

**REKABENTUK DAN FABRIKASI ISFET BERASASKAN SILIKON SEBAGAI
PENDERIA PH**

oleh

ROZINA BINTI ABDUL RANI

**Tesis yang diserahkan untuk memenuhi keperluan bagi
Ijazah Sarjana Sains**

JULAI 2007

PENGHARGAAN

Bersyukur kehadiran Ilahi dengan limpah Rahman dan RahimNya maka dapatlah saya menyiapkan tesis ini bagi memenuhi keperluan pengajian Ijazah Sarjana Sains. Saya ingin merakamkan setinggi-tinggi penghargaan kepada penyelia tesis, Prof. Madya Dr. Othman Sidek di atas sokongan dan bimbingan yang diberikan sepanjang tempoh penyelidikan tesis ini. Penghargaan ini juga diberikan kepada kakitangan pekerja MIMOS Berhad dan MySem yang banyak memberi bantuan dan tunjuk ajar semasa penyelidikan tesis ini dilakukan. Kerjasama yang diberikan amatlah dihargai.

Penghargaan ini juga ditujukan khas kepada ahli keluarga yang turut memberi dorongan terutamanya kepada ibu dan ayah, Puan Asmah Yusop dan Tuan Haji Abdul Rani Dahalan. Saya juga ingin mengucapkan ribuan terima kasih kepada Puan Zaini Abdul Halim dan juga rakan-rakan seperjuangan di Universiti Sains Malaysia kerana banyak memberi sokongan dan nasihat sepanjang tempoh pengajian ini.

Penghargaan ini juga ditujukan kepada mana-mana pihak yang terlibat secara langsung atau tidak langsung dalam membantu menyiapkan penyelidikan ini.

SUSUNAN KANDUNGAN

	Muka surat
PENGHARGAAN	ii
JADUAL KANDUNGAN	iii
SENARAI JADUAL	vi
SENARAI RAJAH	vii
SENARAI TATANAMA	xi
SENARAI LAMBANG	xiv
SENARAI SINGKATAN	xvii
SENARAI LAMPIRAN	xx
SENARAI PENERBITAN DAN SEMINAR	xxi
ABSTRAK	xxii
ABSTRACT	xxiii
BAB SATU : PENGENALAN	
1.0 Mikrosistem Bioperubatan	1
1.1 ISFET sebagai Biopenderia	2
1.2 Kelebihan-kelebihan ISFET	4
1.3 Objektif kajian	6
1.4 Kaedah kajian	7
1.5 Penyusunan Tesis	8
BAB DUA : KAJIAN ILMIAH – MIKROPENDERIA ISFET	
2.0 Pengenalan	9
2.1 Transistor kesan medan - semikonduktor logam oksida (MOSFET)	10
2.2 Transistor kesan medan – sensitif ion (ISFET)	13
2.3 Mekanisma ISFET	14
2.3.1 Model Site-Binding	14
2.3.2 Struktur semikonduktor elektrolit-lapisan sensitif ion, EIS	20
2.3.3 Mekanisma operasi ISFET sebagai penderia pH	22
2.4 Selaput-selaput sensitif pH	24
2.5 Elektrod Rujukan	25

2.6	Perlindungan ESD	27
2.7	Model-model penyelakuan ISFET	29
2.7.1	Model Spice	29
2.7.2	Model HDL-A	29
2.7.3	Model TCAD	30

BAB TIGA : REKABENTUK ISFET MENGGUNAKAN TEKNOLOGI CMOS SUBMIKRO

3.0	Pengenalan	31
3.1	Kesepadanan Proses Fabrikasi ISFET dan CMOS	31
3.2	Teknologi CMOS 1 μ m MIMOS	32
3.3	Pertimbangan Terhadap Projek	33
3.4	Rekabentuk Struktur ISFET	34
3.5	Proses Fabrikasi Penderia ISFET	35
3.5.1	Proses Fabrikasi CMOS 1 μ m	35
3.5.2	Proses fabrikasi CMOS ringkas	41
3.6	Hasil Fabrikasi ISFET	43
3.6.1	Hasil fabrikasi melalui simulasi	43
3.6.2	Hasil fabrikasi melalui proses sebenar	45
3.7	Stuktur ujian PATMOS	51
3.8	Proses mepakej penderia ISFET	53

BAB EMPAT : KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN UJIKAJI

4.0	Pengenalan	58
4.1	Simulasi Penderia ISFET	59
4.1.1	Makromodel ISFET	60
4.1.2	Keputusan dan perbincangan simulasi	64
4.2	Ujikaji amali	66
4.2.1	Sistem pengukuran penderia ISFET	66
4.2.1.1	Litar antaramuka penderia ISFET	67
4.2.1.2	Mikropengawal PIC16F877A dan LCD	68
4.2.2	Sampel larutan kimia	72
4.2.3	Elektrod rujukan Ag/AgCl	72
4.2.4	Penyediaan ujikaji	72

4.3	Keputusan dan perbincangan ujikaji	73
4.3.1	Kajian terhadap ISFET menggunakan elektrod rujukan Ag/AgCl	75
4.3.2	Kestabilan tindakbalas ISFET	80
4.3.3	Ciri-ciri tambahan penderia ISFET	85

BAB LIMA : KESIMPULAN DAN CADANGAN PROJEK

5.0	Kesimpulan	88
5.1	Cadangan Pembaikan Projek	89

SENARAI RUJUKAN	92
------------------------	-----------

LAMPIRAN

Lampiran A: Definasi Istilah	97
Lampiran B: Program SPICE Makromodel ISFET	103
Lampiran C: Program Mikropengawal P16F877A	104

SENARAI JADUAL

	Muka surat
Jadual 2.1: Kadar sensitiviti ISFET menggunakan lapisan sensitif ion yang berbeza	25
Jadual 3.1: Ringkasan proses fabrikasi penderia ISFET-sensorCA menggunakan proses CMOS 1 μm MIMOS.	41
Jadual 3.2: Ringkasan proses fabrikasi penderia ISFET-sensorIB menggunakan proses CMOS ringkas.	42
Jadual 4.1 Data ujikaji penderia ISFET yang telah diuji menggunakan elektrod rujukan jenis Ag/AgCl	85

SENARAI RAJAH

	Muka surat
Rajah 1.1: (a) Skematik keratan rentas MOSFET; (b) Skematik keratan rentas ISFET; (c) Skematik litar MOSFET; (d) Skematik litar ISFET	3
Rajah 2.1: Transistor NMOS; (a) Pandangan keratan rentas, (b) Struktur skematik NMOS, (c) Ciri-ciri keluaran I_D / V_{DS} .	11
Rajah 2.2: Keratan rentas MOSFET dan ISFET	14
Rajah 2.3: Gambaran model 'Site-Binding'	17
Rajah 2.4: Gambarajah asas dan multi-fasa struktur EIS.	21
Rajah 2.5: Lengkung graf C-V bagi struktur EIS elektrolit-SiO ₂ -Si. (Diperolehi daripada artikel Liao et al., [1999])	21
Rajah 2.6: Elektrod rujukan Ag/AgCl bersaiz makro.	26
Rajah 2.7: Teknik perlindungan ESD ISFET; (a) Suis get polisilikon terapung, (b) Penggunaan gelang adang, diod dan transistor MOS berhampiran get ISFET, (c) Penggunaan pelindung diod ESD pada bahagian elektrod rujukan.	28
Rajah 3.1: Bentangan litar penderia ISFET.	35
Rajah 3.2: Acuan yang digunakan untuk menghasilkan penderia ISFET-sensorCA dengan menggunakan proses fabrikasi CMOS 1 μ m MIMOS.	39
Rajah 3.3: Ilustrasi keratan rentas ISFET; (a) Keratan rentas sensorCA (b) Keratan rentas sensorIB.	43
Rajah 3.4: Hasil fabrikasi penderia ISFET dalam bentuk 3D melalui proses simulasi menggunakan perisian MEMS Pro.	44
Rajah 3.5: Keratan rentas pada bahagian get terbuka ISFET yang difabrikasi menggunakan proses CMOS ringkas.	44
Rajah 3.6: Wafer yang mengandungi penderia ISFET hasil daripada fabrikasi proses CMOS 1 μ m dan proses CMOS ringkas.	46
Rajah 3.7: Struktur penderia ISFET yang telah siap difabrikasi dilihat daripada pandangan mikroskop.	46

Rajah 3.8:	(a) Keratan rentas penderia ISFET-sensorCA pada bahagian get terbuka ISFET (b) Kawasan bersebelahan get terbuka ISFET yang terdiri daripada lapisan-lapisan oksida.	47
Rajah 3.9:	(a) dan (b) Keratan rentas Penderia ISFET sensorIB Bahagian get terbuka ISFET. (c) dan (d) Kawasan bersebelahan get terbuka ISFET yang terdiri daripada lapisan-lapisan oksida.	49
Rajah 3.10:	(a) Gambar pandangan mikroskop yang menunjukkan kawasan yang mengalami keretakan berhampiran get terbuka ISFET-sensorIB. (b) Keratan rentas kawasan retak..	50
Rajah 3.11:	Graf arus saluran, I_D melawan voltan saluran-punca, V_{DS} .	52
Rajah 3.12:	Ujian pengukuran kebocoran arus dilaksanakan menggunakan stesen kuar dan Unit pengukuran sumber (SMU) bagi menentukan-sahkan fabrikasi proses CMOS.	52
Rajah 3.13:	Proses pemotongan wafer di Makmal Pusat Pengajian Sains Fizik, Universiti Sains Malaysia.	54
Rajah 3.14:	Anggaran saiz cip penderia ISFET yang telah dipotong bagi tujuan pakej iaitu $\approx 4.0 \times 6.4$ (mm). Manakala saiz bagi kawasan bukaan yang terdedah kepada sampel ialah $1.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$.	55
Rajah 3.15:	Gambarajah keratan rentas pakej penderia ISFET.	56
Rajah 3.16:	Cip penderia ISFET yang telah siap diselakukan ikatan wayar ke papan litar tercetak (PCB) menggunakan wayar aluminium.	56
Rajah 3.17:	Penderia ISFET yang telah siap dipakej ($2\text{cm} \times 4\text{cm}$).	57
Rajah 4.1:	Struktur ISFET saluran-n. OHP adalah permukaan luar Helmholtz.	61
Rajah 4.2:	Litar persamaan elektrik atau makromodel ISFET [Martinoia et al., 2005]	63
Rajah 4.3:	Blok sublitar SPICE menunjukkan pin-pin luaran bagi makromodel ISFET.	65
Rajah 4.4:	Graf keputusan simulasi bagi voltan keluaran melawan nilai pH.	66
Rajah 4.5:	Gambarajah blok sistem litar antara muka ISFET.	67

Rajah 4.6:	Litar antaramuka penerima ISFET.	68
Rajah 4.7:	Litar skematik mikropengawal PIC16F877A dan paparan cecair kristal, LCD.	70
Rajah 4.8:	Keseluruhan litar sistem pengukur penerima ISFET.	71
Rajah 4.9:	Model sistem pengukur penerima ISFET untuk menentu ukur nilai pH larutan.	71
Rajah 4.10:	(A) Elektrod rujukan Ag/AgCl Orion 90-02 sel-separuh rujukan simpang berganda. (B) Elektrod rujukan Ag/AgCl jenis pelet pejal.	74
Rajah 4.11:	Tatasusunan ujikaji terhadap ciri-ciri penerima ISFET.	74
Rajah 4.12:	Graf isyarat keluaran V_o melawan masa hasil tindakbalas ISFET-sensorCA2 menggunakan dua jenis elektrod rujukan. (a) Elektrod Ag/AgCl simpang berganda, (b) Elektrod Ag/AgCl pejal.	77
Rajah 4.13:	Kadar sensitiviti ISFET-sensorCA2 apabila beroperasi menggunakan dua jenis elektrod rujukan Ag/AgCl yang berbeza; Pejal dan Simpang berganda.	78
Rajah 4.14:	Graf isyarat keluaran V_o melawan masa hasil tindakbalas ISFET-sensorIB menggunakan dua jenis elektrod rujukan Ag/AgCl. (a) Elektrod Ag/AgCl simpang berganda, (b) Elektrod Ag/AgCl pejal.	79
Rajah 4.15:	Kadar sensitiviti ISFET-sensorIB apabila beroperasi menggunakan dua jenis elektrod rujukan Ag/AgCl yang berbeza; Pejal dan Simpang berganda.	80
Rajah 4.16:	Graf voltan keluaran, V_o melawan masa hasil tindakbalas ISFET-sensorCA2 yang diuji buat kali kedua.	82
Rajah 4.17:	Graf isyarat keluaran V_o melawan masa (a) Hasil tindakbalas ISFET-sensorCA1 selepas direndam di dalam HF. (b) Hasil tindakbalas ISFET-sensorCA1 untuk ujikaji kali kedua iaitu 2 hari selepas menerima rawatan HF.	83
Rajah 4.18:	Perbandingan kadar sensitiviti di antara sensorCA1 yang telah menerima rawatan HF, sensorCA1 2 hari selepas rawatan HF dan sensorCA2 yang tidak menerima rawatan HF.	84
Rajah 4.19:	Kawasan bulatan menunjukkan isyarat keluaran voltan upaya kembali kepada keadaan isyarat keadaan-mantap apabila gelembong gas hydrogen di permukaan ISFET dipecahkan.	86

Rajah 4.20: (a) Kerosakan pada bahagian get ISFET selepas pengukuran dilakukan ke atas larutan HF. (b) Gambar fokus pada kawasan get yang rosak.

87

SENARAI TATANAMA

<i>Acuan</i>	Mask
<i>Antaramuka elektrolit oksida berair</i>	Oxide aqueous electrolyte interface
<i>Baca</i>	Read
<i>Bantuan-komputer</i>	Computer-aid
<i>Biomangkin kekal</i>	Immobilized biocatalyst
<i>Biopenderia</i>	Biosensor
<i>Ciri-ciri pindah</i>	Transfer characteristics
<i>Dalam-talian</i>	On-line
<i>Dwi</i>	Dual
<i>Elektrod oksigen terlarut</i>	Dissolved oxygen electrode
<i>Elektrolit</i>	Electrolyte
<i>Elektroforesis</i>	Electrophoresis
<i>Enzim-enzim yang tidak bergerak</i>	Immobilized enzymes
<i>Fabrikasi</i>	Fabrication
<i>Fotoberintangian</i>	Photoresist
<i>Fotolitografi</i>	Photolithography
<i>Galangan</i>	Impedance
<i>Gelang adang</i>	Guard ring
<i>Get oksida tak organik</i>	Inorganic gate oxide
<i>Glukosa oksida</i>	Glucose oxidase
<i>Ikatan wayar</i>	Wire bonding
<i>In vivo</i>	In the living organism
<i>Kapilari silika terlakur</i>	Fused silica capillaries
<i>Kation</i>	Cation
<i>Kawasan lurus</i>	Linear region

<i>Kawasan pengasingan</i>	Isolation region
<i>Kawasan tidak tepu</i>	Non-saturation region
<i>Keadaan-mantap</i>	Steady-state
<i>Keadaan pepejal</i>	Solid-state
<i>Keberaliran</i>	Conductivity
<i>Kuar</i>	Probe
<i>Langkah voltan</i>	Voltage step
<i>Lapisan-berganda elektrik</i>	Electric Double-layer
<i>Lapisan penyebaran</i>	Diffusion layer
<i>Lapisan penyongsangan</i>	Inversion layer
<i>Litar gelung-buka</i>	Open-loop circuit
<i>Masa nyata</i>	Real-time
<i>Mikropenderia</i>	Microsensors
<i>Mikropenggerak</i>	Microactuators
<i>Monolit</i>	Monolithic
<i>Pemboleh</i>	Enable
<i>Pemercitan</i>	Sputtering
<i>Penamatan rantai</i>	Chain termination
<i>Pendaftar</i>	Register
<i>Penderia</i>	Sensor
<i>Penentukuran</i>	Calibration
<i>Pengantaramuka</i>	Interfacer
<i>Pengikatan kovalen</i>	Covalent bonding
<i>Penguat kebezaan</i>	Differential amplifier
<i>Penumpukan</i>	Accumulation
<i>Penyelaku</i>	Simulator
<i>Punaran</i>	Etching

<i>Punaran kering</i>	Dry etching
<i>Selaput dialisis</i>	Dialysis membrane
<i>Selaput saraf</i>	Nerve membrane
<i>Sentuhan substratum</i>	Substrate contact
<i>Simulasi</i>	Simulation
<i>Substratum</i>	Substrate
<i>Susuk upaya</i>	Potential profile
<i>Tatasusunan</i>	Array
<i>Teknik berangka</i>	Numerical technique
<i>Teori dwi-lapisan elektrik</i>	Electrical double-layer theory
<i>Teraruh</i>	Induced
<i>Termistor</i>	Thermistors
<i>Tidak lengai</i>	Non-inert
<i>Tulis</i>	Write
<i>Upaya</i>	Potential
<i>Voltan sapuan</i>	Sweep voltage

SENARAI LAMBANG

C_{bulk}	Concentration ion of electrolyte (Penumpuan ion di dalam elektrolit)
C_{eq}	Capacitor's constant (Pemalar pemuat)
C_{Gouy}	Gouy-Chapman layer capacitance (Pemuat Gouy-Chapman)
C_{Helm}	Helmholtz layer capacitance (Pemuat lapisan Helmholtz)
C_{ox}	Insulator capacitance per unit area [F/m^2] (Pemuat penebat per unit luas)
d_{IHP}	Distance between the Inner Helmholtz Plane and the ISFET surface (Jarak penebat-ion tidak terhidrat)
d_{OHP}	Distance between the Outer Helmholtz Plane and the ISFET surface (Jarak penebat-ion terhidrat)
E_{ref}	Reference electrode potential relative to vacuum (Upaya elektrod rujukan nisbi kepada vakum)
g_m	Conduction parameter (Parameter pengaliran)
H_b	Proton concentration in the Bulk electrolyte (Penumpuan proton di dalam elektrolit pukal)
I_D	Drain current (Arus saluran)
k	Boltzmann's constant (Pemalar Boltzmann)
K_a	Positive Site-binding dissociation constant (Pemalar penceraian positif 'site-binding')
K_b	Negative Site-binding dissociation constants (Pemalar negatif penceraian 'site-binding')
K_N	Site-binding dissociation constants (Pemalar penceraian 'site-binding')
L	Channel length (Panjang saluran)
n_i	Intrinsic carrier concentration (Penumpuan pembawa hakiki)
N_{Nit}	Amine surface site density (Ketumpatan permukaan tapak amine)
N_{Sil}	Silanol (or oxide) surface site density (Ketumpatan permukaan tapak silanol)

N_S	Total number of sites per unit area (Jumlah keseluruhan tapak per unit luas)
N_{SS}	Surface state density (Kepadatan keadaan permukaan)
N_{SUB}	Substrate doping (Penedopan substratum)
pH_{pzc}	pH at the point of zero charge (Nilai pH pada titik cas sifar)
q	Elementary charge (Cas asas)
S_{ISFET}	ISFET sensitivity (Sensitiviti ISFET)
T	Temperature (Suhu)
V_B	Bulk voltage (Voltan pukal)
V_{DS}	Drain-source voltage (Voltan saluran-punca)
V_{FB}	Flat-band voltage (Voltan jalur-rata)
V_{GS}	Gate-source voltage (Voltan get-punca)
V_O	Output voltage (Voltan keluaran)
V_{SB}	Source-bulk voltage (Voltan punca-pukal)
V_{th}	Threshold voltage (Voltan ambang)
$V_{th}(ISFET)$	ISFET's threshold voltage (Voltan ambang ISFET)
$V_{th}(MOSFET)$	MOSFET's threshold voltage (Voltan ambang MOSFET)
V_{to}	Zero source-bulk voltage (Voltan punca-pukal pada keadaan sifar)
W	Channel width (Lebar saluran)
μ	Charge carrier mobility in the channel (Kebolehgerakan cas pembawa di dalam saluran)
λ	Channel length modulation parameter (Parameter pemodulatan panjang saluran).
ϕ_F	Strong inversion surface potential or Fermi potential (Kekuatan penyongsangan upaya permukaan atau upaya Fermi)
ϕ_{MS}	Metal-semiconductor potential (Upaya metal-semikonduktor)

γ	Body-effect (Parameter kesan-jasad)
φ_d	Diffusion layer charge density (Ketumpatan cas pada lapisan penyebaran)
φ_{eo}	Ion sensitive layer-dependent surface potential (Upaya permukaan elektrolit-lapisan sensitif ion)
φ_{gd}	potential across the Diffusion layer (Gouy-Chapmann layer) (Upaya di sepanjang lapisan penyebaran (Gouy-Chapmann Layer))
ε_{IHP}	Relative permittivity of the Inner Helmholtz layer (Bahagian dalam kebertelusan satah Helmholtz)
ε_{OHP}	Relative permittivity of the Outer Helmholtz layer (Bahagian luar kebertelusan satah Helmholtz)
ε_w	Electrolyte permittivity (Kebertelusan elektrolit)
σ_d	Charge densities in the diffusion layer (Jumlah bersih cas di dalam lapisan penyebaran)
σ_0	Charge densities at the electrolyte-ion sensitive layer interface (Jumlah bersih cas di antaramuka elektrolit-lapisan sensitif ion)
σ_s	Charge densities in the semiconductor (Jumlah bersih cas di kawasan semikonduktor)
χ^{sol}	Surface dipole potential of the solution (Upaya permukaan dwikutub bagi larutan)
Φ_M	Metal work function (Fungsi kerja metal)
μ_n	Electron mobility in the inversion layer (Kebolehgerakan elektron di dalam lapisan penyongsangan)

SENARAI SINGKATAN

ADC	Analog to digital converter (Penukar analog kepada digital)
Ag/AgCl	Argentum/Argentum Chloride (Argentum/Argentum Klorida)
Al ₂ O ₃	Aluminium oxide (Aluminium oksida)
BioMEMS	Bio-chemical Micro-Electro-Mechanical System (Sistem Bio-Kimia Mikro-Elektro-Mekanikal)
Bt	Bismaleimide-triaine
CCCV	Constant current-constant voltage (Arus malar – voltan malar)
CMOS	Complementary of metal oxide semiconductor (Pelengkap semikonduktor logam oksida)
C-V	Capacitor-voltage (Kapasitor-voltan)
DNA	Deoxyribonucleic acid (Asid deoksiribonukleida)
EIS	Electrolyte-insulator semiconductor (Semikonduktor elektrolit-lapisan sensitif ion)
ENFET	Enzyme Field effect transistor (Transistor kesan medan terputau-enzim)
ESD	electrostatic discharge (Penyahcas elektrostatik)
FE-SEM	Field Emission-Scanning Electron Microscope (Pancaran Medan-Mikroskop Pengimbasan Elektron)
FIA	Flow Injection Analysis (Analisa suntikan aliran)
GUI	Graphical user interface (Antaramuka pengguna bergraf)
H ⁺	Hydrogen ion (Ion hidrogen)
HDL	Hardware Description language (Bahasa Perihal Perkakasan)
HDL-A	Hardware Description language-Analog (Bahasa Perihal Perkakasan-Analog)
HF	Hydrofluoric (Hidroflourik)
ISE	Ion selective electrode (Elektrod memilih ion)
ISFET	Ion sensitive field effect transistor (Transistor kesan medan sensitif ion)
I-V	Current-voltage (Arus-voltan)

KCl	Kalium Chloride (Kalium Klorida)
LCD	Liquid crystal display (Papan cecair kristal)
LOCOS	Local Oxidation Of Silicon (Pengoksidaan setempat silikon)
MOS	Metal-oxide semiconductor (Semikonduktor logam-oksida)
MOSFET	Metal oxide semiconductor field effect transistor (Transistor kesan medan semikonduktor logam oksida)
MPW	Multi-project Wafer (Wafer pelbagai-projek)
N ₂	Nitrogen (Nitrogen)
Na ⁺	Natrium ion (Ion natrium)
NMOS	Negative Channel Metal Oxide Semiconductor (Semikonduktor logam oksida saluran negatif)
OHP	Outher Helmholtz layer (Lapisan luaran Helmholtz)
PCB	Printed circuit board (Papan litar tercetak)
PbTiO ₃	Sol-gel-derived lead titanate (Sol-gel-terbitan plumbum titanate)
pCO ₂	Potential of carbon dioxide (Upaya karbon dioksida)
PECVD	Plasma Enhance Chemical Vapor Deposition (Pemendapan Wap Kimia Peningkatan Plasma)
pH	Potential of hydrogen (Upaya hidrogen)
PMOS	Positive Channel Metal Oxide Semiconductor (Semikonduktor logam oksida saluran positif)
pO ₂	Potential of oxygen (upaya oksigen)
REFET	Reference electrode field effect transistor (Elektrod rujukan transistor kesan medan)
RF	Radio frequency (Frekuensi radio)
RTP	Rapid thermal process (Proses aliran udara panas pantas)
Si	Silicon (Silikon)
Si ₃ N ₄	Silicon nitride (Silikon nitrida)
SiNH ₂	Primary Amine (Amine utama)
SiOH	Hydroxyl group (Kumpulan hidroksil)

SiO ₂	Silicon dioxide (Silikon dioksida)
SiOxNy	Silicon Oxy-nitride (Silikon Oksi-nitrida)
SMU	Source measurement unit (Unit pengukuran sumber)
SnO ₂	Tin oxide (Tin Oksida)
SPIICE	Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis
Ta ₂ O ₅	Tantalum pentoxide (Tantalum Pentoksida)
TCAD	Technology Computer Aided Design (Rekabentuk teknologi komputer tambahan)
VHDL-AMS	Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language-Analog Mixed Signal (Bahasa Perihal Perkakasan Litar bersepadu berkelajuan tinggi-isyarat analog tercampur)

SENARAI LAMPIRAN

	Muka surat
1.1 Definasi Istilah	97
1.2 Program SPICE Makromodel ISFET.	103
1.3 Program Mikropengawal P16F877A	104

SENARAI PENERBITAN & SEMINAR

- 1.1 Rozina Abdul Rani and Othman Sidek. ISFET- pH Sensor for Biomedical Application. AIUB Journal of Science and Engineering (AJSE), Vol.1, No.3, August 2004.
- 1.2 Rozina Abdul Rani and Othman Sidek. ISFET pH Sensor characterization: towards Biosensor Microchip Application. IEEE TENCON 2004, Chiang Mai, Thailand, 21-24 November 2004.
- 1.3 R. A. Rani, O. Sidek, M. I. Syono, and I. Mat. Design, fabrication and packaging of ISFET pH-Sensor. Mimos Symposium 2005, Bangi, Malaysia, 29 – 30 Nov. 2005.
- 1.4 R. A. Rani, M. I. Syono, I. Mat and O. Sidek. A Review: Applications of ISFET Transducer-Based Biosensor and BioMEMS. International Conference on MEMS and Nanotechnology (ICMN '06), Kuala Lumpur, Malaysia, 14 – 15 Mac. 2006
- 1.5 R. Abdul Rani, O. Sidek, I. Mat, and M. I. Syono. Analysis on ISFET – chemical sensor by using Ag/AgCl reference electrode Mimos Symposium 2006, Malaysia, 13 – 14 Dec. 2006.

REKABENTUK DAN FABRIKASI ISFET BERASASKAN SILIKON SEBAGAI PENDERIA pH

ABSTRAK

Penyelidikan untuk menghasilkan penderia pH dengan menggunakan pendekatan Transistor Kesan Medan – sensitif terhadap ion (ISFET) telah dilakukan. ISFET mempunyai potensi yang baik untuk diimplimentasikan dalam bidang perubatan dan juga pertanian. Selain daripada saiznya yang kecil dan kos pembuatan yang rendah, ISFET berasaskan silikon boleh disepadukan bersama-sama litar elektronik dan juga Sistem Biokimia-Mikro-Elektro-Mekanikal (BioMEMS).

ISFET-sensorCA dan ISFET-sensorIB telah difabrikasi di MIMOS Berhad menggunakan teknologi proses piawai CMOS 1 μm . Silikon nitrida, Si_3N_4 digunakan sebagai bahan sensitif ion dan dimendapkan pada bahagian get terbuka ISFET menggunakan teknik pemendapan wap kimia (CVD). ISFET berfungsi sebagai penderia pH dengan mengenalpasti kadar penumpuan ion hidrogen yang menentukan tahap pH sesuatu larutan. Tindakbalas ion di antara ion hidrogen dan lapisan sensitif ion mengakibatkan perubahan aliran arus saluran pada get ISFET dan tindakan ini memberikan nilai voltan tertentu pada litar antaramuka ISFET. Nilai voltan yang terhasil di hantar ke mikropengawal PIC16F877A dan dipamerkan pada paparan cecair kristal (LCD). Bagi tujuan analisa ciri dan fungsi ISFET, elektrod rujukan Ag/AgCl dalam bentuk pepejal dan simpang berganda, dan sampel larutan penampakan pH4, pH7 dan pH10 digunakan semasa eksperimen dilakukan. Penggunaan pelbagai jenis elektrod rujukan bertujuan mengenalpasti kebolehan setiap elektrod rujukan mengawal kestabilan upaya elektrokimia kerana ia turut memberi kesan terhadap operasi ISFET. Semasa ujikaji, kadar sensitiviti ISFET yang baik iaitu 58.17 mV/pH diperolehi dengan menggunakan rawatan HF. Penyelidikan ini turut melibatkan beberapa perisian tambahan iaitu L-Edit, MEMsPro, T-Spice, S-Edit, MicroBasic dan juga MasView.

DESIGN AND FABRICATION OF SILICON BASED ISFET FOR pH SENSOR APPLICATION

ABSTRACT

This thesis describes the research activities on pH sensor development by using Ion Sensitive Field Effect Transistor (ISFET) approach. ISFET promises high potential in medical and agriculture applications. Besides available in micro size and low cost of sensor production, ISFET based silicon can be fabricated together with the electronic circuitry and Biochemical-Micro-Electro-Mechanical System (BioMEMS) as an integrated system.

ISFET-sensorCA and ISFET-sensorIB were fabricated by using standard CMOS 1 μm process technology. Silicon Nitride, Si_3N_4 was used as an ion sensitive layer and it was deposited by using chemical vapor deposition technique. ISFET detects the hydrogen ion concentration which is indicating the pH level of electrolyte. The ion changing between electrolyte and ion sensitive layer modify the channel charge of ISFET. This situation creates a gate potential and then modulates the current flow through the ISFET channel and gives a certain output voltage during the measurement of readout circuitry output pins. The output voltage of readout circuitry is converted to digital values by using PIC16F877A microcontroller and the value is displayed on LCD. For ISFET analysis, two types of Ag/AgCl reference electrode; solid and double junction reference electrode, and three types of pH buffer solutions; pH4, pH7 and pH10 were used during the experiment. The reason of using different types of reference electrode is to study the ability of each reference electrode in order to establish a stable electrochemical potential. This stable condition will affect the ISFET performance. During testing, the highest ISFET sensitivity which is 58.17 mV/pH was obtained by using HF treatment. This research also evolves assistance of additional software including L-Edit, MEMS Pro, T-Spice, S-Edit, Micro Basic and MASView.

BAB 1 PENGENALAN

1.0 Mikrosistem Bioperubatan.

Mikrosistem ialah sebuah sistem dalam bentuk model berskala kecil. Sebuah mikrosistem itu terdiri daripada beberapa gabungan bahagian yang mempunyai fungsi-fungsi tertentu iaitu mikropenderia, mikropenggerak, pengantaramuka elektronik, unit kawalan dan unit-unit komunikasi frekuensi radio, RF. Fungsi mikropenderia ialah menukarkan ciri-ciri fizikal (kimia) keadaan sekeliling kepada isyarat elektrik. Mikropenggerak pula menafsirkan isyarat elektrik kepada sifat berdasarkan fizikal (pergerakan, getaran, cahaya dan bunyi).

Mikrosistem untuk kegunaan bioperubatan merupakan salah satu topik yang sering dibincangkan oleh para penyelidik sejak beberapa tahun kebelakangan ini. Berdasarkan kepada kajiselidik pasaran, penggunaan mikrosistem dalam bidang biokimia dan perubatan dijangka mengalami peningkatan pasaran yang besar. Andrew Mc Williams [2005] telah melaporkan bahawa dianggarkan nilai pasaran biopenderia di seluruh dunia pada tahun 2004 adalah berjumlah \$6.1 billion. Pasaran biopenderia akan terus mengalami unjuran peningkatan yang tinggi dan dijangka mengalami pertumbuhan sebanyak \$8.2 billion pada tahun 2009 dengan kadar pertumbuhan sebanyak 6.3%.

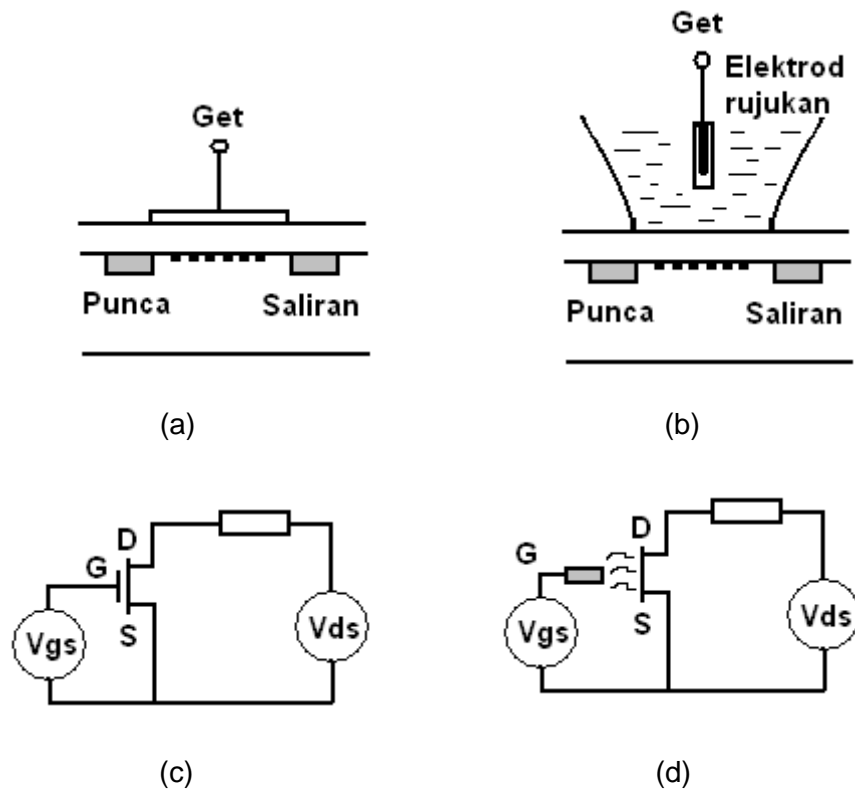
Peningkatan permintaan ini menunjukkan perlunya kajian yang lebih meluas dilakukan untuk menghasilkan lebih banyak produk biopenderia yang bermutu tinggi terutamanya dari segi penjimatan kos pembuatan, kestabilan dan kepekaan.

1.1 ISFET sebagai Biopenderia

Biopenderia diperkenalkan buat pertama kalinya oleh Clark dan Lyons pada tahun 1962 [Grattarola et al., 1998]. Ia merupakan biopenderia glukosa yang mengandungi elektrod oksigen terlarut dan lapisan glukosa oksida. Penderia glukosa yang telah diperkenalkan oleh Clark dan Lyons berfungsi dengan cara memerangkap glukosa oksida di dalam sarung selaput dialisis. Tujuan biopenderia direkacipta ialah untuk menentukan kandungan bahan-bahan kimia di dalam larutan. Strukturnya terdiri daripada biomangkin kekal (contohnya enzim, mikroorganisma atau tisu-tisu), yang bertindak mengenalpasti pemangkin, dan peranti elektrokimia yang berperanan sebagai penukar maklumat kimia kepada isyarat elektrik.

Biopenderia berasaskan peranti elektrokimia menggunakan aplikasi elektrod '*amperometric*' (berkenaan dengan sebarang jenis analisa kimia yang melibatkan penggunaan arus elektrik) oksigen, elektrod memilih ion (ISE) dan termistor. Salah satu peranti elektrokimia berasaskan ISE yang sering digunakan ialah ISFET.

ISFET merupakan penderia ion yang berasaskan peranti semikonduktor dan dihasilkan oleh Bergveld pada tahun 1970 [Bergveld, 2003]. ISFET dihasilkan dengan membuang elektrod logam pada bahagian get semikonduktor logam oksida (MOSFET). Rajah 1.1 menunjukkan perbezaan fizikal di antara MOSFET dan ISFET. Secara prinsip, keberaliran bagi permukaan saluran ISFET adalah berubah-ubah disebabkan oleh perubahan upaya yang berlaku di antaramuka penebat get dan larutan. Oleh sebab itu, penggunaan ISFET memberikan keputusan bacaan dalam bentuk ukuran upaya. ISFET yang telah diperkenalkan oleh Bergveld tidak menggunakan sebarang elektrod rujukan dan penebat get yang digunakan ialah silikon dioksida, SiO₂ iaitu lapisan yang bertindak sebagai lapisan sensitif terhadap ion.



Rajah 1.1: (a) Skematik keratan rentas MOSFET; (b) Skematik keratan rentas ISFET; (c) Skematik litar MOSFET; (d) Skematik litar ISFET

Hasil daripada penyelidikan tersebut, Bergveld mendapati tindakbalas ISFET tidak hanya tertumpu kepada ion hidrogen, H^+ atau ion natrium, Na^+ , tetapi turut bertindakbalas terhadap mono atau dwi kation. Pada tahun 1974, Matsuo [Cané et al.,1997] telah memperkenalkan ISFET yang mempunyai lapisan silikon nitrida, Si_3N_4 di atas lapisan SiO_2 sebagai lapisan sensitif ion. Apabila ISFET tersebut digunakan bersama-sama elektrod rujukan di dalam cecair, suatu peranan penting telah diwujudkan iaitu terhasilnya sebuah penerima ion hidrogen. Oleh itu, penggunaan get oksida tak organik yang digabungkan bersama-sama ISFET dapat memungkinkan suatu tindakbalas yang terarah kepada pengenalpastian kadar penumpuan ion hidrogen di dalam larutan dan seterusnya menentukan keasidan atau kealkalian larutan tersebut.

1.2 Kelebihan-kelebihan ISFET.

Penderia ISFET merupakan suatu alternatif kepada elektrod kaca untuk mengukur nilai pH. ISFET mempunyai beberapa ciri yang istimewa dan kelebihan-kelebihan seperti berikut [Yuqing, 2003]:

- 1) Penderia ISFET dalam keadaan pepejal adalah kuat dan tahan lasak. Tidak seperti kebanyakan penderia lain, kuar ISFET boleh dibersihkan dengan mudah iaitu dengan hanya menggunakan berus gigi. Sifat fizikal ISFET yang tahan lasak membolehkannya dimasukkan ke dalam sampel seperti daging, buah-buahan dan sayur-sayuran.
- 2) Cara penyimpanan yang mudah dan hanya memerlukan penyelenggaraan rutin yang sedikit.
- 3) Mengurangkan ralat berasid dan beralkali dalam julat pH yang maksimum.
- 4) Boleh digunakan melebihi julat suhu yang maksimum.
- 5) Bersaiz kecil dan menggunakan isipadu larutan yang sedikit untuk menentukan kadar pH larutan.
- 6) Pengeluaran produk dalam kuantiti yang banyak jika dihasilkan melalui proses fabrikasi.
- 7) Penggabungan bersepadu ISFET-penderia pH dan litar antaramuka di dalam cip yang sama dapat menjimatkan ruang dan saiz produk.

Berdasarkan kepada sifatnya yang tahan lasak dan cara penyelenggaraannya yang mudah, penderia ISFET boleh digunakan untuk proses pengukuran dalam-talian. Dengan cara ini, proses persempelan dan analisis seterusnya yang sering dilakukan di dalam makmal tidak diperlukan lagi. Tambahan pula, ISFET mempunyai tindakbalas yang pantas, kepekaan yang tinggi, kebolehan melakukan proses berkelompok, bersaiz mikro dan berpotensi sebagai cip litar bersepadu. Berdasarkan kepada kelebihannya, ISFET telah digunakan secara meluas di dalam pelbagai bidang

terutamanya dalam bidang bioperubatan. Beberapa bidang bioperubatan yang terlibat ialah diagnosis perubatan, pengawasan klinikal atau sampel-sampel persekitaran, penapaian dan kawalan bioproses, serta pengujian produk-produk makanan atau ubat-ubatan [Park et al., 2002].

ISFET dalam bentuk tatasusunan juga berpotensi untuk difabrikasi bagi tujuan pengukuran spesis ion yang pelbagai [Tsukada et al., 1991; Liu et al., 1998]. Apa yang menjadi lebih menarik ialah ISFET merupakan peranti elektrokimia yang sesuai untuk aplikasi biopenderia kerana permukaan SiO_2 ISFET mengandungi kumpulan SiOH yang bertindak balas. Keadaan ini membolehkan proses pengikatan kovalen molekul organik dan polimer berlaku. Ini menunjukkan ISFET-penderia ion hidrogen yang dihasilkan dapat dipertingkatkan penggunaannya dengan melakukan penambahan lapisan komponen-komponen biologi (contohnya enzim, sel-sel dan tisu) di atas permukaan lapisan sensitif ion ISFET. Biopenderia berasaskan ISFET yang telah dihasilkan ialah transistor kesan medan terpaut-enzim (ENFET) [Luo et al., 2004; Korpan et al., 2002; Yin et al., 2001; Zayat et al., 2000; Kharitonov et al., 2000]. Park dan Dzyadevich telah menambah lapisan glukosa oksida pada permukaan ISFET untuk menghasilkan biopenderia yang mampu mengukur kadar penumpuan glukosa di dalam serum darah [Park et al., 2002; Dzyadevich et al., 1999].

Selain daripada glukosa, ISFET juga telah digunakan untuk menentukan kadar kandungan urea [Soldatkin et al., 1997]. Koch pula telah menghasilkan suatu konsep pengukuran upaya berasaskan ISFET untuk mengenalpasti penumpukan protein [Koch et al., 1999]. Sistem biopenderia protein ini menggunakan dua transistor ISFET yang disambung selari dan pada permukaan kedua-duanya mempunyai kapilari silika terlakur bersalut yang menghasilkan permukaan tindak balas untuk mengesan protein. Perbezaan upaya di antara kedua-dua ISFET dijadikan ukuran untuk menentukan kadar kandungan protein. Contoh lain aplikasi penggunaan ISFET ialah penderia

penjjukan DNA [Purushothaman et al., 2002]. Penderia ini memberikan maklumat mengenai kedudukan jujukan bagi suatu DNA. Penggunaan penderia ini dapat mempercepatkan proses pengecaman jujukan DNA tanpa perlu melakukan kaedah Penamatan Rantai dan Elektroforesis.

Aplikasi ISFET juga turut diperkembangkan dalam bidang alam sekitar dan pertanian. ISFET digunakan untuk menganalisa kesuburan tanah dengan mengesan tahap kandungan ion-ion tertentu seperti potassium, kalsium dan natrium di dalam tanah [Artigas et al., 2001a]. Analisa terhadap tanah menggunakan ISFET juga dilakukan untuk mengawal kadar kandungan racun rumpai atau serangga dan toksid di dalam tanah akibat aktiviti pertanian dan perindustrian [Artigas et al., 2001b; Artigas et al., 2003].

Berdasarkan kepada kepelbagaian aplikasi ISFET yang telah dinyatakan, ini menunjukkan bahawa penyelidikan terhadap ISFET secara berterusan mampu memberikan sumbangan yang bermanfaat terhadap pembangunan teknologi perubatan dan pengawalan alam sekitar.

1.3 Objektif kajian

Kajian ini bertujuan menyelidik dan membangunkan sebuah sistem penderia pH menggunakan transistor kesan medan – sensitif ion (ISFET) yang boleh difabrikasi menggunakan teknologi silikon, CMOS 1 μm . Silikon nitrida, Si_3N_4 telah digunakan sebagai lapisan sensitif-ion dan diendapkan pada bahagian get ISFET menggunakan teknik PECVD.

Isu utama menghasilkan ISFET-penderia pH menggunakan teknologi silikon ialah untuk membina sebuah penderia yang bersaiz mikro dan diaplikasikan dalam bidang bioperubatan. Kaedah ini dapat menggantikan produk penderia bersaiz makro

yang sedia ada. Melalui pendekatan ini juga, penderia dan litar analog bersepadu mampu dihasilkan secara monolit dan ini memberikan kelebihan dari segi penjimatan kos dan mengurangkan kehilangan isyarat yang terhasil.

1.4 Kaedah kajian

Perlaksanaan kajian ini dibahagikan kepada dua bahagian iaitu bahagian penderia ISFET dan bahagian litar elektronik. Kedua-dua bahagian ini direkabentuk dan ditentukan ciri-cirinya menggunakan perisian perkakasan Tanner (MEMs Pro, S-Edit, T-Spice, dan L-Edit) dan Micro Basic.

Rekabentuk bahagian penderia ISFET dimulakan dengan melakukan proses simulasi menggunakan SPICE. Ini bertujuan mengkaji tingkah laku ISFET sebagai penderia pH sebelum rekabentuk sebenar dihasilkan. Semasa proses ini juga, beberapa parameter penting bagi rekabentuk ISFET seperti panjang, L dan lebar, W get ISFET ditentukan. Selepas itu, rekabentuk bentangan penderia ISFET dilukis menggunakan perisian L-Edit dan dihantar ke Taiwan Mask Corporation, TMC untuk menghasilkan acuan proses fabrikasi. Dalam kajian ini, dua jenis ISFET dihasilkan menggunakan dua langkah proses fabrikasi yang berbeza iaitu proses piawai CMOS 1 μm dan proses ringkas CMOS 1 μm . Fabrikasi ISFET menggunakan proses piawai CMOS 1 μm bertujuan mengkaji kebolehannya untuk disepadukan bersama-sama litar elektronik. Manakala proses kedua pula adalah bertujuan menjimatkan kos dan masa fabrikasi sekiranya kita ingin menghasilkan bahagian penderia sahaja. Wafer ISFET yang telah siap difabrikasi kemudiannya dilakukan pemeriksaan menggunakan Pancaran Medan-Mikroskop Pengimbasan Elektron (FE-SEM), mikroskop dan pengujian terhadap struktur ujian PATMOS iaitu rekabentuk transistor piawai proses fabrikasi CMOS 1 μm . Seterusnya, ISFET dihantar ke AACO Technologies Sdn. Bhd. untuk tujuan proses mempakej ISFET.

Bahagian litar elektronik pula dilaksanakan menggunakan peranti-peranti asas elektronik dan diselakukan sambungan litar di atas papan litar bercetak. Setelah itu, ISFET yang telah siap dipakej dilaksanakan ujikaji secara praktikal untuk mengenalpasti ciri-cirinya seperti kadar kepekaan dan kestabilan. Semasa ujikaji terhadap ISFET dilaksanakan, dua jenis elektrod rujukan Ag/AgCl iaitu jenis simpang berganda dan pejal digunakan untuk mengkaji kesan jenis elektrod rujukan terhadap prestasi ISFET. Akhirnya, kesimpulan terhadap ISFET sebagai penderia pH ditentukan berdasarkan keputusan-keputusan yang telah diperolehi.

1.5 Penyusunan Tesis

Selepas pengenalan asasi projek diberikan pada Bab 1, Bab 2 merumuskan kajian ilmiah mengenai penderia ISFET. Persamaan-persamaan yang menjelaskan kelakuan dan ciri-ciri ISFET, lapisan sensitif-pH dan kepentingan penggunaan elektrod rujukan dibincangkan. Kajian ilmiah mengenai model-model penyelakuan ISFET turut disertakan. Bab 3 membincangkan rekabentuk dan fabrikasi ISFET menggunakan proses CMOS piawai dan proses CMOS ringkas. Proses fabrikasi yang sepadan untuk ISFET dan CMOS membolehkan penderia ISFET difabrikasi bersama-sama litar bersepadu di dalam satu cip. Hasil fabrikasi ISFET dan proses rekabentuk pakej ISFET turut dibincangkan.

Bab 4 pula membincangkan ujikaji yang dilakukan melalui pelaksanaan penyelakuan dan juga ujikaji amali terhadap penderia ISFET dan litar antaramuka elektronik. Penyediaan alatan dan bahan ujikaji juga turut dibincangkan. Keputusan yang diperolehi daripada penyelakuan SPICE dan ujikaji amali diberikan dan ciri-ciri ISFET dirumuskan di dalam bab ini. Bab terakhir, iaitu bab 5 memberikan kesimpulan bagi keseluruhan kajian. Rumusan yang diperolehi daripada kajian yang telah dilakukan dibincangkan dan cadangan untuk memperbaiki dan mempertingkatkan status kajian turut diberikan.

BAB 2

KAJIAN ILMIAH – MIKROPENDERIA ISFET

2.0 Pengenalan

Transistor kesan medan – sensitif ion (ISFET) telah diperkenalkan buat pertama kalinya oleh Bergveld pada tahun 1970. Tujuan asal ISFET direkabentuk adalah untuk mengukur fisiologi saraf iaitu kadar ionik fluks dalaman dan fluks luaran pada selaput saraf. Berdasarkan kepada kadar tindakbalas yang tinggi dan peka terhadap ion hidrogen atau perubahan pH, ISFET telah mendapat perhatian ramai dan kajian yang meluas dilakukan untuk mempelbagaikan kegunaannya.

Dalam bab ini, kajian ilmiah mengenai ISFET sebagai mikropenderia dirumuskan. Fungsi ISFET yang lebih mirip kepada mikropenderia pH mempunyai sifat yang hampir sama dengan Transistor kesan medan - semikonduktor logam-oksida (MOSFET). Oleh itu, pengenalan mengenai MOSFET diberikan dalam bab ini. Mekanisma yang terlibat dalam operasi ISFET sebagai penderia pH dibincangkan dengan lebih terperinci pada bab ini supaya peranan dan operasi ISFET sebagai pengesanan kadar penumpuan ion hidrogen dapat difahami. Beberapa lapisan sensitif ion yang sensitif terhadap ion hidrogen juga dibincangkan. Salah satu bahagian penting dalam ISFET ialah elektrod rujukan dan di antara ciri-ciri ISFET ialah ia amat peka terhadap cas elektrostatik. Oleh yang demikian, sedikit penerangan mengenai teknik perlindungan terhadap kesan penyahcas elektrostatik, ESD juga disertakan.

Sifat-sifat ISFET boleh dikenalpasti dan dikaji dengan menggunakan model-model simulasi. Beberapa jenis model simulasi iaitu SPICE, HDL-A, TACD dibincangkan. Penggunaan model-model simulasi ini memudahkan pemilihan dan penentuan parameter-parameter penderia yang sesuai dan juga untuk melakukan simulasi ISFET bersama-sama litar antaramuka penderia yang telah direkabentuk.

2.1 Transistor kesan medan - semikonduktor logam-oksida (MOSFET)

Sifat dan struktur fizikal mikropenderia ISFET adalah berdasarkan kepada MOSFET, maka penerangan ringkas mengenai ciri-ciri MOSFET saluran-n diberikan. Rajah 2.1 menunjukkan ilustrasi keratan rentas bagi struktur MOS saluran-n. Dengan mengenakan voltan bernilai 0 volt di bahagian get (G), saluran pengaliran tidak akan terbentuk di antara kawasan punca (S) dan saluran (D) transistor. Apabila suatu voltan get positif V_{GS} dikenakan pada struktur MOS, cas-cas negatif akan teraruh pada kawasan permukaan atas semikonduktor iaitu bahagian di bawah oksida get. Jika nilai voltan get V_{GS} yang dikenakan agak besar, kawasan penumpuan elektron teraruh akan membentuk suatu saluran pengaliran jenis-n di antara punca dan saluran. Nilai voltan get V_{GS} yang diperlukan untuk membentuk lapisan penyongsangan dikenali sebagai voltan ambang, V_{th} . Keratan rentas dan ciri-ciri pindah keluaran I-V bagi suatu MOSFET saluran-n (NMOS) ditunjukkan pada Rajah 2.1;(a), (b) dan (c).

Hubung kait di antara arus saluran, I_D , voltan saluran-punca, V_{DS} , voltan get-punca, V_{GS} , dan voltan ambang, V_{th} bagi kawasan tepu, ($V_{DS} \geq V_{GS} - V_{th}$), ditunjukkan oleh persamaan di bawah [Massobrio, 1993];

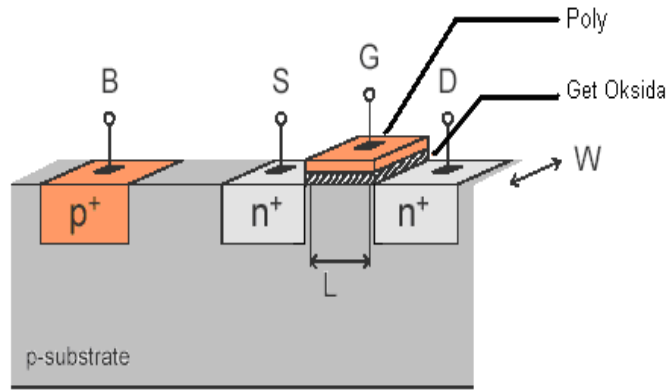
$$I_D = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_{th})^2 (1 + \lambda V_{DS}) \quad (2-1)$$

Manakala persamaan untuk kawasan lurus, ($V_{DS} \leq V_{GS} - V_{th}$) pula ialah,

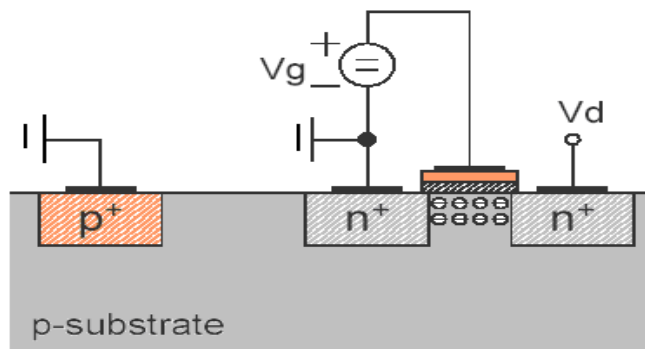
$$I_D = \beta \left(V_{GS} - V_{th} - \frac{V_{DS}}{2} \right) V_{DS} (1 + \lambda V_{DS}) \quad (2-2)$$

laitu,

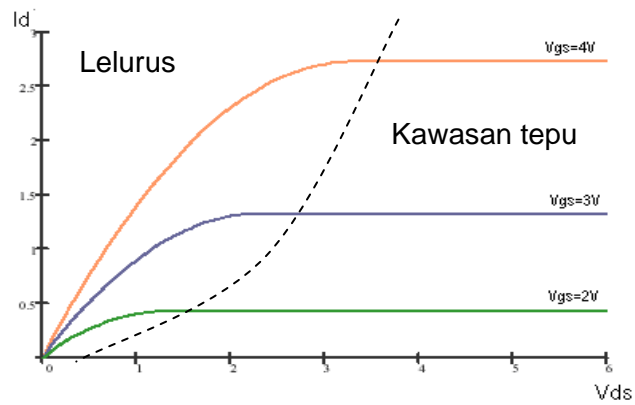
$$\beta = \mu C_{ox} \frac{W}{L} \quad (2-3)$$



(a)



(b)



(c)

Rajah 2.1: Transistor NMOS; (a) Pandangan keratan rentas, (b) Struktur skematik NMOS, (c) Ciri-ciri keluaran I_D/V_{DS} .

dengan C_{ox} ditakrifkan sebagai pemuat penebat per unit luas, μ ialah kebolehergerakan cas pembawa di dalam saluran, W ialah lebar saluran, L ialah panjang saluran, dan λ ialah parameter pemodulatan panjang saluran.

Sentuhan substratum, iaitu jasad atau pun pukat (B) selalunya disentuhkan ke bahagian punca. Bagi sesetengah aplikasi, punca adalah dalam keadaan voltan yang lebih tinggi berbanding dengan pukat. Voltan dalam keadaan tersebut dikenali sebagai voltan punca-pukat, V_{SB} . Voltan ini akan mengubah upaya saluran semikonduktor dan mempengaruhi nilai voltan ambang, V_{th} . Nilai V_{th} ditentukan oleh ciri-ciri bahan semikonduktor dan juga proses fabrikasi. Persamaan bagi voltan ambang, V_{th} ialah;

$$V_{th}(MOSFET) = V_{to} + \gamma \left(\sqrt{2\phi_F + V_{SB}} - \sqrt{2\phi_F} \right) \quad (2-4)$$

$$V_{to} = V_{FB} + 2|\phi_F| + \gamma \sqrt{2|\phi_F|} \quad (2-5)$$

V_{to} ditakrifkan sebagai voltan punca-pukat pada keadaan sifar $V_{SB} = 0V$, ϕ_F merupakan kekuatan penyongsangan upaya permukaan atau dikenali sebagai upaya Fermi, γ ialah parameter kesan-jasad, manakala V_{FB} ialah voltan jalur-rata dan nilainya ditentukan melalui kepadatan keadaan permukaan, N_{SS} dan upaya metal-semikonduktor ϕ_{MS} :

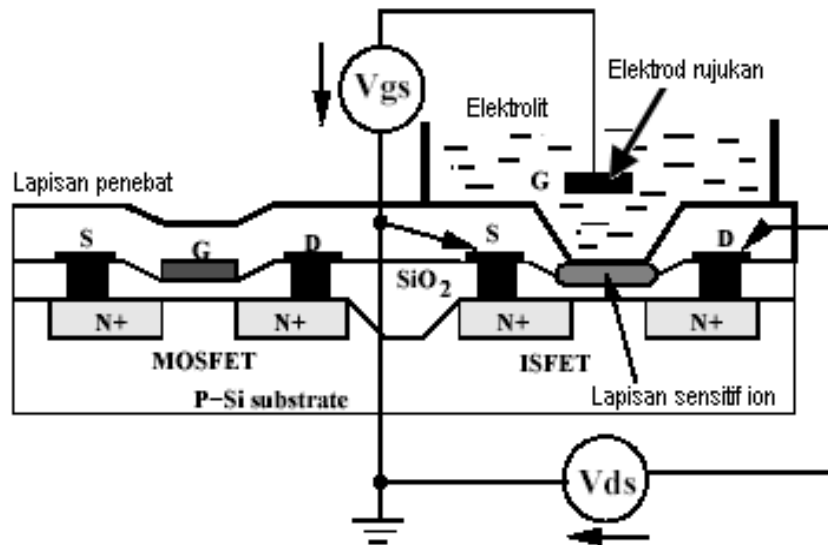
$$V_{FB} = \phi_{MS} - q \frac{N_{SS}}{C_{ox}} \quad (2-6)$$

$$\phi_F = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_{SUB}}{n_i} \quad (2-7)$$

iaitu, n_i ialah penumpuan pembawa hakiki dan N_{SUB} ialah pengedopan (separuh pengalir) substratum.

2.2 Transistor kesan medan – sensitif ion (ISFET)

Bergveld telah memperkenalkan satu konsep mengukur penumpuan kandungan kimia menggunakan peranti keadaan pepejal, yang dinamakan ISFET [Bergveld, 2003; Park et al., 2002; Liao et al., 1999]. ISFET merupakan sebuah MOSFET terubahsuai, yang sensitif terhadap sesuatu ion dan bahagian get elektrod logamnya dibuang dan digantikan dengan lapisan get penebat yang sensitif terhadap ion. Rajah 2.2 menunjukkan bahagian get ISFET didedahkan kepada larutan elektrolit bagi membolehkan tindakbalas ion berlaku. Pemilihan get penebat organik atau tidak organik yang tepat dan bersesuaian, membolehkan peranti ISFET peka terhadap ion-ion yang berbeza atau pelbagai jenis ion yang lain. Permukaan pengesan get saling mempengaruhi terutamanya dengan ion-ion hidrogen yang hadir di dalam larutan. Akibat daripada tindakbalas tersebut, penumpuan ion hidrogen mengalami perubahan dan mempengaruhi voltan ambang, V_{th} ISFET iaitu dengan mengubahsuai upaya elektrolit-lapisan sensitif ion. Voltan ambang ISFET bukan lagi merupakan parameter tetap yang hanya bergantung kepada ciri-ciri peranti keadaan pepejal sahaja, tetapi ia merangkumi kesemua perbezaan upaya bagi permukaan-permukaan tambahan elektrod-elektrolit-lapisan sensitif ion [Chen et al., 1986; Swaminathan et al., 2002].



Rajah 2.2: Keratan rentas MOSFET dan ISFET.

2.3 Mekanisma ISFET

Penggunaan model 'site-binding' yang telah dikemukakan oleh Yates pada tahun 1974 [Yuqing et al., 2003] dapat menerbitkan persamaan yang mengaitkan upaya permukaan elektrolit-lapisan sensitif ion dengan aktiviti ion-ion hidrogen, H^+ . Teori ini, bersama-sama dengan gambaran 'Gouy-Chapman-Stern' bagi susuk upaya di dalam elektrolit [Niu et. al., 1996; Janicki et. al., 2004], digabungkan dalam bentuk fizikal semikonduktor logam-okside (MOS) terubahsuai iaitu semikonduktor elektrolit-lapisan sensitif ion (EIS) untuk memberikan gambaran yang lengkap mengenai sifat-sifat ISFET.

2.3.1 Model Site-Binding

Model 'site-binding' [Fung et al., 1986; Artigas et al., 2001; Janicki et al., 2004] merupakan teori yang menerangkan konsep bagaimana ISFET mengenalpasti penumpuan ion hidrogen, H^+ . Penggunaan model ini dapat memberikan penerangan yang lebih jelas mengenai operasi ISFET. Kini, model 'site-binding' telah menjadi suatu

teori yang paling sesuai dan diterima pakai untuk menggambarkan dan menjelaskan mekanisme ISFET [Meixner et al., 1992].

Model ini diperkenalkan oleh Yates pada tahun 1974 bagi menjelaskan ciri-ciri antaramuka elektrolit oksida berair. Fung et al. [1986] telah menggunakan model tersebut untuk menentukan ciri-ciri ISFET yang menggunakan penebat get oksida iaitu salah satu bahan yang sensitif terhadap H^+ . Model ini telah dikenalpasti di dalam asas termodinamik bagi tindakbalas keseimbangan kumpulan permukaan dan teori 'Gouy-Chapman-Stern' untuk taburan ion pada antaramuka elektrolit-pepejal. Konsep model 'site-binding' ini adalah berdasarkan kepada asas-asas keseimbangan termodinamik di antara penumpuan H^+ di dalam pukal bagi larutan dengan upaya elektrik pada permukaan lapisan sensitif ion. Peneutralan cas diandaikan bagi keseluruhan struktur, oleh itu cas permukaan akan digantikan semula oleh ion-ion berlawanan cas yang terdapat di dalam larutan pada satah bersebelahan permukaan lapisan sensitif ion dan saluran cas. Penyusunan ion-ion daripada permukaan lapisan sensitif ion ke pukal larutan menunjukkan bahawa upaya permukaan adalah bergantung kepada penumpuan ion dan cas permukaan. Menurut teori ini kehadiran ion-ion di dalam larutan yang bertindakbalas dengan ion cas positif dan ion cas negatif tapak aktif pada permukaan lapisan sensitif ion akan membentuk pasangan-pasangan tapak aktif-hidrogen. Pembentukan pasangan tapak aktif-hidrogen tersebut mengakibatkan berlakunya perubahan jumlah bilangan cas tapak aktif pada permukaan lapisan sensitif ion. Keadaan ini mempengaruhi nilai arus yang mengalir melalui saluran transistor disebabkan oleh nilai voltan ambang, V_{th} yang berubah-ubah akibat perubahan bilangan cas tapak aktif pada permukaan lapisan sensitif ion.

Berdasarkan model 'site-binding', permukaan oksida (iaitu permukaan sensitif ion) mengandungi tiga jenis keadaan tapak permukaan iaitu $A-OH_2^+$, $A-OH$ dan

$A-O^-$. Keadaan ini digambarkan pada Rajah 2.3. Sifat berasid dan beralkali bagi tapak neutral $A-OH$ akan ditentukan ciri-cirinya oleh keseimbangan pemalar K_a dan K_b , dan ianya dapat ditunjukkan seperti persamaan berikut [Bergveld, 2003]:



iaitu,

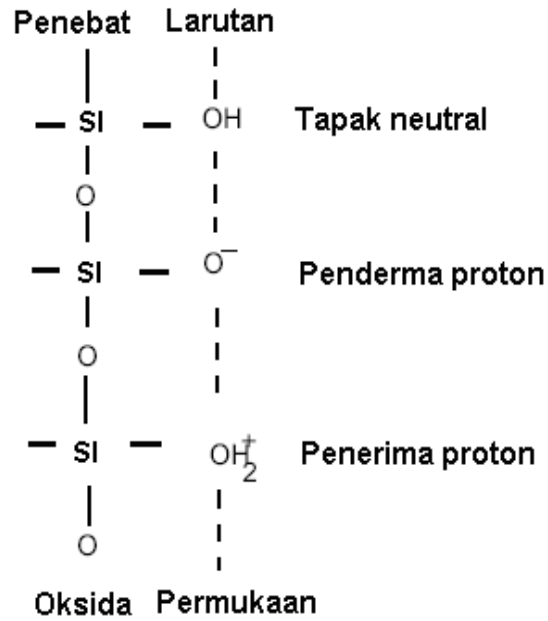
$$K_a = \frac{[A-O^-][H^+]_s}{[A-OH]} \quad (2-10)$$

$$K_b = \frac{[A-OH_2^+]}{[A-OH][H^+]_s} \quad (2-11)$$

Merujuk kepada persamaan (2-8) hingga (2-11), $A-OH_2^+$, $A-OH$ dan $A-O^-$ masing-masing mewakili tapak permukaan positif, neutral dan negatif, manakala $[A-OH_2^+]$, $[A-OH]$ dan $[A-O^-]$ adalah jumlah tapak per luas permukaan. Dalam keadaan ini, keaktifan H_S^+ adalah dalam bentuk $[H^+]_s$, iaitu penumpuan permukaan. Kaitan di antara $[H^+]_s$ dan penumpuan pukal ion-ion H^+ diberikan oleh persamaan Boltzmann berikut:

$$[H^+]_s = [H^+]_b \exp\left(\frac{-q\phi_{eo}}{KT}\right) \quad (2-12)$$

iaitu, q ialah cas asas, ϕ_{eo} ialah upaya permukaan elektrolit-lapisan sensitif ion, T ialah suhu, dan K ialah pemalar Boltzmann.



Rajah 2.3: Gambaran model 'Site-Binding'.

Bagi upaya permukaan, ia dijana oleh jumlah bersih cas di antaramuka elektrolit-lapisan sensitif ion, σ_0 .

$$\sigma_0 = q([A - OH_2^+] - [A - O^-]) \quad (2-13)$$

Manakala jumlah keseluruhan tapak per unit luas ialah

$$N_s = [A - OH] + [A - OH_2^+] - [A - O^-] \quad (2-14)$$

Hubungan di antara $[H^+]_b$, φ_{eo} dan σ_0 boleh diterbitkan daripada persamaan (2-10) hingga (2-14) dalam sebutan K_a , K_b dan N_s , iaitu parameter ciri-ciri suatu oksida tertentu.

$$\ln[H^+]_b - \ln\left(\frac{K_a}{K_b}\right)^{1/2} = \frac{q\varphi_{eo}}{KT} + \sinh^{-1} \frac{\sigma_0}{qN_s} \left(\frac{1}{4K_a K_b}\right)^{1/2} \quad (2-15)$$

Untuk menerbitkan hubungan di antara $pH = -\log_{10}[H^+]_b$ dan φ_{eo} , σ_0 perlu dijadikan dalam bentuk φ_{eo} . Ini menunjukkan bahawa, dalam keadaan kes praktikal lapisan berlapis pemuat boleh dianggarkan menggunakan satu nilai pemalar pemuat, C_{eq} (diterbitkan daripada model 'Gouy-Chapman-Stern' [Martinoia et al., 2005]), yang dapat memberikan hubungan di antara φ_{eo} dan σ_0 :

$$\sigma_0 = \varphi_{eo} C_{eq} \quad (2-16)$$

Persamaan (2-15) telah menunjukkan perhubungan di antara φ_{eo} dan pH. Walau bagaimanapun, penerangan yang lebih jelas diperlukan bagi aplikasi secara praktikal. Oleh itu, berdasarkan persamaan (2-15) titik rujukan dalam skala pH iaitu nilai pH pada keadaan φ_{eo} , dapat ditunjukkan seperti berikut;

$$pH_{pzc} = -\log_{10}(K_a K_b)^{1/2} = \frac{1}{2}(pK_a + pK_b) \quad (2-17)$$

iaitu K_a dan K_b ialah pemalar keseimbangan, manakala $pK_a = -\log_{10}(K_a)$ dan $pK_b = -\log(K_b)$. Keadaan ini dipanggil nilai pH pada titik cas sifar (pH_{pzc}), kerana $\varphi_{eo} = 0$ memberikan nilai $\sigma_0 = 0$, atau, dengan kata lain, pH_{pzc} memberikan nilai penumpuan ion hidrogen yang terhasil pada keadaan permukaan neutral elektrik. Maka, persamaan akhir dapat dituliskan seperti berikut:

$$2.303(pH_{pzc} - pH) = \frac{q\varphi_{eo}}{KT} + \sinh^{-1}\left(\frac{q\varphi_{eo}}{KT} \frac{1}{\beta}\right) \quad (2-18)$$

iaitu,

$$\beta = \frac{2q^2 N_s (K_b / K_a)^{1/2}}{KTC_{eq}} \quad (2-19)$$

Sebahagian daripada nilai pH_{pzc} , β merupakan satu-satunya parameter yang menjelaskan hubungkait bagi $\frac{\varphi_{eo}}{pH}$. Parameter ini bergantung kepada permukaan tindakbalas yang dihasilkan oleh K_a , K_b dan N_s . Persamaan (2-18) boleh dikenal bezakan kepada dua bahagian bagi keluk $\frac{\varphi_{eo}}{pH}$, iaitu dapat diberikan seperti berikut:

Apabila $\frac{q\varphi_{eo}}{KT} \leq \beta$, ia memberikan:

$$\varphi_{eo} = 2.303 \frac{KT}{q} \frac{\beta}{\beta + 1} (pH_{pzc} - pH) \quad (2-20)$$

Manakala untuk keadaan $\frac{q\varphi_{eo}}{KT} \geq \beta$, ia memberikan:

$$2.303(pH_{pzc} - pH) \approx \frac{q\varphi_{eo}}{KT} + \ln \frac{2q\varphi_{eo}}{\beta KT} \approx \ln \frac{2q\varphi_{eo}}{\beta KT} \quad (2-21)$$

Daripada persamaan tersebut, dapat ditunjukkan bahawa apabila nilai β adalah besar, maka kereaktifan atau tindakbalas pada permukaan meningkat, dan lebih banyak φ_{eo} berkelakuan dalam bentuk Nernstian. Apabila permukaan pada keadaan β adalah rendah, ini menyebabkan ISFET kurang peka terhadap pH dan bersifat tidak lurus.

2.3.2 Struktur semikonduktor elektrolit-lapisan sensitif ion, EIS

Lengkung pemuat-voltan (C-V) telah digunakan untuk mengetahui dan menganalisa parameter keadaan pepejal bagi struktur semikonduktor logam-oksida, MOS. Cara yang sama juga boleh digunakan kepada struktur semikonduktor elektrolit-lapisan sensitif ion, EIS untuk menganalisa ciri-ciri permukaan elektrolit-lapisan sensitif ion [Fung et al., 1986; Perrot, 1990]. Dalam hal ini, logam yang bersentuhan dengan penebat bagi struktur MOS digantikan dengan elektrolit iaitu kawasan cecair yang dikenakan voltan dengan menggunakan elektrod rujukan. Gambarajah asas dan berbilang-fasa struktur EIS ditunjukkan pada Rajah 2.4. Persamaan untuk voltan jalur-rata, V_{FB} bagi struktur EIS dapat ditunjukkan seperti berikut:

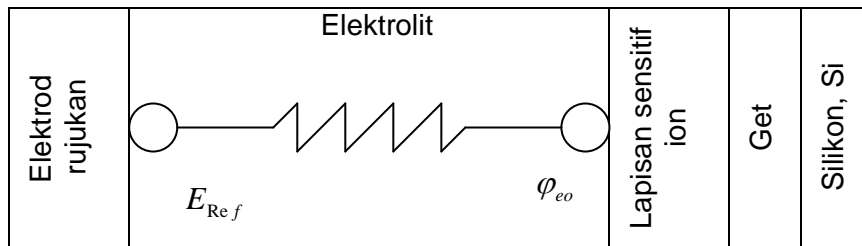
$$V_{FB} = E_{ref} - \varphi_{eo} + \chi^{sol} - \frac{\Phi_{Si}}{q} - \frac{Q_{ox} + Q_{ss}}{C_{ox}} \quad (2-22)$$

laitu φ_{eo} adalah upaya permukaan elektrolit-lapisan sensitif ion dan χ^{sol} pula merupakan upaya permukaan dwikutub bagi larutan. Dalam kes ini, nilai E_{ref} mengandungi fungsi kerja metal, Φ_M bagi substratum logam elektrod rujukan, iaitu ungkapan yang digunakan untuk voltan jalur-rata bagi struktur MOS. Kesemua sebutan dalam persamaan ini adalah malar kecuali φ_{eo} yang bersandar kepada pH.

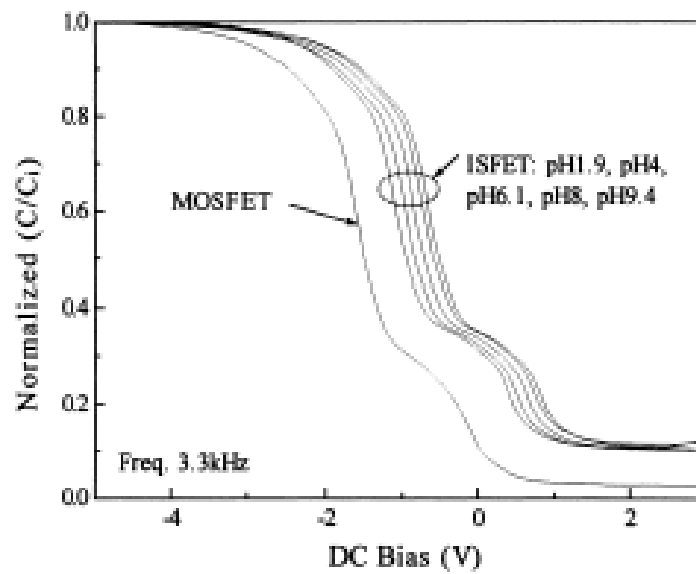
Ciri lengkung C-V untuk sistem elektrolit-SiO₂ ditunjukkan pada Rajah 2.5 bersama-sama dengan lengkung C-V MOS yang sepadan [Liao et al., 1999]. Persamaan bentuk ciri lengkung C-V ini disebabkan oleh permukaan oksida yang digunakan untuk sentuhan dengan elektrolit adalah sama seperti oksida yang menyaluti logam. Dapat ditunjukkan daripada Rajah 2.5, kesemua lengkung EIS menganjak ke arah kanan sama seperti lengkung MOS, yang terhasil daripada

$$E_{ref} - \varphi_{eo} + \chi^{sol} - \frac{\Phi_M}{q}, \text{ manakala lengkung EIS pula bersandar kepada pH yang}$$

terhasil akibat sumbangan φ_{eo} .



Rajah 2.4: Gambarajah asas dan multi-fasa struktur EIS.



Rajah 2.5: Lengkung graf C-V bagi struktur EIS elektrolit-SiO₂-Si. (Diperolehi daripada artikel Liao et al., [1999])

2.3.3 Mekanisma operasi ISFET sebagai penerima pH

Peranti ISFET dihasilkan melalui pengubahsuaian model MOSFET, iaitu dengan membuat andaian bahawa tindakbalas pH bergantung kepada tindakbalas Nernstian atau tindakbalas mirip-Nernstian (quasi-Nernstian) [Artigas et al., 2001]. ISFET yang beroperasi dengan baik akan bertindakbalas menghampiri nilai tindakbalas Nernstian iaitu pada kadar sensitiviti 59.2 mV/pH pada suhu operasi 25°C. Berdasarkan kepada struktur MOSFET, bahagian get logamnya digantikan dengan kombinasi elektrod rujukan, elektrolit dan lapisan sensitif ion untuk membentuk sebuah peranti ISFET. Bagi kawasan lurus, ciri-ciri arus-voltan unggul, I-V bagi model ISFET tambahan saluran-n (*n-channel enhancement*) dapat dijelaskan berdasarkan persamaan berikut:

$$I_D = g_m [2(V_{GS} - V_{th})V_{DS} - V_{DS}^2] \quad (2-23)$$

iaitu $g_m = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2L}$ adalah parameter pengaliran, μ_n ialah kebolehergerakan elektron di dalam lapisan penyongsangan, C_{ox} adalah pemuat penebat per unit luas, W/L adalah nisbah lebar-panjang, V_{th} pula adalah voltan ambang bagi ISFET dan ditunjukkan seperti berikut:

$$V_{th}(ISFET) = V_{th}(MOSFET) + E_{ref} + \chi^{sol} - \varphi_{eo} - \frac{\Phi_M}{q} \quad (2-24)$$

iaitu $V_{th}(MOSFET)$ ialah voltan ambang bagi MOSFET, Φ_M/q adalah fungsi kerja logam, E_{ref} adalah upaya elektrod rujukan nisbi kepada vakum, χ^{sol} adalah upaya permukaan dwikutub bagi pelarut, dan φ_{eo} ialah upaya permukaan pada antaramuka elektrolit- lapisan sensitif ion, seperti yang dinyatakan pada persamaan (2-20).

Persamaan (2-23) dan (2-24) menjelaskan konsep ISFET yang menunjukkan bahawa ISFET mempunyai persamaan dengan MOSFET, kecuali voltan ambang ISFET yang bersandaran kepada kadar penumpuan ion hidrogen. Apabila persamaan (2-23) dan (2-24) digantikan ke dalam persamaan (2-20), maka persamaan bagi ciri I-V dapat dituliskan seperti berikut:

$$I_D = g_m \left[2 \left(V_{GS} - 2.303 \frac{kT}{q} \frac{\beta}{\beta + 1} pH - V_{th}^* \right) V_{DS} - V_{DS}^2 \right] \quad (2-25)$$

iaitu V_{th}^* adalah voltan ambang yang diubahsuai dan $V_{GS} - 2.303 \frac{kT}{q} \frac{\beta}{\beta + 1} pH$ merupakan pemalar pada upaya elektrod rujukan tertentu. Apabila V_{DS} iaitu voltan pemalar beroperasi pada kawasan tidak tepu, penumpuan pH boleh digambarkan oleh persamaan lurus;

$$I_D = \alpha \times V_{GS} - S_1 \times pH - \Theta \quad (2-26)$$

iaitu $\alpha = 2K_n V_{DS}$, $S_1 = 2.303 \frac{kT}{q} \frac{\beta}{\beta + 1} \alpha$ dan $\Theta = \alpha(V_{th}^* + 0.5V_{DS})$

Manakala untuk kawasan tepu pula, ciri I-V unggul bagi model ISFET saluran-n ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$I_D = g_m (V_{GS} - V_{th})^2 \quad (2-27)$$

Persamaan untuk ciri I-V kawasan tepu dapat dituliskan seperti berikut:

$$I_D = g_m \left[(V_{GS} - V_{th}^*)^2 - 4.606(V_{GS} - V_{th}^*) \frac{kT}{q} \frac{\beta}{\beta+1} pH - \left(2.303 \frac{kT}{q} \frac{\beta}{\beta+1} \right)^2 pH^2 \right] \quad (2-28)$$

Apabila keadaan $V_{GS} \geq 2.303 \frac{kT}{q} \frac{\beta}{\beta+1} pH + V_{th}^*$ dipenuhi, sebutan

$\left(2.303 \frac{kT}{q} \frac{\beta}{\beta+1} \right)^2 pH^2$ boleh diabaikan. Maka, V_{GS} adalah nilai tertentu yang

memenuhi keadaan lurus dalam persamaan (2-28) dan penumpuan pH dapat digambarkan oleh persamaan lurus

$$I_D = A - S_2 \times pH \quad (2-29)$$

iaitu $A = g_m (V_{GS} - V_{th}^*)^2$ dan $S_2 = 4.606 g_m (V_{GS} - V_{th}^*) \frac{kT}{q} \frac{\beta}{\beta+1}$ adalah malar.

2.4 Selaput-selaput sensitif pH

Kepekaan kimia dan sifat memilih suatu ISFET adalah bergantung kepada ciri-ciri antaramuka elektrolit dan lapisan sensitif ion. Terdapat beberapa bahan yang selalu digunakan sebagai lapisan get tak organik untuk penerima pH iaitu SiO_2 , Al_2O_3 , Si_3N_4 dan TaO_5 . Secara praktikal, lapisan-lapisan ini akan dimendapkan pada bahagian lapisan teratas SiO_2 get dengan menggunakan teknik-teknik Pemendapan wap kimia (CVD), Pemendapan Pyrolytic, atau teknik pemercitan [Cané et al., 1997]. Jadual 2.1 memberikan rumusan mengenai lapisan-lapisan sensitif terhadap ion hidrogen yang digunakan untuk aplikasi ISFET. Berdasarkan kepada beberapa kes kajian ilmiah pada Bahagian 1.3, ini ternyata bahawa, ISFET boleh diperluaskan lagi aplikasinya dengan menggunakan pelbagai selaput yang bersifat memilih seperti enzim dan polimer. Pemilihan lapisan sensitif ion bukan organik (atau organik) yang tepat dan sesuai, menjadikan ISFET sangat sensitif terhadap sesuatu ion atau pelbagai ion yang berbeza.