

PROSES ETSA ANISOTROPIK SILIKON (Si) DALAM LARUTAN TETRAMETIL AMONIUM HIDROKSIDA : ISOPROPIL ALKOHOL : PYRAZINE DAN KARAKTERISASINYA

Slamet Widodo dan Nanang Sudrajad

PPET-LIPI, Jl. Sangkuriang Komp. LIPI Bandung 40135

No.Telp/Fax:022-2504660/022-2504659,

E-mail: slametwidodo50@gmail.com dan slametwi_dodo@yahoo.co.id

ABSTRAK

Makalah ini menjelaskan karakteristik etsa anisotropik dari kristal tunggal Si dalam larutan tetrametil amonium hidroksida (TMAH) : isopropil alkohol (IPA) : pyrazine. Dengan penambahan IPA untuk larutan TMAH, ada perbaikan dalam kerataan di bagian depan etsa dan pengurangan undercutting diamati, tetapi laju etsa pada Si (100) menurun. Pada Si (100) tingkat etsa ditingkatkan dengan penambahan larutan pyrazine. Laju etsa :0,8 μm / menit pada Si (100), lebih cepat sebesar 13% dari laju etsa untuk larutan 20% berat TMAH. Larutan pyrazine 0,005-g/mL, laju etsa pada Si (100) menurun ketika pyrazine ditambahkan ke larutan. Dengan penambahan pyrazine ke 25% berat larutan TMAH, tidak ada variasi yang signifikan dalam kerataan di bagian depan etsa, dan ratio undercutting berkurang 30 ~ 50 %. Hasil ini menunjukkan bahwa etsa anisotropik dari Si (100) menggunakan TMAH : IPA : larutan pyrazine menjadikan metode yang powerful untuk mewujudkan pembuatan devais mikro elektro-mekanis sistem (MEMS) yang terintegrasi.

Kata kunci : etsa anisotropik, TMAH : IPA : larutan pyrazine, laju etsa, kerataan, undercutting

ABSTRACT

This paper describes the anisotropic etching characteristics of single-crystal Si in tetramethylammonium hydroxide (TMAH) : isopropyl alcohol (IPA) : pyrazine solutions. With the addition of IPA to the TMAH solution, an improvement in the flatness on the etching front and a reduction in undercutting were observed, but the etch rate on (100) Si was decreased. However, the (100) Si etch rate was improved by the addition of pyrazine. An etch rate of 0.8 $\mu\text{m}/\text{min}$ on (100) Si, which was faster by 13 % than the etch rate for a 20-wt.% solution of pure TMAH, was obtained using 20-wt.% TMAH : 0.005-g/ml pyrazine solutions, but the etch rate on (100) Si was decreased when more pyrazine was added to the solution. With the addition of pyrazine to a 25-wt.% TMAH solution, no significant variations in flatness on the etching front were observed, and the undercutting ratio was reduced by 30 ~ 50 %. These results indicate that anisotropic etching of Si using TMAH : IPA : pyrazine solutions provides a powerful and versatile method for realizing of intelligent micro- electro-mechanical systems (MEMS) integrated with signal-processing and compensation circuits.

Keywords: Anisotropic etching, TMAH : IPA : pyrazine solutions, etching-rate, flatness, undercutting

PENDAHULUAN

Baru-baru ini, telah terjadi peningkatan minat dalam pembuatan mikro-elektro-mekanis sistem (Micro Electro Mechanical Systems = MEMS) menggunakan teknologi micromachining silikon (Si) [1, 2]. Karena sifat listrik dan mekanik yang unggul [3], kristal tunggal Si telah diterapkan pada berbagai MEMS. Di antara berbagai

teknologi micromachining, teknologi micromachining untuk bulk Si adalah teknik yang sangat penting. Secara khusus, membuat devais mikro tiga dimensi dengan etsa basah anisotropik dari kristal tunggal Si adalah penting dalam aplikasi MEMS. Jika mikro-sensor intelligent dan mikroaktuator terintegrasi dengan sinyal - pengolahan dan kompensasi sirkuit

harus kembali alized -, perlu untuk menggunakan teknik etsa anisotropik untuk Si dalam fabrikasi konvensional dan pengecoran Si [4]. Kerataan permukaan ter-etsa merupakan faktor kritis dalam menentukan karakteristik perangkat, terutama fabrikasi mikro-diafragma pada Si memerlukan ketebalan yang seragam di seluruh permukaan ter-etsa [5]. Pada undercutting dilakukan setelah etsa dalam (deep etching, sangat sulit untuk membuat struktur yang diinginkan [6]. Dalam kasus mikro-diafragma dibentuk oleh etsa anisotropik basah, khususnya sebuah penyimpangan yang signifikan atau tidak seragam (nonuniformity) ada di permukaan mikro-diafragma ter-etsa, stres dalam mikro-diafragma akan terganggu. Hal ini menyebabkan variasi yang signifikan dalam sensitivitas, offset, dan jangkauan dinamis dari perangkat yang dihasilkan [7].

Etsa anisotropik sering digunakan untuk kristal tunggal Si dengan larutan KOH [7], NaOH [3], Etilen-Diamin - Pyrocatechol (EDP) [8], larutan hidrazin air [9], dan tetra-metil-amonium hidroksida (TMAH) [4]. EDP dan larutan hidrazin yang beracun, stabil dan karena itu, tidak mudah untuk ditangani. KOH dan NaOH memiliki sifat etsa anisotropik yang sangat baik, tetapi penggunaan KOH biasanya terbatas pada pengolahan, karena kontaminasi sehingga tidak direkomendasikan didalam ruang bersih (clean room). Untuk pertimbangan kompatibilitas proses, dalam etsa ini harus cocok dengan proses manufaktur seperti CMOS. Sejak TMAH tidak memiliki ion kontaminan alkali sehingga dapat digunakan dalam pengolahan sirkuit terpadu (IC).

Karakteristik etsa anisotropik TMAH yang mirip dengan KOH dalam hal karakteristik etsa. TMAH juga digunakan untuk menghapus photoresists positif. Karena laju pengikisan rendah pada oksida termal, hasil yang memuaskan dapat dilihat. [10-12]. Namun, permukaan ter-etsa kasar pada konsentrasi rendah dan undercuttings terjadi pada konsentrasi tinggi. Untuk mengatasi kelemahan ini, bekerja pada larutan TMAH dan larutan IPA (isopropil alkohol) baru-baru ini dilakukan.

Meskipun penambahan IPA meningkatkan kehalusan permukaan dan mengurangi undercuttings, mengurangi laju etsa silikon (Si) dalam TMAH [13,14]. Dalam penelitian ini dilakukan penelitian karakteristik etsa anisotropik dari kristal tunggal Si dalam larutan pyrazine ($C_3H_4N_2$) ditambahkan ke dalam TMAH dan larutan IPA pada variabel konsentrasi dan waktu yang berbeda-beda.

EKSPERIMEN

Bahan awal terdiri dari wafer silikon (Si) dengan ketebalan : $380 \pm 25 \mu\text{m}$, orientasi $< 100 >$ dengan diameter wafer: 3 – inch tipe- p dan tipe- n, dengan resistivitas masing-masing adalah $10,64 \sim 11,78 \Omega \text{ cm}$ dan $4 \sim 6 \Omega \text{ cm}$. Pembersihan dengan metode RCA dilakukan sebelum percobaan dimulai, oksida asli telah dihilangkan dengan larutan buffer selama 10 detik. Untuk mengamati variasi dalam laju etsa dengan larutan IPA dan pyrazine, digunakan larutan TMAH pada konsentrasi 10,15, 20, dan 25% berat. Pengaruh penambahan 8,5 dan 17% volume larutan dari IPA itu dievaluasi. Pengaruh penambahan 0,001 sampai 0,003 g/mL larutan pyrazine juga dipelajari. Suhu etsa itu ditentukan pada suhu 80, 85, 90, atau 95 °C. Pengaruh suhu dan pengaruh penambahan IPA serta pyrazine kemudian dianalisis. Untuk meningkatkan kerataan permukaan ter-etsa dan untuk mengkompensasi bawah – pemotongan (undercutting) sudut cembung, ditambahkan kedua IPA sebesar 8,5 dan 17% volume dan pyrazine dengan 0,001 sampai 0,005 g/mL larutan TMAH. Suhu etsa dipertahankan pada 80 °C dalam penelitian ini. Untuk mencegah variasi dalam komposisi etsa, digunakan Pyrex etch-bath dilengkapi dengan pendingin refluks.

Sampel ditempatkan pada posisi vertikal sehingga gelembung hidrogen bisa dengan mudah keluar dari sampel. Kedalaman etsa, kerataan permukaan ter-etsa, diperiksa dengan menggunakan sebuah profilometer, scanning electron microscopy (SEM).

HASIL DAN PEMBAHASAN

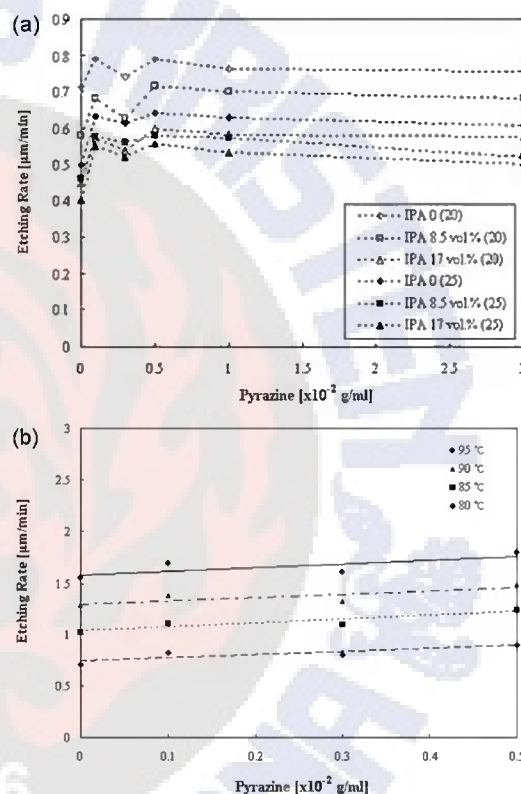
Laju etsa dalam Si (100) dengan larutan TMAH adalah $0,3 \sim 1,28 \mu\text{m}/\text{menit}$ tergantung pada konsentrasi dan temperatur dari larutan TMAH,

dan laju etsa dari Si (111) dalam larutan TMAH adalah 0,013 ~ 0,061 $\mu\text{m}/\text{menit}$. Semakin tinggi konsentrasi TMAH, semakin rendah laju etsa. Semakin tinggi suhu ETSA, semakin tinggi laju etsa karena kenaikan laju reaksi kimia dengan meningkatnya suhu.

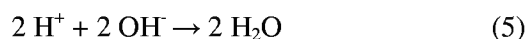
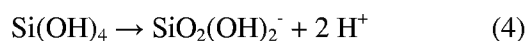
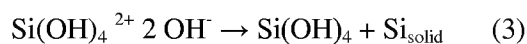
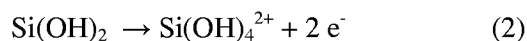
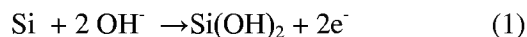
Selektivitas Si (111) dan (100) adalah sekitar 0,03 ~ 0,05. Larutan IPA dengan kadar sebesar 8,5 dan 17% volume ditambahkan ke dalam larutan TMAH, laju etsa pada Si (111) dan Si (100) berkurang masing-masing sekitar 7 ~ 8% dan 10 ~ 15%. Selain itu, penambahan IPA tidak mempengaruhi selektivitas. **Gambar 1** (a) menunjukkan variasi dalam laju etsa untuk Si (100) dalam 20% berat TMAH dan 25% berat larutan TMAH dengan penambahan 8,5 dan 17% volume IPA dan pyrazine dengan kadar 0,001; 0,003; 0,005; 0,01; dan 0,03 g/mL. Laju etsa tertinggi Si (100) diperoleh dalam 20% berat TMAH : larutan pyrazine 0,005 g/mL. Ketika jumlah pyrazine melebihi 0,005 g/mL, laju etsa menurun. **Gambar 1** (b) menunjukkan pengaruh suhu dan penambahan pyrazine pada laju etsa. Seperti ditunjukkan oleh gambar, laju etsa meningkat secara signifikan dengan suhu semakin meningkat dalam larutan 20% berat TMAH. Laju etsa 1,79 $\mu\text{m}/\text{menit}$ diperoleh pada 20% berat TMAH : larutan pyrazine 0,005 g/mL pada suhu 95 °C. Namun, menambahkan pyrazine tidak secara signifikan mempengaruhi laju etsa.

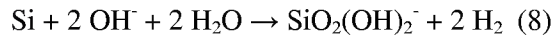
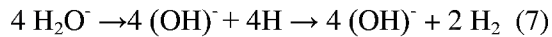
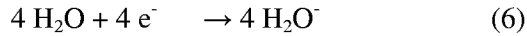
Mekanisme etsa anisotropik dari Si adalah: dua ion hidroksida dapat mengikat dengan dua ikatan (dangling bond) dari atom Si (100) permukaan, menyuntikkan dua elektron ke pita konduksi seperti pada persamaan (1). Selanjutnya tulang punggung Si – Si dari Si(OH)₂ atom kisi tetangga harus dipecah untuk mendapatkan kompleks Si yang larut, yang bermuatan positif, persamaan (2). Si-hidroksida kompleks bereaksi lebih lanjut dengan dua ion hidroksida untuk memberikan asam orthosilic, persamaan (3). Si(OH)₄ dapat meninggalkan permukaan padat oleh difusi, tetapi dalam larutan elektrolit, itu tidak stabil karena larutan dengan pH tinggi. Dalam lingkungan ini, kompleks dapat dibentuk, persamaan (4). Kelebihan elektron pada pita konduksi dapat

ditransfer ke molekul air seperti pada persamaan (5) dan (6), menghasilkan ion hidroksida dan hidrogen, persamaan (7). Pada reaksi dan pada pengamatan bahwa hidrogen berkembang selama etsa pada rasio stoikiometri H₂/Si, dengan langkah oksidasi-reduksi ion hidroksida dan air bereaksi dengan permukaan Si, diikuti oleh tahap chelation melibatkan pyrazine: Reaksi keseluruhan diwakili oleh persamaan (8).



Gambar 1. (a) Variasi laju etsa pada Si (100) kristal tunggal sebagai fungsi penambahan IPA dan pyrazine pada 20 dan 25 % berat larutan TMAH pada suhu 80 °C. dan 1(b) Variasi dari laju etsa pada kristal tunggal Si (100) sebagai fungsi suhu etsa dan penambahan pyrazine pada 20% berat-larutan TMAH.





Dalam struktur formula dari molekuler TMAH yang digunakan dalam penelitian ini, pada persamaan (9), karena ikatan lemah molekul OH (CH₃)₄N⁺ dan ion OH⁻, ion OH⁻ dipisahkan, dan akhirnya, ion OH⁻ dipasok ke reaksi etsa:

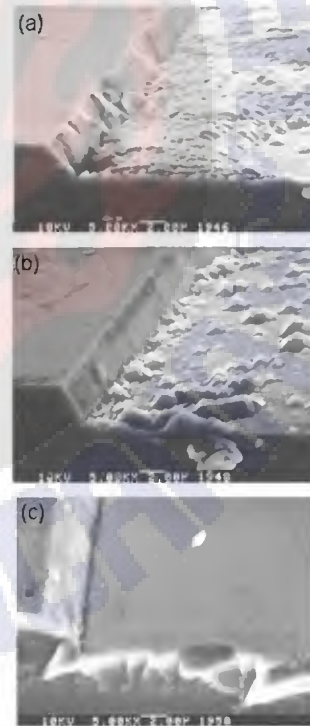


Ketika TMAH di-doping dengan Si, sehingga nilai pH menurun. Hal ini terkait dengan besarnya ion hidroksil dari larutan mungkin tidak memberikan kontribusi signifikan terhadap mekanisme etsa Si (100) sejak peningkatan laju etsa diamati untuk larutan TMAH terkonsentrasi diolah dengan Si. Nilai pH dapat menurunkan melalui pemisahan produk reaksi etsa Si, yang bertindak sebagai asam lemah seperti yang ditunjukkan pada persamaan (4) dan (5). Ion-ion hidroksil yang diperlukan untuk melarutkan Si harus diproduksi pada permukaan Si, dan telah dilakukan bahwa air berdisosiasi untuk membentuk ion OH⁻. Bila menggunakan TMAH-pyrazine (C₄H₄N₂) berbasis larutan, peran utama pyrazine yang dianggap mengkonversi Si(OH)₄ menjadi anion yang lebih kompleks, meningkatkan kelarutan produk etsa. Namun efek ini hampir jenuh pada konsentrasi 5 g pyrazine per liter TMAH. Berdasarkan analisis kimia dari produk reaksi dan pada pengamatan bahwa hidrogen berkembang selama etsa pada rasio stoikiometri H₂/Si, dilakukan langkah oksidasi-reduksi dengan ion hidroksida dan air bereaksi dengan permukaan Si, diikuti oleh tahap chelation melibatkan pyrazine.

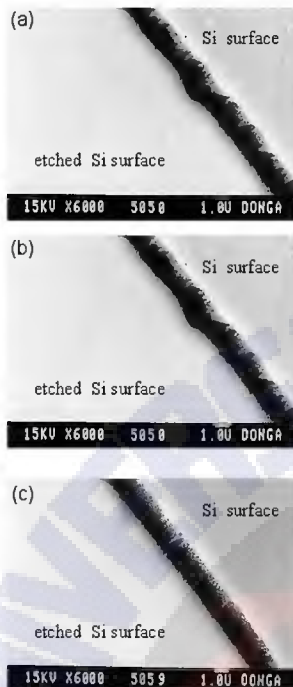
Diasumsikan chelation untuk menjadi lambat, kecuali pyrazine ditambahkan pada konsentrasi 5 g/L. Dalam hal ini, kita mempertimbangkan reaksi oksidasi menjadi tingkat batas. Pyrazine diasumsikan untuk bertindak terutama sebagai agen untuk meningkatkan kelarutan senyawa Si, sehingga menambah laju reaksi dan akhirnya mengarah ke laju etsa meningkat. Kepadatan hillocks menurun dengan meningkatnya konsentrasi larutan TMAH. Dalam larutan 25%

berat. TMAH, permukaan ter-etsa tampaknya sangat bersih. Namun, ketika konsentrasi larutan TMAH lebih rendah dari 15% berat, permukaan ter-etsa menunjukkan karakteristik kurang baik dalam hal kekasaran.

Gambar 2 menunjukkan SEM mikrograf dari permukaan ter-etsa dalam 10% berat larutan TMAH sebagai fungsi dari penambahan IPA. Ketika IPA ditambahkan ke 10% berat larutan TMAH, kepadatan hillocks turun signifikan, dan berkualitas tinggi permukaan ter-etsa dicapai. Merlos et al. [13] melaporkan bahwa tingkat etch dari Si menurun ketika IPA ditambahkan pada larutan 25% berat TMAH. Dalam penelitian ini, kami juga mengidentifikasi bahwa laju etsa lebih tinggi dari Si dalam larutan 10% berat TMAH lebih tinggi dari itu dalam 25% berat larutan TMAH.



Gambar 2. SEM mikrograf dari variasi dalam kerataan permukaan ter-etsa dari kristal tunggal Si dalam 10% berat larutan TMAH untuk penambahan (a) 0, (b) 8,5 dan (c) 17% volume IPA.

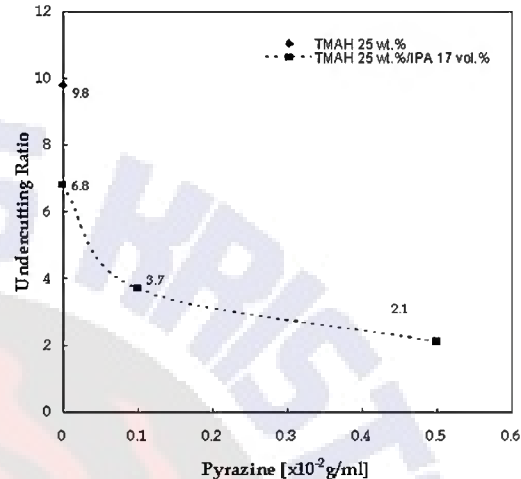


Gambar 3. SEM gambar variasi dalam kerataan permukaan ter-etsa dari kristal tunggal Si untuk (a) 25% berat TMAH, (b) 25% berat TMAH : 17% volume IPA, dan (c) 25% berat TMAH : 17% volume IPA : Pyrazine 0,005 g/mL.

Gambar 3 menunjukkan mikrograf SEM permukaan Si ter-etsa dalam larutan TMAH 25% berat dengan variasi aditif. Kualitas permukaan yang sangat baik dalam 25% berat TMAH. Penambahan IPA kedalam larutan TMAH 25% berat tidak signifikan memburuk kerataan ter-etsa permukaan. Penambahan pyrazine kedalam larutan 25% berat TMAH, meningkatkan laju etsa. Penambahan pyrazine tidak secara signifikan mempengaruhi kualitas permukaan ter-etsa. Oleh karena itu, perlu ditingkatkan laju etsa sementara tetap dipertahankan kualitas yang baik dari permukaan ter-etsa dengan menambahkan pyrazine kedalam larutan 25% berat TMAH.

Ketika etsa dilakukan untuk waktu yang lama terjadi deformasi yaitu sudutnya mejadi cembung. Untuk mendapatkan struktur ter-etsa yang diinginkan, deformasi ini, disebut undercutting harus dikompensasi. Perlu diperiksa efek kompensasi efek dari kedua IPA dan pyrazine pada pola persegi panjang $1 \times 0,25$

mm^2 . Rasio undercutting (UR) didefinisikan oleh $\text{UR} = l / h$, di mana l adalah jarak dari tepi pola untuk bagian ter-etsa dan h adalah kedalaman ter-etsa.



Gambar 4. Variasi undercutting sebagai fungsi dari penambahan pyrazine kepada kedua larutan TMAH dan campuran TMAH – IPA

Gambar 4 menunjukkan variasi dalam undercutting ratio sebagai fungsi dari penambahan IPA dan pyrazine. Untuk larutan TMAH 25% berat murni, UR adalah 9,8. Seperti IPA ditambahkan ke dalam larutan 25% berat TMAH, UR menurun menjadi 6,8. Nilai UR menurun sampai 3,7 dan 2,1 ketika 0,001 dan 0,005 g/mL dari pyrazine, masing-masing ditambahkan. Penambahan IPA ke dalam larutan 25% berat TMAH, penurunan UR menjadi sekitar 30%, tetapi penambahan pyrazine untuk larutan TMAH 25% berat menurunkan UR lebih dari penambahan IPA saja.

KESIMPULAN

Jika larutan TMAH digunakan sebagai etsa anisotropik pada kristal tunggal silikon (Si), karakteristik etsa sangat baik dicapai. Laju etsa Si (100) meningkat dengan penambahan pyrazine kedalam TMAH dan TMAH : larutan IPA. Jika 0,005 g/mL pyrazine ditambahkan pada 20% berat larutan TMAH, laju etsa Si (100) tertinggi. Sedangkan penambahan lebih pyrazine menurunkan laju etsa Si (100). Suhu etsa mempengaruhi laju etsa dari Si (100) sangat buruk. Laju etsa $1,79 \mu\text{m}/\text{menit}$ diperoleh pada

20% berat TMAH dalam larutan pyrazine 0,005 g/mL pada suhu 95 °C. Kualitas teretsa permukaan pada konsentrasi yang lebih rendah dari TMAH sangat kasar, tetapi laju etsa sangat tinggi. Jika IPA ditambahkan ke dalam 10% berat TMAH, permukaan yang sangat halus diperoleh untuk sampel ter-etsa dalam 10% berat TMAH : larutan IPA 17% volume. Penambahan pyrazine ke TMAH dan TMAH : larutan IPA tidak menurunkan kualitas permukaan ter-etsa. Selanjutnya, dievaluasi pengaruh penambahan pyrazine dalam kompensasi untuk undercutting dalam larutan TMAH. Penambahan IPA dan pyrazine dalam larutan TMAH menjadi sangat baik untuk undercutting pada sudut cembung. Dari hasil ini etsa anisotropik menggunakan TMAH : IPA : larutan pyrazine jelas membuat proses yang powerful / kuat dan serbaguna untuk mewujudkan pembuatan devais berbagai jenis mikro-sensor terintegrasi, mikro-aktuator, dan mikro struktur dan devais MEMS.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. K. Shan, G. X. Liu, B. I. Kim, B. C. Shin, S. C. Kim and Y. S. Yu, *J. Korean Phys. Soc.* **42**, 1157 (2003).
- [2] J. Y. Park, D. S. Lee, J. H. Lee and Y. H. Bae, *J. Korean Phys. Soc.* **43**, 963 (2003).
- [3] K. E. Petersen, *Proc. IEEE.* **70**, 420 (1982).
- [4] O. Tabata, R. Asahi, H. Funabashi and S. Sugiyama, *Tech. Dig. Transducers '91*, (San Francisco, 1991), p. 811.
- [5] M. Hirata, K. Suzuki and H. Tanigawa, *Sensors and Actuators A* **13**, 63 (1988).
- [6] Y. Linden, L. Tenez, J. Tiren and B. Hok, *Sensors and Actuators A* **16**, 67 (1989).
- [7] H. Seidel, L. Csepregi, A. Heuberger and H. Baumgartel, *J. Electrochem. Soc.* **137**, 3612 (1990).
- [8] A. Reiseman, M. Berkenblit, S. A. Chan, F. B. Kaufman and D. C. Gree, *J. Electrochem. Soc.* **126**, 1406 (1979).
- [9] M. Mehregany and S. D. Senturia, *Sensors and Actuators A* **113**, 375 (1988).
- [10] U. Schnakenberg, W. Benecke, B. Lochel, S. Ullerich and P. Lange, *Sensors and Actuators A* **25**, 1 (1991).
- [11] O. Tabata, R. Asahi and S. Sugiyama, *Tech. Dig. of the 9th Sensor Symp.*, (Arcadia

Ichigaya, 1990), p. 15.

- [12] O. Tabata, *Sensors and Actuators A* **53**, 335 (1996).
- [13] A. Merlos, M. Acero, M. H. Bao, J. Bausells and J. Esteve, *Sensors and Actuators A* **37**, 737 (1993).
- [14] G. S. Chung and C. S. Park, *J. KEEME* **10**, 481 (1997)

DISKUSI

Mohon ditunjukkan hasil – hasil penelitian.