

文章编号 1004-924X(2013)06-1440-07

# 芯片级原子器件 MEMS 碱金属蒸气腔室制作

尤 政, 马 波, 阮 勇\*, 陈 硕, 张高飞

(清华大学 精密仪器与机械学系, 北京 100084)

**摘要:**提出了基于两步低温阳极键合工艺的碱金属蒸气腔室制作方法,用于实现原子钟、原子磁力计及原子陀螺仪等器件的芯片级集成。由微机电系统(MEMS)体硅工艺制备了腔室结构。首先采用标准工艺将刻蚀有腔室的硅圆片与 Pyrex 玻璃阳极键合成预成型腔室,然后引入氮缓冲气体和由惰性石蜡包覆的微量碱金属铷或铯。通过两步阳极键合来密封腔室,键合温度低于石蜡燃点 198 °C。第一步键合预封装腔室,键合电压小于缓冲气体的击穿电压。第二步键合在大气氛围中进行,电压增至 1 200 V 来增强封装质量。通过高功率激光器局部加热释放碱金属,同时在腔壁上形成均匀的石蜡镀层以延长极化原子寿命。本文实现了 160 °C 的低温阳极键合封装,键合率达到 95% 以上。封装的碱金属铷释放后仍具有金属光泽,实现的最小双腔室体积为 6.5 mm×4.5 mm×2 mm。铷的吸收光谱表明铷有效地封装在腔室中,证明两步低温阳极键合工艺制作碱金属蒸气腔室是可行的。

**关 键 词:**微机电系统;阳极键合;原子蒸气腔室;碱金属封装;芯片级原子器件

**中图分类号:** TN405 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132106.1440

## Microfabrication of MEMS alkali metal vapor cells for chip-scale atomic devices

YOU Zheng, MA Bo, RUAN Yong\*, CHEN Shuo, ZHANG Gao-fei

(Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

\* Corresponding author, E-mail: ruanyong@mail.tsinghua.edu.cn

**Abstract:** This paper reported on the microfabrication of alkali metal vapor cells based on the two-step low temperature anodic bonding for the chip-scale integration of atomic clock, atomic magnetometer, atomic gyroscope and other atomic devices. Cell structures were fabricated by Micro-electromechanical System (MEMS) bulk silicon process, and the etched silicon with cells was firstly bonded to Pyrex glass to fabricate preformed chambers by the standard anodic bonding process. Then, nitrogen buffer gas and micro-scale alkali metal (rubidium or cesium) were introduced into the preformed cells. The two-step anodic bonding process was used to seal the cells at a temperature lower than the paraffin flash point (198 °C). In the first step, bonding voltage was lower than the breakdown voltage of nitrogen buffer gas to pre-seal the cells. In the second step, the bonding was in air atmosphere, and the bonding voltage increased up to 1 200 V to strengthen packaging quality. A high power laser system locally heated the micro-scale alkali metal packets to release alkali metal, and a uniform coating of par-

收稿日期:2013-02-15;修订日期:2013-03-11.

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金新教师基金资助项目(No. 20090002120007);精密测试技术及仪器国家重点实验室基金资助项目.

affin was formed on cell walls to prolong the life of the polarized atoms. With proposed method, 95% bonding is achieved by the two-step low temperature anodic bonding, and the alkali rubidium still has a metallic luster after anodic packaging. The achieved minimum volume of double-cells is about 6.5 mm×4.5 mm×2mm. Rubidium absorption spectrum shows that alkali rubidium is effectively encapsulated in the cells. It is feasible to fabricate MEMS alkali metal vapor cells by the two-step low temperature anodic bonding process.

**Key words:** Micro-electromechanical System(MEMS); anodic bonding; atomic vapor cell; alkali metal packet; chip-scale atomic device

## 1 引言

随着微机电系统(MEMS)技术的发展,基于碱金属原子能级跃迁的原子钟、原子磁力计和原子陀螺仪等器件向着微型化、超低功耗和芯片级系统集成方向发展<sup>[1-4]</sup>。2002年美国国家标准技术研究院(NIST)开展了芯片级原子钟(Chip-Scale Atomic Clock,CSAC)研究计划,并在2004年研制出原子蒸气腔室体积小于10 mm<sup>3</sup>,物理功耗小于75 mW,1 s频率稳定度达到 $2.5 \times 10^{-10}$ 的CSAC实体<sup>[1]</sup>。自2007年起,NIST又开展了芯片级原子磁强计(Chip-Scale Atomic Magnetometer,CSAM)、芯片级原子陀螺仪(Chip-Scale Atomic Gyroscope,CSAG)等相关领域的研究工作。2011年迅腾(Symmetricom)公司开发的芯片级原子钟SA.45实现了物理部分全集成,其物理部分体积达到1 cm<sup>3</sup>、总体积达到16 cm<sup>3</sup>、总功耗小于115 mW、稳定度达到 $2 \times 10^{-10}$ /s,将被用于GPSDO(Global Positioning System Disciplined Oscillator)系统中。

芯片级原子器件的核心部分是碱金属蒸气腔室。近些年,研究人员采用各种新技术和手段制作碱金属蒸气腔室,包括圆片级玻璃吹制、玻璃纤维烧结、玻璃-硅-玻璃阳极键合等封装技术。目前大部分腔室结构都是硅圆片经光刻、湿法或干法刻蚀形成的,然后用两片玻璃圆片键合到硅圆片上封装碱金属。这些传统技术的关键是如何将碱金属注入到腔室中。Knappe等人利用叠氮化钡与碱金属氯化物在阳极键合过程中的原位反应获得铯单质。活泼碱金属使键合过程复杂化,为克服这些技术难题,Liew等人利用沉积到腔室内的叠氮化铯薄膜(叠氮化铯稳定度高达450℃以上),在真空键合封装后用紫外线照射使叠氮化铯

薄膜光解为铯单质和氮气。另一种方法是利用表面富含铯的玻璃,通过电解方法将铯单质释放到腔室内<sup>[5-6]</sup>。然而,这些方法填充的碱金属铷或铯的质量和纯度很难控制,很容易引入杂质,缩短极化原子的寿命。

文中提出一种新的碱金属填充方法,即利用石蜡包覆的碱金属铷或铯,通过高功率激光器将铷或铯释放到腔室中。采用两步阳极键合工艺封装碱金属蒸气腔室,并通过填充缓冲气体和镀均匀的石蜡层来减缓原子与腔壁的碰撞。采用MEMS体硅工艺和玻璃-硅-玻璃3层结构,阳极键合制作碱金属蒸气腔室,显著提高了腔室制作效率。

## 2 微量碱金属封装

微量碱金属封装用于将活泼的碱金属(铷或铯)注入到腔室中,以制备原子态。石蜡是一种很好的封装碱金属材料,除了有机溶剂(如汽油)等,不与其他物质反应。同时石蜡也是一种腔壁镀层材料,能够有效地减缓碱金属原子与腔壁碰撞,使其碰撞次数达到1000次,这将显著减小相干布居囚禁(CPT)谱线的线宽<sup>[7-8]</sup>。文中获得的铷封装体积只有0.9 mm<sup>3</sup>,封装了0.2 μl的碱金属铷,其最小可封装0.1 μl。通过观察碱金属的颜色变化,可以判断封装结果,因为一旦碱金属暴露在空气中,便会与空气中的氧和水迅速反应导致其颜色的显著变化。

微量碱金属封装制作工艺采用硅微机械加工技术<sup>[9-10]</sup>,微量碱金属夹在两个石蜡衬底中间,加热融化石蜡并冷却后形成石蜡封装,通过氢氧化钾溶液腐蚀硅衬底释放石蜡封装。整个封装在水氧值分别低于0.1和0.4 mg/L的手套箱中进行。微量碱金属封装制作详细工艺步骤见文献

[11]。简要工艺流程如图 1 所示。

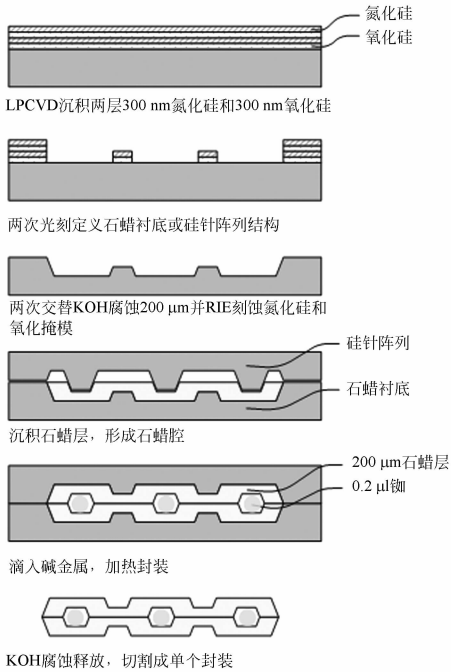


图 1 微量碱金属封装流程示意图

Fig. 1 Micro-scale alkali metal packaging process

#### a、石蜡衬底和硅针阵列制作：

(1) 选择两片硅圆片，分别用于石蜡衬底和硅针阵列。在硅圆片上交替低压化学气相沉积 (LPCVD) 两层 300 nm 的氧化硅和两层 200 nm 的氮化硅；

(2) 两次光刻定义石蜡衬底和硅针阵列结构；

(3) 反应离子刻蚀 (RIE) 一层氮化硅和氧化硅掩模，然后湿法腐蚀  $200\ \mu\text{m}$  硅，再刻蚀一层氮化硅和氧化硅掩模，腐蚀  $200\ \mu\text{m}$  硅，最终形成具有凹结构的石蜡衬底。同样地，交替 RIE 刻蚀氮化硅和氧化硅掩模，湿法分别腐蚀  $150$  和  $200\ \mu\text{m}$  硅，形成具有凸结构的硅针阵列；

#### b、“三明治”封装

(4) 称取石蜡放置于石蜡衬底上，加热到石蜡熔点  $62\ ^\circ\text{C}$  以上使其融化在衬底上形成  $200\ \mu\text{m}$  的石蜡层；

(5) 用硅针阵列在石蜡的软化点 ( $52\ ^\circ\text{C}$ ) 压按石蜡衬底形成石蜡腔阵列；

(6) 微量进样器吸入液态铷或铯注入到石蜡腔中，铷或铯的最小注入量可达  $0.1\ \mu\text{l}$ ；

(7) 将不含碱金属的石蜡衬底放置于滴入碱金属的石蜡衬底上，加热到石蜡熔点并维持 3

min 后冷却，封装碱金属于石蜡腔中；

(8) 将“三明治”结构置于氢氧化钾溶液中，腐蚀硅衬底释放微量碱金属封装阵列，切割成单独微量碱金属封装，如图 2 所示。

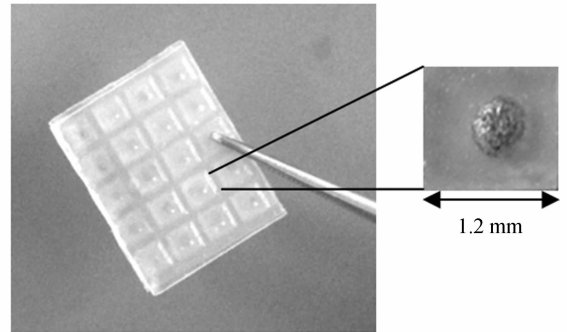


图 2 放置 7 天的  $0.2\ \mu\text{l}$  铷石蜡封装阵列

Fig. 2  $0.2\ \mu\text{l}$  rubidium-wax packet array after 7 days

本文设计的石蜡腔尺寸为  $0.9\ \text{mm}^3$ ，足以容纳  $0.2\ \mu\text{l}$  的铷，整个封装的尺寸为  $1.2\ \text{mm} \times 1.2\ \text{mm} \times 0.6\ \text{mm}$ ，如图 2 所示。将微量碱金属封装暴露在空气中 24 h，铷颜色并没有显著变化，7 天后少部分封装中铷失去了一定的金属光泽，颜色由锃亮变为灰亮。通过减小石蜡腔尺寸、控制加热时间、消除封装中少量的微小气泡可实现碱金属与环境的完全隔离以获得高纯度碱金属单质，提高芯片级原子器件性能。

## 3 原子蒸气腔室制作

### 3.1 腔室设计及工艺

分别设计了单腔室和双腔室结构。双腔室中的一个腔室用于放置微量碱金属封装，称为源腔室，其最小尺寸为  $1.5\ \text{mm} \times 1.5\ \text{mm}$ 。另一腔室用于吸收光谱或 CPT 信号的检测，称之为作用腔室，其最小尺寸为  $1\ \text{mm} \times 1\ \text{mm}$ ，最大尺寸为  $4\ \text{mm} \times 4\ \text{mm}$  以容纳更多的碱金属，获得较大的碱金属蒸气密度。两个腔室之间通过过滤通道连接以避免过多的石蜡进入作用腔影响原子蒸气密度。双腔室结构如图 3 所示。腔室的内层厚度决定了激光通路长度，即激光与原子的作用距离，也决定了芯片级原子钟的短期频率稳定度。根据相关文献报道<sup>[13-15]</sup>，厚度为  $1\ \text{mm}$  腔室的短期频率稳定度可以达到  $1 \times 10^{-11} / \tau^{1/2}$ 。因此文中腔室内层厚度为  $1\ \text{mm}$ ，以满足芯片级原子钟对频率稳定度指标需求。

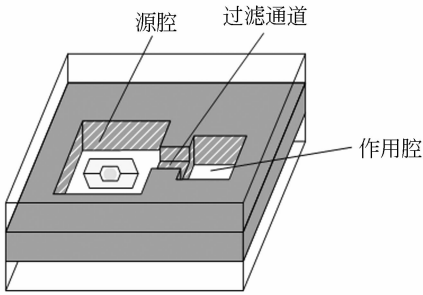


图3 双腔室结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of dual-cell structure

选择厚度为 1 mm、直径为 100 mm 的 N 型  $\langle 100 \rangle$  硅圆片和厚度为 0.5 mm 的 Pyrex7740 玻璃圆片,圆片经过双面抛光用于阳极键合<sup>[18-20]</sup>。腔室制作主要工艺流程如图 4 所示。

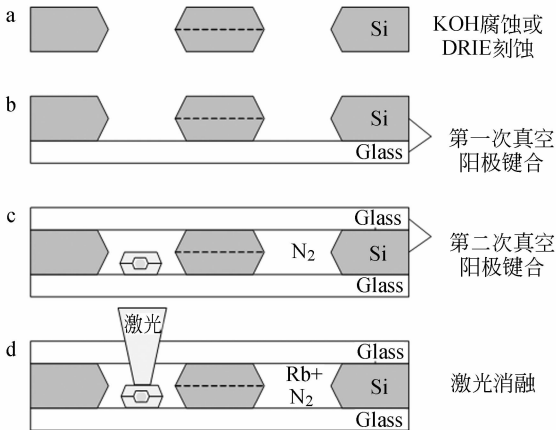


图4 碱金属蒸气腔室制作流程示意图

Fig. 4 Microfabrication process of alkali metal vapor cells

由于石蜡的燃点约为 198 °C,限制了阳极键合温度,而缓冲气体击穿电压限制了阳极键合电压。因此,第二次阳极键合采用两步键合工艺来提高低温阳极键合质量。第一步将碱金属和缓冲气体引入到预成型腔室中(如图 4b),在缓冲气体气氛下进行键合,缓冲气体气压可以通过进气阀控制。键合电压需小于缓冲气体的击穿电压。第二步在大气气氛中进行,增加键合电压以提高封装质量。键合设备为 EVG 520IS。

原子蒸气腔室制作工艺步骤如下:

(1)源腔室、作用腔室及过滤通道结构由双面光刻、双面湿法腐蚀硅圆片形成,如图 4(a);

(2)在第一次阳极键合前,玻璃圆片和刻蚀有腔室的硅圆片在 1:4 的硫酸双氧水溶液中清洗,并用去离子水冲洗。圆片用氮气吹干后在 110 °C

热板上烘烤去除残留水分;

(3)第一次阳极键合将刻蚀有腔室的硅圆片与玻璃圆片键合形成预成型腔室,如图 4(b)。键合在真空度小于  $3.5 \times 10^{-4}$  Pa、温度为 450 °C 的环境下完成。键合电压缓慢升到 1 200 V,并保持 1 200 V 直到键合电流降到峰值的 10% 以下;

(4)键合温度降至室温;

(5)第二次阳极键合前,将微量铷或铯封装于源腔室中。抽真空后,引入氮缓冲气体,调整进气阀使气压维持在预设值处。移除垫片(如图 5),在上层玻璃圆片上施加 500 N 的压力;

(6)缓冲气体放电产生的击穿电压遵循帕邢定律,由气体压力和电极间距及其他因素如气体类型和电极材料决定<sup>[16-17]</sup>。如氮气在 100 Pa ~ 100 kPa 气压下的击穿电压约为 400 V<sup>[16]</sup>。第二次第一步阳极键合,加热至 160 °C、电压增至 400 V,待电流降至其峰值的 10% 以下即完成预封装;

(7)第二次第二步阳极键合,在标准大气压下进行,温度为 160 °C,电压增至 1 200 V,待电流降至其峰值的 10% 以下完成强化封装,如图 4(c);

(8)用高功率激光器透过玻璃加热微量铷或铯封装,激光束聚焦在铷或铯封装的小面积区域,以避免在激发过程中破坏玻璃圆片和硅圆片,如图 4(d)。

### 3.2 缓冲气体封装

按照两步低温阳极键合的工艺流程,缓冲气体和碱金属的封装同时进行。在第一步键合前,缓冲气体通过垫片引入到腔室中,腔室压强通过控制进气阀维持在预设值处(如 10 kPa)。第一步键合是在 160 °C、400 V 条件下进行,直到键合电流下降到足够低的值时预封装完成,此时可观察到陡峭的电流峰。第二步键合在空气气氛中完成,电压增至 1 200 V,可看到明显的电流峰。两步低温键合的缺陷区域小于 5%,与标准的真空阳极键合质量接近。从这些结果可以看出,在缓冲气体中的预键合和空气中的增强键合是成功的。

### 3.3 石蜡镀层形成

通过激光局部加热石蜡,将源腔室中的铷或铯释放到作用腔室,因此激光消融提供了一个快速有效精确转移碱金属铷或铯到作用腔的方法<sup>[7-12]</sup>。使用高功率二氧化碳激光器消融石蜡,

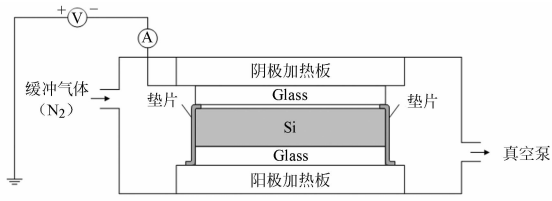


图 5 阳极键合装置

Fig. 5 Anodic bonding device

通过优化消融时间和激光器功率,可在腔壁上形成一层均匀的镀层以增加碱金属原子与腔壁的碰撞次数。

### 3.4 腔室制作结果

两步低温阳极键合获得的腔室如图 6 所示。封装在腔室中的碱金属铷具有金属光泽,通过激光消融石蜡已经均匀分布在腔室周围。实现最小单腔室为  $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ ,最大为  $7\text{ mm} \times 7\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ ;最小双腔室为  $6.5\text{ mm} \times 4.5\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ ,最大为  $10\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 。

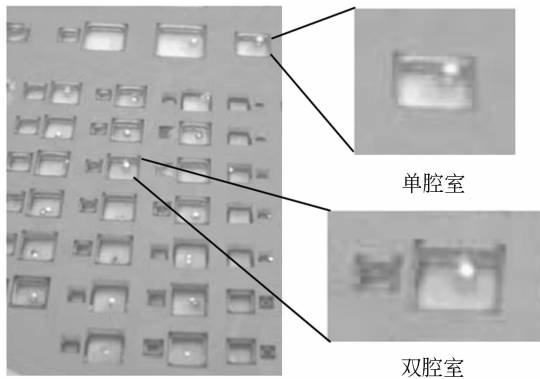


图 6 两步低温阳极键合得到的单、双腔室

Fig. 6 Single and dual-cells fabricated by two-step anodic bonding process

## 4 测量结果

利用氦质谱检漏仪检测腔室的气密性,其漏率为  $2.8 \times 10^{-7}\text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。目前这种漏率水平与半导体器件的标准漏率还有一定差距,但是通过增强低温阳极键合质量可以显著提升腔室的气密性。

利用  $780\text{ nm}$  半导体激光器扫描获得典型的铷吸收光谱如图 7 所示,光谱中存在 2 个吸收峰,证明 MEMS 原子蒸气腔室制作是可行的。因腔室中充入的氮气缓冲气体压强较大,造成多普勒

展宽现象较严重,通过进一步优化缓冲气体压强可获得较好的吸收谱线。由于腔室体积较小(约为  $4\text{ mm}^3$ ),且腔室中的碱金属铷只有  $0.4\text{ }\mu\text{l}$ ,为获得足够的原子饱和蒸汽压,需将腔室温度加热到  $100\text{ }^\circ\text{C}$ ,但温度的增加对于捕获吸收信号造成较大影响。铷的饱和吸收光谱如图 8 所示,饱和吸收谱消除了多普勒效应带来的谱线展宽以及由加热造成的本底噪声。通过进一步优化缓冲气体压强、腔室体积及碱金属注入量等,腔室的性能可大幅提升。同时可以做一些如腔壁镀层实验等传统的玻璃泡气室无法实现的相关研究。MEMS 原子蒸气腔室制作为芯片级原子器件的研制奠定了基础。

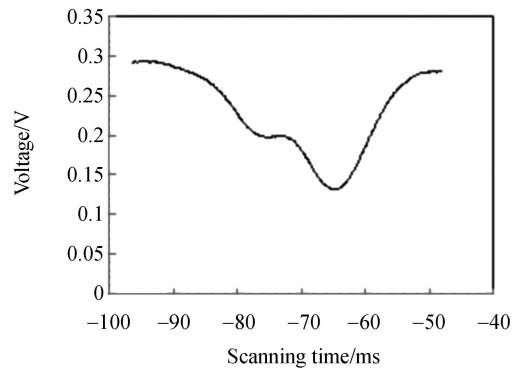


图 7 铷吸收光谱

Fig. 7 Rubidium absorption spectrum

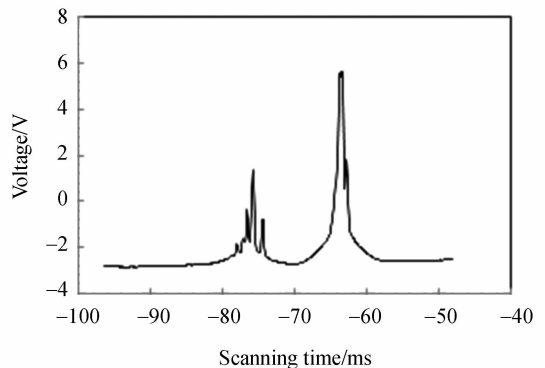


图 8 铷饱和吸收光谱

Fig. 8 Rubidium saturated absorption spectrum

## 5 结论

本文研究了芯片级原子器件 MEMS 碱金属蒸气腔室制作技术,利用低温阳极键合工艺实现了腔室的封装。在此方法中,键合温度降至  $160$

℃,显著低于标准键合温度 450 ℃。第一步阳极键合在氮缓冲气氛中完成腔室预封装,键合电压小于缓冲气体击穿电压;第二步阳极键合在大气气氛中完成,键合电压增至 1 200 V。阳极键合完成的缺陷区域小于 5%,与标准的真空阳极键合质量接近。通过高功率激光器释放碱金属并在腔壁上形成一层均匀的石蜡镀层,可增加碱金属原子与腔壁的碰撞次数。实验获得的单腔室最小

尺寸为 4 mm×4 mm×2 mm,双腔室最小尺寸为 6.5 mm×4.5 mm×2 mm。对腔室的气密性进行了检测,其漏率为  $2.8 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。虽然与半导体器件的标准漏率还有一定差距,但是通过增强低温阳极键合质量可以显著提升腔室的气密性。铷的吸收光谱表明铷有效地封装在腔室中,证明两步低温阳极键合工艺制作碱金属原子蒸气腔室是可行的。

## 参考文献:

- [1] SYMMETRICOM. Chip-scale atomic clock [C]. *Darpano Technology Symposium*, 2007.
- [2] PETER D, SCHWINDT D, KNAPPE S. Chip-scale atomic magnetometer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 85: 6411-6416.
- [3] GUSTAVSON T L, BOUYER P. Precision rotation measurements with an atom interferometer gyroscope [J]. *Physical Review Letters*, 1997, 78: 2046-2049.
- [4] 苑伟政, 牛昊彬, 常洪龙, 等. MEMS 器件与电路共同仿真原型系统[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(10): 2206-2211.
- YUAN W ZH, NIU H B, CHANG H L, *et al.*. Co-simulation of MEMS and circuits in Zeni VLG [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2206-2211. (in Chinese)
- [5] KITCHING J, KNAPPE S. Miniature vapor-cell atomic frequency references [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, 81(3): 553-555.
- [6] LIEW L, MORELAND J. Microfabricated alkali atom vapor cells with in-situ heating for atomic-based sensors [C]. *Sensor Science, Juelich, Germany*, 181-184.
- [7] KLEIN M, HOHENSEE M. Electromagnetically induced transparency in paraffin-coated vapor cells [J]. *Physical Review A*, 2011, 83: 013826.
- [8] SELTZER S J, MICHALAK D J. Investigation of antirelaxation coatings for alkali-metal vapor cells using surface science techniques [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2010, 133: 1447-1450.
- [9] RADHAKRISHNAN S, LAL A. Alkali metal-wax micropackets for chip-scale atomic clocks [C]. *Solid State Sensors and Actuators and Microsystems, Transducers '05, Seoul, Korea*, 2005: 23-26.
- [10] AMIT L, SHANKAR R. 2010 Alkali Metal-wax Micropackets for Alkali Metal Handling: *United States*, 20070034809[P]. 2010.
- [11] CHEN SH, RUAN Y, MA B. A new packaging method of alkali metal simple substrate and related key techniques [J]. *Key Engineering Materials, in pressing*.
- [12] 马小军, 高党忠, 杨蒙生, 等. 应用白光共聚焦光谱测量金属薄膜厚度[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(1): 17-22.
- MA X J, GAO D ZH, YANG M SH, *et al.*. Measurement of thickness of metal thin film by using chromatic confocal spectral technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(1): 17-22. (in Chinese)
- [13] KNAPPE S. *Dark Resonance Magnetometers and Atomic Clocks* [D]. Thesis University of Bonn. 2001.
- [14] CHENACHEV A V T, YUDIN V I. Theory of dark resonances for alkali-metal vapors in a buffer-gas cell [J]. *Physical Review A*, 2003, 67: 338-348.
- [15] SVENJA K. MEMS Atomic Clocks [R]. *Comprehensive Microsystems*, 2009, 3: 571-612.
- [16] BOYLE W S, KISLIUK P. Departure from Paschen's law of breakdown in gases [J]. *Phys. Rev.*, 1955, 97: 255-259.
- [17] CARAZZETTI P, RENAUD P H, SHEA H R. Experimental study of electrical breakdown in MEMS devices with micrometer scale gaps [C]. *SPIE*, 2008: 6884-6888.
- [18] HASEGAWA M, CHUTANI R K. Microfabrication of cesium vapor cells with buffer gas for MEMS atomic clocks [J]. *Sensors and Actuators A*, 2011, 167: 594-601.
- [19] ALBAUGH K B. Electrode phenomena during anodic bonding of silicon to sodium borosilicate glass [J]. *J.*

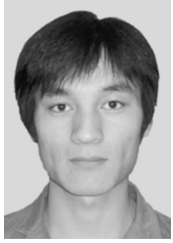
*Electrochem. Soc.*, 1991, 138: 3089-3094.

[20] COZMA A, PUERS B. Characterization of the e-

lectrostatic bonding of silicon and Pyrex glass [J].

*J. Micromech. Microeng.*, 1995, 5: 98-102.

#### 作者简介:



马 波(1984—),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,2008年、2010年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,主要从事 MEMS 技术、系统集成技术研究。E-mail: mab11@mails.tsinghua.edu.cn



阮 勇(1975—),男,河南开封人,博士,助理研究员,1998年于西安电子科技大学获得学士学位,2006年于北京大学获得博士学位,主要从事微纳米技术, MEMS 器件新原理、新方法及其相关工艺研究。E-mail: ruanyong@mail.tsinghua.edu.cn



陈 硕(1988—),男,天津人,博士研究生,2011年于清华大学获得学士学位,主要从事微机电系统相关的器件设计、系统设计等方面的研究。E-mail: chenshuo\_tsinghua@126.com



张高飞(1977—),男,河南开封人,博士,副研究员,2000年、2005年于清华大学分别获得学士、博士学位,主要从事 MEMS 技术、空间微系统技术研究。E-mail: zgf@mail.tsinghua.edu.cn

#### 导师简介:



尤 政(1963—),男,江苏扬州人,教授,教育部长江学者特聘教授,1985年、1987年、1990年于华中科技大学分别获学士、硕士和博士学位,研究方向为微米/纳米技术,微光机电系统集成,微纳卫星技术。E-mail: yz-dpi@mail.tsinghua.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)