

Pembangunan Kaedah Reka Bentuk Dan Fabrikasi Diafram Beralun Silikon Menggunakan Teknik Punaran Anisotropik KOH

Norhayati Soin dan Burhanuddin Yeop Majlis

Jabatan Kejuruteraan Elektrik,
Fakulti Kejuruteraan,
Universiti Malaya,
50603 Lembah Pantai, Kuala Lumpur.
email: norhayatisoin@yahoo.com

Received Date: 20th July 2005 Accepted Date: 21st April 2006

ABSTRAK

Kajian ini adalah mengenai pembangunan suatu kaedah baru bagi mereka bentuk diafram beralun silikon dengan menggunakan teknik punaran anisotropik KOH. Reka bentuk bagi menghasilkan diafram beralun tersebut dibangunkan berdasarkan aturan reka bentuk yang diaplikasikan kepada diafram beralun yang diperbuat daripada logam yang kemudiannya diubahsuai. Proses simulasi punaran KOH dilakukan ke atas diafram yang direka bentuk dengan menggunakan perkakasan simulasi punaran Intellisuite AnisE sebelum proses fabrikasi dijalankan. Nilai peratus ralat punaran, D_e yang didapati di antara keputusan yang didapati dari hasil simulasi dan eksperimen adalah amat kecil iaitu 0.15%.

Kata kunci: Punaran Anisotropik, Diafram Beralun, Aturan Reka Bentuk

ABSTRACT

This study is on the development of a new design method of silicon corrugated diaphragm using KOH anisotropic etching technique. Design rules for designing and fabricating corrugated silicon diaphragm structures were developed based on the application of the design rules for corrugated metal diaphragm structures which is later being modified. The KOH etching process has been performed by using etching simulation tool of Intellisuite AnisE in order to realize the corrugated structures on the silicon wafer prior to the fabrication process. The disparity of the etching error percentage, D_e was found to be too small between the simulated and experimental results which are 0.15%.

Keywords: Anisotropic Etching, Corrugated Diaphragm, Design Rules

PENGENALAN

Diafram beralun bagi aplikasi MEMS boleh direka bentuk dan direalisasikan dengan menggunakan pelbagai teknik reka bentuk dan fabrikasi. Ini bergantung pada keperluan sesuatu peranti MEMS yang hendak dibangunkan. Dalam aspek reka bentuk, kemudahan perisian reka bentuk dan simulasi CAD seperti CoventorWare dan Intelisuite boleh digunakan di mana analisis kelakuan-kelakuan elektrik dan mekanik sesuatu reka bentuk boleh dikaji dan seterusnya pengoptimuman boleh dilakukan (Marchetti et al. 1998). Disamping itu, kaedah alternatif boleh digunakan bagi mereka bentuk diafram tersebut di mana teori asas dari prinsip pertama bagi mereka bentuk diafram beralun yang dibuat daripada bahan logam diaplikasikan dalam reka bentuk silikon. Pendekatan reka bentuk ini adalah berdasarkan penyelidikan yang telah dijalankan oleh Haringx (Haringx 1950, 1953, 1956, 1957), yang mana beliau telah menggunakan hasil eksperimen untuk membuktikan kesahihan pendekatan matematik yang digunakan bagi ketegaran dan reka bentuk diafram beralun. Bagi

mereka bentuk diafram beralun untuk aplikasi MEMS di mana sebagai contoh silikon akan digunakan sebagai bahan diafram, beberapa pengubahsuaian perlu dilakukan mengikut teknologi fabrikasi yang hendak digunakan.

Dalam kajian ini, suatu kaedah reka bentuk diafram beralun silikon telah dibangunkan bagi memenuhi beberapa spesifikasi tertentu. Diafram yang direka bentuk ini telah direalisasikan secara simulasi dan eksperimen.

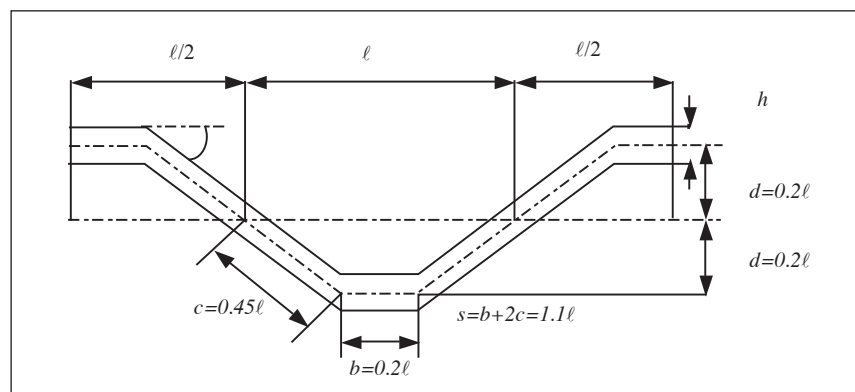
REKA BENTUK DIAFRAM BERALUN

Spesifikasi reka bentuk bagi diafram beralun terdapat dalam Jadual 1. Spesifikasi ini dihasilkan untuk mereka bentuk geometri diafram yang boleh difabrikasi di makmal mikroelektronik IMEN, yang mana ianya merupakan pertimbangan utama bagi reka bentuk geometri. Diafram beralun yang direka bentuk mempunyai struktur alunan berbentuk trapezoid yang dicirikan dengan dimensi b , c , d , ℓ , dan s seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1.

Seperti yang dinyatakan dalam Jadual 1, diafram ini tidak akan memberi sisihan yang

Jadual 1. Spesifikasi reka bentuk diafram beralun

Parameter	Nilai
Modulus Young, E	160 GPa
Pesongan maksimum, f_{max}	153 μm
Tekanan maksimum, p_{max}	60 psi
Tegasan maksimum, σ_{max}	70 MPa
Sisihan daripada kelinearan,	$\Delta 0.1$



Rajah 1. Keratan melintang bagi alunan dengan profil trapezoid (Bagi kes profil alunan yang piawai dilukis di sini $b = d = 0.2l$).

melebihi 10 peratus (= 0.10) berdasarkan persamaan linear di antara tekanan dan pesongan. Silikon telah dipilih sebagai bahan bagi diafram beralun ini. Dalam kes ini, nilai bagi modulus Young, E dan tegasan maksimum, σ_{max} , yang dibenarkan, masing-masing adalah 160 GPa dan 70 MPa. Seterusnya, berpandukan pada batasan-batasan permudah yang dihasilkan oleh Haringx (1950), persamaan berikut boleh diterbitkan:

$$p' = \frac{P_{max}}{(1 + \Delta)\sqrt{\Delta}} \quad (1)$$

$$\sigma' = \frac{\sigma_{max}}{\sqrt{\Delta}} \quad (2)$$

$$f' = \frac{f_{max}}{\sqrt{\Delta}} \quad (3)$$

dengan f_{max} , P_{max} , σ_{max} dan D masing-masing adalah pesongan maksimum, tekanan maksimum, tegasan maksimum dan sisihan daripada kelinearan. Kemudian kuantiti pengurangan p' , σ' , dan f' akan dikira dan seterusnya menghasilkan nilai seperti yang berikut:

$$p' = 1189252.1, \sigma' = 221359436, f' = 0.000486$$

Oleh itu, kuantiti tanpa-dimensi p'/E dan σ'/E didapati bersamaan dengan

$$p'/E = 7.433 \times 10^{-6}, \quad \sigma'/E = 0.0138$$

Dengan merujuk kepada Rajah 2 dan 3 serta berpandukan pada profil alunan piawai yang diberikan dalam Rajah 1 dengan $b = d = 0.2\ell$, nilai berikut telah diperolehi (rujuk pada garisan rujukan putus) iaitu

$h/R = 1.2 \times 10^{-2}$ $f'/R = 0.135$ $d/h = 2.5$ ($q = 6.2$ dari persamaan yang diberi oleh Haringx (1957), $q^2 = 1 + 6d^2/h^2$). Rajah 2 dan 3 diperolehi dengan merujuk kepada persamaan (4) hingga (9) yang terdapat di bawah (Haringx 1957):

$$\frac{p'}{E} = \left(\frac{\sigma'}{E}\right)^2 \frac{T}{QS^2} \quad (4)$$

$$\left(\frac{h}{R}\right)^2 = \frac{\sigma' T}{E QS} \quad (5)$$

$$\left(\frac{f'}{R}\right)^2 = \frac{\sigma' TQ}{E S} \quad (6)$$

dengan

$$T = \frac{3}{2(q+1)(q+3)} \quad (7)$$

$$Q^2 = \frac{7q^2(q+4)^2(2q+1)(3q+5)}{1728(q+1)^2} \quad (8)$$

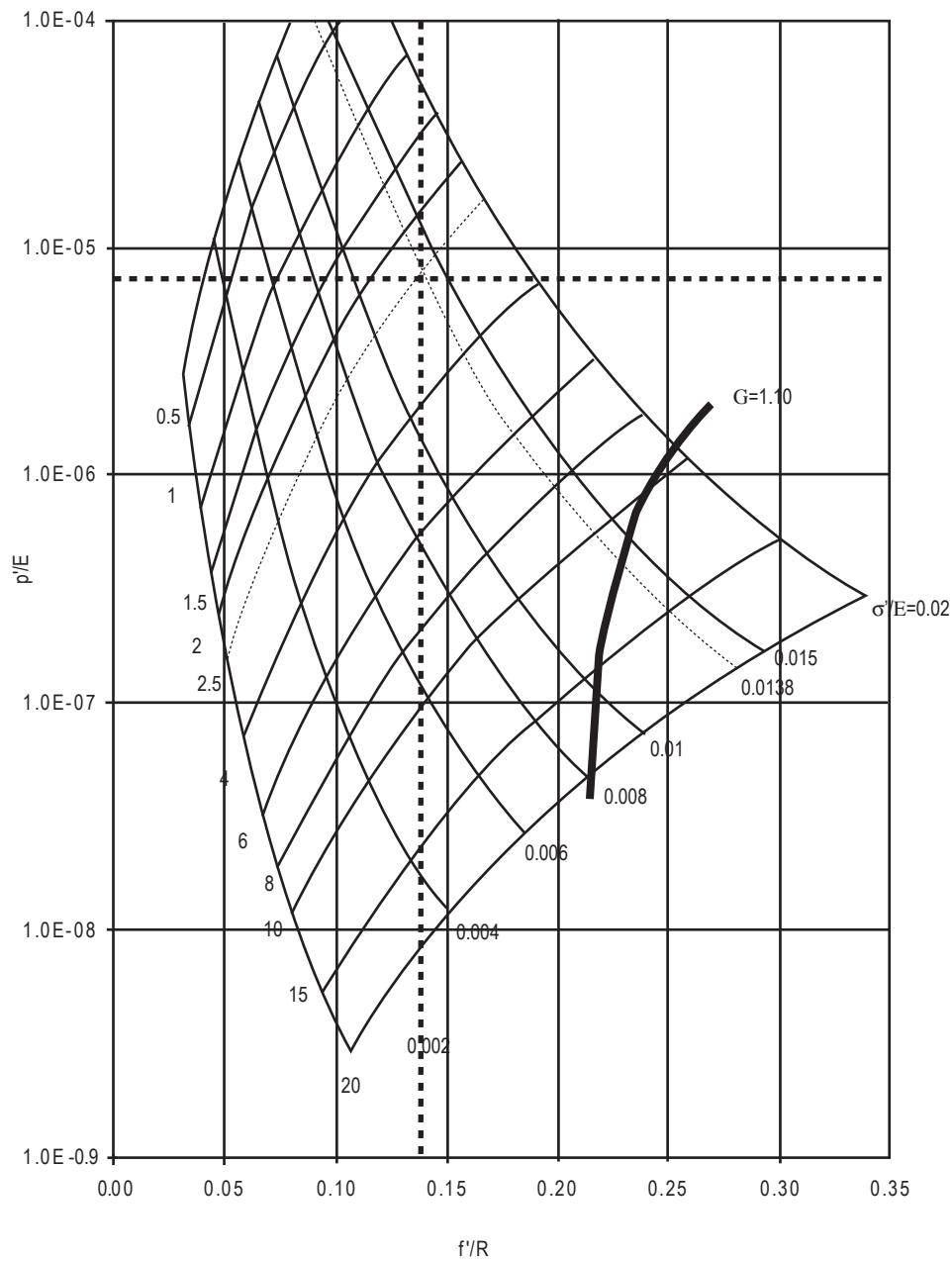
dan

$$S = \frac{3 + \sqrt{6(q^2 - 1)}}{(q-1)(q+3)} \left(\frac{2}{q-1}\right)^{\frac{2}{q-3}} \quad (9)$$

dengan

q	=	faktor profil alunan
f	=	pesongan
R	=	jejari diafram
H	=	ketebalan diafram
P	=	tekanan
E	=	modulus Young

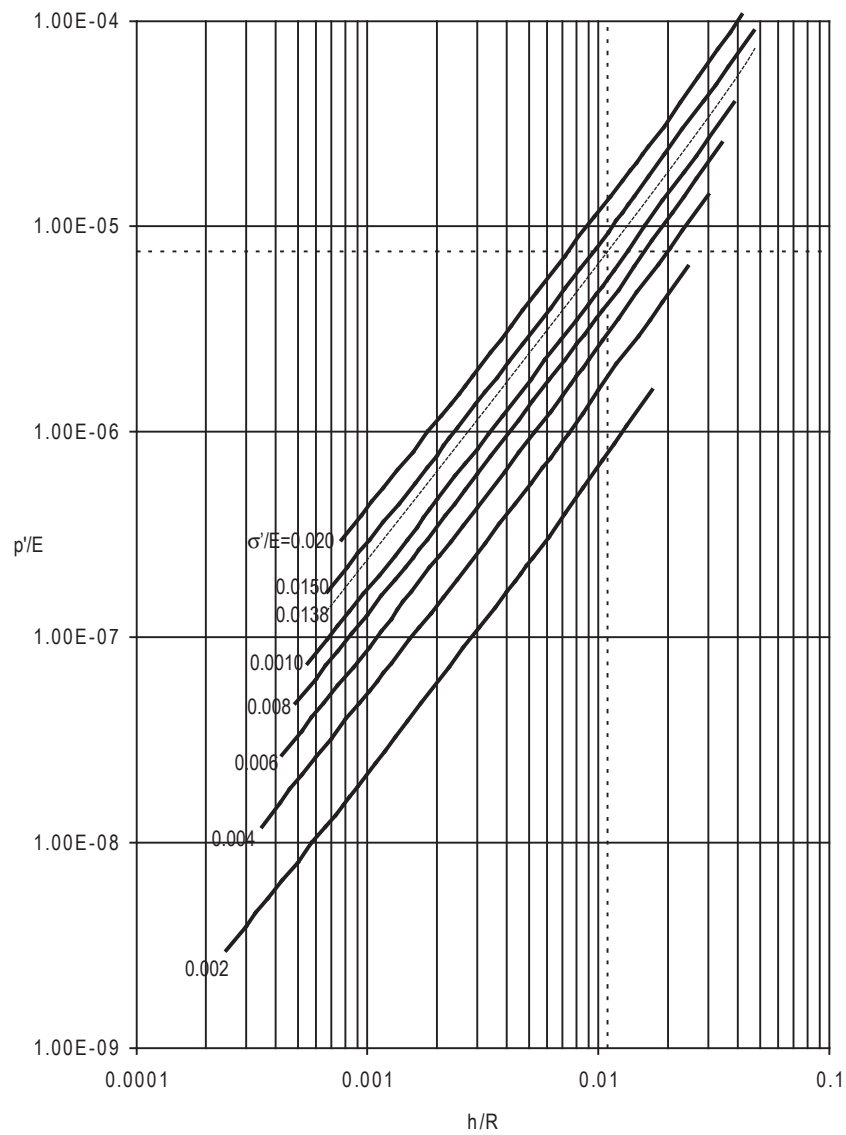
Dengan f' bersamaan 0.000486, jejari luar mestilah bersamaan dengan $R = f'/0.135 = 3.6 \times 10^{-3}$ m. Seterusnya, tebal helaian, $h = 1.2 \times 10^{-2}R = 43.2 \times 10^{-6}$ m, amplitud alunan $d = 2.5h = 108 \times 10^{-6}$ m dan separuh panjang gelombang $l = 5d = 540 \times 10^{-6}$ m. Nisbah $l/R = 0.15$ terletak di dalam kawasan yang dibatasi oleh dua lengkung dalam Rajah 4. Oleh yang demikian, tindihan bagi diafram yang cukup tebal dan juga tindihan bagi tegasan tangen maksimum yang dominan boleh direalisasikan. Walau bagaimanapun diafram kukuh pada bahagian tengah plat berbentuk bulatan dengan diameter 550 μ m ini tidak memberi kesan pada ciri bahan diafram yang mempunyai nilai ketumpatan, $\rho = 0.2330$ dan boleh diterima bagi $d/h = 2.5$ seperti yang dijelaskan dalam Rajah 5 (rujuk kepada garis putus). Ringkasan bagi parameter pencirian bagi diafram beralun yang diperolehi daripada pengiraan di atas disenaraikan dalam Jadual 2.



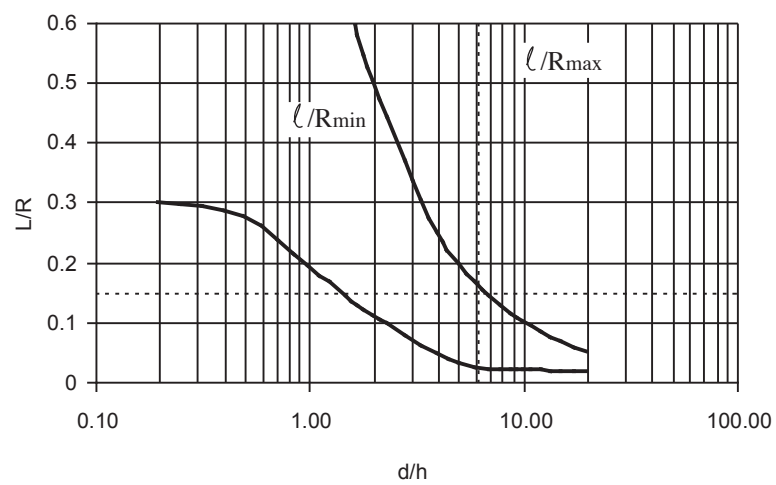
Rajah 2. Carta bagi mereka bentuk diafram beralun dengan beban teragih seragam

Jadual 2. Dimensi Bagi Reka Bentuk Diafram Beralun

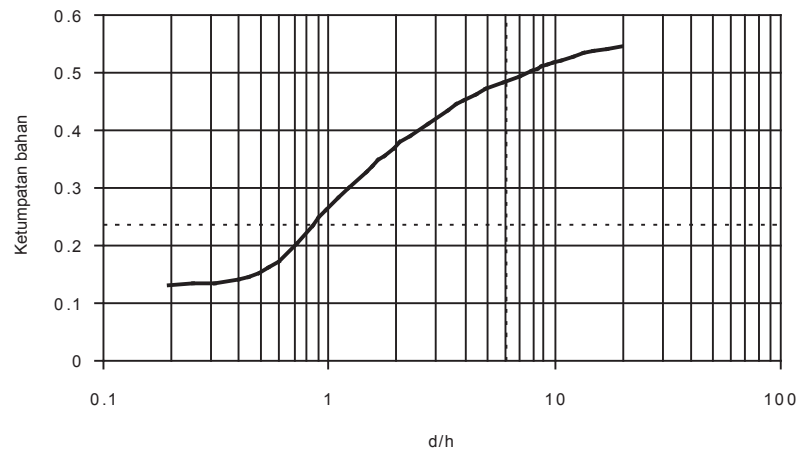
Parameter	Nilai (μm)
Diameter luar, $2R$	7200
Diameter dalam, $2\rho R$	710
Panjang gelombang, 2ℓ	1080
Amplitud alunan, d	108
Tebal helaian, h	43.2



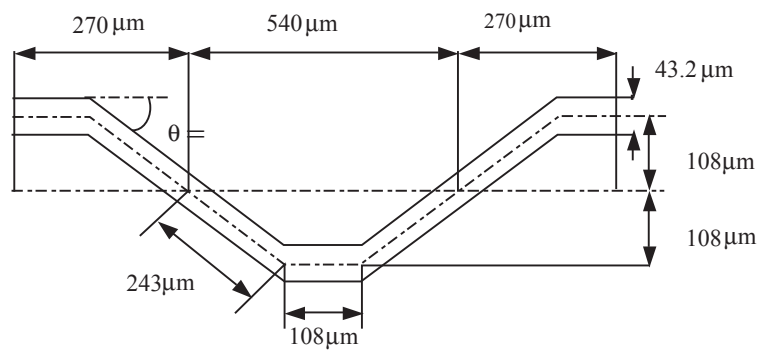
Rajah 3. Carta bagi reka bentuk diafram beralun dengan beban teragih seragam



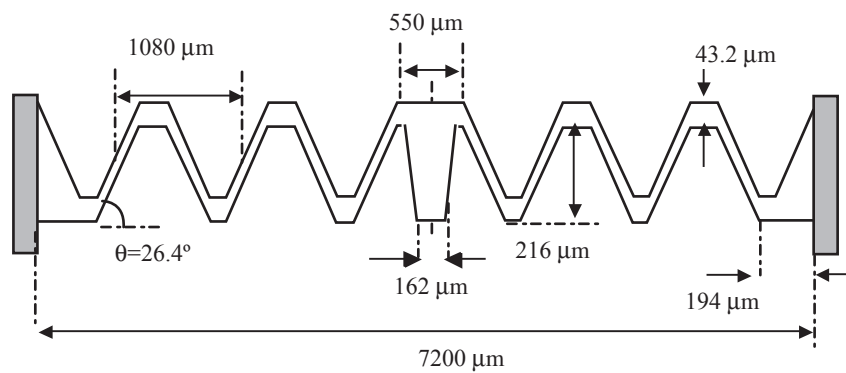
Rajah 4. Nilai maksimum dan minimum yang dibenarkan bagi nisbah L/R sebagai fungsi bagi d/h (atau q) yang mempunyai ketebalan yang mencukupi dan tegasan tangen maksimum adalah penentu



Rajah 5. Nilai maksimum yang dibenarkan bagi sebagai fungsi bagi d/h (atau q) untuk diafram beralun, yang mana kesan daripada plat tengah pada diafram boleh diabaikan



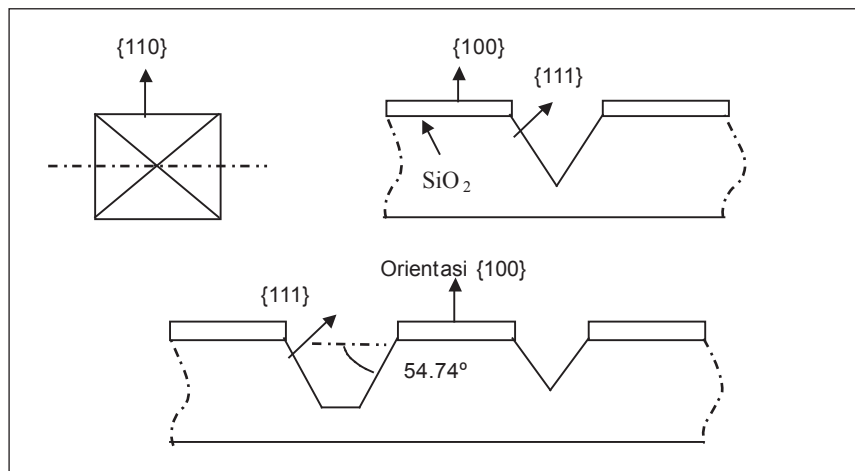
Rajah 6. Keratan melintang bagi struktur tunggal alunan dengan profil trapezoid



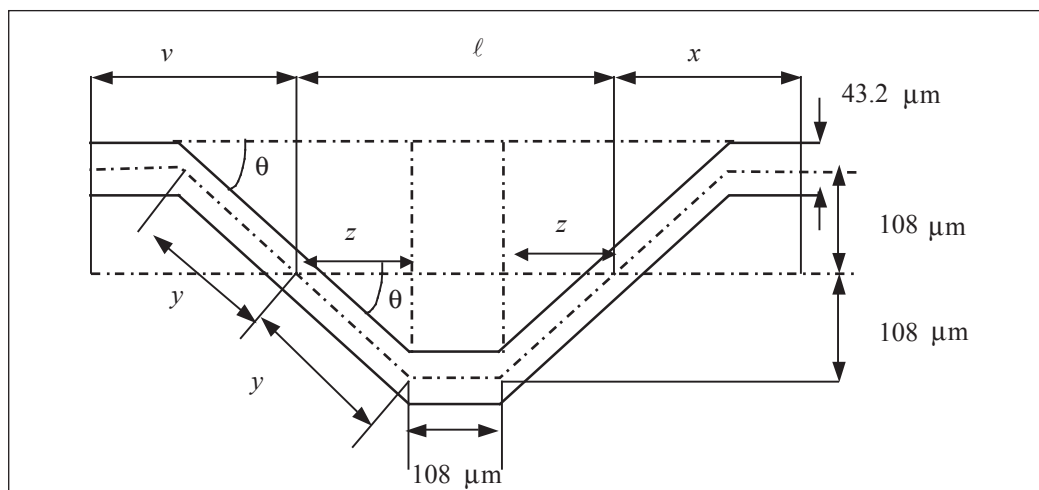
Rajah 7. Keratan rentas skematik bagi diafram beralun yang lengkap

Keratan melintang bagi struktur tunggal alunan dengan profil trapezoid mengikut dimensi reka bentuk yang telah dihitung adalah seperti dalam Rajah 6. Berdasarkan dimensi struktur diafram yang telah dinyatakan, keratan rentas bagi diafram yang lengkap ditunjukkan dalam Rajah 7. Seperti yang ditunjukkan, diafram yang telah direka bentuk terdiri daripada tiga alunan. Bahan-bahan pemutar anisotropik berkemampuan untuk membentuk struktur yang dikehendaki pada bahan-bahan hablur. Jika proses punaran dilakukan dengan sewajarnya, bentuk geometri yang disempadani dengan satah kristalografi yang terbentuk secara sempurna boleh dihasilkan. Ciri struktur silikon berhablur tunggal yang telah dipunarkan dengan menggunakan proses punaran anisotropik adalah seperti yang dalam Rajah 8 (Madou

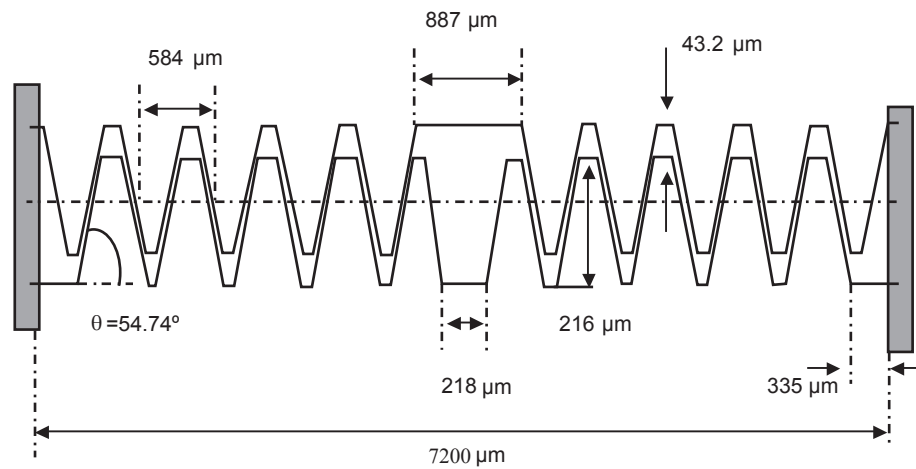
1997). Merujuk kepada rajah tersebut, terdapat dinding curam ke dalam yang bersudut 54.74° dan bahagian bawah yang rata selari dengan permukaan di mana keadaan ini adalah sesuai untuk fabrikasi sesebuah diafram. Dinding curam ke dalam yang didapati dari reka bentuk asal diafram beralun seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 6 dan 7 mempunyai sudut 26.4° dengan satah permukaan. Nilai sudut ini perlu diubah suai supaya menjadi 54.74° dan seterusnya proses punaran anisotropik boleh digunakan untuk membentuk diafram beralun tersebut. Oleh yang demikian, dengan merujuk kepada Rajah 9 dan 10, sudut dinding curam ke dalam perlu diubah suai tanpa menukar dimensi bahagian bawah trapezoid, b dan ketebalan diafram, h . Pengubahsuaian parameter tersebut dilakukan dengan menetapkan dimensi asal



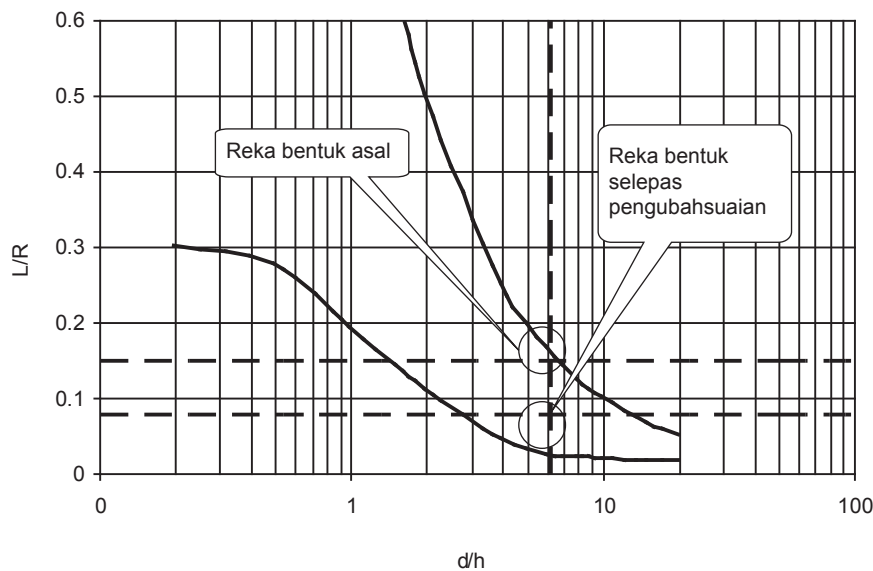
Rajah 8. Ciri struktur wafer silikon {100} yang terpunar secara anisotropik dengan menggunakan topeng segiempat sama



Rajah 9. Ringkasan pengubahsuaian satu unit struktur alunan dengan profil trapezoid



Rajah 11. Gambar rajah skematik keratan rentas untuk diafram beralun yang telah diubah suai



Rajah 12. Nilai maksimum dan minimum bagi nisbah l/R dalam bentuk d/h (atau q) yang boleh diterima untuk diafram beralun yang dianggap mempunyai ketebalan secukupnya di mana tegasan tangen adalah penentu

dibuat dengan menggunakan SEM. Keadaan punaran yang digunakan dalam proses simulasi dan fabrikasi adalah pada kepekatan KOH 35% dan suhu 80°C.

Diafram beralun silikon yang direka bentuk dengan menggunakan kaedah yang dibangunkan ini telah direalisasikan secara simulasi terlebih dahulu sebelum menjalani proses fabrikasi yang sebenar. Perisian simulasi proses punaran anisotropik, Anis E telah digunakan dalam kerja simulasi di mana perisian reka bentuk terbantu computer (CAD) yang dibangunkan oleh IntelliSuite untuk kegunaan dalam pembangunan reka bentuk MEMS ini

mampu menyediakan kemudahan simulasi yang mempunyai ketepatan tinggi untuk peranti MEMS dari kategori yang berlainan prinsip operasinya (mekanik, elektrostatik dan elektromagnetik) dan seterusnya menghasilkan kemunculan gambaran secara grafik untuk peranti yang telah melalui proses punaran secara simulasi (Marchetti et al. 1998).

Proses penyediaan topeng punaran yang digunakan dalam proses fabrikasi dilakukan dengan menggunakan perisian ini dan seterusnya topeng punaran yang optimum dikenalpasti bagi menghasilkan suatu diafram beralun silikon yang sempurna tanpa mengalami keadaan potongan

bawah penjur. Pengoptimuman topeng punaran ini adalah penting memandangkan kaedah punaran KOH mempunyai satu keburukan yang agak serius iaitu pembentukan keadaan potongan bawah penjur pada struktur reka bentuk yang terdiri daripada penjur-penjur cembung di atas wafer silikon dan tanpa sebarang pampasan penghasilan suatu struktur berpenjur cembung yang sempurna adalah amat merumitkan (Bao et al. 1993).

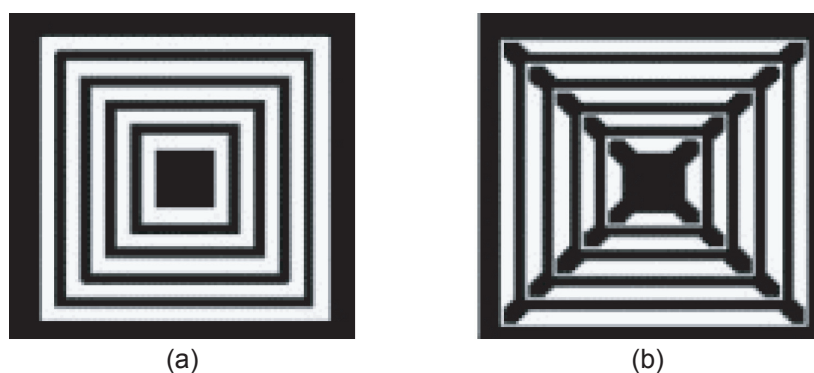
Bentangan topeng asal dan yang telah dioptimumkan dengan topeng pampasan penjur adalah seperti dalam Rajah 13. Dari segi reka bentuk topeng tambahan yang digunakan sebagai pampasan penjur, hasil simulasi menunjukkan bahawa reka bentuk topeng tambahan tersebut mampu mengatasi keadaan potong bawah penjur daripada berlaku. Gambaran jelas mengenai perkara ini ditunjukkan dalam Rajah 14 dan 15 di mana dengan memperkenalkan topeng pampasan penjur tersebut, proses punaran pada penjur-penjur cembung pada diafram beralun yang telah direka bentuk boleh dilambatkan. Rajah-rajah tersebut menunjukkan struktur penjur cembung yang terdapat pada diafram beralun adalah hampir sempurna. Kejituan perisian proses simulasi yang digunakan merupakan faktor yang menyumbang kepada pembentukan struktur penjur cembung yang boleh dianggap tanpa mengalami keadaan potongan bawah penjur. Proses fabrikasi yang digunakan bagi pembentukan diafram ini hanya mengaplikasikan teknik punaran dari satu arah sahaja iaitu dari bahagian atas.

Rajah 16 menunjukkan diafram beralun yang dihasilkan dari proses fabrikasi yang menggunakan topeng berpampasan penjur manakala Rajah 17 dan 18 masing-masing menunjukkan keratan rentas struktur tersebut. Keputusan fabrikasi ini menunjukkan masih lagi terdapat keadaan penjur cembung yang terpunar walaupun topeng berpampasan penjur digunakan dalam proses punaran yang sebenar. Walau bagaimanapun kesan ini amat minimum sekali. Ini adalah disebabkan oleh perbezaan di antara keadaan punaran bagi proses simulasi dan eksperimen serta pengawalan masa punaran yang kurang efektif.

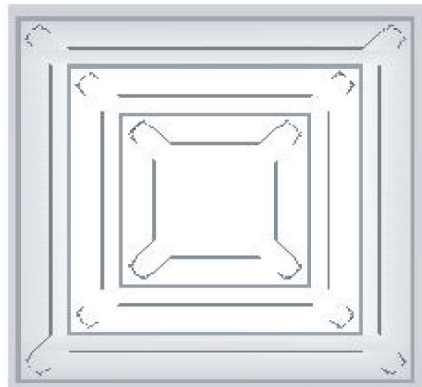
Merujuk kepada Rajah 19, fabrikasi diafram beralun silikon dengan menggunakan punaran anisotropik menghasilkan corak punaran berbentuk lurah-V. Bagi silikon (100), cerun punaran merupakan satah $\langle 111 \rangle$. Berdasarkan prinsip punaran anisotropik, persilangan di antara satah $\langle 111 \rangle$ dan satah $\langle 100 \rangle$ akan membentuk sudut 54.74° (Madou 1997). Oleh yang demikian, sudut persilangan di antara cerun punaran $\langle 111 \rangle$ dan satah permukaan (100) iaitu darjah ketidakisotropikan, θ , yang terbentuk pada diafram beralun yang difabrikasi adalah seperti yang diberikan berikut:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{H}{m} \right) \quad (10)$$

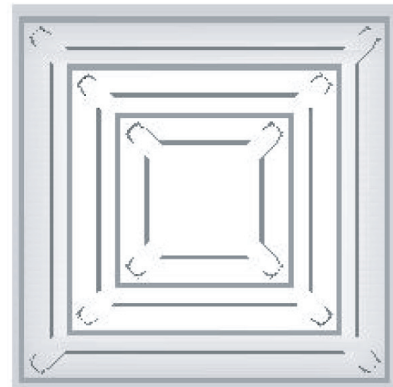
dengan H adalah kedalaman alunan yang terbentuk dan m adalah jarak mendatar bagi cerun punaran. Jadual 3 menunjukkan nilai



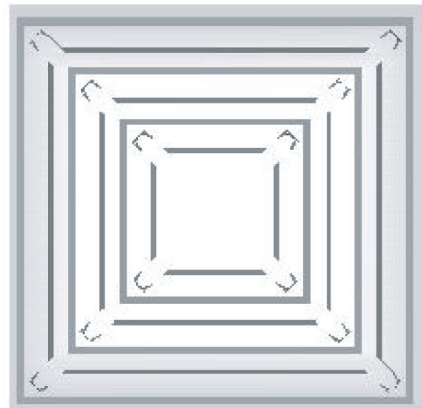
Rajah 13. Bentangan topeng bagi menghasilkan diafram beralun dalam proses punaran anisotropik KOH: (a) topeng asal dan (b) topeng optimum



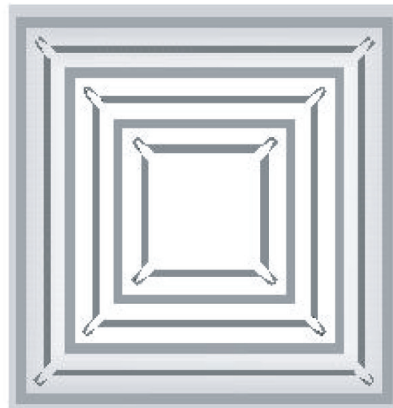
36% daripada tempoh punaran



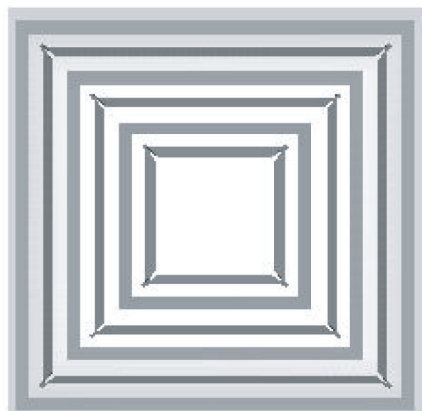
43% daripada tempoh punaran



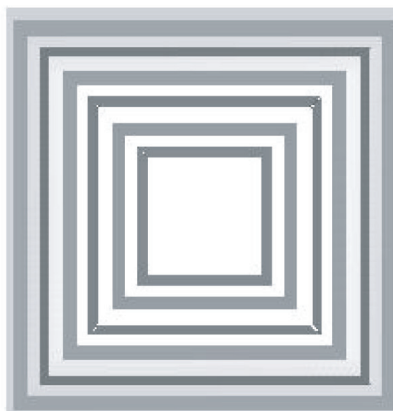
50% daripada tempoh punaran



71% daripada tempoh punaran

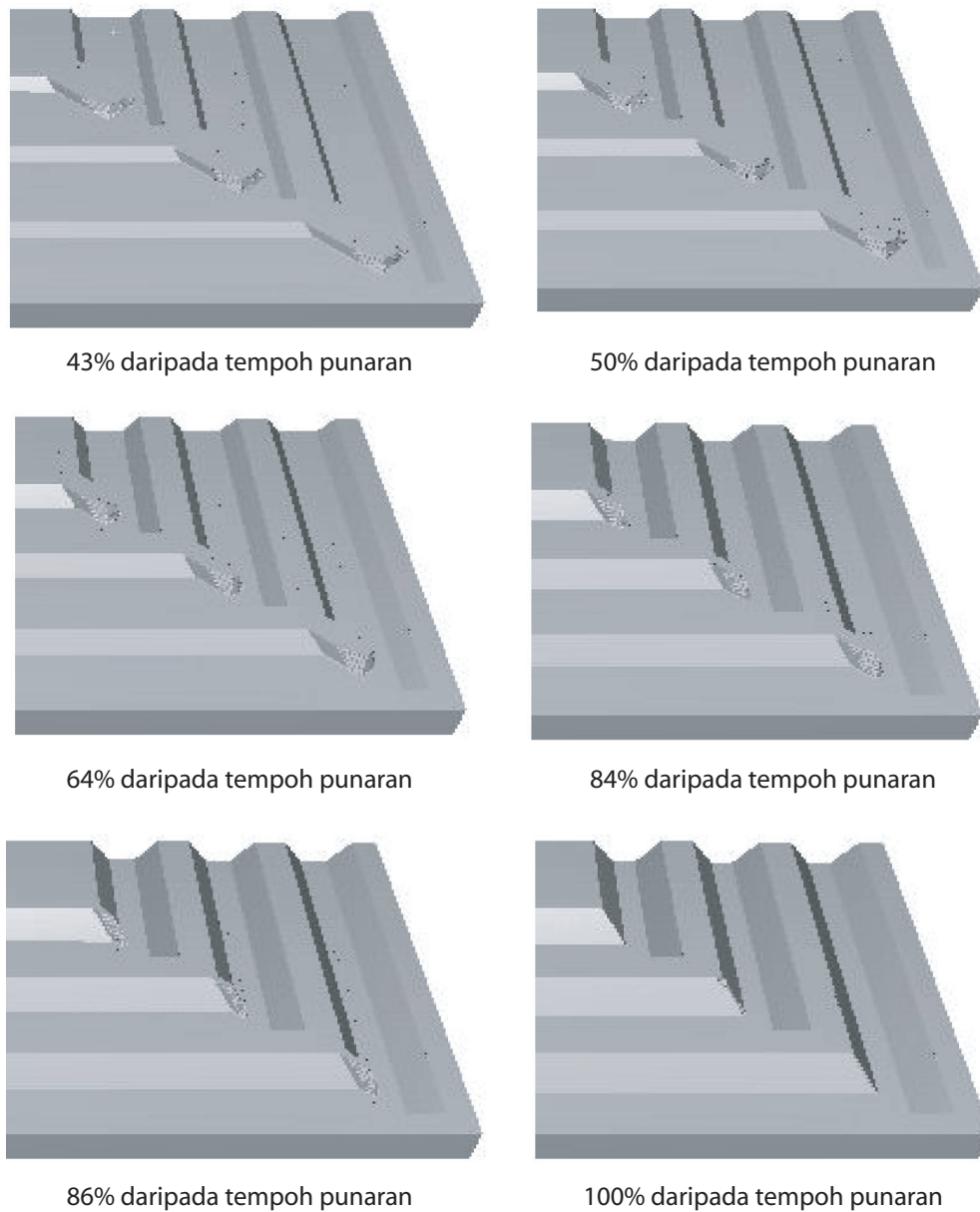


86% daripada tempoh punaran

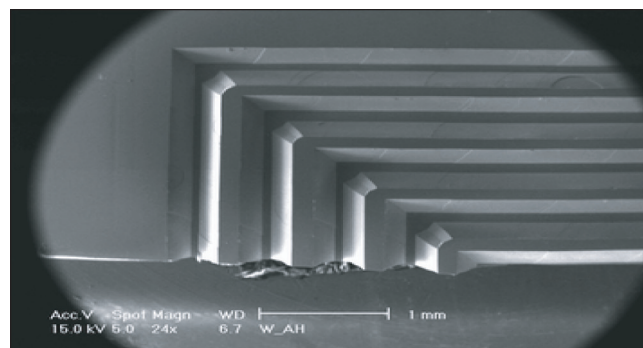


100% daripada tempoh punaran

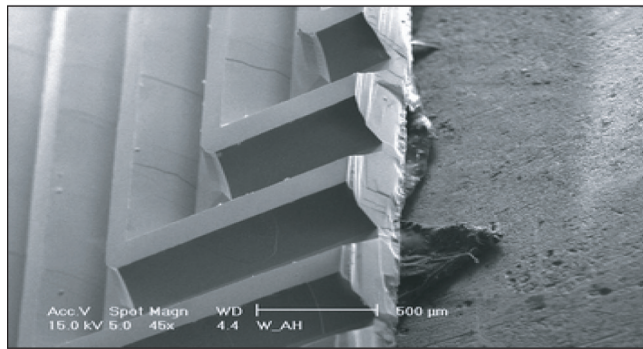
Rajah 14. Hasil simulasi yang menunjukkan pandangan seluruh diafram yang telah dipunarkan dengan menggunakan bentangan topeng pampasan penjuru sepanjang proses punaran hingga lengkap



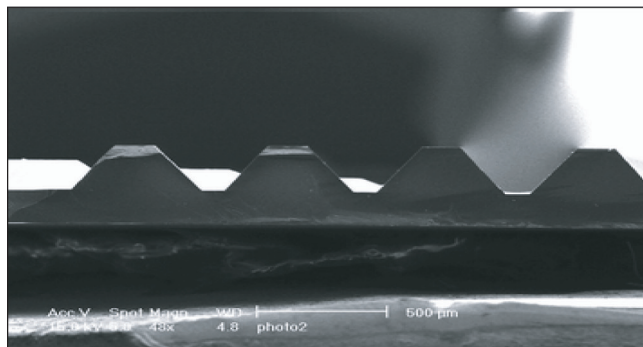
Rajah 15. Hasil simulasi yang menunjukkan pandangan dekat tiga dimensi untuk suku bahagian daripada diafram yang telah dipunarkan dengan menggunakan bentangan topeng pampasan penjuru sepanjang proses punaran hingga lengkap



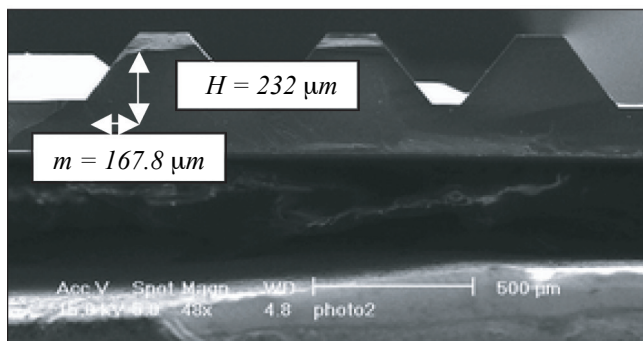
Rajah 16. Pandangan atas sebahagian daripada diafram beralun yang difabrikasi dengan menggunakan topeng pampasan penjuru (Pembesaran SEM : 24X)



Rajah 17. Pandangan atas keratan rentas sebahagian daripada diafram beralun yang difabrikasi dengan menggunakan topeng pampasan penjuru (Pembesaran SEM : 45X)



Rajah 18. Keratan rentas sebahagian daripada diafram beralun yang difabrikasi dengan menggunakan topeng pampasan penjuru (Pembesaran SEM : 48X)



Rajah 19. Nilai H dan m yang didapati dari hasil fabrikasi diafram beralun dengan menggunakan topeng berpampasan (Pembesaran SEM: 48X)

Jadual 3. Darjah ketidakisotropikan, θ alunan diafram yang terbentuk daripada kajian simulasi, eksperimen dan teori

Darjah ketidakisotropikan, θ (°)		
Simulasi	Eksperimen	Teori
55.30	54.10	54.74

darjah ketidakisotropikan, θ , yang dihasilkan daripada kajian simulasi, eksperimen dan teori.

Jika dibandingkan dengan teori punaran silikon (100), ralat punaran, D_e diberi oleh

$$D_e = \left(\frac{\theta_1 - \theta_2}{\theta_1} \right) \times 100\% \quad (11)$$

dengan nilai θ_1 adalah nilai teori (54.74°) dan θ_2 adalah nilai yang didapati dari pengukuran yang sebenar.

Oleh yang demikian, ralat punaran, D_e yang didapati dari persamaan (11) adalah 1.17%. Peratus ralat punaran ini boleh dianggap kecil. Manakala jika perbandingan dilakukan dengan nilai θ yang didapati dari hasil simulasi, peratusan ralat punaran adalah 1.02%. Perbezaan keputusan nilai peratus ralat punaran, D_e yang didapati dari hasil simulasi berbanding eksperimen adalah amat kecil iaitu 0.15%. Ini menunjukkan bahawa hasil reka bentuk diafram beralun silikon menggunakan perisian proses punaran AnisE

mempunyai kejituan yang tinggi seperti yang dilaporkan sebelum ini (Marchetti et al.1998).

KESIMPULAN

Maklumat reka bentuk yang diperoleh dari kerja penyelidikan mengenai diafram beralun logam yang dilakukan beberapa dekad yang lalu berjaya diaplikasikan untuk membangunkan satu kaedah reka bentuk diafram beralun silikon dan seterusnya boleh direalisasikan dengan menggunakan teknik punaran anisotropik bagi menghasilkan diafram beralun silikon yang sempurna.

PENGHARGAAN

Penulis amat menghargai bantuan yang diterima daripada Universiti Kebangsaan Malaysia di bawah geran penyelidikan (Kod IRPA: 03-02-02-0015-SR0003/07-01) dan Universiti Malaya bagi kemudahan biasiswa untuk melaksanakan penyelidikan ini.

RUJUKAN

- Bao, M., Burrer, C., Esteve, J., Bausells, J. & Marco, S. 1993 Etching front control of <110> strips for corner compensation. *Sensors and Actuators A* 37 38: 727-732.
- Giovanni, M.D., *Flat and Corrugated Diaphragm Design Handbook*. Marcel Dekker, Inc., New York, 1982.
- Haringx, J.A. 1950. The rigidity of corrugated diaphragms. *Applied Science Research A2*: 295-325.
- Haringx, J.A. 1953. Stresses in corrugated diaphragms *Anniversary volume on Applied Mechanics*: 199-213.
- Haringx, J.A. 1956. Non-linearity of corrugated diaphragms. *Appl. Sci. Res.* 6(1): 42-52.
- Haringx, J.A. 1957. Design of corrugated diaphragms. *Trans. ASME* 79(1); 54-65.
- Madou, M. 1997. *Fundamentals of microfabrication*. Boca Raton: CRC Press.
- Marchetti, J., He, Y., Than, O. & Akkaraju, S. 1998. Efficient process development for bulk silicon etching using cellular automata simulation techniques. *Symposium on Micromachining and Microfabrication, Micromachined Devices and Components*, September 20-22, 1998. Santa Clara, CA USA. 287-295.
- Norhayati Soin & Burhanuddin Yeop Majlis. 2002. An analytical study on diaphragm behavior for micromachined capacitive pressure sensor. *Proc. IEEE Int. Conf. on Semiconductor Electronics*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2002, 505-510.
- Norhayati Soin & Burhanuddin Yeop Majlis. 2003a. Investigations of the properties of corrugated diaphragms for micromachined capacitive pressure sensor. *Proc. IEEE National Symposium on Microelectronics*, Perlis, Malaysia, 2003, 154-157.
- Norhayati Soin & Burhanuddin Yeop Majlis. 2003b. A simulation based study on modal analysis of micromachined capacitive pressure sensor diaphragms. *Proc. IEEE National Symposium on Microelectronics*, Perlis, Malaysia, 2003, 158-162.
- Norhayati Soin, 2006. Reka bentuk dan fabrikasi diafram beralun silikon untuk sensor tekanan MEMS. Tesis Doktor Falsafah. Universiti Kebangsaan Malaysia.