

Kajian Mengenai Kebersandaran Pembentukan Keadaan Potong Bawah Penjuru Terhadap Jenis Larutan Pemunar dalam Penghasilan Diafram Beralun Silikon

¹Norhayati Soin & ²Burhanuddin Yeop Majlis

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

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

Received: 18 August 2005

ABSTRAK

Kertas kerja ini membentangkan hasil kajian simulasi mengenai kesan jenis larutan pemunar ke atas keadaan potong bawah penjuru yang terhasil pada struktur-struktur penjuru cembung diafram beralun silikon (100). Diafram yang terlibat dalam kajian ini dihasilkan dengan menggunakan teknik punaran anisotropik dengan larutan kalium hidroksida (KOH) dan larutan tetrametil amonia hidroksida (TMAH) sebagai pemunar. Kerja-kerja simulasi telah dijalankan dengan menggunakan perisian proses punaran anisotropik Intellisuite. Berdasarkan geometri struktur penjuru cembung terpunar dan kemunculan satah-satah baru silikon, diafram beralun silikon yang dipunarkan di dalam larutan TMAH didapati mengalami keadaan potong bawah penjuru yang lebih ketara berbanding diafram yang dipunarkan dalam larutan KOH.

ABSTRACT

This paper describes the simulation study of the effect of the etchant type on the convex corner phenomenon of the silicon (100) corrugated diaphragm during the anisotropic etching process. Potassium hydroxide (KOH) and tetramethyl ammonium hydroxide (TMAH) were used as an etchant in order to produce the diaphragm respectively. The Intellisuite process simulation software has been used in this simulation. Based on the geometrical etched structure of the convex corners and the emergent of the new silicon planes, the convex corner-undercutting phenomenon was found to be much more pronounced when TMAH is used as the etchant.

Kata kunci: Diafram beralun, punaran anisotropik, satah baru silikon, potong bawah penjuru

PENGENALAN

Pada masa ini pembangunan yang penting telah dihasilkan dalam membina struktur-struktur sistem mikro elektro mekanikal (MEMS) dengan menggunakan teknologi-teknologi yang berasal dari fabrikasi litar bersepadu. Fabrikasi struktur-

struktur kecil MEMS ini memerlukan pemesian mikro yang amat tepat. Dalam kes ini, proses punaran basah anisotropik telah dikenal pasti sebagai salah satu proses yang merupakan asas kepada fabrikasi struktur-struktur MEMS dan terdapat banyak kajian yang telah dibuat secara eksperimen dan teori untuk memahami mekanisme proses punaran ini (Shikida *et al.* 2001). Seidel *et al.* (1990) dan Glembocki *et al.* (1991) telah menghasilkan model-model bagi proses punaran ini dan mengkaji mengenai ciri-ciri punaran ini di bawah pelbagai keadaan punaran.

Proses punaran basah ini melibatkan silikon berhablur tunggal yang dipunarkan secara kimia dengan menggunakan larutan pemunat. Sehingga kini larutan alkali berair termasuk larutan berair organik tetrametil amonia hidroksida (TMAH) (Shikida *et al.* 2001; Merlos *et al.* 1993), ethylenediamine-pyrocatechol (EDP), atau hydrazine-pyrocatechol dan larutan-larutan berair inorganik seperti potassium hidroksida (KOH) dan ammonium hidroksida (NH_4OH) telah digunakan sebagai larutan pemunat (Glembocki *et al.* 1991). Larutan pemunat yang paling popular di antara larutan-larutan pemunat tersebut adalah larutan yang berasaskan KOH. Larutan pemunat yang berasaskan KOH ini mempunyai ciri-ciri seperti darjah keberacunan yang rendah dan bersifat ketakmudabakaran yang menyebabkan kos proses fabrikasi yang rendah, pengelolaan yang mudah dan pencemaran persekitaran yang rendah (Seidel *et al.* 1990).

Sungguhpun banyak penyelidikan mengenai proses punaran basah tersebut telah dilaporkan sebelum ini, masalah-masalah serius dalam pemahaman dan pengawalan yang melibatkan proses-proses fizik dan elektrokimia masih lagi wujud (Schroder *et al.* 1998). Masalah-masalah ini merupakan perkara yang amat penting dan perlu diberi perhatian dari aspek ekonomi bagi proses fabrikasi sesuatu peranti. Kelakuan punaran ini mestilah dipastikan akan kestabilan dan kebolehmalamannya, terutamanya nisbah anisotropi (dalam punaran dibahagikan dengan jumlah penjuru terpunar (Seidel *et al.* 1990)) yang sepatutnya mempunyai kebolehkeluaran semula dengan kejitian yang tinggi dan permukaan-permukaan terpunar yang licin.

Dalam kajian-kajian sebelum ini, suatu perbandingan maklumat-maklumat mengenai proses punaran yang dihasilkan telah menunjukkan dengan jelasnya akan kewujudan masalah-masalah tersebut (Seidel *et al.* 1990; Tellier dan Durand 1997; Kendall 1990; Zavracky 1997). Struktur bentuk yang dihasilkan dari punaran anisotropik tidak hanya bergantung pada orientasi hablur, kepekatan KOH, suhu punaran, kepekatan dopan boron, jenis larutan pemunat (Seidel *et al.* 1990) tetapi juga kepada bentuk dan penjajaran topeng punaran (Glembocki *et al.* 1991).

Kebiasaannya struktur-struktur yang dibentuk dengan menggunakan punaran anisotropik ini terdiri daripada penjuru cembung seperti yang terdapat dalam sensor tekanan dan mikro pam (Li *et al.* 2000). Struktur-struktur tersebut adalah seperti diafram-diafram bertombol, alur-alur berbentuk V dan lain-lain struktur yang melibatkan penjuru cembung yang selalu mengalami keadaan penjuru terpunar dan memerlukan topeng-topeng yang direka bentuk dengan

struktur-struktur tambahan pampasan penjuru. Keadaan potong bawah penjuru ini merupakan kesan yang tidak dikehendaki dalam pemesinan mikro silikon seperti dalam fabrikasi sensor-sensor mekanikal dengan penjuru cembung yang sempurna adalah penting bagi spesifikasi peranti yang baik.

Objektif kertas kerja ini adalah untuk membuat kajian secara simulasi mengenai pengaruh jenis larutan pemunar ke atas pembentukan keadaan potong bawah penjuru yang terhasil pada diafram beralun silikon. Ini meliputi kerja-kerja pencirian struktur-struktur penjuru cembung yang terpunar secara geometri dan pengenalpastian satah-satah silikon baru yang muncul pada permukaan terpunar tersebut.

PERISIAN SIMULASI PUNARAN ANISOTROPIK INTELLISUITE

Dalam kertas ini kajian simulasi dijalankan dengan menggunakan perisian reka bentuk berbantu komputer (CAD) IntelliSense Software Versi 7.1 yang dibangunkan oleh Intellisuite Corporation (Finch *et al.* 2004). Perisian ini mampu menyediakan kemudahan simulasi yang mempunyai ketepatan yang tinggi untuk peranti-peranti MEMS daripada 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 (Marchetti *et al.* 1998).

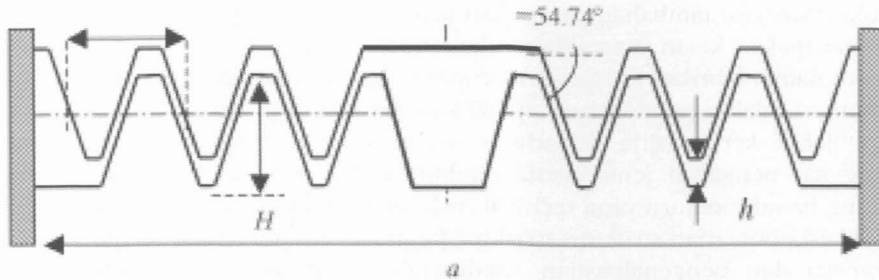
Perisian ini merupakan suatu perisian bersepadu yang kompleks yang boleh membantu pereka-pereka bentuk mengoptimumkan peranti-peranti MEMS dengan memberikan mereka capaian kepada pengkalan data pengilangan dan dengan membenarkan mereka untuk memodelkan keseluruhan turutan pengilangan suatu peranti serta seterusnya mensimulasi ciri-ciri untuk mendapatkan hasil simulasi secara visual tanpa menggunakan kemudahan pengilangan yang sebenar (Marchetti *et al.* 1998).

STRUKTUR DIAFRAM

Struktur diafram yang terlibat dalam kajian ini adalah seperti yang ditunjukkan dalam *Rajah 1*. Diafram tersebut adalah berbentuk segi empat dan bersaiz 7.2 mm x 7.2 mm serta mempunyai corak alunan berbentuk segi empat sepusat. Jumlah alunan yang terdapat di atas diafram tersebut adalah sebanyak tiga. Struktur-struktur alunan tersebut akan direalisasikan dengan menggunakan teknik punaran anisotropik. Parameter-parameter struktur diafram beralun tersebut adalah seperti yang disenaraikan dalam *Jadual 1*. Reka bentuk topeng punaran yang akan digunakan dalam proses punaran bagi pembentukan struktur diafram beralun ini adalah seperti yang ditunjukkan dalam *Rajah 2*.

ANALISIS CIRI-CIRI KEADAAN POTONG BAWAH PENJURU

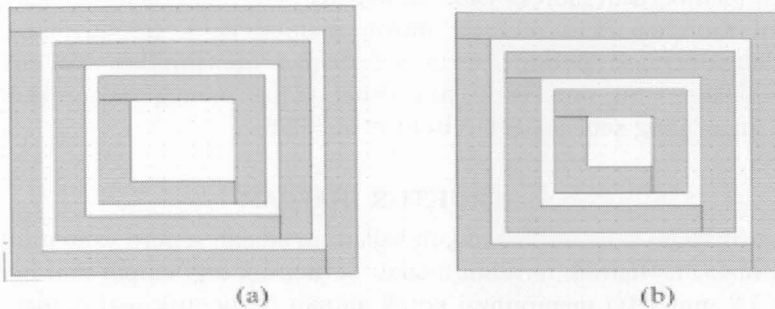
Bahagian ini membincangkan mengenai ciri-ciri keadaan potong bawah penjuru yang terbentuk pada penjuru cembung reka bentuk diafram beralun yang diperoleh daripada kerja-kerja simulasi. Pencirian keadaan potong bawah penjuru



Rajah 1: Pandangan keratan rentas diafram beralun silikon

JADUAL 1
Parameter-parameter bagi struktur diafram beralun silikon

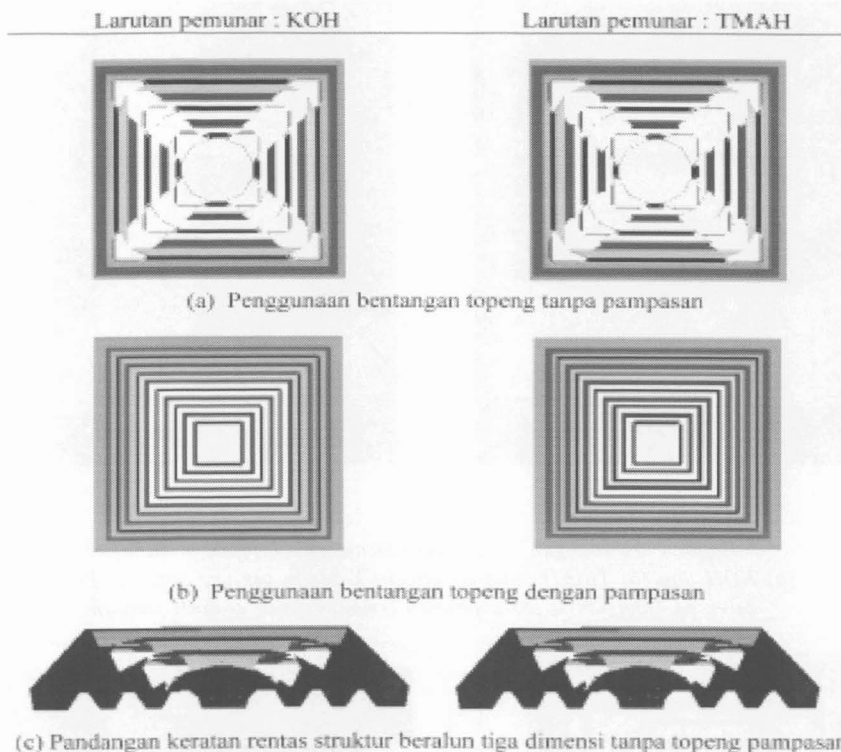
Parameter	Simbol	Nilai
Panjang sisi	a	7.2 mm
Tebal diafram	h	284 μm
Dalam alunan	H	216 μm
Jarak gelombang	,	584 μm
Sudut di antara satah (100) dan dinding tepi	θ	54.74°



Rajah 2: Bentangan topeng bagi struktur diafram beralun silikon bahagian (a) atas dan (b) bawah

tersebut termasuklah mengenal pasti kemunculan satah-satah silikon yang baru pada penjurong cembung semasa proses punaran, jumlah keadaan potong bawah penjurong yang berlaku pada arah 45° kepada satah permukaan rata (100) dan arah $\langle 110 \rangle$.

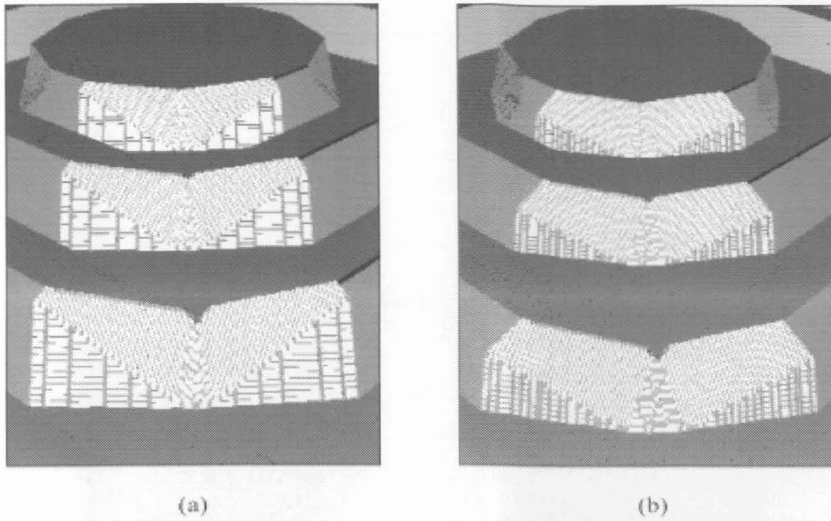
Keputusan kajian ini adalah seperti yang ditunjukkan dalam *Rajah 3* dan *4*. Memandangkan simulasi proses punaran ini telah dilakukan pada kedua-dua bahagian wafer silikon tanpa menggunakan bentangan topeng pampasan, kelihatan terdapat lubang-lubang yang terhasil pada kesemua penjurong cembung



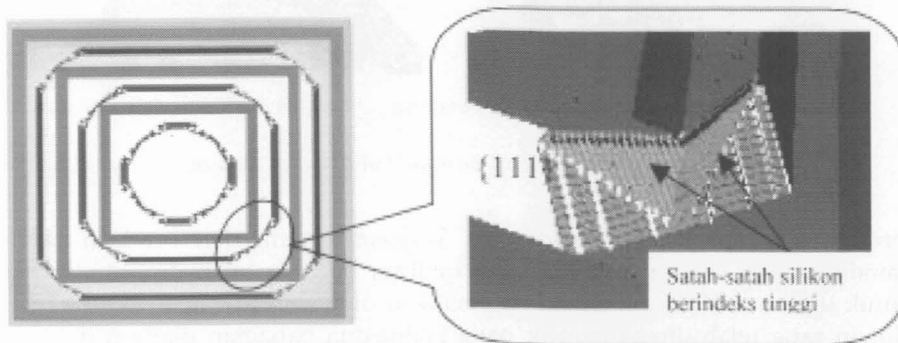
Rajah 3: Hasil-hasil simulasi dengan perisian AnisE untuk diafram beralun silikon

diafram beralun. Bagi memudahkan kerja-kerja pencirian keadaan potong bawah penjuru, hanya bahagian atas diafram beralun telah dipertimbangkan untuk tujuan analisis. Ini adalah disebabkan oleh persamaan struktur-struktur alunan yang telah direka bentuk pada kedua-dua bahagian diafram itu secara geometri. Tambahan pula jika kedua-dua bahagian atas dan bawah dipertimbangkan untuk proses punaran, pencirian keadaan potong bawah penjuru tidak boleh dilakukan kerana wujudnya lubang-lubang pada setiap struktur penjuru cembung hasil daripada proses punaran dari arah atas dan bawah diafram. Daripada keputusan ini, jika pandangan dibuat secara bersudut tepat pada bahagian atas diafram, keadaan potong bawah penjuru yang terhasil boleh disifatkan seperti yang diberikan dalam *Rajah 5* dan *6*. Diafram beralun tersebut memulakan pengubahsuaian ke atas bentuk semua penjuru cembung dengan menukarnya kepada bentuk-bentuk yang berlainan yang mempunyai satah berindeks tinggi.

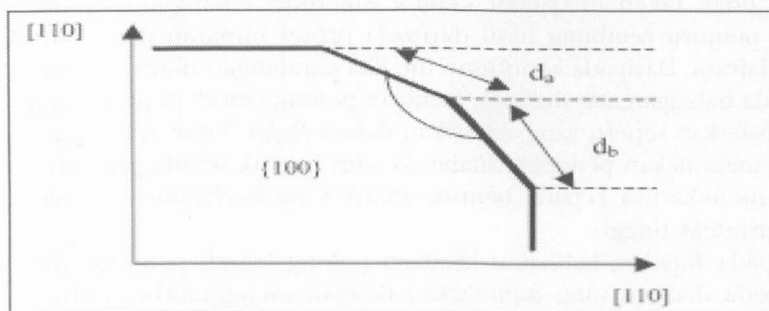
Daripada *Rajah 4*, kelihatan keadaan potong bawah penjuru adalah lebih ketara pada diafram yang dipunarkan dengan menggunakan larutan TMAH berbanding dengan larutan KOH. Secara pandangan kasar, perbezaan ciri-ciri keadaan potong bawah penjuru yang didapati daripada hasil simulasi tersebut



Rajah 4: Pandangan secara dekat kesan jenis larutan pemunat: (a) KOH dan (b) TMAH terhadap ciri-ciri keadaan penjuru terpunar pada beberapa bahagian struktur penjuru cembung pada diafram beralun



Rajah 5: Hasil simulasi pandangan atas dan fenomena potong bawah penjuru pada diafram beralun



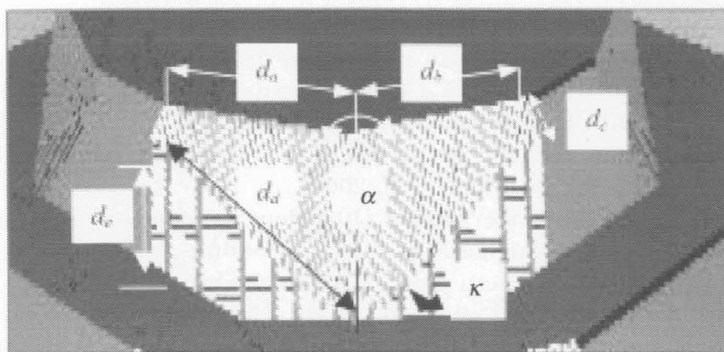
Rajah 6: Pandangan atas dua dimensi suatu penjuru cembung yang terpunar dengan takrifan sudut terhasil, α dan jarak-jarak d_a dan d_b

lebih ketara berlaku pada sudut, κ di antara satah yang baru muncul dan bahagian bawah wafer silikon dengan nilai sudut ini adalah lebih kecil dalam kes larutan pemunar TMAH (rujuk kepada *Rajah 7*). Oleh itu, kawasan bahagian atas penjuru cembung yang telah terpunar atau permukaan satah baru muncul dalam larutan TMAH adalah lebih besar berbanding dengan hasil penjuru cembung yang terpunar dalam larutan KOH. Kenyataan ini disahkan apabila pengukuran bagi dimensi-dimensi struktur potong bawah penjuru yang terhasil dibuat dengan kemudahan perkakas pengukuran yang terdapat dalam perisian AnisE yang dihasilkan oleh Intellisuite Corporation (<http://www.intellisuitesoftware>) dan seterusnya ditunjukkan seperti dalam Jadual 2. Takrifan bagi parameter-parameter yang terdapat dalam Jadual 2 boleh didapati dalam *Rajah 7*.

Daripada hasil pengukuran ini, sudut penjuru cembung yang terpunar, α , dalam larutan TMAH didapati lebih kecil daripada hasil yang didapati dari proses punaran KOH apabila rujukan dibuat kepada *Rajah 5* dengan nilai sudut penjuru cembung yang terpunar, α , yang kecil menandakan keadaan penjuru cembung yang terpunar yang lebih ketara. Bagi proses punaran KOH pula, sudut α yang telah diukur daripada kajian ini mempunyai nilai yang lebih

JADUAL 2
Pencirian keadaan potong bawah penjuru yang dihasilkan oleh larutan pemunar KOH dan TMAH

Parameter	Larutan KOH	Larutan TMAH
d_a (μm)	521.34	541.92
d_b (μm)	518.70	543.86
d_c (μm)	20.89	80.11
d_d (μm)	575.18	584.37
d_e (μm)	204.25	135.92
κ ($^\circ$)	22.80	12.43
α ($^\circ$)	150.21	145.80



Rajah 7: Takrifan bagi parameter-parameter yang digunakan bagi pencirian potong bawah penjuru untuk rujukan Jadual 1

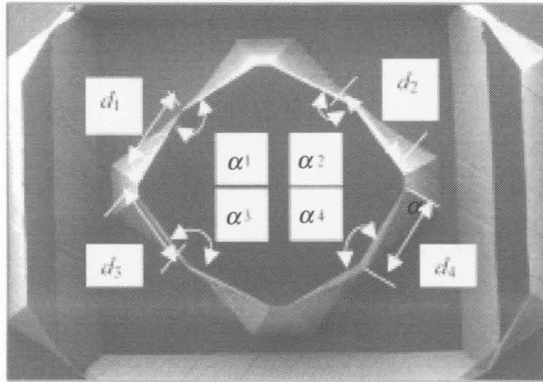
daripada apa yang dihasilkan oleh larutan TMAH dan nilainya hampir serupa dengan satah-satah {411} iaitu 151.20° (Runyan 1965) manakala untuk proses punaran TMAH sudut α mempunyai nilai yang kurang dari satah-satah {411}. Oleh yang demikian, diafram beralun yang dipunarkan di dalam larutan TMAH mengalami keadaan potong bawah penjuru yang lebih ketara berbanding jika ia dipunarkan dalam larutan KOH. Keputusan simulasi ini adalah bertepatan dengan kajian uji kaji yang telah dibuat mengenai proses punaran anisotropik silikon di dalam larutan TMAH sebelum ini (Sonphao dan Chaisirikul 2001).

Nilai-nilai parameter yang terdapat dalam Jadual 2 adalah berdasarkan pengukuran yang dibuat ke atas empat struktur penjuru cembung yang terdapat pada bahagian tengah diafram beralun yang masing-masing menghasilkan sudut terpunar $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ dan α_4 dan parameter-parameter d_1, d_2, d_3 dan d_4 seperti yang ditunjukkan dalam *Rajah 7* dengan kemudiannya nilai purata sahaja yang dipertimbangkan. Dalam kes ini parameter d_a dan d_b dianggap mempunyai nilai yang sama berdasarkan nilai-nilai yang terdapat dalam Jadual 2 dengan nilai puratanya sahaja akan dipertimbangkan bagi menghasilkan nilai-nilai bagi parameter d_1, d_2, d_3 dan d_4 . Bagi tujuan kerja-kerja pencirian keadaan potong bawah penjuru yang seterusnya hanya nilai purata parameter-parameter d_1, d_2, d_3 dan d_4 iaitu d_{ave} dan nilai purata parameter-parameter sudut terpunar $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ dan α_4 iaitu α_{ave} yang akan dipertimbangkan.

Disamping itu, kaedah yang lebih jelas lagi bagi menunjukkan perbezaan keadaan potong bawah penjuru yang-diperolehi dari hasil punaran ke atas diafram beralun ini dengan menggunakan kedua-dua larutan punaran yang berbeza ini adalah melalui pengukuran jumlah penjuru yang terpunar dari arah 45° kepada satah permukaan rata (100), $U_{\langle 100 \rangle}$ dan dari arah $\langle 110 \rangle$, $U_{\langle 110 \rangle}$. Pengukuran ini dilakukan berdasarkan nilai-nilai purata sudut terpotong, α_{ave} dan panjang sisi, d_{ave} yang diperolehi dari hasil simulasi di mana pengiraan dibuat dengan merujuk kepada *Rajah 9*. *Rajah* ini menunjukkan model dua dimensi suatu penjuru cembung terpunar yang dilihat dari atas di mana parameter-parameter x, y, ψ, σ dan seterusnya $U_{\langle 100 \rangle}$ dan $U_{\langle 110 \rangle}$ ditentukan dengan menggunakan prinsip trigonometri seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 3.

Dengan merujuk kepada keputusan dari Jadual 3, jumlah potong bawah penjuru dalam arah $\langle 100 \rangle$ dan $\langle 110 \rangle$ bagi diafram beralun yang dipunarkan dengan menggunakan larutan TMAH didapati lebih besar berbanding dengan yang dipunarkan dengan larutan KOH. Ini mengesahkan lagi kajian uji kaji yang telah dibuat mengenai proses punaran anisotropik silikon di dalam larutan TMAH sebelum ini (Sonphao *et al.* 2001).

Keadaan punaran wafer silikon {100} dengan menggunakan larutan KOH dan TMAH untuk menghasilkan diafram beralun mengikut spesifikasi yang telah diberikan adalah seperti yang telah diringkaskan dalam Jadual 4. Penentuan keadaan proses simulasi punaran KOH dibuat dengan merujuk kepada keputusan-keputusan kajian uji kaji proses punaran yang telah dijalankan di makmal Institut Kejuruteraan Mikro dan Nanoelektronik, Universiti Kebangsaan Malaysia (IMEN-UKM) (Mimiwati 2003). Kajian tersebut telah dilakukan ke atas

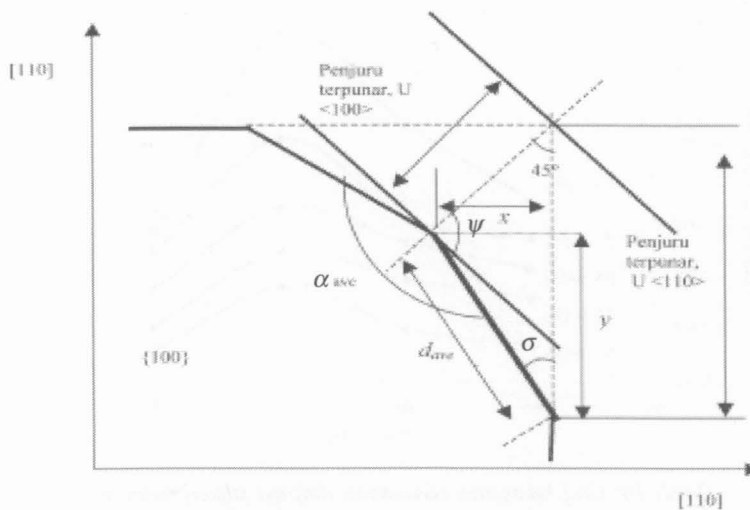


Rajah 8: Contoh-contoh struktur penjuru cembung terpunar, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, dan α_4 dan parameter parameter d_1, d_2, d_3 dan d_4 sebagai rujukan dalam pengukuran jumlah potong bawah penjuru

JADUAL 3

Keputusan pengiraan jumlah potong bawah penjuru dan parameter-parameter yang berkenaan dengan merujuk kepada Rajah 8

Jenis Pemunat	d_{ave} (μm)	α_{ave} ($^\circ$)	ψ ($^\circ$)	σ ($^\circ$)	$U_{\langle 100 \rangle}$ (μm)	$U_{\langle 110 \rangle}$ (μm)
KOH	520.02	150.21	104.90	30.10	368.81	710.67
TMAH	541.89	148.8	105.6	28.90	376.20	738.11



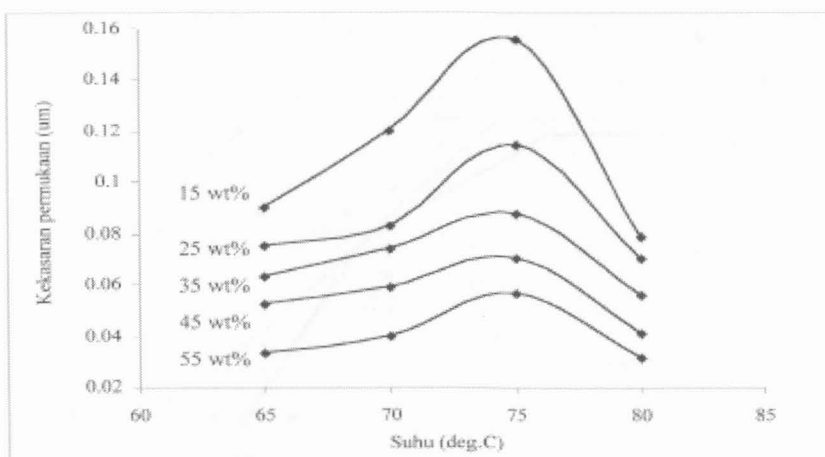
Rajah 9: Pandangan atas dua dimensi suatu penjuru cembung yang terpunar dengan takrifan sudut terhasil, α_{ave} dan parameter-parameter d_{ave}, x, y, ψ dan σ bagi rujukan penentuan jumlah penjuru cembung terpunar

JADUAL 4
Ringkasan maklumat keadaan punaran untuk proses simulasi

Parameter punaran	Larutan KOH	Larutan TMAH
Suhu (°C)	80	80
Kepekatan larutan pemunaran	35%	35%
Masa punaran (jam)	3.5	7.0
Kadar punaran ($\mu\text{m}/\text{jam}$)		
Si {100}	72.55	30.13
Si {110}	111.7	53.85
Purata ketebalan diafram (μm)	38.50	38.50
Purata kedalaman alunan (μm)	≈ 216	≈ 216

wafer silikon jenis-n berorientasi (100) dengan menggunakan kepekatan larutan KOH yang berlainan iaitu dari 15% hingga 55%, manakala suhu punaran yang digunakan adalah bernilai dari 65°C hingga 85°C.

Keputusan kajian ini terhadap kekasaran permukaan wafer silikon yang telah dipunarkan adalah seperti yang ditunjukkan dalam *Rajah 10*. Kenaikan suhu menyebabkan kekasaran permukaan silikon meningkat sehingga kepada suatu takat maksimum iaitu 75°C untuk semua keadaan kepekatan larutan KOH. Walau bagaimanapun, pada semua keadaan kepekatan, graf dalam *Rajah 10* menunjukkan penurunan kekasaran permukaan selepas suhu 75°C.



Rajah 10: Graf kekasaran permukaan diafram silikon melawan suhu pada kepekatan larutan KOH yang berlainan

KESIMPULAN

Kajian ini telah membuktikan bahawa ciri-ciri potong bawah penjuru bagi diafram beralun silikon dipengaruhi oleh jenis larutan pemunar. Kepentingan pengaruh faktor ini boleh ditentukan dengan saiz geometri struktur terpunar dan kemunculan satah-satah baru silikon pada penjuru cembung yang terpunar. Hasil dari kajian ini, permukaan penjuru cembung yang terpunar dapat disimpulkan terdiri daripada kemunculan satah-satah silikon baru yang berindeks tinggi yang berada berhampiran dengan nilai satah-satah {411} dan {511}. Oleh yang demikian pemilihan larutan pemunar yang sesuai adalah penting bagi proses penghasilan diafram beralun silikon dengan menggunakan teknik punaran anisotropik untuk mengurangkan keadaan potong bawah penjuru. Walau bagaimanapun bagi penghasilan struktur diafram yang sempurna tanpa keadaan penjuru terpotong, penggunaan topeng pampasan penjuru dan pengawalan keadaan punaran perlu dipertimbangkan. Keputusan dari kajian ini juga menunjukkan bahawa kekasaran permukaan yang tinggi atau kualiti permukaan yang kurang baik terhasil pada struktur terpunar pada keadaan punaran yang mempunyai suatu suhu yang malar dan larutan KOH yang berkepekatan rendah manakala larutan KOH yang mempunyai kepekatan yang tinggi akan menghasilkan kekasaran permukaan yang rendah atau kualiti permukaan yang sangat baik.

RUJUKAN

- FINCH, N., Y. HE and J. MARCHETTI. 2004. 'General MEMS Process Physics Simulation and its Applications' IntelliSense Corporation, 36 Jonspin Road, Wilmington, MA USA.
- GLEMBOCKI, O. J., E. D. PALIK, G. R DE GUEL and D. L KENDALL. 1991. Hydration model for the molarity dependence of etch rate of Si in aqueous alkali hydroxides. *J. Electrochem. Soc.* **138(4)**: 1055-1063.
- http://www.intellisensesoftware.com/datasheets/Intellisuite_2004.pdf
- KENDALL, D. L. 1990. A new theory for the anisotropic etching of silicon and some underdeveloped chemical micromachining concepts. *Vac. Sci. Technol. A* **8(4)**: 3598-3605.
- LI, X., L. RONGMING, M. JIANMIN and M. BAO. 2000. Study on convex-corner undercutting formed by masked-maskless etching in aqueous KOH. *J. Micromech. Microeng.* **10**: 309-313.
- MARCHETTI, J., Y. He, O. THAN and S. AKKARAJU. 1998. Efficient process development for bulk silicon etching using cellular automata simulation techniques. Dalam *Symposium on Micromachining and Microfabrication, Micromachined Devices and Components*, hlmn. 86-92. Santa Clara, CA USA.
- MERLOS, A., M. ACERO, M. BAO, J. BAUSSELS and J. ESTEVE. 1993. TMAH/IPA anisotropic etching characteristics. *Sensors and Actuators A* **37-38**: 737-43.
- NOOR, M. M. 2004. Kajian punaran basah tidak isotropik secara eksperimen untuk fabrikasi membran silikon. Tesis Sarjana. Universiti Kebangsaan Malaysia, Bangi, Selangor.

- PALIK, E. D., O. J. GLEBOCKI, I. HEARD, P. S. BURNO and L. TENERZ. 1991. Etching roughness for (100) silicon surface in aqueous KOH. *Journal of Applied Physics* **70(6)**: 3291-3300.
- RUNYAN, W. R. 1965. *Silicon Semiconductor Technology*. New York: McGraw Hill.
- SCHRODER, H., E. OBERMEIER and A. STECKENBORN. 1998. Effects of etching mask properties on the anisotropy ration in anisotropic etching of {100} silicon on aqueous KOH. *J. Micromech. Microeng.* **8**: 99-103.
- SEIDEL, H., L. CSEPREGI, H. HEUBERGER and H. BAUMGARTEL. 1990. Anisotropic etching of crystalline silicon in alkaline solutions I. *J. Electrochem. Soc.* **137**: 3612-26.
- SHIKIDA, M., T. MASUDA, D. UCHIKAWA and K. SATO. 2001. Surface roughness of single-crystal silicon etched by TMAH solution. *Sensors and Actuators A*. **90**: 223-231.
- SONPHAO, W. and S. CHAISIRIKUL. 2001. Silicon Anisotropic etching of TMAH solution. *ISIE 2001*, hlmn. 2049-2051, Pusan, Korea.
- TABATA, O., R. ASAH, K. FUNABASHI, K. SHIMAOKA and S. SUGIYA. 1992. Anisotropic etching of silicon in TMAH solutions. *Sensors and Actuators A* **34**: 51-57.
- TELLIER, C. R. and S. S. DURAND. 1997. Micromachining of (hhl) silicon structures: experiments and 3D simulation of etched shapes. *Sensors and Actuators A*. **60**: 168-175.
- ZAVRACKY, P. M. 1997. Comparative studies of TMAH and KOH for anisotropic etching of silicon. *Electrochem. Soc. Proc.* **97(5)**: 102-117.