



PEMBENTUKAN DIAFRAGMA BERALUN SILIKON DENGAN MENGGUNAKAN TEKNIK PUNARAN ANISOTROPIK

NORHAYATI SOIN¹ & BURHANUDDIN YEOP MAJLIS²

Abstrak. Kertas ini memaparkan kajian mengenai pembentukan diafragma beralun silikon dengan menggunakan teknik punaran anisotropik di mana larutan kalium hidroksida digunakan sebagai larutan pemunar. Kajian ini meliputi pengoptimuman topeng punaran bagi mengatasi masalah keadaan potong bawah penjuru yang berlaku pada struktur berpenjuru cembung diafragma beralun yang terpunar. Hasil yang diperolehi daripada kajian simulasi dan eksperimen membuktikan bahawa pengoptimuman topeng punaran yang telah dilakukan berkemampuan mengatasi masalah potong bawah penjuru diafragma beralun silikon.

Kata kunci: diafragma beralun, punaran anisotropik, pengoptimuman topeng

Abstract. This paper presents the study of the formation of a perfect silicon corrugated diaphragm using anisotropic etching technique. Potassium hydroxide (KOH) solution is used as the etching solvent in this study. This study includes optimization of the etching mask, in order to avoid the problem of corner undercutting which exists on all convex corner structures on the etched corrugated diaphragm. Results from the simulation and experimental studies have proved that the optimized etching mask design was able to overcome the problem of convex corner undercutting.

Key words: corrugated diaphragm, anisotropic etching, mask optimization

1.0 PENGENALAN

Punaran anisotropik dengan menggunakan larutan pemunar kalium hidroksida (KOH) ke atas silikon memainkan peranan yang penting dalam kebanyakan proses mekanik-mikro [1]. Walau bagaimanapun, teknik ini mempunyai satu masalah yang agak serius iaitu kewujudan keadaan potong bawah penjuru pada struktur-struktur yang berpenjuru cembung. Fenomena ini berpunca daripada satah-satah silikon (411) yang terpunar lebih pantas daripada satah silikon (100)

¹ Jabatan Kejuruteraan Elektrik, Fakulti Kejuruteraan, Universiti Malaya, 50603 Kuala Lumpur, MALAYSIA. Email: norhayatisoin@um.edu.my

² Institut Kejuruteraan Mikro dan Nanoelektronik (IMEN), Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan, MALAYSIA

[2]-[3]. Oleh yang demikian, penghasilan suatu struktur berpenjuru cembung yang sempurna di atas silikon dengan menggunakan teknik punaran anistropik ini amat merumitkan tanpa sebarang pampasan [4].

Berdasarkan kajian terdahulu, untuk mengatasi masalah ini, beberapa penambahan telah dibuat dalam bentuk topeng seperti topeng berbentuk segiempat pada topeng asal penjuru cembung yang akan digunakan semasa proses punaran [5]. Sementara itu, Bao bersama rakan-rakannya telah menambahkan jalur silikon {110} [4] dan Mayer bersama rakan-rakannya telah menambahkan struktur bar silikon (100) pada penjuru cembung [6] bagi mengatasi masalah tersebut.

Masalah berkenaan dengan punaran pantas satah kristal yang berindeks tinggi yang berlaku pada penjuru cembung boleh diatasi dengan penggunaan struktur pampasan berbentuk dan bersaiz berlainan seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1. Pada umumnya, pampasan bagi keadaan potong bawah ini bertujuan untuk melambatkan masa yang diambil ketika penjuru cembung dipunarkan. Bergantung kepada bentuk struktur pampasan, kadar punaran untuk satah kristal yang berbeza perlu diambil kira untuk membuat penentuan dimensi struktur pampasan.

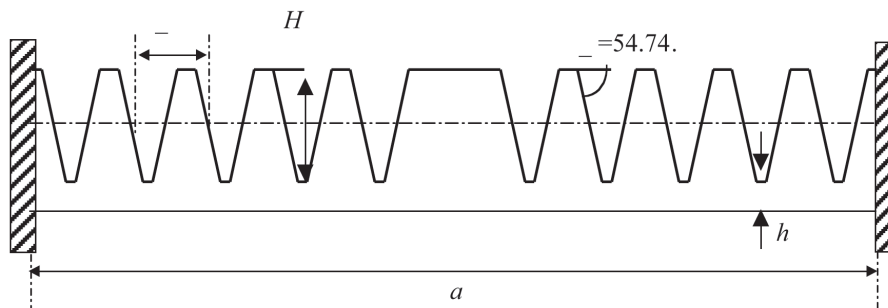
Objektif kajian ini adalah untuk mengaplikasikan teknik punaran anistropik bagi merealisasikan satu diafragma beralun silikon yang sempurna dengan menggunakan kaedah topeng pampasan penjuru. Pengoptimuman topeng punaran bagi memperolehi satu topeng punaran berpampasan penjuru yang mampu mengatasi fenomena potong bawah penjuru dilakukan secara simulasi dan seterusnya proses fabrikasi dilaksanakan.



Rajah 1 Prinsip pampasan yang berbeza dalam melambatkan proses makan bawah penjuru pada struktur penjuru cembung [1], [3], [4] & [7].

2.0 STRUKTUR DIAFRAGMA

Struktur diafragma yang terlibat dalam kajian ini adalah seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1. Diafragma tersebut berbentuk segi empat dan bersaiz 7.2 mm × 7.2 mm serta mempunyai corak alunan berbentuk segi empat sepusat. Jumlah alunan yang terdapat di atas diafragma tersebut adalah sebanyak lima. Struktur alunan tersebut akan direalisasikan dengan menggunakan teknik punaran anisotropik dan penjelasan mengenai proses fabrikasinya boleh didapati dalam bahagian seterusnya. Parameter struktur diafragma beralun tersebut adalah seperti yang disenaraikan dalam Jadual 1.



Rajah 1 Pandangan keratan rentas untuk diafragma beralun silikon

Jadual 1 Parameter bagi struktur diafragma beralun silikon.

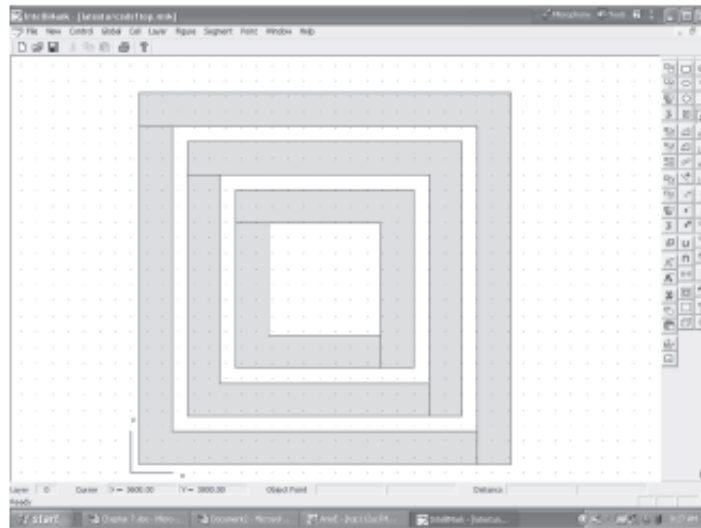
Parameter	Simbol	Nilai
Panjang sisi	a	7.2 mm
Tebal diafragma	h	284 μm
Dalam alunan	H	216 μm
Jarak gelombang	λ	584 μm
Sudut di antara satah (100) dan dinding tepi	θ	54.74°

3.0 REKA BENTUK TOPENG PAMPASAN

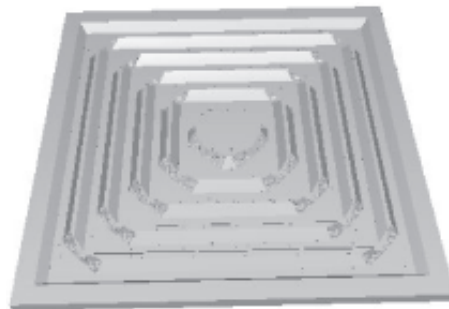
Bahagian ini membincangkan mengenai reka bentuk pampasan penjurong yang perlu dilakukan untuk struktur diafragma beralun yang sempurna dengan menggunakan proses punaran anisotropik. Bentangan topeng untuk diafragma beralun tanpa topeng pampasan ditunjukkan dalam Rajah 2. Berdasarkan penerangan yang telah diberikan sebelum ini, terdapat beberapa kaedah pampasan yang telah digunakan untuk mengatasi masalah makan bawah

penjuru pada penjuru cembung. Oleh yang demikian, untuk merealisasikan suatu reka bentuk diafragma beralun yang sempurna dalam kajian ini, kaedah penambahan topeng berbentuk kombinasi segitiga dan segiempat telah diperkenalkan pada setiap penjuru cembung yang terdapat pada bentangan topeng asal untuk diafragma beralun tersebut.

Rajah 3 menunjukkan hasil simulasi punaran anisotropik bagi struktur diafragma beralun yang dilakukan dengan menggunakan topeng punaran tanpa pampasan seperti dalam Rajah 2. Kelihatan di sini keadaan potong bawah penjuru berlaku pada kesemua penjuru berbentuk cembung.



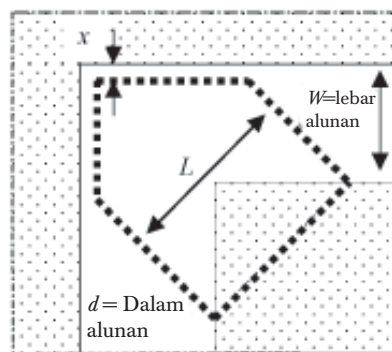
Rajah 2 Bentangan topeng untuk diafragma beralun tanpa topeng pampasan



Rajah 3 Pandangan 3-dimensi diafragma beralun yang dihasilkan dari simulasi proses punaran anisotropik dengan menggunakan topeng tanpa pampasan penjuru.

Corak topeng tambahan telah diperkenalkan pada setiap penjurong cembung yang terdapat pada reka bentuk topeng asal diafragma beralun sebagai kaedah pampasan penjurong dalam projek ini. Reka bentuk topeng tambahan tersebut untuk satu unit penjurong cembung bagi satu struktur alunan dijelaskan seperti dalam Rajah 4. Topeng tambahan tersebut ditunjukkan dengan garis putus, manakala kawasan yang berlorek mewakili bahagian yang dikehendaki atau bahagian yang tidak akan dipunarkan.

Corak dan dimensi bagi topeng tambahan ini telah dianggap sebagai piawai untuk setiap penjurong cembung yang terdapat pada semua struktur alunan diafragma beralun memandangkan semua alunan tersebut adalah sama secara geometri di mana dalam dan lebar alunan yang hendak dipunarkan masing-masing diwakili oleh d dan W . Berdasarkan Rajah 4, dimensi tambahan bagi topeng pampasan ini, iaitu lebar, L , dan panjang di mana secara tak langsung diwakili oleh x mestilah ditentukan supaya dapat memenuhi beberapa keadaan, seterusnya mampu menghalang dari berlakunya keadaan makan bawah penjurong.



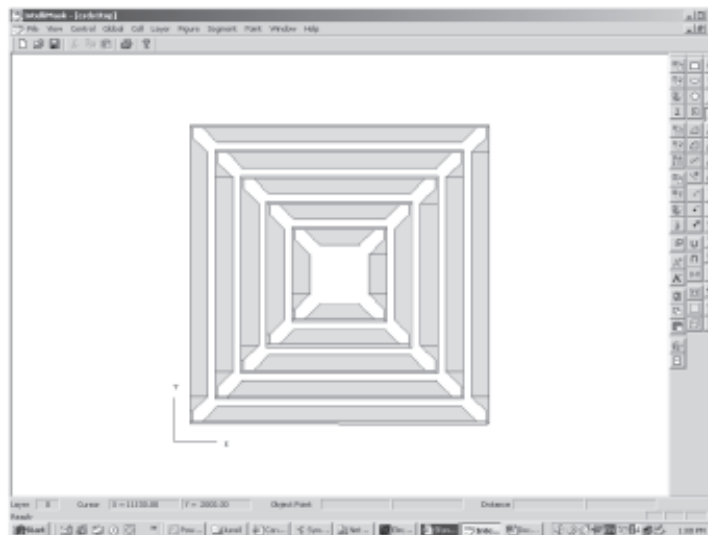
Rajah 4 Reka bentuk bentangan topeng pampasan penjurong untuk satu penjurong cembung bagi satu unit alunan

Kelebaran corak topeng tambahan tersebut dipengaruhi oleh ukur dalam struktur alunan yang hendak dipunarkan: $L = 2d$ di mana masing-masing L dan d adalah ukur lebar dan ukur dalam struktur alunan [7]. Sementara itu, ukur panjang, x , yang sesuai untuk corak topeng tambahan ini ditentukan melalui cara cuba ralat dengan menggunakan perisian proses simulasi AnisE. Penentuan dimensi bentangan topeng pampasan penjurong telah dilakukan dan dijelaskan seperti berikut: Dalam alunan, d telah ditentukan terlebih dahulu sebagai $216 \mu\text{m}$, manakala, ukur lebar, L adalah seperti yang diberikan berikut:

$$\begin{aligned} L &= 2 \times d \\ &= 2 (216 \mu\text{m}) \\ &= 432 \mu\text{m} \end{aligned}$$

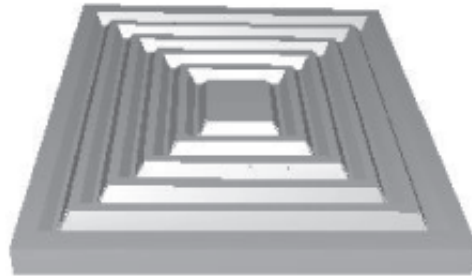
Nilai untuk ukur panjang, x , bagi kes ini telah ditentukan sebagai 130 μm . Nilai ini telah dipastikan dengan cara cuba ralat. Beberapa nilai telah digunakan dalam reka bentuk ini. Pemerhatian ke atas hasil simulasi bagi pembentukan semua penjuru cembung yang terdapat pada diafragma telah dilakukan pada nilai ini. Hasil dari kajian ini didapati bahawa corak topeng tambahan yang mempunyai nilai x bersamaan dengan 130 μm , berjaya menghasilkan penjuru cembung yang sempurna. Bagi nilai x yang kurang daripada 130 μm , keadaan penjuru terpotong masih berlaku, manakala bagi nilai x yang lebih dari nilai tersebut, tiada kelihatan keadaan penjuru terpotong terjadi tetapi terdapat struktur lebihan pada penjuru cembung di mana penjuru cembung yang sempurna tidak berjaya dihasilkan.

Berdasarkan reka bentuk bentangan topeng tambahan di atas, keseluruhan bagi diafragma beralun yang akan diguna pakai dalam simulasi proses punaran ini dapat dihasilkan seperti ditunjukkan dalam Rajah 5.



Rajah 5 Bentangan topeng untuk diafragma beralun dengan topeng pampasan

Dari segi reka bentuk topeng tambahan yang digunakan sebagai pampasan penjuru, hasil simulasi telah menunjukkan bahawa reka bentuk topeng tambahan tersebut mampu mengatasi keadaan potong bawah penjuru dari berlaku seperti dalam Rajah 6. Gambaran yang lebih jelas lagi mengenai perkara ini diberikan dalam Rajah 7 dan 8 di mana dengan memperkenalkan topeng pampasan penjuru tersebut, proses punaran pada penjuru cembung diafragma beralun yang telah direka bentuk boleh dilambatkan dan akhirnya struktur-struktur cembung yang sempurna berjaya dihasilkan.



Rajah 6 Pandangan tiga dimensi diafragma beralun yang dihasilkan dari simulasi proses punaran anisotropik dengan menggunakan topeng pampasan penjuru

Sebelum proses fabrikasi dimulakan, topeng punaran yang akan digunakan dalam proses punaran anisotropik disediakan dengan menggunakan perisian AUTOCAD berdasarkan topeng punaran yang telah direka bentuk dengan tambahan topeng pampasan penjuru melalui proses simulasi seperti yang dijelaskan di atas. Rajah 9 menunjukkan dua topeng punaran yang telah disediakan bagi kegunaan dalam proses fabrikasi diafragma beralun silikon seterusnya.

4.0 PERBINCANGAN

Hasil proses punaran KOH ke atas wafer silikon (100) bagi fabrikasi diafragma beralun dibincangkan dalam bahagian ini. Pengawalan ketebalan diafragma beralun atau kedalaman alunan untuk proses fabrikasi ini dilakukan dengan pengiraan kadar punaran KOH terhadap silikon di mana pengukuran kedua-dua parameter tersebut dibuat dengan menggunakan pemprofil permukaan.

Proses pembentukan diafragma beralun tanpa menggunakan topeng berpampasan penjuru pada setiap penjuru yang berbentuk cembung telah menghasilkan keputusan seperti yang diberikan dalam Rajah 10. Dalam rajah tersebut, keadaan setiap penjuru cembung di atas diafragma beralun tidak terbentuk dengan sempurna malah fenomena potong bawah penjuru ini amat ketara sekali. Keadaan ini dapat dilihat dengan lebih jelas lagi dengan merujuk kepada Rajah 11 manakala Rajah 12 menunjukkan pandangan keratan rentas diafragma yang telah dihasilkan dengan dalam alunan $\approx 230 \mu\text{m}$.

Dalam kes punaran ke atas suatu permukaan cembung ini, bentuk struktur yang terpunar dihadkan oleh satah yang mempunyai kadar punaran pantas dengan satah yang mempunyai kadar punaran yang rendah membentuk penjuru-penjuru dan bahagian pinggiran. Ini merupakan sebab bagi satah-satah (111) yang dihasilkan dari punaran ini tidak bersambung untuk membentuk



36%



43%



50%



71%



86%



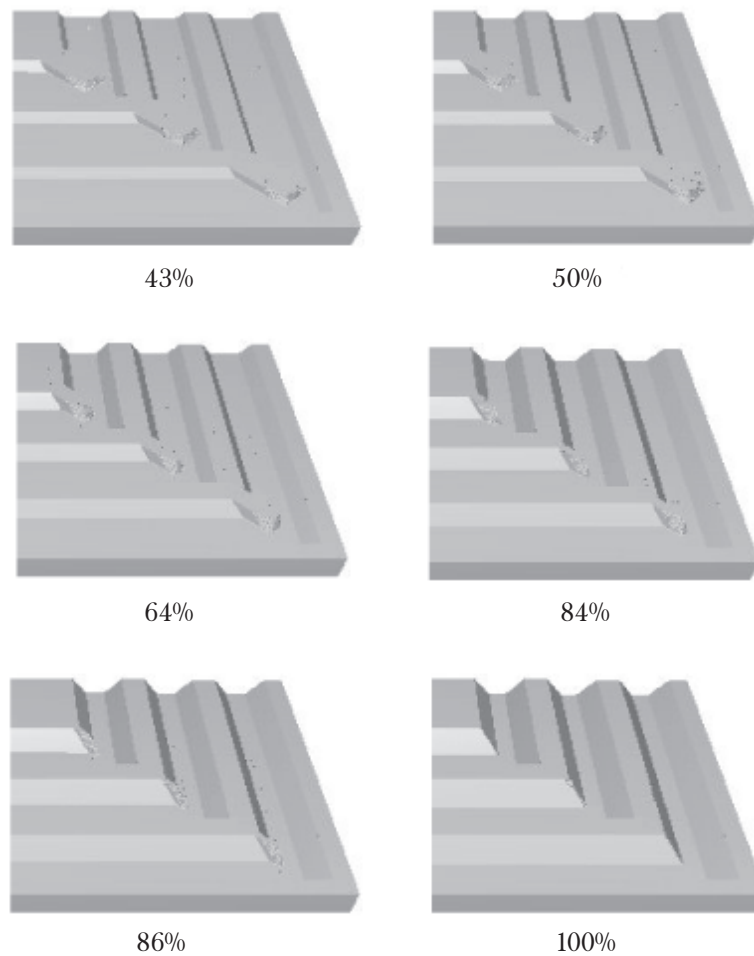
100%

Rajah 7 Pandangan seluruh diafragma yang telah dipunarkan dengan menggunakan bentangan topeng pampasan penjuru sepanjang proses punaran hingga lengkap



PEMBENTUKAN DIAFRAGMA BERALUN SILIKON

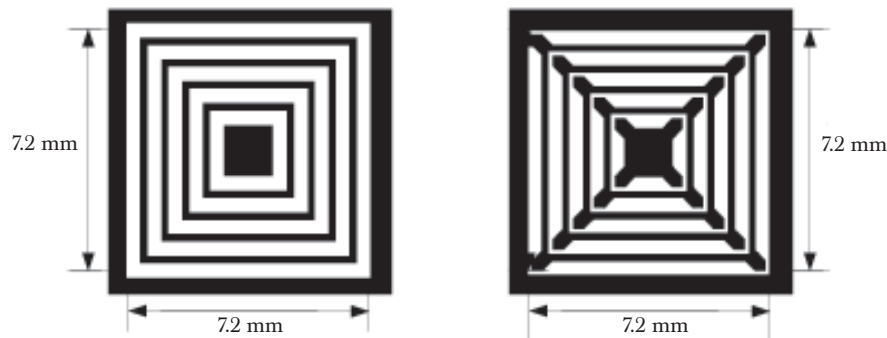
121



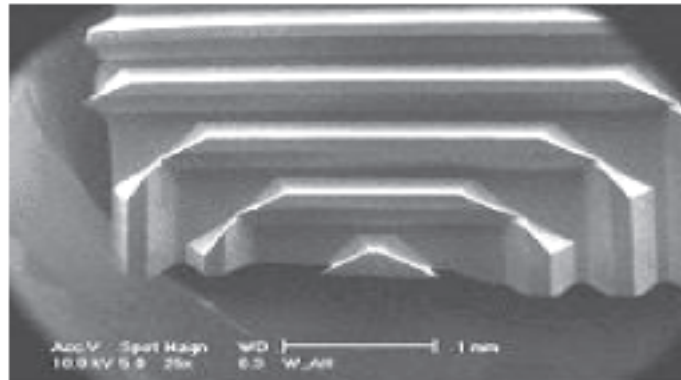
Rajah 8 Pandangan dekat tiga dimensi suku bahagian daripada diafragma yang telah dipunarkan dengan menggunakan bentangan topeng pampasan penjuru sepanjang proses punaran hingga lengkap

suatu penjuru cembung sempurna. Bahagian penjuru tersebut membentuk suatu permukaan cembung yang bentuknya tidak dihadkan oleh satah (111) tetapi satah yang mempunyai kadar punaran pantas [8].

Pemerhatian yang telah dibuat ke atas penjuru-penjuru cekung di atas struktur diafragma beralun selepas proses punaran dijalankan menunjukkan bahawa tiada keadaan punaran yang mempengaruhi bentuk penjuru cekung tersebut. Keadaan penjuru cekung yang sempurna ini ditentukan oleh persilangan satah (111) yang licin tanpa bergantung kepada dalam punaran.



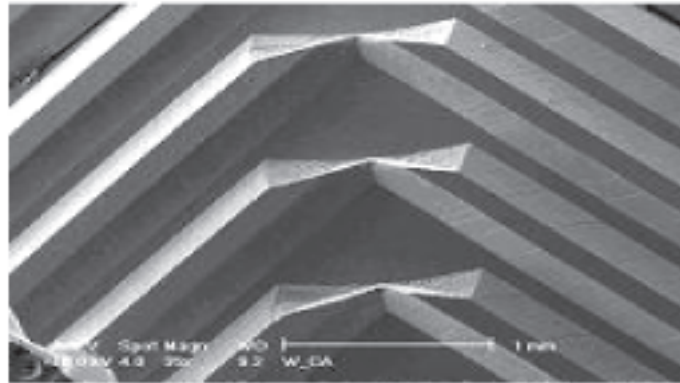
Rajah 9 Topeng-topeng punaran: (a) tanpa pampasan dan (b) dengan pampasan penjuru yang dihasilkan dengan menggunakan perisian AUTOCAD bagi kegunaan dalam proses fabrikasi diafragma beralun silikon.



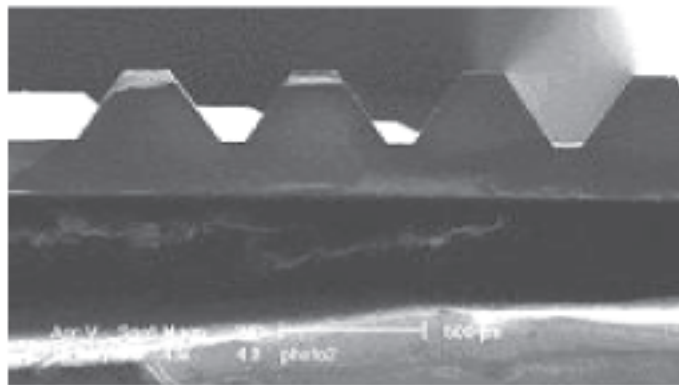
Rajah 10 Pandangan atas sebahagian daripada diafragma beralun yang difabrikasi tanpa menggunakan topeng pampasan penjuru (Pembesaran SEM: 25X)

Rajah 13 menunjukkan fenomena potong bawah penjuru secara dekat pada satu struktur penjuru cembung diafragma beralun yang dipunarkan dengan menggunakan topeng tanpa pampasan penjuru. Kelihatan pada struktur penjuru yang terpotong tersebut ialah kawasan yang mempamerkan morfologi berlainan. Kawasan B mewakili kawasan yang mempunyai struktur teratur licin dan halus manakala kawasan A mempamerkan struktur tidak sekata yang agak kasar akibat dari kestabilan berdekatan dengan satah silikon (111) [9]. Kawasan A terdiri daripada kumpulan satah silikon (100) dan satah silikon berindeks tinggi [6].

Rajah 14 menunjukkan keadaan struktur potong bawah penjuru cembung yang terhasil sepanjang proses punaran bagi mendapatkan kedalaman alunan



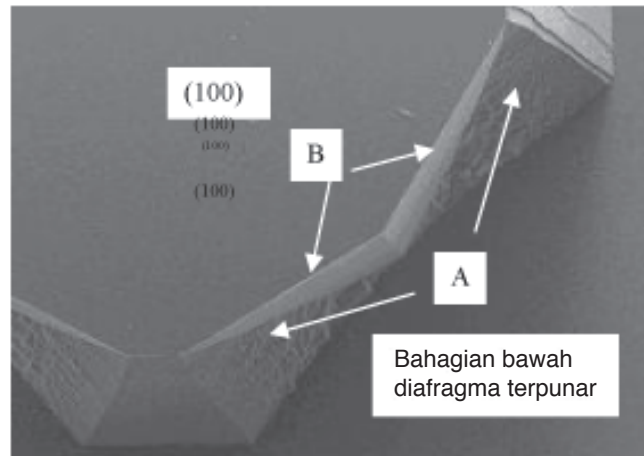
Rajah 11 Pandangan secara dekat beberapa bahagian struktur penjuru cembung diafragma beralun yang terpotong. (Pembesaran SEM : 35X)



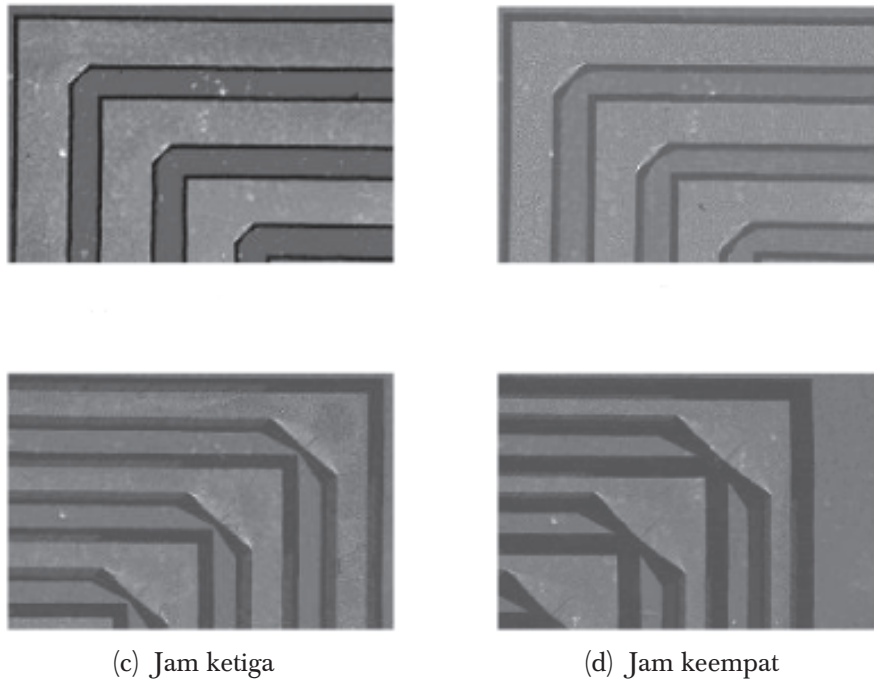
Rajah 12 Keratan rentas sebahagian daripada diafragma beralun yang difabrikasi tanpa menggunakan topeng pampasan penjuru (Pembesaran SEM : 48X)

sebanyak 216 μm dengan kadar punaran 52 $\mu\text{m}/\text{jam}$. Keadaan ini kelihatan berlaku secara perlahan dan menjadi bertambah ketara apabila masa punaran meningkat. Ini menunjukkan kebergantungan keadaan penjuru cembung terpotong terhadap kedalaman alunan yang hendak dipunarkan.

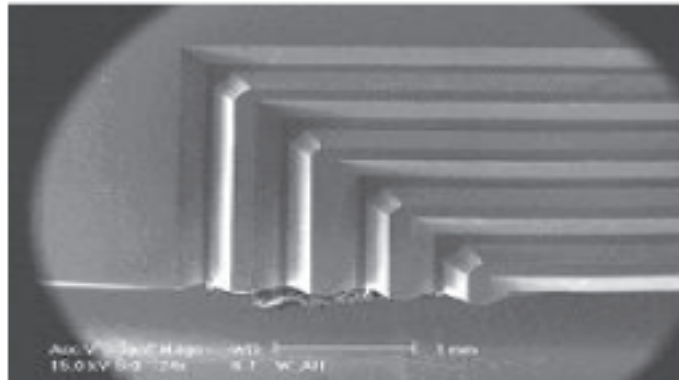
Rajah 15 menunjukkan diafragma beralun yang dihasilkan dari proses fabrikasi yang menggunakan topeng berpampasan penjuru manakala Rajah 16 dan 17 menunjukkan keratan rentas struktur tersebut. Dalam kes ini penjuru cembung kelihatan hampir sempurna dan tidak mengalami keadaan potong bawah penjuru yang amat ketara seperti diafragma yang dihasilkan sebelum ini. Penjuru cembung yang kelihatan terpotong sedikit adalah disebabkan oleh samada masa punaran yang melebihi dari yang sepatutnya atau nilai yang tinggi



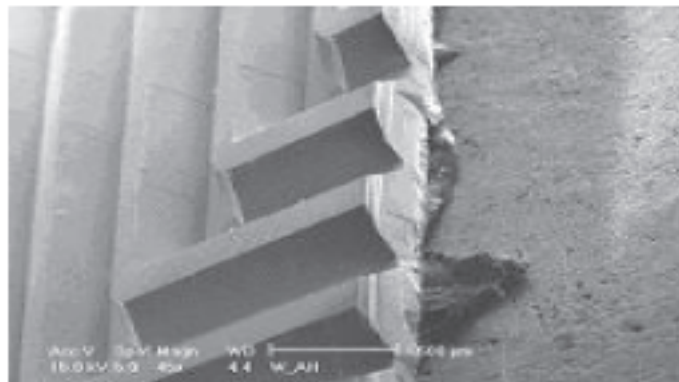
Rajah 13 Pandangan dekat keadaan potong bawah penjuru yang menunjukkan morfologi yang berlainan terbentuk pada satu penjuru cembung yang terdapat di atas diafragma beralun (Pembesaran SEM: 80X)



Rajah 14 Perambatan proses punaran diafragma beralun tanpa topeng pampasan di mana hanya suku bahagian diafragma ditunjukkan (Pembesaran mikroskop optik:5X)



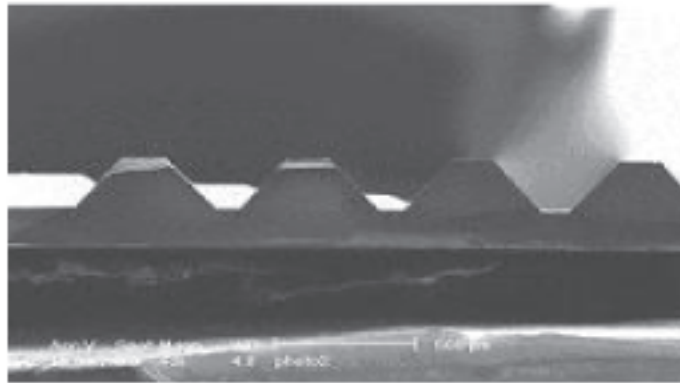
Rajah 15 Pandangan atas sebahagian daripada diafragma beralun yang difabrikasi dengan menggunakan topeng pampasan penjuru (Pembesaran SEM: 24X)



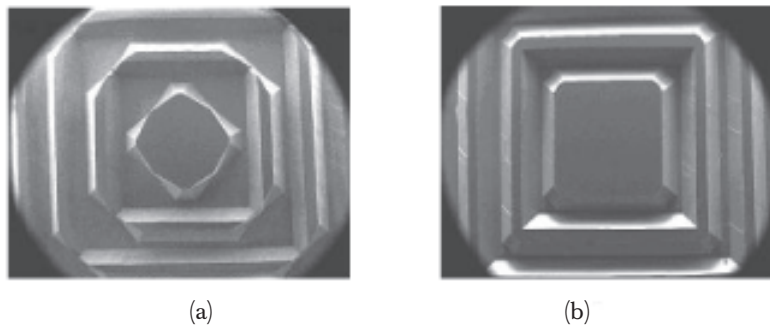
Rajah 16 Pandangan atas keratan rentas sebahagian daripada diafragma beralun yang difabrikasi tanpa topeng pampasan penjuru (Pembesaran SEM: 45X)

bagi nisbah punaran di antara satah menyerong yang baru muncul dan satah (100). Dari keputusan fabrikasi ini, diafragma beralun yang dipunarkan dengan menggunakan topeng berpampasan penjuru berjaya dihasilkan tanpa mengalami fenomena potong bawah penjuru yang ketara.

Rajah 18 menunjukkan perbandingan hasil fabrikasi diafragma beralun dengan menggunakan topeng tanpa dan berpampasan penjuru. Ini dengan jelasnya membuktikan bahawa reka bentuk topeng pampasan yang telah dibuat dalam bahagian sebelum ini mampu menghasilkan struktur diafragma beralun dengan keadaan potong bawah penjuru yang amat minimum. Proses



Rajah 17 Keratan rentas sebahagian daripada diafragma beralun yang difabrikasi dengan menggunakan topeng pampasan penjuru (Pembesaran SEM : 48X)



Rajah 18 Hasil fabrikasi diafragma beralun dengan: (a) topeng pampasan dan (b) tanpa topeng pampasan (Pembesaran SEM: 25X)

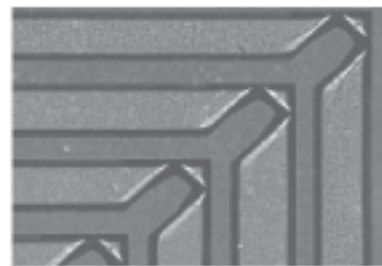
pembentukan penjuru cembung yang hampir sempurna dengan menggunakan topeng pampasan penjuru sepanjang proses punaran bagi mendapatkan kedalaman alunan $216 \mu\text{m}$ dengan kadar punaran $52 \mu\text{m}/\text{jam}$ ditunjukkan seperti dalam Rajah 19.

5.0 KEPUTUSAN

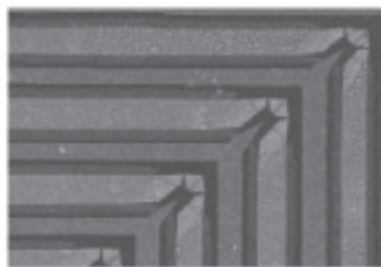
Jadual 2 menunjukkan kadar punaran silikon (100) yang didapati dari tiga jenis kajian. Di sini kelihatan kadar punaran yang dihasilkan dari proses fabrikasi iaitu $52.00 \mu\text{m}/\text{jam}$ mempunyai perbezaan sebanyak 24.6% dari nilai teori. Ini adalah disebabkan oleh larutan punaran KOH yang digunakan dalam eksperimen tidak mempunyai sifat yang sama seperti yang telah digunakan



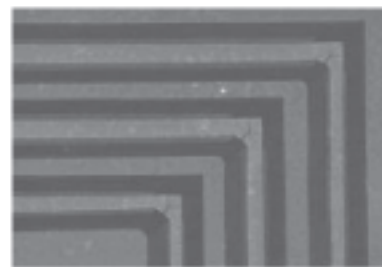
(a) Jam pertama



(b) Jam kedua



(c) Jam ketiga



(d) Jam ketiga

Rajah 19 Perambatan proses punaran diafragma beralun dengan topeng pampasan di mana hanya suku bahagian diafragma ditunjukkan (Pembesaran mikroskop optik:56X)

Jadual 2 Perbandingan kadar punaran KOH pada kepekatan 35% wt dan suhu 80°C

Jenis Kajian	Kadar punaran ($\mu\text{m}/\text{jam}$)
Simulasi	72.55
Eksperimen	52.00
Teori (Resnik <i>et al.</i> 2000)	69.00

bagi menghasilkan nilai teori walaupun keadaan punaran adalah serupa. Kestabilan suhu yang dicapai semasa proses punaran dilakukan juga menyumbang kepada perbezaan nilai di atas di mana kaedah menetapkan suhu punaran secara manual digunakan dalam makmal.

Perbezaan kadar punaran sebanyak 28.30% pula didapati di antara hasil simulasi dan eksperimen manakala jika perbandingan dibuat di antara kadar punaran yang didapati dari hasil simulasi dan teori hanya perbezaan sebanyak 5.1% berlaku. Perbezaan kadar punaran yang dihasilkan oleh nilai simulasi bergantung kepada pangkalan data nilai terukur dan jenis pemodelan proses punaran yang digunakan semasa membangunkan perisian proses punaran

tersebut. Walau bagaimanapun, perisian simulasi proses punaran AnisE yang digunakan untuk meramalkan bentuk silikon (100) dalam kajian ini melalui proses punaran anisotropik telah dibuktikan akan kejituannya dari segi kedalaman punaran dan kesempurnaan penjuru [10].

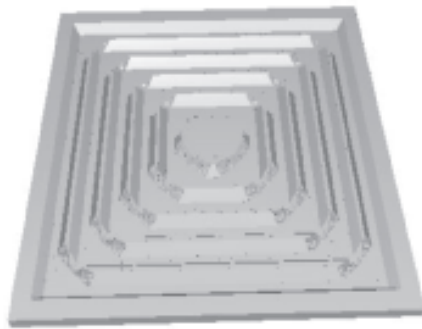
Masa punaran yang diambil bagi proses punaran kedua-dua struktur diafragma beralun adalah selama 4 jam dan 30 minit untuk mencapai kedalaman alunan 232 μm . Walaupun kedalaman asal bagi reka bentuk diafragma beralun yang sepatutnya dicapai adalah 216 μm faktor ketepatan pengawalan masa bagi hentian punaran semasa proses fabrikasi dijalankan dan kadar punaran yang berbeza yang digunakan dalam proses pengoptimuman topeng telah menjadikan kedalaman bertambah sedikit iaitu sebanyak 7% dari nilai asal. Dalam kes kajian simulasi pula kedalaman yang terbaik dapat dicapai adalah 219 μm dalam masa 3 jam. Pengukuran kedalaman alunan untuk kedua-dua diafragma yang difabrikasi ditentukan dengan menggunakan SEM.

Rajah 20 - 23 menunjukkan perbandingan hasil punaran yang didapati dari kajian simulasi dan eksperimen. Bagi hasil punaran yang diperolehi dari eksperimen, gambaran struktur 3-dimensi diafragma beralun diambil menggunakan SEM. Rajah 20 dan 22 menunjukkan keadaan penjuru terpotong yang muncul pada struktur yang berpenjuru cembung bagi diafragma beralun yang dipunarkan dengan menggunakan topeng tanpa pampasan penjuru.

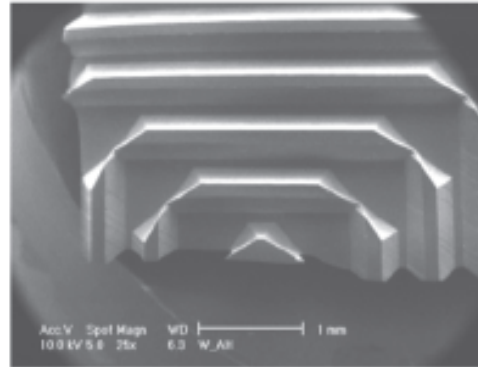
Rajah 21 dan 23 menunjukkan kelihatan masih lagi terdapat keadaan penjuru cembung yang terpotong walaupun topeng berpampasan penjuru digunakan dalam proses punaran sebenar. Walau bagaimanapun, kesan ini amat minimum sekali. Ini disebabkan oleh perbezaan di antara keadaan punaran bagi proses simulasi dan eksperimen serta pengawalan masa punaran yang kurang efektif. Bagi hasil simulasi pula, kelihatan struktur penjuru cembung yang terdapat pada diafragma beralun adalah hampir sempurna. Kejituan perisian proses simulasi yang digunakan merupakan faktor yang menyumbang kepada pembentukan struktur penjuru cembung yang boleh dianggap tanpa keadaan penjuru terpotong. Perbandingan darjah ketidakisotropikan, θ juga dilakukan dalam kes ini.

Merujuk kepada Rajah 24 dan 25, fabrikasi diafragma beralun silikon dengan menggunakan punaran tidak isotropik menghasilkan corak punaran berbentuk lurah-V. Bagi silikon (100), cerun punaran merupakan satah $\langle 111 \rangle$. Berdasarkan kepada prinsip, persilangan di antara satah $\langle 111 \rangle$ dan satah $\langle 100 \rangle$ membentuk sudut 54.74° . Oleh yang demikian, sudut persilangan di antara cerun punaran $\langle 111 \rangle$ dan satah permukaan (100), θ yang terbentuk pada diafragma beralun yang difabrikasi adalah seperti berikut:

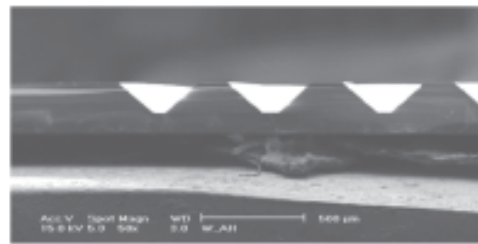
$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{h}{d}\right) \quad (1)$$



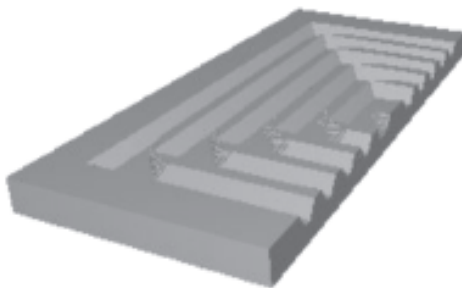
(a)



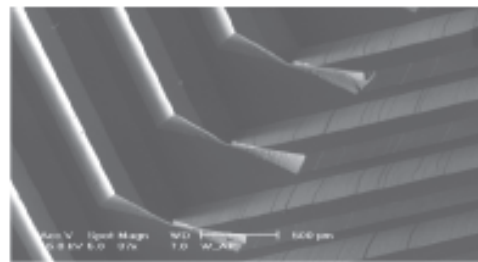
(a) Pembesaran SEM: 19X



Pembesaran SEM: 34X

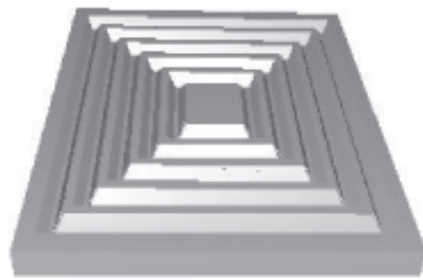


(b)

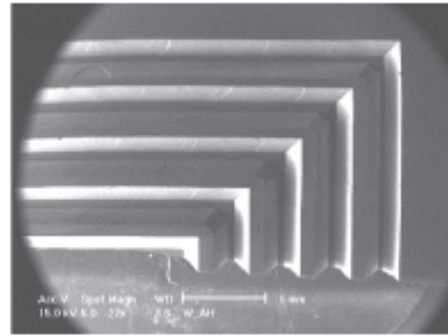


(b) Pembesaran SEM: 34X

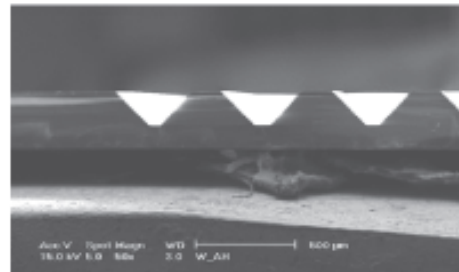
Rajah 20 Perbandingan hasil keputusan fabrikasi diafragma beralun secara simulasi dan eksperimen dengan menggunakan topeng punaran tanpa pampasan penjuru: (a) gambar tiga dimensi dan (b) pandangan keratan rentas



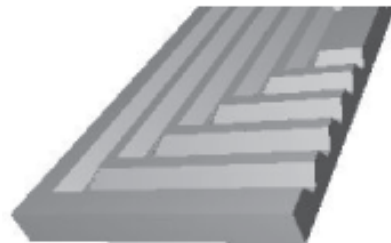
(a)



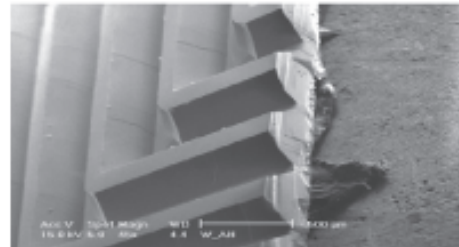
(a) Pembesaran SEM: 17 X



Pembesaran SEM: 34 X



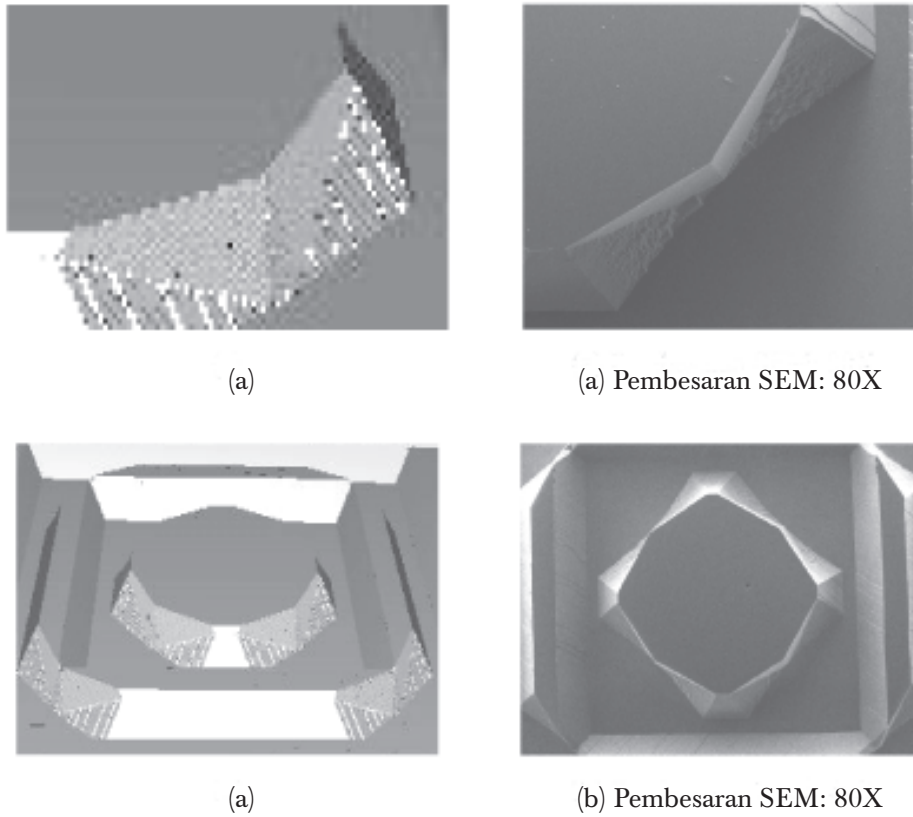
(b)



(b) Pembesaran SEM: 34 X

Rajah 21 Perbandingan hasil keputusan fabrikasi diafragma beralun secara simulasi dan eksperimen dengan menggunakan topeng punaran berpampasan penjuru: (a) gambar tiga dimensi dan (b) pandangan keratan rentas

di mana h adalah kedalaman alunan yang terbentuk dan d adalah jarak mendatar bagi cerun punaran. Nilai θ bagi diafragma beralun yang dipunarkan dengan menggunakan topeng punaran berlainan adalah seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 3.



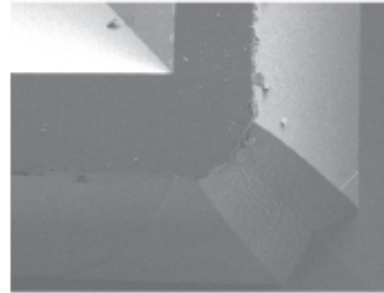
Rajah 22 Pandangan dekat perbandingan diantara hasil simulasi dan fabrikasi keadaan penjuru cembung terpotong diafragma beralun yang dipunarkan tanpa topeng pampasan:(a) satu bahagian struktur penjuru cembung dan (b) bahagian tengah atau tombol diafragma

Jadual 3 Darjah ketidakisotropikan, θ , alunan diafragma yang terbentuk dengan menggunakan topeng punaran yang berbeza

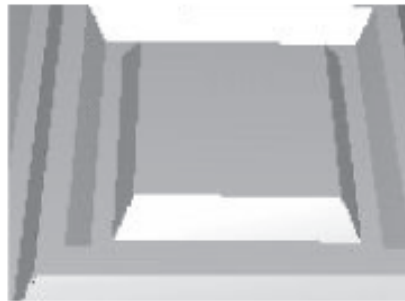
Jenis topeng punaran	Darjah ketidakisotropikan, θ ($^{\circ}$)	
	Simulasi	Eksperimen
Tanpa pampasan	54.00	53.80
Berpampasan	55.30	54.10



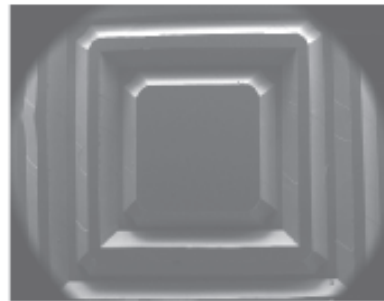
(a)



(a) Pembesaran SEM: 154X



(b)



(b) Pembesaran SEM: 80X

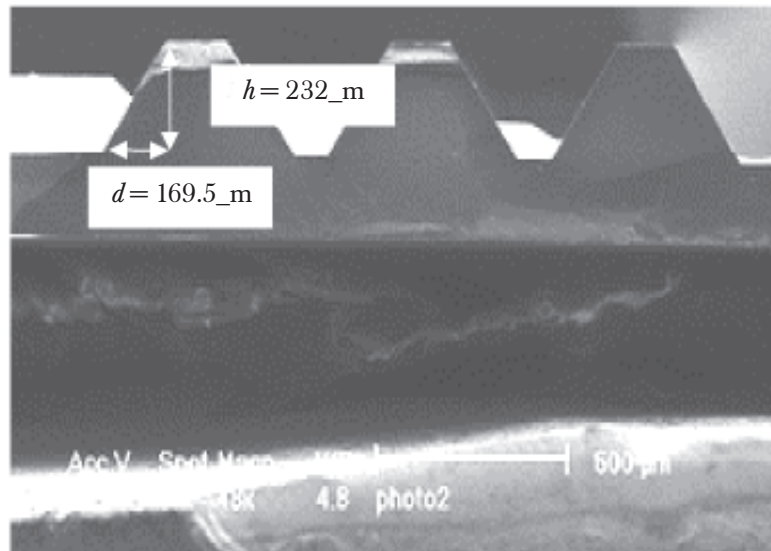
Rajah 23 Pandangan dekat perbandingan diantara hasil simulasi dan fabrikasi keadaan penjuru cembung terpotong diafragma beralun yang dipunarkan dengan topeng pampasan: (a) satu bahagian struktur penjuru cembung dan (b) bahagian tengah atau tombol diafragma

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

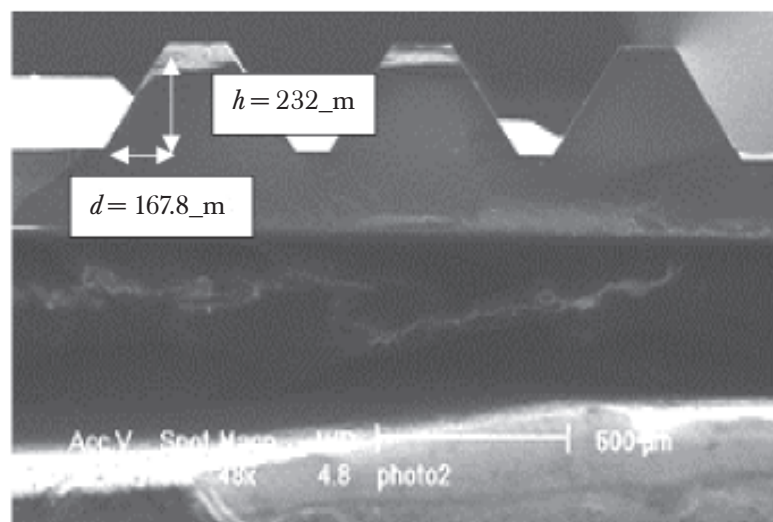
$$D_e = \left(\frac{\theta_1 - \theta_2}{\theta_1} \right) \times 100\% \quad (2)$$

dengan nilai θ_1 adalah nilai teori (54.74°) dan θ_2 adalah nilai yang didapati dari pengukuran yang sebenar. Bagi penentuan ralat punaran, nilai θ_2 yang digunakan adalah nilai purata dari hasil fabrikasi yang terdapat dalam Jadual 7.5 iaitu 53.95° . Oleh yang demikian, ralat punaran, D_e , yang didapati dari persamaan (2) adalah 1.44%. Peratus ralat punaran ini boleh dianggap kecil. Manakala jika perbandingan dilakukan dengan nilai θ yang didapati dari hasil simulasi, peratusan ralat punaran adalah 1.28% di mana nilai purata bagi hasil simulasi iaitu 54.65° digunakan. Nilai peratus ralat punaran, D_e yang didapati di antara keputusan simulasi dan nilai teori adalah amat kecil iaitu 0.16%. Ini

membuktikan bahwa perisian proses punaran AnisE yang digunakan mempunyai kejituan yang tinggi seperti yang dilaporkan sebelum ini [10].



Rajah 24 Nilai-nilai h dan d yang didapati dari hasil fabrikasi diafragma beralun dengan menggunakan topeng tanpa pampasan (Pembesaran SEM: 48X)



Rajah 25 Nilai-nilai h dan d yang didapati dari hasil fabrikasi diafragma beralun dengan menggunakan topeng berpampasan (Pembesaran SEM: 48X)

KESIMPULAN

Teknik punaran anisotropik ke atas struktur silikon memainkan peranan penting bagi pembentukan struktur tiga dimensi dalam pemesinan mikro. Walau bagaimanapun, teknik ini masih tidak dapat memenuhi keperluan struktur-stuktur yang bergeometri kompleks disebabkan oleh fenomena potong bawah penjuru yang berlaku pada struktur berpenjuru cembung.

Dalam kajian ini, satu diafragma beralun silikon dengan keadaan potong bawah penjuru yang amat minimum berjaya direalisasikan dengan aplikasi topeng punaran berpampasan penjuru dalam proses punaran anisotropik. Ini membuktikan bahawa topeng punaran yang direkabentuk dengan menggunakan perisian proses simulasi punaran AnisE berkemampuan mengatasi masalah keadaan potong bawah penjuru.

PENGHARGAAN

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

RUJUKAN

- [1] Enoksson P., 1997. *New Structure for Corner Compensation in Anisotropic KOH Etching*. J. Micromech. Microeng. 7: 141-144.
- [2] Bean K. E. 1978. *Anisotropic Etching of Silikon*. IEEE Trans. Electron Dev. 25 (10): 1185-93.
- [3] Offereins, H. L. H. Sandmaier, K. Marusczyk, K. Kuhl, and A Plettner. 1992. *Compensating Corner Undercutting of (100) Silicon in KOH*. Sens. Mater. 3: 127-144.
- [4] Bao, M. C. Burrer, J. Esteve, J. Bausells, and S. Marco. 1993. *Etching Front Control of <110> Strips for Corner Compensation*. Sensors and Actuators A.37 – 38: 727-732.
- [5] Puers, B. dan W. Sansen. 1991. *Compensation Structures for Convex Corner Micromachining in Silicon*. Sensors and Actuators A21-A23: 1036-1041.
- [6] Mayer, G. K. H. L. Offereins, H. Sandmaier, and K. Kuhl. 1990. *Fabrication of Non-underetched Convex Corners in Anisotropic Etching of (100) Silicon in Aqueous KOH with Respect to Novel Micromechanic Elements*. J. Electrochem. 137 (12): 3947-3951.
- [7] Zhang, Q. L. Liu, and Z. Li. 1996. *A New Approach to Convex Corner Compensation for Anisotropic Etching of (100) Si in KOH*. Sensors and Actuators A 56: 251-254
- [8] Lee. D. B. 1969. *Anisotropic Etching of Silikon*. Journal of Applied Physics. 40: 4569-4574.
- [9] Horn, A. H. Schröder, E. Obermeier, and G. Wachutka. 2000. *Simulation of Orientation Dependent Etching of Silicon using a New Step Flow Model of 3D Structuring*. Tech. Proc. of the 2000 Int. Con. On Modelling and Simulations of Microsystems, 63-66.
- [10] Marchetti, J. Y. He, O. Than, and S. Akkaraju. 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