



2010年中国区用户年会

氢气交叉场等离子体开关 的模拟

国家自然科学基金项目批准号：50877003

项目依托单位：北京化工大学

合作单位：中电集团第12研究所

张明

中电集团第12研究所
国家自然科学基金课题组成员

主要内容

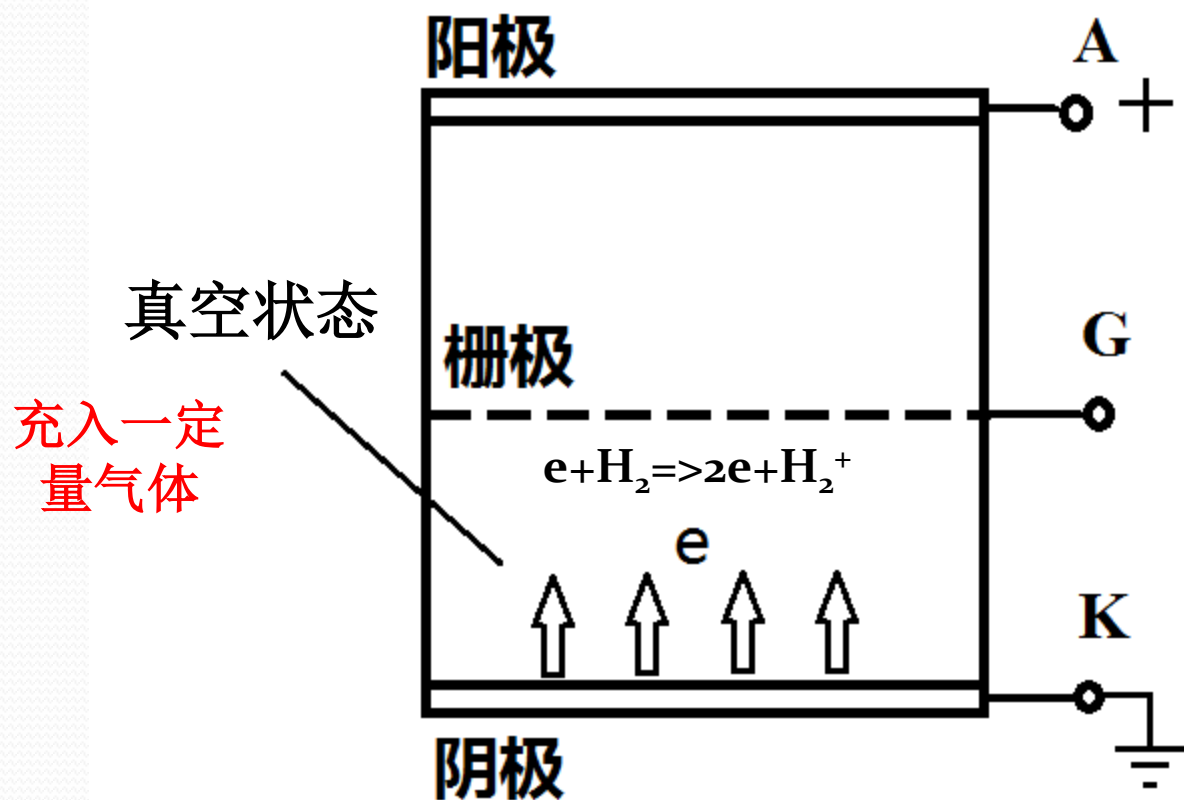
- 1. 等离子体开关的介绍
- 2. 相关理论的讨论
- 3. 氢气模型的建立
 - 定迁移率模型
 - 变迁移率模型
- 4. 模拟对实际工作的帮助
- 5. 结束语

1. 等离子体开关的介绍

等离子体开关，又称气体放电开关，是一种大功率脉冲调制器件，被广泛的用于国防科工以及医疗器件生产等领域。是雷达、加速器等装置的核心部件。



等离子体开关的起源



等离子体开关的类型

闸流管

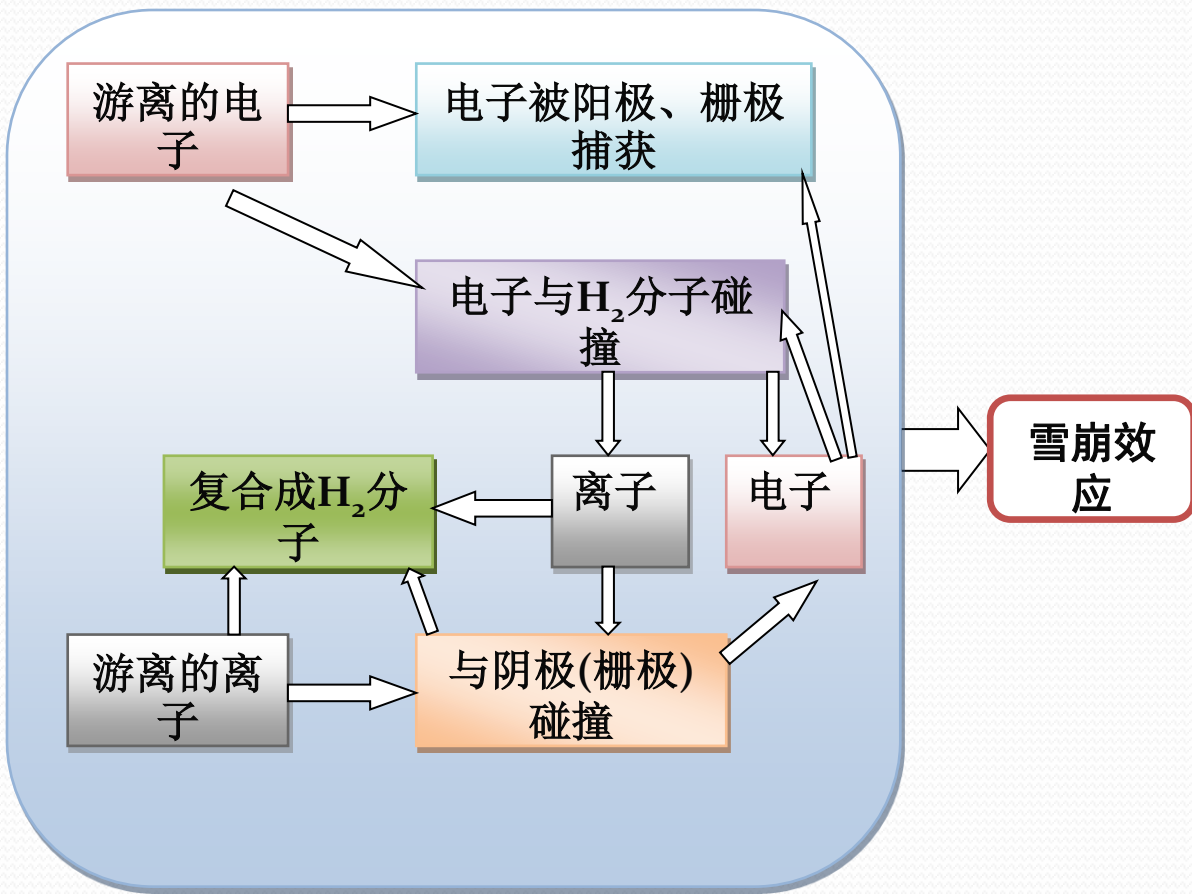
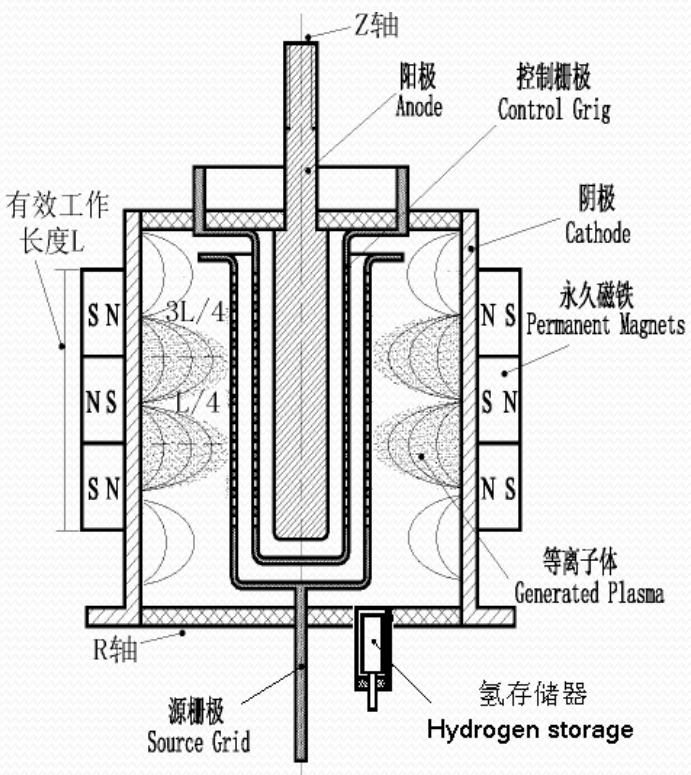
触发管

伪火花放电管

微波天线开关管

交叉场调制开关管

氢气交叉场等离子体开关



2. 等离子体相关理论的讨论

氢气分子的电离可以由下列方程组来描述：

连续性方程

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla j_e = S_e$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla j_i = S_i$$

$$S = S_e = S_i = \alpha \cdot |j_e| = \sigma_{iz} \cdot n_g \cdot |j_e|$$

泊松方程

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{e}{\epsilon_0} (n_i - n_e)$$

粒子通量

$$j_e = -\nabla(D_e n_e) + b_e n_e \nabla \varphi$$

$$j_i = -\nabla(D_i n_i) + b_i n_i \nabla \varphi$$

电子迁移率与多个因素有关，包括压强、电场、磁场等等

离子扩散系数和迁移率可以近似看做定值
 $b_i = 1.12 \text{m}^2/\text{V s}$, $D_i = 0.029 \text{m}^2/\text{s}$

爱因斯坦关系式

$$D_e = k \cdot T_e \cdot b_e$$

$$D_i = k \cdot T_i \cdot b_i$$

与电子能量分布函数EEDF有关

关注的地方

1) 电子的能量分布函数EEDF

2) 电子迁移率 b_e

3) 电子产率-源项S

1) 电子的能量分布函数EEDF

定义

$$n_\varepsilon = n_e \cdot \varepsilon = n_e \cdot (3k \cdot T_e / 2)$$

$$j_\varepsilon = [-\nabla(D_e n_\varepsilon) + b_e n_\varepsilon \nabla \varphi] \cdot 5/3$$

能量的连续性方程

$$\frac{\partial n_\varepsilon}{\partial t} + \nabla j_\varepsilon + E \cdot j_\varepsilon = S_\varepsilon$$

$$S_\varepsilon = \sigma \cdot n \cdot |j_\varepsilon|$$

电子总碰撞截面

$$\sigma = \sigma_{el} + \sigma_{ex} + \sigma_{iz}$$

σ_{el} 弹性碰撞截面

σ_{ex} 激发截面

σ_{iz} 电离截面

2) 电子迁移率 b_e

在没有磁场的存在时，确定电场及压强后可以初步的将 b_e 看做一个定值——**定迁移率模型**

而在电场与磁场（交叉场）同时存在时， b_e 将与电子的回旋频率有关——**变迁移率模型**

3) 电子产率-源项S

$$S = S_e = S_i = \alpha \cdot |j_e| = \sigma_{iz} \cdot n_g \cdot |j_e|$$

截面的理论分析具有先天的局限性，因而引入实验数据进行耦合分析将更可行。

3. 氢气模型的建立

我们一直致力于解决的问题：

如何让等离子体放电模型更可信。

1) 电子迁移率的确定



建立氢气平行平板放电模型，通过实验数据确定对应场强下的迁移率的大小

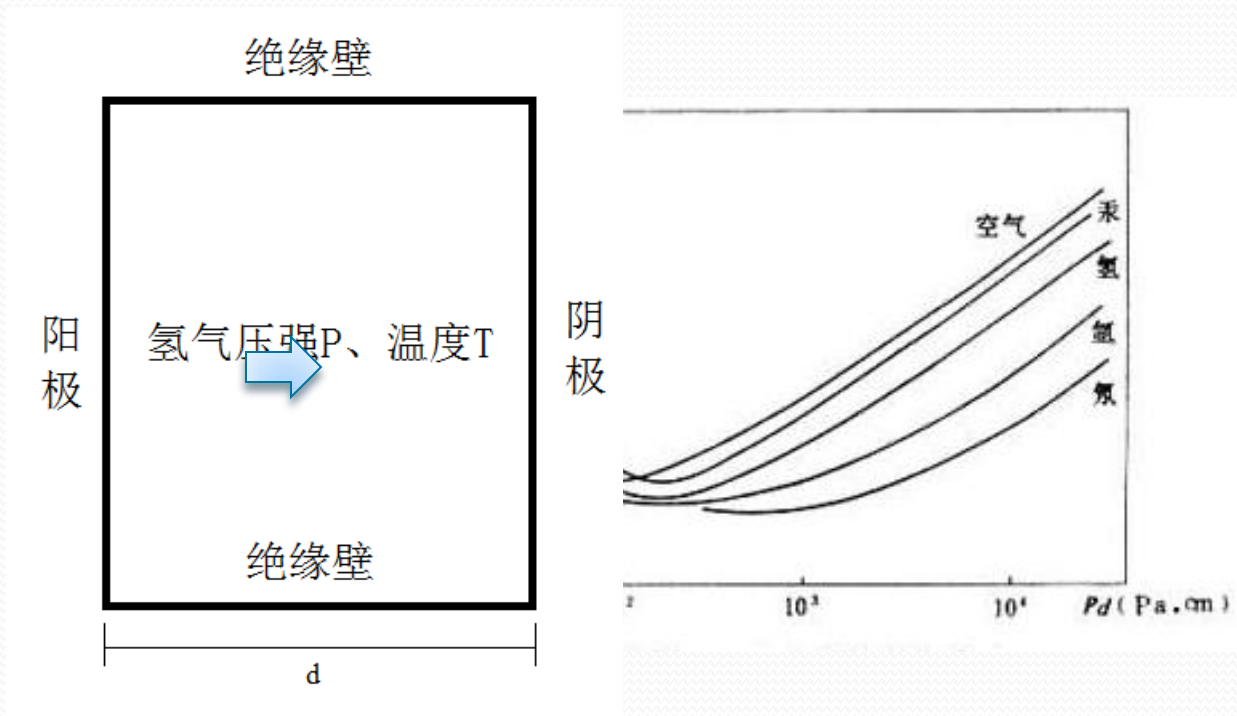
2) 碰撞截面 σ 的确定



从大量实验数据中归纳电子与氢气分子发生碰撞反应的各个截面

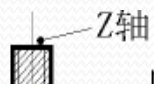
1) 电子迁移率的确定

在管型研制中，**帕邢定律**和**实测的帕邢曲线**是设计器件的一个标准，也是我们确定迁移率的标准。



定迁移率模型

磁场的引入

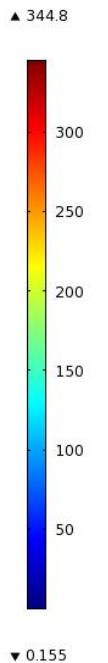
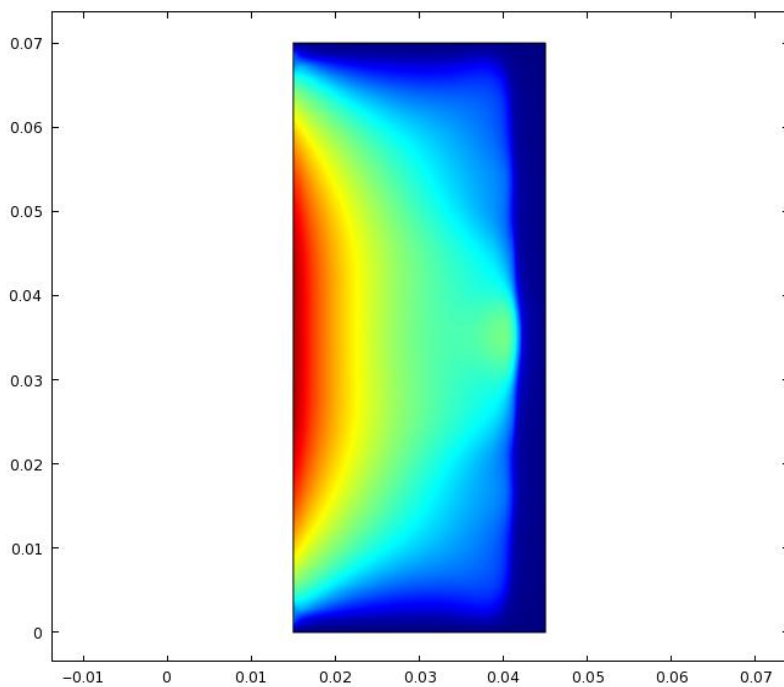
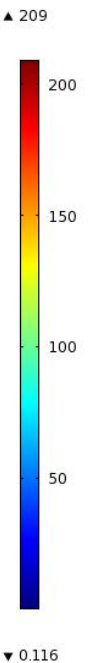
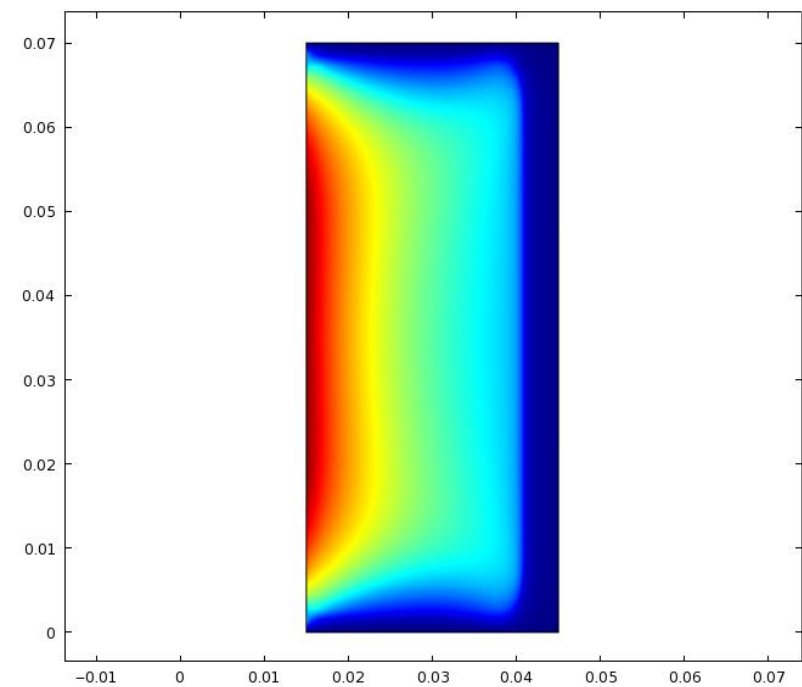


dc.abs_gflux_ne*1.6E-19 (1/(m²*s))

COMSOL MULTIPHYSICS

dc.abs_gflux_ne*1.6E-19 (1/(m²*s))

COMSOL MULTIPHYSICS



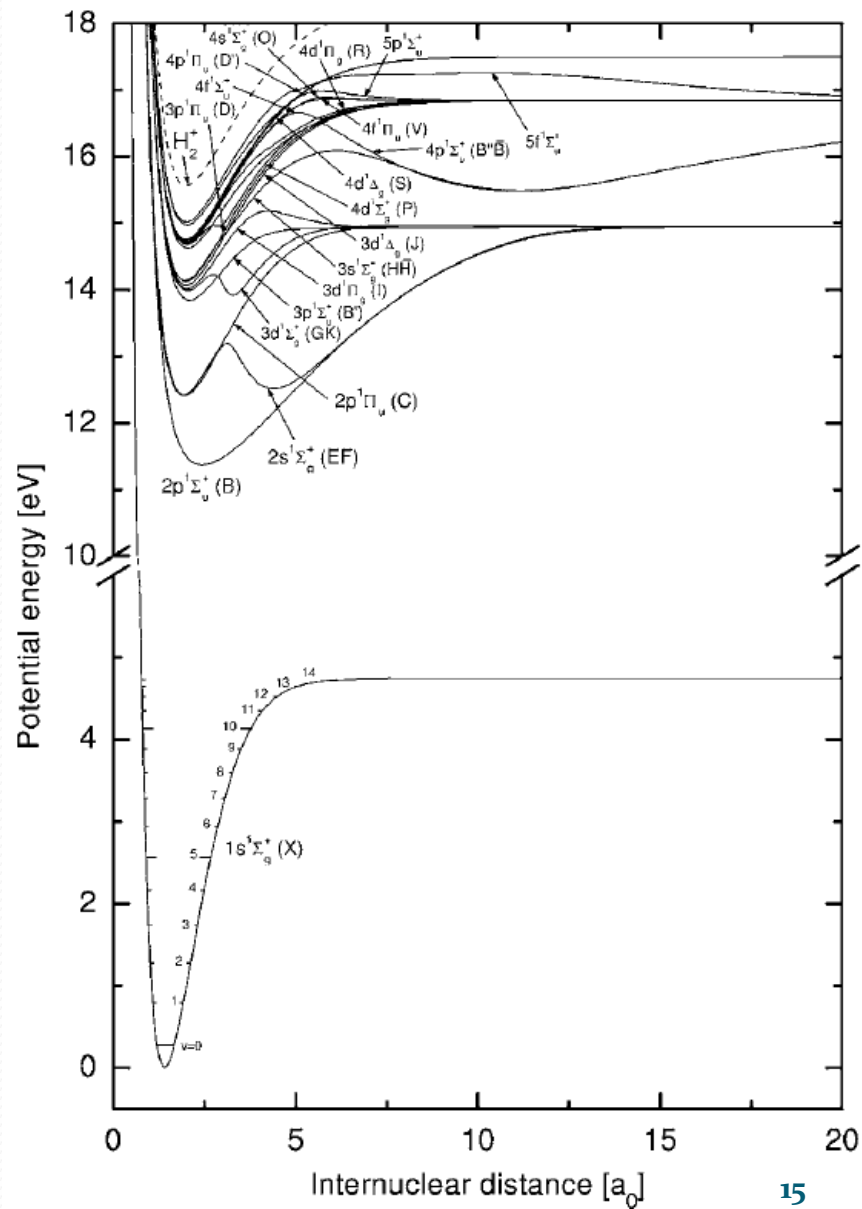
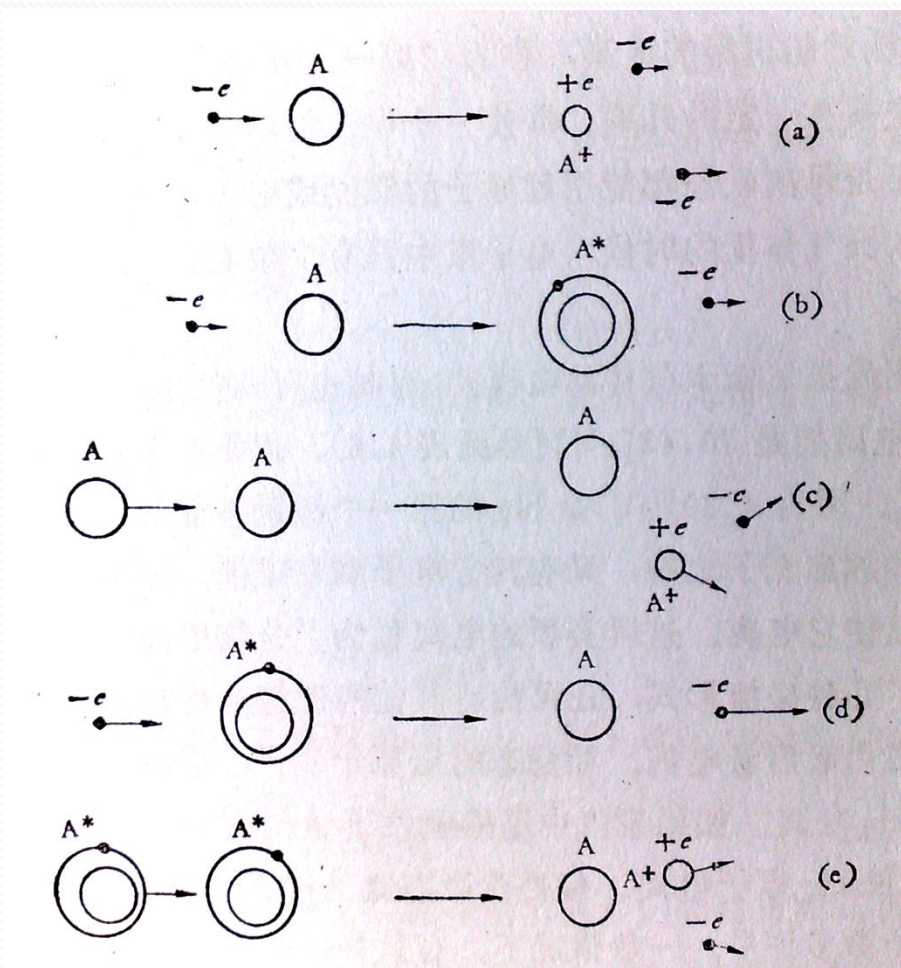
不加磁场

源栅极
Source Grid

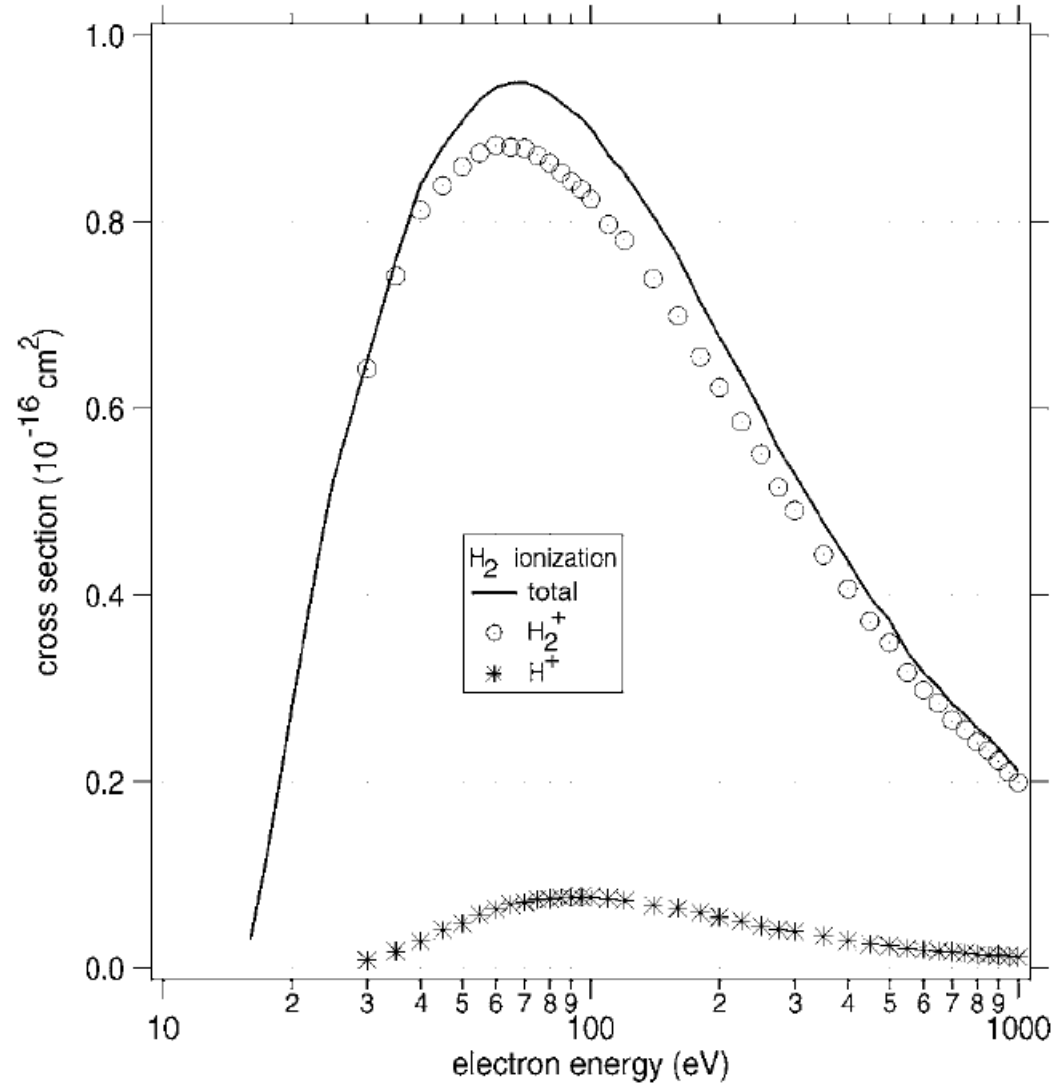
氢存储器
Hydrogen storage 加入磁场

变迁移率模型

2) 碰撞截面的确定



碰撞減速



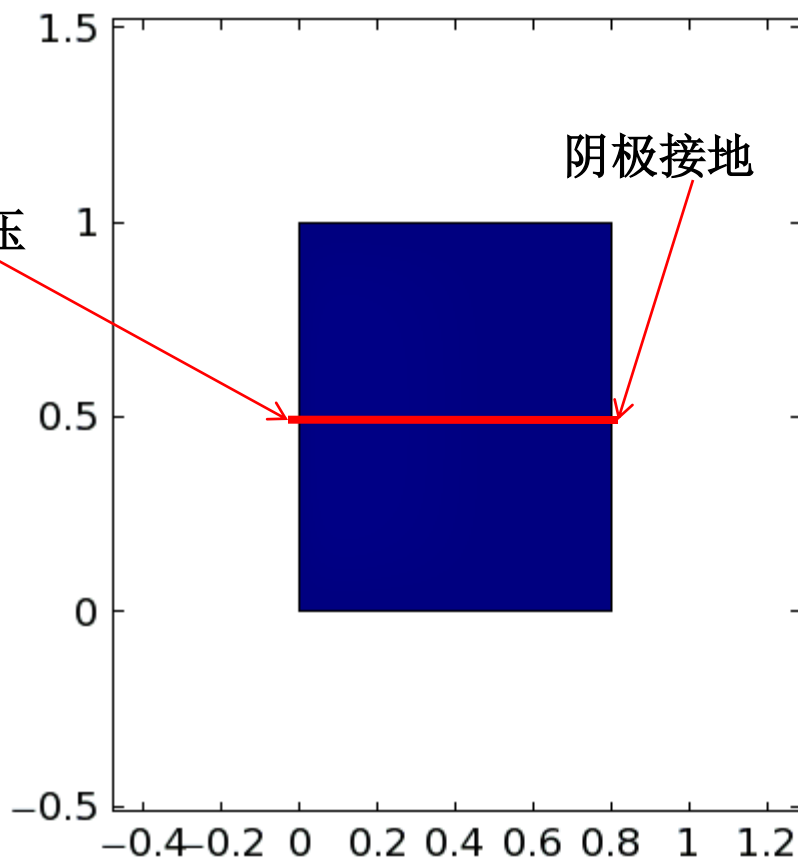
3) 结果展示

电子密度随时间的变化

ne[1/m³]

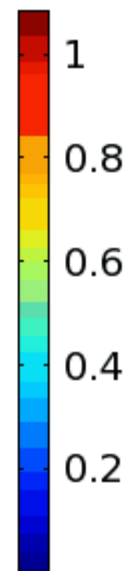
源栅极280V电压

阴极接地



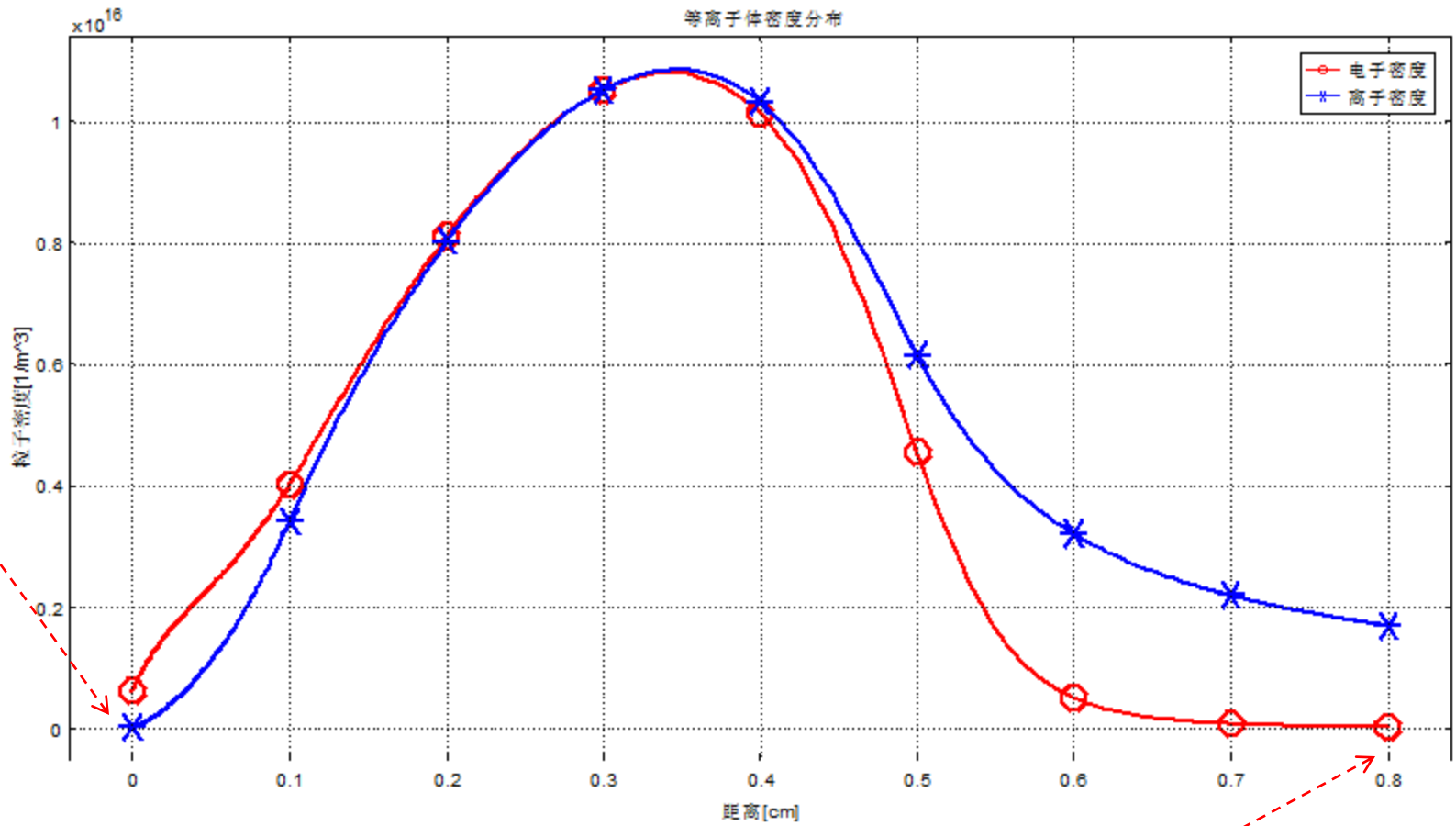
COMSOL MULTIPHYSICS

▲ 8.775×10^{13}
 $\times 10^{16}$



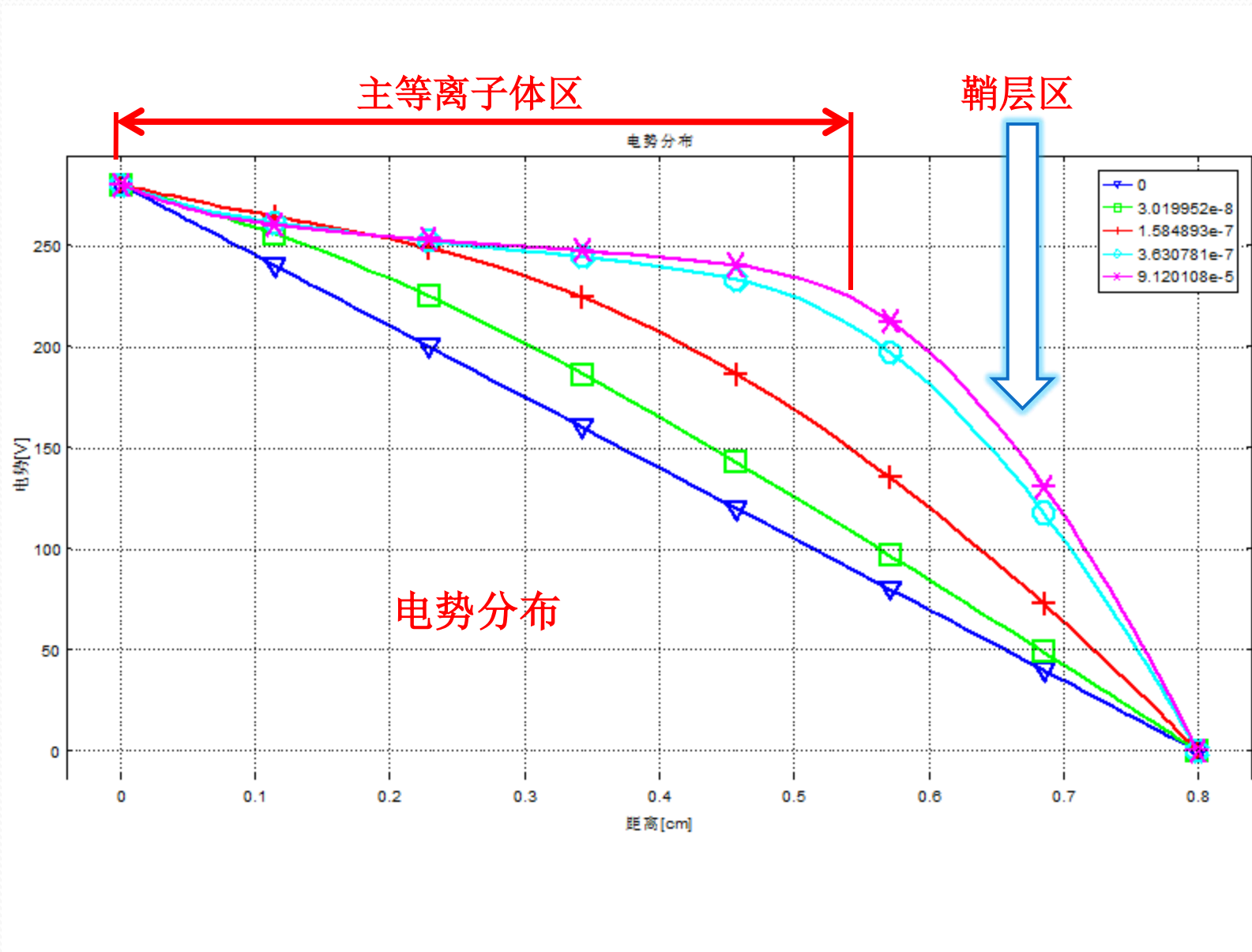
▼ 1.063×10^{10}

等离子体密度分布

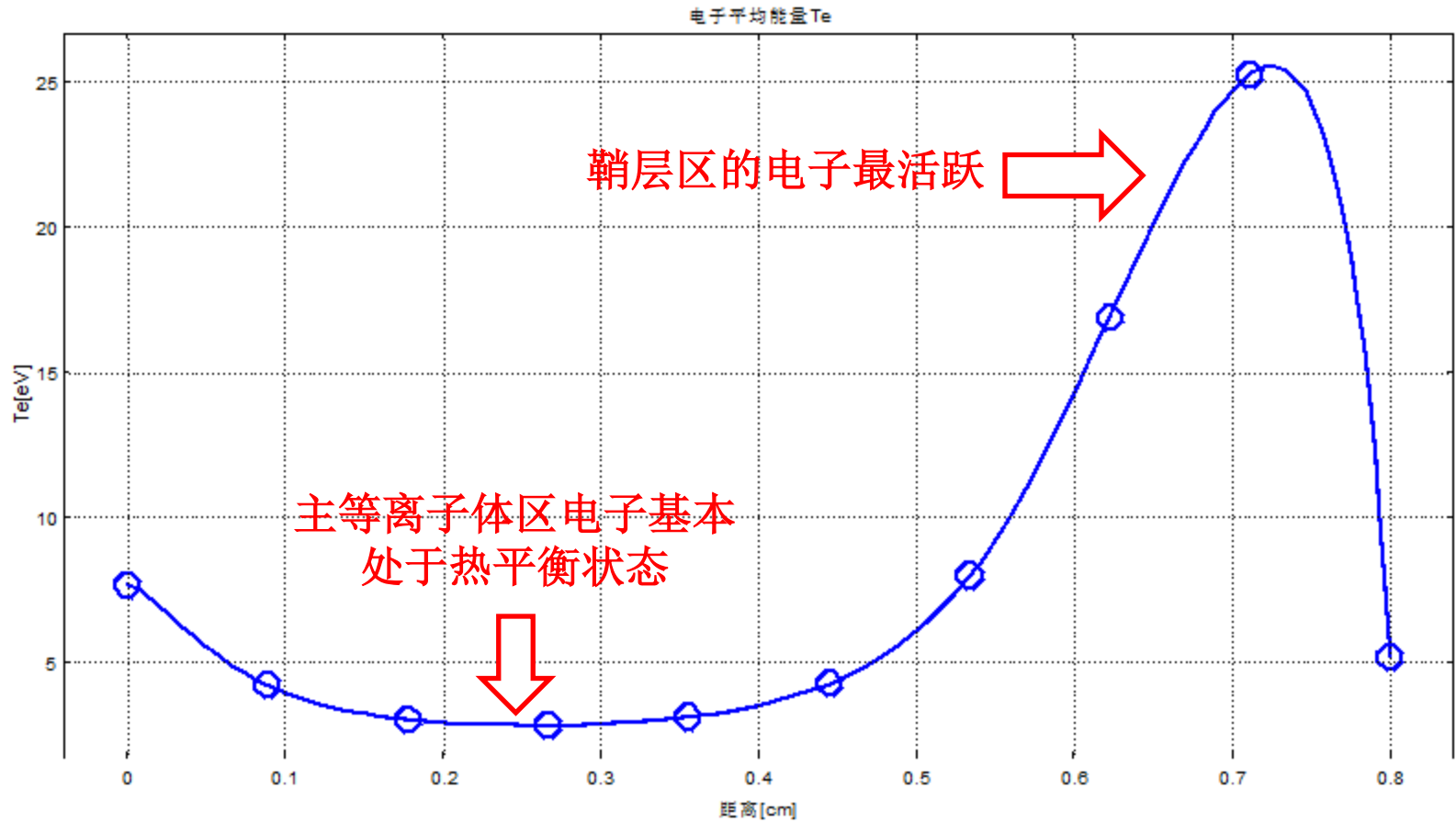


源栅极

阴极



电子平均能量 T_e 的分布



4.模拟对实际工作的帮助

- 1) 通过模拟，我们确定了磁环磁感强度的大小，在进行测试实验时发现，对预电离的稳定性有了极大的提高。
- 2) 模拟结果中控栅需500V点火电压，这与实验结果吻合很好。
- 3) 模拟得出了管内静态时的交叉场分布。特别是在静电场的分布的指导下，能很好的对栅极屏蔽阳极电场的的能力进行评估。

结束语

感谢Comsol软件以及中仿科技对我们工作的支持！

我的报告完毕，欢迎大家批评指正，谢谢！