

用光泵磁共振技术探测位移电流

郑晨 06301030005

(复旦大学物理系, 上海, 200433)

摘要: 作者重做了伦琴在 19 世纪末做的一个著名的物理实验——探测位移电流, 而且对实验仪器进行了改进, 发生装置沿用了伦琴的设计, 探测装置使用了光泵磁共振仪。通过本实验, 直接探测了麦克斯韦方程组中的位移电流项产生的磁场。

关键词: 麦克斯韦方程组, 伦琴, 位移电流, 光泵磁共振

Optical pumping magnetic resonance technology to detect displacement current

ZHENG Chen

(Fudan University, ShangHai, 200433)

Abstract: The author redo the famous physics experiment called displacement current detection which was done by Roentgen in the late 19th century. In the experiment, we replace the detection device with optical pumping magnetic resonance instrument, while the occurrence of device was designed by Roentgen. Through the experiment, we can directly detect of the Maxwell equations of the displacement current generated magnetic field.

Keyword: Maxwell's equations, Roentgen, displacement current, optical pumping magnetic resonance

一、引言

物理学家伦琴在 1885—1888 年间做了一个著名的实验, 直接验证了麦克斯韦方程组中所预言的位移电流项的存在, 这个经典的实验对近代物理学的发展起了重要的作用, 曾被誉为 19 世纪最著名的物理实验之一^[1]。

本文作者沿用了伦琴设计的发生装置, 产生稳恒的位移电流磁场, 然后排除了各种可能的干扰因素, 利用光泵磁共振技术探测了位移电流磁场。

二、实验原理

1. 发生装置

根据麦克斯韦方程组, 有

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

传导电流 \vec{J} 和位移电流 $\epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ 都能产生磁场, 本实验的目的就是探测位移电流产生的磁场。

实验的困难之处有两个: 首先, 在通常的通电导体中, 相比于传导电流, 位移电流十分微弱。

其次, 对于探测到的磁场, 如何确定是位移电流产生的而不是传导电流产生的? 因为若存在

位移电流, 即 $\epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \neq 0$, 而 \vec{E} 随时间变化追根溯源必须有电荷的移动, 电荷移动必然会产生传导电流, 所以一般情况下, 存在位移电流时必定存在传导电流。下面先介绍伦琴设计的

实验装置, 看他是如何巧妙地克服以上困难的。

对于一般的平板电容器，在给它充电的过程中，板间会产生位移电流磁场，如果在两极板之间放一块电介质，电介质内的极化强度会随电容器极板的电压增加而增加，极化强度随时间变化会产生极化电流，所以可以通过探测极化电流产生的磁场验证麦克斯韦方程组中所预言的位移电流项的存在。也就是说，定义了

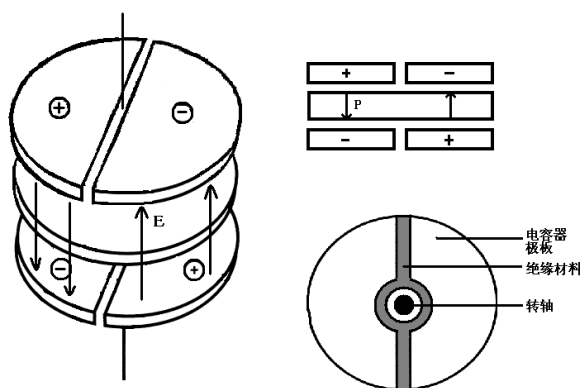
$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}, \quad \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$

在介质中，麦克斯韦方程组的第四个方程变为

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{其中 } \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{P}}{\partial t})$$

只要设法让 $\frac{\partial \vec{P}}{\partial t} \neq 0$ ，就可以探测位移电流 $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ 产生的磁场。

伦琴设计的实验装置如图一所示，他将电容器的两个极板都沿直径分成两部分，中间留出一个狭缝，上下极板的狭缝平行，把横向相邻的两个半圆分别加上相反的电荷，而且上下



图一、位移电流磁场的发生装置

相对的两个半圆带的电荷也相反。在这个特殊的平板电容器的板间放一个介质盘，这样在狭缝左侧的介质内的极化强度与狭缝右侧的介质内的极化强度方向相反。介质盘的中心穿过一根转轴，转轴通过极板的狭缝的中心，但不与极板接触。当电容器的极板固定不动并存在恒定的电势差后，介质盘由转轴带着转动，当盘内任意一处的极化强度在穿过极板的狭缝时，其

极化强度的方向就被倒转过来，一个垂直方向的位移电流 $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ 就会在电介质体中流过，如果介质盘以恒定的速度转动，就可以产生稳定的位移电流磁场^[1]。实验中电容器极板的电荷量不变，所以排除了传导电流的影响；由于在外电场下，介质盘的表面会产生极化电荷，介质盘转动时极化电荷随之运动也会产生磁场，这个磁场与位移电流磁场的产生机制不同，必须排除它的影响，因为这个磁场的磁感线回路在竖直面内，而位移电流磁场的磁感线回路在水平面内，所以在探测时两者不会互相干扰。

有了这些还是不够的，因为位移电流磁场毕竟十分微弱，还需要一个灵敏的探测装置，

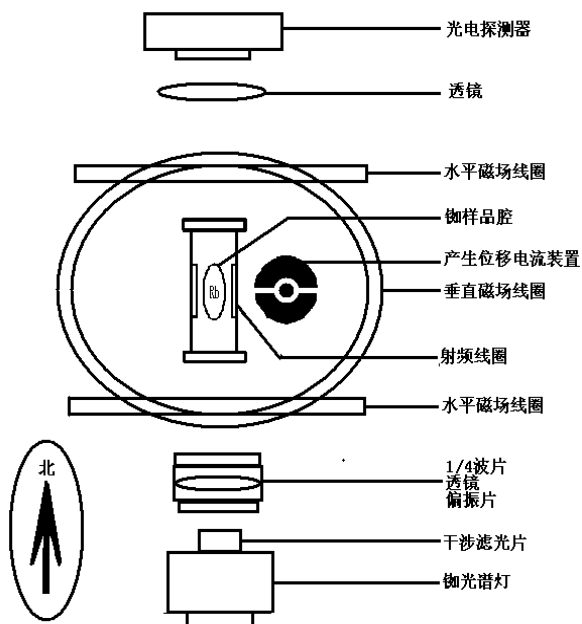
伦琴当时探测磁场用类似卡文迪许测量万有引力常数时使用的放大测微小受力的方法，而作者使用了更先进的光泵磁共振技术，因为一般的光泵磁共振仪可以测量 10^{-7}T 的微弱磁场，合理地设置实验装置各参数后，位移电流磁场的大小是可以到达这个数量级的。

2. 探测装置

光泵磁共振仪是一种可以精确测量磁场的仪器，它的工作原理是先利用圆偏振光激发气态原子（铷），以打破原子的 Zeeman 能级间的玻尔兹曼热平衡分布，造成基态能级的偏极化（称为光抽运），然后利用磁共振效应，对偏极化的能级布居进行扰动，使光抽运的速率发生变化，因为采用光探测的方法观察抽运速率变化，所以灵敏度很高。产生磁共振的条件是

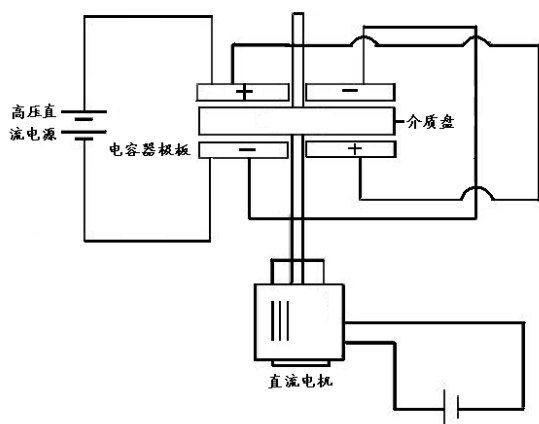
$$h\nu = \mu_B g_F B_{\parallel}$$

其中 ν 为射频场的频率， μ_B 为玻尔磁子， g_F 为对应于原子总角动量和总磁矩的朗德因子， B_{\parallel} 为水平方向的磁感应强度，它包括扫场、地磁场水平分量、水平线圈磁场等^[2]。

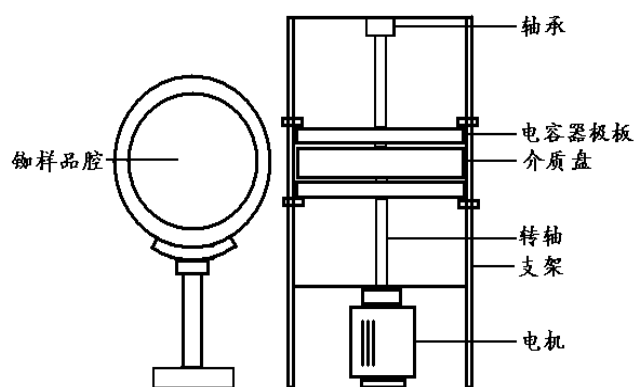


图二、光泵磁共振仪的俯视图

三、实验仪器



图三、电路图



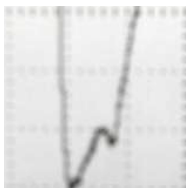
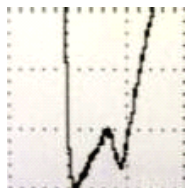
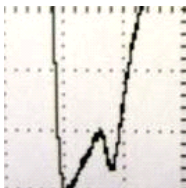
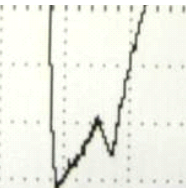
图四、结构简图

产生位移电流磁场的装置的电路图如图三所示。电容器用高压直流电源充电，电压最高可达 $5 \times 10^4\text{V}$ ，电容器极板的材料为无氧铜，电介质用的是聚四氟乙烯，厚度为 5mm ，半

径为 40mm，上下极板紧贴介质盘，极板的狭缝宽为 8mm。介质盘由直流电机带动，电机的最高转速为 8000r/min，为了防止转轴有进动，在转轴的一端安装了一个轴承。本实验采用的是 DH807A 型光泵磁共振仪，发生装置放在铷样品泡的旁边，转轴竖直，介质盘与铷样品泡的中心高度相同，如图四所示。狭缝的方向与光泵磁共振仪的光轴方向垂直，因为狭缝附近的位移电流磁场最强，要紧挨铷样品腔。由于电介质表面的极化电荷运动产生的磁场的大小是恒定的，而产生磁共振所需的射频场只有频率参量，所以前者不会影响射频场，只需用垂直磁场将其抵消即可。

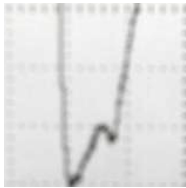
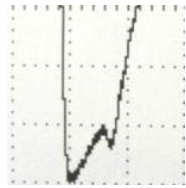
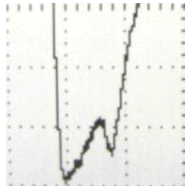
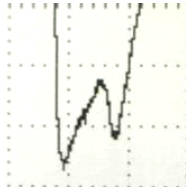
四、实验内容及结果

因为直流电机本身存在磁场，所以实验的第一步是测试电机的磁场对实验的影响，其中包括电机运转时产生的附加磁场的影响，电机机身转动和平动时磁场的变化，另外还测试了电机运转时产生的振动对光泵磁共振仪信号的影响。先将光泵磁共振仪调到磁共振状态，电机逆时针运转（俯视），电机以不同速度运转时，观察到的信号如下表所示：

电机电压(直流)/V	0	10	15	20
示波器图形				

可见，小峰的高度几乎没有变化，说明电机运转时产生的附加磁场可以忽略。接下来使机身有微小的平动和转动，发现信号的变化很大，所以电机必须牢牢固定。将电机固定好后，电机运转时产生的振动对信号的影响很小。

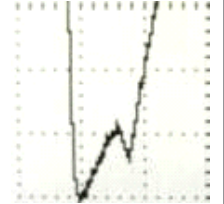
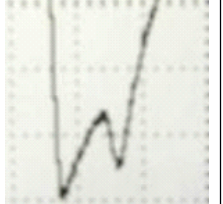
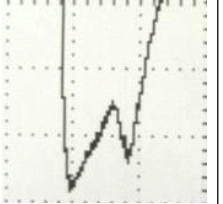
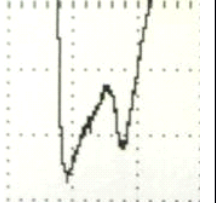
实验的第二步是探测位移电流磁场，各种情况下观察到得信号如下表所示，其中电机的电源电压为 20V 时，电机转速为 80rps。

电容器极板高压/ 电机电压	0kV/0V	8kV/0V	0kV/20V	8kV/20V
示波器图形				

可见，8kV/0V（电容器极板高压/电机电压）和 0kV/20V 时的峰高与 0kV/0V 时相近，而 8kV/20V 时，峰高明显高于前三者，实验重复多次，结果相同。这说明当电容器极板不加高压时，介质盘转动不会产生附加磁场，当介质盘不转而加上 8kV 高压后也不会产生附加磁

场，只有两者兼具，才会有附加磁场产生。

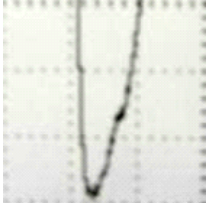
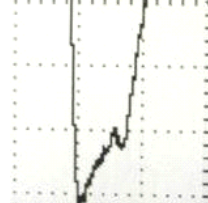
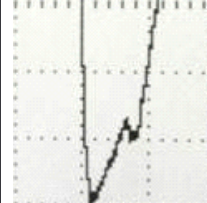
当高压不变，电机以不同速度运转时，观察到的信号如下表所示：

电容器极板高压/ 电机电压	8kV/0V	8kV/10V	8kV/15V	8kV/20V
示波器图形				

可见，随着转速提高，峰高有增大的趋势，这与理论预期是相符的，因为介质盘转速提高，

意味着 $\frac{\partial \vec{P}}{\partial t}$ 值增大，根据 Maxwell 方程组，位移电流磁场大小增加。从以上的实验结果似乎

可以得出探测到位移电流磁场的结论，但是改变电机的转动方向（顺时针）后，得到的实验结果与预期的并不一致，观察到的信号如下表所示：

电容器极板高压/ 电机电压	0kv/0v	0kv/20v	7.6kv/20v
示波器图形			

当不加高压时，电机运转产生了附加磁场，而加上高压后，信号却没有明显变化，现象的原因尚不清楚，有待于进一步的研究。

除了以上遇到的这个问题，这个实验还有很多未完成的内容有待于继续探索：

1、设置以下几种电容器极板的带电方式，观察磁共振信号变化：

$$\frac{+-}{-+}, \frac{-+}{+-}, \frac{++}{--}, \frac{--}{++}$$

其中横线上的符号代表电容器上极板的两个半圆的带电情况，横线下的符号代表电容器下极板的两个半圆的带电情况。

2、确定实验仪器各参数（狭缝宽、介质盘厚度等）的最佳值。

3、计算位移电流磁场的大小。

4、分别测量电容器电压、介质盘转速与位移电流磁场大小的关系。

五、小结

这个实验的发生装置基本上沿用了伦琴的设计，伦琴的这个实验曾在美国《物理学世界》杂志的一个“历史上最美的十个物理实验”评选中获得了提名奖，可见其设计的确很

经典，不会有太大改动。本实验对原实验的改进之处在于使用了光泵磁共振技术探测微弱磁场，实验取得了阶段性的成功，未来还有很多工作要做，一旦完全成功，这个实验可以作为大学近代物理实验课程中“光泵磁共振实验”的扩展内容在各高校中推广。

致谢

感谢张新夷老师和徐为青老师对本实验的支持与帮助。

参考文献

- [1]Peter Dawson,Rontgen's other experiment[J],The British Journal of Radiology,1997,70 (Peter Dawson 著,游胤涛、马世红译,伦琴对电磁理论的重要贡献[J],物理,第36卷第4期)
- [2]吴思诚,王祖铨,近代物理实验[M],北京:北京大学出版社,2005