

# 多晶硅薄膜 及其应用

魏希文 陈国栋 编著



04.055

大连理工大学出版社

## 内 容 简 介

本书主要介绍了多晶硅薄膜的生长方法和生长机理，多晶硅薄膜的氧化和掺杂，多晶硅薄膜的导电理论以及多晶硅薄膜在大规模集成电路、单极型晶体管、双极型晶体管和太阳能电池中的应用。

本书理论与工艺并重，对从事半导体科技工作的工程技术人员有重要的参考价值，也可作为理工科大学半导体物理和器件专业以及微电子专业的研究生的教材、本科生选修课的教材。

### 多 晶 硅 薄 膜 及 其 应 用

DUOJINGGUI BOMO JIQI YINGYONG

魏希文 陈国栋 编著

---

大连理工大学出版社出版发行 辽宁省新华书店经销  
(大连市甘井子区凌水桥) 大连舰艇学院印刷厂印刷

开本：787×1092 1/32 印张：7 5/8 字数：164千字  
1988年8月第一版 1988年8月第一次印刷  
印数：0001—1000

---

责任编辑：尉 迟 封面设计：姜严军  
责任校对：王秋侠

---

ISBN 7-5611-0097-3/O·17 定价：1.28元

## 前 言

本书系高等学校理工科半导体物理与器件专业和微电子专业研究生的教材和本科生选修课的参考书。

近十几年来，多晶硅薄膜已广泛地应用在半导体电子器件、集成电路和太阳能电池中，对器件和集成电路的设计和工艺的革新有很大的影响。为此国内外学者围绕多晶硅薄膜开展了不少的研究工作。

多晶硅薄膜的晶体结构、氧化、掺杂、生长规律和导电机制都有其不同于单晶硅的特点，这些特点在器件结构中有独特的和重要的应用价值。结合近几年来我们在多晶硅薄膜方面所进行的研究工作、教学工作以及国内外的参考文献写成此书，奉献给读者，希望对从事器件工艺研究的科技工作者和学生能有裨益。

本书共分五章，其中第一、二章由陈国栋编写，第三、四、五章由魏希文编写。本书由于篇幅的限制，不能对每一项内容都作详细介绍，若需要进一步了解，可参阅每章后面的参考文献。

本书由哈尔滨工业大学刘振茂教授审稿，特在此表示衷心的感谢。

由于水平所限，不足或错误在所难免，恳切希望读者批评指正。

编者

# 目 录

<b>第一章</b>	<b>多晶硅薄膜的生长</b> .....	1
§ 1.1	多晶硅薄膜的淀积.....	2
1.1.1	常压化学汽相淀积 (APCVD) .....	2
1.1.2	低压化学汽相淀积 (LPCVD) .....	4
1.1.3	等离子增强化学汽相淀积 (PECVD) .....	14
1.1.4	光化学汽相淀积 (PCVD) .....	20
§ 1.2	化学汽相淀积多晶硅薄膜生长机理.....	23
1.2.1	多晶硅淀积基本原理.....	23
1.2.2	多晶硅生长过程的定性分析.....	23
1.2.3	多晶硅成核模型和晶体生长动力学.....	25
§ 1.3	掺杂多晶硅薄膜的生长.....	28
1.3.1	掺杂对多晶硅薄膜生长的影响.....	28
1.3.2	多晶硅电阻率与掺杂的关系.....	29
§ 1.4	多晶硅薄膜结构与形貌.....	30
1.4.1	晶体的优选方向.....	30
1.4.2	晶粒的大小.....	33
	参考文献.....	34
<b>第二章</b>	<b>多晶硅薄膜的掺杂</b> .....	36
§ 2.1	杂质在多晶硅薄膜中的扩散.....	38
2.1.1	扩散深度和多晶硅淀积条件的关系.....	38
2.1.2	杂质在多晶硅中的扩散系数.....	39

2.1.3	多晶硅中的扩散前沿	44
§ 2.2	掺杂多晶硅——硅结构的氧化增强扩散	44
§ 2.3	多晶硅的离子注入	50
2.3.1	多晶硅离子注入的杂质分布	51
2.3.2	多晶硅电学性能和退火条件的关系	55
2.3.3	多晶硅电阻率的温度关系	61
2.3.4	快速退火	63
2.3.5	多晶硅的激光退火	64
	参考文献	68
<b>第三章</b>	<b>多晶硅薄膜的导电理论</b>	<b>70</b>
§ 3.1	引言	70
§ 3.2	Seto 导电理论及其修正	80
3.2.1	Seto 理论	80
3.2.2	理论的检验和修正	84
§ 3.3	隧道穿透和热电子发射的载流子陷阱导电模型	96
§ 3.4	杂质分凝模型	103
§ 3.5	Mandurah等人的导电模型	109
§ 3.6	漂移——扩散小信号导电理论	124
§ 3.7	漂移——扩散任意偏压下的 I—V 理论	132
§ 3.8	简介其它多晶硅薄膜导电理论	138
3.8.1	载流子输运扩散模型	138
3.8.2	复合传导模型	140
	参考文献	147
<b>第四章</b>	<b>多晶硅薄膜的氧化</b>	<b>152</b>
§ 4.1	未掺杂多晶硅薄膜的氧化规律	152

4.1.1	晶粒间界处的增强氧化	155
4.1.2	多晶硅的优选晶向对氧化速率的影响	156
4.1.3	SiO <sub>2</sub> 的粘滞流 (Viscous Flow) 对多 晶硅氧化规律的影响	156
§ 4.2	掺杂多晶硅薄膜的氧化规律	158
4.2.1	掺杂浓度对氧化速率的影响	158
4.2.2	氧化温度和氧化时间对氧化速率的影响	161
4.2.3	差值氧化	162
4.2.4	多晶硅薄膜掺杂增强氧化的物理原因	165
4.2.5	多晶硅薄膜厚度对掺杂增强氧化的影响	169
§ 4.3	多晶硅氧化时的杂质分凝	170
§ 4.4	多晶硅氧化层的特性	171
	参考文献	173
<b>第五章</b>	<b>多晶硅薄膜的应用</b>	<b>177</b>
§ 5.1	多晶硅薄膜在 MOS 晶体管中的应用	177
5.1.1	掺杂浓度的影响	180
5.1.2	淀积温度的影响	182
5.1.3	激光退火的影响	182
5.1.4	退火对硅栅 MOS 结构氧化层中的固定 电荷的影响	185
§ 5.2	多晶硅薄膜在双极型晶体管中的应用	186
5.2.1	硅异质结晶体管	187
5.2.2	多晶硅薄膜在功率晶体管中的应用	194
5.2.3	掺杂多晶硅薄膜扩散源	196
5.2.4	多晶硅薄膜在微波功率晶体管上的应用	199
§ 5.3	多晶硅薄膜在集成电路中的应用	201

5.3.1	集成电路中的多晶硅薄膜电阻·····	203
5.3.2	多晶硅薄膜在MOSFET 集成电路中的 应用·····	211
5.3.3	多晶硅薄膜在双极型集成电路中的应用··	220
§ 5.4	多晶硅薄膜在太阳能电池中的应用·····	225
5.4.1	晶粒大小的多晶硅薄膜的获得·····	229
5.4.2	减小晶粒间界态密度的方法·····	230
§ 5.5	钝化用的多晶硅薄膜·····	230
5.5.1	掺氧 SIPOS 膜的制备·····	231
5.5.2	掺氧 SIPOS 的钝化特性·····	231
	参考文献·····	232

# 第一章 多晶硅薄膜的生长

多晶硅淀积是半导体器件研制中的关键工艺之一。在半导体器件制造中，要求淀积的多晶硅薄膜有较好的台阶复盖性能，对每片上各部位间，要求其厚度和结构是一致的，每次有重复性。对工艺要求是可控性和安全性，易于操作。对设备要求是简单、价廉。

常用的多晶硅淀积方法有：常压化学汽相淀积（APCVD）、低压化学汽相淀积（LPCVD）、等离子增强化学汽相淀积（PECVD）和光化学汽相淀积（PCVD）等<sup>[1-10]</sup>。

各种不同的CVD方法对应的设备结构各异，淀积条件也不相同，温度可由100℃变化到1000℃，压力可由101325Pa变化到6.66Pa，反应所需的能量可由热辐射、也可由光化学反应提供。

常压化学汽相淀积的反应器有多种形式，但可归纳为卧式反应器和立式反应器两种。在卧式反应器中，硅片水平放在基座上。反应气体掠过硅片表面。立式反应器是由一个钟罩形反应器构成的。硅片垂直放置在一个可旋转的底座上。两种反应器中的基座是由强光灯、高频感应或电热体加热。APCVD的上述两种方式，装片取片麻烦，生产效率低，生长厚度均匀性差（不一致性大于±10%）。因此，它们很快就被低压壁热式反应器取代了。随之等离子增强壁热式反应



器和平板式反应器也相继被采用。这时，淀积温度已经降低到350℃。但是，由于PECVD设备复杂，其射频等离子体的撞击会使器件产生等离子损伤，成膜后需要退火处理。光CVD可在更低的温度（≤200℃）下完成，并且可以克服PECVD的不足，60年代首次被用于半导体工业中，80年代由于VLSI的发展，引起了人们的更大关注。所以有可能，随着VLSI的发展，PCVD将成为淀积多晶硅薄膜所使用的主要方法。

选用何种淀积方法和与淀积方法相对应的反应器，要考虑到淀积温度（它应该与器件材料的特性相容），生长膜的特性以及器件生产的要求（硅片产量、安全性、设备可维修性和可靠性）诸因素。

本章主要讨论多晶硅生长机理，综合各种系统的优缺点，介绍几种具有代表性的淀积系统和淀积工艺。

## § 1.1 多晶硅薄膜的淀积

### 1.1.1 常压化学汽相淀积 (APCVD)

化学汽相淀积多晶硅方法，最初是采用常压方法实现的。装置简图如图 1—1 所示。

为得到厚度较为均匀的多晶硅膜，通常采用矩形石英反应器(8)；石墨基座(6)在反应器中保持有一定的倾斜角度，衬底片(7)平放在基座上，气体入口(4)设计成易于装卸样片，又能保证密封，由阀门(3)控制气体流量，进气系统要设计得能保证气体混合均匀。反应器由高频感应加热。石墨基座需采用高纯石墨，使用前经过高温处理，表

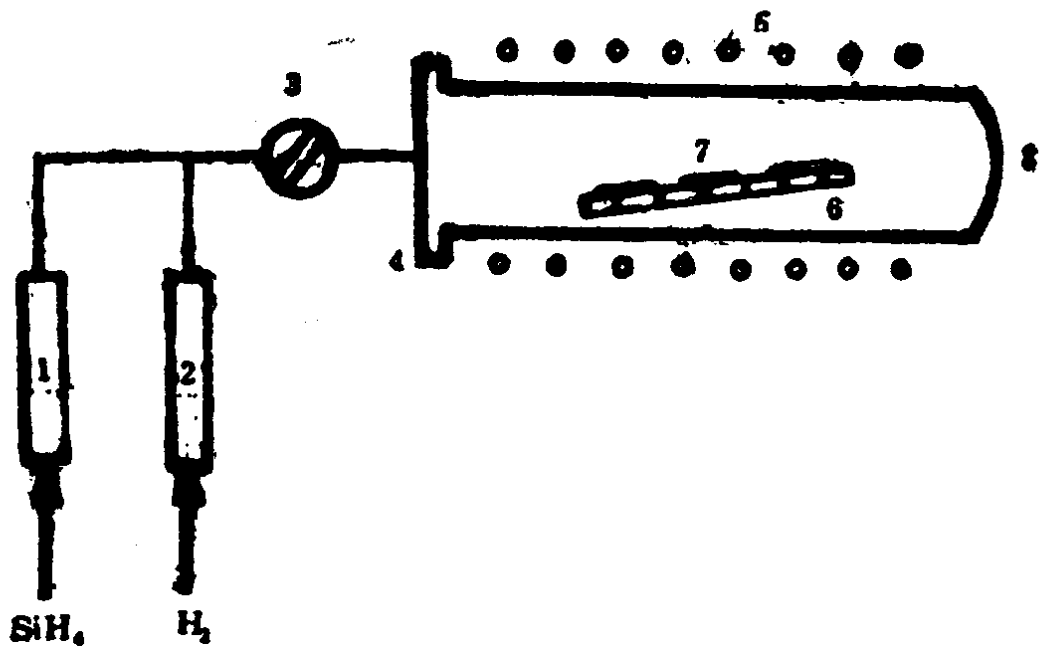


图 1—1 多晶硅装置示意图

1、2 气体流量计，3 阀门，4 气体入口，5 加热器，6 石墨基座，  
7 衬底片，8 石英反应器

面包了多晶硅。衬底材料可以是单晶硅、无定形硅、二氧化硅、尖晶石或兰宝石，视用途而定。它们对多晶硅生长动力学无明显影响。在采用无定形材料做衬底时，其生长速率一般要比以晶体材料做衬底时略低。载气可以是 $H_2$ 、 $N_2$ 和 $H_2$ 、 $A_r$ 、 $SiH_4$ 流速一般为  $15\sim 100\text{ml}/\text{min}$ ， $H_2$  流速为  $4\sim 12\text{l}/\text{min}$ ，淀积温度为  $600\sim 700^\circ\text{C}$ ，淀积速率可达  $100\sim 1000 \times 10^{-10}\text{m}/\text{min}$ 。

多晶硅淀积过程中，硅烷气体被吸附到衬底表面，然后受热分解：



初生态的硅原子具有较高的能量，会迅速在衬底表面核化，形成晶核，或使已有的晶核长大，反应生成的H原子迅速结合成稳定的氢分子，通过扩散运动向外脱附。同时 $SiH_4$

也不断向衬底表面补充，维持淀积的连续进行，以形成结晶态的硅淀积层。

如果  $\text{SiH}_4$  在空间气相状态发生分解，这样，形成的淀积层易出现无定形结构。为了抑制气相分解，保证生成的多晶硅层的质量，一般采取如下措施：（1）用氢气作载气；（2）适当加大气体流量；（3）反应系统要密封，气体要纯化；（4）采用低温成核方法。

多晶硅层的晶粒大小和淀积温度有关，温度升高，晶粒尺寸明显增大。在  $600\sim 850^\circ\text{C}$  范围内，衬底温度愈低，表面愈平坦，晶粒愈小。通常采用低温（ $600^\circ\text{C}$ ）成核，高温（ $700^\circ\text{C}$ ）生长的方法来制备多晶硅薄膜，这样会容易得到较好的结果。

### 1.1.2 低压化学汽相淀积 (LPCVD)

为了解决常压 CVD 的不足，人们很早就集成电路工艺中探讨使用低压化学汽相淀积技术。

1962 年 Sandor 发表了用低压热壁系统淀积二氧化硅的文章，接着 Oroshnik 等人在 1968 年，Tanikawa 等人在 1971 年也先后报道了他们在这方面的的工作。1973 年，Maeda 完成了多晶硅，氮化硅和二氧化硅的低压 CVD 工作，同年 Tanikawa 等人用减压淀积原理实现了衬底片垂直放置，从而提高了淀积效率和厚度均匀性。1975 年 Chruma 和 Hilton 发表了用硅烷进行 LPCVD 制备多晶硅薄膜的专利，到 1976 年，热壁 LPCVD 技术已普遍用于集成电路生产线上，并陆续取代了冷壁常压 CVD 方法。

#### 1. LPCVD 的特点

低压化学汽相淀积多晶硅主要过程是，使硅烷在恒温低

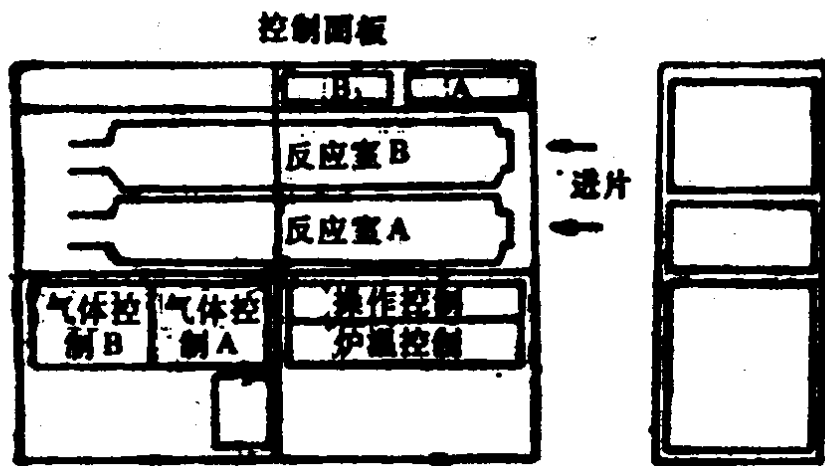
压下分解成硅和氢气，然后淀积在硅表面上，形成多晶硅薄膜。一般硅片采用直立密集装片方式。反应是在电阻炉恒温恒压下进行，因此是热壁条件。在LPCVD工艺中，由于反应在低压下进行，增大了质量转移率，加大了分子平均自由程，气体的扩散速度也加大了。热壁反应炉对片子直接加热，使温度的均匀性和可控性大大提高。硅片的竖直排列，使片子表面的质量转移速率比表面反应速率大得多，这不仅提高了均匀性，而且也增加了装片量。

通常用于淀积多晶硅的低压CVD工艺有二种。一种是采用100%的硅烷，反应室气压为26.66~133.32Pa。另一种工艺流程是维持与上述相同的气压而采用20%~30%的硅烷。两种工艺每批次容量都可达100~200片，膜厚一致性在5%以内。淀积速率约为 $100\sim 200 \times 10^{-10} \text{ m/min}$ 。

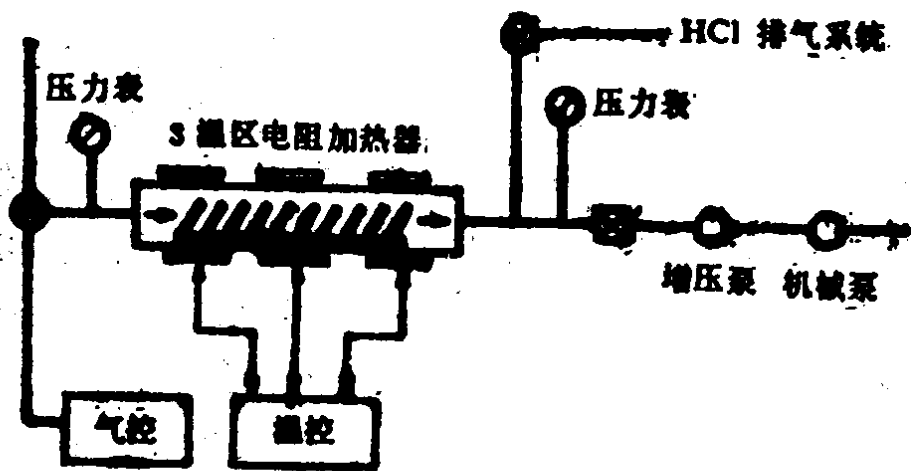
LPCVD工艺的优点是：（1）有均匀的台阶复盖；（2）膜的成份和结构可控；（3）淀积温度较低；（4）淀积速率较快；（5）工艺容量较高；（6）制片成本较低。此外，和APCVD相比，它的重要特点还在于它有很高的膜厚一致性，在硅片内达到 $\pm 1\sim 3\%$ ，片间一致性达 $\pm 2\sim 5\%$ ，而APCVD相应的为 $\pm 4\sim 8\%$ 和 $\pm 6\sim 12\%$ 。

淀积多晶硅薄膜存在的问题是，反应器壁上的淀积问题，淀积物剥落，堆积在硅片上，形成多晶硅颗粒，从而破坏了多晶硅薄膜的完整性，亦对电路工艺影响极大。在常压情况下，为了克服这一点，通常采用冷壁方式，以使壁上淀积达到低限。低压情况，由于是热壁，多晶硅淀积在壁上与淀积在硅片表面上的机会均等。控制得当，这种淀积方式反而有利于防止颗粒问题，这种壁上淀积膜，厚度要保持低于

20 $\mu$ m, 并且: (1) 壁上淀积膜要致密, 和壁的粘敷要很好, (2) 壁温要保持恒定, (3) 硅片要垂直放置, 以减少多晶颗粒落到硅片表面的机会。



(a)



(b)

图1-2 LPCVD系统图

## 2. LPCVD 系统

一个典型的LPCVD系统示于图 1—2 中。图1—2(a)示

出了这个系统的剖面图，它包含了两个独立的反应器系统，每一系统又是由电阻加热反应器，炉温控制，气体管路和气体控制，增压泵——机械泵和控制面板等几个主要部分组成。结构框图如图 1—2(b) 所示。采用适当口径的石英管和电阻加热三段温控炉构成热壁反应器主体，排气系统由增压泵和机械泵串联构成。

反应气体输入系统很重要，对气路密封性要求很高。一般，气路均用不锈钢管道连接，阀门转接方式和气流混合方式要根据反应要求来设计。此系统包括有：气体压力调节器、气体过滤器、减压阀、流速计、气压计、清洗气分路等，可根据实际需要选用不同组合方式。

操作时，首先升温，达到确定温度时（例如  $600^{\circ}\text{C}$ ）启动机械泵和增压泵，抽空系统，向系统内缓缓通入高纯氩或高纯氮气，约  $3\sim 5\text{min}$ ，停止抽空，继续通气至管口打开，将片子装入石英托具，送入恒温区，启动抽气泵继续抽空。当温度达到恒温（如  $600^{\circ}\text{C}$ ），真空度达到了  $2.67\text{Pa}$  左右时，打开硅烷管路，调节针形阀，缓缓通入硅烷，流量约为  $20\sim 50\text{ml/min}$ ，压力达到  $26.67\sim 66.67\text{Pa}$ ，时间适当选择，例如  $50\sim 60\text{min}$ ，炉温为  $600^{\circ}\text{C}$  时，可得到约为  $3000\sim 4000 \times 10^{-10}\text{m}$  厚的多晶硅膜。完成后，关闭硅烷管路，抽净残余气体，再以高纯氩或高纯氮冲洗  $3\sim 5\text{min}$  之后停泵，继续通氩或氮气至管口打开取出硅片。

恰当地选取温度、压力、流量和时间对于淀积出优质的多晶硅十分重要，而且它们之间互相依赖，需要适当组合才能获得理想结果。

### 3. 多晶硅淀积速率和温度的关系

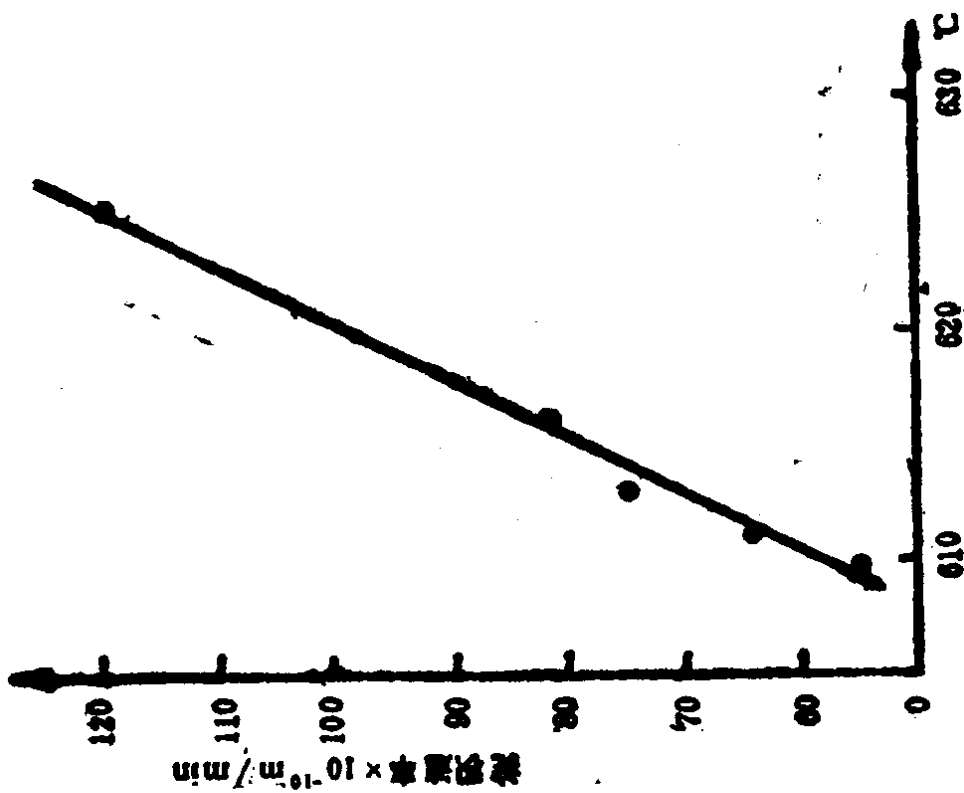


图1-3 20%浓度的SiH<sub>4</sub>生长的多晶硅(SiH<sub>4</sub>流量一定, 时间一定, 压力一定)

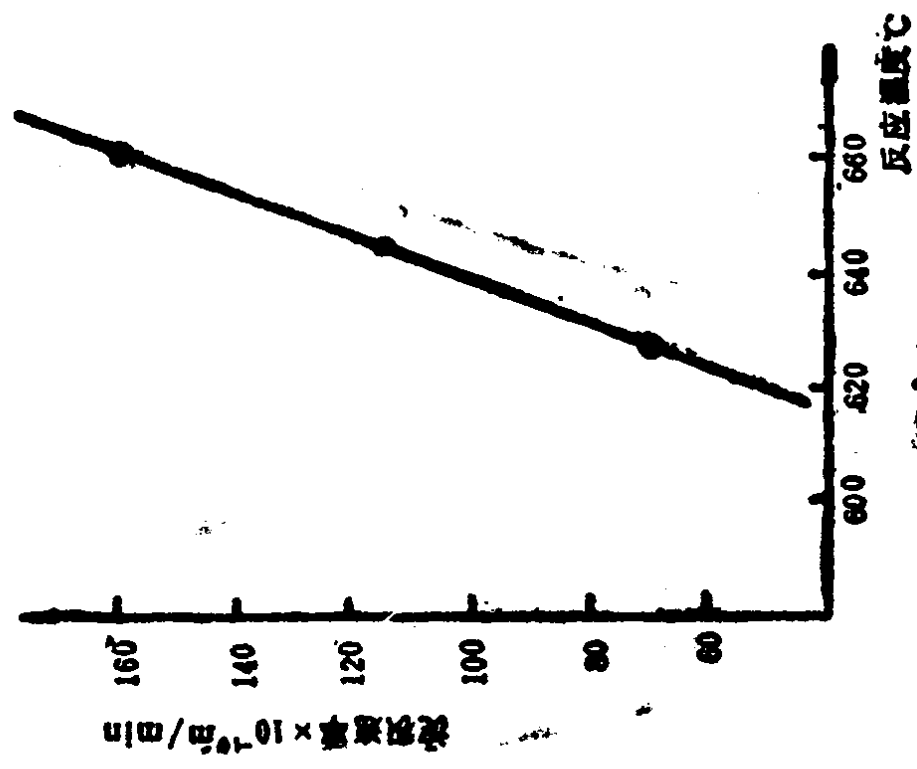


图1-4 5%浓度的SiH<sub>4</sub>生长的多晶硅(SiH<sub>4</sub>流量一定, 时间一定, 压力一定)

温度是影响淀积速率的重要因素,当 $\text{SiH}_4$ 流量一定时,控制反应室内压力不变,淀积时间固定,这时淀积速率随反应室内温度的升高而明显加快,呈线性关系,如图 1—3、图 1—4 所示。

在严格等温的反应室内,由于硅烷逐渐分解,气流入口端的薄膜淀积速率要大于出口端的淀积速率,实现每批次片间均匀淀积很困难。所以在实际的系统中,为达到片间淀积均匀,必须使恒温区内有一个温度梯度,例如使恒温区的出口端温度高 $10\sim 20^\circ\text{C}$ 。

#### 4. 薄膜生长速率、生长厚度与压力的关系

控制其它条件不变,改变  $\text{N}_2$  (或  $\text{Ar}$ ) 流量,改变反应室内压力,会发现,压力  $< 133.32\text{Pa}$  时,生长的多晶硅薄膜

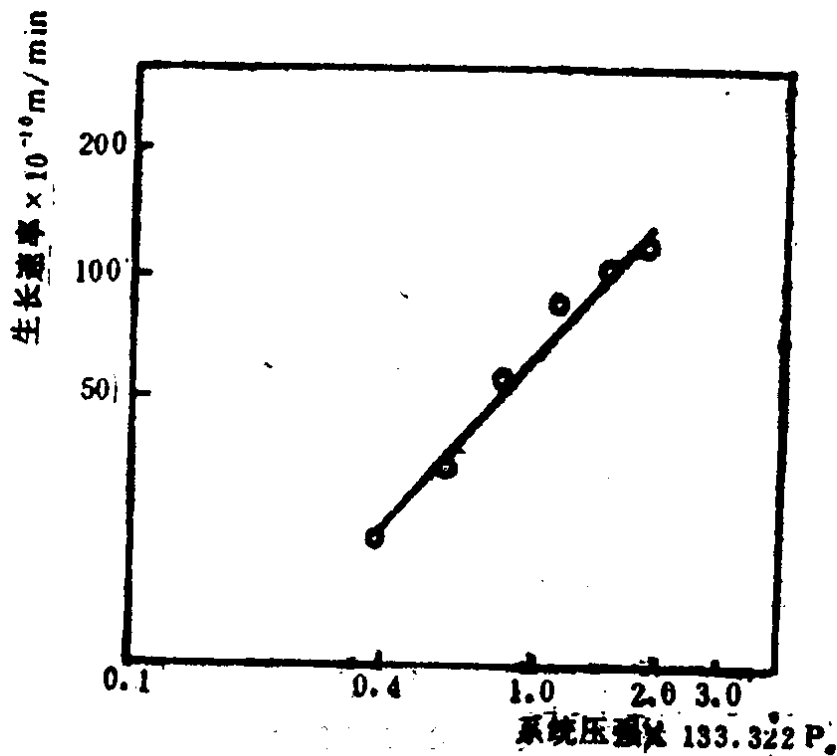


图1—5 磷掺杂多晶硅膜生长速率和系统压强的关系 (生长温度  $620^\circ\text{C}$ ,  $\text{PH}_3/\text{SiH}_4 = 6 \times 10^{-2}$ , 片间距离  $18\text{mm}$ )



厚度均匀，变化不大。但如果温度和  $\text{SiH}_4$  流量一定，淀积速率将随室内压力的增大而增大（见图1—5）。

淀积速率和分压强的关系如图1—6、图1—7所示，即使温度和流量不变，由于装片量不同，系统压力也会略有变

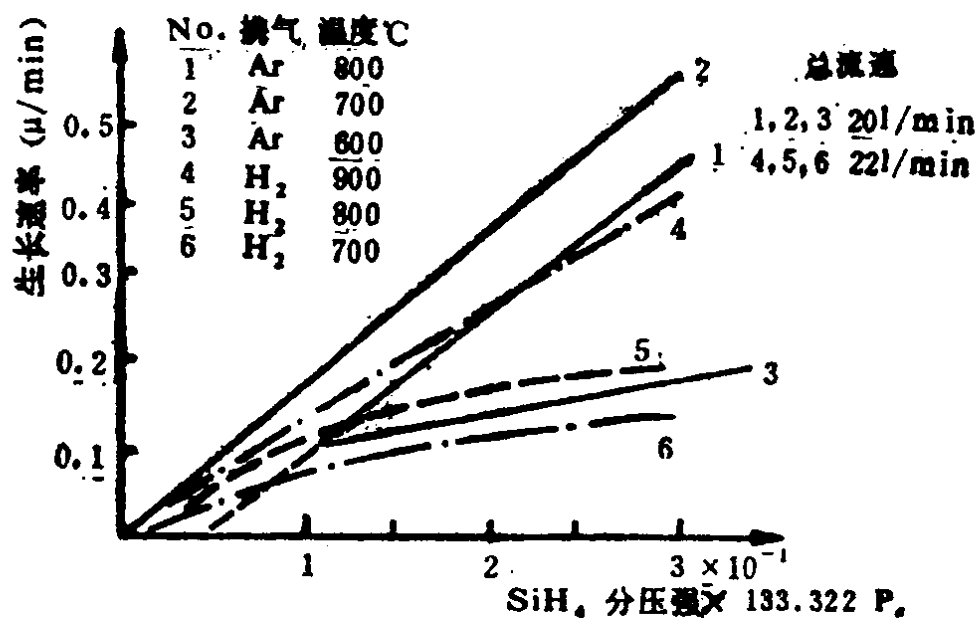


图1—6 淀积速率和  $\text{SiH}_4$  分压强的关系

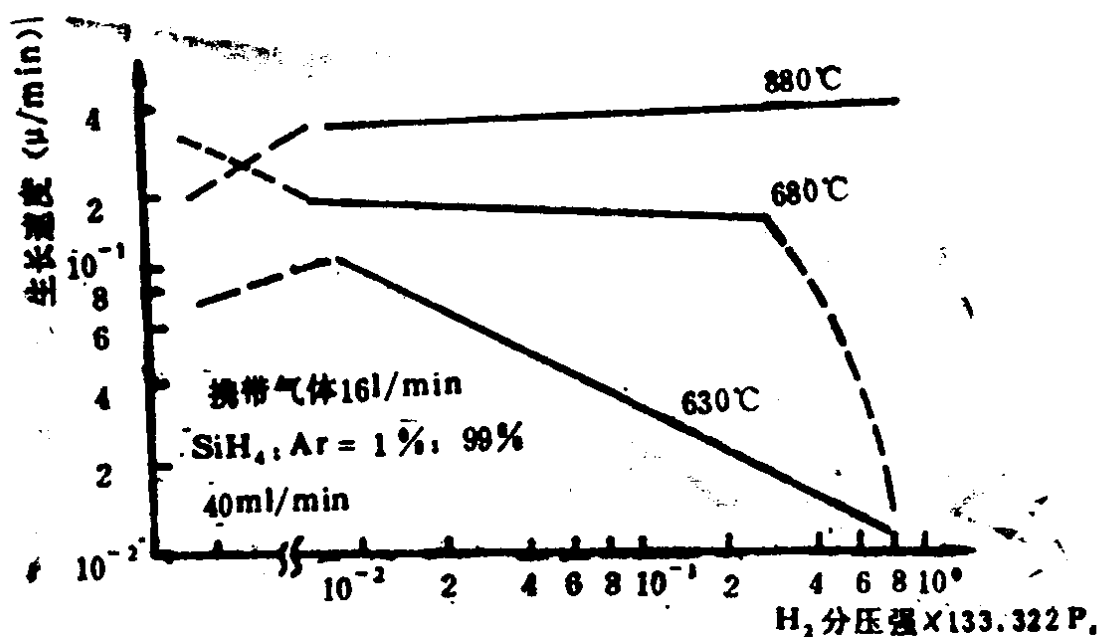


图1—7 淀积速率和  $\text{H}_2$  分压强的关系