

* 专题评述 *

介质阻挡放电斑图动力学研究进展*

贺亚峰 董丽芳** 刘富成 范伟丽 王志军

河北大学物理科学与技术学院, 保定 071002

摘要 介质阻挡放电斑图动力学是一门新兴的交叉学科, 对它的研究已经引起了人们广泛的关注. 介质阻挡放电中复杂的非线性过程以及系统经历的高级动力学分叉过程使得系统可呈现出丰富的时空斑图与时空对称性破缺. 因此介质阻挡放电成为研究斑图动力学的一个新的系统, 它为目前实验室斑图动力学的研究注入了新的内容. 文中对介质阻挡放电的应用研究与应用基础研究作了简要的介绍, 着重介绍了介质阻挡放电斑图动力学的研究进展, 并对这一领域的研究进行了展望.

关键词 介质阻挡放电 时空斑图 反应扩散模型

1 介质阻挡放电的应用及其斑图动力学

介质阻挡放电(简称 DBD, 又名无声放电)是一种有电介质插入放电空间的气体放电, 一般工作在交流电压下, 而且远离热力学平衡态, 是一种典型的非平衡态交流气体放电^[1,2]. 根据放电气体成分、介质材料性质、放电间隙宽度等实验条件, 介质阻挡放电可呈现出3种放电模式: 丝状模式、弥散模式与斑图模式^[1]. 丝状模式最典型的应用就是因其能够在大气压下以一种经济、有效的方式产生臭氧而被应用于臭氧发生器等领域. 对于弥散模式最有应用前景的就是大气压辉光放电, 因为在许多应用领域(如材料表面的高速处理等)要求产生的等离子体是均匀的, 并且工作在大气压下以利于工业化^[3,4], 这使得大气压辉光放电成为人们研究的一个热点. 稳定的 He 气大气压辉光放电很容易实现, 而空气, N, O, Ar 等气体大气压放电容易向丝状放电转化, 因而对它们的研究是实现工业应用的必然要求. 另外, 斑图模式的介质阻挡放电也具有广泛的应用前景. 例如材料的局域生长, 在适当的控制条件下放电丝能自组织排列成规则的结构(斑图), 而放电丝内材料的生长速度高于放电

丝外其他地方的生长速度^[5]. 最近对等离子体光子晶体的研究引起了人们广泛的关注^[6]. 它是一种由等离子体和介质层周期性排列的结构, 因等离子体对电磁波具有负折射率, 电磁波在等离子体光子晶体中传播时折射率的周期性变化会出现光子晶体具有的导带、禁带等特征. 斑图模式的介质阻挡放电就是实现三维等离子体光子晶体的一种有效方法^[7].

斑图就是指在时间、空间或时空上具有某种规律性的非均匀宏观结构, 它是系统的一种内在属性^[8]. 它广泛存在于自然界, 如斑马身上的条纹, 天空的云街等. 实验室研究斑图的系统主要有化学系统、Faraday 系统、对流系统、非线性光学系统、磁流体系统、液晶系统以及介质阻挡放电系统^[9-14]. 虽然各个系统斑图形成的具体物理机制各不相同, 但斑图的形成与演化规律却有着一定的共性. 斑图动力学就是研究斑图形成系统中斑图的形成、演化与失稳规律的一门学科. 对斑图动力学的研究也具有实际应用价值. 例如, 在可激发系统中的螺旋波斑图和螺旋波破缺产生的缺陷湍流与心脏的心率不齐和室颤的病变问题有关, 对它们的控制对于心脏疾病的治疗有重要意义.

2006-07-17 收稿, 2006-10-30 收修改稿

* 国家自然科学基金(批准号: 10375015, 10575027)和河北省自然科学基金(批准号: A2004000086, A2006000950)资助项目

** 通信作者. E-mail: Dongli@hbu.cn

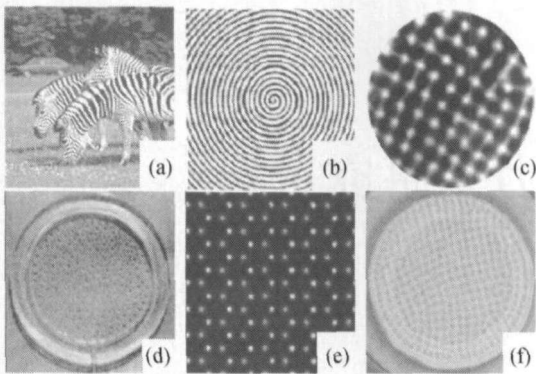


图1 各种系统中的斑图

(a) 生物系统; (b) 化学反应系统; (c) Faraday 系统;
(d) 对流系统; (e) 非线性光学系统; (f) 介质阻挡放电系统

介质阻挡放电除了具有广泛的应用前景外, 还因其具有以下几个优点而在斑图动力学研究领域引起人们广泛的关注: (1) 放电本身是发光的, 因而 DBD 为斑图动力学提供了一个很好的可视化研究对象; (2) DBD 中形成稳定斑图所需要的时间非常短, 在一般的非线性耗散系统如流体中热对流系统、化学反应扩散系统中, 稳定斑图的形成需要几小时甚至几天的时间, 而在 DBD 中只需要几分钟甚至几秒钟; (3) DBD 中组成斑图的单元为放电丝, 用我们提出的光学方法可被单独测量, 这样可以研究微单元与斑图的关系, 这在其他系统中很难实现; (4) 影响斑图模式的控制参数(如外加电压、放电气隙宽度、气体成分等)可以方便地调节. 以上几个主要特点使得介质阻挡放电系统很适合研究斑图动力学.

2 介质阻挡放电斑图动力学与大气压辉光放电研究的关系

作为介质阻挡放电两个主要研究方向, 介质阻挡放电斑图动力学与大气压辉光放电的研究实际上是相互联系的. 辉光放电的实现需要抑制丝状放电或弧光放电, 而斑图一般是由丝状放电形成的, 同时也会经历均匀放电. 本课题组前期工作就发现, 丝状放电可由弥散放电而来, 适当条件下(如改变电压、气压等)放电丝可排列成规则的斑图. 然而, 如果再改变实验条件(如增加电压)丝状斑图会过渡到均匀放电^[15]. 更有意思的是, 如果再增加电压, 均匀的放电背景上还能形成点状斑图^[16]、条纹斑图、螺旋波斑图等. 另外, 加拿大的 Radu 等利用

高速相机研究惰性气体放电, 发现在一个放电事件中(一个宽的放电电流)放电先后经历了斑图模式与辉光模式^[17]. 因此介质阻挡放电斑图动力学的研究对研究大气压辉光放电也具有很重要的意义.

3 介质阻挡放电斑图动力学的实验研究进展

20 世纪 80 年代人们就已经在介质阻挡放电中观察到了斑图, 后来有几个小组也分别在不同的实验条件下得到了自组织斑图. 但是由于得到的斑图类型很少(六边形、反六边形、条纹、靶波), 他们并没有对介质阻挡放电斑图动力学作深入研究. 只有德国 Purwins 小组一直在作这方面的研究, 但是他们采用的也是 ITO 电极, 得到斑图类型有限(六边形、条纹、同心圆环)^[18,19]. 另外 Purwins 小组还采用半导体与 ITO 电极做直流气体放电, 得到了耗散孤子、六边形、条纹、螺旋波、靶波及 Zigzag 的螺旋波与靶波斑图^[20-23], 但是这种直流的放电不是严格意义上的介质阻挡放电. 本课题组采用独特的液体电极放电装置在 Ar 和空气混合气体中获得了丰富的时空斑图, 如运动六边形、静态的六边形、超六边形、反六边形、四边形、超四边形、条纹、螺旋波、靶波、准晶斑图等^[16,24-26]. 这些结果为介质阻挡放电斑图动力学的深入研究提供了很好的研究对象.

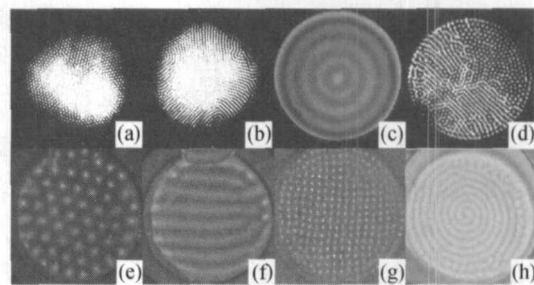


图2 ITO 电极(上)与水电极(下)介质阻挡放电斑图
(a), (b) 来自文献[27], (c) 来自文献[18], (d) 来自文献[19], (e)~(h) 为本课题组所得斑图^[16,24,26]

早在 1982 年 Boyers 和 Tiller 在大气压 He 和 Ne 混合气体中观察到了六边形与条纹斑图(图 2 (a), (b)), 这种斑图是非辉光背景上的辉光结构(等离子体泡), 也就是由局部辉光放电组成的规则斑图. 但他们并没有意识到所得到的结构是典型自组织放电斑图, 只是把等离子体泡与磁泡的某些特性作了类比, 得到三点共性: (1) 改变电压可以改

变泡的大小与形状；(2) 使泡直径稳定的电压有一个范围；(3) 泡是双稳的。在此研究的基础上提出了一种设计交流等离子体显示的新方法^[28]。随后德国的 Purwins 小组在高频(几百 kHz) He, Ar 中观察到了运动的和静止的六边形与条纹斑图^[19,29,30]。他们实验中的 pd 值(气压与气隙宽度的乘积)不高于 $10 \text{ Torr}^1 \cdot \text{cm}$, 是一种 Townsend 放电模式。一般来讲, 条纹斑图总是六边形斑图在增加电压过程中某一特征方向的点连接成条状结构形成的。在文献^[29]中他们利用高速相机对静态的环状结构进行了时空测量, 发现这种静态环状结构是多个瞬时点斑图的积分效果, 在某一时刻点斑图是运动的, 点沿着一定的方向运动形成环形轨迹。这是较早利用高速相机对斑图时空动力学进行的测量。最近, 他们在 pd 值不到 $1 \text{ Torr} \cdot \text{cm}$ 的氮气交流放电中还观察到了静止的同心圆环斑图^[18], 但这种斑图并非点斑图的积分效果。通过高速相机可以看到这种同心圆环斑图具有时空嵌套结构, 是由两套同心圆环结构在空间上相互嵌套而成, 并在时间上具有时间反演的特性。此时, 放电电流每半周期有两个电流峰, 分别对应这两套结构。

1995 年美国的 Breazal 小组在 He 与少量水蒸气介质阻挡放电中同样得到了静止的六边形与条纹斑图^[31], 实验中用正弦和方波电压都可得到类似的结果。适当的增加 He 气中水蒸气的含量可以得到动态的条纹、靶及旋转的六边形斑图。由于他们用到的气体是 He 气, pd 值不到 $10 \text{ Torr} \cdot \text{cm}$, 所以这种不太强烈的放电可使 ITO 电极工作在常温下。2000 年美国 Walhout 小组利用长玻璃管在大气压 Ar-He 介质阻挡放电中得到了一维周期性的放电丝排列^[32,33], 其 pd 值约为 $150 \text{ Torr} \cdot \text{cm}$ 。根据外加电压的不同把斑图类型分为 3 类: (1) 分布较宽的窄放电丝(450—610 V); (2) 分布较密(周期约为前一类的一半)的窄放电丝(610—940 V); (3) 亮、宽的放电丝与暗、窄的放电丝的周期排列(980—1200 V)。在增加电压过程中, 放电丝在空间位置上由周期性疏排列过渡到周期性密排列, 在较高电压(1050 V)时出现倍周期排列, 这是最早得到空间倍周期结构的实验。更高的外加电压使得放电呈现

出混沌状态(均匀放电)。另外, 他们认为第二类斑图在时间上还可能是两套结构的叠加, 但没有从实验上得到证明。

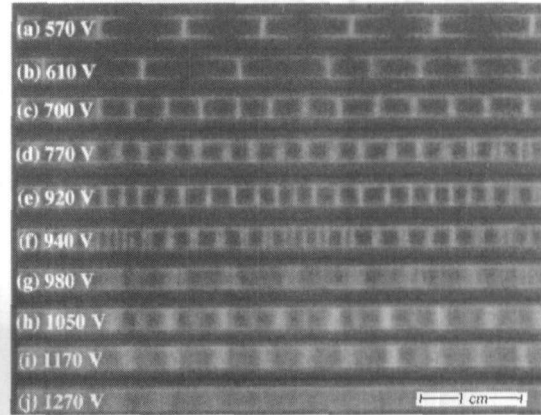


图 3 一维周期性的放电丝排列^[32,33]

2003 年日本 Shirafuji 等利用 ITO 电极在 210 Torr 的 Ar 气中观察了放电丝随电压增加的自组织过程, 他们考虑了介质上同性壁电荷之间的静电排斥力, 认为放电丝的自组织必然要求丝之间还存在相互吸引力, 而放电丝之间的 Lorentz 吸引力正扮演了这种角色^[34]。两个放电丝形成壁电荷之间的 Coulomb 力约为 $2.42 \times 10^{-4} \text{ N}$ (由放电丝电流和放电时间得到), 两个放电丝之间的 Lorentz 力约为 $1.51 \times 10^{-10} \text{ N}$ 。这种短程排斥力与长程吸引力的相互作用可使得放电丝之间自组织成规则的结构。这是较早关于放电丝之间相互作用分析的报告。同年, 加拿大 Radu^[17,35-36]等在一个大气压下对流动的空气、氮气及惰性气体交流放电进行了较为详细的研究。实验中测量了放电的光信号和电流信号并用高速相机拍摄瞬态放电斑图。他们发现, 大气压下空气放电是一种丝状放电, 而纯氮气放电可以是均匀的辉光放电。利用光电倍增管和高速相机对惰性气体放电进行了时空分辨测量, 发现在一个放电事件(即半个电压周期内的一个宽电流脉冲)中放电经历了斑图模式与辉光模式(图 4), 即最初由放电丝形成斑图, 增加电压振幅使得放电丝直径扩展以致占满整个放电区域, 形成均匀放电。随电压振幅增加, 在均匀背景上最初放电丝斑图形成的地方放电熄灭, 形成反相的斑图, 直至整个放电熄灭。实

1) $1 \text{ Torr} = 0.13322 \text{ kPa}$

验还得到其他条件相同时不同气体放电丝直径的变化规律是 $\text{He} > \text{Ne} > \text{Ar} > \text{Kr}$, 扩展了 Kogelschatz 的研究结果: $\text{He} > \text{Xe} > \text{N}_2 > \text{空气} > \text{CO}_2 > \text{O}_2$ ^[1]. 除了考虑 Shirafuji 等提到的放电过程中 Coulomb 力与 Lorentz 力外, 他们还考虑放电丝中种子电子的作用, 这些电子的相互作用也使得放电丝之间产生 Coulomb 排斥力. 由此估算了总的 Coulomb 力约为 $6 \times 10^{-16} \text{ N}$ (由电子密度和放电丝大小得到),

Lorentz 力约为 $1 \times 10^{-17} \text{ N}$, 结果与 Shirafuji 等所得结果相差很大, 两者的可靠性还需进一步的研究. 2004 年美国 Drexel 大学的 Fridman 小组利用存储荧光成像法 (Storage phosphor imaging method) 研究了大气压空气阻挡放电的放电丝分布, 并利用基于 Monte Carlo 方法的元胞自动机对放电丝之间的相互作用进行了模拟 (图 5)^[37], 这是最早对放电丝相互作用的二维数值研究.

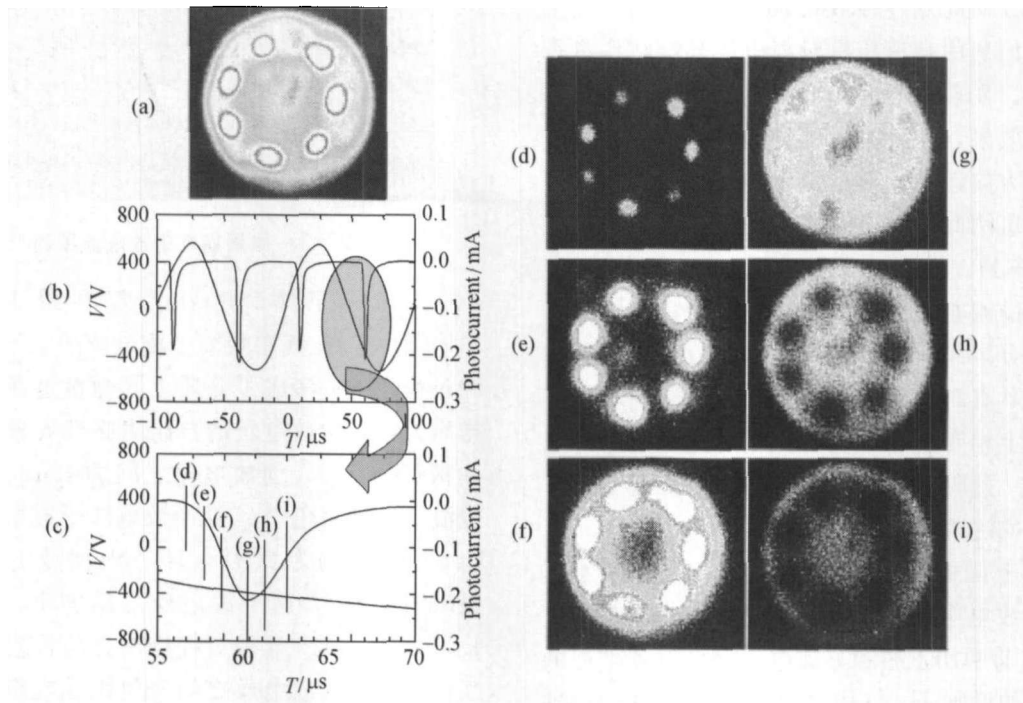


图 4 一次放电中出现的斑图模式与辉光模式

(a) ICCD 相机拍摄到的照片; (b) 光电倍增管信号; (c) 光电倍增管信号的时间展开; (d)–(i) 一个放电脉冲里不同位置对应的斑图, 照片曝光时间: 10 ns

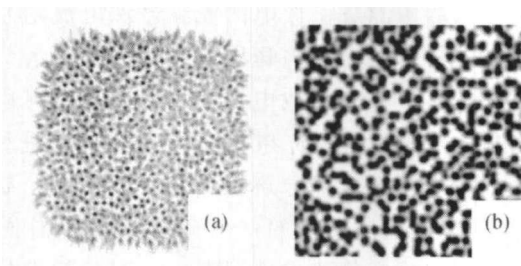


图 5 二维空气放电斑图 (a) 与数值模拟 (b)

从国外介质阻挡放电斑图动力学研究的进程来看, 人们采用的放电装置都是 ITO 固体电极, 放电气体多数是惰性气体, 此时 pd 值最高可达 $150 \text{ Torr} \cdot \text{cm}$. 因较强的放电热效应, 氮气介质阻挡放电需要工作在低 pd 值下 (约 $1 \text{ Torr} \cdot \text{cm}$). 对

斑图时空动力学的研究主要是利用高速相机成像法, 另外还可通过测量放电电流及光电流信号来研究其时间特性, 利用存储荧光成像法研究其空间特性. 他们得到的斑图类型有限, 包括六边形、条纹、靶波及同心圆环斑图.

本课题组从 2002 年开始介质阻挡放电及其斑图动力学的研究. 首次采用液体电极双介质阻挡放电装置, 并利用光学方法 (光电测量与光谱测量) 研究了氩气及与空气的混合气体介质阻挡放电及其斑图动力学. 由于水电极具有透明性、一定的冷却性等特点, 所以更有利于实验测量, 这也是能得到丰富的时空斑图的一个主要原因. 在我们的工作中已经观察到了丰富的时空斑图与时空对称性破缺

(图 6). 在高 pd 值(约 125 Torr·cm)介质阻挡放电中观察到了六边形与条纹斑图^[16]; 实验观察到了漫游的相螺旋波、可激发螺旋波及螺旋波破缺混沌, 得到多臂螺旋波中心的运动规律, 并首次从实验上验证了螺旋波由 Core 不稳定性或 Notching 不稳定性形成^[24]; 最近还报道了超四边形斑图的时空动力学^[25], 详细地讨论了壁电荷斑图与放电丝斑图的相互影响; 首次观察到了四边形斑图并对其时空动力学进行了测量, 从实验上证明了四边形斑图(图 7(a))是由两套子斑图构成的嵌套结构(图 7(b)示意图, 分别用○和◆表示这两套结构). 测量方法是, 分别对任一横或竖列、任一对角线上一列、任意两个相邻放电丝的光信号进行多次测量, 并与总光信号对比. 图 7(c), (d)中上列为总光信号, 可以看到在每半周期有两个脉冲, 分别对应这两套结构放电, 每套结构几乎同时放电, 并对应同一个

脉冲. 图 7(c)下列为沿任一横或竖列的光信号, 可以看到每半周期有两个脉冲, 分别对应两套斑图放电. 图 7(d)下列为任一对角线上一列的光信号, 在每半周期有一个脉冲, 对应某一套子斑图放电. 实验测量结果还发现四边形斑图放电还具有时间反演的特性, 即○、◆两套结构放电的时间序列为○—◆—◆—○—○—◆—◆—○. 时间反演使得在连续的半周期○、◆的放电时间间隔具有长短交替的特点, 即四边形斑图放电的倍周期行为^[26].

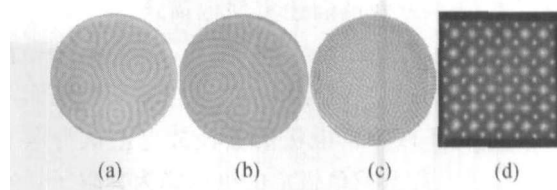


图 6 本课题组代表性斑图
(a) 螺旋波; (b) 靶波; (c) 螺旋波破缺混沌; (d) 超四边形斑图

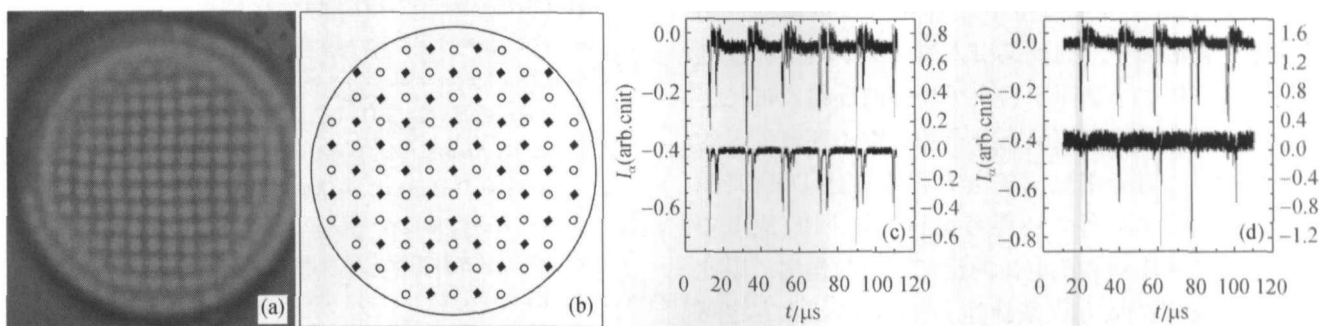


图 7 四边形斑图时空动力学测量
(a) 四边形斑图; (b) 四边形斑图两套结构示意图; (c) 总光信号与任一列光信号; (d) 总光信号与对角一列光信号

4 介质阻挡放电理论研究

介质阻挡放电过程非常复杂, 影响放电过程的因素非常多, 如介质材料及其厚度、气体种类、气压、放电间隙等等^[38], 因此几乎所有的理论研究都对放电过程作了许多简化, 例如不考虑二次电子发射、忽略复合过程等. 所以, 这些研究还不能很好地解释介质阻挡放电现象. 对于介质阻挡放电中的非线性自组织现象的解释就更加困难, 目前还没有一个能描述介质阻挡放电斑图动力学的方程. 一般来讲, 描述非线性系统的物理方程都是非线性偏微分方程, 即属于‘微观’方程, 如描述流体系统的 Navier-Stokes 方程, 但一般很难从‘微观’方程中提取到系统的动力学信息. 因此通常通过一定的方法将其抽象为能描述

一类动力学特性的宏观模型. 目前描述斑图动力学的这类模型主要有 Swift-Hohenberg 方程、Kuramoto-Sivashinsky 方程、Reaction-Diffusion 方程和 Ginzburg-Landau 方程^[9]. 这些方程一般是耦合的非线性偏微分方程, 其中对反应扩散(Reaction-Diffusion)方程的研究最多. 反应扩散方程一般具有 $\frac{\partial C}{\partial t} = f(C, \mu) + D\nabla^2 C$ 的形式. 其中 C 为反应物浓度矢量, 右边第一项代表系统的反应动力学, 第二项代表扩散项, μ 是系统控制参量的总和, D 是扩散系数矩阵, ∇^2 是 Laplace 算符. 反应扩散方程可以描述许多非线性系统, 例如, 化学反应系统, 传染病的传播, 半贫瘠地区的植物生长模型等等^[8].

国内外也曾有人用反应扩散方程来唯象的描述

放电斑图。1988年德国 Müller 对气体放电电压-电流曲线的双稳特性进行了研究,得到的电流密度方程是一个反应扩散方程,模拟结果与实验观察到的点斑图非常相像^[39]。1999年 Müller 等利用电子与正离子的连续性方程和动量传递方程以及 Poisson 方程模拟了一维多个放电丝的形成^[19]。2005年荷兰 Ebert 提出的是一个与电场耦合的、两种带电粒子的反应-漂移-扩散模型,得到瞬时的指状电离波峰^[40]。2005年大连理工大学王德真等利用双流体模型观察到了放电丝的分裂现象^[41]。另外他们还定性地描述了直流气体放电系统的时间振荡行为¹⁾。德国 Purwins 小组一直试图用反应扩散方程来唯象地描述放电斑图,他们考虑的是半导体和 ITO 作电极的直流放电,认为电子雪崩为活化子,高欧姆电极上的电压降为禁阻子,通过这个两变量反应扩散模型模拟得到了 Turing 六边形与条纹斑图、稳定的局域态结构、单个运动的耗散孤子^[42-46]。但两变量模型不能解释多个运动的、相互作用的耗散孤子。因此又引入第二个禁阻子:壁电荷的作用。第二个禁阻子引入了局部的反馈,可稳定孤子。这样就能解释束缚态分子和多粒子耗散孤子的形成^[20,47,48]。对于用反应扩散方程来描述 DBD 斑图除了以上几点考虑外,还要考虑到实际 DBD 放电中外界周期性的驱动和壁电荷的记忆效应的作用。因此如果要用反应扩散方程来描述 DBD 斑图,此方程可能还要包含驱动项,并且是一个非自治的偏微分方程。建立这样一个比较真实的方程将是一个艰难的历程,也是介质阻挡放电斑图动力学研究内容之一。

5 展望

总之,新型的对称性结构以及复杂的分叉类型使得 DBD 成为研究斑图动力学的一个新的非线性系统。就介质阻挡放电本身而言,其放电物理过程非常复杂,要想更加深入地理解其动力学过程,需要借助更精确的物理实验测量和更全面的理论分析。实验方面,壁电荷在斑图形成及演化过程中扮演着重要的角色,如何有效地测量壁电荷的形成过程及其分布将是人们研究的一个重要课题。另外用光谱法研究放电过程也将对 DBD 斑图动力学的研究也有一定的帮助。理论方面,从放电机理出发,

建立一个具有放电物理特性的斑图动力学模型将有助于人们进一步了解和掌握斑图的自组织规律。

参 考 文 献

- 1 Kogelschatz U. Filamentary, Patterned, and diffuse barrier discharges. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2002, 30(4): 1400-1407
- 2 Xu XJ. Dielectric barrier discharge-properties and applications. *Thin Solid Films*, 2001, 390: 237-242
- 3 Mangolini L, Orlov K, Kortshagen U, et al. Radial structure of a low-frequency atmospheric-pressure glow discharge in helium. *Appl Phys Lett*, 2002, 80(10): 1722-1724
- 4 Laroussi M, Lu XP, Malott CM. A non-equilibrium diffuse discharge in atmospheric pressure air. *Plasma Sources Sci Technol*, 2003, 12: 53-56
- 5 Jiang N, Qian SF, Wang L, et al. Localized material growth by a dielectric barrier discharge. *Thin Solid Film*, 2001, 390: 119-122
- 6 Sakai O, Sakaguchi T, Tachibana K. Verification of a plasma photonic crystal for microwaves of millimeter wavelength range using two-dimensional array of columnar microplasmas. *Appl Phys Lett*, 2005, 87: 241505
- 7 Hitoshi H, Atsushi M. Dispersion relation of electromagnetic waves in one-dimensional plasma photonic crystals. *J Plasma Fusion Res*, 2004, 80(2): 89-90
- 8 欧阳硕. 反应扩散系统中的斑图动力学. 上海: 上海科技教育出版社, 2000, 2-7
- 9 Cross MC, Hohenberg PC. Pattern formation outside of equilibrium. *Rev Mod Phys*, 1993, 65(3): 851-1112
- 10 Ouyang Q, Swinney HL. Transition from a uniform state to hexagonal and striped Turing patterns. *Nature*, 1991, 352: 610-612
- 11 Turing AM. The chemical basis of morphogenesis. *Phil Trans R Soc London Ser B*, 1952, 327: 37-72
- 12 Bénard H. Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide transportent de la chaleur par convection en regime permanent. *Ann Chim Phys*, 1900, 7: 62-144
- 13 Faraday M. On the forms and states assumed by fluids in contact with vibrating-elastic surfaces. *Philos Trans R Soc London*, 1831, 52: 319-340
- 14 Dubois-Violette E, Durand G, Guyon E, et al. Instabilities in nematic liquid crystals. In: *Liquid Crystals*, edited by Liebert L. *Solid State Phys Suppl*. New York: Academic Press, 1978, 14, 147
- 15 Dong LF, Mao ZG, Ran JX. Spatial uniformity of dielectric barrier discharge at moderate pd values. *Chinese Phys*, 2005, 14(8): 1618-1621

1) 张远涛. 一类非线性微分方程数值解的分岔与混沌研究. 大连理工大学. 硕士论文, 2005

- 16 Dong LF, He YF, Yin ZQ, et al. Hexagon and stripe patterns in dielectric barrier streamer discharge. *Plasma Sources Sci Technol*, 2004, 13; 164—165
- 17 Radu I, Bartnikas R, Czeremuszkin G, et al. Diagnostics of dielectric barrier discharges in noble gases; Atmospheric pressure glow and pseudoglow discharges and spatio-temporal patterns. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2003, 31(3); 411—421
- 18 Gurevich EL, Zanin AL, Moskalenko AS. Concentric-ring patterns in a dielectric barrier discharge system. *Phys Rev Lett*, 2003, 91(15); 154501
- 19 Müller I, Punset C, Ammelt E, et al. Selforganized filaments in dielectric barrier glow discharges. *IEEE Transaction on Plasma Science*, 1999, 27(1); 20—21
- 20 Astrov YA, Purwins HG. Plasma spots in a gas discharge system; Birth, scattering and formation of molecules. *Phys Lett A*, 2001, 283; 349—354
- 21 Ammelt E, Astrov Yu A, Purwins HG. Hexagon structures in a two-dimensional dc-driven gas discharge system. *Phys Rev E*, 1998, 58(6); 7109—7117
- 22 Gurevich EL, Astrov Yu A, Purwins HG. Pattern formation in planar dc-driven semiconductor-gas discharge devices; Two mechanisms. *J Phys D Appl Phys*, 2005, 38; 468—476
- 23 Astrov Yu A, Müller I, Ammelt E, et al. Zigzag destabilized spirals and targets. *Phys Rev Lett*, 1998, 80(24); 5341—5344
- 24 Dong LF, Liu FC, Liu SH, et al. Observation of spiral pattern and spiral-defect chaos in dielectric barrier discharge in argon/air at atmospheric pressure. *Phys Rev E*, 2005, 72; 046215
- 25 Dong LF, Fan WL, He YF, et al. Square superlattice pattern in dielectric barrier discharge. *Phys Rev E*, 2006, 73; 066206
- 26 Dong LF, Yin ZQ, Wang L, et al. Square pattern formation in a gas discharge system. *Thin Solid Films*, 2003, 435; 120—123
- 27 Boyers DG, Tiller WA. Plasma bubble domains; A magnetic bubble analog. *Appl Phys Lett*, 1982, 41(1); 28—31
- 28 Boyers DG. A plasma bubble display; A new approach to the design of a shift-addressed AC plasma display. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1983, ED-30(5); 431—438
- 29 Ammelt E, Schweng D, Purwins HG. Spatio-temporal pattern formation in a lateral high-frequency glow discharge system. *Phys Lett A*, 1993, 179; 348—354
- 30 Zanin AL, Gurevich EL, Moskalenko AS, et al. Rotating hexagonal pattern in a dielectric barrier discharge system. *Phys Rev E*, 2004, 70; 036202
- 31 Breazeal W, Flynn KM, Gwinn EG. Static and dynamic two-dimensional patterns in self-extinguishing discharge avalanches. *Phys Rev E*, 1995, 52(3); 1504—1515
- 32 Guikema J, Miller N, Niehof J, et al. Spontaneous pattern formation in an effectively one-dimensional dielectric-barrier discharge system. *Phys Rev Lett*, 2000, 85(18); 3817—3820
- 33 Klein M, Miller N, Walhout M. Time-resolved imaging of spatiotemporal patterns in a one-dimensional dielectric-barrier discharge system. *Phys Rev E*, 2001, 64; 026402
- 34 Shirafuji T, Kitagawa T, Wakai T, et al. Observation of self-organized filaments in a dielectric barrier discharge of Ar gas. *Appl Phys Lett*, 2003, 83(12); 309—311
- 35 Radu I, Miralá SF, Czeremuszkin G, et al. High speed camera imaging and other diagnostics of dielectric barrier discharges at atmospheric pressure. *Bull Amer Phys Soc, Ser II*, 2001, 46(6); 60—61
- 36 Radu I, Bartnikas R, Czeremuszkin G, et al. Diagnostics of dielectric barrier discharges at atmospheric pressure in noble gases. In: *Proc Int Symp High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry (Hakone VIII)*, Tartu, Estonia, 2002, 124—130
- 37 Chirokov A, Gutsol A, Fridman A, et al. Analysis of two-dimensional microdischarge distribution in dielectric-barrier discharges. *Plasma Sources Sci Technol*, 2004, 13; 623—635
- 38 Kogelschatz U. Dielectric-barrier discharges; Their history, discharge physics, and industrial applications. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2003, 23(1); 1—46
- 39 Müller KG. Structures at the electrodes of gas discharge. *Phys Rev A*, 1988, 37(12); 4836—4845
- 40 Šijača DD, Ebert U, Rafatov I. Oscillations in dc driven barrier discharges; Numerical solutions, stability analysis, and phase diagram. *Phys Rev E*, 2005, 71; 066402
- 41 Zhang YT, Wang DZ, Wang YH. Two-dimensional numerical simulation of the splitting and uniting of current-carrying zones in a dielectric barrier discharge. *Physics of Plasmas*, 2005, 12; 103508
- 42 Gurevich EL, Liehr AW, Amiranashvili S, et al. Role of surface charges in dc gas-discharge systems with high-ohmic electrodes. *Phys Rev E*, 2004, 69; 036211
- 43 Astrov YA, Logvin YA. Formation of clusters of localized states in a gas discharge system via a self-completion scenario. *Phys Rev Lett*, 1997, 79(16); 2983—2986
- 44 Schenk CP, Schütz P, Bode M, et al. Interaction of self-organized quasiparticles in a two-dimensional reaction-diffusion system; The formation of molecules. *Phys Rev E*, 1998, 57; 6480—6486
- 45 Schütz P, Bode M, Purwins HG. Bifurcations of front dynamics in a reaction-diffusion system with spatial inhomogeneities. *Physics D*, 1995, 82; 382—397
- 46 Strümpel C, Astrov YA, Purwins HG. Nonlinear interaction of homogeneously oscillating domains in a planar gas discharge system. *Phys Rev E*, 2000, 62(4); 4889—4897
- 47 Gurevich SV, Bödeker HU, Moskalenko AS, et al. Drift bifurcation of dissipative solitons due to a change of shape; Experiment and theory. *Physica D*, 2004, 199; 115—128
- 48 Bödeker HU, Röttger MC, Liehr AW, et al. Noise-covered drift bifurcation of dissipative solitons in a planar gas-discharge system. *Phys Rev E*, 2003, 67; 056220