

LAMPIRAN A MICROMACHINING

1. MIKROFABRIKASI UNTUK MEMS

Silicon micromachining merupakan faktor kunci dalam perkembangan MEMS yang sangat pesat. *Silicon micromachining* merupakan cara membentuk bagian-bagian mekanis berukuran mikroskopis dari substrat silikon atau di atas substrat silikon. *Silicon micromachining* terdiri atas dua teknologi:

a. *Bulk micromachining*

Struktur-struktur dibentuk dalam substrat silikon (*bulk*).

b. *Surface micromachining*

Lapisan-lapisan mikromekanis dibentuk dari lapisan-lapisan dan film-film yang dideposisikan pada permukaan silikon.

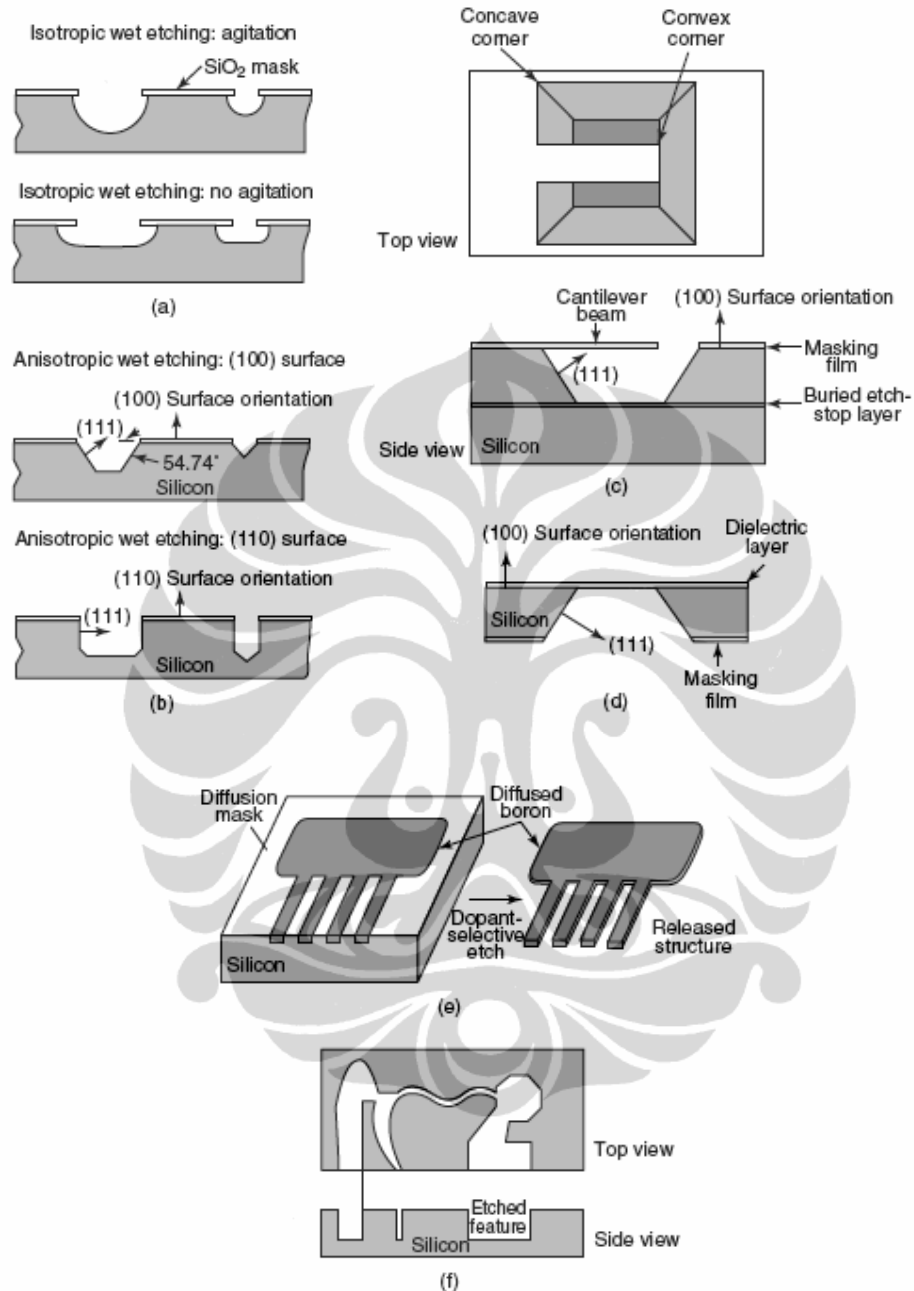
Bulk micromachining dan *surface micromachining* adalah dua bidang proses *micromachining* silikon; ikatan wafer silikon biasanya dibutuhkan dalam mikrofabrikasi silikon. Teknik mikrofabrikasi LIGA dan *three dimensional* (3D) digunakan untuk rasio beraspect tinggi dan fabrikasi mikrostruktur 3D untuk MEMS [6].

1.1 Teknik *Bulk micromachining*

Teknik *bulk micromachining* dikembangkan pada tahun 1960-an dan memungkinkan penghapusan selektif sejumlah silikon yang signifikan dari substrat untuk membentuk membran pada satu sisi dari wafer, beragam celah, lubang atau struktur-struktur lain seperti yang terlihat pada gambar A.1.

Teknik tersebut dibagi menjadi *wet etching* dan *dry etching* silikon menurut fase dari proses *etching* tersebut. Jika proses *etching* yang digunakan cair (hampir keseluruhannya merupakan bahan kimia berair), maka tekniknya disebut sebagai *wet etching*. Sedangkan jika proses *etching* berbentuk uap atau plasma, tekniknya dikenal sebagai *dry etching*.

Bulk micromachining adalah teknologi yang paling matang di antara kedua teknik *silicon micromachining* yang telah disebutkan di atas. Teknik ini muncul pada awal tahun 1960-an dan telah dipakai untuk fabrikasi mikrostruktur yang berbeda-beda. Teknik tersebut digunakan dalam manufaktur mayoritas divais-divais komersial.



Gambar A.1 Bulk silicon micromachining: (a) Etching isotropik; (b) Etching anisotropik; (c) Etching anisotropik dengan lapisan etch-stop yang terkubur etching anisotropik dengan lapisan etch-stop; (d) membran dielektrik yang dilepaskan dengan bulk etching di sisi belakang struktur; (e) dopant dependent wet etching. (f) dry etching anisotropik. [6]

Istilah *bulk micromachining* berasal dari proses *micromachining* yang digunakan untuk membentuk struktur-struktur mikromekanis di dalam *bulk* dari

wafer silikon kristal-tunggal dengan meng-*etching* atau menghapus material wafer secara selektif. Rentang ketebalan struktur-struktur mikro yang difabrikasi dengan *bulk micromachining* mulai dari submikron hingga ketebalan penuh dari wafer (200 sampai 500 μm).

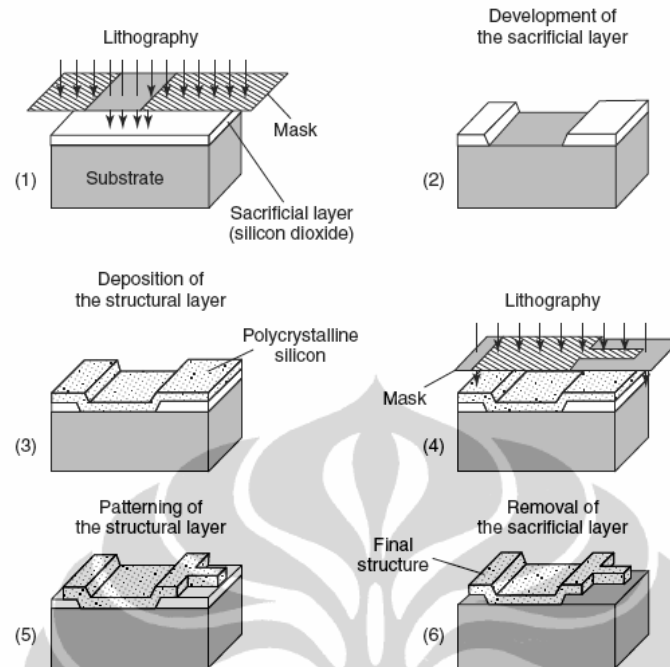
Dengan struktur-struktur mikro hasil fabrikasi dengan teknik *bulk micromachining*, teknik *wafer-bonding* diperlukan untuk merakit divais MEMS. Tetapi *surface micromachining* dapat digunakan untuk divais MEMS yang monolitik (tidak membutuhkan *wafer bonding*) [6]

1.2 *Surface Micromachining*

Surface micromachining tidak membentuk *bulk* silikon melainkan membangun struktur-struktur pada permukaan silikon dengan mendeposisikan lapisan-lapisan film tipis yang terdiri dari “lapisan yang dikorbankan” dan “lapisan struktural”. Dengan menghilangkan “lapisan yang dikorbankan” akan didapatkan struktur mekanis yang diperlukan.

Mikrostruktur silikon yang difabrikasi dengan teknik *surface micromachining* dapat berukuran beberapa orde magnitudo lebih kecil daripada struktur yang menggunakan *bulk micromachining*, maka miniaturisasi jauh lebih meningkat dengan teknik ini. Keuntungan utama dari struktur-struktur yang di-*surface micromachining* adalah integrasi dengan komponen-komponen IC yang mudah, karena wafernya juga dapat digunakan oleh elemen-elemen IC.

Mikrostruktur-mikrostruktur silikon yang difabrikasi dengan teknik tersebut biasanya merupakan struktur planar atau dua dimensi. Tetapi teknik lain yang melibatkan penggunaan struktur material film tipis yang dihasilkan dari menghilangkan “lapisan yang dikorbankan” telah membuat struktur *surface micromachining* konvensional menjadi tiga dimensi. [6]



Gambar A.2. Langkah-Langkah Pemrosesan Surface Micromachining pada Umumnya [6].

Seperti yang dapat dilihat pada gambar A.2, pada langkah pertama dan kedua dilakukan litografi untuk membentuk lapisan yang dikorbankan. Kemudian, lapisan struktural dideposisikan di atas lapisan tersebut. Pada langkah keempat litografi kembali dilakukan untuk membentuk pola lapisan struktural. Selanjutnya, pada langkah terakhir lapisan yang dikorbankan dihilangkan sehingga didapat mikrostruktur akhir yang tiga dimensi.

LAMPIARAN B

DERAU FASA (*PHASE NOISE*)

1. Phase Noise

Sebuah osilator yang ideal akan menghasilkan tegangan output yang sesuai pers :

$$v_o(t) = A \cos(\omega_o t) \quad (\text{B. 1})$$

dimana $\omega_o = 2\pi f_o$ dengan f_o adalah frekuensi osilasi. Sedangkan osilator yang tidak ideal akan menghasilkan tegangan output sesuai pers dibawah ini :

$$v_o(t) = A(t) \cos[\omega_o t + \varphi(t)] \quad (\text{B. 2})$$

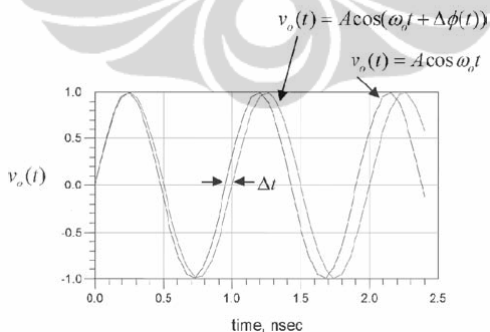
dimana $A(t)$ mencerminkan fluktuasi amplitudo atau lebih dikenal dengan *AM noise*, dan $\varphi(t)$ merepresentasikan variasi dari *phase* atau lebih dikenal dengan *phase noise*. Frekuensi sesaat ditunjukkan oleh pers (B.4) [25].

$$\omega(t) = \frac{d}{dt} [\omega_o t + \varphi(t)] = \omega_o + \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (\text{B. 3})$$

atau memenuhi :

$$f(t) = f_o + \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (\text{B. 4})$$

Dari pers (B.4) terlihat bahwa akan terjadi perubahan frekuensi apabila terjadi variasi dari fasenya. Sehingga keduanya berhubungan, dan dapat digunakan untuk menjelaskan *phase noise* seperti Gambar B.1 [25]

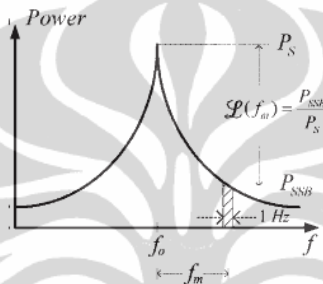


Gambar B.1. Keluaran osilator yang ideal dan yang tidak ideal [25].

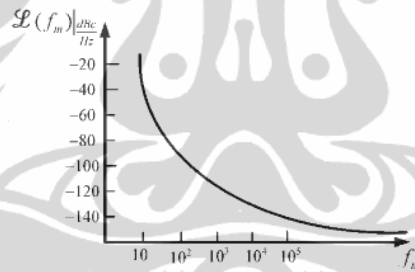
Pada osilator, *phase noise* merupakan tantangan tersendiri karena dapat merubah frekuensi osilasi. Hal ini berbeda dengan *amplitude noise*, karena amplitude noise dapat diminimalisasi dengan menggunakan *Analog gain control* (AGC). Sebuah *phase noise*, dihasilkan oleh *thermal noise*, *shot noise*, dan *flicker*

noise. *Thermal noise* merupakan fungsi dari suhu, bandwidth dan *noise resistance*. *Shot noise* merupakan fungsi dari arus dc bias. Sedangkan *flicker noise* merupakan fungsi dari karakteristik devais aktifnya [25].

Fluktuasi fase lebih mudah dilihat dalam frekuensi domain. Sebagai contoh dari spektrum osilator dapat dilihat seperti Gambar B.2. *Phase noise* biasanya dihitung dengan menggunakan perbandingan power, yaitu antara *single-side band power* P_{SSB} pada bandwidth 1 Hz sejauh f_m dari frekuensi center f_o yang memiliki power P_S . Hasilnya terlihat seperti Gambar B.3.



Gambar B.2. Spektrum dari osilator dengan random *phase noise* [25].



Gambar B.3 Nilai *phase noise* [25].

Besar *phase noise* dapat dihitung melalui pers (B.5) yang memiliki satuan *decibel* yang relative terhadap *power carrier* (dBc/Hz).

$$\mathcal{L}(f_m) = 10 \log \left[\frac{P_{SSB}}{P_S} \right] \frac{\text{dBc}}{\text{Hz}} \quad (\text{B.5})$$

LAMPIRAN C FAKTOR KUALITAS Q

Faktor kualitas (Q) adalah parameter berdimensi umum digunakan untuk model kerugian pada sistem tertentu. Hal ini juga memungkinkan untuk model sistem dengan rasio redaman ($\xi = (2Q)^{-1}$), dengan total model redaman akibat kerugian. Meskipun beberapa lainnya mendeskripsikan faktor kualitas yang setara untuk dapat ditemukan dalam literatur, secara umum definisi diterima adalah [39]:

$$Q = 2\pi \frac{\text{Energy stored per cycle}}{\text{Energy dissipated per cycle}}$$

yang pada dasarnya tidak menempatkan batasan apapun dengan jenis sistem. Ini hukum yang sempurna untuk berbicara tentang faktor kualitas sistem resonan maupun yang non-resonan, seperti rangkaian RC sederhana. Untuk sistem resonan, faktor kualitas tinggi membantu untuk meningkatkan sensitivitas modus (resonansi) sensor dan mengurangi kebisingan fase dari osilator. Ada beberapa mekanisme yang berkontribusi terhadap redaman dalam sebuah perangkat MEMS [39]:

- a. Akustik redaman (Acoustic damping) : tergantung pada gerakan perangkat mekanik, dapat redaman *slide film* (*viscous drag-lateral* perangkat bergerak) atau redaman *squeeze film* (dari bidang perangkat). Dalam sebagian besar kasus redaman akustik adalah kombinasi dari redaman *squeeze* dan *slide film* secara bersama-sama.
- b. Bahan redaman (*Material damping*) : Jenis kerugian akibat internal *damping* terjadi pada *solid-material*. Subclass utama adalah redaman thermoelastic, interaksi fonon-fonon dan cacat yang disebabkan disipasi.
- c. Kerugian Anchor (Anchor losses) : sistem mekanis Resonant memancarkan sejumlah energi getaran melalui ankur, yang berakibat menurunkan faktor kualitas Q.

Satu tambahan yang perlu perhatian adalah sistem antarmuka eksternal yang menuju ke resonator. Faktor kualitas dengan adanya sebuah beban eksternal (misalnya sirkuit umpan balik untuk mempertahankan osilasi) disebut faktor kualitas terbebani (*loaded quality factor*). Faktor kualitas keseluruhan dapat dihitung sebagai [39]:

$$Q_{Total}^{-1} = Q_{acoustic}^{-1} + Q_{material}^{-1} + Q_{anchor}^{-1} + Q_{Load}^{-1}$$

LAMPIRAN D

TABEL HASIL SIMULASI

Tabel c.1 Frekuensi keluaran dengan ketebalan ZnO bervariasi

No	Elektroda	h _{ZnO}				
		0.20	0.40	0.60	0.80	1.00
1	0.05	7.3725E+09	4.6659E+09	3.4714E+09	2.7701E+09	2.3063E+09
2	0.1	5.5665E+09	3.6941E+09	2.8448E+09	2.3347E+09	1.9872E+09
3	0.15	4.6379E+09	3.1424E+09	2.4625E+09	2.0510E+09	1.7680E+09
4	0.2	4.0540E+09	2.7790E+09	2.1996E+09	1.8483E+09	1.6058E+09
5	0.25	3.6430E+09	2.5160E+09	2.0044E+09	1.6942E+09	1.4798E+09

Tabel c.2 Frekuensi keluaran dengan ketebalan Elektroda bervariasi

No	Piezoelektrik	h _{Elektroda}				
		0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
1	0.2	7.3725E+09	3.8753E+09	2.6259E+09	1.9883E+09	1.6014E+09
2	0.4	6.5426E+09	3.6941E+09	2.5437E+09	1.9409E+09	1.5701E+09
3	0.6	5.6930E+09	3.5088E+09	2.4625E+09	1.8945E+09	1.5397E+09
4	0.8	4.9020E+09	3.3135E+09	2.3799E+09	1.8483E+09	1.5097E+09
5	1.0	4.2355E+09	3.1077E+09	2.2947E+09	1.8016E+09	1.4798E+09

Tabel c.3 Frekuensi keluaran dengan struktur material piezoelektrik bervariasi

No	h _{elektroda}	h _{piezoelektrik}					
		0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20
1	Polysi-ZnO-	4.3626E+09	3.4798E+09	2.9711E+09	2.6331E+09	2.3872E+09	2.1973E+09
	Polysi						
2	Polysi-PZT-	4.2587E+09	3.4308E+09	2.9348E+09	2.5893E+09	2.3379E+09	2.1444E+09
	Polysi						
3	Al-PZT-Pt	2.4374E+09	1.8358E+09	1.4366E+09	1.1718E+09	9.8694E+08	8.5145E+08

Tabel c.4 Perbedaan frekuensi keluaran berlubang dengan tidak berlubang

No	Elektroda (0.110)	h _{ZnO}					
		0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20
1	Berlubang	4.3629E+09	3.4829E+09	2.9747E+09	2.6369E+09	2.3912E+09	2.2015E+09
2	Tidak berlubang	4.2559E+09	3.4254E+09	2.9394E+09	2.6127E+09	2.3733E+09	2.1876E+09