

国家自然科学基金视角下我国光电器件领域发展的分析和展望

唐华^{1*}, 吕俊鹏²

1. 国家自然科学基金委员会信息科学部, 北京 100085;

2. 东南大学物理学院, 南京 211189

* 联系人, E-mail: tanghua@nsfc.gov.cn

光电器件是利用光与载流子之间的相互作用而产生特定效应或功能的器件, 主要包括激光器、发光二极管(light-emitting diode, LED)、光电探测器、太阳能电池等。作为半导体光电子产业一个重要的分支, 光电器件在当今社会具有极其重要的地位, 在光通信、探测、遥感、成像、军事、航天等领域中得到广泛应用。光电器件是信息获取、传输、处理、显示四大系统的主要载体和核心元器件。随着信息时代的深入发展, 信息量呈爆炸式增长, 对光电器件的性能也提出了更高的要求。因此, 紧扣国家战略发展需求, 开发具有高效率、高速率、高灵敏度、高集成度的高性能光电器件, 以适应多维度、不同场景的应用需求, 有助于我国早日实现科技强国和民族伟大复兴。

国家自然科学基金(以下简称自然科学基金)是我国支持基础研究的重要渠道^[1], 其中信息科学部下属的F0403和F0502是两个主要关于光电子器件的代码。F0403(半导体光电子器件与集成)是一级学科半导体科学与信息器件(F04)下设的二级学科申请代码, 主要资助方向为“半导体发光材料与器件”“半导体激光器”“半导体光探测器”“半导体光电子集成”“半导体成像与显示相关材料及器件”“半导体光伏材料与器件”“有机/柔性光电子器件与集成”“新型半导体光电子器件”“光电子器件工艺、封装与测试”等。F0502(光子与光电子器件)是一级学科光学和光电子学(F05)下设的二级学科申请代码, 主要资助的方向包括“低维光电材料与器件”“光电/电光转换器件”“光纤器件”“光电功能集成器件”“有机光电子材料与器件”“光电探测材料与器件”“紫外/极紫外光电材料与器件”“光子晶体材料、物理及器件”“发光器件与光源”“纳米光电子材料与器件”“光波导器件”“微波光子器件”“柔性光电子材料与器件”“新型光电子器件”等。本文首先对光电器件进行了分类简介, 并在此基础上梳理了近5年(2018~2022年)这两个二级代码中受自然科学基金资助的项目, 包括重点项目、重大项目、国家重大科研仪器研制项目、原创探索专项项目、面上项目和青年科学基金项目。通过对资助项目主要研究内容进行统计和热词分析, 本文总结了当前光电器件研究的热点和主要科学问题, 指出了当前光电器件所面临的主要挑战, 展望了未来光电器件的发展方向及趋势。



唐华 国家自然科学基金委员会信息科学部四处副处长兼激光技术与技术光学项目主任, 主要从事科学基金管理工作。

点和主要科学问题, 指出了当前光电器件所面临的主要挑战, 展望了未来光电器件的发展方向及趋势。

1 光电器件简介

本文将详细介绍构筑光电器件的材料种类与特性, 光电器件的类型、技术指标及典型应用场景, 概述当前光电器件的发展现状及应用情况; 同时, 结合不同应用场景的需求, 分析光电器件面临的挑战, 分析结果将有助于广大自然科学基金申报人员更好地了解光电器件的发展趋势和应用潜力, 可以更精确地将国家战略目标和基础研究方向相互匹配, 更高效地支持一线科研人员为国家科技自立自强作出贡献。

1.1 半导体光电材料

半导体材料是构建光电器件的基础, 对光电器件的性能起到决定性作用。半导体材料的选择和设计需要考虑材料的能带结构、光吸收系数、光电转换效率以及载流子迁移率等特性。半导体材料的飞速发展, 不仅促进了电子、微电子器件的进步, 同时大幅提升了光电器件的性能和功能丰富性。下面简单介绍半导体光电材料的发展历程及其在光电器件领域的应用。

(1) 第一代半导体材料。硅和锗作为典型的第一代半导体

材料, 具有高的晶体质量和稳定性. 其中硅材料具有良好的耐高温和耐辐射性能, 被广泛应用于太阳能电池板和传感器等光电器件领域. 然而, 由于其较低电子迁移率(小于 $1500 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$)和功率密度, 限制了其在高频高功率器件中的应用.

(2) 第二代半导体材料. 第二代半导体材料主要包括III-V族和III-VI族, 典型的有砷化镓(GaAs)和锑化铟(InSb). 这些材料具有更宽的能带间隙和更高的载流子迁移率, 使其在光电器件制造方面具有更大的应用潜力. 以砷化镓为例, 相比于第一代半导体材料, 砷化镓具有高电子迁移率($\sim 10000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$)、高功率密度、高击穿场强等特性, 被广泛应用于无线通信、光通信以及发光器件中. 然而, 第二代半导体材料稀缺、价格昂贵, 并且有毒、污染环境, 这些缺点使得其应用具有很大的局限性.

(3) 第三代半导体材料. 第三代半导体材料包括碳化硅和氮化镓(GaN)等宽禁带材料, 与前两代半导体材料相比, 其最大的优势是更宽的禁带. 此外, 其还具有更高的热导率和电子饱和速率等, 适合于制作高温、高频、抗辐射及大功率的器件, 因此广泛应用于半导体照明、激光、探测器和大功率耐辐照电子器件等光电器件中.

(4) 新型半导体材料. 二维材料和钙钛矿等作为新型半导体材料, 由于其优异的光电性能以及可集成和柔性等特性, 在光电传感器、太阳能电池和显示器件等领域已展现出巨大的应用前景.

1.2 光电器件

根据光与载流子相互作用的方式, 光电器件可分为两类: 一类是光-电转换器件, 如光电探测器、太阳能电池等; 另一类是电-光转换器件, 如发光二极管、激光器等. 下面分别从器件原理、性能指标、典型应用场景等方面对两类器件进行描述, 有助于刚涉及该领域的青年科技工作者快速了解光电器件科研攻关的关键指标.

1.2.1 光-电转换器件

光-电转换器件是将光信号转换成电信号, 典型的器件包括光电探测器和太阳能电池.

(1) 光电探测器. 光电探测器是将光信号转换为电信号而对光信号进行探测的光电器件, 根据转换方式的不同, 可分为光子型探测器和热探测器. 前者主要依靠半导体材料吸收光子能量, 输出相应的电信号, 而后者主要依靠光热效应, 与光子相互作用后温度变化导致材料的电学特性发生改变.

衡量光电探测器品质的主要参数包括以下几项: (a) 响应度, 描述探测器的光电转换能力, 定义为光电探测器的响应电流或电压与入射光功率的比值, 单位为 A/W 或 V/W , 一般具有波长依赖性. (b) 响应速度, 反映器件对光响应的快慢, 通常取光响应 $10\% \sim 90\%$ 之间的时间差或 c 指数拟合得到的时间常数来表示, 单位为秒(s). 有时也用响应频率或带宽表示

器件的响应速度, 当响应度随频率增加降至峰值的 $1/\sqrt{2}$ 倍时(功率下降为原来的一半时), 对应的频率称之为响应截止频率, 也称为 3 dB 带宽, 单位为赫兹(Hz). (c) 光谱响应范围, 表示器件可以响应光的波长范围, 该范围通常由器件光敏材料的带隙决定, 热探测器通常可以响应红外等更长波长的光. (d) 量子效率, 从微观角度描述器件对入射光的利用效率, 可分为外量子效率和内量子效率. 外量子效率定义为每入射一个光子, 探测器所释放的平均电子数; 而内量子效率表示的是材料每吸收一个光子产生的电子数. 通常情况下, 量子效率都小于 100% . 但是像雪崩探测器、光电倍增管等具有增益的探测器件, 其量子效率可大于 100% . (e) 等效噪声功率, 描述的是探测器探测弱光的能力或灵敏度. 通常将输出带宽归一化为 1 Hz 条件下, 当入射光产生的光电流与器件噪声电流相等时, 定义此时入射光功率为噪声等效功率. (f) 比探测率, 描述的是器件归一化不同参数后的综合探测性能, 其定义为 $D^* = \frac{R}{I_n} \sqrt{A \cdot \Delta f}$, 其中 R , I_n , A , Δf 分别为器件的响应度、噪声电流、有效面积和测量带宽.

根据光电探测机制的不同, 不同光探测器也具有不同的应用场景. 光电导型探测器件(如光敏电阻)往往具有较大的响应度和量子效率, 但是响应速度受到一定限制, 所以主要用于如光控开关等对速度要求不高的场景中. 光伏型光电探测器件(如光电二极管等)具有较快响应速度, 应用空间更为广阔, 涵盖通信、成像、控制和探测等领域.

在光通信领域, 光子相比于电子具有更快的传输速度, 并且可以加载不同波形作为信息载体, 用于光纤或光波导通讯, 大大提高了通讯效率, 而且不用担心热耗散问题. 作为光通讯中解调光信号的光电探测器, 需要具有极高的响应带宽来匹配光通讯的需求.

在成像领域, 目标物发出或反射的光被光电探测器阵列收集, 将光信号转换为电信号, 通过电路传输处理后得到目标物的图像信息, 如照相机、遥感、雷达等. 成像系统用探测器通常要求具有高的灵敏度和响应速度. 目前成像波段主要在可见-红外波段, 可见光探测器通常具有较高的灵敏度、分辨率和响应速度, 但是受气候影响较大. 红外成像多是利用物体表面的红外热辐射成像, 因此其响应速度受到一定限制, 且图像分辨率有待提高.

(2) 太阳能电池. 将太阳能收集转换为电能存储起来. 衡量太阳能电池品质的主要参数包括以下几项: (a) 开路电压, 描述的是光照下电池输出两端处于断路时输出的最大电压, 表现为在光照下电流-电压曲线与电压轴的截距. (b) 短路电流, 描述的是光照下电池输出两端短路使得电压为零时输出的电流, 表现为在光照下电流-电压曲线与电流轴的截距. (c) 最大输出功率, 太阳能电池的工作电压和电流随负载而变, 当输出电压和电流乘积最大时, 即得到最大输出功率. (d) 填充因子, 衡量太阳能输出特性的重要指标, 定义为最大

输出功率与开路电压和短路电流乘积的比值,该值越大表示太阳能电池的输出功率越大,最大值为1。(e)转换效率,描述的是对太阳光的利用效率,定义为在标准光照下,输出的最大功率与入射光功率的比值。

随着煤、石油、天然气等不可再生资源的持续消耗,化石能源不仅存在消耗殆尽的风险,而且使用过程中产生的燃烧产物严重污染大气环境。太阳能作为可再生资源,不仅可以显著缓解能源危机,而且是对空气无污染的清洁能源,预计在不久的将来会占据能源消费的主体地位。因此,大力发展光伏产业是全世界的共识。近期,我国自主研发的硅异质结太阳能电池转换效率达到26.81%,刷新了硅太阳能电池的世界纪录。

1.2.2 电-光转换器件

光电器件中的另外一类是电-光转换器件,通过半导体器件中载流子的复合发光过程将电能转换成光能,主要包括发光二极管和激光器。下面将从电-光转换器件涉及的重要应用领域,以及相关领域发展的重点来简要介绍这两种器件。

(1) LED。LED是一种典型的半导体电光转换器件,通过电流驱动半导体中的电子和空穴进行复合,以产生光子的形式释放能量。光的颜色(对应光子的能量)由半导体的带隙决定。LED的器件结构包括常见的PN结、双极注入的(多)量子阱结构、单极注入的金属-绝缘层-半导体(metal-insulator-semiconductor, MIS)结构以及瞬态结构等。其主要参数有发光波长、发光强度、亮度、驱动电流、工作电压、发光效率等:(a)发光波长,发光二极管发射光的波长范围,常见的发光波长有红色、绿色、蓝色等。(b)发光强度,发光二极管在特定方向的光强度,用单位立体角内的光通量(流明,lm)来表示。(c)亮度,单位面积上的光强度,通常用单位面积(cm^2)内的光通量(流明,lm)来表示。(d)驱动电流,驱动发光二极管的电流大小,单位是安培(A)。(e)工作电压,在给定的驱动电流下,发光二极管的电压大小,单位是伏特(V)。(f)发光效率,发光二极管将输入电能转化为输出光能的效率,用流明/瓦特(lm/W)来表示。

发光二极管具备长寿命、高效率、低能耗、快速开关等突出优点,被广泛用于显示、照明、通信等领域。

发光二极管在显示领域的应用十分广泛,涵盖了多个领域。Micro LED是一种新型显示技术,可将显示用的红绿蓝三原色LED器件进行微小化和阵列化,使得单个元件尺寸仅在 $1\sim 10\ \mu\text{m}$ 量级。由于Micro LED采用的是自发光的微米级LED,其发光频谱的半高宽仅为约20 nm,因此其对比度和色彩表现能力是液晶显示(liquid crystal display, LCD)、有机发光二极管(organic light-emitting diode, OLED)等显示技术无法比拟的。而且, Micro LED由于结构简单、能量转换效率高,其正常工作下的功耗仅为LCD的10%,在大幅度降低功耗的同时具备更高的亮度。此外,长寿命和小尺寸的特性使得LED在交通信号灯、状态指示灯等领域有独特的优势。

LED的高效率、低功耗和高亮度等特点使其广泛应用于照明领域。LED灯泡的亮度通常在50 lm/W以上,6 W的LED灯泡已经可以实现与标准的40 W白炽灯同样的亮度,全球范围内LED灯泡已成为照明领域的主流光源。封装LED的稳定性和长寿命被应用于汽车照明、太阳能街灯和建筑照明上,能在减少电能消耗的前提下降低维护成本。此外,红外LED被用于夜间红外照明上,包括安全摄像头等设备。利用LED的高亮度和快速开关等优点,LED已被广泛应用于汽车刹车灯和转向灯上。LED充分点亮所需的时间比白炽灯快约0.1 s,给驾驶员提供了更多的反应时间。此外,LED汽车大灯中较高的脉冲频率可有效避免驾驶员眼中出现幽灵图像,大幅提升汽车的行车安全性。

光子比电子具备更高的可控自由度和稳定性,是除电子外的另外一种重要的信息载体。LED的快速开关特性使其被广泛应用于光纤和自由空间光通讯,如电视遥控使用红外LED和电视进行通讯。

可见光通讯技术(visible light communication, VLC)将传输的信息通过电路调制到LED的驱动电流上,使LED光具备极高的闪烁频率。人眼无法感知到超过一定频率的高频闪烁,因此不会对原有照明效果产生不利影响。通过与光电探测器相结合,可以检测到高频闪烁LED上携带的信息。因此,只要在室内白光LED照射到的地方,就可以利用VLC进行无线通讯。绿色环保、快速灵活、可靠性强,高功率LED照明的推广普及使VLC技术的应用前景巨大。

(2) 激光器。激光器作为另一种电-光转换器件,主要由谐振腔、增益介质、激励能源构成。激励能源激发增益介质产生自发辐射光束,光束通过谐振腔在增益介质中来回振荡,当腔内增益大于吸收时,产生受激辐射,光束从谐振腔的端面发射出去形成激光。

激光器的主要参数包括波长、输出功率、工作模式、光束质量、调制带宽等:(a)发光波长,激光器输出的光波长,通常用纳米(nm)表示。常见的波长有紫外、可见光和红外等。(b)输出功率,激光器输出的激光功率,通常用瓦特(W)表示。(c)工作模式,激光器的输出模式,通常分为连续波、脉冲和超短脉冲等模式。(d)光束质量,激光束的空间分布和光束尺寸,通常用 M^2 值表示。 M^2 值越小,表示激光束质量越高。(e)功率稳定性,表征激光输出功率在一定时间内的不稳定性,输出功率或能量的最大值和最小值之差与功率平均值或能量平均值的百分比。(f)调制带宽,激光器输出脉冲可以被调制的范围,用千兆赫(GHz)表示。调制带宽越高,激光器的调制速度越快。

激光与其他光的主要区别在于激光具有相干性,包括时间相干性和空间相干性。空间相干性使激光在长距离传输下不易扩散,并且能够聚焦。时间相干性使得激光在时域上形成超短脉冲,频域上形成单色激光。因此,激光通常具备高强度、单色性、窄线宽、平行传输以及高稳定性等特点,并已

氮化镓、铝镓氮材料,这是因为氮化镓作为第三代半导体和宽禁带半导体光电材料的代表,氮化镓(3.4 eV)、氮化铟(0.7 eV)、氮化铝(6.2 eV)及其多元合金,对应波长覆盖了从深紫外到红外的宽广光谱范围,尤其是在蓝绿光及紫外波段的激光器、发光二极管、探测器研制方面具有不可替代的作用。氮化物中最受关注的是工作波长包含深紫外波段的铝镓氮材料。受铝原子表面迁移能力较低的影响,高质量的铝镓氮材料制备需要高温(1300~1400°C)的金属有机物化学气相沉积系统(metal-organic chemical vapor deposition, MOCVD),衬底制备和薄膜外延生长的难度较大,因此,突破该技术壁垒有望大力推动激光器更广泛的应用。

太阳能电池是除激光器外的另一种典型器件,说明从国家战略层面出发,能源问题始终是光电领域重点关注的方向。太阳能电池关注的重点还是其效率问题,目前已经商用化的太阳能电池中晶体硅的光电转换效率最高,而且硅储量丰富、无毒、无污染,具有巨大的规模产业化前景以及长远的产业化生命力。近期中国太阳能科技企业隆基绿能制造的硅异质结太阳能电池刷新了世界纪录,效率达到26.81%,光电转换效率也越来越接近Shockley-Queisser理论极限,但是在提高光电转换效率的同时降低生产成本仍具有一定的挑战。与此同时,科技工作者也在不断寻求其他适用于太阳能电池的材料,钙钛矿由于其吸光强、低成本、易制备的特点受到了广泛的关注。经过短短10余年的发展,钙钛矿太阳能电池的效率已经突破25%,未来可期。但由于钙钛矿材料对水、氧等环境比较敏感,稳定性是其面临的主要问题。另外,钙钛矿材料的毒性以及电池生产工艺是其需要解决的问题。

对于光电探测器的关注点可以总结为融合,包括材料融合、结构融合、性能融合,落脚点依然为集成芯片的研究。关于激光雷达涉及两个项目,主要是硅基集成芯片关键技术的研究。另外,在发光二极管方面涉及两个项目,都是基于量

子点制备高性能大面积发光器件,主要是面向未来显示应用,解决效率和相关工艺问题。

2.2 重大项目

重大项目面向科学前沿和聚焦国家重大需求的重大科学问题,超前部署,引领开展多学科交叉和综合性研究。本文统计了2018~2022年F0403资助代码下的2个项目(包含7个子课题),对其项目名称和关键词进行了热词分析和热词关联,如图2所示。可以看出,最热门的研究依然是激光器,尤其是中远红外激光器,这主要是因为可见光和近红外波段激光器技术和市场日益成熟,而中远红外在光电对抗、激光雷达、环境监测等方面具有巨大的市场需求。其覆盖的两个大气窗口(3~5和8~14 μm)衰减较小,在军事国防领域具有重要的应用。此外,中远红外光谱技术可用于高灵敏气体分子检测和传感,可用于环境监测和气体泄漏监测等。因此,发展中远红外激光器对军用和民用领域都具有战略意义。实现中远红外激光器,目前普遍采用的技术路径是利用量子级联,通过生长多周期、上千层纳米级高精度的半导体薄膜构建多量子阱结构,借助声子共振辅助隧穿效应实现电子的“循环”利用,实现级联放大和激光激射,激光波长可由半导体薄膜的厚度来调控。经过20多年的发展,我国在量子级联激光器方面也取得了巨大进展,但中远红外相关产业仍然较少,支持中远红外关键技术和核心芯片的研发促进产业链的形成,有助于推动国内中远红外产业发展。

2.3 重大仪器项目

2018~2022年F0403和F0502代码下资助的重大科研仪器研制项目有6项,其中5项涉及激光器的使用,无论是光谱测量、物质检测还是仪器校准测试,激光在大型仪器设备中应用越来越广泛。这主要得益于其高强度、窄线宽以及光纤的

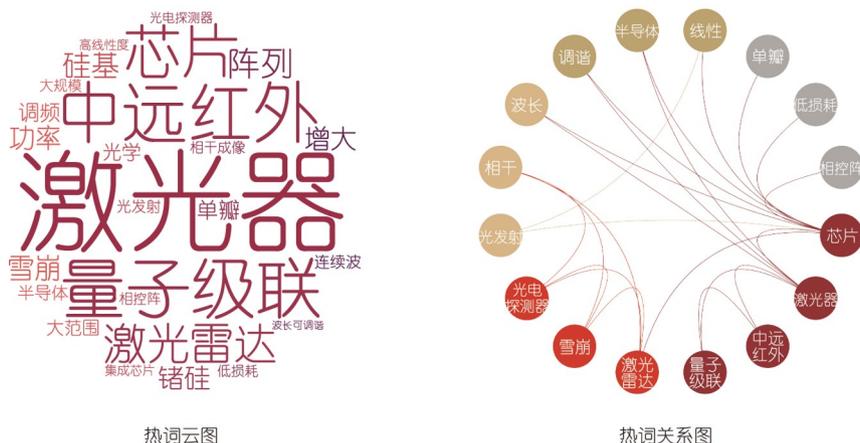


图2 2018~2022年F0403代码下资助的重大项目热词云图和热词关系图

Figure 2 Hot word cloud chart and relation chart of Major Programs of National Natural Science Foundation of China supported by F0403 during 2018-2022

成熟工艺. 重大项目的要求是探索性、原创性的重大仪器设备研制, 这类新型科研仪器往往需要高精尖的指标, 代表了相关研究领域的最前沿, 这也需要高性能光电器件的支持.

2.4 原创探索项目

2018~2022年F0502和F0403代码下资助的原创探索项目共3项, 其中两项关于发光二极管, 分别为非掺杂型稀土化合物电致蓝光器件和小注入条件下发光二极管的电光转换机理研究, 一项关于氮化镓基紫外激光器.

在非掺杂型稀土化合物电致蓝光器件中, 稀土元素与其他元素形成一种稀土化合物, 这种化合物不需要掺杂其他杂质, 即可实现电致蓝光发光, 可以应用于显示技术、照明技术等领域. 这种器件的研究主要包括稀土元素的选择、化合物的制备、器件结构的设计等方面. 其中, 稀土元素的选择是非常重要的, 因为不同的稀土元素对蓝光发光的贡献程度不同. 例如, 铟元素对蓝光发光有很好的贡献, 而镱元素对蓝光发光的贡献相对较小. 在制备过程中, 通常采用化学合成的方法来制备稀土化合物, 需要控制化合物的组成和晶体结构, 以保证其发光性能和稳定性. 目前常用的器件结构包括有机电致发光器件和无机电致发光器件, 这些器件的结构设计需要考虑稀土化合物的特性, 如发光效率、光学波导特性等.

小注入条件下, 发光二极管内部的载流子密度较低, 同时激子寿命也会变得较长, 这会导致非辐射复合的比例增加, 从而降低电光转换效率. 通过在低注入下增加载流子的扩散长度和减少激子的寿命, 可以提高发光二极管的电光转换效率, 同时发光二极管中的量子限域等效应也会影响电光转换效率.

瓦级大功率GaN基紫外激光器可靠性机理研究, 主要研

究GaN基紫外激光器在长期使用中出现的可靠性问题及其背后的机理. GaN基紫外激光器的可靠性问题主要包括两个方面: 一是激光器自身的热稳定性问题, 在高功率工作状态下, GaN基紫外激光器的温度会升高, 这会导致激光器内部应力的变化, 从而引起激光器的退化; 二是材料的化学稳定性问题, GaN材料容易受到水、氧气等物质的侵蚀, 从而引起GaN基紫外激光器的退化. 研究GaN基紫外激光器的可靠性机理, 可以帮助研究人员了解GaN材料的性能和缺陷, 进而开发出更加可靠和稳定的GaN基紫外激光器.

原创探索项目资助科研人员提出原创学术思想、开展探索性与风险性强的原创性基础研究工作, 如提出新理论、新方法或揭示新规律等, 旨在培育或产出从无到有的引领性原创成果. 由原创探索项目的科学问题可以看出, 上述项目分别从新材料、新机理出发, 对发光器件进行深入研究, 说明探索新型光源、改善发光特性始终是光电器件研究的主要方向.

2.5 面上与青年项目

本文统计了2018~2022年F0403和F0502代码下资助的与光电器件相关的392项面上项目和520项青年项目的研究重点, 制作了热词云图和热词关系图, 如图3和4所示. 面上和青年项目中出现频率最高的几个热词包括“钙钛矿”“探测器”“光电”“激光器”“太阳能电池”等. 青年项目提取的热词数量为818, 大于面上项目的685, 表明青年项目覆盖的研究内容更加广泛.

针对面上项目和青年项目, 我们着重分析了出现次数最多的10个热词, 并统计了它们的词频(热词出现的次数/相应的项目总数), 相关结果如表1所示. 其中“钙钛矿”“太阳能电

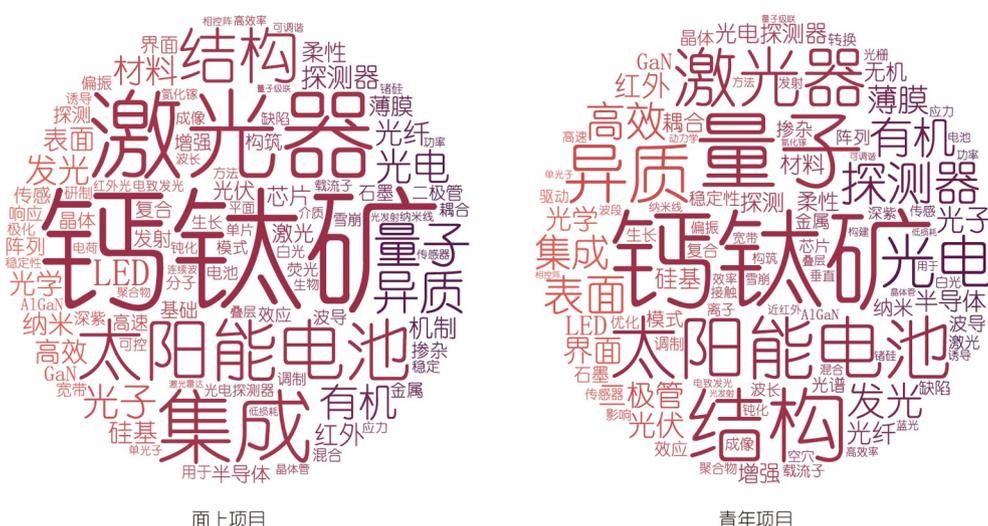


图3 2018~2022年F0403和F0502代码下资助的面上项目和青年项目热词云图
 Figure 3 Hot word cloud chart of General and Youth Programs of National Natural Science Foundation of China supported by F0403 and F0502 during 2018-2022

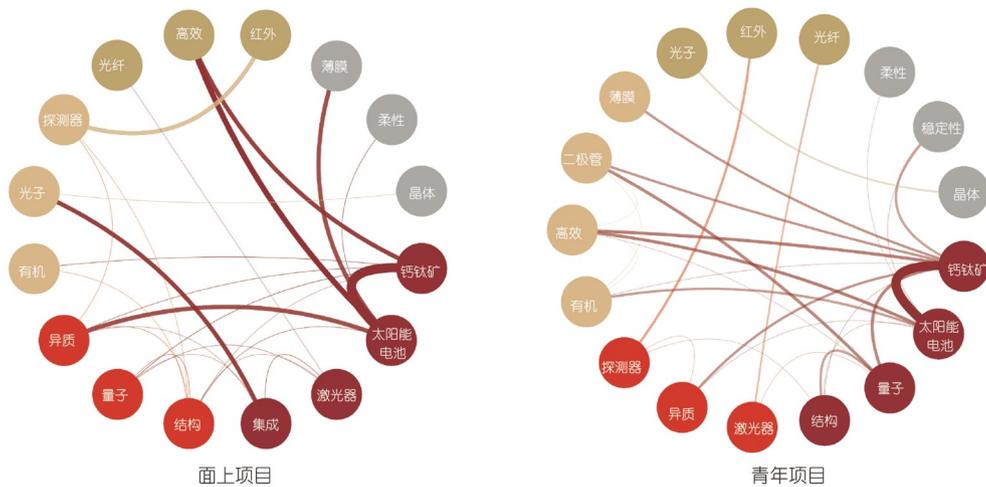


图4 2018~2022年F0403和F0502代码下资助的面上项目和青年项目热词关系图

Figure 4 Hot word relation chart of General and Youth Programs of National Natural Science Foundation of China supported by F0403 and F0502 during 2018–2022

表1 面上项目和青年项目出现频率前10的热词和词频

Table 1 Top 10 hot words and word frequencies of General and Youth Programs of National Natural Science Foundation

序号	面上项目		青年项目	
	热词	词频	热词	词频
1	太阳能电池	0.145	钙钛矿	0.219
2	钙钛矿	0.143	太阳能电池	0.169
3	激光器	0.120	量子	0.115
4	集成	0.117	结构	0.108
5	结构	0.102	激光器	0.090
6	量子	0.097	异质	0.088
7	异质	0.092	光电	0.083
8	有机	0.089	探测器	0.081
9	光子	0.074	有机	0.075
10	探测器	0.074	高效	0.075

池”“激光器”均出现在面上项目和青年项目频率排名前五的热词中，并且青年项目中这些热词的词频略高于面上项目。这表明与钙钛矿相关的光电器件是目前我国学者普遍关注的热点，也比较符合国内外光电领域的研究趋势和实际情况，并且青年学者对这些热点体系的研究更加集中。

“电池”“激光器”和“探测器”作为前述的光电器件中的三大类，与人类的实际生活和社会进步息息相关，也是面上项目和青年项目共同关注的热点。其原因已在第一部分做了详细说明，此处不再赘述。三种不同类型器件热度相似，说明科研人员对这三种器件的关注程度和项目支持力度基本相当。除器件结构外，“集成”一词在面上项目的热度高于青年项目，说明光电器件的集成是在分立器件的基础上实现的，承担面上项目的科研人员此前在研究生阶段和工作的初始阶段已

经对具体的光电器件特性已经有了一定的了解和研究基础，随着研究的不断深入，从“分立”到“集成”既是技术发展趋势，也是自然形成的思维模式。与此对比，“集成”一词在青年项目中的热度相对较低，说明年轻科研人员的研究方向更加细致和具体，对不同类型的光电器件尚未形成系统性关联性概念。值得注意的另一点是，“钙钛矿”在青年项目中的热度相对突出，说明年轻科研人员在初次独立选择研究方向时，会更倾向于选择国际上的热点问题和前沿方向。目前关于钙钛矿太阳能电池的研究主要集中在发光效率提升、稳定性能提升、无铅降低毒性以及发光调控等方向，是钙钛矿太阳能电池走向商业化亟须解决的问题。此外，“结构”“异质”“有机”等热词的出现表明器件材料、异质结和器件结构的优化是光电器件研究中普遍关注的研究方向。

3 对光电器件研究方向的展望

为了促进我国光电器件的研究,需要紧密结合国家重大需求,坚持服务国家战略,鼓励以需求为导向开展基础和應用研究。下面结合国家战略需求,从基础科学、光通信、可穿戴器件、成像显示和生物医疗等方面讨论光电器件未来的发展趋势。

(1) 基础科学. 光电器件是半导体领域发展的关键器件,在科技创新和国家战略发展中也具有重要的地位。高性能的光电器件的基础是化合物半导体材料和器件物理,实现高质量材料制备、掌握理解其物理本质器件工作原理才能研制出性能优异的器件,技术创新往往也是建立在对基础科学问题的理解上。国家自然科学基金委员会作为基础研究最主要的资助来源,鼓励科技工作者对科技前沿问题展开攻关。如在激光器方面,高效的紫外和中远红外激光器仍是研究热点,材料和结构设计是影响性能的主要因素,加强关键材料和新型结构设计的研究将进一步提升器件性能。

(2) 光通信. 新型光子芯片可以实现快速的信息传输和处理,可有效改善电子芯片中存在的热耗散问题,在光通讯领域具有重要的地位。为实现光子集成芯片,需加强片上光源的研究,探究片上光源的耦合和调制机理,利用波导等结构实现光信息的调制与探测,开发光源-调制-探测一体化片上集成技术。

(3) 可穿戴器件. 在可穿戴器件领域,未来的光电器件将会朝着更加轻薄、柔性化方向发展,具有更高的可靠性和功耗性能比。具体来说,未来的柔性光电器件将不再受限于刚性硅基材料,而是采用更加柔性的聚合物材料、二维材料、碳纳米管等。此外,未来的光电器件需要具备更好的能量管理和节能技术,以满足可穿戴设备对于长时间使用的需求。此外,可穿戴设备的生物监测功能需要更加精准和高灵敏度的光电器件支持,例如生物光子学技术和光学传感器技术等。

(4) 成像显示. 光电器件需要具备更高的分辨率、亮度和色域,以满足VR/AR、智能家居、智能驾驶等领域的发展需求。具体来说,未来的光电器件将会采用更加先进的材料和

工艺技术,例如量子点发光二极管(quantum dot light-emitting diodes, QLED)、Micro-LED等,以提高屏幕的亮度、色彩还原度和能效。此外,未来的光电器件也需要更好的可持续性和环境友好性,例如采用低毒、无毒的材料,以及采用低功耗、高效能的驱动技术。

(5) 生物医疗. 在生物医疗领域,未来的光电器件需要具备更高的灵敏度、分辨率和可靠性,以满足生物成像、荧光光学成像、光动力治疗等方面的需求。具体来说,将采用更加先进的光学材料和结构设计,以提高光学传感器的灵敏度和分辨率。此外,未来的光电器件还需要具备更好的生物兼容性和可重复性,以保证在临床实践中的可靠性和稳定性。

4 结语

光电器件是信息社会的基础组成部分,也是国家战略发展过程中最重要的工具之一,具有广泛的应用前景。随着信息技术与通讯技术的高速发展,光电器件已经成为现代工业和生活中不可或缺的核心器件,在未来光通讯、柔性可穿戴器件、高分辨高性能成像显示以及生物医疗等应用领域中将继续发挥举足轻重的作用。与微电子领域相比,我国光电器件与国际领先水平的差距相对较小。持续发挥国家自然科学基金科学规划和引领,从战略需求中提炼科学问题,通过解决关键科学问题、突破关键技术,率先实现光电子领域的创新和引领,带动光通信、探测成像、清洁能源等重大领域的高水平科技自立自强。

本文从光电器件的分类及其主要的应用领域出发,结合国家自然科学基金F0403和F0502代码下资助的重点项目、重大项目、重大仪器项目、原创探索项目、面上项目和青年项目立项情况,对光电相关项目的主要研究内容进行了热词分析,总结了当前光电器件研究的热点,并梳理了当前探测器、激光器、太阳能电池、LED等光电器件的研究现状。最后,结合国家重大战略需求,从国家自然科学基金角度对我国光电器件的发展趋势进行了展望,指出了光电器件在不同领域发展需要进一步深入研究和探讨的问题。

推荐阅读文献

- 1 Li J H. Deepen the reform of the national natural science fund to promote the high-quality development of basic research (in Chinese). Bull Natl Nat Sci Found China, 2020, 34: 529–532 [李静海. 深化科学基金改革 推动基础研究高质量发展. 中国科学基金, 2020, 34: 529–532]
- 2 Han Y. Strengthening strategy study on discipline development, leading major breakthroughs in original achievements (in Chinese). Bull Natl Nat Sci Found China, 2019, 33: 321 [韩宇. 做好学科发展战略研究 引领原创成果重大突破. 中国科学基金, 2019, 33: 321]

Summary for “国家自然科学基金视角下我国光电器件领域发展的分析和展望”

Analysis and prospects of the development of optoelectronic devices in China from the perspective of National Natural Science Foundation of China

Hua Tang^{1*} & Junpeng Lü²

¹ Department of Information Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085, China;

² School of Physics, Southeast University, Nanjing 211189, China

* Corresponding author, E-mail: tanghua@nsfc.gov.cn

Optoelectronic devices, which are functional devices based on semiconductor materials with optical and electrical conversion effects, have become an integral part of our daily lives, particularly in the fields of military and aerospace applications. These devices hold significant strategic importance in these areas. In the information era, optoelectronic devices have made remarkable advancements and have found their way into various aspects of our lives. They utilize the principles of optics and electronics to manipulate light for different purposes. The applications of optoelectronics are diverse and include technologies like LEDs, photovoltaic cells, laser diodes, photodetectors, and optical fibers. In this paper, we provide a concise introduction to the development of semiconductor optoelectronic materials. It subsequently explores the different types, key parameters, and application scenarios of optoelectronic devices, focusing on their roles in optoelectronic and electro-optical conversion. Furthermore, it presents an analysis of optoelectronic device projects funded by the National Natural Science Foundation of China between 2018 and 2022. The two primary program codes of interest are F0403 (Semiconductor Optoelectronic Devices and Integration) and F0502 (Photonic and Optoelectronic Devices) within the Information Science Division. The paper scrutinizes the keywords associated with these programs, including Key Programs, Major Programs, Research Programs of National Major Research Instruments, Original Exploration Programs, General Programs, and Youth Programs. Key Programs and Major Programs funded by the National Natural Science Foundation of China hold a significant position in the realm of optoelectronic research. These programs prioritize the development of integrated optoelectronic devices, specifically chips, that align closely with the nation's major strategic needs. Research Programs of National Major Research Instruments and Original Exploration Programs are instrumental in driving optoelectronic research forward. Through their focus on sophisticated instruments, equipment, and high-risk exploration, these programs aim to achieve groundbreaking original achievements and foster transformative advancements in the field. They provide the necessary support and resources for researchers to pursue innovative ideas and push the boundaries of knowledge, ultimately shaping the future of optoelectronics. General Programs and Youth Programs under the National Natural Science Foundation of China play a vital role in fostering research and innovation in the field of optoelectronics. By catering to a wide audience and encompassing diverse research topics, these programs stimulate collaboration, encourage exploration, and propel the field forward into new frontiers of knowledge and technological advancements. Through an analysis of the frequently mentioned keywords in the funded projects, the paper discerns the current development status and challenges faced by optoelectronic devices in China. Finally, based on the national strategic needs, the paper presents a prospective outlook on the future development direction of optoelectronic devices. This includes areas such as basic science, optical communication, wearable devices, imaging displays, and biomedicine. The goal is to anticipate and address the demands and opportunities that lie ahead for optoelectronic devices in various fields. By examining the funded projects and analyzing the trends and priorities reflected in the keywords, this study sheds light on the state of optoelectronic device research in China. It provides valuable insights into the country's strategic focus and offers a roadmap for future advancements in optoelectronic technology.

optoelectronic device, photodetector, solar cell, laser device, light-emitting diode

doi: [10.1360/TB-2023-0438](https://doi.org/10.1360/TB-2023-0438)