

用数字示波器探究光磁共振实验中反常共振信号的机理

黄水平 钱小青

(宁波大学物理科学与技术学院, 浙江 宁波 315211)

摘要 本文根据拟合得到的 g_F 因子大小, 确定了光磁共振实验中的反常共振信号; 用数字示波器测量了反常共振射频信号的频谱, 计算了反常共振射频信号各高次谐波的大小; 通过线性拟合, 得到了正常共振信号幅度与射频信号幅度的关系。利用此关系, 计算了各高次谐波产生的反常共振信号大小, 计算结果与测量值基本一致。频率计连接射频信号源后, 射频信号波形和频谱发生明显变化, 反常共振信号随着射频信号频谱的变化发生相应改变, 进一步证明了反常共振信号由射频信号的高次谐波共振所引起。这些结果表明, 用数字示波器探究光磁共振实验中反常共振信号的机理不仅可行, 还能定量估算和预测射频信号波形对反常共振信号大小的影响。

关键词 光磁共振; 反常共振信号; 高次谐波; 数字示波器

EXPLORING THE MECHANISM OF ABNORMAL RESONANCE SIGNALS IN OPTICAL PUMPING MAGNETIC RESONANCE EXPERIMENT USING DIGITAL OSCILLOSCOPE

HUANG Shuiping QIAN Xiaoqing

(School of Physical Science and Technology, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211)

Abstract The abnormal resonance signals in optical pumping magnetic resonance experiment were determined according to the value of g_F -factor obtained by fitting. The spectra of the abnormal resonance radio-frequency signals were measured using digital oscilloscope, and the magnitudes of the higher harmonics were calculated. The relationship between the amplitudes of normal resonance signals and the ones of radio-frequency signals was obtained by the least squares linear fitting. Using the relationship, the magnitude of the abnormal resonance signal engendered by each higher harmonic was estimated. The calculated results are basically consistent with the experimental ones. The waveforms and the spectra of the radio-frequency signals change obviously after the frequency meter is connected with the radio-frequency signal generator. The abnormal resonance signals change accordingly with the changes in the RF signal spectrum, which suggests that the abnormal resonance signals are caused by the higher harmonic resonances of the radio-frequency signals. These results show that it is not only feasible to explore the mechanism of abnormal resonance signal in optical magnetic resonance ex-

收稿日期: 2023-09-15

基金项目: 浙江省高等学校课程思政示范课程建设项目(近物实验); 宁波大学课程思政一流课程建设项目(近物实验); 宁波大学教师教育专项研究项目(2022SFJY10)。

作者简介: 黄水平, 宁波大学物理科学与技术学院副教授, huangshuiping@nbu.edu.cn。

引文格式: 黄水平, 钱小青. 用数字示波器探究光磁共振实验中反常共振信号的机理[J]. 物理与工程, 2024, 34(1): 143-147, 152.

Cite this article: HUANG S P, QIAN X Q. Exploring the mechanism of abnormal resonance signals in optical pumping magnetic resonance experiment using digital oscilloscope[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(1): 143-147, 152. (in Chinese)

periment by digital oscilloscope, but can also quantitatively estimate and predict the influence of radio-frequency signal waveform on the magnitude of abnormal resonance signals.

Key words optical pumping magnetic resonance; abnormal resonance signal; high order harmonics; digital oscilloscope

光磁共振实验是近代物理实验中的重要实验之一。实验中,为测量 Rb 原子超精细结构的朗德因子 g_F ,需分别测出水平场 B_0 与扫场 B_S 、地磁场水平分量 $B_{e//}$ 同向(水平场取正方向)和反向(水平场取负方向)时的共振频率 ν 、 ν' ^[1,2]。由于⁸⁷Rb 和⁸⁵Rb 两种同位素的同时存在,在水平场 B_0 的每一个取向中,理论上均可观察到两个共振信号,较高频率的共振信号由⁸⁷Rb 原子产生,较低频率的共振信号则由⁸⁵Rb 原子产生。实际测量中却发现,在水平场 B_0 的每一个取向中,所观察到的共振信号并非两个,而是三个以上。其中,射频场频率不满足共振方程的共振信号称之为反常共振信号。对于反常共振信号产生的原因,一种观点认为是原子的多量子吸收跃迁所引起^[3-5],另一种观点认为是射频信号的高次谐波共振所引起^[4-5]。第一种观点的研究中,使用的不失真射频信号是通过目测射频信号波形来判断的,未能对射频信号进行频谱测量,因而信号的不失真难以得到保证。后一种观点的研究中,文献[6]对射频信号波形进行采样、样条插值后通过傅立叶积分公式求出了各反常共振射频信号的谐波分量,此方法步骤繁琐、工作量大,各谐波分量大小的比较也不是很直观,从而限制了问题的深入研究。文献[7]用数字示波器对三个不同厂家信号发生器的射频信号频谱进行了测量,但射频信号频率只固定在

1MHz,未对反常共振信号对应的射频信号频谱进行测量和分析。本文在文献[6]的基础上,尝试利用数字示波器的快速傅立叶变换(FFT)功能,来探究反常共振信号的产生机理。

1 反常共振信号的测量及判断

采用北京大华仪器厂生产的 DH807A 型光磁共振实验仪和上海无线电二十六厂生产的 XFG-7 型高频信号发生器。实验中水平场电流为 0.492A,垂直场电流为 0.055A,射频和共振信号大小的测量使用泰克 TDS1002 数字存储示波器。

实验发现,水平场 B_0 取正方向或负方向时,能分别观察到 6 个共振信号。为判断各共振信号的性质(正常或反常信号),利用公式 $h\Delta\nu = g_F\mu_B\Delta B_0$ 通过线性拟合测出了各共振信号对应的 g_F 因子^[6,8-9]。⁸⁷Rb 和⁸⁵Rb 原子 g_F 因子的理论值分别为 1/2 和 1/3,根据测出的 g_F 因子大小,可确定各共振信号的性质,见表 1。

从表 1 可以看出,水平场 B_0 的每个取向,都能观察到 4 个反常共振信号。在允许的误差范围内,正常共振频率和反常共振频率存在明显的整数倍关系。这表明,反常共振信号要么是 Rb 原子的多量子吸收跃迁引起,要么是 Rb 原子对射频信号高次谐波的共振吸收引起。

表 1 各共振频率对应的 g_F 因子及共振信号性质

	共振频率/kHz	ν_1	ν_2	ν_3	ν_4	ν_5	ν_6
		1890.89	1263.49	945.422	630.302	472.737	420.213
B_0 取正方向	g_F 因子	0.4936	0.3308	0.2508	0.1669	0.1255	0.1105
	性质	正常 (⁸⁷ Rb)	正常 (⁸⁵ Rb)	反常 ($\nu_1/2$)	反常 ($\nu_2/2$ 或 $\nu_1/3$)	反常 ($\nu_1/4$)	反常 ($\nu_2/3$)
	共振频率/kHz	ν'_1	ν'_2	ν'_3	ν'_4	ν'_5	ν'_6
		1315.72	876.410	657.765	438.770	328.903	292.723
B_0 取负方向	g_F 因子	0.5023	0.3293	0.2494	0.1649	0.1251	0.1094
	性质	正常 (⁸⁷ Rb)	正常 (⁸⁵ Rb)	反常 ($\nu'_1/2$)	反常 ($\nu'_2/2$ 或 $\nu'_1/3$)	反常($\nu'_1/4$)	反常 ($\nu'_2/3$)

2 反常共振信号产生机理探究

2.1 反常共振信号幅度测量结果

尽管多量子吸收能产生反常共振信号,但3阶以上的多量子跃迁因跃迁几率太小,受射频场强度的制约在现有的光磁共振实验装置中一般探测不到^[4]。但表1的测量结果表明,本文的实验在正常频率的1/3和1/4处也出现了反常共振信号,这是无法用多量子跃迁来解释的。此外,如果同时发生了双量子跃迁和3阶以上的多量子跃迁,双量子跃迁、3阶量子跃迁、4阶量子跃迁的共振信号幅度应该依次递减^[4],但实际测量结果并非如此,见表2(表中射频场幅度为4.5V,各信号幅度均为峰-峰值)。

从表2可以看出, B_0 取正方向时,射频场频率 ν_3 、 ν_5 、 ν_6 对应的反常共振信号幅度相差不大(ν_6 对应的共振信号稍小些),频率 ν_4 对应的反常信号幅度在4个反常共振信号中最大。 B_0 取负方向时,射频场频率 ν'_3 、 ν'_4 对应的反常共振信号幅

度相差不大,频率 ν'_4 对应的反常信号幅度在4个反常共振信号中最大,频率 ν'_5 对应的反常信号幅度在4个反常共振信号中最小。这些结果与多量子跃迁的机制明显不符。

2.2 反常共振信号幅度理论计算结果

为进一步确定反常共振信号的成因,用数字示波器测量了反常共振射频信号的频谱,如图1和图2所示。为便于比较,测量中,各射频信号的幅度均固定为4.5V。

根据图1和图2的频谱分析结果及分贝与伏特之间的对应关系($0\text{dB}=1V_{\text{RMS}}$),可算出各反常共振射频信号的相关谐波分量大小(峰-峰值),见表3。

为确定各谐波能产生的共振信号大小,在获得各谐波峰-峰值的基础上,在各谐波大小附近,测量了1890.89kHz、1263.49kHz、1315.72kHz、876.410kHz四个正常共振频率的共振信号大小随射频信号幅度的变化情况,用最小二乘法进行线性拟合^[3,5],可得到两者的函数关系,如图3和图4所示。

表2 射频场幅度为4.5V时共振信号大小测量值

B_0 取正方向	共振频率/kHz	ν_1	ν_2	ν_3	ν_4	ν_5	ν_6
	共振信号幅度/mV	1890.89	1263.49	945.422	630.302	472.737	420.213
B_0 取负方向	共振频率/kHz	ν'_1	ν'_2	ν'_3	ν'_4	ν'_5	ν'_6
	共振信号幅度/mV	1315.72	876.410	657.765	438.770	328.903	292.723

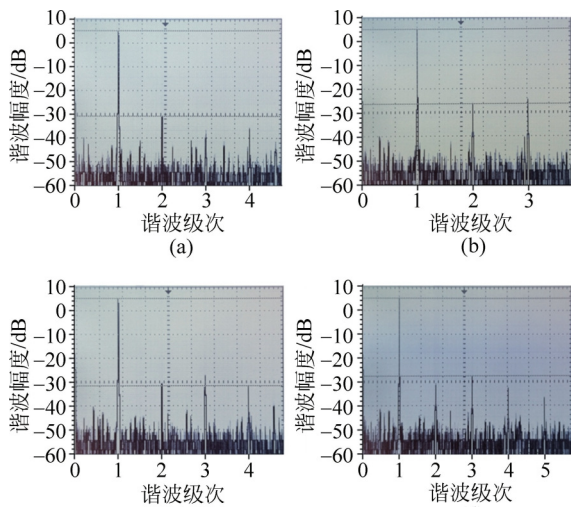


图1 水平场正向时反常共振射频信号频谱

(a) 945.422kHz; (b) 630.302kHz; (c) 472.737kHz; (d) 420.213kHz

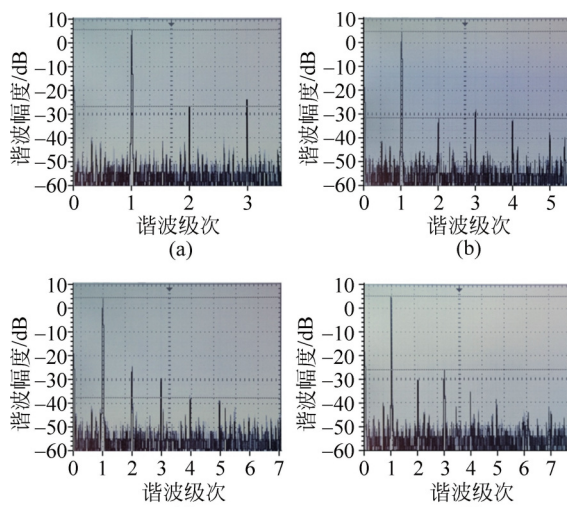


图2 水平场反向时反常共振射频信号频谱

(a) 657.765kHz; (b) 438.770kHz; (c) 328.903kHz; (d) 292.723kHz

表 3 反常共振射频信号谐波幅度

射频频率/kHz	945.422	630.302	472.737	420.213	657.765	438.770	328.903	292.723
谐波级次	2	2	3	4	3	2	2	3
谐波幅度/dB	-31.00	-26.60	-24.42	-31.80	-27.80	-27.00	-31.40	-28.60
谐波峰-峰值/mV	79.72	132.30	170.04	72.70	115.23	126.34	76.13	105.09
共振峰-峰值/mV	79.72	132.30	170.04	72.70	115.23	126.34	76.13	105.09

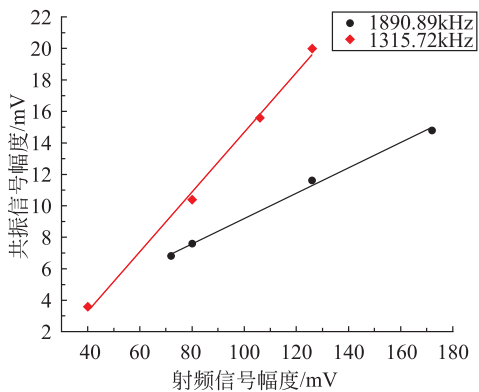


图 3 ⁸⁷Rb 共振信号幅度与射频信号幅度关系

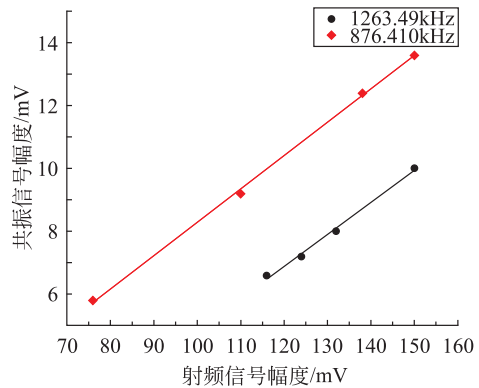


图 4 ⁸⁵Rb 共振信号幅度与射频信号幅度关系

根据图 3 和图 4 的拟合结果,可计算出表 3 中各谐波产生的共振信号大小,见表 4。

比较表 4 和表 2 可以发现,利用谐波幅度计算出的反常共振信号幅度和实验测量值基本相符,见表 5。其中,630.302kHz 和 438.770kHz 射频场的反常共振信号同时包含了其 2 次谐波和 3 次谐波的贡献。表 5 中的数据充分表明,实验中的反常共振信号是由射频信号的高次谐波共振所引起的。

2.3 频率计接入对反常共振信号的影响

由于频率计的输入阻抗较小,当把频率计连接射频信号源时,射频信号波形由原来的纯正弦波形变为准方波波形,射频信号的频谱也相应改变。图 5 为 657.756kHz 射频信号在频率计接入前后的波形,图 6 为图 5(b)中准方波的频谱分析图。

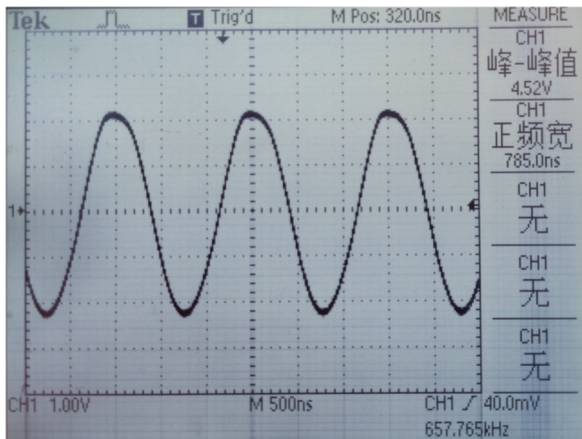
从图 6 可以看出,频率计接入后,射频信号的 3 次、5 次谐波强度明显增大,而 2 次、4 次谐波的强度则明显减弱。同时,频率计接入后,反常共振信号的变化情况为:945.422kHz、472.737kHz、657.765kHz、328.903kHz 四个反常共振信号消失,而 630.302kHz、420.213kHz、438.770kHz、292.723kHz 四个反常共振信号的幅度则增加到原来的 3~4 倍不等。反常共振信号的这些变化,与射频信号的频谱变化是对应的。这进一步证明,反常共振信号是射频信号的高次谐波共振所引起的。

表 4 反常共振射频信号谐波产生的共振信号大小计算结果

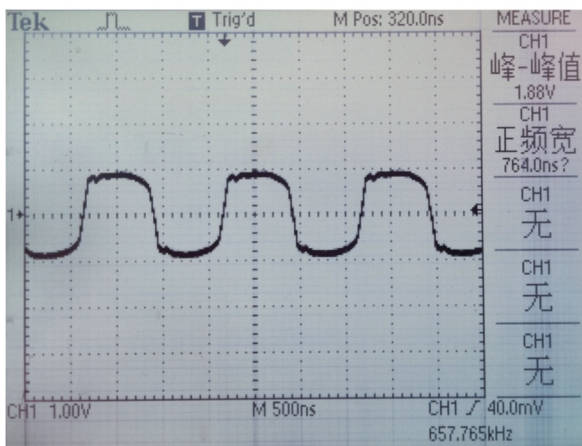
射频频率/kHz	945.422	630.302	472.737	420.213	657.765	438.770	328.903	292.723
谐波级次	2	2	3	4	3	2	2	3
谐波峰-峰值/mV	79.72	132.30	170.04	72.70	115.23	126.34	76.13	105.09
共振信号幅度/mV	7.57	8.13	14.81	7.01	6.40	19.68	5.75	15.64

表 5 反常共振信号幅度的理论值与测量值对比

射频频率/kHz	945.422	630.302	472.737	420.213	657.765	438.770	328.903	292.723
共振信号测量值/mV	7.60	20.4	8.00	6.40	20.8	21.6	3.20	12.0
共振信号理论值/mV	7.57	22.9	7.01	6.40	19.7	21.4	2.94	12.4



(a)



(b)

图5 频率计连接射频信号源前后的射频信号波形
(657.756kHz)

(a) 频率计未接信号源; (b) 频率计连接信号源

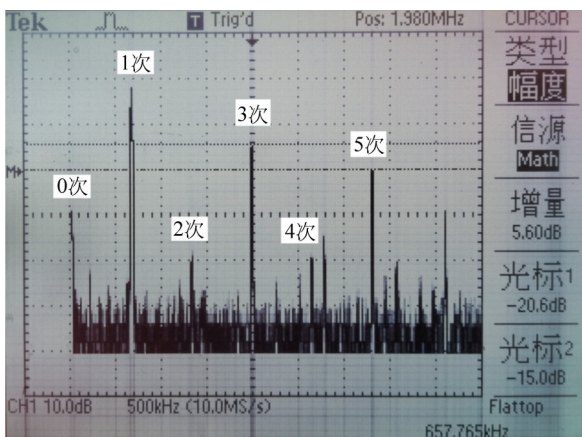


图6 频率计连接射频信号源后的射频信号频谱
(657.756kHz)

3 结语

根据数字示波器测出的光磁共振实验中反常

共振射频信号频谱,对反常共振信号大小进行了理论计算,所得结果与测量值基本相符。频率计连接射频信号源后,反常共振信号的变化与数字示波器测出的射频信号波形和频谱的变化相对应,进一步证明了光磁共振实验中出现的反常共振信号是由射频信号的高次谐波所引起。实验结果表明,用数字示波器不仅能很好探究光磁共振实验中反常共振信号的机理,还能定量估算和预测射频信号波形对反常共振信号大小的影响。

参 考 文 献

- [1] 黄水平,张飞雁. 光泵磁共振实验测量 g_F 值方法的改进与拓展[J]. 物理实验, 2004, 24(1): 35-37.
HUANG S P, ZHANG F Y. Improvement and expansion of the method for measuring g_F in optical pumping magnetic resonance experiment[J]. Physics Experimentation, 2004, 24(1): 35-37. (in Chinese)
- [2] 熊正辉,吴奕初. 光磁共振实验中测量 g_F 值方法的改进[J]. 物理实验, 2000, 20(1): 3-5.
XIONG Z Y, WU Y C. Improvement of the method for measuring g_F in optical pumping magnetic resonance experiment[J]. Physics Experimentation, 2000, 20(1): 3-5. (in Chinese)
- [3] 张清,陈一冰,王煜,等. 光泵磁共振中小信号的讨论[J]. 物理实验, 2000, 20(10): 48-49.
ZHANG Q, CHEN Y B, et al. Discussion on small signals in optical pumping magnetic resonance experiment [J]. Physics Experimentation, 2000, 20(10): 48-49. (in Chinese)
- [4] 孙昕,崔海峰,彭慰先,等. 光磁共振实验中双量子跃迁及射频场谐波干扰[J]. 物理实验, 2001, 21(3): 7-9.
SUN X, CUI H F, PENG W X, et al. Double-quantum transition and harmonic interference of radio-frequency field in optical pumping magnetic resonance experiment [J]. Physics Experimentation, 2001, 21(3): 7-9. (in Chinese)
- [5] 汪华英,李华秀,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): 30-33.
WANG H Y, LI H X, ZHANG Z Q, et al. Relationship of opto-magnetic resonance signal magnitude and RF field amplitude[J]. Physics Experimentation, 2005, 25(7): 30-33. (in Chinese)
- [6] 张飞雁,黄水平,裴积全. 光磁共振实验反常共振信号的判断与原因分析[J]. 宁波大学学报:理工版, 2010, 23(2): 71-73.
ZHANG F Y, HUANG S P, PEI J Q. Study on abnormal resonance signals in optical pumping Magnetic Resonance Experiment: diagnosis and causes [J]. Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition), 2010, 23(2): 71-73. (in Chinese)

(下转第 152 页)

指向不够清晰,容易引起误解。运用投影相位差的概念解释杨氏双缝干涉实验中引入三个偏振片时没有干涉条纹的现象,计算过程简洁明了,物理图像直观,便于理解,也适合在课堂教学中运用。通过进一步分析增加偏振片以及去除所有偏振片的情况,更清晰地展示投影相位差的作用,有助于学生对光源发光机理、干涉、偏振的概念以及偏振光干涉的深入理解与运用,这样的教学研究能够提升教学效果,是非常有效的教学探索。

参 考 文 献

- [1] 赵凯华,钟锡华. 光学[M]. 北京:北京大学出版社,2017:125-130,413.
- [2] 赵凯华. 新概念物理教程:光学[M]. 北京:高等教育出版社,2004:332.
- [3] 吴强,郭光灿. 光学[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1996:341-32.
- [4] 张永德. 物理学大题典 光学[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2005:232-235.
- [5] 赵凯华,罗蔚茵,王笑君. 新概念物理题解:下册[M]. 北京:高等教育出版社,2009:167-168.
- [6] 刘金江,托和罗·路. 对杨氏装置中偏振光干涉问题的探讨[J]. 长春邮电学院学报,1989,7(2):40-45.
- LIU J J, TUOHELULO L. A discussion of the interference of polarized light in the Young's device[J]. J. of Changchun Posts and Telecom Mun. Inst., 1989, 7(2): 40-45. (in Chinese)
- [7] 孙慕渊,程正则. 用杨氏实验装置产生线偏振光的干涉[J]. 咸宁师专学报,1998,18(3):30-31.
- SUN M Y, CHENG Z Z. Investigating the interference of linearly polarized light using the Yang's experimental setup[J]. Journal of Hubei University of Science and Technology, 1998,18(3): 30-31. (in Chinese)
- [8] 李祥. 在杨氏双缝干涉装置中引入偏振片的几点讨论[J]. 阿坝师范高等专科学校学报,2005,22(3):100-101.
- LI X. Discourse of the introduction of polaroid into Young's double-slit interfering device[J]. Journal of Aba Teachers College, 2005, 22(3): 100-101. (in Chinese)
- [9] 谢亮,赵小青. 偏振片对杨氏双缝干涉实验影响的形象化解释[J]. 课程教育研究,2015,13:214-215.
- XIE L, ZHAO X Q. Visualization of the impact of polarizers on the Young's double-slit interference experiment[J]. Course Education Research, 2015, 13: 214-215. (in Chinese)
- [10] 蔡展中. 偏振光的杨氏干涉[J]. 大学物理,2007,26(6):1-4.
- CAI L Z. Young's interference experiment of polarized light[J]. College Physics, 2007, 26(6): 1-4. (in Chinese)
- (上接第 147 页)
- [7] 雷衍连,张巧明,张勇. 光磁共振实验中反常共振信号的机理探究[J]. 西南师范大学学报:自然科学版,2013,38(7):148-151.
- LEI Y L, ZHANG Q M, ZHANG Y. Exploration of mechanisms underlying the abnormal resonance signals in optical pumping magnetic resonance experiment[J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2013, 38(7): 148-151. (in Chinese)
- [8] 段俊熙,冯璐. 光泵磁共振实验中实验参数选取的探讨[J]. 物理与工程,2022,32(1):136-142.
- DUAN J X, FENG L. Research on experimental parameters in optical-pumping magnetic resonance experiments[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(1): 136-142. (in Chinese)
- [9] 高浩哲,池水莲,陈昕,等. 光泵磁共振实验中扫场信号研究和测量[J]. 实验技术与管理,2017,34(2):66-69.
- GAO H Z, CHI S L, CHENG X, et al. Research and measurement of scanning field signal in experiment of optical pumping magnetic resonance[J]. Experimental Technology and Management, 2017, 34(2): 66-69. (in Chinese)