



โครงการวิจัยการวิเคราะห์สเปกตรัมระหว่างผิวของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

โดย

ดร. เกวียงศักดิ์ เฉลิมศิริกุล

(วุฒิ) B.E. (E.E.) Auckland, M.S.E.E. and Ph.D. (Notre-Dame)

รศ.ดร. มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร

(วุฒิ) วศ.บ. (ไฟฟ้า) เกียรตินิยม จุฬาฯ, วศ.บ. (ไฟฟ้า) จุฬาฯ

D.E.A. and Dr. Ing, l' ENSEEIHT, Toulouse, France

รศ.ดร. บรรยง ไตรระเสวีรุหงส์

(วุฒิ) วศ.บ. (ไฟฟ้า) เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง จุฬาฯ

D.E.A. and Dr. Ing, University of Paul Sabatier, Toulouse,  
France

ผศ.ดร. มุทธนา ภูฉวีพิศ

(วุฒิ) วศ.บ. (ไฟฟ้า) เกียรตินิยม จุฬาฯ

D.E.A. and Dr. Ing, INSA, Rennes, France

โครงการวิจัยเลขที่ 22G-EE-2528

ทุนส่งเสริมการวิจัยงบประมาณแผ่นดินปี 2528

สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพฯ

กันยายน 2530

รายงานฉบับสมบูรณ์ของโครงการวิจัย

เรื่อง

"การวิเคราะห์สถานะระหว่างผิวของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ"

(Analysis of Interface States for Semiconductor Devices)

ผู้ทำวิจัย :      ดร. เกียรติศักดิ์ เฉลิมดีระกูล  
                  ดร. มนตรี           สวัสดิ์ศฤงฆาร  
                  ดร. บรรยง           โคปุระเสวีรัฐหงส์  
                  ดร. ยุทธนา           กุลวิฑิต



ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทุนวิจัย :      ทุนวิจัยงบประมาณแผ่นดิน มีงบประมาณ 2528 เป็นเงิน 135,000 บาท

ระยะเวลาทำวิจัยที่กำหนดให้ : มกราคม 2528 - ธันวาคม 2528

รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 1 : ส่งเมื่อ วันที่ 3 กรกฎาคม 2528

รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 2 : ส่งเมื่อ วันที่ 11 พฤศจิกายน 2528

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ : ส่งเมื่อ วันที่ 9 กรกฎาคม 2530



### บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของโครงการวิจัยนี้ เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ความหนาแน่นของสเตรทระหว่างผิวของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งของตัวเก็บประจุ MOS โดยการวัดลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ MOS ที่สร้างขึ้น การวัดความจุไฟฟ้า-แรงดันนี้จะทำบนระบบเครื่องวัดโดยอัตโนมัติที่ทำขึ้นมา ค่าความหนาแน่นของประจุระหว่างผิวและข้อมูลอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องจะถูกคำนวณมาจากเคิร์ฟความจุไฟฟ้า-แรงดันที่วัดได้จากการทดลอง ค่าที่คำนวณได้เหล่านี้จะมีประโยชน์โดยเป็นข้อมูลย้อนกลับเข้าไปเพื่อปรับปรุงคุณภาพของตัวเก็บประจุ MOS ให้ดีขึ้น และยังเป็นประโยชน์ต่อการวิจัยและพัฒนาทรานซิสเตอร์ชนิด MOSFET บนสารซิลิกอนอีกด้วย

## Abstract

The objective of this research is to conduct a study and an analysis of interface state density of semiconductor devices, specifically of MOS capacitors, by means of capacitance-voltage measurements. Measurements will be done on an automated C-V characterization system. Interface state densities and other related information can be extracted from the measured C-V curves. These results are expected to be useful in improving quality of MOS devices as well as for research and development of silicon MOSFETs.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	iii
Abstract.....	iv
1. บทนำ.....	1
2. ทฤษฎีของสิ่งประดิษฐ์ MOS (MOS Devices) และ MOS Capacitors....	3
2.1 โครงสร้าง MOS เชิงอุดมคติ (Ideal MOS Structure).....	3
2.2 Non-ideal MOS.....	18
3. เครื่องมือวิเคราะห์และการพัฒนาซอฟต์แวร์ในการวิเคราะห์ความหนาแน่นของ สเดตระหว่างผิว.....	30
3.1 เครื่องมือวิเคราะห์.....	30
3.2 การพัฒนาซอฟต์แวร์.....	34
4. การวัดและการวิเคราะห์ผลการวัดของตัวเก็บประจุ MOS.....	37
4.1 ตัวเก็บประจุ MOS.....	37
4.2 การวัดลักษณะสมบัติความจุ-แรงดัน.....	37
4.3 การวิเคราะห์ผลการวัดตัวเก็บประจุ MOS.....	41
5. สรุปผลโครงการและข้อ เสนอแนะ.....	49
กิตติกรรมประกาศ.....	51
ภาคผนวก.....	52
หนังสืออ้างอิง.....	57



## 1. บทนำ

สภาวะระหว่างผิว (surface states หรือ interface states) หมายถึงระดับพลังงานที่เกิดขึ้นใน forbidden band gap ที่ผิวสัมผัสระหว่างฉนวนและสารกึ่งตัวนำ ซึ่งทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุกับสารกึ่งตัวนำได้ในเวลาอันสั้น (1)

สภาวะระหว่างผิวได้เป็นอุปสรรคสำหรับอย่างหนึ่งคือการพัฒนาสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ MOS (Metal-oxide semiconductor) ในระยะแรกเริ่มของการพัฒนาทรานซิสเตอร์ (ประมาณปี ค.ศ. 1950-1951) จึงทำให้เทคโนโลยีของทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพล่าร์จังก์ชัน (ทรานซิสเตอร์หาคู่) รุดหน้าไปก่อน (2) ต่อมาเมื่อได้มีการศึกษาค้นคว้าและทำวิจัยของโครงสร้าง MOS เพื่อนำไปพัฒนาเป็นทรานซิสเตอร์ชนิด MOSFET (Metal-oxide semiconductor field effect transistor) มากขึ้น เพราะ MOSFET มีข้อดีเหนือทรานซิสเตอร์หาคู่ เนื่องจากมีโครงสร้างที่ง่ายกว่า มีขนาดเล็กกว่า และกินไฟน้อยกว่า จึงเหมาะแก่การนำไปเป็นส่วนประกอบในไอซี (integrated circuits) จึงได้ทราบถึงสาเหตุของอุปสรรคในการทำ MOS ที่ดี ซึ่งรวมทั้งการที่มีไอออนบวกที่เคลื่อนที่ได้ในชั้นออกไซด์ และสภาวะระหว่างผิวซึ่งเกิดจากการที่บอนด์ของอะตอมของสารกึ่งตัวนำ (ซิลิกอน) ถูกตัดขาดไปที่ผิวสัมผัส (interface) ระหว่างซิลิกอนและซิลิกอนไดออกไซด์ รวมทั้งสาเหตุอื่น ๆ อีกด้วย สาเหตุสำคัญของการมีไอออนบวกที่เคลื่อนที่ได้ เกิดจากการใช้น้ำที่มีคุณภาพไม่ดีพอในการเตรียมแผ่นผลึก หรือการใช้น้ำที่ไม่สะอาดพอ หรือการ handle แผ่นผลึกอย่างไม่ระมัดระวัง หรือแม้กระทั่งขบวนการผลิตที่ไม่ดีพอ หรือสาเหตุหลาย ๆ ข้อที่กล่าวมานี้รวมกัน ส่วนสาเหตุของการเกิดสภาวะระหว่างผิวที่มีความหนาแน่นสูงมักเกิดจากเงื่อนไขของการปลูกชั้นออกไซด์บนแผ่นผลึกซิลิกอน เช่น อุณหภูมิ เวลา ทิศทาง (orientation) และชนิดของแผ่นผลึก และชนิดของออกซิเจนที่ใช้ (แห้ง ขึ้น ฯลฯ) เป็นต้น การวิเคราะห์หาความหนาแน่นของสภาวะระหว่างผิว จะทำให้ได้ข้อมูลย้อนกลับไปยังขบวนการและเงื่อนไขของการผลิตสิ่งประดิษฐ์ MOS เพื่อทำให้ได้สิ่งประดิษฐ์ที่มีคุณภาพดีขึ้น

การทำงานวิจัยของโครงการนี้ได้ตั้งเป้าหมายงานที่จะดำเนินการดังนี้

1. ประกอบชุดเครื่องมือวัด ที่จะทำการวัดลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวเก็บประจุ MOS โดยอัตโนมัติ เพื่อนำผลที่ได้ไปคำนวณหาความหนาแน่นของประจุระหว่างผิว

2. พัฒนาซอฟต์แวร์หรือโปรแกรมที่จะควบคุมการวัด การเก็บบันทึกข้อมูล การคำนวณ และการแสดงผลข้อมูลเชิงกราฟ ให้เป็นไปได้อย่างรวดเร็วและถูกต้องแม่นยำ

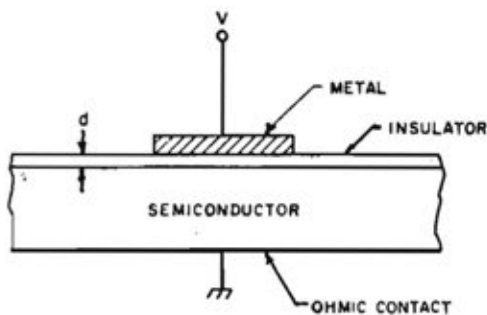
3. ดำเนินการวัดตัวอย่างตัวเก็บประจุ MOS โดยใช้ระบบเครื่องมือวัดอัตโนมัติดังกล่าว และนำผลที่วัดได้มาวิเคราะห์คำนวณหาความหนาแน่นของสเตรระหว่างผิว เพื่อใช้เป็นข้อมูลป้อนกลับไปยังขบวนการผลิต เพื่อให้ได้ผลที่ดียิ่งขึ้น

รายงานฉบับนี้จะกล่าวถึงการดำเนินงานตามขั้นตอนดังกล่าวข้างบน รวมทั้งอธิบายทฤษฎีของโครงสร้าง MOS เพื่อให้เป็นพื้นฐานความเข้าใจของการคำนวณหาความหนาแน่นของสเตรระหว่างผิวของตัวเก็บประจุ MOS

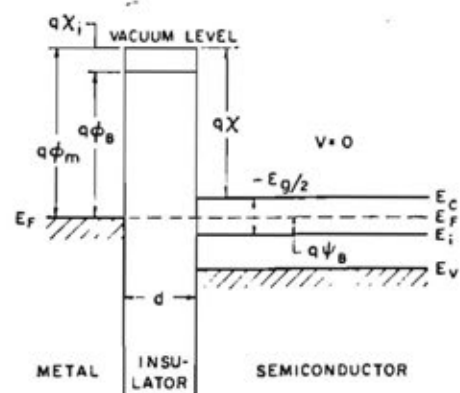
## 2. ทฤษฎีของสิ่งประดิษฐ์ MOS (MOS Devices) และ MOS Capacitors

Metal-oxide-semiconductor (MOS) เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งในกลุ่มของ metal-insulator-semiconductor (MIS) แต่ MOS เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่นิยมมากที่สุด เพราะสารกึ่งตัวนำที่ใช้มากที่สุดในปัจจุบันเป็นซิลิกอน (Si) และฉนวน (insulator) ที่สร้างง่ายที่สุดและมีสมบัติทางไฟฟ้าและเคมีที่ดีที่สุดบนแผ่นผลึกซิลิกอน ก็คือซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) โครงสร้างแบบ MOS ยังสามารถพัฒนาต่อไปเป็น metal-oxide-semiconductor field-effect transistor หรือ MOSFET ซึ่งกำลังเป็นที่นิยมใช้ในไอซีดังที่กล่าวมาในบทนำ การศึกษาสมบัติทางผิว (surface properties) ของสิ่งประดิษฐ์ MOS จึงเป็นสิ่งที่สำคัญ เพราะความน่าเชื่อถือ (reliability) และเสถียรภาพ (stability) ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทุกชนิดมักจะเกี่ยวพันอย่างใกล้ชิดกับของสภาวะผิวของสารกึ่งตัวนำ

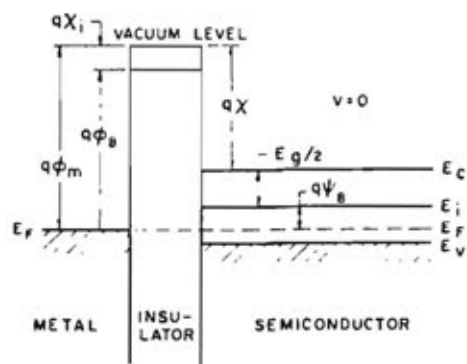
### 2.1 โครงสร้าง MOS เชิงอุดมคติ (Ideal MOS Structure)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของ Metal-oxide semiconductor



(a) IDEAL MOS DIODE (n-TYPE SEMICONDUCTOR)



(b) IDEAL MOS DIODE (p-TYPE SEMICONDUCTOR)

รูปที่ 2.2 แผนภูมิแถบพลังงานของ MOS เชิงอุดมคติที่  $V = 0$



โครงสร้างของ MOS เซิงอุคมคคิแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 d เป็นความหนาของชั้น oxide และ  $V$  เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ใส่ที่แผ่นโลหะ (metal field plate) เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่แผ่นโลหะเป็นบวกเมื่อเทียบกับโหนดิกคอนแทคต์ด้านล่าง ถือว่าเป็นไบแอสตาม (forward bias) เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่แผ่นโลหะเป็นลบเมื่อเทียบกับโหนดิกคอนแทคต์ ถือว่าเป็นไบแอสย้อน (reverse bias)

เมื่อแรงดันไบแอส  $V = 0$  energy band diagram จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.2 (ก) และ 2.2 (ข) สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิด p และสารกึ่งตัวนำชนิด n ตามลำดับ MOS เซิงอุคมคคิจะต้องมีสมบัติดังต่อไปนี้คือ

1. เมื่อ  $V = 0$  work function ของโลหะ ( $\phi_m$ ) และ work function ของสารกึ่งตัวนำ ( $\phi_s$ ) จะต้องอยู่ในระดับเดียวกันนั่นคือ จะต้องมิลักษณะเป็น flat band และ

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left( X + \frac{E_g}{2q} - \psi_B \right) = 0 \quad \text{สำหรับสารชนิด n (2.1 a)}$$

$$\text{หรือ } \phi_{ms} = \phi_m - \left( X + \frac{E_g}{2q} + \psi_B \right) = 0 \quad \text{สำหรับสารชนิด p (2.1 b)}$$

โดยที่  $X$  คือ electron affinity ของสารกึ่งตัวนำ

$X_i$  คือ electron affinity ของฉนวน

$E_g$  คือ band gap

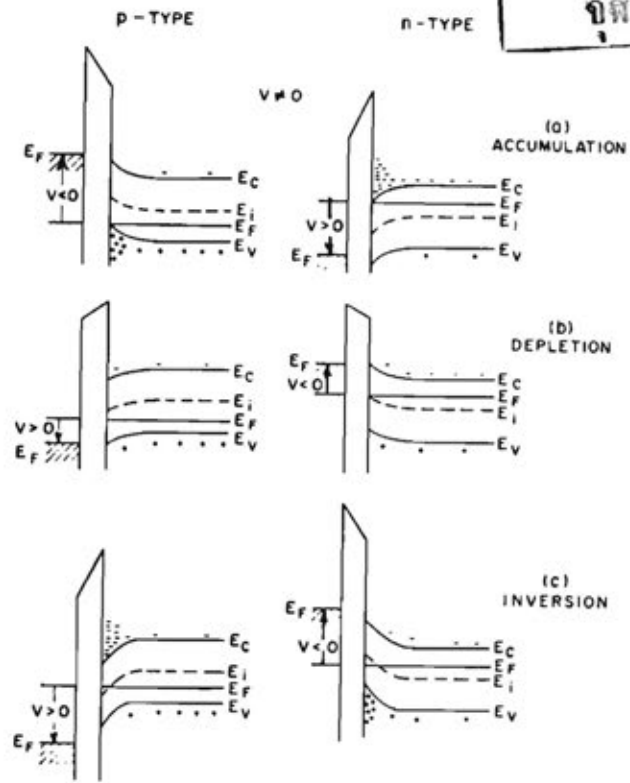
$\phi_B$  คือ potential barrier ระหว่างโลหะและฉนวน

$\psi_B$  คือ ความต่างศักย์ระหว่าง Fermi level  $E_F$  และ intrinsic Fermi level  $E_i$

2. ไม่ว่าจะมีการไบแอสในลักษณะใด จะมีประจุไฟฟ้าได้เพียงใด สารกึ่งตัวนำและประจุไฟฟ้าที่มีปริมาณเท่ากันแต่เครื่องหมายตรงกันข้าม ที่ผิวโลหะซึ่งอยู่ติดกับฉนวนเท่านั้น และ

3. เมื่อมีการไบแอสแรงดันไฟตรง จะต้องไม่มีการถ่ายเทพาหะข้ามชั้นฉนวน นั่นคือ ชั้นฉนวนจะต้องมีความต้านทานจำเพาะเป็นอนันต์

เมื่อมีการไบแอส MOS จะมีการตีที่ต้องพิจารณาอยู่ 3 กรณี กล่าวคือ (สมมุติว่าเป็น MOS ชนิด p )



รูปที่ 2.3 แผนภูมิแถบพลังงานของ MOS เซมิคอนดักเตอร์เมื่อ  $V \neq 0$  สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น

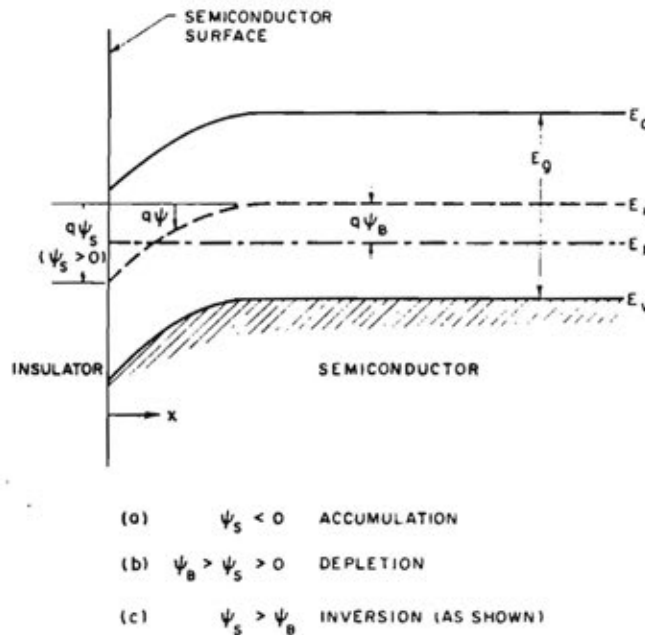
ก. เมื่อแรงดันไบแอสที่ผ่านโลหะเป็นลบ ( $V < 0$ ) วาเลนซ์แบนด์จะโค้งขึ้นเข้าใกล้ Fermi level มากขึ้น ตามรูปที่ 2.3 (ก) เนื่องจากไม่มีกระแสไหลผ่านชั้นออกไซด์ Fermi level จึงคงที่ในสารกึ่งตัวนำ การที่วาเลนซ์แบนด์เข้าใกล้ Fermi level มากขึ้น เปรียบเสมือนว่า ความเข้มข้นของโฮลมีค่าสูงตรงบริเวณผิวสัมผัส จึงเรียกย่านนี้ว่า accumulation

ข. เมื่อแรงดันไบแอสที่ผ่านโลหะมีค่าบวกน้อย ๆ ( $V > 0$ ) แถบพลังงานจะโค้งลง และพาหะข้างมากจะถูกไล่ออกจากบริเวณใกล้ผิวสัมผัส จึงเรียกการทำงานในย่านนี้ว่า depletion (รูปที่ 2.3 (ข))

ค. เมื่อแรงดันไบแอสมีค่าบวกมากขึ้นตามรูปที่ 2.3 (ค) แถบพลังงานจะโค้งลงมากขึ้น จนระดับ intrinsic ( $E_i$ ) ข้าม Fermi level ( $E_F$ ) ที่จุดนี้จำนวนอิเล็กตรอน (ซึ่งเป็นพาหะข้างน้อย) จะมีมากกว่าโฮลที่บริเวณผิวสัมผัส จึงเรียกว่าผิวสัมผัสถูกเปลี่ยน (inverted) และเรียกย่านนี้ว่า inversion

ในกรณีที่ เป็น MOS ชนิด n ขั้วของแรงดันจะตรงกันข้ามกันเพื่อให้ได้ผลลัพท์ที่คล้ายคลึงกัน

### 2.1.1 Surface Space-Charge Region



รูปที่ 2.4 แผนภูมิแถบพลังงานที่ผิวของสารกึ่งตัวนำชนิดที่  $\psi$  มีค่าเป็นศูนย์ในเนื้อสาร และวัดโดยใช้ระดับ  $E_i$  เป็นหลัก  $\psi_s$  เรียกว่า surface potential

รูปที่ 2.4 แสดงแถบพลังงานของ MOS ชนิด p ที่ละเอียดขึ้น  $\psi$  คือขนาดของ  $E_i$  ที่เบนไปจาก  $E_i$  ในเนื้อสาร (bulk) ดังนั้น  $\psi$  จะมีค่าเป็นศูนย์ในเนื้อสารและมีค่าเป็นบวกเมื่อแบนด์โค้งลง ตามรูปที่ 2.4 ที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ  $\psi = \psi_s$  เรียกว่า surface potential ความเข้มข้นของอิเล็กตรอนและโฮลหาได้จาก (1, 3)

$$n_p = n_{p0} \exp(q\psi/kT) \quad (2.2)$$

$$p_p = p_{p0} \exp(-q\psi/kT) \quad (2.3)$$

โดยที่  $n_{p0}$  และ  $p_{p0}$  เป็นค่าความเข้มข้นอิควิวลิเบรียมของอิเล็กตรอนและโฮล  
ในเนื้อสารกึ่งตัวนำ ที่บริเวณผิวสัมผัสจะได

$$n_s = n_{p0} \exp(q\psi_s/kT) \quad (2.4)$$

$$p_s = p_{p0} \exp(-q\psi_s/kT)$$

จากรูปที่ 2.4 และสมการที่ (2.4) จะเห็นได้ว่า

$\psi_s < 0$  จะเกิด accumulation ของโฮล (แถบพลังงานโค้งขึ้น)

$\psi_s = 0$  สภาวะ flat-band

$\psi_B > \psi_s > 0$  เกิด depletion ของโฮล (แถบพลังงานโค้งลง)

$\psi_s = \psi_B$  เกิด on-set of inversion ( $n_s = p_s = n_i$ )

$\psi_s > \psi_B$  เกิด (strong) inversion

ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\psi$  กับระยะจากผิวสัมผัสได้จากสมการ Poisson คือ

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \frac{-\rho(x)}{\epsilon_s} \quad (2.5)$$

โดยที่  $\epsilon_s$  คือ permittivity ของสารกึ่งตัวนำและ  $\rho(x)$  เป็น space charge  
ทั้งหมดซึ่งหาได้จาก

$$\rho(x) = q(N_D^+ - N_A^- + p_p - n_p) \quad (2.6)$$

โดยที่  $N_D^+$  และ  $N_A^-$  เป็นความหนาแน่นของไอออนที่มีประจุของ donors และ  
acceptors ตามลำดับ ในเนื้อสารซึ่งห่างจากผิวสัมผัสมาก จะต้องมีความเป็นกลางของประจุ  
ดังนั้น  $\rho(x) = 0$  และ  $\psi = 0$  จึงได้ว่า

$$N_D^+ - N_A^- = n_{p0} - p_{p0} \quad (2.7)$$

จากสมการที่ (2.2) และ (2.3) และที่ค่า  $\psi$  ใด ๆ จะได้

$$p_p - n_p = p_{po} \exp\left(-\frac{q\psi}{kT}\right) - n_{po} \exp\left(\frac{q\psi}{kT}\right) \quad (2.8)$$

ดังนั้นสมการ Poisson (2.5) ที่ต้องการแก้จึงมีรูปเป็น

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = -\frac{q}{\epsilon_s} \left[ p_{po} (e^{-q\psi/kT} - 1) - n_{po} (e^{q\psi/kT} - 1) \right] \quad (2.9)$$

ถ้าเราอินทิเกรตสมการที่ (2.9) จากเนื้อสารมาถึงผิวสัมผัส

$$\int_0^{\psi} \frac{\partial \psi / \partial x}{\partial x} \left( \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) d\left( \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) = -\frac{q}{\epsilon_s} \int_0^{\psi} \left[ p_{po} (e^{-q\psi/kT} - 1) - n_{po} (e^{q\psi/kT} - 1) \right] d\psi \quad (2.10)$$

จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า ( $E \equiv -\partial\psi/\partial x$ ) และศักย์ไฟฟ้า  $\psi$  คือ

$$E^2 = \left( \frac{2kT}{q} \right)^2 \left( \frac{q^2 p_{po}}{2\epsilon_s kT} \right) \left[ \left( e^{-q\psi/kT} + \frac{q\psi}{kT} - 1 \right) + \frac{n_{po}}{p_{po}} \left( e^{q\psi/kT} - \frac{q\psi}{kT} - 1 \right) \right] \quad (2.11)$$

ถ้าเราให้  $L_D \equiv \sqrt{\frac{2kT\epsilon_s}{p_{po}q^2}}$  เรียกว่า extrinsic Debye Length ของโชนด (2.12)

และ  $F\left(\frac{q\psi}{kT}, \frac{n_{po}}{p_{po}}\right) \equiv \left[ \left( e^{-q\psi/kT} + \frac{q\psi}{kT} - 1 \right) + \frac{n_{po}}{p_{po}} \left( e^{q\psi/kT} - \frac{q\psi}{kT} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} > 0$  (2.13)

จะได้สนามไฟฟ้า

$$E = -\frac{\partial \psi}{\partial x} = \pm \frac{2kT}{qL_D} F\left(\frac{q\psi}{kT}, \frac{n_{po}}{p_{po}}\right) \quad (2.14)$$

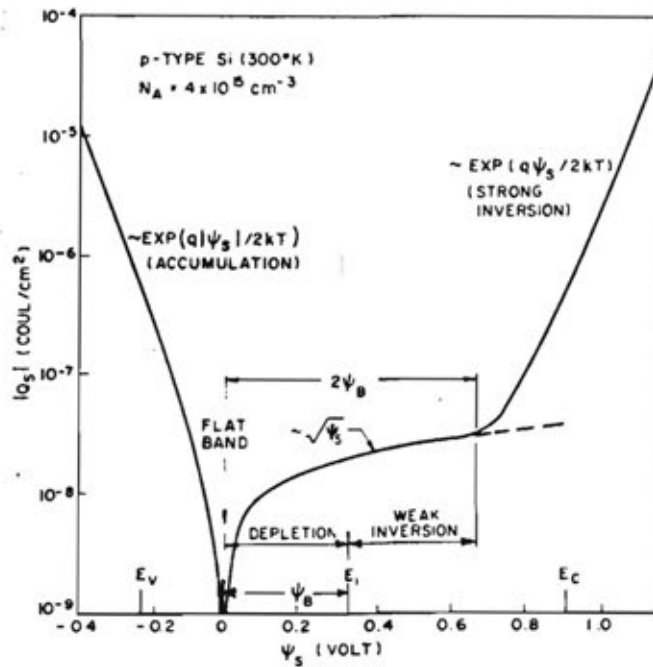
$E$  จะมีค่าบวกเมื่อ  $\psi > 0$  และค่าลบเมื่อ  $\psi < 0$  ที่ผิวสัมผัส  $\psi = \psi_s$  จะได้

$$E_s = \pm \frac{2kT}{qL_D} F\left(\frac{q\psi_s}{kT}, \frac{n_{po}}{p_{po}}\right) \quad (2.15)$$

จากกฎของ Gauss ค่า space charge ต่อหน่วยพื้นที่ที่จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าเท่ากับ

$$Q_S = \epsilon_S E_S = \pm \frac{2\epsilon_S kT}{qL_D} F\left(\frac{2\psi_S}{kT}, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right) \quad (2.16)$$

รูปที่ 2.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ  $Q_S$  กับ  $\psi_S$



รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงของ  $Q_S$  กับ  $\psi_S$  ใน p-Si ซึ่งมี  $N_A = 4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  ที่อุณหภูมิห้อง

การเกิด strong inversion จะเกิดขึ้นเมื่อ

$$\psi_S(\text{inv}) \approx 2\psi_B \approx \frac{2kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) \quad (2.17)$$

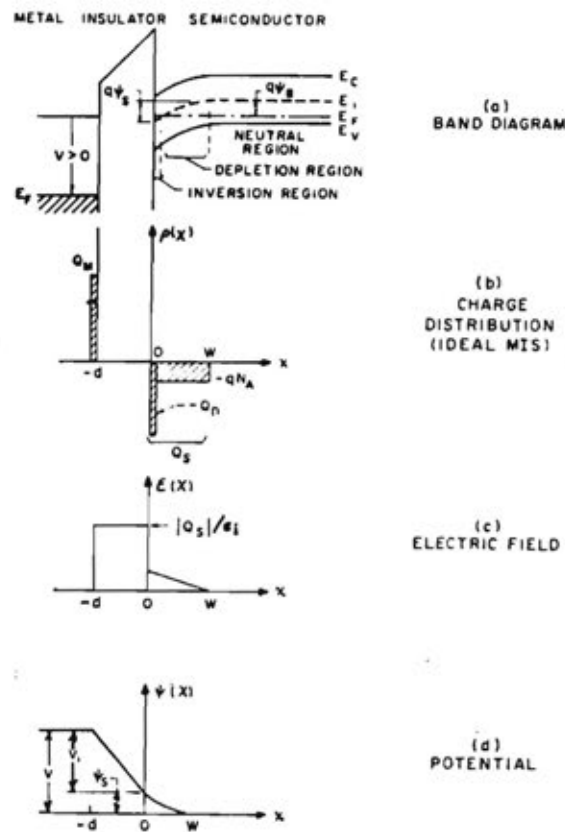
และ differential capacitance ของ space-charge region ในสารกึ่งตัวนำ หาได้จาก

$$C_D \equiv \frac{\partial Q_S}{\partial \psi_S} = \frac{\epsilon_S}{L_D} \frac{\left[1 - 2e^{-q\psi_S/kT} + \frac{n_{p0}}{p_{p0}} (e^{q\psi_S/kT} - 1)\right]}{F\left(\frac{q\psi_S}{kT}, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right)} \text{farad/cm}^2 \quad (2.18)$$

ในกรณี flat-band  $\psi_s = 0$  สามารถหา  $C_D$  ได้โดยการขยายเทอม exponential ไปเป็นอนุกรมจะได้

$$C_D(\text{flat-band}) = \sqrt{2} \epsilon_s / L_D \text{ farad/cm}^2 \quad (2.19)$$

2.1.2 เคิร์ฟเชิงอุทกคคิของ MOS



- (a) Band diagram of an ideal MIS structure.
- (b) Charge distribution under inversion condition.
- (c) Electric field distribution.
- (d) Potential distribution.

รูปที่ 2.6

รูปที่ 2.6 (a) และ (b) แสดง band diagram ของ MOS ชนิด p และ charge distribution ตามลำดับ ในการที่จะทำให้เกิดความเป็นกลางของประจุ

$$Q_M = Q_n + qN_A W = Q_s \quad (2.20)$$

- โดยที่  $Q_M$  เป็นประจุต่อหน่วยพื้นที่บนโลหะ  
 $Q_n$  เป็นอิเล็กตรอนต่อหน่วยพื้นที่ในบริเวณ  
 $qN_A W$  เป็น ionized acceptor ต่อหน่วยพื้นที่ในเขตปลอดพาหะ  
 ซึ่งกว้าง  $W$   
 และ  $Q_S$  เป็นประจุทั้งหมดต่อหน่วยพื้นที่ในสารกึ่งตัวนำ

สนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าซึ่งได้จากการอินทิเกรตสมการ Poisson หนึ่งและสองครั้งตามลำดับ  
 ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.6 (c) และ (d) ตามลำดับ

ในกรณีที่  $\phi_{ms} = 0$  แรงดันที่ใส่เข้าไปส่วนหนึ่งจะปรากฏคร่อมชั้นออกไซด์ ( $V_i$ )  
 และอีกส่วนหนึ่งจะตกคร่อมซิลิกอน ( $\psi_s$ ) ดังนั้น

$$V = V_i + \psi_s \quad (2.21)$$

$$V_i \equiv \frac{Q_S}{C_i} = \frac{Q_S d}{\epsilon_i} \quad (2.22)$$

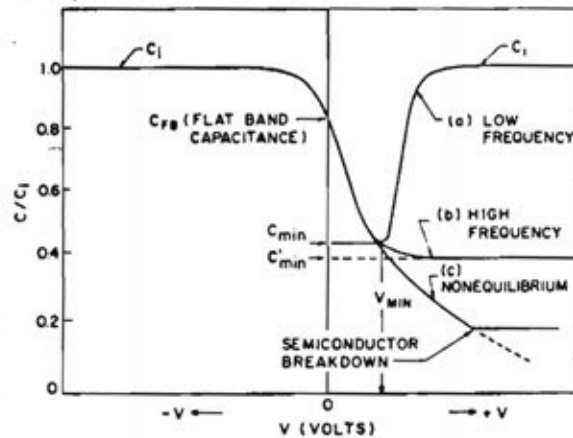
ค่าความจุรวม ( $C$ ) ประกอบไปด้วยความจุของชั้นออกไซด์  $C_i (= \frac{\epsilon_i}{d})$  และความจุของ  
 เขตปลอดพาหะ  $C_D$  ของซิลิกอนต่อกันอย่างอนุกรม

$$C = \frac{C_i C_D}{C_i + C_D} \quad \text{farad/cm}^2 \quad (2.23)$$

$C_i$  มีค่าคงที่ที่ความหนา  $d$  ค่าหนึ่ง และเป็นค่าสูงสุดของความจุรวม แต่  $C_D$  ของซิลิกอนมี  
 ค่าขึ้นอยู่กัแรงดัน จากสมการที่ (2.17) และ (2.20)-(2.22) ทำให้เราสามารถเขียน  
 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $C$  และ  $V$  ได้ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.7 (a) จุดที่น่าสนใจคือ  
 ค่าความจุรวมที่สภาวะ flat-band คือที่  $\psi_s = 0$  จากสมการที่ (2.19) และ (2.23)  
 จะได้ว่า

$$C_{FB} (\psi_s = 0) = \frac{\epsilon_i}{d + \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{\epsilon_i}{\epsilon_s}\right) L_D} = \frac{\epsilon_i}{d + \left(\frac{\epsilon_i}{\epsilon_s}\right) \sqrt{\frac{kT\epsilon_s}{p_{po} q}}} \quad (2.24)$$





รูปที่ 2.7 กราฟความจุ-แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ MOS

- a) ความถี่ต่ำ      b) ความถี่สูง  
c) กรณี nonequilibrium

จากรูปที่ 2.7 เมื่อ  $V < 0$  ใน accumulation region จะมี differential capacitance ในสารกึ่งตัวนำสูง ดังนั้นค่าความจุรวมจึงมีค่าใกล้เคียงกับความจุของชั้นออกไซด์ เมื่อแรงดันโพลมีค่าน้อยลงเพียงพอ จะเริ่มเกิดชั้นpletion ในซิลิกอนใกล้ผิวสัมผัส ทำให้ความจุรวมมีค่าลดลงจนถึงค่าต่ำสุดค่าหนึ่ง แล้วจะเพิ่มขึ้นอีกเมื่อเกิดชั้น inversion ชั้นที่ผิวสัมผัส สิ่งที่สำคัญที่พึงระลึกไว้คือว่า การเพิ่มของค่าความจุขึ้นอยู่กับความสามารถของอิเล็กตรอนที่จะเคลื่อนตอบสนองต่อสัญญาณที่ป้อนเข้าไป ดังนั้นเฉพาะที่สัญญาณความถี่ต่ำเท่านั้นที่อัตราการเกิดและการรวมตัว (recombination-generation rate) ของพาหะข้างน้อยจะติดตามสัญญาณทัน ทำให้มีการแลกเปลี่ยนประจุกับชั้น inversion จากการทดลองพบว่าสัญญาณต่ำนี้มีค่าตั้งแต่ 5 Hz ถึง 100 Hz สำหรับ Metal-SiO<sub>2</sub>-Si ดังนั้นจากรูปที่ 2.7 (b) จะเห็นว่าที่ความถี่สูง ค่าความจุจะไม่เพิ่มขึ้นทางด้านขวามือ ส่วนรูปที่ 27 (c) แสดงถึงค่าความจุในสภาวะ nonequilibrium

การหาเคิร์ฟที่ความถี่สูงอาจทำได้โดยใช้วิธีคล้าย ๆ กับ one-sided abrupt p-n junction คือเมื่อผิวของสารกึ่งตัวนำถูกทำให้เป็นเขตpletion (depletion)

ionized acceptors ในเขตปลอดพาหะจะมีประจุต่อหน่วยพื้นที่  $-qN_A W$  โดยที่  $W$  เป็นความกว้างของเขตปลอดพาหะ เมื่ออินทิเกรตสมการ Poisson จะได้การกระจายของศักย์ไฟฟ้าคร่อม เขตปลอดพาหะ

$$\psi = \psi_S \left(1 - \frac{x}{W}\right)^2 \quad (2.25)$$

โดยที่

$$\psi_S = \frac{qN_A W^2}{2\epsilon_S} \quad (\text{surface potential}) \quad (2.26)$$

เมื่อแรงดันที่ป้อนมีค่าเพิ่มขึ้น  $\psi_S$  จะเพิ่มขึ้นทำให้  $W$  เพิ่มขึ้นด้วย จนเกิด strong inversion ซึ่งจากรูปที่ 2.5 จะเห็นว่า strong inversion เริ่มเกิดขึ้นที่  $\psi_S(\text{inv}) \approx 2\psi_B$  ที่จุดนี้  $W$  จะมีค่าสูงสุด เมื่อแถบพลังงานโค้งลงจน  $\psi_S = 2\psi_B$  ชั้น inversion จะป้องกันไม่ให้สนามไฟฟ้าแผ่ลึกเข้าไปในซิลิกอนอีกต่อไป และค่าสูงสุดของ  $W$  คือ  $W_m$  จะหาได้จากสมการที่ (2.17) และ (2.26) คือ

$$W_m \approx \sqrt{\frac{2\epsilon_S \psi_S(\text{inv})}{qN_A}} = \sqrt{\frac{4\epsilon_S kT \ln(N_A/n_i)}{q^2 N_A}} \quad (2.27)$$

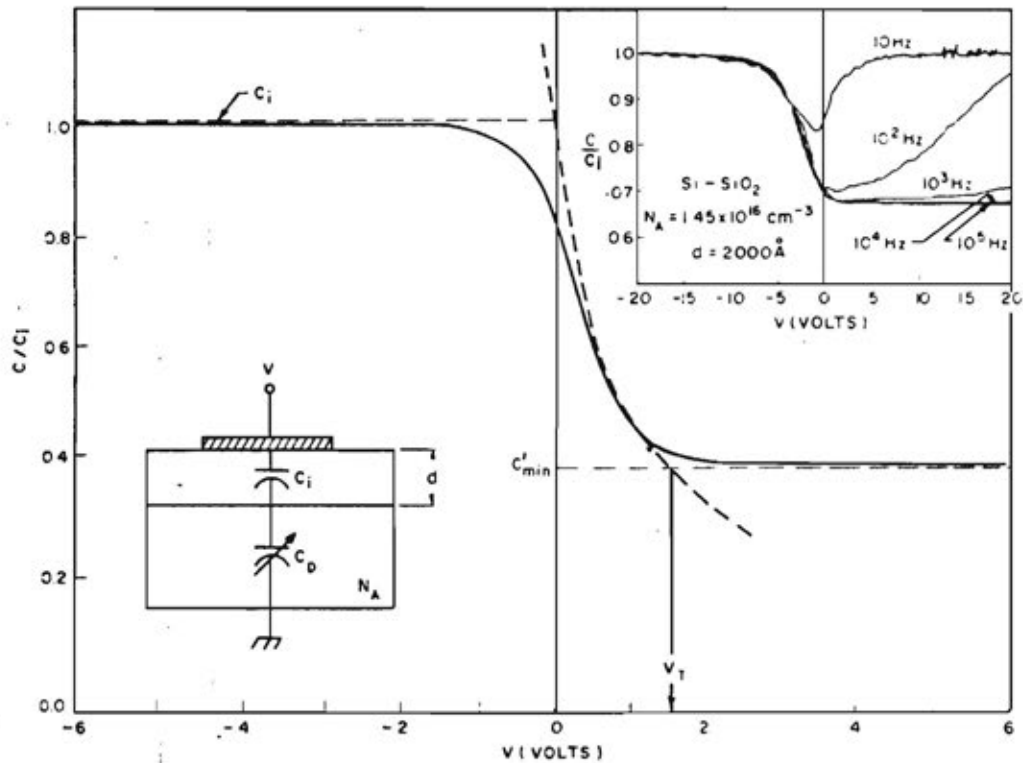
ค่าอีกค่าหนึ่งที่น่าสนใจคือ ค่าแรงดันวิกฤต  $V_T$  ที่จะทำให้เกิด strong inversion จากสมการที่ (2.17) และ (2.21) จะได้

$$V_T (\text{strong inversion}) = \frac{Q_S}{C_i} + 2\psi_B \quad (2.28)$$

และค่าความจุรวมที่จุดนี้เท่ากับ

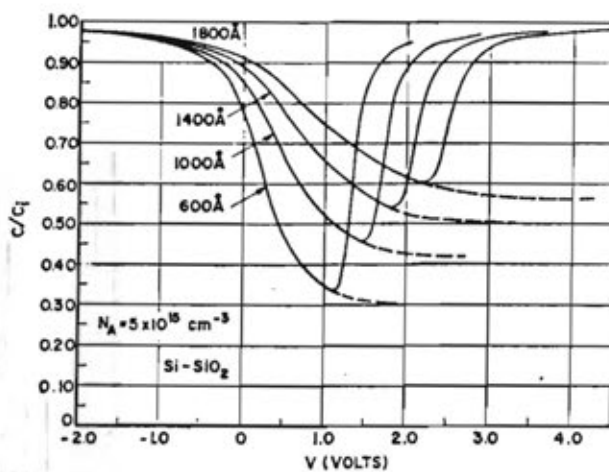
$$C'_{\min} = \frac{\epsilon_S}{d + \left(\frac{\epsilon_i}{\epsilon_S}\right) W_m} \quad (2.29)$$

C-V โคอร์ปที่ความถี่สูง จากการประมาณ (เส้นประ) ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.8 ภาพแทรกเล็กแสดงถึง C-V โคอร์ปที่ความถี่ต่าง ๆ ทำให้เห็นว่าจุดเริ่มความถี่ต่ำเกิดที่  $f \leq 100$  Hz

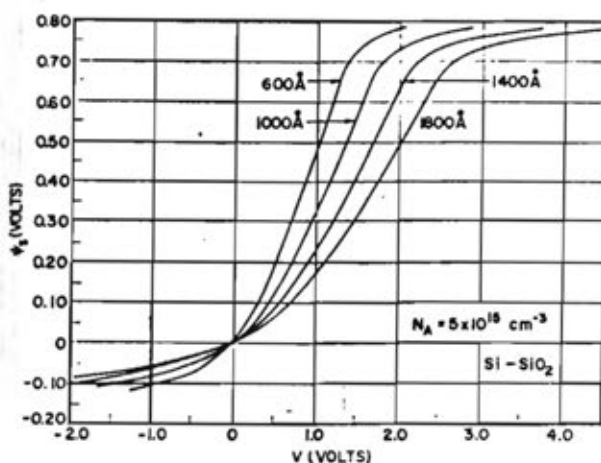


รูปที่ 2.8 กราฟความจุ-แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ MOS ที่ความถี่สูง  
เส้นประแสดงค่าประมาณ ส่วนรูปเล็กแสดงผลของความถี่

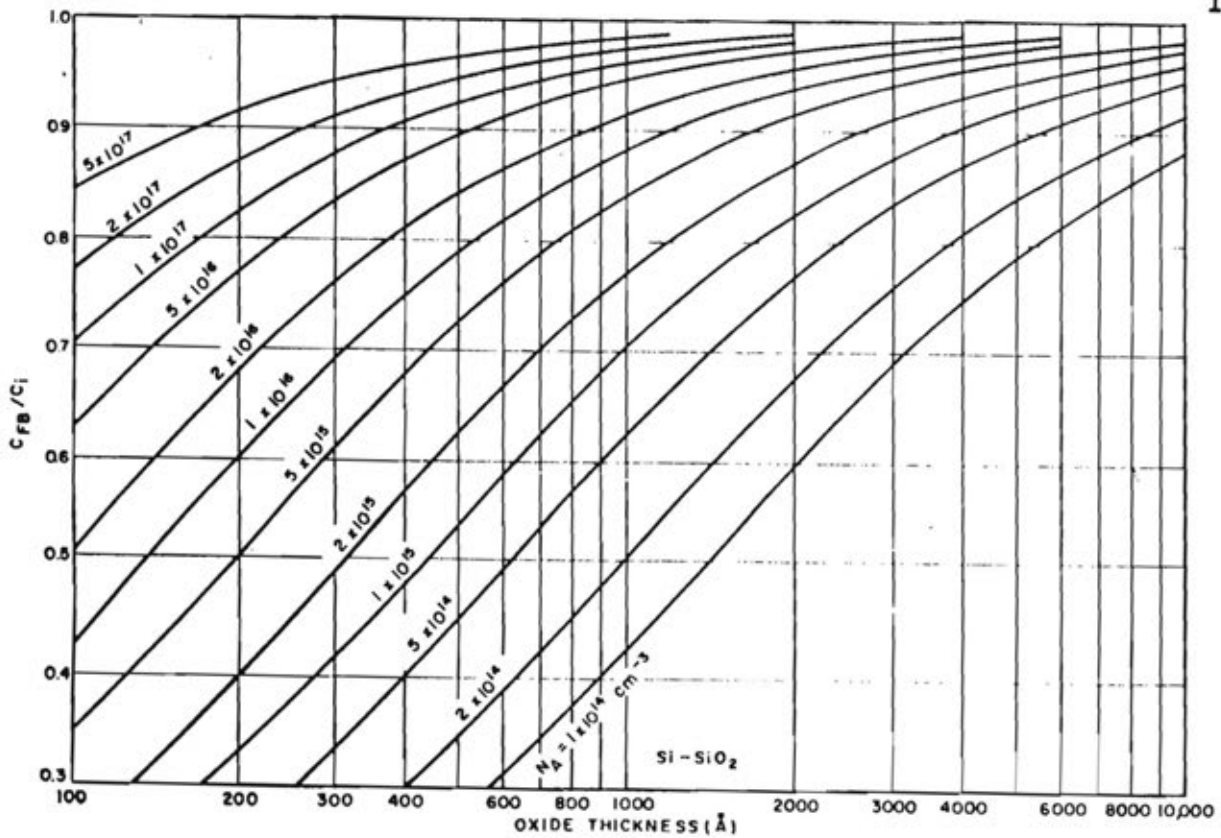
C-V เคิร์ฟเชิงอุคตคคิจจากการคำนวณของ MOS ที่ทำจากซิลิกอนที่ความหนาของออกไซด์ขนาดต่าง ๆ กัน ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.9 ส่วนรูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\psi_s$  และ  $V$  ของ MOS เช่นเดียวกับในรูปที่ 2.9 รูปที่ 2.11 แสดง normalized flat-band capacitance ( $C_{FB}/C_i$ ) รูปที่ 2.12 แสดง normalized minimum capacitances ( $C_{min}/C_i$ ) และ ( $C_{min}/C_i$ ) และรูปที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{min}$  และความหนาของออกไซด์ โดยมีความเข้มข้นของสารเจือปนเป็นพารามิเตอร์



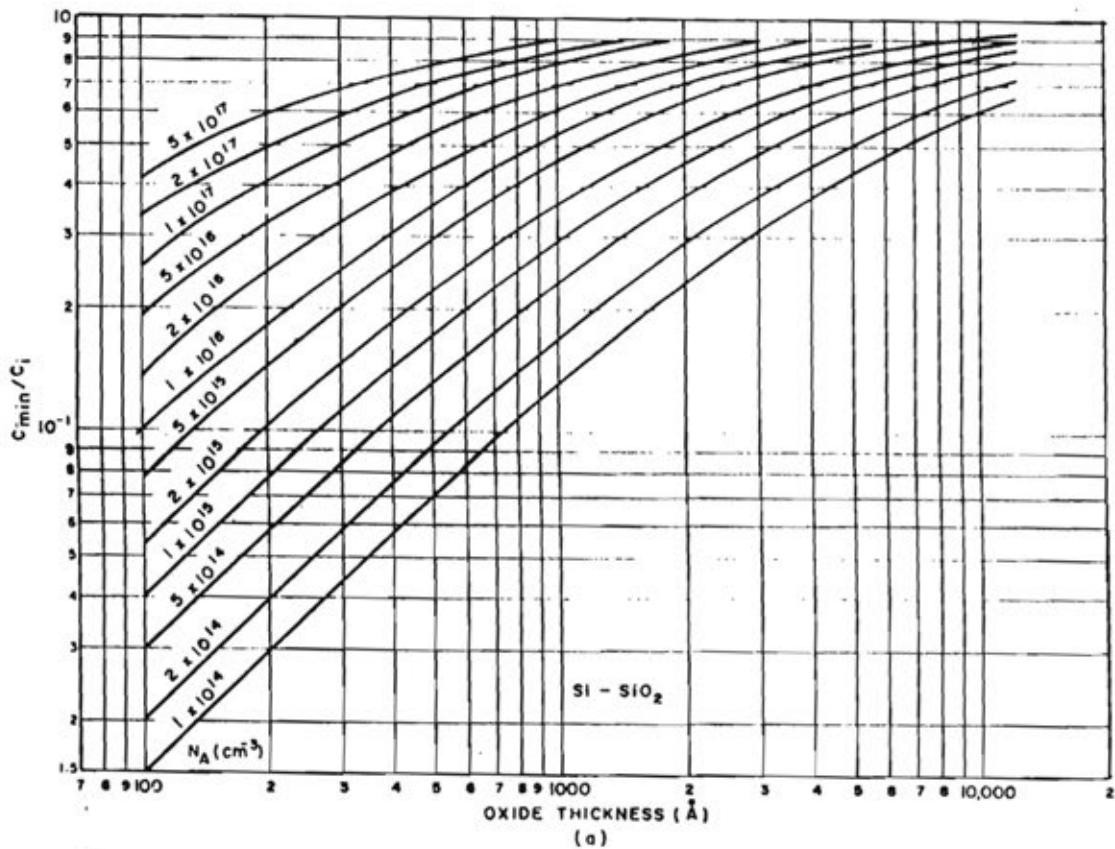
รูปที่ 2.9 กราฟความจุ-แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ MOS เริงอุคมคคิ เส้นเดิม สำหรับความถี่ต่ำ ส่วนเส้นประจุสำหรับความถี่สูง ที่ความหนาของชั้น ออกไซด์ต่าง ๆ กัน



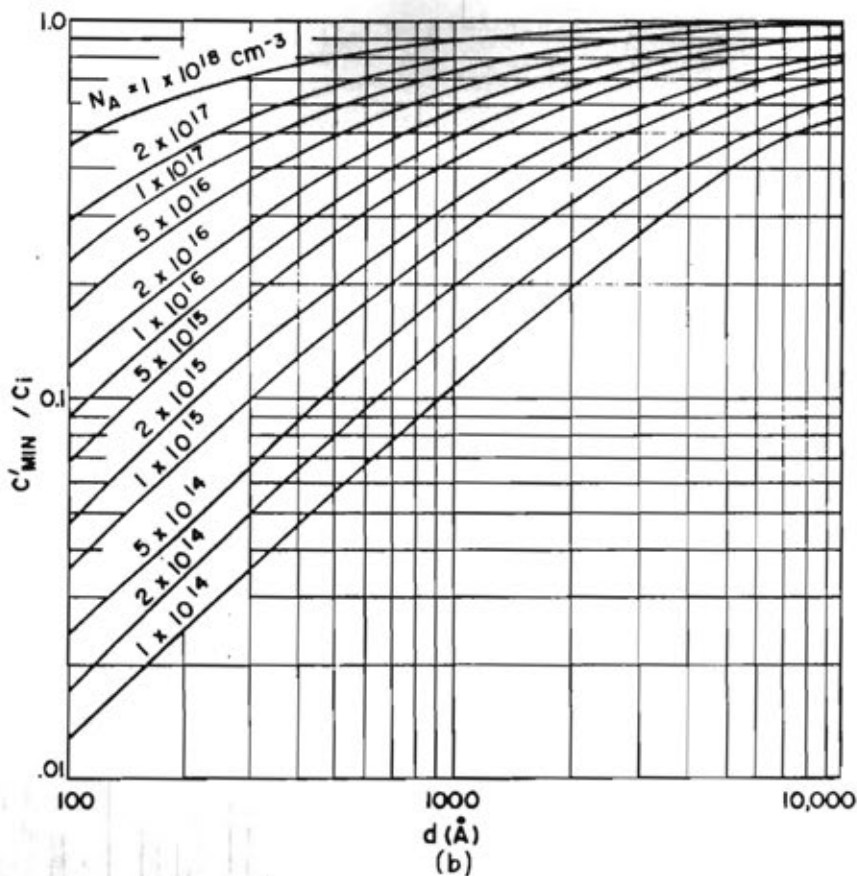
รูปที่ 2.10 กราฟแสดง surface potential กับแรงดันที่ป้อน สำหรับตัวเก็บประจุ MOS เริงอุคมคคิ



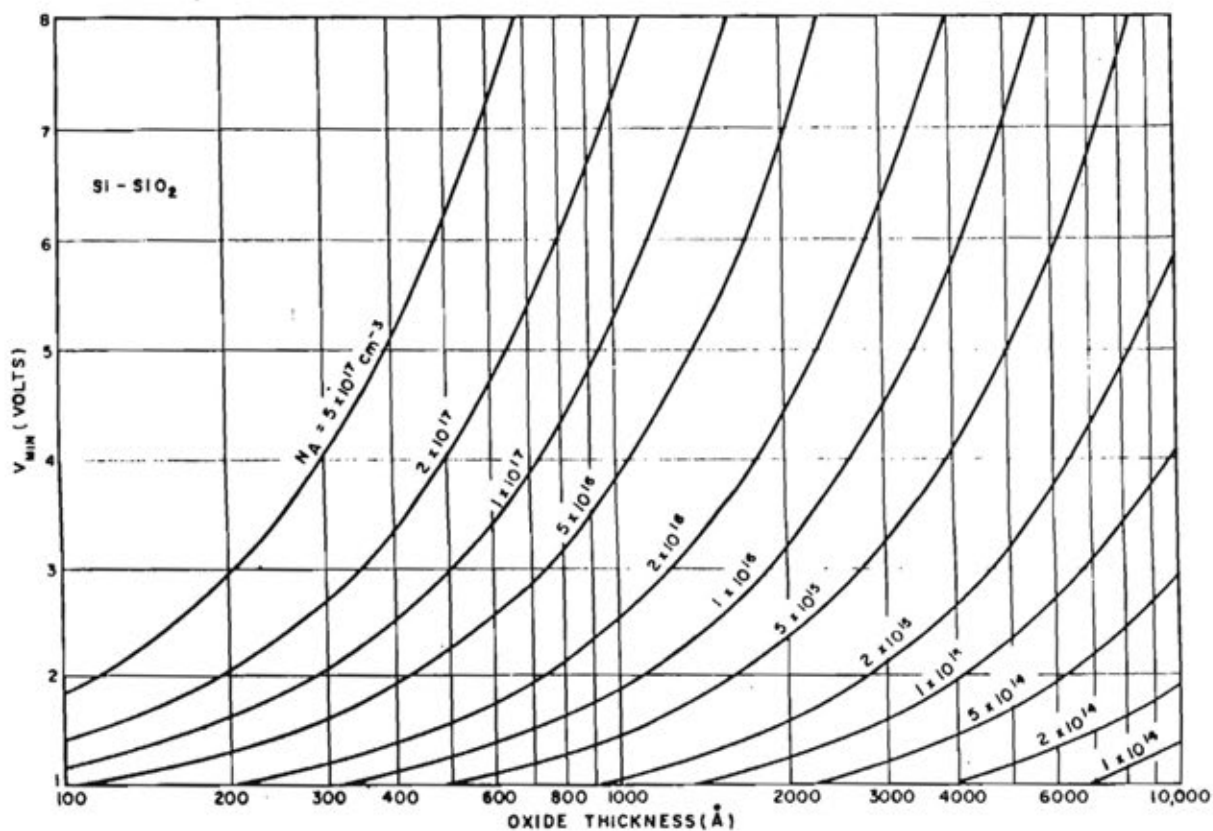
รูปที่ 2.11 กราฟแสดง normalized flat-band capacitance กับความหนาของชั้นออกไซด์ โดยมีความเข้มข้นของสารเจือปนเป็นพารามิเตอร์ของ MOS เซิงอุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 2.12 a) กราฟแสดง normalized minimum capacitance กับความหนาของชั้นออกไซด์ โดยมี doping เป็นพารามิเตอร์ของ MOS เซิงอุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 2.12 b) กราฟแสดง normalized minimum capacitance กับความหนาของชั้นออกไซด์ โดยมี doping เป็นพารามิเตอร์ของ MOS เซิงอุณหภูมิต่ำ

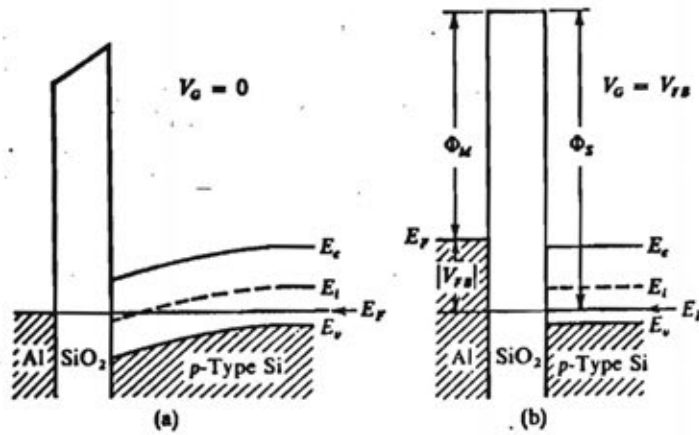


รูปที่ 2.13 กราฟแสดงแรงดันต่ำสุดกับความหนาของออกไซด์ โดยมี doping เป็นพารามิเตอร์ของ MOS เซิงอุณหภูมิต่ำ

## 2.2 Non-ideal MOS

### 2.2.1 Work Function Difference

ในหัวข้อที่ 2.1 ได้กล่าวถึง MOS เชิงอุดมคติ ซึ่งมี work function difference  $\phi_{ms} = 0$  ในความเป็นจริง  $\phi_m$  และ  $\phi_s$  (รูปที่ 2.14 (b)) จะมีค่าไม่เท่ากัน เมื่อเราลัดวงจรระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำใน MOS อิเล็กตรอนจะไหลจากโลหะไปที่สารกึ่งตัวนำ (ในกรณีนี้  $\phi_m < \phi_s$ ) จนกว่าจะเกิดศักย์ไฟฟ้าระหว่างทั้งสองเพื่อต้านความแตกต่างของ work function เมื่อถึงจุด equilibrium fermi level ของโลหะและสารกึ่งตัวนำจะอยู่ในระดับเดียวกัน จึงทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าสถิตย์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงจากด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่งตามรูปที่ 2.14 (a) ในกรณีของ Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (4)



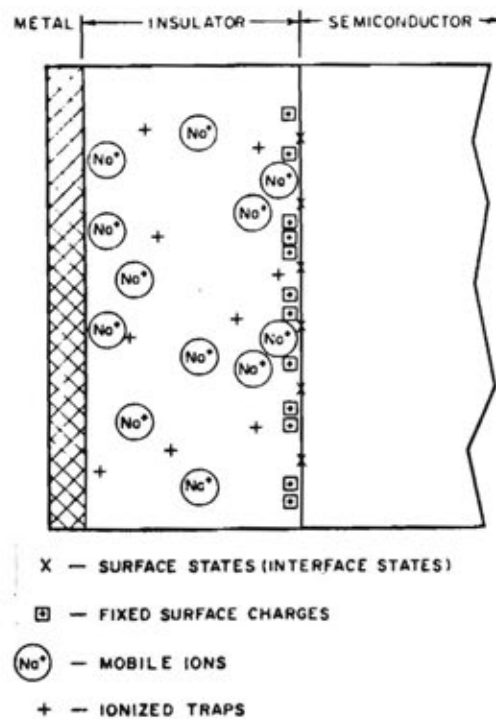
รูปที่ 2.14 ผลของ work function difference ระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ที่มีต่อ potential distribution ในโครงสร้าง MOS a) เมื่อ  $V_G = 0$  b) สภาวะแฟลตแบนด์

ในการหาผลกระทบของ  $\phi_{ms}$  ที่มีต่อลักษณะสมบัติของ MOS วิธีที่ง่ายที่สุดได้แก่ การต่อแรงดันเข้าที่แผ่นโลหะ (เกต) เพื่อต้านความแตกต่างของ work function และทำให้ได้สภาวะ flat-band ในสารกึ่งตัวนำตามรูปที่ 2.14 (b) แรงดันที่ทำให้เกิดสภาวะ flat-band เรียกว่า แรงดัน flat-band  $V_{FB}$

$$V_{FB} = \phi_m - \phi_s \equiv \phi_{ms} \quad (2.30)$$

### 2.2.2 สเทระหว่างผิว (Interface states หรือ surface states)

ใน MOS จริง ๆ ก็มีสเทหรือประจุชนิดต่าง ๆ อยู่ในชั้นออกไซด์ (รูปที่ 2.15) ซึ่งทำให้มีผลต่อลักษณะสมบัติของ MOS สเทหรือประจุต่าง ๆ เหล่านี้ได้แก่ (1) interface states หรือ surface states (2) fixed surface charges (3) mobile ions (4) ionized trap ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง interface states ซึ่งมีคำนิยามว่าเป็นระดับพลังงานที่อยู่ใน forbidden band gap ที่ผิวสัมผัสระหว่างชั้นออกไซด์และสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสามารถแลกเปลี่ยนประจุกับเนื้อสารกึ่งตัวนำได้ในเวลาอันสั้น



รูปที่ 2.15 การแบ่งชนิดของสเทและประจุในไดโอด MOS จริง

interface states เกิดขึ้นใน forbidden gap ได้เนื่องจากการที่ periodic lattice structures ถูกตัดคอนอย่างฉับพลันที่ผิวหน้าของผลึก

สเทระหว่างผิวมีทั้งแบบ donor state คือเป็นกลางหรือเป็นบวกเมื่อให้อิเล็กตรอนออกไป และแบบ acceptor state ซึ่งอาจเป็นกลางหรือเป็นลบเมื่อได้รับอิเล็กตรอนมา distribution function ของสเทระหว่างผิวจะคล้ายคลึงกับระดับสารเจือปนในเนื้อสารกึ่งตัวนำ กล่าวคือ



$$F_{SD}(E_t) = \left[ 1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{g} \exp\left(\frac{E_t - E_F}{kT}\right)} \right] = \frac{1}{1 + g \cdot \exp\left(\frac{E_F - E_t}{kT}\right)} \quad (2.31)$$

สำหรับ donor states และ

$$F_{SA}(E_t) = \frac{1}{1 + \frac{1}{g} \exp\left(\frac{E_t - E_F}{kT}\right)} \quad (2.32)$$

สำหรับ acceptor states โดยที่  $E_t$  เป็นระดับพลังงานของสถานะระหว่างผิว และ  $g$  เป็น ground state degeneracy ซึ่งมีค่าเป็น 2 สำหรับ donor และ 4 สำหรับ acceptor

เมื่อมีการป้อนแรงดันเข้าไประดับของผิวจะเลื่อนขึ้นหรือลงไปกับแถบวาเลนซ์หรือคอนดักชันในขณะที่ระดับเฟอร์มิอยู่กึ่งกลาง การเปลี่ยนแปลงของประจุในสถานะระหว่างผิวจะเกิดขึ้นเมื่อมันติดกับระดับเฟอร์มิ ซึ่งจะมีส่วนทำให้ค่าความจุ MOS เปลี่ยนแปลงไปจากอุดมคติ รูปที่ 2.16 (a) แสดงวงจรสมมูลพื้นฐาน ซึ่งรวมสถานะระหว่างผิวเข้าไปด้วย  $C_i$  และ  $C_D$  เป็นความจุของออกไซด์และเขตปลอดพาหะของสารกึ่งตัวนำตามลำดับ  $C_S$  และ  $R_S$  เป็นความจุและความต้านทานที่เกิดจากสถานะระหว่างผิวและขึ้นอยู่ศักย์ที่ผิว ( $\psi_s$ ) ผลคูณ  $C_S R_S$  เป็น lifetime ของสถานะระหว่างผิวซึ่งจะกำหนดพฤติกรรมเชิงความถี่ของสถานะระหว่างผิว ส่วนที่ขนานกันของวงจรในรูปที่ 2.16 (a) สามารถแปลงไปเป็นความจุที่ขึ้นอยู่กับความถี่  $C_p$  คืออย่างขนานกับความนำที่ขึ้นอยู่กับความถี่  $G_p$  ดังรูปที่ 2.16 (b)

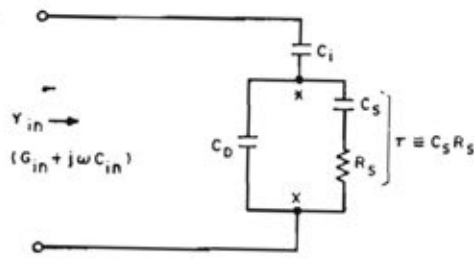
โดยที่ 
$$C_p = C_D + \frac{C_S}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.33)$$

และ 
$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{C_S \omega \tau}{H \omega^2 \tau^2} \quad (2.34)$$

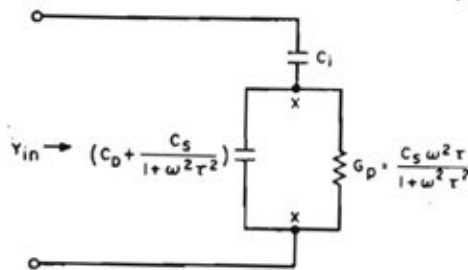
ในที่นี้  $\tau = C_S R_S$  และ admittance ขาเข้า  $Y_{in}$  มีค่า

$$Y_{in} \equiv G_{in} + j\omega C_{in} \quad (2.35)$$

$$C_p = C_D + \frac{C_S}{1 + \omega^2 \tau^2}$$



(a)



(b)

รูปที่ 2.16 วงจรสมมูลซึ่งรวม  $C_S$  และ  $R_S$  อันเป็นผลมาจากสแตทที่ผิว

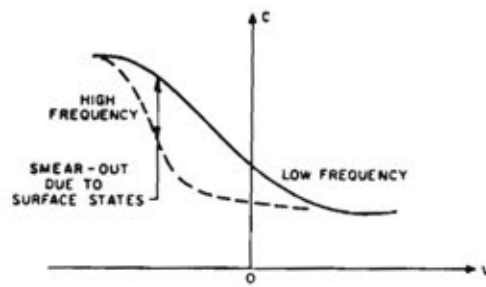
โดยที่

$$G_{in} = \frac{\omega^2 C_S \tau C_i^2}{(C_i + C_D + C_S)^2 + \omega^2 \tau^2 (C_i + C_D)^2} \quad (2.36)$$

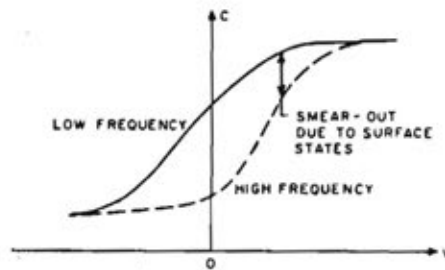
$$C_{in} = \frac{C_i}{C_i + C_D + C_S} \left[ C_D + C_S \frac{(C_i + C_D + C_S)^2 + \omega^2 \tau^2 C_D (C_i + C_D)}{(C_i + C_D + C_S)^2 + \omega^2 \tau^2 (C_i + C_D)^2} \right] \quad (2.37)$$

การหาความหนาแน่นของสแตทระหว่างผิว อาจทำได้โดยการวัดค่าความจุที่แรงดันขนาดต่าง ๆ ที่ป้อนเข้าไป (C-V measurement) ซึ่งแบ่งเป็นวิธีต่าง ๆ 3 วิธี คือ

ก) วิธี Differentiation วิธีนี้ทำโดยการวัดค่าความจุ-แรงดัน ที่ความถี่สูง ( $\omega\tau \gg 1$ ) ซึ่งทำให้สมการที่ (2.37) ลดเหลือสมการที่ (2.23) ซึ่งไม่มีเทอมอันเกิดจากสแตทระหว่างผิว เคิร์ฟความถี่สูงที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.17 (เส้นประ) อย่างไรก็ตามก็ตามอิทธิพล



(a) p-TYPE SEMICONDUCTOR



(b) n-TYPE SEMICONDUCTOR

รูปที่ 2.17 กราฟ C-V ที่ความถี่สูงและความถี่ต่ำของตัวอย่างชนิดพีและชนิดเอ็น

ของสภาวะระหว่างผิวทำให้เคิร์ฟนี้เลื่อนไปตามแกนของแรงดัน ทั้งนี้เนื่องจากสภาวะระหว่างผิวทำให้สนามไฟฟ้าในชั้นออกไซด์สูงกว่าสนามไฟฟ้าในบริเวณผิวสัมผัสของสารกึ่งตัวนำ จึงต้องการประจุในโลหะเป็นจำนวนมากขึ้น เพื่อที่จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสค่าเดียวกันในสารกึ่งตัวนำ ถ้าเราเปรียบเทียบรูปที่ 2.17 กับเคิร์ฟเชิงอุคคคติ เราจะได้เคิร์ฟระหว่าง  $\Delta V$  กับ  $V$  โดยที่  $\Delta V$  เป็นแรงดันที่เปลี่ยนแปลง ประจุทั้งหมดในสภาวะระหว่างผิวที่ค่าศักย์ที่ผิว (surface potential) ใด ๆ จะหาได้จาก

$$Q_{SS} = C_i (\Delta V) \quad \text{Coul/cm}^2 \quad (2.38)$$

ความหนาแน่นของสภาวะระหว่างผิวต่อหน่วยพลังงาน ( $N_{SS}$ ) หาได้จากการดิฟเฟอเรนเชียลเชิงกราฟ (graphical differentiation)

$$N_{SS} = \frac{1}{q} \left( \frac{\partial Q_{SS}}{\partial \psi_s} \right)_V \quad \text{states/cm}^2/\text{eV} \quad (2.39)$$

การวัดค่าความจุที่ความถี่ต่ำ (เส้นทึบตามรูปที่ 2.17) ทำให้เราสามารถคำนวณหา time constants ( $\tau$ ) ของสภาวะระหว่างผิวได้ การหา  $N_{SS}$  ด้วยวิธีนี้เหมาะสำหรับ MOS ที่มีสภาวะระหว่างผิวมาก และเป็นวิธีที่ไม่ค่อยละเอียดอ่อนนัก

ข) วิธี Integration วิธีนี้ไม่ต้องใช้การดิฟเฟอเรนเชียลเชิงกราฟ และสามารถหาค่าที่ผิว ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับแรงดันที่มือนเข้าไม่ได้จากการวัด differential capacitance ที่ความถี่ต่ำ ถ้าเราสามารถละลายผลกระทบบของ space-charge ใน ออกไซด์ได้ จากสมการที่ (2.21) และ (2.22) และจาก  $dQ = C_i dV_i = CdV$  เราจะได้

$$\frac{\partial \psi_s}{\partial V} = 1 - \frac{C}{C_i} \quad (2.40 \text{ a})$$

และ

$$\frac{\partial \psi_s}{\partial V_i} = \frac{C_i}{C} - 1 \quad (2.40 \text{ b})$$

อินทิเกรตสมการที่ (2.40 a) จาก  $V_1$  ไป  $V_2$  ได้

$$\psi_s(V_1) - \psi_s(V_2) = \int_{V_2}^{V_1} \left[ 1 - \frac{C}{C_i} \right] dV \quad (2.41)$$

สมการที่ (2.41) ชี้ให้เห็นว่าศักย์ที่ผิวที่แรงดันใด ๆ สามารถหาได้จากการอินทิเกรตเคิร์ฟ  $(1 - C/C_i)$  แต่สมการนี้จะใช้ได้เฉพาะกรณีที่สเตรระหว่างผิวอยู่ในอิควิลิเบรียมเท่านั้น คือ ที่ความถี่ต่ำ นอกจากนี้จากรูปที่ 2.6 (b) และจากกฎความเป็นกลางของผลึก (charge neutrality) ในสารกึ่งตัวนำนอกจากจะมีประจุ  $Q_s$  แล้ว ขณะนี้ยังมี  $N_{SS}(q\psi_s) = N_{SD}^+(q\psi_s) + N_{SA}^-(q\psi_s)$  โดยที่  $N_{SD}^+$  และ  $N_{SA}^-$  เป็น donor และ acceptor interface state densities ตามลำดับ จากกฎความเป็นกลางของผลึกจะได้

$$\frac{\epsilon_i V_i}{d} = q \int_0^\infty \left[ N_{SD}^+ F_{SD}(E_t) - N_{SA}^- F_{SA}(E_t) \right] dE + Q_s \quad (2.42)$$

ดิฟเฟอเรนเชียลสมการที่ (2.42) กับ  $\psi_s$  ได้

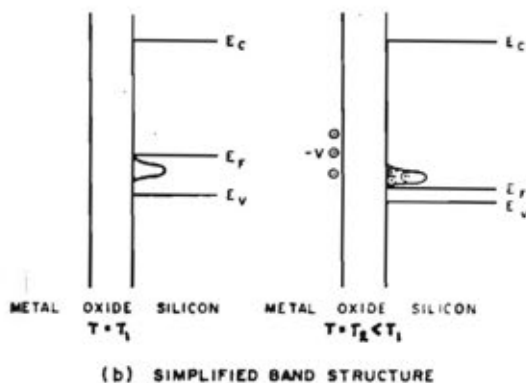
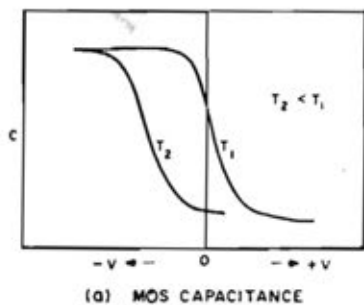
$$\frac{\partial \psi_s}{\partial V_i} = \frac{\epsilon_i}{d} \left/ \left[ \frac{dQ_s}{d\psi_s} + qN_{SS}(q\psi_s) \right] \right. \quad (2.43)$$

จากสมการที่ (2.40 b) และ (2.41) จะทำให้เราได้เคิร์ฟระหว่าง  $\partial\psi_S/\partial V_i$  กับ  $\psi_S$  จากการวัดค่าความจุของ MOS ที่ความถี่ต่ำ ถ้าเราทราบค่าความเข้มข้นของสารเจือปนและอุณหภูมิ เราจะสามารถเทียบเคิร์ฟนี้กับเคิร์ฟที่ได้จากสมการที่ (2.43) เพื่อหาค่า  $N_{SS}$  ได้

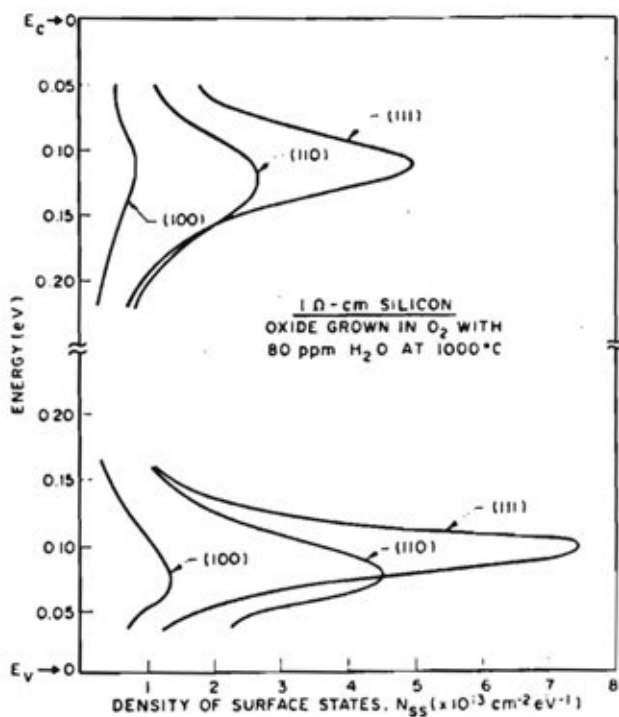
ค) วิธีอุณหภูมิ วิธีนี้สามารถแยกผลกระทบต่อสัทธิที่ผิวอันเกิดจาก space-charge ในชั้นออกไซด์ออกจากสเคற்றะหว่างผิว รูปที่ 2.18 (a) แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของเคิร์ฟ C-V เมื่ออุณหภูมิลดลง ถ้าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี แรงดันที่บ่อนเข้าที่ขั้วโลหะจะต้องมีค่าลบสูงขึ้น เพื่อที่จะทำให้เกิดสภาวะ flat-band เมื่ออุณหภูมิลดลง แต่ถ้าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น แรงดันจะต้องมีค่าบวกสูงขึ้นถ้าอุณหภูมิลดลง รูปที่ 2-18 (b) แสดงการเปลี่ยนแปลงของระดับเฟอร์มิกับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิต่ำลงระดับเฟอร์มิจะเคลื่อนที่เข้าใกล้วาเลนซ์แบนด์ ทำให้สเคற்றะหว่างผิวบางสเคเทเสียอิเล็กตรอนไปทำให้มีประจุเป็นบวก ในกรณีนี้สเคற்றะหว่างผิวจะควบคุมสัทธิที่ผิว ทำให้ต้องบ่อนแรงดันที่ขั้วโลหะด้วยโพลสูงขึ้นไปเพื่อไล่อิเล็กตรอนออกจากสเคற்றะหว่างผิวให้หมดเสียก่อน จึงจะเกิดสภาวะ flat-band สเคเทเหล่านี้เรียกว่า donors ถ้าเป็นกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จะมีสเคற்றะหว่างผิวใกล้ conduction band เรียกว่า acceptors ค่าแรงดัน flat-band ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะให้ประจุสเคற்றะหว่างผิวโดยตรง เนื่องจากไม่มีการโค้งงอของแถบพลังงานและสัทธิที่ผิวมีค่าเท่ากับระดับเฟอร์มิในเนื้อสารซึ่งสามารถคำนวณได้ วิธีการทดลองประกอบด้วย (1) เปลี่ยนอุณหภูมิตั้งที่ (2) ศึกษาสภาวะ flat-band โดยการสังเกตการเปลี่ยนแปลงค่าความจุและปรับแรงดันไบแอส (3) บันทึกแรงดัน flat-band กับอุณหภูมิ และ (4) แปลงข้อมูลเหล่านี้เป็นประจุผิว (surface charge  $Q_{SS}$ ) กับสัทธิที่ผิว,  $\psi_S = (E_F - E_V)/q$  ความหนาแน่นของประจุระหว่างผิวหาได้จาก

$$N_{SS} = \frac{1}{q} \frac{\partial Q_{SS}}{\partial \psi_S} \quad (2.44)$$

ผลจากการทดลองของระบบ Si-SiO<sub>2</sub> แสดงไว้ในรูปที่ 2.19 จะเห็นว่า  $N_{SS}$  มีค่าสูงสุดใกล้ขอบของแถบพลังงาน และไม่ขึ้นกับ surface orientation ทั้งนี้เราได้ตั้งข้อสมมุติฐานว่า (1) ความถี่มีค่าสูงพอที่จะไม่ทำให้  $Q_{SS}$  ไปมีส่วนกับค่าความจุมากนัก (2) space-charge ในชั้นออกไซด์ และ electron affinity differences ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ และ (3)  $N_{SS}$  มีค่าคงที่โดยประมาณในเชิงพลังงานแคบ ๆ ใน forbidden gaps



รูปที่ 2.18 a) แผนภูมิแสดงการเลื่อนของเคิร์ฟ C-V เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง  
 b) การเปลี่ยนแปลงของระดับเฟอร์มิเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

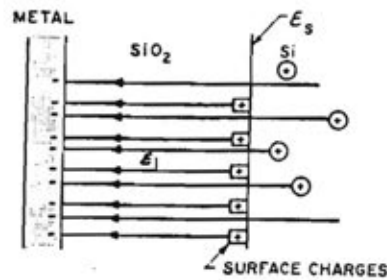


รูปที่ 2.19 ค่าความหนาแน่นของสถานะระหว่างผิวที่วัดได้ที่ orientation ต่าง ๆ กัน

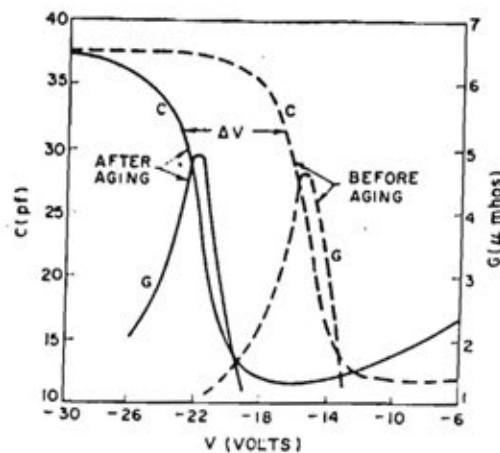
### 2.2.3 Surface charges และ Space Charges ในออกไซด์

ประจุผิว (surface charges) ประกอบไปด้วย ประจุที่ติดอยู่กับที่ (fixed surface charge) ไอออนที่เคลื่อนที่ได้ (mobile ions) และ trap ที่มีไอออน (ionized traps) ซึ่งอยู่ใกล้หรืออยู่ที่ผิวสัมผัสระหว่างออกไซด์กับสารกึ่งตัวนำ space charges ในออกไซด์ประกอบด้วย ไอออนที่เคลื่อนที่ได้ และ trap ที่มีไอออนซึ่งอยู่ภายในออกไซด์ ประจุที่ติดอยู่กับที่มีสมบัติดังต่อไปนี้คือ มันต้องอยู่กับที่และไม่สามารถถูกขจัดหรือดีสชาร์จจากการเปลี่ยนแปลงอย่างมากของ  $\psi_s$  ได้ มันต้องอยู่ห่างจากผิวสัมผัสไม่เกิน  $100 \text{ \AA}$  ความหนาแน่น ( $Q_{fc}$ ) ของมันต้องไม่เปลี่ยนแปลงไปตามความหนาของชั้นฉนวน (ออกไซด์) หรือความเข้มข้น หรือชนิดของสารเจือปนในสารกึ่งตัวนำมากนัก  $Q_{fc}$  จะขึ้นกับการเกิดชั้นออกไซด์ สภาวะการ anneal และทิศ (orientation) ของสารกึ่งตัวนำ ประจุที่ติดอยู่กับที่อาจเกิดจากไอออนส่วนเกินของซิลิกอนในออกไซด์ ผลของประจุที่ติดอยู่กับที่จะทำให้เคิร์ฟของตัวเก็บประจุ MOS เคลื่อนไปอย่างขนานกับแนวเดิมตามแกนแรงดัน และจำนวนที่เคลื่อนไป  $\Delta V$  หาได้จาก

$$\Delta V = \frac{Q_{fc}}{C_i} \quad (2.45)$$



(a)



(b)

รูปที่ 2.20 ผลของประจุที่ผิว (surface charge) ต่อเคิร์ฟ MOS

ถ้าดูจากรูปที่ 2.20 (a) จะเห็นว่าเมื่อมีประจุบวกอยู่กับที่ผิว สนามไฟฟ้า  $E_f$  ในชั้นออกไซด์ จะสูงกว่าสนามไฟฟ้าในผิวของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นจึงต้องไขประจุที่ชั้นโลหะมากขึ้นเพื่อที่จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่ผิว  $E_s$  ค่าหนึ่ง ดังนั้นจึงต้องป้อนแรงดันสูงขึ้นเพื่อให้ได้ศักย์ที่ผิว  $\psi_s$  รูปที่ 2.20 (b) แสดงรูป Si-SiO<sub>2</sub> ที่มีเสถียร ก่อนและหลังการ anneal สาเหตุที่ทำให้ C-V เคิร์ฟเลื่อนไป เนื่องจากมีประจุที่ผิวตรงบริเวณผิวสัมผัสระหว่าง Si-SiO<sub>2</sub> มากขึ้น

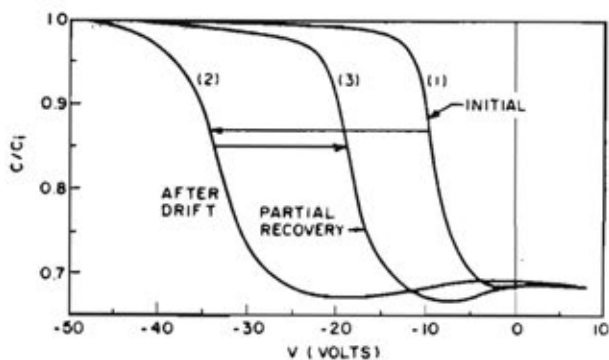
จากการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าไอออนของพวก alkali เช่นโซเดียม ในชั้นออกไซด์ (thermally grown oxide) เป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิดความไม่เสถียรของสิ่งประดิษฐ์ที่มีชั้นออกไซด์เป็นฉนวน ซึ่งเมื่อทำงานที่อุณหภูมิสูงไอออนจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นออกไซด์ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน รูปที่ 2.21 (a) แสดงตัวอย่างของผลอันเกิดจากไอออนที่เคลื่อนที่ได้เหล่านี้ C-V เคิร์ฟอันแรก (1) ของ Si-SiO<sub>2</sub> ถูก anneal ที่ 127°C เป็นเวลา 30 นาที ขณะที่ป้อนแรงดัน + 10 V ที่ขั้วโลหะทำให้ได้เคิร์ฟ (2) เคิร์ฟ (3) ได้จากการ anneal Si-SiO<sub>2</sub> ตัวเดิมที่อุณหภูมิและเวลานานเท่าเดิม แต่ป้อนแรงดัน -10 V ที่ขั้ว ทำให้เกิด partial recovery ขึ้น ปรากฏการณ์นี้อธิบายได้จากรูปที่ 2.21 (b) คือตอนแรกสุดไอออนของอัลคาไลอยู่ใกล้ขั้วโลหะ เมื่อป้อนแรงดันโพลบวกเข้าที่ขั้วโลหะ (ที่ 127°C) ไอออนบวกจะเคลื่อนไปทางสารกึ่งตัวนำจะถึงบริเวณผิวสัมผัส ทำให้แรงดันเคลื่อนไปอย่างมาก เมื่อป้อนโพลลบ (ที่ 127°C) ไอออนส่วนใหญ่จะเคลื่อนกลับไปขั้วโลหะ ทำให้เกิดการฟื้นตัวบางส่วน (partial recovery)

Space charge ในชั้นออกไซด์ก็ทำให้แรงดันบนเคิร์ฟ C-V เคลื่อนไปเช่นเดียวกัน รูปที่ 2.22 แสดง band diagram, charge distribution, สนามไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าของ MOS ที่มีทั้งสเตรทระหว่างผิวและ space charge ในชั้นออกไซด์ เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 2.6 ซึ่งเป็น MOS เชิงอุดมคติ จะเห็นว่าถ้าค่าศักย์ที่ผิว  $\psi_s$  เท่ากัน แรงดัน  $V$  ที่ป้อนจะมีค่าลดลง ซึ่งให้เห็นว่ามี การเคลื่อนของแรงดันไปทางค่าลบ การเคลื่อนที่ซึ่งเกิดจากความหนาแน่นของ space charge  $\rho_j(x)$

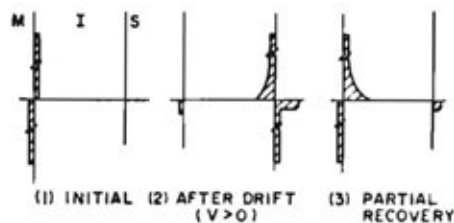
$$\Delta V = \frac{1}{C_i d} \int_0^d x \rho_j(x) dx \quad (2.46)$$

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าการทำงานที่ MOS ที่มีเสถียรเมื่อถูกใช้งานที่สนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงหรือที่อุณหภูมิสูง เราจะต้องควบคุม ion drift instability และ





(a) C-V CHARACTERISTICS



(b) CHARGE DISTRIBUTIONS CORRESPONDING TO (a)

### รูปที่ 2.21 ผลของไอออนที่เคลื่อนที่ได้ (mobile ions) ต่อเคิร์ฟ MOS

surface-charge instability หลักการควบคุมการเคลื่อนที่ของไอออน (ion drift) ทำได้โดย (1) คัดแปลงชั้นฉนวน เช่น เดิมหรือสพอร์สลงในระบบ Si-SiO<sub>2</sub> หรือใช้ฉนวนอย่างอื่น เช่น ซิลิกอนไนไตรด์ และ (2) ขบวนการจะต้องสะอาดเพื่อหลีกเลี่ยงโซเดียมหรือสารเจือปนอย่างอื่น หลักการควบคุมความไม่เสถียรของประจุผิว (surface-charge instability) ทำได้โดย (1) การ anneal ที่เหมาะสม เช่น anneal ที่อุณหภูมิสูงในไฮโดรเจนแห้ง ซึ่งจะได้ความหนาแน่นของประจุผิวได้อย่างมีผล และ (2) ใช้แว่นผลึกสารกึ่งตัวนำที่ไม่มีสารแปลกปลอม

จากการวิเคราะห์ในข้างต้น (หัวข้อที่ 2.2.1 ถึง 2.2.3) จะสรุปได้ว่า ผลของ work function difference ระหว่างผิว (interface state) และ surface และ space charges จะทำให้เคิร์ฟ C-V ของ MOS เคลื่อนไปตามแนวแรงดัน

แรงดันเรียกว่า แรงดัน flat-band จากสมการที่ (2.30), (2.38) และ (2.46) จะได้ค่ารวมของ  $V_{FB}$  ว่า

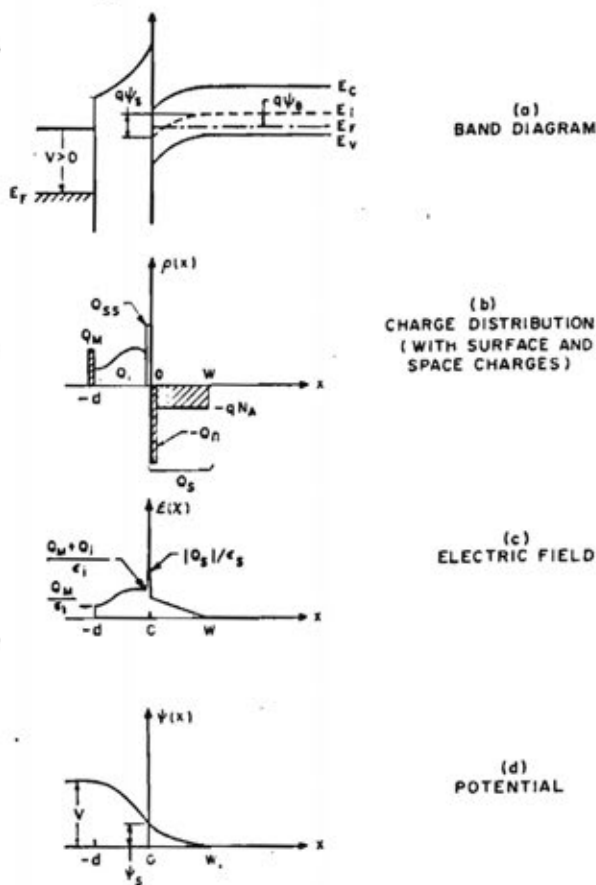
$$V_{FB} = \phi_{ms} - \frac{Q_{ss}}{C_i} - \frac{1}{C_{id}} \int_{-d}^0 x \rho_i(x) dx \quad (2.47)$$

ทำให้เราสามารถหัดแปลงสมการที่ (2.28) ของ MOS เซิงอุคมคคิได้เป็น

$$V_T = V_{FB} - \frac{Q_s}{C_i} + \psi_s \quad (2.48)$$

หรือ

$$V_T = V_{FB} - \frac{Q_s}{C_i} + 2\psi_B \quad (2.49)$$



รูปที่ 2.22 แถบพลังงาน การกระจายประจุ สนามไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ MOS ที่มีประจุที่ผิวและ space charge ในชั้นออกไซด์

### 3. เครื่องมือวิเคราะห์และการพัฒนาซอฟต์แวร์ในการวิเคราะห์ความหนาแน่นของสเกต จะหว่างผิว

เนื่องจากวัตถุประสงค์ของโครงการนี้ เพื่อพัฒนาและจัดตั้งระบบการวัด ลักษณะสมบัติความจุ-แรงดัน (C-V characteristics) แบบอัตรโนมิต เพื่อเป็น เครื่องมือวัดมาตรฐานของการศึกษาสเกตระหว่างผิวของ MOS และสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำอื่น ๆ ในห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (SDRL) ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ บทนี้จึงจะกล่าวถึงเครื่องมือที่ได้จัดตั้งขึ้นมาเพื่อใช้ในการวัด และเนื่องจากการวัดจะเป็นไปโดยอัตรโนมิตโดยมีคอมพิวเตอร์เป็นควบคุม จึงต้องมีการพัฒนาซอฟต์แวร์ ซึ่งเป็นงานสำคัญส่วนหนึ่งของโครงการนี้ เพื่อควบคุมการวัด

#### 3.1 เครื่องมือวิเคราะห์

##### 3.1.1 เครื่องมือวัดความจุ-แรงดัน

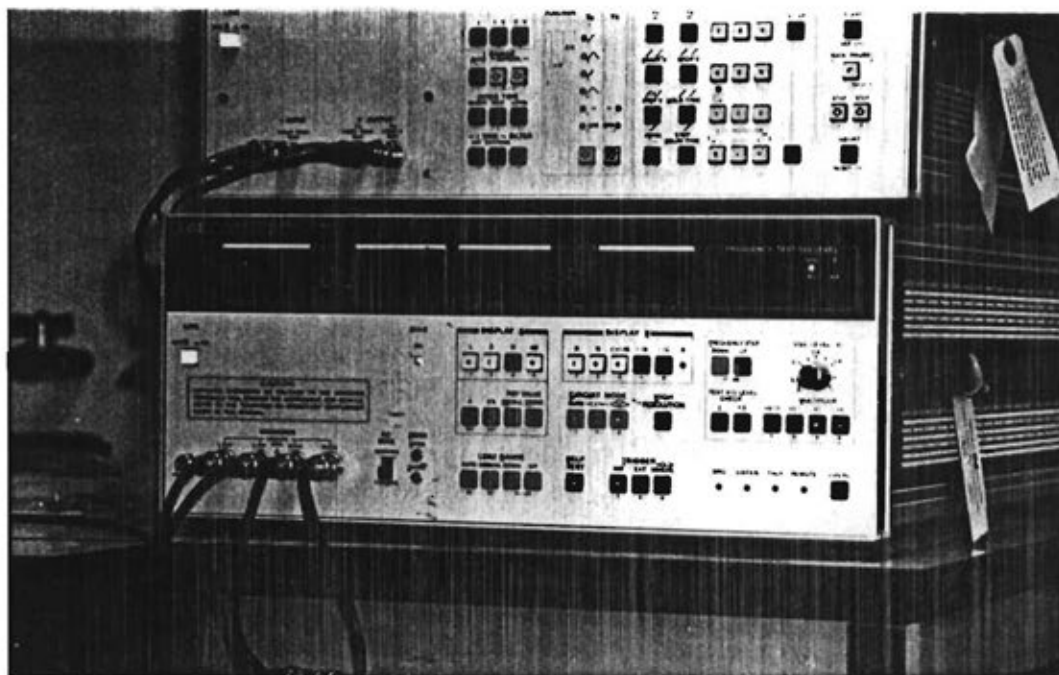
เครื่องมือวัดความจุ-แรงดัน (C-V) โดยทั่ว ๆ ไป มีประกอบไปด้วย

- 1) เครื่องมือวัดความจุ (capacitance meter) ซึ่งมีแหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่สูงในตัวมันเอง และสามารถวัดความจุที่มีค่าน้อยเป็น picofarads (pF) ได้
- 2) แหล่งจ่ายไฟตรง (DC power supply) เพื่อไบแอส MOS ที่ต้องการวัด และ
- 3) X-Y plotter ถ้า capacitance meter สามารถให้สัญญาณ output จากค่าความจุที่วัดได้เป็นแรงดันไฟฟ้าซึ่งสามารถนำมาขับเคลื่อนแกน Y ของ X-Y plotter ได้ มิฉะนั้นจะต้องจคข้อมูลของค่าความจุที่วัดได้ และค่าแรงดันไบแอสที่ม้อนเข้าไปด้วยมือ และนำข้อมูลเหล่านั้นมาพล็อตเองด้วยมือเช่นเดียวกัน ทำให้เสียเวลามากสำหรับการวัดแต่ละครั้ง

เครื่องมือวัดความจุ-แรงดันที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ เป็นเครื่องมือยี่ห้อ Hewlett-Packard รุ่น HP-4274A Multi-Frequency LCR Meter คือเป็นเครื่องมือที่ได้วัดได้ทั้ง capacitance, inductance และ resistance ที่ความถี่ต่าง ๆ ได้ตั้งแต่ 100 Hz ถึง 100 kHz โดยที่เราสามารถปรับขนาดของสัญญาณได้ตามต้องการ (โดยปรกติขนาดของสัญญาณวัดควรมีค่าไม่เกิน  $\frac{kT}{q}$  หรือประมาณ 25 mV ที่อุณหภูมิห้อง) และค่าความจุที่สามารถวัดได้มีค่าตั้งแต่ femtofarads (fF, 1 fF =  $10^{-15}$  F)

จนถึงหลาย ๆ พัน microfarads ( $\mu\text{F}$ ) นอกจากนี้ภายในเครื่อง HP-4274 A ยังมีแหล่งจ่ายไฟตรง (internal DC bias supply) ซึ่งสามารถควบคุมได้ด้วยมือหรือผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์

ในการทำงานของ HP-4274 A เราสามารถควบคุมการวัดทั้งหมดด้วยมือได้ นอกจากนี้เครื่องมือชิ้นนี้ยังมี interface bus เรียกว่า HP-IB (Hewlett-Packard Interface Bus) ซึ่งมีมาตรฐานเหมือน IEEE 488 Bus นี้ทำให้เราสามารถต่อเครื่องมือนี้เข้ากับเครื่องอื่น ๆ ซึ่งใช้ bus ระบบเดียวกัน ทำให้สามารถติดต่อส่งสัญญาณถึงกันได้ และเมื่อต่อเครื่องมือเหล่านี้เข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ ก็จะทำให้เราควบคุมการวัด การเก็บบันทึกข้อมูล การคำนวณ วิเคราะห์ และประมวลผลข้อมูลรวมทั้งการแสดงผลทั้งเชิงเลขและเชิงกราฟได้อย่างอัตโนมัติ ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการวิจัยเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว แม่นยำ และมีประสิทธิภาพ และผลที่ได้จะถูกบันทึกไปยังขบวนการผลิต เพื่อแก้ไขปรับปรุงขบวนการในการผลิตให้ดีขึ้น



รูปที่ 3.1 Multifrequency LCR Meter

### 3.1.2 คอมพิวเตอร์

คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมการวัดดังกล่าวข้างต้นให้เป็นไปโดยอัตโนมัติ เป็นไมโครคอมพิวเตอร์ Hewlett-Packard รุ่น HP-9816S ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อการใช้งานทางด้านวิทยาศาสตร์ และวิศวกรรมศาสตร์ โดยเฉพาะ คอมพิวเตอร์ระบบนี้ประกอบด้วยหน่วยความจำ (memory) 516 KB มี disk drive 2 ตัว ใช้ floppy disk ขนาด 3.5 นิ้ว ซึ่งมีความจุ 710 KB และมีจอแสดงผล ซึ่งแสดงได้ทั้งตัวอักษรและกราฟพร้อม ๆ กันได้ การติดต่อระหว่างเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ และเครื่องมือวัดความจุ-แรงดัน ติดต่อโดยผ่าน HP-IB เช่นเดียวกับการติดต่อระหว่างกับคอมพิวเตอร์ และเครื่องมือประกอบอย่างอื่น เช่น printer และ plotter ภาษาคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการพัฒนาซอฟต์แวร์ในการวัดและวิเคราะห์เป็นภาษา BASIC ของ Hewlett-Packard

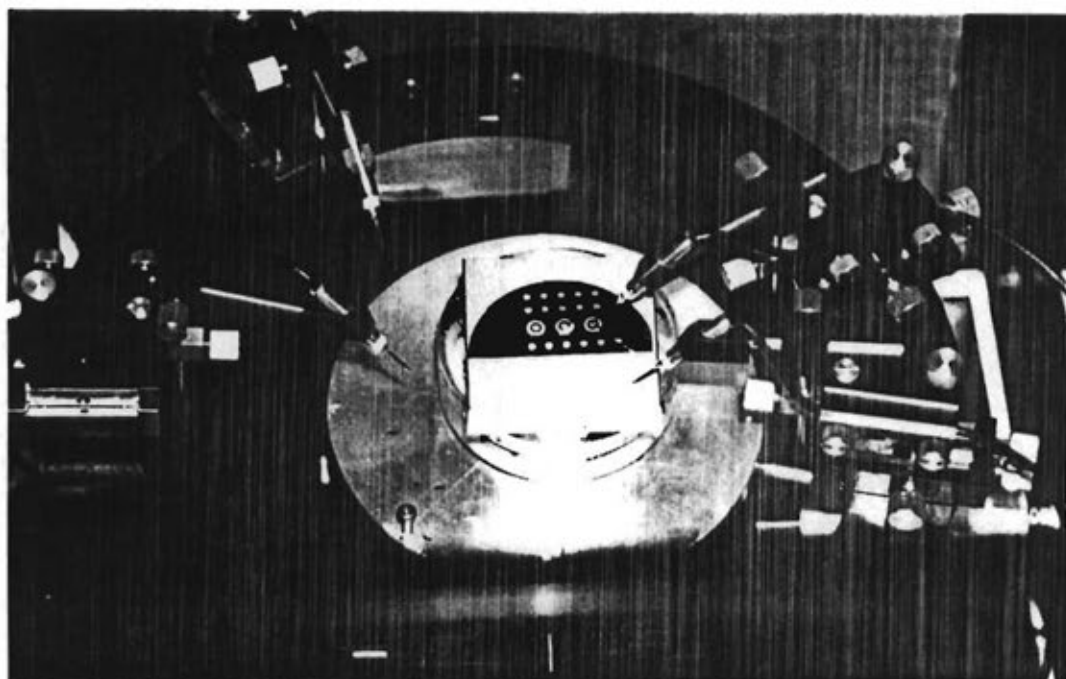
### 3.1.3 Probe Station

เนื่องจากสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างขึ้นมาเพื่อการวิจัย มักไม่มีการต่อขาออกมา probe จึงเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการวัด เพราะเป็นเครื่องมือที่ต่อสัญญาณไฟฟ้าระหว่างสิ่งประดิษฐ์และเครื่องมือวัด probe ที่มีจะต้องมีความต้านทานไฟฟ้า และความจุไฟฟ้าต่ำ เพื่อจะได้ไม่มีผลต่อค่าที่วัดได้ และจะต้องทำสัมผัสทางไฟฟ้า (electrical contact) ดีกับสิ่งยประดิษฐ์ที่มีขนาดเล็กมาก ค่าที่วัดได้จึงจะมีความน่าเชื่อถือสูง นอกจากนี้บริเวณรอบ probe station ควรมีการป้องกันแสงและคลื่นรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) เพื่อมิให้มีอิทธิพลต่อผลการวัด รูปที่ 3.2 แสดง probe station ที่ใช้ในการวัด

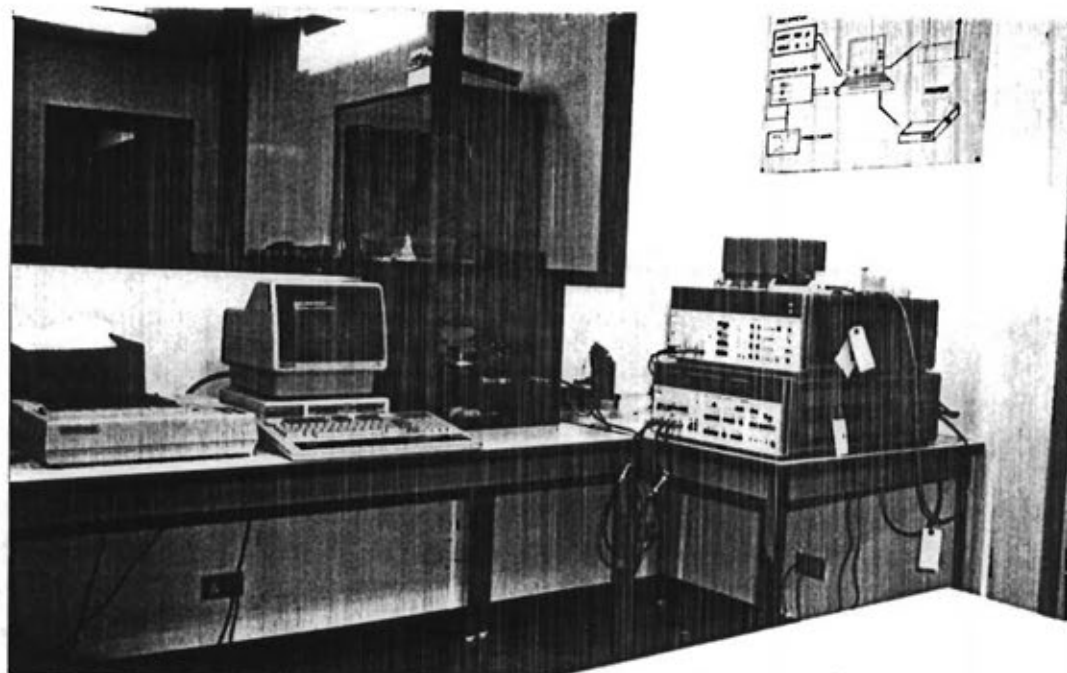
### 3.1.4 เครื่องมือแสดงผล

เครื่องมือแสดงผลการวัดและวิเคราะห์ มีทั้งจอภาพ (monitor) เครื่องพิมพ์ (printer) และเครื่องพล็อตกราฟ (graphic plotter) ข้อมูลที่ได้จากการวัดจะถูกนำมาเก็บและคำนวณโดยคอมพิวเตอร์ เมื่อได้ผลแล้วจึงส่งไปยัง printer หรือ plotter ตามต้องการ หรืออาจแสดงบนจอภาพเพียงอย่างเดียวก็ได้ รูปที่

### 3.3 แสดงระบบเครื่องมือวัดทั้งหมด



รูปที่ 3.2 Probe station



รูปที่ 3.3 ระบบเครื่องมือวัด C-V

### 3.2 การพัฒนาซอฟต์แวร์

โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการวัด การเก็บบันทึกข้อมูล การคำนวณวิเคราะห์ และประมวลผลข้อมูล รวมทั้งการแสดงผลซึ่งต่อไปนี้จะเรียกย่อ ๆ ว่า โปรแกรมควบคุมฯ ถูกพัฒนามาจากภาษา BASIC บนเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ Hewlett-Packard จุดประสงค์หลักของการพัฒนาโปรแกรมนี้ ก็เพื่อให้การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติ ความจุ-แรงดัน (C-V measurements) เป็นไปได้อย่างรวดเร็ว ถูกต้อง ยืดหยุ่นและง่ายต่อการใช้งาน เพื่อผลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้จะได้เป็นข้อมูลย้อนกลับไปยังขบวนการผลิต (processing) ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สร้างขึ้นมาในห้องปฏิบัติการวิจัยนี้

เนื่องจากเครื่องมือวัดรุ่น HP-4274 A มีขีดความสามารถและความยืดหยุ่นในการวัดสูง ทำให้ผู้ใช้เครื่องมือวัดนี้ จะต้องตัดสินใจในการวัดแต่ละครั้งว่าต้องการช่วงที่กัก และพารามิเตอร์ ต่าง ๆ อย่างไร การพัฒนาโปรแกรมควบคุมฯ จึงมีแนวทางดังต่อไปนี้คือ

ก. ก่อนเริ่มทำการวัดจะต้องตัดสินใจว่า จะวัดค่าความจุและความนำไฟฟ้า (Capacitance/Conductance) หรือความจุไฟฟ้าและ dissipation factor (Capacitance/Dissipation factor) ของชั้นออกไซด์

ข. เลือกช่วงแรงดันไฟตรงที่จะป้อนให้กับสิ่งประดิษฐ์ที่ต้องการวัดจากแรงดันต่ำสุด ถึงแรงดันสูงสุดว่า ต้องการค่าเท่าไร

ค. เลือกความถี่ของสัญญาณที่ใช้ในการวัด

ง. เริ่มทำการวัด การวัดจากช่วงแรงดันไฟตรง และความถี่ของสัญญาณไฟที่เลือกไว้ โดยค่อย ๆ เพิ่มแรงดันไฟตรงจากค่าต่ำสุดไปค่าสูงสุดที่ละ 0.2 V และรอ 0.2 วินาที ก่อนที่จะเพิ่มค่าแต่ละครั้ง การวัดครั้งนี้เป็นการวัดเพื่อหาค่าความจุไฟฟ้าต่ำสุดและสูงสุด เพื่อใช้ในการคำนวณสเกลของแกน Y ซึ่งเป็นแกนของความจุไฟฟ้า (แกน X เป็นแรงดันไฟตรง)

จ. เมื่อได้ค่าความจุไฟฟ้าต่ำสุดและสูงสุด และคำนวณแกน Y แล้ว จึงตีกรอบและวาดแกน X-Y บนจอภาพพร้อมทั้งเขียนสเกลที่เหมาะสม หลังจากนั้นจึงเริ่มทำการวัดใหม่ โดยเริ่มจากแรงดันไฟตรง 0 volt ไปยังค่าแรงดันไฟตรงต่ำสุด หลังจากนั้นจึงเพิ่มค่าแรงดันไฟตรงไปจนถึงค่าสูงสุด และลดกลับมายังค่าต่ำสุดอีกครั้งหนึ่ง เพื่อ

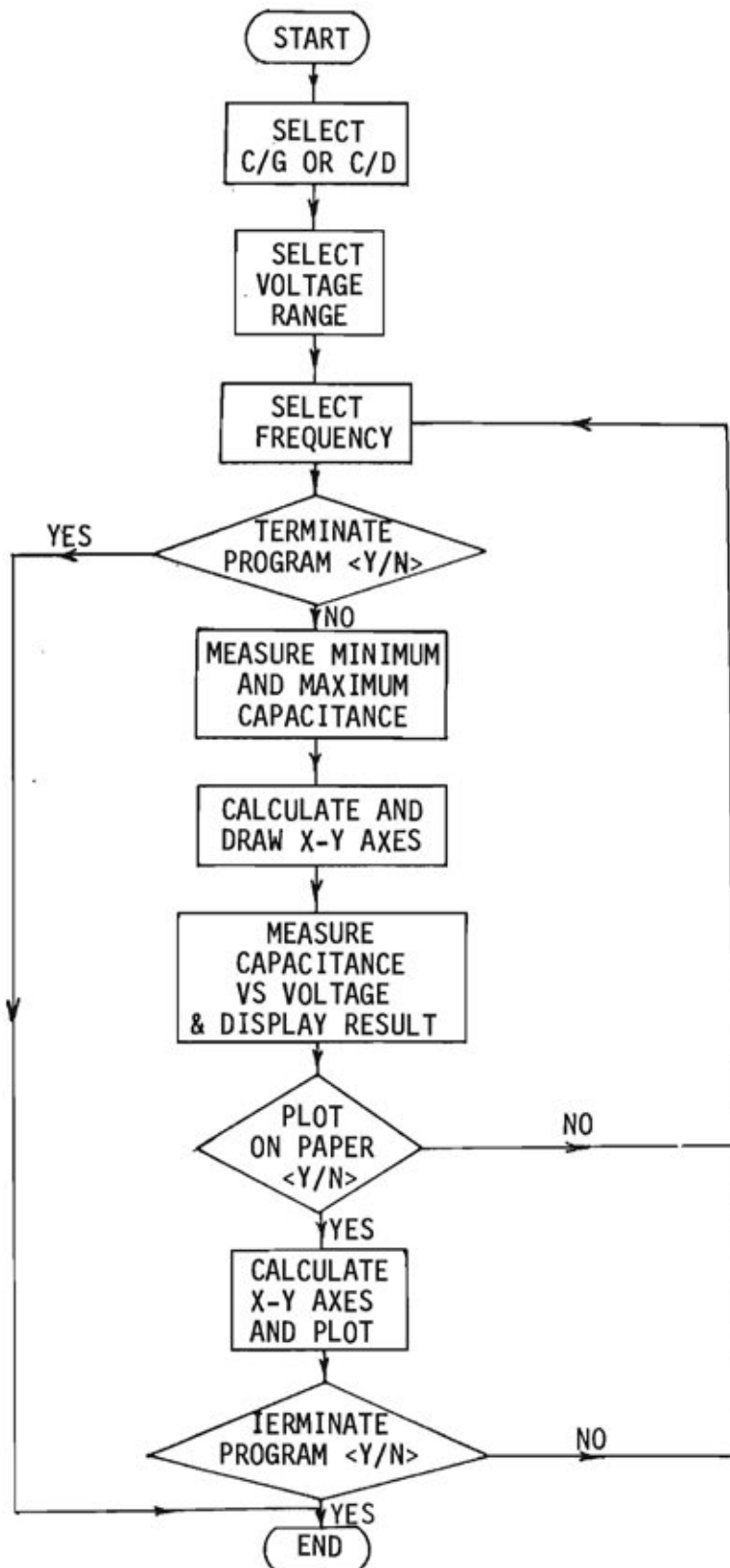
ตรวจดูว่ามี hysteresis หรือไม่ การเพิ่มหรือลดค่าแรงดันไฟตรงแต่ละครั้งเพิ่มเป็น  
 สลับ 0.2 V และรอ 0.2 วินาที ก่อนเพิ่มหรือลดค่าต่อไป เพื่อให้ประจุต่าง ๆ ทั้ง  
 ในชั้นออกไซด์และที่ผิวสัมผัสตอบสนองได้ทัน ค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันไฟตรงแต่ละจุด  
 จะถูกพล็อตเป็น C-V curve บนจอแสดงภาพ

จ. เมื่อเสร็จการวัด ผู้วัดจะสามารถเลือกได้ว่าต้องการพล็อตกราฟที่ได้  
 นี้ลงบนกระดาษหรือไม่ ถ้าต้องการโปรแกรมควบคุมฯ จะส่งโค้ดและข้อมูลต่าง ๆ ที่ใช้  
 ในการเขียนแกน X-Y และกราฟไปยัง plotter เพื่อพล็อตรูปออกมา

ช. ผู้วัดจะสามารถเลือกได้ว่า จะทำการวัดใหม่ที่ความถี่ต่าง ๆ กันหรือไม่  
 ถ้าต้องการก็เลือกความถี่ใหม่ตามข้อ ค. เป็นต้นมา เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของ  
 กราฟที่ความถี่ต่าง ๆ กัน ถ้าไม่ต้องการก็หยุดโปรแกรมแค่เพียงเท่านี้

รูปที่ 3.4 เป็น Flowchart แสดงโปรแกรมควบคุมฯ รายละเอียดของ  
 การเขียนโค้ดภาษาเบสิกถูกแสดงไว้ในภาคผนวก



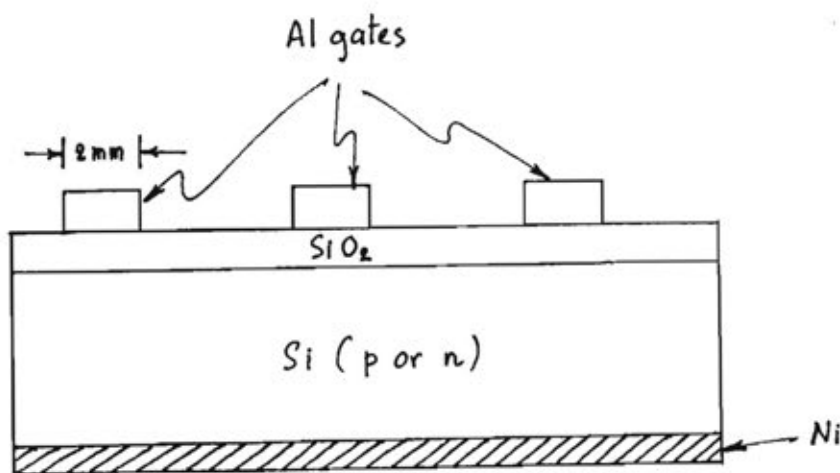


รูปที่ 3.4 Flowchart ของโปรแกรมการวัดความจุ ๗

#### 4. การวัดและการวิเคราะห์ผลการวัดของตัวเก็บประจุ MOS

##### 4.1 ตัวเก็บประจุ MOS

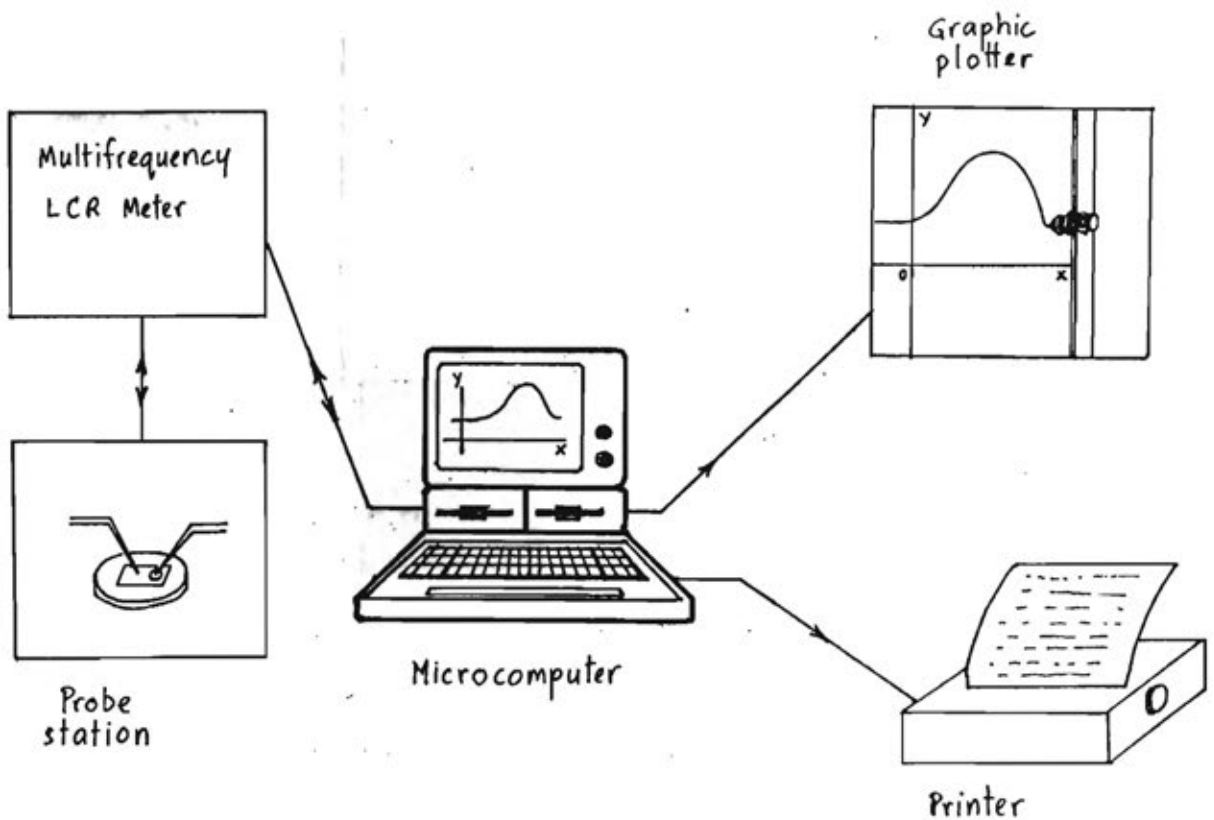
ตัวเก็บประจุ MOS ที่นำมาศึกษาสร้างจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ซึ่งมีค่าความต้านทานจำเพาะ ( $\rho$ ) ประมาณ  $5 \Omega\text{-cm}$  และแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี ซึ่งมีค่าความต้านทานจำเพาะประมาณ  $0.2 \Omega\text{-cm}$  ผิวของแผ่นผลึกเป็นชนิดขัดมันทั้งสองด้าน ความหนาของชั้นออกไซด์ที่ปลูกมีค่าประมาณ 1200 อังสตรอม (ด้วยวิธี dry oxidation) และประมาณ 1000 (ด้วยวิธี wet oxidation) ผิวสัมผัสด้านหลังเป็นโลหะนิกเกิลเกิดทำโดยการชุบแบบไร้ไฟฟ้า (electroless plating) พื้นที่ของชั้นออกไซด์ถูกกำหนดด้วยขนาดของโลหะที่ทำหน้าที่เป็น gate ซึ่งสร้างโดยการฉาบอะลูมิเนียม (Al) ภายใต้อุณหภูมิห้อง ให้ความหนาประมาณ 0.3 ไมครอน เป็นรูปร่างกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ตามรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โครงสร้างตัวเก็บประจุ MOS

##### 4.2 การวัดลักษณะสมบัติความจุ-แรงดัน

บทที่ 3 ได้กล่าวถึงรายละเอียดของเครื่องมือที่ใช้ในการวัดลักษณะสมบัติความจุ-แรงดันของตัวเก็บประจุ MOS รวมทั้งหลักการพัฒนาซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการควบคุมการวัด ระบบเครื่องมือวัดดังกล่าวช่วยให้การวัดเป็นไปได้อย่างรวดเร็วและถูกต้องแม่นยำ แผนภูมิของระบบเครื่องมือวัดแสดงไว้ในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แผนภูมิของระบบเครื่องมือวัดลักษณะสมบัติ C-V ของตัวเก็บประจุ MOS

ขั้นตอนในการวัดมีดังต่อไปนี้คือ

1. วางแผ่นผลึกที่มีตัวเก็บประจุ MOS บน probe station และเลื่อน probe มาสัมผัสบน Al-gate electrode ด้านล่างของแผ่นผลึกจะสัมผัสกับแท่นของ probe station ซึ่งก็เป็น electrode อีกตัวหนึ่ง
2. Load และ run โปรแกรมควบคุมฯ

3. เลือกว่าต้องการวัดค่าความจุไฟฟ้าและค่าความนำไฟฟ้า (capacitance/conductance หรือ C/G) หรือค่าความจุไฟฟ้าและค่าแฟกเตอร์ความสูญเสีย (capacitance/dissipation factor หรือ C/D)

4. เลือกค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดและสูงสุด (ช่วงแรงดันไฟฟ้า) ของการวัด

5. เลือกค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าที่ใช้ในการวัด

6. เมื่อถึงจุดนี้ หากเกิดการผิดพลาดในการบ่อนค่าต่าง ๆ อาจหยุดโปรแกรมเพื่อทำการบ่อนข้อมูลใหม่ มิฉะนั้นโปรแกรมควบคุมฯ จะเริ่มทำงาน

7. ในขั้นแรกโปรแกรมควบคุมฯ จะเริ่มปรับแรงดันของแหล่งจ่ายไปตรงภายในเครื่อง LCR meter ให้ไปอยู่ที่แรงดันต่ำสุดก่อนโดยปรับแรงดันทีละ 0.2 โวลต์ ทุก ๆ 0.2 วินาที จากนั้นจึงเริ่มเพิ่มแรงดันจากค่าต่ำสุดไปยังค่าสูงสุดทีละ 0.2 โวลต์ ทุก ๆ 0.2 วินาทีเช่นกัน พร้อมทั้งวัดและบันทึกค่าความจุไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้าเหล่านี้ทุกค่า จุดประสงค์ของขั้นตอนนี้ก็เพื่อหาค่าความจุไฟฟ้าต่ำสุดและสูงสุดเพื่อสร้างแกน Y ให้มีขนาดเหมาะสมโดยที่ไม่ต้องมาคำนวณและบ่อนค่าเข้าไปด้วยมือ

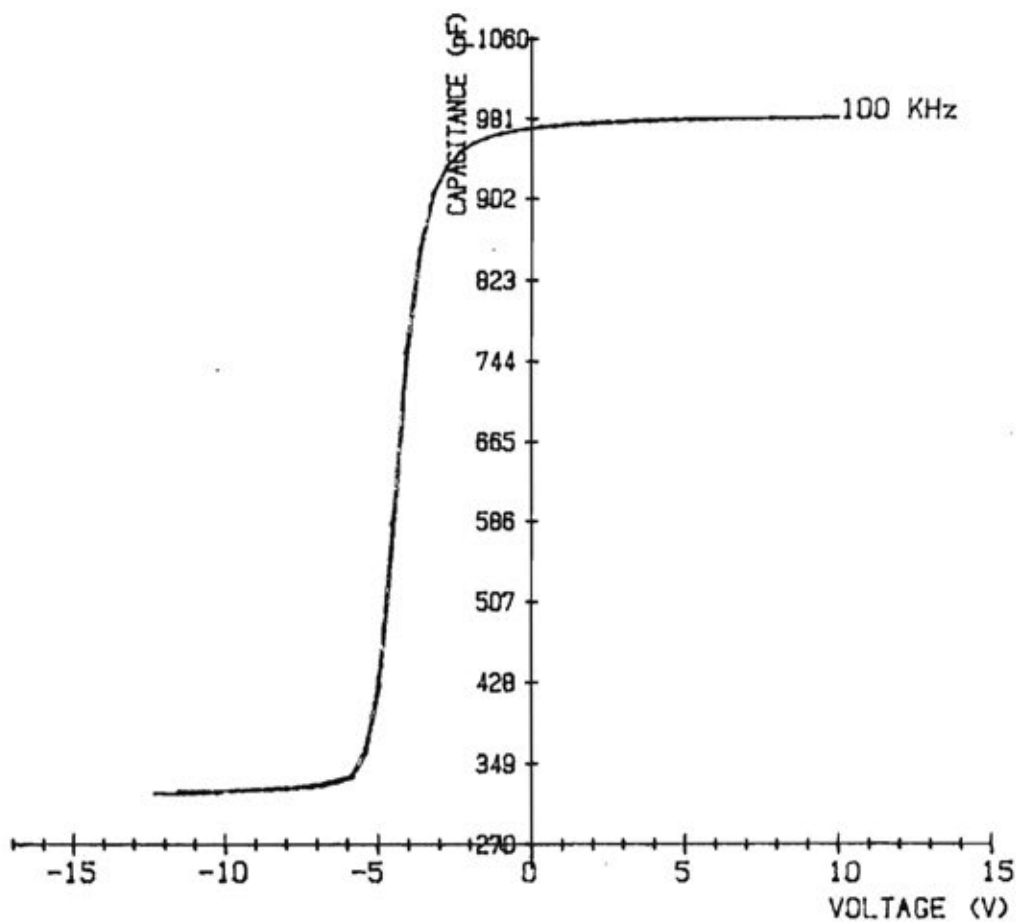
8. เมื่อได้ค่าความจุไฟฟ้าต่ำสุดและสูงสุด และวาดแกน X และ Y บนจอเรียบร้อยแล้ว โปรแกรมควบคุมฯ จะเริ่มทำการวัด บันทึกข้อมูล และแสดงผลที่ได้บนจอ โดยเริ่มจากค่าแรงดันไฟตรงต่ำสุด ไปยังค่าแรงดันไฟตรงสูงสุด โดยเพิ่มค่าแรงดันทีละ 0.2 โวลต์ ทุก ๆ 0.2 วินาที จากนั้นจึงเริ่มวัดกลับจากแรงดันไฟตรงสูงสุด ไปยังค่าแรงดันไฟตรงต่ำสุด โดยลดค่าแรงดันทีละ 0.2 โวลต์ ทุก ๆ 0.2 วินาที จุดประสงค์ของการวัดกลับ ก็เพื่อดูว่า C-V เคิร์ฟที่วัดนี้มี hysteresis loop หรือไม่ อันจะบ่งถึงคุณภาพของชิ้นออกไซด์ที่สร้างขึ้นมา

9. เมื่อเสร็จสิ้นการวัดลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน จะปรากฏบนจอภาพถ้าผู้วัดต้องการบันทึกภาพเป็นกระดาษ โปรแกรมควบคุมฯ ก็จะส่งข้อมูลการวัดที่เก็บไว้ในหน่วยความจำของเครื่องไปยังเครื่องพล็อตกราฟ (graphic plotter) และพล็อตรูปที่ได้ออกมาพร้อมทั้งเขียนคำอธิบายแกน X-Y สเกลของค่า และความถี่ของสัญญาณที่ใช้วัดออกมา

10. ผู้วัดอาจสั่งให้โปรแกรมควบคุมฯ ทำการวัดตัวอย่างทดสอบ (sample) เดิมอีกครั้ง แต่เปลี่ยนความถี่ของสัญญาณที่ใช้วัดเป็นค่าใหม่ และพล็อตผลของการวัดทับลงบนรูปเดิมเพื่อการเปรียบเทียบ หรือสั่งให้โปรแกรมหยุดทำงานที่จุดนี้ได้

ตัวอย่างของผลการวัดของตัวเก็บประจุ MOS ซึ่งสร้างบน n-Si ถูกแสดงไว้

ในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 C-V characteristics ของตัวเก็บประจุ MOS ชนิด n-Si

#### 4.3 การวิเคราะห์ผลการวัดตัวเก็บประจุ MOS

ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ เป็นค่าความจุไฟฟ้าที่แท้จริงของตัวเก็บประจุ MOS ทั้งนี้เพราะก่อนทำการวัด ได้ทำการ calibrate เครื่องมือวัดไว้ก่อนแล้ว กล่าวคือเมื่อวัดจะวัดค่า stray capacitance (หรือ parasitic capacitance) ที่ทุก ๆ ความถี่ของระบบก่อนที่จะต่อตัวเก็บประจุ MOS เข้าไปในระบบ และบันทึกค่าเหล่านี้ลงในหน่วยความจำของเครื่อง เมื่อทำการวัดที่แท้จริง เครื่องจะลบค่า stray capacitance นี้ออกจากค่าที่วัดได้โดยอัตโนมัติ และแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่แท้จริงของตัวอย่างทดลอง

##### 4.3.1 การหาความหนาของชั้นออกไซด์

จากตัวอย่างในรูปที่ 4.3 ได้ค่าความจุไฟฟ้าสูงสุด ( $C_{max}$ ) 980 pF และค่าความจุไฟฟ้าต่ำสุด ( $C_{min}$ ) 340 pF จากทฤษฎีเมื่อตัวเก็บประจุ MOS ถูกไบแอสด้วยแรงดันไฟตรงค่าความจุไฟฟ้ารวม ( $C_{total}$ ) จะประกอบไปด้วยค่าความจุไฟฟ้าของชั้นออกไซด์ ( $C_{OX}$ ) และค่าความจุไฟฟ้าของซีดีก่อนอันเกิดจากเขตปลอดพาหะ ( $C_S$ ) ซึ่งค่อนข้างจะขึ้นอยู่กับ ดังนั้นค่าของ  $C_S$  จะเปลี่ยนแปลงไปตามการไบแอส กล่าวคือถ้าไบแอสแบบ

$$\frac{1}{C_{total}} = \frac{1}{C_{OX}} + \frac{1}{C_S} \quad (4.1)$$

accumulation ไม่มีเขตปลอดพาหะ จะไม่มี  $C_S$  (นั่นคือ  $C_S$  มีค่าสูงมากจนสามารถตัดทิ้งได้) ถ้าไบแอสแบบ depletion คือมีเขตปลอดพาหะ  $C_S$  จะมีค่าแปรผันตามความกว้างของเขตปลอดพาหะ และเมื่อไบแอสจนถึงเขต inversion ความกว้างของเขตปลอดพาหะจะมีขนาดใหญ่ที่สุดและมีค่าคงที่ทำให้  $C_S$  มีค่าต่ำสุด ส่วน  $C_{OX}$  มีค่าคงที่ตามสมการ

$$C_{OX} = \frac{\epsilon_{OX} A}{d_{OX}}$$

โดยที่  $\epsilon_{OX}$  = permittivity ของ  $SiO_2$

$$= 3.9 \times 8.854 \times 10^{-14} \quad F/cm$$

$$\begin{aligned}
 A &= \text{พื้นที่หน้าตัดของ Gate (Al dot)} \\
 &= \pi r^2 \\
 &= \pi \times (0.1)^2 \quad (\text{เส้นผ่าศูนย์กลาง} = 2 \text{ มม.}) \\
 &= 0.031416 \quad \text{cm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 d_{\text{ox}} &= \text{ความหนาของชั้นออกไซด์} \\
 &= 1200 \text{ \AA}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น} \quad C_{\text{ox}} &= \frac{3.9 \times 8.854 \times 10^{-14} \times 0.031416}{1200 \times 10^{-8}} \\
 &= 904 \quad \text{pF}
 \end{aligned}$$

จากการวัดได้ค่า  $C_{\text{max}}$  ซึ่งก็คือ  $C_{\text{ox}}$  เท่ากับ 980 pF หรืออีกนัยหนึ่งจากค่าที่ได้จากการวัด เราสามารถคำนวณหาความหนาของชั้นออกไซด์ได้ว่า

$$\begin{aligned}
 d_{\text{ox}} &= \frac{\epsilon_{\text{ox}} A}{C_{\text{ox}}} \\
 &= \frac{3.9 \times 8.854 \times 10^{-14} \times 0.031416}{980 \times 10^{-12}} \\
 &= 1106.5 \text{ \AA}
 \end{aligned}$$

เมื่อเทียบกับ 1200 Å ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากคำนวณตามเงื่อนไขของการปลูกชั้นออกไซด์ จะเห็นว่าทั้งสองแตกต่างกันน้อยกว่า 10% ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ดี

#### 4.3.2 การคำนวณหาความเข้มข้นของสารเจือปน (doping concentration)

ความเข้มข้นของสารเจือปนในชั้นฐานซิลิกอน (Si-substrate) สามารถหาได้จากสมการที่ (2.27) ในบทที่สองคือ

$$W_m = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \psi_s(\text{inv})}{qN_D}} \quad (4.2)$$

$$= \sqrt{\frac{4_s kT \ln(N_D/n_i)}{q^2 N_D}} \quad (4.3)$$

โดยที่  $\epsilon_s$  = permittivity ของ Si

$$= 11.7 \times 8.854 \times 10^{-14} \text{ F/cm}$$

$k$  = Boltzmann's constant

$$= 1.380 \times 10^{-23} \text{ joule/}^\circ\text{K}$$

$T$  = อุณหภูมิเป็น  $^\circ\text{K}$  ( $300^\circ\text{K}$ )

$q$  = Electron charge

$$= 1.602 \times 10^{-19} \text{ coulomb}$$

$$n_i = 1.6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} \text{ ที่ } 300^\circ\text{K}$$

$N_D$  = ความเข้มข้นของสารเจือปนที่ต้องการหา

และ  $W_m$  = ค่าความกว้างสูงสุดของเขตปลอดพาหะซึ่งหาได้จาก

$$C_{s(\text{min})} = \frac{\epsilon_s A}{W_m} \quad (4.4)$$



$$\text{ดังนั้น } C_{s(\min)} = \frac{\epsilon_s A}{\sqrt{\frac{4\epsilon_s kT \ln(N_D/n_i)}{q^2 N_D}}} \quad (4.5)$$

ค่าของ  $C_{s(\min)}$  สามารถหาได้เมื่อค่า  $C_{\text{total}}$  มีค่าต่ำสุด กล่าวคือ

$$\begin{aligned} \frac{1}{C_{\min}} &= \frac{1}{C_{\text{ox}}} + \frac{1}{C_{s(\min)}} \\ \text{ซึ่งจะได้ } C_{s(\min)} &= \frac{C_{\min} \times C_{\text{ox}}}{(C_{\text{ox}} - C_{\min})} \\ &= \frac{980 \times 340}{(980 - 340)} \\ &= 520.6 \text{ pF} \end{aligned}$$

เมื่อนำค่าต่าง ๆ เหล่านี้แทนลงในสมการ (4.5) ซึ่งเป็นสมการชนิด transcendental equation และใช้โปรแกรมสำเร็จรูป LOTUS 1-2-3 และไมโครคอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณจะได้ค่า  $N_D \approx 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

#### 4.3.3 การหาความหนาแน่นของสเตรหะหว่างผิว

จากสมการที่ (2.46) ได้ค่าของ  $V_{\text{FB}}$  ว่า

$$V_{\text{FB}} = \phi_{\text{ms}} - \frac{Q_{\text{ss}}}{C_i} - \frac{1}{C_{\text{id}}} \int_{-d}^0 x \rho_i(x) dx$$

โดยที่  $\rho_i(x)$  คือ charge distribution อันเกิดจาก surface charge และ space charge ซึ่งสามารถควบคุมและลดลงได้ โดยการใช้น้ำที่มีความบริสุทธิ์สูงและปราศจากไอออน (de-ionized water) การ anneal ที่เหมาะสม และการใช้แว่นผลิตสารกึ่งตัวนำที่ไม่มีสารแปลกปลอม ซึ่งในการทำวิจัยครั้งนี้ก็ได้พยายามทำตามหลักปฏิบัติทั้งหมด เพื่อลดผลของ  $\rho_i(x)$  ให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ และเนื่องจากไม่สามารถวัดคำนวณและ

ประมาณค่าของ  $\rho_i(x)$  จึงจะละเลยค่าของ  $\rho_j(x)$  ในการวิจารณ์ต่อไป (หลักปฏิบัติทั่วไป มักจะประมาณ  $\rho_j(x)$  เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งหรือรวมเข้ากับค่า  $Q_{SS}$  เป็นค่าคงที่ เนื่องจากรู้สึกว่าหาค่า distribution function ได้) จึงได้ว่า

$$V_{FB} = \phi_{ms} - \frac{Q_{SS}}{C_i} \quad (4.6)$$

ในสมการนี้ค่าของ  $C_i$  หาได้โดยตรงจากการวัดคือ ค่า  $C_{OX} = 980 \text{ pF}$  ส่วนค่า  $V_{FB}$  และ  $\phi_{ms}$  หาได้ดังต่อไปนี้คือ

$V_{FB}$  คือแรงดันแถบเรียบ (flat-band) เมื่อไม่มีการโค้งงอของแถบพลังงาน ซึ่งหาได้จาก C-V เคิร์ฟ เมื่อ C มีค่าเท่ากับ  $C_{FB}$  จากสมการ (2.19) จะได้

$$\begin{aligned} C_D(\text{Flat-band}) &= \sqrt{2} \epsilon_s / L_D \\ &= \sqrt{2} \epsilon_s \sqrt{\frac{2kT \epsilon_s}{q^2 N_D}} \\ &= \frac{\sqrt{2 \times 11.7 \times 8.854 \times 10^{-14} \times \sqrt{1.602 \times 10^{-19} \times 2 \times 10^{15}}}}{\sqrt{2 \times 0.0259 \times 11.7 \times 8.854 \times 10^{-14}}} \\ &= \sqrt{\frac{11.7 \times 8.854 \times 10^{-14} \times 1.602 \times 10^{-19} \times 2 \times 10^{15}}{.0259}} \\ &= 1.13 \times 10^{-7} \text{ F/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่าจริงของ } C_D(\text{Flat-band}) &= 1.13 \times 10^{-7} \text{ F/cm}^2 \times \text{Area} \\ &= 1.13 \times 10^{-7} \times 0.031416 \\ &= 3550 \text{ pF} \end{aligned}$$

ค่าประจุรวมในสภาวะแถบเรียบจึงมีค่า

$$\begin{aligned} C_{FB} &= \frac{C_{ox} C_D \text{ (Flat-band)}}{C_{ox} + C_D \text{ (Flat-band)}} \\ &= \frac{980 \times 3550}{980 + 3550} \\ &= 768 \text{ pF} \end{aligned}$$

จากกราฟรูปที่ 4.3 จะได้ค่า  $V_{FB} = -4.0 \text{ V}$

ค่า  $\phi_{ms}$  หาได้จาก สมการ (2.1 a) (सारทั้งตัวนำชนิดเอ็น)

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left( X + \frac{E_g}{2q} - \psi_B \right)$$

ค่าของ  $\phi_m$ ,  $X$  และ  $E_g$  หาได้จาก (1) ส่วน  $\psi_B$  หาได้จากสมการ  $\psi_B = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{N_D}{n_i} \right)$  ทำให้ได้

$$\begin{aligned} \phi_{ms} &= 3.2 - \left( (4.35 - 1.1) + 1.1/2 - 0.0259 \ln (2 \times 10^{15} / 1.5 \times 10^{10}) \right) \\ &= -0.294 \text{ V} \end{aligned}$$

แทนค่า  $V_{FB} = -4.0 \text{ V}$ ,  $\phi_{ms} = -0.294 \text{ V}$  และ  $C_i$  (ต่อหน่วยพื้นที่) =  $980 \times 10^{-2} / 0.031416 = 3.119 \times 10^{-8} \text{ F}$  ลงในสมการ (4.6) จะได้

$$\begin{aligned} Q_{ss} &= 1.156 \times 10^{-7} \text{ coul/cm}^2 \\ &= \frac{1.156 \times 10^{-7}}{q} \text{ /cm}^2 \\ &= 7.22 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \end{aligned}$$

ค่า  $Q_{SS}$  ที่คำนวณได้จากผล จากการทดลองนี้พบว่ามีความค่อนข้างสูง ผิดสัมพันธ์ที่  $Q_{SS}$  ควร มีค่าอยู่ในช่วงค่า ๆ ของ  $10^{10}/\text{cm}^2$  จากการวัดของตัวอย่างตัวเก็บประจุ MOS อีกตัว หนึ่งซึ่งอยู่บนแผ่นผลึกคนละแผ่น แต่มีสมบัติใกล้เคียงกัน และสร้างตัวเก็บประจุ MOS พร้อมๆ กันด้วย เจอนโซและพารามิเตอร์ของการทดลองเหมือนกัน ได้ค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้คือ

$$C_{ox} = 882 \text{ pF} \quad (\text{จากการทดลอง และดูรูปที่ 4.4})$$

$$C_{min} = 310 \text{ pF}$$

$$\text{ได้ } d_{ox} = 1223 \text{ \AA} \quad (\text{ค่าที่คาดคือ } 1200 \text{ \AA})$$

$$N_D = 1.7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$$

$$C_{FB} = 875 \text{ pF}$$

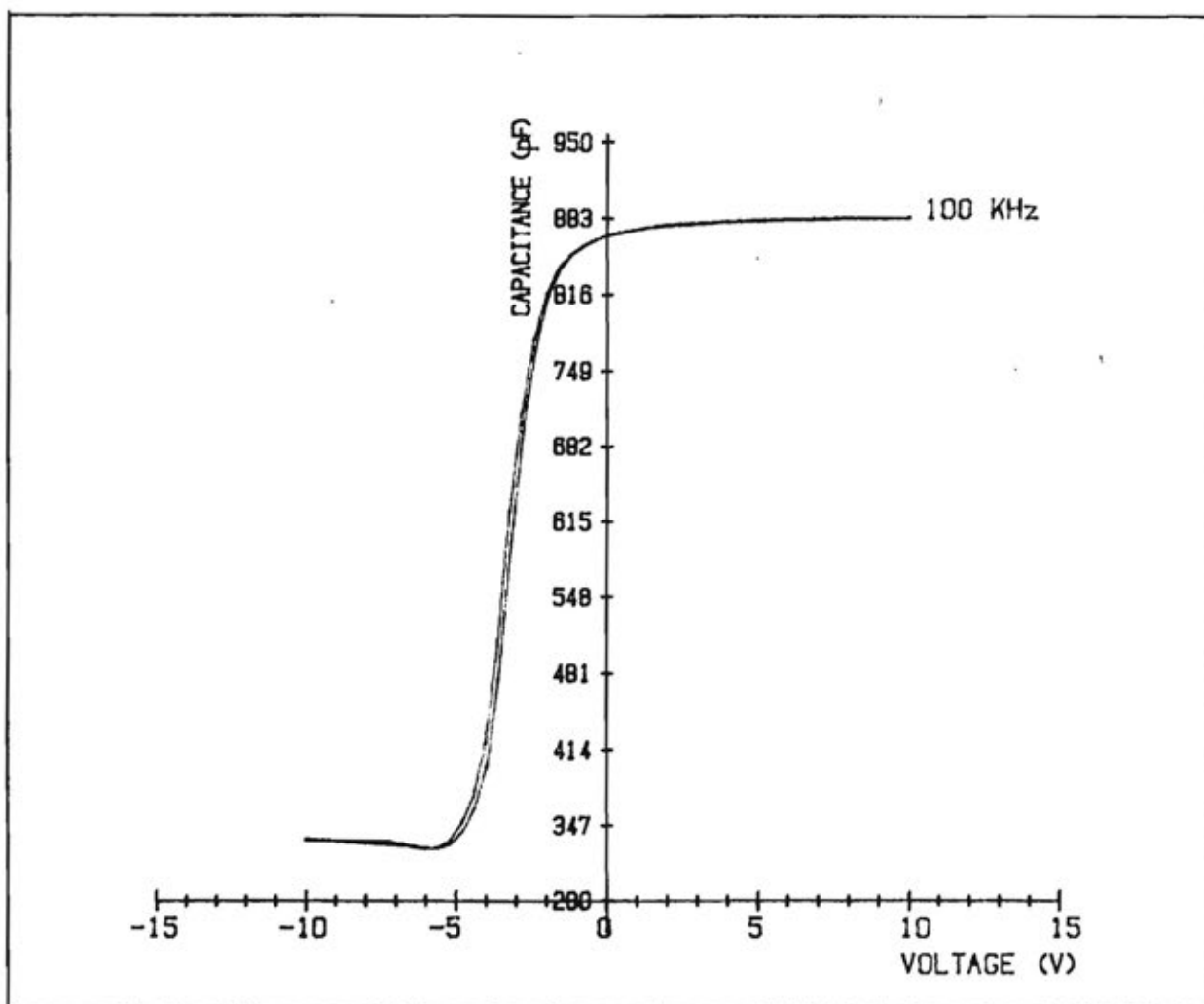
$$V_{FB} = -3.8 \text{ V}$$

$$Q_{SS} = 6.13 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$$

ซึ่งใกล้เคียงกับค่าของตัวเก็บประจุ MOS ตัวแรก

อนึ่งในการทดลองวัดค่าแรงดัน-ความจุของตัวเก็บประจุ MOS ที่ได้สร้างขึ้น มาหลายตัวด้วยเงื่อนไขการสร้างต่าง ๆ ปรากฏว่าตัวเก็บประจุ MOS ส่วนใหญ่เสียหาย ไป วัดค่าไม่ได้ อันเกิดจากการ breakdown ในขณะที่ทำการวัดหรือมีคุณสมบัติไม่ตามแต่ แรกเนื่องจากการควบคุมขั้นตอนไม่ดีพอ เช่นเมื่อความหนาของชั้นออกไซด์ต่ำกว่า  $1200 \text{ \AA}$  ตัวเก็บประจุ MOS ที่สร้างขึ้นจะเสียหายเกือบหมด จึงเหลือตัวอย่างที่ใช้วัดได้เพียงไม่กี่ตัว แต่ผลที่ได้จากการวัดและคำนวณของตัวอย่างทั้งสองตัวนี้พบว่าใกล้เคียงกับค่าที่คาดไว้ตาม ทฤษฎี เช่นค่า  $C_{ox}$  และ  $d_{ox}$  ส่วนค่า  $N_D$  และ  $Q_{SS}$  ที่คำนวณได้ของตัวอย่างทั้งสองตัว ก็มีค่าใกล้เคียงกันมาก ( $N_D = 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  และ  $1.7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  และ  $Q_{SS} = 7.22 \times 10^{11}$  และ  $6.13 \times 10^{11}$  ตามลำดับ) จึงนับเป็นการ confirm ผลที่ได้จากการวัด เพราะแผ่นผลึกที่ใช้มีสมบัติใกล้เคียงกัน และการเตรียมและการปลูกชั้นออกไซด์ของทั้งสอง ตัวอย่างทำไปพร้อม ๆ กัน

จากผลการวิเคราะห์ที่ได้ค่า  $Q_{SS}$  ระหว่าง  $10^{11}$ - $10^{12}$   $\text{cm}^{-2}$  ซึ่งนับเป็นค่าค่อนข้างสูง จึงถือว่าเป็นตัวเก็บประจุ MOS ที่ยังมีคุณภาพไม่ดัดนัก เนื่องจากการเตรียมแผ่นผลึกและขบวนการผลิตยังคงควบคุมไม่ดีพอ ควรปรับปรุงให้ดีขึ้น แต่ทั้งนี้ก็ตรงกับจุดประสงค์ของโครงการวิจัยนี้ เพื่อวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นของสถานะระหว่างผิว เพื่อทำข้อมูลที่ได้อีกต่อไปปรับปรุงขบวนการและเงื่อนไขต่าง ๆ ของการผลิตตัวเก็บประจุ MOS และสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำอื่น ๆ ที่ทำขึ้นบนแผ่นผลึกสารซิลิกอน



รูปที่ 4.4 C-V characteristics ของตัวเก็บประจุ MOS ชนิด n-Si ตัวที่ 2

## 5. สรุปผลโครงการและข้อเสนอแนะ

วัตถุประสงค์หลักของโครงการวิจัยครั้งนี้ เพื่อศึกษาและวิเคราะห์สัณฐานระหว่างผิวของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งของตัวเก็บประจุ MOS ทั้งนี้เพราะตัวเก็บประจุ MOS มีผิวสัมผัสระหว่างซิลิกอนไดออกไซด์กับซิลิกอน ทำให้มีความหนาแน่นของสัณฐานระหว่างผิวสูง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสิ่งประดิษฐ์ที่จะสร้างขึ้นบนโครงสร้างนี้อันได้แก่ MOSFET ซึ่งเป็นสิ่งประดิษฐ์หลักของไอซีรุ่นใหม่ (CMOS) จากการค้าเงินโครงการวิจัยนี้ งานที่ได้ค้าเงินสำเร็จไป จะสรุปได้ดังต่อไปนี้คือ

1. จัดตั้ง (set-up) ระบบเครื่องมือวัดความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (capacitance-voltage) แบบอัตโนมัติ ซึ่งประกอบด้วย microprobes และ manipulators, multifrequency LCR meter, microcomputer, graphic plotter และ printer
2. พัฒนาโปรแกรมควบคุมการวัด การเก็บบันทึกข้อมูล การคำนวณวิเคราะห์ และประมวลผลข้อมูล รวมทั้งการแสดงผล
3. งานวัด C-V เคอร์ฟของตัวเก็บประจุ MOS และวิเคราะห์หาความหนาแน่นของสัณฐานระหว่างผิวจากเคอร์ฟที่วัดได้ เพื่อนำผลที่ได้ไปย้อนกลับไปยังขบวนการสร้างตัวเก็บประจุ MOS

งานที่ได้ค้าเงินไปตามข้อ 1 และข้อ 2 เป็นประโยชน์ไม่เฉพาะแต่เพียงงานวิจัยในโครงการนี้เท่านั้น แต่ยังเป็นชุดเครื่องมือวัดและวิเคราะห์แบบอัตโนมัติมาตรฐานของห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (SDRL) ซึ่งสามารถวัดและวิเคราะห์ตัวอย่างอื่นทั่ว ๆ ไปได้

อย่างไรก็ดีแล้วแต่ในการค้าเงินงานวิจัยครั้งนี้ได้ประสบผลสรวรรคบางอย่างซึ่งทำให้งานล่าช้ากว่ากำหนดเกิน 1 ปี และได้ผลวิเคราะห์ไม่มากเท่าที่ควร อุปสรรคที่สำคัญคือ

1. ได้รับเครื่องมือวิจัยค่อนข้างล่าช้า คือได้รับเครื่องมือวัด LCR meter และเครื่องคอมพิวเตอร์ เดือนตุลาคม 2528 แต่อุปกรณ์ที่ได้รับในครั้งนั้นมีไม่ครบจนกระทั่ง 2 เดือนถัดมา จึงได้อุปกรณ์ครบทุกชิ้น
2. เครื่องคอมพิวเตอร์เสียหายระหว่างเดือนมีนาคม-พฤษภาคม 2529 ทำให้การพัฒนาโปรแกรมควบคุมขาดหยุดชะงักไป

3. เตาแพร่ซึมที่ใช้ในการปลูกชั้นออกไซด์มีอายุการใช้งาน ทำให้อุปกรณ์ควบคุมมักเสื่อมหรือทำงานไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นการควบคุมพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในขบวนการผลิตจึงอาจไม่ดีเท่าที่คาด ตัวอย่างที่ผลิตขึ้นมาจึงมี yield ค่า ประกอบทั้งตัวอย่างบางตัวได้ถูกทำลายในระหว่างการวัด จึงทำให้มีตัวอย่างที่ดีเหลือเป็นจำนวนน้อยมาก

เนื่องจากอุปสรรคในสองข้อแรก ทำให้การวิจัยล่าช้าเกินกำหนดเวลาไปมาก ประกอบกับช่วงเวลาในการปลูกชั้นออกไซด์ไม่สอดคล้องกับการทดสอบเครื่องมือและโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ จึงมิได้นำผลที่ได้ขึ้นมาเป็นข้อมูลป้อนกลับเข้าไปยังขบวนการผลิตใหม่ในรายงานครั้งนี้ แต่ในการทดลองครั้งต่อไปในอนาคต จะสามารถทำวัดและวิเคราะห์ผลของตัวอย่างที่สร้างขึ้นมาได้ทันที

จากการดำเนินงานวิจัยในโครงการนี้ ได้ทราบถึงสิ่งบกพร่องและแนวทางปรับปรุงเพื่อให้ได้ผลที่ดีขึ้นพอสรุปได้ดังต่อไปนี้คือ

1. พัฒนาโปรแกรมควบคุมเพิ่มเติม เพื่อให้สามารถคำนวณค่าต่าง ๆ เช่น  $C_{S(\min)}$ ,  $N_D$ ,  $C_{FB}$ ,  $V_{FB}$  และ  $Q_{SS}$  ได้ทันที
2. พัฒนาระบบเครื่องมือวัด กระแส-แรงดัน พร้อมทั้งพัฒนาโปรแกรมควบคุมการวัดโดยอัตโนมัติ เพื่อให้สามารถทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ทดสอบคุณภาพของฉนวน และหา breakdown voltage (breakdown field) ของฉนวนหรือหัวต่อพี-เอ็น กระแสรั่ว ฯลฯ ได้ด้วย
3. ศึกษาการหาความหนาแน่นของสเดตระหว่างผิวของตัวเก็บประจุ MOS โดยการวัดความนำไฟฟ้า-แรงดัน (Conductance-voltage หรือ G-V) ซึ่งทำให้สามารถคำนวณค่า  $Q_{SS}$  ได้ง่ายกว่าและให้ผลที่แม่นยำกว่า

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้  
อนุมัติงบประมาณแก่โครงการวิจัยนี้ และขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ได้ให้การ  
สนับสนุนค้ำค้ำเนินการ จนทำให้โครงการวิจัยนี้บรรลุผลตามเป้าหมาย



תוכנית

```

10 ! C-V2 TEST PROGRAM
20 ! C-V MEASUREMENTS PROGRAM
30 ! OCTOBER 1986
40 !
50 !
60 DIM Cap(200),V(400),Capp(400)
70 PRINT CHR$(12);
80 PRINT "PRESS A FOR C/G, ANY OTHER KEY FOR C/D"
90 INPUT P$
100 PRINT CHR$(12);
110 IF P$="A" THEN
120 OUTPUT 717;"A2B3"
130 ELSE
140 OUTPUT 717;"A2B1"
150 END IF
160 PRINT "ENTER THE VALUE OF STARTING VOLTAGE"
170 PRINT "(RANGE -32 TO +32)"
180 INPUT K1
190 V1=10*K1
200 PRINT CHR$(12)
210 PRINT "STARTING VOLTAGE =",K1,"V"
220 IF K1>0 THEN
230 LET Y=.2
240 ELSE
250 LET Y=-.2
260 END IF
270 PRINT
280 PRINT "ENTER THE VALUE OF FINAL VOLTAGE"
290 PRINT "(RANGE +32 TO -32)"
300 INPUT K2
310 V2=10*K2
320 PRINT CHR$(12);
330 PRINT "STARTING VOLTAGE =",K1,"V"
340 PRINT "FINAL VOLTAGE      =",K2,"V"
350 PRINT
360 PRINT "SELECT THE FREQUENCY AT WHICH YOU WANT TO OPERATE BY CHOOSING"
370 PRINT "THE CODE INDICATED BELOW"
380 PRINT
390 PRINT "  F11 FOR 100 Hz          F17 FOR 4 KHz"
400 PRINT "  F12 FOR 120 Hz          F18 FOR 10 KHz"
410 PRINT "  F13 FOR 200 Hz         F19 FOR 20 KHz"
420 PRINT "  F14 FOR 400 Hz        F20 FOR 40 KHz"
430 PRINT "  F15 FOR 1 KHz         F21 FOR 100 KHz"
440 PRINT "  F16 FOR 2 KHz         X TO EXIT THE PROGRAM"
450 INPUT F$
460 IF F$="X" THEN
470 BEEP
480 PRINT CHR$(12)
490 PRINT "END OF PROGRAM"
500 GOTO 2870
510 END IF
520 OUTPUT 717;F$
530 PRINT CHR$(12)
540 Frame$="Y"
550 FOR X=0 TO K1 STEP Y
560 OUTPUT 717;"BI";VAL$(X);"E";"OOV";
570 WAIT .2
580 NEXT X

```

```

590 M=0
600 FOR X=K1 TO K2 STEP -Y
610 OUTPUT 717;"BI";VAL$(X);"E";"OOV";
620 WAIT .2
630 ENTER 717;A
640 Cap(M)=A
650 M=M+1
660 NEXT X
670 REDIM Cap(M-1)
680 Cmaxi=MAX(Cap(*))*10^12
690 Cmini=MIN(Cap(*))*10^12
700 FOR X=K2 TO 0 STEP Y
710 OUTPUT 717;"BI";VAL$(X);"E";"OOV"
720 WAIT .2
730 NEXT X
740 Cmax1=Cmaxi*1.2
750 Cmin1=Cmini*.7
760 PRINT "MAXIMUM CAPACITANCE =",Cmaxi
770 PRINT "MINIMUM CAPACITANCE =",Cmini
780 PRINT
790 PRINT
800 PRINT "PRESS [CONTINUE] TO CONTINUE"
810 PAUSE
820 PRINT CHR$(12)
830 ! WINDOW AND FRAME DEFINITIONS
840 DEG
850 GINIT
860 GRAPHICS ON
870 Wl=MIN(K1,K2)-10
880 Wr=MAX(K1,K2)+10
890 Wb=Cmin1*.8
900 Wt=Cmax1
910 Cal=Wl+5
920 Car=Wr-5
930 Cab=Cmin1*1.1
940 Cat=Cmax1*.9
950 Ylocx=50*INT(Cmini/50)
960 Z=INT((Cat-Ylocx)/10)
970 Xtick=1
980 Ytick=10
990 Xlocy=0
1000 Xmajor=5
1010 Ymajor=5
1020 Size=2
1030 Cfl=Cal-2
1040 Cfr=Car+2
1050 Cfb=Cmin1*1.05
1060 Cft=Cmax1*.95
1070 WINDOW Wl,Wr,Wb,Wt
1080 CLIP Cal,Car,Cab,Cat
1090 AXES Xtick,Ytick,Xlocy,Ylocx,Xmajor,Ymajor,Size
1100 CLIP OFF
1110 CLIP Cfl,Cfr,Cfb,Cft
1120 FRAME
1130 !
1140 LOGS 8
1150 FOR I=Ylocx TO Cat STEP 50
1160 MOVE Xlocy,I

```

```

1170 CSIZE 4,.4
1180 LABEL I
1190 NEXT I
1200 IMOVE -4,0
1210 LDIR 90
1220 LABEL "CAPACITANCE (pF)"
1230 !
1240 LORG 6
1250 LDIR 360
1260 FOR I=Cal TO Car STEP 1
1270 MOVE I,Ylocx
1280 IF I MOD 5=0 THEN LABEL I
1290 NEXT I
1300 IMOVE -5,0
1310 LABEL "VOLTAGE (V)"
1320 !
1330 GRAPHICS OFF
1340 GOTO 1550
1350 PRINT
1360 PRINT "SELECT THE FREQUENCY AT WHICH YOU WANT TO OPERATE BY CHOOSING
1370 PRINT "THE CODE INDICATED BELOW"
1380 PRINT
1390 PRINT "    F11 FOR 100 Hz                F17 FOR 4 KHz"
1400 PRINT "    F12 FOR 120 Hz               F18 FOR 10 KHz"
1410 PRINT "    F13 FOR 200 Hz                  F19 FOR 20 KHz"
1420 PRINT "    F14 FOR 400 Hz                   F20 FOR 40 KHz"
1430 PRINT "    F15 FOR 1 KHz                    F21 FOR 100 KHz"
1440 PRINT "    F16 FOR 2 KHz                    X TO EXIT THE PROGRAM"
1450 INPUT F$
1460 IF F$="X" THEN
1470 BEEP
1480 PRINT CHR$(12)
1490 PRINT "END OF PROGRAM"
1500 GOTO 2870
1510 END IF
1520 OUTPUT 717;F$
1530 PRINT CHR$(12);
1540 Frame$="N"
1550 GRAPHICS ON
1560 !
1570 MOVE 0,0
1580 X=(V1-V2)/50
1590 FOR I=0 TO V1 STEP X
1600 OUTPUT 717;"BI";VAL$(I);"E";"--01V";
1610 WAIT .5
1620 NEXT I
1630 ENTER 717;A,B
1640 LET V0=.1*I
1650 LET C0=A*(10^12)
1660 MOVE V0,C0
1670 DRAW V0,C0
1680 !
1690 N=0
1700 FOR I=V1 TO V2 STEP X*(-1)
1710 OUTPUT 717;"BI";VAL$(I);"E";"--01V";
1720 WAIT 1
1730 ENTER 717;A,B
1740 PRINT .1*I,A,B

```

```

1750 V(N)=.1*I
1760 Capp(N)=A*(10^12)
1770 DRAW V(N),Capp(N)
1780 N=N+1
1790 NEXT I
1800 IMOVE 3,0
1810 IF F$="F11" THEN
1820 LABEL "100 Hz"
1830 Freq$="100 Hz"
1840 END IF
1850 IF F$="F12" THEN
1860 LABEL "120 Hz"
1870 Freq$="120 Hz"
1880 END IF
1890 IF F$="F13" THEN
1900 LABEL "200 Hz"
1910 Freq$="200 Hz"
1920 END IF
1930 IF F$="F14" THEN
1940 LABEL "400 Hz"
1950 Freq$="400 Hz"
1960 END IF
1970 IF F$="F15" THEN
1980 LABEL "1 KHz"
1990 Freq$="1 KHz"
2000 END IF
2010 IF F$="F16" THEN
2020 LABEL "2 KHz"
2030 Freq$="2 KHz"
2040 END IF
2050 IF F$="F17" THEN
2060 LABEL "4 KHz"
2070 Freq$="4 KHz"
2080 END IF
2090 IF F$="F18" THEN
2100 LABEL "10 KHz"
2110 Freq$="10 KHz"
2120 END IF
2130 IF F$="F19" THEN
2140 LABEL "20 KHz"
2150 Freq$="20 KHz"
2160 END IF
2170 IF F$="F20" THEN
2180 LABEL "40 KHz"
2190 Freq$="40 KHz"
2200 END IF
2210 IF F$="F21" THEN
2220 LABEL "100 KHz"
2230 Freq$="100 KHz"
2240 END IF
2250 N=N-1
2260 MOVE V(N),Capp(N)
2270 !
2280 FOR I=V2 TO V1 STEP X
2290 OUTPUT 717;"BI";VAL$(I);"E";"--01V";
2300 WAIT 1
2310 ENTER 717;A,B
2320 PRINT .1*I,A,B

```

```

2330 V(N)=.1*I
2340 Capp(N)=A*(10^12)
2350 DRAW V(N),Capp(N)
2360 N=N+1
2370 NEXT I
2380 FOR I=V1 TO 0 STEP -X
2390 OUTPUT 717;"BI";VAL$(I);"E";"-01V";
2400 WAIT .5
2410 NEXT I
2420 BEEP
2430 GRAPHICS OFF
2440 PRINT "DO YOU WANT A PAPER PLOT <Y/N>?"
2450 INPUT Plot$
2460 PRINT CHR$(12)
2470 GRAPHICS ON
2480 IF Plot$="Y" THEN
2490 IF Frame$="N" THEN GOTO 2710
2500 CONTROL 9,3;9600
2510 OUTPUT 9;"IN;SP1;IP2500,750,9000,6259;"
2520 OUTPUT 9;"SC";W1;Wr;Wb;Wt
2530 OUTPUT 9;"PA";W1;Wb;"PD";Wr;Wb;Wr;Wt;W1;Wt;W1;Wb;"PU"
2540 OUTPUT 9;"SI .12,.23;L1.5,0"
2550 OUTPUT 9;"PA";Cal;Ylocx;"PD";Car;Ylocx;"PU"
2560 OUTPUT 9;"PA0,";Cab;"PDO";Cat;"PU"
2570 FOR I=Ylocx TO Cat STEP 50
2580 OUTPUT 9;"TL;PA0,",I,"YT;"
2590 OUTPUT 9;"CP-5,-.25;LB";I;CHR$(3)
2600 NEXT I
2610 OUTPUT 9;"CP-5,-5;DIO,1;LBCAPACITANCE (pF)";CHR$(3)
2620 FOR I=Cal TO Car STEP 1
2630 IF I MOD 5=0 THEN
2640 OUTPUT 9;"TL1,1;PA";I;Ylocx;"XT;"
2650 OUTPUT 9;"SI.15,.25;DI1,0;CP-1.5,-1;LB";I;CHR$(3)
2660 ELSE
2670 OUTPUT 9;"TL;PA";I;Ylocx;"XT;"
2680 END IF
2690 NEXT I
2700 OUTPUT 9;"CP-11,-1;LBVOLTAGE (V)";CHR$(3)
2710 OUTPUT 9;"PU";V(0),Capp(0)
2720 N=0
2730 FOR I=V1 TO V2 STEP X*(-1)
2740 OUTPUT 9;"PD";V(N),Capp(N)
2750 N=N+1
2760 NEXT I
2770 OUTPUT 9;"PU;CP1,0;LB";Freq$;CHR$(3)
2780 N=N-1
2790 OUTPUT 9;"PU";V(N),Capp(N)
2800 FOR I=V2 TO V1 STEP X
2810 OUTPUT 9;"PD";V(N),Capp(N)
2820 N=N+1
2830 NEXT I
2840 OUTPUT 9;"PU";
2850 END IF
2860 GOTO 1350
2870 OUTPUT 9;"IN";
2880 END

```

หนังสืออ้างอิง

1. S.M. Sze, "Physics of Semiconductor Devices", Wiley-Interscience 1969.
2. Jacob Millman, "Microelectronics", McGraw-Hill, 1979.
3. E.H. Nicollian, J.R. Brews, "MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology", John Wiley & Sons, 1982.
4. A.S. Grove, "Physics and Technology of Semiconductor Devices", John Wiley & Sons, 1967.