

شبیه‌سازی المان محدود یک میکروگریپر دارای عملگر الکتریکی - حرارتی با استفاده از نرم‌افزار COMSOL

امین روحانی اصفهانی^{۱*}، مجتبی کلاهدوزان^۲، مهران مرادی^۳

تاریخ دریافت: ۳ مهر ۹۲ تاریخ پذیرش: ۱۵ آذر ۹۲

چکیده

سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی (MEMS)^۴ ترکیبی از اجزای الکتریکی و مکانیکی در ابعاد میکرون می‌باشد. در سال‌های اخیر روش‌های تحریک، نگهداری و حمل‌ونقل ممز به طور عمیقی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. از جمله‌ی ممز می‌توان به میکروگریپرها، میکرو سنسورها، میکرو رله‌ها و غیره اشاره نمود. میکروگریپرها در جابه‌جایی، موقعیت دهی و مونتاژ قطعات و اجزای میکرونی کاربرد بسیار دارند. میکروگریپر برای گیره بندی نیاز به تحریک دارد. این تحریک توسط عملگرهایی مانند الکترواستاتیک، الکتروترمال، الکترومغناطیس و غیره ایجاد می‌شود. عملگرهای الکتروترمال عملکرد نسبتاً ساده‌ای دارند و نسبت به عملگرهای رایج دیگر برای یک جابه‌جایی برابر، توان الکتریکی کمتری مصرف می‌کنند. در این مقاله طرح نوینی از یک میکروگریپر الکتروترمال با عملگرهای U شکل به منظور نگهداری و حمل همزمان محدوده‌ی وسیعی از قطعات به ازای ولتاژهای متناظر ۱ تا ۱۰ ولت مدل‌سازی و تحلیل شده است. این میکروگریپر از جنس سیلیکون و به ضخامت ۲۵ میکرومتر، قابلیت گیرش قطعاتی بین ابعاد ۴۶۰ تا ۴۸۰ میکرومتر را دارد. در نهایت رفتار این میکروگریپر در نرم‌افزار المان محدود قدرتمند COMSOL شبیه‌سازی و میزان جابه‌جایی بازوهای گیرنده و حرارت تولیدشده آن محاسبه شده است

واژگان کلیدی: سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی، میکروگریپر، عملگرهای الکتریکی حرارتی، شبیه‌سازی المان محدود

۱. مقدمه

کوچک‌شده، حسگرها، محرک‌ها و میکرو الکترونیک‌ها می‌باشد، قابل توجه‌ترین و مهم‌ترین بخش‌های آن شامل میکرو سنسورها و عملگرهای میکرونی است [۲]. میکروگریپرها بخشی از سیستم‌های MEMS برای نگهداری، انتخاب، جابه‌جایی و مونتاژ اجزای میکرونی هستند که دارای کاربردهای مختلف از جمله در ربات‌های میکرو، میکرو جراحی‌ها، سیلان شناسی میکرو، میکرو رله‌ها و

سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی یکی از جنبه‌های تکنولوژی مدرن، شامل عناصر کوچک الکترومکانیکی ساخته‌شده با استفاده از تکنیک‌های ساخت میکرونی می‌باشند. بزرگ‌ترین وعده MEMS در توانایی تولید حرکت مکانیکی در یک مقیاس کوچک است [۱]. درحالی‌که بخش‌های تشکیل‌دهنده‌ی MEMS شامل ساختارهای

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد - دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد: amin_rouhany@yahoo.com

۲. استادیار - دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد

۳. استادیار - دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد

۴. Micro Electro Mechanical Systems

در این مقاله یک میکروگریپر U شکل با عملگر الکترو ترمال شبیه‌سازی و تحلیل شده است. از آنجا که صحت و کارایی میکروگریپر برای احتیاجات لازم ساخت و طراحی عملگرهای ممز حائز اهمیت است، نتایج این تحقیق کمک خواهد کرد با توجه به هزینه‌های ساخت بالای عملگرهای ممز و با توجه به شرایط مرزی پیچیده میزان اعتماد به میکروگریپر قبل از انجام مراحل ساخت بررسی گردد.

۲- مواد و روش‌ها

اجزای مختلف و ابعاد نهایی میکروگریپر به ترتیب در شکل (۱) و جدول (۱) نشان داده شده است.

و ابزارهای پزشکی است [۳]. اصل تحریک مورد بحث ممکن است الکترواستاتیک که دو طرح اصلی در این میکرو عملگرها مکانیزم شانه‌ای جانبی^۱ [۴] و میکرو موتور چرخان^۲ [۵] است، پیزو الکتریک [۶-۸]، الکترومغناطیس [۹] و الکتریکی حرارتی که به دو شکل کلی U شکل یا اصطلاحاً شبه بیمورف^۳ [۱۰] و V شکل یا اصطلاحاً تیرک خمیده^۴ [۱۱] باشند.

در این بین محرک‌های حرارتی دارای مزایایی نسبت به محرک‌های دیگر می‌باشند که از جمله می‌توان به جابه‌جایی بیشتر در ولتاژهای پایین، ساختار قوی تر، نیروی خروجی بزرگ‌تر، بهره‌وری آسان تر، ساخت آسان تر و همچنین معایبی از جمله مصرف انرژی بالا و سرعت پایین برای انحراف که به نرخ انتقال حرارت بستگی دارد اشاره نمود [۱۲]. محرک‌های حرارتی با استفاده از دو قانون ژول و انبساط حرارتی مواد به تحریک مکانیکی مورد نظر دستیابی پیدا می‌کنند.

طریقه‌ی کار میکروگریپرهای الکتریکی حرارتی بدین صورت است که شامل دو بازوی پهن (محرک سرد) و بازوی نازک (محرک گرم) به عنوان محرک‌های میکرونی می‌باشند که با اعمال ولتاژ به آن‌ها، با عبور جریان الکتریکی بازوی نازک گرم می‌شود و مقاومت کوچکی طبق رابطه‌های ۱ و ۲ تولید می‌گردد که باعث خم شدن آن به سمت بازوی پهن می‌شود [۱۲-۱۳].

(۱)

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

(۲)

$$H = RI^2$$

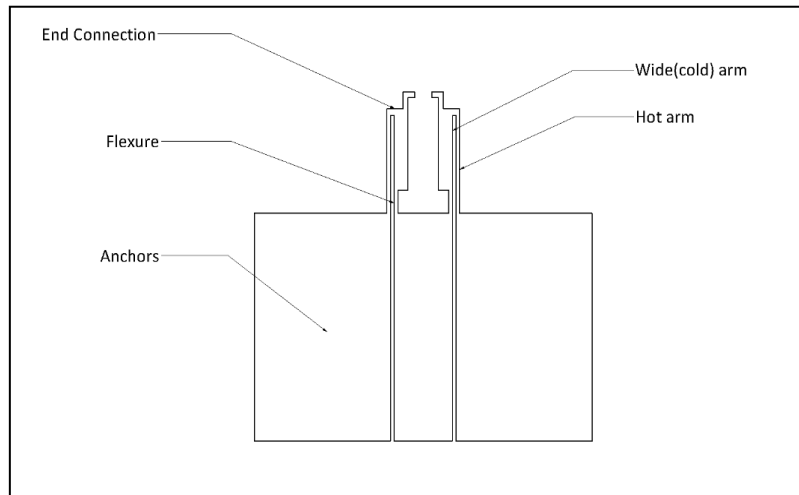
در این روابط R مقاومت بر حسب اهم (Ω)، L طول بر حسب میلی‌متر (mm)، A مساحت مقطع بازو بر حسب میلی‌متر مربع (mm^2)، H گرمای تولیدشده در بازو بر حسب وات (J/s) و I جریان عبور داده‌شده از بازو بر حسب آمپر (A) است.

¹ Lateral Comb drive

² Rotary Micromotor

³ Pseudo Bimorph

⁴ Bent Beam



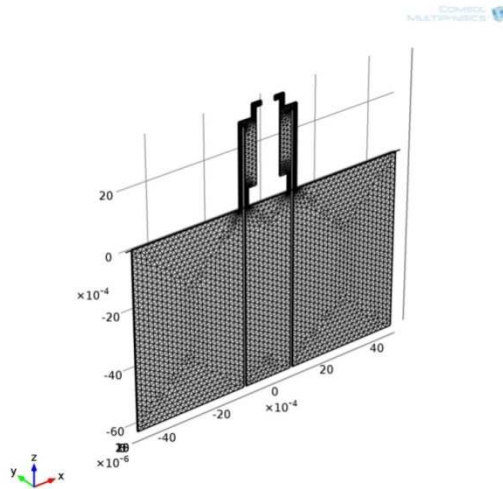
شکل (۱): طرح شماتیک میکروگریپر U شکل جفت شده به صورت دو بعدی

جدول (۱): ابعاد قسمت‌های مختلف میکروگریپر

Design Parameter	Hot arm		Wide(cold) arm	
	Length	Width	Length	Width
Value[μm]	2860	100	2230	390
Design Parameter	Flexure		End Connection	
	Length	Width	Length	Width
Value[μm]	630	110	600	180
Design Parameter	Anchors		Thickness	
	Length	Width		
Value[μm]	6230	3760	25	

شبیه‌سازی MEMs مورد استفاده قرار می‌گیرد و آن را از دیگر نرم‌افزارهای مشابه متمایز می‌کند. شماتیکی از مدل مش بندی شده میکروگریپر در شکل (۲) نشان داده شده است.

تحلیل این مدل در نرم‌افزار COMSOL Multiphysics 4.4 انجام شده است. یک ماژول MEMs در این نرم‌افزار گنجانده شده است که مجموعه‌ای از رابط‌های فیزیکی و مدل‌های از پیش تعریف شده برای نرم‌افزار می‌باشد که به ویژه برای طراحی و

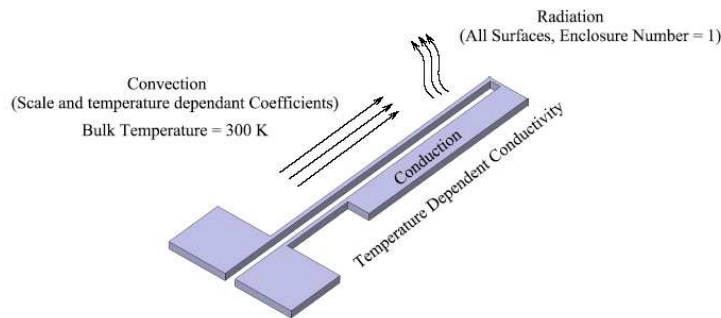


شکل (۲): شماتیکی از مدل مش بندی شده در نرم‌افزار المان محدود COMSOL

درجه کلوین) مدهای انتقال حرارت از طریق جابه‌جایی اهمیت بسیاری پیدا می‌کنند. اهمیت این مسئله وقتی بیشتر می‌شود که ابعاد و اندازه‌های عملگر مورد نظر کوچک می‌شود و این مهم به این دلیل است که با کوچک‌تر شدن اندازه عملگر، نسبت سطح به حجم عملگر افزایش پیدا می‌کند.

با استفاده از نتایج Mankame و همکارانش [۱۴] می‌توان اهمیت مدل‌سازی دقیق حرارتی را یافت. شکل (۳) شرایط مرزی اعمال‌شده را به صورت شماتیک نشان می‌دهد

با توجه به اینکه در تحلیل مربوطه با سه میدان مختلف روبرو هستیم سه شرط مرزی سازه‌ای، حرارتی و الکتریکی خواهیم داشت. شرط مرزی دمایی از بقیه مهم‌تر بوده و در نتایج تأثیر بسیار مهمی دارد. در حالت پایدار عملگرهای الکتریکی حرارتی تمام توان الکتریکی ورودی را به صورت گرما تلف می‌کنند تا به حالت پایدار برسند. در دماهای پایین مقدار قابل‌توجهی از گرمایی که در عملگر تولید می‌شود از طریق پدها به زیر لایه منتقل می‌شود، اما در دماهای بالاتر (بالاتر از ۵۰۰



شکل (۳): شرایط مرزی حرارتی اعمال‌شده در مدل المان محدود

ماده وابسته به دما می‌باشد؛ لذا خواصی چون ضریب انبساط حرارتی و ضریب هدایت حرارتی باید به صورت متغیر با دما در نظر گرفته شود. با نگاهی به جدول شماره ۳ به راحتی می‌توان دریافت که محدوده‌ی تغییرات ضرایب هدایت حرارتی در محدوده‌ی دمای کاری قابل‌توجه بوده و لزوم متغیر بودن آن بیش از پیش اهمیت پیدا خواهد کرد.

جنس انتخاب‌شده برای عملگر، سیلیکون تک کریستال با راستای $\langle 100 \rangle$ و ناخالص ساز فسفر است. ضخامت نهایی میکروگریپر نیز ۲۵ میکرومتر می‌باشد. برای انجام شبیه‌سازی المان محدود عملگر مورد نظر، باید خواص مکانیکی و ترموفیزیکی ماده به صورت دقیق انتخاب و وارد مدل شوند که در جدول (۲) و (۳) لیست شده‌اند. به دلیل بالا بودن دمای عملگرهای الکتروترمال در حین کار و با توجه به اینکه بسیاری از خواص

جدول (۲): خواص مکانیکی و ترموفیزیکی استفاده‌شده در شبیه‌سازی [۱۵-۱۶]

مقدار	خاصیت
678[J/(kg*K)]	ظرفیت گرمایی در فشار ثابت ^۱
4.5	ثابت دی الکتریک نسبی ^۲
2320[kg/m ³]	چگالی ^۳
8200[S/m]	رسانایی الکتریکی ^۴

¹ Heat capacity at constant pressure

² Relative permittivity

³ Density

⁴ Electrical conductivity

مقدار	خاصیت
169e9[Pa]	مدول یانگ ^۱
1	نسبت پواسون ^۲
400[w/(m ² k)]	ضریب انتقال حرارت ^۳

جدول (۳) : تغییرات ضریب انبساط حرارتی α [۱۷] و ضریب هدایت حرارتی Kt [۱۸] در شرایط دمایی مختلف

α ($\mu\text{m/mK}$)	K_t (W/mK)	Temperature (K)
2.568	146.4	300
3.212	98.3	400
3.594	73.2	500
3.831	57.5	600
3.987	49.2	700
4.099	41.8	800
4.185	37.6	900
4.258	34.5	1000
4.323	31.4	1100
4.384	28.2	1200
4.442	27.2	1300
4.500	26.1	1400
4.556	25.1	1500

¹ Young's modulus

² Poisson's ratio

³ Heat transfer coefficient

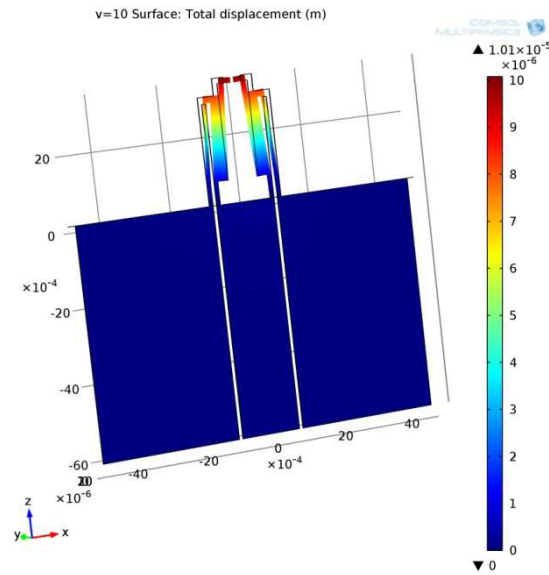
⁴ Coefficient of linear thermal expansion

⁵ Thermal Conductivity

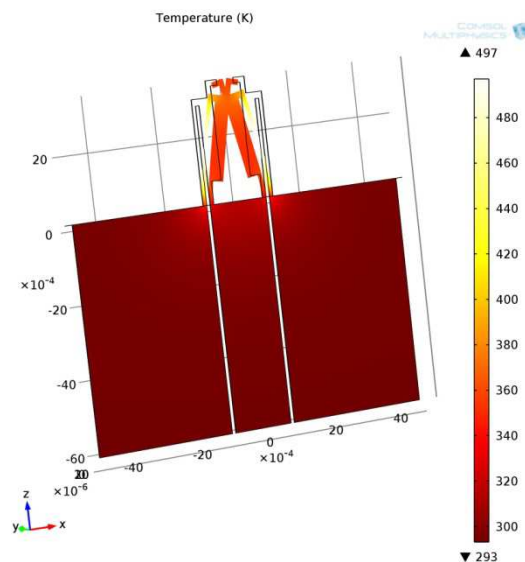
۳- نتایج و بحث:

دست خواهد آمد. همچنین دمای کاری میکروگریپهای الکتریکی حرارتی بالا است و دانستن دمای عملگرهای به کاررفته با توجه به حساس بودن قطعاتی که باید موقعیت دهی شوند از اهمیت خاصی برخوردار است. نتایج حل المان محدود به ازای ولتاژ ورودی ۱۰ ولت در شکل (۴) و (۵) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود ماکزیمم جابه جایی نوک هر بازوی میکروگریپ برابر ۱۰.۰۷۲ میکرومتر و ماکزیمم دمای ایجادشده در بازوی نازک برابر ۴۹۷ درجه ی کلوین است.

محاسبه ی میزان جابه جایی بازوهای گیرنده به ازای مقادیر مختلف ولتاژ اعمالی اهمیت بسیاری دارد. دلیل این امر نیز این است که محدوده ی کارگیر عملگر طراحی شده به طور مستقیم با این جابه جایی در ارتباط است و از طرف دیگر برای قطعات مختلف در رنج کاری میکروگریپ جابه جایی های مختلفی نیاز است که متناسب با یک ولتاژ ورودی هستند؛ بنابراین با دانستن میزان جابه جایی مورد نیاز برای عملیات گیرش، ولتاژ ورودی به

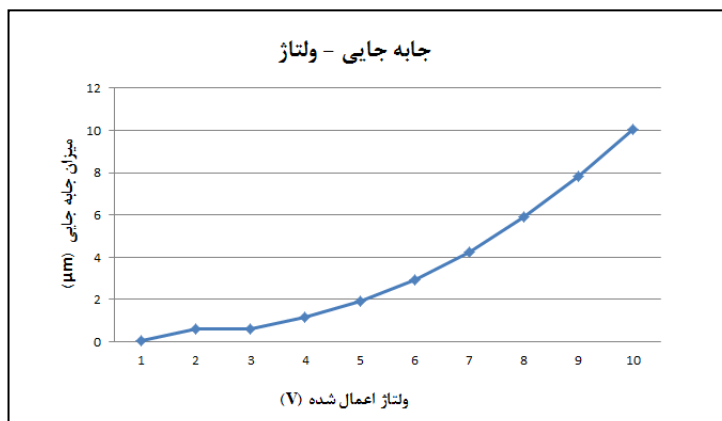


شکل (۴) : جابه جایی نوک بازوهای میکروگریپ قبل و بعد از اعمال ولتاژ

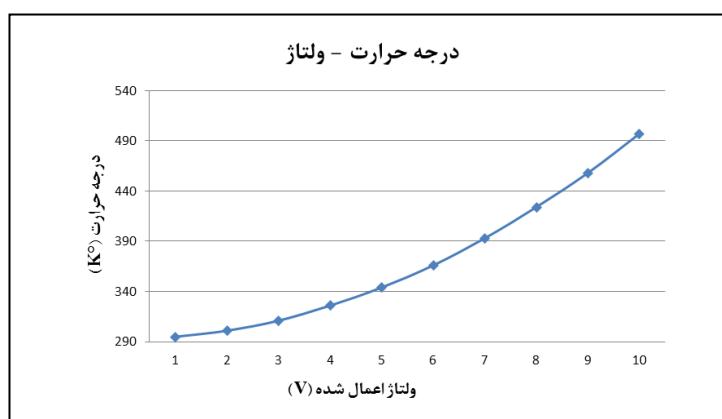


شکل (۵) : توزیع دما در میکروگریپ به ازای ولتاژ ورودی ۱۰ ولت

تغییرات جابه‌جایی و درجه حرارت با ولتاژ اعمال شده در شکل (۶) و (۷) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود میزان جابه‌جایی و درجه حرارت به طور غیرخطی با افزایش ولتاژ ورودی، افزایش پیدا می‌کنند.



شکل (۶): تغییرات میزان جابه‌جایی نوک هر بازوی میکروگریپر به ازای ولتاژ ورودی



شکل (۷): تغییرات درجه حرارت بازوهای میکروگریپر به ازای ولتاژ ورودی

۴- نتیجه گیری:

حل المان محدود نمودارهای جابه‌جایی - ولتاژ و دما - ولتاژ برای بازوهای میکروگریپر بود. در این شبیه‌سازی حداکثر جابه‌جایی نوک هر بازوی میکروگریپر برابر ۱۰.۰۷۲ میکرومتر و ماکزیمم دمای به دست آمده ۴۹۷ درجه‌ی کلوین به ازای ولتاژ ۱۰ ولت اندازه‌گیری شده است.

در این مقاله یک میکروگریپر U شکل با عملگر الکتروترمال در نرم‌افزار المان محدود COMSOL در بازه‌ی ولتاژ ۱ تا ۱۰ ولت شبیه‌سازی و تحلیل شد. شرط مرزی دمایی از مهم‌ترین شرایط مرزی اعمال شده بر روی میکروگریپر با توجه به تغییرات ضرایب حرارتی متناسب با دما انتخاب گردید. نتایج حاصل از

- [1] Jeong, H., M., Ha, S., "Dynamic Analysis of a Resonant Combdrive Micro-actuator in Linear and Nonlinear Regions". *Sensors and Actuators A*, 125(1), October, pp. 59-68, 2005.
- [2] Patowari, P., K., Saikia, J., Chatterjee, P., S., Ramachandran, A., Ashwin, P., G., Baishya, S., "Analysis of a Comb Type Microactuator Used in Micro Thermal Switches", *Proceedings of the World Congress on Engineering 2011 Vol II, WCE 2011*, July 6 - 8, London, U.K, 2011.
- [3] Vidyaa, V., "Hybrid Design Electrothermal Polymeric Microgripper with Integrated Force Sensor", *COMSOL Conference in Bangalore*, 2012.
- [4] Fan, L., Tai, Y., C., Mullar, R., "IC-Processed Electrostatic Micromotors", *Sensors and Actuators A*, 20(1-2), November, pp. 49-55, 1989.
- [5] Tang, W., C., Nguye, T., C., Howe, R., T., "Laterally Driven Polysilicon Resonant Microstructures", *Sensors and Actuators A*, 20(1-2), pp. 25-32, 1989.
- [6] Seki, H., 1992. "Modeling and Impedance Control of a Piezoelectric Bimorph Microgripper", *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference of Intelligent Robots and Systems*, pp. 958-965, 1992.
- [7] Basrour, S., Robert, L., Ballandras, S., Megtert, S., Blind, P., Rouillay, M., Bernède, P., Daniau, W., "Microgrippers Fabricated by the LIGA Technique", *Sensors and Actuators A*, 58(3), March, pp. 265-272, 1997.
- [8] Salim, R., Warmus, H., Harnisch, A., Hulsenberg, D., "Microgrippers Created in Microstructurable Glass", *Microsystem Technologies*, 4(1), December, pp. 32-34, 1997.
- [9] Suzuki, Y., "Flexible microgripper and Its Application to Micro-measurement of Mechanical and Thermal Properties", *IEEE MEMS Proceedings 9th Annual International Workshop*, pp. 406-411, 1996.
- [10] Comtois, J., H., Michalick, M., ABarron, C., C., "Electrothermal Actuators Fabricated in Four-Level Planarized Surface Micromachined Polycrystalline Silicon", *Sensors and Actuators A*, 70(1-2), October, pp. 23-31, 1998.
- [11] Que, L., Park, J., S., Gianchandani, Y., B., "Bent-Beam Electro-Thermal Actuators for High Force Applications", *IEEE Conf. on Micro Electro Mechanical Systems*, Orlando, Florida. pp. 31-36, 1999.
- [12] Singh, J., Teo, J., H., S., "A Two Axes Scanning SOI MEMS Micromirror for Endoscopic Bioimaging", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 18(2), pp. 1-10, 2008.
- [13] Pahwa, T., "Analysis & Design Optimization of laterally driven Poly- Silicon Electro-thermal Micro-gripper for Micro-objects Manipulation", *COMSOL Conference in Bangalore*, 2012.
- [14] Mankame, N., D., Ananthasuresh, G., K., "Comprehensive Thermal Modelling and Characterization of an Electro-Thermal-Compliant Microactuator", *J. Micromech. Microeng.*, 11(5), 452-462, 2001.
- [15] Hull, R., *Properties of Crystalline Silicon*, INSPEC, London, 1999.
- [16] Ravindra, N., Sopori, B., Gokce, O., Cheng, S., Shenoy, A., Jin, L., Abedrabbo, S., Chen, W., Zhang, Y., "Emissivity Measurements and Modeling of Silicon-Related Materials: An Overview", *Int. J. Thermophys.*, 22(5), September, pp. 1593-1611, 2001.
- [17] Okada, Y., Tokumaru, Y., "Precise determination of lattice parameter and thermal expansion coefficient of silicon between 300 and 1500 K", *J. Appl. Phys.*, 56(314), 1984.