◆新质生产力与产业态势◆

发展高纯磷及磷系半导体材料，赋能传统磷产业跃升为新兴和未来产业

汤建伟[1]，惠　峰[2]，周登明[1,3]，曹昌威[4]，李国胜[1,3]，何建勇[1,3]，张岩皓[1]，董良民[1,3]

（1. 郑州大学，河南 郑州　450001；2. 云南临沧鑫圆锗业股份有限公司，云南 临沧　650500；3. 关键金属选冶与高纯制程全国重点实验室，河南 郑州　450001；4. 楚雄川至电子材料有限公司，云南 楚雄　675000）

［摘　要］2026年作为“十五五”开局之年，国家战略明确提出优化提升传统产业、培育壮大新兴产业和未来产业，磷资源高效高值利用成为传统磷产业升级的必由之路。合成磷化物（以磷化铟为主）作为重要化合物半导体材料，广泛应用于光芯片、光模块、AI算力、6G通信等领域，其中磷化铟因直接带隙、高频、特定波长等优势，成为800 G/1.6 T光模块核心材料，市场需求爆发式增长，但供需缺口超70%，产能高度集中于海外。磷化铟生产依赖7N级以上高纯铟和高纯红磷，我国铟资源储量占全球的75%，具备全链条供给能力且实施出口管制，高纯铟制备技术已实现突破；我国磷矿资源丰富但以中低品位为主，高纯红磷产能不足，仍依赖进口。本文结合产业背景，系统阐述磷化铟的特性、产业链、市场趋势及AI光互联技术路线，分析高纯铟、高纯红磷的资源分布、制备工艺及产业现状，指出我国在磷基半导体材料领域的优势与短板，为传统磷产业向新兴半导体领域跃升、推动新质生产力发展提供参考。

［关键词］磷产业；半导体材料；磷化铟；高纯铟；高纯红磷；制备

［中图分类号］TQ126.3　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2026）05-0001-08

Developing high purity phosphorus and phosphorus-based semiconductor materials, enabling the traditional phosphorus industry to transform into an emerging and future industry

TANG Jianwei[1], HUI Feng[2], ZHOU Dengming[1,3], CAO Changwei[4], LI Guosheng[1,3], HE Jianyong[1,3], ZHANG Yanhao[1], DONG Liangmin[1,3]

(1. *Zhengzhou University*, *Zhengzhou* 450001, *China*; 2. *Yunnan Lincang Xinyuan Germanium Industrial Co., Ltd.*, *Lincang* 650500, *China*; 3. *National Key Laboratory of Key Metal Smelting and High Purity Process*, *Zhengzhou* 450001, *China*; 4. *Chuxiong Chuanzhi Electronic Material Co., Ltd.*, *Chuxiong* 675000, *China*)

Abstract: As the inaugural year of the “15th Five-Year Plan” in 2026, the national strategy explicitly calls for optimizing and upgrading traditional industries while fostering and expanding emerging and future industries. The efficient and high-value utilization of phosphorus resources has become an essential pathway for upgrading the traditional phosphorus industry. Synthetic phosphides (mainly indium phosphide) are important compound semiconductor materials, which are widely used in optical chips, optical modules, AI computing power, 6G communication, etc. Among them, indium phosphide, due to its direct band gap, high frequency, and specific wavelength advantages, has become the core material for 800 G/1.6 T optical modules. The market demand has exploded, but the supply-demand gap exceeds 70%, and the production capacity is highly concentrated overseas. The production of indium phosphide relies on 7N-level or higher high-purity indium and high purity red phosphorus. China's indium reserves account for 75% of the global total, and it has the full-chain supply capability and implements export control, and the high purity indium technology has achieved breakthroughs; China has abundant phosphorus resources but mainly with medium and low grades, and the production capacity of high purity red phosphorus is still dependent on imports. This paper, based on the industrial background, systematically elaborates on the characteristics, industrial chain, market trends, and AI optical interconnection technology route of indium phosphide, analyzes the resource distribution, preparation process, and industrial

收稿日期:2026-05-06

作者简介:汤建伟(1964—　),男,广东梅州人,教授,研究方向为磷资源加工与高效利用。

status of high purity indium and high purity red phosphorus, points out the advantages and shortcomings of China in the phosphorus-based semiconductor materials field, and provides a reference for the traditional phosphorus industry to leap to the emerging semiconductor field and promote the development of new quality productive forces.

Key words: phosphorus industry; semiconductor materials; indium phosphide; high purity indium; high purity red phosphorus; preparation

1 传统产业向新兴和未来产业跃升背景

2026年是国家“十五五”开局之年，3月13日公布的《中华人民共和国国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要》将“建设现代化产业体系，巩固壮大实体经济根基”作为战略任务的第一条，提出“优化提升传统产业、培育壮大新兴产业和未来产业”。

新兴产业（Emerging Industry）是在技术创新、相对成本关系转变、新消费需求等因素驱动下新形成的或重新焕发活力的产业，具有知识密集度高、物质资源消耗少、综合效益好、成长潜力大等特点，对于建立现代产业体系、满足国家重大战略需要具有支撑引领作用。2023年8月，工业和信息化部等四部门发布《新产业标准化领航工程实施方案（2023—2035年）》，明确提出将新一代信息技术、新能源、新材料、高端装备、新能源汽车、绿色环保、民用航空、船舶与海洋工程装备八类产业列入新兴产业。

未来产业（Future Industry）是由前沿技术驱动，当前处于孕育萌发阶段或产业化初期，具有显著战略性、引领性、颠覆性和不确定性的前瞻性新兴产业。2024年1月18日工业和信息化部等七部门发布的《关于推动未来产业创新发展的实施意见》（工信部联科〔2024〕12号）界定了未来制造、未来信息、未来材料、未来能源、未来空间和未来健康等未来产业的具体领域方向。

磷矿是战略性非金属资源，由磷资源加工流程型工业制造的磷基制品和材料关乎粮食安全、生命健康、新能源及新能源汽车等重要产业链、供应链的安全稳定。2023年12月29日工业和信息化部等八部门发布的《推进磷资源高效高值利用实施方案》（工信部联原〔2023〕259号），明确磷资源高效高值利用发展定位，其中高附加值磷化学品要求面向新能源、集成电路、生命健康等重点产业链需求，推动磷化学品产业链向新能源材料、电子化学品、功能性精细化学品等领域延伸。

新一代信息技术、新材料产业是新兴产业的重要组成部分，未来信息、未来材料方向是未来产业的重要方向，推动磷资源高效高值利用是传统磷产业提质增效、升级发展的必由之路。因此，“十五五”期间，加快我国磷产业向合成磷化物半导体核心材料方向发展，提高光芯片产业国产替代和市场占有率，是“优化提升传统产业、培育壮大新兴产业和未来产业”的战略举措，也是促进我国新质生产力发展的重要载体。

2 磷系半导体材料

合成磷化物磷化铟（InP）、磷化镓（GaP）、磷化铝（AlP）、磷化锌（Zn_3P_2）、磷化钙（Ca_3P_2）、磷砷化镓铝（AlGaAsP）、磷砷化镓铟（InGaAsP）、磷砷化镓（GaAsP）等属于化合物半导体，其广泛应用于集成电路、太阳能电池、晶体硅、半导体、彩色液晶屏（TFT-LCD）、光纤预制棒和光化学等领域，是非常重要的半导体基础材料。在集成电路制造过程中，掺杂是在硅片规定的区域内引入所需杂质（如磷、硼等），并达到数量可控、分布符合要求的目的，以实现半导体电学特性的改变，上述磷化物也是集成电路（IC）掺杂的固态磷源。

1952年，德国物理学家海因里希·韦尔克（Heinrich Welker）在西门子实验室里，没有选择去研究当时主流的硅和锗元素，偏偏对Ⅲ-Ⅴ族化合物磷化铟和砷化镓产生了兴趣。他自制简陋设备，熔融、拉晶，制备出一小块磷化铟晶体，检测其电子的迁移率，发现电子在磷化铟中的迁移速度比在硅晶体中快得多，预测磷化铟“可能在高频和光电领域有特殊应用”。20世纪70年代，光纤通信技术开始萌芽，研究人员发现光纤在1 310 nm和1 550 nm两个波长下损耗最低，光信号在光纤里传输几十千米而不衰减，采用磷化铟制成的光纤通信激光器、探测器和调制器能天然稳定地发出这两个波长的光。20世纪80年代，第一批商用磷化铟激光器问世；20世纪90年代，小批量磷化铟衬底开始生产；21世纪20年代，AI（人工智能）算力和光通信需求暴涨，AI大模型兴起，磷化铟与传统硅基材料相比，电子迁移率更高、信号损耗更低，数据传输更快、算力更强，耐高温、抗辐射，已成为800 G/1.6 T光模块中不可或缺的核心基础材料，

成为AI算力“提速器”、6G通信“铺路石”、激光雷达的“火眼金睛”。磷化铟全产业链的上游是铟、磷资源和其高纯元素，中游是磷化铟多晶材料和单晶衬底，下游是外延片，终端是光芯片与光模块。

2.1 *磷化铟制光芯片与光模块*

磷化铟是铟和磷的化合物，一种重要的半导体材料，Ⅲ-Ⅴ族化合物，闪锌矿结构。磷化铟制光芯片与光模块，具有3大优良特性。

（1）磷化铟是直接带隙材料。电子在磷化铟能带间跃迁时，能量可直接高效转化为光子，表明其是一种天然光源材料。AI算力集群的核心瓶颈是数据传输速度，图形处理器（Graphics Processing Unit，GPU）算力每年翻倍增长。单台AI服务器所需的光模块数量是普通服务器的10倍以上，单颗800 G光模块需要4～8颗磷化铟激光器芯，1.6T光模块对磷化铟衬底的需求是800 G的2.7～3.0倍，英伟达Quantum-X交换机单台配备18个硅光引擎，全部依赖磷化铟衬底。激光器、调制器、探测器等是AI算力时代光通信中的核心器件，用磷化铟材料制造这些器件必将更为高效。目前的CPU（中央处理器）、内存、手机芯片几乎都由硅材料制造，硅是间接带隙材料，电子在里面“跳跃”时，释放的能量主要以热能形式耗散，硅几乎不发光，也不擅长处理光，而用磷化铟恰恰弥补了这个缺陷。

（2）磷化铟具有高频特性。其禁带宽度约1.35 eV，电子迁移率是硅的10倍。因具备宽禁带结构、电子迁移率与光电性能远超硅基材料，导热与转换效率出众，可以在更高频率下稳定工作，在制作更高频率或更短波长电子器件方面具有独特优势，可应用于光通信、无人驾驶、人工智能、可穿戴设备等多个领域。在长距离、高速率、高可靠性的高频、高功耗场景中，800 G/1.6 T光模块为主流方案，磷化铟材料撑起FP/DFB/EML电吸收调制激光器、PIN/APD探测器芯片的性能底座，适配电信与数据中心长距离信号传输，800 G光模块是GPU之间的“高速公路”，磷化铟EML芯片则是高速公路上跑车的“发动机”。如果没有磷化铟，800G光模块就是一堆废铁，GPU集群就是信息孤岛。AI数据中心的大规模建设，让这些器件变得“极度紧缺”。

（3）磷化铟具有波长优势。磷化铟EML芯片可以在1 310 nm和1 550 nm两个波段稳定工作，其恰好是光纤通信低损耗的黄金窗口，尤其是在1 550 nm波段，光纤损耗最低，且对人眼安全（车载激光雷达也偏爱1 550 nm光源）。磷化铟衬底能与磷砷化镓铟、磷砷化镓铝等外延层晶格完美匹配，是制造DFB激光器、EML芯片、光电探测器以及光子集成芯片的唯一最优选择。在25 Gbps以上速率的光通信领域，没有可替代磷化铟的材料。磷化铟不但在电信市场有应用，而且在AI数据中心、激光雷达、6G传感这些未来产业赛道，也有良好应用前景。

2.2 *磷化铟多晶材料、单晶衬底和外延片*

磷化铟产业链中游是磷化铟多晶材料和单晶衬底，下游是外延片。磷化铟在制备技术和设备方面存在较高壁垒，导致全球供应商数量相对较少。扩产周期长，建一条新产线需要2～3年。磷化铟产业核心生产工艺如下。

1）合成磷化铟多晶材料。铟的熔点为156.6 ℃，磷化铟在1 062 ℃熔化，该温度下，磷的蒸气压高达2.79 MPa。用7N级（纯度99.999 99%）的高纯铟和7N级（纯度99.999 99%）的高纯磷，在高压、高温下精准反应合成InP多晶材料，反应方程式：In + P → InP。合成难度极大，稍一失控磷就会挥发，使熔体富铟，晶体缺陷随之上升。常用的两种合成路线：水平布里奇曼法（HB），将磷、铟分置在石英安瓿瓶两端，磷端控低温稳定蒸气压，铟端高温熔融后与磷蒸气反应，借温度梯度凝固成多晶锭，优势为磷压独立可控；原位直接合成法，在同一高压炉内完成铟、磷反应与熔体长晶，省去卸料清洗，难点在于磷压与反应终点控制要求极高。

2）多晶生长单晶衬底。多晶材料需重熔后在籽晶上定向凝固得到单晶棒。当前主流工艺有3种：（1）LEC（液封直拉法），采用熔融B_2O_3封盖熔体抑制磷挥发，籽晶上浸提拉生长。适配4/6英寸晶体，生长速度快，但热应力大，位错密度偏高。代表企业是住友电工和JX金属。（2）VGF（垂直梯度凝固法），将多晶料与籽晶置于PBN坩埚内，全熔后温控驱动固液界面上移。该工艺温度梯度小，缺陷少、良率高，但生长速率慢，设备成本高。代表企业是AXT和云南锗业。（3）VB（垂直布里奇曼法），类似VGF，以坩埚/温区机械移动推进固液界面。设备简单、成本较低，但晶体均匀性略差。代表企业是国内部分厂商。

磷化铟单晶生长良率低，目前12英寸硅片已经普及，磷化铟仍停留在4/6英寸，主要原因是磷

化铟脆性强、高温需维持高磷压，尺寸放大后开裂、孪晶、位错等缺陷呈指数级增加，当前全球以4英寸磷化铟为主流，6英寸磷化铟刚进入规模化应用阶段。

3） 在衬底上生长外延层。该外延层是光芯片的核心功能层。激光器、探测器的核心价值在于外延功能层，其在光芯片物料清单中价值占比30%~40%，主流制备技术分为2类：（1）MOCVD（金属有机物化学气相沉积），金属有机源与磷烷、砷烷在加热衬底表面逐层沉积薄膜，适配规模化量产，为当前主流路线；（2）MBE（分子束外延），超高真空下原子束精准沉积，精度极高，但速率慢，多用于前沿研发。

2.3 磷化铟半导体市场发展趋势

全球光电子产业高速发展，磷化铟在光通信、激光雷达、太赫兹通信、医疗检测等领域的应用逐步扩大，市场需求呈现爆发式增长。据预测，2027年磷化铟光电子全球市场规模将达56亿美元，年复合增长率达14%。磷化铟在光模块器件中的应用最为广泛，占据了80%的市场份额。随着全球5G基站建设和AI数据中心需求增加，磷化铟已成为基础设施建设的关键制约瓶颈。2024—2026年全球磷化铟的需求增长了将近3倍，价格逐年攀升，订单已排到2028年以后。

2025年全球磷化铟衬底供需缺口超70%。据Omdia、Yole 2026年4月报告，2025年全球磷化铟衬底需求（折合2英寸当量）200万~210万片，有效产能60万~70万片，供需缺口超70%。2026年需求升至260万~300万片，产能仅微增至75万片左右，缺口仍维持在70%以上。2027年后需求将突破400万片，年增速超50%。按当前扩产计划，供应紧张至少延续至2027年下半年。2021年全球磷化铟衬底外延片市场销售额1.04亿美元，2026年销量将达128.19万片，预计2028年市场规模将达到1.62亿美元。磷化铟衬底价格近两年暴涨3倍，2英寸高端光通信级衬底：2025年年初800美元/片，2026年4月达2 300~2 500美元/片，同比上涨约187%，急单报价破3 000美元/片。6英寸高端衬底：2025年年初1 400美元/片，2026年4月5 000美元/片，同比上涨250%。国内2英寸普通衬底1 200~1 350元/片，主攻中低端市场。全球磷化铟主要供应商有日本住友、日本能源、美国AXT、法国In Pact、英国Wafer Tech等，它们占全球90%以上市场份额，行业产能高度集中。

我国磷化铟市场巨大缺口为国产替代打开了黄金赛道。2026年3月25日，深圳市出台《AI服务器产业链行动计划（2026—2028）》，将光模块列为核心赛道，推动1.6 T/3.2 T迭代与磷化铟技术突破。2026年4月2日，工业和信息化部发布普惠算力专项行动方案，明确推进全光交换技术规模化部署。产业链发展大尺寸化趋势明显，6英寸磷化铟衬底将逐步取代4英寸产品成为主流，进一步降低光芯片生产成本，提升生产效率。随着国内企业在多晶合成、单晶生长、外延制备等环节的技术突破，磷化铟产业链国产化率将持续提升，国产化进程加速。下游光模块、光芯片企业向上游延伸，通过投资、战略合作等方式锁定上游产能，保障供应链安全。

2.4 AI算力互联技术路线预测

AI算力的爆发式增长，高速光互联已成为AI集群的核心命脉。在光通信的核心—调制层领域，硅光（Silicon Photonics）、磷化铟（InP）、薄膜铌酸锂（TFLN）、电光聚合物（EO Polymer）四大技术路线并立，各自凭借独特优势卡位不同场景，共同构成AI光互联的技术底座。

硅光核心竞争力在于与CMOS工艺的天然兼容性，成本低、集成度高，光模块可直接嵌入AI芯片周边，缩短光电转换距离，减少信号损耗，是中高速短距AI光互联、800 G/1.6 T中低端模块的“主力军”，但超高速带宽不足、功耗偏高。随着AI网络向“高速交换+光互联”架构升级，制造能力与良率控制将成为关键壁垒。

磷化铟核心优势在于高频性能与发光能力，是唯一可同时实现高速发光与高速调制的半导体材料，制备的电吸收调制激光器，具备带宽大、消光比高、信号稳定性强等特点，是800G/1.6T，甚至3.2T超高速光模块的核心方案。在AI数据中心长距离高速连接、骨干网相干光通信等场景中，几乎无可替代。但磷化铟晶圆尺寸小、脆性大，全球高端外延片与衬底产能高度集中，扩产周期极长，成本高、产能稀缺、集成度低。未来AI光通信需求爆发时，终端模块或可快速扩产，但上游核心材料磷化铟易供需失衡。

薄膜铌酸锂通过离子剥离技术将传统铌酸锂（块状）薄膜化，彻底解决了材料集成度低、体积大的缺陷，其核心性能全面领先传统方案，带宽超110 GHz（是硅光的2~3倍），原生支持单波400 G及以上速率，驱动电压低于2 V，功耗较硅光降低

30%、较磷化铟降低50%，完美适配AI集群的散热与功耗约束，同时具备超低光学损耗、极致线性度，可满足高阶调制格式需求，被视为下一代高速AI光互联的核心技术，但成本较高，仍处于规模化初期。

电光聚合物的性能精准契合AI数据中心的核心痛点——带宽效率+功耗效率。相比硅光，它具备更高电光系数，可实现超80 GHz带宽、低于1 V的驱动电压，功耗与热损耗大幅度降低，同时材料成本更低、加工工艺更简单，理论上可实现更低成本的规模化生产。当AI集群规模持续扩大，低功耗特性恰好匹配未来超大规模智算集群的互联需求。

综上，AI光通信的四大调制路线，是差异化互补、长期共存的格局。短期，硅光主导规模化中高速市场，磷化铟主导超高速高端场景；中期，薄膜铌酸锂抢占高端调制器市场；长期，电光聚合物有望凭借低功耗颠覆性优势，成为AI超大规模集群互联的核心技术。因此，磷化铟产业发展也存在一些不确定因素，中长期调制技术发展可能出现磷化铟替代风险，或分流磷化铟部分应用场景；全球厂商扩产节奏提速，供需缺口可能提前收窄；国内磷化铟出口许可审批趋严，影响海外订单交付；原材料铟价格持续上涨，增加产业链下游企业的生产成本等。

3　磷化铟原料高纯铟资源

磷化铟的核心原料为铟和磷，是整个产业的根基。磷化铟生产需7N级（纯度99.999 99%）以上高纯铟和高纯红磷，产业技术壁垒在于铟和磷原料的纯度。纯度等级通常以“N”（数字9的个数）来衡量，定义了材料从“工业级”到“战略级”的战略价值。4N级（99.99%），工业级高纯，适用于普通电子、建筑、一般工业合金；5N级（99.999%），高纯级，进入半导体封装、高端合金、高端电池领域；6N级（99.999 9%），超高纯级，半导体先进制程（14 nm及以下）、高端靶材的“入场券”；7N级（99.999 99%），极致超高纯级，满足3 nm及更先进制程芯片的核心需求，被国家列为关键战略材料。纯度改变是物理化学性能的质变—杂质浓度每降低一个数量级，材料的导电性、导热性、延展性、抗腐蚀性都可能发生根本性跃迁，纯度跃迁带来的不仅是性能提升，更是市场价值的几何级增长。

3.1　铟资源

铟（元素符号In，英文Indium）单质呈银白色并略带淡蓝色，质地非常软，可塑性强，是目前所公认的8种（铟、镓、锗、硒、镉、碲、铼、铊）稀散元素成员之一。铟在地壳中质量分数仅为0.000 005%，大约只有最常见稀土元素（如铈）的1/170左右，不足黄金的1/200，且95%以上伴生于锌、铅矿中，无独立经济可采矿床，供给端极具刚性。美国地质调查局（USGS）2008年统计（一直未更新），全球铟矿储量1.1万t，基础储量为1.6万t。全球铟资源量预计7.6万t，但其中可开采的仅50%。据《“双碳”目标下中国光伏产业铟需求预测》，全球铟资源储量主要分布于中国、秘鲁、美国、加拿大、俄罗斯等国家，合计占全球总储量的83.1%，其中中国储量8 000 t，约占全球储量的75%。铟主要以伴生矿形式开采，作为锌、铅和铜等金属的副产品提取，难以单独开采。目前通过工业提纯的方法生产金属铟，回收率大约50%。铟资源回收再生是精炼铟的另一个重要来源，近年来产量已超过矿产原生铟。中国的精铟生产企业分为两类，第一类是锌冶炼企业，第二类是以冶炼渣、灰、泥，钢厂烟灰、尘泥等为原料，以精铟等稀贵金属、锌锭、硫酸锌、次氧化锌为主要产品的企业。根据美国地质调查局（USGS）数据，全球精炼铟产量约2 500 t/a，其中中国约占70%（2024年产量1 726 t），韩国约占17%，日本约占6%，美国和其他国家合计约占7%。中国是全球领先的铟生产、精炼和出口国。中国含铟资源的矿区数近百个，其中，完全开发和部分开发的矿区数超过一半，未开发的矿区数不到一半。中国是全球唯一具备“铟资源–提纯–深加工”全链条供给能力的国家。

由于全球稀缺性与中国绝对垄断，铟是典型的稀散金属，使得中国在全球铟产业链中占据绝对主导地位。中国于2025年2月将铟纳入出口管制清单，当年4月进一步加强对磷化铟及铟金属管制，进一步收紧全球供给通道。精铟价格从2025年3月的2 300 ~ 2 400元/kg翻倍至当前的5 500元/kg，涨幅约140%，价格创下近十年新高。随着AI、新能源、人形机器人、商业航天等新兴产业爆发，铟的战略价值正迎来历史性重估。2026年金属铟价格继续上演“火箭式”上涨，从年初约2 500元/kg，短短一个多月飙升至4 300 ~ 4 700元/kg，涨幅达88%。

铟作为AI算力时代的“战略命脉”，广泛应用于制造触摸屏、液晶显示器和太阳能电池等高科技产品。铟的主要用途之一是制备铟锡氧化物（ITO），该材料是平板显示触摸屏的核心材料，能

够提供高透明度和导电性。铟也是太阳能电池铜铟镓硒（CIGS）薄膜的关键原材料。在全球铟的需求构成中，ITO靶材占据主导地位，需求占比高达72%，而电子半导体、焊料与合金分别占比11%和12%。根据华经产业研究院《2025年中国精铟行业市场现状及前景展望》，2024年全球精铟消费量为2 068 t。我国铟产业体量较小，铟进出口表现出明显的市场集中性，每年都有大量的初级铟产品出口到日本、韩国等国家，但高端大尺寸ITO靶材等基本依赖进口。进口方面主要来自日本、韩国、德国和美国，其中日本占比最大，主要来自云南省对日本的未锻轧铟进口。出口方面，韩国是最大出口市场，其次是中国香港、新加坡、日本和美国，主要是广东省的来料加工贸易和一般贸易。

3.2 高纯铟制备

高纯铟（7N级以上）将半导体信号传输速率提升20%，目前高纯铟的制备方法主要有电解精炼法、真空蒸馏法、区熔法、单晶直拉法，以及升华法、萃取法等。电解精炼法是根据不同杂质元素的电位差别，化学电位比铟低的杂质元素沉积在阳极，而化学电位高于铟的杂质元素残留于电解液中，从而达到提纯的目的；真空蒸馏法是利用铟熔体中各杂质元素饱和蒸气压的差别，通过控制蒸馏温度和真空条件，使各杂质元素选择性挥发和冷凝，各自富集于气相或残余液相中；区熔法是利用选分结晶原理，即凝固过程中液相和固相成分差异特性，达到纯化金属的目的；单晶直拉法基本原理类似于区熔法，同样基于选分结晶凝固偏析，实际生产中通常需要两到三次重熔直拉。电解精炼法作为工业生产普遍应用的方法，难以去除与铟电位相近的Cd、Tl等杂质，且必须在前期加入熔盐进行预净化处理；真空蒸馏法可以有效去除铟金属中的Cd、Zn、Pb、Tl等杂质元素，生产过程中不产生废液、废气，但产品收得率低；水平区熔法难以调控熔区宽度，改为垂直区熔后，施加冷却系统可以制备出超高纯铟；单晶直拉法通过反复提拉能够制备出超高纯铟，但生产成本高，产品质量不稳定。

我国是全球铟资源和国际原生铟供应第一大国，但铟产品集中在中低端，7N级高纯铟仍需要通过国外再加工反向输入，进口依赖度达68%。法国Recylex、美国铟泰公司、欧洲金属公司、日本同和集团和三菱株式会社都拥有较为稳定成熟的6N、7N级高纯铟生产技术。2026年1月22日柳州华锡有色设计研究院负责运营的我国铟锡资源高效利用领域唯一的国家工程实验室——铟锡资源高效利用国家工程实验室，成功研发并制备出纯度达7N级（99.999 99%）的超高纯铟产品（经权威第三方检测，各项指标均达到行业领先水平），且具备量产超高纯铟的能力，可直接满足半导体、AI光模块等高端领域的严苛应用需求。

铟资源与高纯铟资源主要企业：锡业股份，全球原生铟储量与产能双龙头，控股华联锌铟为全球最大原生铟生产基地，铟年产能约127 t，国内市场占有率近30%，可量产6N、7N级高纯铟，资源自给率100%，为磷化铟产业链核心原料主力供应商；株冶集团，全球铟产量龙头，以锌冶炼副产回收铟为主，2024年铟产量127 ~ 142 t，占全球总产量的61%，精铟年设计产能60 t，实际超产显著，铟回收率98%以上，成本行业最低，供应5N、6N级高纯铟，是国内铟原料稳定供给的核心力量；有研新材，7N级高纯铟产能全球第一，占国内35%市场份额，同时布局磷化铟衬底业务，4英寸衬底量产、6英寸衬底中试，实现“铟提纯–磷化铟衬底”垂直整合，为国内光芯片企业自主供料；锌业股份，亚洲最大半导体用铟供应商，铟年产能约60 t，可量产6N、7N、8N级超高纯铟，技术领先，产品定向供应半导体、光电子领域，在ITO靶材领域全球市场占有率超30%；豫光金铅，依托铅锌冶炼副产回收，实现7N级超高纯铟小批量量产，与河南本地磷化铟厂商铭镓半导体深度合作，原料直供中游衬底厂商，为区域磷化铟产能核心配套企业；盛和资源，稀散金属综合回收龙头，具备高纯铟制备能力，产品纯度达半导体级，适配磷化铟原料需求，为国内铟供给重要补充。

铟是不可替代的战略金属，需求长期由AI、光伏、半导体驱动。供给端受伴生属性限制+出口管制收紧，价格兼具商品属性与贵金属金融属性，高位震荡仍是主线。铟资源的伴生性、储量的不完全确定性，给全球铟资源的可持续供应带来风险，一定程度上制约铟资源配置利用，影响铟相关产业可持续发展。近年来，铟价持续上涨进一步刺激冶炼厂的积极性，叠加湿法炼锌浸出渣处理的技术改革提升了铟等副产品的回收效率，全球铟产量保持小幅增长态势。

4 磷化铟原料高纯红磷资源

4.1 磷资源

1669年，德国汉堡人汉林·布朗德（Hennig Brand）首先发现了磷。他在强热蒸发人尿的过程

中，偶然在曲颈瓶接收器中发现一种像白蜡一样的白色固体，在黑暗的小屋里闪闪发出蓝绿色火光，遂以kalte feuer（德文，冷火）命名这种物质为“磷”。磷的拉丁名称phosphorum，由希腊文phos（光）和phero（携带）组成，意思是“light bringer，发光物”。磷的英文是phosphorus，化学元素符号P，元素周期表中第三周期第15族第Ⅴ主族（ⅤA）氮族，原子序数15。磷元素晶体为简单立方晶胞，有黄磷（白磷）、红磷（赤磷）和黑磷（紫磷、金属磷）3种同素异构（形）体。

磷蒸气在隔绝空气的条件下迅速冷却可得到黄磷。黄磷在常温下就有很高的化学活性，在空气中缓慢氧化，表面积聚的热量使温度达到40 ℃时，便达到了黄磷的燃点，引起自发燃烧；60 ℃时在空气中自燃，形成白色的烟雾P_4O_{10}。所以黄磷必须贮存在密闭容器里，保存在冷水中，少量的黄磷也须储存在水中。黄磷不溶于水（15 ℃，饱和溶液含磷质量分数为0.000 3%），难溶于乙醇、甘油，易溶于乙醚、苯和二硫化碳等溶剂，可溶于热的浓碱溶液，生成磷化氢和次磷酸二氢盐。在氧气不足、潮湿情况下，黄磷能够发生缓慢氧化，产生的能量以光的形式放出，在暗处能够看到“磷光”现象，平时所说的“鬼火”，就是动物或人体骨骼中的磷缓慢氧化所发出的磷光。将黄磷蒸气加热到800 ℃，P_4开始分解为P_2，这时的双原子分子结构（:P≡P:）与氮分子相似。黄磷在充足的空气中易自燃，生成P_2O_5和其他氧化物。P_2O_5为白色固体物质，吸水性极强，与水化合生成偏磷酸和磷酸。我国磷酸生产中常使用黄磷制备热法磷酸。如果空气不足则生成P_2O_3。干燥的氯气与过量的磷反应生成三氯化磷，过量的氯气与磷反应生成五氯化磷。在含磷化合物中，磷原子通过氧原子而和别的原子或基团相联结。磷蒸气在隔绝空气的条件下迅速冷却将得到黄磷。

1845年，奥地利化学家施勒特尔发现了红磷。红磷有7种变体，呈深红色、褐色到紫色的粉末状固体，毒性很弱，略溶于无水乙醇，不溶于水、二硫化碳和有机溶剂。密度2.34 g/cm^3，熔点59 ℃，沸点200 ℃，燃点（着火点）240 ℃，加热到400 ℃以上才着火。黄磷在没有空气的条件下，加热到260 ℃或在常温时光照下就会转变成红磷，黄磷经放置或在400 ℃密闭加热数小时可转化为红磷，而红磷加热到416 ℃就升华变成蒸气，它的蒸气冷凝后就会重新变成黄磷。红磷的化学活性比黄磷小，在空气中氧化很慢，但易被氧化剂所氧化，如被硝酸氧化成磷酸。红磷与氯酸钾（$KClO_3$）一起摩擦即着火燃烧，甚至发生爆炸，可以利用这个特性来制造安全火柴。红磷的变体有紫磷、金属磷，略显金属性，能导电，故有“金属磷”之称。

红磷不是磷的某一单独变体，而是一种复杂的高分子固态聚合物，为黄磷的聚合体。红磷的结构至今还不十分清楚，有人认为，红磷是四面体结构的P_4分子断裂开1个键之后连接起来形成的长链状巨大分子。黄磷与红磷的物理性质如表1所示。

表1　黄磷与红磷的物理性质

Table 1　Physical properties of yellow phosphorus and red phosphorus

品名	色、态	溶解性	密度/(g·cm^{-3})	着火点/℃	受热熔化温度(隔绝空气)/℃	毒性	关系
黄磷(P_4)	白色或浅黄色，蜡状固体	不溶于水，易溶于CS_2	1.82	40	44	剧毒	相互转化
红磷	暗红色，粉末	不溶于水，也不溶于CS_2	2.34	240	416 ①	无毒	相互转化

注：416 ℃升华。

我国已查明磷矿资源储量203.1亿t，全球排名第二，仅占世界5%左右，云、贵、川、鄂、湘5省磷矿查明磷矿资源储量163.3亿t，占全国的81.4%。我国磷资源以中低品位磷矿为主，平均品位$w(P_2O_5)$仅为16.85%。按照推动磷化学品产业链向新能源材料、电子化学品、功能性精细化学品等领域延伸的目标方向，电炉制黄磷（热法黄磷）是实现这一目标的重要抓手。

黄磷作为由P_4分子构成的高活性磷同素异形体，其生产主要依赖电炉高温还原磷矿石的热法工艺，将磷矿、焦炭、硅石放进高温电炉内，加热还原出黄磷蒸气，冷却后变成液体黄磷。电炉制黄磷生产中电耗占生产成本的40%左右，全国平均电耗为14 000 kW·h/t，综合能耗折标准煤3.6 t/t，行业准入条件先进值为13 200 kW·h/t和标准煤3.2 t/t。每生产1 t黄磷，产生磷炉尾气2 500 ~ 3 500 m^3、炉渣8 ~ 10 t，磷炉尾气和炉渣利用价值较低。热法黄磷是全球工业体系中高附加值磷化合物的核心原料，在现代工业链条中占据不可替代的基础地位，通过衍生转化可形成磷酸、三氯化磷等关键中间体，广泛支撑化肥农药、阻燃材料、电子化学品及磷酸铁锂（LFP）电池等多领域发展，其产业发

展质量对全球产业链供应链稳定具有重要影响。20世纪90年代后期开始，我国黄磷产能、产量一直处于上升领先地位，美国、欧盟处于下降趋势。目前世界黄磷供给主要在中国、越南、哈萨克斯坦。2014年，我国黄磷产能达到240万t，产量首次突破百万吨大关（102.5万t），产能、产量分别占世界的88.24%、89.91%。“十二五”“十三五”“十四五”期间我国黄磷产量分别为465.5万t、439.34万t、400万t（估算）。主要生产企业：云南宣威磷电有限责任公司（产能8万t/a）、云南弥勒市磷电化工有限责任公司（产能7万t/a）、云南江磷集团股份有限公司（产能7万t/a）等，贵州瓮福黄磷有限公司（产能11.6万t/a）、瓮安县龙马磷业有限公司（产能5万t/a）、贵州黔能天和磷业有限公司（产能9万t/a），四川川南达凯瑞磷化工公司（产能6万t/a）、会东金川磷化工有限责任公司（产能5万t/a）、四川攀枝花众立成化工公司（产能6万t/a）、湖北吉星化工有限责任公司（产能5.3万t/a）等。

4.2 高纯红磷制备

磷化铟生产需要6N、7N、8 N级及以上高纯红磷单体原料，它是合成磷化物半导体的主要材料之一，可用于合成磷化铟等半导体材料，也可用作IC掺杂的固态磷源，广泛应用于集成电路、太阳能电池、晶体硅、半导体、TFT-LCD、光纤预制棒和光化学等领域，是非常重要的半导体基础材料。

高纯红磷单体原料一般先以电炉法工艺制备工业级黄磷，再经过除杂提纯净化，最终转化为高纯红磷原料。工业级黄磷纯度一般为99.5% ~ 99.8%，主要杂质包括砷、铁、锑、硅、硫、锰、铝、铬、有机物、固体颗粒等。高纯红磷通常由工业黄磷净化制得，净化方法主要分为化学净化法和物理净化法。化学净化法主要包括氧化法、碘化物法和萃取法。氧化法中又分为早期的硝酸或硝酸–硫酸混酸法，以及后期开发的水相氧化法。化学净化法是工业黄磷精制工艺流程中前置技术手段，主要用于脱除砷、锑等杂质离子。我国化学净化法发展最迅速的是水相氧化法、有机溶剂萃取法等。在化学净化法后再采用吸附、区域熔融等物理精制法组合，将黄磷进一步精制到5N、6N、7N级水平。化学净化法砷脱除率高，但在精制过程中较难脱除试剂带入的杂质离子。物理净化法主要包括真空蒸馏法、活性炭吸附净化法、电磁净化法、区域熔融法、微米过滤净化等。化学–物理相结合的净化法包括水相氧化–吸附黄磷精制技术、带氧化增强剂的水相氧化–吸附黄磷精制技术、有机溶剂萃取–区域熔融–微滤精制技术等。国内高纯红磷典型的2种工艺均是以多种除杂工艺相结合的方法：第1种，工业级黄磷→吸附→过滤→酸洗→蒸馏→精制黄磷→区域提纯→红磷转化→高纯红磷；第2种，工业级黄磷→酸洗→氯化三氯化磷→精馏提纯→还原→红磷转化→高纯红磷。该工艺采用高纯氢气还原高纯三氯化磷来制备高纯红磷，其优点是原料带入的杂质少，红磷纯度高。缺点是常压法工艺过程转化率低，产品密度低（夹带气泡）、副产氯化氢易造成设备腐蚀等问题，需要有稳定的高纯氢气来源，采用该技术的工业化高纯红磷装置已经在云南楚雄川至电子材料有限公司投产。

国内半导体、动力电池等领域对高纯红磷需求持续攀升，7N级以上高纯红磷产能不足，长期依赖从日本和德国进口，价格与供应易受国际市场波动影响。半导体行业（如磷化铟、先进制程芯片等）、新能源行业（如固态电池添加剂）、光伏行业（如TOPCon电池磷掺杂工艺）等行业的国产化加速，对“自主、稳定、可控”的供应提出刚性需求，国内产能扩建迫在眉睫。我国兴发集团依托高纯黄磷产能，向下游磷化铟领域延伸；南大光电子公司飞源气体实现技术突破，是国内唯一规模化生产6N级磷烷的企业。

5 结语

磷产业目前正处于由传统产业向现代化产业体系跃升的关键时期，实现磷产业的高质量、可持续发展亟须产业科技革命和产业变革，推动新兴和未来产业与磷产业相融共促、相得益彰。随着磷资源加工“精细、专用、高质、高值、高端和绿色化”的产业发展定位，高纯磷和洁净磷酸的市场需求急剧扩大。

为有效解决目前传统电炉制黄磷工艺高能耗、磷炉尾气和炉渣处理以及磷矿资源合理利用等问题，在将氢能应用场景由燃料电池汽车向交通、工业等具备条件的多元领域拓展，提升清洁低碳氢供给能力的政策要求下，以及各种新型能源技术的发展和大规模应用已成熟条件下，传统电炉制黄磷（热法黄磷）工艺创新的紧迫性和可行性增大，“新能源+氢制磷”制黄磷技术开发及产业化成为黄磷行业技术进步的期盼。欢迎校企专家合作，共同开展电炉制黄磷创新工艺技术开发。