ระบบ ซี-วี ควบคุมโดยคอมพิวเตอร์
สำหรับศึกษาสมบัติของรอยต่อกึ่งตัวนำ

นายวิชิต ศิริโชติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2531

ISBN 974-569-433-9

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

014461

Computerized C-V System

for Characterizing Semiconductor Junction

Mr. Wichit Sirichote

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science

Department of Physics

Graduate School

Chulalongkorn University

1988

ISBN 974-569-433-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบ ซี-วี ควบคุมโดยคอมพิวเตอร์สำหรับศึกษาสมบัติของรอยต่อกึ่งตัวนำ
โดย	นายวิชิต ศิริโชติ
ภาควิชา	ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงศ์ ฉัตราภรณ์
	อาจารย์ ดร.ขจรยศ อยู่ดี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ ดร.ถาวร วัชราภัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ภิยโย ปันยารชุน)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.อภิสิทธิ์ อึ้งกิจจานุกิจ)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิรณันต์ รัตนธรรมพันธ์)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงศ์ ฉัตราภรณ์)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ขจรยศ อยู่ดี)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

วิฮิต ศิริโชติ : ระบบ ซี-วี ควบคุมโดยคอมพิวเตอร์สำหรับศึกษาสมบัติของรอยต่อกึ่งตัวนำ
(COMPUTERIZED C-V SYSTEM FOR CHARACTERIZING SEMICONDUCTOR JUNCTION)
อ. ที่ปรึกษา : ผศ. สมพงศ์ จิตราภรณ์ และ อ.ดร. ยงยุทธ อยู่ดี, 109 หน้า.

ในงานวิจัยนี้ได้สร้างระบบ ซี-วี ควบคุมโดยคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการศึกษาการวัดความสัมพันธ์ ความจุ-แรงดันไฟฟ้า ของโครงสร้าง MIS ระบบที่สร้างขึ้นเป็นการเชื่อมต่อเครื่องวัดค่าความจุไฟฟ้า (Boonton 72A), เครื่องจ่ายไฟตรงแบบโปรแกรมได้ (Kepco ABC 425M) และเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์แอปเปิลทู โดยสร้างส่วนอินเตอร์เฟสขึ้นมาเพื่อให้เป็นระบบเก็บบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ นอกจากนี้ยังได้สร้างเครื่องวัดคาบเวลาเมื่อใช้ร่วมกับระบบ ซี-วี จะทำให้สามารถวัดลักษณะความจุไฟฟ้า-เวลาของโครงสร้าง MIS ได้อีกด้วย จากข้อมูล ความจุ-แรงดันไฟฟ้าและความจุไฟฟ้า-เวลา เราสามารถหาปริมาณบ่งชี้ทางไฟฟ้า ได้แก่ ชนิดของพาหะข้างมาก, ปริมาณความเข้มข้นสารเจือปน, โปรไฟล์สารเจือปนและช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อย การทดสอบการทำงานของระบบ ซี-วี กระทำโดยการทดลองใช้วัดตัวอย่างมาตรฐาน (อุปกรณ์ MOS มีโครงสร้างเป็นแบบ Al-SiO_2-Si) พบว่าค่าที่วัดได้จากระบบ ซี-วี มีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลของตัวอย่างมาตรฐาน

ภาควิชา ฟิสิกส์ ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2531 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา สมพงศ์ จิตราภรณ์

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

WICHIT SIRICHOTE : COMPUTERIZED C-V SYSTEM FOR CHARACTERIZING SEMICONDUCTOR JUNCTION. THESIS ADVISORS : ASST. PROF. SOMPHONG CHATRAPHORN AND DR. KAJORNYOD YOODEE. 109 pp.

In this research we have constructed a Computerized C-V system for the measurement of capacitance-voltage relation of MIS structure. The system combines a capacitance meter (Boonton 72A), a programmable power supply (Kepco ABC 425M) and an Apple II microcomputer with a home made interfacing unit, designed for the job as an automatic data acquisition system. In addition, with another home made time interval counter unit, the system can also be used for capacitance-time characteristic measurement of the device. From C-V and C-t data, electrical properties, i.e., conductivity type, carrier concentration, doping profile and minority carrier lifetime can be deduced. The C-V system was tested by standard samples (i.e. Al-SiO_2-Si MOS device). Results of the measurement and the known parameters are in good agreement.

ภาควิชา ฟิสิกส์ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2531 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงศ์ ฉัตราภรณ์ และ อ.ดร. ขจรยศ อยู่ดี ที่ได้ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ในระหว่างการศึกษา และการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.วิรุฬห์ สายคณิต รองศาสตราจารย์ จงอร พีรานนท์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชิต ศรีตระกูล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิรณันต์ รัตนธรรมพันธ์ และคณะผู้วิจัย หน่วยวิจัยฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ ในการให้คำแนะนำและช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ แก่ผู้เขียนโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ดร.วิโรจน์ ตันตราภรณ์ ในการให้แนวความคิดเริ่มต้นในการทำวิจัยและมอบอุปกรณ์จำนวนหนึ่งใช้ในงานวิจัย

อนึ่ง งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนา สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จึงใคร่ขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

กราบขอบพระคุณพ่อและแม่ที่ได้ช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านมาโดยตลอด และให้กำลังใจแก่ผู้เขียนจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญรูป..... ญ

บทที่ 1 บทนำ..... 1

บทที่ 2 โครงสร้าง MIS 4

2.1 โครงสร้าง MIS ในอุดมคติ..... 4

2.1.1 บริเวณปลอดพาหะที่ผิวหน้า..... 7

2.1.2 ลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้า..... 14

2.1.3 ผลของความถี่..... 18

2.2 การเบี่ยงเบนไปจากโครงสร้าง MIS ในอุดมคติ..... 20

2.2.1 ผลจากความแตกต่างค่าเวอร์คฟังชั่น..... 20

2.2.2 ผลจากประจุไฟฟ้าในชั้นฉนวน..... 22

2.2.3 ผลจากสถานะผิว..... 25

บทที่ 3 การวัดสมบัติบ่งชี้ทางไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS ด้วยวิธี
การวัดลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้า..... 27

3.1 ชนิดของพาหะข้างมาก..... 27

3.2 ปริมาณความเข้มข้นสารเจือปน..... 28

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3 โปรไฟล์สารเจือปน..... 32
3.4 ช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อย..... 35

บทที่ 4 ระบบ ซี-วี..... 40
4.1 เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์แอปเปิลทู..... 43
4.2 เครื่องวัดค่าความจุไฟฟ้า Boonton 72A..... 45
4.3 เครื่องจ่ายไฟตรงแบบโปรแกรมได้ Kepco ABC 425M..... 46
4.4 ส่วนอินเตอร์เฟสกับระบบไมโครคอมพิวเตอร์..... 49
4.4.1 วงจรกำเนิดแรงดันไฟตรงเพื่อใช้โปรแกรม เอาท์พุทของเครื่อง Kepco..... 50
4.4.2 วงจรอ่านค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันไบแอส..... 52
4.4.3 วงจรเลือกช่วงการวัดค่าความจุไฟฟ้า..... 55
4.4.4 วงจรวัดคาบเวลา..... 57
4.4.5 ภาคจ่ายไฟตรงให้กับวงจรแปลงข้อมูล..... 60
4.5 ขั้นตอนการทำงานของระบบ ซี-วี..... 61
4.5.1 การเก็บบันทึกข้อมูล ความจุ-แรงดันไฟฟ้า..... 61
4.5.2 การเก็บบันทึกข้อมูล ความจุไฟฟ้า-เวลา..... 61
4.6 โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการเก็บข้อมูล และวิเคราะห์ผล.... 63
4.6.1 โปรแกรม CVMASTER++++..... 64
4.6.2 โปรแกรม ND-PROFILE..... 69
4.6.3 โปรแกรม TRANSIENT2..... 70
4.6.4 โปรแกรม CVANALYSIS..... 71

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.7 การทดสอบกับตัวอย่างมาตรฐานและโครงสร้าง MIS ที่มี $CuInSe_2$ เป็นฐานรองรับ..... 72

บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผล..... 81

ภาคผนวก 89

ประวัติผู้เขียน 109

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้าง MIS	5
2.2	ไดอะแกรมแถบพลังงานของโครงสร้าง MIS ในอุดมคติ.....	7
	ก. สารกึ่งตัวนำเป็นชนิดเอ็น	
	ข. สารกึ่งตัวนำเป็นชนิดพี	
2.3	ไดอะแกรมแถบพลังงานและการกระจายประจุของโครงสร้าง MIS ที่เงื่อนไขการไบแอสต่าง ๆ กัน.....	8
2.4	การกระจายของศักย์ไฟฟ้าภายในบริเวณชั้นปลอดพาหะ.....	11
2.5	ไดอะแกรมแถบพลังงานเมื่อเริ่มเกิดชั้นอินเวอร์ชั่นอย่างรุนแรง.....	13
2.6	กราฟแสดงความกว้างมากที่สุดของชั้นปลอดพาหะมีค่าขึ้นกับความเข้มข้นสารเจือปน.....	13
2.7	โครงสร้าง MIS เมื่อไบแอสอยู่ในเงื่อนไขแอคคิวมูเลชั่น.....	16
2.8	ลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS	17
2.9	แรงดันไบแอสโครงสร้าง MIS	18
2.10	ผลของความถี่ต่อกราฟลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้า.....	19
2.11	ผลของความแตกต่างค่าเวอร์คฟังชั่น.....	21
	ก. เมื่อ $V_G = 0$	
	ข. เมื่อ $V_G = V_{FB}$	
2.12	ผลของ V_{FB} มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ถ้า V_{FB} เป็นบวก กราฟจะเลื่อนไปทางขวามือ ถ้า V_{FB} เป็นลบ กราฟจะเลื่อนมาทางซ้ายมือ.....	21

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.13	ผลจากประจุไฟฟ้าในชั้นฉนวน.....	23
	ก. เมื่อ $V_G = 0$	
	ข. เมื่อ $V_G = V_{FB}$	
2.14	ผลจากประจุไฟฟ้ามีการกระจายของประจุเป็น $\rho(x)$	23
2.15	ผลเนื่องจากประจุในชั้นฉนวน และ $\phi_{MS} \neq 0$	24
2.16	การโค้งของแถบพลังงานเมื่อไบแอสในเงื่อนไขต่าง ๆ โดยมีสถานะผิวอยู่บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ.....	26
	ก. เงื่อนไขแอคคิวมูเลชั่น.....	
	ข. เงื่อนไขอินเวอร์ชั่น.....	
2.17	ผลเนื่องจากสถานะผิวรวดเร็ว.....	26
3.1	กราฟลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้าที่ความถี่สูงของโครงสร้าง MIS....	28
	ก. ชนิดเอ็น	
	ข. ชนิดพี	
3.2	ตัวอย่างกราฟความจุ-แรงดันไฟฟ้าที่ความถี่สูงและการหาค่า $C_{SC\ (min)}$.....	30
3.3	การกระจายของประจุ, สนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าของรอยต่อชนิดเป็นขั้นข้างเดียว.....	33
3.4	การหดตัวของชั้นปลอดพาหะเมื่อชั้นอินเวอร์ชั่นสร้างขึ้น.....	36
3.5	การวัดลักษณะความจุไฟฟ้า-เวลา.....	38
	ก. แรงดันไบแอส	
	ข. กราฟความจุ-แรงดันไฟฟ้า	
	ค. กราฟความจุไฟฟ้า-เวลา	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.6	รูปกราฟที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ 3.18 เมื่อ $C_o = 0.1$ และ $C_{min} = 0.5$	38
3.7	ตัวอย่างการคำนวณ T จากกราฟ	38
4.1	ไดอะแกรมส่วนประกอบของระบบ ซี-วี	41
4.2	ระบบ ซี-วี ที่ได้สร้างเสร็จแล้ว	42
4.3	โครงสร้างเครื่องแอปเปิลทู	44
4.4	ก. แสดงการเชื่อมต่อกับอินพุทและเอาท์พุทพอท	44
	ข. การจัดขาขั้วต่อขยายระบบ	44
4.5	วงจรย่นย่อเครื่องวัดความจุไฟฟ้า Boonton 72A	45
4.6	เครื่องจ่ายไฟตรงแบบโปรแกรมได้ Kepco ABC 425M	47
4.7	การเชื่อมต่อเพื่อโปรแกรมแรงดันไฟตรงเอาท์พุทของเครื่อง Kepco ABC 425M	48
4.8	ไดอะแกรมของส่วนอินเตอร์เฟส	50
4.9	เอาท์พุทของวงจรแปลงข้อมูลดิจิตอลเป็นอนาลอกขนาด 8 บิท	51
4.10	วงจรกำเนิดแรงดันไฟตรงเพื่อใช้โปรแกรมเอาท์พุทเครื่อง Kepco	52
4.11	วงจรอ่านค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันไบแอส	54
4.12	แสดงขั้วต่อด้านหลังของเครื่อง Boonton 72A ที่ใช้โปรแกรมช่วงการวัดค่าความจุไฟฟ้า	55
4.13	วงจรเลือกช่วงการวัดค่าความจุไฟฟ้า	56
4.14	หลักการวงจรวัดคาบเวลา	57
4.15	วงจรวัดคาบเวลา	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.16	ภาคจ่ายไฟตรงให้กับวงจรแปลงข้อมูล.....	60
4.17	ขั้นตอนการทำงานของระบบ ซี-วี.....	62
4.18	ลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง MOS มี Si เป็นฐานรอง.....	73
4.19	ลักษณะความจุไฟฟ้า-เวลา ของโครงสร้างแบบ MOS เป็นฐานรองจากกราฟคำนวณช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อยได้เท่ากับ 54 μs.	74
4.20	โปรไฟล์สารเจือปนของซิลิคอนไดโอด เบอร์ 1N5401.....	75
4.21	ตัวอย่างโปรไฟล์สารเจือปนของรอยต่อ $In/CuInSe_2$.....	76
4.22	ลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้าของตัวอย่างโครงสร้าง MIS. มี GaAs ชนิดเอ็นเป็นแผ่นรองรับคำนวณความเข้มข้นสารเจือปนได้เท่ากับ 3.8×10^{18} cm^{-3}.....	77
4.23	ลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้าของตัวอย่างโครงสร้าง MIS มี $CuInSe_2$ ชนิดเอ็นเป็นแผ่นรองรับ คำนวณความเข้มข้นสารเจือปนได้เท่ากับ 4.8×10^{18} cm^{-3}.....	78
4.24	ลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้าของตัวอย่างโครงสร้าง MIS มี $CuInSe_2$ ชนิดพีเป็นแผ่นรองรับ คำนวณความเข้มข้นสารเจือปนได้เท่ากับ 1.0×10^{16} cm^{-3}.....	79
4.25	ลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้าของตัวอย่างโครงสร้าง MIS มี $CuInSe_2$ ชนิดพีเป็นแผ่นรองรับ คำนวณความเข้มข้นสารเจือปนได้เท่ากับ 5.7×10^{15} cm^{-3}.....	80