光泵磁共振（简要）实验报告

工程物理系工物00

3 实验结果与分析

3.1 光抽运信号观察与研究

3.1.1 用指南针判断磁场方向

将水平线圈和垂直线圈的电流调至最小，水平扫场的大小（示波器上显示方波的峰峰值）调至最小。此时地磁场远大于线圈产生的磁场，将指南针放在吸收池上方中心处，指南针白端指向南方。

把水平扫场调至最大，若指南针保持原样，则二者同向否，则水平扫场与地磁场水平分量反向。同理可以判断水平线圈和垂直线圈的磁场方向。注意在判断一个场的方向时，应把另外两个场的大小调至最小。

表1 线圈磁场方向与地磁场分量方向的关系

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 磁场 | 水平线圈磁场 | 水平线圈扫场 | 垂直线圈磁场 |
| 开关按下 | 同向 | 反向 | 同向 |
| 开关松开 | 反向 | 同向 | 反向 |

3.1.2 调出光抽运信号

调节水平扫场方波的峰峰值，垂直线圈电流（反向），调节水平线圈电流从小到大，调出光抽运信号如下，

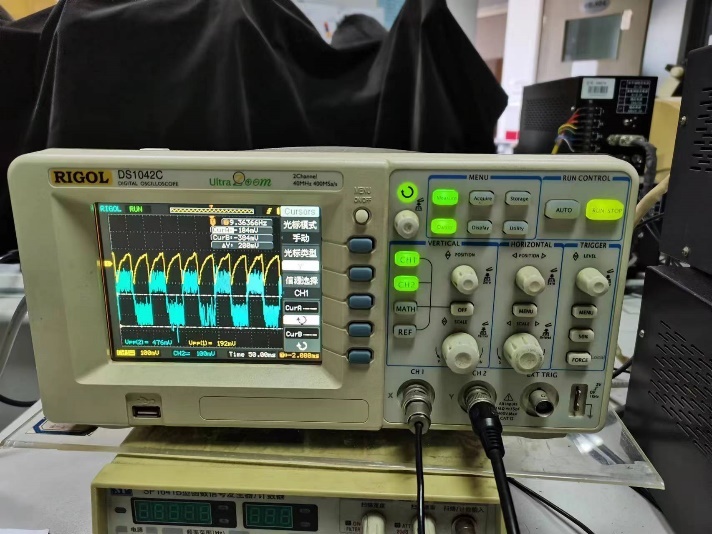


图1 磁场零点在中间的光抽运信号

在观察信号之前，需要使1/4玻片的光轴与偏振光方向的夹角为π/4以获得圆偏振光。因为左旋圆偏振光把原子抽运到的能级，右旋圆偏振光把原子抽运到的能级，线偏振光可视为强度相等的与的叠加，因此两种光抽运作用抵消。所以只有当入射光为圆偏振光时，光抽运的效应最强，而椭圆偏振光由于两种光抽运作用不能完全抵消，会吸收一部分的入射光。在调节圆偏振光时，转动铷灯前面凸透镜上的圆圈，可以发现光抽运信号的幅度有明显变化，当光抽运信号最强时即是圆偏振光。

用示波器测量光抽运信号的峰峰值为，周期为。

水平扫场信号的峰峰值为，周期为。

3.1.3 研究光抽运信号强度与垂直线圈磁场的关系

（a）设置垂直线圈与地磁场垂直分量同向

随着垂直线圈电流的增大，始终无法观察到光抽运信号。

这是因为磁场总是大于等于地磁场垂直分量，不可能为0。铷原子基态吸收光子能量跃迁到激发态，同时激发态的原子通过自发辐射和受激辐射回到基态，这两种过程会不断进行。但是在外磁场不为0的情况下，铷原子在从能级到能级的激发跃迁中，由于遵守光跃迁选择定则，基态子能级（以为例）上的粒子不能跃迁；在从能级到能级的向下跃迁中，的跃迁是允许的。所以经过多次上下跃迁后，粒子大多在基态的能级上，能够吸收光的粒子减少，所以光信号会一直保持在较大的强度。

（b）设置垂直线圈与地磁场垂直分量反向

表2 光抽运信号峰峰值与垂直线圈电流的关系

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |

图2 垂直线圈电流与光抽运信号的关系

当垂直线圈磁场与地磁场垂直分量反向时，随着垂直线圈电流的增大，外磁场垂直分量会逐渐减小至0，再逐渐增大。加上扫场后，就可以使某一段时间内外磁场较小或为0，此时各塞曼子能级会发生部分或全部的简并，由于原子共振吸收，光信号会较弱；而另一段时间磁场较大时，如前所述会有较强的光信号。这样就观察到了光抽运信号。

当光抽运信号峰峰值最大时，，，对应的即是垂直线圈磁场与地磁场垂直分量相等时，此时外磁场会在某段时间为0，光抽运信号最弱。

， （1）

垂直线圈磁场：，即地磁场的垂直分量大小。

3.1.4 研究光抽运信号强度与水平线圈磁场的关系

3.1.4.1调节垂直线圈电流使光抽运信号最强（即），固定此时垂直线圈的电流。研究光抽运信号强度与水平线圈磁场的关系。

（a） 地磁场水平分量

水平扫场磁场

水平磁场

随着水平线圈电流的增大，一直观察不到光抽运信号。这是因为在这种情况下外磁场不可能为0，如3.1.3（a）中所述，光信号会一直保持在一个较大的强度，所以观察不到光抽运信号。

（b） 地磁场水平分量

水平扫场磁场

水平磁场

表3 （b）情况下光抽运信号幅度与水平线圈电流的关系

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |

图3 （b）情况下光抽运信号幅度与水平线圈电流的关系

当地磁场水平分量和水平扫场同向，水平线圈与这二者反向时，会观察到光抽运信号。这是因为随着水平线圈磁场的增大，在水平扫场的作用下，外磁场会在某一段时间内为0，如前所述，此时由于共振吸收，光信号会较弱；而在另一段时间内外磁场不为0，光信号会较强。所以能观察到光抽运信号。

图中第一个峰处，是水平线圈磁场大小等于地磁场水平分量大小减去水平扫场大小时，即当水平扫场处于负方波时，，此时外磁场为0；图中第二个峰处，是水平线圈磁场大小等于地磁场水平分量大小加上水平扫场大小时，,即当水平扫场处于正方波时，此时外磁场为0。

（c） 地磁场水平分量

水平扫场磁场

水平磁场

表4 （c）情况下光抽运信号幅度与水平线圈电流的关系

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 0.017 | 0.018 | 0.019 | 0.020 | 0.022 | 0.025 | 0.028 | 0.030 |
|  | 260 | 264 | 276 | 280 | 284 | 2644 | 272 | 276 |
|  | 0.034 | 0.037 | 0.040 | 0.042 | 0.044 | 0.050 | 0.060 |  |
|  | 280 | 280 | 208 | 128 | 84 | 32 | 20.0 |  |

图4 （c）情况下光抽运信号幅度与水平线圈电流的关系

当地磁场水平分量和水平扫场同向、水平线圈都反向时，会观察到光抽运信号。与（b）情况类似，图中出现了两个峰。图中第一个峰处，水平线圈磁场大小等于地磁场水平分量大小减去水平扫场峰值大小，，即当水平扫场处于正方波时，外磁场为0；图中第二个峰处，是水平线圈磁场大小等于地磁场水平分量大小加上水平扫场大小时，，即当水平扫场处于负方波时，此时外磁场为0。

虽然峰处的磁场都满足关系式：或，但是（c）情况下峰对应的水平线圈电流要比（b）情况下的更小，这是因为本实验中水平扫场是在直流磁场上叠加了一个调制磁场，所以（c）情况是该直流磁场加上水平磁场后才等于地磁场水平分量与调制的（方波）磁场的叠加结果，所以（c）情况下峰处对应的水平磁场会更小。

3.1.4.2 调出（b）和（c）情况下的三种典型光抽运信号，并记录下对应的水平线圈电流。

（b）

①

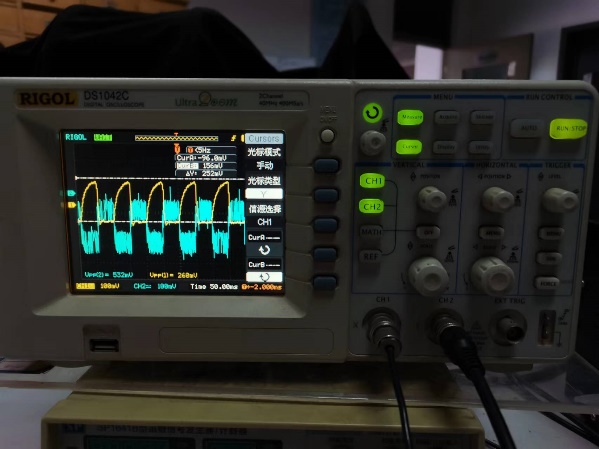


图5 （b）情况下的光抽运信号①

对应的水平线圈电流为。此时磁场零点在方波的顶端，因为在方波的顶端光信号最弱，说明此时共振吸收最强，即对应外磁场为0的情况，。

②

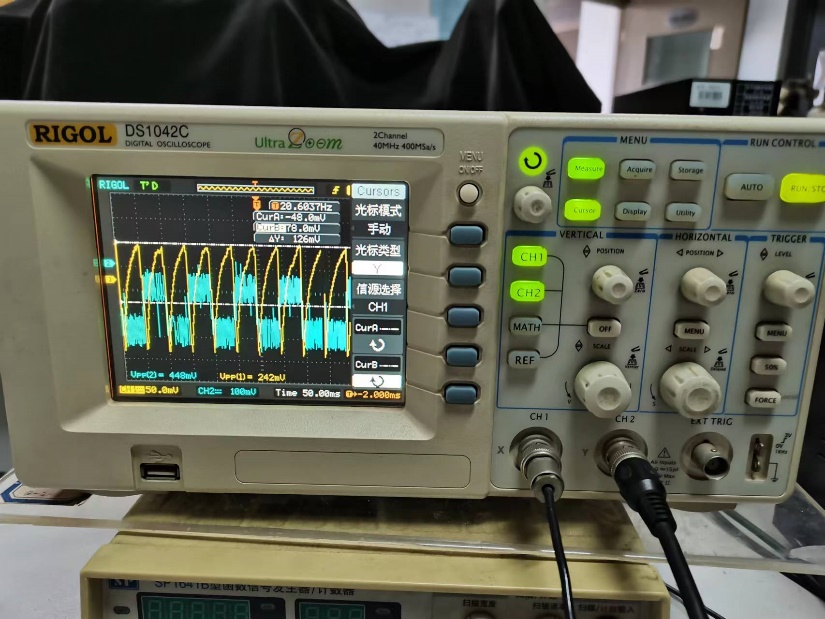


图6 （b）情况下的光抽运信号②

对应的水平线圈电流为。此时磁场零点在方波的中间，因为在方波的中间光信号最弱，说明此时共振吸收最强，即对应外磁场为0的情况，（加上水平扫场的直流分量）。

③

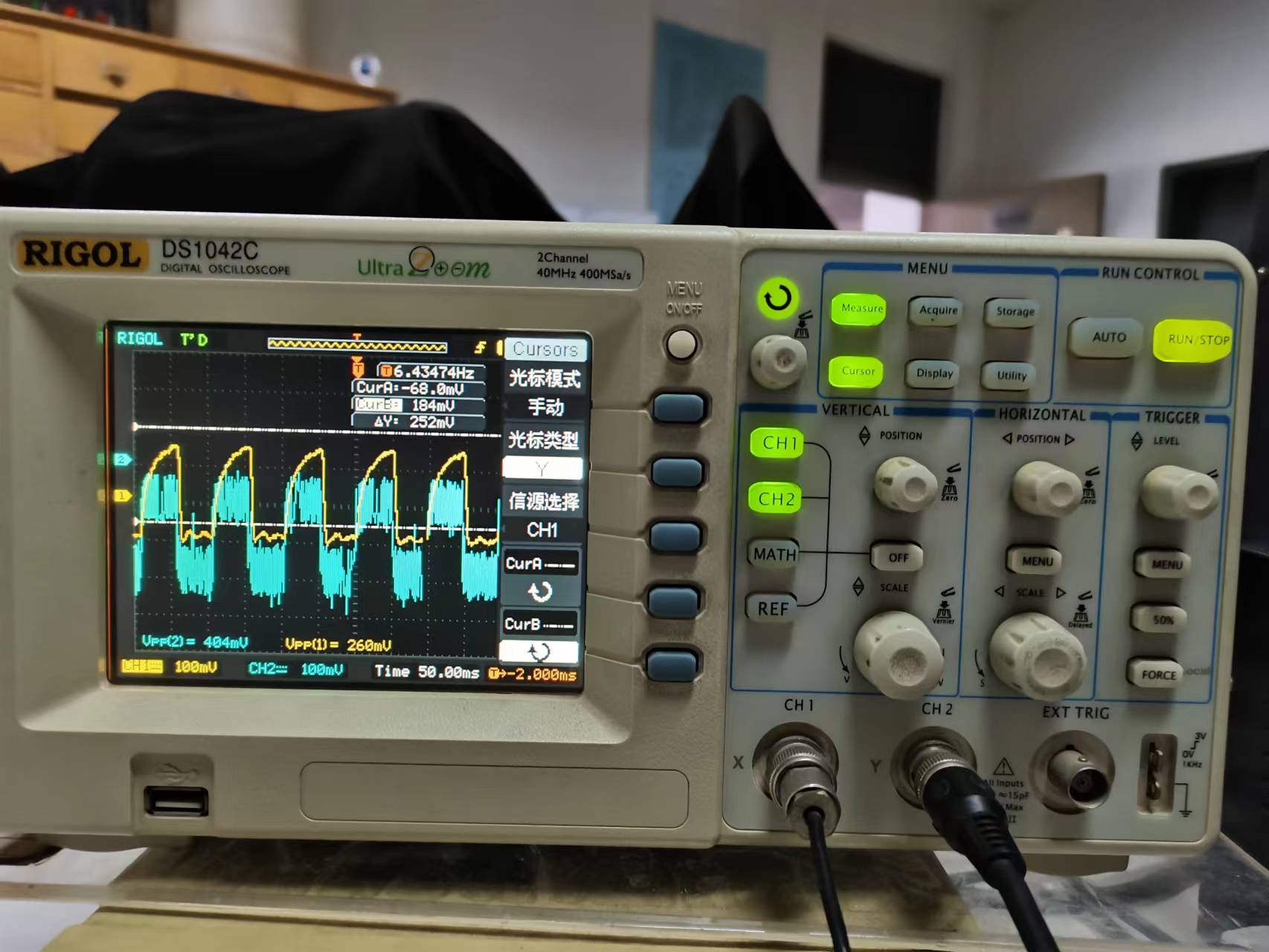


图7 （b）情况下的光抽运信号③

对应的水平线圈电流为。此时磁场零点在方波的底端，因为在方波的底端光信号最弱，说明此时共振吸收最强，即对应外磁场为0的情况，。

（c）

①

图8 （c）情况下的光抽运信号①

对应的水平线圈电流为。此时磁场零点在方波的底端，因为在方波的底端光信号最弱，说明此时共振吸收最强，即对应外磁场为0的情况，。

②

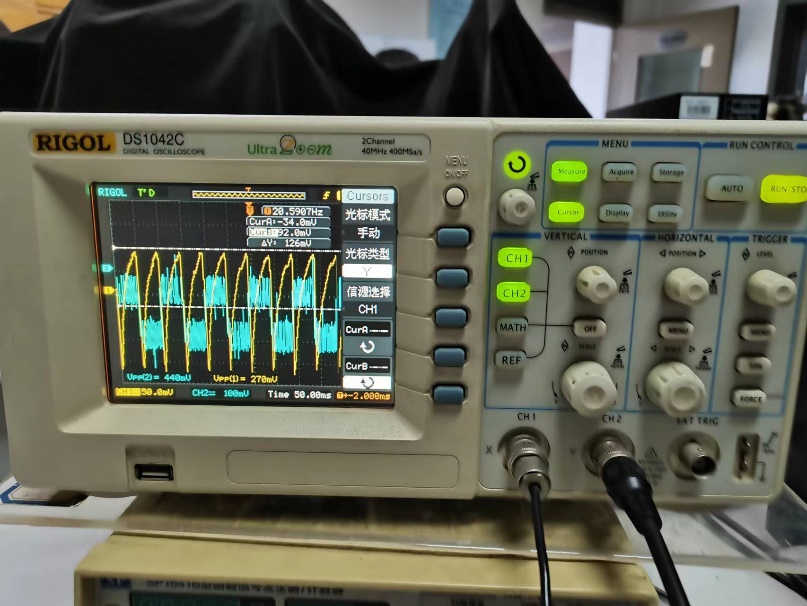


图9 （c）情况下的光抽运信号②

对应的水平线圈电流为。此时磁场零点在方波的中间，因为在方波的中间光信号最弱，说明此时共振吸收最强，即对应外磁场为0的情况，（减去水平扫场的直流分量）。

③

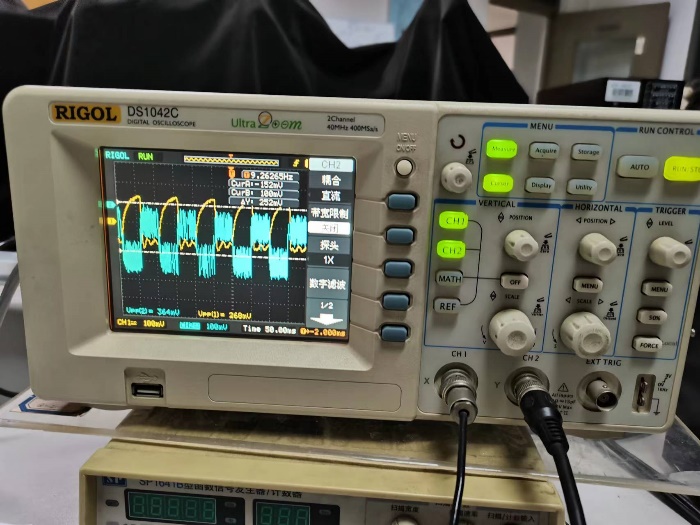


图10 （c）情况下的光抽运信号③

对应的水平线圈电流为。此时磁场零点在方波的顶端，因为在方波的顶端光信号最弱，说明此时共振吸收最强，即对应外磁场为0的情况，。

可以观察到，随着水平线圈电流的增大，（b）和（c）情况下磁场零点的出现位置的顺序相反，这是因为前者水平磁场与水平扫场的方向相反，而后者水平磁场与水平扫场的方向相同。另外，前者对应的水平线圈电流比后者要大，其原因如前所述，水平扫场具有直流部分。（b）（c）情况下对应的水平线圈电流的差值相当，这是因为两者设置的水平扫场的大小相等。

当磁场零点出现在方波中间时，估算地磁场水平分量的大小。

在（b）的②情况下，

在（c）的②情况下，

，

联立方程可得：

根据①③情况，可以计算水平扫场的交流部分大小（以（b）情况为例）：

联立求解，并对（b）（c）情况求平均可得：

3.1.5 将水平扫场信号调整为三角波，观察光抽运信号

（b）

①

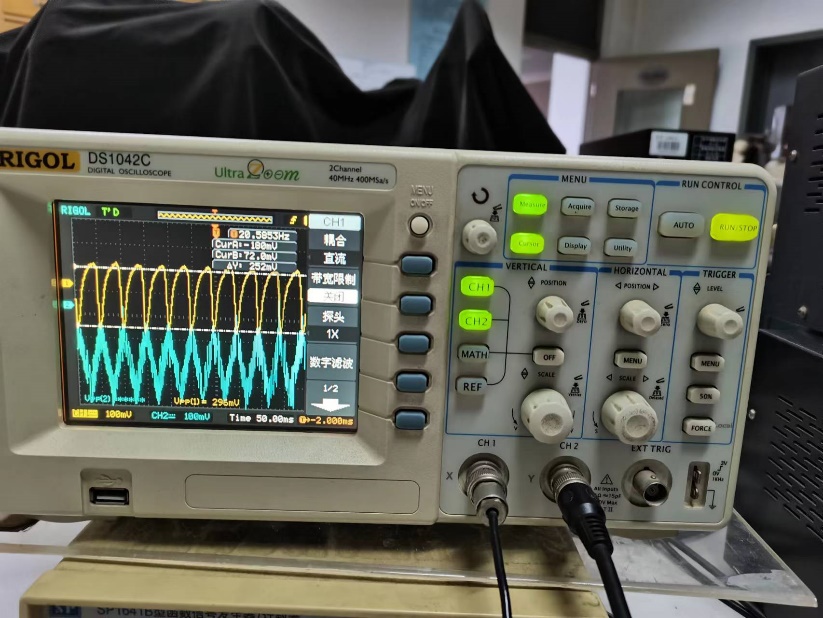


图11 （b）情况下的光抽运信号①

对应的水平线圈电流为。此时磁场零点在三角波的顶端，因为在三角波的顶端光信号最弱，说明此时共振吸收最强，即对应外磁场为0的情况，。

②

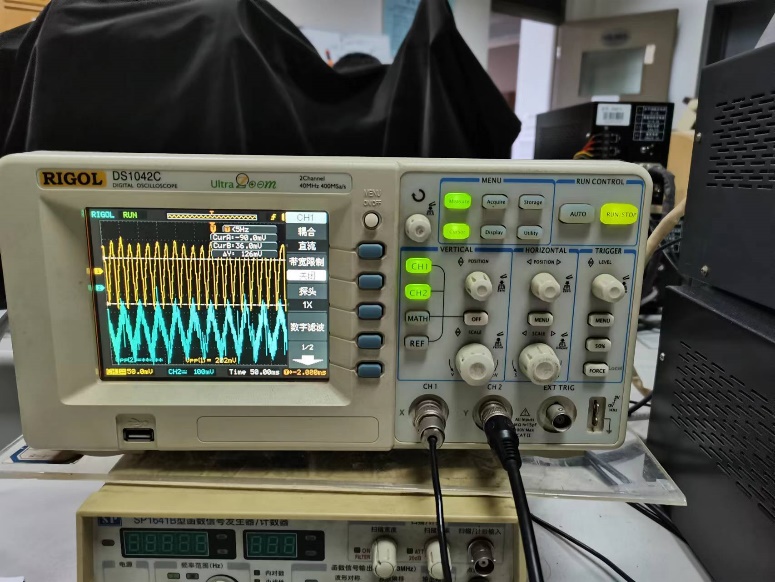


图12 （b）情况下的光抽运信号②

对应的水平线圈电流为。此时磁场零点在三角波的中间，因为在三角波的中间光信号最弱，说明此时共振吸收最强，即对应外磁场为0的情况，（加上水平扫场的直流分量）。

③

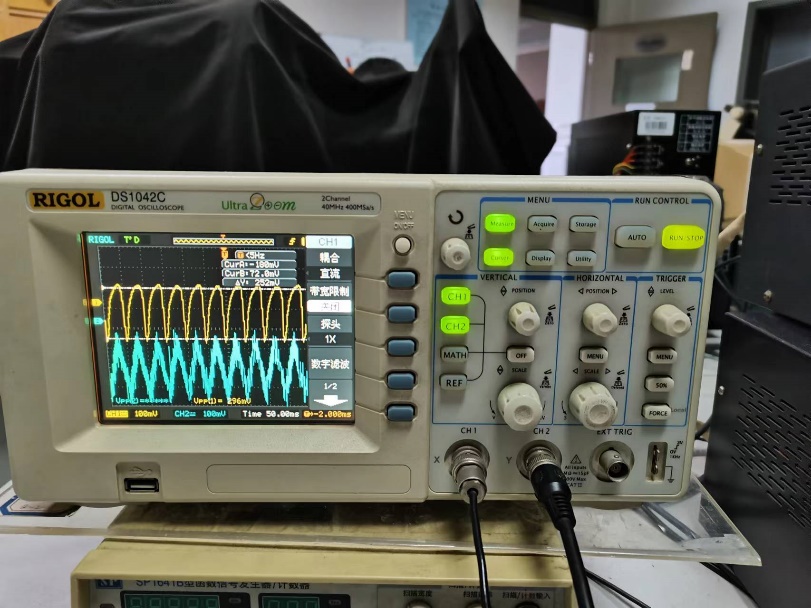


图13 （b）情况下的光抽运信号③

对应的水平线圈电流为。此时磁场零点在三角波的底端，因为在三角波的底端光信号最弱，说明此时共振吸收最强，即对应外磁场为0的情况，。

（c）

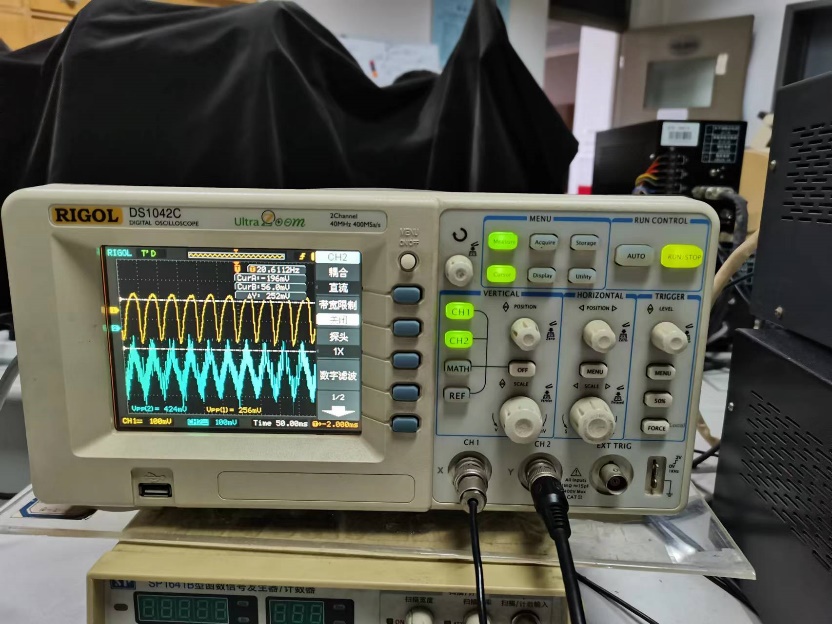
①

图14 （c）情况下的光抽运信号①

对应的水平线圈电流为。此时磁场零点在三角波的底端，因为在三角波的底端光信号最弱，说明此时共振吸收最强，即对应外磁场为0的情况，。

②

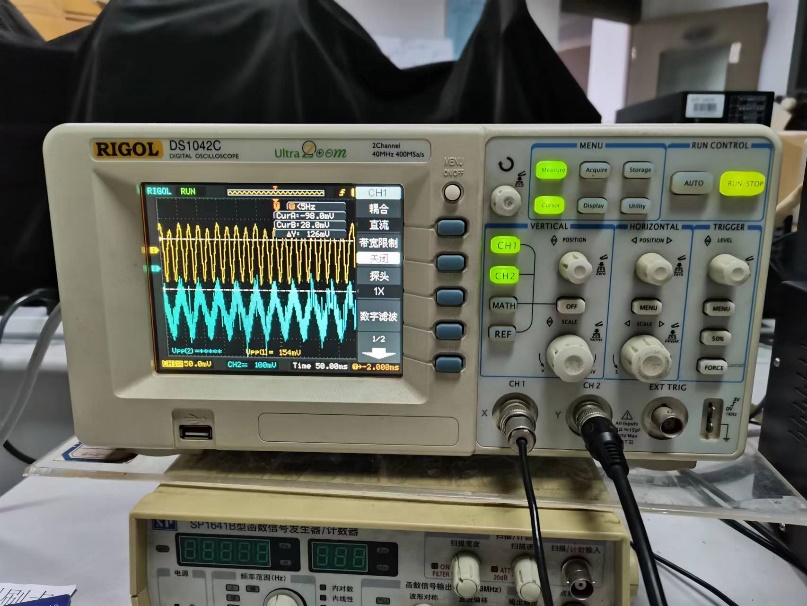


图15 （c）情况下的光抽运信号②

对应的水平线圈电流为。此时磁场零点在三角波的中间，因为在三角波的中间光信号最弱，说明此时共振吸收最强，即对应外磁场为0的情况，（减去水平扫场的直流分量）。

③

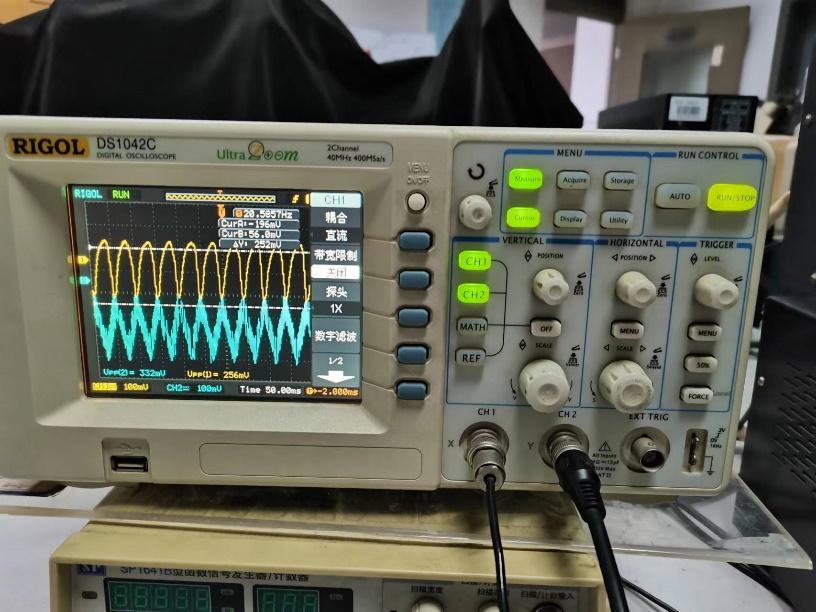


图16 （c）情况下的光抽运信号③

对应的水平线圈电流为。此时磁场零点在三角波的顶端，因为在三角波的顶端光信号最弱，说明此时共振吸收最强，即对应外磁场为0的情况，。

随着水平线圈电流的增大，（b）和（c）情况下磁场零点的出现位置与3.1.4中的情况相同。但是，由于水平线圈电流最小只能设置为，所以为了观察到（c）中①的光抽运信号，不得不将水平扫场的大小调小，所以（b）（c）情况下对应的水平线圈电流的差值并不相等。

3.2 磁共振信号观察与研究

3.2.1 区分光抽运信号和磁共振信号

如果对铷原子一直施加一直流磁场，因为光抽运使铷原子基态的一子能级（的，的）上的粒子数饱和，铷原子不再吸收光子能量，透过铷原子的光增强保持不变，观察不到光抽运信号。这时，在垂直产生塞曼分裂的水平磁场的方向上加一射频磁场，当满足磁共振条件时：

式中为射频磁场的频率，在本实验中为。

塞曼子能级间产生感应跃迁，称为磁共振。磁共振破坏了粒子在该子能级（的，的）上的饱和分布状态，所以原子可以继续进行光抽运过程，光信号变弱，出现了吸收峰。

光抽运信号和磁共振信号的波形一样，可以通过其对应的水平线圈电流的大小来区分。前者光信号最弱（吸收峰）时，外磁场大小为0，而后者光信号最弱（吸收峰）时，外磁场大小应满足磁共振条件：

所以前者的水平线圈电流会小于后者。

3.2.2 和的理论计算

（1）对于的基态：量子数，，，，

共振时外磁场大小为

对应电流为

（2）对于的基态：量子数，，，，

共振时外磁场大小为

对应电流为

3.2.3 测量磁共振电流

选择水平扫场为三角波，在3.1.4的（a）（b）（c）的情况下，调节水平线圈的电流由小到大，会先出现光抽运信号（除情况（a）外），然后出现两次磁共振信号，分别是和的吸收峰。记录下发生磁共振时的磁场处于三角波中间时对于的水平线圈的电流大小。

表5 磁共振时水平线圈的电流大小

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| （a）情况电流大小（A） |  |  |
| （b）情况电流大小（A） |  |  |
| （c）情况电流大小（A） |  |  |

在这三种情况下对应的磁共振计算公式为：

联立方程可以求得：

对于，，与理论值的相对误差为。

对于，，与理论值的相对误差为。

