



行政院環境保護署

## 矽-關鍵物料調查報告

中華民國 106 年 12 月



# 目錄

第一章	前言	1
1.1	編撰目的	1
1.2	報告涵蓋內容	2
第二章	關鍵物料來源與應用趨勢	3
2.1	關鍵物料之基本特性	3
2.2	關鍵物料之來源	4
2.3	關鍵物料之應用趨勢	14
第三章	關鍵物料之供需與循環利用	25
3.1	關鍵物料產業鏈及物料流佈	25
3.2	關鍵物料供需情勢評析	33
3.3	廢棄與循環再生利用	37
第四章	結論與建議	44
4.1	結論	44
4.2	建議	45
第五章	參考文獻	48

# 表目錄

表 1.1-1	優先管理之 10 項關鍵物料篩選 .....	2
表 2.1-1	矽基本特性介紹 .....	4
表 2.2-1	矽(用於合金及高科技業)之主要產源國近六年產量 .....	5
表 2.2-2	矽(工業用矽砂)之主要產源國近六年產量(單位：千公噸).....	7
表 2.2-3	國內含矽物料 100-105 年各年度進口量 .....	8
表 2.2-4	國內含矽物料 100-105 年各項平均進口量及佔比.....	8
表 2.2-5	矽砂及石英砂進口量及進口國家佔比 .....	13
表 2.2-6	矽砂及矽相關礦產台灣自產量(單位：公噸) .....	13
表 2.2-7	矽晶圓(徑 6 吋及以上，但未達 8 吋者)進口價值及國家佔比.....	13
表 2.2-8	矽晶片（正方形或四角為圓弧狀之正方形），邊長 6 吋及以上，但未達 8 吋者進口價值及國家佔比.....	14
表 2.3-1	各類矽產品常用之品質規格 .....	24
表 3.1-1	105 年國內各矽物料使用量 .....	32
表 3.2-1	我國重點矽資源歷年進口量(單位：公噸).....	34
表 3.2-2	我國重點矽資源歷年出口量(單位：公噸).....	35
表 3.2-3	我國重點矽資源歷年進口值(單位：千元).....	35

表 3.2-4	我國重點矽資源歷年出口值(單位：千元).....	36
表 3.2-5	我國重點矽資源歷年單位進口值(千元/公噸).....	36
表 3.2-6	我國重點矽資源歷年單位出口值(千元/公噸).....	37

# 圖目錄

圖 2.2-1	全球矽資源生產量的分布情形 .....	6
圖 2.2-2	全球碳化矽資源生產量的分布情形 .....	6
圖 2.3-1	世界各國晶圓生產比例 .....	17
圖 2.3-2	3D 矽模列印機 .....	21
圖 3.1-1	矽物料流布概況 .....	25
圖 3.1-2	半導體業產業鏈 .....	27
圖 3.1-3	太陽能矽晶圓業產業鏈 .....	27
圖 3.1-4	玻璃產業鏈 .....	29
圖 3.1-5	水泥產業鏈 .....	30
圖 3.1-6	中國大陸矽油主要下游產業 .....	30
圖 3.1-7	矽物料之主要使用用途 .....	32
圖 3.3-1	廢矽晶圓製成太陽能電池流程 .....	40
圖 3.3-2	廢矽橡膠回收流程 .....	42

# 第一章 前言

## 1.1 編撰目的

高純度單晶矽乃重要之半導體基礎材料，主要應用於微晶片及積體電路。若於單晶矽中摻入微量的ⅢA族元素，則可形成P型矽半導體；摻入微量的VA族元素，則可形成N型矽半導體；將P型和N型半導體結合，則可形成太陽能電池，隨著半導體產業與太陽能電池產業的蓬勃發展，對矽晶圓材料的需求急速增加，矽晶圓製造業的產能不斷增加，故矽已成為高科技產業不可或缺之原料。相較於其它進口依賴性較高之稀有關鍵物料，臺灣每年可產約13萬公噸之矽砂，雖可自產然相較總進口量卻僅占其10%，故當前之矽資源仍有賴於進口。

為確保既有所需關鍵物質在合理價格下可穩定供應，掌握綠色能源產業關鍵稀有金屬需求可獲滿足，行政院環保署於105年研提「關鍵物料篩選原則」，並以「經濟重要性」、「供給風險」及「環境影響」等三大指標，篩選出30項關鍵物料後，續盤點其中較為關鍵之10項物料(詳如表1.1-1)列為應優先管理之關鍵物料項目，就其產業發展來源及趨勢、能(資)源使用情形及國內供需與循環利用等進行評析，本報告以10項關鍵物料中之「矽」進行調查並提出報告，以供產官學研界參考。

表 1.1-1 優先管理之 10 項關鍵物料篩選

項次	物料名稱	經濟重要性	供給風險	環境影響
1	矽	10	14	1
2	煙煤-煉焦煤	11	18	4
3	鎂(含菱鎂礦)	21	7	5
4	銅	13	47	6
5	錫	8	26	11
6	銻	18	3	15
7	鈷	7	15	29
8	稀土元素	3	1	39
9	銦	2	11	41
10	鍺	5	9	47

資料來源：環保署，「永續物料管理指標檢討與環境衝擊估算及資料庫功能提升專案工作計畫」，105 年 12 月。

## 1.2 報告涵蓋內容

本報告共分四個章節，相關內容介紹如下：

第一章「前言」：主要說明編撰目的、報告涵蓋內容等。

第二章「關鍵物料來源與應用趨勢」：說明關鍵物料之基本特性、國內主要之來源及關鍵物料之應用趨勢等。

第三章「關鍵物料之供需與循環利用」：將分別說明關鍵物料相關產業鏈、製程及物料流佈情形、供需情勢及運作方式及廢棄及循環再生利用現況。

第四章「結論與建議」：針對上述章節內容進行綜整，並提出相關建議。

第五章「參考文獻」



## 第二章 關鍵物料來源與應用趨勢

### 2.1 關鍵物料之基本特性

矽是極為常見的一種元素，然而它極少以單質的形式在自然界出現，而是以複雜的矽酸鹽或二氧化矽的形式，廣泛存在於岩石、砂礫、塵土之中。矽在宇宙中的儲量排在第八位，在地殼中，它是第二豐富的元素，構成地殼總質量的 25.7%，僅次於第一位的氧（49.4%）。

矽是人體必需微量元素之一，成人體內含量約為 18mg，一般多存在於表皮及組織中，尤其存於人體主動脈壁內，在人體的含量隨年齡的增長而減少。矽主要參與骨質的鈣化過程，可促進生長，具有維持動脈壁彈性和保護內壁膜的作用，因此，如果人體的矽攝入量不足，會導致生長遲緩、器官萎縮、骨骼異常畸形，以及心血管病死亡率增高，骨骼及組織異常和老年激素的改變等。

但人體矽攝入量若過多時會產生高矽症，高矽飲食的人群中曾發現局灶性腎小球腎炎，腎組織中含矽量明顯增高的個體，可能得到尿結石，此外，經呼吸道長期吸入大量含矽的粉塵，可引起矽肺，是塵肺中最為常見的一種類型，是由長期吸入大量含有游離二氧化矽粉塵所引起，以肺部廣泛的結節性纖維化為主的疾病，矽肺病人由於兩肺發生廣泛性纖維組織增生肺組織的微血管循環發生障礙，抵抗力下降，因而容易合併其他疾病，導致病情惡化，甚至死亡。

表 2.1-1 矽基本特性介紹

性質	數值	應用產品
原子量	28.080	1. 半導體材料 2. 矽二極管 3. 電子整流器和可控矽整流器 4. 太陽能電池 5. 金屬陶瓷複合材料 6. 光導纖維通信 7. 玻璃、陶瓷、水泥和耐火材料 8. 矽烷偶聯劑 9. 矽油 10. 矽橡膠 11. 矽樹脂 12. 隔音材料
原子密度	$5.0 \times 10^{22}$ 原子/cm <sup>3</sup>	
密度	2.33 克/cm <sup>3</sup>	
結構檢查	金剛石型晶格	
晶格常數	5.42Å	
禁帶寬度	1.115±0.008eV	
電子遷移率	1350±100 cm <sup>2</sup> /伏·秒	
比熱	0.219 卡/克·度	
蒸發熱	71 千卡/克分子	
汽化熱	359 kJ/mol	
熔解熱	12.1 千卡/克分子	
熔融潛熱	425±64 卡/克	
本征載流子濃度	$1.5 \times 10^{10}$ cm <sup>2</sup> /伏·秒	
界電常數	11.7±0.2	
沸點	3145°C	
熔點	1416±4°C	
臨界溫度	4920°C	
比熱 (18~100°C)	0.186 卡/克·度	
表面張力	720 達因/厘米	
硬度	7.0 莫氏硬度	
折射率	3.420	
凝固時的膨脹	±10%	
線型熱脹系數	$(2.6 \pm 0.3) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	

資料來源：Wikimedia Commons，查詢時間：106 年 7 月/環興科技股份有限公司計畫整

## 2.2 關鍵物料之來源

世界矽資源豐富，據估算當前之儲量及蘊藏量，足以滿足世界需求數十年之久，以下將就世界產量及國內矽資源進口量作相關介紹。

### 一、矽資源儲量及生產量

矽物料主要生產國之儲備相當充足，表 2.2-1 乃矽(用於合金

及高科技業)之主要產源歷年生產狀況，該類型矽資源每年於全球總生產量約 720 萬公噸，最大生產國為中國大陸，占全球 64%，主要應用於鋁合金及化學工業，另亦有小部份應用於半導體和太陽能產業，其分布情形如圖 2.2-1 所示。另全球碳化矽之百分比分布情形如圖 2.2-2 所示，其資源總生產量約為 101 萬公噸，最大生產國亦為中國大陸，占全球 45%。另於建築、玻璃、化學及相關產業所用之工業用矽砂則額外統計，表 2.2-2 乃矽(工業用矽砂)之主要產源歷年生產狀況，該類型矽資源每年於全球總生產量約 1.79 億公噸，最大生產國為美國，約占全球 51%。

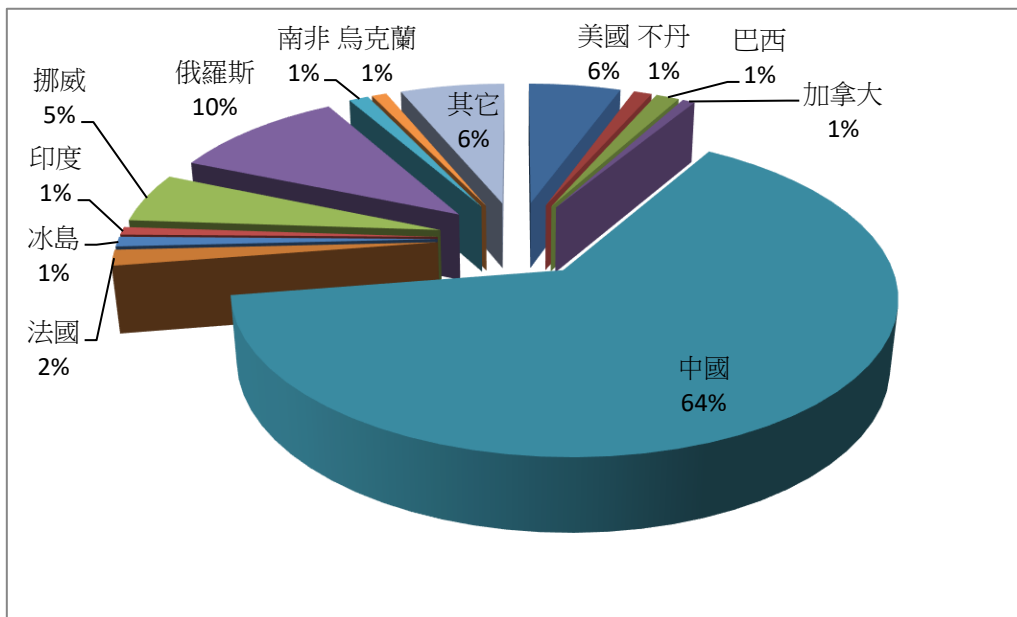
**表 2.2-1 矽(用於合金及高科技業)之主要產源國近六年產量**

(單位：千公噸)

國家	2011	2012	2013	2014	2015	2016
美國	326	383	365	373	411	396
不丹	61	61	54	72	78	78
巴西	225	225	230	154	117	100
加拿大	50	55	60	52	54	54
中國	4,780	5,050	5,200	5,500	5,000	4,600
法國	164	174	130	130	121	121
冰島	78	75	75	75	75	75
印度	68	70	86	86	60	60
挪威	297	339	362	332	375	380
俄羅斯	647	733	733	700	747	747
南非	142	132	84	84	84	84
烏克蘭	98	78	96	92	59	64
其它	429	402	407	460	449	449
全球統計	7,370	7,770	7,880	8,110	7,630	7,200

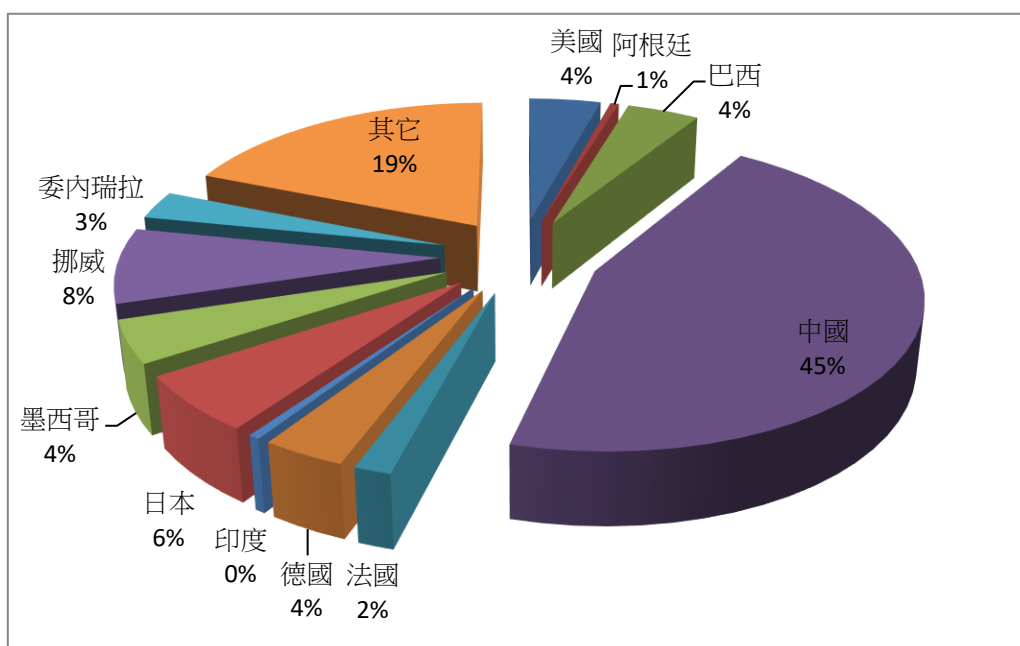
註：2016 年之產量值為引用 USGS 之預估值

資料來源：USGS「Mineral Commodity Summaries」(2011-2016)/環興科技股份有限公司計畫整理



資料來源：USGS「Mineral Commodity Summaries」(2016)

圖 2.2-1 全球砂資源生產量的分布情形



資料來源：USGS「Mineral Commodity Summaries」(2016)

圖 2.2-2 全球碳化砂資源生產量的分布情形

表 2.2-2 矽(工業用矽砂)之主要產源國近六年產量(單位：千公噸)

國家	2011	2012	2013	2014	2015	2016
美國	43,700	50,700	62,100	110,000	103,000	91,700
澳大利亞	5,600	5,300	5,500	5,500	6,000	6,000
加拿大	1,800	1,590	1,690	1,690	1,700	1,700
智利	1,240	1,270	1,360	1,360	1,250	1,300
捷克	1,350	1,340	1,340	1,270	1,270	1,350
芬蘭	2,250	2,400	2,400	2,400	2,400	2,400
法國	5,000	6,290	6,290	8,750	8,750	8,750
德國	7,770	7,500	7,500	7,500	7,500	7,500
印度	1,800	1,900	1,210	3,430	3,400	3,400
義大利	19,800	16,400	16,400	13,900	13,900	13,900
日本	2,900	3,200	3,000	3,000	3,000	2,800
墨西哥	2,570	3,590	3,590	3,590	3,600	3,600
挪威	1,200	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
波蘭	2,460	2,570	2,300	2,300	2,300	2,700
南非	2,900	2,600	2,110	2,110	2,300	2,100
西班牙	5,000	5,000	3,400	3,400	3,400	3,400
土耳其	5,000	7,000	15,000	7,970	8,000	8,000
英國	3,760	3,760	3,760	4,000	4,000	4,000
其它	21,960	14,170	12,090	12,170	12,260	13,100
全球統計	138,000	139,000	152,000	196,000	189,000	179,000

註：2016 年之產量值為引用 USGS 之預估值

資料來源：USGS「Mineral Commodity Summaries」(2011-2016)/環興科技股份有限公司計畫整理

## 二、我國矽資源進口量

依據財政部關務署統計資料庫統計資料，國內 100-105 年含矽之物料每年平均進口量約 238 萬公噸(表 2.2-3)，其中 100 年及 102 年進口量增加分別為 8.8%及 18.9%，而 101 年、103 年、104 年及 105 年進口量皆減少，初步評估應與景氣及市場供需有相當之關係。

國內 100-105 年含矽之物料計有 72 項(表 2.2-4)，其中以進口量分析，100-105 年矽砂及石英砂平均每年進口量約 137 萬公噸，佔所有含矽物料之 57.96%為最多，而若以含矽物料之價值分析，100-105 年矽晶圓（直徑 6 吋及以上，但未達 8 吋者）進口價值最高，總進口價值約 2,329 億元。

**表 2.2-3 國內含矽物料 100-105 年各年度進口量**

年度	含矽物料進口量(公噸)	年增減率
100 年	2,397,895	+8.8%
101 年	2,131,407	-11.1%
102 年	2,534,686	+18.9%
103 年	2,485,856	-1.9%
104 年	2,378,545	-4.3%
105 年	2,283,846	-3.9%

資料來源：財政部關務署統計資料庫查詢系統

**表 2.2-4 國內含矽物料 100-105 年各項平均進口量及佔比**

中文貨名(含矽物料)	100-105 年 各項平均進口 量(公噸)	所佔 比例 (%)
八甲基（苯基或其他有機基）環四矽氧	77	0.00
匣鉢，含石墨或其他碳或上述產品之混合物重量超過 50% 者，但矽化石粉製品或類似矽土製者除外	1	0.00
匣鉢，含氧化鋁（AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ）或氧化鋁與二氧化矽（SI O <sub>2</sub> ）之混合物或化合物重量超過 50% 者，但矽化石粉製品或類似矽土製者除外	14	0.00
其他二氧化矽	20,984	0.89
其他不論是否符合化學定義之氫化物、氮化物、疊氮化物、矽化物和硼化物，第 2849 節之碳化物除外	1,413	0.06
其他有機矽化合物	2,712	0.11
其他矽	5,530	0.23

中文貨名(含矽物料)	100-105 年 各項平均進口量(公噸)	所佔 比例 (%)
其他矽，含矽重量未達 99.99% 者	19,437	0.82
其他矽酸鹽	249	0.01
其他矽錳鋼條及桿，焊接電極用者	5	0.00
其他矽錳鋼製條及桿	40	0.00
其他氟矽酸鹽、氟鋁酸鹽及氟錯鹽	37	0.00
其他耐火陶瓷製品，但矽化石粉製或類似矽土製者除外	1,287	0.05
其他耐火陶瓷製品，含石墨或其他碳或上述產品之混合物重量超過 50% 者，但矽化石粉製品或類似矽土製者除外	69	0.00
其他耐火陶瓷製品，含氧化鋁 (AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) 或氧化鋁與二氧化矽 (SiO <sub>2</sub> ) 之混合物或化合物重量超過 50% 者，但矽化石粉製品或類似矽土製者除外	6,421	0.27
其他耐火磚、塊、瓦及其他類似之耐火陶瓷建材製品，但矽化石粉製品或類似矽土製者除外	16,993	0.72
其他鈉之矽酸鹽	184	0.01
其他電氣矽鋼扁軋製品，寬度 600 公厘及以上者，以頻率 50 赫芝最大磁通密度 1.5 韋伯/平方公尺時鐵心損失在 5 瓦特/公斤及以上但未達 6.5 瓦特/公斤者	376	0.02
其他電氣矽鋼扁軋製品，寬度 600 公厘及以上者，以頻率 50 赫芝最大磁通密度 1.5 韋伯/平方公尺時鐵心損失在 6.5 瓦特/公斤及以上者	111	0.00
其他電氣矽鋼扁軋製品，寬度 600 公厘及以上者，以頻率 50 赫芝最大磁通密度 1.5 韋伯/平方公尺時鐵心損失低於 5 瓦特/公斤者	24,938	1.05
其他電氣矽鋼扁軋製品，寬度小於 600 公厘者，以頻率 50 赫芝最大磁通密度 1.5 韋伯/平方公尺時鐵心損失在 6.5 瓦特/公斤及以上者	60	0.00
其他電氣矽鋼扁軋製品，寬度小於 600 公厘者，以頻率 50 赫芝最大磁通密度 1.5 韋伯/平方公尺時鐵心損失低於 5 瓦特/公斤者	1,363	0.06
其他聚矽氧，初級狀態	5,644	0.24
其他熱軋矽錳鋼條及桿，繞成不規則捲盤狀	3,448	0.15
其他類似矽質土，不論是否煅燒者，其視比重不超過 1 者	2,234	0.09
初級狀態或呈板、片、條狀之未硫化配合橡膠，經與碳黑或氧化矽配合者	1,689	0.07
坭堦，含石墨或其他碳或上述產品之混合物重量超過 50%	440	0.02

中文貨名(含矽物料)	100-105 年 各項平均進口量(公噸)	所佔 比例 (%)
者，但矽化石粉製品或類似矽土製者除外		
坭塼，含氧化鋁（ $Al_2O_3$ ）或氧化鋁與二氧化矽（ $SiO_2$ ）之混合物或化合物重量超過50%者，但矽化石粉製品或類似矽土製者除外	136	0.01
矽之碳化物	31,074	1.31
矽多晶體	28,293	1.19
矽油	10,899	0.46
矽油膏	76	0.00
矽砂及石英砂	1,372,914	57.96
矽晶片（正方形或四角為圓弧狀之正方形），邊長6吋及以上，但未達8吋者	4,373	0.18
矽晶棒	3,913	0.17
矽晶圓，直徑12吋及以上者	2,208	0.09
矽晶圓，直徑5吋及以上，但未達6吋者	90	0.00
矽晶圓，直徑6吋及以上，但未達8吋者	10,801	0.46
矽晶圓，直徑8吋及以上者，但未達12吋者	855	0.04
矽晶圓，直徑未達5吋者	85	0.00
矽鈦鐵	6	0.00
矽酸鈉（水玻璃）	49,466	2.09
矽酸複鹽或錯鹽，包括鋁矽酸鹽水合物，不論是否符合化學定義者	2,050	0.09
矽酸鋁	982	0.04
矽酸鈾	820	0.03
矽酸鎂	590	0.02
矽鉻鐵	148	0.01
矽樹脂	2,696	0.11
矽橡膠	11,821	0.50
矽錳鋼線	1,537	0.06
矽錳鐵	122,295	5.16
矽藻土，已加工煅燒者，其視比重不超過1者	6,549	0.28
矽鐵，以重量計含矽量不超過55%者	2,453	0.10
矽鐵，以重量計含矽量超過55%者	96,526	4.08
非合金生鐵，以重量計含0.5%及以下之磷且含矽量1.2%及以上但小於1.5%者	122,315	5.16



中文貨名(含矽物料)	100-105 年 各項平均進口量(公噸)	所佔 比例 (%)
非合金生鐵，以重量計含 0.5% 及以下之磷且含矽量 1.5% 及以上但小於 2.0% 者	36,591	1.54
非合金生鐵，以重量計含 0.5% 及以下之磷且含矽量 2.0% 及以上者	120,795	5.10
非合金生鐵，以重量計含 0.5% 及以下之磷且含矽量小於 1.2% 者	142,474	6.01
氟矽酸鈉	423	0.02
氟矽酸鉀	5	0.00
紅柱石、藍晶石及矽線石	3,364	0.14
耐火磚、塊、瓦及其他類似之耐火陶瓷建材製品，但矽化石粉製品或類似矽土製者除外，以氧化鎂、氧化鈣、或三氧化二鉻表示之，含鎂、鈣、或鉻元素，不論單計或合計，其重量超過 50% 者	33,629	1.42
耐火磚、塊、瓦及其他類似之耐火陶瓷建材製品，但矽化石粉製品或類似矽土製者除外，含氧化鋁 (AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )，二氧化矽 (SiO <sub>2</sub> ) 或上述產品之混合物或化合物，其重量超過 50% 者	10,535	0.44
偏矽酸鈉	1,897	0.08
晶狀具方向性電氣矽鋼扁軋製品，寬度 600 公厘及以上者	11,475	0.48
晶狀具方向性電氣矽鋼扁軋製品，寬度小於 600 公厘者	330	0.01
鉀之矽酸鹽	303	0.01
實驗室、衛生或醫療用之玻璃器，已否刻度或校正者均在內，屬熔凝石英或其他熔化矽砂製者	2,024	0.09
熔凝石英或其他熔化矽砂製玻璃管，未加工	754	0.03
聚矽烷	88	0.00
熱軋矽錳鋼條及桿，焊接電極用，繞成不規則捲盤狀	2,085	0.09
磚、塊、瓦及其他陶瓷製品，以矽化石粉製者（例如矽藻土）或類似矽土製者	210	0.01
總計	2,368,707	100

資料來源：財政部關務署統計資料庫查詢系統

進一步分析國內 100-105 年進口量最高之矽砂及石英砂及進口價值最高之矽晶圓（直徑 6 吋及以上，但未達 8 吋者），其中

矽砂及石英砂進口量平均每年約 137 萬公噸(表 2.2-5)，除 101 年進口量較前年度減少外，其餘每年進口量皆較前年度增加，另在進口國家部分，主要進口國家為澳大利亞佔 61.8%，其次為越南 18.9%及柬埔寨 14.7%。除進口外我國亦有少量自產矽砂及相關物料，歷年產量詳表 2.2-6 所示，僅矽砂部分我國每年自產量約 12 萬公噸，自 101 年起有逐步上升跡象，另因近期環保意識抬頭且再生粒料之增加使用，故大理石(水泥用)之自產量已呈逐步下降趨勢。

矽晶圓 (直徑 6 吋及以上，但未達 8 吋者)進口價值平均每年約 388 億元(表 2.2-7)，101 年、104 年及 105 年進口價值較前年度降低，102 年及 103 年進口價值則較前年度提升，另於「矽晶片 (正方形或四角為圓弧狀之正方形)，邊長 6 吋及以上，但未達 8 吋者」，自 104 年開始進口，其進口總價值已超越矽晶圓(直徑 6 吋及以上，但未達 8 吋者)，相關進口價值及國家佔比詳表 2.2-8 所示，未來有逐步增加且取代矽晶圓之趨勢，另在進口國家部分，主要進口國家為中國大陸，其次為南韓及日本。

**表 2.2-5 矽砂及石英砂進口量及進口國家佔比**

年度	矽砂及石英砂進口量(公噸)	矽砂及石英砂進口國家佔比
100 年	1,311,478	澳大利亞 51.2% 柬埔寨 37.6% 越南 8.0% 中國大陸 2.0% 其他 1.2%
101 年	1,074,211	
102 年	1,408,849	
103 年	1,509,402	
104 年	1,511,081	
105 年	1,422,463	

資料來源：財政部關務署統計資料庫查詢系統

**表 2.2-6 矽砂及矽相關礦產台灣自產量(單位：公噸)**

年度	矽砂	大理石(石材用)	大理石(水泥用)	大理石(原料石)
100 年	173,354	13,807	0	24,680,636
101 年	58,157	15,882	0	22,909,851
102 年	61,717	19,628	17,085,012	5,103,044
103 年	131,651	20,384	16,085,246	4,485,536
104 年	132,468	16,055	14,309,894	3,712,080
105 年	175,642	8,975	12,494,749	3,414,422

資料來源：經濟部礦務局統計資料庫查詢系統

**表 2.2-7 矽晶圓(徑 6 吋及以上，但未達 8 吋者)進口價值及國家佔比**

年度	矽晶圓(徑 6 吋及以上，但未達 8 吋者)進口價值(新台幣千元)	矽晶圓(徑 6 吋及以上，但未達 8 吋者)進口國家佔比
100 年	66,815,151	美國 22.7% 德國 20.8% 中國大陸 20.4% 日本 16.5% 馬來西亞 5.7% 其他 13.9%
101 年	34,688,301	
102 年	42,422,730	
103 年	53,882,823	
104 年	31,720,669	
105 年	3,387,002	

資料來源：財政部關務署統計資料庫查詢系統

表 2.2-8 矽晶片（正方形或四角為圓弧狀之正方形），邊長 6 吋及以上，但未達 8 吋者進口價值及國家佔比

年度	矽晶片（正方形或四角為圓弧狀之正方形），邊長 6 吋及以上，但未達 8 吋者 (新台幣千元)	矽晶片（正方形或四角為圓弧狀之正方形），邊長 6 吋及以上，但未達 8 吋者
100 年	0	中國大陸 88.5%
101 年	0	南韓 4.7%
102 年	0	德國 2.3%
103 年	0	新加坡 1.8%
104 年	20,996,460	馬來西亞 1.5%
105 年	41,746,539	其他 1.2%

資料來源：財政部關務署統計資料庫查詢系統

## 2.3 關鍵物料之應用趨勢

矽之用途非常廣泛，常見之用途包括：矽晶圓、矽砂、矽油、碳化矽、有機矽等，以下針對各常見用途之應用趨勢進行說明：

### 一、矽晶圓

首先在矽晶圓部分，由於矽具有一定的導電性，但矽晶體中沒有明顯的自由電子，因此矽晶體不具有金屬性質，且隨溫度升高而增加，而具有半導體性質，在純矽中摻入少許的砷或磷等元素，就會多出一個自由電子，形成 n 型半導體；在純矽中摻入少許的硼，反而少了一個電子(可視為多一個正電荷)，而形成 p 型半導體。

矽晶圓的生產方式有許多種，如改良西門子法、矽烷法和流

化床法…等，其中較簡單及常用者為改良西門子法，其係將二氧化矽提煉，經由高溫將矽粉與 HCl 合成為  $\text{SiHCl}_3$ ，然後對  $\text{SiHCl}_3$  進行化學精制提純，接著對  $\text{SiHCl}_3$  進行精餾，使其純度達到 99.9999999%(9~11 個 9 以上)，最後在還原爐中用  $1050^\circ\text{C}$  的高溫下，用氫氣對  $\text{SiHCl}_3$  進行還原，而長成高純度之「多晶矽」矽棒。而單晶矽則可在高溫下利用晶種將融化狀之多晶矽進行拉引，使之形成單晶矽錠(Ingot)。一根八吋矽晶棒重量約一百二十公斤，經過切割後可成為積體電路(IC)工廠的一片片八吋矽晶圓。另矽晶棒依面積大小可分為 300mm (12 英寸)、200mm (8 英寸) 和 150mm (6 英寸) 等規格。

矽晶圓主要之用途包括作為積體電路(Integrated Circuit, IC)或作為太陽能電版使用。矽晶圓(片)是最重要的半導體材料，目前 90% 以上的晶片和傳感器是基於半導體單晶矽晶片製造而成。全球半導體矽晶圓市場規模在 2009 年受經濟危機影響而急劇下滑，2010 年反彈之後，又由於 8 吋矽晶圓的普及，造成矽晶圓單位面積的製造成本下降，同時加上企業擴能競爭激烈，在 2013 年全球矽片的市場規模僅達 75 億美金，連續下滑兩年，2014 年後受汽車電子及智能終端的需求帶動，全球半導體矽晶圓出貨量開始復甦，2015 年全球 IC 產業中 IC 製造材料的市場規模為 241

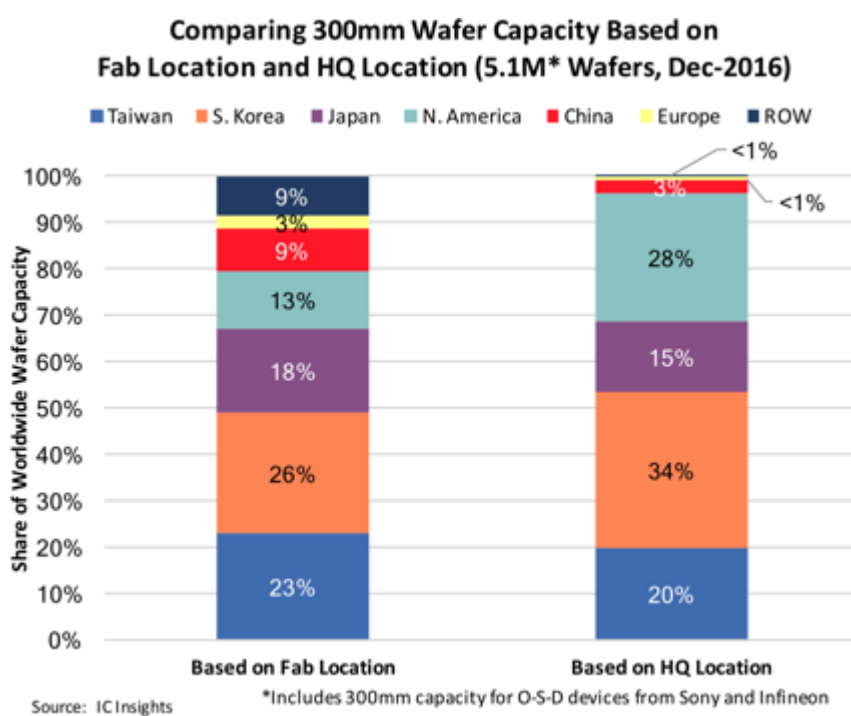
億美元，其中半導體矽晶圓占比約 33%，為 80 億美元左右。

根據 Gartner 的預測，到 2020 年全球半導體矽晶圓市場規模將達到 110 億美元左右。另依 IC Insights 之分析目前全球主要晶圓生產廠商主要由五大廠商掌控，包括：台積電、台聯電、格羅方德、三星和中芯國際，五家企業之總生產量約占全球半導體之 80% 左右，其中在代工方面台積電牢牢占據第一位，年生產份額保持在 50% 左右，是全球晶圓代工之龍頭。台積電在 2015 年收入 264.39 億美元，較前一年收入增長 5.5%，主要係因 20nm 製程與 16nm FinFET 製程的推出，滿足了高階處理器與基頻數據機晶片方面的需求。另以各廠商表現來看，三星是安裝晶圓產能最高的半導體業者，每月產能為 250 萬片 8 寸晶圓，占全球總產能的 15.5%，其中生產最多的是 DRAM 與 FLASH 快閃記憶體。

在不同尺寸的矽晶圓產能方面，根據 IC Insights 在 2016 年 12 月的報告，12 寸晶圓產能排行中，三星以 22% 的生產量奪全球第一，其次為美光的 14%，SK 海力士與台積電同為 13% 位居第三。在 8 寸晶圓製程方面，主要是以代工、模擬/混合信號及微控制器為主。8 寸晶圓廠產能排名中，台積電以 11% 位居第一，德州儀器則以 7% 位居第二，意法半導體(STMicro)、聯電同以 6% 名列第三。根據 IC Insights 預測，預計未來幾年 IC 製造廠的

晶圓產能將保持較為快速的增長，到 2018 年和 2020 年分別達到 1,942 萬片和 2,130 萬片（以 8 寸 200mm 矽片折算），2015-2020 年的複合年均增速為 5.4%。另世界各國之晶圓之生產比例如圖 2.3-1。

矽晶圓的應用方面，根據 IHS 在 2016 年 12 月發布的報告，2015 年全球半導體矽晶圓需求中智慧型手機和電腦的消耗量合計占比為 41.23%，但預計 2016 年將出現下滑，反而是採用 NAND FLASH 工藝的 SSD 對矽晶圓之需求將實現 33% 的增長，其他行業應用（工業、汽車、家庭、網關等）則將有 5%~10% 的增長。



資料來源：IC Insights

圖 2.3-1 世界各國晶圓生產比例

另外矽晶圓在全球太陽能產業部分，因 2008 年國際油價飆升至每桶 147 美元，歐美國家陸續釋出對太陽能生產之補貼優惠，導致中國、台灣廠商大舉進入市場並積極擴產，但隨後受金融海嘯、歐債危機影響，加上投入者過多，但實際市場並未隨之擴展，產業開始出現供需失衡。造成太陽能上游多晶矽與矽晶圓價格狂跌，許多太陽能業者虧損嚴重，紛紛退出市場。加上美國對中國發動反傾銷與反補貼制裁，使太陽能產業受到嚴重影響，慶幸的是台灣受到稅制懲罰相對較中國業者低，反倒獲得轉單效益，使台灣太陽能產業受到衝擊較小。近年中國太陽能廠已不再恣意擴充產能，使太陽能產品價格終於逐漸回穩。

## 二、矽砂

矽砂為含二氧化矽( $\text{SiO}_2$ )成分高的石英砂總稱，矽砂在陸地上以層狀或砂丘分佈，在河口或海岸以濱砂沉積。矽砂在地球表面上含量約為 60%，矽同時也是生物界重要的組成元素之一。其主要用途為玻璃原料、鑄砂原料、水泥原料…等。

在製造玻璃的材料中，矽沙成份約占 50%~70% 以上，將矽砂與其他化學物質，如石灰、純鹼及金屬氧化物混合後，在坩堝中加熱至  $1400^{\circ}\text{C} \sim 1500^{\circ}\text{C}$  融熔而成。矽沙在作為玻璃的原料時，需將天然矽沙中矽成分較高的的細微結晶磨細，始可應用，純矽



砂熔點約為  $2000^{\circ}\text{C}$ ，因此製造玻璃時一般會加入碳酸鈉( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ，蘇打)與碳酸鉀( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ，鉀鹼)，使矽砂熔點降至  $1000^{\circ}\text{C}$  左右。玻璃生產時還可加入鉛丹( $\text{Pb}_3\text{O}_4$ )以減低黏性、使其易於加工、產生光澤、提高折射率；若加入氧化鎳( $\text{NiO}$ )與氧化錳( $\text{MnO}$ )等則可去除因氧化鐵( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )所造成的青綠色。由於透明是玻璃最大的特點，但一般的玻璃因為製造時加入了碳酸鈉，所以會吸收短於  $400\text{nm}$  波長的紫外線。如要讓紫外線穿透，必須以純二氧化矽製造，這種玻璃成本較高，一般被稱為石英玻璃。

另在玻璃中加入金屬和金屬氧化物則可以改變玻璃的顏色。如錳可產生淡紫色的玻璃；鈷可產生藍色的玻璃；錫的氧化物及砷氧化物可產生不透明的白色玻璃；銅的氧化物則會產生青綠色的玻璃，但金屬銅則會產生深紅色、不透明的玻璃。另外，改變玻璃生產溫度亦會改變這些金屬化合物造成的顏色，但當中的化學原理非常複雜，至今仍然未被澈底分析出來。此外，玻璃依其功能來分尚可包括強化玻璃、反射玻璃、夾層(安全)玻璃、調光玻璃、液晶面版玻璃、可撓式玻璃…等，由於玻璃多為各行業之零組件之一，其應用趨勢多配合各行業之需求，如在 3C 產業部分，目前玻璃將朝抗污、防指紋的塗層技術進行研發，並配合未來產品需求朝可撓式玻璃進行開發。

矽砂在金屬工業上常用來作為鑄砂使用，一般鑄造可分為砂模鑄造、脫蠟鑄造、金屬模鑄造及其他(如離心鑄造、真空鑄造)等，其中又以砂模鑄造最為常見。砂模鑄造在數千年前已開始應用，一般鑄模砂原料以矽砂 ( $\text{SiO}_2$ ) 最為常見，因矽砂具有溶點高不易分解、價廉耐用、可回收、形狀與顆粒選擇性高等優點，但純矽砂本身並無黏結能力，因此須加入部分黏土才可獲得黏結性能。目前砂模鑄造應用非常廣泛，適用於各種材料、大小及複雜外形的零件，且相關技術成熟，對產品表面粗糙度及尺寸公差控制良好，甚至可改進材料性質，達到高的產能。近年鑄砂部分亦導入環保型呋喃樹脂與矽砂共同摻配使用，或採用新興之 3D 列印技術，利用 3D 列印技術大幅縮短模具開發週期、提高開發件生產效率，製造出傳統生產技術無法製造出的形狀複雜之鑄件產品(如圖 2.3-2)



資料來源：金屬中心

**圖 2.3-2 3D 砂模列印機**

國內砂砂之主要用途除玻璃、鑄砂外，以水泥業使用量較大，水泥製造時，將大理岩(石灰石)、粘土、矽砂、鐵渣等原料以適當比例配料，研磨後再經均勻拌合選粉後存於生料庫中。生料再經旋窯以 1450~1500°C 高溫燒至半熔融，再掉入冷卻機中予以冷卻後形成熟料，將熟料及石膏經研磨至標準細度即可成為水泥製品。依財政部國稅局所編列之水泥及其製品業，每公噸水泥產品約使用 0.22 公噸的矽砂，故水泥中矽砂添加比例約為 22%，以 2016 年台灣水泥生產量約 1,200 萬公噸<sup>1</sup>計，換算其使用之矽砂約 264 萬公噸。另每方(立方米)混凝土中所使用之砂含量約

---

<sup>1</sup> 資料來源：經濟日報(<https://money.udn.com/money/story/5648/2534495>)

0.878 公噸，以 2016 年台灣混凝土使用量約 3,460 萬立方米計，換算其使用之砂量約 3,038 萬公噸之砂。

### 三、有機矽

有機矽的基本結構單元是由矽—碳或矽—氧鏈節所構成的，側鏈則通過矽原子與其他各種有機基團相連。因此，在有機矽產品的結構中既含有有機基結構，又含有無機結構，這種特殊的組成和分子結構使它集有機物的特性與無機物的功能於一身。與其他高分子材料相比，有機矽具有耐高低溫、絕緣、低表面張力、不易分解、耐輻照等特性。有機矽中最常見的就是矽油(Silicone oil)，矽油是一種不同聚合度鏈狀結構的聚有機矽氧烷，一般可由二甲基二氯矽烷加水水解產生聚環體，再經裂解、精餾製得低環體，然後把環體、催化劑等放在一起調聚就可得到各種不同聚合度的混合物，最後經減壓蒸餾除去低沸物就可製得矽油。

矽油具有卓越的耐熱性、電絕緣性、疏水性、具惰性和較小的表面張力，此外還具有低的黏滯係數、較高的抗壓縮性，部分種類還具有耐輻射的性能，在各種矽油中，以甲基矽油套用得最廣泛，是矽油中最重要的品種，其次是甲基苯基矽油。矽油之用途非常廣泛，在電子、汽車、機械、化工、醫藥及食品等行業都有使用，如作為高級潤滑油、防震油、絕緣油、消泡劑、乳霜、

乳液、洗面乳、化妝水、彩妝及香水等原料，此外，亦可利用其消泡作用，產製胃腸藥及肺水腫消泡氣霧劑等藥物。

中國為目前有機矽材料的最大消費國。由於紡織，電子及電器產品的大量出口和國內建築、紡織、汽車及日化等行業對有機矽材料的旺盛需求，因此，中國將有機矽列入了新材料「十二五」規劃項目之一，更使其未來之生產與使用量預期都可大幅成長。據美國諮詢公司 MarketsandMarkets 的一份最新報告顯示，全球有機矽市場到 2017 年市值將達 194 億美元。從消費區域看，目前世界主要消費區域集中在中國、北美和歐洲，比重分別約為 30%、20%和 25%，而未來需求量的增長中心將是中國及太平洋地區。

#### 四、碳化矽

碳化矽俗稱金剛砂，為矽與碳鍵結而成的化合物，但因其屬簡單的碳矽化合物不含其他有機物，故非屬有機矽而為無機化合物。碳化矽在自然界以少見的莫桑石礦物的形式存在。碳化矽的用途自 1893 年起被大量用作磨料及耐火材料之原料使用。此外，將碳化矽粉末燒結可得到堅硬的陶瓷狀碳化矽顆粒，可將之用於汽車剎車片、離合器和防彈背心等需要高耐用度的材料中，在電子業上，碳化矽亦被用於產製發光二極體、早期的無線電探測器

之類的電子零件中也有使用。如今碳化矽被廣泛用於製造高溫、高壓半導體，另由於碳化矽(金剛砂)的耐用性和低成本，亦常被當作磨料使用，如砂輪切割、搪磨、水刀切割和噴砂等磨削加工過程，如近年太陽能面板等切割常以碳化矽為水刀原料。

以下彙整各類矽相關產品常用之品質規格如表 2.3-1 所示。

**表 2.3-1 各類矽產品常用之品質規格**

產品名稱	常見品質規格
平板玻璃	SiO <sub>2</sub> 98% 以上，Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 1.10.2%，Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.05~0.10% 以下，CaO+MgO 0.5% 以下，粒度 14~100mesh，-120mesh 佔 15% 以內。
玻璃製品 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 限值	光學玻璃 0.01%，水晶玻璃 0.02%，餐桌玻璃 0.04%，白色瓶玻璃 0.04%，電燈泡 0.05%，化學儀器 0.1%，有色瓶 0.2%。
碳化矽	SiO <sub>2</sub> 99.6% 以上，Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.15% 以下，Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.15% 以下，CaO 0.10% 以下，TiO <sub>2</sub> 0.4% 以下。
鑄砂	SiO <sub>2</sub> 含量愈高愈佳，耐火性良好，粒度分布整齊，顆粒具圓形，砂粒不易破碎。
輕量氣泡 混凝土(ALC)	SiO <sub>2</sub> 90% 以上，Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 2.5% 以下，Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 2% 以下，粒度 5~200mesh。

資料來源：中央大學應用地質研究所(<http://gis.geo.ncu.edu.tw/>)

### 第三章 關鍵物料之供需與循環利用

#### 3.1 關鍵物料產業鏈及物料流佈

依 2.3 節之分析，矽主要產品可分為四大類，包括矽晶圓、矽砂、有機矽及碳化矽等，相關流布概況如圖 3.1-1 所示，以下針對此四類產品之相關產業鏈及物料流佈等進行說明：

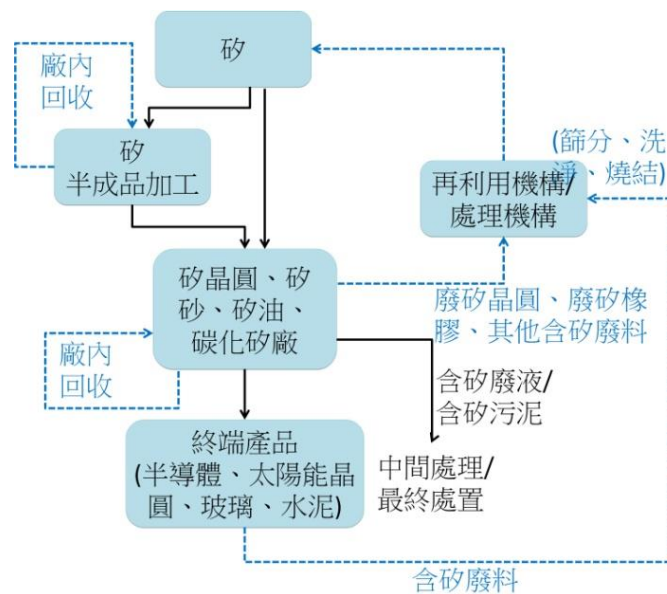


圖 3.1-1 矽物料流布概況

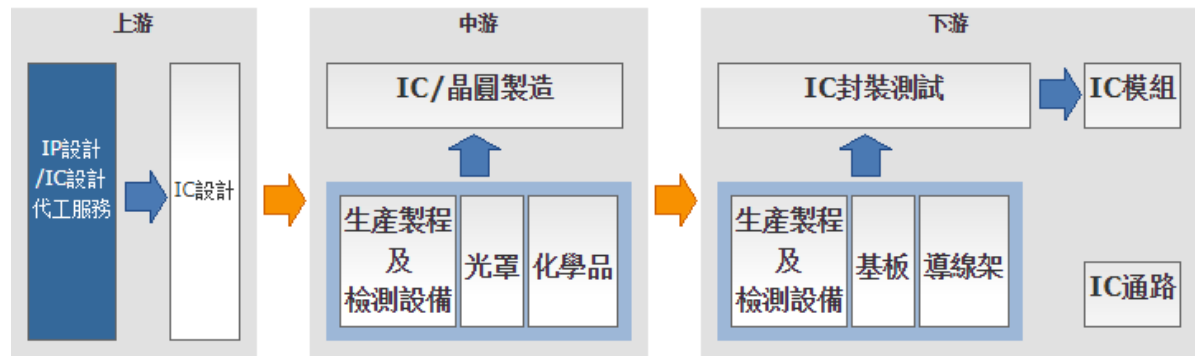
##### 一、矽晶圓相關產業鏈

矽晶圓主要可分為半導體用矽晶圓及太陽能矽晶圓二大類，其中半導體矽晶圓部分，其上游產業鏈為 IP(Intellectual Property，譯為智產元件、智財元件或智權元件)設計及 IC 設計，中游為 IC/晶圓製造業，下游為 IC 封裝測試等(如圖 3.1-2 所示)，國內上

游半導體相關廠商如凌陽、聯陽…約 160 家，中游廠商如僅計算 IC 晶圓製造不含生產製程、光罩、相關化學品等約為五十多家，另下游之封裝測試、IC 模組及 IC 通路等合計約八十多家。

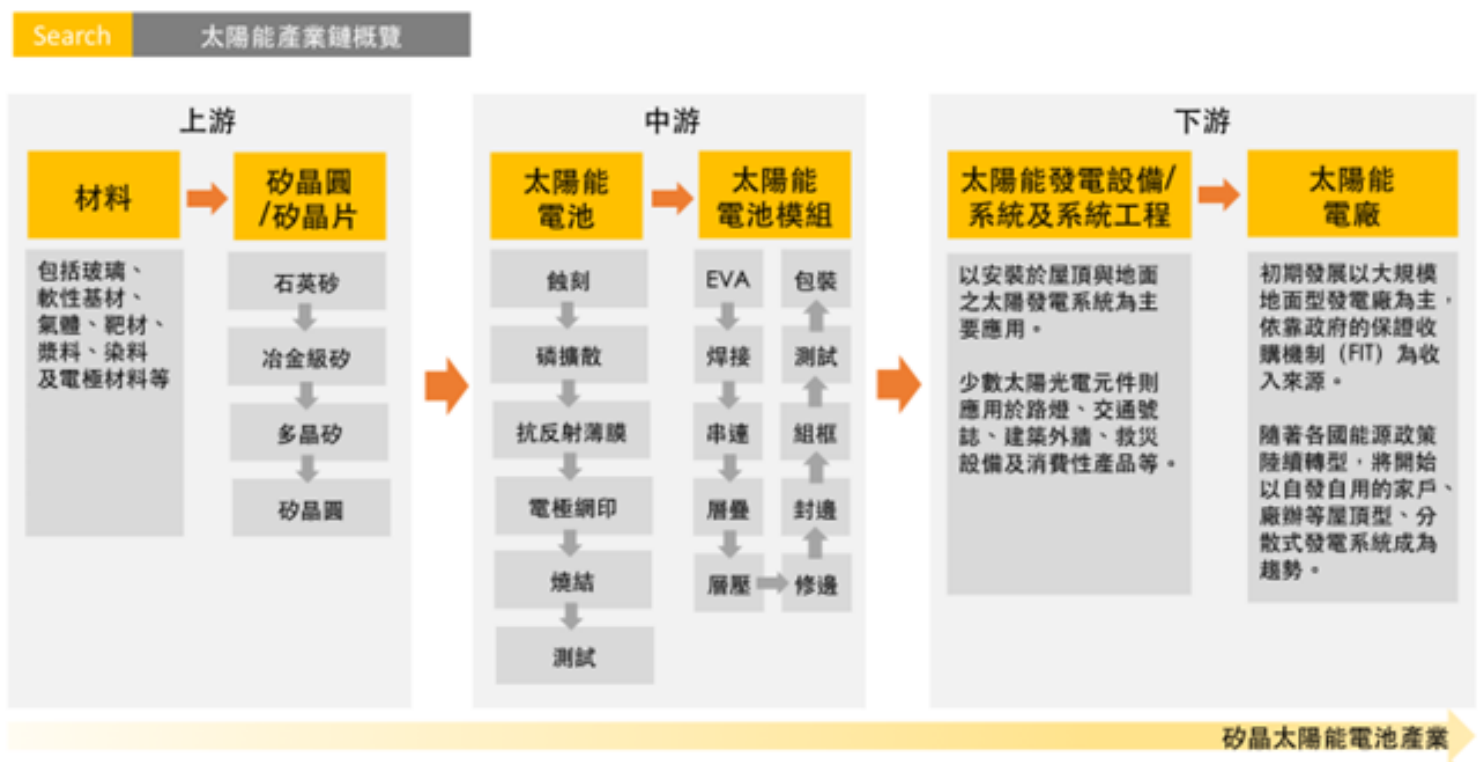
在太陽能矽晶圓部分，其上游(如圖 3.1-3)主要為矽晶圓之生產製造，分為單晶與多晶兩種，將矽原料經由長晶、拉晶、切斷、研磨、切片、清洗等步驟後製成矽晶圓。一般半導體產業中的矽晶圓大多為圓形，但在太陽能產業中則多為方型，以增加矽晶圓之照射面積。太陽能矽晶圓之中游產業為太陽能電池、模組之製造，其將晶圓經蝕刻、磷擴散、抗反射薄膜、電極網印、燒結及測試等製程製成太陽能電池後，再將一片片的太陽能電池拼接並封裝於模組板中，形成太陽能板。而太陽能矽晶圓之下游產業主要包括發電系統工程及太陽能電廠。目前發電系統部分以地面、屋頂及建築物整合設置太陽能發電系統（BIPV）為主。目前國內太陽能矽晶圓等上游廠商有綠能、中美矽晶…等約 30 家，另中游太陽能電池及模組部分包括昇陽光電、益通光能…等二十多家，另下游部分包括茂矽、鑫禾…等約三十多家。





資料來源：產業價值鏈資訊平台(<http://ic.tpex.org.tw/index.php>)

圖 3.1-2 半導體業產業鏈



資料來源：大和有話說(<https://dahetalk.wordpress.com/>)

圖 3.1-3 太陽能矽晶圓業產業鏈

## 二、矽砂相關產業鏈

矽砂之主要用途包括玻璃原料、鑄砂原料、水泥原料…等，

其中在玻璃生產部分，其主要之產業鏈係依玻璃生產種類而不同

，其中平板玻璃下游產業包括建築業、汽車業、傢俱業、裝潢業、光電業、衛浴業、燈具業及電子業等，而玻璃纖維之下游產業則包括電子、電器、通訊、運輸及營建業；另玻璃器皿下游主要以食品、飲料及家電等為主(如圖 3.1-4 所示)。

在鑄砂部分，其上游為鑄砂製造廠，下游為金屬鑄造業者，另依鑄件用途區分，則鑄造業者可分為汽車零件鑄造、大型工具機件鑄造、水五金鑄造、鑄鐵管鑄造及其他鑄件鑄造等。目前國內上游之鑄砂廠商包括金晶矽砂、協興矽砂…約 20 家左右，而中游之鑄造廠依鑄造學會先前之調查約有八百多家，以中小企業為主，雇用人數多在 70 人以下，且以砂模鑄造為主，約占整體產值之 55%，其次則為脫蠟鑄造。

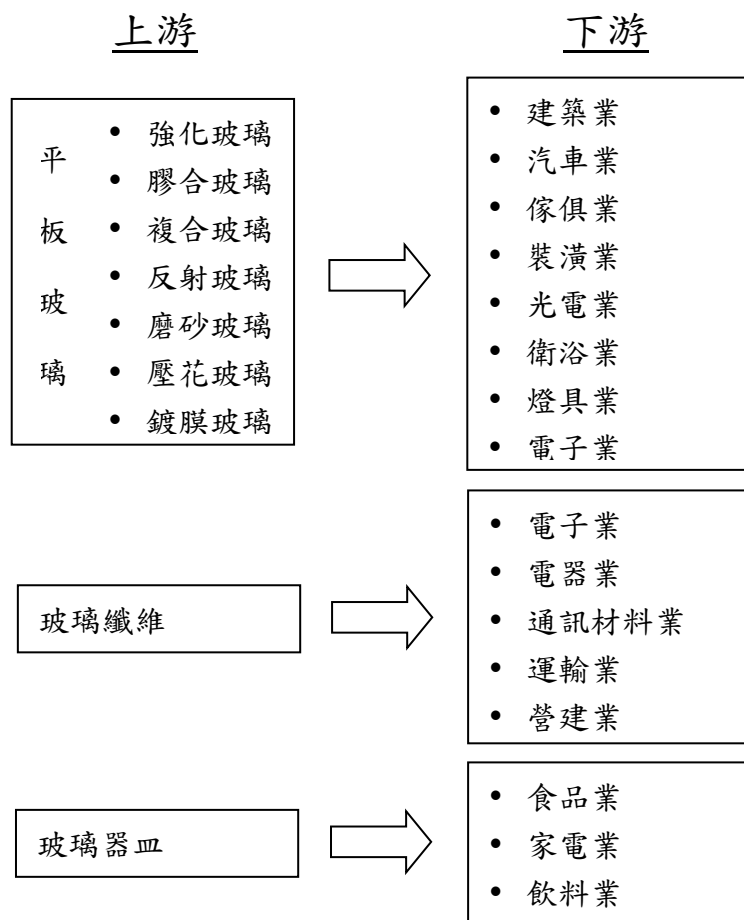
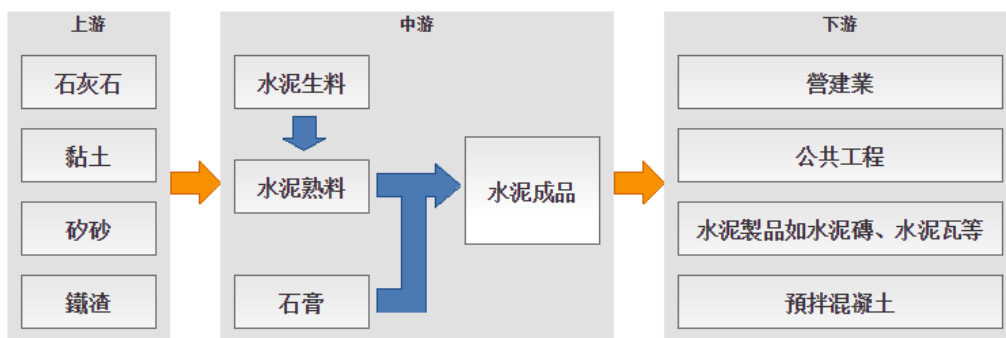


圖 3.1-4 玻璃產業鏈

在水泥原料部分，其產業鏈(如圖 3.1-5)上游產業為石灰石、黏土、矽砂、鐵渣等供應商或採礦場，而中游則為水泥製造廠，目前國內尚有旋窯運作之水泥廠包括台泥、亞泥、信大、幸福、潤泰、東南(目前暫時停工中)等廠。而水泥業之下游則包括營建業、水泥製品業、預拌混凝土業及相關公共工程等。

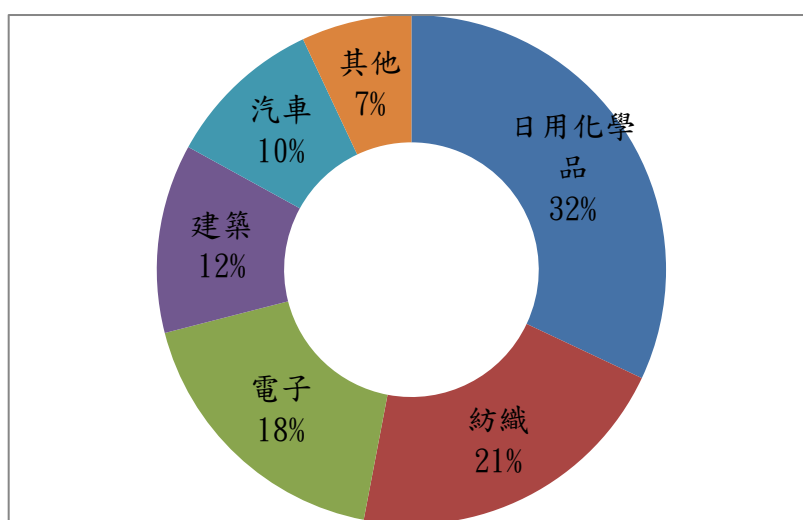


資料來源：產業價值鏈資訊平台(<http://ic.tpex.org.tw/index.php>)

圖 3.1-5 水泥產業鏈

### 三、有機矽產業鏈

矽油係為液體狀態的聚矽氧烷產品，其應用非常廣泛，包括航空、軍事技術的特種材料，也用於日用化學品、建築、電子電氣、紡織、汽車、機械、造紙、油漆、醫藥醫療等，據卓創資訊不完全統計，2014 年中國大陸矽油主要下游產業分布在日用化學品、紡織、電子、建築以及汽車行業，矽油在各行業使用比例如圖 3.1-6 所示。



資料來源：卓創資訊(<https://read01.com/Pao67y.html#.Wa9oHvMjGn4>)

圖 3.1-6 中國大陸矽油主要下游產業

#### 四、碳化矽產業鏈

碳化矽之應用領域廣泛，包括傳統的磨料磨具、耐火材料領域，到高端的碳化矽晶圓、智能電網、新能源汽車、軍用電子系統等，目前全球碳化矽(SiC:矽碳化物)市場，預計 2017~2022 年以 17.4%的年複合成長率 (CAGR) 擴大，另因為半導體產業原有之矽晶圓越來越難以滿足當今市場發展對於高頻、高溫、高功率、高能效、耐惡劣環境以及輕便小型化的新需求，碳化矽(SiC)作為半導體材料，不但具有擊穿電場强度高、熱穩定性好，還有載流電子飽和漂移速度高、熱導率高等特點，可以用來製造各種耐高溫的高頻、高效大功率元件，故目前全球碳化矽元件以每年 60~70% 年成長率快速成長，隨著 SiC 生產成本的降低，SiC 半導體晶圓正在憑藉其優良的性能逐步取代 Si 半導體晶圓。

#### 五、矽物料流布

矽物料之用途十分廣泛，包括半導體及太陽能晶圓、玻璃、水泥、鑄砂等原料及作為碳化矽、矽油等用途，茲彙整矽之各使用用途如圖 3.1-7 所示。

由於矽物料種類繁多且用途廣泛，且部分原料為國內自行開採，而部分卻以進口產品或半產品入國內，因此過去未針對各矽物料之有明確之流布分析，目前僅能透過環保署事業廢棄物申報

及管理系統分析各類原料之使用量，經查 105 年矽物料之使用量以矽砂最多，約為 236 萬公噸，占所有矽物料之 97%，其次為碳化矽、太陽能矽晶圓及半導體矽晶圓(如表 3.1-1 所示)。

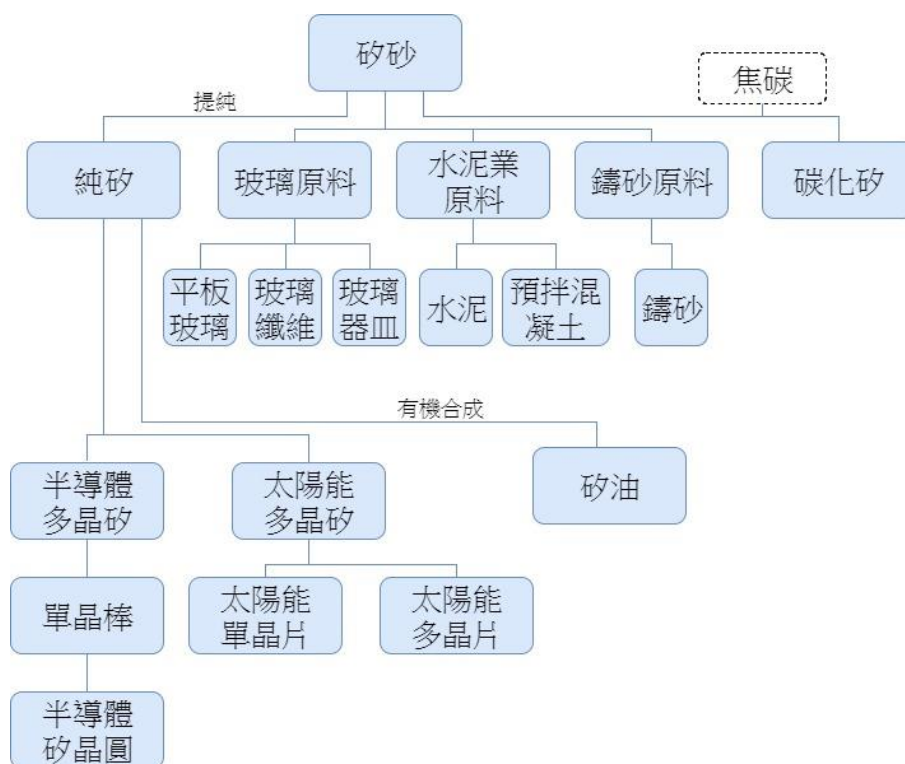


圖 3.1-7 矽物料之主要使用用途

表 3.1-1 105 年國內各矽物料使用量

產品種類	國內使用量(公噸)	比例(%)
矽砂	2,358,075	97.1%
半導體矽晶圓	20,722	0.9%
太能能矽晶圓	21,421	0.9%
碳化矽	22,902	0.9%
矽油	5,215	0.2%
小計	2,428,336	100.0%

### 3.2 關鍵物料供需情勢評析

依 2.3 節及 3.1 節之分析，矽資源之常見用途包括：矽晶圓、矽砂、矽油、碳化矽及有機矽等，當中又以矽砂及矽晶圓分別占所有矽物料之進口重量及價值之最大值，以下就針對上述之物料供需情勢進行說明。

依據財政部關務署統計資料庫查詢系統，觀察 2011 年至 2016 年矽相關資源進出口統計值(表 3.2-1、表 3.2-2、表 3.2-3、表 3.2-4、表 3.2-5、表 3.2-6)，可發現矽砂及石英砂進口重量於 2014 年至 2015 年上升，然出口重量卻下降，初步估計為國內需求增加，另由於國內持續推動以再生粒料作為建材等政策，故亦可能導致該類物料進口量持續下降。另於晶圓部分，直徑 6 吋及以上，但未達 8 吋晶圓雖總進口價格最高，然進口重量卻逐年下滑，且「矽晶片（正方形或四角為圓弧狀之正方形），邊長 6 吋及以上，但未達 8 吋者」，自 104 年開始進口，其進口總價值已超越直徑 6 吋及以上，但未達 8 吋矽晶圓，顯示有取代矽晶圓之趨勢，另於直徑 5 吋及以上，但未達 6 吋之矽晶圓其單位出口價值略高於單位進口價值，顯示該類晶圓以供給國外為主。整體而言，近年國內矽需求進口量遞減，部分物料出口量則遞增，初步推估國內業者於回收如廢矽晶圓等含矽廢棄物略有成效，進口原料部分已非往常之高依賴程度。

回顧 2.2 節之來源分析可發現雖然國內有少量自產矽砂及相關物料，然目前國內使用之矽原料來源主要仍仰賴進口，且該類資源主要集中在於中國大陸及日本，價格易受進口國供應波動影響，然近年因加工技術精進及源頭減量意識抬頭，國際間皆開始以高端技術及替代原料於製程中實行，為此我國亦年年減少對矽物料之進口需求。

針對矽物料之能資源使用情形，以某靶材廠為例，其每年使用之磊晶矽晶圓約 0.17 公噸，消耗之電量平均約 14,000 度/年(3.22kLOE)，故矽物料之能源耗用量約為  $3.22 \div 0.17 \approx 18.94 \text{ kLoe/公噸}$ 。

**表 3.2-1 我國重點矽資源歷年進口量(單位：公噸)**

進口重量	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年
矽砂及石英砂	1,311,478	1,074,211	1,408,849	1,509,402	1,511,081	1,422,463
矽之碳化物	32,697	29,196	32,319	34,785	28,369	29,075
其他有機矽化合物	2,344	2,316	2,643	2,600	2,859	3,506
矽晶圓，直徑未達 5 吋者	84	71	101	91	101	59
矽晶圓，直徑 5 吋及以上，但未達 6 吋者	133	43	130	136	45	50
矽晶圓，直徑 6 吋及以上，但未達 8 吋者	8,900	10,351	15,197	18,429	11,691	232
矽晶圓，直徑 8 吋及以上者，但未達 12 吋者	647	704	927	1,000	968	880
矽晶圓，直徑 12 吋及以上者	1,154	1,764	2,177	2,668	2,496	2,990
矽晶片（正方形或四角為圓弧狀之正方形），邊長 6 吋及以上，但未達 8 吋者	0	0	0	0	8,550	17,687
矽油	11,533	10,026	10,606	10,541	10,979	11,707

資料來源：財政部關務署統計資料庫查詢系統/環興科技股份有限公司計畫整理



表 3.2-2 我國重點矽資源歷年出口量(單位：公噸)

出口重量	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年
矽砂及石英砂	197,000	158,279	161,279	179,982	171,677	128,150
矽之碳化物	847	4,155	10,777	15,603	5,589	7,157
其他有機矽化合物	34	22	1	81	113	108
矽晶圓，直徑未達 5 吋者	200	452	580	652	653	665
矽晶圓，直徑 5 吋及以上，但未達 6 吋者	43	52	31	33	42	47
矽晶圓，直徑 6 吋及以上，但未達 8 吋者	1,390	881	1,730	3,787	2,829	128
矽晶圓，直徑 8 吋及以上者，但未達 12 吋者	207	243	257	282	290	346
矽晶圓，直徑 12 吋及以上者	211	264	422	369	286	436
矽晶片（正方形或四角為圓弧狀之正方形），邊長 6 吋及以上，但未達 8 吋者	0	0	0	0	2,411	3,770
矽油	697	1,280	1,602	2,028	2,368	2,673

資料來源：財政部關務署統計資料庫查詢系統/環興科技股份有限公司計畫整理

表 3.2-3 我國重點矽資源歷年進口值(單位：千元)

進口值	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年
矽砂及石英砂	1,706,285	1,529,058	1,845,962	1,942,295	2,057,821	1,856,041
矽之碳化物	3,499,522	2,577,385	2,414,713	2,582,020	1,923,528	1,788,864
其他有機矽化合物	1,410,120	1,359,026	1,461,725	1,672,413	1,788,848	2,169,506
矽晶圓，直徑未達 5 吋者	2,400,685	1,511,804	1,872,931	1,742,134	1,610,311	1,383,754
矽晶圓，直徑 5 吋及以上，但未達 6 吋者	1,968,304	831,096	1,126,875	1,205,085	775,067	858,843
矽晶圓，直徑 6 吋及以上，但未達 8 吋者	66,815,151	34,688,301	42,422,730	53,882,823	31,720,669	3,387,002
矽晶圓，直徑 8 吋及以上者，但未達 12 吋者	9,782,506	9,034,997	9,625,753	11,866,956	11,875,576	11,578,318
矽晶圓，直徑 12 吋及以上者	19,778,098	21,030,410	21,676,811	24,252,134	23,278,715	25,617,289
矽晶片（正方形或四角為圓弧狀之正方形），邊長 6 吋及以上，但未達 8 吋者	0	0	0	0	20,996,460	41,746,539
矽油	1,303,182	1,069,168	1,120,274	1,147,657	1,309,286	1,333,194

資料來源：財政部關務署統計資料庫查詢系統/環興科技股份有限公司計畫整理

表 3.2-4 我國重點矽資源歷年出口值(單位：千元)

出口值	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年
矽砂及石英砂	1,398,369	1,206,986	1,048,029	1,113,814	1,069,091	854,873
矽之碳化物	106,544	144,104	214,741	160,978	149,389	159,666
其他有機矽化合物	21,045	15,558	1,323	20,797	25,812	32,470
矽晶圓，直徑未達 5 吋者	4,121,986	4,510,691	5,000,961	5,419,518	5,376,845	5,179,800
矽晶圓，直徑 5 吋及以上，但未達 6 吋者	1,167,238	810,141	886,734	1,034,475	1,168,328	968,635
矽晶圓，直徑 6 吋及以上，但未達 8 吋者	12,907,361	6,148,798	7,316,408	11,804,305	9,436,132	2,602,003
矽晶圓，直徑 8 吋及以上者，但未達 12 吋者	4,610,035	5,549,908	4,755,879	4,907,683	5,297,088	5,637,955
矽晶圓，直徑 12 吋及以上者	3,120,051	3,400,239	4,240,390	3,267,161	2,660,775	3,650,690
矽晶片（正方形或四角為圓弧狀之正方形）， 邊長 6 吋及以上，但未達 8 吋者	0	0	0	0	6,858,234	9,317,973
矽油	173,427	205,485	249,056	296,896	318,123	292,356

資料來源：財政部關務署統計資料庫查詢系統/環興科技股份有限公司計畫整理

表 3.2-5 我國重點矽資源歷年單位進口值(千元/公噸)

單位進口值	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年
矽砂及石英砂	1.3	1.4	1.3	1.3	1.4	1.3
矽之碳化物	107.0	88.3	74.7	74.2	67.8	61.5
其他有機矽化合物	601.6	586.8	553.1	643.2	625.7	618.8
矽晶圓，直徑未達 5 吋者	28,579.6	21,293.0	18,543.9	19,144.3	15,943.7	23,453.5
矽晶圓，直徑 5 吋及以上，但未達 6 吋者	14,799.3	19,327.8	8,668.3	8,860.9	17,223.7	17,176.9
矽晶圓，直徑 6 吋及以上，但未達 8 吋者	7,507.3	3,351.2	2,791.5	2,923.8	2,713.3	14,599.1
矽晶圓，直徑 8 吋及以上者，但未達 12 吋者	15,119.8	12,833.8	10,383.8	11,867.0	12,268.2	13,157.2
矽晶圓，直徑 12 吋及以上者	17,138.7	11,922.0	9,957.2	9,090.0	9,326.4	8,567.7
矽晶片（正方形或四角為圓弧狀之正方形）， 邊長 6 吋及以上，但未達 8 吋者	0	0	0	0	2,455.7	2,360.3
矽油	113.0	106.6	105.6	108.9	119.3	113.9

資料來源：財政部關務署統計資料庫查詢系統/環興科技股份有限公司計畫整理

表 3.2-6 我國重點矽資源歷年單位出口值(千元/公噸)

單位出口值	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年
矽砂及石英砂	7.1	7.6	6.5	6.2	6.2	6.7
矽之碳化物	125.8	34.7	19.9	10.3	26.7	22.3
其他有機矽化合物	619.0	707.2	1,323.0	256.8	228.4	300.6
矽晶圓，直徑未達 5 吋者	20,609.9	9,979.4	8,622.3	8,312.1	8,234.1	7,789.2
矽晶圓，直徑 5 吋及以上，但未達 6 吋者	27,145.1	15,579.6	28,604.3	31,347.7	27,817.3	20,609.3
矽晶圓，直徑 6 吋及以上，但未達 8 吋者	9,285.9	6,979.3	4,229.1	3,117.1	3,335.5	20,328.1
矽晶圓，直徑 8 吋及以上者，但未達 12 吋者	22,270.7	22,839.1	18,505.4	17,403.1	18,265.8	16,294.7
矽晶圓，直徑 12 吋及以上者	14,787.0	12,879.7	10,048.3	8,854.1	9,303.4	8,373.1
矽晶片（正方形或四角為圓弧狀之正方形），邊長 6 吋及以上，但未達 8 吋者	0	0	0	0	2,844.6	2,471.6
矽油	248.8	160.5	155.5	146.4	134.3	109.4

資料來源：財政部關務署統計資料庫查詢系統/環興科技股份有限公司計畫整理

### 3.3 廢棄與循環再生利用

自然界中矽資源非常豐富，隨著近些年矽材料的應用日漸廣泛，矽資源的回收逐漸被重視起來。市場上回收的含矽廢料主要包括：廢矽晶圓、廢矽橡膠、太陽能電池及其他含矽廢料等，以下針對廢矽晶圓及廢矽橡膠回收說明如下。

#### 一、廢矽晶圓回收

矽晶圓長晶過程因矽晶棒頭尾兩端形成圓錐狀而無法切成固定大小晶片，需要予以裁切去除，產生「廢矽晶頭尾料」。因其成分與產出的單晶矽晶棒之特性相似，可重新投入長晶爐內進行冶鍊，重新再經過長晶製程發展為單晶矽晶棒。其他的矽晶圓

製程（如：研磨、拋光）皆有可能因應力不當而造成矽晶圓破損片，一般分為研磨前破片、研磨後破片及拋光後破片，可由晶片表面亮度與光滑程度判別，矽晶圓破片大都已经過不同的表面處理程序，因此，回收後還需再經酸洗製程才可重新再利用。

自 2002 年開始，多晶矽材料廠開發出改善太陽能電池的新製造技術，使得多晶矽太陽能電池的產能與需求開始大幅地成長，對矽晶圓材料的消耗量大增，也大幅增加全球矽晶圓材料的使用量，依據國際半導體設備暨材料協會（SEMI）統計，2003～2004 年的全球矽晶圓材料使用量大幅增加 22%，預估 2010 年以前，全球使用年需求量仍有 6.2% 成長率，驅使全世界矽晶圓需求不斷激增，造成矽晶圓破片資源化技術廣泛應用於生產太陽能電池晶片。

由於太陽能電池無論使用單晶矽或多晶矽作為原料，均利用其矽的特性達成能源轉換之目的。太陽能電池的矽晶圓材料之矽純度約 97% 以上，相較於半導體業者所要求的純度與規格條件，均遠不如半導體晶圓之矽純度 99.99999999%，若利用半導體製程產生破損的廢矽晶圓片做為矽原料，也較開採二氧化矽的礦砂進行冶煉容易許多。

此外，太陽能電池晶圓並不拘泥於形狀，利用破損的矽晶圓

再製成為太陽能矽晶圓片，可以有效降低成本，其製作原理主要將外表破損的矽晶圓切割成為太陽能電池所需的外型（通常為矩形），並利用濃度 48% 之氫氟酸浸泡，浸泡結束後再以去離子水與丙酮先後清洗其外表油污，並在晶片較光亮面塗上一層由硼酸與氧化鋁（濃度比例 1：3）配成的混合液，放入約 1,050℃ 的高溫爐 15 分鐘加以擴散，氧化鋁的作用在於防止晶片因擴散冷卻而碎裂，爐內應保持抽真空狀態或通入氮氣，以防止氧化反應。因為擴散過程中，硼元素可能會滲入晶片邊緣或背面，而造成漏電現象，所以晶片取出後，需要在晶片背面與邊緣以金剛砂進行研磨，再加入氫氟酸腐蝕其擴散過程可能會生成之氧化層。

傳統多晶矽鑄造技術的門檻不高，其關鍵技術在於多晶矽熔爐之熱場設計與溫梯設計，透過最佳化設計達到多晶矽晶體電鈍性晶界控制之目的。各製程產生的單晶矽晶圓破片摻雜多晶矽原料進入澆鑄爐內，在高溫熔融的作用下可以形成多晶體晶板，在經過切片與研磨製成方形的太陽能多晶晶片，可供作生產太陽能電池使用，如圖 3.3-1 所示。

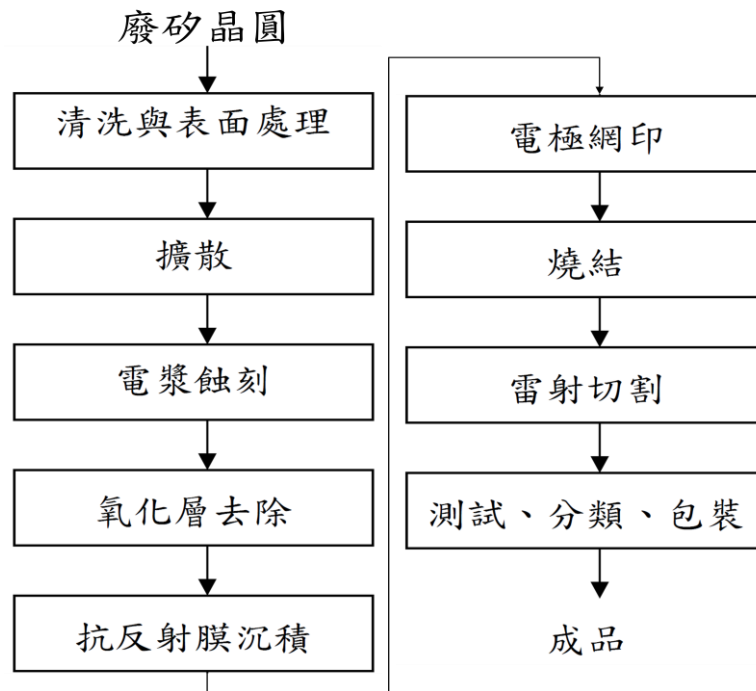


圖 3.3-1 廢矽晶圓製成太陽能電池流程

另外一種製造太陽能矽晶圓片的作法是多晶矽鑄造法，雖然使用單晶矽製造太陽能矽晶圓的材料品質最佳，但原料的選用過程缺乏彈性，必須使用較高純度的矽原料進行提拉成長為單晶，即使長成出單晶也會因雜質含量過高而影響光電轉換效率，原料成本無形中增加不少，高純度的原料取得成為太陽能單晶矽晶圓發展障礙。因此，目前業者使用多晶矽作為太陽能矽晶圓原料選擇的對象，除了有較高的彈性，純度的要求在容易達成的範圍，反而有較大的發展空間。

## 二、廢砂漿回收

太陽能矽晶圓產業於其製程中除會產生廢矽晶圓，廢砂漿亦

是其製程之主要廢棄物之一，國內如茂迪、中美晶、綠能、旭晶、友達等晶圓大廠，其廢砂漿之年產量約有 2.4 萬噸，其中固體物約占五成，而固體物主要成分為矽或矽化物，若以鋼鐵業者角度而言，廢砂漿如妥善處理則可作為還原及升溫之添加原料，因煉鋼過程乃用矽鐵作還原添加料，且矽鐵價格不斐並仰賴進口，故若能將廢砂漿加工則可替代既有進口原料並減少相關物料成本。鑒於上述誘因，目前已有業者與學界共同合作投入相關研究，並可於生產線製出矽碲，其年產量已可達 3,000 公噸，且已有鋼鐵業者使用該類矽碲。

### 三、TFT-LCD 玻璃回收

臺灣乃 TFT-LCD 主要生產源，相關業者於製程中將會產出大量廢玻璃，其中包含素玻璃、黑玻璃及液晶玻璃，廢素玻璃屬公告回收再利用廢棄物，然 TFT-LCD 之廢素玻璃為無鹼硼矽玻璃，且膨脹係數與傳統素玻璃不同因素，故無法以傳統模式回收再利用，因此 TFT-LCD 廢玻璃目前多以陶瓷原料、混凝土粒料、紅磚原料及瀝青混凝土粒料作再利用。

### 四、矽橡膠回收

再生矽橡膠由於矽橡膠已經廣泛的應用到生活生產當中，而且矽橡膠價格較貴，產品優良且具有很多優良的特性，因此再生

矽橡膠也應運而生，再生矽橡膠通過科技手段對回收的廢棄的矽橡膠進行再生技術，這樣的再生利用可以很好的降低公司的生產成本，節約原材料。現在已經應用到了很多從事矽橡膠製品原料生產的廠家。

再生矽橡膠主要的製程包括精選廢矽橡膠並去掉產品的雜質，然後進行分類，最後進行切塊和裂解，製成如圖 3.3-2 所示。

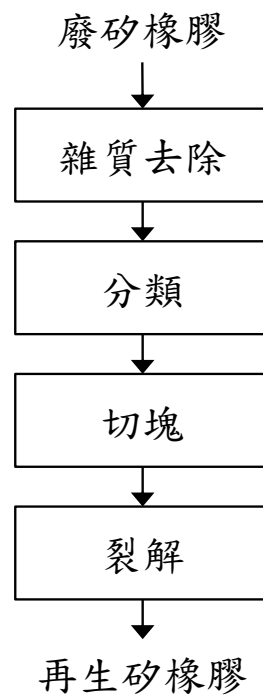


圖 3.3-2 廢矽橡膠回收流程

再生矽橡膠製成需特別注意裂解溫度，如溫度急速提升會造成矽橡膠粒因溫度的急劇變化而炸裂，故在溫度控制上應緩慢的提高；但若溫度過高會引起矽橡膠孔結構的變化而明顯降低其吸



附效果，對於藍膠指示劑或變色矽膠，脫附再生的溫度應不超過120℃，否則會因顯色劑逐步氧化而失去顯色作用；此外，為有效控制再生矽橡膠的質量，，必須使再生矽橡膠的膠粒均勻，故需要去除掉矽橡膠裡面的細小的顆粒。

再生的矽橡膠比起沒有再生過的矽橡膠材料而言，它的彈性、伸展度及撕裂強度都不足未再生的矽橡膠材料，同時再生矽橡膠的硬度也比較大，而且使用久了後也會發現微小的變形。

## 第四章 結論與建議

### 4.1 結論

#### 一、矽資源戰略重要性

世界矽資源豐富，據估算當前之儲量及蘊藏量，足以滿足世界需求數十年之久，在進口國家部分，主要進口國家為中國大陸，其次為南韓及日本，除進口外我國亦有少量自產矽砂及相關物料，單就矽砂部分我國每年自產量約 12 萬公噸，自 101 年起有逐步上升跡象，另因近期環保意識抬頭且再生粒料之增加使用，故國內自產大理石(供交水泥用)或進口之矽砂及石英砂之重量已呈逐步下降趨勢。

#### 二、矽資源應用趨勢

矽物料之用途十分廣泛，包括半導體及太陽能晶圓、玻璃、水泥、鑄砂等原料及作為碳化矽、矽油等用途，由於矽物料種類繁多且用途廣泛，且部分原料為國內自行開採，而部分卻以進口產品或半產品入國內，因此過去未針對各矽物料之有明確之流布分析，目前僅能透過環保署事業廢棄物申報及管理系統分析各類原料之使用量，經查 105 年矽物料之使用量以矽砂最多，約為 236 萬公噸，占有矽物料之 97%，其次為碳化矽、太陽能矽晶圓及半導體矽晶圓，我國雖有少量矽資源，然大部分矽資源仍有

賴國外進口，根據進其統計其進口量有減少趨勢，出口量雖持續增加然並未大幅上升。

### 三、矽資源供需近況

近年國內矽需求進口量遞減，部分物料出口量則顯示遞增，初步推估為國內推動以再生粒料作為建材等政策，進而導致矽進口量持續下降，然該資源仍有賴進口，且資源集中於中國大陸及日本，價格易受進口國影響。

### 四、矽資源回收

初步推估國內業者於回收如廢矽晶圓、廢矽漿、TFT-LCD 玻璃、廢矽橡膠等含矽廢棄物略有成效，進口原料部分已非往常之高依賴程度。然主要資源仍有賴進口，且部分大廠之含矽污泥最終仍交由焚化及掩埋等處理機構處理，導致資源浪費，故其回收技術及替代物料之發展更顯迫切需要。

## 4.2 建議

如高附加價值矽原料之主要產業矽晶圓及半導體產業，其價值極高，過內外業者也持續追求體積更小、效能更好之方式，包括原料之取代及技術之精進等，為目前大多於研究階段，短期內半導體產業仍以矽晶圓為主要原料，故建議參照目前國內外矽晶圓原料之取代及精進技術等相關資訊以為後續產官學業者之參考，並有效利用資源及減

少商業風險，相關說明如下。

## 一、矽晶原料取代

### 1. 「高 k 柵極電介質」和「金屬柵極材料」

電子在碳電晶體內比在矽電晶體內更容易移動，因此能有更快的資料傳輸率。碳奈米管乃一種全新的半導體材料，其電子特性比矽更加吸引人，特別是如果能夠打造寬度只有幾十個原子大小的奈米級電晶體裝置。此外，因為碳奈米管可以達到非常小的奈米等級，效能比任何其他材料的電晶體都還要好，故在未來可望能夠以碳奈米管取代矽。

### 2. 黑磷二維晶體

二維晶體是由幾層單原子層堆疊而成的納米厚度的平面晶體，比如大名鼎鼎的石墨烯，研究發現黑磷二維晶體有良好的電子遷移率( $\sim 1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ )，還有非常高的漏電流調製率(是石墨烯的 10000 倍)，與電子線路的傳統材料矽類似。除了電性能優越以外，黑磷的光學性能同包括矽和硫化鉬在內的其他材料相比也有巨大的優勢，它的半導體帶隙是直接帶隙，即電子導電能帶(導帶)底部和非導電能帶(價帶)頂部在同一位置，實現從非導到導電，電子只需

要吸收能量(光能)，這個特性讓黑磷成為未來光電器件(例如光電傳感器)的一個備選材料。

## 二、技術之精進

太陽能矽晶圓的鑽石切割 (Diamond wire saw) 逐漸取代傳統切削方式 (Slurry-base)，此切割方式至少能節省成本 10-20%，高效率低污染超薄多晶晶片鑽石線切割技術目前已成功開發 140um 多晶片鑽石線切割與表面製絨處理技術，矽料耗損率可再下降 10%，且鑽石線可做到切片時材料耗損少，且不用再使用傳統切削油、粉，對成本、效率都有幫助，更無環保問題，目前此技術多用於目前主攻單晶矽晶圓之切割，未來也會朝向多晶矽晶圓切割進行。

## 第五章 參考文獻

- 【1】 United States Geological Survey, “Germanium Statistics and Information”, 2016
- 【2】 United States Geological Survey, “Mineral Commodity Summaries”, 2016
- 【3】 光電科技工業協進會(PIDA)，全球光通訊市場與台灣產業，2012年
- 【4】 張添晉，「臺灣資源循環經濟之策略發展」，綠基會通訊專題報導，第40期，2015年6月
- 【5】 陳必晟、商能州、馬鴻文，「物質流分析與企業環境管理」，工業污染防治期刊，第117期，2011年7月
- 【6】 財團法人中技社，「永續資源管理技術手冊」，2013年5月
- 【7】 呂長育，稀有資源循環再生利用及戰略儲備之研究，碩士論文，國立臺北科技大學，臺灣臺北，2013年。
- 【8】 United Nations Environment Programme, “Recycling Rates of Metals”, UNEP International Resource Panel, status report, 2011.
- 【9】 王長君，「強化產業能力以因應中國大陸國內需求」，Nikkei Ecology，2011年03月
- 【10】 「臺灣資源循環產業發展策略」，財團法人中技社，2013年7月
- 【11】 美國地質調查局，United States Geological Survey，<https://www.usgs.gov/>
- 【12】 中國產業研究發展網，<http://www.chinairr.org/>
- 【13】 R. Liu, M. Buchert, S. Dittrich, A. Manhart, C. Merz, D. Schüler, “Application of rare earths in consumer electronics and challenges for recycling,” *Oko-Institut*, 2011, pp.286-290.
- 【14】 Z. Chen, “Global rare earth resources and scenarios of future rare earth industry,” *Journal of Rare Earth*, 2011, pp.1-6.
- 【15】 財政部關務署統計資料庫，<https://portal.sw.nat.gov.tw/APGA/GA01>
- 【16】 光電科技工業協進會(PIDA)，全球光通訊市場與台灣產業，2012年
- 【17】 經濟合作發展組織(Organization for Economic Cooperation and Development, OECD)，<http://www.oecd.org/>
- 【18】 郭乃文，「能資源循環型社會之永續物質管理」，農業生技產業季刊，No.46，2016
- 【19】 Eurostat, Economy-wide material flow accounts derived indicators: A Methodological Guide, office for official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2001, p.16

- 【20】 Seiji Hashimoto, Hiroki Tanikawa, Yuichi Moriguchi, “Where will large amounts of materials accumulated within the economy go?-A material flow analysis of construction minerals for Japan,” *Waste Management*, vol. 27, 2007, pp. 1725-1738.
- 【21】 A. Yoshida et al., “Material flow analysis of used personal computers in Japan,” *Journal of Waste Management*, 2009, pp.1602-1614.
- 【22】 B. Steubing et al., “Assessing computer waste generation in Chile using material flow analysis,” *Journal of Waste Management*, vol. 30, 2010, pp.473-482.
- 【23】 G. Finnveden, Å. Moberg, “Environmental systems analysis tools -an overview,” *Journal of Cleaner Production*, 2005, pp.1165-1173.
- 【24】 G.B. Hong, C.M. Ma, H.W. Chen, K.J. Chuang, C.T. Chang, T.L. Su, “Energy flow analysis in pulp and paper industry,” *Energy*, vol.36, pp.3063-3068,2011
- 【25】 A. Elshkaki, E.D. Van Voet, V. Timmermans and M. Van Holderbeke, “Dynamic stock modeling: A Method for the identification and estimation of future waste streams and emissions based on past production and product stock characteristics,” *Energy*, 2005, pp.1353-1363.
- 【26】 刘敬智、王青、顾晓薇、丁一、刘建兴，『中国经济的直接物质投入与物质减量分析』，中国科技论文联机，2005。
- 【27】 Masahiro Oguchi, Takashi Kameya, Suguru Yagi, Kohei Urano, “Production flow analysis of various consumer durables in Japan,” *Resources, Conservation and Recycling*, 2008, pp.463-480.
- 【28】 馬鴻文，永續物質管理，循環經濟與節能減碳，2011年
- 【29】 呂冠霖、李育明，台灣地區總物質需求分析與資源生產力評估，永續產業發展雙月刊，No.48，2010年2月
- 【30】 行政院環境保護署，「全國事業廢棄物申報及管理資訊系統」
- 【31】 經濟部統計處，「工業產銷存動態調查資料庫」

## **矽-關鍵物料調查報告**

出版日期：中華民國 106 年 12 月初版

編審人：張添晉教授

執行製作：環興科技股份有限公司

發行單位：行政院環境保護署

臺北市中華路一段 83 號

電話：02-23117722

網址：<http://www.epa.gov.tw>