

一种提高热氧化均匀度的方法

张 霞

(北京广播学院光电子学系, 北京 100024)

摘要: 分析了在采用内燃结构进行氢氧合成氧化过程中, 造成氧化层厚度不均匀的原因。根据流体力学和热传导理论, 设计了解决这一问题的半封闭式炉管结构氧化方法和相关的匀流隔热散热装置。实验结果表明, 此方法简单易行, 能够有效改善氢氧合成氧化的均匀度, 并已用于微电子工艺研究和生产中。

关键词: 热氧化; 均匀度; 热传导; 匀流隔热散热装置

EEACC: 7850G; 6855; 4725Q

中图分类号: TN 305.5

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)07-0884-05

1 引言

在现代微电子工艺中, 氢氧合成氧化方法以其氧化速率快、氧化层质量高、沾污水平低、工艺简单可靠等优点被普遍采用。氢氧合成氧化设备分为预燃式和内燃式两种。前者结构复杂, 需要专用预燃室及控制部件, 虽氧化均匀度好, 但使用成本高; 后者结构简单, 无需专用预燃室, 在一般氧化炉的进气端直接插入H₂气喷管即可, 有较好的通用性, 使用成本低^[1], 但将其用于大口径炉管时, 硅片间的氧化层厚度偏差大。针对内燃方式进行氢氧合成氧化时存在厚度不均匀的问题, 本文从流体力学和热传导的角度进行了分析、研究。提出了有效改善氧化厚度均匀性的半封闭式炉管结构氧化方法, 设计、制造了匀流隔热散热装置, 得到了令人满意的实验结果, 并用于生产实践。

2 实验设备和条件

实验用氧化炉管直径为140mm, H₂气喷嘴直径为2.5mm。氧化量为Φ100mm×155片/炉。H₂气和O₂气流量分别为7L/min和5L/min。氧化温度为900℃和1000℃。使用MPV-SP膜厚仪和MDC C-V测量仪测量氧化层的厚度和质量。

3 原因分析

采用上述实验设备和条件进行内燃式氢氧合成氧化时, 是将喷口直径为2.5mm的H₂气喷管从氧化炉管的进气端中心处插入炉管内, H₂气管喷口距离恒温区约为45cm。实验结果表明, H₂气流量达到7L/min时, H₂气燃烧在炉管内产生的水汽比较充足, 在同一炉中硅片内氧化层厚度的偏差在±3%以内, 但是, 前后硅片间氧化层厚度的最大偏差达±15%。若适当地减小H₂气流量, 如5L/min, 并采用倾斜温区的方法(使炉管进气端一边的温度低、炉口一边的温度高), 则硅片间的氧化层厚度偏差会减小到±10%, 但这远不能满足生产工艺的要求。况且, 减小H₂气流量使炉管内H₂气燃烧产生的水汽不够充足, 结果硅片内的偏差大于±5%。此外, 倾斜温区还会造成器件其他工艺、结构和电气参数的不一致。显然, 这些方法都是不可取的。为了解决这一工艺问题, 需要分析热量在炉管内产生和传导的规律, 并在此基础上提出解决方案。

首先分析氢氧合成燃烧的情况。当H₂气流量为7L/min时, 根据氢氧合成反应热(241.8kJ/mol)可估算出在炉内燃烧的H₂气相当于功率为1.26kW的热源, 此功率与氧化炉的边段恒温功率(约1.5kW)相当, 这足以对炉管内的温度产生决定性影

张 霞 女, 1961年出生, 副教授, 主从事物理学和微电子学教学工作。

2003-07-01 收到, 2003-10-28 定稿

©2004 中国电子学会

响。在上述实验条件下，当 1.26kW 热源对燃烧生成的 7L/min 水汽和未反应的 1.5L/min O₂ 气进行加热时，由水汽和 O₂ 气的定压摩尔热容 C_{p,m} 为 53J/(mol·K) 和 41J/(mol·K)^[2]，可大致算出温度升高值。

$$\Delta T = Q / (C_{p,m} v)$$

$$= \frac{1260}{[(53 \times 7 + 41 \times 1.5)/8.5] \times [(8.5/60)/22.4]} = 3901\text{K}$$

由于氧化炉不是绝热系统，热源(氢焰)附近气体剧烈的截面环流运动使部分热量通过炉管壁散发，另外，氢焰的热量还会以热辐射的方式传播。因此，实际气体温度远比计算值低。但从氢焰能将距离喷口 15cm 处石英板局部烧熔的情况分析和根据对一般气体燃料测算，燃烧温度可达 2000℃^[3]的结果看，距离喷口 15cm 处的火焰温度至少高于 1500℃。如此高的火焰温度不仅会直接影响炉管内局部温度分布，还将产生比较强烈的辐射，影响炉管内距氢焰比较远的区域(恒温区)。由于硅材料的红外吸收率比气体的大，因此，受辐射硅片因氢焰辐射而温度升高，造成了氧化速率加快，氧化不均匀。

下面分析热气流运动的影响。流量为 7L/min 的 H₂ 气，从直径为 2.5mm 的气管喷口处射出时，其流速约为 23.8m/s，此流速比从炉管进气口处流入相同流量的气体快 2 个数量级。H₂ 气燃烧产生的过热气流运动可以用流体力学中的温差射流描述^[3,4]，其在垂直于炉管中心轴线截面上的流速分布规律可表示为

$$v/v_m = \exp[-(r/r_{0.5})^2]$$

其中 r 是以炉管中心轴线为原点的炉管半径方向的坐标，其绝对值为“射流”(过热气流)中某点到炉管中心轴线的距离； v 为该点的流速； v_m 为该点所在横截面上中心轴线处的流速； $r_{0.5}$ 为该横截面上 $v = 0.5v_m$ 处距中心轴线的距离^[4]。公式所对应的曲线如图 1 所示。氢氧合成燃烧产生的过热气流在炉管中心轴线上具有最大流速。横截面上的温度分布类似速度分布^[5]。由于大部分过热气流沿炉管中心轴线附近前进，不能有效地与炉管壁交换热量，因此，边段电偶无法正确地“感知”过热气流的温度，及时、合理地调整边段热量的“补偿量”(可控硅导通量只减小 7% 左右)，具有较大流速且温度分布不均匀的过热气流冲入恒温区，引起恒温区的温度分布倾斜，造成硅片间氧化层厚度不均匀。

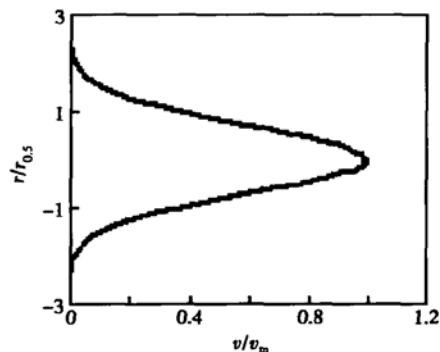


图 1 过热气流流速分布

Fig. 1 Speed distribution of over heat

在口径较小的炉管中采用内燃结构进行氢氧合成氧化，由于 H₂ 气流量较小，上述问题表现得并不明显。在直径为 140mm 的炉管中采用此方法时，这一问题就突出地表现出来。

4 解决方法和相关装置的设计

针对上述问题，本文提出了以半封闭式炉管结构配合匀流隔热散热装置改善内燃式氢氧合成氧化均匀性的方法。

具体考虑是：要将过热气流导向炉管壁，使过热气流在炉管中的分布相对均匀，与炉管壁较充分地交换热量，避免让过热气流在散热不充分的情况下直接冲入恒温区。同时使边段电偶能够正确地“感知”炉内过热气流的温度，通过改变边段加热功率来平衡过热气流带入的热量；要挡住并吸收氢焰发出的红外辐射，使其不能射入恒温区。从上述原则出发，依据流体力学和热传导的理论，设计了一种匀流隔热散热装置，如图 2 所示。

匀流隔热散热装置采用石英材料制作。一端为球面挡板(分流反射面)；另一端为直径较大、均匀分布的多个圆孔的圆形平板(匀流增压板)；连接分流反射面与匀流增压板的四条石英梁，其中两条石英梁上开有片槽，放置硅片，两条石英梁作为该装置的底托。使用时，分流反射面一端对着氢气喷管，距喷口约 20cm，匀流增压板距边段电偶约 5cm。

分流反射面的主要作用是把过热气流导向炉管壁。在传热学中，圆筒的热流量为

$$\Phi = 2\pi\lambda\Delta TL/\ln(r_2/r_1)$$

其中 λ 为传热系数； r_1, r_2 分别为圆筒的内外半径^[6]。当过热气流被驱向炉管壁时，就会增大炉管壁

内外的温差 ΔT , 提高热流量 Φ . 分流反射面采用球面结构是因为球面可以使过热气流均匀散开, 避免局部

过热和压力增加而被烧熔. 同时, 球面可以将氢焰发出的部分红外辐射散射掉.

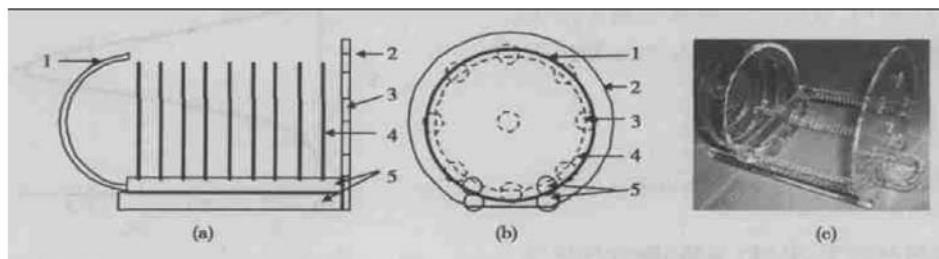


图2 匀流隔热散热装置结构示意图 (a) 正视图; (b) 左视图; (c) 实物照片(170mm 炉管用)

1: 分流反射面; 2: 匀流增压板; 3: 匀流增压板上的孔; 4: 硅片组; 5: 分流反射面与匀流增压板间的连接架

Fig. 2 Structure of heat disturbing, distributing and isolating (a) Frontview; (b) Sideview; (c) Photo of the structure
1: distribution and reflection bowl; 2: uniform and pressure boosting plate; 3: the holes in uniform plate; 4: silicon wafers; 5: frame and plates connector

分流反射面后放置一组硅片, 用它来形成影响气流运动的“阻挡墙”. 流体力学的理论指出: 流体在流经障碍时, 其各部分因受到突然约束而产生旋涡, 旋涡的形成和扩散使其各部分之间发生混乱, 混乱越显著表明流体的扰动性越强, 流体的扰动性越强, 放热就越强烈^[7]. 可见, 硅片组的作用是: 一是把气流继续限制在炉管壁附近流动; 二是形成具有“凸凹”表面的圆筒结构对气流进行连续约束, 使其产生大量旋涡, 以增大放热量; 三是利用硅片对红外的吸收率比石英高来吸收氢焰的辐射, 并进行热交换.

硅片组后匀流增压板所起的作用是: 减小气流

的流通面积, 以延长气流在硅片组处的换热时间; 增加局部压强, 提高换热效率; 使仍显过热的气流在向中心收缩前, 继续沿炉管壁运动, 引起边段电偶的反应, 控制边端的加热功率, 对过热气流进行实时补偿; 板上均匀分布的圆孔可以使气流较均匀地进入恒温区.

图3为采用半封闭式炉管结构和匀流隔热散热装置进行内燃式氢氧合成氧化的工作示意图. 半封闭式炉管结构是在普通氧化炉系统的基础上, 将石英炉帽上的进钩孔封闭, 并在炉门内侧加一弹簧结构. 关闭炉门时, 弹簧结构将炉帽顶住, 使炉管口与

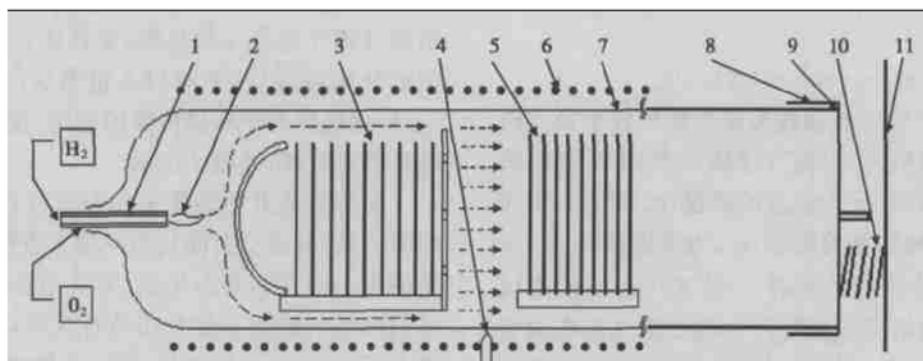


图3 改善氢氧合成氧化均匀性方法的工作示意图

1: 氢气喷管; 2: H₂气焰; 3: 匀流隔热散热装置; 4: 边段测温热电偶; 5: 被氧化硅片; 6: 扩散炉加热体; 7: 扩散炉的石英炉管; 8: 炉帽; 9: 炉帽与炉管口的结合部; 10: 用于顶住炉帽的弹簧; 11: 炉门

Fig. 3 Scheme of the way of improving the uniformity of H₂ and O₂ combination oxidation

1: hydrogen injector; 2: flame of hydrogen; 3: structure of heat disturbing; distributing and isolating; 4: thermocouple for side zone temperature control; 5: processing wafers; 6: furnace heater; 7: furnace tube; 8: tube cap; 9: semi sealing area between tube and tube cap; 10: spring for press tube cap; 11: door of the furnace

炉帽间的缝隙减至最小,起到阻碍气体流动,适当提高炉管内压强的作用,从而使炉管内分子数密度n增加。根据气体动力学理论,有

$$\bar{\lambda} = \frac{\bar{v}}{\bar{Z}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi d^2 n}}$$

其中 d 为分子的有效直径^[8]。由上式可知,当炉管内分子数密度n增加时,分子热运动的平均自由程 $\bar{\lambda}$ 变短,平均碰撞频率 \bar{Z} 增加,从而较快地均衡炉管内的热量,使得炉管的热电偶正确地控制加热功率,对过热气流进行实时“补偿”,使恒温区的温度更均衡。

5 装置使用情况

表1为采用半封闭式炉管结构配合匀流隔热散热装置方法前、后的氢氧合成氧化均匀度对照情况。表中同一硅片内的均匀度为

表1 匀流隔热散热装置使用前后氧化均匀度情况对照

Table 1 Comparison of uniformity before and after the structure of thermal disturbing used

氧化温度 /℃	取样硅片	使用装置前氧化厚度/nm					均匀度/%		使用装置后氧化厚度/nm					均匀度/%	
		d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	片内	片间	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	片内	片间
900	3#	68	67	67	68	68	0.6	- 12.6	78	79	79	78	78	- 0.5	- 1.8
	75#	75	76	75	76	76	- 0.8	- 2.2	79	81	80	80	80	- 1.3	0.2
	148#	87	89	89	90	89	- 2.0	14.8	81	81	81	82	81	- 0.2	1.7
1000	3#	657	652	649	655	658	0.4	- 10.0	786	788	794	779	784	0.0	- 2.3
	75#	728	725	723	729	727	0.2	- 0.1	804	808	807	808	801	- 0.2	0.1
	148#	841	839	840	845	843	- 0.1	10.2	824	820	823	827	819	0.2	2.2

注:取样片号为硅片在石英舟上的排列序号,3# 片靠近炉口,148# 片靠近进气口

热功率。这说明有数百瓦的氢焰热量从扩散炉边段加热区域散掉了。另外,电荷检测实验数据也表明,匀流隔热散热装置使用前后,硅片氧化层的 Q_B , Q_{SS} 没有发生变化。

6 结论

在大口径氧化炉中,用内燃结构氢氧合成氧化大尺寸硅片时,使用半封闭式炉管结构配合匀流隔热散热装置可以有效地控制氢氧合成燃烧产生的热量分布,较好地解决了在大管径氧化炉中,采用内燃结构进行氢氧合成氧化时氧化层厚度不均匀的问题。由于这种氧化方法无需预燃室及控制部件,因此具有结构简单、与普通氧化炉兼容、以及氧化层均匀性好等优点。半封闭式炉管结构配合匀流隔热散热装置的使用为氢氧合成氧化提供一种经济、易行的

$$\frac{d_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i} \times 100\%$$

片与片之间的均匀度为

$$\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n d_{ij} \right]}{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{ij} \right]} \times 100\%$$

其中 i 为取样点(相对石英舟取样点位于硅片的上、中、下、左、右 5 点); j 为片数。

从表1可以看出,由于使用半封闭式炉管结构及匀流隔热散热装置,氧化片间均匀度由±15% 提高到小于±2.5%。在实践中还观察到采用该方法前后,控制边段加热的可控硅导通量从仅减小7% 左右增加到减小15% 以上,相当于减小了数百瓦的加

途径。目前,本文研究成果已在多家微电子研究和生产单位使用。

致谢 本项研究工作的工艺实验和结果检测得到了北京市半导体器件三厂和北京大学微电子学研究院的大力支持,在此对他们的帮助表示感谢。

参考文献

- [1] Zhuang Tongzeng. Technology of integrated circuit fabrication. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1987 (in Chinese) [庄同曾. 集成电路制造技术——原理与实践. 北京: 电子工业出版社, 1987]
- [2] Wang Zhenglie, Zhou Yaping. Physical chemistry. Beijing: Higher Education Press, 2001 (in Chinese) [王正烈, 周亚平. 物理化学. 北京: 高等教育出版社, 2001]
- [3] Xie Xinghua. Combustion theory. Beijing: China University Mining and Technology Press, 2002 (in Chinese) [谢兴华. 燃

- 烧理论. 北京: 中国矿业大学出版社, 2002]
- [4] Xing Zongwen . Fluid mechanics fundament. Xi' an: North-western Polytechnical University Press, 1992(in Chinese) [邢宗文. 流体力学基础. 西安: 西北工业大学出版社, 1992]
- [5] Luo Tiqian . Fluid mechanics . Bejing : Mechanical Industry Press, 1999(in Chinese) [罗惕乾. 流体力学. 北京: 机械工业出版社, 1999]
- [6] Dai Guosheng . Heat transfer . Bejing : Higher Education Press, 1999(in Chinese) [戴锅生. 传热学. 北京: 高等教育出版社, 1999]
- [7] Liu Guangzong. Theory and analysis method of fluid mechanics. Beijing: Higher Education Press, 1992) (in Chinese) [刘光宗. 流体力学原理与分析方法. 北京: 高等教育出版社, 1992]
- [8] Lu Guo . Fundamental physics . Bejing : Higher Education Press, 1997(in Chinese) [陆果. 基础物理学. 北京: 高等教育出版社, 1997]

A Method of Improving Uniformity in Thermal Oxidation and Design of a Related Structure

Zhang Xia

(Department of Photo-Electronics, Beijing Broadcasting Institute, Beijing 100024, China)

Abstract: The reason of not uniform of oxide thickness in an inner burning H₂and O₂combination oxidation furnace is analyzed. Based on the theories of fluid mechanics and heat transfer, a new way of semi-sealing tube combined with a structure of heat disturbing, distributing, and isolating is created. The experiment results show that this new method to oxidate the combination of H₂and O₂ is very easy in use and can improve the uniformity greatly.

Key words: oxidation; heat conduction; uniformity; structure of heat disturbing, distributing and isolating

EEACC: 7850G; 6855; 4725Q

Article ID: 0253-4177(2004)07-0884-05

Zhang Xia female, was born in 1961, associate professor. She is engaged in the teaching of physics and microelectronics.

Received 1 July 2003, revised manuscript received 28 October 2003

© 2004 The Chinese Institute of Electronics