ICPCVD 低温生长非晶硅的工艺及光学特性研究

王进 张伟 冷家君 韩鹤彬 沈文超 陆铖灵 张学敏^{*} (中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所纳米加工平台苏州 215123)

Technology and Optical Properties of Amorphous Silicon Grown at Low Temperature by ICPCVD

WANG Jin, ZHANG Wei, LENG Jiajun, HAN Hebin, SHEN Wenchao, LU chengling, ZHANG Xuemin^{*} (Nano Fabrication Facility, Suzhou Institute of Nano-tech and Nano-bionics, CAS, Suzhou 215123, China)

Abstract In this paper, amorphous silicon thin films were grown on glass and sapphire substrates at temperatures of 100 °C and below, using the ICPCVD method. The growth of high-quality amorphous silicon films at low temperatures was achieved by adjusting parameters such as the gas flow ratio of Ar to SiH₄, radio frequency power, and substrate temperature. The effect of substrate temperature on the deposition quality of amorphous silicon films was characterized and analyzed using Raman spectroscopy. It was found that at a substrate temperature of 100°C, the crystalline fraction and microcrystalline size of the amorphous silicon film were 64.4% and 4.7 nm, respectively. In addition, the optical properties such as refractive index and transmittance of the amorphous silicon films were studied, and the calculated optical bandgap of the films was found to be 1.68 eV. Finally, two types of a-Si/SiO₂/a-Si Bragg reflector structures were fabricated with thicknesses of 36/100/41 nm and 62/132/60 nm, respectively. These two structures achieved high reflectivity of 90.4% in the visible light range and 88.9% in the infrared range, respectively.

Keywords ICPCVD, Amorphous silicon film, RF power, Refractive index, Bragg reflection

摘要 文章利用 ICPCVD 在 100℃ 及以下玻璃和蓝宝石片衬底上生长非晶硅薄膜,并通过调节 Ar 和 SiH₄ 气体流量比例、 射频功率及衬底温度等参数,实现低温下高质量非晶硅薄膜的生长。随后用拉曼光谱表征分析研究了衬底温度变化对非晶 硅薄膜沉积质量的影响,并计算出衬底温度为 100℃ 时,非晶硅薄膜的结晶分数和微晶尺寸分别为 64.4% 和 4.7 nm。此外还 研究了非晶硅薄膜折射率和透过率等光学特性,并计算出薄膜的光学带隙最低为 1.68。最后制备了两种 a-Si/SiO₂/a-Si 布拉 格反射结构,厚度分别为 36/100/41 nm 和 62/132/60 nm。两种结构在可见光和红外波段分别实现了 90.4% 和 88.9% 的最高反 射率。

关键词 ICPCVD 非晶硅薄膜 射频功率 折射率 布拉格反射 中图分类号: 0471.4 文献标识码: A doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202305010

非晶硅是近年来广受关注的半导体材料。非 晶硅材料带隙范围较宽,且变化可控,光吸收系数 高,能够实现从可见光到短波红外的高效光吸收^[1-2]。 另外其具有电阻温度系数高,可控掺杂工艺较易实 现,以及与半导体制造工艺相兼容等特点^[3]。因此, 它在太阳能电池、MEMS 器件、薄膜晶体管及偏振 光栅结构等研究领域都有着广泛的应用^[4-7]。非晶 硅薄膜的制备方法主要有化学气相沉积(CVD)、磁 控溅射(MS)以及电子束蒸发(EBE)等^[8-10]。在目前 已报道的沉积非晶硅薄膜的方法中,CVD 法具有极 大的多功能性,并可控制所得薄膜的沉积速率以及 光学和机械性能。CVD 生长非晶硅最常用的工艺 是等离子增强 CVD(PECVD)和电感耦合等离子 CVD(ICPCVD)^[11-12]。其中,PECVD 法制备的非晶

收稿日期:2023-05-11

基金项目:国家重点基础研发项目(2021YFC2203400)

^{*}联系人:E-mail: xmzhang2010@sinano.ac.cn

硅折射率高,热光性能好,工艺简单,便于集成。但 是由于其电容耦合射频结构特点,容易在生长过程 中因高能离子撞击而对生长薄膜造成损伤,并且 PECVD 生长非晶硅薄膜工艺较高的温度要求,一般 为250-350℃。ICPCVD在低温下生长非晶硅薄膜 方面具有较大优势,因为它具有~10¹² cm⁻³ 的高等离 子体密度和良好的均匀性,能够在工艺过程中实现 更低的功率和更低的温度下的等离子体离解。并 且与 PECVD 相比, 由于等离子体电势值较低, 对生 长表面的离子轰击较少,减轻了离子轰击对生长表 面的影响,从而确保了沉积的非晶硅薄膜中的低缺 陷密度^[13]。对于 ICPCVD 生长非晶硅工艺, 目前所 报道的文献中大多数温度都控制在 120℃ 以上, 很 少有研究者关注 120℃ 以下的生长工艺[14]。而有些 器件结构如柔性聚合物 MEMS 器件和光学薄膜则 有着更低温度生长非晶硅薄膜的需求。

布拉格反射结构(DBR)是实现光学 MEMS 可 调法布里-珀罗(FP)滤波器的重要组成部分。一个 简单的三层 DBR 一般由两个高折射率介电材料中 间夹一层低折射率介电层所组成。每一层材料都 是四分之一波长的光学厚度。非晶硅、氮化硅和氧 化硅是制作 DBR 结构的候选系列材料之一,其相 较于其他半导体材料体系的优点在于合成薄膜方 式的简易性及低成本。其中的非晶硅层需具备较 高的折射率和较低的消光系数^[15]。

本文利用 ICPCVD 在 100℃ 以下温度生长非 晶硅薄膜,并通过调节气体流量比例、射频功率及 反应温度等参数,实现低温下高质量非晶硅薄膜的 生长。还研究了非晶硅薄膜折射率、透过率等光学 特性,最后制备了两种布拉格反射结构,实现在可 见光和红外波段的分别为 90.4% 和 88.9% 的高反 射率。

1 实验

1.1 样品制备

制备非晶硅薄膜的衬底分别采用玻璃片(BF33) 和蓝宝石片。玻璃片厚度约 500 μm,主要用于非晶 硅薄膜生长后的应力测试、拉曼测试及光透过率测 试; 蓝宝石片厚度约为 500 μm,主要用于非晶硅薄 膜的椭偏仪测试。首先将衬底依次放入丙酮、无水 乙醇和去离子水中,分别超声波清洗 10 min,完成 有机清洗流程后迅速用高纯氮气枪吹干,将洁净的 衬底片放入 ICPCVD 设备中进行非晶硅薄膜的沉 积工艺。ICPCVD 设备采用牛津仪器的 OXFORD PLASMALAB 100, 它的电感耦合线圈是通过匹配 单元连接到 13.56 MHz、3.0 kW 的射频电源上。 ICP 线圈功率可以单独控制等离子体密度。下电极 是一个独立的 13.56 MHz、功率为 300 W 的射频源, 可以独立控制轰击衬底的能量。ICPCVD 是在电感 线圈上施加高频电流,线圈在射频电流驱动下,激 发变化的磁场,变化的磁场感生回旋电场。电子在 有旋电场的加速下作回旋运动,将反应源气体分子 碰撞并将其离解,产生了大量的活性等离子基团, 并在气流的作用下被输运到衬底表面并被吸附,然 后通过表面反应形成薄膜。ICP 中电子的回旋加速 增加了其与气体分子的碰撞几率,能够产生比传统 电容式放电更高的等离子体密度,使低温快速沉积 高质量的薄膜成为可能[16]。在工艺过程中,影响薄 膜性能的主要沉积参数包含工艺气体流量比、ICP 功率、RF 功率和温度等。进入工艺阶段,通过改变 Ar 和 SiH₄ 的气体流量比、ICP 功率、RF 功率和温 度等工艺参数,制备出不同条件下的非晶硅薄膜, 生长时间都为10min,压力都为10mTorr。实验中 典型参数如表1所示。

表1 非晶硅薄膜典型沉积参数

Tab. 1 Typical deposition parameters of amorphous silicon films

温度/℃	ICP 功率/W	RF 功率/W	SiH ₄ 流量/ (mL/min)	Ar 流量/ (mL/min)
75	2000	150	17	80
100	1000	150	40	80
75	1000	150	40	80
75	1000	100	40	80
75	1000	100	40	40
50	1000	150	40	80

1.2 样品表征

采用美国 FSM 公司的 FSM8800 分析非晶硅薄 膜的应力;采用德国布鲁克公司的 DektakXT 探针 式 台 阶 仪 测 试 样 品 的 生 长 厚 度;采 用 日本 HORRIBA-JY 公司的 LABRAM HR 激光共聚焦拉 曼光谱仪进行样品的拉曼表征;采用美国 Woollam J A 的椭偏仪验证薄膜厚度和折射率测试。采用美 国 PerkinElmer 公司的 LAMBDA 750 紫外/可见/红 外分光光度计分析薄膜的光透过率性能。

2 结果与讨论

2.1 工艺参数对薄膜沉积速率和应力的影响

ICP 功率通常会对非晶硅薄膜的成膜速度产生 影响。较高的 ICP 功率会导致更多的离子和电子 在反应室中产生,从而增加非晶硅薄膜的成膜速度。 如图 1(a)所示,当 ICP 功率从 500 W 逐步增加到



图1 非晶硅薄膜典型沉积参数对生长速率和薄膜应力的影响。(a) ICP 功率,(b) 下电极 RF 功率,(c) 气体比例

Fig. 1 Effects of typical deposition parameters on growth rate and film stress of amorphous silicon films. (a) ICP power, (b) bias RF power, and (c) gas ratio

2000 W 时,非晶硅薄膜的沉积速率从 3.6 nm/min 增加到 10.3 nm/min。但是,如果 ICP 功率过高,可能会引起过度的表面反应和结晶,从而导致非晶硅薄膜质量下降。因此,在 ICPCVD 生长非晶硅薄膜时,需要根据具体的实验条件选择适当的 ICP 功率,以获得较高的生长速率和优良的薄膜质量。而薄膜应力随着 ICP 功率的增加而增大,到 1500 W 时,应力增加至-1875 MPa。可以看出高 ICP 功率通常也会导致非晶硅薄膜的内部应力增大,这主要是因为高功率产生的离子轰击和沉积速率不均匀等因素。功率增加至 2000 W 时,应力反而有所下降,可能是由于反应离子过饱和导致薄膜致密性有所下降。

图 1(b)展示了下电极射频功率对沉积速率和 薄膜应力的影响。可以看出其他条件不变时,随着 RF 功率从 50 W 提升到 150 W, 沉积速率从 5.5 nm/min 提升至 9 nm/min; 应力也从-106 MPa 增加 至-1099 MPa。分析速率提高是由于下电极射频功 率的增加会增加等离子体的能量和密度, 促进非晶 硅前体气体的解离和反应。下电极射频也会增强 对衬底表面新沉积薄膜的物理轰击, 使薄膜更加致 密, 因此薄膜应力也随之增加。

气体比例对沉积速率和应力有显著的影响,因 为不同气体在等离子体中的化学反应和物理过程 是不同的。通常,气体比例的改变会改变等离子体 的性质和反应过程,从而影响沉积速率和应力。如 图 1(c)所示,本实验采用反应气体 SiH₄和 Ar 的混 合气体。SiH₄为主反应气体,而加入 Ar 取代常用 的 H₂可以降低非晶硅薄膜的含 H 量,从而提升薄 膜的光学特性,还可以提高对衬底表面的物理轰击 作用,提高薄膜质量。从曲线可以看出最开始沉积 速率随着 SiH₄/Ar 比例的增加而增加,而应力则随 之减小。这是由于 SiH₄ 主反应气体的增加导致反 应等离子密度提高增强了化学反应。而当气体比 例增加到一定程度时,等离子密度过饱和,沉积速 率有所降低,而应力有所增加。

根据上述参数分析,当衬底温度为温度 75℃时,ICP 功率 1000 W, RF 功率 150 W,压力 10 mTorr 及 SiH₄: Ar=40:80 mL/min 的工艺参数具有较高的沉积速率和合适的薄膜应力,可作为最优参考条件。

2.2 衬底温度对薄膜质量的影响

拉曼光谱是表征微晶硅结构的一种重要手段。

以最优参考条件为基础,在不同衬底温度下沉积的 样品的拉曼光谱如图 2(a)所示。在 25℃和 50℃ 下沉积的薄膜显示出已 481 cm⁻¹ 为中心的宽带,这 表示薄膜结构是非晶态的。当衬底温度升高到 75℃ 时,出现了约 506 cm⁻¹ 的主峰,这说明出现了小微晶 结构。当衬底温度增加至 100℃时,主峰位置移动 至 516 cm⁻¹ 附近,说明薄膜逐渐向微晶硅转变。



图2 不同温度条件下非晶硅薄膜的 Raman 表征。(a) 不同 温度拉曼光谱, (b) 100℃ 拉曼光谱拟合

Fig. 2 Raman characterization of amorphous silicon films at different temperature conditions. (a) Raman spectra at different temperatures, (b) Raman spectra fitting at 100 ℃

拉曼光谱中的谱带可以解耦为三个独立的高 斯峰:以约 480 cm⁻¹ 为中心的宽峰、在 520 cm⁻¹ 处 的主峰和在 510 cm⁻¹ 附近的中间峰。结晶分数 F_c 可以通过如下公式表示:

$$F_{\rm C} = \frac{I_{510} + I_{520}}{I_{480} + I_{510} + I_{520}} \tag{1}$$

式中 I_{480} 、 I_{510} 和 I_{520} 分别代表 480、510 和 520 cm⁻¹ 附近的高斯峰的积分强度^[17]。对衬底温度为 100℃ 时沉积的非晶硅薄膜的拉曼光谱进行高斯拟合,未 发现中间峰。两个峰位实际得到的结晶分数 $F_{\rm c}$ 约 为 64.4%。主峰的实际峰位约在 516cm⁻¹ 附近,可以 根据式 2 进一步计算出薄膜样品的晶粒尺寸:

$$d = 2\pi (B/\Delta\omega)^{\frac{1}{2}} \tag{2}$$

式中 *B* 为常数, 一般取值为 2.24 nm²/cm, $\Delta \omega$ 表示拉 曼散射频移, 即为晶态峰位与硅单晶峰位之差。通 过计算可以得到 100℃ 时, 薄膜的最大晶粒尺寸可 以达到约 4.7 nm。

2.3 非晶硅薄膜的光学特性

本实验采用蓝宝石衬底上生长的非晶硅薄膜 进行椭偏仪测试,得到了较优的软件拟合曲线。使 用柯西色散方程,从测得的光学数据中提取了非晶 硅薄膜的折射率 *n* 和消光系数 *k*。如图 3(a)和(b) 所示。



图3 不同温度条件下非晶硅薄膜折射率和消光系数。(a) 折 射率,(b) 消光系数

Fig. 3 Refractive index and extinction coefficient of amorphous silicon films at different temperatures. (a) Refractive index, (b) extinction coefficient

柯西色散方程可表示为:

$$n(\lambda) = n_0 + \frac{n_1}{\lambda^2} + \frac{n_2}{\lambda^4}$$
 (3)

$$k = k_0 \exp\left(\frac{k_1}{\lambda}\right) \tag{4}$$

式中, $n(\lambda)$ 是薄膜的折射率, k是薄膜的消光系数, n_0 、 n_1 、 n_2 、 k_0 和 k_1 是拟合系数。计算中包括了蓝宝石 衬底的背面反射^[15]。

从图 3(a)可以看出随着温度的升高,非晶硅薄膜的折射率也相应提高,在 100℃时已波长 1000 nm 为标准,折射率约为 3.29。这是由于在较高衬底 温度下沉积的薄膜结构孔隙较少,并且提升了薄膜 的致密性。如图 3(b)所示,消光系数也和温度的变 化存在一定的联系。可以看出随着衬底温度的升高,消光系数随之降低。非晶硅薄膜的消光系数与 密度和折射率有关,而这两个参数都受到沉积温度 的影响。当沉积温度升高时,非晶硅薄膜中的硅键 密度增加,从而使薄膜密度增加,折射率也随之变 化,从而使消光系数降低。从而也验证了温度升高 可以提高薄膜的结晶质量,与拉曼的测试结构 相符。

图 4 为不同温度条件下沉积的非晶硅薄膜的 光透过率曲线,显示了波长从 500-1100 nm 测量的 光透射率和衬底温度的函数关系。本实验的光透 过率曲线未出现干涉条纹振荡,这可能是由于所有 实验条件生长的非晶硅薄膜较薄。可以看出在可 见光波段(500-600 nm),曲线幅度都是急剧衰减, 这表明该区域比红外波段(700-1100 nm)具有更高 的吸收。在红外波段,随着温度的提高而吸收减少, 光透过率提高,这同样源于薄膜晶体质量的提高。







此外,非晶硅薄膜的光学带隙可以用 Tauc 公 式来计算:

 $(\alpha h\nu)^{1/2} = B(h\nu - E_{\rm g})$ (5)

式中, α 是吸收系数, hv 为光子能量, E_g 为光学带隙的能量, B 是被称为边缘宽度参数的常数^[18]。从光透射率图转换的 Tauc 图中线性状态部分延伸与横轴的交点即为样品的光学带隙宽度 E_g 。如图 5 所示, 在衬底温度为 25 °C 时, 所计算的薄膜光学带隙约为 1.83 eV, 而当温度上升到 100 °C 时, 光学带隙降低至 1.68 eV。一般认为非晶硅材料的光学带隙在 1.12 eV-2.4 eV, 而质量较好的非晶硅带隙宽度要小于 1.7 eV。这说明随着衬底温度的提高, 非晶硅薄膜逐渐从非晶态向微晶态转变。这同样与拉曼光谱的分析结果相一致。原因可能为衬底温度升高导致等离子体中 SiH₃ 基团迁移速率加快。薄膜表面吸附的 H 原子大量放出, 加强了硅悬挂键的钝化效果, 使薄膜定域态密度下降, 从而导致薄膜光学带隙宽度下降。





Fig. 5 Optical band gap calculation of amorphous silicon films at different temperatures

2.4 利用非晶硅薄膜制备布拉格反射结构

为了验证 ICPCVD 非晶硅薄膜的光学性能,作 者在玻璃片衬底上采用本实验 ICPCVD 的最优沉 积条件(温度 100℃, ICP 功率 1000 W, RF 功率 150 W, 压力 10 mTorr, SiH₄:Ar=40:80 mL/min)生长的 非晶硅薄膜作为上下两层高折射率层,中间由一层 同设备生长的 SiO₂ 低折射率层隔开, SiO₂ 的生长条 件为:衬底温度 75℃, ICP 功率 2000 W, RF 功率 150 W, SiH₄:N₂O=17:80 mL/min, 压力 5 mTorr。从 而形成 Si-SiO₂-Si 结构。ICPCVD 沉积的 SiO₂ 层在 可见光到近红外波长范围内可忽略消光系数。每 一层在适当波段的中心波长处的厚度为四分之一 波长。根据可见光和近红外两种不同波段,制备了 两种薄膜厚度的 DBR,如图 6(a)所示,在可见光波 段,顶层非晶硅、中间层 SiO₂和底层非晶硅的厚度 分别为 36 nm、100 nm 和 41 nm。在 500-700 nm 波 段所测得的峰值反射率约为 90.4%。如图 6(b)所示, 在近红外波段,顶层非晶硅、中间层 SiO₂和底层非 晶硅的厚度分别为 62 nm、132 nm 和 60 nm。在 700-1000 nm 波段所测得的峰值反射率约为 88.9%。 接近于理论计算值 93% 和 92%^[15]。这说明尽管所 制备非晶硅薄膜在可见光和近红外波段处有明显 的吸收,但薄四分之一波长硅层会产生高反射率 DBR,并且适用于 FP 滤波器制造。这 DBR 结构具 有较大的光学带宽,也适用于光谱学等相对较宽光 谱范围内的应用。



图6 可见光和近红外的 DBR 结构反射率测试。(a) 可见光, (b) 近红外

Fig. 6 Reflectance tests of DBR structures in visible and near infrared. (a) Visible light, (b) near infrared

3 结论

在本项工作中,利用 ICPCVD 在 100℃ 及以下

生长非晶硅薄膜,并通过调节气体流量比例、射频 功率及衬底温度等参数,得到较优的沉积条件,实 现低温下高质量非晶硅薄膜的生长。随后用拉曼 光谱表征分析研究了衬底温度变化对非晶硅薄膜 沉积质量的影响。研究发现随着温度的提升,薄膜 非晶硅 516 cm⁻¹ 附近的主峰逐渐形成,表面薄膜质 量的逐步提高。通过公式计算出衬底温度为 100℃ 时,非晶硅薄膜的结晶分数和微晶尺寸分别为 64.4%和4.7 nm。此外还研究了非晶硅薄膜折射率、 透过率等光学特性,并计算出薄膜的光学带隙最低 为 1.68。最后制备了两种布拉格反射结构,实现在 可见光和红外波段的分别为 90.4%和 88.9%的峰 值高反射率,与理论计算值相接近,适用于 FP 滤波 器制造及光谱学等相对较宽光谱范围内的应用。

参考文献

- Wagner S. Amorphous silicon: Vehicle and test bed for large - area electronics[J]. Physica Status Solidi, 2010, 207(3): 501-509
- [2] Li Z, Zhang X, Han G. Electrical and optical properties of boron - doped nanocrystalline silicon films deposited by PECVD[J]. physica status solidi (a), 2010, 207: 144–148
- [3] Strum A, Fenigstein A. Complementary metal-oxidesemiconductor (CMOS) X-ray sensors[J]. High Perform. Silicon Imaging, 2020: 413-436
- [4] Ramanujam J, Bishop D M, Todorov T K, et al. Flexible CIGS, CdTe and a-Si: H based thin film solar cells: A review[J]. Prog Mater Sci, 2019, 110: 100619
- [5] Cianci E, Coppa A, Foglietti V, et al. Fabrication of RF-MEMS switches on LTCC substrates using PECVD a-Si as sacrificial layer[J]. Microelectron Eng, 2007, 84(5-8): 1401–1404
- [6] Chen C W, Chang T C, Liu P T, et al. High-performance hydrogenated amorphous-Si TFT for AMLCD and AMOLED applications[J]. IEEE Electron Device Lett, 2005, 26(10): 731–733
- [7] Lee S, Kim S. Optical absorption characteristic in thin a-Si film embedded between an ultrathin metal grating and a metal reflector[J]. IEEE Photonics J, 2013, 5(5): 4800610
- [8] Takagi T, Takechi K, Nakagawa Y, et al. High rate deposition of a-Si: H and a-SiNx: H by VHF PECVD[J]. Vacuum, 1998, 51(4): 751–755
- [9] Triendl F, Pfusterschmied G, Fleckl G, et al. On the crystallization behavior of sputter-deposited a-Si films on 4H-

SiC[J]. Thin Solid Films, 2020, 697: 137837

- [10] Sontheimer T, Becker C, Ruske F, et al. Challenges and opportunities of electron beam evaporation in the preparation of poly-Si thin film solar cells[C]. 2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2010: 000614– 000619
- [11] Chen K C, Ming Q T, Po H T, et al. Fabrication and characterization of amorphous Si films by PECVD for MEMS[J]. J Micromech Microeng, 2004, 15(1): 136
- [12] Castro F G, Sagazan O D, Coulon N, et al. ICP-CVD μ-Si layers optimization for strain gauges on flexible substrates[J]. Sens and Actuators A, 2020, 315: 112261
- Brookshire K L, Martyniuk M, Silva K, et al. Long-term stability of ICPCVD a-Si under prolonged heat treatment
 [C]. 2014 Conference on Optoelectronic and Microelectronic Materials & Devices. IEEE, 2014: 160-163
- [14] Han S M, Lee M C, Shin M Y, et al. Poly-Si TFT fabricated at 150 deg C using ICP-CVD and excimer laser an-

nealing[J]. Proc IEEE, 2005, 93(7): 1297-1305

- [15] Tripathi D K, Jiang F, Martyniuk M, et al. Optimization of ICPCVD amorphous silicon for optical MEMS applications[J]. J Microelectromech Syst, 2015, 24(6): 1998– 2007
- [16] Doris K T N, Wang Q, Wang T, et al. Exploring high refractive index silicon-rich nitride films by low-temperature inductively coupled plasma chemical vapor deposition and applications for integrated waveguides[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2015, 7(39): 21884–21889
- [17] Dalal V, Graves J, Leib J. Influence of pressure and ion bombardment on the growth and properties of nanocrystalline silicon materials[J]. Appl Phys Lett, 2004, 85(8): 1413–1414
- [18] Qin Y, Yan H, Li F, et al. The optoelectronic properties of silicon films deposited by inductively coupled plasma CVD[J]. Appl Surf Sci, 2010, 257(3): 817–822