

# 介质阻挡放电丝结构转变中的缺陷研究\*

董丽芳<sup>†</sup> 李树峰 范伟丽

(河北大学物理科学与技术学院, 保定 071002)

(2010年6月29日收到; 2010年9月1日收到修改稿)

在介质阻挡放电中,对放电丝结构从四边形向四边形格子态结构转变中的缺陷进行了研究. 实验发现,在四边形向四边形格子态结构的转化中,存在两种缺陷:角缺陷及错位缺陷. 为了研究缺陷的形成机理,实验测量了四边形格子态结构中不同放电丝的发光信号,结果发现八边形晶胞的中心放电丝发光强度强于边缘放电丝发光强度. 通过引入准势场,研究了放电丝之间的相互作用及其对放电丝结构转变的影响,并由此分析了在转变过程中出现的缺陷,结果与实验符合得很好.

**关键词:** 介质阻挡放电, 角缺陷, 错位缺陷, 超四边格子态

**PACS:** 52. 38. Ph, 82. 40. Bj, 47. 54. - r

## 1. 引言

介质阻挡放电(DBD)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>[1-8]</sup>. 依据气压 $p$ 与两介质板间的气体间隙的宽度 $d$ 的乘积 $pd$ 值的大小,放电呈现出不同的模式. 当 $pd$ 值较高时,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>[9,10]</sup>.

在丝状放电中,从壁电荷的角度来说,每一个放电丝相当于一个准粒子. 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>[1]</sup>. 因此,放电丝在电极端面所表现出的亮点也代表了壁电荷,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>[3]</sup>. 因此,该体系相当于一个二维体系. 不同的放电丝结构之间的转变,可以看作是一个二维体系的相变过程<sup>[6]</sup>. 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>[11,12]</sup>. 因此,通过介质阻挡放电系统对二维系统相变过程中的缺陷进行研究,对二维体系物理的发展无疑具有重要意义.

本工作在介质阻挡放电中,对放电丝结构从四边形向四边形格子态结构<sup>[10]</sup>转变中的缺陷进行了研究. 所谓四边形格子态,是一种超点阵结构,其傅里叶能谱是由两套四边形格子旋转一定的角度而成. 实验发现,在四边形向四边形格子态结构的转化中,存在两种缺陷:角缺陷及错位缺陷,其形成与放电丝之间的相互作用有关.

## 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75 mm的圆柱形有机玻璃管组成,与高压交流电源两极相连的金属钛环浸入水中. 有机玻璃管的两端用厚度为1 mm的玻璃片封住,玻璃片

\* 国家自然科学基金(批准号:10975043),河北省自然科学基金(批准号:A2010000185),河北省教育厅重点项目(批准号:ZD2010140)和高等学校博士学科点专项科研基金(批准号:20101301110001)资助的课题.

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

兼作电介质. 放电间隙用厚度为 1.4 mm, 内径为 68 mm 的带有狭缝开口的玻璃圆环封住. 整个电极放入气室中. 气室两侧开有观察窗, 用 DiMAGE Z2 型数码相机记录放电丝的空间分布. 单个放电丝的光辐射用透镜、光阑和光电倍增管测量, 由数字示波器 (Tektronix TDS3052, 500 MHz) 记录. 高压交流电源输出波形由高压探头监测. 电源为频率为 50 kHz 的正弦交流电源. 放电气体为 99.99% 的氩气, 气压为一个大气压 ( $10^5$  Pa).

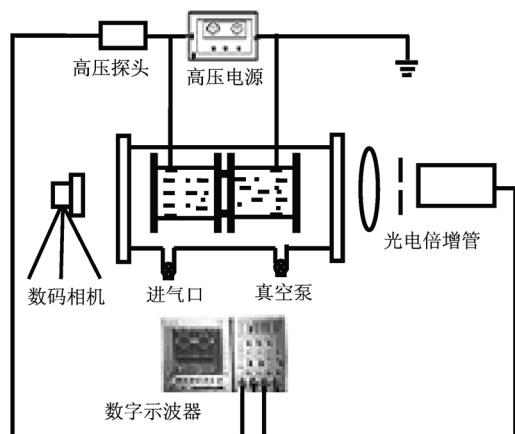


图1 实验装置示意图

### 3. 实验结果与讨论

实验中得到的超四边格子态结构如图 2 所示, 是由八边形的晶胞在空间上排列成的四边形结构, 每一个八边形晶胞由一个中心放电丝和八个边缘放电丝构成. 实验中观察到超四边格子态结构是由简单四边形结构演化而来. 当四边形结构出现时系统处于双稳状态, 即保持电压不变, 随着放电的进行, 超四边格子态逐渐由四边形结构演化而来, 并且在演化过程中存在超四边格子态与四边形结构相互竞争的现象. 图 3 给出的是演化过程的照片.

事实上, 四边形结构演化到超点阵结构时, 生成的结构并非总是如图 2 那样完美, 而是可能存在着不同的缺陷. 为表述方便, 我们定义中心放电丝所构成四边形的边长方向为超四边格子态结构的取向, 如图 2 中白线所标注, 于是一片完整的超四边格子态结构就有两个相互垂直的取向. 当一片完整四边形结构的两个不同放电区域内同时演化出超四边格子态结构时, 由于系统的旋转对称性和平移对称性, 在两片超四边格子态结构的交界处就有可能出现缺陷.

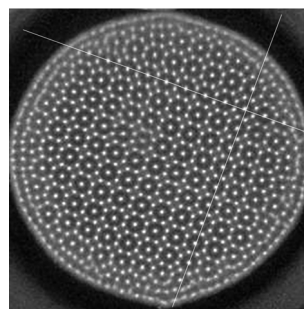


图2 超四边格子态结构及其两个相互垂直的取向(图中的白线标注)

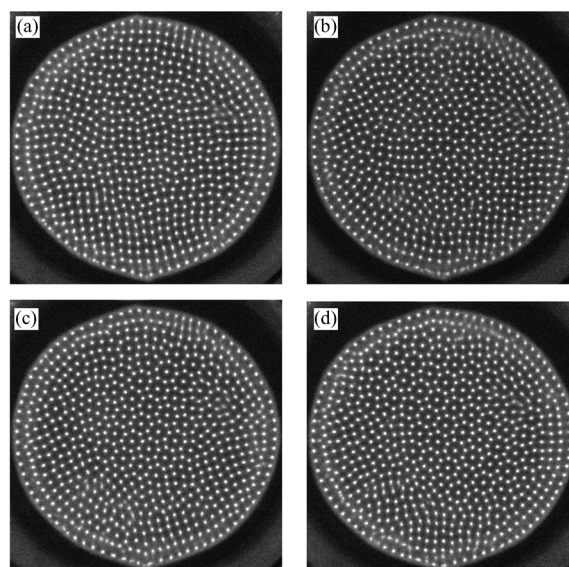


图3 超四边格子态结构由四边形结构中演化出现的过程 驱动电压  $U = 1.9$  kV, 电源频率  $f = 50$  kHz, 每张照片的时间间隔大约为 2 s

首先, 两个放电区域生成的超四边格子态结构可能会由于取向不一致而形成一定的夹角, 从而导致缺陷的形成, 这种缺陷我们称之为角缺陷. 图 4 给出了角缺陷的一个典型例子, 图中左上部格子态结构的一个取向和右部格子态结构的两个取向已经标出, 两片结构取向的夹角为  $\alpha$  或  $\beta$  ( $\alpha$  和  $\beta$  互为余角). 通过测量,  $\alpha \approx 36.7^\circ$ ,  $\beta \approx 53.3^\circ$ . 多次实验证明, 超点阵格子态结构出现的角缺陷只有这种情况.

其次, 即使两个放电区域生成的超四边格子态结构取向一致, 也会由于错位而在结构中形成缺陷, 把这种缺陷我们称之为错位缺陷. 如果进一步定义沿超四边格子态结构取向的中心放电丝的连线为结构的主轴线. 错位缺陷包括两种不同的情况. 第一种情况 (图 5 (a)) 是一部分放电区内超四边格子态结构的主轴线 (图 5 (a) 中的白线) 是另一部分放电区内八边形晶胞的割线, 但不与它的主轴

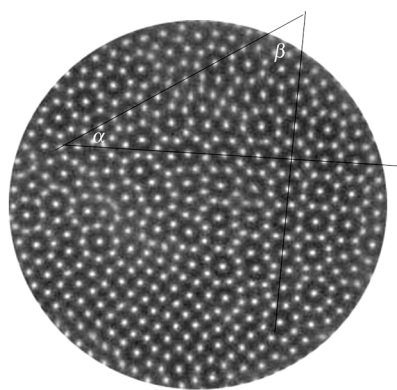


图4 超四边形格子态结构中的角缺陷  $\alpha \approx 36.7^\circ, \beta \approx 53.3^\circ$

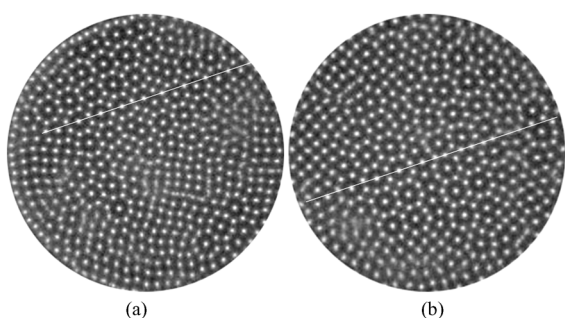


图5 超四边形格子态结构中的错位缺陷 (a) 半错位缺陷, (b) 完全错位缺陷

线重合,这种情况我们称之为半错位;第二种情况(图5(b))是一部分放电区内超四边形格子态结构的主轴线(图5(b)中的白线)是另一部分放电区内八边形晶胞的切线,即通过八边形晶胞边缘两个相邻的放电丝,这种情况我们称之为完全错位. 同样,多次实验证明,超四边形格子态结构中出现的错位缺陷只有这两种情况.

在四边形格子态出现的放电参数范围(电压为5.5—6.4 kV,频率为35—55 kHz)内<sup>[10]</sup>,通过大量的观察发现,由四边形结构向四边形格子态结构的演化过程中存在以下几种情况:如果四边形格子态由一个区域演化而来,此区域将逐渐扩大(类似一波阵面的传播),直至整个放电区域由四边形转化为规则的格子态结构. 如果四边形格子态有两个区域演化而来,则将出现缺陷;若两区域生成的四边形格子态取向不一致,就形成夹角为 $36.7^\circ$ 或 $53.3^\circ$ 的角缺陷. 当两个区域生成的四边形格子态取向一致但位置不对应时,就出现错位缺陷. 当然当两个区域生成的四边形格子态方向一致且位置对应时,它们能够完好地接在一起,形成规则的格子态结构,但这种情况非常少见.

一般来说,四边形结构和完美的四边形格子态结构非常稳定,持续时间长达十几分钟,属稳态结构. 对于存在角缺陷或错位缺陷的格子态结构,由于不同区域结构之间的竞争,缺陷位置会发生移动,缺陷结构随之变化. 观察发现,缺陷移动的方向取决于两结构势力的强弱. 如果某一区域占主导优势,将逐渐驱除另一区域,最后整个区域按优势区域的取向方式形成;如果两个区域势力相当,其竞争将持续下去,使得缺陷位置随机移动. 经大量观察发现,缺陷位置在数十秒之内保持不变,远远大于我们所使用的交流电源的周期(20  $\mu\text{s}$ ),但又小于完美的四边形格子态结构的稳定时间. 因此,缺陷结构应属于微观上(相对于放电周期)稳定但宏观上瞬变的结构.

以下我们将着重对角缺陷和错位缺陷的形成进行详细的分析.

实验中通过观察发现八边形晶胞的中心放电丝总是比边缘放电丝更亮. 为此,我们同时测量了一个中心放电丝和一个边缘放电丝的光信号并与总发光信号进行了比较,结果如图6所示. 显见,这两个放电丝的发光信号中,对应于总光信号中间脉冲的光信号总是强于交替对应总光信号两侧脉冲的光信号,根据以前的实验结果<sup>[10]</sup>,较强的光脉冲来自于八边形晶胞的中心放电丝,而较弱的光脉冲来自于八边形晶胞的边缘放电丝. 即中心放电丝的发光强度要高于边缘放电丝的发光强度. 由于放电丝的亮度与其放电通道中的电流密度成正比<sup>[2]</sup>,因此中心放电丝的放电电流总是大于边缘放电丝的放电电流.

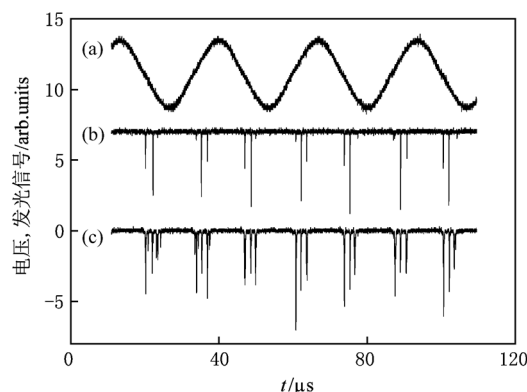


图6 超四边形格子态结构的驱动电压和发光信号波形 (a) 驱动电压波形, (b) 超四边形格子态结构同一晶胞中一个中心放电丝和一个边缘放电丝的发光信号, (c) 总发光信号

介质阻挡放电中的流光放电通道以及壁电荷可以看成准粒子,它们之间存在着相互作用.一般认为放电丝之间存在相互排斥的库仑力和相互吸引的洛伦兹力,这两个力使放电丝达到平衡并形成稳定的结构.但是 Shirafuji 等<sup>[4]</sup>研究发现当放电丝之间达到稳定时,放电丝之间的库仑力与洛伦兹力并不能够达到平衡.因此他们对照二维的库仑系统,在放电丝分布的区域内引入一个抛物形束缚势场.在上述三者的作用下,放电丝之间才能达到平衡形成稳定的结构.

实际上放电丝之间的相互作用是相当复杂的,尚不能一言以蔽之.为简单起见,我们引入一个准势  $u$ ,把放电丝之间所有的相互作用等效成  $u$  之间的相互作用,设  $u$  与放电丝的电流密度成正比

$$u_m = \chi \frac{j_m}{r^\alpha}.$$

这里  $\chi$  是一个比例系数,  $j_m$  是第  $m$  个放电丝的电流密度,  $r$  是到放电丝  $m$  的距离,于是我们可以得到放电区内总的势能

$$U = \sum_{m \neq n} \chi \frac{j_m j_n}{r^\alpha}.$$

利用图 7 给出的示意图,我们可以对四边形结构到超四边格子态结构的转化过程做一下解释.对于图 7 中的四边形结构,每个放电丝所产生的准势  $u_i$  都是相同的.假如某一时刻由于涨落的影响,某一放电丝  $A$  的放电电流变大了,这将给  $A$  周围的八个相邻的放电丝带来两种影响.第一,由于外加驱动电压保持不变,整个放电区以及部分放电区都应该保持电流不变,所以随着放电丝  $A$  放电电流的增大,其周围相邻的八个放电丝的放电电流就应该减小.第二,放电丝  $A$  电流的增大使得  $u_A$  增强,为了保持总体势能处于最低值,其周围的八个放电丝将会重新调整自己位置.由于放电丝激发的准势场具有圆对称性,所以八个放电丝将会调整到距  $A$  等距的位置上去.这样就大致形成了一个八边形的晶胞,放电电流增大和减小的放电丝分别演化成了晶胞中的中心放电丝和边缘放电丝.

8 个放电丝的变化继续影响再外层放电丝,比如图中的  $I, B, B'$  和  $H$  等,其放电电流都有增大的可能,而电流增大的放电丝就会演化成八边形晶胞的中心放电丝.但如果系统选择  $H(I)$  电流增大,那么在  $A$  和  $H(I)$  的作用下,放电丝  $E(F)$  将回到原来的位置,这样在超四边格子态与四边形的交界处就会出现竞争现象.如果系统就要选择  $B$  或  $B'$  作为中

心放电丝(由于  $B$  和  $B'$  相邻,系统只能选其一),八边形晶胞能够在空间继续生长.进一步分析,如果系统选择了  $B$  作为中心放电丝,在  $A$  和  $B$  的共同作用下,放电丝  $F$  和  $G$  最终会稳定在  $A$  与  $B$  连线的垂直平分线上.在保证八边形晶胞能继续生长的情况下,根据以上分析讨论更远的放电丝,则系统将会选择  $C$  和  $D$  等微放电丝作为中心放电丝.同理,如果系统选择了  $B'$  作为中心放电丝,那么  $C'$  和  $D'$  也会演化成中心放电丝.可以看出,其中的共同规律是相邻的中心放电丝处于原四边形结构“日”字对角的顶点上,我们把这样的选择叫做“匹配”.只有系统选择的中心放电丝相互匹配,才能在空间形成完整的超四边格子态结构.

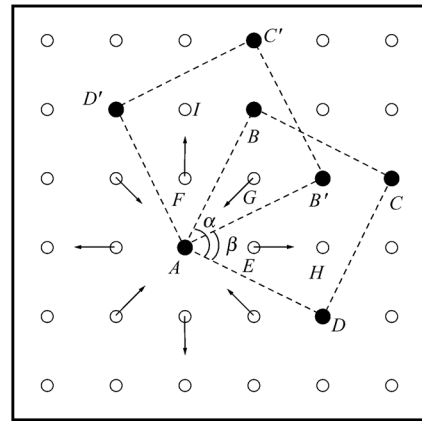


图 7 四边形结构到超四边格子态结构演化过程的示意图

在四边形结构中,如果只在一个区域内形成四边形格子态,并能按上述方式完好的匹配,则四边形格子态区域将逐渐扩大,类似一波阵面的传播,最终占满整个放电区域.

如果在一片完整四边形结构的两个不同的区域同时生成超四边格子态结构,两个区域的超四边格子态结构向外生长,在交界处如果方向不一致将会生成角缺陷.从上图图 7 可以看出,放电丝结构由四边形演化成超四边格子态结构,会有两种取向供系统选择,如图 7 所示,一种是  $A, B, C, D$  的取向,一种是  $A, B', C', D'$  的取向,这两种取向之间存在一个固定的夹角,即为图 7 中的  $\alpha$  或  $\beta$ , ( $\alpha$  和  $\beta$  是互余的),由简单得几何关系可以得到  $\alpha = 36.87^\circ$ ,  $\beta = 53.13^\circ$ ,这与我们实验中得到的结果非常一致.

如果在四边形结构的不同放电区域内生成的超四边格子态结构取向一致,即使不存在夹角缺陷,也可能会出现另一种缺陷,即错位缺陷.图 8 给

出了错位缺陷形成的示意图. 图 8(a) 是一四边形结构, 我们将它分成了两个区域, I 区和 II 区, II 区的黑点是将会演化成中心放电丝的那些放电丝, 可以看出它们是相互匹配的, 而且进一步可以看出, 在这种匹配的情况下, 每一行(列)上每隔 4 个放电丝会出现一个将作为中心的放电丝. 即可以看作它的空间周期单元为 5. 如果在 I 区也要演化出超四边格子态, 其自身中心放电丝的选取首先要相互匹配, 假设其取向与 II 区是相同的. 但由于中心放电

丝的空间周期单元是 5, 那么某一个中心放电丝(其他中心放电丝任何时候都是与之相匹配的)在定位时就会依次有 5 种不同的选择, 图 8(a) 中的 A, B, C, D, E 表示了这 5 种不同的选择, 图 8(b) 给出了这 5 种选择与 II 区的不同错位方式, 从图中可以看出, 这 5 种不同的选择只对应着两种错位情况和一种匹配情况. 放电丝 A 与 II 区中心放电丝相匹配, 放电丝 B 和 E 对应着与 II 区的半错位情况, 而 C 和 D 则对应着与 II 区的完全错位情况.

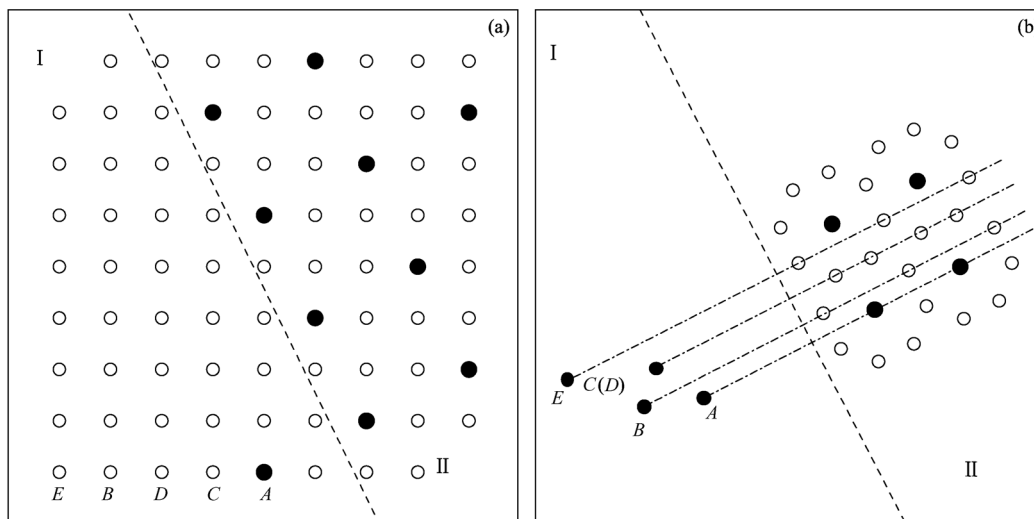


图 8 超四边格子态结构中错位缺陷生成的示意图

#### 4. 结 论

在介质阻挡放电中, 对放电丝结构从四边形向四边形格子态结构转变中的缺陷进行了研究. 研究表明, 在四边形向四边形格子态结构的转化中, 存在两种缺陷: 角缺陷及错位缺陷. 角缺陷的特征角度为  $\alpha \approx 36.7^\circ$ ,  $\beta \approx 53.3^\circ$ , 两者互余; 错位缺陷包

括两类, 分别为半错位缺陷和完全错位缺陷. 通过对超四边格子态中放电丝的时空测量, 发现八边形晶胞的中心放电丝总是比边缘放电丝更亮, 表明中心放电丝的放电电流总是大于边缘放电丝的放电电流. 通过引入准势场, 理论上分析了放电丝之间的相互作用及其对放电丝结构转变的影响, 给出了角缺陷和错位缺陷产生的条件, 结果与实验符合得很好.

- [1] Stollenwerk L, Laven J G, Purwins H G 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 255001
- [2] Ammelt E, Astrov Y A Purwins H G 1997 *Phys. Rev. E* **55** 6731
- [3] Brauer I, Bode M, Ammelt E, Purwins H G 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4104
- [4] Shirafuji T, Kitagawa T, Wakai T Tachibana K 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 2309
- [5] Sun J, Zhang J L, Wang D Z, Ma T C 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 344 (in Chinese) [孙 姣, 张家良, 王德真, 马腾才 2006 物理学报 **55** 344]
- [6] Dong L F, Yang Y J, Fan W L, Yue H, Wang S, Xiao H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1917 (in Chinese) [董丽芳, 杨玉杰, 范伟丽, 岳 晗, 王 帅, 肖 红 2010 物理学报 **59** 1917]
- [7] Li G, Li Y M, Xu Y J, Z Y, Li H M, Nie C Q, Z J Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4026 (in Chinese) [李 钢, 李轶明, 徐燕骥, 张 翼, 李汉明, 聂超群, 朱骏强 2009 物理学报 **58** 4026]
- [8] 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]
- [9] Fan W L, Dong L F, Li X C, Yin Z Q, He Y F, Liu S H 2007

- Acta Phys. Sin.* **56** 1467 (in Chinese) [ 范伟丽、董丽芳、李雪 122308  
辰、尹增谦、贺亚峰、刘书华 2007 物理学报 **56** 1467 ] [11] Chu J H, Lin I 1994 *Phys. Rev. Lett.* **72** 4009  
[10] Dong L F, Li S F, Fan W L Pan Y Y 2009 *Phys. Plasma* **16** [12] Carpio A, Bonilla L L 2008 *Phys. Rev. B* **78** 085406

## Defects in transition between different filament structures in dielectric barrier discharge \*

Dong Li-Fang<sup>†</sup> Li Shu-Feng Fan Wei-Li

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

(Received 29 June 2010; revised manuscript received 1 September 2010)

### Abstract

The defects in the transition from square to square grid states are studied in a dielectric barrier discharge. It is found that there exist two kinds of defects in this transition, which are angle defect and dislocation defect. In order to investigate the formation mechanism of the defects, the light emissions from different filaments are measured, which show that the light intensity of filament in the middle of the octagonal cell is larger than that in the side. By introducing the quasi-potential field, the interactions between filaments as well as their influences on the transition between different structures are studied. From above analyses, the defects that could emerge in the transition are suggested, which are in good agreement with that observed in experiments.

**Keywords:** dielectric barrier discharge, angle defect, dislocation defect, square grid state

**PACS:** 52.38.Ph, 82.40.Bj, 47.54.-r

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10975043), the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant No. A2010000185), the Key Project of Department of Education of Hebei Province, China (Grant No. ZD2010140), and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20101301110001).

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