Journal of Sensor Technology and Application 传感器技术与应用, 2026, 14(6), 926-933
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/jsta
https://doi.org/10.12677/jsta.2026.146088

太赫兹光电导天线研究进展

杨闰棋[1,2,3]，黄国现[1,2,3]，蒋品群[1,2,3*]，刘林生[1,2,3*]

[1]广西师范大学电子与信息工程学院/集成电路学院，广西类脑计算与智能芯片重点实验室，广西 桂林
[2]广西师范大学广西高校集成电路与微系统重点实验室，广西 桂林
[3]广西师范大学广西高校光电信息技术工程研究中心，广西 桂林

收稿日期：2026年10月5日；录用日期：2026年11月5日；发布日期：2026年11月16日

摘 要

光电导天线是产生与探测太赫兹辐射的主流器件，凭借结构简单、室温工作、宽带宽等优势在太赫兹时域光谱与成像中应用广泛。本文从工作原理出发，梳理了光电导天线面临的光–太赫兹转换效率低、自由空间损耗大、材料难以两全等关键挑战，并按材料与结构两条主线综述近年来的研究进展。材料方面，低温生长GaAs、InGaAs、石墨烯与宽禁带半导体先后被用于改善载流子动力学；结构方面，等离子体纳米结构、超表面、光子晶体与叉指电极显著提升了效率与增益。最后总结了现存问题并展望发展方向。

关键词

太赫兹，光电导天线，等离子体纳米结构，转换效率

Research Progress of Terahertz Photoconductive Antennas

Runqi Yang[1,2,3], Guoxian Huang[1,2,3], Pinqun Jiang[1,2,3*], Linsheng Liu[1,2,3*]

[1]Guangxi Key Laboratory of Brain-Inspired Computing and Intelligent Chips, School of Electronic and Information Engineering/School of Integrated Circuits, Guangxi Normal University, Guilin Guangxi
[2]Key Laboratory of Integrated Circuits and Microsystems (Guangxi Normal University), Education Department of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Guilin Guangxi
[3]Guangxi Universities Engineering Research Center for Optoelectronic Information Technology, Guangxi Normal University, Guilin Guangxi

Received: October 5, 2026; accepted: November 5, 2026; published: November 16, 2026

Abstract

Photoconductive antennas are the mainstream devices for generating and detecting terahertz

*通讯作者。

文章引用: 杨闰棋, 黄国现, 蒋品群, 刘林生. 太赫兹光电导天线研究进展[J]. 传感器技术与应用, 2026, 14(6): 926-933. DOI: 10.12677/jsta.2026.146088

radiation, and have been widely applied in terahertz time-domain spectroscopy and imaging owing to their simple structure, room-temperature operation, and broad bandwidth. Starting from the operating principle, this paper reviews the key challenges faced by photoconductive antennas, including low optical-to-terahertz conversion efficiency, large free-space path loss, and the difficulty of reconciling conflicting material requirements, and then surveys recent progress along two main lines, namely materials and structures. In terms of materials, low-temperature-grown GaAs, InGaAs, graphene, and wide-bandgap semiconductors have been successively adopted to improve carrier dynamics. In terms of structures, plasmonic nanostructures, metasurfaces, photonic crystals, and interdigitated electrodes have markedly enhanced the efficiency and gain. Finally, the remaining problems are summarized and the development directions are outlined.

Keywords

Terahertz, Photoconductive Antenna, Plasmonic Nanostructure, Conversion Efficiency

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

太赫兹波通常指频率在 0.1~10 THz 之间的电磁辐射，其位置介于微波与红外之间，如图 1 所示。图 1 将太赫兹置于整个电磁波谱中，可以看出它恰好处于电子学与光子学的交界地带，这一位置使它长期被称作太赫兹间隙[1]。

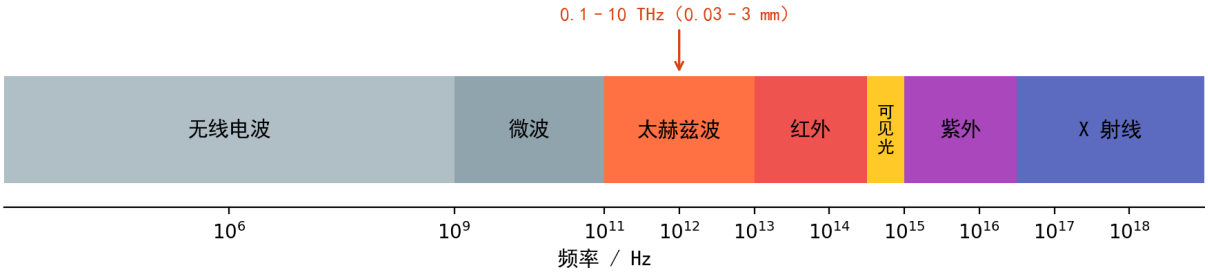


Figure 1. Position of terahertz wave in the electromagnetic spectrum
图 1. 太赫兹波在电磁波谱中的位置

该频段具有几方面突出的特性。太赫兹光子能量很低，1 THz 对应的光子能量约 4.1 meV，比 X 射线低了几个数量级，不足以电离分子或损伤生物组织，用于人体安检和生物医学相对安全。它能穿透纸张、塑料、织物等非极性材料，而金属和水对其吸收又很强，成像时既能隔物又能分辨材质。大量分子的转动、振动跃迁能量恰好落在这一频段，形成各不相同的吸收谱线，构成独一无二的指纹谱，为物质识别提供了直接依据[1]。

这些特性使太赫兹技术在无损成像、光谱检测、安检、生物医学诊断以及高速无线通信等领域得到应用[1]。这些应用能否落地，取决于能否提供高效稳定的太赫兹源和探测器。

光电导天线(photoconductive antenna, PCA)正是其中主流的一类。自 Auston 等人 1984 年报道皮秒光电导赫兹偶极子以来[2]，它凭借结构简单、室温工作、易于与光纤激光器集成等优点，成为太赫兹时域

光谱系统中使用最广的源与探测器[3] [4]。本文以光电导天线为核心，按材料与结构两条主线梳理其研究进展。

2. 光电导天线工作原理

光电导天线由半导体衬底、两个金属电极和电极间的一条窄间隙组成。衬底常用低温生长砷化镓(LT-GaAs)、InGaAs 或 Si，间隙宽度从几微米到几十微米不等，飞秒激光聚焦于此处[5]。如图 2 所示，PCA 的基本结构包括衬底、两电极和中间的光电导间隙，载流子的激发与辐射都发生在这一窄间隙内。

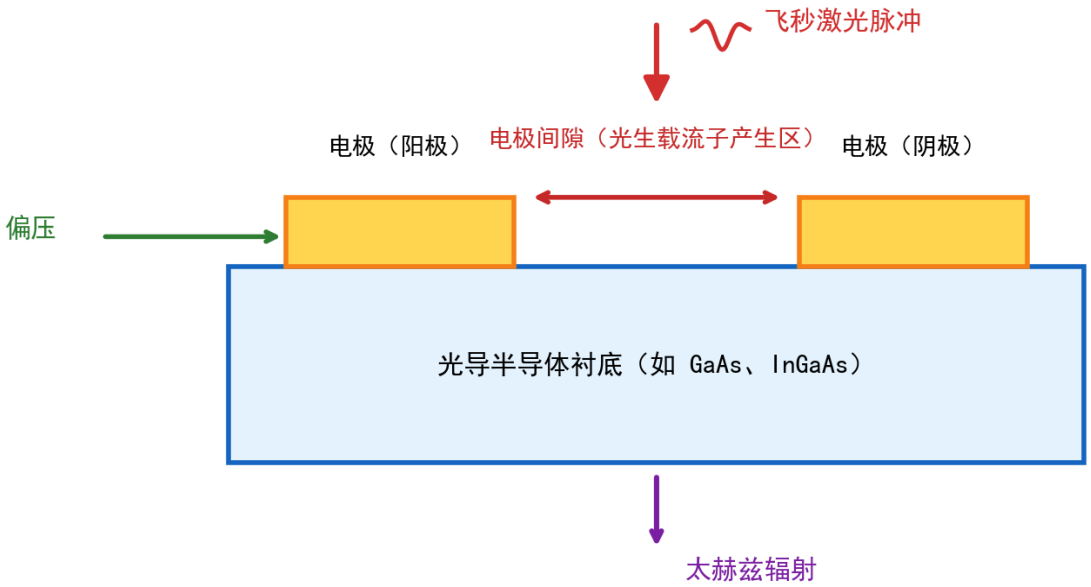


Figure 2. Basic structure of photoconductive antenna (PCA)
图 2. 光电导天线(PCA)的基本结构

工作时，一束飞秒激光脉冲照进间隙，只要光子能量超过衬底带隙，半导体便吸收光子，把电子从价带激发到导带，留下空穴，形成电子－空穴对。两电极之间预先加有直流偏压，光生载流子在电场作用下加速运动，在间隙内形成皮秒量级的瞬态光电流。电流浪涌模型认为，辐射电场强度正比于光电流对时间的导数，因此电流的快速上升和衰减会向外辐射太赫兹电磁波[2] [6]。如图 3 所示，太赫兹产生依次经历激光照射、光吸收产生电子－空穴对、偏压下形成瞬态光电流，再由光电流变化辐射太赫兹波。按电流浪涌模型，辐射电场正比于光电流的时间导数，即式(1)所示。

$$E_{THz}(t) \propto \partial J(t)/\partial t \tag{1}$$

式中 E_{THz} 为辐射太赫兹电场，$J(t)$为瞬态光电流。



Figure 3. Working principle of terahertz radiation generation from photoconductive antenna
图 3. 光电导天线产生太赫兹辐射的工作原理

探测过程可以看作上述发射过程的逆过程。太赫兹波入射到间隙处，直接驱动光生载流子运动，此时用第二束采样光对载流子做光门控，通过改变采样光与太赫兹脉冲之间的时间延迟，逐点读出太赫兹时变电场的振幅和相位[4] [7]。发射与探测共用同一套光导结构，这也是 PCA 能同时充当源和探测器的基础。

评价 PCA 性能的指标主要有四项。光－太赫兹转换效率是辐射出的太赫兹功率与入射光功率之比，普通器件往往不足百分之一，采用三维等离子体接触电极的器件曾做到 7.5% [8]。带宽决定太赫兹脉冲覆盖的频率范围，与载流子寿命密切相关，寿命越短、光电流衰减越快、频谱越宽，LT-GaAs 的载流子寿命可短至 0.3 ps 左右[5]。迁移率反映载流子对电场的响应快慢，SI-GaAs 的迁移率可达 8500 $cm^2/(V·s)$，低温生长的 LT-GaAs 则只有 200 $cm^2/(V·s)$左右[5]。动态范围是信号与噪声本底之比，高性能探测器的动态范围可达 100 dB 以上[9]。

3. 关键挑战

光电导天线最直接的短板是光－太赫兹转换效率太低。普通器件通常只有 10^{-3} 到 10^{-4} 量级[3]，泵浦光的大部分能量转化为热，真正辐射出去的太赫兹只占很小一部分。即便是采用三维等离子体接触电极的先进结构，目前报道的最好结果也只有 7.5% [8]，离实用化仍有距离。为了得到可用的输出功率，往往只能增大泵浦光强，而大功率激光器体积大、成本高。

太赫兹波在自由空间中的传播同样棘手。大气中的水汽分子对这一频段吸收很强，在 0.557 THz、0.752 THz 等水汽吸收峰附近衰减尤其明显，路径损耗随距离迅速增大[4]。因此太赫兹系统难以像微波那样做远距离传输，多数成像和通信场景只能局限于短距离甚至紧贴样品，应用空间受到压缩。

衬底材料本身也充满矛盾。宽带辐射要求载流子寿命短，光生载流子快速复合、脉冲拖尾小；高效辐射要求迁移率高，载流子能被偏置场迅速扫出；产生强场还要求材料耐得住高偏压。这三条很难在同一材料上同时满足[6]。低温生长的 GaAs 可以把寿命压到亚皮秒量级，但迁移率明显下降；宽禁带半导体耐压好，迁移率却普遍偏低[6]。

针对这一矛盾，我组尝试了多种平衡策略，例如在低温 InGaAs/InAlAs 多量子阱中通过局部层掺杂，在保持迁移率的同时利用可提高电阻率。本课题组近年发展的迁移增强外延(MEE)技术为此提供了新的思路[10]-[13]：采用 MEE 模式在 InP 衬底上生长$(InAs)_4(GaAs)_3$/InAlAs 短周期超晶格替代传统 InGaAs 体材料，借助逐原子层生长，大幅度提高低温下原子的迁移可获得陡峭的界面与良好的周期性，使室温电子迁移率与电阻率同时得到改善[11] [13]。进一步的台面结构设计使偏置电场平行于超晶格平面，保证多个量子阱内电场均匀分布，在 1.55 μm 飞秒激光激发下将有效光电流密度提高 4.54 倍、暗电流降低约 90%、太赫兹辐射功率提升至平面结构的 4 倍[10]。此外，在结构中引入分布式布拉格结构增强了光利用效率，使有效光电流输出达到 427 μA [10]。这些结果表明，通过外延工艺的精细调控，可以在寿命、迁移率与电阻率之间取得更好的折中。

光通量增大之后还有饱和的问题。泵浦增强后光生载流子密度上升，载流子间的空间电荷屏蔽外加偏置场，辐射出的太赫兹场反过来又对器件产生屏蔽，输出功率便不再随泵浦线性增加[14]。因此单纯增大光强难以继续提升输出功率。

除性能层面的挑战外，工程化应用还面临一系列实际困难。高功率光电导天线工作时，光生载流子在偏置电场中产生的焦耳热会迅速累积，使器件温度升高、暗电流增大，严重时导致热失控。常用的缓解策略包括选用高热导率衬底、采用脉冲偏置降低平均功耗、在器件背面集成散热基板以及优化电极布局以分散热源。宽禁带材料中金刚石的热导率远超其他半导体，是潜在的高功率散热衬底方案。

天线与硅透镜的集成封装是另一项工程难题。硅透镜用于引导太赫兹波出射并改善方向性，透镜与

衬底的对准精度直接影响波束质量，透镜表面还需增透处理以减小界面反射损耗。封装材料既要保证太赫兹波段的低吸收，又要兼顾机械强度与长期稳定性。目前多采用高阻硅半球透镜配合增透膜，并借助精密机械定位实现与天线的对准。

器件的长期可靠性同样值得关注。金属电极在长期高压偏置与温度循环下会发生电迁移，导致电极边缘退化甚至短路；半导体表面暴露于空气中会逐渐氧化，引入表面态并降低性能。已有研究报道了金电极电迁移导致的器件失效，以及表面钝化层对延长器件寿命的作用。对这些失效机理的理解与抑制，是光电导天线走向实用化的必要环节。

4. 材料研究进展

低温生长的砷化镓(LT-GaAs)是当前最常用的光电导天线材料。它通常在 200℃~250℃下用分子束外延生长，低温条件引入大量砷反位缺陷，把载流子寿命压到亚皮秒量级，有文献报道可短至 0.3 ps [5]。寿命短意味着光生载流子迅速复合，天线能输出脉宽很窄的太赫兹脉冲，同时材料暗电阻仍足够高，可以承受较大的偏置电场。半绝缘砷化镓(SI-GaAs)衬底电阻率高、工艺成熟，常被用作大面积天线的基底[5]。

GaAs 体系的激发波长落在 800 nm 附近，只能配合钛宝石激光器，成本高、体积也大。InGaAs 的带隙只有约 0.75 eV，可以直接被 1550 nm 通信波段的光纤激光泵浦，从而复用成熟廉价的光纤器件，有利于系统小型化[5] [15]。代价是其本征载流子寿命偏长，一般还要借助离子注入、低温生长或重掺杂来缩短[15]。

石墨烯等二维材料代表另一个思路。石墨烯室温迁移率可达数万 $cm^2/(V\cdot s)$，费米能级又能通过栅压或化学掺杂调节，理论上适合做高速光电导开关[15]。只是高质量单层石墨烯的制备与转移并不容易，器件成品率和稳定性欠佳，目前多数停留在原理验证阶段[15]。

宽禁带半导体 ZnSe、SiC、GaN 和金刚石的介电强度高、耐高压，适合在需要强太赫兹辐射的场景下承受大偏压[16]。如图 4 所示，金刚石的带隙达 5.46 eV、介电强度约 2000 kV/cm，远超 GaAs 的 1.44 eV 和不到 10 kV/cm，带隙越大的材料介电强度越高、越能耐受高压。Ropagnol 等人用紫外激光泵浦这类材料的大口径天线，获得了较强的亚太赫兹辐射[16]。改性方面，量子点[17]、调制掺杂异质结构[18]和离子注入掺杂等手段也被用来调整能带结构或缩短载流子寿命。Gorodetsky 等在叉指量子点天线中观察到准弹道输运带来的太赫兹发射增强[17]，Afalla 等则通过带凹槽金属接触的调制掺杂异质结构提高了发射效率[18]。

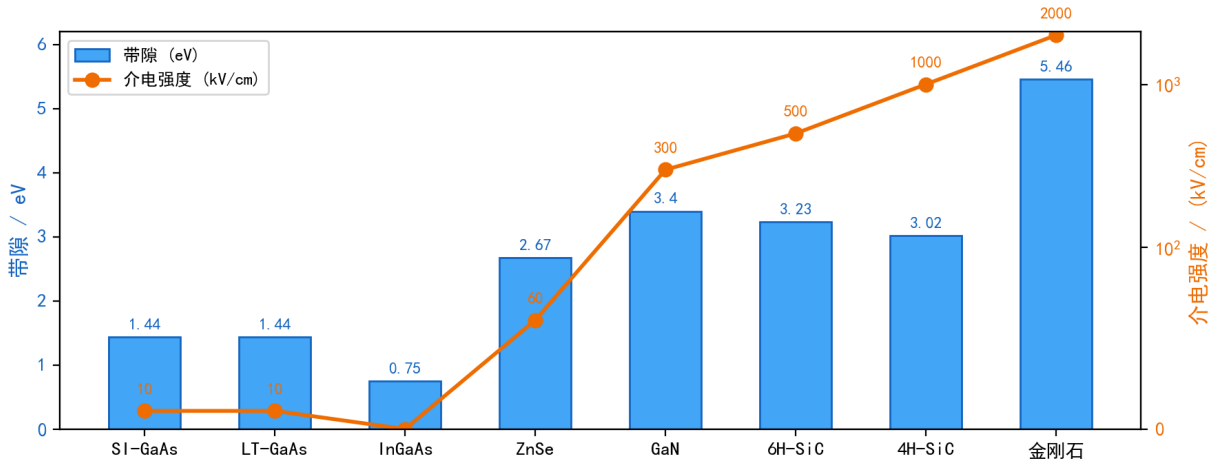


Figure 4. Comparison of bandgap and dielectric strength of common photoconductive materials
图 4. 常见光导材料的带隙与介电强度对比

5. 结构设计进展

电极结构的改进，是提升光电导天线性能最早也最有效的途径。Berry 等在接触电极里引入等离子体纳米结构，利用局域表面等离子体把入射光汇聚到电极边缘的窄区内，让光生载流子贴着电极生成、尚未复合就被收集，太赫兹辐射功率因此提高了约 50 倍[19]。Yang 等改用高深宽比的金属光栅，靠表面等离子体把光场限制在纳米尺度的电极间隙里，进一步增强了光与物质的相互作用[20]。这一思路随后被推向三维，Yang 等在 2014 年把电极做成三维结构，等离子体从侧壁和底部同时约束光场，光生载流子几乎全部落在有源区内，光－太赫兹转换效率做到 7.5% [8]。Ponomarev 等 2023 年采用更厚的等离子体电极光栅，把光生载流子更严格地限制在电极间隙内，减少了向衬底深处的扩散损失，辐射强度进一步提升[21]。

把等离子体结构推向大面积，是近几年比较明显的趋势。Yardimci 等把等离子体纳米天线排成大面积阵列来做探测端，吸收和响应随面积同步增大，在毫米级有源面积上仍能保持较高的探测灵敏度[22]。发射端上，De Vetter 等 2024 年用单一高阻金属和纳米等离子体电极制作大面积叉指天线，工艺更简单，还能在大面积下维持高电场[23]。Ropagnol 等则用大孔径光电导天线产生强太赫兹脉冲，峰值电场超过 100 kV/cm，有质动力势大到足以驱动电子加速等强场应用[24]。

衬底和外围结构同样能改善性能。超表面把亚波长谐振单元排成阵列，按需调控入射光的吸收和场分布，Seddon 等用非线性光电导 GaAs 超表面把连续波探测拓展到 1550 nm 泵浦波段[25]。光子晶体衬底靠周期性折射率调制减慢光速、拉长光与有源区的相互作用，提高了吸收效率[5]。硅透镜贴在衬底背面，把本会在半导体－空气界面全反射损失掉的太赫兹波导出来，辐射的方向性和收集效率都得到改善[5]。

6. 应用进展

太赫兹时域光谱(TDS)是光电导天线应用最久也最成熟的方向。飞秒激光脉冲打在光电导天线上辐射出宽带太赫兹脉冲，探测端用另一束采样光对时变电场做相干取样，直接得到电场的振幅和相位，而不只是强度。由于能同时获得振幅与相位，TDS 可一次反演出材料的折射率和吸收系数，成为材料表征的常规手段[7]。基于光电导天线的 TDS 系统带宽可达数 THz，动态范围常在 60 dB 以上。

成像方向利用太赫兹脉冲携带的时域信息，发展出时域成像、层析、近场显微和共焦显微等多种模式，面向安检和材料内部无损检测[4]。近场显微可把空间分辨率提升到亚波长量级，突破传统衍射极限。其中的光－太赫兹开关型器件是多光谱成像的关键一环，近年综述对其研究现状和机会做了梳理，把多光谱成像视作在空间分辨率之外的新增长点[4]。

连续波与通信应用更多依赖光子混频。1550 nm 泵浦的非线性光电导 GaAs 超表面实现了连续波太赫兹探测，让光电导器件能接入成熟的 1.55 μm 光纤通信窗口[25]。基于光电导天线的 0.4 THz 宽带噪声源也有报道，可服务于接收机定标和器件表征[26]。用长载流子寿命天线搭建的频域太赫兹光谱，则以连续波方式提供高分辨率测量，与时域方案形成互补[9]。在无线通信方面，太赫兹频段的大带宽为 6G 及未来的超高速通信提供了频谱资源，光电导天线作为其中一类室温、紧凑的太赫兹源与探测器，有望参与高速无线链路的搭建[3]。

在高分辨率无损检测方面，等离子体接触电极将光－太赫兹转换效率提高到 7.5% [8]，显著增强了信号强度，使厚度仅数十微米的涂层缺陷与多层结构内部分层的检测成为可能；大面积等离子体纳米天线阵列在毫米级有源面积上保持了高探测灵敏度[22]，支撑了面向工业产线的快速扫描成像。

在非线性太赫兹光谱方面，宽禁带半导体光电导天线能够承受 30 kV/cm 以上的偏置场，产生的太赫兹脉冲峰值电场超过 100 kV/cm [24]，足以驱动半导体中的载流子加热与碰撞电离等非线性过程，为强场

太赫兹光谱与物质调控实验提供了紧凑的台式光源。

在高速无线通信方面，1550 nm 波段光导材料的成熟使光电导天线能够直接对接商用光纤激光器，显著降低系统体积与成本；本课题组发展的 MEE 短周期超晶格将 1550 nm 激发下的有效光电流提升至 427 μA [10]，为高数据率太赫兹链路的发射端提供了性能储备。配合 0.4 THz 宽带噪声源用于接收机定标[26]，光电导天线在 6G 及未来超高速通信中的应用路径正在逐步清晰。

7. 总结与展望

太赫兹光电导天线的发展大致沿两条线并行推进。材料端从低温生长的 LT-GaAs 起步，载流子寿命压到 0.3 ps 左右，兼顾了快速开关与高暗电阻，后来逐渐扩展到宽禁带半导体和二维材料。结构端最初只是 Auston 等人的简单赫兹偶极子，后来引入等离子体接触电极、超表面和叉指电极，把泵浦光与载流子束缚在亚波长尺度里。两条线合起来，把转换效率从早期的千分之一量级推高，三维等离子体电极已经做到 7.5% [8]。

这些进展之外，仍有几个关键瓶颈尚未解决。等离子体、光子晶体这类结构性能虽好，但工艺复杂、成本高，与 PCA 结构简单、易集成的初衷相矛盾。二维材料和拓扑绝缘体前景被反复提及，可大面积、高质量样品的制备尚未过关，载流子寿命、迁移率等参数也远不如 GaAs 可控。宽禁带半导体能承受高偏压，但需要紫外泵浦，等于把压力转移到光源上。

往后看，超表面与 PCA 的融合是一条较为稳妥的路线，1550 nm 泵浦的非线性光导 GaAs 超表面已经实现连续波探测[25]，说明两条技术路线不必二选一。无偏置发射器可省去高压电源，对阵列化和便携化都有吸引力，也是光–太赫兹开关走向多光谱成像的一个方向。自旋电子学和低维材料试图从更根本的载流子动力学入手，把调控维度从单纯的短寿命拓展开。拓扑绝缘体的表面态若真能用于光电导，或许能绕开体材料里寿命与迁移率的固有矛盾。

材料与结构两条线已各自逼近现有工艺的边界，接下来更关键的是在不过度增加复杂度的前提下，让二维材料、拓扑绝缘体这些新体系真正接入光电导的电路。

基金项目

本研究受国家自然基金项目(61964003)，广西类脑计算与智能芯片重点实验室项目(BCIC-24-Z2)，广西高校集成电路与微系统重点实验室项目(ICM-26-07)的资助。

参考文献

[1] Tonouchi, M. (2007) Cutting-Edge Terahertz Technology. *Nature Photonics*, **1**, 97-105. https://doi.org/10.1038/nphoton.2007.3

[2] Auston, D.H., Cheung, K.P. and Smith, P.R. (1984) Picosecond Photoconducting Hertzian Dipoles. *Applied Physics Letters*, **45**, 284-286. https://doi.org/10.1063/1.95174

[3] Han, R., Abohmra, A., Pires, T., Ponciano, J., Abbas, H., Alomainy, A., *et al*. (2025) Advancements in Terahertz-Enabled Photoconductive Antenna Design: A Review. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, **17**, 977-993. https://doi.org/10.1017/s1759078725102274

[4] Ponomarev, D.S., Yachmenev, A.E., Lavrukhin, D.V., Khabibullin, R.A., Chernomyrdin, N.V., Spektor, I.E., *et al*. (2023) Optical-to-Terahertz Switches: State of the Art and New Opportunities for Multispectral Imaging. *Physics-Uspekhi*, **67**, 3-21. https://doi.org/10.3367/ufne.2023.07.039503

[5] Burford, N.M. and El-Shenawee, M.O. (2017) Review of Terahertz Photoconductive Antenna Technology. *Optical Engineering*, **56**, 1-20. https://doi.org/10.1117/1.oe.56.1.010901

[6] Isgandarov, E., Ropagnol, X., Singh, M. and Ozaki, T. (2021) Intense Terahertz Generation from Photoconductive Antennas. *Frontiers of Optoelectronics*, **14**, 64-93. https://doi.org/10.1007/s12200-020-1081-4

[7] Bacon, D.R., Madéo, J. and Dani, K.M. (2021) Photoconductive Emitters for Pulsed Terahertz Generation. *Journal of*

Optics, **23**, Article ID: 064001. https://doi.org/10.1088/2040-8986/abf6ba

[8] Yang, S., Hashemi, M.R., Berry, C.W. and Jarrahi, M. (2014) 7.5% Optical-to-Terahertz Conversion Efficiency Offered by Photoconductive Emitters with Three-Dimensional Plasmonic Contact Electrodes. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, **4**, 575-581. https://doi.org/10.1109/tthz.2014.2342505

[9] Lu, P. and Jarrahi, M. (2023) Frequency-Domain Terahertz Spectroscopy Using Long-Carrier-Lifetime Photoconductive Antennas. *Optics Express*, **31**, 9319-9329. https://doi.org/10.1364/oe.483746

[10] Du, H., You, M., Deng, Z., Liu, G., Li, Z., Qin, L., *et al*. (2025) Terahertz Photoconductive Antennas Based on Migration-Enhanced Epitaxy of $(InAs)_4(GaAs)_3$/InAlAs Short-Period Superlattices for Performance Enhancement. *Journal of Alloys and Compounds*, **1047**, Article ID: 185106. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.185106

[11] Chen, R., Li, X., Du, H., Yan, J., Kong, C., Liu, G., *et al*. (2024) Migration-Enhanced Epitaxial Growth of InAs/GaAs Short-Period Superlattices for THz Generation. *Nanomaterials*, **14**, Article 294. https://doi.org/10.3390/nano14030294

[12] Liu, L., Deng, Z., Liu, G., Kong, C., Du, H., Chen, R., *et al*. (2024) Low-Temperature Migration-Enhanced Epitaxial Growth of High-Quality $(InAs)_4(GaAs)_3$/Be-Doped Inalas Quantum Wells for THz Applications. *Crystals*, **14**, Article 421. https://doi.org/10.3390/cryst14050421

[13] Liu, L., Chen, R., Kong, C., Deng, Z., Liu, G., Yan, J., *et al*. (2024) Low-Temperature Growth of InGaAs Quantum Wells Using Migration-Enhanced Epitaxy. *Materials*, **17**, Article 845. https://doi.org/10.3390/ma17040845

[14] Darrow, J.T., Zhang, X.C., Auston, D.H. and Morse, J.D. (1992) Saturation Properties of Large-Aperture Photoconducting Antennas. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **28**, 1607-1616. https://doi.org/10.1109/3.135314

[15] Lu, P., Fernandez Olvera, A.D.J., Turan, D., Seifert, T.S., Yardimci, N.T., Kampfrath, T., *et al*. (2022) Ultrafast Carrier Dynamics in Terahertz Photoconductors and Photomixers: Beyond Short-Carrier-Lifetime Semiconductors. *Nanophotonics*, **11**, 2661-2691. https://doi.org/10.1515/nanoph-2021-0785

[16] Ropagnol, X., Kovács, Z., Gilicze, B., Zhuldybina, M., Blanchard, F., Garcia-Rosas, C.M., *et al*. (2019) Intense Sub-Terahertz Radiation from Wide-Bandgap Semiconductor Based Large-Aperture Photoconductive Antennas Pumped by UV Lasers. *New Journal of Physics*, **21**, Article ID: 113042. https://doi.org/10.1088/1367-2630/ab532e

[17] Gorodetsky, A., Lavrukhin, D.V., Ponomarev, D.S., Smirnov, S.V., Yadav, A., Khabibullin, R.A., *et al*. (2023) Enhanced THz Generation from Interdigitated Quantum Dot Based Photoconductive Antenna Operating in a Quasi-Ballistic Regime. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **29**, 1-5. https://doi.org/10.1109/jstqe.2023.3271830

[18] Afalla, J., De Los Reyes, A., Cabello, N.I., Vistro, V.D.A., Faustino, M.A., Ferrolino, J.P., *et al*. (2020) A Modulation-Doped Heterostructure-Based Terahertz Photoconductive Antenna Emitter with Recessed Metal Contacts. *Scientific Reports*, **10**, Article No. 19926. https://doi.org/10.1038/s41598-020-76413-7

[19] Berry, C.W., Wang, N., Hashemi, M.R., Unlu, M. and Jarrahi, M. (2013) Significant Performance Enhancement in Photoconductive Terahertz Optoelectronics by Incorporating Plasmonic Contact Electrodes. *Nature Communications*, **4**, Article No. 1622. https://doi.org/10.1038/ncomms2638

[20] Yang, S. and Jarrahi, M. (2013) Enhanced Light-Matter Interaction at Nanoscale by Utilizing High-Aspect-Ratio Metallic Gratings. *Optics Letters*, **38**, 3677-3679. https://doi.org/10.1364/ol.38.003677

[21] Ponomarev, D.S., Lavrukhin, D.V., Glinskiy, I.A., Yachmenev, A.E., Zenchenko, N.V., Khabibullin, R.A., *et al*. (2023) Enhanced THz Radiation through a Thick Plasmonic Electrode Grating Photoconductive Antenna with Tight Photocarrier Confinement. *Optics Letters*, **48**, 1220-1223. https://doi.org/10.1364/ol.486431

[22] Yardimci, N.T. and Jarrahi, M. (2017) High Sensitivity Terahertz Detection through Large-Area Plasmonic Nano-Antenna Arrays. *Scientific Reports*, **7**, Article No. 42667. https://doi.org/10.1038/srep42667

[23] De Vetter, A., Song, C., Mičica, M., Tignon, J., Mangeney, J., Palomo, J., *et al*. (2024) Large Area Terahertz Digitated Photoconductive Antennas Based on a Single High Resistivity Metal and Nanoplasmonic Electrode. *Photonics and Nanostructures—Fundamentals and Applications*, **59**, Article ID: 101248. https://doi.org/10.1016/j.photonics.2024.101248

[24] Ropagnol, X., Khorasaninejad, M., Raeiszadeh, M., Safavi-Naeini, S., Bouvier, M., Côté, C.Y., *et al*. (2016) Intense THz Pulses with Large Ponderomotive Potential Generated from Large Aperture Photoconductive Antennas. *Optics Express*, **24**, 11299-11311. https://doi.org/10.1364/oe.24.011299

[25] Seddon, J., Hale, L., Jung, H., Norman, S., Brener, I., Seeds, A., *et al*. (2024) Continuous Wave Terahertz Detection Using 1550 nm Pumped Nonlinear Photoconductive Gaas Metasurfaces. *Optics Express*, **32**, 9809-9819. https://doi.org/10.1364/oe.517422

[26] Chen, Y., Qin, F., Liu, L., Zhao, Z., Li, P., Sun, Y., *et al*. (2025) 0.4 THz Broadband Terahertz Noise Source Based on Photoconductive Antennas. *Photonics*, **12**, Article 252. https://doi.org/10.3390/photonics12030252