بیست و هفتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و سیزدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه سیستان و بلوچستان،
زاهدان، ایران.
۱۴-۱۶ بهمن ۱۳۹۹

کد مقاله : ۲-۳۲۹-۱۰-A

ژیروسکوپ ارتعاشی نیمکروی: رویکردهای پیاده‌سازی پوسته نیمکروی

عبدالله اسلامی مجد[۱]،آیلارخوشه مهری[۲]،سیده عطیه حسینی[۳]

[۱و۲]هیأت علمی دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران[۱]، [۳]کارشناسی ارشد برق الکترونیک

چکیده - ژیروسکوپ ارتعاشی نیمکروی به دلیل داشتن نویز کم، عملکرد مناسب و طول عمر بالا به‌عنوان انتخابی با ارزش برای صنعت هوا و فضا می‌باشد. مهمترین بخش این ژیروسکوپ، پوسته ارتعاشی آن است. پوسته ارتعاشی نیمکروی در ابعاد میکرون به سه روش میکروماشینکاری، بلوتورچینگ و دمش شیشه‌ای قابل پیاده‌سازی است. در این مقاله پس از معرفی اجمالی و مقایسه رویکردهای ممکن به منظور ساخت پوسته نیمکروی، روش دمش شیشه‌ای انتخاب و زیر فرایندهای این روش معرفی و نتایج پیاده-سازی آن ارائه شده است. در نمونه‌ی ارائه شده با اجرای روش دمش شیشه‌ای، پوسته نیمکروی با شعاع ۱.۵mm، با شعاع پایه میانی و ارتفاع پوسته ۱۰۰µm ساخته‌شد. همچنین در این روش ساخت با طراحی زیرفرایند دمش در جهت کنترل فرایند دمایی در مرحله-ی خنک سازی قطعه از افزایش کریستالیزه شدن در پوسته جلوگیری شده است.

کلید واژه- پوسته ارتعاشی نیمکروی، روش دمش شیشه‌ای، ژیروسکوپ، ژیروسکوپ ارتعاشی نیمکروی

Hemispherical Resonator Gyroscope: Hemispherical Shell Implementation Approaches

AbdollahEslamiMajd, AylarKhooshehMehri,SeyedehAtiehHosseini

Abstract-The low noise, high performance and no wear-out has made the Hemispherical Resonator Gyroscope (HRG) the high value choice for aerospaceindustry. One of the parts of a Hemispherical Resonator Gyroscope is itshemispherical shell Resonator (HSR). It is possible to Implementation the µHSR in three technique by micromachining, blow-torching and glassblowing. In this article, after a brief introduction and comparison of possible approaches to make a hemispherical shell, the glass blowing method is selected and the sub-processes of this method are introduced and the results of its implementation are reported. The fabrication of hemispherical shell with different radius include radius of a shell with 1.5 mm and radius of stem has been done. In this process, the height of the shell is 100 micrometers. Also, in this fabrication method, by increasing the blowing sub-process in order to control the temperature process in the cooling stage of the part, the increase of crystallization in the shell is prevented.

Keywords: glassblowing, gyroscope, Hemispherical Resonator Gyroscope, Hemispherical ShellResonator

---

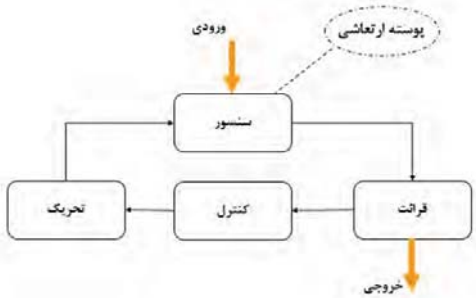
[1]a_eslamimajd@mut-es.ac.ir

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترس باشد.

مقدمه

ژیروسکوپ ارتعاشی نیمکروی که با تشدیدگر نیمکروی ارتعاش می‌کند، تحت عنوان HRG[۲] معرفی می‌گردد[۳]. HRG تنها نوع ژیروسکوپ ارتعاشی است، که در کلاس ناوبری قرار دارد [۲]. بنا بر مزایایی از قبیل بهینه‌سازی اتلاف انرژی و مقاوم بودن در برابر ارتعاشات بیرونی و ساخت متقارن پوسته، توجه به کاربرد تشدیدگرهای نیمکروی ارتعاشی در حسگرهای هدایت و ناوبری روبه افزایش است [1].

همان‌طور در شکل (۱) قابل مشاهده است، ساختار ژیروسکوپ ارتعاشی نیمکروی از سه بخش اصلی الکترودها، پوسته ارتعاشی و مدارات کنترلی تشکیل گردیده است که پوسته ارتعاشی به عنوان حسگر در این سامانه، چرخش ورودی را دریافت می‌کند.



شکل ۱: نمایی از جایگاه پوسته در ساختار ژیروسکوپ ارتعاشی

پوسته ارتعاشی نیمکروی در ابعاد میکرون به سه روش دمش شیشه‌ای[۳]، بلوتورچینگ[۴] و یا میکروماشینکاری[۵] ساخته می‌شود.در این پژوهش پس از معرفی و مقایسه‌ی روش‌های مذکور، ساخت پوسته نیمکروی بر مبنای روش دمش شیشه‌ای مورد بررسی قرارگرفته است.

انواع رویکردهای ساخت پوسته

در روش دمش شیشه‌ای ابتدا پس از انتخاب زیرلایه‌ی مناسب به عنوان بستر مورد نظر،در زیرلایه حفره‌ای استوانه‌ای شکل ایجاد می‌شود. سپس طی فرآیند باندینگ[۶]، یک ویفر از جنس شیشه به زیرلایه مذکور متصل می‌شود. سپس با اجرای فرایند دمش و با انبساط فشار گاز داخل حفره و نیروی کشش سطحی، تغییر شکل در لایه شیشه‌ای صورت می‌گیرد. نیروی کشش سطحی در این فرایند باعث ایجاد تقارن بالا و کمترین ناهمواری در سطح می‌شود[۴].

روش بلوتورچینگ بدین صورت است که بین دو قالبی که از جنس گرافیت هستند، لایه‌ای شیشه‌ای از جنس فیوزد سیلیکا[۷] قرار می‌گیرد که با اعمال حرارت از بالا و اختلاف فشار از زیرقالب‌ها، لایه فیوزد سیلیکا به داخل حفره کشیده می‌شود. این فرایند در زمان کوتاه با استفاده از مشعل، با دمای حدود ۲۵۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود [۵]. روش دیگر میکروماشینکاری است که این روش براساس چند مرحله لیتوگرافی[۸] و زدایش و فرایندهای متداول این تکنیک که در ساخت انواع ادوات الکترونیکی نیز مرسوم است، اجرا می‌شود[۶].

با توجه به اینکه استفاده از روش میکروماشینکاری برای ساخت پوسته ارتعاشی با تقارن و همواری سطح موردنظر مستلزم امکانات ویژه‌ای است که در داخل کشور در دسترس نیست، برای انتخاب روش مناسب، در ادامه قیاس

---

[۲] Hemispherical Resonator Gyroscope
[۳] glassblowing
[۴] blow-torching
[۵] micro machining
[۶] bonding
[۷] fused silica
[۸] Lithography

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترس باشد.

بین دو روش دمش شیشه‌ای و بلوتورچینگ در جدول۱ بیان‌شده است.

جدول ۱: مقایسه روش دمش شیشه‌ای و بلوتورچینگ

روش‌های ساخت	مزایا	معایب
دمش شیشه‌ای	افزایش دما تا دمای بالای نقطه دمایی نرم‌شدگی[7] امکان ساخت چند پوسته همزمان [7] هزینه کمتر ساخت [9]	محدودیت نرخ ابعاد [7] اهمیت فرایند دمایی به منظور جلوگیری از کریستالیزه شدن پوسته [8]
بلوتورچینگ	سریعبودنفرایند [8] امکان افزایش نرخ ابعاد امکان ساخت چند پوسته به طور همزمان[8]	برحسب دمای نقطه ذوب مواد اعمال حرارت[8] نیاز به دقت بالا در همترازی مرکز مشعل با مرکز قالب [8]

ساخت پوسته

در این مقاله با توجه به درنظرگرفتن فرایند دمایی و امکان پذیری اعمال حرارت، رویکرد دمش شیشه‌ای به منظور ساخت پوسته نیمکروی ارتعاشی[۹](HSR) انتخاب و پیاده-سازی گردید. این روش شامل چهار مرحله اصلی زیر است:

الف) مرحله ایجاد حفره

ب) مرحله باندینگ

ج) مرحله دمش

د) مرحله نهایی

با انتخاب سیلیکن به عنوان بستر و ایجاد حفره استوانه‌ای در آن با شعاع1.5mm و عمق ۵۳۲µm، اتصال ویفر شیشه‌ای به بستر با روش آندیک باندینگ انجام پذیرفت. سپس طی فرایند دمشویفرهای متصل شده تا دمایی بیشتر از نقطه دمایی نرم‌شدگی (دمای ۸۲۰ درجه سانتی-گراد)حرارت می‌بینند، که ویسکوز شدن لایه شیشه‌ای و انبساط هوای داخل حفره در این وضعیت رخ می‌دهد. در نتیجه با فشار گاز و نیروی کشش سطحی پوسته متورم می‌شود. این روند دمش تا زمانی ادامه می‌یابد که فشار داخلی با فشار خارجی محیط برابر شود. به بیان دیگر در طی بازه‌ی زمانی کوتاهی، در لایه شیشه‌ای، نیروی کششی در سطح ساختار پوسته در مقیاس اتمی عمل می‌کند تا ناهمواری سطحی و نقص‌های ساختاری را به حداقل برساند.

نتایج

درنهایت در طی مراحلی با شناسه ذکرشده در **Error! Unknown switch argument.** پوسته‌ای با مشخصات، شعاع ۱۵۰۰ میکرومتر و شعاع میانی ۲۵۰ میکرومتر و ارتفاع ۱۰۰ میکرومتر حاصل می‌گردد. شکل (۳) بیانگر پوسته پدید آمده تحت فرایندهای ایجادشده است.

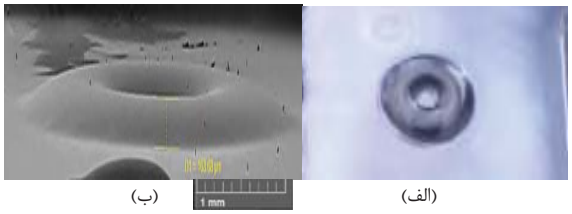
جدول ۲. مشخصات پوسته حاصل از روش دمش شیشه‌ای

مشخصات نمونه					
فرایندایجاد حفره	ضخامتسیلیکون (µm)	قطر حلقهمیانی (µm)	شعاعبررسی شده (µm)	عمقبررسی شده (µm)	لبپردگی (µm)
	۷۰۴	۴۵۰	۱۲۷۵	۵۳۲	۵۰
فرایندباندینگ	دمای فرایند 550c		ولتاژ 800v	زمان اعمال ولتاژ 30s	
فرایندسایش	ضخامت150µm		پولیش25µm درنهایتضخامت125µm		
فرایند دمش	زمانورود۲۱۰s	زمانماندن۳۰۰s	زمانسردشدن۹۰s		
ابعاد نهایی پوسته	ارتفاع 100 µm شعاع میانی 250 µm شعاع حلقه بیرونی1500 µm				

[۹] Hemispherical Shell Resonator

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترس باشد.

شکل (۳) بیانگر تصویر پوسته نیمکروی ساقه‌دار در دو حالت بررسی متفاوت است، تصویر (الف) نشانگر عدم کریستالیزه شدن و شفافیت پوسته، تصویرSEMپوسته (ب) نمایانگر ابعاد پوسته با دقت میکرومتری و صحت انجام زیرفرایندهای دمش شیشه‌ای می‌باشد.



(ب) (الف)

شکل ۲: پوسته نیم کروی ساقه‌دار شیشه‌ای با ارتفاع 100μmحاصل از روش دمش شیشه‌ای بر روی بستری از سیلیکن

نتیجه‌گیری

در این مقاله ساخت نمونه آزمایشگاهی پوسته ارتعاشی نیمکروی با روش دمش شیشه‌ای پیاده‌سازی شد و با انجام زیرفرایندهای لازم و یافتن نقطه کار مورد نظر، پوسته شیشه‌ای با ساختار نیمکروی ساقه‌دار و با کنترل کریستالیزه شدن در ساختار بلوری آن حاصل گردید.همچنین بر اساس این نتایج می‌توان این پوسته را با توجه به مشخصات ژیروسکوپی مورد نظر طراحی نمود و ساخت.

مرجع‌ها

[1] D. Senkal, M. J. Ahamed, A. A. Trusov, and A. M. Shkel, “Achieving sub-hz frequency symmetry in micro-glassblown wineglass resonators,” J. Microelectromechanical Syst., vol. 23, no. 1, pp. 30–38, 2014.

[2] Yun, Li, et al. "Quadrature control of hemispherical resonator gyro based on FPGA." IEEE 2011 10th International Conference on Electronic Measurement & Instruments. Vol. 3. IEEE, 2011.

[۳] Litty, E. C., Gresham, L. L., Toole, P. A. E. C. Litty, L. L. Gresham, P. A. Toole, and D. A. Beisecker, “Hemispherical Resonator Gyro: an IRU for Cassini,” Proc. SPIE - Int. Soc. Opt. Eng., vol. 2803, pp. 299–310, 1996.

[4] D. Senkal, C. R. Raum, A. A. Trusov, and A. M. Shkel, “Titania silicate / fused quartz glassblowing for 3-d fabrication of low internal loss wineglass micro-structures,” Tech. Dig. - Solid-State Sensors, Actuators, Microsystems Work., pp. 267–270, 2012.

[5] J. Cho, J. Yan, J. A. Gregory, H. Eberhart, R. L. Peterson and K. Najafi, "High-Q fused silica birdbath and hemispherical 3-D resonators made by blow torch molding," 2013 IEEE 26th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Taipei, pp. 177-180, 2013.

[6] A. Heidari et al., “Micromachined polycrystalline diamond hemispherical shell resonators,” in 2013 Transducers and Eurosensors XXVII: The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, TRANSDUCERS and EUROSENSORS 2013, no. June, pp. 2415–2418, 2013.

[7] B. Luo, J. Shang, Z. Su, J. Zhang, and C. P. Wong, “Height adjustment of 3-d axisymmetric microumbrella shells for tailoring wineglass frequency,” IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol., vol. 9, no. 3, pp. 567–574, 2019.

[8] J. Y. Cho, J. Yan, J. A. Gregory, H. W.Eberhart, R. L. Peterson, and K. Najafi, “3-Dimensional Blow Torch-Molding of Fused Silica Microstructures,” J. Microelectromechanical Syst., vol. 22, no. 6, pp. 1276–1284, 2013.

[9] D. Senkal, M. J. Ahamed, S. Askari, and A. M. Shkel, “MEMS micro-glassblowing paradigm for wafer-level fabrication of fused silica wineglass gyroscopes,” Procedia Eng., vol. 87, pp. 1489–1492, 2014.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترس باشد.