报道了一种新型 TiO_2 超透镜，能够同时实现钙钛矿光电探测器高速、高灵敏和宽带的检测。集成 TiO_2 超透镜的钙钛矿光电探测器在 400～800 nm 的宽探测范围内显示出前所未有的灵敏度和高速探测能力，其响应度大于 0.5 A·W^{-1}，检测度大于 10^{13} Jones，线性动态范围(LDR)大于 120 dB，响应速度为 200 ns[47]。

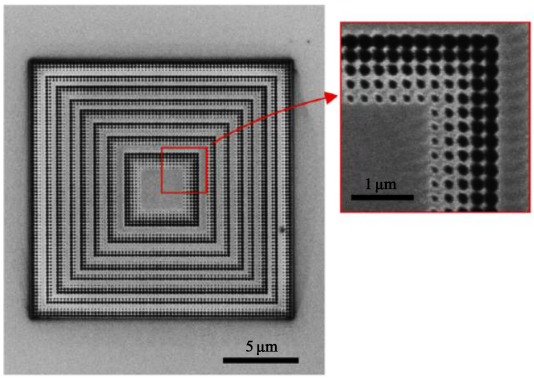
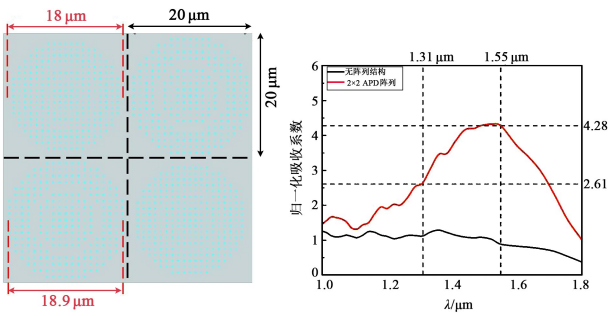


图 7 制造出的超透镜样品的 SEM 图像[46]

本课题组提出了将超透镜阵列与微型Ⅲ-Ⅴ族材料 APD 阵列集成在一起的集成 APD 创新结构[48]，图 8 展示了该结构示意图和理论仿真成果。该研究表明，与超透镜阵列集成的 APD 阵列在光通信波长处表现出增强的宽带吸收效率。相对于普通 APD 来说，最高可在 1 550 nm 波长处达到 4.28 倍的吸收效率增强。在这项工作中，我们设计出两种在光通信波长下直径约为 20 μm 的超透镜结构，并进行了总体优化，提出了一种集成了超透镜的 2×2 APD 阵列。我们提出的集成 APD 阵列具有体积小、成本低、制造难度低、偏振无关、信噪比高等优点。

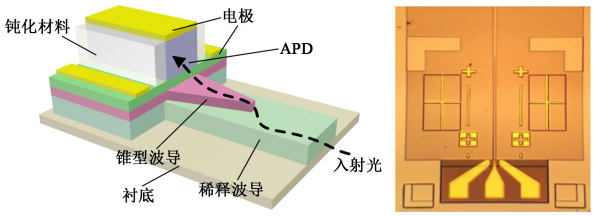


(a) 阵列示意图 (b) 归一化吸收效率

图 8 2×2 APD 阵列示意图和理论仿真结果

2.3 倏逝波耦合波导与光侧入射 APD 的单片集成

图 9(a)给出了 EC APD 的 3D 结构示意图。EC APD 的工作原理为：吸收层吸收光子产生电子-空穴对，其中空穴渡越到 p 电极区，而电子则通过过渡层和电荷层进入倍增区，电子在倍增层高电场的作用下加速并产生碰撞离化过程，随后渡越到 n 电极区。EC APD 光耦合的方式是光从稀释波导注入器件，经过锥型波导的作用，以倏逝波耦合的方式进入反向偏置电压的 InAlAs APD。图 9(b)为根据图 9(a)的思想研制的 EC APD 器件实物图[22]。EC APD 有效地解决了探测器响应度与带宽之间存在的固有矛盾问题。



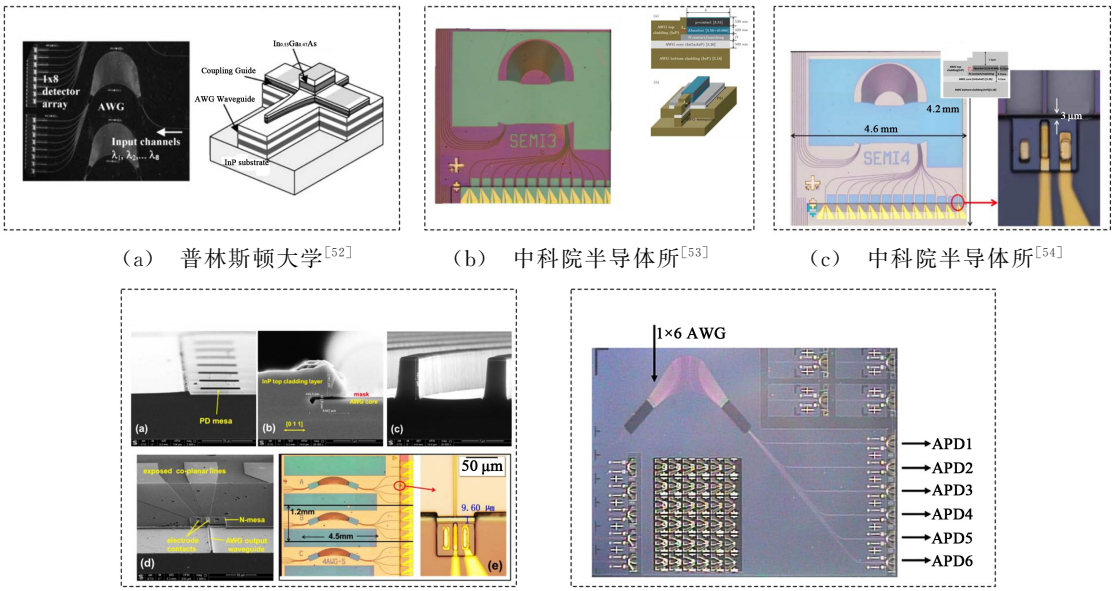
(a) 结构示意图 (b) 器件实物图[22]

图 9 EC APD 的 3D 结构示意图及器件实物图[22]

阵列波导光栅(AWG)作为已经成功应用于点对点波分复用系统的光学滤波器，是构成灵活、大容量波分复用网络的关键元件。与传统的滤波器相比，AWG 具有低损耗、高端口数和可大规模生产的优点，已广泛应用于光通信系统。1995～2002 年间，日本电报电话公司[49-50]和贝尔实验室[51]的研究团队采用多次外延或 PLC-PLC 直接接触的方式实现了 AWG 与波导探测器的集成。2004 年，普林斯顿大学电子工程系光子学与光电材料中心 Forrest[52]的研究团队采用一次外延过程，基于非对称双波导结构实现偏振不相关的 1×8 阵列波导光栅，并将其与 8 个独立的 InGaAs 波导探测器单片集成(如图 10(a)所示)，单个波导探测器具有 0.46 A/W 的响应度和 25.5 GHz 的 3 dB 电学带宽，偏振相关损耗为 0.76 dB。中科院半导体所杨晓红教授团队也对用于波分复用的集成探测器芯片进行了一系列理论和实验研究，2016 年[53]，该研究组设计并制作了集成 13 通道 InP 基 AWG 和 InGaAs 波导探测器的芯片(图 10(b))，采用二次外延，使 AWG 输出波导与波导探测器有源区形成无缝连接，测试得到的响应度为 0.87 A/W。2017 年[54]，他们在 AWG 上包层和探测器 p 型接触层之间引入一个浅沟槽(图 10(c))，采用非选择性再生长的方法获得光滑的外延结构界面，并实现了该类波导探测器与一个 13 通道阵列波导光栅的单片集

成芯片。测试得到该沟槽结构 PD 的响应率为 0.68 A/W，在 10 V 偏压下各通道探测器带宽均高于 16 GHz，所以该集成器件的总带宽可达到 200 Gb/s。同年[55]，他们演示了单行载流子光电二极管阵列和 4 通道的阵列波导光栅的单片集成芯片(图 10(d))，利用选区生长技术在 InP 平台上实现 O 波段阵列波导光栅解复用器。在 AWG 和波导探测器对接处采用了扩展耦合层，探测器量子效率高达 77%。所制备的集成芯片具有良好的性能，每个通道的探测器带宽均超过 25 GHz，串扰优于 22 dB。

2020 年，本课题组[22]设计并制作了用于 1 310 nm 波段 4×25 Gbit/s 波分复用系统的接收端芯片(图 10(e))，该芯片只须一次外延生长过程，实现了 4 通道输出的 AWG 波长解复用器和波导型雪崩光电二极管的单片集成，采用了优化的类稀释波导实现偏振不敏感的端面耦合和分波功能。实验测得探测器响应度为 0.6 A/W，独立探测器的 3 dB 带宽达到 19.5 GHz，灵敏度为 −18.9 dBm，满足 100G-ER4-lite 光模块的行业标准。



(a) 普林斯顿大学[52]　(b) 中科院半导体所[53]　(c) 中科院半导体所[54]

(d) 中科院半导体所[55]　(e) 武汉光电国家研究中心[22]

图 10　不同单位展示的 InP 基 WDM 接收机芯片实物图

3　对未来发展趋势的探讨

近年来有关 APD 的研究大多是围绕如何改善其 K 值进行的[5-14,17]。理论发展为 APD 器件结构的创新奠定了基础；对高 RBP APD 的实际需求同时也促进了 APD 理论的进步。McIntyre 局域离化理论在厚倍增层(低带宽)APD 的设计中取得了成功。但是，伴随着对高速 APD 的实际需求，APD 的倍增层必须做薄。对薄倍增层 APD 的研究表明，McIntyre 理论与实验不相符。这说明当 APD 倍增层变薄到一定程度(对高速 InAlAs APD 的倍增层来说，一般在 100 nm 以下)时，需要发展新的理论来指导实验。与局域的 McIntyre 理论相对应，dead space 模型在高速 APD(薄倍增层 APD)的设计和研制中起到了非常重要的指导作用。同时，我们注意到，已有理论大多局限于一维 APD 结构，本文提出建立 3D 理论以指导新型 3D APD 的设计与制作，预期能有效提高现有 APD 的 RBP[9]。此外，在材料创新方面，已报道 AlGaAsSb 显示了良好的噪声特性；在结构创新方面，数字合金技术显示了一定的优越性。但上述两种技术对材料外延有较高的要求，从目前看尚需进一步探索高质量材料和外延结构的生长方法。伴随着光学技术的发展，集成光学表面微纳结构或新型波导结构的 APD 集成芯片，将为该领域发展注入新的活力。

4　结语

从 APD 的基本理论入手，针对高速 APD 目前存在的噪声高、响应度-带宽积低等迫切需要解决的实际问题，本文提出采用 3D 纳米化技术降低噪声、提高带宽，采用光集成方案提高光响应度的可行方案。综述了集成化高速 APD 的研究进展，包括以

下三个方面的内容:1)表面等离基元聚光结构与垂直光入射型 APD 的混合集成;2)超透镜与垂直光入射型 APD 的混合集成;3)阵列波导光栅(AWG)与光侧入射倏逝波耦合波导 APD 的单片集成。在分析该领域国内外发展趋势的同时,对本课题组的工作也进行了介绍。

参考文献:

[1] Campbell J C, Holden W S, Qua G J. Frequency response of InP/InGaAsP/InGaAs avalanche photodiodes with separate absorption "grading" and multiplication regions[J]. IEEE J. Quant. Electron, 1985, 21(11): 1743-1746.

[2] Masahiro Nada, Yuki Yamada, Hideaki Matsuzaki. Responsivity-bandwidth limit of avalanche photodiodes: Toward future ethernet systems[J]. IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron, 2018, 24(2): 3800811.

[3] McIntyre R J. Factors affecting the ultimate capabilities of high speed avalanche photodiodes and a review of the state-of-the-art[C]// Tech. Dig. Int. Electron Devices Meeting, 1973: 213-216.

[4] Emmons R B. Avalanche-photodiode frequency response[J]. J. Appl. Phys., 1967, 14(9): 633.

[5] Ramirez D A, Hayat M M, Huntington A S, et al. Non-local model for the spatial distribution of impact ionization events in avalanche photodiodes[J]. IEEE Photonics Technol. Lett., 2014, 26(1): 25-28.

[6] Senanayake P, Hung C H, Farrell A, et al. Thin 3D multiplication regions in plasmonically enhanced nanopillar avalanche detectors[J]. Nano Lett., 2012, 12(2): 6448-6452.

[7] Farrell A C, Senanayake P, Hung C H, et al. Plasmonic field confinement for separate absorption-multiplication in InGaAs nanopillar avalanche photodiodes [J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 17580.

[8] El-Howayek G, Milner B M, Senanayake P, et al. Analytical model for impact ionization in 3D multiplication regions[C]// Photonics Conf. (IPC) IEEE, 2014: 168-169.

[9] Wu Zhiwei, Guo Jingshu, Li Yuan, et al. Low-noise 3-D avalanche photodiodes[J]. IEEE Photonics J., 2016, 8(4): 1-10.

[10] Ferraro M S, Rabinovich W S, Clark W R, et al. Impact ionization engineered avalanche photodiode arrays for free space optical communication[J]. Optical Engin., 2016, 55(11): 111609.

[11] Ferraro M S, Rabinovich W S, Mahon R, et al. Position sensing and high bandwidth data communication using impact ionization engineered APD arrays [J]. IEEE Photonics Technol. Lett., 2019, 31(1): 58-61.

[12] Zheng J Y, Yuan Y, Tan Y H, et al. Digital alloy InAlAs avalanche photodiodes[J]. J. Lightwave Technol., 2018, 36(17): 3580-3585.

[13] Lee S, Kodati S H, Guo B, et al. Low noise $Al_{0.85}Ga_{0.15}As_{0.56}Sb_{0.44}$ avalanche photodiodes on InP substrates[J]. Appl. Phys. Lett., 2021, 118: 081106.

[14] Zhou X X, Pinel L L G, Dimler S J, et al. Thin $Al_{1-x}Ga_xAs_{0.56}Sb_{0.44}$ diodes with low excess noise[J]. IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron, 2018, 24: 3800105.

[15] Wu S L, Wun Naseem J M, Chao R L, et al. High-speed $In_{0.52}Al_{0.48}As$ based avalanche photodiode with top-illuminated design for 100 Gb/s ER-4 system [J]. J. Lightwave Technol., 2018, 36: 5505.

[16] Zhang Bojian, Yin Shunzheng, Liu Yingjian, et al. High performance InGaAs/InP single-photon avalanche diode using DBR-metal reflector and backside micro-lens [J]. J. Lightwave Technol., DOI 10.1109/JLT.2022.3153455.

[17] Wang Wenyang, Yao Jinshan, Wang Jingyi, et al. Characteristics of thin InAlAs digital alloy avalanche photodiodes[J]. Optics Lett., 2021, 46: 3841.

[18] Han Hao, Zhu Yicheng, Guo Zilu, et al. High performance InGaAs/InP avalanche photodiode integrated with metal-insulator-metal microcavity [J]. Optical and Quantum Electronics, 2021, 53: 307.

[19] Wang Hui, Yang Xiaohong, Wang Rui, et al. Low dark current and high gain-bandwidth product of avalanche photodiodes: Optimization and realization [J]. Optics Express, 2020, 28: 16211.

[20] Ma Y J, Zhang Y G, Gu Y, et al. Tailoring the performances of low operating voltage InAlAs/InGaAs avalanche photodetectors[J]. Optics Express, 2015, 23: 19278.

[21] Li Yu, Yuan Weifang, Li Ke, et al. InGaAs/InAlAs SAGCMCT avalanche photodiode with high linearity and wide dynamic range[J]. Chinese Optics Lett., 2022, 20: 022503.

[22] Zhao Yanli, Tu Junjie, Li Qian, et al. Monolithic integrated InGaAs/InAlAs WDM APDs with partially depleted absorption region and evanescently coupled waveguide structure[J]. J. Lightwave Technol., 2020, 38: 4385.

[23] Yuan Yuan, Tossoun Bassem, Huang Zhihong, et al. Avalanche photodiodes on silicon photonics [J]. J. of Semiconductors, 2022, 43: 021301.

[24] Schuller J A, Barnard E S, Cai W, et al. Plasmonics for extreme light concentration and manipulation [J]. Nature Materials, 2010, 9: 193.

[25] Ishi T, Fujikata J, Makita K, et al. Si nano-photodiode with a surface plasmon antenna[J]. Jap. J. of Appl. Phys., 2005, 44: L364.

[26] Yu Z, Veronis G, Fan S, et al. Design of midinfrared photodetectors enhanced by surface plasmons on grating structures[J]. Appl. Phys. Lett., 2006, 89: 151116.

[27] Lee S C, Krishna S, Brueck S R. Quantum dot infrared photodetector enhanced by surface plasma wave excitation

[J]. Optics Express, 2009, 17: 23160.

[28] Rosenberg J, Shenoi R V, Krishna S, et al. Design of plasmonic photonic crystal resonant cavities for polarization sensitive infrared photodetectors[J]. Optics Express, 2010, 18: 3672.

[29] Guo Jingshu, Wu Zhiwei, Li Yuan, et al. Design of plasmonic photodetector with high absorptance and nano-scale active regions[J]. Optics Express, 2016, 24: 18229.

[30] Liao S K, Cai W Q, Liu W Y, et al. Satellite-to-ground quantum key distribution[J]. Nature, 2017, 549: 43-47.

[31] Yu C, Shangguan M, Xia H, et al. Fully integrated free-running InGaAs/InP single-photon detector for accurate lidar applications[J]. Opt. Express, 2017, 25: 14611-14620.

[32] Hadfield R H. Single-photon detectors for optical quantum information applications[J]. Nat. Photonics, 2009, 3: 696-705.

[33] Beveratos A, Brouri R, Gacoin T, et al. Single photon quantum cryptography[J]. Phys. Rev. Lett., 2002, 89: 187901.

[34] Lopez T, Massenot S, Estribeau M, et al. Integration of nanostructured planar diffractive lenses dedicated to near infrared detection for CMOS image sensors[J]. Opt. Express, 2016, 24: 8809-8823.

[35] Wen J, Wang W J, Li N, et al. Plasmonic optical convergence microcavity based on the metal-insulator-metal microstructure[J]. Appl. Phys. Lett., 2017, 110: 231105.

[36] Kildishev A V, Boltasseva A, Shalaev V M. Planar photonics with metasurfaces[J]. Science, 2013, 339: 6125.

[37] Yu N, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces [J]. Nat. Mater., 2014, 13: 139-150.

[38] Li X, Chen S, Yu J, et al. Design of mid-infrared dielectric metasurface based on cross-like meta-atom[J]. Opt. Commun., 2021, 488: 126370.

[39] Yu N, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. Science, 2011, 334: 333-337.

[40] Yang X, Geng C, Li X, et al. Performance comparison of quasi-optical phased arrays using micro lens array with different structures[J]. Infrared Phys. Techn., 2021, 118: 103861.

[41] Khorasaninejad M, Chen W T, Zhu A Y, et al. Visible wavelength planar metalenses based on titanium dioxide[J]. IEEE J. Sel. Top. Quant., 2016, 23: 43-58.

[42] Genevet P, Capasso F, Aieta F, et al. Recent advances in planar optics: From plasmonic to dielectric metasurfaces[J]. Optica, 2017, 4: 139-152.

[43] Khorasaninejad M, Chen W T, Devlin R C, et al. Metalenses at visible wavelengths: Diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging[J]. Science, 2016, 352: 1190-1194.

[44] Chen W T, Zhu A Y, Khorasaninejad M, et al. Immersion meta-lenses at visible wavelengths for nanoscale imaging[J]. Nano Lett., 2017, 5: 3188-3194.

[45] Fan Z B, Qiu H Y, Zhang H L, et al. A broadband achromatic metalens array for integral imaging in the visible [J]. Light-Sci. Appl., 2019, 8: 1-10.

[46] Mikheeva E, et al. CMOS-compatible all-dielectric metalens for improving pixel photodetector arrays[J]. APL Photonics, 2020, 5: 116105.

[47] Xiao T, Zhao J, Sun P, et al. Sensitive, high-speed, and broadband perovskite photodetectors with built-in TiO_2 metalenses[J]. Small, 2021, 17: 2102694.

[48] Zhang Hewei, Zhao Yanli, Li Qian, et al. Opt. Commun., 2022, 514: 128159-1-8.

[49] Kohtoku M, et al. Packaged polarization-insensitive WDM monitor with low loss (7.3 dB) and wide tuning range (4.5 nm)[J]. IEEE Photonics Technol. Lett., 1998, 10 (11): 1614-1616.

[50] Ohyama T, Yamada T, Akahori Y. Hybrid integrated multiwavelength photoreceivers consisting of photo-diodes and an arrayed-waveguide grating[C]// LEOS 2001. 14th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2001.

[51] Chandrasekhar S, et al. Monolithic eight-wavelength demultiplexed receiver for dense WDM applications[J]. IEEE Photonics Technol. Lett., 1995, 7(11): 1342-1344.

[52] Tong W, et al. An asymmetric twin waveguide eight-channel polarization-independent arrayed waveguide grating with an integrated photodiode array[J]. IEEE Photonics Technol. Lett., 2004, 16(4): 1170-1172.

[53] Lv Q Q, et al. Design and fabrication of multi-channel photodetector array monolithic with arrayed waveguide grating[J]. Chinese Physics B, 2016, 25(3): 038505.

[54] Lv Q, et al. Monolithic integration of a InP AWG and InGaAs photodiodes on InP platform[J]. Optics & Laser Technol., 2017. 90: 122-127.

[55] Ye H, et al. Monolithic integration of an InP-based 4 × 25 GHz photodiode array to an O-band arrayed waveguide grating demultiplexer[J]. Optics & Laser Technol., 2017, 97: 290-296.

作者简介：

赵彦立(1973—)，男，博士，教授，博士生导师，武汉光电国家研究中心研究员；2002 年获浙江大学博士学位，2004 年 12 月至 2006 年 12 月在日本名古屋大学量子工程系/Venture Business Laboratory 从事博士后研究；近年来主要从事纳米尺度光探测器、雪崩光电二极管、高功率光探测器、高速光模块及新型纳米光接收机的研究；已在 Optics Express，IEEE Electron Device Letters 等期刊上发表论文 40 余篇，授权专利 20 余项，包括 1 项美国专利。