

PECVD 法制备纳米多孔 SiO_x 薄膜

曹玥, 王灿, 张改梅, 宋晓利, 陈强
(北京印刷学院, 北京 102600)

摘要: **目的** 研究基于等离子体增强气相化学沉积 (PECVD) 制备多孔 SiO_x 薄膜的方法。**方法** 以六甲基二硅氧烷(HMDSO)为单体, 并通入氧气、氩气, 再加入少量的有机物质, 通过辉光放电的方式形成等离子体, 从而在玻璃基材表面沉积, 制备出氧化硅薄膜, 再在高温下进行热处理, 使氧化硅薄膜中的碳氢键等有机组分被除去, 形成孔隙。研究单体与氧气的比例、沉积时间、沉积功率等实验条件对沉积率、形貌、结构以及折射率的影响。**结果** 当放电时间为 10 min, 放电功率为 50 W, 氧气与单体的体积比为 1:6 时, 薄膜沉积速率达到最优值, 为 14.6 nm/min。伸缩振动的吸收强度随着氧气含量的增加强度降低。经过热处理后, 氧化硅表面的平整度得到提升, 热处理后断面的形貌发生了变化, 出现了断层面开裂的现象。**结论** 通过 PECVD 沉积 SiO_x 薄膜, 通过加热形成孔隙制备多孔 SiO_x 薄膜, 能将介电常数降低到 1.9 以下。

关键词: 多孔 SiO_x 薄膜; 折射率; 单体; 沉积率

中图分类号: TB484 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)19-0035-06

Preparation of Nano-porous SiO_x Films by PECVD Method

CAO Yue, WANG Can, ZHANG Gai-mei, SONG Xiao-li, CHEN Qiang
(Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing, 102600, China)

ABSTRACT: The work aims to study the method of preparing porous SiO_x films based on plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD). With hexamethyldisiloxane (HMDSO) as monomer, the plasma was formed in the form of glow discharge with the addition of oxygen and argon and then small quantities of organic matters, so that they were deposited on the surface of the glass substrate and hence the silicon oxide films were prepared. By heat treatment at high temperatures, the carbon-hydrogen bonds and other organic components in the silicon oxide films were removed to form pores. The effects of experimental conditions, such as the ratio of monomer to oxygen, deposition time and deposition power on the deposition rate, morphology, structure and refractive index were investigated. When the discharge time was 10 min, the discharge power is 50 W, and the ratio of oxygen to monomer was 1:6, the optimum deposition rate of the film was 14.6 nm/min. The absorption intensity of the stretching vibration decreased with the increase in the oxygen content. After heat treatment, the smoothness of the surface of the silicon oxide film had been improved, the morphology of the cross section had been changed after heat treatment, and the cracking of the cross section had appeared. SiO_x films are deposited by PECVD and the porous SiO_x films are prepared due to the porosity formed by heating, so that the dielectric constant can be reduced to below 1.9.

KEY WORDS: porous SiO_x films; refractive index; monomer; deposition rate

随着集成电路尺寸特征的快速减小, 芯片内部连线的长度已达万米之长^[1], 芯片内部线宽的特征尺寸必然会减小, 引发了器件信号传输延时、功率损耗增

大等问题, 因此采用具有低介电常数特性的薄膜材料来代替传统的氧化硅薄膜引起人们的极大关注^[2-4]。随着物联网的发展, 智能包装用超高频 (UHF) 射频

收稿日期: 2017-08-16

基金项目: 国家自然科学基金 (51305038); 北京印刷学院科技面上项目 (Eb201701)

作者简介: 曹玥 (1994—), 女, 北京印刷学院硕士生, 主攻材料加工工程。

通讯作者: 张改梅 (1975—), 女, 博士, 北京印刷学院教授, 主要研究方向为纳米无损检测、现代测控技术等。

标签(RFID)具有独特的识别距离远、识别正确率高、识别速度快、环境适应能力强等特点,得到了广泛关注^[5]。超高频天线其结构紧凑、增益高^[6],也需要低介电常数材料。材料的介电常数是由材料的极化率和单位体积极化分子的个数决定,材料的孔隙率影响其介电常数的值^[7-8]。氧化硅薄膜具有热稳定性好、尺寸稳定、力学强度高以及与集成电路工艺兼容等优点,纳米多孔氧化硅薄膜正适合用于大规模集成电路中^[9-10]。低介电常数纳米多孔氧化硅薄膜的制备方法很多,主要有溶胶-凝胶法(Sol-Gel)^[11-13]、化学气相沉积法(CVD)^[14-17]。此外,还可采用物理方法制备,但得到的薄膜比较致密、介电常数高,因此不常用物理法制备多孔氧化硅薄膜。

利用等离子体增强气相化学沉积法(PECVD)制备多孔氧化硅薄膜主要是在沉积的过程中掺入有机组分,从而形成以无机组分为骨架包含有机成分的杂化薄膜^[18],然后再经过热退火去除薄膜里的有机组分,同时固化骨架,得到具有纳米多孔结构的氧化硅薄膜。Grill和Patel以有机小分子作为成孔剂,利用PECVD法制备了介电常数为2.05的多孔氧化硅薄膜,可知采用环氧己烯作为成孔剂比环氧丁烯更能有效降低薄膜的介电常数^[19]。Favenec等提出薄膜中的有机组分会影响热处理后薄膜的孔隙率,但是当有机含量达到一定值时,再增加其通入量,反而会降低薄膜的孔隙率。这是由于如果薄膜中有机组分太高,则在后期热退火过程中会发生孔的坍塌,导致薄膜孔隙率降低,无法降低薄膜的介电常数^[20]。退火处理会对氧化硅薄膜的各项性能产生很重要的影响,经研究发现在惰性气体的氛围下,氧化硅薄膜在420~450℃的温度下热退火1h是一种有效且被广泛使用的处理方法^[21]。文中采用PECVD法,以六甲基二硅氧烷(HMDSO)为单体,并通入氧气、氩气,再加入少量的有机物质,通过辉光放电的方式形成等离子体,在玻璃基材表面沉积氧化硅薄膜,再在高温下进行热处理,使氧化硅薄膜中的碳氢键等有机组分挥发形成孔隙,从而降低薄膜的介电常数,分析不同条件对孔隙率和介电常数的影响。

1 实验

1.1 设备、仪器及材料

采用PECVD法制备纳米多孔氧化硅薄膜,实验装置的简图和实物见图1。主要材料:六甲基二硅氧烷(283740),北京百灵威科技有限公司;乙二醇二甲醚(分析纯),天津市光复科技发展有限公司;载玻片(7101),帆船牌;乙醇(分析纯),天津市光复科技发展有限公司;异丙醇(分析纯),北京化工厂;实验室自制去离子水。主要仪器:PECVD,实验室

自制;台阶仪(Dektak150),美国Veeco公司;场发射扫描电子显微镜(SU8000),日本Hitachi公司;傅里叶红外光谱仪(FTIR-8400),日本岛津公司;椭圆偏振光谱仪(HORIBA-UVISEL),法国HORIBA公司;真空气氛管式电炉(TSK-2-12Q),北京弗恩森电炉有限公司;超声波清洗器(KQ-100DE),昆山市超声仪器有限公司;原子力显微镜(VeecoDI INNOVA),美国Veeco公司。

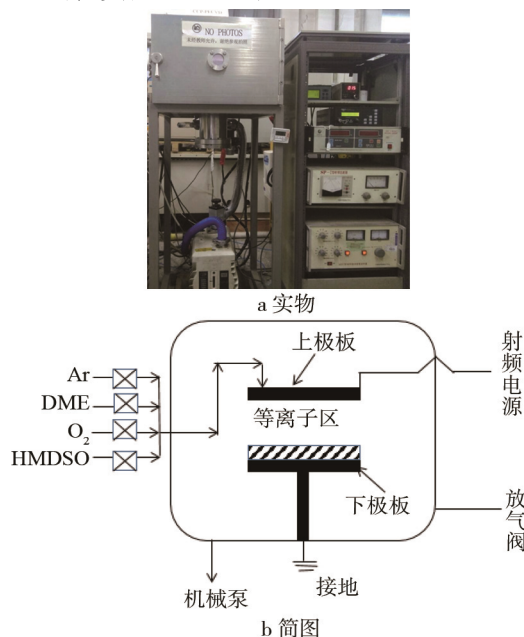


图1 PECVD沉积氧化硅薄膜装置
Fig.1 Devices for deposition of silicon oxide film by PECVD

1.2 方法

1) 基材的准备。依次将分切好的载玻片放入异丙醇、乙醇、去离子水中超声清洗,并用氩气吹干。

2) 多孔 SiO_x 薄膜的制备。按照设定的比例依次向如图1所示的腔体中通入氧气和六甲基二硅氧烷,单体与氧气的比例通过真空示数计的示数改变量来控制。为了增加孔隙率,在放电前加入少量的醚,并加入少量氩气帮助放电;调节放电功率,设定反应时间,进行放电以沉积 SiO_x 薄膜。

3) 孔隙率的测量。利用椭圆偏振法拟合时,需要获取载玻片的数据及了解薄膜的组成成分,从材料库中调出并调节它们在薄膜中所占的比例。利用椭圆偏振法拟合时,以横坐标为635.8 nm左右的波长来进行取值,然后再进行折射率、介电常数和孔隙率的分析 and 计算。

2 结果及分析

2.1 不同实验条件对氧化硅薄膜沉积速率的影响

放电时间为10 min,放电功率为50 W,改变氧气与单体比例的条件下制备的氧化硅薄膜热处理前

后的厚度和沉积速率见表 1。由表 1 的实验结果可以看出,相同的放电时间和放电功率条件下,氧化硅薄膜的沉积速率随着单体所占比例的增大而先增大,当单体所占比例增大到一定程度后,薄膜的沉积速率便会达到一个饱和值,然后沉积速率便会随着 HMDSO 所占比例的增大而减小。总的来说,对于某一放电功率的条件下,氧气与单体的比例对薄膜的沉积速率存在最优值。当放电时间为 10 min,放电功率为 50 W,氧气与单体的体积比为 1 : 6 时,薄膜沉积速率达到最优值,为 14.6 nm/min。

表 1 不同比例条件下氧化硅薄膜的厚度和沉积速率
Tab.1 The thickness and the deposition rate of the silicon oxide film under different proportions

氧气与 HMDSO 的体积比	热处理前 厚度/nm	沉积速率/ (nm·min ⁻¹)	热处理 厚度/nm
1 : 3	113	11.3	82
1 : 4	123	12.3	116
1 : 5	129	12.2	104
1 : 6	146	14.6	107
1 : 7	135	13.5	100
1 : 8	117	11.7	75
1 : 9	109	10.9	97

在放电时间为 10 min,氧气与单体的体积比为 1 : 8,放电功率不同条件下制备的氧化硅薄膜退火前后的厚度和沉积速率见表 2。由表 2 可以看出,氧化硅薄膜的沉积速率随着放电功率的增大而增大,放电功率越大,则参加反应的电子的密度和温度也会增大,更有利于单体和氧气的分解,从而提高了薄膜的沉积速率。

表 2 不同放电功率条件下氧化硅薄膜的厚度和沉积速率
Tab.2 The thickness and deposition rate of the silicon oxide film under different discharge powers

放电功率/ W	热处理前 厚度/nm	沉积速率/ (nm·min ⁻¹)	热处理后 厚度/nm
50	117	11.7	75
75	123	12.3	104
100	134	13.4	105
150	168	16.8	143

同时由表 1 和表 2 的实验结果中可以看出,热处理前后氧化硅薄膜的厚度均发生了变化,由此可以证明经热处理后,氧化硅薄膜内部结构发生了改变。

2.2 不同实验条件对氧化硅薄膜结构的影响

纳米多孔氧化硅薄膜在放电时间为 10 min,放电功率为 100 W,不同比例条件下的红外光谱见图 2,3 条曲线在 2962, 1260, 1030, 798 cm⁻¹ 处也有 4 个明显的吸收峰,不同的是在 2962 cm⁻¹ 处饱和 C—H 伸

缩振动和 1260 cm⁻¹ 对应 Si—CH₃ 的伸缩振动的吸收强度随着氧气含量的增加强度降低。这是由于氧气会与侧链—CH₃ 反应,从而导致 Si—CH₃ 的键含量降低,导致在 1260 和 2962 cm⁻¹ 时吸收强度降低。此外不同比例条件下的红外光谱,在 1030 cm⁻¹ 处特征峰的宽度不同,说明放电时间和功率相同的条件下,氧气与单体的比例不同则沉积的氧化硅薄膜的厚度也不同。

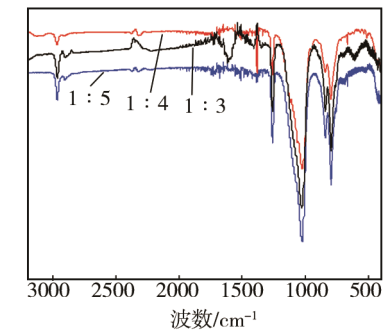


图 2 不同比例条件下氧化硅薄膜的红外光谱
Fig.2 Infrared Spectra of Silicon Dioxide Films under Different Proportions

2.3 不同实验条件对氧化硅薄膜断面形貌的影响

在放电时间为 5 min,放电功率为 100 W,氧气与单体的体积比为 1 : 4 的条件下,放大倍率为 20 000 的纳米多孔氧化硅薄膜表面的 SEM 照片见图 3。从图 3 可以看出,氧化硅薄膜表面完整无开裂的现象,表面由均匀的氧化硅颗粒组成。

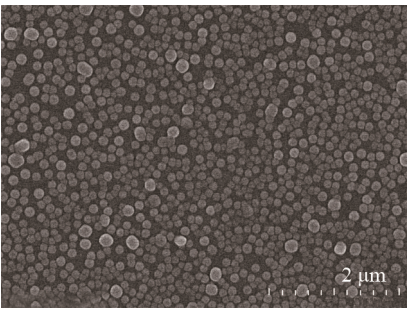


图 3 氧化硅薄膜表面的 SEM
Fig.3 SEM of the surface of silicon oxide film

在放电时间为 20 min,放电功率为 100 W,氧气与单体的体积比为 1 : 4 的条件下,纳米氧化硅薄膜热处理前后断面的 SEM 照片见图 4a。从图 4a 可以看出,氧化硅薄膜沉积得比较均匀,薄膜下部分很难与硅片区分,经热处理后断面的形貌发生了变化,但断面层完整无开裂。

在放电时间为 20 min,放电功率为 100 W,氧气与单体的体积比为 1 : 6 的条件下,纳米氧化硅薄膜热处理前后断面的 SEM 照片见图 4b。从图 4b 中可以看出,热处理前氧化硅薄膜沉积得较均匀,薄膜下部分很难与基底区分,经热处理后断面的形貌发生了变化,出现了断面层开裂的现象。这是由于热处理使

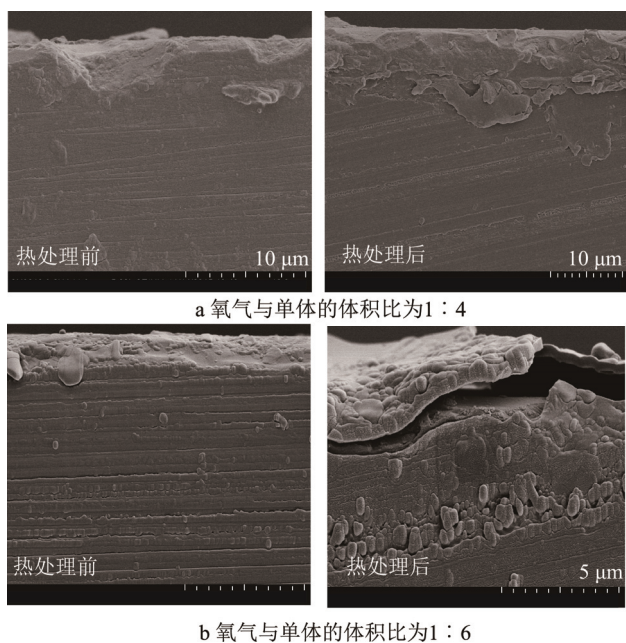


图 4 氧化硅薄膜热处理前后断面的 SEM

Fig.4 SEM of the section before and after heat treatment of silicon oxide film

有机成分从氧化硅薄膜中分解出时导致了孔道的坍塌,还引起了薄膜表面的开裂,这主要与有机醚的加入量相关。

3 多孔氧化硅薄膜的介电常数及孔隙率分析

孔隙率的大小影响氧化硅薄膜内部的结构分布,从而影响其力学性能和绝热性能。文中采用椭圆偏振光谱仪测定薄膜的折射率,再通过 Lorentz-Lorenz 公式计算多孔薄膜的孔隙率:

$$\frac{n_0^2 - 1}{n_0^2 + 2}(1 - p) = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \quad (1)$$

式中: n_0 为载玻片的折射率,这里 $n_0 = 4.340$; n 为薄膜的折射率; p 为薄膜的孔隙率。

薄膜的介电常数通过 Maxwell-Garnette 公式计算:

$$k = n^2 \quad (2)$$

式中: k 为薄膜的介电常数; n 为薄膜的折射率。

在放电时间为 10 min,放电功率为 50 W,氧气与单体比例不同的条件下,氧化硅薄膜热处理前后的折射率见图 5。由图 5 可知,氧化硅薄膜经热处理后折射率都有所下降。这是由于薄膜中的 $-\text{CH}_3$ 等有机组分被分解除去,形成了以稳定的 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 等无机组分为骨架的多孔结构,使得薄膜折射率降低。

在氧气与单体的体积比为 1:8,放电时间为 10 min,放电功率不同条件下,氧化硅薄膜热处理后的介电常数和孔隙率见表 3。由表 3 的实验结果可知,

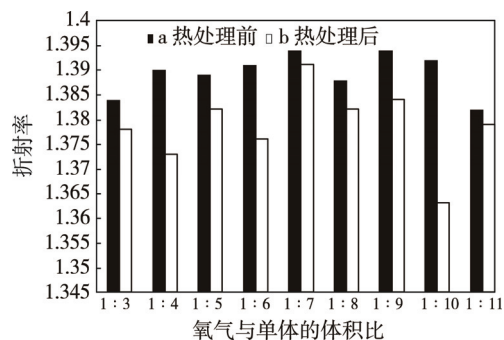


图 5 不同比例条件下氧化硅薄膜热处理前后的折射率
Fig.5 The refractive index of the silicon oxide film before and after heat treatment under different proportions

氧化硅薄膜的折射率在经过热处理后均减小,其中当放电功率为 50 W 时,薄膜热处理后的折射率最小,此时薄膜的介电常数已小于 1.9。

表 3 放电功率不同条件下氧化硅薄膜热处理后的介电常数和孔隙率

Tab.3 Dielectric constant and porosity of silicon oxide films after heat treatment under different discharge powers

放电功率/W	热处理前 折射率	热处理后 折射率	介电常数	孔隙率/%
50	1.403	1.377	1.896	73.133
75	1.382	1.379	1.902	73.000
100	1.388	1.382	1.910	72.811
150	1.396	1.384	1.915	72.697

在氧气与单体比例为 1:8,放电功率为 50 W,不同放电时间条件下氧化硅薄膜热处理后的介电常数和孔隙率见表 4。由表 4 的实验结果可知,氧化硅薄膜的折射率经热处理后都有所降低,并且随着时间的增加先减小后增大,这说明多孔氧化硅薄膜的介电常数受薄膜厚度的影响。

表 4 放电时间不同条件下氧化硅薄膜热处理后的介电常数和孔隙率

Fig.4 The dielectric constant and porosity of the silicon oxide film after heat treatment under different discharge time

放电 时间/min	热处理前 折射率	热处理后 折射率	介电 常数	孔隙 率/%
5	1.407	1.394	1.943	72.061
10	1.383	1.377	1.896	73.133
15	1.396	1.389	1.929	72.378
20	1.407	1.401	1.963	71.612

在放电时间为 10 min,放电功率为 50 W,氧气与单体比例不同条件下氧化硅薄膜热处理后的介电常数和孔隙率见表 5。由表 5 的实验结果可知,氧化硅薄膜的折射率经热处理后介电常数都小于 2.0。主要是由于该实验采用射频电源形式,且在薄膜中添加

了少量的乙二醇二甲醚，增加了薄膜中—CH₃ 基团的数量，经热处理后—CH₃ 基团被除去，得到了多孔的氧化硅薄膜，使薄膜的介电常数都降低到 2.0 以下。

表 5 不同比例条件下氧化硅薄膜的介电常数和孔隙率
Fig.5 The dielectric constant and porosity of the silicon oxide film under different proportions

O ₂ 与HMDSO 的体积比	热处理后 折射率	介电常数	孔隙率/%
1 : 3	1.378	1.899	73.064
1 : 4	1.373	1.885	73.388
1 : 5	1.382	1.910	72.811
1 : 6	1.376	1.893	73.203
1 : 7	1.391	1.935	72.242
1 : 8	1.382	1.910	72.811
1 : 9	1.384	1.915	72.697
1 : 10	1.377	1.896	73.133
1 : 11	1.379	1.902	72.456

5 结语

实验采用 PECVD 法通过调节单体与 O₂ 的比例、放电时间、放电功率等试验条件，并通过热处理制备出 $k < 1.9$ 的低介电常数多孔氧化硅薄膜，并对其沉积速率及微观结构进行了表征和分析，可知不同实验条件下制备出的纳米氧化硅薄膜具有不同的结构特征。

参考文献:

[1] MILLER R D. In Search of Low k Dielectrics. Science, 1999, 286: 421—422.

[2] 宁兆元, 叶超. 超低介电常数材料和多孔 SiOCH 薄膜[J]. 世界科技研究与发展, 2004(6): 19—23.
NING Zhao-yuan, YE Chao. Ultra-low Dielectric Constant Materials and Porous SiOCH Films[J]. WorldSci-Tech R & D, 2004(6): 19—23.

[3] 叶超, 宁兆元. 纳电子器件中的超低介电常数材料与多孔 SiOCH 薄膜研究[J]. 物理, 2006, 35(4): 322—329.
YE Chao, NING Zhao-yuan. Ultra-low Dielectric Constant Materials and Porous SiCOH Film for Nano-electronic Devices[J]. Physics, 2006, 35(4): 322—329.

[4] 付振生. 多孔低介电常数材料的制备与探讨[D]. 南京: 南京工业大学, 2011.
FU Zhen-sheng. Preparation of Porous Materials with Low Dielectric Constant[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2011.

[5] DOBKIN D M. The RF in RFID: UHF RFID in Practice[M]. Newnes, 2012.

[6] CHEN Z N, QING X, CHUNG H L. A Universal UHF RFID Reader Antenna[J]. Microwave Theory and Tech-

niques, IEEE Transactions on, 2009, 57(5): 1275—1282.

[7] GRILL A, NEUMAYER D A. Structure of Low Dielectric Constant to Extreme Low Dielectric Constant SiCOH Films: Fourier Transform Infrared Spectroscopy Characterization[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 94(10): 6697—6707.

[8] ROSSOW U. Optical Characterization of Porous Materials[J]. Physica Status Solidi, 2015, 184(1): 51—78.

[9] GUENDOUZ M, PEDRONO N, ETESE R, et al. Oxidised and Non Oxidised Porous Silicon/disperse Red Composite: Physical and Optical Properties[J]. Physica Status Solid, 2003, A197(2): 414—418.

[10] 冯坚, 张长瑞, 王娟, 等. 低介电常数纳米多孔氧化硅薄膜[J]. 电子元件与材料, 2004(9): 583—586.
FENG Jian, ZHANG Chang-rui, WANG Juan, et al. Nanoporous Silica Oxide Films with Low Dielectric Constant[J]. Electronic Components and Materials, 2004(9): 583—586.

[11] 吴广明, 吴兆丰, 姚兰芳, 等. 低介电常数多孔氧化硅薄膜的制备与研究[J]. 材料科学与工程学报, 2005, 23(3): 408—411.
WU Guang-ming, WU Zhao-feng, YAO Lan-fang, et al. Preparation and Study of Low Dielectric Constant Mesoporous Silical Films[J]. Materials Science and Engineering, 2005, 23(3): 408—411.

[12] 马建华, 孟祥建, 孙璟兰, 等. 常压制备 SiO₂ 气凝胶薄膜[J]. 红外与毫米波学报, 2004(6): 465—468.
MA Jian-hua, MENG Xiang-jian, SUN Jing-lan, et al. Silica Aerogel Thin Films Prepared at Ambient Pressure[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2004(6): 465—468.

[13] LEE S, CHA Y C, HWANG H J, et al. The Effect of pH on the Physicochemical Properties of Silica Aerogels Prepared by an Ambient Pressure Drying Method[J]. Materials Letters, 2007, 61: 3130—3133.

[14] 沈峰. PECVD 法制备 P 型非晶硅薄膜及多晶硅薄膜[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
SHEN Feng. Fabrication of P-typed Amorphous Silicon Films and Poly-silicon Films by PECVD[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008.

[15] 张会娟. PECVD 多晶硅薄膜制备工艺和性能的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2010.
ZHANG Hui-juan. Investigation on Technology and Properties of Polycrystalline Silicon Thin Film Prepared by PECVD[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2010.

[16] 贾冬义. 常压冷等离子体的产生及在微电子和材料表面改性中的应用[D]. 长春: 长春理工大学, 2006.
JIA Dong-yi. Atmospheric-pressure Cold Plasma Production and Its Application in Microelectronics and Surface Modification[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2006.

- [17] 夏磊. 常压等离子体化学气相沉积制备纳米多孔硅基薄膜的过程和特性研究[D]. 上海: 东华大学, 2007.
XIA Lei. Investigation of the Process and Properties of Nano Porous Silicon-based Thin Film by Atmospheric Plasma Enhanced Vapor Deposition[D]. Shanghai: Donghua University, 2007.
- [18] 王海. PDMS/SiO₂ 杂化薄膜的制备与性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
WANG Hai. Synthesis and Characteristic of PDMS/SiO₂ Hybrid Materials[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [19] GRILL A, PATEL V. Ultra low-k Dielectrics Prepared by Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition[J]. Applied Physics Letters, 2001, 79(6): 803—805.
- [20] FAVENNEC L, JOUSSEAUME V, GERBAUD G, et al. Ultralow k Using a Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition Porogen Approach: Matrix Structure and Porogen Loading Influences[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 102(6): 064107—064109.
- [21] 谭再上, 吴小蒙, 范仲勇, 等. 热退火对等离子体增强化学气相沉积 SiCOH 薄膜结构与性能的影响[J]. 物理学报, 2015, 64(10): 263—269.
TAN Zai-shang, WU Xiao-meng, FAN Zhong-yong, et al. Effect of Thermal Annealing on the Structure and Properties of Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposited SiCOH Film[J]. Acta Physical Sinica, 2015, 64(10): 263—269.

《智能包装与活性包装》特色栏目征稿函

智能包装与活性包装是包装工程技术领域的发展趋势,也是全球包装行业研发和应用的焦点。智能包装新技术与活性包装新材料的应用,能改善包装物条件的体系(通过释放物质、排除或抑制SU),延长包装物使用寿命;提高卫生安全性;改善气味和口感特性的同时保证其品质不变。利用新型的包装材料、结构与形式对商品的质量和流通安全性进行积极干预与保障,通过信息收集、管理、控制与处理技术完成对运输包装系统的优化管理等。

鉴于此,本刊拟围绕“智能包装与活性包装”这一主线,作系列专项报道。本刊编辑部特邀请相关专家为该栏目撰写稿件,以期进一步提升本刊的学术质量和影响力。稿件以研究论文为主,也可为综述性研究,请通过网站投稿,编辑部将快速处理并优先发表。

编辑部电话: 023-68792294 网址: www.packjour.com

《包装工程》编辑部