

## ◆氟材料及制品◆

## 含氟电子特气发展现状与展望

吴祥虎<sup>1</sup>, 崔武孝<sup>2</sup>

(1. 湖北和远新材料有限公司, 湖北 宜昌 443000; 2. 洛阳森蓝化工材料科技有限公司, 河南 洛阳 471000)

[摘要] 介绍“十四五”期间几种重要含氟电子特气(三氟化氮、六氟化钨、六氟丁二烯、六氟化硫、四氟化碳、六氟乙烷、八氟丙烷)的产品现状、技术路线、应用领域及市场前景。展望“十五五”期间含氟电子特气的发展趋势,包括国产替代加速,技术创新推动高端化发展,下游需求持续增长,绿色化与可持续发展,行业整合与全球化布局。

[关键词] “十四五”; 含氟电子特气; 现状; 应用领域; 展望

[中图分类号] TQ124.3 [文献标志码] A [文章编号] 2097-4566 (2025) 07-0046-10

## Current status and prospects of fluorinated electronic special gases

WU Xianghu<sup>1</sup>, CUI Wuxiao<sup>2</sup>

(1. Hubei Heyuan New Materials Co., Ltd., Yichang 443000, China;

2. Luoyang Senlan Chemical Materials Technology Co., Ltd., Luoyang 471000, China)

**Abstract:** The product status, technical routes, application fields and market prospects of several important fluorinated electronic special gases (nitrogen trifluoride, tungsten hexafluoride, hexafluorobutadiene, sulfur hexafluoride, carbon tetrafluoride, hexafluoroethane, octafluoropropane) during the 14th Five-Year Plan period are introduced. The development trends of fluorinated electronic special gases during the 15th Five-Year Plan period are looked forward, including accelerated domestic substitution, technological innovation promoting high-end development, sustained growth in downstream demand, green and sustainable development, industry integration and global layout.

**Key words:** 14th Five-Year Plan; fluorinated electronic special gases; status; application fields; prospects

电子气体是指具有电子级纯度的特种气体,分为电子大宗气体及电子特气,应用于集成电路、显示面板、半导体照明和光伏等半导体行业<sup>[1]</sup>。全球电子气体市场主要被美国空气化工产品公司、德国林德集团、法国液化空气集团以及日本大阳日酸株式会社4家公司占据,占全球70%以上市场份额。含氟电子特气领域有较强竞争力的海外企业有韩国SK集团(三氟化氮、六氟化钨供应商)、日本关东电化工业株式会社(三氟化氮、四氟化碳、六氟乙烷供应商)、日本昭和电工株式会社(高纯四氟甲烷、三氟甲烷、六氟乙烷、三氯化硼供应商)等。

受益于半导体产业投资加速及“碳中和”、“碳达峰”目标,我国电子气体行业呈高速增长态势。我国仅生产约20%的电子气体品种,主要为集成电路的清洗、蚀刻、光刻等工艺环节,以及掺杂、沉积等工艺的特种气体。近年来部分品种取得突破,产品比例逐年上升。国内的特气企业包括:中船

(邯郸)派瑞特种气体股份有限公司(简称派瑞特气)、广东华特气体股份有限公司(简称华特股份)、金宏气体股份有限公司(简称金宏气体)、江苏南大光电材料股份有限公司(简称南大光电)、江苏雅克科技股份有限公司、天津绿菱气体股份有限公司(简称绿菱气体)、昊华气体有限公司(简称昊华气体)、湖南凯美特气体股份有限公司(简称凯美特气)、湖北和远气体股份有限公司、浙江巨化股份有限公司、上海正帆科技股份有限公司。随着我国电子行业的迅猛发展,我国的电子气体国

[收稿日期] 2025-04-30

[作者简介] 吴祥虎(1989-),男,湖北监利人,工程师,湖北和远新材料有限公司总经理,研究方向:含氟、硅、氯等电子特气材料项目的研发及产业化。

[通信作者] 崔武孝(1965-),男,河南洛阳人,高级工程师,总工程师,研究方向:电解制氟装置、电解氟化装置,高纯氟气及其下游产品含氟电子气体、含氟医药中间体、含氟高性能材料、含氟锂电材料等项目的研发及工业化。

产化生产和市场占有率不断突破。半导体制程中用到的电子气体, 35%已经实现本土化, 还有35%正在本土化。我国电子气体市场规模增长率明显高于全球, 发展空间较大。全球电子气体市场规模见图1, 我国电子特气市场规模见图2。

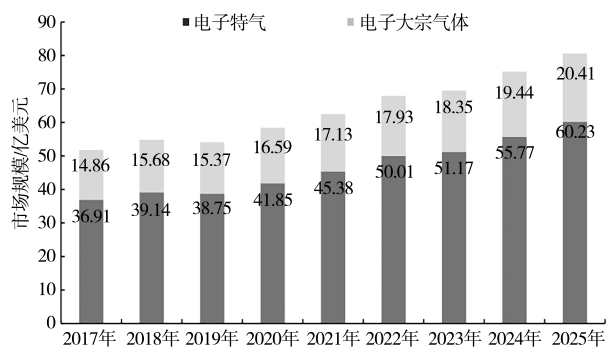


图1 全球电子气体市场规模

Fig. 1 Market scale of electronic gas in global

注:数据来源于国信证券经济研究所。

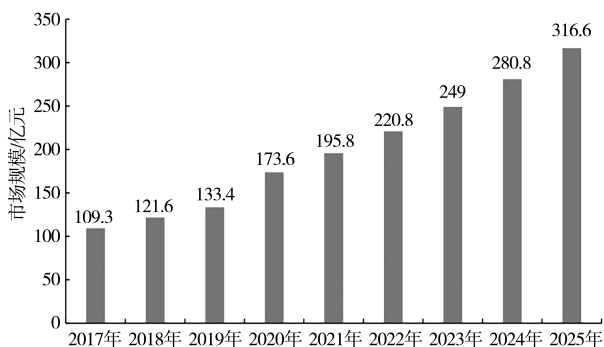


图2 我国电子特气市场规模

Fig. 2 Market scale of electronic special gas in China

注:资料来源于中国半导体工业协会,国信证券经济研究所整理。

电子气体用量中电子大宗气体与电子特气分别

占比55%和45%。按照气体所含化学成分, 电子特气可分为: 含氟气体、含硅气体、含硼气体、含锗气体、氢化物气体等。

含氟电子特气在电子特气中约占30%, 主要用于电子产品的蚀刻剂、清洗剂、掺杂剂、成膜材料等<sup>[2]</sup> (见表1)。

表1 含氟电子特气应用

Table 1 Application of fluorinated electronic special gas

应用工艺	气体类型	种类
图形转移工艺	蚀刻气	NF <sub>3</sub> 、SF <sub>6</sub> 、CF <sub>4</sub> 、C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> 、C <sub>3</sub> F <sub>8</sub> 、CHF <sub>3</sub> 、CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub> 、CH <sub>3</sub> F、CClF <sub>3</sub> 、SiF <sub>4</sub> 、XeF <sub>2</sub> 、C <sub>4</sub> F <sub>6</sub> 、C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> 、C <sub>3</sub> F <sub>8</sub>
	光刻准分子激光气	F <sub>2</sub> /Xe、F <sub>2</sub> /Ne、F <sub>2</sub> /Ar等二元、三元气体
薄膜工艺	清洗气体	SF <sub>6</sub> 、NF <sub>3</sub> 、CF <sub>4</sub> 、C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> 、COF <sub>2</sub> 、F <sub>2</sub>
薄膜工艺	成膜气体	WF <sub>6</sub> 、GeF <sub>4</sub> 、SiF <sub>4</sub>
CVD		
掺杂工艺	离子注入气	BF <sub>3</sub> 、PF <sub>3</sub> 、AsF <sub>3</sub>

### 1 “十四五”期间含氟电子特气现状

“十四五”期间含氟电子特气主要品种有SF<sub>6</sub>、CF<sub>4</sub>、WF<sub>6</sub>、NF<sub>3</sub>、C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>、C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>、PF<sub>3</sub>、BF<sub>3</sub>、SiF<sub>4</sub>、CH<sub>3</sub>F、COF<sub>2</sub>、C<sub>4</sub>F<sub>6</sub>、MoF<sub>6</sub>、F<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>等。产能较大的品种主要是SF<sub>6</sub>、CF<sub>4</sub>、NF<sub>3</sub>、C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>、C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>、WF<sub>6</sub>等<sup>[2]</sup>。主要含氟电子特气产能约为6.2万t/a。随着我国工艺制程的逐步追赶, 先进制程工艺需求品种如八氟环丁烷、六氟丁二烯等, 也将迎来高速增长。“十四五”期间, 无机氟化物重点发展UPSS电子级氢氟酸和含氟电子特气; 鼓励开发电子特气方面小型气体发生装置; 鼓励开发有效监测5N以上高纯气体产品的高精密检测仪器。2023年国际主要气体公司含氟电子特气产品及市场见表2, 国内含氟电子特气公司产品及产量见表3。

表2 2023年国际主要气体公司含氟电子特气产品及市场

Table 2 Fluorinated electronic special gas products and markets of major international gas companies in 2023

企业名称	生产基地	含氟电子特气产品	2023年销量/t	2023年收入/亿美元	市场占比/%
德国林德集团	德国、中国、美国、英国	F <sub>2</sub> 、SF <sub>6</sub> 、WF <sub>6</sub> 、NF <sub>3</sub> 、CF <sub>4</sub> 、CHF <sub>3</sub> 等	5 960	3.748 8	11.54
日本昭和电工株式会社	日本、中国、韩国	CH <sub>3</sub> F、C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> 、C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> 、C <sub>4</sub> F <sub>6</sub> 、C <sub>3</sub> F <sub>8</sub> 、SF <sub>6</sub>	5 187	1.493 9	4.62
索尔维集团	比利时、韩国、德国	F <sub>2</sub> 、SF <sub>6</sub>	3 217	0.521 2	1.61
日本大阳日酸株式会社	日本、美国、韩国、中国	C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> 、C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> 、WF <sub>6</sub> 、NF <sub>3</sub> 、CF <sub>4</sub> 、C <sub>4</sub> F <sub>6</sub> 、C <sub>3</sub> F <sub>8</sub> 、CHF <sub>3</sub>	3 462	0.830 9	2.57
法国液化空气集团	法国、中国、德国、美国	SF <sub>6</sub> 、NF <sub>3</sub> 、WF <sub>6</sub> 、CHF <sub>3</sub> 、CF <sub>4</sub> 、C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> 、C <sub>3</sub> F <sub>8</sub> 、C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> 、C <sub>4</sub> F <sub>6</sub> 等	2 535	1.001 3	3.10
美国空气化工产品公司	美国	C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> 、F <sub>2</sub> 、CHF <sub>3</sub> 、NF <sub>3</sub> 、C <sub>3</sub> F <sub>8</sub> 、CF <sub>4</sub> 、WF <sub>6</sub>	1 944	1.061 4	3.28
日本关东电化工业株式会社	日本、中国	CF <sub>4</sub> 、SF <sub>6</sub> 、NF <sub>3</sub> 、CHF <sub>3</sub> 、C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> 、C <sub>3</sub> F <sub>8</sub> 、C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> 、C <sub>4</sub> F <sub>6</sub>	8 684	3.074 1	9.51
三井化学株式会社	日本	NF <sub>3</sub>	2 056	0.762 8	2.36
东莞市协和工业气体有限公司	美国	SF <sub>6</sub> 、CF <sub>4</sub>	941	0.075 3	0.23
默克(慧瞻)	美国、中国	C <sub>4</sub> F <sub>6</sub> 、CF <sub>4</sub> 、WF <sub>6</sub> 、C <sub>3</sub> F <sub>8</sub> 、NF <sub>3</sub>	4 854	2.300 8	7.12
厚成科技(南通)有限公司	韩国、中国	C <sub>4</sub> F <sub>6</sub> 、WF <sub>6</sub>	155	0.065 3	0.20
晓星化学株式会社	韩国、中国	NF <sub>3</sub> 、F <sub>2</sub>	4 491	1.666 2	5.15
中央硝子株式会社	日本	WF <sub>6</sub>	317	0.363 0	1.12
韩国SK集团	中国	NF <sub>3</sub> 、WF <sub>6</sub> 、C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> 、CF <sub>4</sub> 、C <sub>4</sub> F <sub>6</sub> 、C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> 、CHF <sub>3</sub>	10 588	3.917 6	12.11

表3 2023年国内含氟电子特气公司产品

Table 3 Product of domestic fluorinated electronic special gas companies in 2023

企业名称	主要含氟电子特气产品	2023年销量/t	2023年收入/亿美元	备注
昊华气体	SF <sub>6</sub> 、NF <sub>3</sub> 、CF <sub>4</sub> 、WF <sub>6</sub>	8 323	1.406 9	计划NF <sub>3</sub> 6 000 t/a
华特股份	CH <sub>3</sub> F、CHF <sub>3</sub> 、C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> 、C <sub>3</sub> F <sub>8</sub> 、c-C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> 、CF <sub>4</sub> 等	1 804	0.330 1	提纯、经营为主
派瑞特气	NF <sub>3</sub> 、WF <sub>6</sub> 、C <sub>4</sub> F <sub>6</sub>	7 124	3.220 0	
南大光电	NF <sub>3</sub> 、SF <sub>6</sub>			
山东飞源集团有限公司	SF <sub>6</sub> 、NF <sub>3</sub>	5 179	1.175 6	南大光电收购
福建三明金氟化工科技有限公司	IF <sub>3</sub> 、F <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>			
福建永晶科技股份有限公司	SF <sub>6</sub> 、CF <sub>4</sub> 、F <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>			
成都科美特种气体有限公司	CF <sub>4</sub> 、SF <sub>6</sub>	11 012	85.890 0	
金宏气体	SF <sub>6</sub> 、NF <sub>3</sub> 、CF <sub>4</sub> 、C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> 、C <sub>3</sub> F <sub>8</sub>	857	0.116 6	经营、提纯为主
浙江博瑞电子科技有限公司	WF <sub>6</sub> 、F <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> 、CHF <sub>3</sub> 、C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> 等			
福建德尔科技股份有限公司	SF <sub>6</sub> 、CF <sub>4</sub> 、C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>			
山东锐华氟业有限公司	SF <sub>4</sub> 、IF <sub>3</sub>			
泉州宇极新材料科技有限公司	CF <sub>4</sub> 、C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> 、C <sub>3</sub> F <sub>8</sub> 、C <sub>4</sub> F <sub>6</sub> 、F <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>			
太和气体(荆州)有限公司	BF <sub>3</sub> 、CeF <sub>4</sub>			
绿菱气体	SiF <sub>4</sub> 、C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> 、C <sub>2</sub> F <sub>5</sub> 、C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> 、CF <sub>4</sub>			计划建3 000 t/a NF <sub>3</sub> 装置

我国含氟电子特气市场在过去几年快速增长，产能和产量显著提升，尤其是在三氟化氮、六氟化硫和四氟化碳等关键产品上，国产替代进程加速，市场竞争力不断增强。未来随着下游需求持续增长和技术突破，我国有望进一步扩大市场份额，产能将逐年提高。

## 2 “十四五”期间几种重要含氟电子特气生产现状

### 2.1 三氟化氮 (NF<sub>3</sub>)

2021年国内三氟化氮需求量约1.6万t，占全球总需求量的40%~42%。2019—2021年国内三氟化氮需求量年均复合增长率约为23.2%，按此增长率预计，至2025年国内三氟化氮市场需求量将达到3.7万t，2030年将超过10万t。

#### 2.1.1 NF<sub>3</sub>制备技术路线

(1) 直接法。F<sub>2</sub>和NH<sub>3</sub>或NH<sub>3</sub>的衍生物在惰性气体稀释下直接反应制备NF<sub>3</sub>。因反应有大量的副产物HF生成、温度不易控制且收率较低，工业上采用F<sub>2</sub>与NH<sub>3</sub>在熔融的NH<sub>4</sub>F·(HF)<sub>x</sub>中反应制备NF<sub>3</sub>。熔盐既作为吸热剂，使反应热分散，又作为NH<sub>3</sub>的传递介质<sup>[3]</sup>。优点：不产生爆炸性气体，生产相对比较安全，收率较高，可达到90%。缺点：合成过程不易控制，易堵塞，工艺设备复杂。国际上采用此方法生产的主要是美国空气化工产品公司、韩国晓星化学株式会社等。

(2) 电解氟化法。在特制的电解槽中电解熔融NH<sub>4</sub>F·(HF)<sub>x</sub> (x=1~3)，阳极上生成NF<sub>3</sub>，阴极上产生H<sub>2</sub>。相对直接化合法，电解氟化法相对简单一些，设备投资相对较低。优点：一步反应生成，生

产过程中不需存储和使用高毒性和腐蚀性的F<sub>2</sub>，产品纯度高，工艺连续性良好，产品质量稳定，设备要求低和成本易于控制等。缺点：电解过程阴阳极气体混合，有爆炸危险；转化率相对较低，主副反应之比约为60:35。日本、韩国、中国等均采用电解氟化法生产NF<sub>3</sub>。

#### 2.1.2 NF<sub>3</sub>产能

2023年国内主要三氟化氮生产公司产能为21 000 t/a，2025年将增加至46 300 t/a，产能增长迅速（见表4）。2025年NF<sub>3</sub>实际产量应在3万t/a左右。

表4 2023年、2025年国内三氟化氮生产公司及产能  
Table 4 Nitrogen trifluoride production companies and production capacity in China in 2023 and 2025

公司名称	2023年产能/(t·a <sup>-1</sup> )	计划新增产能/(t·a <sup>-1</sup> )	预计2025年产能/(t·a <sup>-1</sup> )	位置
南大光电	2 000	7 800	11 800	乌兰察布
昊华气体	2 000	6 000	8 000	自贡
山东飞源集团有限公司	2 000		2 000	淄博
派瑞特气	12 000	6 500	18 750	邯郸、呼和浩特
福建德尔科技股份有限公司		10 000		
中氟能新材料科技有限公司		5 000	5 000	雅安
内蒙古绿林生态科技开发有限公司		3 000		
贵州泉鑫化学科技有限公司		3 000		
晓星新材料科技(衢州)有限公司	2 000		2 000	
奥林巴斯(中国)投资有限公司(OCL)	1 000		1 000	

## 2.2 六氟化钨 (WF<sub>6</sub>)

### 2.2.1 WF<sub>6</sub>产品现状

WF<sub>6</sub>是一种强氟化剂，高温下可被氢或其他还原性气体（如GeH<sub>4</sub>、SiH<sub>2</sub>F<sub>2</sub>和二乙基硅烷等）还原为金属钨和HF，该反应应用于化学气相沉积（CVD）中<sup>[4-5]</sup>。六氟化钨是唯一能稳定存在的钨的氟化物。化学气相沉积工艺形成金属钨，制成的硅化钨作为电子工业中集成电路的配线材料；通过混合金属的化学气相沉积工艺制得钨和铼的复合涂层，应用于太阳能吸收器以及X射线发射电极的制造。

随着集成电路工艺不断迭代，三维闪存层数从32层发展至64层和128层，六氟化钨用量呈几何级增长。据统计，2020年六氟化钨全球总需求量约4 620 t，预计2025年全球需求量增长至8 901 t左右，增长将近1倍，年均增速达到14%。据统计，2021年我国六氟化钨需求量约为1 100 t，在使用量增加和下游产能扩张驱动下，预计2025年国内六氟化钨的需求量将达到4 500 t，年均复合增速均为42.2%。

2023年国内外六氟化钨产能见表5。

表5 2023年国内外六氟化钨产能

Table 5 Production capacity of tungsten hexafluoride in domestic and foreign in 2023

项目	公司	现有产能/(t·a <sup>-1</sup> )	规划产能/(t·a <sup>-1</sup> )
国内企业	派瑞特气	2 230	
	浙江博瑞中硝科技有限公司	200	
	昊华气体	600	
	南大光电		500
	福建德尔科技股份有限公司		600
国外企业	韩国SK集团	1 800	
	日本关东电化工业株式会社	1 400	
	厚成科技(南通)有限公司	720	
	中央硝子株式会社	700	
	默克公司	600	

2023年我国高纯WF<sub>6</sub>气体全球用户覆盖率70%，市场占有率28%，国内用户覆盖率98%，国内市场占有率近50%，居世界第一。

### 2.2.2 WF<sub>6</sub>技术路线

(1) F<sub>2</sub>直接反应法：电解氟气与钨粉反应生成六氟化钨粗品，粗品气经冷阱收集、吸附塔纯化、精馏塔精馏，合格后充装。该方法优点是转化率

高，生产成本低；缺点是HF难以去除，纯度提高难度较大。

(2) NF<sub>3</sub>氟化法：三氟化氮与钨粉反应生成六氟化钨粗品，粗品气通过冷阱进行收集，经过吸附塔纯化、精馏塔精馏，检测合格后充装。目前该方法为制备WF<sub>6</sub>的主流工艺，优点是工艺控制相对安全，产品纯度容易提高；缺点是反应转化率相对较低，生产成本低。

## 2.3 六氟丁二烯 (C<sub>4</sub>F<sub>6</sub>)

### 2.3.1 C<sub>4</sub>F<sub>6</sub>产品现状

C<sub>4</sub>F<sub>6</sub>为无色、无味气体，加压可液化，有毒性，具有易燃性，与空气混合达到一定浓度有爆炸危险。C<sub>4</sub>F<sub>6</sub>是一种新型的含氟绿色电子蚀刻气，可以实现近乎垂直的蚀刻加工，为制造小体积、大容量的3D NAND闪存提供了可能；作为下一代蚀刻气体，可取代CF<sub>4</sub>，用于KrF激光锐利蚀刻半导体电容器图形的干工艺<sup>[6]</sup>。在先进制程技术层面有诸多蚀刻上的优点，适合对100 nm以下的电子线路进行蚀刻，性能较全氟碳气体和NF<sub>3</sub>更好<sup>[7]</sup>；C<sub>4</sub>F<sub>6</sub>与C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>相比也具有更高的对光阻和氮化硅选择比<sup>[8]</sup>；C<sub>4</sub>F<sub>6</sub>的全球变暖潜能值（GWP）几乎为0。

集成电路尤其3D NAND的推进及显示面板等下游应用领域的发展，拉动六氟丁二烯需求增长。据日本富士经济统计数据，2021年六氟丁二烯市场需求量约为900 t。据Linx Consulting数据，2021年电子特气市场规模为44.23亿美元，六氟丁二烯占比7%，市场规模为3.11亿美元。随着全球NAND销量上升，主要应用于3D NAND蚀刻的六氟丁二烯需求会快速增长。据广州广钢气体能源股份有限公司公告，截至2023年5月，99.9%纯度的六氟丁二烯产品报价区间（含税）为165万~170万元/t。

C<sub>4</sub>F<sub>6</sub>作为蚀刻气体，具有高选择性、高蚀刻精度、高蚀刻效率、低环境污染等优点，发展潜力大。当前六氟丁二烯产品核心技术主要掌握在日本、韩国、德国等少数国家的企业手中，国内加强了研制与布局，供给端产能稳步增加。

### 2.3.2 C<sub>4</sub>F<sub>6</sub>制备技术路线

国内C<sub>4</sub>F<sub>6</sub>主要制备路线见表6。六氟丁二烯的合成路径较为多样化，但总结起来核心中间体可以分为六氟四氯丁烷、八氟二溴（碘）丁烷、三氟乙烯基氯（溴）化锌三大类，起始原料为四氯乙烯、三氯乙烯及三氯甲烷等氯代烃以及HF、F<sub>2</sub>等含氟物。

表6 国内C<sub>4</sub>F<sub>6</sub>主要制备路线  
Table 6 Main preparation routes of C<sub>4</sub>F<sub>6</sub> in China

方法	制备	备注
丁二烯法	$CH_2=CH-CH=CH_2 + Cl_2 \longrightarrow CH_2Cl-CHCl-CH=CH_2;$ $CH_2Cl-CHCl-CH=CH_2 + Cl_2 \longrightarrow CH_2Cl-CHCl-CHCl-CH_2Cl;$ $CH_2Cl-CHCl-CHCl-CH_2Cl + 6F_2 \longrightarrow CF_2Cl-CFCl-CFCl-CF_2Cl + 6HF;$ $CF_2Cl-CFCl-CFCl-CF_2Cl + 2Zn \longrightarrow CF_2=CF-CF=CF_2 + 2ZnCl_2;$ $ZnCl_2 + 2NaOH = Zn(OH)_2 + 2NaCl$	丁二烯先氯化再氟化,制备六氟四氯丁烷,再用锌粉脱氯得到C <sub>4</sub> F <sub>6</sub> ,工艺简单,易实现规模化生产
三氟氯乙 烯法	$CF_2=CFCl + ICl \longrightarrow CF_2Cl-CFICl;$ $2CF_2Cl-CFICl + Zn \longrightarrow CF_2Cl-CFCl-CFCl-CF_2Cl + ZnI_2;$ $CF_2Cl-CFCl-CFCl-CF_2Cl + 2Zn \longrightarrow CF_2=CF-CF=CF_2 + 2ZnCl_2$	三氟二氯碘烷脱碘,脱氯得C <sub>4</sub> F <sub>6</sub> ,工艺相对熟,已有中试装置
二溴四氟 乙烷作原 料	$CF_3-CFBr_2 + 2Zn \longrightarrow CF_2=CFZnBr + ZnFBr;$ $2CF_2=CFZnBr \longrightarrow CF_2=CF-CF=CF_2 + ZnBr_2 + Zn$	极性非质子溶剂中1,1-二溴四氟乙烷与Zn粉反应生成三氟乙烯基溴化锌,在催化剂存在下偶联得到HFBD <sup>[9]</sup> ,转化率高达99.8%,HFBD纯度为95.0%
三氟乙 烯法	将1,2-二溴四氟乙烷异构化成1,1-二溴四氟乙烷后,在DMF中加锌粉合基氯(溴)成,也可以由三氟乙炔合成三氟溴乙炔后在DMF中加锌粉合成,而三氟乙炔化锌法可由R134a高温脱氟化氢合成,或由三氟氯乙炔氢化合成,同时它也是合成三氟氯乙炔时的主要副产物	二溴四氟乙烷锌粉脱溴

2.3.3 C<sub>4</sub>F<sub>6</sub>产能

2022年国内六氟丁二烯产能总计335 t/a, 规划产能1 900 t/a, 具体分布见表7。

表7 2022年国内六氟丁二烯产能

Table 7 Production capacity of hexafluorobutadiene in China in 2022

公司	产能/(t·a <sup>-1</sup> )	规划产能/(t·a <sup>-1</sup> )	备注
金宏气体 中船特气		200	2023年规划
浙江博瑞电子 科技有限公司	50		
南大光电		100	2023年规划
中化蓝天集团 有限公司		1 000	2023年9月 开始建设
厚成科技 (南通)有限公司	40	200	2023年200 t/a 装置试生产
派瑞特气	100		
梅塞尔集团	45		
北京宇极科技 发展有限公司	100		
山东飞源集团 有限公司		200	2023年开工
福建金石氟业 有限公司		200	2023年2月 装置试生产

2.4 六氟化硫(SF<sub>6</sub>)

2.4.1 SF<sub>6</sub>产品现状

SF<sub>6</sub>具有优良的绝缘性能和减弧能力, 广泛应用于电力设备、半导体制造业等, 用量最大的在电力设备中。电子级SF<sub>6</sub>主要应用于半导体及面板显示器件工艺中的蚀刻与清洗, 具有用量少、纯度高的特点。国内仅有少数厂家能生产电子级SF<sub>6</sub>。因极强的温室效应(全球变暖潜能值(GWP)是CO<sub>2</sub>的23 500倍), 未来使用受到环保法规严格限制。

2.4.2 SF<sub>6</sub>产能

2020年我国新型基础设施建设(简称新基建)给六氟化硫带来了新的发展机遇。5G基站、特高压电网、城际铁路和城市轨道交通、新能源汽车充电桩的产业链中, 特高压电网建设增加对六氟化硫需求较大。2023年全球市场规模约为15亿美元, 2023—2024年一季度出现缺货情况。预计到2030年市场规模将以年均复合增长率(CAGR)3%~5%的速率增长。国内六氟化硫主要厂家及产能情况见表8。2024年国内六氟化硫主要厂家产能达到18 600 t,

表8 2016—2024年国内六氟化硫主要厂家及产能

Table 8 Main manufacturers and production capacity of sulfur hexafluoride in China from 2016 to 2024

公司名称	产能/(t·a <sup>-1</sup> )						备注
	2016年	2017年	2018年	2019年	2023年	2024年	
成都科美特种气体有限公司	5 000	7 000	8 000	8 000	6 000	6 000	
吴华气体	2 800	2 800	2 800	2 800	1 500	1 000	
南大光电			2 000	2 000	1 500	6 100	
福建德尔科技股份有限公司	700	700	700	700	5 000	5 000	
绥宁县联合化工有限责任公司	1 500	1 500	1 000	1 000	0	0	华特收购
新乡利帆氟业有限公司	1 000	1 000	500	500			半停业状态
河南华能氟业有限公司	700	1 000	500	500			半停业状态
重庆大安盈德特种气体有限公司	800	800	1 500	1 500	0	0	盈德气体收购
福建永晶科技股份有限公司	700	700	500	500	500	500	
无锡天致化工科技有限公司	2 000	2 000	2 000	2 000	0	0	
山东锐华氟业有限公司	500	500	1 000	1 000	0	0	2019年后停产

需求量超过 11 000 t。

六氟化硫在环保压力下面临结构性调整，短期内依赖新兴市场需求增长，长期需依赖技术创新和替代品研发。需平衡合规成本与市场机会，关注政策动向（如欧盟 2030 年禁用计划）以规避风险。

未来，因大气寿命及 GWP，SF<sub>6</sub> 市场用量将会逐渐减少。

## 2.5 四氟化碳 (CF<sub>4</sub>)

### 2.5.1 CF<sub>4</sub> 产品现状

CF<sub>4</sub> 产品是微电子工业中用量最大的等离子蚀刻气体，用于硅、二氧化硅、氮化硅和磷硅玻璃等材料的蚀刻，在电子器件表面清洗、低温制冷、气体绝缘等方面大量应用。由于它的化学稳定性极强，还可应用于金属冶炼和塑料行业等<sup>[10]</sup>。

### 2.5.2 CF<sub>4</sub> 产能

2018—2024 年国内四氟化碳主要厂家及产能变化见表 9。

表 9 2018—2024 年国内四氟化碳主要厂家及产能变化

Table 9 Major manufacturers of carbon tetrafluoride and capacity changes in China from 2018 to 2024

项目	产能/(t·a <sup>-1</sup> )				备注
	2018年	2019年	2023年	2024年	
成都科美特特种气体有限公司	2 000	2 000	1 200	1 400	2023 年计划增加 2 000 t/a
昊华气体	200	200	1 200	1 200	
山东锐华氟业有限公司	500	500	0	0	
广东华特气体有限公司	400	400	400	400	经销为主
绿菱科技	500	500	500	500	经销为主
四川众力氟业有限责任公司	500	500	0	0	
四川中氟能新材料科技有限公司					计划新增 5 000 t/a
福建省邵武市永飞化工有限公司	300	300	500	500	
福建德尔科技股份有限公司	500	500	3 000	3 000	
山东飞源集团有限公司	500	500			
合计	5 400	5 400	6 800	7 000	

CF<sub>4</sub> 以其相对低廉的价格长期占据着蚀刻气体的市场。2023 年全球估值 3 亿~5 亿美元，受半导体、光伏产业驱动，年增长率为 5%~8%。

半导体工艺向 3 nm 以下发展，推动 CF<sub>4</sub> 纯度向 99.999 9% 迈进。CF<sub>4</sub> 的 GWP 高达 6 630 (CO<sub>2</sub> = 1)，被《京都议定书》列为管控气体，欧盟 F-Gas 法规限

制其使用。《基加利修正案》将 CF<sub>4</sub> 纳入氢氟碳化物 (HFCs) 管控清单，要求缔约国逐步削减产量。我国“十四五”规划加强了氟化工排放监管。未来绿色绝缘介质和循环经济模式将成为行业核心议题，六氟丁二烯 (C<sub>4</sub>F<sub>6</sub>)、八氟环戊烯 (C<sub>5</sub>F<sub>8</sub>) 等低 GWP 气体将逐步替 CF<sub>4</sub>。CF<sub>4</sub> 市场用量将会逐渐减少。

## 2.6 六氟乙烷 (C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>)

### 2.6.1 C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> 产品现状

六氟乙烷 (C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>) 是一种无色、无味、无毒的气体，化学性质稳定，不易与其他物质反应，全球变暖潜能值 9 200 (以 CO<sub>2</sub> 为基准，100 年时间尺度)。C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> 在半导体与微电子工业中用作等离子蚀刻气体、器件表面清洗剂等<sup>[11]</sup>；用于化学气相沉积 (CVD) 后的清洗气体；在等离子工艺中作为二氧化硅和磷硅玻璃的干蚀气体。高纯六氟乙烷是超大规模集成电路所必需的介质，对半导体行业的发展起着重要的作用。

近年来半导体行业迅猛发展，对电子特气的纯度要求越来越高，而六氟乙烷由于具有边缘侧向侵蚀现象极微、高蚀刻率及高精确性的优点，解决了常规湿法腐蚀不能满足 0.18~0.25 μm 的深亚微米集成电路高精度细线蚀刻的问题，极好地满足此类线宽较小的制程的要求。在以 SiH<sub>4</sub> 为基础的各种 CVD 制程中，六氟乙烷作为清洗气体，与甲烷相比具有排放性低、气体利用率高、反应室清洁和设备产出率高等特点。

半导体和电子行业的需求增长，推动六氟乙烷市场持续扩大。全球六氟乙烷市场规模预计将在未来 5 年内稳步增长。

### 2.6.2 C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> 技术路线

电化学氟化法 (ECF)：乙炔、乙烯或乙烷在电解条件下氟化。该方法优点是设备投资小，操作稳定；缺点是产品转化率低，电耗高。

热解法：通过四氟乙烷和 CO<sub>2</sub> 之间的热分解反应制备。

金属氟化物氟化法：乙炔、乙烯和乙烷与金属氟化物 (CoF<sub>3</sub>、MnF<sub>3</sub>、AgF<sub>2</sub>) 进行反应制备。

氟化氢催化氟化法：催化剂存在下氟化全卤代乙烷化合物 (C<sub>2</sub>F<sub>x</sub>Cl<sub>y</sub>)。

直接氟化法：活性炭、乙炔、乙烷和五氟乙烷等气体直接与氟气反应。该方法优点是工艺短，易得到高纯度产品；缺点是投资高，工艺控制难度大。

### 2.6.3 C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> 产能

2020 年国内电子级六氟乙烷产能总计 1 000 t/a，

其中华特股份 400 t/a, 浙江博瑞电子科技有限公司 55 t/a, 派瑞特气 110 t/a, 中昊光明化工研究设计院有限公司 400 t/a。中化蓝天集团有限公司计划新增产能 2 500 t/a。

## 2.7 八氟丙烷 (C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>)

### 2.7.1 C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>产品现状

八氟丙烷化学稳定性和热稳定性好, 具有无毒、无嗅、不燃、不溶于水和油、在有机物中溶解度小、电绝缘性好、介电率高、导热性佳、有较高的生理耐药性能等特性<sup>[12]</sup>。八氟丙烷主要用作半导体电子元件的等离子蚀刻气和电介质气体, 还可用作喷雾剂、深冷剂、热交换器的传热介质、H/F 激光器惰性反应介质、特殊变压器和电子仪器的绝缘传热介质, 用于集成电路或大规模集成电路的浸渍检查; 用作呼吸系统的气体或眼科手术用气体, 甚至将它的均聚物用作人造血浆 (氧载体)。

随着半导体制程向 3 nm、2 nm 等更先进节点发展, 八氟丙烷作为关键工艺气体的需求将持续增长。八氟丙烷的 GWP 较高, 受到环保法规的限制, 推动了对低 GWP 替代品的研发。氢氟烯烃 (HFOs) 等低 GWP 替代品的开发将成为未来趋势。在航空航天领域, 八氟丙烷用作绝缘和冷却介质的需求逐渐增加。全球芯片短缺促使半导体制造商加大投资, 进一步拉动八氟丙烷需求。八氟丙烷市场前景广阔。

### 2.7.2 C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>工艺路线

氟氮气氟化法: 六氟丙烯和氟氮气反应制成八氟丙烷。

烃类的直接气相氟化: 氟氯烷烃如 CF<sub>3</sub>CCl<sub>2</sub>CClF<sub>2</sub> 等, 与氟或三氟化氯反应, 或跟三氟化锰反应得到八氟丙烷。

电解氟化法: 将有机化合物溶解或分散在无水 HF 中, 在低于 8 V 电压下进行电解, 在阳极释放出氟化物, 在阴极释放出氢气。

氟烃热解: CHF<sub>3</sub>、CF<sub>3</sub>CHF<sub>2</sub>CF<sub>3</sub>、全氟丁酰氟、C<sub>3</sub>FCF<sub>2</sub>C (CF<sub>3</sub>) 在催化剂存在下, 热解都可得到 C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>。

六氟丙烯氟化剂氟化加成: 将六氟丙烯与氟化剂反应, 可得到八氟丙烷。

### 2.7.3 C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>产能

目前, 国内电子级八氟丙烷产能合计 330 t/a, 其中华特股份 100 t/a, 四川富华信新材料科技有限公司 200 t/a, 中国船舶集团有限公司第七一八研究所 30 t/a。

## 3 环境友好型低温室效应含氟电子特气生产技术

部分含氟电子特气大气寿命和 GWP 较高, 对臭氧层破坏较大, 在《京都议定书》框架内面临逐步减量甚至禁用。国内主流含氟电子气体大气寿命及 GWP 见表 10。开发低 GWP 的替代气体, 减少对环境的负面影响, 将是未来电子特气发展趋势。环境友好型低温室效应含氟电子特气主要有电子级氟氮气、电子级碳酰氟 (COF<sub>2</sub>)、电子级三氟化氯 (ClF<sub>3</sub>)、八氟环戊烯 (C<sub>5</sub>F<sub>8</sub>)。

表 10 国内主流含氟电子特气大气寿命及 GWP

Table 10 Atmospheric lifetime and GWP of mainstream fluorinated electronic special gases in China

气体名称	大气寿命/a	GWP(100年)
四氟化碳 <sup>①</sup>	50 000	< 16 500
六氟乙烷 <sup>①</sup>	10 000	9 200
八氟丙烷 <sup>①</sup>	2 600	7 000
八氟环丁烷 <sup>①</sup>	3 200	8 700
三氟甲烷 <sup>①</sup>	264	11 700
六氟化硫 <sup>①</sup>	3 200	22 800
三氟化氮 <sup>②</sup>	740	10 970

注:①《京都议定书》被认定为温室气体;②已被关注。

### 3.1 电子级氟氮气

氟氮气是 F<sub>2</sub> 与 N<sub>2</sub> 的混合气体, 由于氟气的高活性和强氧化性, 使用过程中需要加入一定量的惰性气体 (一般为氮气, 也可用氩气、氦气等) 稀释降低活性。根据需要氟氮气中氟气体积分数一般为 5% ~ 20%。纯氟由于强氧化性、高活性, 提纯过程难度高, 吸附剂选择难度大, 精馏工艺难以选择合适材质和控制器件保证工艺安全, 充装工艺又存在泄漏和超压风险, 造成了国内电子级氟氮气纯度提高难度较大。

电子级氟氮气产品优势: (1) 高反应活性。电子级氟氮气具有极强的化学活性, 能够与多种材料迅速反应, 在半导体制造中用于刻蚀和清洗工艺, 可有效去除表面杂质和氧化物。(2) 精确刻蚀。电子级氟氮气在等离子体状态下能够实现纳米级精度的刻蚀, 适用于制造高集成度的半导体器件, 确保器件的高性能和可靠性。(3) 高效清洗。电子级氟氮气能高效去除硅片表面的氧化物和有机污染物, 提升半导体材料的纯度和表面质量, 从而提高器件性能。(4) 低温工艺兼容。电子级氟氮气在较低温度下仍能保持高反应活性, 适合对温度敏感的半导体材料, 避免高温对材料性能的负面影响。(5) 选择性刻蚀。通过调整工艺参数, 氟气可以选择性刻蚀

特定材料,实现复杂的多层结构,满足现代半导体器件对多层结构的需求。(6)环保。氟气本身具有强腐蚀性,但在封闭系统中使用可减少环境污染,其高反应活性减少了化学废物产生,符合绿色制造要求。

电子级氟氮气凭借其以上产品优势以及广泛的应用场景,在半导体制造中具有显著优势,推动了半导体技术的发展。随着低温室效应产品替代进行,电子级氟氮气市场用量将会越来越多,发展前景广阔。

### 3.2 电子级碳酰氟

COF<sub>2</sub>是一种无色、有毒的气体,常温下稳定,具有较高的化学反应活性,主流制备工艺为氟气和一氧化碳直接反应制备。COF<sub>2</sub>是一种应用于半导体设备刻蚀和清洗的新型材料,可替代传统的全氟化碳、三氟化氮,效果优异,环境友好,GWP≈1,大气寿命约为0,可有效减小温室效应,是清洗气的换代产品,市场前景广阔。

全球半导体需求上升,尤其是中国市场的快速扩展,推动了对碳酰氟的需求。国家对半导体和高端制造业的政策支持,也将进一步推动碳酰氟的需求增长。未来随着技术进步和需求增加,市场前景广阔。

### 3.3 电子级三氟化氯

ClF<sub>3</sub>是已知的化学性质最活泼的卤素氟化物,也是一种能力极强的氟化剂,可通过ClF<sub>3</sub>与铀(U)的反应分离提取U;作为氟化试剂用于有机物的氟化和金属氟化物的制备;在航天与军事领域可以作为火箭或导弹的氧化性推进剂;在半导体、液晶、太阳能领域作为刻蚀气。用氟气与氯气或一氟化氯气体进行反应,以氟化镍作为填充材料,可以得到较高的收率(>90%)。

对有些半导体清洗来说,ClF<sub>3</sub>被认为是清洗剂的一种有效替代品。尤其是对于需要在室温或低温下清洗的系统,ClF<sub>3</sub>极高的反应活性能够在非等离子条件下完成系统和部件的原位清洗,某些场合可用于替代NF<sub>3</sub><sup>[13]</sup>。另外ClF<sub>3</sub>本身不属于高GWP气体,对保护环境有益,在电子气体应用中有一定优势。

### 3.4 八氟环戊烯

八氟环戊烯(C<sub>5</sub>F<sub>8</sub>)可用于等离子体刻蚀和腔体清洗,尤其在先进制程(如3 nm以下)中表现出优异的性能,是应用于集成电路、半导体发光器件及材料刻蚀与清洗等领域新开发的含氟电子特气。用于刻蚀二氧化硅和氮化硅等介质材料,特别

是在氧化物薄膜的超细蚀刻加工中表现突出<sup>[14]</sup>。另外八氟环戊烯也作为环保型制冷剂,用于空调和制冷系统;用于合成含氟聚合物和特种化学品。

作为下一代蚀刻气,因其具有优良的蚀刻性能和绿色环保特性,被认为具有竞争优势,是传统蚀刻气全氟环丁烷的理想替代品之一。由于八氟环戊烯在等离子体气氛中分解产物与传统清洗气CF<sub>4</sub>和C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>等类似,因而适合用于半导体工业的腔室清洗;同时,它还是一种具有极强竞争优势的SF<sub>6</sub>替代品。

3DNAND、FinFET等新架构对蚀刻气体的性能要求更高,C<sub>5</sub>F<sub>8</sub>的高选择性和低损伤特性使其成为重要选择。二维材料(如石墨烯)和量子计算器件的研发可能为C<sub>5</sub>F<sub>8</sub>带来新的应用场景。

## 4 “十五五”期间含氟电子特气发展展望

### 4.1 新工艺、新技术应用

随着先进制程对电子特气要求提高,国内生产及研发公司在特种电子气体的生产技术研发和投入持续增加,新工艺、新技术将会不断增加。如:

- (1) 强氧化性含氟特气特种吸附剂的研究和应用;
- (2) 超微精密过滤材料、膜分离等技术研究和应用;
- (3) 超纯、超净包装容器及阀门有更多需求,亟待实现国产化;
- (4) 精准、稳定的先进监控仪器、仪表将越来越重要,亟待实现国产化;
- (5) 稳定、超净、高效的输送设备,如高纯气体、液体输送泵亟须提高质量,实现国产化进程;
- (6) 电子级高纯产品的分析仪器亟待实现国产化,降低制造成本;
- (7) 老产品、新工艺的研究,提高生产安全性、运行稳定性,降低生产成本亟待实现;
- (8) 生产工艺自动化、智能化操作将会是“十五五”发展的新趋势。

国内含氟电子特气在精馏、充装等工序用到的主要设备基本依靠进口,国产设备占比较低,一方面,国产设备很难达到要求,即使达到要求,也很难通过认证;另一方面,因质量稳定性问题,难有企业敢轻易试用国产设备。设备自动化、智能化控制,将为含氟电子特气生产安全、质量稳定注入新的活力。

### 4.2 新型含氟电子特气进入市场实现进口替代

近几年国内研发的含氟电子特气,如电子级无水氟化氢(AHF)、三氟化磷(PF<sub>3</sub>)、四氟化锗(GeF<sub>4</sub>)等市场用量逐渐增加,已引起了国内企业重视,随着技术成熟,实现进口替代将成为“十五五”期间的趋势。近年来含氟电子特气研发的热点产品见表11。

表 11 近年来含氟电子特气研发的热点产品

Table 11 Hot products in the development of fluorinated electronic special gases in recent years

名称	应用领域	市场
电子级 AHF	用于清洗硅片表面,去除氧化物和杂质;在蚀刻工艺中精确控制蚀刻过程;太阳能电池和光学元件的表面处理、钝化层去除等	半导体、太阳能电池、平板显示器、光学元件和化学合成等领域
PF <sub>3</sub> 、PF <sub>5</sub>	半导体工艺中作为掺杂剂,调整硅片的电学特性;有机合成中作为催化剂中间体;锂离子电池电解质制造中用作六氟磷酸锂的原料	半导体制造、化学合成、电池材料等领域应用
GeF <sub>4</sub> 、GeF <sub>4</sub> -72	半导体工艺中作为掺杂剂;核医学中 GeF <sub>4</sub> -72 作为放射性同位素,用于制备某些放射性同位素,进行医学成像和治疗;用于某些传感器的制造工艺,提升灵敏度和稳定性	随着技术进步和新兴市场的开拓,GeF <sub>4</sub> 市场前景广阔,但技术壁垒、原料供应是其面临的主要挑战
BF <sub>3</sub> 、BF <sub>3</sub> -11	BF <sub>3</sub> -11 用于核磁共振光谱分析,帮助确定分子结构和化学环境;半导体工艺中作为掺杂剂,调整硅片的电学特性;有机合成中作为路易斯酸催化剂,广泛应用于烷基化、酰基化、聚合等有机反应	核磁共振技术增加,BF <sub>3</sub> -11 的需求上升;在有机合成、半导体制造、石油化工和医药制造等领域应用
AsF <sub>3</sub> 、AsF <sub>5</sub>	半导体工艺中作为掺杂剂,调整硅片的电学特性;作为催化剂参与多种有机化学反应,如聚合反应和氟化反应;用于合成某些药物中间体,如抗生素和抗癌药物	在半导体制造、化学合成、医药制造等领域应用
MoF <sub>6</sub>	半导体工艺中用于沉积钼薄膜,应用于半导体器件的制造;在铀浓缩过程中作为中间产物,用于核燃料的生产;用于生产高温合金,应用于航空航天和能源领域;作为涂层材料,提升材料的耐磨性和耐腐蚀性	半导体、核工业、材料科学和化学研究领域有广泛应用,随着技术进步,市场需求增长
XeF <sub>2</sub>	二氟化氙在极紫外光刻(EUV)中用作光源气体,帮助制造更小、更高效的芯片;用于精确蚀刻硅片和其他材料;是准分子激光器的关键气体,广泛应用于眼科手术、微加工和科学研究	在半导体、激光技术、医疗和科研领域有广泛应用,随着技术进步,市场需求增长

### 4.3 传统含氟电子特气近几年继续发力,新型环保友好型产品逐渐替代

在人工智能(AI)、超算、智能驾驶等利好形势的推动下,传统含氟电子特气市场增速继续增加,特别是近几年国内含氟电子特气制造技术逐渐突破瓶颈,国内、国际市场占有率均快速增加。因此传统含氟电子特气因技术成熟度高、产品使用效果好、生产成本低等优势,“十五五”期间仍然是主流电子特气。但因CF<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>、C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>、SF<sub>6</sub>、NF<sub>3</sub>等的替代产品即新型环境友好型低GWP含氟电子特气的研究已逐渐开展并形成规模,“十五五”期间有序替代应该成为趋势(见表12)。

表 12 几种环境友好型含氟电子特气GWP及替代对象

Table 12 GWP and replacement objects of several environmentally friendly fluorinated electronic special gases

新型含氟电子特气	GWP(100年)	替代对象	用途
一氟甲烷	92	CF <sub>4</sub>	蚀刻剂
六氟丁二烯	<1	CF <sub>4</sub> 、C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> 、c-C <sub>3</sub> F <sub>8</sub> 、NF <sub>3</sub>	蚀刻剂
八氟环戊烯	2	CF <sub>4</sub> 、C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> 、c-C <sub>3</sub> F <sub>8</sub>	蚀刻剂
碳酰氟	1	C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> 、SF <sub>6</sub> 、NF <sub>3</sub>	清洗剂、蚀刻剂
三氟化氯	0	CF <sub>4</sub> 、C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	清洗剂
氟气	0	C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> 、SF <sub>6</sub> 、NF <sub>3</sub>	清洗剂

### 4.4 含氟电子特气的竞争格局及规划布局

#### 1) 规模效益,行业洗牌

随着集成电路制造领域技术快速更迭,制程节点不断减小,晶圆尺寸不断变大,对电子特气纯度和精度要求持续提高。产品技术难度增加,生产成本提高,产品利润空间减小,竞争加剧,新一轮的

行业洗牌将再次出现。有资金实力、技术优势、品牌效应的企业会发展壮大,而实力较小、新进入的企业会面临并购、重组。这一趋势促进含氟电子特气行业健康发展,提高与国外企业竞争能力。

#### 2) 产品产地重新规划布局

含氟电子特气产品需求增加,规模提高,竞争加剧是必然趋势。同时含氟电子特气产品涉及危险工艺,电解工艺涉及电耗较大,生产成本占比较大。为了稳定生产,增加企业效益,“十四五”期间,含氟电子特气较多产能已经转移到环保压力小、电费低的地区,如内蒙古、四川、贵州、甘肃等。“十五五”期间这一现象仍会持续。另一种趋势是附加值高、技术难度大、人才要求高的含氟电子特气产品会选择在距离下游用户较近的地区,如西安周边、武汉周边、安徽周边、成渝周边。

### 4.5 含氟电子特气发展趋势

#### 1) “十四五”期间含氟电子特气存在的问题

(1) 技术壁垒与高端产品依赖进口。在含氟电子特气的生产上,中低端产品已实现国产化,但高端领域(如高纯度气体、先进制程配套气体)仍依赖进口。例如,7 nm及以下制程所需的含氟电子特气,国际厂商如德国林德集团、日本关东电化工业株式会社等占据主导地位,国内企业技术积累不足,产品质量和稳定性存在差距。

(2) 原材料供应风险。部分核心原材料(如稀有气体、高纯度氟化物)依赖进口,供应链稳定性受国际政治和贸易摩擦影响较大。2022年数据显示,国内部分企业因原材料短缺导致产能利用率不

足70%，增加了生产成本和交付风险。

(3) 环保与生产合规压力。含氟气体生产过程中可能产生强温室气体（如SF<sub>6</sub>、NF<sub>3</sub>），环保法规对其排放和回收要求日益严格。例如，欧盟已对SF<sub>6</sub>实施严格管控，国内企业需投入更多资金改进工艺以符合国际标准，导致成本上升。

(4) 国际竞争与品牌劣势。外资企业凭借技术优势和品牌影响力占据全球市场主导地位，国内企业虽在价格和服务上具备竞争力，但在高端市场认可度较低。例如，德国林德集团、韩国SK集团等国际巨头占据全球市场份额超过60%，而国内企业如派瑞特气仅占约10%。

## 2) “十五五”期间含氟电子特气发展趋势

(1) 国产替代加速。在政策支持（如《“十四五”国家战略性新兴产业发展规划》）和供应链安全需求驱动下，国内企业逐步突破技术瓶颈。例如，南大光电、昊华科技等企业通过新增产能和研发投入，三氟化氮（NF<sub>3</sub>）和六氟化硫（SF<sub>6</sub>）的国产化率已从2020年的30%提升至2025年的50%以上。

(2) 技术创新推动高端化发展。企业加大研发投入，聚焦高纯度气体、低GWP环保气体开发。例如，华特气体已推出适用于5 nm制程的蚀刻气体，昊华科技则布局绿色合成技术以减少碳排放。

(3) 下游需求持续增长。半导体、显示面板、光伏等行业扩张是核心驱动力。预计到2029年，全球含氟电子特气市场规模将达到379亿元，年复合增长率8.9%，中国市场占比将提升至35%以上，成为全球最大单一市场。

(4) 绿色化与可持续发展。行业向环保型产品转型，例如开发替代SF<sub>6</sub>的低GWP气体（如C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N），并通过循环利用技术降低排放。政策层面，我国已提出“双碳”目标，推动含氟气体生产向低碳工艺升级。

(5) 行业整合与全球化布局。市场竞争加剧推动行业整合，头部企业通过并购重组扩大规模。例如，南大光电通过收购中小型气体公司提升产能；同时，国内企业加速海外布局，如派瑞特气在东南亚设立生产基地以拓展国际市场。

## [参考文献]

- [1] 程僊龙.磷肥企业向氟化工布局探讨[J].生态产业科学与磷氟工程,2024,39(9):48-52.  
CHENG X L.Layout of phosphate fertilizer enterprises towards fluorine chemical industry [J].Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering, 2024, 39(9):48-52.
- [2] 张增英,毛树标.关于浙江省氟化工行业发展的建议[J].浙江化工,2022,53(2):1-8.  
ZHANG Z Y, MAO S B.Suggestions on the Development of the Fluorine Chemical Industry in Zhejiang Province [J]. Zhejiang Chemical Industry, 2022,53(2):1-8.
- [3] 郭金森.对三氟化氮几种制备技术和纯化技术的探讨分析[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(2):156-158.
- [4] 于剑昆.六氟化钨的合成与开发[J].无机盐工业,2003(4):1-4.  
YU J K.Synthesis and development of tungsten hexafluoride [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2003(4):1-4.
- [5] 缪光武,白占旗,张金柯,等.高纯六氟化钨的制备技术研究进展[J].低温与特气,2020,38(1):1-5.  
MIAO G W, BAI Z Q, ZHANG J K, et al.Progress in Synthesis of High Purity Tungsten Hexafluoride [J].Low Temperature and Specialty Gases, 2020,38(1):1-5.
- [6] 李盛姬,黄雪静,齐海,等.含氟电子气体研究进展[J].低温与特气,2013,31(1):1-5.  
LI S J, HUANG X J, QI H, et al. State-of-the-Art of Fluorinated Cleaning Gases Used in Semiconductor Industry [J].Low Temperature and Specialty Gases, 2013,31(1):1-5.
- [7] 曹伟.六氟丁二烯的合成工艺分析[J].有机氟工业,2018(4):33-36.  
CAO W. Discussion on the Synthesis Processes of Hexafluorobutadiene [J].Organo-Fluorine Industry, 2018 (4) : 33-36.
- [8] 张呈平,权恒道.芯片制造用含氟电子特气的研究进展[J].精细化工,2024,41(2):330-340,390.  
ZHANG C P, QUAN H D.Research progress on fluorine-containing electronic specialgases for chip manufacturing [J].Fine Chemicals, 2024, 41(2) : 330-340,390.
- [9] 于剑昆,张志勇.新一代蚀刻气六氟-1,3-丁二烯的性质、制备和应用[J].化学推进剂与高分子材料,2017,15(2):27-47.  
YU J K, ZHANG Z Y. Properties, preparation and application of new generation etching gas hexafluoro-1, 3-butadiene [J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2017, 15 (2) : 27-47.
- [10] 于剑昆.四氟化碳的合成与开发[J].化学推进剂与高分子材料,2004(3):14-17.
- [11] 杜汉盛.六氟乙烷的制备及纯化方法概述[J].低温与特气,2013,31(3):1-4.  
DU H S.Method For Producing And Purifying Hexafluoroethane [J].Low Temperature and Specialty Gases,2013,31(3):1-4.
- [12] 朱顺根.特种气体——八氟丙烷合成路线简评[J].低温与特气,1987(1):1-4,16.
- [13] 王连心,于剑昆,张景利.三氟化氯电子气体研究进展[J].化学推进剂与高分子材料,2021,19(3):21-31.  
WANG L X, YU J K, ZHANG J L.Research progress of chlorine trifluoride electronic gas [J].Chemical Propellants & Polymeric Materials,2021,19(3):21-31.
- [14] 徐娇,于万金,刘武灿.新型含氟电子气体八氟环戊烯的合成方法及应用[J].有机氟工业,2013(4):13-18.  
XU J, YU W J, LIU W C.Synthesis and Application of a Novel Fluorinated Electronic Gas Octafluorocyclopentene [J]. Organo-Fluorine Industry,2013(4):13-18.