

深入理解光泵磁共振

摘要 (Abstract): 前面我已经做过这个实验,但是没有深入理解。本文主要讨论光泵磁共振实验中我们采用方波和三角波对光抽运信号和磁共振信号的影响,以及关于如何才能得到好的抽运信号和磁共振信号作深入阐述。

关键词 (Keywords): 光抽运信号, 感应跃迁, 共振信号

引言 (Introduction): 五十年代初期 A.Kastler 等人提出了光抽运 (Optical Pumping, 又称光泵) 技术。光抽运是运用圆偏振光束激发气态原子的方法以打破原子在所研究的能级间的波尔兹曼热平衡分布,造成所需的布居数差,从而在低浓度的条件下提高了共振强度,这时再用相应频率的射频场激励原子的磁共振。由于光量子的能量比射频量子高七八个数量级,所以探测信号的灵敏度得到很大的提高。

二三十年来用光抽运-磁共振-光探测技术对于许多原子、离子和分子进行了大量的研究,增进了我们对微观粒子结构的了解。

实验理论 (Theory parts):

光抽运产生的机理

铷原子的超精细结构能级及其在弱磁场中的塞曼能级如图 1 所示:

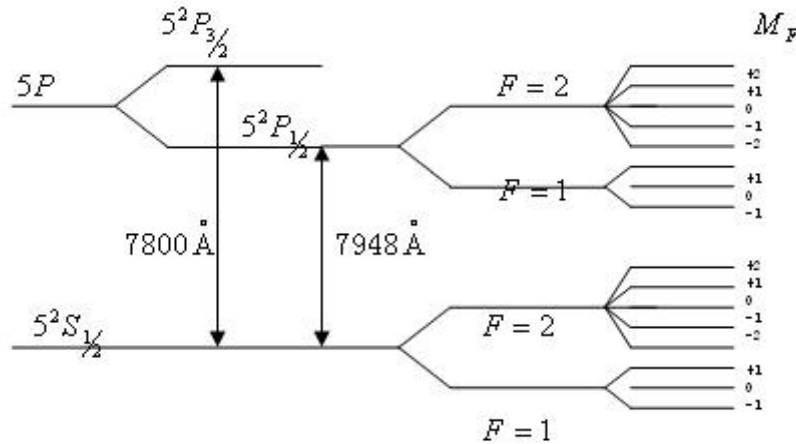


图1: ^{87}Rb 的超精细能级及其塞曼分裂

当用波长为 7948 \AA 的 σ^+ 共振光 (即 $D_1\sigma^+$ 光) 照射气态 ^{87}Rb 时, $5^2S_{1/2}$ 态的原子吸收了 7948 \AA 的 σ^+ 共振光,便产生从 $5^2S_{1/2}$ 态各塞曼支能级到 $5^2P_{1/2}$ 能级的激发跃迁;另一方面,跃迁到 $5^2P_{1/2}$ 态的粒子在经历了大约 10^{-8} s 以后将通过自发跃迁返回到基态各支能级。当基态原子受激发跃迁到第一激发态,再由第一激发态自发跃迁回基态,基态 $M_F = +2$ 能级上的粒子

数就会增加，而非 $M_F = +2$ 各能级上的粒子数会相应减少，这样，当光持续照射，经若干循环后，基态 $M_F = +2$ 能级上的粒子数就会大大增加。随着粒子数逐渐被抽运到 $M_F = +2$ 能级上，能够吸收 $D_1\sigma^+$ 光的粒子数减少，对光的吸收随着减弱，透过样品的光逐渐增强。当抽运到 $M_F = +2$ 能级的粒子数达到饱和时， $D_1\sigma^+$ 光将不再被粒子所吸收，透过样品的光强达到最大而不再变化，这就是光抽运效果。光抽运的效果使所有原子由各个方向的均匀取向变成只有 $M_F = +2$ 的取向，形成偏极化。

实验分析 (Analysis):

通过示波器观察抽运信号

产生的扫场信号是由纯交流信号 $B_{\text{交}}$ （方波或三角波）和一个直流分量 B_0 叠加而成。当调节改变交流信号 $B_{\text{交}}$ 振幅时，在一定范围内，直流分量 B_0 按一定比例随之变化，且 B_0 略大于 $B_{\text{交}}$ 信号的峰峰值的半，以保证交流信号 $B_{\text{交}}$ 不失真。

样品 Rb 同时受到三个磁场的作用：轴向为水平方向的直流磁场 B_0 和扫场 B_S ；轴向为竖直方向的垂直磁场 B_{\perp} 。垂直磁场 B_{\perp} 的方向必须与地磁场垂直分量的方向相反，目的是消除地磁场的影响。而一般让 $B_0 = 0$ ，并设带直流分量的方波扫场 B_S 和地磁场水平分量 $B_{E//}$ 方向相反，则水平方向叠加的外磁场 $B = \pm B_0 \pm B_{\text{交}} + B_{E//}$ ，如图 2 所示。从图可知 B 在正-负-正变化，这就提供了观察光抽运的条件。

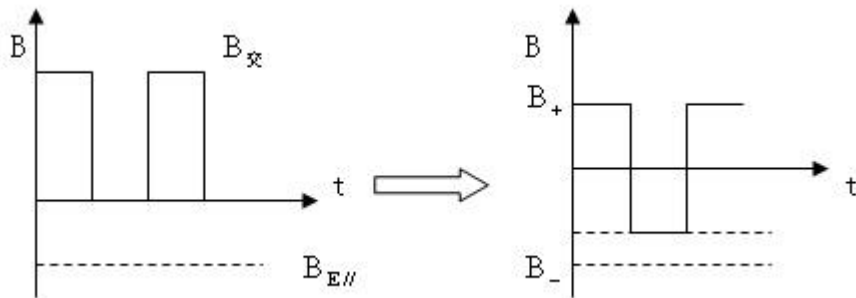


图2: 扫场与地磁场水平分量的合成

在图 3 中，我们来分析水平总磁场在 ABC 段的作用：

- AB 段，样品处于刚建立的外磁场中，发生塞曼分裂，则铷原子吸收 $D_1\sigma^+$ 光。随着原子被抽运到 $M_F = +2$ 能级上，可吸收的光原子数变少，透射光增强。
- BC 段，当抽运到 $M_F = +2$ 能级上的粒子数达到饱和后，透射样品的光强达到最大值而不变化。
- C 点，当扫场过零点并反向时，塞曼子能级跟随发生简并再分裂。重新分裂后各塞曼子能级上粒子数近乎相等。对 $D_1\sigma^+$ 光的吸收到达最大，透射光最小，对应光抽运峰。

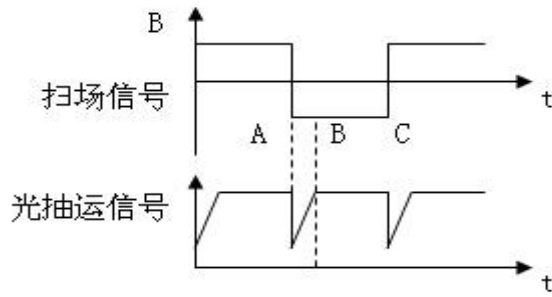


图 3: 正常情况下的光抽运信号

当图 2 中 $|B_+| \neq |B_-|$ 时, 则有图 4 所示情形。这是因为: 塞曼分裂时, 两相邻能级间能量差与外磁场有如下关系 $\Delta E = g_F \mu_B B$, 当外场 B 较大的时候 ΔE 也随之变大。处于各能级上的

粒子数服从波尔兹曼 (Boltzmann) 分布:
$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right)$$

其中为下能级和上能级的简并度, 我们通常取 $g_1 = g_2$ 则有 $\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right)$, 因而 ΔE 增大

时, 各能级间粒子数差也增大。此时对应的较高的抽运峰, 在 $D_1\sigma^+$ 光照射下达到偏极化的速度也越快, 接收到的光信号也会越快的达到最强, 表现为图中的光电输出曲线的斜率越大。

反之, B 较小时, ΔE 也比较小, $\frac{N_2}{N_1}$ 也相应较小, 对应较低的抽运峰。由于以上原因, 所以当正反磁场的大小不同时, 观察到的光抽运信号在磁场正反两个方向上不完全相同或不等幅。

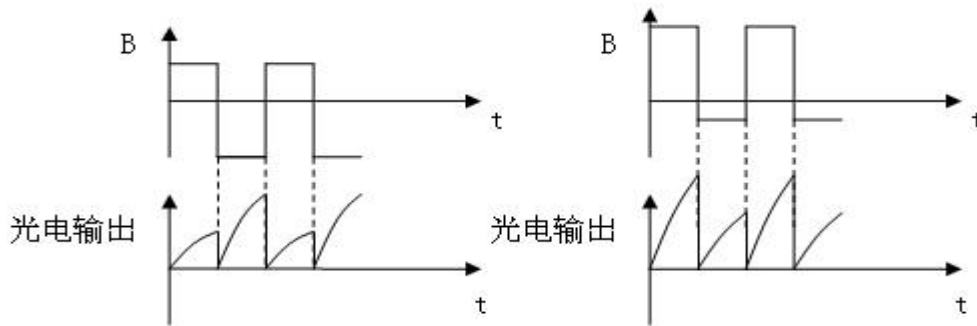


图 4: 不同水平磁场 B 的情况下的光抽运

由上面的分析, 我们可以知道要通过示波器观察到光抽运信号, 在水平方向的总磁场必须形成一个正——负——正的周期性变化, 否则就观察不到抽运信号。

实验结论 (Conclusion):

通过实验, 经分析后可以得到以下结论:

- 我们在上面已经提到过要观察到很理想的光抽运信号图形, 必须是我们要在纯交流扫场的条件下, 但是如上面所说的扫场信号中本身就是由纯交流信号 $B_{交}$ (方波或三角波) 和一个直流分量 B_Q 叠加而成的。所以我们在实验的时候要观察到理想的抽运图形就是想办法

在水平方向消除直流信号 $B_{直}$ 影响, $B_{直}$ 包括 B_0 (扫场中的直流), (地磁场水平分量), (外加水平磁场)。 $B_{直} = \pm B_0 \pm B_0 + B_{E//}$, 我们要让 $B_{直} = 0$, 此时我们就能够看到如图 5 中的理想光抽运信号图:

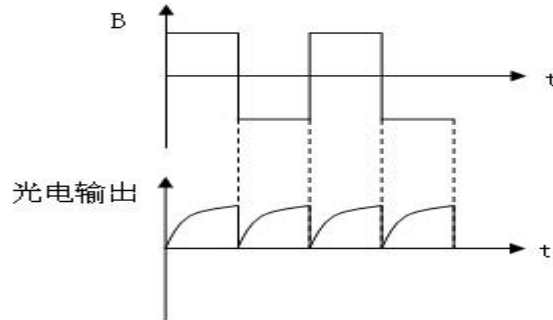


图 5: 理想的光抽运信号

- 要看到抽运信号, $B_{直}$ 必须小于 $B_{交}$ 的峰峰值的一半 $B_{交m}$, 否则会出现如图 6 的情况(有抽运发生, 只是示波器观察不到):

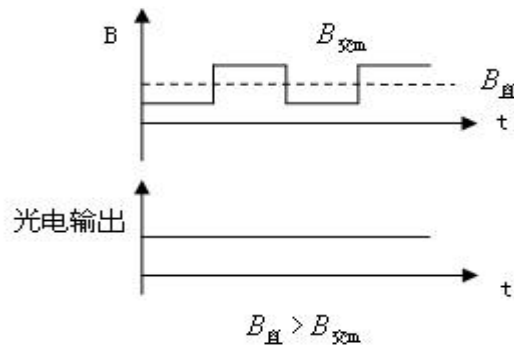


图 6: $B_{直} > B_{交m}$ 时的情形

- 加上三角波和垂直方向的射频信号, 调节射频信号的频率, 塞曼子能级之间会产生感应跃迁, 称为磁共振。观察共振信号的时候, 我们首先要弄明白水平场 B_0 与地磁场水平分量 $B_{E//}$ 的方向关系。具体有如下的结论:
A、假设两者的方向相同, 那么当加上射频信号后, 当射频信号的频率由大到小变化时, 在第一次出现共振最强时, 由于 B_0 与 $B_{E//}$ 同向, 所以共振应该出现在扫场的波峰处, 如图 7 所示:

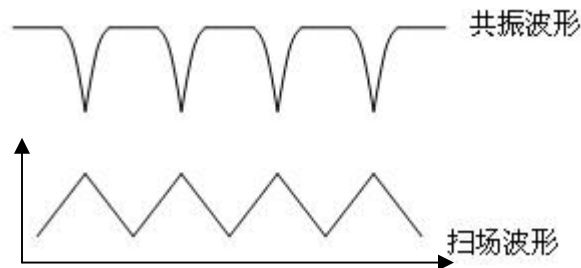


图 7: 共振出现在扫场波峰处



满足 $\Delta E = h\nu_{\max} = g_F \mu_B B_{\max}$ 时，达到共振最大。

B、假设，两者方向相反，那么当加上射频信号后，由射频信号由大到小变化的过程中，第一次共振最强应该出现在扫场的波谷处，因为此处水平场 B_0 与地磁场水平分量 $B_{E//}$ 以及扫场 $B_{交}$ 的差值的绝对值和也是最大的，那么对应的射频信号也应该是最大的，如图 8 所示：

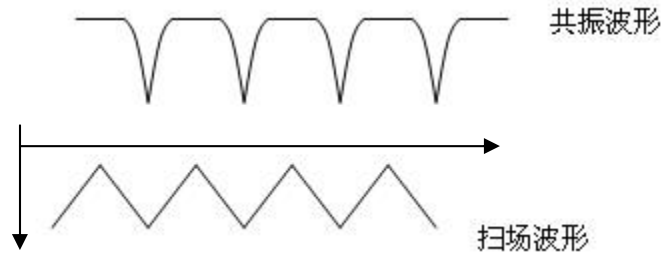


图 8：共振出现在扫场波谷处



满足 $\Delta E = g_F \mu_B B_{\max}$ 时，达到共振最大，此时 $B_{交M}$ 反向，对应于波谷处最大。

致谢 (Acknowledgments):

以上是我对光泵磁共振实验的一些深入理解，如有不对的地方还请老师指正。感谢各位实验室的老师这一学期的辛勤指导，谢谢你们孜孜不倦地给我们传授知识和基本的科研精神。

参考文献 (References):

- [1] 刘海霞，徐铭. 光磁共振实验中扫场的作用和影响. [大学物理，第 24 卷第 12 期，2005. 12]
- [2] 侯清润，曾蓓. 磁场对光抽运信号的影响. 物理实验，2000.
- [3] 南京大学近代物理实验室. 近代物理实验. [南京大学出版社，1997].
- [4] 光泵磁共振实验. [近代物理实验补充讲义 P1~P9. 复旦大学物理系]