

硅薄膜沉积中等离子体辉光功率 和阻抗的测试分析*

张晓丹^{1)†} 张发荣^{1)‡} Amanatides Elefterious³⁾ Mataras Dimitris³⁾ 赵颖^{1)‡}

1) 南开大学光电子薄膜器件与技术研究所, 天津 300071)

2) 南开大学光电子薄膜器件与技术天津市重点实验室, 天津 300071)

3) (Plasma Technology Laboratory Department, Chem. Engineering, Patras University, Patra, 26500, Greece)

(2006 年 9 月 14 日收到, 2006 年 10 月 13 日收到修改稿)

采用改进的电压和电流测试方法对衬底电极外加不同电压 V_s 的射频等离子体中的阻抗和功率消耗进行了测试分析. 结果表明, 在射频电极施加恒定的电压 V_a 时, 随衬底电极外加电压 V_s 的增加, 辉光的电流在增加, 结果导致阻抗在减小; 另外, 通过计算分析发现, 仅有一小部分功率用于辉光, 大部分功率消耗在匹配器和电缆上. 通过对等离子体电学特性的综合测试分析也说明, 在保证有足够多的硅烷时, 衬底电极外加电压 V_s 增加时将会提高薄膜的沉积速率.

关键词: 等离子体, 辉光功率, 阻抗, 诊断

PACC: 5225, 5270

1. 引 言

电容耦合的等离子体增强化学气相沉积技术被广泛地用于硅薄膜和器件的沉积^[1,2]. 薄膜的沉积速率及其特性和宏观的沉积参数是密切相关的, 比如沉积气压、衬底温度、功率和硅烷浓度等^[3-5]. 但是由于不同条件下传输阻抗的变化也使得等离子体中实际消耗的功率有很大的变化, 结果影响制备薄膜的电学特性和结构特性. 因此, 通过对等离子体电学特性的了解, 可以对具体的耦合情况有更深入的了解, 同时也可对相应的沉积过程有更深入的了解, 进而达到对沉积过程的控制. 另外, 通过对等离子体电学特性的测试分析, 可以对宏观的沉积参数和等离子体的微观现象之间的关系有更深入的了解, 比如不同沉积条件如何影响气体的离化、分解碰撞和电子加热机理等^[6,7]. 国内目前在这一领域的研究还很少^[8,9].

目前已经有多种方法用于对气体辉光放电中阻抗和功率消耗的测试分析研究. 具体主要有以下几

种方法: 1) 输出阻抗的测量^[10]: 这种方法主要是通过阻抗桥法或者辉光熄灭后由具体的网络来计算. 这种方法要求在匹配网络上的损失尽可能小, 实际上很难获得结果. 2) 在线功率计测量^[11]: 这种方法是通过使用相同电压, 起辉和断辉前后功率计的差值来确定辉光实际消耗的功率, 如果知道匹配网络的设置也可以确定辉光阻抗. 3) 电压和电流的测试方法^[12]: 这种方法存在的问题是电压和电流的测量是在反应室的外面, 由于杂散阻抗的存在, 测试点所在的电压和电流, 电极表面的电压和电流有一定差别. 4) 量热法^[13]: 这种技术是通过量热技术确定在匹配的网络和电缆上消耗的功率, 然后用总功率减去此功率来获得实际辉光消耗的功率, 但这种技术不能获得辉光阻抗.

本文主要在第 3) 种方法的基础上, 引入了一个等效电路用于计算杂散阻抗, 通过测量腔室外面的电压和电流, 由等效电路来确定实际在电极表面上的电压和电流波形. 关于此等效电路的具体结构见文献 [14].

对于标准的电容耦合等离子体, 改变放电功率

* 国家重点基础研究发展规划(批准号: 2006CB202602, 2006CB202603)/国家自然科学基金(批准号: 60506003), 天津市自然科学基金(批准号: 05YFJMJC01600), 南开大学博士启动基金(批准号: J02031), 教育部新世纪人才计划(NCET)和科技部国际合作重点项目(批准号: 2006DFA62390)资助的课题.

† E-mail: xdzhang@nankai.edu.cn

后不仅离子的轰击能量会发生变化,而且通量也会发生变化.离子能量如果过高则将会对沉积薄膜的表面造成轰击,影响沉积薄膜的特性.相反离子通量的增加则有可能提高薄膜的沉积速率.因此,为了独立的控制离子的能量和通量可以采用双电源的方法^[15].本文则主要通过固定加在射频电极上电压的峰值,而改变加在衬底上的电源电压峰值,来研究等离子体电学特性的变化,以便对等离子体的电学特性有深入的了解,同时对提高薄膜的沉积速率提供依据.

2. 实 验

实验中所有测试分析都是在射频等离子体增强化学气相沉积系统中进行的.关于腔室的具体结构可见文献^[16].电极板是圆形,电极间距固定为 15 mm.射频电极的功率源频率为 13.56 MHz,固定应用电压的峰值为 320 V.而外加在衬底电极上功率源频率为 20 kHz,其电压峰值的变化为 0—800 V.实验中硅烷流量为 4sccm,氢气的流量为 396sccm,衬底温度为 250℃,气压为 2.5 Torr (1 Torr = 133.322Pa).电压探针(Hameg model HZ 53, 衰减比 100:1)和电流探针(FCC model F-35-1)跟匹配器后的功率探头相接.电压和电流信号通过 Lecroy model 9400 数字示波器测试,然后传输给计算机进行傅里叶变换分析,具体的电学参数测试原理见文献^[14].

3. 结果与讨论

图 1 给出了衬底电极外加不同交流电压峰值时,等离子体中电压和电流相差的变化规律.从图中看出,电压和电流相差的绝对值在降低,这意味着等离子体的辉光结构发生了变化.具体来看辉光电流和阻抗的变化(图 2),从图 2 中可以看出辉光电流在逐渐增加.我们知道,辉光电流和电子的密度以及迁移率是密切相关的,也就是说,辉光电流的增加意味着电子的密度和迁移率的乘积是增大的.另外,等离子体阻抗(图 2)的计算结果表明:其大小随电压的增加而降低.我们知道等离子体的阻抗和应用的电压成正比,而与电子的密度成反比.因此,由上面的结果可以知道,在射频电极所加电压恒定的情况下,随衬底电极外加交流电源电压的增加,对应电子的密度增加.电子密度的提高意味着损失的带电粒

子减少(实际上直流自偏压(图 3)的变化规律已经证明了此结果),这样改变了辉光的结构.电子密度的提高有可能导致硅烷和氢气的离化增强.通过对沉积速率(图 4)的研究显示:在硅烷浓度比较低的情况下,电子密度的提高主要用于对氢气的离解,在这种情况下硅烷已经耗尽,对沉积速率的影响弱化.因此,当外加电源的电压增加时,会提高等离子体密度.如果保证有足够多的硅烷则薄膜的沉积速率将会提高.

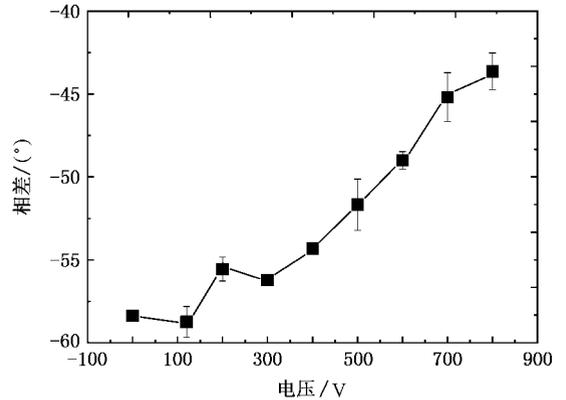


图 1 衬底电极外加不同电压辉光阻抗相差的变化

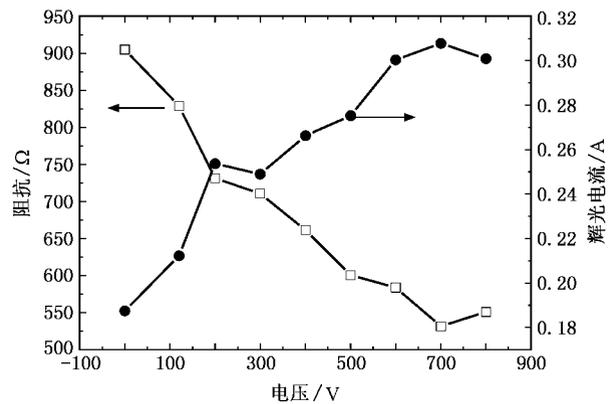


图 2 衬底电极外加不同电压辉光阻抗和电流的变化

图 2 的结果显示:随衬底电极外加交流电压峰值的增加,对应等离子体的阻抗在降低.在电源频率为 13.56 MHz 的情况下,辉光阻抗可以用下述公式来表示:

$$Z = \frac{V_{el}}{I_{el}} e^{j\varphi_{el}} = R + jX, \quad (1)$$

φ_{el} 是电压和电流之间的相差, R 为辉光阻抗的实部,即辉光电抗, X 为辉光阻抗的虚部,即辉光容抗. R 和 X 通过下述表达式来确定:

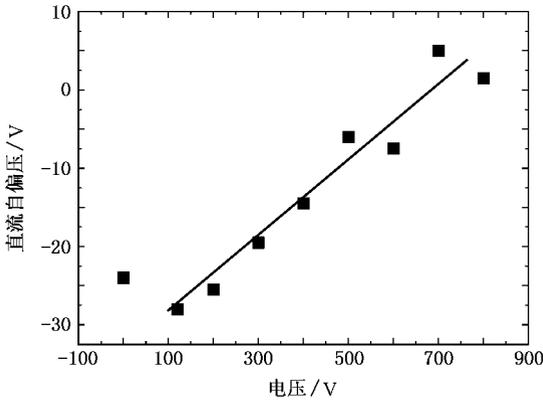


图3 衬底电极外加不同电压时直流自偏压的变化

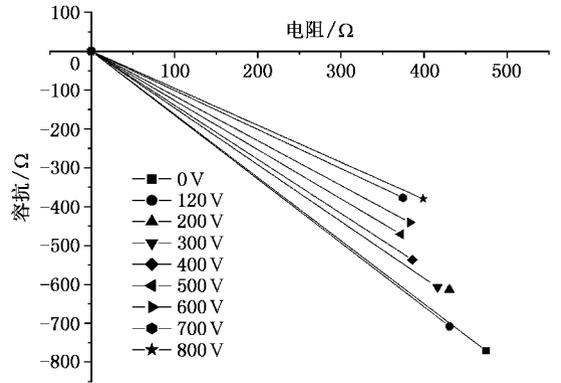


图6 衬底电极外加不同电压时阻抗分析

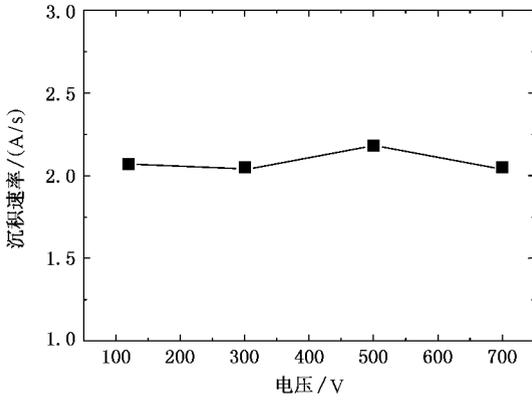


图4 衬底电极外加不同电压时制备薄膜的沉积速率

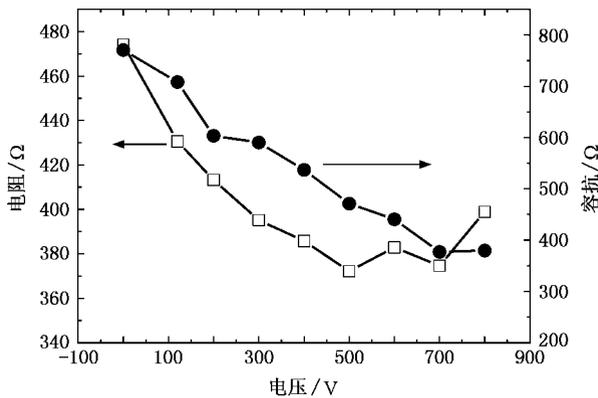


图5 衬底电极外加不同电压时阻抗的实部和虚部

$$R = Z \cos \varphi_{el} = \frac{V_{el}}{I_{el}} \cos \varphi_{el} \quad (2)$$

$$X = Z \sin \varphi_{el} = \frac{V_{el}}{I_{el}} \sin \varphi_{el} \quad (3)$$

通过(2)和(3)式计算电抗和容抗的结果如图5所示.从图5中可看出,随衬底电极外加电压峰值的增

加,对应辉光电抗和容抗都在减小.我们可以采用一个简单的电学模型来对辉光进行解释.即可把辉光看作是容抗和鞘层相联系,而电抗则说明在等离子体和鞘层中的功率损耗.其中功率消耗主要是由于鞘层中的电场对电子的加速.容抗的逐渐减小则是由于鞘层电容在增加,即辉光的几何结构发生了变化,对应鞘层厚度变小导致的结果.

为了对电抗和容抗有更深入地了解,进行了等离子体结构的深入分析.图6的结果表明,随衬底电极外加交流电压峰值的增加,辉光结构变得更加电阻化.

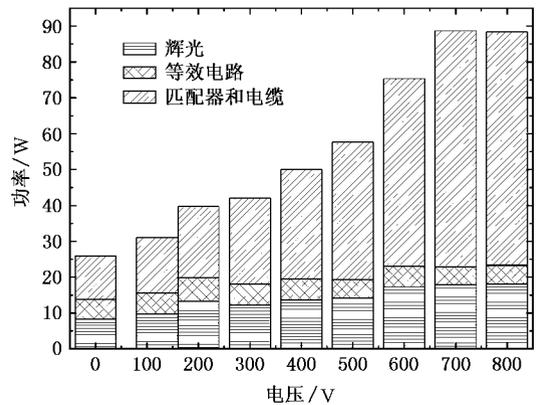


图7 衬底电极外加不同电压条件下辉光、等效电路和匹配网络上消耗的功率

实际消耗的辉光功率和电源提供的功率有很大的不同,不同沉积条件功率耦合的结果也不一样.实验中,主要是固定高频电源的应用电压,为了保持这一应用电压一定,当衬底电极外加电源电压增加时,功率计的输入功率也在增加.为了对功率的消耗有更深入的了解,进行了相关的分析计算.主要包括:实际辉光(discharge)的功率消耗、匹配器和电缆上

(matching network and cables)的功率消耗以及等效电路上(shunt and cell)的功率消耗.实际辉光消耗的功率通过测试分析即可以获得,而等效电路上消耗的功率则可以通过等效电阻和应用的电压来确定.关于匹配器和电缆上消耗的功率则由总功率减去前面两者而得到.具体的计算结果如图7.从图中可以看出,在此实验中,当射频电极所加电压恒定时,随衬底电极外加偏压的增加,等效电路上消耗的功率几乎是不变的,但匹配器和电缆上消耗的功率,以及辉光中消耗的功率都在逐渐增加.而且图中很清楚的显示出输入功率的大部分消耗在匹配器和电缆上.因此,从能量的有效利用上来看,应用于衬底电极的电压越大,损失的能量越多.

4. 结 论

在射频电极应用电压确定的情况下,随衬底电

极外加电压的增加,等离子体中的辉光电流增加,而阻抗则降低.同时阻抗的进一步分析结果显示:对应的辉光越加电阻化.另外,等离子体的电学测试结果也表明,随衬底电极外加电压的增加,等离子体的密度增加,如果有足够的硅烷则薄膜的沉积速率将会提高.通过对功率消耗的具体测试分析可看出,衬底电极外加电压越大,为维持射频电极中恒定的应用电压,则需要将输入功率增加,而增加功率中只有一小部分用于辉光,大部分损失在匹配网络和电缆上.因此为获得薄膜沉积速率的提高,要选择合适的条件.

感谢中国-希腊政府间合作项目对本文的支持.

-
- [1] Shah A , Meier J , Vallat-Sauvain E , Wyrsh N , Kroll U , Droz C , Graf U 2003 *Solar Energy Materials & Solar Cells* **78** 469
- [2] Hapke P , Finger F 1998 *J. Non-Cryst. Solids* **227-230** 861
- [3] Kroll U , Meier J , Torres P , Pohl J , Shah A 1998 *J. Non-Cryst. Solids* **227-230** 68
- [4] Kondo M , Fukawa M , Guo L H , Matsuda A 2000 *J. Non-Cryst. Solids* . **266-269** 84
- [5] Ray S , Das C , Mukhopadhyay S , Saha S C 2002 *Solar Energy Materials & Solar Cells* **74** 393
- [6] van Roosmalen A J , van Voorst Vader P J Q 1990 *J. Appl. Phys.* **68** 1497
- [7] Pointu A M 1986 *J. Appl. Phys.* **60** 4113
- [8] Zhu Z S , Lin K X , Lin X Y , Qiu G M , Yu Y P , Luo Y L 2006 *Chin. Phys.* **15** 969
- [9] Hao Z Q , Yu J , Zhang J , Yuan X H , Zheng Z Y , Yang H , Wang Z H , Ling W J , Wei Z Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1290(in Chinese) [郝作强、俞进、张杰、远晓辉、郑志远、杨辉、王兆华、令维军、魏志义 2005 物理学报 **54** 1290]
- [10] van Roosmalen A J 1983 *Appl. Phys. Lett.* **42** 416
- [11] Godyak V A , Piejak R B 1990 *J. Vac. Sci. Technol. A* **8** 3833
- [12] Bletzinger P , Flemming M J 1987 *J. Appl. Phys.* **62** 4688
- [13] Beneking C 1990 *J. Appl. Phys.* **68** 4461
- [14] Spiliopoulos N , Mataras D , Rapakoulias D E 1996 *J. Vac. Sci. Technol. A* **14** 2757
- [15] Kongjing X L 2002 *Plasma Electron Engineering* (Science Press) 109(in Chinese) [宫井秀郎 2002 等离子体电子工程学(科学出版社) 第 109 页]
- [16] Mataras D , Cavadias S , Rapakoulias D 1993 *J. Vac. Sci. Technol. A* **11** 66

Plasma power and impedance measurement in silicon thin film deposition *

Zhang Xiao-Dan^{1,2)†} Zhang Fa-Rong^{1,2)} Amanatides Elefterious³⁾ Mataras Dimitris³⁾ Zhao Ying^{1,2)}

1) *Institute of Photo-Electronics Thin Film Devices and Technique of Nankai University, Tianjin 300071, China*

2) *Key Laboratory of Photo-Electronics Thin Film Devices and Technique of Tianjin, Tianjin 300071, China*

3) *Plasma Technology Laboratory Department Chem. Engineering, Patras University, Patra, 26500, Greece*

(Received 14 September 2006 ; revised manuscript received 13 October 2006)

Abstract

Plasma impedance and power consumption were measured by modified voltage-current method at different applied voltages on the substrate electrode. The results indicated that discharge current increases with the increase of applied voltage on the substrate electrode when the applied voltage of RF electrode is fixed. As a result, plasma impedance decreases. In addition, only a small part of power was used by the plasma and a large part of power was consumed on the matching network and cables. Through the analysis of plasma electrical properties, it was found that the deposition rate of thin films will be increased with the increase of applied voltage on the substrate electrode so long as there is enough silane.

Keywords : plasma, discharge power, impedance, diagnostic

PACC : 5225, 5270

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2006CB202602 and 2006CB202603), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60506003), the Natural Science Foundation of Tianjin (No. 05YFJMJC01600), the Strat Project for Doctor of Nankai University (Grant No. J02031), the Program for New Century Excellent Talents in University (NCET) and the International Cooperation Key Project of Ministry of Science and Technology (Grant No 2006DFA62390)

† E-mail : xdzhang@nankai.edu.cn