

光抽运自旋极化固态¹²⁹Xe

汪盛烈* 赵明信 孙献平 曾锡之

(中国科学院武汉物理研究所波谱与原子分子物理国家实验室, 武汉, 430071)

摘要: 用半导体激光抽运极化¹²⁹Xe 气体, 在 80-SY 核磁共振谱仪上单次采样得 NMR 信号, 信噪比大于 100, 信号增强因子大于 10³, 降温凝固成固态后, 其信噪比大于 50, 初步测得固态(约 80K) ¹²⁹Xe 弛豫时间为 4400s。

关键词: 光抽运 核极化 弛豫

Nuclear polarized solid ¹²⁹Xe by laser pumping

Wang Shenglie, Zhao Mingxin, Sun Xianping, Zeng Xizhi

(Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and

Molecular Physics, Wuhan Institute of Physics, Academia Sinica, Wuhan, 430071)

Abstract: The nuclear polarized ¹²⁹Xe gas by diode laser pumping was measured with a WP-80SY NMR spectrometer. We found that the SNR was greater than 100, and the signal enhancing factor was greater than 1000. After frozento solid state(80K), SNR was better than 50, the relaxation time was 4400s.

Key words: laser pumping nuclear polarization relaxation time

引 言

光抽运极化¹²⁹Xe 气体曾成功地用于老鼠肺部成像^[1]。它在人体的肺部及大脑和循环系统的成像有着重要的应用前景, 不仅具有较好的对比度和成像速度, 而且不需要很高的磁场强度, 使得人体成像仪不需要超导磁体, 只需电磁体就可满足, 大大简化了成像装置。鉴于成像时需要足够量的¹²⁹Xe, 得有相当的储存量, 由于气态¹²⁹Xe 极化弛豫时间较短, 约 20min, 而固态¹²⁹Xe 极化弛豫时间较长, 在 77K 温度, 0.1T 磁场下, ¹²⁹Xe 极化弛豫时间为 8500s, 在 4K 温度时, ¹²⁹Xe 极化弛豫时间约 500h, 因此, 高磁场、低温固态条件下储存是可行的。我们研究光抽运极化的气态¹²⁹Xe 在固化及储存过程中的有关特性, 为¹²⁹Xe 成像提供有关数据。

1 实 验

1.1 光抽运极化固态¹²⁹Xe NMR 信号观测

如图 1 所示, 1 为半导体激光器, 2 为 λ/4 波片, 3 为样品管, 4 为恒温炉, 5 为光探头, 6 为示波器, 7 为光窗, 8 为充气室。

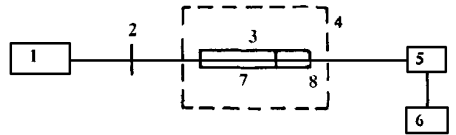


Fig. 1 Experimental setup

50mW 半导体激光(852.1nm) 抽运样品泡中的 Cs 原子。样品泡中充有 82912.6Pa 天然氙(丰度: 26% 的¹²⁹Xe) 和 3332.5Pa 氦。通过自旋交换, ¹²⁹Xe 被核极化。

* 现联系地址: 武汉华中理工大学激光加工国家工程研究中心。

在温度为 70℃ 的地磁场下, 光泵 20min 后, 放入 SY-80M 核磁共振谱仪中单次采样, 得信噪比大于 100 气态¹²⁹Xe 核磁共振信号。在没有激光照射时, 观察不到 NMR 信号, 信号增强因子大于 10³。通过谱仪上的降温装置, 吹入低温氮气, 把样品区(探头)恒温于 148K, 被光泵极化样品放入谱仪后, 其中的氙凝固成固态, 单次采样得信噪比大于 50 的极化固态¹²⁹Xe 核磁共振信号。若将光泵极化样品直接插入液氮中(77K)凝固成固态后, 放入 SY-80M 核磁共振谱仪中单次采样, 得信噪比大于 20 的极化的固态¹²⁹Xe 核磁共振信号。

1.2 固态¹²⁹Xe 极化弛豫时间 T₁ 测量

由谱仪上的降温装置, 把样品区(探头)恒温于 148K, 被光泵极化样品放入谱仪后, 开始时, 氙样品凝固在样品泡的底部, 随着时间的推移,

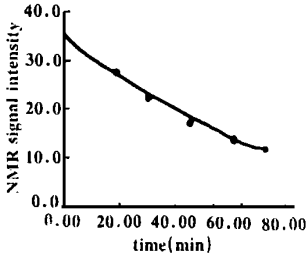


Fig. 3 The curve of relaxation

样品泡中的氙沿管壁形成一长条, 导致部分样品不在探头线圈中, 降低了 NMR 信号的强度。我们采用外部凝固的方法, 将光泵相同时间的极化的样品直接插入处于 0.1T ~ 0.26T 磁场的液氮中(77K)凝固成固态, 并在此条件下保持一定时间后, 再放入 SY-80M 核磁共振谱仪中单次采样, 方式如图 2, 测量出实验点。对不同的时间间隔重复测量, 所得的实验点形成弛豫曲线(图 3)。拟算出弛豫时间 T₁。这个过程有一定的误差, 初步测量出弛豫时间 T₁ 约 4400s。

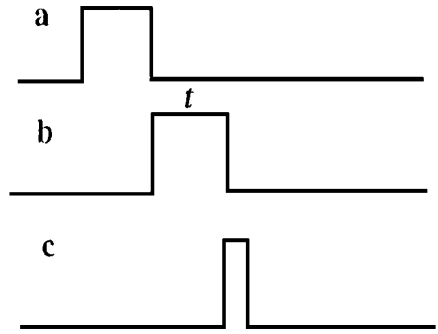


Fig. 2 Optical pumping-store up-measuring processing
a—optical pumping 20 minutes b—low temperature store up time “t” c—FID after $\pi/2$ pulse, by varying the t in (b), the Fig. 2 was obtained

2 结果分析

2.1 气-固转化过程中的极化损失

按 M. Gatzke 等^[2]的结果, ¹²⁹Xe 凝固过程中极化损失小于 2%。在我们的实验中, 因气态测量时, 样品管中只有 1/3 的粒子在探测线圈内, 而固态测量时, 几乎全部粒子都在探测线圈内, 故:

$$\frac{\text{固态极化量}}{\text{气态极化量}} = \frac{\text{固态信噪比}}{\text{气态信噪比}} \times \frac{\text{气态测量线圈中}^{129}\text{Xe 粒子数}}{\text{固态测量线圈中}^{129}\text{Xe 粒子数}} = \frac{50}{100} \times \frac{1}{3} \approx 33\%$$

极化损失大约 60%, 原因有: (1) 样品中充有铯原子, 在凝固过程中, ¹²⁹Xe 凝聚于铯的表面而加速极化弛豫; (2) 样品泡未涂壁, 在凝固过程中, ¹²⁹Xe 凝聚于管壁上, 加快了壁弛豫; (3) 由于样品泡中存在金属铯原子, 降温时凝聚于管底壁, 有一定的屏蔽效应, 减小了固态 NMR 信号。

2.2 弛豫时间 T₁ 的理论计算

根据 Fox 和 Happer 等^[2]采用的德拜声子谱方法处理核自旋弛豫, 弛豫时间 T₁ 可表示为:

$$1/T_1 \approx 8.20 \times 10^4 (\nu/h)^2 [h/(kT_D)] f(T^*) (1 + 0.667\varepsilon + 0.122\varepsilon^2) \quad (1)$$

式中, h 为普朗克常数, k 为波尔兹曼常数, T_D = 55K 为固态氙的德拜温度。

$$f(T^*) = (T^*)^9 \int_0^{1/T^*} e^x x^8 (e^x - 1)^{-2} dx \quad (2)$$

式中, $T^* = T/T_D$, $\varepsilon = (r_0/\gamma_1) d\gamma_1/dr$, γ_1 为依赖于核间距 r 的耦合常数, 平衡态时 $\gamma_1 = \gamma_1(r_0)$, $r_0 \approx 0.44\text{nm}$ 。由固态与气态之间的化学位移 ($\sigma_s - \sigma_g$) 和自旋-转动相互作用的对应关系得:

$$\gamma_1/h = (\mu_I/\mu_B) [h/(8\pi M r_0^2)] (\sigma_s - \sigma_g) \quad (3)$$

对于 ^{129}Xe , 磁矩 $\mu_I = -0.772\mu_N$, μ_B 为波尔磁子, M 为约化质量, 根据 A. Pines 等的结果: 77K 时, $\sigma_s - \sigma_g = 317 \times 10^{-6}$, 由 (3) 式计算得: $\gamma_1/h = -27\text{Hz}$ 。根据 Adrian^[3] 的结果, $\varepsilon/r_0 = -25.06\text{nm}^{-1}$, 计算得: $T_1 = 8300\text{s}$ (77K 时)。这与 M. Gatzke 等^[2] 的结果 $8500 \pm 800\text{s}$ (磁场 $H > 0.1\text{T}$ 时) 相吻合。

2.3 弛豫时间 T_1 的实验与理论误差

我们测的 $T_1 = 4400\text{s}$ 与上述结果相差较大, 可能的原因有: (1) 样品泡中充有大量的铯, 在凝固过程中, ^{129}Xe 凝聚于铯的表面而加速极化弛豫; (2) 样品泡未涂壁, 在凝固过程中, ^{129}Xe 凝聚于管壁, 加大壁弛豫; (3) 样品是天然氙, 而不是同位素, 这里有 ^{129}Xe 与 ^{131}Xe 之间的交叉弛豫, 而上述理论计算是忽略壁弛豫和同位素效应得出的, M. Gatzke 等的结果也是在涂壁和同位素条件下测量的。

3 结 论

我们获得极化的固态 ^{129}Xe , 信号增强因子大于 5×10^2 , 初步测量的极化弛豫时间为 4400s , 要进一步增大极化度和弛豫时间需采取如下措施: (1) 加大抽运激光功率; (2) 适当减少样品中的铯金属; (3) 样品管涂壁。

参 考 文 献

- 1 Albert M S, Cares G D, Driehuys B *et al*. Nature, 1994; 370: 199
- 2 Gatzke M, Cares G D, Driehuys B *et al*. Phys Rev Lett, 1993; 70: 690
- 3 Adrian F J. Phys Rev, 1964; A980: 136

作者简介: 汪盛烈, 男, 1965年5月出生。硕士, 助理研究员。现主要从事激光技术与应用研究工作。

收稿日期: 1998-02-20 收到修改稿日期: 1998-06-03

• 简 讯 •

改进的 CdGeAs₂ 晶体室温发射可调谐中红外光波

英国伦敦 Blackett 实验室的研究人员 K. L. Vodopyanov 和美国新罕布什尔州的 Sanders 的 P. G. Schunemann 研制成功一种高效的室温中红外脉冲 CdGeAs₂ 晶体激光器, 用钷激光泵浦磷锗锌光参量振荡器的信号和载波之间的差频振荡 (DFG)。输出 $6.8 \sim 20.1\mu\text{m}$ 的可调谐连续光波。这种改进的 CdGeAs₂ 晶体在室温条件发射, 该晶体在 Sanders 采用水平梯度冷却技术生长而成。在 $10 \sim 13\mu\text{m}$ 波长时, 最大转换效率 20%, 在 $7 \sim 16\mu\text{m}$ 波长时, 高于 10%, 相应的峰值功率为几千瓦。20% 的外转换效率相当于 39% 的内转换效率。这种波长范围可调谐的光源对于包括光谱学、遥测、生物学和医学等多种应用都具有重要意义。

(卢中尧 曹三松 供稿)