

New

New Generation Atomic Clocks

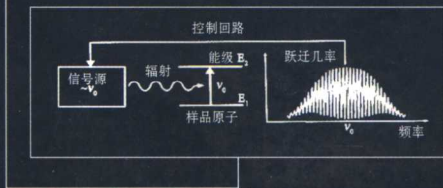
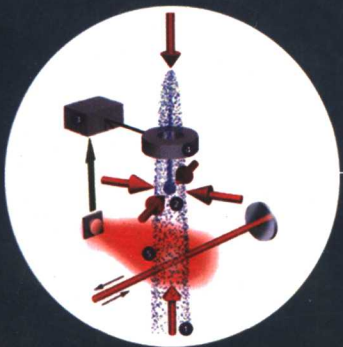
新一代原子钟

■ 黄秉英 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社



New
New Generation Atomic Clocks

新一代原子钟

■ 黄秉英 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

新一代原子钟/黄秉英著. —武汉: 武汉大学出版社, 2006. 10
ISBN 7-307-05249-0

I. 新… II. 黄… III. 原子钟 IV. TH714.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 116380 号

责任编辑:任翔 史新奎 责任校对:王建 版式设计:杜枚

出版发行: **武汉大学出版社** (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: wdp4@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

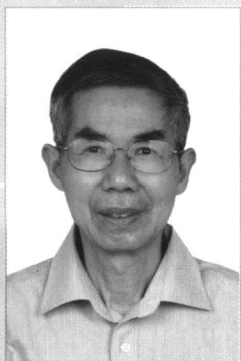
印刷: 武汉大学出版社印刷总厂

开本: 850×1168 1/32 印张: 4 字数: 108千字 插页: 2

版次: 2006年10月第1版 2006年10月第1次印刷

ISBN 7-307-05249-0/TH·9 定价: 12.00元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。



黄秉英

1961年毕业于武汉大学物理系，中国计量科学研究院研究员。长期从事原子钟研究，近十年来致力于冷原子钟研制，由他主持物理设计的铯原子喷泉，成为我国第一台冷原子钟。已出版著作《时间频率的精确测量》(1986)；《计量测试技术手册——第11卷时间频率(1996)》。

序

20 世纪 50 年代发明原子钟以来,随着科学技术的发展,原子钟技术已不知不觉地深入人类生活的各个层面,特别是原子钟获得广泛的工业应用。其中,最辉煌的应用是成为导航星全球定位系统(美国 GPS、俄罗斯 GLONASS 和欧盟正在建立的伽利略系统)的控制核心,极大地促进了导航和信息传播技术的发展。

20 世纪 90 年代,随着激光技术的进步,科学家实现了用激光冷却、捕陷和操控中性原子,相继研制成功冷原子钟和光钟,以及基于“相干布居囚禁”的 CPT 钟,它们成为新一代原子钟,把原子钟的应用推进到更高层次,扩展到更宽的层面。

本书作者长期从事原子钟研究工作,近十年来致力于冷原子钟研制。由他主持物理设计的我国第一台冷原子钟(2003),准确度达到 10^{-15} 量级,相当于走时 350 万年不差一秒。作者着重在技术和方法层面上,论述新一代原子钟的原理、技术、方法、具体组成及其应用,是传播相关新技术、新方法的一部力作,将有助于人们站在高新技术前沿,激发自主创新思维。

王育竹

2006.6

王育竹,中国科学院院士,瑞典皇家工程科学院外籍院士。最早提出光频移激光冷却气体原子的机制,我国激光冷却捕陷原子的先驱。曾任国际量子电子学多届会议节目委员会委员和大会副主席。

目 录

第 1 章 传统型原子钟	1
1.1 铷原子钟	1
1.1.1 铷汽泡型	2
1.1.2 铷激射器	4
1.2 氢原子钟	6
1.2.1 主动型氢激射器	6
1.2.2 被动型氢激射器	9
1.3 铯原子钟	10
1.3.1 磁选态型	11
1.3.2 光选态型	14
1.3.3 铯原子束频率基准	16
1.4 传统型原子钟的性能及其限制	18
1.4.1 主要特性	18
1.4.2 性能限制	18
第 2 章 新一代原子钟	23
2.1 冷原子喷泉钟	23
2.1.1 工作原理	24
2.1.2 关键技术	27
2.1.3 原子喷泉钟回落信号原子数损失的估计	35

2.1.4	冷原子喷泉钟的领先水平	39
2.2	空间基准钟与汽泡型冷原子钟	40
2.2.1	空间基准钟	40
2.2.2	汽泡型冷原子钟	42
2.3	CPT 钟	43
2.3.1	CPT 现象	43
2.3.2	CPT 钟工作原理	43
2.3.3	CPT 钟的前景	45
2.4	光钟	45
2.4.1	光梳	46
2.4.2	光钟的基本组成	47
2.4.3	激光频率标准	48
第 3 章	我国第一台冷原子钟	50
3.1	结构与特点	50
3.1.1	装置的基本组成	50
3.1.2	冷原子喷泉的设计与配置	51
3.1.3	激光—光学系统	61
3.1.4	电子测控系统	64
3.2	关键部件及其性能	66
3.2.1	磁光阱	66
3.2.2	C 场及其磁屏蔽组件	72
3.2.3	微波谐振腔	74
3.2.4	荧光收集器	79
3.2.5	主、从激光器	80
3.2.6	声光调制器(AOM)	82
3.2.7	PC 机控制系统	83
3.3	飞行时间信号	84
3.3.1	基本估算公式	85

3.3.2 TOF 信号测量	86
3.4 主要性能指标	89
3.4.1 主要性能	89
3.4.2 不确定度评估	91
第 4 章 原子钟的高端应用	95
4.1 原子钟在导航星和空间站的应用	95
4.1.1 星载原子钟的改进与更新	96
4.1.2 新一代空间频率基准	99
4.2 用原子干涉仪测量重力加速度	101
4.2.1 工作原理	101
4.2.2 装置概要	103
4.2.3 主要环节	105
4.2.4 结果	112
4.3 21 世纪的时间频率计量	112
4.3.1 计量科学的革新	113
4.3.2 导航航天及信息业应用	114
4.3.3 新一代原子钟和“天文钟”	115
附录:与原子钟的发明和改进相关的诺贝尔物理学奖	117
参考文献	118

第1章 传统型原子钟^{[1]-[2]}

原子钟是最精确的频率和时间标准装置。它以所用原子特定能级跃迁辐射的电磁波频率为参考频率,通过电子学频率自动控制方法,对实用频率源进行频率或相位锁定,从而得到方便使用的、与原子参考标准同样准确和稳定的标准频率信号。将该频率信号一个周期一个周期地累加起来,再规定好一个起点,便成为原子钟。

这里,把原子钟发明以来获得广泛应用、结构日臻完善的原子钟,归类为传统型原子钟,其原子样品工作温度均在室温(300K)以上,它们是铷原子钟、氢原子钟和铯原子钟。

1.1 铷原子钟

铷原子(同位素⁸⁷Rb和⁸⁵Rb)的基态超精细能级及相应谱线结构如图1-1所示。

在铷原子钟,用做参考标准的是⁸⁷Rb的($F=2, m_F=0$) \leftrightarrow ($F=1, m_F=0$)能级跃迁,相应跃迁频率为

$$f_{\text{Rb}} = f_0 + 574 \overline{H_c^2} \quad (1-1)$$

式中: $f_0 = 6\,834\,682\,608\text{Hz}$;

H_c 为工作磁场强度,单位为Gs(高斯, $1\text{Gs} = 10^{-4}\text{T}$);

f_{Rb} 以Hz计。

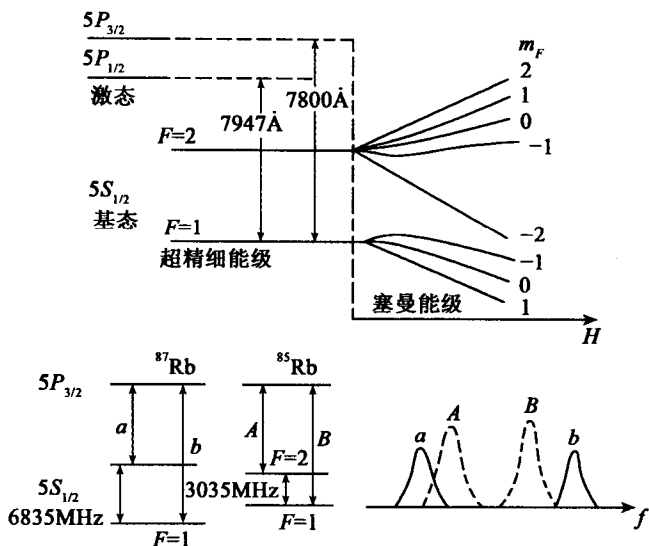


图 1-1 ^{87}Rb 和 ^{85}Rb 的基态超精细能级及其相应谱线结构

1.1.1 铷汽泡型

铷汽泡型原子钟的工作原理示于图 1-2。

其中,铷原子谐振器由 ^{87}Rb 放电光源、 ^{85}Rb 滤光泡、 ^{87}Rb 谐振泡、微波谐振腔以及光敏管检测器组成。它是一种被动型谐振器,通过图中的锁频环路对压控晶振进行频率控制。

铷原子谐振器的工作原理如下:利用高频放电把铷原子 (^{87}Rb) 激发到 $5P_{1/2}$ 或 $5P_{3/2}$ 态,随后,受激原子自发辐射放出波长为 7947\AA 或 7800\AA 的光。经透镜聚焦的光束通过滤光泡时,由于 ^{85}Rb 原子谱线结构中的 A 线与 ^{87}Rb 光谱中的 a 线部分重叠的特殊结构(参考图 1-1), ^{87}Rb 光中的 a 线将被 ^{85}Rb 吸收,于是通过滤

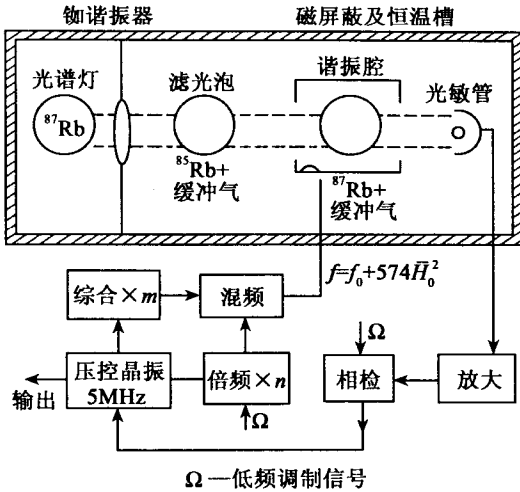


图 1-2 铷原子频标的原理方块图

光泡的铷(^{87}Rb)光只有 b 线,这是一个近乎单色的光,以致当其到达谐振腔时,将只抽运 ^{87}Rb 的基态超精细能级 $F=1$ 上的原子到激发态 $5P_{3/2}$ 。由于原子在激发态的弛豫时间很短,很快就通过自发辐射以相等的几率跃迁到基态 $F=1$ 和 $F=2$ 两能级上去,于是多次重复这一过程的结果, $F=1$ 能级上的原子将完全被抽运到 $F=2$ 能级上去,完成通过光抽运方法进行态选择的过程。此后,继续入射的光就不会再被吸收了。但是,如果同时还向谐振腔馈入微波激励信号,则当该信号频率等于 ^{87}Rb ($F=2, m_F=0$) \leftrightarrow ($F=1, m_F=0$) 之间的能级跃迁频率时, ^{87}Rb 将发生微波谐振。与之相应,原子从能态 ($F=2, m_F=0$) 过渡到 ($F=1, m_F=0$),入射的光又将继续被吸收。光敏检测器将检测到这一吸收信号。这样,光敏检测器上吸收信号的大小,与 ^{87}Rb 谐振泡中原子的微波跃迁几率成比例,鉴于这种跃迁几率与激励信号频率的关系,具有一般

谐振器那种谐振线形,我们看到的吸收信号,其频率响应也便与一般谐振器相似。

图 1-3 示出铷频标的典型锁频环路。

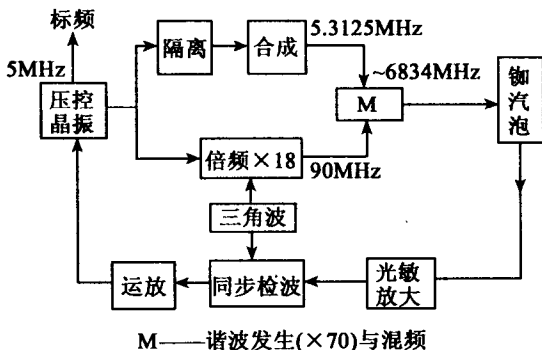


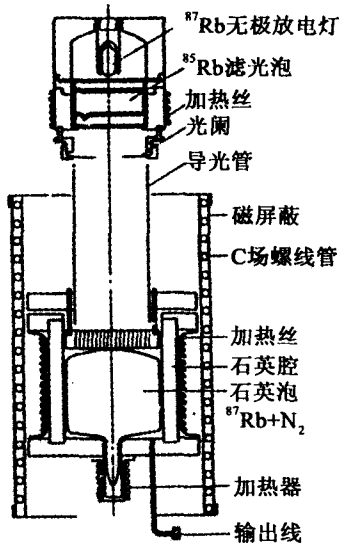
图 1-3 典型铷频标锁频环路

1.1.2 铷激光器

在图 1-2 所示的汽泡型铷谐振器中,如果腔的损耗足够低(或 Q 值较高),铷(^{87}Rb)汽泡中铷原子的数量和铷灯的光强足够高,则能产生自持振荡。这时,去掉铷谐振器中的光敏管,并用锁相环路代替图 1-3 中的锁频环路,便得到新的频率标准——铷激光器频率标准。

铷激光器的基本结构如图 1-4 所示。

同汽泡型铷频标相比,这部分只少了光探测部件。抽运光源是无极放电灯,它和滤光泡同置于恒温罩内。激射器要求的抽运光强远较非自激式铷频标高,灯功率约为 10W 数量级。滤光泡的工作气体(除 ^{87}Rb 蒸汽外,还充有惰性气体,如氩等)和温度要选择,以便对 ^{87}Rb 共振光的 a 线有较好的滤除效果,而对 b 线,又有很好的透光性能,以达到强光抽运的目的。谐振腔 Q 值要很高,

图 1-4 光抽运铷激光器(^{87}Rb)

一般大于 50 000。由于腔频的牵引作用,使振荡频率随腔谐振频率而变化,因此,腔要很好恒温。腔材料选用热膨胀系数小的,或采用温度补偿措施。一般常采用内壁镀银的熔融石英腔。腔的工作模式常选 TE_{021} ,以得到较高的 Q 值和较大的体积,并容纳较多的工作物质。腔一端通光,吸收泡也用石英材料制成,泡壁与腔壁贴近,以减少微波损耗,载泡腔 Q 值也须大于 30 000。也有采用腔泡合一工艺结构的,以提高机械稳定性,但由于腔体即为铷蒸汽容器,需要真空密封,而且要防止铷原子与腔壁起作用,所以在真空工艺上困难较大。

吸收泡内除充金属铷同位素外,还充以适量的缓冲气体,以 1.5kPa 左右的氮气为最好。腔和吸收泡处在不同恒温罩内,保持最佳工作温度。为了防止铷蒸汽在泡壁上冷凝,影响腔 Q 值,泡

尾部特别又装了一恒温器,其温度略低于泡温,使铷只凝结在该处。振荡在(0-0)跃迁线的铷激射器,腔外应加恒定磁场线圈,以产生与高频磁场平行的 C 场。腔体部分要有很好的磁屏蔽,以免周围杂散磁场变化引起振荡频率不稳。

1.2 氢原子钟

氢(^1H)原子的基态超精细能级结构如图 1-5 所示。

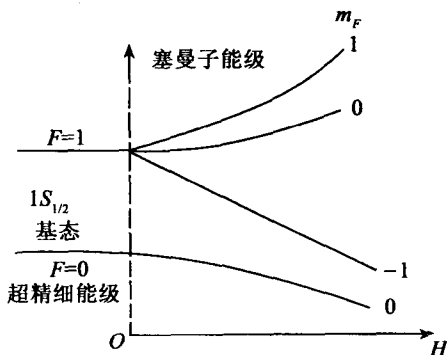


图 1-5 氢原子的基态超精细能级结构

在氢原子钟,用做参考标准的是 $(F=1, m_F=0) \leftrightarrow (F=0, m_F=0)$ 能级跃迁,其相应跃迁频率为:

$$f_H = f_0 + 2\,766\, H_c^2 \quad (1-2)$$

式中: $f_0 = 1\,420\,405\,752\text{Hz}$;

H_c 为工作磁场强度,单位为 Gs(高斯);

f_H 以 Hz 计。

1.2.1 主动型氢激射器

主动型氢激射器是一个自激振荡器,图 1-6 示出其工作原理。

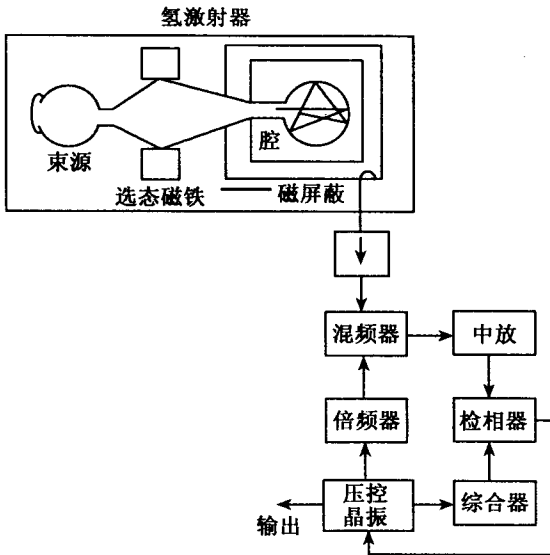


图 1-6 氢激光器原子频率标准

其中,激光器由氢原子束源、选态磁铁、贮存泡和谐振腔等组成。氢原子由束源飞出后,在真空中形成原子束,态选择器是一个六极磁铁,它把原子束中那些处于高能态($F=1, m_F=0$)的原子聚焦到置于谐振腔中的贮存泡。进入泡中的原子经过多次反射才能从泡中飞出,从而延长了原子同微波场相互作用的时间(约1s)。贮存泡是由特殊材料制成的,泡壁有特殊的涂层,以保证氢原子与其碰撞时不会改变能态。处于谐振腔中的氢原子,首先在腔中接近氢原子($F=1, m_F=0$) \longleftrightarrow ($F=0, m_F=0$)跃迁频率的噪声感应下发生跃迁,由于经过选态器进入谐振腔的氢原子是处于高能态的,故伴随跃迁将辐射电磁波。鉴于腔的谐振频率也是调谐在($F=1, m_F=0$) \longleftrightarrow ($F=0, m_F=0$)的跃迁频率上,原子的辐射信号

将在腔中得到加强,并进一步感应($F = 1, m_f = 0$)态的原子发生跃迁。当进入腔中的原子流量足够大,超过了某个阈值,以致感应辐射的能量足以补偿谐振腔的电损耗时,谐振腔中将产生自持振荡。振荡的信号由谐振腔引出,作为锁相环路的参考信号,对压控晶振进行相位锁定。

图 1-7 示出一种典型的主动氢激光器的锁相环路。

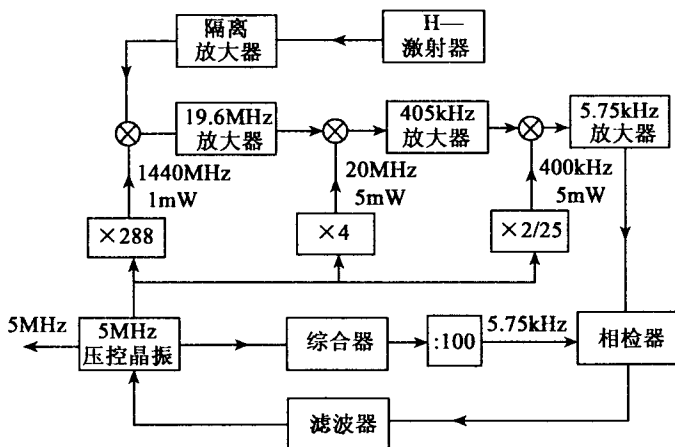


图 1-7 典型的氢原子钟锁相环路

氢激光器的谐振信号,线宽可以做到 1Hz,因此,它的谱线 Q 值是原子标准中最高的。与之相应,它有很好的短期稳定度(取样时间 $\tau = 1 \sim 10^4$ s)。它的准确度主要受限于贮存泡的壁移效应(氢原子在贮存泡中与器壁碰撞将产生可观的频移),至今只达到 $1 \sim 2 \times 10^{-12}$ 量级。当氢原子频率标准作为一台钟投入长期连续运行时,由腔失谐产生的频率牵引效应是造成频率漂移的主要原因。

1.2.2 被动型氢激光器

被动型氢激光器(见图 1-8),着眼于最有效地减少激光器的腔牵引效应。

同主动型激光器相比,它具有下述特点:

①激光器工作在振荡阈值之下,即不振荡,不输出振荡信号,其作用与一谐振放大器相似,检测信号为氢原子所放大的微波信号。

由于不要求激光器满足振荡条件,腔的 Q 值(Q_c)可远小于主动型激光器情形,而腔牵引效应仍比例于 Q_c/Q_l ,牵引效应因此得到显著的减少。此外,由于腔 Q 减小,腔的体积也得到明显减小,它为实现装置的小型化提供了必要的条件。

②引入自适应调谐技术保持谐振腔的预调谐值,从而有效地抑制了腔频的变化和漂移。

③用锁频环路代替锁相环路实现对主控振荡器的控制。

被动型氢激光器的工作原理如图 1-8 所示。

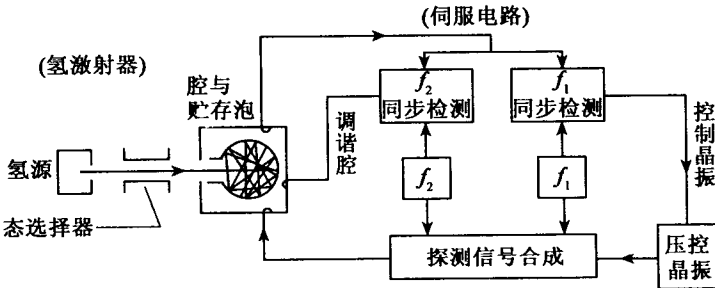


图 1-8 被动型氢激光器

图中, f_1, f_2 分别为调制频率, $f_1 \leq$ 氢共振线半宽, $f_2 \leq$ 腔谐振线半宽。它是一个双锁频环路。5MHz 晶振被锁在氢谱线峰上, 而微波腔的调谐受晶振频率控制, 从而也锁在氢谱线峰频率上。