

PENCIRIAN KEADAAN POTONG BAWAH PENJURU KE ATAS DIAFRAGMA BERALUN SILIKON

NORHAYATI SOIN^{1*} & BURHANUDDIN YEOP MAJLIS²

Abstrak. Kertas kerja ini membentangkan hasil kajian mengenai keadaan potong bawah penjuru yang terhasil pada struktur-struktur penjuru cembung diafragma beralun silikon (100). Diafragma yang terlibat dalam kajian ini dihasilkan dengan menggunakan teknik punaran anisotropik dengan larutan kalium hidroksida (KOH) sebagai larutan pemunat. Keadaan punaran yang optimum bagi pembentukan diafragma beralun ini adalah pada kepekatan KOH 35% dan suhu 80°C. Pengenalpastian satah-satah silikon yang baru muncul pada struktur penjuru cembung terpunar dilakukan berdasarkan kepada keputusan-keputusan yang diperolehi daripada kajian simulasi dan eksperimen. Penentuan nilai maksima potong bawah penjuru juga dibuat dalam kajian ini. Hasil-hasil yang diperolehi dari kajian ini menunjukkan bahawa satah-satah silikon (411) didapati mendominasi pembentukan struktur-struktur penjuru cembung terpunar pada diafragma beralun silikon (100) dalam keadaan punaran yang diberikan.

Kata kunci: Potong bawah penjuru, punaran anisotropik, diafragma beralun

Abstract. This paper reports on the study of the corner-undercutting phenomenon that occurs at the convex corner structures on silicon (100) corrugated diaphragm. The anisotropic etching technique with aqueous potassium hydroxide as the etchant was used to produce the corrugated diaphragm. The optimum etching condition of 35% KOH concentration and 80°C temperature was applied for the formation of this corrugated diaphragm. The identification of new emergent silicon planes on the etched convex corner was done based on the simulation and experimental results. The maximum amount of corner undercutting was also determined in this study. It can be concluded that the dominant facets contributing to the undercutting of the convex corners of the corrugated diaphragm for the given etching condition is silicon (411) planes.

Keyword: Corner-undercutting, anisotropic etching, corrugated diaphragm

1.0 PENGENALAN

Punaran anisotropik ke atas silikon merupakan suatu proses yang penting untuk merealisasikan struktur-struktur MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) dalam tiga dimensi seperti pembentukan diafragma-diafragma untuk sensor tekanan [1]. Walau bagaimanapun, kaedah punaran ini mempunyai satu keburukan yang agak

^{1&2} Institut Kejuruteraan Mikro dan Nanoelektronik (IMEN), Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM, Bangi, Selangor Darul Ehsan, Malaysia

* Penulis utama: Email: norhayatisoin@um.edu.my

serius iaitu pembentukan keadaan potong bawah penjuru pada struktur reka bentuk-reka bentuk yang terdiri daripada penjuru-penjuru cembung di atas wafer silikon dan tanpa sebarang pampasan, penghasilan suatu struktur berpenjuru cembung yang sempurna adalah amat merumitkan [2].

Berdasarkan kajian terdahulu, struktur-struktur yang terbentuk pada penjuru cembung yang terpunar didominasi oleh satah-satah punaran pantas [3]. Arah punaran bagi satah-satah punaran pantas tersebut juga telah dikenal pasti dan perbezaan hasil-hasil kajian dan pendapat banyak bergantung pada keadaan proses punaran seperti jenis larutan pemunar, suhu, kepekatan larutan pemunar, dan pengedopan substrat. Walau bagaimanapun, kebanyakan daripada hasil-hasil kajian tersebut telah bersetuju menerima satah-satah silikon (411) sebagai satah-satah punaran pantas yang terbentuk pada struktur-struktur penjuru cembung terpunar [3].

Maklumat mengenai satah-satah silikon berindeks tinggi ini adalah penting bagi mereka bentuk struktur pampasan penjuru dan topeng-topeng pampasan yang lain secara lebih tepat bagi mengatasi keadaan potong bawah penjuru.

Objektif kertas kerja ini adalah untuk membuat pengenalpastian ke atas satah-satah silikon yang baru muncul pada struktur-struktur penjuru cembung terpunar dan menentukan jumlah maksima potong bawah yang terhasil. Pengesahan hasil-hasil eksperimen dilakukan dengan membuat perbandingan dengan keputusan-keputusan yang diperolehi dari kajian simulasi dan teori.

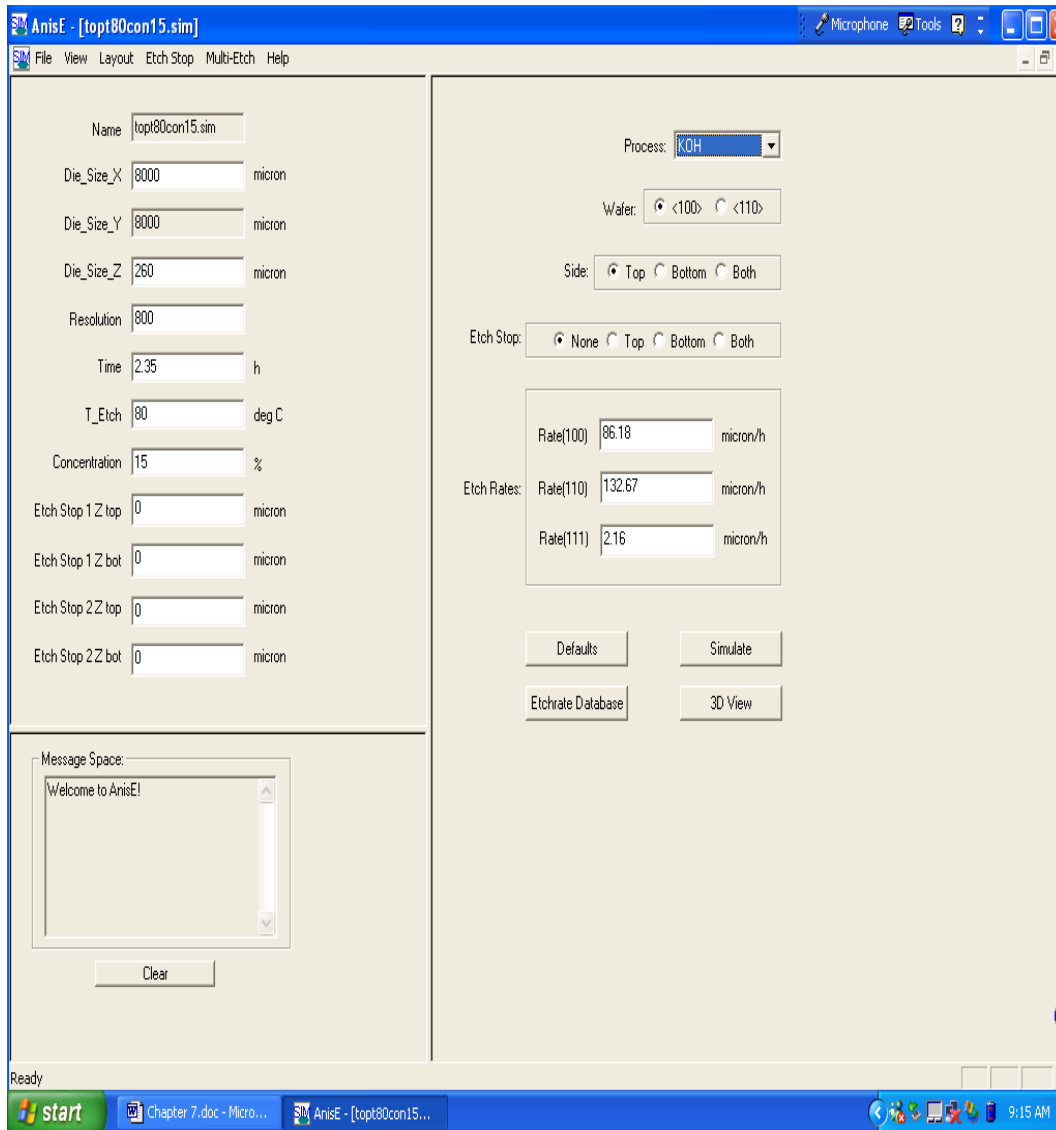
2.0 KERJA-KERJA PENYELIDIKAN

2.1 Perisian Simulasi Punaran Anisotropik Intellisuite

Dalam kertas kerja ini, kajian simulasi dijalankan dengan menggunakan perisian reka bentuk terbantu komputer (CAD) IntelliSuite. Perisian ini mampu menyediakan kemudahan simulasi yang mempunyai ketepatan yang tinggi untuk peranti-peranti MEMS dari kategori-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 [4].

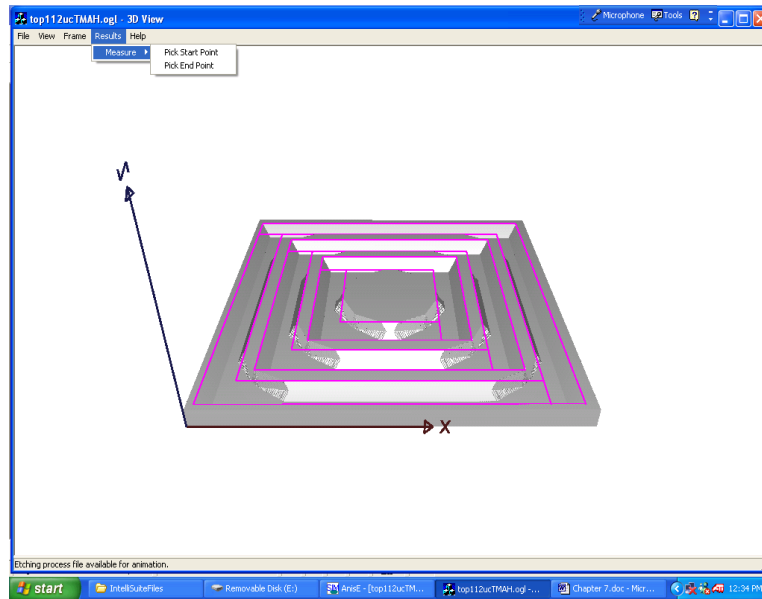
Perisian ini merupakan satu perisian bersepadu yang kompleks di mana ia boleh membantu pereka-pereka bentuk dalam mengoptimumkan peranti-peranti MEMS dengan memberikan mereka capaian kepada pengkalan-pengkalan data pengilangan dan dengan membenarkan mereka untuk memodelkan keseluruhan turutan pengilangan suatu peranti serta seterusnya mensimulasi ciri-ciri untuk mendapatkan hasil simulasi secara visual tanpa menggunakan kemudahan pengilangan yang sebenar [4].

Dengan menggunakan perisian ini, seseorang pengguna boleh mereka bentuk bentangan topeng untuk suatu struktur mikro, mendapatkan pandangan tiga dimensi, mencapai maklumat mengenai kadar punaran untuk larutan punaran yang berbeza

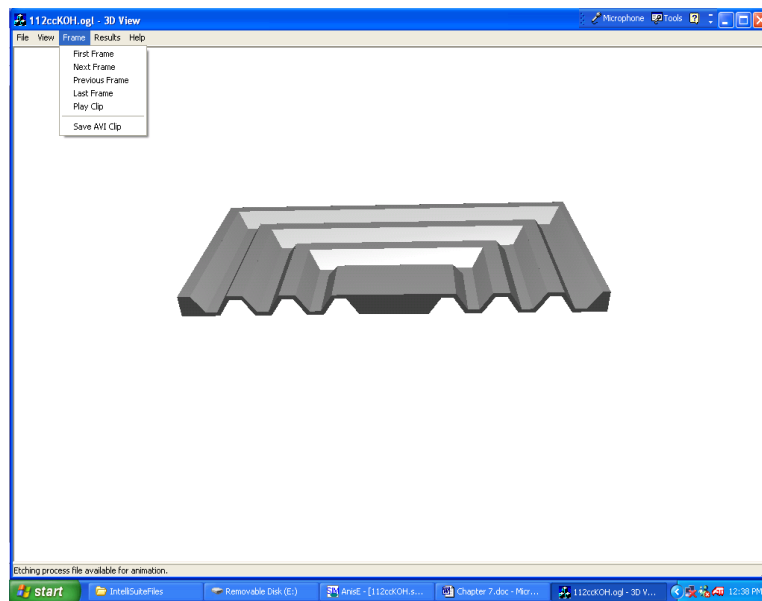


Rajah 1 Contoh hasil simulasi punaran anistropik dari perisian Intellisuite

dan seterusnya melakukan proses simulasi punaran secara automatik di bawah parameter-parameter jangka masa, suhu, dan kepekatan yang berbeza. Rajah 1 dan Rajah 2, masing-masing menunjukkan suatu skrin *shot* dari perisian Intellisuite dengan beberapa contoh penggambaran tiga dimensi.



(a)

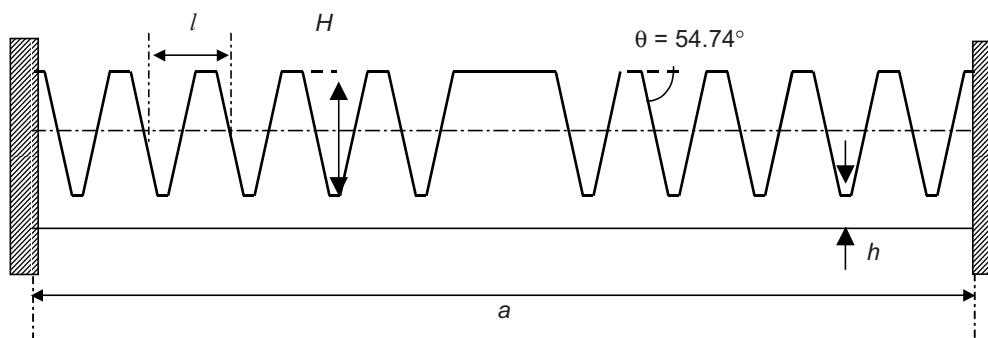


(b)

Rajah 2 Contoh hasil simulasi punaran anisotropik dari perisian Intellisuite: (a) pandangan atas dan (b) keratan rentas diafragma beralun

2.2 Struktur Diafragma

Struktur diafragma yang terlibat dalam kajian ini adalah seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 3. Diafragma tersebut berbentuk segi empat dan bersaiz $7.2 \text{ mm} \times 7.2 \text{ mm}$ serta mempunyai corak alunan berbentuk segi empat sepusat. Jumlah alunan yang terdapat di atas diafragma tersebut adalah sebanyak lima. Struktur-struktur alunan tersebut akan direalisasikan dengan menggunakan teknik punaran anisotropik dan penjelasan mengenai proses fabrikasinya boleh didapati dalam bahagian seterusnya. Parameter-parameter struktur diafragma beralun tersebut adalah seperti yang disenaraikan dalam Jadual 1. Penentuan parameter-parameter tersebut adalah berdasarkan reka bentuk diafragma beralun silikon yang dibuat bagi memenuhi beberapa spesifikasi sensor tekanan MEMS (Micro-electro-mechanical systems) [5]. Reka bentuk diafragma beralun silikon ini dibuat dengan mengaplikasikan kaedah reka bentuk diafragma beralun logam yang telah diperkenalkan oleh Haringx [6].



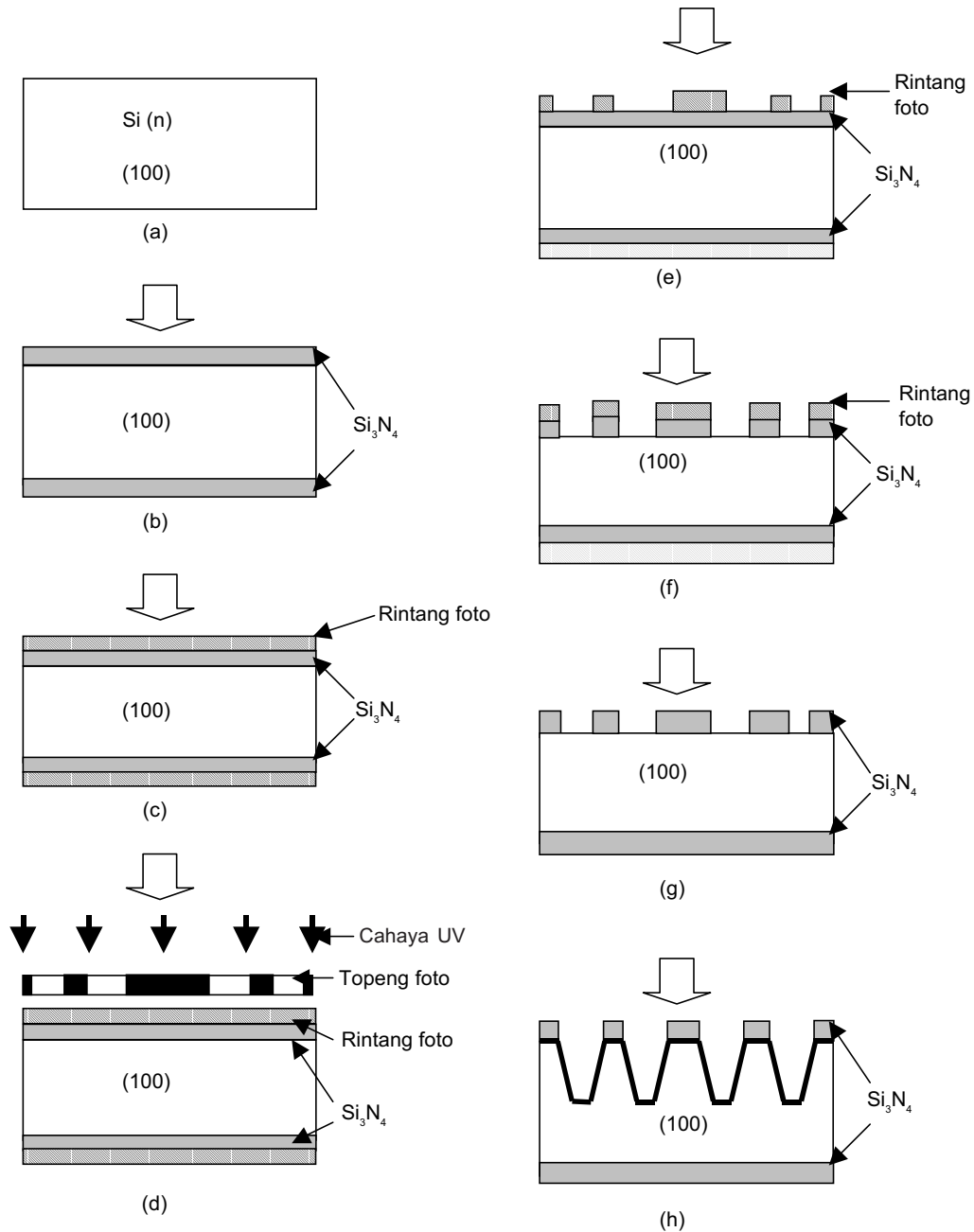
Rajah 3 Rajah skematik yang menunjukkan pandangan keratan rentas untuk diafragma beralun silikon (tidak mengikut skala)

Jadual 1 Parameter-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	l	584 μm
Sudut di antara satah (100) dan dinding tepi	θ	54.74°

2.3 Fabrikasi Diafragma Beralun Silikon

Proses fabrikasi diafragma beralun silikon dijelaskan secara skematik seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 4. Bahan asas yang digunakan dalam fabrikasi diafragma



Rajah 4 Rajah skematik yang menunjukkan urutan proses-proses fabrikasi diafragma beralun silikon dengan teknik punaran basah: (a) pembersihan wafer, (b) pemendapan lapisan silikon nitrit, (c) penyalutan rintang foto, (d) pendedahan sampel di bawah cahaya uv, (e) pembangunan rintang foto, (f) punaran lapisan silikon nitrit, (g) penyingkiran rintang foto, dan (h) punaran silikon

beralun ini merupakan wafer silikon jenis-n, berorientasi (100), dengan ketebalan 500 μm dan berdiameter 6 inci. Pembersihan wafer merupakan langkah pertama yang dilakukan dalam proses fabrikasi ini. Teknik pemendapan wap kimia dengan plasma (*Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition*, PECVD IPL 2000 E/D) digunakan bagi menghasilkan lapisan nipis silikon nitrit yang akan bertindak sebagai topeng punaran. Ketebalan lapisan silikon nitrit yang dihasilkan melalui proses ini adalah 2 μm .

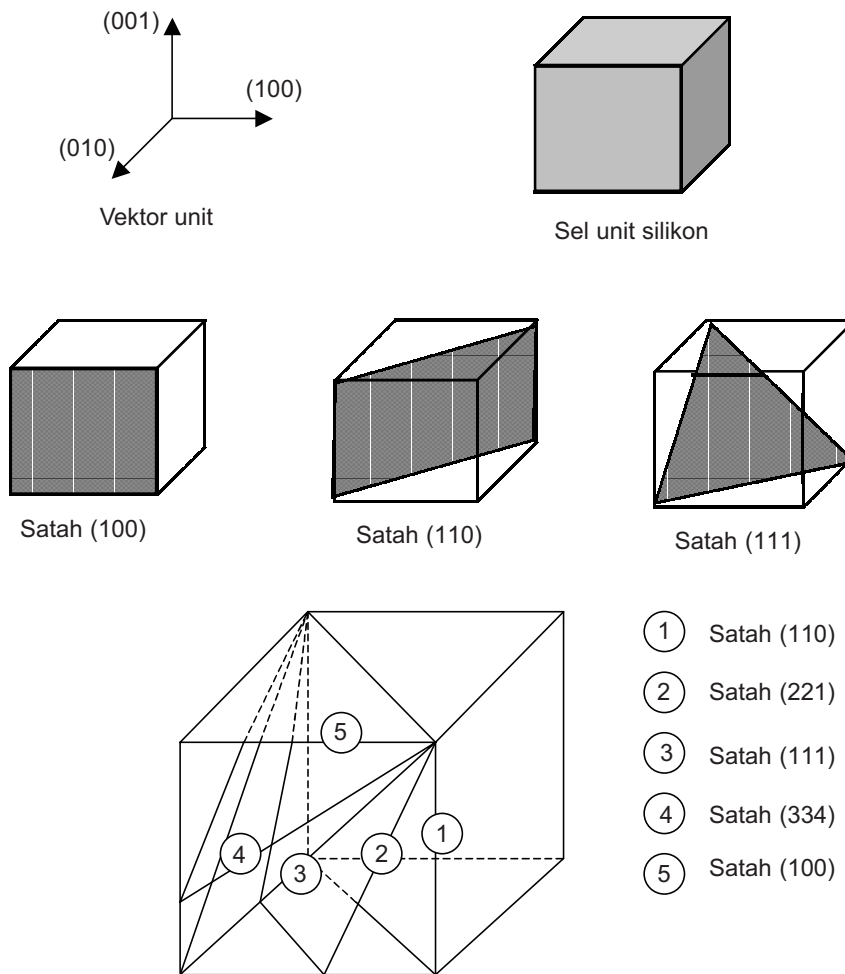
Penjajaran wafer-topeng dilakukan dengan menggunakan alat penjajar topeng sebelum proses pendedahan rintang foto dengan cahaya UV dijalankan. Selepas pendedahan dilakukan, rintang foto dibangunkan dengan menggunakan *developer*. Penyingkiran lapisan silikon nitrit dilakukan dengan menggunakan proses punaran ion reaktif. Penyingkiran rintang foto pula dilakukan dengan menggunakan larutan aseton (gred CMOS, J. T. Baker). Kemudian, substrat silikon yang telah terdedah dipunarkan di dalam larutan KOH (gred elektronik, J. T. Baker) untuk pembentukan struktur alunan yang mempunyai kedalaman 216 μm .

Teknik kiraan tempoh punaran KOH digunakan bagi memastikan kedalaman alunan yang dipunarkan. Ini melibatkan proses punaran KOH yang dijalankan selama satu jam dan kemudian kedalaman punaran diukur dengan menggunakan SEM dan seterusnya kadar punaran larutan pemunaran ke atas substrat silikon boleh diperolehi. Dalam proses fabrikasi ini, masa yang diambil untuk menghasilkan kedalaman alunan 216 μm adalah selama empat jam dan tiga puluh minit. Bagi pencirian struktur penjuru cembong yang terpunar, mikroskop optik (LEICA) digunakan bagi mengenal pasti satah-satah silikon yang baru muncul dan penerangan yang terperinci mengenainya boleh didapati dalam seksyen 3.1.

2.4 Teori Kristalografi Silikon

Silikon berhablur tunggal mempunyai struktur hablur kubus intan dengan beberapa satah-satah berindeks rendah yang boleh dipilih untuk orientasi sesuatu wafer. Kebiasaannya, wafer-wafer silikon boleh didapati dengan permukaan-permukaan yang berorientasikan sama ada satah (100) atau (110) secara komersial. Wafer-wafer silikon tersebut masing-masing biasanya dikenali sebagai jenis (100) dan jenis (110). Dalam kajian ini, wafer silikon jenis (100) akan digunakan dan keseluruhan penerangan seterusnya akan merujuk kepada wafer jenis (100), melainkan jika dinyatakan.

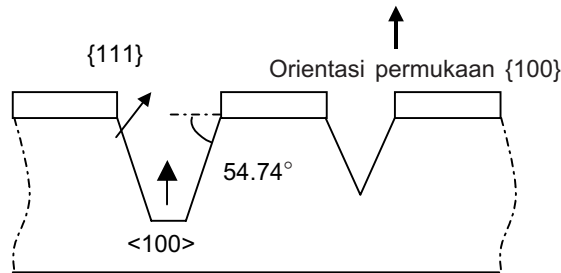
Terdapat tiga satah yang paling biasa digunakan untuk peranti-peranti MEMS seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 5. Rajah ini juga menunjukkan contoh satah-satah silikon berindeks tinggi [7]. Ketiga-tiga satah yang paling biasa digunakan tersebut mempunyai ketumpatan atom yang agak berbeza, di mana satah {111} mempunyai ketumpatan atom yang paling tinggi, satah {100} mempunyai ketumpatan atom yang sederhana, dan satah {110} mempunyai ketumpatan atom yang paling rendah. Perbezaan-perbezaan dalam ketumpatan atom tersebut adalah penerangan umum untuk sifat semulajadi anisotropik punaran basah kimia silikon seperti yang dijelaskan dalam



Rajah 5 Satah-satah silikon yang biasa digunakan untuk peranti MEMS dan contoh satah-satah silikon berindeks tinggi [7]

Rajah 6, di mana jika ketumpatan atom bagi sesuatu satah semakin tinggi, maka kadar punaran akan menjadi semakin rendah [1]. Satah {111} dipunarkan dengan kadar yang paling rendah berbanding dengan satah {100} dan menjadikannya seperti satah menghenti punaran (*etch stopping plane*).

Punaran basah tidak-isotropik silikon adalah berdasarkan perbezaan-perbezaan dalam kelajuan punaran bagi satah-satah yang berbeza dalam silikon berhablur tunggal [1]. Dua jenis larutan pemunaran yang paling kerap digunakan adalah larutan pemunaran kalium hidroksida, KOH (kalium hydroxide-water), dan EDP (ethylenediamine-pyrocatechol-water) [1]. Apabila sesuatu wafer silikon direndam ke dalam larutan pemunaran, silikon tersebut bukan sahaja dipunaran secara menegak tetapi juga secara menyisi (*laterally*). Geometri akhir dan profil dinding struktur yang telah melalui

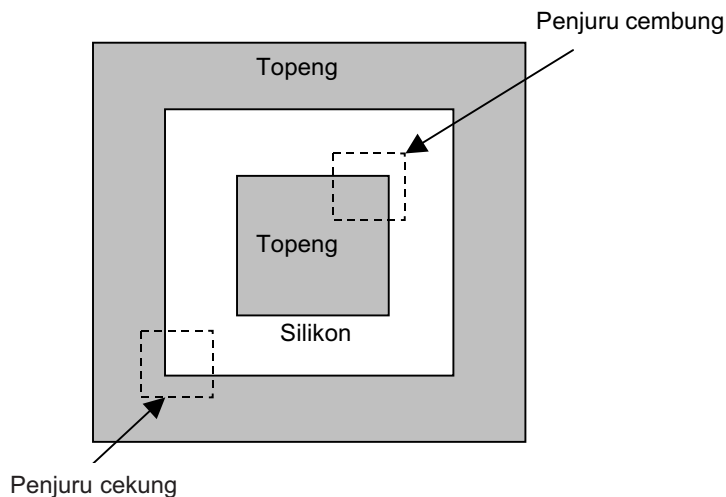


Rajah 6 Rajah skematik pandangan keratan rentas punaran anisotropik wafer silikon

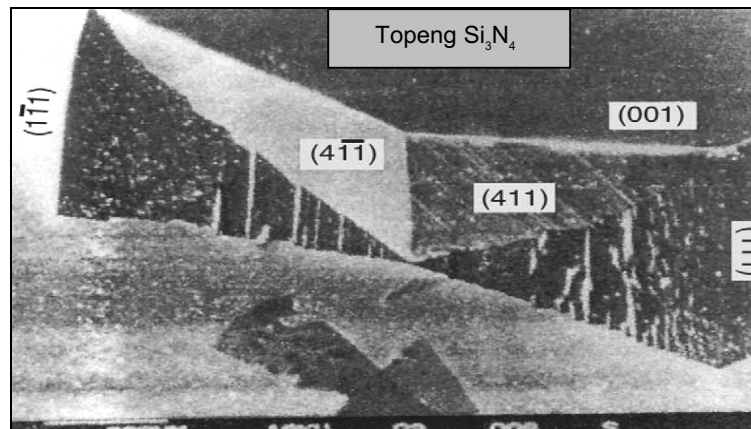
proses punaran adalah banyak bergantung kepada geometri topeng dan orientasinya terhadap satah-satah berhablur.

Pada umumnya, terdapat dua jenis geometri yang dikenali sebagai geometri topeng cekung dan cembung seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 7. Rajah ini menunjukkan suatu topeng yang akan menghasilkan struktur alunan apabila melalui proses punaran anisotropik. Merujuk kepada kajian yang telah dilaporkan sebelum ini, keadaan penjuru terpunar hanya berlaku pada struktur silikon yang berpenjuru cembung sahaja manakala bagi struktur silikon yang berpenjuru cekung pula, tiada sebarang keadaan punaran pun yang akan mengakibatkan penjuru tersebut mengalami keadaan terpunar [7]. Oleh yang demikian, penerangan seterusnya akan berkisar mengenai keadaan potong bawah penjuru cembung sahaja.

Dalam kes geometri topeng cembung, struktur-struktur bentuk yang dihasilkan didominasi oleh satah-satah punaran pantas (*fast etching planes*) seperti yang diterangkan dalam Rajah 8 [3]. Dalam kajian literatur, arah punaran pantas telah



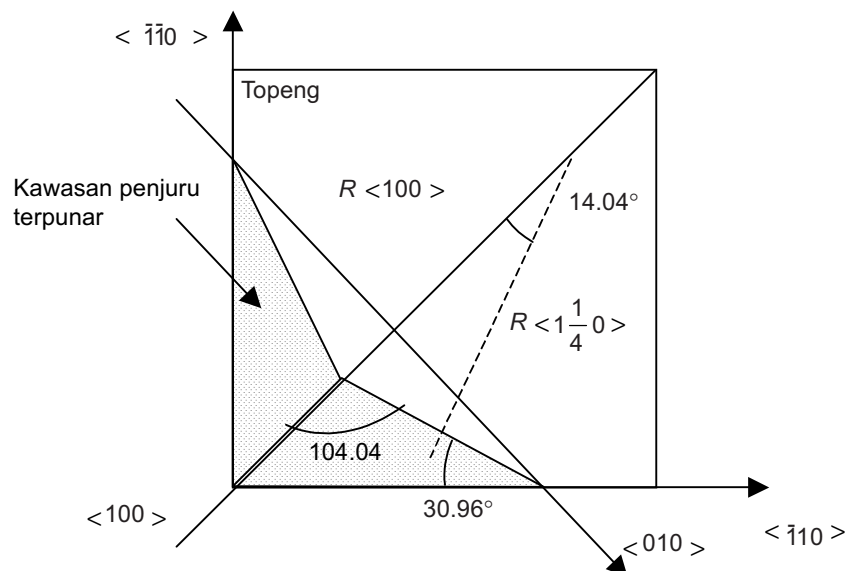
Rajah 7 Geometri topeng cekung ($<180^\circ$) dan cembung ($>180^\circ$)



Rajah 8 Satah-satah yang muncul pada penjuru-penjuru cembung semasa proses punaran KOH

dikenal pasti dan perbezaan hasil kajian dan pendapat banyak bergantung kepada keadaan proses punaran seperti jenis larutan pemunar, suhu, kepekatan larutan pemunar, pengedapan substrat, dan jumlah '*stirring*'. Walau bagaimanapun, satah-satah $\{411\}$ kebanyakannya telah diterima sebagai satah-satah punaran pantas untuk struktur-struktur cembung [3].

Selain daripada itu, keadaan penjuru terpunar yang maksimum didapati berlaku dalam arah 45° kepada satah rata primer [8]. Dua satah dari famili $\{411\}$ bertemu di antara satu sama lain dan membentuk suatu penjuru yang bergerak contohnya dalam arah $\langle 100 \rangle$, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 9 [8].



Rajah 9 Fenomena penjuru cembung terpunar

Jadual 2 Nilai-nilai teori bagi sudut potong bawah penjuru, α , bagi beberapa satah-satah silikon berindeks tinggi [9]

hkl	Sudut, α (darjah)
211	126.84
311	143.20
411	151.20
511	157.42

Penentuan satah-satah silikon berindeks tinggi pada struktur penjuru terpunar yang diperolehi dari proses fabrikasi boleh dilakukan dengan menggunakan mikroskop optikal yang mempunyai resolusi yang tinggi. Nilai-nilai sudut yang didapati daripada pengukuran ini kemudiannya boleh dibandingkan dengan nilai-nilai teori sudut di antara satah (100) dan satah-satah yang lain. Nilai-nilai teori bagi sudut tersebut adalah seperti yang diberikan dalam Jadual 2 [9].

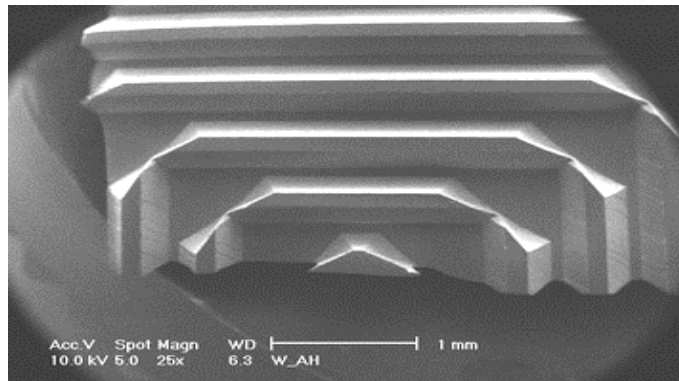
3.0 KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Proses pembentukan diafragma beralun telah menghasilkan keputusan seperti yang diberikan dalam Rajah 10. Kelihatan dalam rajah tersebut keadaan setiap penjuru cembung di atas diafragma beralun tidak terbentuk dengan sempurna malah fenomena penjuru terpotong 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 $\approx 230 \mu\text{m}$ melalui proses punaran selama empat setengah jam. Kedalaman alunan ini didapati melebihi daripada nilai yang telah ditetapkan akibat daripada teknik pemberhentian proses punaran anisotropik yang digunakan kurang efektif.

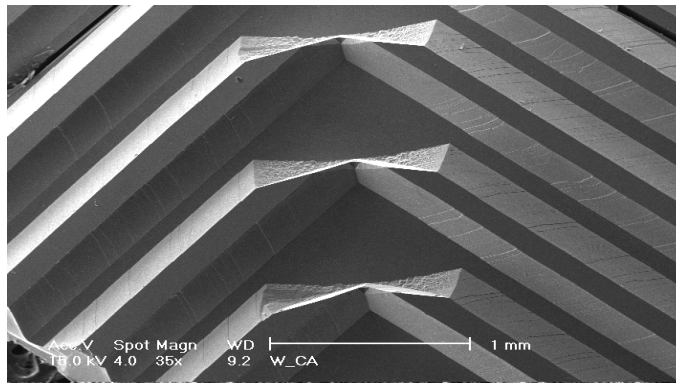
Dalam kes punaran ke atas suatu permukaan cembung ini, bentuk struktur yang terpunar dihadkan oleh satah-satah yang mempunyai kadar punaran yang pantas dengan satah-satah yang mempunyai kadar punaran yang rendah membentuk penjuru-penjuru dan bahagian-bahagian pinggiran. Ini merupakan sebab bagi satah-satah (111) yang dihasilkan dari punaran ini tidak bersambung untuk membentuk suatu penjuru cembung yang sempurna. Bahagian penjuru tersebut membentuk suatu permukaan cembung yang bentuknya tidak dihadkan oleh satah-satah (111) tetapi satah-satah yang mempunyai kadar punaran yang pantas [10].

Rajah 11 menunjukkan dengan jelasnya bahawa bahagian penjuru yang terpunar adalah berbentuk menyerong dan bukannya membulat. Pembentukan satah menyerong ini tidak bergantung semata-mata kepada wafer silikon yang telah terlarut pada kedua-dua sisi tetapi disebabkan oleh anisotropi kadar punaran [10].

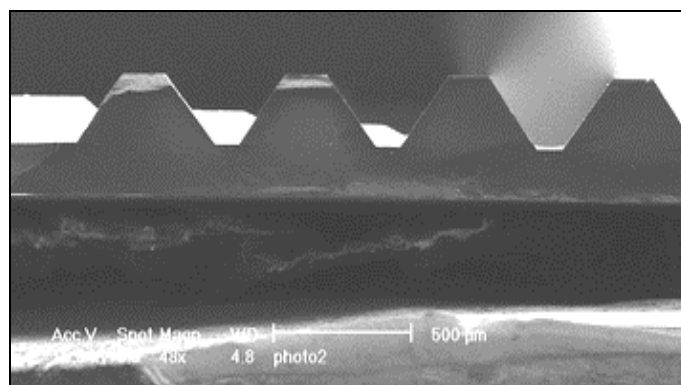
Pemerhatian yang telah dibuat ke atas penjuru-penjuru cekung di atas struktur diafragma beralun selepas proses punaran dijalankan menunjukkan bahawa tiada



Rajah 10 Gambar rajah SEM yang menunjukkan pandangan atas sebahagian daripada diafragma beralun yang difabrikasi tanpa menggunakan topeng pampasan penjuru



Rajah 11 Gambar rajah SEM yang menunjukkan pandangan secara dekat beberapa bahagian struktur penjuru cembung diafragma beralun yang mengalami keadaan potong bawah penjuru



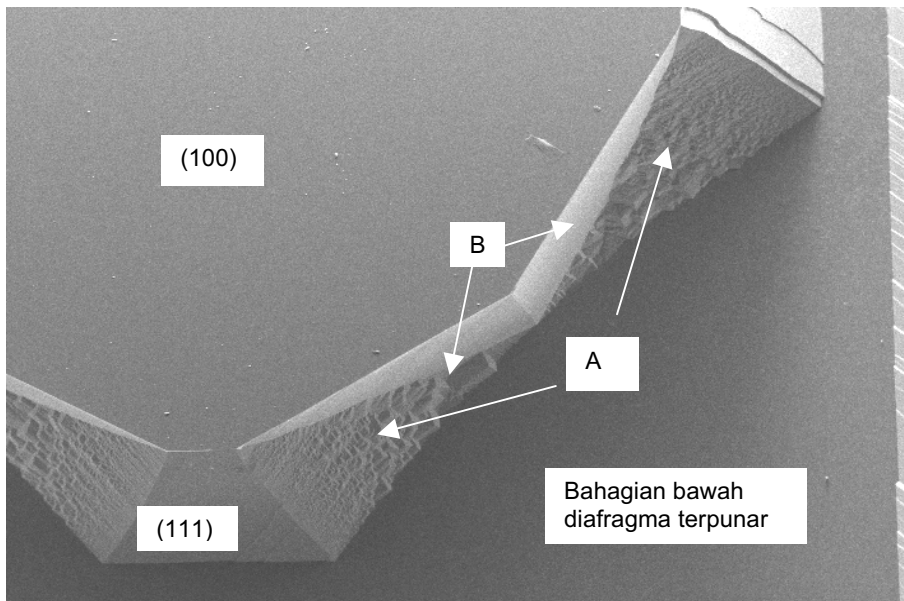
Rajah 12 Gambar rajah SEM yang menunjukkan keratan rentas sebahagian daripada diafragma beralun yang difabrikasi tanpa menggunakan topeng pampasan penjuru

keadaan punaran yang mempengaruhi bentuk penjuru-penjuru cekung tersebut. Keadaan penjuru cekung yang sempurna ini ditentukan oleh persilangan satah-satah silikon (111) yang licin tanpa bergantung kepada dalamnya punaran.

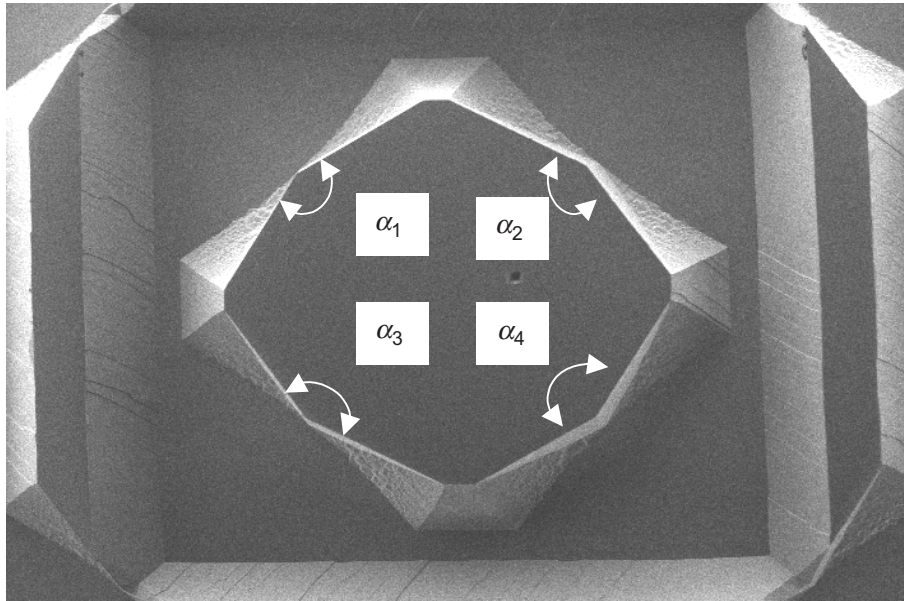
3.1 Pencirian Potong Bawah Penjuru

Rajah 13 menunjukkan fenomena potong bawah penjuru secara dekat pada salah satu struktur penjuru cembung di atas diafragma beralun yang dipunarkan dengan menggunakan topeng tanpa pampasan penjuru. Kelihatan pada struktur penjuru yang terpotong tersebut ialah kawasan-kawasan yang mempamerkan morfologi yang berlainan. Kawasan B mewakili kawasan yang mempunyai struktur teratur yang licin dan halus manakala kawasan A mempamerkan struktur tidak sekata yang agak kasar akibat daripada kesan kestabilan satah-satah silikon (100) yang berada berdekatan dengan satah-satah silikon (100). Kawasan A didapati terdiri daripada kumpulan satah-satah silikon (100) dan satah-satah silikon berindeks tinggi [11,12].

Satah-satah baru yang muncul pada penjuru cembung semasa proses punaran ini sukar dikenal pasti secara jelas dengan hanya menggunakan SEM kerana satah-satah tersebut terdiri daripada satu set muka-muka kecil yang tidak bertertib dengan alihan-alihan lancar. Walau bagaimanapun, proses mengenal pasti satah-satah tersebut masih boleh dilakukan dengan menggunakan SEM dan mikroskop optikal di mana



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



Rajah 14 Gambar rajah SEM yang menunjukkan contoh-contoh sudut penjuru cembung terpunar, α_1 , α_2 , α_3 , dan α_4 , yang telah dirujuk dalam pengukuran satah berindeks tinggi (Pembesaran SEM: 50X)

sudut potong bawah penjuru (α) ditentukan supaya perbandingan dengan nilai teori bagi nilai sudut berkenaan boleh dibuat. Nilai teori ini diperolehi daripada teori kristalografi silikon seperti yang dinyatakan dalam seksyen 2.4 [9]. Definisi sudut penjuru terpotong (α) adalah seperti yang ditunjukkan secara grafik dalam Rajah 14 di mana terdapat empat contoh sudut penjuru terpotong, α_1 , α_2 , α_3 , dan α_4 , yang dipertimbangkan bagi mengenal pasti satah-satah baru tersebut.

Pengukuran sudut, α , telah dibuat pada empat struktur penjuru cembung yang mengalami keadaan potong bawah di mana keputusannya adalah seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 3. Nilai purata bagi sudut-sudut tersebut iaitu 152.18° diambil kira bagi membuat perbandingan dengan nilai teori sudut penjuru cembung terpunar seperti yang diberikan dalam Jadual 2. Nilai purata sudut penjuru cembung terpunar yang didapati dari hasil fabrikasi ini adalah hampir kepada nilai sudut bagi satah silikon (411) iaitu 151.20° [9]. Oleh yang demikian, satah silikon (411) boleh dianggap sebagai satah baru silikon yang muncul pada penjuru cembung yang terpunar pada kepekatan KOH 35% dan suhu 80°C .

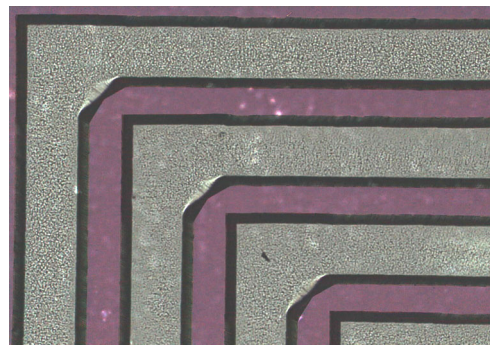
Rajah 15 menunjukkan keadaan struktur potong bawah penjuru cembung terpotong yang terhasil sepanjang proses punaran bagi mendapatkan kedalaman alunan $216\ \mu\text{m}$ dengan kadar punaran $52\ \mu\text{m}/\text{jam}$. Keadaan ini kelihatan berlaku secara perlahan dan menjadi bertambah ketara apabila masa punaran meningkat. Ini menunjukkan kebergantungan keadaan potong bawah penjuru terhadap kedalaman alunan yang hendak dipunarkan.

Jadual 3 Keputusan pengukuran sudut-sudut penjuru terpunar, α

Contoh sudut	Nilai sudut ($^{\circ}$)
α_1	149.10 $^{\circ}$
α_2	155.64 $^{\circ}$
α_3	152.27 $^{\circ}$
α_4	150.90 $^{\circ}$



(a) Jam pertama



(b) Jam kedua



(c) Jam ketiga



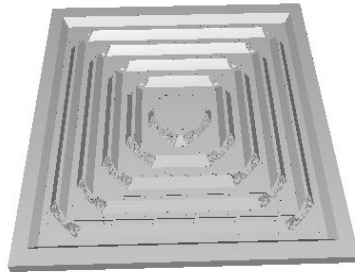
(d) Jam keempat

Rajah 15 Gambar rajah mikroskop optik yang menunjukkan perambatan proses punaran diafragma beralun tanpa topeng pampasan di mana hanya suku bahagian diafragma sahaja ditunjukkan (Pembesaran mikroskop optik:5X)

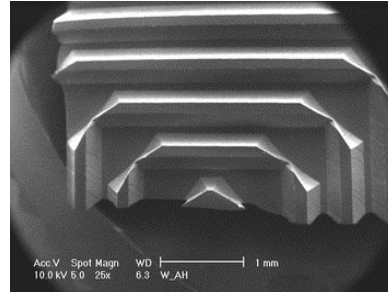
Rajah 16 menunjukkan perbandingan hasil-hasil punaran yang didapati dari kajian simulasi dan eksperimen. Bagi hasil-hasil punaran yang diperolehi dari eksperimen, gambaran struktur tiga dimensi diafragma beralun telah diambil dengan menggunakan SEM.

Simulasi

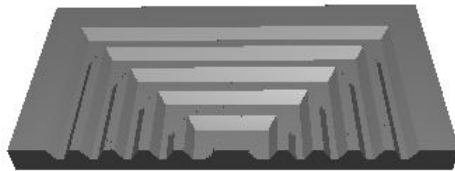
Eksperimen



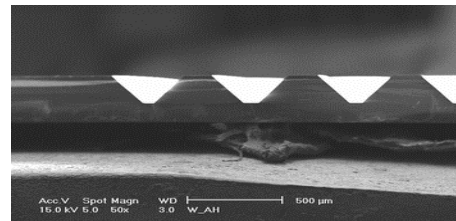
(a)



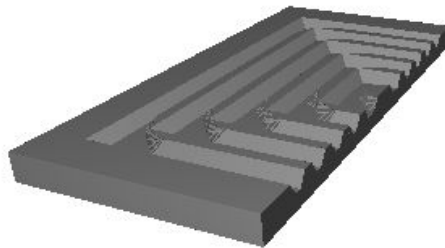
(a) Pembesaran SEM: 19X



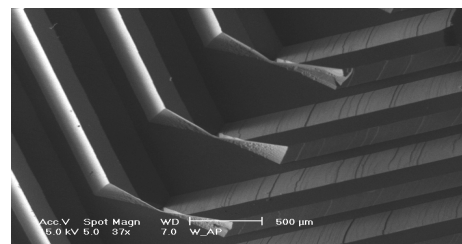
(b)



(b) Pembesaran SEM: 34X



(c)



(c) Pembesaran SEM: 34X

Rajah 16 Perbandingan hasil-hasil fabrikasi diafragma beralun secara simulasi dan eksperimen dengan menggunakan topeng punaran tanpa pampasan penjuru: (a) gambar tiga dimensi, (b) pandangan keratan rentas, dan (c) pandangan dekat sebahagian struktur-struktur penjuru cembung yang terpunar

Dalam kajian eksperimen yang telah dijalankan sebelum ini, jumlah potong bawah penjuru yang maksima didapati berlaku dalam arah 45° kepada satah rata (100) [9]. Bagi pengiraan parameter jumlah potong bawah, hanya nilai purata sudut-sudut potong bawah penjuru sahaja digunakan, di mana dalam kes ini hanya pada bahagian struktur tengah diafragma atau bahagian tombol sahaja yang dipertimbangkan, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 17. Nilai-nilai purata sudut ini, α_{ave} iaitu 150.18° dan 151.2° yang didapati dari kajian simulasi dan eksperimen seperti yang diberikan dalam Jadual 4 digunakan untuk mendapatkan nilai-nilai simulasi dan pengukuran jumlah potong bawah penjuru. Rajah 18 menunjukkan gambar dua dimensi keadaan potong bawah

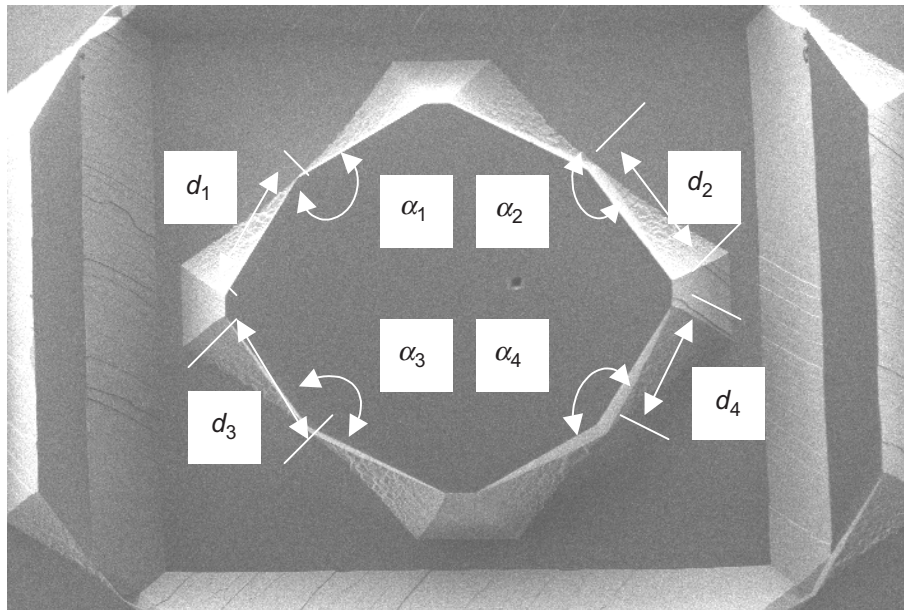
penjuru yang memberi takrifan bagi parameter-parameter x , y , ψ , dan σ , di mana nilai parameter d juga ditetapkan dengan mengira nilai purata yang didapati dari hasil simulasi dan eksperimen yang diberikan dalam Jadual 5.

Merujuk kepada jadual ini, terdapat perbezaan yang ketara di antara nilai-nilai d yang diperolehi dari kajian simulasi dan eksperimen. Perbezaan ini adalah disebabkan oleh faktor kadar punaran larutan KOH yang digunakan dalam fabrikasi di makmal Institut Kejuruteraan Mikro dan Nanoelektronik, Universiti Kebangsaan Malaysia (IMEN) adalah berlainan dengan yang telah digunakan dalam laporan penyelidikan sebelum ini. Kadar punaran yang digunakan dalam fabrikasi diafragma beralun ini adalah $52 \mu\text{m/jam}$ dalam larutan KOH yang berkepekatan 35% dan suhu 80°C manakala nilai teori adalah $72.55 \mu\text{m/jam}$ [13]. Kadar punaran yang berbeza adalah berpunca daripada larutan punaran KOH yang digunakan dalam eksperimen ini, mungkin tidak mempunyai sifat-sifat yang sama seperti yang telah digunakan bagi menghasilkan nilai teori walaupun keadaan punaran adalah serupa, di mana tiada maklumat yang lengkap mengenai komposisi larutan pemunaran KOH yang disediakan dalam kajian teori tersebut [13]. Kestabilan suhu yang dicapai semasa proses punaran dilakukan juga menyumbang kepada perbezaan nilai di atas [1] di mana kaedah menetapkan suhu punaran secara manual digunakan dalam kajian ini.

Dalam kajian ini, penentuan keadaan punaran bagi proses punaran KOH secara simulasi dan fabrikasi dibuat dengan merujuk kepada keputusan-keputusan kajian eksperimen proses punaran yang telah dijalankan di makmal Institut Kejuruteraan Mikro dan Nanoelektronik, Universiti Kebangsaan Malaysia (IMEN) [14]. Kajian tersebut telah dilakukan ke atas wafer silikon jenis-n berorientasi (100) dengan menggunakan kepekatan larutan KOH (gred elektronik, J. T. Baker) yang berlainan iaitu dari 15% hingga 55%, manakala suhu punaran yang digunakan adalah di antara 65°C dan 85°C . Keadaan punaran yang mempunyai kepekatan KOH 35% pada suhu 80°C didapati merupakan kepekatan dan suhu optima untuk mendapatkan kadar punaran dan kualiti permukaan yang tinggi bagi struktur silikon yang dipunarkan.

Nilai-nilai parameter x , y , ψ , dan σ , yang telah didapati secara pengiraan dengan merujuk kepada nilai eksperimen dan simulasi sudut terpotong, α dan jarak d diberikan dalam Jadual 6. Jumlah maksima bagi nilai potong bawah penjuru dalam arah 45° kepada satah rata, $U_{\langle 100 \rangle}$ ditentukan secara teori dan didapati sebanyak $363.50 \mu\text{m}$ [8]. Walau bagaimanapun, dengan merujuk kepada Jadual 7, nilai yang didapati dari hasil fabrikasi adalah $271.71 \mu\text{m}$. Nilai ini didapati lebih kecil dari nilai teori dan mempunyai ralat peratus sebanyak 25.25%. Perbezaan ini adalah disebabkan oleh kenyataan yang telah diberikan di atas iaitu mengenai perbezaan kadar punaran yang dihasilkan daripada eksperimen dan simulasi. Kadar punaran yang didapati daripada kaedah eksperimen bagi satah silikon yang baru muncul pada struktur penjuru yang terpunar dalam kes ini iaitu satah (411) adalah $60.4 \mu\text{m/jam}$.

Dalam kes jumlah potong bawah penjuru dalam arah $\langle 110 \rangle$, $U_{\langle 110 \rangle}$ pula, nilai teori yang didapati adalah $685.60 \mu\text{m}$ [8] manakala nilai yang diperolehi secara



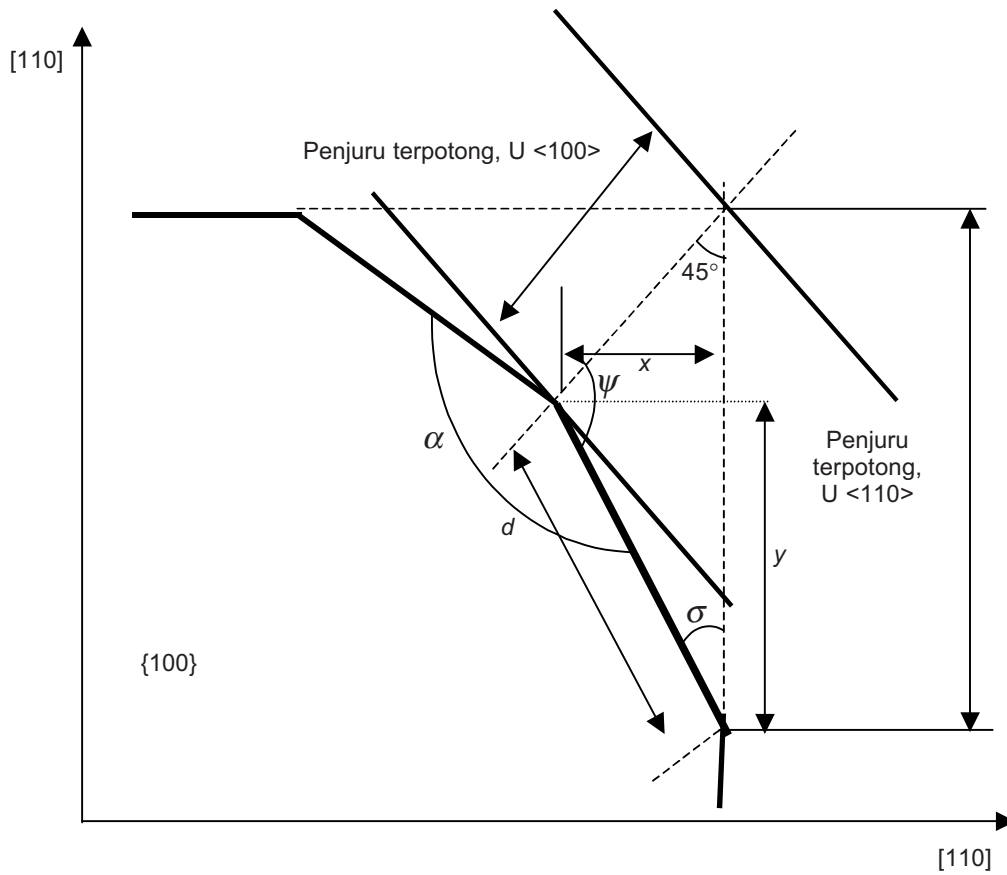
Rajah 17 Gambar rajah SEM bagi struktur bahagian tengah diafragma yang terpunar di mana contoh-contoh sudut potong bawah penjuru, α_1 , α_2 , α_3 , dan α_4 , dan parameter d_1 , d_2 , d_3 , dan d_4 yang telah dirujuk dalam pengukuran jumlah potong bawah penjuru (Pembesaran SEM: 50X)

Jadual 4 Nilai-nilai pengukuran dan simulasi sudut penjuru terpunar

Contoh sudut	Nilai sudut (darjah)	
	Pengukuran	Simulasi
α_1	149.10	148.41
α_2	155.64	150.21
α_3	152.27	150.73
α_4	150.90	151.50

Jadual 5 Nilai-nilai pengukuran dan simulasi bagi nilai parameter d

Contoh sudut	Contoh parameter	Nilai parameter d (μm)	
		Pengukuran	Simulasi
α_1	d_1	360.21	509.57
α_2	d_2	375.83	521.31
α_3	d_3	370.70	513.12
α_4	d_4	381.27	535.01



Rajah 18 Pandangan atas dua-dimensi suatu penjuru cembung yang terpunar dengan takrifan sudut terhasil, α dan parameter-parameter d , x , y , ψ , dan σ bagi rujukan penentuan jumlah penjuru terpotong

eksperimen adalah $510.74 \mu\text{m}$. Nilai yang didapati dari hasil fabrikasi adalah lebih kecil dari nilai teori dan mempunyai ralat peratus sebanyak 25.50%. Kadar punaran yang didapati daripada kaedah eksperimen bagi satah silikon yang baru muncul pada struktur penjuru yang terpunar dalam kes ini iaitu satah (411) seperti yang telah ditentukan sebelum ini adalah $113.5 \mu\text{m/jam}$. Perbezaan ini juga disebabkan oleh

Jadual 6 Nilai-nilai parameter bagi pengiraan jumlah potong bawah penjuru yang merujuk kepada Rajah 13

Kajian	α (°)	x (μm)	y (μm)	d (μm)	ψ (°)	σ (°)
Eksperimen	152.18	245	280	372.06	103.91	31.09
Simulasi	150.21	285	435	520.05	104.90	30.10

Jadual 7 Perbandingan nilai maksima potong bawah penjuru dalam arah 45° kepada satah rata (100) dan dalam arah $\langle 110 \rangle$

Kajian	Penjuru terpotong $U_{\langle 100 \rangle} (\mu\text{m})$	Penjuru terpotong $U_{\langle 110 \rangle} (\mu\text{m})$
Simulasi	379.70	713.85
Pengukuran	271.71	510.74
Teori	363.50	685.60

faktor yang sama seperti dalam kes penjuru terpotong dalam arah 45° kepada satah rata, $U_{\langle 100 \rangle}$.

4.0 KESIMPULAN

Kemunculan satah-satah silikon berindeks tinggi telah didapati berlaku pada kesemua struktur penjuru cembung diafragma beralun yang dihasilkan dengan menggunakan topeng tanpa pampasan semasa proses fabrikasi dijalankan. Satah-satah silikon tersebut telah dikenal pasti sebagai satah-satah silikon (411). Ini membuktikan bahawa diafragma beralun yang dihasilkan dengan melalui proses punaran anisotropik dengan kepekatan KOH 35% dan suhu 80°C menghasilkan penjuru-penjuru cembung terpunar yang disebabkan oleh kemunculan satah-satah silikon (411). Kadar punaran maksimum bagi satah ini yang didapati dari kajian eksperimen ini adalah $60.4 \mu\text{m}/\text{jam}$ berbanding dengan kadar punaran silikon bersatah (100) iaitu $113.5 \mu\text{m}/\text{jam}$. Keputusan ini menunjukkan bahawa kadar punaran satah-satah silikon (411) adalah lebih pantas dari kadar punaran satah-satah silikon (100) yang mengakibatkan keadaan potong bawah penjuru berlaku. Jumlah potong bawah penjuru yang telah ditentukan secara purata dari hasil ukuran yang diperolehi adalah sebanyak $271.71 \mu\text{m}$ terpotong dalam arah 45° kepada satah rata (100) dan $510.74 \mu\text{m}$ dalam arah $\langle 110 \rangle$. Oleh yang demikian, kewujudan keadaan potong bawah penjuru ini akan menjejaskan permukaan efektif diafragma dan perlu diatasi bagi mencapai diafragma beralun yang berprestasi tinggi.

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] Madou, M. 1997. *Fundamentals of Microfabrication*. Boca Raton: CRC Press.
- [2] 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.
- [3] Offereins, H. L., K. Kuhl, and H. Sandmaier. 1991. Methods for the Fabrication of Convex Corners in Anisotropic Etching of (100) Silicon in Aqueous KOH. *Sensors and Actuators A*. 25-27: 9-13.
- [4] Marchetti, J., Y. He, O. Than, and S. Akkaraju. 1998. Efficient Process Development for Bulk Silicon Etching Using Cellular Automata Simulation Techniques. SPIE Symposium on Micromachining and Microfabrication, Micromachined Devices and Components. Santa Clara. 83-89.
- [5] Soin, N. 2005. Reka Bentuk dan Fabrikasi Diafram Beralun Silikon untuk Sensor Tekanan Mems. Ph. D. Thesis. Universiti Kebangsaan Malaysia.
- [6] Haringx, J. A. 1950. The Rigidity of Corrugated Diaphragms. *Applied Science Research*. A2: 295-325
- [7] Bean, K. E. 1978. Anisotropic Etching of Silicon. *IEEE Trans. Electron Dev.* 25(10): 1185-93.
- [8] Enoksson, P. 1997. Novel Resonant Micromachined Silicon Devices for Fluid Applications. Ph. D. Thesis. Royal Institute of Technology.
- [9] Runyan, W. R. 1965. *Silicon Semiconductor Technology*. New York: McGraw Hill.
- [10] Lee, D. B. 1969. Anisotropic Etching of Silicon. *Journal of Applied Physics*. 40: 4569-4574.
- [11] 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.
- [12] Mayer, G. K., H. L. Offereins, L. 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. *Journal of Electrochemistry*. 137(12): 3947-3951.
- [13] Resnik, D., D. Vrtacnik, U. Aljancic, and S. Amon. 2000. Wet Etching of Silicon Structures Bounded by (311) Sidewalls. *Microelectronic Engineering*. 51-52: 555-566.
- [14] Noor, M. M. 2004. Kajian Punaran Basah Tidak Isotropik Secara Eksperimen untuk Fabrikasi Membran Silikon. M. Sc. Thesis. Universiti Kebangsaan Malaysia.