

光伏产业现状

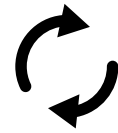
人类的生存与发展离不开能源,如石油、煤炭等传统化石能源,由于自然资源匮乏以及在使用过程中对大自然的损害,促使全球各地积极寻找蕴藏丰富、环境友好的可再生能源。太阳光是可被人类使用的储量最充足的洁净能量之一,通过利用光电效应把太阳光转化为电能,就可以在充分利用太阳光的同时减少对环境的污染,所以全球各地近年来都大力发展光伏发电,各地政府不断出台的产业扶持措施促进了光伏行业蓬勃发展,目前光伏产业已经是全世界增长最快的新兴产业之一。由于硅元素具有光电效应,且其具有清洁、无污染和可再生循环的特点,所以在光伏领域,大多使用硅光伏电池完成太阳能到电能的转换。



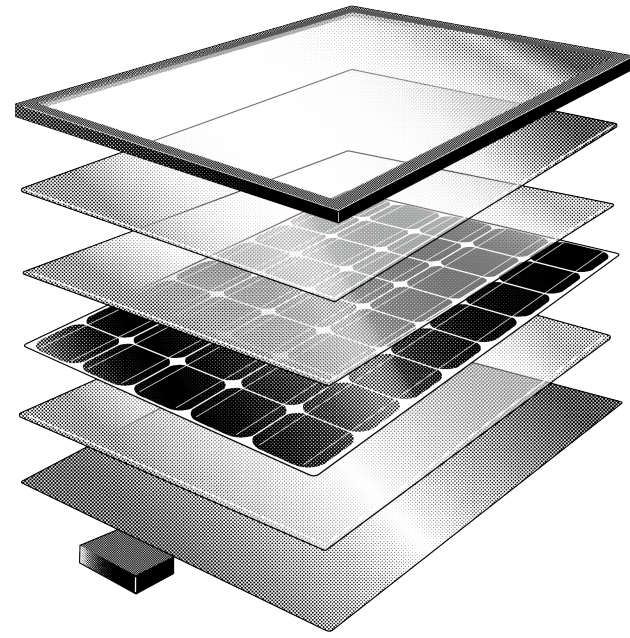
清洁



无污染



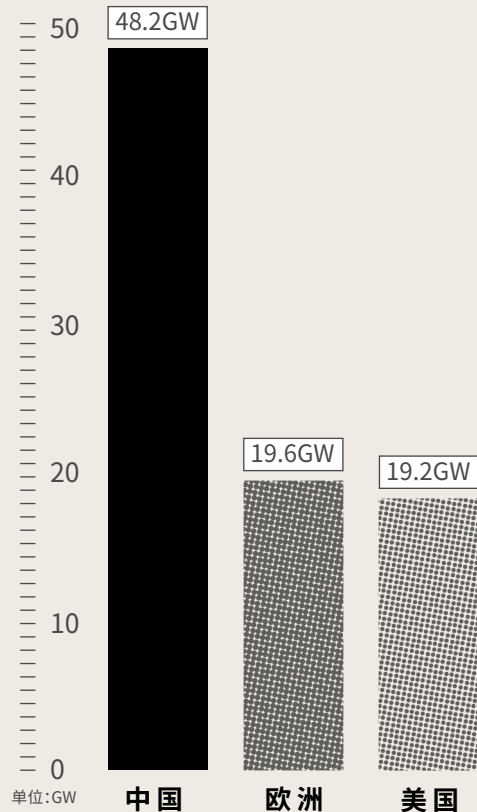
可再生循环



太阳能级硅应用前景及 《一种真空连续熔炼提纯太阳能级硅材料的设备》

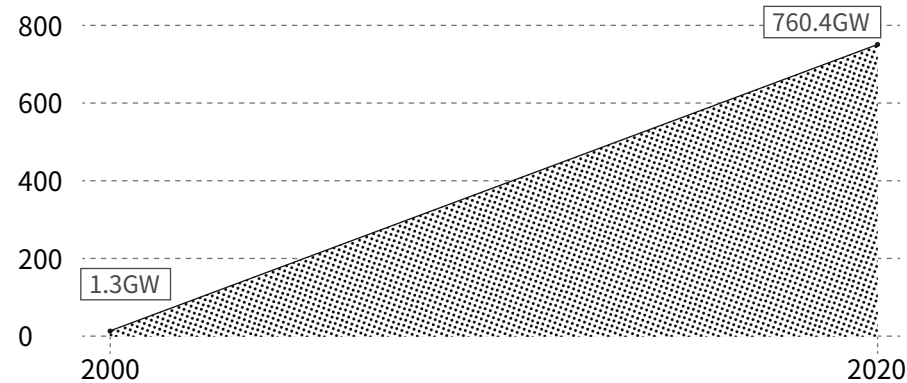
——专利技术成熟度研究与相关分析

新光伏容量前三国家



欧洲光伏产业协会统计数据

根据欧洲光伏产业协会统计数据,世界光伏累计装机容量由2000年的1.3GW增至2020年的760.4GW,并且世界光伏的新装机容量仍保持着较快上升态势,其中有二十多个国家的新光伏容量突破了1GW。



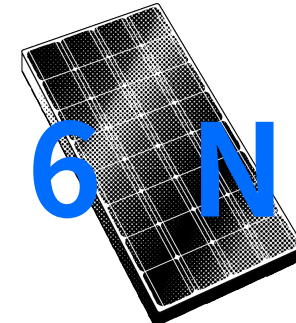
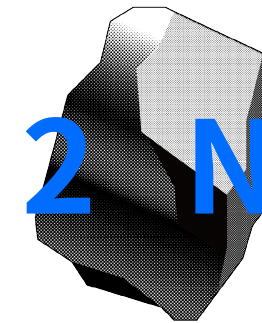
到2020年底,我国太阳能发电设施容量将超过1.6亿千瓦,年发电量将超过一千七百亿千瓦时,年的总建设成本为二千多亿元。其中,地面光伏发电的总装机容量将超过1.5亿千瓦,地面电站8000万千瓦,分布式光伏电站七千万千瓦。按照国际再生能源署的预计,至二零三零年世界光伏累计装机容量将已超过1721GW,而中国未来的光伏发电规模仍将快速持续增长。而尽管目前我国的太阳能光伏发电装机容量增加速度很快,但在全球发电的累计装机容量中所占比例还是相对较小,所以中国光伏行业的未来潜力仍然很大。

太阳能级硅介绍

多晶硅类别

冶金级硅

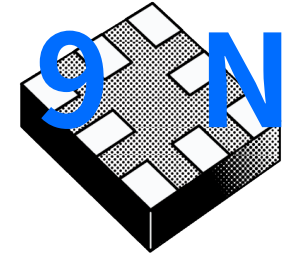
MG-Si, 纯度为99% (2N)
纯度较低,用于冶金、机械行业,多被用作原材料制备高纯度的太阳能级硅和电子级硅。



太阳能级硅
(SOG-Si, 纯度99.9999% (6N))
纯度较高,用于太阳能电池芯片的制作。

电子级硅

(EG-Si, 纯度99.999999% (9N))
纯度极高,主要用于半导体芯片制造。

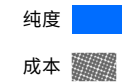


近年来,由于世界经济社会的高速发展,对化石资源的需求量不断提高以及人类不当的利用,造成了世界上化石资源匮乏以及生态环境问题的日益突出,基于此现状以及“碳达峰”,“碳中和”的大背景下,开发清洁的、安全的和可再生的能源对于保障能源安全,环境保护和经济可持续发展具有十分重要的意义。其中,具有环境友好、能源安全、高效便利和再生循环特点的太阳能光伏发电技术日益受到世界各国的关注,光伏发电行业市场前景持续加大,已成为了关系到我国未来发展技术和资源等方面的全局性发展方向与优势地位的关键战略资源。^[1]

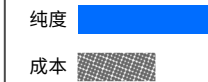
多晶硅类别分析

如何解决光伏行业对多晶硅电池产品的巨大需要,发展太阳能用高纯度多晶硅的低成本制造工艺,是全球光伏行业竞争的重中之重。

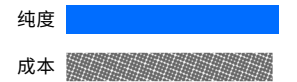
冶金级硅虽然获取成本较低,但其纯度较低,无法满足光伏行业需求,故常常作为原材料参与到生产高纯度硅的工艺中。



介于冶金级硅和电子级硅之间的太阳能级多晶硅既满足太阳能电池对于硅纯度的需求,又相对降低获取成本。



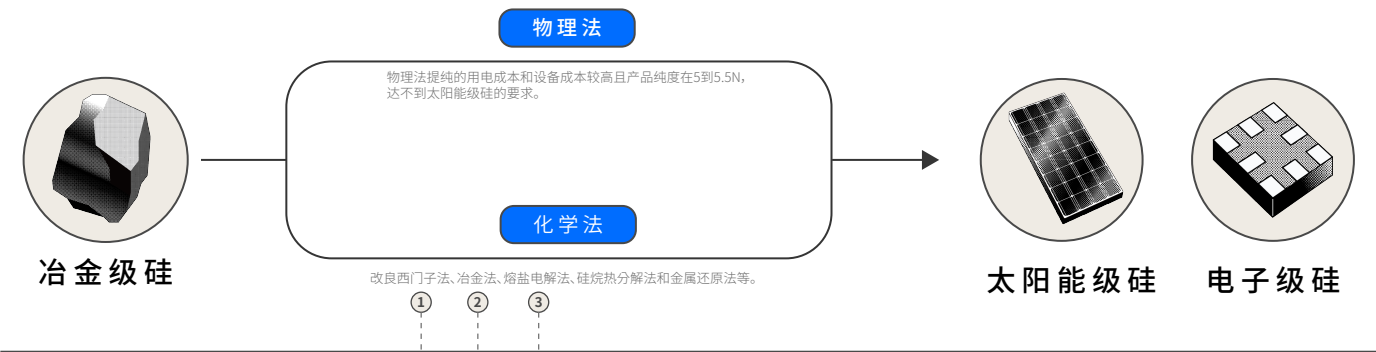
电子级硅纯度极高,虽然满足光伏电池的纯度要求,但是制备成本极高,且高于大多光伏电池的硅纯度需求,故常常被用于少数需求十分苛刻的领域,不适合在光伏行业大面积推广。



因此,太阳能级多晶硅是可以大力开发的高纯度,低成本光伏发电产业原材料,因其清洁、无污染和可再生循环的特点被广泛应用,在光伏产业领域占据巨大市场,具有十分重要的研究意义。

多晶硅的制备方法

如何制备高纯度,低成本的多晶硅是一个关键性的问题,多晶硅生产的本质是冶金级硅经过去杂和纯化得到太阳能级硅或电子级硅,提纯的主要方法有化学法和物理法。^[4] 由于物理法提纯的用电成本和设备成本较高且产品纯度在5到5.5N,达不到太阳能级硅的要求。^[5] 因此目前多晶硅的生产多以化学方法为主,主要有改良西门子法、冶金法、熔盐电解法、硅烷热分解法和金属还原法等。^[6]



1 改良西门子法

改良西门子法所得多晶硅纯度较高,生产效率较高且性能稳定,但由于工艺过程中涉及到了氢气、三氯氢硅等易燃易爆的物质,该方法具有一定安全隐患,且工艺流程较长,导致能耗成本高。

2 冶金法

冶金法中,被提纯主体硅不参与反应,因此可大幅度减低污染,主要包括过湿法冶金、吹氧造渣、定向凝固、真空熔炼等技术。

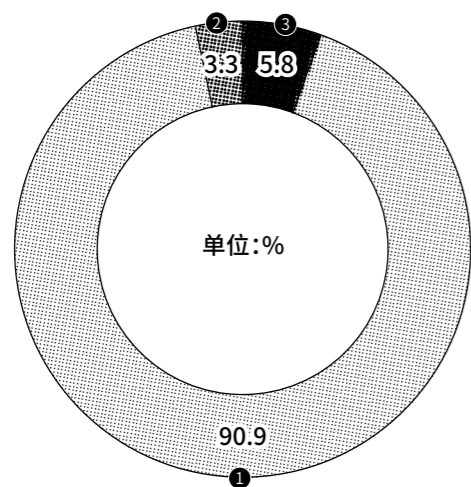
3 熔盐电解法

熔盐电解法无腐蚀性气体产生,安全,且在拥有许多绿色的发电措施,电能充足且成本相对不高。^[6]

不同类型多晶硅占比

不同类型多晶硅占比百分比图

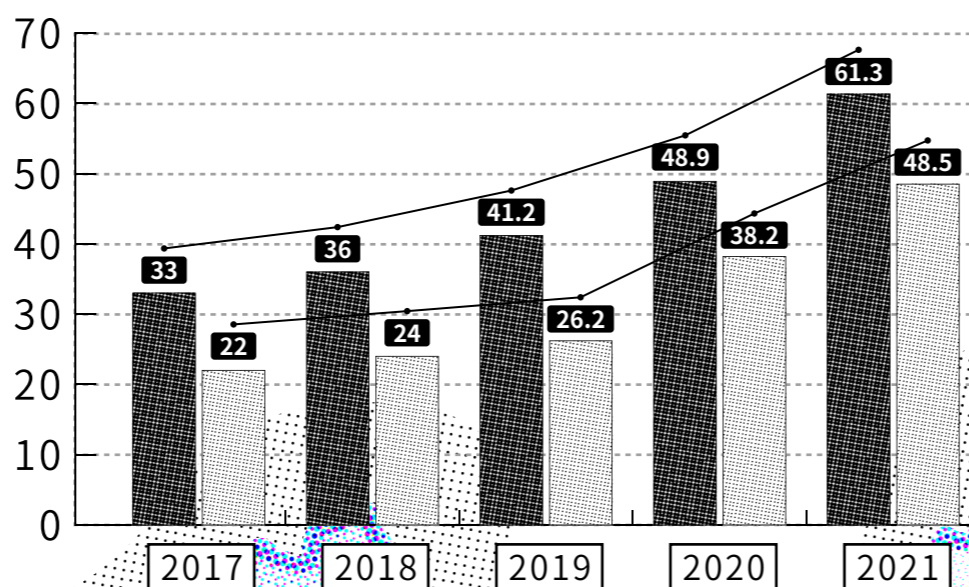
- ① 太阳能级多晶硅
- ② 电子级多晶硅
- ③ 颗粒硅



随着全球光伏行业的快速发展,近五年全球多晶硅产量逐年增长,2020年全球多晶硅产量为52.1万吨,2021年产量达63.2万吨,增加23.2%,为近年来增速的最高值。2021年全球多晶硅生产中,电子级多晶硅产量约为3.7万吨、太阳能级块状硅约为58.4万吨、颗粒硅约为2.1万吨,在世界多晶硅总产量中的占比分别为5.8%、90.9%和3.3%。2020年全球多晶硅产能为64.2万吨,2021年产能达到了77.4万吨,同比增长20.6%,其中新增产能主要集中在中国。

太阳能级硅市场现状

2017-2021年中国多晶硅产能和产量

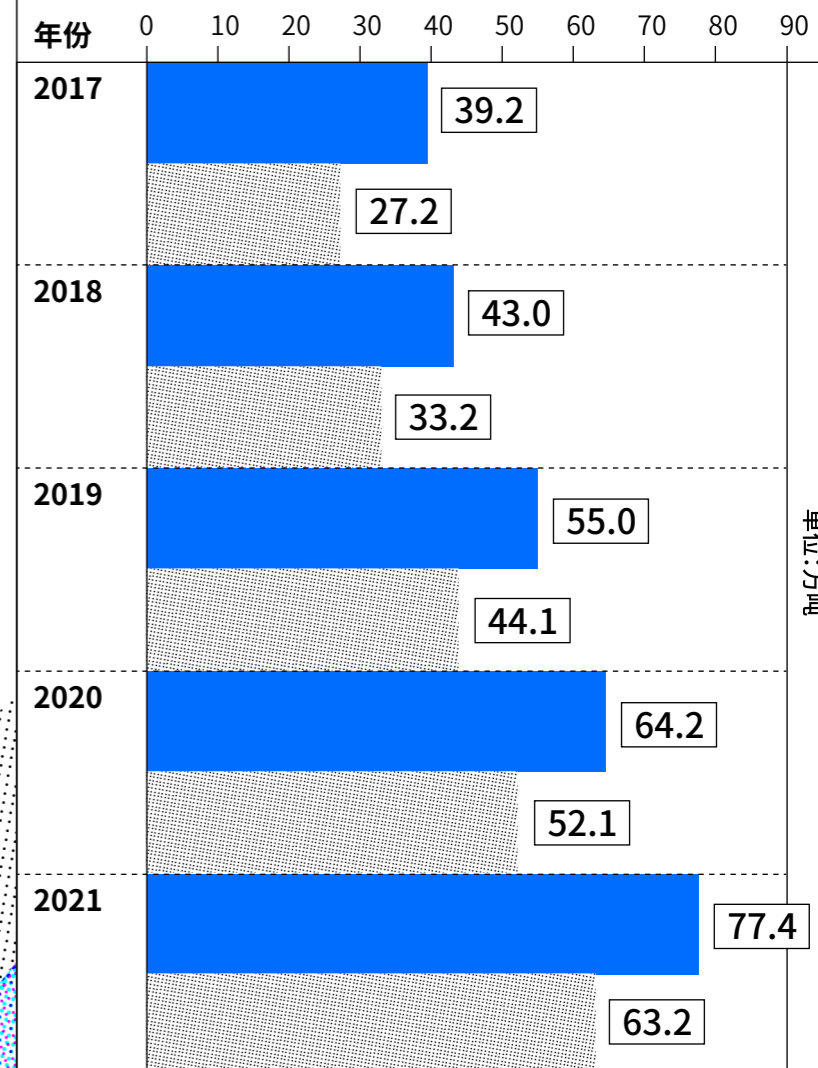


单位:万吨

● 产能 ● 产量

世界多晶硅产能和产量

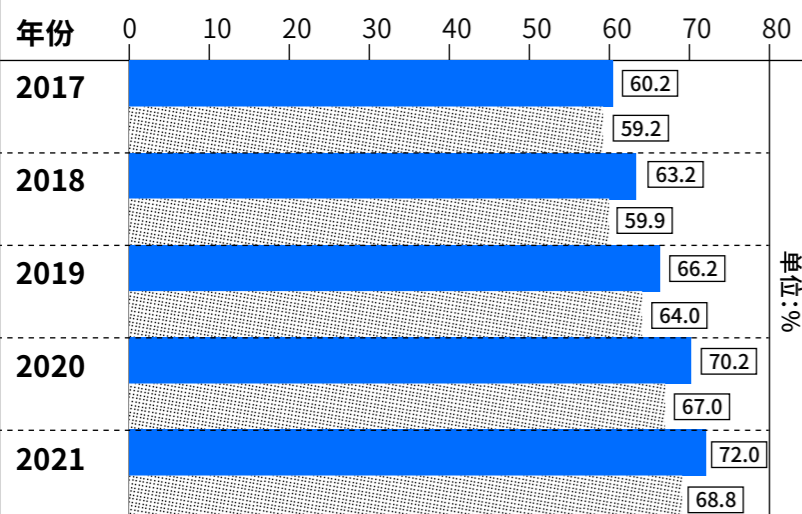
2017-2021年世界多晶硅产能和产量图



单位:万吨

中国多晶硅产能和产量占世界比重

中国多晶硅产能和产量占世界比重百分比图



单位:%

由于行业技术壁垒相对较高,而欧美,日韩等先进国家从上世纪八十年代开始,就投入了大量资金开始研究,产线投入资金也起步较早,因此多晶硅料的主要生产技术也曾一度掌握在美,德,日,韩等外企手中。由于中国光伏产业的发展迅猛,经济增长势头强劲,市场前景广阔,对多晶硅产品也产生了相当大的需求,因此目前全球多晶硅产业向中国的转移趋势很明显。2021年中国多晶硅产能占全球的80.49%,产量占全球的78.82%。

我国多晶硅生产企业不断地推进技术发展,优化提纯工艺技术水平,国内多晶硅行业逐渐逐渐在光伏材料市场占据一席之地。中国的太阳能光电领域制造业在二零零五年左右受欧美国家市场的推动下开始迅速发展起步,产品也大多是向国外市场输出,但随着晶硅的太阳能电池应用的进展迟滞也造成了多晶硅的提纯工艺技术起步迟滞,直到欧盟金融危机和欧美政府对中国采取“双反”措施之后,中国的应用领域才开始慢慢打开。中国多晶硅行业目前仍然面临低价值的产品供过于求,生产能力严重过剩,技术壁垒有待突破的技术瓶颈,高纯硅生产还处在较低水平,高新产品大部分依靠进口,正处于产品竞争力不高以及典型的结构性生产能力严重过剩和新产品科技含量不高,需要大量的研究突破新的技术瓶颈。世界上也存在多晶硅产销不平衡的现象,多晶硅太阳能电池主要生产区域与主要应用市场并不一致,产量产能较高的国家并不完全是应用市场最大的国家,且两级分化会愈加明显,导致多晶硅产业链庞大且不断扩大。

太阳能级硅发展前景

政策利好行业发展

- 《可再生能源中长期发展规划》
- 《关于完善太阳能发电上网电价政策的通知》
- 《关于促进光伏产业健康发展的若干意见》
- 《电子信息制造业“十二五”发展规划》

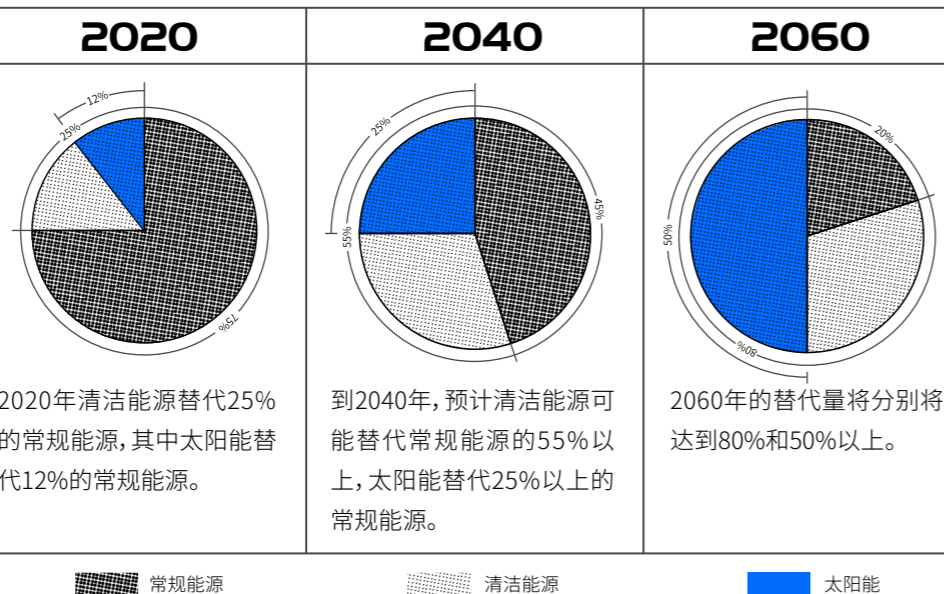
在国家提倡“双碳”经济战略的政策背景下，经过中国持续的节能、减排，我国在未来对化石能源的需求将会逐步减少，取而代之的将是储备比较丰富、无污染和对环境友好的清洁能源。而太阳能则是目前已被世界上普遍利用的储量比较丰富的清洁能源之一，可运用于光伏发电中，在充分利用太阳能的同时降低对人类健康的危害和环境污染。

光伏发电是全球目前成本最低、最稳定、最容易大规模使用的新能源，具备了安全可靠、不用消耗大量资金、不受国家能源分配范围限制、建设周期较小等诸多优势，我国积极应对全球性能源危机、推动绿色发展与可持续发展的重要措施，对调整和完善我国能源格局、节能减排、提高环境生态水平具有重要意义。

国家政策上高度重视对太阳光资源的合理利用，近年国家发改委颁布的《可再生能源中长期发展规划》、《关于完善太阳能发电上网电价政策的通知》、《关于促进光伏产业健康发展的若干意见》等一系列国家重要产业政策，极大的推动了我国光伏行业的科学发展。工信部印发《电子信息制造业“十二五”发展规划》，规划中提出，在太阳能光伏领域将着力扶持发展高纯度、低能耗、价格较低、副产物含量低的太阳能级多晶硅产业及其制造设备和配套产品，并帮助重点企业进一步增强科技创新和在光电领域的核心竞争力，进一步深入开拓光电领域，从而打破生产高质量、高纯度太阳能级硅产品受制于国外限制，需要大量依靠进口的局面，也进一步促进了中国光伏产业加快发展。

需求量大

按照全球再生能源机构、欧盟联合研发机构以及全球光电工业协会的评估，基于太阳光能源独一无二的清洁高效能源优势，应用发展前景将非常巨大，预测在二零四零年全球光伏发电量将达到世界总发电量的百分之二十，并且在未来几十年世界上的太阳能光电生产范围还将不断拓展，到了二十一世纪中叶，太阳能光伏发电资源将成为全球的最重要基本资源之一，将在全球资源结构中占据着关键位置，甚至不可取代的重要作用。虽然当下我国的太阳能光伏发电行业工艺和技术水平并未处于世界前列，但随着太阳能作为新能源在全球普及发展的大趋势背景下，被列为人类战略性新兴资源，太阳能级多晶硅作为光伏产业主要原料之一，其市场前景因此也变得非常广阔。



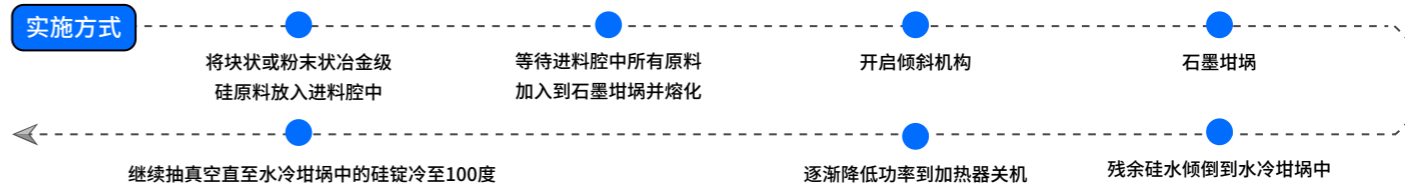
中国地大物博，人口众多，对能源需求极大，光伏发电行业市场广阔，作为光伏产业原材料的太阳能级多晶硅的市场潜力巨大，同时大部分地区太阳能资源较为丰富，因此在国家的大力支持下，未来产能将持续高速增加，服务于中国的大市场。

国产替代进口加速行业发展

因为中国的高纯太阳能级硅材料一直大量依靠从海外进口，而因此需要巨大资金的投入，并且先进工艺也长期由欧美，日本等国家所掌握，形成无法自给自足，受制于人的局面。未来我国的光伏产业将持续增长，若先进技术不能自己掌握，不仅需要投入不可估量的资金，还有可能进口受限，不能满足国内的清洁能源需求，未来将作为战略性新兴产业的供给不足，国家的能源安全得不到保障，损失将不计其数。因此，国家积极投入大量资源，支持企业不断提高太阳能级硅生产技术的核心竞争力，将核心技术掌握在自己手中，进一步开拓国际光伏市场，占据主导地位，做到自给自足，用国产硅替代进口硅，摆脱对进口硅的依赖，不仅能节省大量成本，还能保障国家能源安全。

专利技术背景

2014年9月17日，由中国国家知识产权局专利局授予发明专利——《一种真空连续熔炼提纯太阳能级硅材料的设备》，专利号 ZL201210131540.4。该发明属于太阳能级硅冶金法熔炼提纯技术领域，但本专利提供了一种更加简化的相分离提纯硅的设备。



该设备操作简单，对工作人员来说易上手。此外，该设备提供真空环境，有效避免了硅被氧化产生副产物，使最终太阳能级硅的生产效率较高且稳定。该发明的目的在于研制出一种用于工业化生产使用的真空连续熔炼提纯太阳能级硅材料的设备，可以在高真空条件下连续熔炼，去除硅中的O、P、N、S、Al、Ca等挥发性杂质，具有高真空、高温、连续熔炼的技术特点，拥有能耗低、无耗材、成本低、易于操作与控制的优点。

行业技术背景

目前制备太阳能级硅生产技术工艺主要有两种，即化学法和冶金法，以三氯氢硅法，亦称改良西门子法为代表的化学法，利用低纯度的冶金级硅通过氢化—还原等工艺将硅转化为三氯氢硅(SiHCl₃)和甲硅烷(SiH₄)，最终获得高纯度的电子级硅，然后再通过掺杂工艺制备成太阳能级硅。虽然化学法生产的太阳能级硅质量较稳定，但是工艺的流程较长导致能耗成本高昂。冶金法利用杂质与硅性质差异，利用熔炼、蒸发、萃取、偏析等物理方法将冶金硅中硅含量提升到太阳能级硅的纯度要求，提纯过程中不改变硅基体的性质也不发生化学反应，由于冶金法工艺路线相对简单、投资小等优势日益引起国内外学者的广泛研究。不同的杂质对应有不同的去除方法，常用的冶金法方法主要有酸洗精炼、造渣精炼、定向凝固和真空精炼等。

酸洗精炼	造渣精炼	真空精炼
酸洗精炼主要是针对冶金级硅这的金属杂质去除，利用杂质在熔体硅与固体硅之间的分凝作用，实现杂质与硅形成化合物且在晶界或多晶硅的间隙位置沉淀，通过酸浸出硅原料不断提高硅的纯度，酸洗精炼可以使冶金级硅纯度达到3N以上。	造渣精炼是基于液液萃取原理提纯硅的一种技术，造渣精炼利用B易与造渣剂发生氧化反应的原理实现有效去除冶金多晶硅中的B杂质，通过分离渣硅两相而获得纯度较高的太阳能级硅；定向凝固利用硅熔体凝固过程中杂质的偏析现象，最终凝固的区域将杂质富集，并切去锭尾，从而降低低杂质含量，然而定向凝固技术对B、P杂质去除效果不大。	真空精炼利用不同物质在高温、真空条件下蒸气压和蒸发速度不同，因此蒸气压比硅高的杂质元素(如钙、磷、铝等)以气体形式从硅中挥发，降低杂质含量，提高硅的纯度。由于真空精炼技术具有工艺简单，对环境污染小的特点，因此，该工艺相对于其他工艺应用前景最为广泛。

专利市场前景

冶金法相较于化学法的本质区别是在提纯过程中，被提纯主体硅不参与反应，因此可大幅度减低污染，理论上成本和能耗可降到西门子法的1/3以下。冶金法中的真空熔炼是去除硅中挥发性杂质的关键技术，是冶金法提纯硅材料重要方法。然而由于技术限制，以及成本高昂的缺点，现在真空熔炼设备与技术尚未产业化。由于本专利产品结构相对简单，易于操作，高温真空连续熔炼，大大提高太阳能级硅的制备效率，随着未来光伏产业的高速发展具有广阔的市场。

多晶硅太阳能电池应用领域广泛，主要包括：

① 用户生活用电	③ 通讯领域，如微波中继站、光缆站、电话电视信号站等	④ 太阳能建筑，如将太阳能发电与建筑行业联合，使未来的大型建筑企业项目能够自给自足，相对可靠稳定	⑤ 其他领域，如太阳能汽车、电动汽车、卫星、宇宙飞船、空间太阳能电站等
② 交通领域，如路灯、航标灯、交通信号灯和标志灯等			

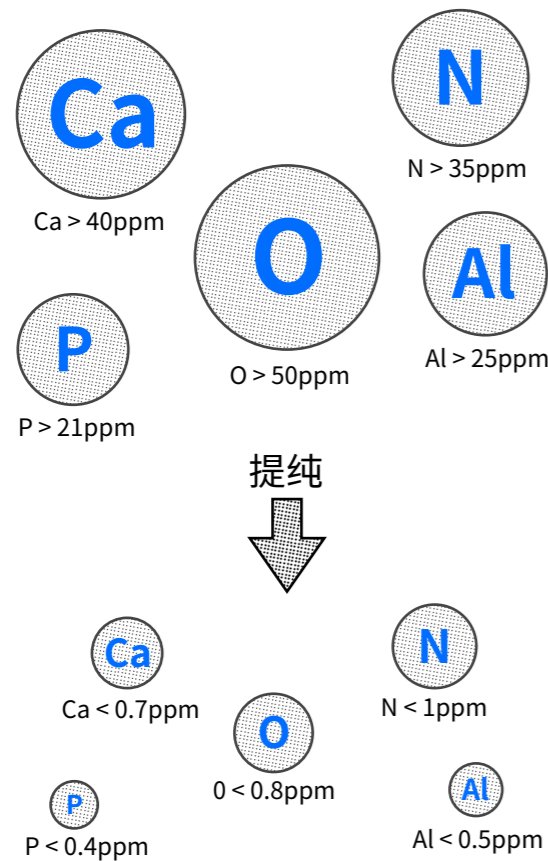
因此，作为未来光伏产业原材料的太阳能级硅的应用前景十分广阔。

专利成熟度

操作简易

虽然还是属于太阳能级硅冶金法熔炼提纯技术领域,但本专利提供的一种更加简化的相分离提纯硅的设备,将块状或粉末状冶金级硅原料放入进料腔中,等待进料腔中所有原料加入到石墨坩埚并熔化后,开启倾斜机构,将石墨坩埚中,残余硅水倾倒入水冷坩埚中。逐渐降低功率到加热器关机,继续抽真空直至水冷坩埚中的硅锭冷至100度,该设备操作简单,对工作人员来说易上手。此外,该设备提供真空环境,有效避免了硅被氧化产生副产物,使最终太阳能级硅的生产效率较高且稳定。

杂质含量经过真空连续熔炼提纯



可以看出该设备对于太阳能级硅的效果较好,同时,有效减少了成本投入。

本发明按照低成本、无污染、高效稳定、可规模化的提纯工艺的标准,在本发明专利中仅需要冶金级硅原材料置于坩埚,抽真空,开倾斜装置等三次步骤,而且其中仅坩埚熔化冶金级硅需要一定能耗,其余步骤耗能极少,实现较低成本的标准;杂质元素停留在封闭环境内的坩埚中,即使有少量副产物产生,在密闭的环境中不会扩散至外界环境中,有效避免了环境污染;几个步骤中各阶段反应不冲突,可以连续稳定生产,并且对冶金级硅原材料要求不高,无需通过多次重复提纯操作实现制备高纯度太阳能级硅目标,具有突出优势。

本发明可以对多种类型的硅原材料进行加工熔炼提纯,可拓展到其他低品质废硅中,如冶金废硅、半导体废硅等或其他非贵金属提纯工艺中去,从而使专利应用面更广,有利于本发明专利的落地实践,本发明得到的硅的纯度更高,杂质元素去除率更高。

去除率

O	N	P	Ca	Al
98.4%	97.1%	98.1%	98.3%	98.0%

相较于传统工艺的去除率大大提升,能够进一步满足太阳能级等高品质硅的需求,避免多次重复提纯提高工艺的能耗成本。

行业趋势

行业整合加速

小型企业由于没有足够的资金支持高新技术的研究,也没有实现规模化,系统化的产业结构,市场较为单一,服务于光伏行业产业链的某些单一环节,很难与大型企业竞争,且容易被取代,发展不稳定。因此,要降低光伏行业不必要的成本投入,降低多晶硅生产成本,必须对行业现有结构进行调整,将面临亏损破产的小型与大企业整合,推动技术进步及工艺完善,晶体硅太阳能电池行业也会发展更具深度和广度,不断提升产量和质量,进行大规模生产有利于降低太阳能级硅生产成本和光伏行业整体成本,不仅可以提升竞争力还可以减少生产乱象。

中国太阳能级硅发展方向

当前国家关于光伏行业发展最紧迫的课题是怎样科学规范的掌握国内外光伏领域的基础地位,关键在于建立和整合并迅速贯彻现行的法律政策,同时我们需要在掌握外国领先的技术方法和科技知识的情况下,结合中国实际,实现专业化,产业化,让中国太阳能级硅领域的开发更加成熟。此外,为了增强核心技术竞争力、必须增大科学研究的投入,包括政府和企业两方面的投入,国外光伏产业发展较为完善的国家企业科研支出占销售额的5%甚至更高,而我国的科研投入占比远低于此,一方面由于技术发展不完善,未形成较强的竞争力,利润不理想,一方面是以往对科研投入并未足够重视。未来加强太阳能级硅生产工艺和相关设备的研究,尤其是新兴工艺,做到降低能耗成本,提高纯度和质量。要以市场为主导,突破产业和地区的限制,实现设备与工艺的优化,建设具有大量市场规模且具有自主知识产权的现代化高效生产太阳能级硅企业。

参考文献

- Chigondo F. From metallurgical-grade to solar-grade silicon:an overview[J].Silicon, 2018, 10(3):789-798.
- 张妙鹤,唐安江,韦德举.太阳能级多晶硅生产工艺的比较研究[J].广州化工, 2015, 43(02):10-12.
- Chen H, Morita K, Ma X, et al. Boron removal for solar-grade silicon production by metallurgical route:A review[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2019, 203:110169.
- 丁伟杰. 冶金硅间接加氢制硅烷反应过程的机理及动力学研究[D]. 上海交通大学, 2015.
- 侯彦青, 谢刚, 陶东平, 等. 太阳能级多晶硅生产工艺[J]. 材料导报, 2010, 24(13):31-43.
- 王鹏, 李慧, 王新蕊, 等.太阳能级硅制备技术的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(2):556-560.
- 王新刚. 太阳能级多晶硅生产技术研究现状及展望[J]. 化工技术与开发, 2012(9):27-33.
- 赵玉文. 中国光伏产业发展现状与前景[J]. 太阳能, 2012(18):31-37.
- Coso G D, Tobias I, Caizo C, et al. Temperature homogeneity of polysilicon rods in a Siemens reactor[J]. Journal of Crystal Growth, 2007, 299(1): 165-170.
- Moritak K. Thermodynamic evaluation of new metallurgical refining processes for SOG-silicon production[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(3): 685-690.

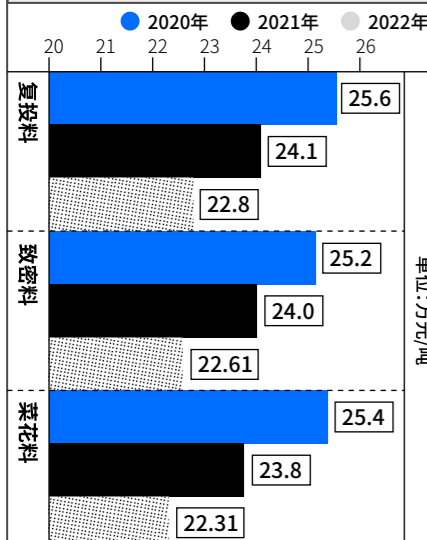
作者: 朱文锦
剑桥大学卡文迪许实验室化学系
博士研究生

Author: Wenjin Zhu
Sirringhaus Lab, University of Cambridge
Doctoral Researcher

行业趋势

价格将持续降低

近三年多晶硅价格变化



降低多晶硅生产成本

占比光伏产业成本40%的太阳能级硅高昂价格是阻碍光伏产业扩大和国内光伏市场快速发展的重要因素,因此,降低太阳能级多晶硅的生产成本变得迫切需要。虽然世界和我国在不断提高技术水平,也取得了部分成效,但要长期持续稳定利用太阳能和逐步替代改变传统能源结构,光伏产业的成本要持续降低,多晶硅生产技术需快速进步,进行技术改革和技术升级,从而降低多晶硅生产成本,稳定光伏市场。

太阳能级多晶硅最新价格走向

