

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.03.05

芯片相干布居囚禁原子钟

陈杰华^{1,2}

(1. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 湖北 武汉 430071;

2. 武汉量子技术研究院, 湖北 武汉 430206)

摘要: 对基于相干布居囚禁 (CPT) 态原子的芯片级原子钟技术进行了综述, 包括 CPT 原子钟的基本原理、Ramsey-CPT 原子钟技术、CPT 原子钟的微小型化方案、CPT 芯片原子钟的发展等, 对其中的关键技术: 激光频率调制、Ramsey 技术、左右旋圆偏振光泵浦 (push-pull)、激光和微波稳频以及微光机电加工系统 (MOEMS) 等技术进行分析讨论, 最终总结出 CPT 原子钟向着低功耗、芯片化和时钟精度高的方向发展。

关键词: 微波原子钟; 相干布居囚禁; 电磁感应透明; 微光机电加工

中图分类号: TB939

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795(2023)03-0053-07

Chip-scale coherent population trapping atomic clock

CHEN Jiehua^{1,2}

(1. Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences,

Wuhan 430071, China; 2. Wuhan Institute of Quantum Technology, Wuhan 430206, China)

Abstract: The chip-scale atomic clock technology based on coherent population trapping (CPT) atoms is reviewed, including the basic principle of CPT atomic clock, Ramsey-CPT atomic clock technology, schemes of CPT atomic clock suitable for miniaturization, and the development and current status of the chip-scale CPT atomic clock. The key technologies, such as laser frequency modulation, Ramsey technology, left and right circularly polarized light pumping (push-pull), laser and microwave frequency stabilization, and micro optical-electro-mechanical system (MOEMS), are analyzed and discussed. Finally, it is concluded that the CPT atomic clock is developing in the direction of low power consumption, chip-based and high clock precision.

Key words: microwave atomic clock; coherent population trapping; electromagnetically induced transparency; micro optical-electro-mechanical system

0 引言

芯片级原子钟在小体积、低功耗的条件下可获得较高的时频稳定度, 在很多对时频精度有较高要求的小型终端上有重要应用。1976年, Alzetta 等人采用激光与钠原子作用产生基态 $3^2S_{1/2}$ 至第一

激发态 $3^2P_{1/2}$ 的跃迁, 观察 $3^2P_{1/2}$ 原子辐射荧光时发现了在一定条件下出现光强变弱的现象^[1], 随后, 经深入研究表明: 现象源于相干双色光场与原子体系作用^[2]。因为干涉效应, 相干双色光将部分原子囚禁在两基态的相干叠加态上, 这种原子态被称为相干布居囚禁 (Coherent Population Trap-

收稿日期: 2023-01-11; 修回日期: 2023-02-09

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB2002400)

引用格式: 陈杰华. 芯片相干布居囚禁原子钟[J]. 计测技术, 2023, 43 (3): 53-59.

Citation: CHEN J H. Chip-scale coherent population trapping atomic clock[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(3):53-59.



ping, CPT) 态, 囚禁在 CPT 态的原子不再吸收光子向激发态跃迁, 因此激发态原子自发辐射产生的荧光变弱。早期实验^[1]中所用的激光器实际输出的是多模激光, 当其中的两个激光模式光频同时满足分别由 $3^2S_{1/2}(F=1)$ 和 $3^2S_{1/2}(F=2)$ 向同一激发态 $3^2P_{1/2}$ 末态跃迁频率时, 会将部分原子制备成 CPT 态, 因此实验中观察到荧光变弱现象, 所观察到的谱线被称为 CPT 暗线。事实上, 若观察与原子作用后的透射激光, 伴随 CPT 态原子的出现, 原子体系吸收光的能力减弱, 导致透射光强会增强, 此现象被定义为电磁感应透明 (Electromagnetically Induced Transparency, EIT), 所观察到的透射光增强谱线被称为 EIT 亮线。

制备 CPT 态原子的构型主要有 3 种^[3]: ①由两基态和一个激发态与双色光作用, 在两基态上制备出 CPT 态原子的构型为 Λ 构型; ②由两激发态和一个基态与双色光作用, 在两激发态上制备出 CPT 态原子的构型为 V 构型; ③由基态、低激发态与高激发态与双色光作用, 在基态和高激发态制备出 CPT 态原子的阶梯 Σ 构型。然而, V 构型与阶梯构型均出现布居在激发态的 CPT 态, 虽然相干效应使得布居在激发态的原子与光子无宏观作用, 但是激发态的能级寿命造成相应 CPT 态原子辐射衰变而减少, 故获得的 CPT 态布居相对少些, 在应用中 Λ 构型更广泛采纳。CPT 现象已经获得广泛应用, 其中较为重要的就是为时频领域提供了具有重要应用价值的 CPT 原子钟^[3]。

芯片原子钟的体积、功耗与恒温晶振相当, 具有原子钟技术时钟精度高的优势, 也具有重要的应用价值。本文对基于相干布居囚禁 (CPT) 态原子的芯片原子钟技术进行了综述, 并对芯片 CPT 原子钟的应用前景进行了展望。

1 Ramsey-CPT 原子钟

应用 CPT 共振实现原子钟的最初尝试是采用 Ramsey-CPT 方案, Thomas 等人采用染料激光器提供激光, 用声光调制激光束产生满足 Na 原子 $3^2S_{1/2}(F=1, 2)$ 两基态向 $3^2P_{1/2}$ 激发态跃迁的双色光, 双色光束两次正交入射 Na 原子束与原子作用, 用光电倍增管探测作第二次作用区域原子自发辐射荧

光。因为两次 CPT 共振之间存在位相干涉, 所以从荧光中能获得线宽比 CPT 谱线更窄的 Ramsey-CPT 谱线。实验采用 Ramsey-CPT 谱线作为微波鉴频信号, 实现了秒频率稳定度 2.5×10^{-10} 的 Ramsey-CPT 原子钟研究结果^[4]。Zanon 等人通过锁相技术锁定两激光器输出光的频率差, 将两输出光合束后获得的双色光与原子泡中的热运动 Cs 原子作用, 实现 CPT 共振探测并从透射光束提取 EIT 谱线。实验采用脉冲光与原子作用, 以两个脉冲为周期, 在第二脉冲期间探测透射光获取所需信号。两脉冲期间分别产生的 CPT 共振之间的位相干涉效应产生 Ramsey-CPT 干涉, 可从探测获得的信号中提取出 Ramsey-CPT 谱线^[5], 采用此方案开展原子钟研究, 并在实验中实现了 $3.5 \times 10^{-12}/\tau^{1/2}$ 中短期频率稳定度^[6]。目前 Ramsey-CPT 原子钟 200 s 内短期频率稳定度已达 $1.45 \times 10^{-13}/\tau^{1/2}$, 万秒内短期频率稳定度达 $2 \times 10^{-13}/\tau^{1/2}$, 在万秒处短期频率稳定度达 2.5×10^{-15} ^[7], 性能与高端铯钟、铷钟相当。我国在 Ramsey-CPT 原子钟研究上也取得一定进展, Yun 等人采用的多重干涉 Ramsey-CPT 方案为获取性能更好的鉴频信号提供了有效途径, 可用于实现性能更优的原子钟^[8]。

采用原子泡取代原子束可大幅度地减小原子钟的体积, 具备实现与铯钟、铷钟体积相当的 compact 原子钟的条件。由于铯钟、铷钟等传统小型原子钟性能潜力已经被充分发掘, 而新型的 Ramsey-CPT 原子钟还有许多研究、改进的空间。随着深入研究, Ramsey-CPT 原子钟有望成为具有竞争优势的 compact 原子钟。

2 实施小型、微型化 CPT 原子钟的方案

Gieler 等人采用电光调制 (Electro-Optic Modulator, EOM) 激光, 利用获得的 ± 1 级边带作为双色光研究了 Na 原子 CPT 现象^[9], 用调制获得的多色光束中的两个频率成分作为产生 CPT 共振所需的双色光, 是一种简单方便的方法。

目前, 广泛应用的 CPT 原子钟方案如图 1 所示, 光源器件通常采用垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 激光管 (或芯片), 激光束入射原子泡与原子作用后被光电探测器探测; 微波调制的电流

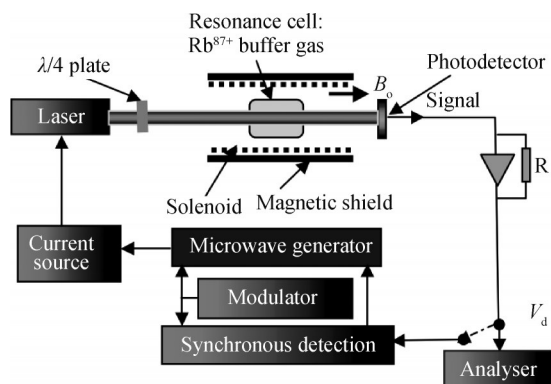


图1 广泛应用CPT原子钟方案

Fig.1 Widely used scheme for CPT atomic clock

作为VCSEL的驱动电流使VCSEL输出调频多色光，线偏振光束经 $\lambda/4$ 波片转换为圆偏光，其中两个频率成分（通常 ± 1 级边带）和一个三能级系统（由碱金属原子两基态能级和激发态能级构成）耦合实现 Λ 构型CPT共振；原子泡放置于磁屏蔽桶和线圈之内，屏蔽桶将屏蔽环境电磁场，而线圈产生一个实现原子Zeeman分裂的恒定磁场，并且与基态 $m_F = 0$ 两子能级Raman共振的 ± 1 级边带将在这两能态之间制备出CPT态原子。透射光束然后被光电探测器直接探测，激光稳频和微波稳频分别从所获光电信号中提取原子对激光的Doppler展宽吸收谱线并将其作为光频鉴频信号实施激光稳频。用CPT态原子对双色光吸收减弱而产生的EIT谱线作为微波频率鉴频信号实施微波稳频。因为直接探测透射光束，除了 ± 1 级边带，其他边带的光成分也被探测，导致所获光电信号中无用的背景本底信号，使EIT信号幅度与总的信号幅度之比（contrast）一般低于4%。

2004年，Varian等人^[10]采用CPT原子钟方案研制出体积为 125 cm^3 ，频率稳定度为 $3 \times 10^{-11}/\tau^{1/2}$ 的CPT原子钟；2008年Symmetricom公司推出了采用基本相同方案实现的CPT原子钟产品，其频率稳定度 $2 \times 10^{-11}/\tau^{1/2} \sim 5 \times 10^{-11}/\tau^{1/2}$ ，功耗为5 W，体积仅为 47 cm^3 ^[11]。

CPT原子钟方案采用圆偏振光在 $m_F = \pm 1$ 子能态之间制备原子的CPT态，但圆偏振光在抽运过程中也会将原子抽运至 $m_F = 2$ 能级态。由于 $m_F = 2$ 态原子与圆偏振光脱离耦合，因此如图2所示这些原子留在 $m_F = 2$ 态成为极化囚禁原子，导致参与

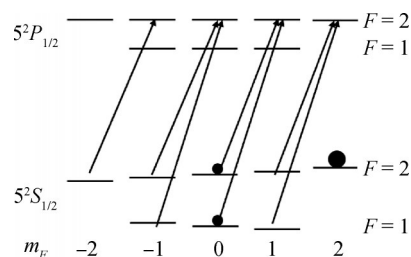


图2 跃迁示意图

Fig.2 Schematic diagram of transition

CPT共振的有效工作原子数量减少，降低了原子的利用率。

事实上，若去掉图1中的 $\lambda/4$ 波片，线偏振光直接入射原子泡，在图4磁场环境中等效于左右旋圆偏振光同时与原子作用。左右旋圆偏振光分别与原子作用都会在 $m_F = 0$ 两子能态制备出CPT态原子，但分别在 $m_F = \pm 2$ 产生极化囚禁原子。当线偏振光与原子作用时，其等效左右旋圆偏振光的作用效果就消除分别在 $m_F = \pm 2$ 产生的极化囚禁原子。然而，左右旋圆偏振光和 $m_F = 0$ 磁子能级态制备的CPT态原子数量并不会叠加，这是因为左右旋圆偏振光之间的相位干涉效应与原子的CPT共振干涉相消，无法制备出CPT原子，故左右旋圆偏振光和 $m_F = 0$ 磁子能级态制备的CPT态原子数量并不会叠加。

Jau等人发展的push-pull方案^[12]为解决这一问题提供了一种有效光源。此方案将线偏振光束分为两束，分别转换成左右旋圆偏振光后再合束，通过控制两光束的光程差使两束光之间发生 $(2n+1)\pi$ 相移，当左右旋圆偏振光出现了 π 相差，与原子 $m_F = 0$ 的CPT共振效果成为干涉相长，产生的CPT态原子的数量为两圆偏振光分别产生量的叠加。Taichenachev等人^[13]通过光反射的方式实现左右旋圆偏振光CPT共振干涉相长进而实现CPT原子钟，即一种push-pull CPT原子钟。

经研究表明，偏振方向相互垂直的线偏振双色光与原子作CPT共振的lin $\perp$ lin CPT方案^[14]，以及用偏振相互平行的线偏振双色光与图2中的 $5^2P_{1/2}$ 上能级作CPT共振的lin//lin CPT方案^[15]都将是消除极化囚禁原子，改善CPT原子钟性能的有效方案。例如：文献[6]中实现中短期频率稳定度 $3.5 \times 10^{-12}/\tau^{1/2}$ 的原子钟就是采用lin $\perp$ lin CPT方案。另

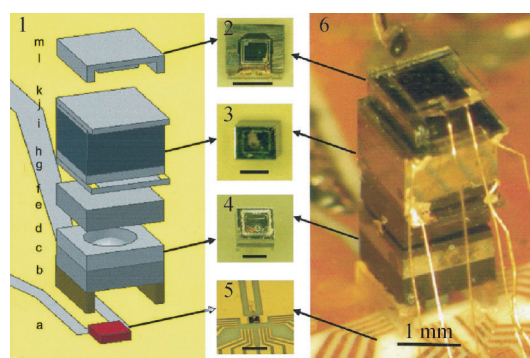
外,采用椭圆偏振光作为光源,也是消除极化囚禁态原子,改善CPT原子钟性能的有效方法。若将图1中 $\lambda/4$ 旋转一定角度就将线偏振光转换成椭圆偏振光,实际成为幅度不等的左右旋圆偏振光同时与原子作用,不会出现极化囚禁态原子。这样的左右旋圆偏光与原子CPT共振可以产生干涉相消效应,但是两偏振光的强度不同,也会导致较强的圆偏振光成分仍然能够制备出一定量的CPT态原子。所以,在椭圆偏振光实验方案中,对左右旋圆偏振光强度比的寻找显得尤为重要,当处于最佳强度比的条件下将会消除极化囚禁态原子使得参与CPT共振的原子数量增加,从而提升CPT信号质量。实验研究表明:适当设置左右旋圆偏振光强度比,可实现性能明显优于单一圆偏振光的CPT原子钟^[16]。

3 芯片CPT原子钟

传统微波原子钟利用微波谐振腔提供微波场,通过原子与微波场的作用获得谱线实现微波频率稳频,获得原子稳定的频率输出。然而,原子钟利用微波控制的双色光与原子CPT共振,用所获得的谱线实现微波频率稳频,获得原子钟稳定的频率输出。因为原子与双色光场作用,故CPT原子钟是一种全光型的微波原子钟。

传统微波原子钟与原子作用的微波波长均为厘米量级,微波谐振腔的尺寸与微波存在整数倍关系,谐振腔体积较大,故传统微波原子钟难以达到Symmetricom公司CPT原子钟产品^[11]的体积。与之相反,CPT原子钟不受微波腔体积限制,使得CPT原子钟具有实施小型、微型化的优势,尤其是在现代制造、加工和信号处理技术的支撑下,CPT原子钟已具备实施微型化、芯片化的条件。2004

年,Knappe等人成功研制出首台芯片原子钟^[17],通过微光机电系统(MOEMS)工艺,研制出的原子钟物理系统芯片体积仅为 9.5 mm^3 ,具体细节如图3所示。受物理系统芯片的限制导致原子气室容积很小,如图3所示的原子气室容积不足 1 mm^3 。为保证原子气室蒸发出足够数量的原子参与光-原子相互作用,物理系统芯片工作温度一般接近 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 左右。偏高的工作温度以及维持高温的功耗,使物理系统芯片不适合以常规芯片器件的形式直接应用于仪器设备中。



注: 1-装配示意图;2-光电二极管组件;3-原子气室组件;4-光学部分组件;5-激光器组件;6-集成微型芯片的整个原子钟物理系统。

图3 微型原子钟物理封装系统

Fig.3 Physics package of microfabricated atomic clock

2005年,Symmetricom公司Lutwak等人发表了为适合实际应用而设计的物理系统方案及研制成果^[18]。为了减少传导热损耗,将物理系统芯片与支撑它的骨架通过悬挂方式进行连接的方案,物理系统结构如图4所示,工作时仅对物理系统芯片实施加热、控温。通过采用低导热性的材料制作截面积尽量小的悬挂梁,高温芯片通过传导途径对外热耗散被降至较低水平;为了减少热运动气

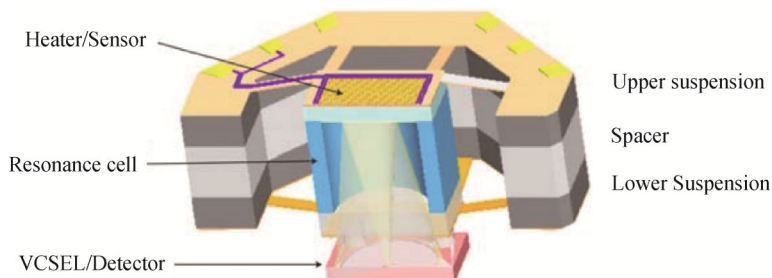


图4 物理系统结构

Fig.4 Physics package architecture

体对流产生的热损耗,将图4结构封装在陶瓷材料制造的真空密闭盒中,并在密闭盒中设置吸气剂动态地将外界渗入和内部材料释放的气体抽空,使真空密闭盒内长期维持在所设定的高真空度水平,从而将对流热损耗降至较低水平;另外方案还采用对盒内的物体表面镀反射膜的措施,以减少高温物理系统芯片热辐射所造成的功率损耗。图5为陶瓷封装物理系统的外观结构,体积约为 1 cm^3 ,陶瓷外壳的温度与工作环境温度接近,为实际应用奠定基础。此外,陶瓷封装物理系统功耗比裸芯物理系统芯片的功耗低1个量级以上,有利于实际应用中的低功耗需求。

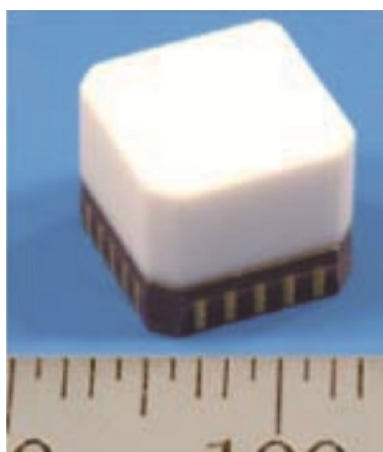


图5 陶瓷封装物理系统

Fig.5 Physics package in ceramic carrier

2009年, Symmetricom 公司推出了一款微型 CPT 原子钟产品^[19],其物理系统是在图4和图5的基础上改进、升级而实现的,此款陶瓷封装物理系统体积降至 0.35 cm^3 。原子钟工作时,物理系统芯片温度为 90°C ,当环境温度为 25°C 时,物理系统功耗小于 10 mW 。这款原子钟产品的主要技术指标是:体积为 17 cm^3 ,功耗为 125 mW ,频率稳定度达 $2 \times 10^{-10}/\tau^{1/2}$,目前已经大批生产并获得大范围应用。该原子钟采用物理系统芯片,故一般将这种微型 CPT 原子钟称为芯片原子钟。继实现芯片原子钟量产后,美国于2018年推出了应用于低轨和微纳卫星的空间芯片原子钟产品,随后积极开展新机理和技术研究,发展稳定度和准确度更优的下一代芯片原子钟技术。

我国对芯片原子钟的发展也做出了一些有重

要价值的贡献。Wang 等人^[20]开展了将 push-pull 光源应用于芯片原子钟的实验研究^[12],获得短期频率稳定度为 $0.8 \times 10^{-10}/\tau^{1/2}$ 比传统圆偏光方案提升2.8倍,接近理论预期分析的3倍改善效果^[20]。Zhang 等人采用了一种 push-pull 方案,研究证明该方案能够更有效地提升 CPT 原子钟性能^[21],在此基础上发展了物理系统芯片方案,该芯片 push-pull 物理系统方案已经获得发明专利保护^[22]。Lin 等人将椭圆偏振光方案^[16]应用于芯片原子钟实验,并采用差分探测方式通过旋光信号中提取 EIT 谱线,获得短期频率稳定改善3倍的实验结果^[23]。Yun 等人设计并研究了一种通过互注入锁频的实验方案,将两个 VCSEL 的部分输出相互注入对方,从而实现两激光器输出光频率的互锁,由此产生的准双色激光光束中 CPT 共振所需双色光功率占光束总功率的90%以上。并且,该小组还设计出芯片准双色光源器件,这种芯片光源特别适合芯片原子钟应用,芯片准双色光源方案已经获得发明专利保护^[24]。



(a) 中科院2019年芯片钟
(a) 2019 CAS chip-scale atomic clock

(b) 中科院2020年芯片钟
(b) 2020 CAS chip-scale atomic clock

(c) Microsemi芯片原子钟
(c) Microsemichip-scale atomic clock

图6 三款芯片原子钟外观

我国于2013年成功研制出芯片原子钟并取得较快发展,所研制出的芯片原子钟性能也不断改进。中科院芯片原子钟研制团队于2019年研制出频率稳定度为 $2 \times 10^{-10}/\tau^{1/2}$,功耗为 200 mW ,体积

仅为 8 cm^3 的 CPT 原子钟, 是当时世界上最小的芯片原子钟, 如图 6 (a) 所示。在此基础上, 该团队于 2020 年研制出频率稳定度和功耗不变, 体积进一步降至 2.3 cm^3 的芯片原子钟, 如图 6 (b) 所示。美国的 Microsemi (如图 6 (c) 所示) 是目前国外最高水平的芯片原子钟, 其与中科院两款芯片原子钟的外观比较如图 6 所示, 这三款芯片原子钟的主要性能比较见表 1。从表 1 可见, 中科院两款芯片原子钟的推出标志着我国芯片原子钟研制水平已走在世界前列。

表 1 三款芯片钟技术指标比较
Tab.1 Technical index comparison of three chip-scale atomic clocks

芯片钟	体积/ cm^3	功耗/ mW	秒稳	天漂
中科院 2019 年	8	200		8×10^{-12}
中科院 2020 年	2.3	180	$2 \times 10^{-10}/\tau^{1/2}$	1×10^{-11}
美国 Microsemi	17	125		

4 结论

CPT 原子钟不依靠微波谐振腔获得微波鉴频信号, 不受微波谐振腔体积限制, 因此物理系统具有可小型化、微型化的优势。现代 MOEMS 工艺已经成功制造出物理系统芯片, 在此基础上研制的芯片原子钟已经获得应用。目前实现的芯片原子钟体积、功耗均比最小的传统原子钟小 1 个量级以上, 但仍保持原子钟守时精度高的优点, 比体积相当的常规频率源恒温晶振 (OCXO) 守时精度高 1 个量级以上, 是对守时精度要求高的高端仪器设备的理想频率源部件。我国芯片原子钟研制处于国际前列水平, 随着科技成果转化及应用推广, 为推动相关产业发做出更大的贡献。

参考文献

[1] ALZETTA G, GOZZINI A, MOI L, et al. An experimental method for the observation of rf transitions and laser beat resonances in oriented Na vapour[J]. Nuovo Cimento Della Societa Italiana Di Fisica B-general Physics Relativity Astronomy and Mathematical Physics and Methods,

1976, 36(1): 5 – 20.

- [2] ARIMONDA E. V coherent population trapping in laser spectroscopy[J]. Progress in Optics, 1996, 35: 257 – 354.
- [3] VANIER J. Atomic clocks based on coherent population trapping: a review[J]. Applied Physics B-lasers and Optics, 2005, 81: 421 – 442.
- [4] THOMAS J, HEMMER P, EZEKIEL S, et al. Observation of Ramsey fringes using a stimulated, resonance Raman transition in a sodium atomic beam[J]. Physical Review Letters, 1982, 48: 867.
- [5] ZANON T, GUERANDEL S, CLERCQ E, et al. High contrast Ramsey fringes with coherent - population - trapping pulses in a double lambda atomic system[J]. Physical Review Letters, 2005, 94: 193002.
- [6] ZANON T, TREMINE S, GUERANDEL S, et al. International frequency control symposium and exposition [C], Canada: IEEE, 2005.
- [7] HAFIZ M, COGET G, PETERSEN M, et al. Symmetric autobalanced Ramsey interrogation for high - performance coherent-population-trapping vapor-cell atomic clock[J]. Applied Physics Letters, 2018, 112: 244102.
- [8] YUN P, ZHANG Y, DENG W, et al. Multiwavelength amplified harmonic emissions from carbon dioxide pumped by mid-infrared femtosecond laser pulses[J]. Europhysics Letters, 2012, 97: 64004.
- [9] GIELER M, AUMAYR F, WINDHOLZ L. Coherent population trapping probed by charge exchange reactions[J]. Physical Review Letters, 1992, 69: 3452.
- [10] VANIER J, LEVINE M, KENDIG S, et al. International frequency control symposium and exposition [C]. Canada: IEEE, 2004.
- [11] DENG J, VLITAS P, TAYLOR D, et al. European frequency and time forum [C]. France: IEEE, 2008.
- [12] JAU Y, MIRON E, POST A, et al. Push - pull optical pumping of pure superposition states[J]. Physical Review Letters, 2004, 93: 160802.
- [13] TAICHENACHEV A, YUDIN V, VELICHANSKY V, et al. High-contrast dark resonances on the D1 line of alkali metals in the field of counterpropagating waves[J]. Jetp Letters, 2004, 80: 236 – 240.
- [14] YIM S, YOON T, CHO D. Polarization orthogonalizer for a pair of laser beams with nearly equal frequencies [J]. Review of Scientific Instruments, 2008, 79: 126104.
- [15] TAICHENACHEV A, YUDIN V, VELICHANSKY V, et al.

- On the unique possibility of significantly increasing the contrast of dark resonances on the D1 line of ^{87}Rb [J]. Jap Letters, 2005, 82: 398 – 403.
- [16] LIN H F, TIAN Y, TAN B Z, et al. Differential detection scheme for compact CPT atomic clocks [J]. Europhysics Letters, 2017, 119: 23001.
- [17] KNAPPE S, SHAH V, SCHWINDT P, et al. A microfabricated atomic clock [J]. Applied Physics Letters, 2004, 85: 1460.
- [18] LUTWAK R, VLITAS P, VARGHESE M, et al. International frequency control symposium and exposition [C]. Canada: IEEE, 2005.
- [19] LUTWAK R. International frequency control symposium and exposition [C]. Canada: IEEE, 2009.
- [20] WANG K W, YUAN Y, YIN Y, et al. A polarization converting device for an interfering enhanced CPT atomic clock [J]. Review of Scientific Instruments, 2017, 88: 13107.
- [21] ZHANG Y, QU S P, GU S H. Spin-polarized dark state free CPT state preparation with co-propagating left and right circularly polarized lasers [J]. Optics Express, 2012, 20: 6400.
- [22] GU S H, ZHANG Y, QU S P, et al. Physical system for chip-scale CPT atomic clock: US 9118336 B2 [P]. Aug. 25, 2015.
- [23] LIN H F, TIAN Y, CHEN J H, et al. Experimental study of the application feasibility of a novel chip-scale atomic clock scheme [J]. Review of Scientific Instruments, 2019, 90: 53111.
- [24] YUN E X, TAN B Z, GU S H. Device and method for producing coherent bi-color light source: US9001861B2 [P]. Apr. 07, 2015.

(本文编辑: 田艳玲)



作者简介: 陈杰华 (1980—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要研究方向为原子分子光物理和原子传感器的研制与应用。