

# 介质阻挡放电中放电丝结构相变过程研究<sup>\*</sup>

董丽芳<sup>†</sup> 杨玉杰 范伟丽 岳 晗 王 帅 肖 红

(河北大学物理科学与技术学院, 保定 071002)

(2009 年 5 月 8 日收到; 2009 年 5 月 20 日收到修改稿)

在氩气和空气混合气体介质阻挡放电中, 研究了放电丝结构随外加电压及气体压强的变化, 并从二维体系相变的角度进行了分析. 随着电压的增加, 放电丝结构的演变过程为: 稀疏的随机放电丝—稠密的随机放电丝—六边形结构—超六边形结构—混沌态, 此过程相应于二维体系的气相—液相—简单晶体—超点阵晶体—液相的相变过程. 实验还研究了相变过程中超六边形形成中晶格常数及相邻格点间距离的变化、超六边形结构中大点的形成过程以及超六边形结构的 Penta-Hepta 缺陷.

**关键词:** 介质阻挡放电, 放电丝结构, 相变, 超点阵

**PACC:** 5280, 0565, 0570F

## 1. 引 言

介质阻挡放电(DBD), 又称无声放电, 是一种典型的非平衡态交流气体放电, 它通常是由两个平行电极组成, 其中至少在一个电极表面覆盖上电介质<sup>[1-4]</sup>. 在这种放电中, 气压  $p$  与两介质板间的气体间隙的宽度  $d$  的乘积  $pd$  的变化范围可以从几 Torr·cm 到几百 Torr·cm ( $1 \text{ Torr} = 1.33322 \times 10^2 \text{ Pa}$ ). 依据  $pd$  值的大小, 放电呈现弥散模式和丝状模式<sup>[5-9]</sup>. 对于低  $pd$  值, 放电为弥散模式. 而对于高  $pd$  值, 放电为丝状模式, 即在气体发生击穿后, 气隙中会形成许多微放电通道(也称放电丝). 放电丝是发光的, 从电极的端面观察, 放电丝表现为一个亮点. 通常情况下, 这些放电丝在空间上是游移不定的. 但在适当的条件下, 放电丝通过相互作用可形成稳定的规则结构, 在端面观察则为二维规则点阵结构<sup>[10-14]</sup>.

在高  $pd$  值的丝状放电中, 每一个放电丝就是一个强烈的流光通道, 从壁电荷的角度来说相当于一个准粒子. 当外加电压达到击穿阈值时, 气体分子发生电离产生正负带电粒子. 在外加场的作用下,

这些带电粒子分别向两极运动, 并沉积在介质表面, 形成壁电荷. 测量表明, 正电荷与负电荷在阴极和阳极上所占区域的大小与放电丝亮点的大小成正比<sup>[15]</sup>. 因此, 放电丝在电极端面所表现出的亮点实际代表了壁电荷, 进而放电丝亮点在一定程度上可被看作准粒子. 放电丝在放电气隙间的游移和分布表现为准粒子在一个二维平面上的运动和分布<sup>[16]</sup>. 因此, 该体系相当于一个二维体系, 放电丝的不同结构可以看作是二维体系的气相、液相及固相, 不同的放电丝结构之间的演化可以看作是一个二维体系的相变过程. 据我们所知, 这样的二维实验体系并不多见, 仅存在液氦表面的电子气、尘埃等离子体及最近发现的石墨烯材料等几个例证<sup>[17-19]</sup>. 因此, 通过介质阻挡放电系统对二维系统的相变、晶体形成等进行研究, 对二维体系物理的发展无疑具有重要意义.

本工作在氩气和空气的混合气体介质阻挡放电中, 研究了放电丝结构及其傅里叶频谱随外加电压及气体压强的变化, 并从二维体系相变的角度进行了分析. 实验还研究了相变过程中超六边形形成中相邻格点间距离的变化、超点阵结构中大点的形成过程以及超六边形结构的 Penta-Hepta 缺陷.

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 10775037, 10975043), 河北省自然科学基金(批准号: A2008000564)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: Donglf@mail.hbu.edu.cn

## 2. 实验装置

实验装置如图 1 所示. 放电电极是由两个装满水的内径为 70 mm 的圆柱形容器组成, 与高压交流电源两极相连的金属环浸在水中. 容器的两端用厚度为 1.5 mm 的玻璃片封住, 作为电介质, 放电区域被封闭在方形边界内. 整个电极放入密闭的反应室中. 其两侧设有观察窗, 用数码相机 (Konica Minolta Dimage Z2) 从端面拍摄放电丝的空间分布及运动变化过程. 使用频率为 30—70 kHz 的正弦交流电源, 电压由高压探头 (Tektronix P6015A 1000X) 测得, 并用数字示波器 (Tektronix DPO4054, 500MHz) 记录、存储. 放电气体为空气和氩气的混合气体, 氩气含量约为 60%. 反应室气压控制在 380—684 Torr.

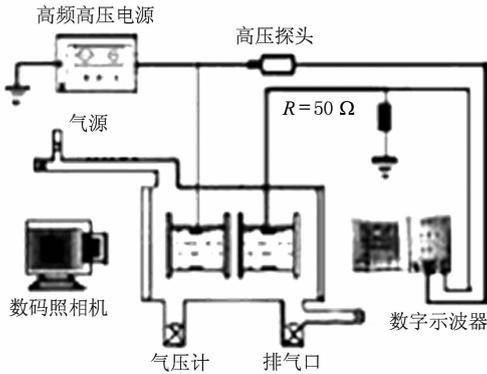


图 1 实验装置示意图

## 3. 实验结果与讨论

图 2 给出了随着电压的升高, 放电丝结构的变化及其相应的傅里叶频谱. 当驱动电压达到击穿阈值时, 放电区域出现少量的放电丝, 其傅里叶频谱中空间模式在各方向上均有分布且大小不一, 如图 2(a) 所示. 随着电压的升高, 放电丝增多, 逐渐布满整个放电区域, 其傅里叶频谱中空间模式集中在一个圆环上, 如图 2(b) 所示. 继续增加电压, 放电丝自组织形成六边形结构, 其空间模式进一步集中, 形成了夹角为  $60^\circ$  的  $k_1$  和  $k_2$  模. 另外, 由于放电区域内还存在另一种取向的六边形, 因而傅里叶频谱中还出现了与主模 ( $k_1$  和  $k_2$  等) 方向不同的  $k_3$  模, 如图 2(c) 所示. 稍微增加驱动电压, 一些新的放电丝在边界附近产生, 并以一定速度滑入放电区. 这些放电丝在滑入过程中, 会与原有的六边形结构上的

点形成旋转的放电丝对, 其旋转速度在每秒几十转左右. 当照片曝光时间较长时 (40 ms 以上), 这些放电丝对看起来就像个空心的圆环. 为了与原有的六边形结构上的小点相区别, 我们将这些放电丝对 (或空心的圆环) 称之为超六边形结构的大点. 这样, 边界附近就形成了一个大小点组成的超六边形区域, 但此时此区域中规则的超六边形晶胞较少, 同时存在一定的缺陷. 继续增加电压, 在放电区域内逐渐形成超六边形结构, 并与六边形结构共存. 此时的傅里叶频谱中, 不仅出现了与  $k$  模截然不同的模式  $q$ , 而且在原六边形空间模的内侧出现了另一个空间模式  $k'$ , 其方向与原六边形结构的模式相同, 幅值  $k'$  比原六边形结构的稍小, 如图 2(d) 所示. 在形成超六边形结构后, 如图 2(e), 原六边形结构的模式  $k$  消失, 仅留下  $k'$ , 此模式变化过程在后文将仔细研究. 再增加电压, 在放电区域内出现混沌态, 随着电压的增加, 混沌态区域逐渐衍生变大, 直至充满整个放电区域. 实验中混沌态的衍生把超六边形结构分成两部分, 这两部分超六边形结构的取向不同, 导致两组不同方向  $k'$  模和  $q$  模, 但随着电压的升高逐渐变为一组, 如图 2(f) 所示. 在超六边形结构消失形成混沌态的过程中,  $k'$  模和  $q$  模一直存在, 但是两种模的强度逐渐变弱, 最后出现两个半径为  $k'$  和  $q$  圆环, 如图 2(g), (h) 所示.

从相变的角分析, 从稀疏的随机放电丝—稠密的随机放电丝结构—六边形结构—超六边形结构—混合态的变化过程, 可以看作由气相—液相—简单结构晶体—超点阵结构晶体—液相的相变过程. 这是因为稀疏的随机放电丝中的粒子 (放电丝) 的空间分布及频谱分布都是随机的, 就像气体分子在空间内无规则分布一样, 所以此时的放电丝结构为气相; 稠密的随机放电丝有了一定的距离分布, 空间模式在一个圆上, 但没有规则的结构, 此时的放电丝结构为液相; 六边形结构可以看作简单结构的固体晶体 (固相), 因为它具有一个简单结构的规则分布, 就像一种简单结构的固体晶体; 超六边形结构, 由于其为两套结构复合而成的规则结构, 可以把它看作一种超点阵结构的固体晶体; 混沌态, 与稠密的随机放电丝相似, 它也没有规则的空间结构, 但有一定的频谱分布, 也可看作液相. 因此, 上述放电丝结构的演化实则为二维体系的相变过程.

实验测量了放电丝结构随外加电压以及气体

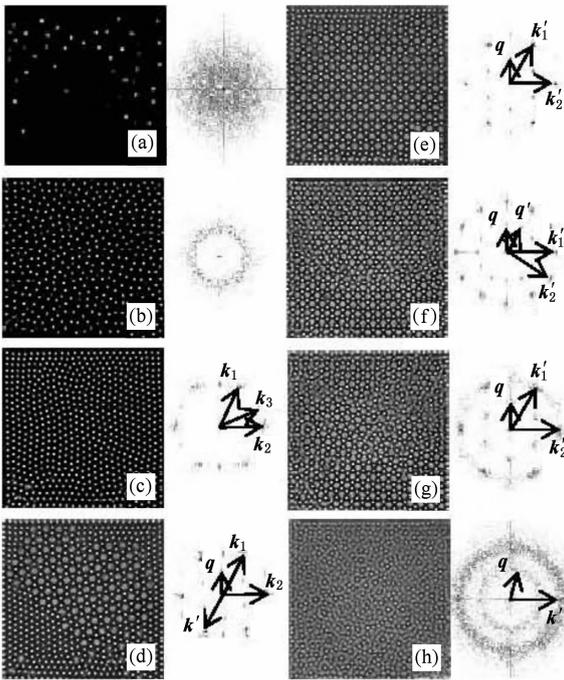


图2 放电丝结构及其傅里叶频谱随外加电压的变化 (a) 稀疏的随机分布的放电丝,  $U=3.46$  kV; (b) 稠密的随机分布的放电丝,  $U=4.12$  kV; (c) 六边形结构,  $U=4.68$  kV; (d) 六边形与超六边共存结构,  $U=5.28$  kV; (e) 超六边结构,  $U=5.48$  kV; (f) 超六边结构,  $U=5.72$  kV; (g) 超六边形结构与混沌态共存结构,  $U=5.88$  kV; (h) 混沌态,  $U=6.36$  kV. 其他实验条件: 电压频率  $f=55$  kHz, 放电区域面积为  $49\text{ mm} \times 49\text{ mm}$ , 照片曝光时间为  $40\text{ ms}$ , 气隙间距  $d=1.5\text{ mm}$ , 气压  $p=456\text{ Torr}$ , 氩气含量  $\chi=60\%$

丝结构的变化次序为: 稀疏的随机放电丝—稠密的随机放电丝—六边形结构—超六边形结构—混沌态, 它们分别对应于相图中五个区域, 相应于二维晶体的气相—液相—简单晶体—超点阵晶体—液相的相变过程. 从相图中还可以看出, 随着气压的逐渐变大, 各结构的形成电压逐渐增加.

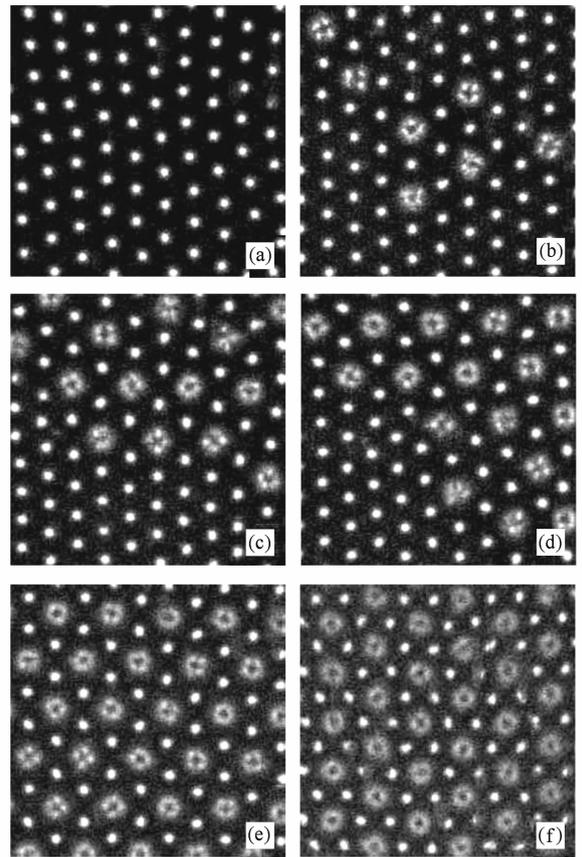


图4 六边形结构到超六边形结构的相变过程 (a) 六边形结构,  $U=4.68$  kV; (b) 六边形与超六边共存结构,  $U=4.84$  kV; (c) 六边形与超六边共存结构  $U=5.08$  kV; (d) 六边形与超六边共存结构,  $U=5.28$  kV; (e) 超六边结构,  $U=5.48$  kV; (f) 超六边结构,  $U=5.72$  kV. 每幅照片对应的放电区域大小均为  $16.5\text{ mm} \times 16.5\text{ mm}$

为了搞清从六边形结构到超六边形结构相变过程中空间模式大小变化的情况, 我们仔细观察了此相变过程中晶格常数以及相邻格点(放电丝)之间距离的变化, 如图4所示. 由图见, 六边形的晶格常数以及超六边的晶格常数均随电压增加而减小. 在超六边形结构形成过程中(电压为  $4.84\text{—}5.48\text{ kV}$  时), 其相邻格点之间的距离(两相邻小点之间或者大点中心到邻近小点的距离)大于原六边形结构的晶格常数, 此即在六边形和超六边形共存

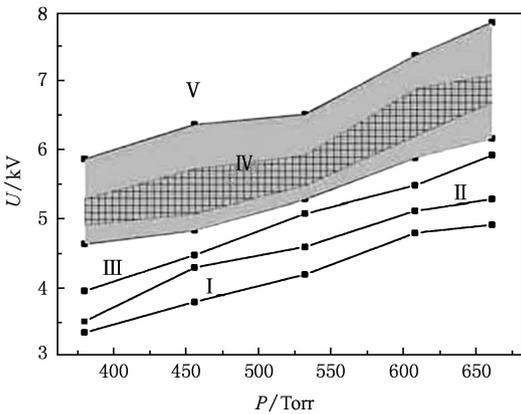


图3 放电丝结构随压强与电压变化的相图 (I 为稀疏的随机放电丝; II 为稠密的随机放电丝; III 为六边形结构; IV 为超六边形结构; V 为混沌态. 方格区域为完好的超六边形结构, 阴影区域为局部的超六边形结构)

压强变化的相图, 如图3所示. 随着电压升高, 放电

结构(图 2(d))的傅里叶频谱中在原六边形空间模式的内侧出现另一个六边形空间模式的原因. 超六边形结构中相邻格点之间的距离在超六边形结构充满放电区域(电压为 5.48 kV 时)前基本不变,但在超六边形结构充满放电区域后亦随电压增加而减小. 进一步,图 5 给出了此过程中晶格常数以及相邻格点间距离随电压变化的关系.

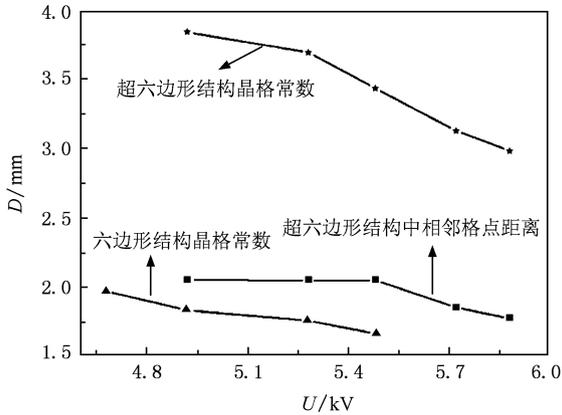


图 5 对应图 4 中各放电丝结构的晶格常数和相邻格点之间距离随电压的变化曲线(晶格常数和相邻格点之间距离  $D$  与其相应的空间模式  $k$  之间的关系为  $D = \frac{C}{k}$ ,  $C$  为常数)

实验还仔细研究了随着电压的增加,超六边形中旋转放电丝对(大点)的形成过程,如图 6 所示. 由图可以看出:在六边形结构的背景中,一小点先在边界处出现,然后逐渐向里滑动,当移动到与六边形结构中的一格点有合适距离时,两点形成放电丝粒子对,并且以每秒几十转的速度旋转起来,图 6 所示的大点是逆时针旋转的.

由放电丝粒子对的旋转特性,推测两放电丝之间应存在着引力. 根据介质阻挡放电的特性分析,该引力应与壁电荷有关. 在介质阻挡放电中,当外加电压达到击穿阈值时,气体分子发生电离产生正负带电粒子. 在外加电场的作用下,这些带电粒子分别向两极运动,并沉积在介质表面,形成壁电荷. 在外加电压的每半周期中,放电丝放电之前其位置处对应的壁电荷的极性与放电后的极性相反. 因而,两放电丝之间的相互作用是引力还是斥力,取决于两放电丝的放电与否. 以前的工作表明,超六边形中大点对应的两个放电丝不同时放电<sup>[20]</sup>. 因此,两放电丝均未放电或均放完电时,两放电丝的壁电荷极性相同,它们之间作用力为斥力;而当两放电丝中仅有一个放完电时,两放电丝的壁电荷极性不

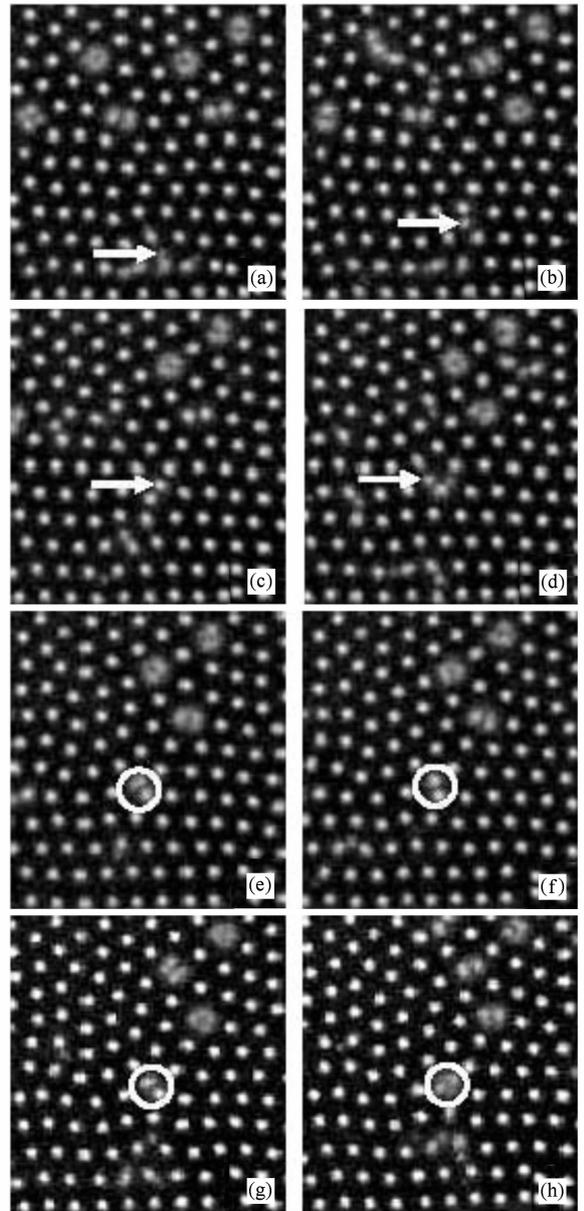


图 6 超六边形结构大点的形成过程(图片为录像截图,相邻两幅时间间隔为 1/30 s.  $\Rightarrow$ 指出了六边形背景下游走点的运动情况,  $U = 4.84$  kV)

同,它们之间的作用力为引力. 无论是引力还是斥力,在六边形结构中,放电丝处于六边形格点上时所受合力为零,当偏离格点后将受到指向格点的力. 因此,当一放电丝从边界滑入六边形结构内时,对称性结构被打破,滑入的放电丝将受到指向六边形格点的力. 由于该放电丝本身已具有一定的速度,因此该放电丝将绕格点旋转. 同时,原格点上的放电丝,由于受到滑入放电丝的影响也会偏离原格点,继而旋转起来. 这样就产生了超六边形中的旋

转放电丝对(大点).

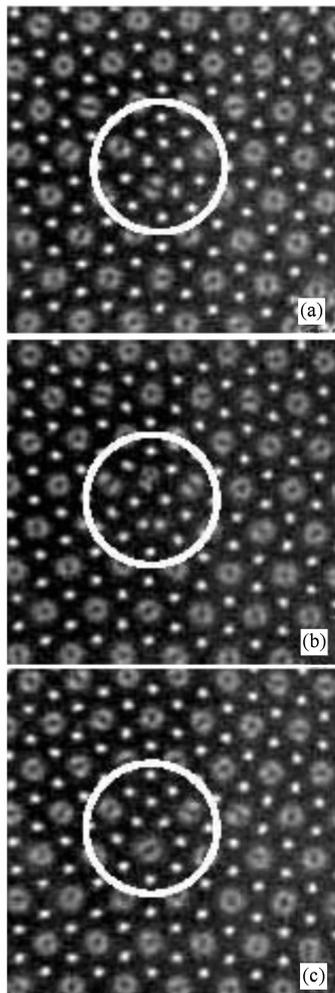


图7 超六边形结构中的 Penta-Hepta 缺陷

众所周知,晶体缺陷对晶体生长、晶体的力学性能、电学性能、磁学性能和光学性能等有重要影响.因此,关于缺陷问题,在晶体结构研究中非常重

要.特别是,最近关于二维六边形晶体石墨烯材料的缺陷问题的研究更是引人注目<sup>[19, 21]</sup>.基于此,本工作对超六边形结构中的缺陷进行了研究,发现了 Penta-Hepta 缺陷,如图 7 所示.这些缺陷类似于二维六边形晶体(石墨烯材料)中观察到的 Penta-Hepta 缺陷<sup>[19, 21]</sup>,其外围是 5 个点和 7 个点.但由于超点阵结构单元的核心所含点数的不同,使得它们与普通六边形结构中的 Penta-Hepta 缺陷又有所不同.如图 7(a)中,五边形和七边形中心分别存在一个和三个点;而图 7(b)中,均为两个点;图 7(c)中,分别为一个和两个.实验发现三种 Penta-Hepta 缺陷之间可相互转化.类比六边形结构中的 Penta-Hepta 缺陷,对于超六边形结构, Penta-Hepta 缺陷应该是图 7(b)中所示的样子,但是由于五边形结构比较小,影响了两放电丝粒子对间的引力,使得此结构十分不稳定,反而是五边形中心为一个点的结构(如图 7(a), (c)所示)相对比较稳定.

#### 4. 结 论

在氩气和空气混合气体介质阻挡放电中,研究了放电丝结构随外加电压及气体压强的变化,并从二维体系相变的角度进行了分析.随着电压的增加,放电丝结构的演变过程为:稀疏的随机放电丝—稠密的随机放电丝—六边形结构—超六边形结构—混沌态,此过程相应于二维体系的气相—液相—简单晶体—超点阵晶体—液相的相变过程.实验还研究了相变过程中超六边形形成中晶格常数及相邻格点间距离的变化、超点阵结构中大点的形成过程以及超六边形结构的 Penta-Hepta 缺陷.

[1] Kogelschatz U 2002 *IEEE Trans. on Plasma Sci.* **30** 1400  
 [2] Xu X 2001 *Thin solid Films* **390** 237  
 [3] Li G, Xu Y J, Mu K J, Nie C Q, Zhu J Q, Zhang Y, Li H M 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6444 (in Chinese) [李 钢、徐燕骥、穆克进、聂超群、朱俊强、张 翼、李汉明 2008 物理学报 **57** 6444]  
 [4] Yin Z Q, Wan J Y, Huang M Q, Wang H J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 7078 (in Chinese) [尹增谦、万景瑜、黄明强、王慧娟 2007 物理学报 **56** 7078]  
 [5] Ouyang J T, He F, Mao J S, Feng S 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5969 (in Chinese) [欧阳吉庭、何 锋、缪劲松、冯 硕 2006 物理学报 **55** 5969]

[6] Zhang Y T, Wang D Z, Wang Y H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4808 (in Chinese) [张远涛、王德真、王艳辉 2005 物理学报 **54** 4808]  
 [7] Wang Y H, Wang D Z, 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1295 (in Chinese) [王艳辉、王德真 2005 物理学报 **54** 1295]  
 [8] Zhang H Y, Wang D Z, Wang X G 2007 *Chin. Phys.* **16** 1089  
 [9] Shang W L, Wang D Z, Kong M G 2007 *Chin. Phys.* **16** 458  
 [10] Dong L F, Gao R L, He Y F, Fan W L, Li X C, Liu S H, Liu W L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1471 (in Chinese). [董丽芳、高瑞玲、贺亚峰、范伟丽、李雪辰、刘书华、刘微粒 2007 物理学报 **56** 1471]

- [11] Dong L F, He Y F, Liu W L, Gao R L, Wang H F, Zhao H T 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 031504
- [12] Zanin A L, Gurevich E L, Moskalenko A S, Bödeker H U, Purwins H G 2004 *Phys. Rev. E* **70** 036202
- [13] Breazeal W, Flynn K M, Gwinn E G 1995 *Phys. Rev. E* **52** 1503
- [14] Shirafuji T, Kitagawa T, Wakai T, Tachibana K 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 2309
- [15] Stollenwerk L, Laven J G, Purwins H G 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 255001
- [16] Brauer I, Bode M, Ammelt E, Purwins H G 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4104
- [17] Quinn R A, Goree J 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 195001
- [18] Chi J H, Lin I 1994 *Phys. Rev. Lett.* **72** 4009
- [19] Carpio A, Bonilla L L 2008 *Phys. Rev. B* **78** 085406
- [20] Dong L F, Gao R L, He Y F, Fan W L, Liu W L 2006 *Phys. Rev. E* **74** 057202
- [21] López-Sancho M P, de Juan F, Vozmediano M A H 2009 *Phys. Rev. B* **79** 075413

## Study on the phase transition of the filaments structure in dielectric barrier discharge \*

Dong Li-Fang<sup>†</sup> Yang Yu-Jie Fan Wei-Li Yue Han Wang Shuai Xiao Hong

(College of Physics Science and Technology, Hebei University, Baoding 071002, China)

(Received 8 May 2009; revised manuscript received 20 May 2009)

### Abstract

The evolution of filaments structure with the applied voltage and gas pressure in dielectric barrier discharge in argon/air mixture is studied, which is also analyzed in the aspect of two-dimensional phase transition. With the increase of the applied voltage, the filaments structure undergoes stages of sparse random filaments-dense random filaments-hexagon structure-hexagonal superlattice structure-chaos, which can be considered as a phase transition from gas-liquid-simple solid-superlattice solid-liquid. The changes of the lattice constant and the distance between two neighboring lattice points are investigated in the process of formation of the hexagonal superlattice structure in the phase transition. In addition, the formation of the large spots and the Penta-Hepta defects in the hexagonal superlattice structure are also studied.

**Keywords:** dielectric barrier discharge, filaments structure, phase transition, superlattice

**PACC:** 5280, 0565, 0570F

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10775037, 10975043), the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant No. A2008000564).

<sup>†</sup> E-mail: Donglf@mail.hbu.edu.cn