บทที่ 5

วิธีการวัดและวิเคราะห์ผลการทดลอง

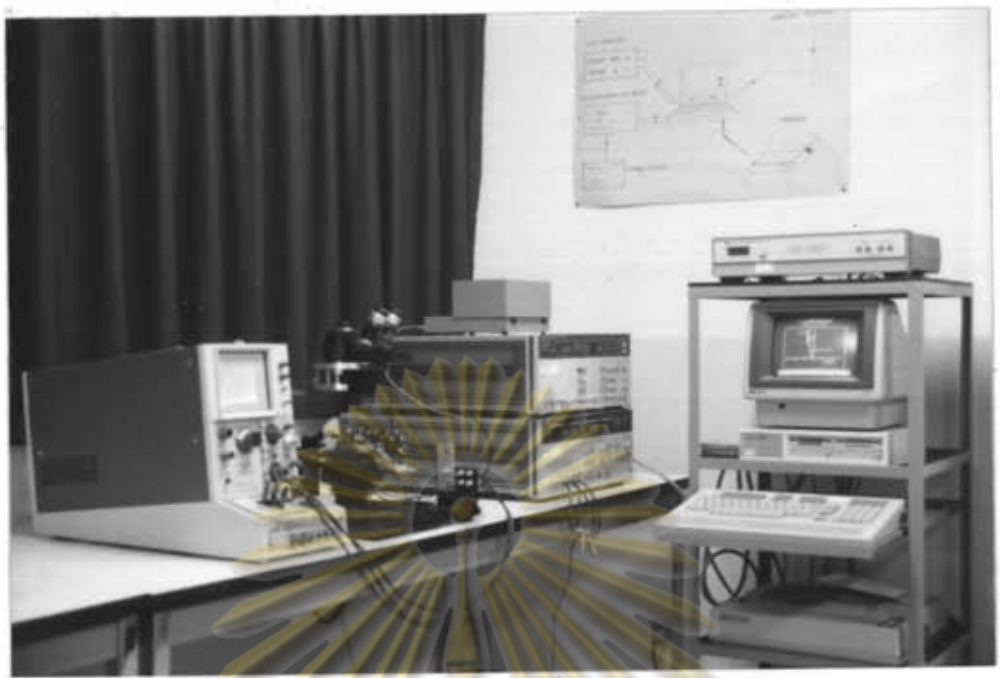
การศึกษากระบวนการผลิตตัวเก็บประจุมอสและทรานซิสเตอร์แบบมอส จำเป็นต้องศึกษาถึงคุณภาพของเกตออกไซด์ของตัวเก็บประจุมอส ชั้นแพร่ซึมของเดรนและซอร์สของทรานซิสเตอร์แบบมอส และสมบัติทางไฟฟ้าของตัวเก็บประจุมอสและทรานซิสเตอร์แบบมอสที่ผลิตขึ้นด้วยกระบวนการผลิตนี้ เพื่อนำผลที่ได้จากการศึกษาไปปรับปรุงกระบวนการผลิตให้ได้ตัวเก็บประจุมอสและทรานซิสเตอร์แบบมอสที่มีคุณภาพดีต่อไป

ในการศึกษาคุณภาพของเกตออกไซด์ ชั้นแพร่ซึมของเดรนและซอร์สของทรานซิสเตอร์แบบมอส ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวเก็บประจุมอส และแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนของทรานซิสเตอร์แบบมอลนั้น เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย Multi-frequency LCR meter รุ่น HP 4274A, DC picoammeter รุ่น HP 4140B, Probes station และไมโครคอมพิวเตอร์ รุ่น HP 9816S เครื่องมือเหล่านี้ติดต่อถึงกันโดยผ่าน HP-IB Interface bus (ยกเว้น Probes station) สำหรับการศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์แบบมอส และค่า Transconductance ของทรานซิสเตอร์แบบมอส เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย Curve tracer รุ่น TEK 577/177 และ Probes station ชุดเครื่องมือเหล่านี้แสดงดังในรูปที่ 5.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โปรแกรมซึ่งใช้ในการควบคุมการวัด การเก็บบันทึกข้อมูล การคำนวณวิเคราะห์ และการประมวลผลข้อมูล รวมทั้งการแสดงผลซึ่งต่อไปนี้จะเรียกย่อ ๆ ว่า โปรแกรมควบคุมฯ ถูกพัฒนามาจากภาษา BASIC บนเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ Hewlett-Packard โปรแกรมควบคุมฯจะแบ่งออกเป็น 5 ส่วนคือ

1. โปรแกรมการวัดลักษณะสมบัติของตัวเก็บประจุมอส
2. โปรแกรมเรียกข้อมูลที่เกี่ยวกับลักษณะสมบัติของตัวเก็บประจุมอสจากแผ่นดิสค์
3. โปรแกรมการวัดความต้านทานของตัวต้านทานแพร่ซึม (Diffused resistor)



รูปที่ 5.1 ชุดเครื่องมือวัด

4. โปรแกรมเรียกข้อมูลที่เกี่ยวกับความต้านทานของตัวต้านทานแพร่ซึมจากแผ่นดิสค์

5. โปรแกรมการวัดแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold voltage) ของทรานซิสเตอร์แบบมอส

โปรแกรมเหล่านี้ผู้ใช้สามารถเรียกใช้ได้โดยอัตโนมัติโดยผ่านโปรแกรม MENU รายละเอียดเกี่ยวกับโปรแกรมแต่ละโปรแกรม จะขอแยกกล่าวในหัวข้อการวัดและวิเคราะห์ผลการวัดของอุปกรณ์แต่ละชนิดดังต่อไปนี้

5.1 การวัดและวิเคราะห์ผลการวัดของตัวเก็บประจุมอส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เครื่องมือที่ใช้วัดตัวเก็บประจุมอสประกอบด้วย Multi-frequency LCR Meter รุ่น HP 4274A, Probes station และไมโครคอมพิวเตอร์ Hewlett-Packard การพัฒนาโปรแกรมควบคุมฯ เพื่อวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวเก็บประจุมอสนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมการทำงานของเครื่องมือวัดรุ่น HP 4274A ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีความสามารถและความยืดหยุ่นในการวัดสูงให้เป็นไปอย่างอัตโนมัติ สามารถแสดงผลที่ได้จากการวัด และเก็บข้อมูลที่ต้องการไว้ในแผ่นดิสค์เพื่อการเรียกกลับมาได้ในภายหลัง

5.1.1 การพัฒนาโปรแกรม

โครงสร้างของโปรแกรมการวัดลักษณะสมบัติของตัวเก็บประจุมอสประกอบด้วยโปรแกรมหลัก (Main program) ซึ่งทำหน้าที่เรียกโปรแกรมย่อยที่ต้องการมาใช้ และโปรแกรมย่อย (Subprogram) ทำหน้าที่ทำงานเฉพาะอย่าง แนวทางในการพัฒนาโปรแกรมการวัดลักษณะสมบัติของตัวเก็บประจุมอส มีดังต่อไปนี้

1. ตัดสินใจว่า ต้องการวัดลักษณะสมบัติของตัวเก็บประจุมอส หรือต้องการวิเคราะห์คุณภาพของตัวเก็บประจุมอส (เมื่อมีข้อมูลเกี่ยวกับตัวเก็บประจุมอสแล้ว)

2. เรียกโปรแกรมย่อยการกำหนดเงื่อนไขของการวัด (Setting condition subprogram) เป็นโปรแกรมย่อยที่ทำหน้าที่ให้ผู้ใช้เลือกช่วงของแรงดันไฟฟ้าซึ่งจะใช้ป้อนให้แก่ตัวเก็บประจุมอส และความถี่ของสัญญาณที่จะใช้ในการวัด รวมถึงเลือกว่าจะวัดค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้าของตัวเก็บประจุมอส หรือวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุมอสและค่า Dissipation factor ของชั้นออกไซด์

3. เรียกโปรแกรมย่อยการวัดลักษณะสมบัติแรงดัน-ความจุไฟฟ้า และแรงดัน-ความนำไฟฟ้าของตัวเก็บประจุมอส (C-V and G-V measurement subprogram) โปรแกรมย่อยนี้ทำหน้าที่เรียกโปรแกรมย่อยที่สำคัญต่อการวัดและการแสดงผลอันได้แก่

3.1 โปรแกรมย่อยการรับข้อมูลจากการวัด (Input data subprogram) ทำหน้าที่ควบคุมให้ HP 4274A ทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้าของตัวเก็บประจุมอสที่ความถี่ของสัญญาณซึ่งถูกเลือกไว้ เริ่มตั้งแต่ค่าแรงดันเริ่มแรกจะถึงค่าแรงดันสุดท้าย โดยเปลี่ยนขนาดของแรงดันไปทีละ 0.2 V และรอ 0.2 วินาที ก่อนที่จะเปลี่ยนค่าแต่ละครั้ง การวัดจะกระทำในทิศทางย้อนกลับจากค่าแรงดันสุดท้ายมายังค่าแรงดันเริ่มแรกในลักษณะเดียวกัน การวัดครั้งนี้เป็นการวัดเพื่อหาค่าสูงสุดและต่ำสุดของค่าความจุไฟฟ้าและค่านำไฟฟ้า และค่าแรงดันไฟฟ้าของค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดเหล่านั้น (เพื่อเป็นข้อมูลให้แก่โปรแกรมย่อยการกำหนดสเกลและวาดแกน x-y ต่อไป) เพื่อเก็บข้อมูลที่วัดได้แต่ละค่าของแรงดันไฟฟ้าไว้ในหน่วยความจำ (เพื่อเป็นข้อมูลให้แก่โปรแกรมย่อยการแสดงผล และโปรแกรมย่อยการบันทึกข้อมูลลงแผ่นดิสค์ต่อไป) และเพื่อตรวจดูลักษณะกราฟหลังจากแสดงผลแล้วว่ามี Hysteresis หรือไม่

3.2 โปรแกรมย่อยการกำหนดสเกลและวาดแกน x-y แบบเชิงเส้น (Scaling and drawing x-y axis in linear scale subprogram) ทำหน้าที่นำค่าสูง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุดและต่ำสุดของค่าความจุไฟฟ้าและค่าความนำไฟฟ้า และช่วงของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ มาคำนวณเพื่อวาดแกนและกำหนดสเกลแบบเชิงเส้นที่เหมาะสมบนแกน y และ x ตามลำดับ

3.3 โปรแกรมย่อยการแสดงผลแบบเชิงเส้น (Plot in linear scale subprogram) ทำหน้าที่นำข้อมูลของค่าความจุไฟฟ้า ค่าความนำไฟฟ้า และค่าแรงดันไฟฟ้าจากหน่วยความจำมาแสดงผลลงบนแกน x-y แบบเชิงเส้น และแสดงผลของลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน หรือความนำไฟฟ้า-แรงดันลงในกระดาษ เมื่อผู้ใช้ต้องการ

เนื่องจากต้องการความยืดหยุ่นให้ผู้ใช้สามารถเลือกดูกราฟที่ต้องการได้ จึงแยกโปรแกรมย่อยในหัวข้อ 3.2 และ 3.3 สำหรับแสดงผลลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน และความนำไฟฟ้า-แรงดันออกจากกัน

3.4 โปรแกรมย่อยการกำหนดสเกลและวาดแกน x-y แบบ Semi-log (Scaling and drawing x-y axis in semi-log scale subprogram) ทำหน้าที่นำค่าความนำไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุด และช่วงของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ มาคำนวณเพื่อวาดแกนและกำหนดสเกลแบบ Semi-log ที่เหมาะสมบนแกน y และ x ตามลำดับ

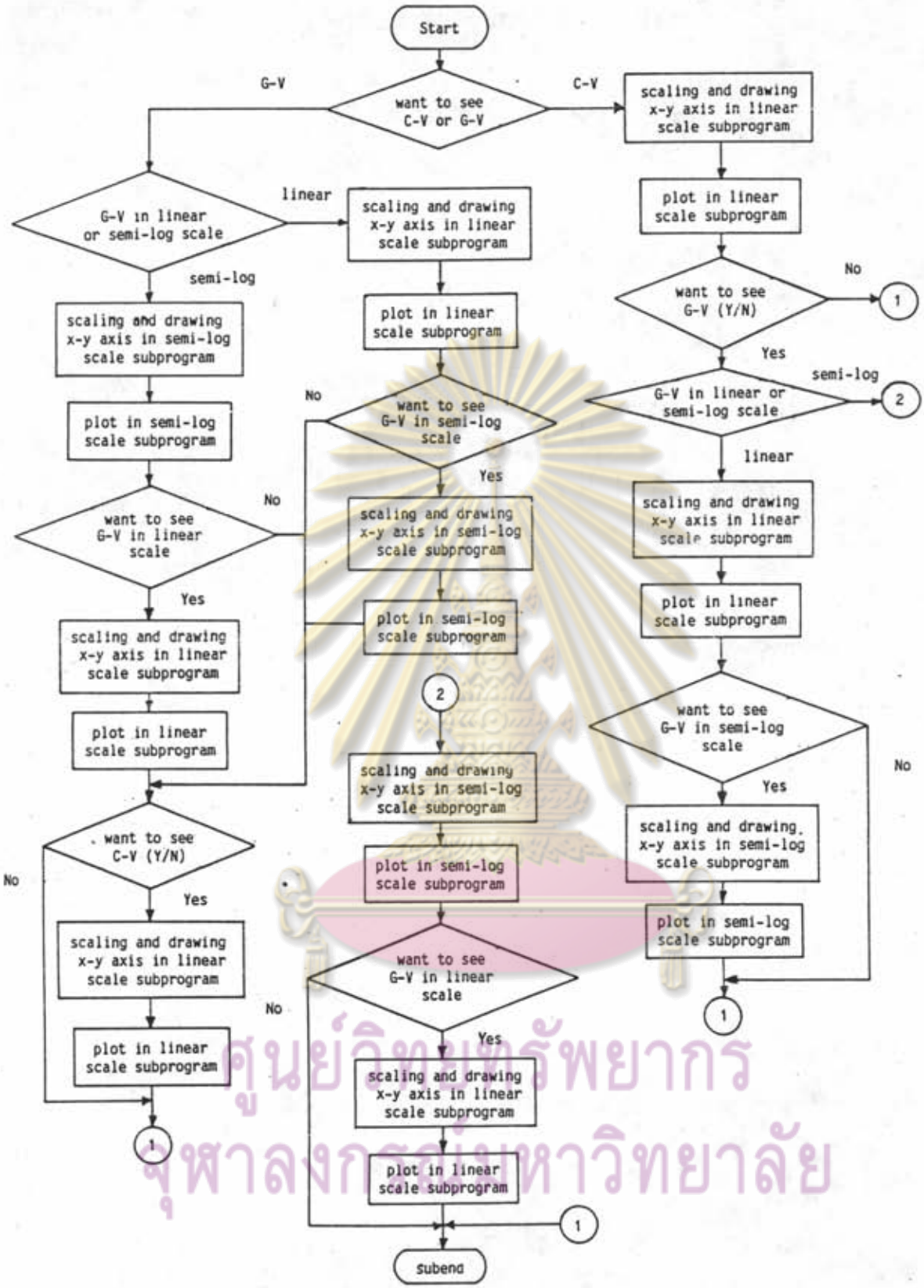
3.5 โปรแกรมย่อยการแสดงผลแบบ Semi-log (plot in semi-log scale subprogram) ทำหน้าที่นำค่าความนำไฟฟ้า และค่าแรงดันไฟฟ้าจากหน่วยความจำมาคำนวณ และแสดงผลบนแกน x-y แบบ Semi-log และแสดงผลของลักษณะสมบัติความนำไฟฟ้า-แรงดันนี้ลงในกระดาษ เมื่อผู้ใช้ต้องการ

ขั้นตอนต่าง ๆ ของโปรแกรมย่อยการวัดลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน และความนำไฟฟ้า-แรงดันในการเรียกโปรแกรมย่อยการวัดและแสดงผล แสดงดัง Flowchart ในรูปที่ 5.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. หลังจากได้เห็นลักษณะสมบัติของตัวเก็บประจุมอสแล้ว ผู้ใช้สามารถเลือกว่าต้องการเก็บข้อมูลของตัวเก็บประจุมอสนี้ลงแผ่นดิสค์หรือไม่

5. เรียกโปรแกรมย่อยการบันทึกข้อมูลลงบนแผ่นดิสค์ (Record data subprogram) เมื่อผู้ใช้ต้องการบันทึกข้อมูลลงบนแผ่นดิสค์ โปรแกรมย่อยนี้ทำหน้าที่บันทึกข้อมูล



รูปที่ 5.2 Flowchart ของโปรแกรมย่อยการวัดลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน และความนำไฟฟ้า-แรงดัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลงบนแผ่นดิสค์โดยผู้ใช้สามารถเลือก disk drive ที่ต้องการบันทึกข้อมูลได้

6. หลังจากวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวเก็บประจุมอสแล้ว ผู้ใช้สามารถเลือกว่าต้องการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการวัดหรือไม่

7. เรียกโปรแกรมย่อยการวิเคราะห์ผลของตัวเก็บประจุมอส (MOS capacitance analysis subprogram) เมื่อผู้ใช้ต้องการวิเคราะห์คุณภาพของตัวเก็บประจุมอส โปรแกรมย่อยนี้เป็นโปรแกรมที่นำข้อมูลที่ได้จากการวัดลักษณะสมบัติของตัวเก็บประจุมอส มาคำนวณเพื่อหาชนิดของแว่นผลึกที่ใช้ทำวัสดุฐานรอง ความหนาของเกตออกไซด์ ความเข้มข้นของสารเจือปนในวัสดุฐานรอง ความจุไฟฟ้าแถบราบ (Flat-band capacitance) ค่าแรงดันไฟฟ้าแถบราบ (Flat-band voltage) ความแตกต่างของฟังก์ชันงานระหว่างโลหะและวัสดุฐานรอง และหนาแน่นของ Interface states ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะแสดงให้เห็นถึงคุณภาพของเกตออกไซด์และตัวเก็บประจุมอสว่าเป็นอย่างไร

8. เมื่อวิเคราะห์ผลของการวัดแล้ว จะเรียกโปรแกรม MENU เพื่อเตรียมสำหรับการเลือกใช้โปรแกรมต่อไป

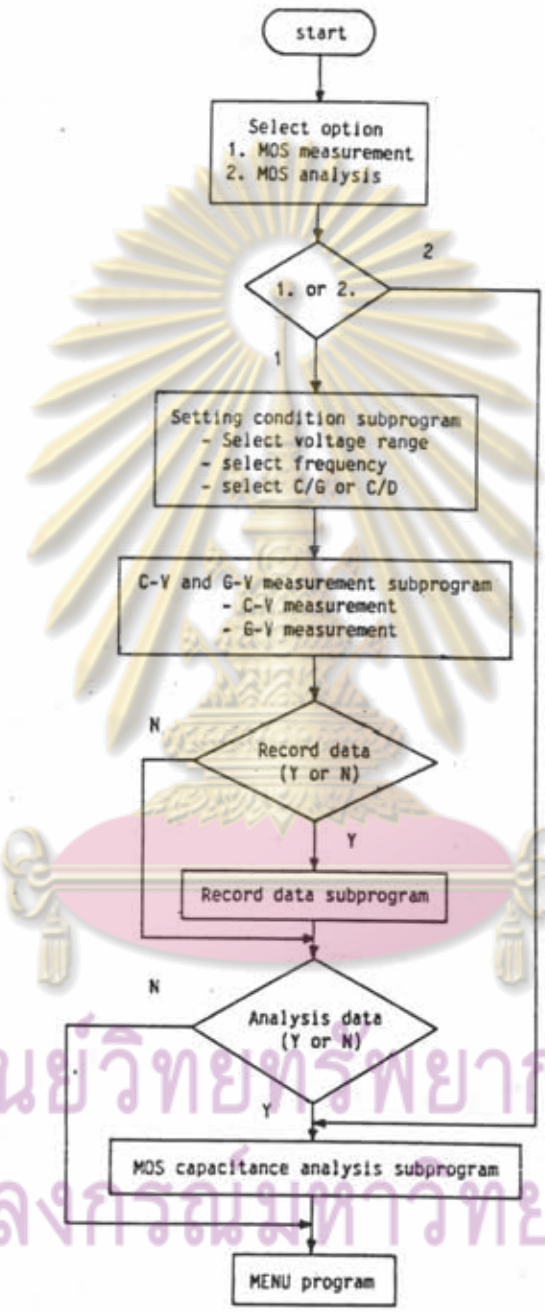
Flowchart ของโปรแกรมการวัดลักษณะสมบัติของตัวเก็บประจุมอส แสดงดังในรูปที่ 5.3

โปรแกรมเรียกข้อมูลที่เกี่ยวกับลักษณะสมบัติของตัวเก็บประจุมอสจากแผ่นดิสค์ ทำหน้าที่เรียกข้อมูลของตัวเก็บประจุมอสที่อยู่ในแผ่นดิสค์เมื่อผู้ใช้ต้องการ นำข้อมูลที่เรียกขึ้นมาดำเนินการตามขั้นตอนดังกล่าวข้างบนตั้งแต่ข้อ 3 ถึงข้อ 8 รายละเอียดการเขียนโค้ดภาษาเบสิกของโปรแกรมการวัดลักษณะสมบัติของตัวเก็บประจุมอสและโปรแกรมการเรียกข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะสมบัติของตัวเก็บประจุมอส แสดงไว้ในภาคผนวก ก.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.1.2 การวิเคราะห์ผลการวัดของตัวเก็บประจุมอส

การวิเคราะห์ผลการวัดของตัวเก็บประจุมอสนี้ เพื่อให้การวิเคราะห์เป็นไปอย่างถูกต้องและแม่นยำ ข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์ผลต้องเป็นข้อมูลที่ได้จากการวัดลักษณะของตัวเก็บประจุมอสในย่านความถี่สูง



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.3 Flowchart โปรแกรมการวัดลักษณะสมบัติของตัวเก็บประจุมอส

5.1.2.1 การหาชนิดของวัสดุฐานรองและความหนาของชั้นออกไซด์

การหาชนิดของวัสดุฐานรอง ใช้วิธีการเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุด (ซึ่งจะใช้อักษาย่อว่า V_{cmax} และ V_{cmin} ตามลำดับ) ในการวัดลักษณะสมบัติของตัวเก็บประจุมอสย่านความถี่สูง ถ้า V_{cmax} มีค่ามากกว่า V_{cmin} แสดงว่าชั้นอินเวอร์ชันเกิดขึ้นเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าลบให้แก่เกตของตัวเก็บประจุมอส (วัสดุฐานรองต่อลงกราวน์) ดังนั้นวัสดุฐานรองจึงเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด P ถ้า V_{cmax} มีค่าน้อยกว่า V_{cmin} แสดงว่าชั้นอินเวอร์ชันเกิดขึ้นเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าบวกให้แก่เกตของตัวเก็บประจุมอส ดังนั้นวัสดุฐานรองจึงเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n

ดังได้กล่าวแล้วในบทที่ 2 เกี่ยวกับลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวเก็บประจุมอสค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดของตัวเก็บประจุมอสจะตรงกับค่าความจุไฟฟ้าของซิลิกอน-ไดออกไซด์ (C_{ox}) ซึ่งมีค่าเป็น

$$C_{ox} = \frac{\varepsilon_{ox} A}{d_{ox}} \qquad (5.1)$$

โดยที่ ε_{ox} คือ ค่า permittivity ของซิลิกอนไดออกไซด์ (F/cm)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของเกต (cm^2)

d_{ox} คือ ความหนาของชั้นออกไซด์

ดังนั้นความหนาของชั้นออกไซด์จะสามารถหาได้จากสมการ

$$d_{ox} = \frac{\varepsilon_{ox} A}{C_{ox}} \qquad (5.2)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.1.2.2 การคำนวณหาค่าความเข้มข้นของสารเจือปนในวัสดุฐานรอง

ความเข้มข้นของสารเจือปนในวัสดุฐานรองสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.7)

$$W_m = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s \phi_s (inv)}{qN_A}} = \sqrt{\frac{4\varepsilon_s kT\ln(N_A/n_i)}{q^2 N_A}} \quad (5.3)$$

และ

$$C_{smin} = \frac{\varepsilon_s A}{W_m} \quad (5.4)$$

เมื่อหาค่า W_m จากสมการที่ (5.4) และแทนลงในสมการที่ (5.3) จะได้ว่า

$$N_A = \frac{4kT\ln(N_A/n_i)C_{smin}^2}{A^2 q^2 \varepsilon_s} \quad (5.5)$$

ค่า C_{smin} สามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\frac{1}{C_{min}} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_{smin}} \quad (5.6)$$

ดังนั้น

$$C_{smin} = \frac{C_{ox}\, C_{min}}{(C_{ox} - C_{min})} \quad (5.7)$$

โดยที่ ε_s คือ ค่า permittivity ของซิลิกอน

k คือ ค่า Boltzmann's constant

T คือ ค่า อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน

q คือ ค่า ประจุของอิเล็กตรอน

n_i คือ ค่า Intrinsic concentration (1.5×10^{10} cm^{-3})

N_A คือ ค่า ความเข้มข้นของสารเจือปนในวัสดุฐานรองที่ต้องการหา

W_m คือ ค่า ความกว้างสูงสุดของเขตปลอดพาหะ

การคำนวณค่า N_A คำนวณได้จากสมการที่ 5.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.1.2.3 การหาค่าความจุไฟฟ้าแถบราบ

ค่าความจุไฟฟ้าแถบราบของตัวเก็บประจุมอส (C_{FB}) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$C_{FB} = \frac{C_{ox}\, C_{FBS}}{(C_{ox} + C_{FBS})} \qquad (5.8)$$

$$C_{FBS} = \varepsilon_S / L_D \qquad (5.9)$$

$$L_D = \sqrt{\frac{kT\varepsilon_S}{N_A q^2}} \qquad (5.10)$$

ดังนั้น

$$C_{FBS} = \sqrt{\frac{N_A q^2 \varepsilon_S}{kT}} \qquad (5.11)$$

เมื่อคำนวณค่า C_{FBS} จากสมการที่ (5.11) ได้แล้ว นำไปแทนลงในสมการที่ (5.8) จะได้ค่าความจุไฟฟ้าแถบราบของตัวเก็บประจุมอส

5.1.2.4 การหาค่าแรงดันแถบราบ (V_{FB})

แรงดันแถบราบตรงกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับตัวเก็บประจุมอส แล้วทำให้มีค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับค่าความจุไฟฟ้าแถบราบ การหาค่าแรงดันแถบราบของตัวเก็บประจุมอสจึงต้องนำข้อมูลค่าความจุไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าในหน่วยความจำ ซึ่งได้จากการวัดลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า–แรงดันของตัวเก็บประจุมอส มาเปรียบเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าแถบราบ เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในหน่วยความจำ มีการเก็บข้อมูลเป็นแบบ Array ซึ่งเรียงลำดับตามค่าแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงจากค่าแรงดันเริ่มแรกถึงค่าแรงดันสุดท้าย (จะเรียกข้อมูลกลุ่มนี้ว่า ข้อมูลกลุ่มแรก) และจากค่าแรงดันสุดท้ายถึงแรงดันเริ่มแรก (จะเรียกข้อมูลกลุ่มนี้ว่าข้อมูลกลุ่มหลัง) ดังได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 5.1.1 การหาค่าแรงดันแถบราบจะแบ่งเป็นการหาค่าแรงดันแถบราบของข้อมูลกลุ่มแรก และของข้อมูลกลุ่มหลัง และนำค่าแรงดันแถบราบทั้งสองค่านี้มาหาค่าเฉลี่ยเพื่อหาค่าแรงดันแถบราบของตัวเก็บประจุมอส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การหาค่าแรงดันแถบราบจะเริ่มจากการเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มแรก C(1) กับค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากค่าแรงดันไฟฟ้าสุดท้าย C(I) ว่าค่าใดมีค่ามากกว่า (โดยที่ I คือตัวแปรที่เก็บลำดับที่ของข้อมูลที่ได้จากการป้อนแรงดันไฟฟ้าด้วยค่าแรงดันไฟฟ้าสุดท้าย) ค่าที่มากกว่าจะเป็นค่าความจุไฟฟ้าในย่าน Accumulation (ซึ่งเป็นค่าความจุไฟฟ้าที่สูงกว่าค่าความจุไฟฟ้าแถบราบและเป็นค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดของตัวเก็บประจุมอส) การเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าแต่ละค่าแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุมอสกับค่าความจุไฟฟ้าแถบราบ จะเริ่มจากค่าความจุไฟฟ้าในย่าน Accumulation จนพบค่าความจุไฟฟ้าที่น้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความจุไฟฟ้าแถบราบ ถ้าค่าความจุไฟฟ้าค่านั้นเท่ากับความจุไฟฟ้าแถบราบ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตรงกับค่าความจุไฟฟ้าค่านั้นจะเป็นค่าแรงดันแถบราบ ถ้าค่าความจุไฟฟ้าค่านั้นน้อยกว่าค่าความจุไฟฟ้าแถบราบ การหาค่าแรงดันแถบราบจะนำค่าความจุไฟฟ้าและค่าแรงดันไฟฟ้าในลำดับก่อนหน้าลำดับของค่าความจุไฟฟ้าค่านั้นหนึ่งลำดับ มาใช้คำนวณหาค่าแรงดันแถบราบด้วย โดยที่

$$V_{FB1} = V(X) \pm \frac{(C_{FB} - C(X))}{(C(X-1) - C(X))} |V(X-1) - V(X)| \qquad (5.12)$$

โดยที่ V_{FB1} คือ แรงดันแถบราบของข้อมูลกลุ่มแรก

C_{FB} คือ ค่าความจุไฟฟ้าแถบราบ

C(X) คือ ค่าความจุไฟฟ้าค่าแรกที่พบว่ามีค่าน้อยกว่าค่าความจุไฟฟ้าแถบราบ

V(X) คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนแก่ตัวเก็บประจุมอสที่ทำให้ได้ค่าความจุไฟฟ้า C(X)

C(X-1) คือ ค่าความจุไฟฟ้าลำดับก่อน C(X) ในการเปรียบเทียบนี้หนึ่งลำดับ

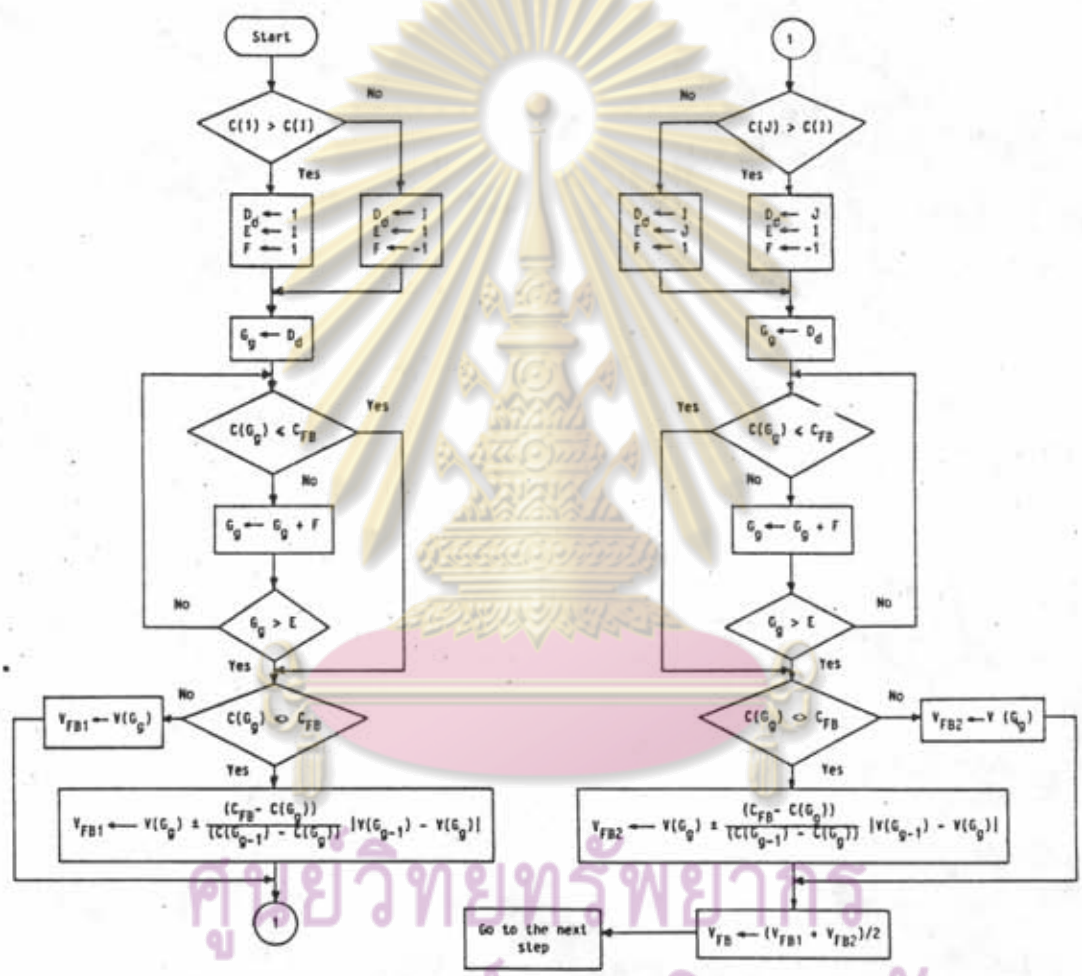
V(X-1) คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนแก่ตัวเก็บประจุมอสที่ทำให้ได้ค่าความจุไฟฟ้า C(X-1)

เครื่องหมาย ± หมายความว่า ถ้า V(x) > V(X-1) เครื่องหมายจะเป็นลบ ถ้า V(X) < V(X-1) เครื่องหมายจะเป็นบวก

ในการหาค่าแรงดันแถบราบของข้อมูลกลุ่มหลัง (V_{FB2}) จะกระทำเช่นเดียวกับการหาค่าแรงดันแถบราบของข้อมูลกลุ่มแรก แต่ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มแรกจะเป็น C(J) (โดยที่ J คือตัวแปรที่เก็บลำดับที่ของข้อมูลที่ได้จากการป้อนแรงดัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ไฟฟ้าด้วยค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มแรกของข้อมูลกลุ่มหลัง) ส่วนค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากค่าแรงดันไฟฟ้าสุดท้ายจะเป็น C(I) เหมือนเดิม Flowchart แสดงการหาค่าแรงดันแถบราบของตัวเก็บประจุแสดงดังในรูปที่ 5.4



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.4 Flowchart การหาค่าแรงดันแถบราบของตัวเก็บประจุมอส

5.1.2.5 การหาค่าความแตกต่างของฟังก์ชันงานและความหนาแน่นของ Interface state

ค่าความแตกต่างของฟังก์ชันงานระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

สำหรับวัสดุฐานรองที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n

$$W_{ms} = W_{fm} - (E_{afs} - \epsilon_g/2 - kT\ln(N_D/n_i)) \qquad (5.13)$$

สำหรับวัสดุฐานรองที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p

$$W_{ms} = W_{fm} - (E_{afs} - E_g/2 - kT\ln(n_i/N_A)) \qquad (5.14)$$

โดยที่ W_{ms} คือ ค่าความแตกต่างของฟังก์ชันงานระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ

W_{fm} คือ ค่าฟังก์ชันงานของโลหะ

E_{afs} คือ ค่า Electron affinity ของซิลิกอน

E_g คือ ช่องว่างแถบพลังงานของซิลิกอน

N_A คือ ความเข้มข้นของสารเจือปนชนิด p

N_D คือ ความเข้มข้นของสารเจือปนชนิด n

ศูนย์วิทยทรัพยากร

การหาค่าความหนาแน่นของ Interface state หาได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.13) (4) (โดย $\psi_{ms} = W_{ms}$)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$V_{FB} = W_{ms} + \frac{Q_{ss}}{C'_{ox}} \qquad (5.15)$$

ดังนั้นจะได้ว่า $$Q_{ss} = (V_{FB} - W_{ms})C'_{ox} \quad \text{Coulomb/cm}^2 \qquad (5.16)$$

หรือ $$Q_{ss} = \frac{(V_{FB} - W_{ms})C'_{ox}}{q} \quad cm^{-2} \qquad (5.17)$$

โดยที่ Q_{ss} คือ ความหนาแน่นของ Interface state

C'_{ox} คือ ค่าความจุไฟฟ้าของซิลิกอนไดออกไซด์ต่อหน่วยพื้นที่

5.2 การวัดและวิเคราะห์ผลของชั้นแพร่ซึม

ชั้นแพร่ซึมเดรนและซอร์สของทรานซิสเตอร์แบบมอส เป็นชั้นแพร่ซึมชนิด n^+ สำหรับทรานซิสเตอร์แบบมอสชนิด n การวิเคราะห์คุณภาพของชั้นแพร่ซึมเดรนและซอร์สนี้ ทำโดยการสร้างตัวต้านทานแพร่ซึม (Diffused resistor) ซึ่งมีเงื่อนไขในการแพร่ซึมต่าง ๆ เช่นเดียวกับเดรนและซอร์ส และวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานนี้เพื่อตรวจดูคุณภาพของชั้นแพร่ซึม แว่นผลึกที่ใช้สร้างตัวเก็บประจุมอส ตัวต้านทานแพร่ซึม และทรานซิสเตอร์แบบมอสเป็นแว่นผลึกชนิดพี มีค่าความต้านทานจำเพาะ (ρ) ประมาณ 20 Ω-cm ($N_a \simeq 10^{15}$ cm^{-3}) ความเข้มข้นของสารเจือปนที่ผิวของชั้น n^+ จะมีค่าเท่ากับค่า Solid Solubility ของสารเจือปนนั้นในซิลิกอน ในที่นี้สารเจือปนเป็นฟอสฟอรัสดังนั้นความเข้มข้มของสารเจือปนที่ผิวของชั้น n^+ จะมีค่าเป็น 4.0×10^{20} cm^{-3} ตัวต้านทานแพร่ซึมที่สร้างขึ้นเพื่อศึกษาและวิเคราะห์ชั้นแพร่ซึมมีขนาดกว้าง (W) 50 µm ยาว (L) 500 µm ดังแสดงในรูปที่ 5.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.5 ตัวต้านทานแพร่ซึม

พารามิเตอร์ที่สำคัญของชั้นแพร่ซึมได้แก่ ความเข้มข้นของสารเจือปนที่ผิว (N_s) และความลึกของหัวต่อ (Junction depth, x_j) ในกรณีของชั้น n^+ ดังได้กล่าวแล้วข้างต้น ความเข้มข้นของสารเจือปนที่ผิวจะมีค่าเป็น 4.0×10^{20} cm^{-3} และชั้นแพร่ซึมที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นเดรนและซอร์สต้องการให้มีความลึกของหัวต่อประมาณ 1.0 μm จากค่าความเข้มข้นของสารเจือปนที่ผิวสามารถหาค่า Average conductivity (σ) ได้โดยอาศัย Irvin's curves ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารเจือปนที่ผิว และค่า Average conductivity โดยมีอัตราส่วน x/x_j เป็นพารามิเตอร์ จาก Irvin's curves ที่ความเข้มข้นของสารเจือปนที่ผิว 4.0×10^{20} cm^{-3} อัตราส่วน $x/x_j = 0$ จะได้ค่า Average conductivity (σ) = 8.8×10^{2} $(\Omega\ cm)^{-1}$ (45) จากค่า σ จะสามารถหาค่า Sheet resistance (ρ_s) ได้จากความสัมพันธ์

$$\rho_s = \frac{1}{\bar{\sigma}x_j} \qquad (5.18)$$

เมื่อ $\sigma = 8.8\times10^{2}$ $(\Omega\text{-cm})^{-1}$ และ $x_j = 1.0\times10^{-4}$ cm ดังนั้น ρ_s จะมีค่าเป็น 11.4 Ω/cm^2 จากค่า ρ_s ของชั้นแพร่ซึมซึ่งมีค่า $N_s = 4.0\times10^{20}$ cm^{-3} และ x_j = 1.0 μm จะหาค่าความต้านทานของตัวต้านทานแพร่ซึมได้จากความสัมพันธ์

$$R = \frac{\rho_s L}{W} \qquad (5.19)$$

$$= \frac{11.4\times500\times10^{-6}}{50\times10^{-6}}$$

$$= 114 \quad \Omega$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดังนั้นชั้นแพร่ซึมเดรนและซอร์สซึ่งเป็นชั้น n^+ ที่ต้องการให้มีค่าความเข้มข้นของสารเจือปนที่ผิวประมาณ 4.0×10^{20} cm^{-3} ความลึกของหัวต่อประมาณ 1.0 μm จะสามารถตรวจสอบคุณภาพของชั้นแพร่ซึมได้ด้วยการวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานแพร่ซึม ซึ่งถูกสร้างขึ้นพร้อมกับชั้นแพร่ซึมเดรนและซอร์ส โดยความต้านทานของตัวต้านทานแพร่ซึมนี้จะมีค่าประมาณ 114 Ω

การวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานแพร่ซิมเพื่อวิเคราะห์คุณภาพของชั้นแพร่ซิม เครื่องมือที่ใช้ประกอบด้วย DC pA meter รุ่น HP 4140B, Probes station และไมโครคอมพิวเตอร์ Hewlett Packard สาเหตุที่ต้องใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ในการวัดค่าความต้านทานนี้ เนื่องจากตัวต้านทานที่ผลิตขึ้นมีเป็นจำนวนมาก การพัฒนาโปรแกรมขึ้นมาเพื่อวัดค่าความต้านทานและเก็บข้อมูลลงบนแผ่นดิสค์จะเป็นการสะดวกและรวดเร็วในการวัด รายละเอียดการเขียนโค๊ดภาษาเบสิกแสดงไว้ในภาคผนวก ก.

5.3 การวัดและวิเคราะห์ผลของทรานซิสเตอร์แบบมอส

ทรานซิสเตอร์แบบมอสที่ผลิตขึ้นเป็นทรานซิสเตอร์แบบ 4 ขั้ว พารามิเตอร์ที่สำคัญของทรานซิสเตอร์แบบมอส ได้แก่ ค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold voltage, V_{TH}) และค่า Transconductance (g_m) เครื่องมือวัดค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน ประกอบด้วย DC pA meter รุ่น HP 4140B, Probes station และไมโครคอมพิวเตอร์ Hewlett Packard การวัดลักษณะสมบัติขาออกของทรานซิสเตอร์แบบมอส และค่า Transconductance เครื่องมือที่ใช้ได้แก่ Curve tracer รุ่น TEK 577/177 และ Probes station

การวัดค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน ทำโดยป้อนแรงดันไฟฟ้าให้แก่เดรนด้วยค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่ในย่านอิ่มตัว ($V_D > V_{D,sat}$) เทียบกับซอร์ส แรงดันไบอัสเกต (เทียบกับซอร์ส) จะเปลี่ยนค่าตั้งแต่ค่าแรงดันต่ำ ๆ (อาจเป็นแรงดันลบในกรณีที่ทรานซิสเตอร์แบบมอสมีช่องนำไฟฟ้าอยู่แล้ว) จนกระทั่งกระแสเดรนมีค่า 10 μA ค่าแรงดันเกตค่านี้จะเรียกว่า V_{10} เพิ่มค่าแรงดันเกตต่อไปจนกระทั่งกระแสเดรนมีค่า 40 μA ค่าแรงดันเกตค่านี้จะเรียกว่า V_{40} ในขณะที่ป้อนแรงดันไบอัสให้กับทรานซิสเตอร์แบบมอสนี้ วัสดุฐานรองจะถูกลัดวงจรกับซอร์สเพื่อกำจัดผลของ Back-gate bias ค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนจะหาได้จากความสัมพันธ์

$$V_{TH} = 2V_{10} - V_{40} \qquad (5.20)$$

ความสัมพันธ์ในสมการที่ (5.20) ได้มาจากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันเกตในย่านอิ่มตัวในสมการที่ (3.23)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$I_{DS} = \frac{\beta}{2}(V_{GS} - V_{TH})^2 \qquad (5.21)$$

เมื่อกำหนดให้ I_D เป็นกระแส I_{DS} ที่มีค่า 10 μA เมื่อป้อนแรงดันเกตด้วยค่าแรงดันไฟฟ้า V_{10} จะได้ว่า

$$I_D = \frac{\beta}{2}(V_{10} - V_{TH})^2 \qquad (5.22)$$

เมื่อเพิ่มแรงดันเกตเป็น V_{40} กระแสเดรนที่ไหลจะมีค่าเป็น 40 μA หรือ 4 I_D ซึ่งจะได้ว่า

$$4I_D = \frac{\beta}{2}(V_{40} - V_{TH})^2 \qquad (5.23)$$

นำสมการที่ (5.22) หารด้วยสมการที่ (5.21) และหารากกำลังที่สองทั้งสองข้างจะได้

$$2 = \frac{(V_{40} - V_{TH})}{(V_{10} - V_{TH})}$$

ดังนั้นจะได้ $$V_{TH} = 2V_{10} - V_{40}$$

จากหลักการในการวัดค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนดังกล่าว จึงเหมาะอย่างยิ่งที่จะใช้ HP 4140B ซึ่งเป็น Picoammeter ที่มีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถควบคุมลักษณะของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ทรานซิสเตอร์แบบมอสได้ตามต้องการ 2 ชุด ในการวัดค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนนี้ค่า V_{10} และ V_{40} อาจจะเป็นค่าแรงดันที่ทำให้กระแสเดรนมีค่าอื่นที่ไม่ใช่ 10 μA และ 40 μA ตามลำดับก็ได้ แต่ค่ากระแสเดรนทั้งสองค่าต้องมีค่ามากกว่ากัน 4 เท่าเสมอ รายละเอียดการเขียนโค๊ดภาษาเบสิกสำหรับการหาค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนแสดงไว้ในภาคผนวก ก.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การหาค่า Transconductance ของทรานซิสเตอร์แบบมอสจะหาได้จากลักษณะสมบัติขาออกของทรานซิสเตอร์แบบมอสในย่านอิ่มตัว ซึ่งทำการวัดด้วย Curve Tracer รุ่น TEK 577/177 โดยที่

$$g_m = \frac{\Delta I_{DS}}{\Delta V_{GS}} \qquad (5.24)$$

การวัดลักษณะสมบัติของทรานซิสเตอร์แบบมอสนี้วัสดุฐานรองจะถูกลัดวงจรเข้ากับซอร์ส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย