

铷光谱灯的光谱研究

王芳^{1,2}, 赵峰¹, 祁峰^{1,2}, 吴汉华¹, 钟达¹, 梅刚华^{1*}

1. 中国科学院武汉物理与数学研究所, 湖北 武汉 430071

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要 Rb 光谱灯是 Rb 原子频标的重要部件。Rb 光谱灯发出的光含有两种成分, 一种是对原子跃迁信号有贡献的有效光成分, 一种是仅体现为光噪声的无效光成分。尽可能地增强 Rb 光谱灯有效光成分并抑制无效光成分, 对于提高 Rb 原子频标锁频环路的信噪比从而改善 Rb 原子频标的频率稳定度具有重要意义。利用单色仪获得了分别充有起辉气体 Ar, Kr 和 Xe 的三种常用 Rb 光谱灯的光谱, 分析了三种 Rb 光谱灯的光谱特性, 讨论了如何提高有效光强和抑制无效光强的问题。实验和分析结果表明, Rb 光谱灯有效光强与所用起辉气体的种类和灯泡的工作温度密切相关。灯泡工作温度较低时, Xe 灯有用光强最大, Kr 灯次之, Ar 灯最低; 当灯泡工作温度较高时, Xe 灯有用光强仍最大, Ar 灯次之, Kr 灯最低。分析还表明, 采用合适的光学滤光方法可以有效地滤除 Rb 光谱灯的无效光成分。

关键词 Rb 光谱灯; 光谱; 起辉气体; 光噪声

中图分类号: O433.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)05-1164-04

引言

Rb 光谱灯是被动型 Rb 原子频标的重要部件^[1]。Rb 光谱灯的作用^[2, 3]是通过光抽运实现 Rb 原子基态两个钟跃迁能级之间的粒子数反转, 对 Rb 原子频标整机的性能有很大影响^[4, 5]。

Rb 光谱灯的发光原理是无极放电^[6], 发光物质是 Rb 蒸气和起辉气体。在高频电场的作用下, 灯泡中的起辉气体分子发生电离。电离后的起辉气体分子通过碰撞将能量传给 Rb 原子, 把 Rb 原子激发到激发态上去。处于激发态的 Rb 原子通过跃迁回到基态而发光。光谱灯光谱可以分为两种成分, 一种是对光抽运有贡献的有效成分, 包含 Rb 原子从 $5^2P_{1/2} - 5^2S_{1/2}$ 跃迁所发出的光 (794.7 nm) 和从 $5^2P_{3/2} - 5^2S_{1/2}$ 跃迁所发出的光 (780 nm), 称为有效光; 一种是对光抽运没有贡献的无效成分, 包含 Rb 原子其他谱线的发光和起辉气体发光, 称为无效光。一个性能优良的光谱灯所发出的光, 应该具有尽可能强的有效成分和尽可能弱的无效成分^[7]。从上述发光过程可看出, Rb 光谱灯的光谱特性与起辉气体关系非常密切^[8]。因此, 考察 Rb 光谱灯的光谱特性与起辉气体的关系, 对于改善 Rb 光谱灯的性能乃至改善 Rb

原子频标的性能具有重要意义。

Rb 光谱灯所用的起辉气体选用化学性质不活泼的惰性气体, 一般有氩 (Ar)、氪 (Kr) 和氙 (Xe) 三种。本文从实验上研究充有以上三种不同起辉气体的 Rb 光谱灯的光谱特性。利用单色仪获得了三种谱灯在不同工作温度下的光谱, 定量分析了有效光和无效光成分, 讨论了三种谱灯的特点, 从设计和使用的角度探讨了减小 Rb 光谱灯光谱中无效成分的方法。

1 实验方法

3 个谱灯分别充有起辉气体 Ar, Kr, Xe 气。气体压力为 267 Pa, 激励信号的频率约为 110 MHz, 功率为 1.8 W。灯泡的工作温度用温控电路控制并设置, 以便测量不同温度下谱灯的发光光谱。

光谱测试装置示于图 1。谱灯发出的光经过透镜聚焦后, 由狭缝 S1 进入单色仪。入射光通过凹面反射镜 M1 反射到光栅 G 进行分光, 分光后得到的单色光经 M1 和反射镜 M2 反射后穿过狭缝 S2, 供光电倍增管探测^[9]。单色仪为 WDP500-D 型自动扫描单色仪, 扫描范围设置为 300~900 nm, 采样间隔为 0.1 nm, 积分时间为 0.3 s, 计算机发出单

收稿日期: 2008-03-10, 修订日期: 2008-06-16

基金项目: 国家“973”计划项目 (2005CB724507) 资助

作者简介: 王芳, 1982 年生, 中国科学院武汉物理与数学研究所博士研究生 e-mail: fang_wang@wipm.ac.cn

* 通讯联系人 e-mail: mei@wipm.ac.cn

色仪光栅扫描驱动指令，并储存光电倍增管的光强输出信号。

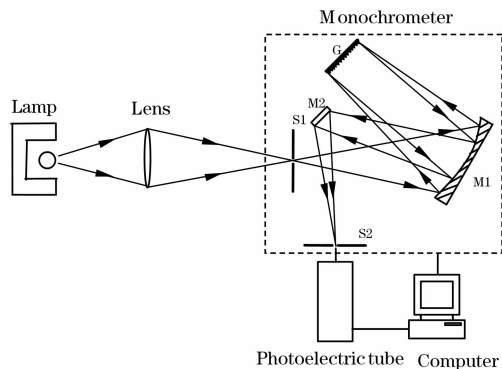


Fig. 1 Experimental setup for spectrum measurement of a rubidium spectrum lamp

2 实验结果分析

2.1 光谱

采用图 1 所示的实验装置，我们测得不同工作温度下 3 个谱灯的光谱。工作温度为 110 °C 时三种谱灯的光谱示于图 2。由图 2 可以看到，Rb 光谱灯光谱中含有众多成分，为便于分析，我们对 Rb 原子发光成分进行了标识^[10]。

如图 2 所示，三种谱灯中均观察到丰富的发光谱线。这些谱线可以分为 Rb 发光和起辉气体发光两种。Rb 发光谱线共观察到 6 条，谱线标识列于表 1。在 6 条 Rb 原子谱线中，谱线 ⑤ 和 ⑥（分别对应 $5^2P_{1/2} - 5^2S_{1/2}$ 跃迁 (794.7 nm) 和 $5^2P_{3/2} - 5^2S_{1/2}$ 跃迁 (780 nm)，是 Rb 光谱灯光谱中的有效成分，其余为无效成分。由图 2 和表 1，可以看出三种谱线中有效光谱成分所占比例呈现出较大差异，有效成分比重最大者为 Xe 灯。

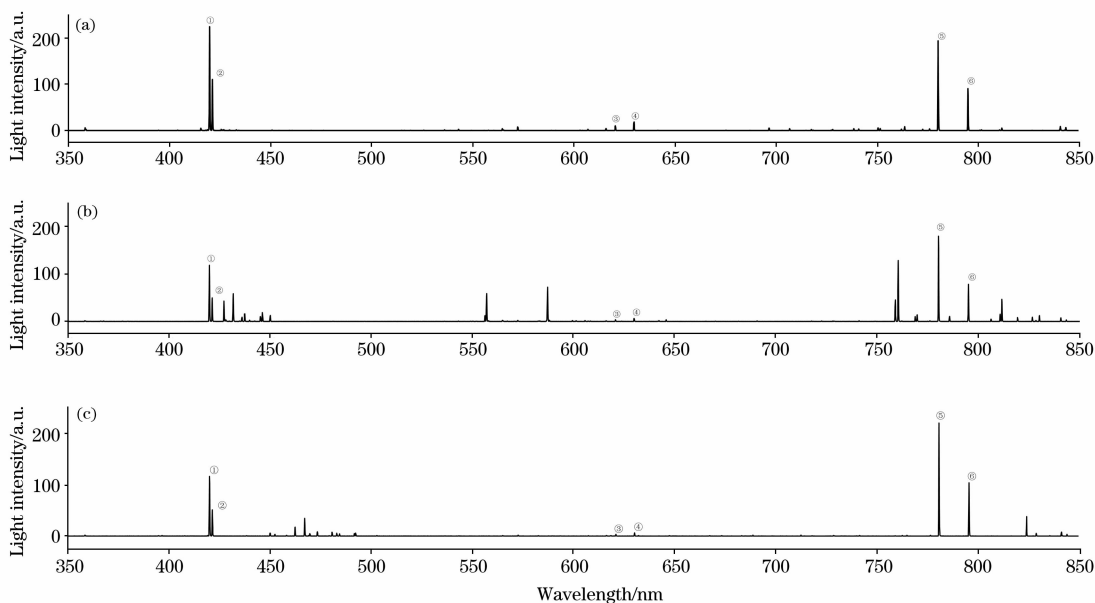


Fig. 2 Light spectra of argon(a), krypton(b) and xenon(c) buffer gas lamps. The rubidium lines were marked, and unmarked ones are the buffer gas lines

Table 1 Rubidium lines observed in the three lamps

谱线	对应原子跃迁	波长 /nm	强度/a. u.		
			Ar 灯	Ke 灯	Xe 灯
1	Rb($6^2P_{3/2} - 5^2S_{1/2}$)	420.1	219.5	118.5	115.7
2	Rb($6^2P_{1/2} - 5^2S_{1/2}$)	421.5	110.1	498.0	50.7
3	Rb($6^2D_{3/2} - 5^2P_{1/2}$)	620.6	10.3	3.4	3.3
4	Rb($6^2D_{5/2} - 5^2P_{3/2}$)	629.8	18.3	6.4	6.0
5	Rb($5^2P_{3/2} - 5^2S_{1/2}$)	780	193.7	180.0	218.8
6	Rb($5^2P_{1/2} - 5^2S_{1/2}$)	794.7	90.6	78.4	103.1

2.2 光谱随温度变化关系

Rb 光谱灯中灯泡的工作温度对发光特性的影响很大^[11]。为了弄清这种关系，我们在 106~142 °C 之间改变谱灯的工作温度，每隔 4 °C 选择一个温度点，在每一个温度点

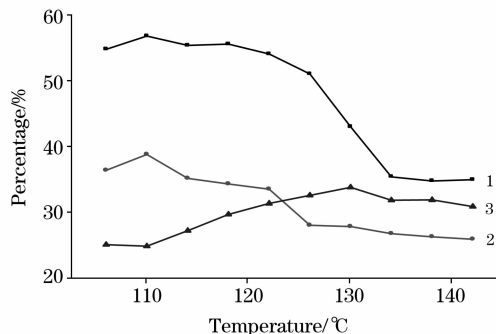


Fig. 3 Percentage ratios of useful light intensity to total light intensity as the function of lamp bulb temperature

1: Xe; 2: Ar; 3: Kr

对三种起辉气体的谱灯的光谱进行测试,得到了三种谱灯在每个温度点的光谱。

对于一个实用的光谱灯,我们关心的主要问题为何种温度条件下,有效光成分的比重最大。我们根据三种谱灯在不同工作温度下的光谱,作出了有效光强在总光强中所占比例随温度变化的曲线,见图 3。

3 讨 论

原子频标最重要的指标是频率稳定度。频率稳定度与原子频标锁频环路的信噪比有直接关系,在信号一定的情况下,噪声越大,稳定度越低。因此,抑制噪声是提高稳定度的重要手段。对于 Rb 原子频标而言,噪声主要来源是光子的散弹噪声^[12],即

$$N_{PC} = (2qI_{PC})^{1/2} \quad (1)$$

其中 q 为电子电量, I_{PC} 为光电池探测到的直流光电流信号。光电池探测到的是总光强信号。为了提高 Rb 原子频标稳定度,应尽可能提高有效光强在总光强中所占的比例。

(1)不同起辉气体谱灯特性比较

光谱灯中有效光强占总光强比例与充入的缓冲气体密切相关。充入 Ar, Ke 和 Xe 作为起辉气体的谱灯都被证明是可用的^[13, 14]。但迄今为止没有见到关于三种谱灯优劣的比较。这种比较应该从光谱中有效光强占总光强比例进行。由图 3, 容易看到,在灯的工作温度较低时,光谱纯度是 Xe 灯最优, Ar 灯次之, Kr 灯最差;当灯的工作温度较高时, Xe 灯仍最

优, Kr 灯次之, Ar 灯最差;即无论是高温还是低温,都是 Xe 灯的有用光强占总光强最大。最近美国 Perking Elmer 公司研制出目前世界上稳定度最高的谱灯抽运 Rb 频标,用的就是 Xe 灯^[15],这与 Xe 灯的此特性不无关系。

(2)光学滤光

采用光学滤光方法,可以有效地滤除 Rb 光谱灯的无效光。滤光方案有低通滤光、高通滤光和带通滤光三种。滤光方案的选取应根据无效光的分布特性确定。与有效光波长比较,如果无效光分布在波长较短的区域,可采取高通滤光方案;若无效光分布在波长较长的区域,可采取低通滤光方案;如果象图 2 所示 Kr 灯光谱那样,无效光分布范围较大,则可选用带通式滤光。光学滤光片的技术已经相当成熟,如果选用合适,可以在减小 Rb 频标的光量子噪声方面发挥重要作用。

4 总 结

Rb 光谱灯是 Rb 原子频标的重要部件。Rb 光谱灯总是包含了有效光和无效光两种成分。有效光对信号有贡献,无效光则仅对噪声有贡献,应尽可能加以抑制。本文研究了分别充有 Ar, Kr 和 Xe 气体的三种 Rb 光谱灯的发光光谱,发现 Xe 灯有用光强占总光强最大。因此,采用 Xe 气作为起辉气体,并采取合理的光学滤光措施,可以相当程度上减小 Rb 光谱灯的无效光成分,提高 Rb 原子频标锁频环路的信噪比,从而改善 Rb 原子频标的频率稳定度指标。

参 考 文 献

- [1] ZENG Yuan, ZHAO Feng, WU Han-hua, et al(曾 媛, 赵 峰, 吴汉华, 等). Chinese Journal of Magnetic Resonance(波谱学杂志), 2004, 21(3): 345.
- [2] Bell W E, Bloom A L, Lynch J. Rev. Sci. Instrum., 1961, 32: 688.
- [3] Brewer R G. Rev. Sci. Instrum., 1961, 32: 1356.
- [4] Vanier Jacques, Audion Claude. The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards Adam Hilger, 1989, 1: 1271.
- [5] Volk C H, Frueholz R P. J. Appl. Phys., 1985, 57(3): 980.
- [6] WANG Yi-qiu, WANG Qing-ji, FU Ji-shi, et al(王义遒, 王庆吉, 傅济时, 等). Quantum Frequency Standard Theory(量子频标原理). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 1986. 368.
- [7] Camparo J C, Mackay R. Journal of Applied Physics, 2007, 101: 053303.
- [8] Fukuyo H, Iga K I. Japanese Journal of Applied Physics, 1970, 9(7): 729.
- [9] YANG Huai-dong, XU Li, CHEN Ke-xin, et al(杨怀栋, 徐 立, 陈科新, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2005, 25(9): 1520.
- [10] Luna F R T, Cavalcanti G H, Coutinho L H, et al. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2002, 75: 559.
- [11] Fukuyo H, Iga K I, Kuramochi N, et al. Japanese Journal of Applied Physics, 1970, 9: 729.
- [12] Vanier J, Bernier L G. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement IM-30, 1981. 277.
- [13] Tako Toshiharu, Koga Yasuki, Hirano Isao. Japanese Journal of Applied Physics, 1975, 14(5): 949.
- [14] Moe G, Tam A C, Happer W. Physical Review A, 1976, 14(1): 349.
- [15] Todd Dass, Gerald Freed, John Petzinger, et al. GPS Clocks in Space: Current Performance and Plans for the Future. 34th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, Reston, VA, USA, December 03-05, 2002, 175.

Spectroscopy Study of Rubidium Spectrum Lamps

WANG Fang^{1,2}, ZHAO Feng¹, QI Feng^{1,2}, WU Han-hua¹, ZHONG Da¹, MEI Gang-hua^{1*}

1. Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract Rubidium spectral lamp is one of the critical parts in a rubidium atomic frequency standard (RAFS). The light emitted from the spectral lamp contains two components, one is the useful component, which contributes to the atomic transition signal, and the other is the useless component, which acts only as the light noise. In order to improve the signal-to-noise ratio of the frequency locking loop of a RAFS, and therefore to obtain a highly stable RAFS, it's very important to enhance the useful light component and suppress the useless component. In the present work the light spectra of the three commonly used rubidium spectrum lamps with bulbs separately filled with buffer gases argon, krypton and xenon were obtained by means of a monochromator. The spectra were analyzed and the methods to enhance useful light intensity and reduce useless light intensity were discussed. Results showed that the useful light intensity strongly depends on the types of buffer gases and the bulb temperature. In the whole range of bulb temperature, the Xe lamp had the highest useful light intensity among the three lamps. The Kr lamp showed a higher useful light intensity than the Ar lamp at low bulb temperature, while at high bulb temperature the Ar lamp showed a higher useful light intensity than the Kr lamp. Analysis also indicates that the light noise of a rubidium spectrum lamp can be effectively minimized by adopting suitable light filtering technique.

Keywords Rubidium spectrum lamp; Spectroscopy; Buffer gas; Light noise

* Corresponding author

(Received Mar. 10, 2008; accepted Jun. 16, 2008)

(上接 1163 页)

22-26 ACS Spring 2009 National Meeting & Exposition,

Salt Lake City, UT;

Contact: ACS Meetings, 1155 16th St., NW, Washington, DC 20036; Tel. (202) 872-4396, Fax: (202) 872-6128;

E-mail: natlmtgs@acs.org

Web site: <http://www.chemistry.org/>

April 2009

9-11 7th China International Scientific Instrument and Laboratory Equipment Exhibition (CISILE 2009),

Beijing, China;

Contact: CISILE Exhibition Office, B2-804 Room No. 1 Building Wudongdalou No. 9, Yard Chegongzhuang Street, Beijing 100044, China; Tel. 86 10 88395128, Fax: 86 10 88395130;

E-mail: chenwei@cisile.com.cn

Web site: <http://www.cisile.com.cn/>

13-17 2009 Materials Research Society Spring Meeting,

San Francisco, CA;

Contact: Materials Research Society, 506 Keystone Drive, Warrendale, PA 15086-7573; Tel. (724) 779-3003, Fax: (724) 779-8313;

E-mail: info@mrs.org

Web site: http://www.mrs.org/s_mrs/index.asp

(下转 1175 页)