

兴建年产一千吨电子级多晶硅工厂的思考

梁骏吾

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

[摘要] 文章简要评述了世界以及中国的电子级多晶硅的生产能力和市场需求。在2000年和2010年中国对多晶硅的需求分别是736 t/a和1304 t/a。但近几年中国的多晶硅生产仅达到80 t/a, 所以在中国建设一座年产1000 t电子级多晶硅的工厂是很合理的。然而由最新统计数据可知, 自1997年以来, 世界多晶硅生产能力连年均超过市场需求, 而且在最近的将来, 这一趋势将会继续。为了占领国内多晶硅市场, 未来的多晶硅工厂将面临挑战, 产品质量和生产成本是应当考虑的最重要指标。为了占领国内市场, 在保证多晶硅产品纯度的前提下, 生产成本只能略微超过20美元/kg。

[关键词] 多晶硅; 半导体工业; 规模生产

半导体材料是半导体工业的基础材料。在半导体材料中用量最大和用途最广泛的是半导体硅。当今95%以上的半导体器件是用硅材料制造的, 集成电路的99%以上是硅集成电路。硅材料支撑着种类繁多、意义重大的半导体工业。电子级多晶硅是单晶硅片的起始材料, 因此多晶硅的重要性是十分明显的。

我国早在20世纪50年代即开始了电子级多晶硅的研制, 60年代中期开始批量生产。现在仍然是世界上少数(含日、美、德、俄、乌、意等国)能生产电子级多晶硅的国家之一。然而我国的多晶硅生产工艺与设备严重落后, 不符合现代化大生产的要求, 产量、质量和价格均不具备竞争力, 所以兴建一个年产1000t(即达到现代化生产的临界产量)的大硅厂一直是人们关注的项目。许多单位提出项目可行性报告。一个千吨级多晶硅工厂的投资约为1亿美元以上。因此在考虑项目上马时应当十分慎重, 需仔细分析全球电子级多晶硅的生产和销售形势, 特别要注意由于资料来源和时间不同往往分析的结果有很大差别。本文将根据一些最新的数据提出以下背景形势分析和千吨级多晶硅厂的建立应考虑的标准。

1 有利形势——半导体工业迅速增长

以半导体器件为主的世界电子产品的产值在1998年达到9300亿美元, 而且增长速度很高——1999年、2000年至2001年的增长率分别为9.1%、15.2%和18.2%。与这样大的增长率相适应的是世界集成电路市场迅速上升, 1996年为1153亿美元, 2001年将达到2110亿美元。世界多晶硅需求也相应上升, 1996年世界电子级多晶硅需求为14300t, 而2000年和2001年分别上升为16100t和17800t(见表1)^[1,3]。

2 严峻的现实——多晶硅生产能力大于市场需求

表1的数据是由多晶硅主要生产厂家Wacker公司统计和推测的, 是最新数据。在引用数据时要特别注意其准确性; 如有疏忽则会得出错误结论。例如根据1996~1997年日本稀有金属新闻和日本金属时评^[2]的资料推断得2000年世界多晶硅需求量高达25508t。比表1中的2000年需求量高了58%, 显然过高了, 不能反映真实情况。

表1 世界电子级多晶硅的市场需求、生产能力和和库存量/ $t \cdot a^{-1}$ Table 1 Production capacity, market demand and stock of the electronic grade polysilicon in the world/ $t \cdot a^{-1}$

年份	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
生产能力	12 995	16 950	22 450	24 110	26 060	26 585	26 635	26 635
需求	14 300	15 600	13 800	14 500	16 100	17 800	19 400	21 100
需求-能力	1 305	-1 350	-8 650	-9 610	-9 960	-8 785	-7 235	-5 535
库存	1 720	2 400	5 800	5 510				

数据来源: 德国 Wacker 公司 (1999 年 8 月 30 日); 数据不包括太阳能级多晶硅

我国电子级多晶硅市场 2000 年和 2010 年需求量可根据 1998 年实际产量进行预测 (表 2)。

表 2 国内多晶硅市场需求^[4]

Table 2 Polysilicon demand in China

年份	1996	2000	2010
需求/ $t \cdot a^{-1}$	242	736	1304

由表 2 可知, 建设一个年产千吨的电子级多晶硅厂与中国市场的需求量大体上一致。

我国在 1983 年有 18 家工厂生产多晶硅, 生产能力为 150 t/a。由于市场竞争, 到 1987 年剩下 7 个工厂, 生产多晶硅能力下降为 112 t/a。1998 年只剩下两个多晶硅厂, 生产能力进一步下降到 80 t/a。

多晶硅缺额很大, 所以我国需求的多晶硅由国外进口, 许多单晶厂家为了降低成本向国外收购含石墨的多晶料。总之, 目前我国多晶硅主要依赖外国。

另一方面, 我国多晶硅生产规模小 (仅为 30 ~ 50 t/a), 公认的多晶硅生产临界规模为 1000 t/a。所以新建一个年产 1000t, 质量与价格均有竞争力的电子级多晶硅厂, 从而满足国内以及周边地区的需求已成为半导体界的一个共识, 也是半导体工作者多年来的心愿。

但是在考虑项目的可行性时, 一定要全面而准确地判断世界多晶硅生产与销售形势。表 1 的数据说明, 世界多晶硅市场固然在扩大, 然而生产能力也在扩大, 结果在 1998 和 1999 年世界多晶硅的生产能力分别超出当年市场需求的数量为 8 650t 和 9 610t; 并分别造成库存 5 800 t 和 5 510 t。预计到 2000 年和 2003 年时生产能力分别将超过市场需求为 9 960 t 和 5 535 t。这意味着新建的千吨级硅厂将面临激烈的竞争。

竞争是不可避免的, 要占领中国多晶硅市场必须通过竞争。不过在竞争中我们要做到知己知彼, 否则会陷入盲目性。

3 必须在产品质量和价格两方面均有竞争力

电子级多晶硅的生产经过 40 多年的发展, 已经取得很大进步。目前国外工厂均以闭环三氯氢硅法为主 (也有少数工厂用硅烷法)。由于工艺先进, 国外每生产 1 kg 多晶硅的物质消耗 (含原料硅、液氯、氢等) 和能耗 (还原电耗和总电耗) 远比国内的低。这样, 国外的生产成本远低于国内生产成本。通常工厂的生产成本是不轻易公开的。但据 Rogers 估算, 一个年产 200t 多晶硅工厂的多晶硅成本如表 3 所示^[5]:

表 3 闭环三氯氢硅工厂的运行成本

Table 3 Operating costs of a trichlorosilane plant using closed loop system

项目	费用 (美元/kg)
原材料	7.31
设备	2.23
劳力	2.45
运行	1.74
废物处理	0.20
折旧 (十年)	6.40
合计	20.63

按表 3, 多晶硅的运行成本为 20.63 美元/kg, 折合人民币为 172 元/kg。当工厂运行 10 年之后, 折旧费已扣完, 运行成本降至 14.23 美元/kg, 折合人民币为 114 元/kg。当然, 工厂运行 10 年以后要维持生产还需投入资金。上述计算有些偏低。

我国多晶硅生产的工艺比较落后, 过去未采用闭环生产。多晶硅原料消耗为国外的 3.5 倍, 液氯消耗为 13 倍, 氢消耗为 21 倍, 电消耗为 4.2 倍。因此, 我国的多晶硅成本远高于世界其它硅厂。中国多晶硅售价为 500 元/kg, 明显高于外国进口料。

新的多晶硅厂的能耗和物耗必须达到国际先进水平, 否则无法竞争。

即使应用十分先进的生产工艺，电耗仍然在成本中占重要部分。新的多晶硅厂必须能得到廉价的电力。全年电价起码不能超过 0.25 元/kW·h。否则成本不可能下降。

我国四川峨眉半导体厂的年产 100t 多晶硅闭环生产线通过鉴定，其技术指标先进，诸如物耗、能耗、硼、磷杂质含量均有突破，为建立规模化大生产提供了设计依据。但是从 100 t/a 试制到 1 000 t/a 的大生产仍然有一过程。

在我国国产多晶硅短缺情况下，国外进口多晶硅的价格为 40 美元/kg（直拉）和 60 美元/kg（区熔）。随着竞争激烈，国外多晶硅仍在降价：直径 20-65mm 的多晶料降至 20 多美元/kg，直径 20~150 mm 多晶料降至 28 美元/kg，所以新建的多晶硅工厂的生产成本只能接近于 20 美元/kg 才有竞争力。

电子级多晶硅的纯度要求十分严格。表 4 列出国际上最新的多晶硅纯度指标^[3,6]。可以看出，对高纯硅除要求很低的施主、受主、碳、金属杂质外，对表面金属杂质也有很高要求。

表 4 多晶硅质量指标

Table 4 Purity characteristics of polysilicon

	杂质	浓度*	电阻率/ $\Omega \cdot \text{cm}$
体纯度	施主杂质 (P, As, Sb)	最高 150ppt	最低 500
	受主杂质 (B, Al)	最高 50ppt	最低 1 500
	碳	最高 100ppba	
	体金属总量 (Fe, Cu, Ni, Cr, Zn)	最高 500pptw	
表面金属	Fe	最高 500pptw/250ppt	
	Cu	最高 50pptw/25ppt	
	Ni	最高 100pptw/50ppt	
	Cr	最高 100pptw/55ppt	
	Zn	最高 100pptw/130ppt	
	Na	最高 800pptw/980ppt	

* 在半导体硅材领域，杂质含量的国际通行表示法仍为 ppb, ppt

等“非标准”，为方便读者，此处未予更改

** 为表面酸洗后的值

我国多晶硅的硼、磷、碳含量一般能达到国际质量水平。但是体金属杂质含量往往不注意，表面金属杂质含量也未列入指标。另一方面，优品率的提高也是工厂盈亏的重要条件。如果能提供超高纯多晶硅，即质量指标优于表 4 的产品（硼杂质含量小于 0.03ppb）供区熔单晶使用，则价格可提高到 60 美元/kg，经济效益立即上升。即多晶硅厂的产品质量除满足表 4 指标外，还应能生产优级产品。

4 结语

综上所述，中国在 2000 年和 2010 年分别有 736 t 和 1 304 t 电子级多晶硅的市场，但多晶硅厂的建设必须考虑国际竞争，必须考虑全球多晶硅生产能力过剩这一现实。要取得中国乃至周边地区的多晶硅市场，必须保证产品质量为第一流，生产技术也必须是第一流的，能耗和物耗等指标应处于世界先进行列，有廉价电力供应，其生产成本只能接近于 20 美元/kg；建成的工厂应能生产区熔硅用的高纯多晶硅。

参考文献

- [1] Wacker Siltronic A G. Polysilicon Production, 1995 - 2003 [R]. 1999
- [2] 中国硅材料工业发展研究课题组. 中国硅材料工业发展研究 [R]. 1997, 11: 52
- [3] 宋大有. 上海有色金属, 2000, 21 (1): 31
- [4] 万群. 中国信息产业领域相关重点基础材料科技发展战略研究 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2000
- [5] Rogers L C. Handbook of Semiconductor Silicon Technology [M], Eds, O' Mara W C, Herring R B. Hunt L P. Noyes Publ. New Jersey, 1990, 60
- [6] Product Specification of Wucker-Chemie GmbH, 1999, No. PCA-CH4; 1998, No. PCA-AE4

Thoughts on the Construction of an Electronic Grade Polycrystalline Silicon Plant with Annual Production of 1000t in China

Liang Junwu

(Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 10083, China)

(cont. on p.48)

- D euler code for subsonic turbine vane flows and study of the non radial blade stacking [A]. ASME Paper [C]. 92 - GT - 63
- [9] Masakatsu H, Eiichiro W, Hikaru T. Recent technology on steam turbine performance improvement [R]. PWR - Vol.13, Design, Repair and Refurbishment of Steam Turbines ASME 1991
- [10] Kawagishi H, Kawasaki S. The effect of nozzle on turbine efficiency [R]. PWR - Vol.13, Design, Repair, and Refurbishment of Steam Turbines ASME 1991
- [11] Hesketh J A, Tritthart H, Aubry P. Modernization of steam turbines for improved performance [R]. Symposium on Steam Turbine and Generators. 1994
- [12] Weingold H D, Neubert R J, Beblke R F, et al. Bowed stators: an example of CFD applied to improve multistage compressor efficiency [J]. ASME Journal of Turbomachinery. 1997, 119 (4): 161~168
- [13] Lejambre C R, Zacharias R M, Biederman A J, et al. Development and application of a multistage Navier - Stokes flow solver: Part II - Application to a high-pressure compressor design [J], ASME Journal of Turbomachinery, 1998, 120 (4): 215~223
- [14] Bogold A B, Kimasov Y L, Mitrokhin V T, et al. Direct and inverted calculation of 2D axisymmetric and 3D flow in axial compressor blade rows [A]. Recent Advances in Compressor and Turbine Aerothermodynamics Conference Papers [C]. 24 - 25 Nov. 1992, France

Research Status and Development of the Bowed-Twisted Blade for Turbomachines

Wang Zhongqi, Zheng Yan

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

[Abstract] The bowed-twisted blades have been widely used in the developed countries in the 1990s, such as the USA and UK. In China, this new type blades are also successfully applied to the steam turbines, and the application of these blades to gas turbines of air-engines has had a good beginning. The effectiveness of applying the bowed-twisted blades to turbines demonstrated by the tunnel and static experiments is discussed, and the mechanism of reducing the radial- and cross- secondary flow losses by using the bowed-twisted blades is analyzed in this paper. The advances in research on compressor bowed blades and key problems in this research are considered shortly. Based on design experiences, several principles for designing stages with bowed-twisted blades are summarized in the end of this paper.

[Key words] bowed-twisted blade; secondary flow; cascade aerodynamics

(Cont. from p.35)

[Abstract] This paper briefly reviews the electronic grade polysilicon production capacity and market demand in the world as well as in China, It is estimated that in the year of 2000 and 2010 the polysilicon demand in China will be 736 t/a and 1 304 t/a, respectively.

In the recent years, the gross polysilicon production in China is only 80 t/a, so the construction of an electronic grade polysilicon plant in China with a 1 000 t/a production capacity should be reasonable. However, referring the newest statistical data since 1997, the world polysilicon production capacity has being exceeded the market demand and the trend will continue in the near future. In order to occupy the domestic polysilicon market the future polysilicon plant will face challenge. The quality of the product and the manufacturing cost are the most important criteria to be considered. Ensuring the polysilicon product purity, the manufacturing cost should be near 20 dollars per kilogram for competition in domestic market.

[Key words] polycrystalline silicon; semiconductor; production