

## 光磁共振实验中异常光抽运信号的深入探讨

实验教学

周健, 俞熹, 王煜

(复旦大学物理系, 上海 200433)

**摘要:**利用改装的 DH807 光磁共振实验仪, 直接观察了铷泡处磁场的变化。由于电感的作用, 真实的磁场变化与外源扫场波形有很大区别。定量地测量了光抽运弛豫饱和值与磁场的关系, 研究了抽运波形随磁场变化周期的关系, 并探讨了未完全抵消的垂直磁场对光抽信号幅度的影响, 分析了方波和三角波扫场时遇到的异常光抽运信号的成因。

**关键词:**光磁共振; 弛豫过程; 弛豫饱和值; 光抽运信号

**中图分类号:** O482.531

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-4642(2009)04-0001-05

### 1 引言

北京大华无线电仪器厂生产的 DH807 型光磁共振实验仪为目前国内广泛使用的光磁共振实验装置, 该装置操作简单, 性能可靠<sup>[1]</sup>。但在实验过程中发现除正常的光抽运信号外, 还存在各种异常的光抽运信号。在深入研究了 DH807 型光磁共振实验仪结构后, 针对其不足, 对其进行了改装, 重新搭建了光电信号放大电路, 并使用霍尔传感器直接观察铷泡处的磁场值<sup>[2]</sup>。利用改进后的实验装置, 纠正了仪器本身交流放大电路对抽运信号产生的扭曲, 并使用霍尔传感器真实地反映铷泡处磁场的变化, 并在此基础上对真实的光抽运信号进行了探讨和解释。

### 2 DH807 光磁共振实验仪的不足及问题

1) 实验过程中发现, 仪器的光电接收器输出的信号只有交流成分, 直流成分完全被光电池后面的放大电路中的电容截去, 导致无法得到光电池输出的直流成分的信息(该直流成分对于研究抽运信号的弛豫饱和值与外磁场的大小之间的关系以及对异常光抽运信号的解释至关重要)。同时由于该电容很大, 对真实的光抽运信号产生了扭曲, 不利于做深入的分析和研究。

2) 实验过程中用于对比的水平扫场信号是从信号发生器中直接取出的, 并非水平场线圈中真实的电流信号, 更不能代表铷泡处的磁场的变化

的信号。考虑到水平场线圈实际电感很大, 加入的方波/三角波信号难以产生精确的方波/三角波磁场, 许多观察到的难以解释的异常的光抽运信号由此产生。

### 3 光抽运信号分析

改装前后三角波与方波扫场时抽运信号见图 1。图 1(a) 为扫场半周期  $T=100$  ms 改装前的抽运信号(上)与信号发生器输出的方波扫场信号(下), 其中不同抽运峰对应的磁场值  $A$  和  $A^*$  点相差很大, 不同抽运峰  $C$  和  $D$  强度不同; 图 1(b) 为扫场半周期  $T=25$  ms 改装前的抽运信号(上)与信号发生器输出的三角波扫场信号(下), 除不同抽运峰对应的磁场值相差很大外, 抽运峰畸变为异常的圆顶; 图 1(c) 为扫场半周期  $T=100$  ms 改装后的抽运信号(上)与霍尔传感器给出的铷泡处真实的方波磁场变化信号(下), 其中不同抽运峰对应的磁场值  $A$  和  $A^*$  点在同一水平线上, 不同抽运峰  $C$  和  $D$  强度相同; 图 1(d) 为扫场半周期  $T=25$  ms 改装后的抽运信号(上)与霍尔传感器给出的铷泡处真实的三角波磁场变化信号(下), 其中不同抽运峰对应的磁场值  $A$  和  $A^*$  点在同一水平线上, 抽运信号仍为正常形状。

#### 3.1 常见的异常光抽运信号

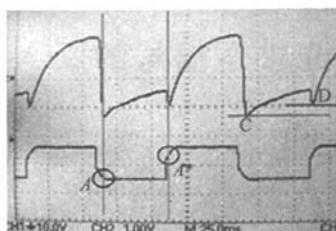
1) 使用未改装的 DH807 型光磁共振实验仪实验时, 抽运峰对应着磁场零点, 故所有抽运峰对应的磁场值应该相同。但是在图 1(a) 中发现不同

收稿日期: 2008-08-25

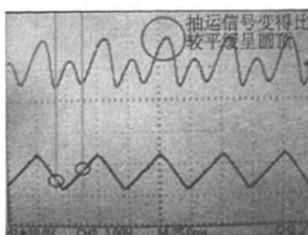
基金项目: 国家基础科学人才培养基金资助(No. J0730310)

作者简介: 周健(1987-), 男, 四川绵阳人, 复旦大学物理系 2005 级本科生。

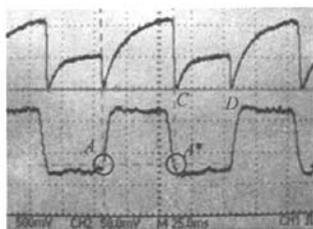
指导教师: 俞熹(1978-), 男, 浙江东阳人, 复旦大学物理系讲师, 博士, 研究方向为低温扫描显微镜、核磁共振及成像技术。



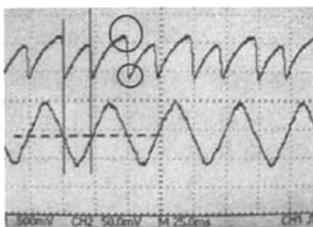
(a)



(b)



(c)



(d)

图 1 改装前后三角波与方波扫场时抽运信号的对比

抽运峰对应的磁场值  $A$  和  $A^*$  点相差很大。

2) 按通常的解释<sup>[3]</sup>, 磁场过零后一瞬间由于能级简并再分裂, 在方波扫场时, 抽运信号强度都应该一样大。但是在图 1(a) 中,  $C$  和  $D$  点不在同一水平线上。

3) 在图 1(a) 中, 2 个抽运峰的弛豫饱和值相差很大, 该现象在许多文献中都有提及<sup>[4-6]</sup>, 但未能给出原理上的解释。

4) 正常的抽运信号在磁场过零的位置时, 光电信号的强度应该陡然下降, 但是在图 1(b) 中, 发现在较高频率的三角波扫场时, 抽运信号斜率变缓, 顶部变得圆滑, 与标准的抽运信号在形状上有很大的差异。

### 3.2 利用改装后的光磁共振实验装置观察抽运信号

对比改装前后的三角波扫场抽运信号可发现:

1) 改装前三角波扫场时, 由于装置本身放大器后面的大电容充放电的影响, 抽运信号的形状畸变, 呈圆顶 [图 1(b)], 而改装后的装置观察到的抽运信号弛豫过程波形完全正常, 抽运峰尖锐 [图 1(d)]。

2) 改装前抽运信号对应的扫场值零点相差很远 [图 1(a) 和 (b)], 从显示的波形难以解释其原因, 而改装后的装置其抽运信号对应的磁场零点严格地在一条水平线上 [图 1(c) 和 (d)], 与理论预测完全相符。

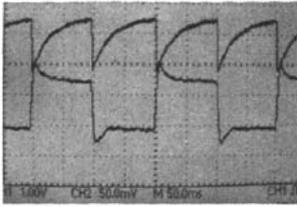
3) 改装前扫场波形为信号源的波形, 不能代表铷泡处磁场真实的变化; 改装后发现方波/三角波在亥姆霍兹线圈中产生的磁场与信号源的波形有一定差距, 由于电感的作用, 三角波的顶角呈圆弧状 [图 1(d)], 方波为前后沿有突起的梯形波 [图 1(c)], 且由于信号源本身性能局限, 产生的信号与线圈的反馈叠加后导致波形不光滑, 故在后续的实验中使用性能更稳定的 XFD-8B 超低频信号发生器的功率输出直接控制水平扫场线圈, 该信号发生器周期  $0.2 \text{ ms} \sim 100 \text{ s}$  可调。

### 3.3 抽运信号形状与扫场周期的关系

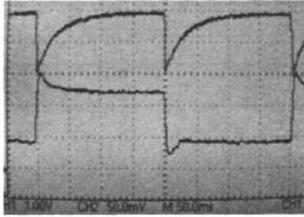
利用现在信号源周期可调的优势, 可以细致研究抽运波形与扫场周期的关系。

对比图 2(a) 和 (b) 可发现, 在该条件下, 光抽运信号真实的弛豫时间约为  $130 \text{ ms}$ , 在半周期  $T=200 \text{ ms}$  时, 可以看到完整的抽运信号的弛豫过程, 而在实验仪器本身采用的  $100 \text{ ms}$  半周期下, 看到的为不完整的抽运信号, 其弛豫过程尚未结束便开始了下一半周期的抽运。

概括地来讲, 当磁场变化半周期在  $130 \text{ ms}$  以下时, 相当于截取不同比例的完整的抽运信号, 见图 3。当半周期取  $30 \text{ ms}$ , 则抽运信号应该是截取图 3 框内的部分 (图 4), 其抽运信号幅度为完整信号的  $60\%$  左右, 通过实验验证, 该预测与实际波形完全一致。



(a)扫场半周期  $T=100\text{ ms}$



(b)扫场半周期  $T=200\text{ ms}$

图 2 XFD-8B方波扫场光抽运信号(上)和铷泡处真实的磁场变化信号(下)

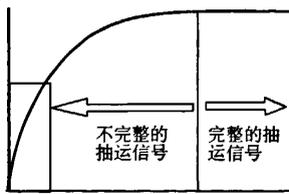


图 3 不同扫场周期下抽运信号形状示意图



图 4 半周期  $T=30\text{ ms}$  时预期的抽运信号形状

### 3.4 未完全抵消的垂直磁场对光抽运信号的影响

在文献[2]中,细致讨论了光抽运信号弛豫饱和值和磁场的关系及其原理,利用该关系,已经解释了一高一矮的异常抽运信号出现的原因,利用其数据,还可以大致估计未完全抵消的垂直磁场对光抽运信号的影响。

目前一般的资料中认为当总磁场过零时, Zeeman 子能级简并再分裂时才会出现抽运信号<sup>[7]</sup>。但实验中清楚地发现,即使垂直场没有完全抵消(总磁场永远不可能过零),也有可能看到抽运信号,只是幅度较小。从光抽运信号弛豫饱和值和磁场的关系可以看到即使磁场不过零,只

要当它接近零时,就可以观察到抽运信号。

结合图 5<sup>[2]</sup>和图 6 可以看到,抽运信号底的位置大致等于总磁场绝对值的最低点(等于地磁场垂直分量尚未抵消的部分)所对应的弛豫饱和值。利用该关系,还可以估算出地磁场的垂直分量到底控制在多少以内仍可以看到抽运信号。

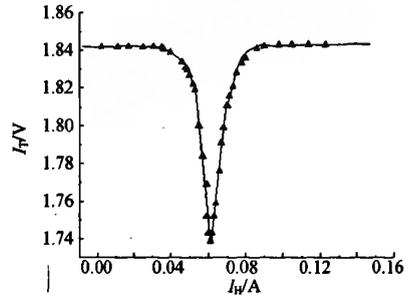


图 5 静态磁场下弛豫饱和和电压值与外磁场的关系

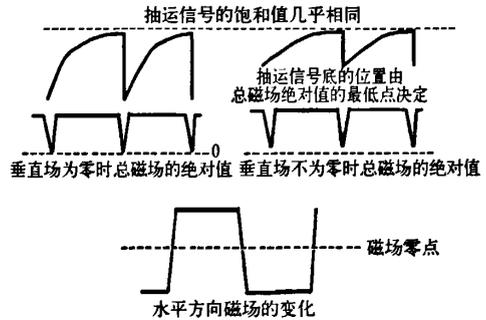


图 6 未抵消的垂直磁场与光抽运信号的关系示意图

读图 5 可知如果水平场电流小于 0.046 A 或大于 0.076 A 时,其弛豫饱和值与大磁场下的弛豫饱和值相比已相差不大。注意到磁场过零时水平场电流为 0.061 A,即  $\Delta I_{\text{水平max}}=0.015\text{ A}$ ,由于  $B \propto \frac{N}{R}I$ ,代入水平和垂直线圈的匝数和半径数据,得到  $\Delta I_{\text{垂直max}}=0.023\text{ A}$ 。

在本实验室位置,地磁场垂直分量在垂直场电流为 0.047 A 时抵消,所以垂直场电流在 0.024~0.070 A 之间时,都可以看到一定的抽运信号,只是偏离 0.047 A 越远,抽运信号幅度越小,该关系在实际观察中得到了很好的验证。

### 3.5 磁场过零点斜率与抽运信号的关系

由图 5 知,铷泡对光的吸收强度仅在磁场零点附近很灵敏地随相应磁场变化,故当磁场过零

处斜率很大时,磁场迅速变向,系统在短时间内处于非平衡态,伴随着对左旋偏振光的强烈吸收,出现较尖锐较强的吸收峰;而当磁场斜率过零很缓,相当于磁场以缓慢的速度在零点附近变化,系统更接近准静态变化,此时出现的吸收峰强度较小,吸收峰退化为平缓的下降。

### 3.6 对各种异常光抽运信号的解释

利用前面的结论,现在解释所有实验中观察到的异常光抽运信号。为了便于与通常的实验结果对比,本部分使用DH807型光磁共振实验仪自带的信号源驱动扫场线圈(由于该信号源不稳定,其磁场波形不光滑,其波形质量不及XFD-8B超低频信号发生器),但仍使用霍尔传感器直接探测铷泡处磁场变化(图7)。

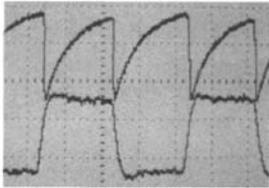


图7 扫场半周期  $T=100\text{ ms}$  时,使用仪器自带信号源方波扫场时抽运信号(上)和铷泡处实际磁场变化波形(下)

#### 3.6.1 方波扫场

对于方波,其由于扫场线圈的电感作用,其产生的真实磁场波形变为前后沿带突起的梯形波(为清楚起见,见示意图8)。



图8 简化的方波扫场磁场变化波形图

1)当磁场零点(虚线)接近方波前沿的突起时[图9(a)],根据3.4中类似的理由,由于A点离磁场零值较近,产生较大的抽运峰,B点离磁场零值较远,产生较小的抽运峰,过B点后,磁场陡然增大,出现一段弛豫过程B~C。

2)当磁场零点(虚线)穿过前沿突起A时(局部放大)[图9(b)],磁场先在A点过零,产生1个抽运峰,由于A\*磁场斜率很缓,相当于磁场以缓慢的速度在零点附近变化,系统此时更接近准静

态变化,故在A\*点附近,抽运信号有一反常的平缓下降的过程,而非通常情况下的较尖锐的抽运峰,此后由于磁场一直很接近零点,故由图8中的关系知,抽运信号一直在较低的位置处于饱和状态,直到在B点,磁场再次过零,产生第2个抽运峰(很小),过B点后,磁场陡然增大,出现一段典型的弛豫过程B~C。

3)当磁场零点(虚线)位于梯形的上半部分时[图9(c)],磁场在A,B,C点过零,产生3个抽运峰,但是由于AB间磁场小于BC间磁场,由图8中弛豫饱和值与磁场的关系可知,AB间的抽运信号的顶低于BC间的抽运信号的顶,且由于AB比BC短,所以2个周期的抽运信号宽度不同。

4)当磁场零点(虚线)位于梯形的中部时[图9(d)]此时得到的便是正常的抽运信号。

当磁场零点扫过梯形的下半部分时,抽运信号与上述讨论完全对称,此处略去。

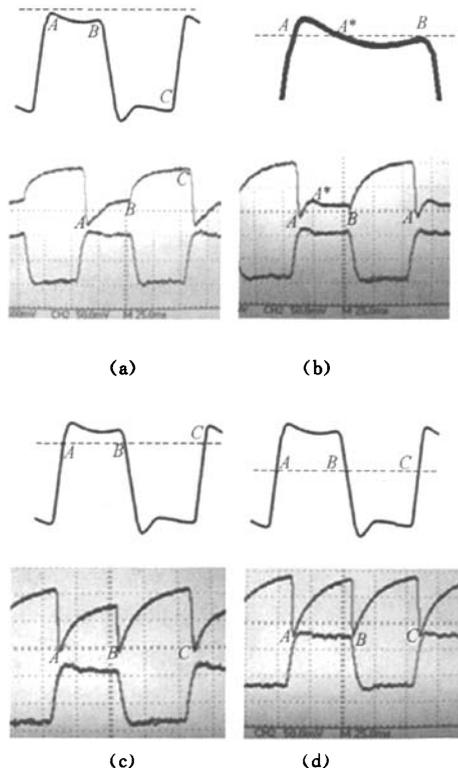


图9 扫场半周期  $T=100\text{ ms}$ ,使用仪器自身信号源方波扫场时,真实磁场波形与磁场零点的对应关系示意图(上),示波器观察到的各种异常光抽运信号(中)及霍尔传感器给出的铷泡处真实的磁场变化信号(下)

### 3.6.2 三角波扫场

对于三角波其由于扫场线圈电感作用,其产生的真实磁场波形变为圆顶的三角(图 10)。注意:为了观察清楚,对图 10 中波形进行了横向放大,此时示波器每格时间为 10 ms,故与图 1(d)相比抽运信号显得比较圆。图 11 中三角波顶部附近并不是完全对称的,左侧斜率比较大,右侧斜率比较小。

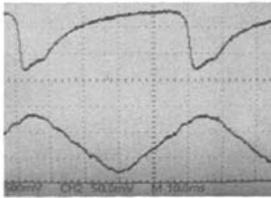


图 10 扫场半周期  $T=100\text{ ms}$ ,使用仪器自带信号源三角波扫场时抽运信号(上)和伽泡处实际磁场变化波形(下)

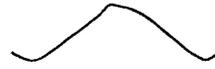


图 11 简化的三角波扫场磁场变化波形图

1)当磁场零值(虚线)接近三角波顶部时[图 12(a)],磁场在 A 点与零点相切,出现抽运峰 A,但由于三角形顶部右侧较平缓,磁场一直离零点不远,故可以观察到抽运信号在一段时间内处于较低位置,然后才因为磁场继续增大而出现典型的弛豫曲线。

2)当磁场零值(虚线)穿过三角波上部时[图 12(b)],注意到三角波左右并不完全对称,右侧斜率较缓,所以抽运信号 B 比 A 略高一点(理由见 3.5)。从图中可以清楚地看到 BA 间磁场比 AB 间磁场大,所以其抽运峰的饱和值更高。

3)当磁场零值(虚线)穿过三角波中央时[图 12(c)],此时得到正常的光抽运信号。

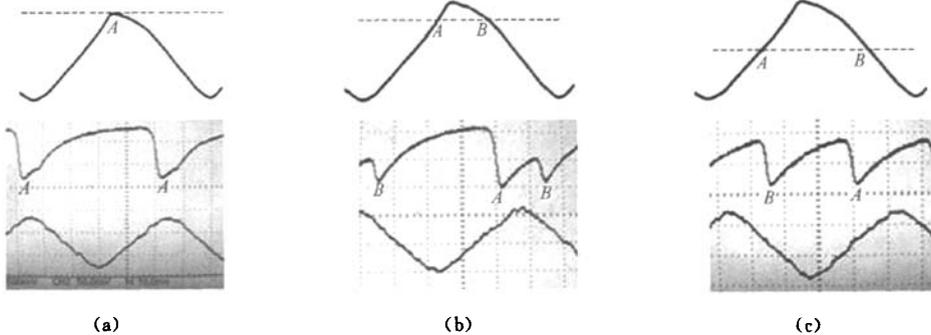


图 12 扫场半周期  $T=25\text{ ms}$ ,使用仪器自身信号源三角波扫场时,真实磁场波形与磁场零点的对应关系示意图(上),示波器观察到的各种异常光抽运信号(中)及霍尔传感器给出的伽泡处真实的磁场变化信号(下)

当磁场零值穿过三角波下半部分时,抽运信号与上述讨论完全对称,此处略去。

## 4 结束语

通过对 DH807 型光磁共振实验仪的改装,测量伽泡处实测磁场的变化,观察并纠正了仪器本身交流放大电路带来的对抽运信号的扭曲;解释了光磁共振实验中异常光抽运信号产生的原因:由于线圈电感的作用,伽泡处真实的磁场变化与外源扫场波形有很大的区别,且仪器本身的放大电路进一步扭曲了真实的抽运信号。在此基础上,利用改装后的仪器研究了各种因素对抽运波

形的影响,并利用这些结果对实验中遇到的所有异常光抽运信号给予了进一步的探讨和解释。

## 参考文献:

- [1] 大华无线电仪器厂. DH807 型光磁共振实验装置技术说明书[Z]. 2006.
- [2] 周健,俞薰,王煜. 光磁共振实验中壁弛豫过程与外磁场关系的精确测量与理论分析[J]. 大学物理, 2009,28(6):待发.
- [3] Department of Physics, MIT. Optical pumping of rubidium vapor experiment instructions [Z]. 1992.

(下转第 10 页)

- [6] Kamshilin A A, Paivasaari K. Polarization self-modulation in photorefractive crystals—a new approach for adaptive detection of ultrasonic surface displacement [J]. *Opt. Mater.*, 2001, 18:41-44.
- [7] Kamshilin A A, Paivasaari K, Khomenko A V, et al. Polarization self-modulation of the nonstationary speckle field in a photorefractive crystal [J]. *Opt. Lett.*, 1999, 24(12):832-834.
- [8] 陈军. 光学位相共轭及其应用[M]. 北京:科学出版社, 1999.
- [9] 李书民, 唐军. 应用迈克耳孙干涉仪研究压电陶瓷的特性[J]. *物理实验*, 2008, 28(6):42-43.

## Measuring the characteristic of PZT with dynamic grating transfer technique

CHEN Yun-peng, HU Yi, CHEN Li-xuan, FAN Xue-lan, ZHAO Hong-e, CHENG Zheng-wei  
(Department of Physics, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Diffraction features of dynamic holographic gratings in a photorefractive  $\text{LiNbO}_3$  crystal are observed. The frequencies and fast phasic shift of the vibrations of a piezoelectric crystal are measured using dynamic grating transfer technique. The experiment results indicate that the frequency change of the output intensity equals the vibration frequency of PZT, a linear relationship exists between the driving voltage and the quick phasic amplitude.

**Key words:** grating transfer technique; photorefractive effect;  $\text{LiNbO}_3$  crystal; PZT

[责任编辑:任德香]

(上接第 5 页)

- [4] 王书运. 光泵磁共振实验中扫场及线圈产生水平场方向的判定[J]. *实验室研究与探索*, 2008, 27(7): 67.
- [5] 刘海霞. 光泵磁共振实验探究[J]. *大学物理实验*, 2005, 18(4):23.
- [6] 侯清润, 王钧炎, 王天时, 等. 光泵磁共振实验中测量地磁场水平分量的方法[J]. *物理与工程*, 2007, 17(3):36.
- [7] 吴思诚, 王祖铨. 近代物理实验[M]. 北京:北京大学出版社, 1995.
- [8] 汪华英, 李兰秀, 张仲秋, 等. 光泵磁共振信号幅度与射频场振幅的关系[J]. *物理实验*, 2005, 25(7): 30-32.

## Abnormal optical pumping signals in optical-magnetic resonance experiment

ZHOU Jian, YU Xi, WANG Yu

(Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** With the improved DH807 optical-magnetic resonance apparatus, the change of the magnetic field in the Rb vapor bulb is directly observed. Because of the inductance of the coil, there is difference between the change of the real magnetic field and external scanning voltage. The relation between the Rb vapor's saturated absorption rate and the magnetic field is quantitatively measured, the relation between the shape of optical pumping signal and period of magnetic field is studied. The influence of the un-offsetted vertical magnetic field on the optical pumping signals is discussed, and all the abnormal optical pumping signals during the experiment are explained.

**Key words:** optical-magnetic resonance; wall relaxation process; relaxation saturation; optical pumping signal

[责任编辑:任德香]

# 光磁共振实验中异常光抽运信号的深入探讨

作者: [周健](#), [俞熹](#), [王煜](#), [ZHOU Jian](#), [YU Xi](#), [WANG Yu](#)  
作者单位: [复旦大学, 物理系, 上海, 200433](#)  
刊名: [物理实验](#) **PKU**  
英文刊名: [PHYSICS EXPERIMENTATION](#)  
年, 卷(期): 2009, 29(4)  
引用次数: 0次

## 参考文献(8条)

1. 大华无线电仪器厂 [DH807型光磁共振实验装置技术说明书](#) 2006
2. [周健](#), [俞熹](#), [王煜](#) [光磁共振实验中壁弛豫过程与外磁场关系的精确测量与理论分析](#) 2009(6)
3. Department of Physics MIT [Optical pumping of rubidium vapor experiment instructions](#) 1992
4. [王书运](#) [光泵磁共振实验中扫场及线圈产生水平场方向的判定](#)[期刊论文]-[实验室研究与探索](#) 2008(7)
5. [刘海霞](#) [光泵磁共振实验探究](#)[期刊论文]-[大学物理实验](#) 2005(4)
6. [侯清润](#), [王钧炎](#), [王天时](#), [陈宜保](#) [光泵磁共振实验中测量地磁场水平分量的方法](#)[期刊论文]-[物理与工程](#) 2007(3)
7. [吴思诚](#), [王祖铨](#) [近代物理实验](#) 1995
8. [汪华英](#), [李兰秀](#), [张仲秋](#), [林露芳](#), [崔伟](#) [光泵磁共振信号幅度与射频场振幅的关系](#)[期刊论文]-[物理实验](#) 2005(7)

## 相似文献(1条)

1. 期刊论文 [周健](#), [俞熹](#), [王煜](#), [ZHOU Jian](#), [YU Xi](#), [WANG Yu](#) [光磁共振实验中壁弛豫过程与外磁场的关系](#) -[大学物理](#) 2009, 28(6)

利用改进后的DH807型光磁共振实验装置,在静态磁场下精确测量了抽运信号的弛豫饱和值与外磁场的关系,从而得到壁弛豫速率与外磁场的关系,并建立模型对其原理进行了探讨.

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_wlsy200904001.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wlsy200904001.aspx)

下载时间: 2009年12月9日