

โปรแกรมจำลองการทำงานไดโอดรอยต่อพีเอ็นแบบ 1 มิติ และ 2 มิติ
SIMULATION PROGRAM OF PN JUNCTION DIODE
IN ONE AND TWO DIMENSIONAL



โดย
นาย อนุชา ประทุมวิง

เลขหน้.....
เลขทะเบียน...46212
วัน, เดือน, ปี 2 1 ส.ค. 2546

.b.....
.i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมจำลองการทำงานไดโอดรอยต่อพีเอ็นแบบ 1 มิติ และ 2 มิติ
SIMULATION PROGRAM OF PN JUNCTION DIODE
IN ONE AND TWO DIMENSIONAL



ปริญญานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ ปีการศึกษา 2544

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง โปรแกรมจำลองการทำงาน ไดโอดรอยต่อพีเอ็นแบบ 1 มิติ และ 2 มิติ

SIMULATION PROGRAM OF PN JUNCTION DIODE IN ONE AND TWO
DIMENSIONAL

ผู้จัดทำ

นายอนุชา ประทุมวิง รหัสนักศึกษา 42515756



อาจารย์ที่ปรึกษา

(น.ดร. เต็มยศ เต็มวง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมจำลองการทำงานไดโอดรอยต่อพีเอ็นแบบ 1 มิติ และ 2 มิติ

SIMULATION PROGRAM OF PN JUNCTION DIODE IN ONE AND TWO DIMENSIONAL

ผู้จัดทำ

นายอนุชา ประทุมวิง รหัสนักศึกษา 42515756

โครงการได้รับการตรวจสอบแล้ว พร้อมที่จะทำการสอบได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมจำลองการทำงานไดโอดรอยต่อพีเอ็นแบบ 1 มิติ และ 2 มิติ

นาย อนุชา ประทุมวิง

ผศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล(อาจารย์ที่ปรึกษา)

ปีการศึกษา: 2544

บทคัดย่อ

สารกึ่งตัวนำมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่น่าสนใจ จึงได้ถูกนำมาผลิตเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ โดยเฉพาะรอยต่อของสารกึ่งตัวนำชนิดพีและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น หรือที่เรียกว่า ไดโอดรอยต่อพีเอ็น แต่ในกระบวนการสร้างไดโอดรอยต่อพีเอ็นเพื่อทำการวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางไฟฟ้านั้นมีหลายขั้นตอนและค่อนข้างซับซ้อน จึงมีการนำเอาการเขียนโปรแกรมมาจำลองการทำงานในลักษณะ การวิเคราะห์สมการสารกึ่งตัวนำโดยการจำลองอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมาใช้แทน

โดยการเขียนโปรแกรมนั้นทำได้ง่ายและสะดวกกว่า โดยเราเลือกใช้โปรแกรมภาษาวิซวลซี ซึ่งจะทำให้ผู้ใช้โปรแกรมใช้โปรแกรมได้ง่ายขึ้นในรูปแบบของโปรแกรมวินโดวส์ โดยผู้ใช้สามารถวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ ของไดโอดรอยต่อพีเอ็นจากค่าข้อมูลที่คำนวณได้ ซึ่งเป็นค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญ เช่น ค่าความต่างศักย์ ค่าความเข้มข้นของพาหะและค่าความหนาแน่นกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SIMULATION PROGRAM OF PN JUNCTION DIODE IN ONE AND TWO DIMENSIONAL

Anucha Pratoomwing

Asst.Prof.Dr.Toempong Phetchakul(Advisor)

Academic year 2001

Abstract

Semiconductor materials have very interesting electrical properties so that make them useful in the production of semiconductor devices. Of particular interest to study is the junction which consist of p-type semiconductor and n-type semiconductor materials –the pn junction diode. But in fabrication of the pn junction diode to analyze electrical characteristics have too many processes and quite complex. So the programming for simulation devices by analysis about the semiconductor equation on device modeling is used to replace them.

The programming is faster and more convenience than the fabrication processes. We choose the visual c++ language because it makes program easy for using in window programming style. The user can analyze some electrical characteristics of the pn junction diode from the results. These results have very important electrical characteristics such as potential, the both carriers concentration and current density.

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.2 ขอบเขตของโครงการ	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีสารกึ่งตัวนำ	3
2.1 พฤติการณ์ของพาหะ	3
2.1.1 การครีฟท์ของพาหะ	3
2.1.2 กระแสครีฟท์	3
2.1.3 การแพร่ของพาหะ	5
2.1.4 กระแสการแพร่	6
2.1.5 กระแสรวมในสารกึ่งตัวนำ	7
2.1.6 การเกิดและการรวมตัวของพาหะ	8
2.1.7 การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของพาหะส่วนเกิน	13
2.2 ทฤษฎีพื้นฐานของรอยต่อพีเอ็น	14
2.2.1 รอยต่อพีเอ็นในขณะไม่มีแรงดันไบอัส	14
2.2.2 รอยต่อพีเอ็นขณะได้รับไบอัสตรง	15
2.2.3 รอยต่อพีเอ็นขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ	16
2.2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพีเอ็น	17
2.2.5 กระแสรั่วที่รอยต่อพีเอ็น	18
2.2.6 ปรากฏการณ์พังทลายที่รอยต่อพีเอ็น	19
บทที่ 3 การออกแบบโปรแกรมคำนวณแบบ 1 มิติ	22
3.1 จำลองไดโอดรอยต่อพีเอ็น	22
3.2 ออกแบบความกว้างเมฆ	22
3.3 ออกแบบการคำนวณที่ใช้ในโปรแกรม	23
3.3.1 สร้างสมการที่ใช้ในการคำนวณ	24
3.3.2 การสเกลตัวแปร	27
3.3.2 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น	29
3.3.5 การคำนวณความหนาแน่นกระแส	29
3.4 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม	31
3.5 ไดอะแกรมของโปรแกรมแบบ 1 มิติ	34
บทที่ 4 การออกแบบโปรแกรมแบบคำนวณ 2 มิติ	35
4.1 จำลองไดโอดรอยต่อพีเอ็น	35
4.2 การออกแบบความกว้างเมฆ	36
4.3 ออกแบบการคำนวณที่ใช้ในโปรแกรม	46
4.3.1 การสเกลตัวแปร	46
4.3.2 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต	47
4.3.3 การสร้างสมการที่ใช้คำนวณ	55
4.4 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม	62
4.5 ไดอะแกรมของโปรแกรมแบบ 2 มิติ	63
บทที่ 5 ผลลัพธ์โปรแกรมในส่วนการคำนวณแบบ 1 มิติ	64
5.1 ค่าศักดาไฟฟ้า	65
5.2 ค่าความหนาแน่นพาหะ	66
5.3 ค่าความหนาแน่นกระแส	69
บทที่ 6 ผลลัพธ์โปรแกรมในส่วนการคำนวณแบบ 2 มิติ	70
6.1 ค่าศักดาไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสที่บริเวณผิวหน้าไดโอด	71
6.2 ค่าศักดาไฟฟ้าของไดโอด	73
6.3 ความหนาแน่นของโฮล	76
6.4 ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน	79
6.5 การพิจารณาค่าศักดาไฟฟ้าที่รอยต่อพีและเอ็น	82
6.6 การพิจารณาความหนาแน่นพาหะที่รอยต่อพีและเอ็น	85
บทที่ 7 วิเคราะห์และสรุปผล	88

สารบัญรูป

	หน้า
รูป 2.1 การแพร่และกระแสแพร่ของอิเล็กตรอน-โฮลในสารกึ่งตัวนำ ที่มีการกระจายของพาหะไม่สม่ำเสมอ	6
รูป 2.2 การกระจายของสนามไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะและทิศทางของกระแสครีฟท์	8
รูป 2.3 การเกิดและการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮล	9
รูป 2.4 การสร้างความเข้มข้นของอิเล็กตรอนและโฮลส่วนเกินโดยโฟตอน	10
รูป 2.5 การรวมตัวใหม่ของพาหะส่วนเกินเพื่อสร้างสภาวะสมดุลความร้อนขึ้นใหม่	11
รูป 2.6 ภาพแสดงปริมาณแสดงส่วนประกอบ x ของฟลักซ์อนุภาคโฮล	13
รูป 2.7 รอยต่อพี-เอ็น ในสภาวะสมดุลย์ (Equilibrium $V_A = 0$)	15
รูป 2.8 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับไบอัสตรง ($V_A > 0$)	16
รูป 2.9 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสกลับ ($V_A < 0$)	16
รูป 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น	17
รูป 2.11 การเกิดพาหะและการรวมตัวของพาหะ โดยระดับพลังงาน Deep level ขณะไบอัสตรง	18
รูป 2.12 การเกิดพาหะและการรวมตัวของพาหะ โดยระดับพลังงาน Deep level ขณะไบอัสกลับ	19
รูป 2.13 การเกิดการพังทะลายแบบอะวาลานซ์ (Avalanche Breakdown)	20
รูป 2.14 การเกิดการพังทะลายแบบซีเนอร์ (Zener Breakdown)	21
รูป 3.1 แบบจำลองไดโอดรอยต่อพีเอ็นแบบ 1 มิติ	22
รูป 3.2 การออกแบบเมชที่ใช้ในการคำนวณ	23
รูป 3.3 การออกแบบการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต	28
รูป 3.4 ไดอะล็อกของโปรแกรมแบบ 1 มิติ	34
รูป 4.1 แบบจำลองไดโอดรอยต่อพีเอ็นแบบ 2 มิติ	35
รูป 4.2 การออกแบบความกว้างเมชแบบ 2 มิติ	36
รูป 4.3 การออกแบบเมช i . เท่ากับ 0 ถึง 15	37
รูป 4.4 การออกแบบเมช i . เท่ากับ 16 ถึง 25	38
รูป 4.5 การออกแบบเมช i . เท่ากับ 26 ถึง 93	39
รูป 4.6 การออกแบบเมช i . เท่ากับ 94 ถึง 111	40
รูป 4.7 การออกแบบเมช i . เท่ากับ 112 ถึง 179	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 4.8 การออกแบบเมฆ i เท่ากับ 180 ถึง 205	42
รูป 4.9 การออกแบบเมฆ j เท่ากับ 17 ถึง 22	43
รูป 4.10 การออกแบบเมฆ j เท่ากับ 11 ถึง 16	44
รูป 4.11 การออกแบบเมฆ j เท่ากับ 0 ถึง 10	45
รูป 4.12 การออกแบบเงื่อนไขขอบเขตบริเวณต่างๆ	47
รูป 4.13 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตบริเวณอินเตอร์เฟซ	48
รูป 4.14 โคออร์ดิเนตของโปรแกรมแบบ 2 มิติ	63
รูป 5.1 รูปแบบไฟล์เอ็กซ์เซลที่ใช้เก็บค่าที่คำนวณได้ในการคำนวณแบบ 1 มิติ	64
รูป 5.2 ค่าความต่างศักย์ของไดโอดรอยต่อพีเอ็น	65
รูป 5.3 ความหนาแน่นพาหะขณะยังไม่มีไบอัส	66
รูป 5.4 ความหนาแน่นพาหะขณะได้รับไบอัสตรง	67
รูป 5.5 ความหนาแน่นพาหะขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ	68
รูป 5.6 ค่าความหนาแน่นกระแสของไดโอดรอยต่อพีเอ็น	69
รูป 6.1 การเก็บค่าที่คำนวณได้ในไฟล์เอ็กซ์เซล	70
รูป 6.2 ค่าศักดาไฟฟ้าที่บริเวณผิวหน้าไดโอดที่ไบอัสต่างๆ	71
รูป 6.3 ค่าความหนาแน่นพาหะขณะที่ยังไม่มีไบอัสตรง	72
รูป 6.4 ศักดาไฟฟ้าของไดโอดรอยต่อพีเอ็นขณะที่ยังไม่มีไบอัส	73
รูป 6.5 ศักดาไฟฟ้าของไดโอดรอยต่อพีเอ็นขณะได้รับไบอัสตรง	74
รูป 6.6 ศักดาไฟฟ้าของไดโอดรอยต่อพีเอ็นขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ	75
รูป 6.7 ความหนาแน่นของโฮลขณะที่ไดโอดยังไม่มีไบอัส	76
รูป 6.8 ความหนาแน่นของโฮลขณะที่ไดโอดได้รับไบอัสตรง	77
รูป 6.9 ความหนาแน่นของโฮลขณะที่ไดโอดได้รับไบอัสย้อนกลับ	78
รูป 6.10 ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนขณะที่ไดโอดยังไม่มีไบอัส	79
รูป 6.11 ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนขณะที่ไดโอดได้รับไบอัสตรง	80
รูป 6.12 ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนขณะที่ไดโอดได้รับไบอัสย้อนกลับ	81
รูป 6.13 ศักดาไฟฟ้าที่รอยต่อพีเอ็นขณะที่ยังไม่มีไบอัส	82
รูป 6.14 ศักดาไฟฟ้าที่รอยต่อพีเอ็นขณะได้รับไบอัสตรง	83
รูป 6.15 ศักดาไฟฟ้าที่รอยต่อพีเอ็นขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ	84
รูป 6.16 การเปรียบเทียบความหนาแน่นโฮลบริเวณรอยต่อพีเอ็นกรณีไม่มีและมีไบอัสตรง	85
รูป 6.17 ความหนาแน่นอิเล็กตรอนขณะที่ไดโอดได้รับไบอัสย้อนกลับ	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำได้เข้ามามีบทบาทในงานด้านอิเล็กทรอนิกส์มากยิ่งขึ้น โดยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำพื้นฐานที่สนใจคือ ไดโอดรอยต่อพี-เอ็น แต่ก่อนที่จะศึกษาคุณสมบัติต่างๆจะต้องทำการสร้างอุปกรณ์ขึ้นมาซึ่งกระบวนการสร้างมีหลายขั้นตอนต้องใช้เครื่องมืออุปกรณ์หลายๆชนิด และใช้เวลาสร้างค่อนข้างนานพอสมควร แต่ด้วยการจำลองไดโอดรอยต่อพี-เอ็น ที่เราจะศึกษาและใช้สมการทางคณิตศาสตร์กับสมการพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำ แล้วทำการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำให้สามารถหาค่าต่างๆที่สำคัญของไดโอดรอยต่อพี-เอ็น ที่เราสนใจได้ง่ายขึ้น

จากโปรแกรมเดิมที่เขียนขึ้นด้วยโปรแกรมวิซวลเบสิก ก็ให้ผลลัพธ์ที่ยอมรับได้ แต่ใช้เวลาประมวลผลนาน จึงริเริ่มที่จะเขียนโปรแกรมด้วยภาษาวิซวลซี ซึ่งสามารถแก้ปัญหาเรื่อง เวลาในการประมวลผลได้ รวมทั้งพัฒนาโปรแกรมให้มีความยืดหยุ่นมากยิ่งขึ้น

1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อเป็นการสร้างวิธีที่จะศึกษาไดโอดรอยต่อพีเอ็นด้วยวิธีใหม่โดยการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองตัวอุปกรณ์ไดโอดรอยต่อพีเอ็น ซึ่งจากการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทำให้เราไม่ต้องทำการสร้างอุปกรณ์จริงซึ่งสามารถศึกษาไดโอดรอยต่อพีเอ็น ด้วยวิธีที่ง่ายขึ้น ประหยัดเวลา และงบประมาณในการสร้างได้อีกด้วย โดยพัฒนาจากโปรแกรมเดิมซึ่งเป็นภาษาวิซวลเบสิก ดังนี้

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นใหม่สามารถลดเวลาในการประมวลผลลงได้

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นใหม่มีความยืดหยุ่นมากยิ่งขึ้น

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นใหม่สามารถใช้งานได้สะดวกมากยิ่งขึ้น

โปรแกรมสามารถจำลองการทำงานของไดโอดรอยต่อพีเอ็นได้ดีขึ้น

1.2 ขอบเขตของโครงการ

โครงการนี้เป็นการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองการทำงานของไดโอดรอยต่อพีเอ็น ด้วยภาษาวิซวลซีเพื่อศึกษาค่าความต่างศักย์ (Potential) ค่าความเข้มข้นพาหะ (Carrier concentration) และค่าความหนาแน่นกระแส (Current density) โดยผลลัพธ์ที่ได้สามารถแสดงให้ผู้

ใช้สามารถตรวจสอบได้โดยง่าย ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณโดยวิซวลซี สามารถนำไปเก็บเป็นฐานข้อมูลในไฟล์ของ excel อีกทั้งผลลัพธ์ที่ได้ สามารถแสดงในรูปกราฟที่เข้าใจง่าย

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

1. ทำให้เรารู้ถึงค่าคุณสมบัติต่างๆของไดโอดรอยต่อพีเอ็นเมื่อ ไดโอดอยู่ในกรณีไบอัสต่างๆ ได้ง่ายขึ้น
2. ทำให้เราประหยัดเวลา ค่าใช้จ่ายในการศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติของไดโอดรอยต่อพีเอ็น
3. โปรแกรมจำลองการทำงานของไดโอดรอยต่อพีเอ็นซึ่งเป็นโปรแกรมจำลองการทำงานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำพื้นฐาน ที่จะสามารถนำไปสู่การพัฒนาอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอื่นๆในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีสารกึ่งตัวนำ

2.1 พฤติการณ์ของพาหะ

คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำจะเกี่ยวข้องโดยตรงกับพฤติกรรมต่างๆของพาหะในสารกึ่งตัวนำ เช่น กลไกการเคลื่อนที่ของพาหะ ซึ่งพาหะในสารกึ่งตัวนำสามารถเคลื่อนที่ได้สองลักษณะคือแบบครีฟท์(Drift) และแบบแพร่(Diffusion) ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

2.1.1 การครีฟท์ของพาหะ (Drift of carrier)

การครีฟท์ของพาหะ อาจนิยามได้ว่า หมายถึงการเคลื่อนที่ของพาหะเนื่องจากได้รับแรงจากสนามไฟฟ้า เช่น อิเล็กตรอนซึ่งมีประจุไฟฟ้าลบ ($-q$) เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า (\mathcal{E}) จะเกิดมีแรงกระทำต่ออิเล็กตรอน คือ $F = -q\mathcal{E}$ แรงนี้จะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง (a) ไปในทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้า และสำหรับโฮลซึ่งมีประจุไฟฟ้าบวก($+q$) แรงที่เกิดจากสนามไฟฟ้าคือ $F = +q\mathcal{E}$ จะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า ความเร็วที่เกิดจากสนามไฟฟ้านี้ถูกเรียกว่า “ความเร็วครีฟท์” (Drift velocity : v_D)

อย่างไรก็ดี การเคลื่อนที่ของพาหะในสารของแข็งเช่นผลึกสารกึ่งตัวนำจะแตกต่างจากการเคลื่อนที่ของพาหะในสูญญากาศ โดยในสารของแข็งประกอบด้วยอะตอมหรือแลตทิซจำนวนมาก ดังนั้นจึงเกิดปรากฏการณ์ “การชนกัน” (Collision) ระหว่างพาหะ เช่นอิเล็กตรอนหรือโฮลกับอะตอม เมื่อพิจารณาสารกึ่งตัวนำชิ้นหนึ่งซึ่งถูกให้สนามไฟฟ้าคงที่ \mathcal{E} ที่อุณหภูมิสูงกว่า 0 K อิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำอยู่ในอิทธิพลของพลังงานความร้อนและสนามไฟฟ้า ในกรณีนี้จะมีความเร็วสุทธิตั้งขึ้นในทิศทางของแรงจากสนามไฟฟ้า แรงจากสนามไฟฟ้านี้จะทำให้อิเล็กตรอนมีความเร่ง a หรือก็คือ ความเร็วจะเพิ่มขึ้นกับเวลา แต่เนื่องจากการชนกันความเร็วของอิเล็กตรอนจึงมีค่าลดลงเป็นศูนย์ หลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่ง ความเร็วก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งมีการชนกัน ความเร็วก็จะลดลงเป็นศูนย์ซ้ำไปเช่นนี้เรื่อยๆ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า “ความเร็วครีฟท์” จะสังเกตได้ว่า ในกรณีที่ไม่มีสนามไฟฟ้า ความเร็วสุทธิของอิเล็กตรอนมีค่าเป็นศูนย์

2.1.2 กระแสครีฟท์ (Drift Current)

ในสารกึ่งตัวนำซึ่งมีพาหะอยู่สองชนิด คือ อิเล็กตรอนและโฮล เมื่อได้รับสนามไฟฟ้าจะเกิดมีแรงกระทำต่อพาหะทั้งสองและทำให้พาหะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วครีฟท์ โดยอิเล็กตรอนจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางสนามไฟฟ้า แต่โฮลเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวสนามไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของพาหะให้เกิดมีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น และกระแสของพาหะทั้งสองมีทิศทางเดียวกัน กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้ถูกเรียกว่า “กระแสครีฟท์”

จากสมการความหนาแน่นของกระแส

$$J = nqv \quad \text{แอมแปร์/ตร.ซม.}$$

จะได้ว่า กระแสครีฟท์ของอิเล็กตรอน

$$J = nq\mu_n \mathcal{E} \quad (2.1)$$

และเนื่องจาก

$$J = \sigma \mathcal{E}$$

โดย σ คือ สภาพนำไฟฟ้า มีหน่วยเป็น โหมห์ / ซม.

ดังนั้น สภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเนื่องจากอิเล็กตรอน

$$\sigma_n = nq\mu_n \quad (2.2)$$

ในทำนองเดียวกัน กระแสครีฟท์ของโฮล

$$J = p nq\mu_p \mathcal{E} \quad (2.3)$$

และสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเนื่องจากโฮล

$$\sigma_p = pq\mu_p \quad (2.4)$$

เนื่องจากกระแสครีฟท์รวมที่เกิดขึ้นเป็นผลรวมของกระแสครีฟท์ของอิเล็กตรอนและโฮล ดังนั้นกระแสครีฟท์รวม คือ

$$J_T = J_n + J_p \quad (2.5)$$

หรือ

$$J_T = nnq\mu_n \mathcal{E} + p nq\mu_p \mathcal{E} \quad (2.6)$$

$$= (\sigma_n + \sigma_p) \mathcal{E}$$

$$J_T = \sigma_T \mathcal{E}$$

โดยที่ สภาพนำไฟฟ้า

$$\sigma_T = \sigma_n + \sigma_p \quad (2.7)$$

ในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ซึ่ง $n \gg p$ หรือ $N_D \gg N_A$

จะได้ว่า $\sigma_n \gg \sigma_p$ หรือ $\sigma_T \approx \sigma_n$

ดังนั้น

$$J_T \approx \sigma_n \mathcal{E} = J_n \quad (2.8)$$

และ

$$\sigma_n = N_D q \mu_n \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่ง $p \gg n$ หรือ $N_A \gg N_D$

จะได้ว่า $\sigma_p \gg \sigma_n$ หรือ $\sigma_T \approx \sigma_n$

ดังนั้น

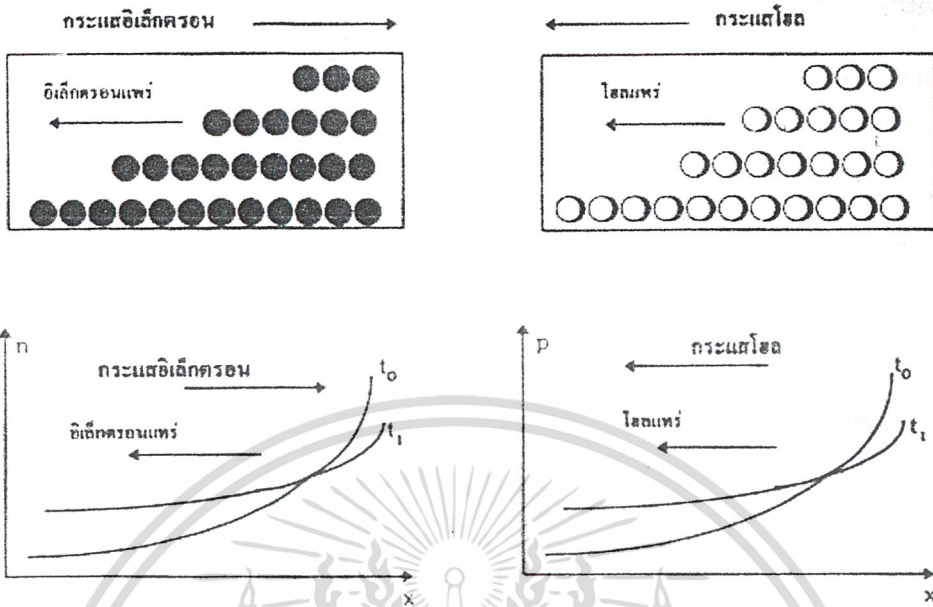
$$J_T \approx \sigma_p \varepsilon = J_p \quad (2.10)$$

และ

$$\sigma_p = N_A q \mu_p \quad (2.11)$$

2.1.3 การแพร่ของพาหะ(Carrier Diffusion)

การเคลื่อนที่ของพาหะในสารกึ่งตัวนำอาจเกิดขึ้นได้เมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้า ซึ่งเราเรียกว่า “การครีฟท์” และทำให้มีกระแสครีฟท์เกิดขึ้นดังกล่าวมาแล้ว นอกจากนี้แล้วพาหะในสารกึ่งตัวนำอาจยังเคลื่อนที่ได้เมื่อการกระจายความหนาแน่นของพาหะไม่เท่ากัน หรือมีความหนาแน่นแตกต่างกัน (Concentration gradient) ในกรณีนี้ พาหะจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูง ไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า คล้ายกับการแพร่ของโมเลกุลของน้ำหมึกที่ถูกหยดลงไปในแก้วน้ำสะอาด การเคลื่อนที่ลักษณะนี้เรียกว่า “การแพร่” (Diffusion) และจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นซึ่งเรียกว่า “กระแสการแพร่” (Diffusion current) แรงที่กระทำต่อพาหะและทำให้พาหะแพร่ด้วยความเร็ว v_{diff} จะแปรโดยตรงกับค่าความแตกต่างของความหนาแน่นของพาหะ หรือความเข้มข้นของการกระจายความหนาแน่นของพาหะ ยิ่งพาหะมีความหนาแน่นแตกต่างกันมากแรงก็จะมีความมาก ทำให้พาหะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ดังนั้น กระแสการแพร่จึงแปรโดยตรงกับขนาดความแตกต่างของความหนาแน่นของพาหะ การแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำซึ่งมีการกระจายของพาหะที่ไม่สม่ำเสมอ และกระแสการแพร่ที่เกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงการแพร่และกระแสการแพร่ของอิเล็กตรอน-โฮลในสารกึ่งตัวนำที่มีการกระจายของพาหะไม่สม่ำเสมอ

2.1.4 กระแสการแพร่(Diffusion current)

การแพร่ของพาหะ จะทำให้เกิดกระแสการแพร่ขึ้น โดย

กระแสการแพร่ $J_{diff} = Nqv_{diff}$ (2.12)

ดังนั้น กระแสการแพร่ของอิเล็กตรอน $J_{n(diff)} = qD_n \frac{dn}{dx}$ (2.13)

และกระแสการแพร่ของโฮล $J_{p(diff)} = -qD_p \frac{dp}{dx}$ (2.14)

เครื่องหมายลบที่แสดงในสมการกระแสการแพร่ของโฮล แสดงว่า กระแสการแพร่ของโฮลมีทิศตรงกันข้ามกับการกระจายของโฮล ซึ่งจะเห็นได้ดังในรูปที่ 2.1

จาก $\mu = \frac{q\tau_c}{m}$ และ $D = \frac{kT \cdot \tau_c}{m}$

ดังนั้น จะได้ความสัมพันธ์ ระหว่างสภาพคล่อง และ สัมประสิทธิ์การแพร่ของพาหะดังนี้

$$D = \left(\frac{kT}{q} \right) \mu$$

สำหรับอิเล็กตรอน $D_n = \left(\frac{kT}{q} \right) \mu_n$ (2.15)

สำหรับโฮล $D_p = \left(\frac{kT}{q} \right) \mu_p$ (2.16)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q} \quad (2.17)$$

2.1.5 กระแสรวมในสารกึ่งตัวนำ

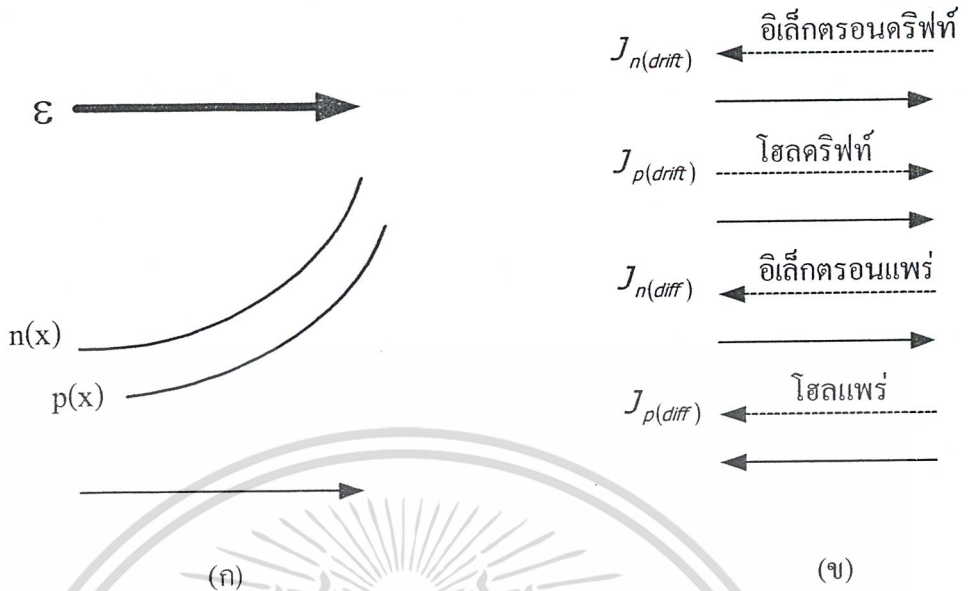
ในตอนที่แล้วมา เราได้กล่าวถึงการเกิดกระแสครีฟท์ และกระแสการแพร่ ของอิเล็กตรอน และโฮลในสารกึ่งตัวนำ โดยกระแสครีฟท์เกิดจากสนามไฟฟ้า และ กระแสการแพร่เกิดจากการกระจายของพาหะไม่สมำเสมอ ในทางปฏิบัติ สารกึ่งตัวนำอาจได้รับสนามไฟฟ้าและมีการกระจายของพาหะไม่สมำเสมอได้ในเวลาเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2.1 ดังนั้นจึงมีกระแสครีฟท์และกระแสการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮลเกิดขึ้นพร้อมๆกัน ได้ กระแสรวมที่ไหลในสารกึ่งตัวนำ จึงเป็นผลรวมของกระแสต่างๆเหล่านี้ ดังสมการ

$$\text{กระแสรวมของอิเล็กตรอน} \quad J_n = nq\mu_n \varepsilon + qD_n \frac{d_n}{d_x} \quad (2.18)$$

$$\text{กระแสรวมของโฮล} \quad J_p = pq\mu_p \varepsilon - qD_p \frac{d_p}{d_x} \quad (2.19)$$

$$\text{และกระแสรวมสุทธิ} \quad J_T = J_n + J_p \quad (2.20)$$

จากสมการที่ (2.18) และ (2.19) เป็นที่น่าสังเกตว่ากระแสการแพร่ของโฮลมีทิศทางตรงข้ามกับกระแสอื่นๆ การทำความเข้าใจเกี่ยวกับ การเกิดกระแสและทิศทางของกระแสในสารกึ่งตัวนำนี้มีความสำคัญมากต่อการศึกษาคุณสมบัติและการทำงานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำต่างๆ ไป ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นกระแสการแพร่ของพาหะส่วนน้อยเท่านั้น เช่นกระแสที่ไหลใน ไดโอดและไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ เป็นต้น



รูปที่ 2.2 แสดง (ก) การกระจายของสนามไฟฟ้า และความหนาแน่นของพาหะ (ข) ทิศทางของกระแสครีฟท์

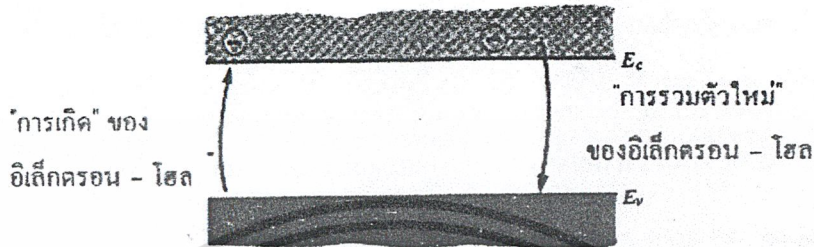
2.1.6 การเกิดและการรวมตัวของพาหะ

การเบี่ยงเบนใดๆก็ตามไปจากสมดุลความร้อนจะมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนความเข้มข้นของอิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำ การเพิ่มของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วจะเพิ่มอัตราที่จะผลิตอิเล็กตรอนและโฮลด้วยความร้อน ดังนั้นความเข้มข้นของพาหะจะเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา จนกระทั่งจะเข้าสู่สภาวะสมดุลใหม่ การกระตุ้นภายนอกอย่างเช่น แสง (ลำของ โปรตอน) สามารถที่จะผลิตอิเล็กตรอนและโฮลและจะสร้างสภาวะไม่สมดุลให้เกิดขึ้น เพื่อที่จะเข้าใจกระบวนการเกิดขึ้นและรวมตัวใหม่ เราพิจารณาการเกิดแบบ โดยตรงจากแถบพลังงานสู่แถบพลังงาน (direct band to band generation) และการรวมตัวแบบ โดยตรงจากแถบพลังงานสู่แถบพลังงาน (direct band to band recombination) และหลังจากนั้นพิจารณาผลของสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนิกส์ที่ยอม ภายในช่องว่างแถบพลังงาน เรียกว่า แทรป (trap) หรือศูนย์กลางการรวมตัว

สารกึ่งตัวนำในสภาวะสมดุล

เราได้หาความเข้มข้นของอิเล็กตรอนและโฮลในแถบความนำและแถบวาเลนซ์ที่สภาวะสมดุล ความร้อนตามลำดับมาแล้ว ที่สภาวะสมดุลความร้อนความเข้มข้นเหล่านี้จะอิสระจากเวลาหรือไม่ขึ้นอยู่กับเวลา อย่างไรก็ตามจากการกระตุ้นอย่างต่อเนื่องจากความร้อนโดยธรรมชาติของกระบวนการทางความร้อนจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบความนำ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่อย่างไร้ทิศทางตลอด

ผลึกสารกึ่งตัวนำในแถบความนำ และอาจจะใกล้เคียงกับโฮล เพราะว่าความเข้มข้นพาหะสุทธิเป็นอิสระ กับเวลาที่สมดุลความร้อน อัตราส่วนอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดและการรวมตัวใหม่จะเท่ากัน ดังรูป ที่ 2.3 แสดงการเกิดขึ้นและการรวมตัวใหม่



รูปที่ 2.3 การเกิดและการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮล

ให้ G_{n0} และ G_{p0} คืออัตราการเกิดเนื่องจากความร้อนของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ มีหน่วยเป็น $\#/cm^3\text{-sec}$ สำหรับการเกิดแบบโดยตรงจากแถบพลังงานอิเล็กตรอนและโฮลจะถูกสร้างเป็นคู่ ดังนั้นเราจะได้ว่า

$$G_{n0} = G_{p0}$$

ให้ R_{n0} และ R_{p0} เป็นอัตราการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮลของสารกึ่งตัวนำที่สมดุล ความร้อนตามลำดับ อยู่ในหน่วย $\#/cm^3\text{-sec}$ ในการรวมตัวใหม่แบบโดยตรงจากแถบพลังงานคู่แถบพลังงานอิเล็กตรอนและโฮลจะรวมตัวกันเป็นคู่ ดังนั้น

$$R_{n0} = R_{p0}$$

ที่สมดุลความร้อน ความเข้มข้นของอิเล็กตรอนและโฮลจะอิสระกับเวลา ดังนั้นอัตราการเกิดและการรวมตัวจะเท่ากัน ซึ่งเราจะได้ว่า

$$G_{n0} = G_{p0} = R_{n0} = R_{p0}$$

การเกิดและการรวมตัวใหม่ของพาหะส่วนเกิน

อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์อาจจะถูกกระตุ้นเข้าไปในแถบความนำ เมื่อมีพลังงานโฟตอนสูงมากมากระทบบนสารกึ่งตัวนำ เมื่อเกิดเหตุการณ์นี้ขึ้นไม่เพียงอิเล็กตรอนจะถูกสร้างขึ้นที่แถบความนำเท่านั้น แต่โฮลจะถูกสร้างขึ้นที่แถบวาเลนซ์ด้วย ดังนั้นคู่อิเล็กตรอน-โฮล จะถูกผลิตขึ้น

อิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกสร้างเพิ่มขึ้นนี้ เรียกว่า อิเล็กตรอนส่วนเกิน (excess electrons) และโฮลส่วนเกิน (excess holes)

อิเล็กตรอนส่วนเกินและโฮลจะถูกผลิตโดยแสงภายนอกที่อัตราค่าหนึ่งให้ g'_n เป็นอัตราการผลิตของอิเล็กตรอนส่วนเกินและ g'_p เป็นอัตราการผลิตของโฮลส่วนเกิน อัตราการเกิดเหล่านี้มีหน่วยเป็น $\#/cm^3\text{-sec}$ สำหรับการเกิดแบบโดยตรงจากแถบพลังงานสู่แถบพลังงาน อิเล็กตรอนและโฮลส่วนเกินจะถูกสร้างเป็นคู่ ดังนั้นเราจะได้

$$g'_n = g'_p$$

เมื่ออิเล็กตรอนส่วนเกิน และโฮลส่วนเกินถูกสร้างขึ้น ความเข้มข้นของอิเล็กตรอนในแถบความนำและโฮลในแถบวาเลนซ์จะเพิ่มขึ้นมากกว่าค่าที่สมดุลความร้อน เราอาจจะเขียนได้ว่า

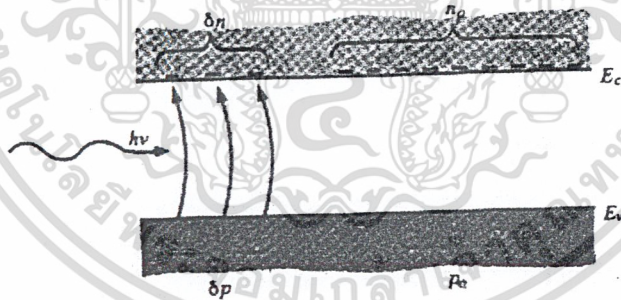
$$n = n_0 + \delta n \quad (2.21)$$

และ

$$p = p_0 + \delta p \quad (2.22)$$

ซึ่ง n_0 และ p_0 เป็นความเข้มข้นที่สมดุลความร้อนและ δn และ δp เป็นอิเล็กตรอนส่วนเกินในรูปที่

2.4 แสดงกระบวนการเกิดอิเล็กตรอน-โฮลส่วนเกิน และแสดงผลลัพธ์ความเข้มข้นพาหะแสงภายนอกที่รบกวนสถานะสมดุลทำให้สารกึ่งตัวนำไม่สามารถรักษาสภาวะสมดุลต่อไปได้ เราอาจสังเกตจากสมการที่ 2.21 และ 2.22 ว่าเงื่อนไขความไม่สมดุล $n_p \neq n_0 p_0 = n_i^2$

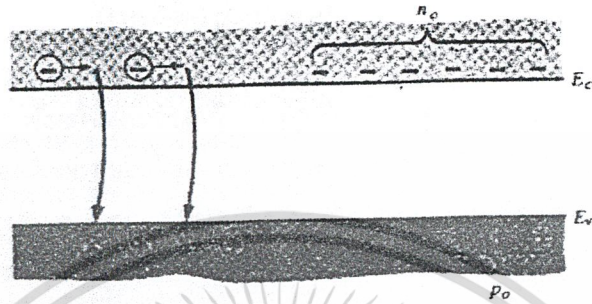


รูปที่ 2.4 การสร้างความเข้มข้นของอิเล็กตรอนและโฮลส่วนเกินโดยโฟตอน

ที่สภาวะคงที่ของการเกิดพาหะส่วนเกินของอิเล็กตรอนและโฮล จะไม่เป็นสาเหตุการสร้าง ความเข้มข้นพาหะต่อเนื่องไปเรื่อยๆ ดังในกรณีสมดุลความร้อน อิเล็กตรอนในแถบความนำอาจจะตกลงมาในแถบวาเลนซ์ ซึ่งนำไปสู่กระบวนการการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอน-โฮลส่วนเกิน กระบวนการนี้แสดงดังรูปที่ 2.5 อัตราการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนส่วนเกินเขียนแทนด้วย R'_n

และสำหรับโฮลส่วนเกินเขียนแทนด้วย R_p ทั้งสองตัวแปร มีหน่วยเป็น $\#/cm^3\text{-sec}$ อิเล็กตรอนและโฮลส่วนเกินจะรวมตัวทั้งคู่ ดังนั้นอัตราการรวมตัวใหม่จะต้องเท่ากัน เราสามารถเขียนได้เป็น

$$R_n = R_p$$



รูปที่ 2.5 การรวมตัวใหม่ของพาหะส่วนเกินเพื่อสร้างสถานะสมดุลความร้อนขึ้นใหม่

ในการรวมตัวใหม่แบบโดยตรงจากแถบพลังงานสู่แถบพลังงานที่กำลังพิจารณา การรวมตัวใหม่จะปรากฏโดยธรรมชาติ ดังนั้น โอกาสของการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮลจะคงที่กับเวลาอัตราซึ่งอิเล็กตรอนรวมตัวต้องเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของโฮลด้วย ถ้าไม่มีอิเล็กตรอนและโฮลก็จะไม่มีการรวมตัวใหม่เกิดขึ้น

อัตราสุทธิของการเปลี่ยนความเข้มข้นของอิเล็กตรอนสามารถเขียนได้ว่า

$$\frac{dn(t)}{dt} = \alpha_r [n^2 - n(t)p(t)] \tag{2.23}$$

ซึ่ง

$$n(t) = n_0 + \delta n(t)$$

และ

$$p(t) = p_0 + \delta p(t)$$

เทอมแรก $\alpha_r n^2$ ในสมการ 2.23 คือ อัตราการเกิดที่สมดุลความร้อน เพราะว่าอิเล็กตรอนและโฮลส่วนเกินถูกสร้างและรวมตัวใหม่เป็นคู่ เพราะเราจะได้ว่า $\delta n(t) = \delta p(t)$ (ความเข้มข้นอิเล็กตรอนและโฮลส่วนเกินมีค่าเท่ากัน เราสามารถใช้เทอมพาหะส่วนเกินแทนทั้งอิเล็กตรอนส่วนเกินและโฮลส่วนเกินได้) ตัวแปรที่สมดุลความร้อน n_0 และ p_0 จะเป็นอิสระกับเวลาและสมการที่ 2.23 จะกลายเป็น

$$\begin{aligned} \frac{d(\delta n(t))}{dt} &= \alpha_r [n^2 - (n_0 + \delta n(t))(p_0 + \delta p(t))] \\ &= -\alpha_r \delta n(t) [(n_0 + p_0) + \delta n(t)] \end{aligned} \tag{2.24}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ(2.24)สามารถแก้สมการได้ง่ายขึ้นถ้าเรากำหนดเงื่อนไข “การฉีดในระดับต่ำ” (Low level injection) การฉีดระดับต่ำจะจำกัดขนาดของความเข้มข้นพาหะส่วนเกินเมื่อเปรียบเทียบกับพาหะที่สมดุลความร้อน ในสารเอ็กซ์ทรินซิกชนิดเอ็นเรามี $n_0 \gg p_0$ และในสารเอ็กซ์ทรินซิกชนิดพีเรามี $p_0 \gg n_0$ การฉีดในระดับต่ำหมายความว่า ความเข้มข้นพาหะส่วนเกินจะมีค่าน้อยกว่าความเข้มข้นพาหะส่วนมากที่สมดุลความร้อนมาก ในทางกลับกัน การฉีดระดับสูง (High level injection) จะเกิดเมื่อพาหะส่วนเกินจะมีค่าเทียบเคียงหรือมากกว่า ความเข้มข้นพาหะส่วนมากที่สมดุลความร้อน

ถ้าเราพิจารณาสารชนิดพี ($p_0 \gg n_0$) ภายใต้การฉีดระดับต่ำ ($n_0 \gg p_0$) แล้วสมการจะเป็นดังนี้

$$\frac{d(\delta n(t))}{dt} = -\alpha_r p_0 \delta n(t) \quad (2.25)$$

คำตอบของสมการจะลดลงอย่างเอ็กซ์โพเนนเชียล จากความเข้มข้นส่วนเกินเริ่มต้นหรือ

$$\delta n(t) = \delta n(0)e^{-\alpha_r p_0 t} = \delta n(0)e^{-t/\tau_{n0}} \quad (2.26)$$

ซึ่ง $\tau_{n0} = (\alpha_r p_0)^{-1}$ และจะคงที่สำหรับการฉีดระดับต่ำ สมการ 2.26 จะอธิบายการลดลงของพาหะอิเล็กตรอนที่เป็นพาหะส่วนเกินที่เป็นพาหะส่วนน้อย ดังนั้น τ_{n0} จะถูกอ้างอิงถึงบ่อยๆ โดยเป็นค่าเวลาชีวิตของพาหะส่วนเกินที่เป็นพาหะส่วนน้อย (excess minority carrier lifetime) อัตราการรวมตัวใหม่ซึ่งถูกกำหนดให้เป็นปริมาณบวก อิเล็กตรอนส่วนเกินที่เป็นพาหะส่วนน้อยสามารถที่จะเขียนเป็น

$$R'_n = -\frac{d(\delta n(t))}{dt} = +\alpha_r p_0 \delta n(t) = \frac{\delta n(t)}{\tau_{n0}} \quad (2.27)$$

สำหรับการรวมตัวใหม่แบบโดยตรงจากแถบพลังงานสู่แถบพลังงาน พาหะโฮลส่วนเกินที่เป็นพาหะส่วนมากจะรวมตัวในอัตราเดียวกัน

$$R'_n = R'_p = \frac{\delta n(t)}{\tau_{n0}} \quad (2.28)$$

ในกรณีของสารชนิดเอ็น ($n_0 \gg p_0$) ภายใต้การฉีดระดับต่ำ ($\delta n(t) \ll n_0$) การลดลงของพาหะโฮลส่วนน้อย ปรากฏที่ค่าคงที่ $\tau_{p0} = (\alpha_r n_0)^{-1}$ ซึ่ง τ_{p0} ถูกอ้างถึงว่าเป็นค่าเวลาชีวิตของพาหะส่วนเกินที่เป็นพาหะส่วนน้อย อัตราการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนพาหะส่วนมากจะเหมือนกับพาหะส่วนน้อยโฮล

$$R'_n = R'_p = \frac{\delta n(t)}{\tau_{p0}} \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการเกิดของพาหะจะไม่ใช่ฟังก์ชันของความเข้มข้นของอิเล็กตรอนและโฮล ในกรณีทั่วไปอัตราการเกิดและการรวมตัวใหม่อาจจะเป็นฟังก์ชันของพิกัดระยะทางและเวลา

2.1.7 การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของพาหะส่วนเกิน

เราจะพัฒนาสมการอธิบายปรากฏการณ์ของอิเล็กตรอนและโฮลส่วนเกิน เพราะว่าอัตราการเกิดอาจจะเป็นฟังก์ชันของเวลาและระยะทาง ความเข้มข้นของพาหะส่วนเกินอาจจะเป็นฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงเดียวกันด้วย

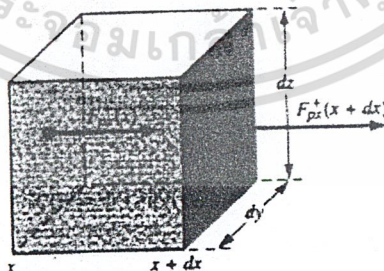
สมการความต่อเนื่อง

จากรูปที่ 2.6 แสดงปริมาตรเล็กๆ ซึ่งฟลักซ์ของอนุภาคโฮลในหนึ่งมิติ เข้าไปในปริมาตรนี้ที่ x และออกจากปริมาตรที่ $x+dx$ ตัวแปร F^+_{px} คือฟลักซ์ของอนุภาคโฮลหรือการไหล มีหน่วยเป็น # ของโฮล / $cm^2 \text{ sec}$ สำหรับองค์ประกอบตามระยะทาง x ของความหนาแน่นกระแสอนุภาคเขียนแสดงได้คือ

$$F^+_{px}(x+dx) = F^+_{px}(x) + \frac{\partial F^+_{px}}{\partial x} dx$$

จากสมการนี้คือ การกระจายเทเลอร์ของ $F^+_{px}(x+dx)$ ซึ่งคิดเพื่อเรนเซิลความยาว dx มีค่าน้อย ดังนั้นเพียงสองเทอมแรกของการกระจายนี้เท่านั้นที่มีนัยสำคัญ การเพิ่มขึ้นสุทธิในจำนวนของโฮลต่อหน่วยเวลาภายในปริมาตรเล็กๆ เนื่องจากองค์ประกอบของฟลักซ์โฮลคือ

$$\frac{\partial p}{\partial t} dx dy dz = \left[F^+_{px}(x) - F^+_{px}(x+dx) \right] dy dz = - \frac{\partial F^+_{px}}{\partial x} dx dy dz \quad (2.30)$$



รูปที่ 2.6 ภาพแสดงปริมาตรแสดงส่วนประกอบ x ของฟลักซ์อนุภาคโฮล

ถ้า $F^+_{px}(x) > F^+_{px}(x+dx)$ จะมีการเพิ่มของปริมาณสุทธิของจำนวนโฮลในปริมาตรเล็กๆ กับเวลา เราเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไป สามมิติของฟลักซ์โฮล แล้วทางด้านขวาของสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การ 2.30 อาจเขียนได้เป็น $-\nabla \cdot F^+ p dx dy dz$ ซึ่ง $-\nabla \cdot F^+ p$ คือ ไดเวอร์เจนท์ของเวกเตอร์ฟลักซ์ แต่เราจะจำกัดการวิเคราะห์ของเราเพียงหนึ่งมิติเท่านั้น

อัตราการเกิดและอัตราการรวมตัวใหม่ของโซลจะมีผลต่อความเข้มข้นของโซลในปริมาตรเล็กๆ ด้วยการเพิ่มขึ้นสุทธิของจำนวนโซลต่อหน่วยเวลาในปริมาตรเล็กๆ จะเป็น

$$\frac{\partial p}{\partial t} dx dy dz = -\frac{\partial F^+ p}{\partial x} dx dy dz + g p dx dy dz - \frac{p}{\tau_{pt}} dx dy dz \quad (2.31)$$

ซึ่ง p คือ ความหนาแน่นของโซล ในเทอมแรกทางขวามือของสมการ 2.31 เป็นการเพิ่มของจำนวนโซลต่อหน่วยเวลาเนื่องจากฟลักซ์โซล เทอมที่สองคือ การเพิ่มขึ้นของจำนวนโซลต่อหน่วยเวลาเนื่องจากการเกิดของโซล และเทอมสุดท้ายคือ การลดลงของจำนวนโซลต่อหน่วยเวลาเนื่องจากการรวมตัวใหม่ของโซล อัตราการรวมตัวใหม่ของโซล เขียนแทนด้วย $\frac{p}{\tau_{pt}}$ ซึ่ง τ_{pt} ได้รวมค่าเวลาชีวิตของพาหะสมมูลความร้อนและค่าเวลาชีวิตของพาหะส่วนเกินเข้าไว้ด้วยกัน

ถ้าหารทั้งสองข้างด้วยสมการ 2.31 โดยปริมาตรเล็กๆ $dx dy dz$ การเพิ่มขึ้นสุทธิในความเข้มข้นของโซลต่อหน่วยเวลา คือ

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\partial F^+ p}{\partial x} + g p - \frac{p}{\tau_{pt}} \quad (2.32)$$

สมการที่ 2.32 จะรู้จักกันในนามสมการความต่อเนื่องของโซล ในทำนองเดียวกันสมการต่อเนื่องในหนึ่งมิติสำหรับอิเล็กตรอนคือ

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{\partial F^+ n}{\partial x} + g n - \frac{n}{\tau_{nt}} \quad (2.33)$$

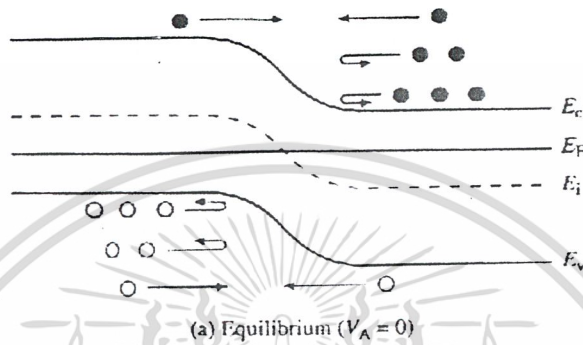
ซึ่ง F_p^- คือ การไหลของอนุภาคอิเล็กตรอน หรือฟลักซ์อิเล็กตรอน และมีหน่วยเป็น # ของอิเล็กตรอน $/cm^2 \cdot sec$

2.2 ทฤษฎีพื้นฐานของรอยต่อพีเอ็น

2.2.1 รอยต่อพี-เอ็น ในขณะไม่มีแรงดันไบอัส

เมื่อเกิดเป็นรอยต่อพี-เอ็น ขึ้นแล้วเนื่องจากความหนาแน่นของโซล ด้านพี มีมากกว่าโซล ด้านเอ็น และอิเล็กตรอน ด้านเอ็น มีมากกว่าอิเล็กตรอน ด้านพี จึงทำให้อิเล็กตรอน ด้านเอ็น เคลื่อนที่ไปด้านพี เกิดเป็นไอออนบวกขึ้นแทนที่ และโซล ด้านพีเคลื่อนที่ไปด้านเอ็นทำให้เกิดไอออนลบ (Negative ion) ขึ้นแทนที่ ซึ่งการเกิดไอออน (Ionization) ขึ้นมานั้นจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นที่

บริเวณรอยต่อนั้นเองเป็นแรงดันค่าหนึ่ง เรียกว่า “แรงดันภายใน (Built in voltage: V_0)” ซึ่งแรงดันนี้จะต่อต้านการเคลื่อนที่ของประจุอิเล็กตรอนและโฮล ไม่ให้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้เรียกว่า “สภาวะสมดุลย์” บริเวณรอยตอดังกล่าวนั้นจะเป็นบริเวณปลอดพาหะ (Depletion region) ซึ่งไม่มีพาหะใดๆอยู่บริเวณนี้เลย

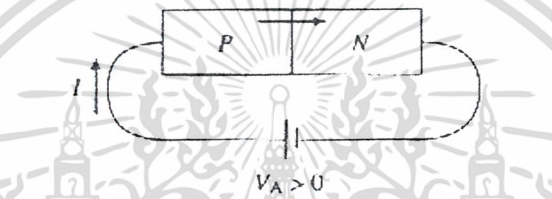
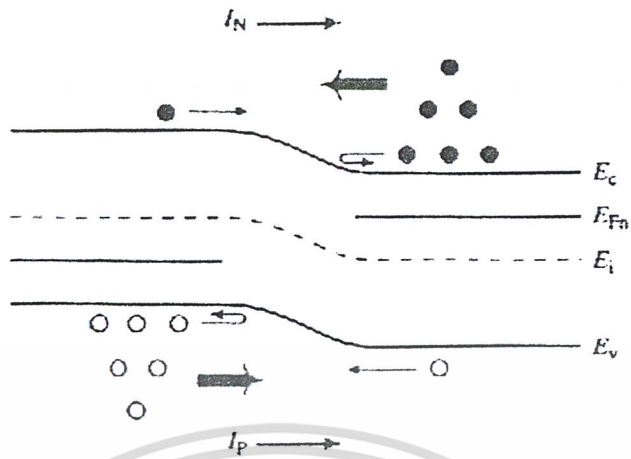


รูป 2.7 รอยต่อพี-เอ็น ในสภาวะสมดุลย์ (Equilibrium $V_A = 0$)

2.2.2 รอยต่อพี-เอ็น ในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง

เมื่อรอยต่อพี-เอ็น ได้รับแรงดันไบอัสตรง กล่าวคือ ป้อนไฟบวกด้านพี และป้อนไฟลบด้านเอ็น ลักษณะเช่นนี้จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมรอยต่อมีค่าลดลง ($V_0 - V_A$) บริเวณปลอดพาหะแคบลง ทำให้ อิเล็กตรอนด้านเอ็น และ โฮล ด้านพี สามารถเคลื่อน ที่ข้ามรอยต่อได้สะดวกการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และโฮล ทำให้เกิดกระแสไหลขณะได้รับไบอัสตรง ดังสมการ

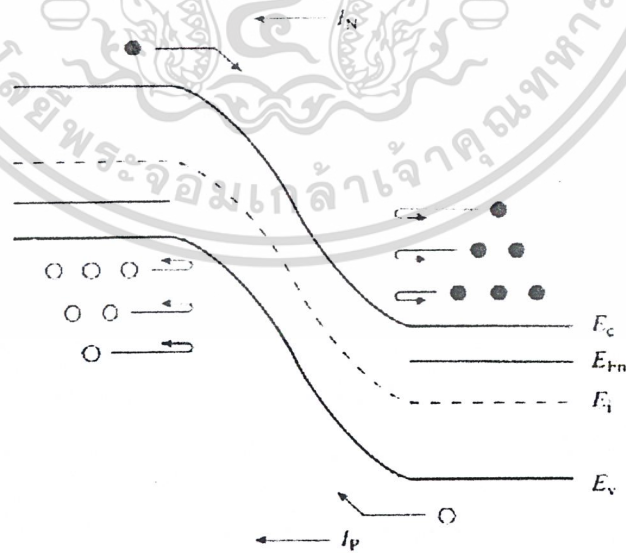
$$I = I_0 \left(e^{qV_A / kT} - 1 \right)$$



(b) Forward bias ($V_A > 0$)

รูป 2.8 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับไบอัสตรง ($V_A > 0$)

2.2.3 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสกลับ



(c) Reverse bias ($V_A < 0$)

รูป 2.9 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสกลับ ($V_A < 0$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อรอยต่อพี-เอ็น ได้รับแรงดันไบอัสกลับ กล่าวคือ ป้อนไฟบวกเข้าด้านเอ็น และไฟลบเข้าด้านพี จะยิ่งไปเพิ่มแรงดันภายในรอยต่อให้มีความมากขึ้นกว่าเดิม ($V_0 + V_A$) บริเวณปลอตกพาหะกว้างมากขึ้นทำให้ อิเล็กตรอน และโฮล ไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อไปได้

กระแสที่ไหลผ่านรอยต่อจะมีค่าน้อยมากซึ่งจะเป็นกระแสของพาหะส่วนน้อย เรียกว่า “กระแสรั่ว (Leakage Current)” ซึ่งความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยใกล้ๆบริเวณปลอตกพาหะจะมีจำนวนลดลง สามารถหาได้จากกฎของรอยต่อ คือ

$$P_n |_{t_n} = P_{no} \cdot e^{q \cdot V_A / K T} \tag{2.34}$$

$$n_p |_{t_p} = n_{po} \cdot e^{q \cdot V_A / K T} \tag{2.35}$$

พิจารณากระแสเมื่อได้รับไบอัสย้อนกลับที่อุณหภูมิห้อง ($T=300K^{\circ}$) จะได้ค่ากระแสมีค่าประมาณ

$$I = I_0 \left(e^{qV_A / K T} - 1 \right) \tag{2.36}$$

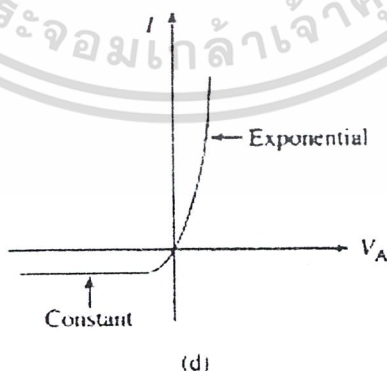
เทอม $\left(e^{qV_A / K T} \right)$ จะน้อยกว่าหนึ่งมากจะได้

$$I = -I_0 \tag{2.37}$$

จากกระแสที่ได้นั้นจะเห็นได้ว่า กระแส I_0 เป็นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับมีค่าน้อยมากๆ และไม่ขึ้นอยู่กับแรงดันไบอัส แต่จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของรอยต่อเท่านั้นเอง

2.2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

จากสมการกระแสของไดโอดนั้นเมื่อทำการพิจารณาจากการให้ไบอัสทั้งสองแบบแล้วนำมา
 มา
 พล็อตกราฟความสัมพันธ์ของแรงดันกับกระแสแล้วจะได้กราฟดังนี้



(กราฟ I-V characteristic)

รูป 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟพิจารณาที่ควอดแดรนต์ที่ 1 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสตรงไปจนถึงค่าๆ หนึ่งถึงค่าแรงดันภายใน (Built in Voltage) จะทำให้เกิดกระแสเพิ่มขึ้นอย่างมากเป็นลักษณะการเพิ่มแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลนั่นเอง และพิจารณาที่ควอดแดรนต์ที่ 3 จะเห็นได้ว่าเมื่อป้อนไบอัสกลับจะเกิดมีกระแสรั่วขึ้นที่บริเวณรอยต่อแต่หากว่ามีค่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่ถ้าป้อนไบอัสกลับจนถึงค่าแรงดันพังจะเกิดมีกระแสเพิ่มขึ้นอย่างมากมาย

2.2.5 กระแสรั่วที่รอยต่อพี-เอ็น

กระแสรั่วที่เกิดขึ้นที่รอยต่อพี-เอ็น จะเกิดขึ้นขณะไบอัสกลับเท่านั้น ซึ่งกระแสรั่ว 2 ชนิดคือ

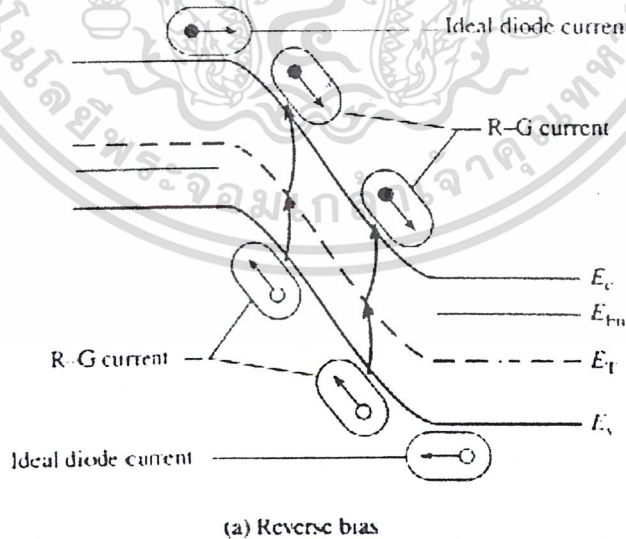
1. กระแสอิมิตัวย้อนกลับ I_0 โดยจะมีค่าประมาณ แสดงดังสมการ

$$I_0 = A \cdot q \cdot n_i^2 \cdot \left[\frac{D_P}{L_P N_D} + \frac{D_N}{L_N N_A} \right] = A \cdot q \cdot n_i^2 \cdot \left[\frac{1}{N_D} \sqrt{\frac{D_P}{\tau_P}} + \frac{1}{N_A} \sqrt{\frac{D_N}{\tau_N}} \right] \quad (2.38)$$

2. กระแสการเกิดและการรวมตัว (Generation-Recombination)

กระแสนี้เรียกกันย่อๆว่ากระแส G-R จะเกิดขึ้นเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของผลึกของซิลิคอน ซึ่งแบ่งได้เป็น

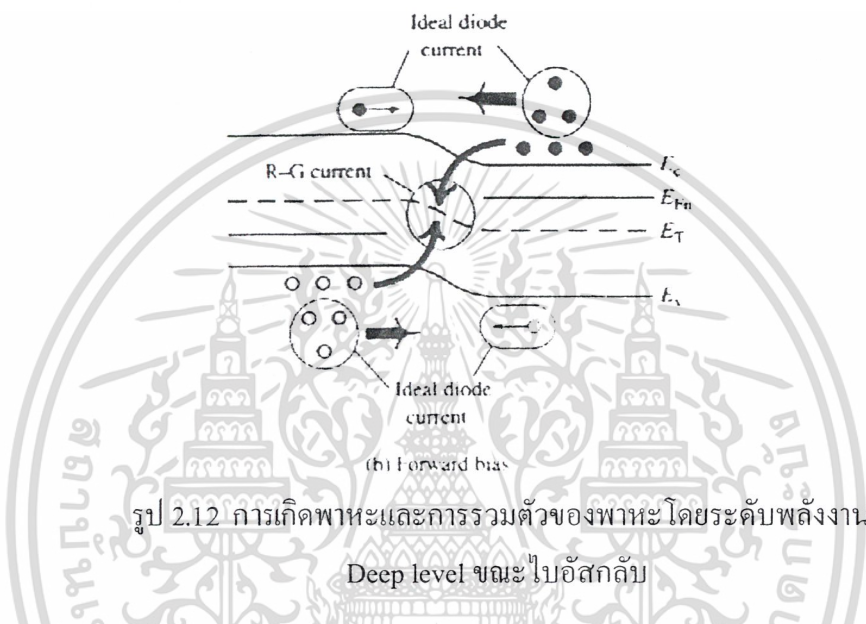
- 1. ซิลิคอนไม่บริสุทธิ์ (Metallic impurities)
- 2. ผลึกสารที่บกพร่อง (Crystalline defects)



รูป 2.11 การเกิดพาหะและการรวมตัวของพาหะ โดยระดับพลังงาน Deep level ขณะไบอัสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาเหตุที่ทำให้ผลึก ไม่สมบูรณ์ของทั้งสองชนิดนั้นจะเกิดมีระดับพลังงานที่เรียกว่าที่พัคอิเล็กตรอน (Deep level) แสดงตัวเป็นศูนย์กลางการรวมตัว(Recombination-Center) เกิดขึ้นในช่องว่างตรงกลางของแถบพลังงาน โดยมันจะเป็นที่พัคของพาหะอิเล็กตรอน หรือ โฮล ในขณะที่มันเคลื่อนที่ระหว่างแถบวาเลนซ์(Valance band) และแถบความนำทำให้เกิด “ การเกิดของพาหะ” หรือ “ การรวมพาหะ” (Combination) ได้



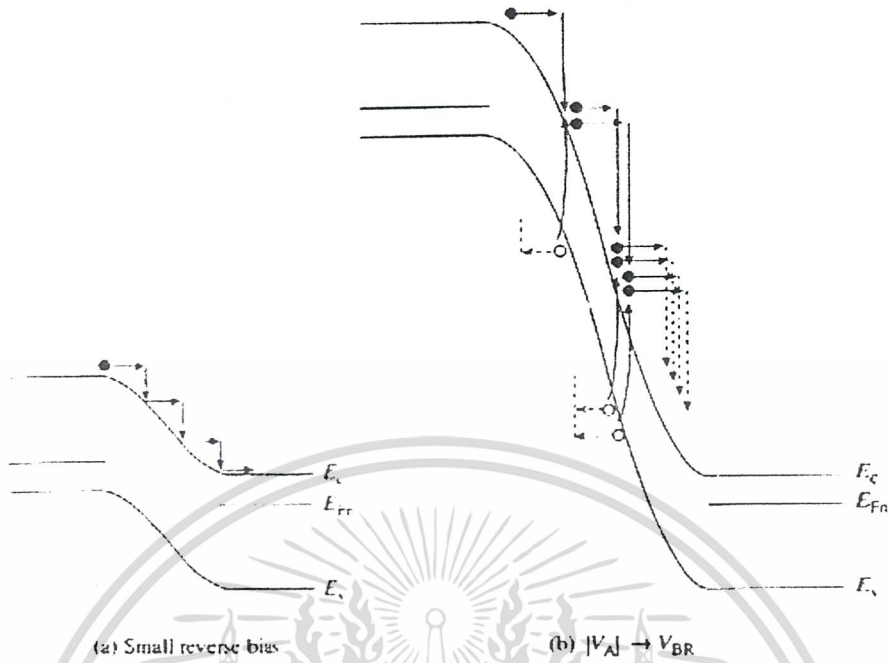
รูป 2.12 การเกิดพาหะและการรวมตัวของพาหะ โดยระดับพลังงาน Deep level ขณะ ไบอัสกลับ

2.2.6 ปปรากฏการณ์พังทะลายที่รอยต่อพี-เอ็น

ถึงแม้ว่าช่วงแรงดันพัง (Breakdown voltage) จะเป็นช่วงที่มีกระแสไหลอย่างมากแต่ก็ไม่ได้หมายความว่าทำให้ไดโอดเสียหายเสมอไป เพราะมีการจำกัดกระแสที่ไหลโดยหลีกเลี่ยงอุณหภูมิที่สูงๆ แต่ก็หลีกเลี่ยงการเกิดการพังทะลายไม่ได้เมื่อป้อนไบอัสกลับค่าที่สูงค่าๆหนึ่ง โดยจะแบ่งเป็น 2 แบบคือ

1.การพังทะลายแบบอะวอลานซ์ (Avalance Breakdown)

การพังทะลายแบบนี้ขึ้นอยู่กับค่าแรงดันไบอัสกลับ (Reverse - Biased ; V_{BR}) โดยกระแสนย้อนกลับ (Reverse current)จะเกิดจากพาหะส่วนน้อยที่อยู่บริเวณปลดพาหะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าภายในรอยต่อพี-เอ็น เองจนกระทั่งทำให้เกิดการชนกันของอิเล็กตรอน กับอะตอมที่อยู่ข้างเคียงไปเรื่อยๆเกิดเป็นอิเล็กตรอนอิสระขึ้นใหม่ทวีคูณอย่างนี้ไปเรื่อยๆ



รูป 2.13 การเกิดการพังทลายแบบอะวาลานซ์ (Avalanche Breakdown)

โดยค่ากระแสที่เพิ่มขึ้นด้วยพหุคูณเรียกว่า Multiplication Factor ; M หาได้จาก

สมการ

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{VA}{VB}\right)^n} \tag{2.39}$$

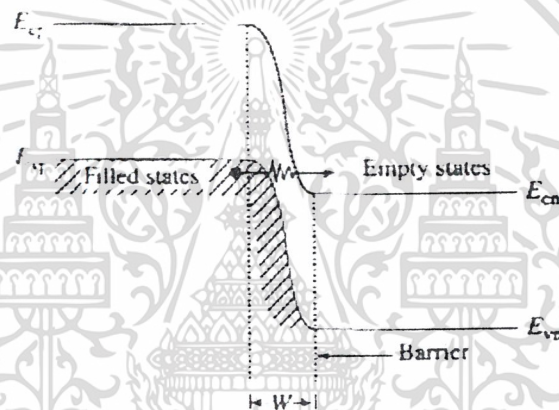
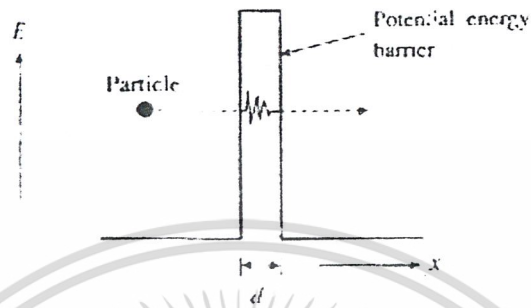
- โดยที่ n = 3,6 สำหรับสารกึ่งตัวนำเยอรมาเนียมชนิดเอ็นและพี
- N = 4,2 สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดซิลิกอนชนิดเอ็นและพี
- VA = แรงดันไบอัสย้อนกลับ
- VB = แรงดันย้อนกลับที่จะทำให้เกิดการพังทลายแบบอะวาลันซ์

2.การพังทลายแบบซีเนอร์ (Zener Breakdown)

การพังทลายแบบซีเนอร์เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การทันแนลลิง (Tunneling) เพราะเมื่อป้อนแรงดันไบอัสกลับ แล้วจะเกิดปรากฏการณ์ที่อิเล็กตรอน เคลื่อนที่ทะลุผ่านกำแพงศักย์ การพังทลายแบบนี้แม้จะป้อนแรงดันไบอัสกลับ ไม่สูงนักก็จะทำให้เกิดการพังทลายได้เพราะ 2 สาเหตุ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณรอยต่อมีค่าความหนาแน่นของสารเจือที่สูงอยู่แล้ว และเนื่องจากบริเวณปลอดพาหะแคบมากนั่นเอง โดยค่าสนามไฟฟ้าบริเวณปลอดพาหะจะมีค่าสูงตามไปด้วยทำให้ยิ่งไปเร่งอิเล็กตรอนให้วิ่งด้วยความเร็วสูงทะลุผ่านกำแพงศักย์ เกิดเป็นกระแสไหลเป็นจำนวนมากๆได้



รูป 2.14 การเกิดการพังทะลายแบบซีเนอร์ (Zener Breakdown)

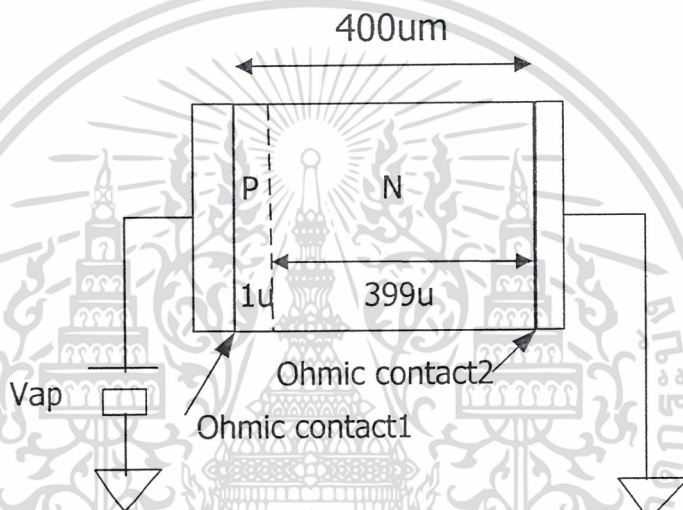
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบโปรแกรมคำนวณแบบ 1 มิติ

3.1 จำลองไดโอดรอยต่อพีเอ็น

ในการจำลองการออกแบบไดโอดรอยต่อ เราจะทำการจำลองไดโอดโดยกำหนดรูปแบบเป็นลักษณะดังรูป 3.1 เพื่อกำหนดขอบเขตการคำนวณซึ่งรูปเป็นการจำลอง ไดโอดรอยต่อพีเอ็นที่มีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหนา 400 ไมครอน และมีการแพร่อะตอมสารเจือเพื่อสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่มีความหนา 1 ไมครอน



รูป 3.1 แบบจำลองไดโอดรอยต่อพีเอ็นแบบ 1 มิติ

การออกแบบแบบจำลองดังรูปนี้ จะเห็นว่า เราจะพิจารณาคำนวณค่าเป็นเส้นตรง 1 มิติ โดยมีจุดต่างๆ ที่ต้องคำนวณค่าต่างๆ เป็นแนวยาว ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในหัวข้อการออกแบบความกว้างเมฆและมีบริเวณที่สนใจพิจารณาคือ บริเวณ Ohmic contact 1, Ohmic contact 2 และบริเวณรอยต่อ ดังนั้นในขั้นตอนการออกแบบความกว้างเมฆ บริเวณดังกล่าวต้องมีการออกแบบความกว้างเมฆให้มีความละเอียดสูงสุด

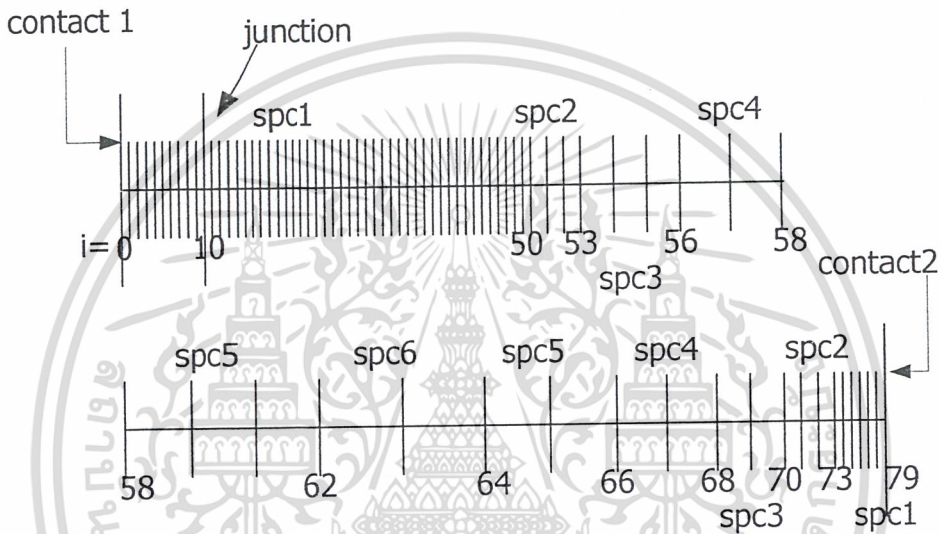
3.2 การออกแบบความกว้างของเมฆ

ในการออกแบบความกว้างเมฆนั้นมีความสำคัญกับการคำนวณของโปรแกรมอย่างมาก โดยในขั้นตอนของการออกแบบกำหนดความกว้างเมฆนั้นจะเห็นว่า บริเวณที่เราสนใจพิจารณาคือ สมบัติต่างๆ เป็นพิเศษจะออกแบบให้มีความละเอียดสูงสุด ซึ่งได้แก่ บริเวณ contact 1, contact 2

และ บริเวณรอยต่อพี-เอ็น ทั้งนี้ก็เพื่อให้ได้ค่าต่างๆที่มีความละเอียดสูงที่สุดและเมื่อทำการออกแบบครบทุกเมชแล้วผลรวมของระยะทุกเมชจะต้องมีค่าเท่ากับขนาดของอุปกรณ์ที่เราทำการจำลอง

โดยเราจะออกแบบให้มีความกว้างเมชมีค่าต่างๆ ดังนี้

- spc1 = 0.1 um spc2 = 0.4 um spc3 = 1.6 um
- spc4 = 6.4 um spc5 = 25.6 um spc6 = 102.4 um



รูป 3.2 การออกแบบเมชที่ใช้ในการคำนวณ

3.3 การออกแบบการคำนวณในโปรแกรม

ในขั้นตอนนี้เป็นการสมการที่ใช้ใน โปรแกรมจำลองการทำงานของไดโอดรอยต่อพีเอ็นแบบ 1 มิติ เพื่อหาค่าศักดาไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นพาหะและค่าความหนาแน่นกระแส โดยค่าศักดาไฟฟ้าพิจารณาจากสมการปัวซอง ความหนาแน่นพาหะพิจารณาจากสมการความต่อเนื่องของพาหะ และสำหรับค่าความหนาแน่นกระแสจะหาได้จากค่าศักดาไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นพาหะที่คำนวณได้

เริ่มต้นด้วยการพิจารณาสมการพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำ โดยเริ่มตั้งแต่พิจารณาที่มาค่าของศักดาไฟฟ้าจะพิจารณาจากสมการของปัวซอง และความหนาแน่นพาหะ พิจารณาจากสมการความต่อเนื่องของพาหะ ซึ่งพิสูจน์ได้ดังนี้

สมการปัวซอง (Poisson's Equation)

สมการข้อที่ 3 ของ Maxwell $div\vec{D} = \rho$

ความสัมพันธ์ระหว่างระยะกระจัดและสนามไฟฟ้า $\vec{D} = \epsilon \bullet \vec{E}$
 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า $\vec{E} = -grad \Psi$
 แทนค่าจะได้

$$div(\epsilon \bullet grad \Psi) = -\rho$$

$$div(grad \Psi) = \frac{q}{\epsilon} \bullet (n - p - C)$$

ซึ่ง $C = Nd - Na$

สมการความต่อเนื่องของพาหะ (Carrier Continuity Equations)

พิจารณาความหนาแน่นกระแสจากสมการ Maxwell นี้

สมการข้อที่ 1 ของ Maxwell $div \text{rot } \vec{H} = div \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$

แยกความหนาแน่นกระแส ออก 2 ส่วน เป็นดังนี้

$$\vec{J} = \vec{J}_n + \vec{J}_p$$

และ $\rho = q(p - n + C)$,

ดังนั้นแทนค่า สมการของ Maxwell จึงได้เป็น

$$div(\vec{J}_n + \vec{J}_p) + q \frac{\partial}{\partial t}(p - n) = 0.$$

จะได้สมการความต่อเนื่องของพาหะทั้งสองดังนี้

$$div \vec{J}_n - q \frac{\partial n}{\partial t} = q R \quad \text{สมการความต่อเนื่องสำหรับอิเล็กตรอน}$$

$$div \vec{J}_p + q \frac{\partial p}{\partial t} = -q R \quad \text{สมการความต่อเนื่องสำหรับโฮล}$$

ได้สมการความหนาแน่นกระแสเป็นดังนี้

$$\vec{J}_n = -q (\mu_n n \text{ grad } \Psi - D_n \text{ grad } n) \quad \text{สำหรับอิเล็กตรอน}$$

$$\vec{J}_p = -q (\mu_p p \text{ grad } \Psi + D_p \text{ grad } p) \quad \text{สำหรับโฮล}$$

3.3.1 สร้างสมการที่ใช้คำนวณ

โดยในการออกแบบการคำนวณใน โปรแกรมจะเป็นลักษณะสามสมการและหาสามตัว

แปรที่ไม่ทราบค่า โดยตัวแปร F1, F2 และ F3 และตัวแปร derivative ของ F1, F2 และ F3 เป็นตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แปรที่ทราบค่าและจะใช้วิธีการตั้งเมตริกคำนวณหาค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าทั้งสามตัวแปรซึ่งในที่นี้คือ $\delta\psi(i), \delta n(i), \delta p(i)$

สามารถแสดงสมการเพื่อหาค่าตัวแปร F1, F2 และ F3 และตัวแปร derivative ของ F1, F2 และ F3 รวมถึงการหาค่า $\delta\psi(i), \delta n(i), \delta p(i)$ ดังนี้

$$F_1 = \lambda^2 \cdot \left(\frac{1}{h_i} \cdot (\psi_{i+1} - \psi_i) - \frac{1}{h_{i-1}} \cdot (\psi_i - \psi_{i-1}) \right) \cdot \frac{2}{h_{i-1} + h_i} - n_i + p_i + C_i = 0$$

$$F_2 = n_{i-1} \cdot D_{n|_{i-1/2}} \cdot B_4 \left(\frac{\psi_{i-1} - \psi_i}{U_t} \right) \cdot \frac{1}{h_{i-1}} - n_i \cdot D_{n|_{i-1/2}} \cdot B_3 \left(\frac{\psi_i - \psi_{i-1}}{U_t} \right) \cdot \frac{1}{h_{i-1}}$$

$$- n_i \cdot D_{n|_{i+1/2}} \cdot B_2 \left(\frac{\psi_i - \psi_{i+1}}{U_t} \right) \cdot \frac{1}{h_i} + n_{i+1} \cdot D_{n|_{i+1/2}} \cdot B_1 \left(\frac{\psi_{i+1} - \psi_i}{U_t} \right) \cdot \frac{1}{h_i}$$

$$- R_i \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2} = 0$$

$$F_3 = p_{i-1} \cdot D_{p|_{i-1/2}} \cdot B_3 \left(\frac{\psi_i - \psi_{i-1}}{U_t} \right) \cdot \frac{1}{h_{i-1}} - p_i \cdot D_{p|_{i-1/2}} \cdot B_4 \left(\frac{\psi_{i-1} - \psi_i}{U_t} \right) \cdot \frac{1}{h_{i-1}}$$

$$- p_i \cdot D_{p|_{i+1/2}} \cdot B_1 \left(\frac{\psi_{i+1} - \psi_i}{U_t} \right) \cdot \frac{1}{h_i} + p_{i+1} \cdot D_{p|_{i+1/2}} \cdot B_2 \left(\frac{\psi_i - \psi_{i+1}}{U_t} \right) \cdot \frac{1}{h_i}$$

$$- R_i \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2} = 0$$

โดยที่ R_i มีค่าเป็น

$$R_i = \frac{n_i \cdot p_i - n_i^2}{\tau_i \cdot (n_i + p_i + 2 \cdot n_i)}$$

จัดรูป derivative ของ F1, F2 และ F3 เทียบ ψ, n, p เป็นดังนี้ เพื่อตั้งเมตริกหา

$$\delta\psi(i), \delta n(i), \delta p(i)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial F_1}{\partial \psi} = -\lambda^2 \cdot \left(\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_{i-1}} \right) \cdot \left(\frac{2}{h_i + h_{i-1}} \right)$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial n} = -1$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial p} = 1$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_2}{\partial \psi} = & -n_{i-1} \cdot D_{n_{i-1/2}} \cdot \frac{dB_4}{dX_4} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{1}{h_{i-1}} - n_i \cdot D_{n_{i-1/2}} \cdot \frac{dB_3}{dX_3} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{1}{h_{i-1}} \\ & - n_i \cdot D_{n_{i+1/2}} \cdot \frac{dB_2}{dX_2} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{1}{h_i} - n_{i+1} \cdot D_{n_{i+1/2}} \cdot \frac{dB_1}{dX_1} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{1}{h_i} \\ & - 0 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial n} = -D_{n_{i-1/2}} \cdot B_3 \cdot \frac{1}{h_{i-1}} - D_{n_{i+1/2}} \cdot B_2 \cdot \frac{1}{h_i} - \frac{\partial R_i}{\partial n} \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2}$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial p} = \frac{\partial R_i}{\partial p} \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_3}{\partial \psi} = & p_{i-1} \cdot D_{p_{i-1/2}} \cdot \frac{dB_3}{dX_3} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{1}{h_{i-1}} + p_i \cdot D_{p_{i-1/2}} \cdot \frac{dB_4}{dX_4} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{1}{h_{i-1}} \\ & + p_i \cdot D_{p_{i+1/2}} \cdot \frac{dB_1}{dX_1} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{1}{h_i} + p_{i+1} \cdot D_{p_{i+1/2}} \cdot \frac{dB_2}{dX_2} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{1}{h_i} \\ & - 0 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial n} = \frac{\partial R_i}{\partial n} \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2}$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial p} = -D_{p_{i-1/2}} \cdot B_4 \cdot \frac{1}{h_{i-1}} - D_{p_{i+1/2}} \cdot B_1 \cdot \frac{1}{h_i} - \frac{\partial R_i}{\partial p} \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตั้งเมตริก เพื่อหาค่าของ $\delta\psi(i), \delta n(i), \delta p(i)$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \psi} & \frac{\partial F_1}{\partial n} & \frac{\partial F_1}{\partial p} \\ \frac{\partial F_2}{\partial \psi} & \frac{\partial F_2}{\partial n} & \frac{\partial F_2}{\partial p} \\ \frac{\partial F_3}{\partial \psi} & \frac{\partial F_3}{\partial n} & \frac{\partial F_3}{\partial p} \end{bmatrix}^k \cdot \begin{bmatrix} \delta\psi^k \\ \delta n^k \\ \delta p^k \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} F_1(\psi^k, n^k, p^k) \\ F_2(\psi^k, n^k, p^k) \\ F_3(\psi^k, n^k, p^k) \end{bmatrix}$$

โดยในการคำนวณหาค่า $\delta\psi(i), \delta n(i), \delta p(i)$ มีเงื่อนไขว่าค่า $\delta\psi(i), \delta n(i), \delta p(i)$ ต้องน้อยกว่า 1×10^{-10}

3.3.2 การสเกลตัวแปร (Scaling factors)

ในการคำนวณค่าต่างๆ ในโปรแกรม ค่าที่ใช้ในการคำนวณต้องเป็นค่าที่ถูกสเกล(scaled value) โดยตัวแปรต่างๆ จะถูกทำให้เป็นค่าที่ถูกสเกลโดยหารด้วยตัวแปรสเกล (scaling factor เช่น x_0, C_0, D_0 เป็นต้น) โดยมีหลักการคือ เลือกราคาตัวแปรสูงสุดเป็นค่าของตัวแปรสเกล ทั้งนี้เพื่อให้ได้ค่าที่มีค่าน้อยๆ

ไปทำการคำนวณในโปรแกรม

$$x_0 = \max |\vec{x} - \vec{y}|, \vec{x}, \vec{y} \in D(\text{สเกลความยาว}), (cm)$$

$$\psi_0 = \frac{k \cdot T}{q} (\text{สเกลศักย์ไฟฟ้า}), (volt)$$

$$C_0 = \max |C(\vec{x})|, \vec{x} \in D(\text{สเกลความเข้มข้นการไหล}), (cm^{-3})$$

$$D_0 = \max |D_n(\vec{x}), D_p(\vec{x})|, \vec{x} \in D(\text{สเกลความคล่องตัวของพาหะ}), (cm^2 / sec)$$

$$\lambda^2 = \frac{\psi_0 \cdot \epsilon_s}{x_0^2 \cdot q \cdot C_0} (\text{สเกลสมการรั้งของ})$$

$$\tau_0 = \frac{x_0^2}{D_0} (\text{สเกลค่าเวลชีวิตของพาหะ}), (sec)$$

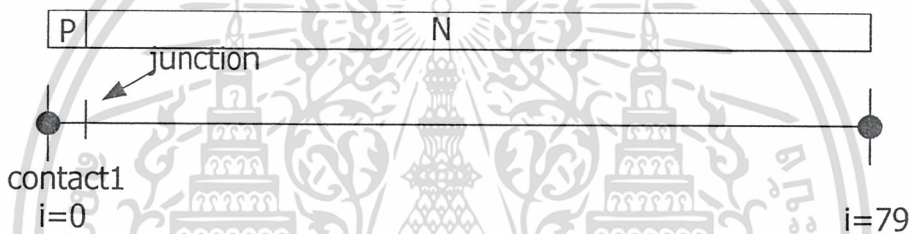
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_0 = \frac{D_0 \cdot C_0}{X_0^2} (\text{สเกลอัตรากรเกิดและจมตัว}), (cm^{-3} \cdot sec^{-1})$$

$$j_0 = \frac{-q \cdot D_0 \cdot C_0}{X_0} (\text{สเกลค่าความหนาแน่นกระแส}) \left(\frac{A}{cm^2} \right)$$

3.3.3 กำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions)

เป็นการกำหนดค่า ψ, n, p เริ่มต้นให้กับเมชแรก ($i=0$) และเมชสุดท้าย ($i=79$) ซึ่งเป็นเมชที่ทราบค่า ψ, n, p ที่แน่นอนตามชนิดสารกึ่งตัวนำ โดยจากรูปจะเห็นว่า ที่เมชแรกคือที่คอนแทก 1 ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี สำหรับที่เมชสุดท้ายคือที่คอนแทก 2 ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยค่านี้ใช้ค่าเป็นค่าตั้งต้นให้กับการคำนวณเมชภายใน (inner mesh : mesh1-mesh78)



รูป 3.3 การออกแบบการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

ที่โหนดมีคอนแทก 1 (At ohmic contact1) มีการกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตดังนี้

$$\psi_{contact1} = \psi_{builtinpotential} + V_{ap}$$

$$p_{contact1} = \frac{\sqrt{C^2 + 4 \cdot n_I^2} - C}{2}, C = -N_a$$

$$n_{contact1} = \frac{n_I^2}{p_{contact1}}$$

$$\text{โดยที่ } \psi_{builtinpotential} = -\frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{N_a}{2 \cdot n_I} + \sqrt{\left(\frac{N_a}{2 \cdot n_I} \right)^2 + 1} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่โหนดมีคอนแทก 2 (At ohmic contact2) มีการกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตดังนี้

$$\psi_{\text{contact 2}} = \psi_{\text{builtinpotential}}$$

$$n_{\text{contact 2}} = \frac{\sqrt{C^2 + 4 \cdot n_I^2} + C}{2}, C = N_d$$

$$p_{\text{contact 2}} = \frac{n_I^2}{n_{\text{contact 2}}}$$

$$\text{โดยที่ } \psi_{\text{builtinpotential}} = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{N_d}{2 \cdot n_I} + \sqrt{\left(\frac{N_d}{2 \cdot n_I} \right)^2 + 1} \right)$$

3.3.4 การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial conditions)

เป็นการกำหนดค่าเริ่มต้นของค่า $\psi(i), n(i), p(i)$ ซึ่งเป็นค่าที่เราต้องการคำนวณหาตัวเอง ดังนั้น การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นก็คือการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปร $\psi(i), n(i), p(i)$ ก่อนที่จะทำการคำนวณซ้ำเพื่อหาค่าดังกล่าวในโปรแกรม โดยค่าเงื่อนไขเริ่มต้นเป็นดังนี้

$$\psi(i) = \psi_{\text{contact 1}}, n(i) = n_{\text{contact 1}}, p(i) = p_{\text{contact 1}} \quad \text{ในบริเวณพี}$$

$$\psi(i) = \psi_{\text{contact 2}}, n(i) = n_{\text{contact 2}}, p(i) = p_{\text{contact 2}} \quad \text{ในบริเวณเอ็น}$$

3.3.5 การคำนวณความหนาแน่นกระแส (Current density)

หลังจากโปรแกรมคำนวณค่า $\psi(i), n(i), p(i)$ เสร็จแล้ว การคำนวณในส่วน of ค่าความหนาแน่นกระแสก็จะนำค่า $\psi(i), n(i), p(i)$ มาคำนวณหาค่าความหนาแน่นกระแส โดยมีที่มาจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส และ Quasi-Fermi potential เป็นดังสมการทั่วไปของความหนาแน่นกระแสดังนี้

$$\vec{j}_n = -q \left(\mu_n n \text{ grad } \psi - D_n \text{ grad } n \right) \quad \text{สำหรับอิเล็กตรอน}$$

$$\vec{j}_p = -q \left(\mu_p p \text{ grad } \psi + D_p \text{ grad } p \right) \quad \text{สำหรับโฮล}$$

และสามารถเขียนได้อีกรูปแบบหนึ่งดังนี้

$$J_n = -q \cdot \frac{q}{k \cdot T} \cdot D_n \cdot n \cdot \text{grad } \varphi_n \text{ สำหรับอิเล็กตรอน}$$

$$J_p = -q \cdot \frac{q}{k \cdot T} \cdot D_p \cdot p \cdot \text{grad } \varphi_p \text{ สำหรับโฮล}$$

สำหรับในการคำนวณความหนาแน่นกระแสทั้ง J_n และ J_p จะคำนวณหาค่าที่กึ่งกลางระหว่างเมชเมื่อแทนค่าต่างๆ แล้วจะได้เป็นสมการสมการความหนาแน่นกระแสที่จะใช้ในการคำนวณในโปรแกรมดังนี้

$$J_n \left(i + \frac{1}{2} \right) = D_n |_{i+1/2} \cdot n \left(i + \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{\varphi_n(i+1) - \varphi_n(i)}{h_i}$$

$$J_p \left(i + \frac{1}{2} \right) = D_p |_{i+1/2} \cdot p \left(i + \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{\varphi_p(i+1) - \varphi_p(i)}{h_i}$$

โดย $n \left(i + \frac{1}{2} \right)$ and $p \left(i + \frac{1}{2} \right)$, มีค่าตามสมการ

$$n \left(i + \frac{1}{2} \right) = \frac{n(i)}{1 + \exp \left(\frac{\psi(i) - \psi(i+1)}{2 \cdot U_t} \right)} + \frac{n(i+1)}{1 + \exp \left(\frac{\psi(i+1) - \psi(i)}{2 \cdot U_t} \right)}$$

$$p \left(i + \frac{1}{2} \right) = \frac{p(i)}{1 + \exp \left(\frac{\psi(i+1) - \psi(i)}{2 \cdot U_t} \right)} + \frac{p(i+1)}{1 + \exp \left(\frac{\psi(i) - \psi(i+1)}{2 \cdot U_t} \right)}$$

สมการควอไซ - เฟอร์มิ (Quasi-Fermi potential หรือ Imref potential)

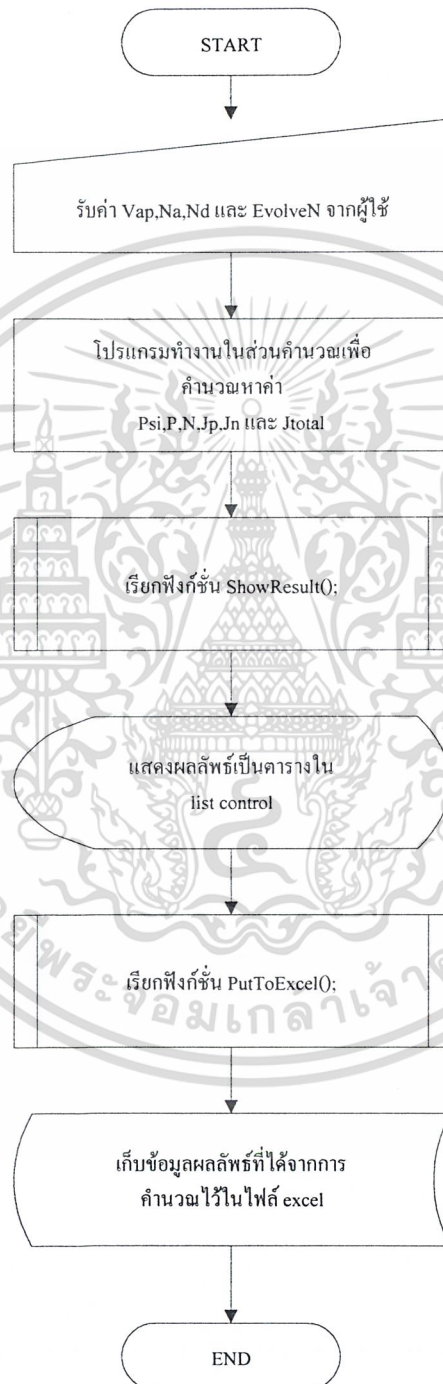
$$\varphi_n(i) = \psi(i) - \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{n(i)}{n_i} \right)$$

$$\varphi_p(i) = \psi(i) + \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{p(i)}{n_i} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

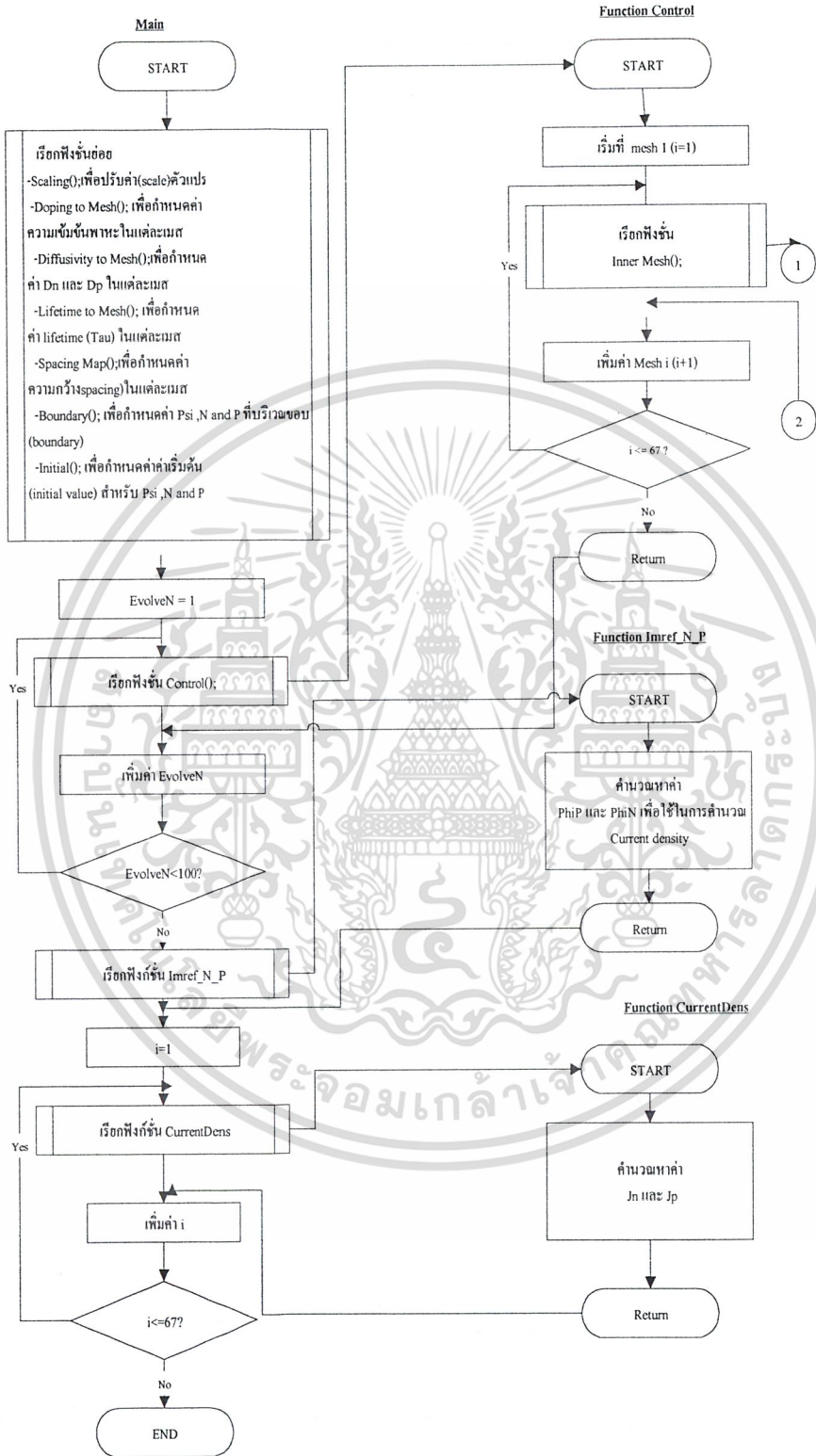
3.4 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

ลำดับการทำงานของโปรแกรม

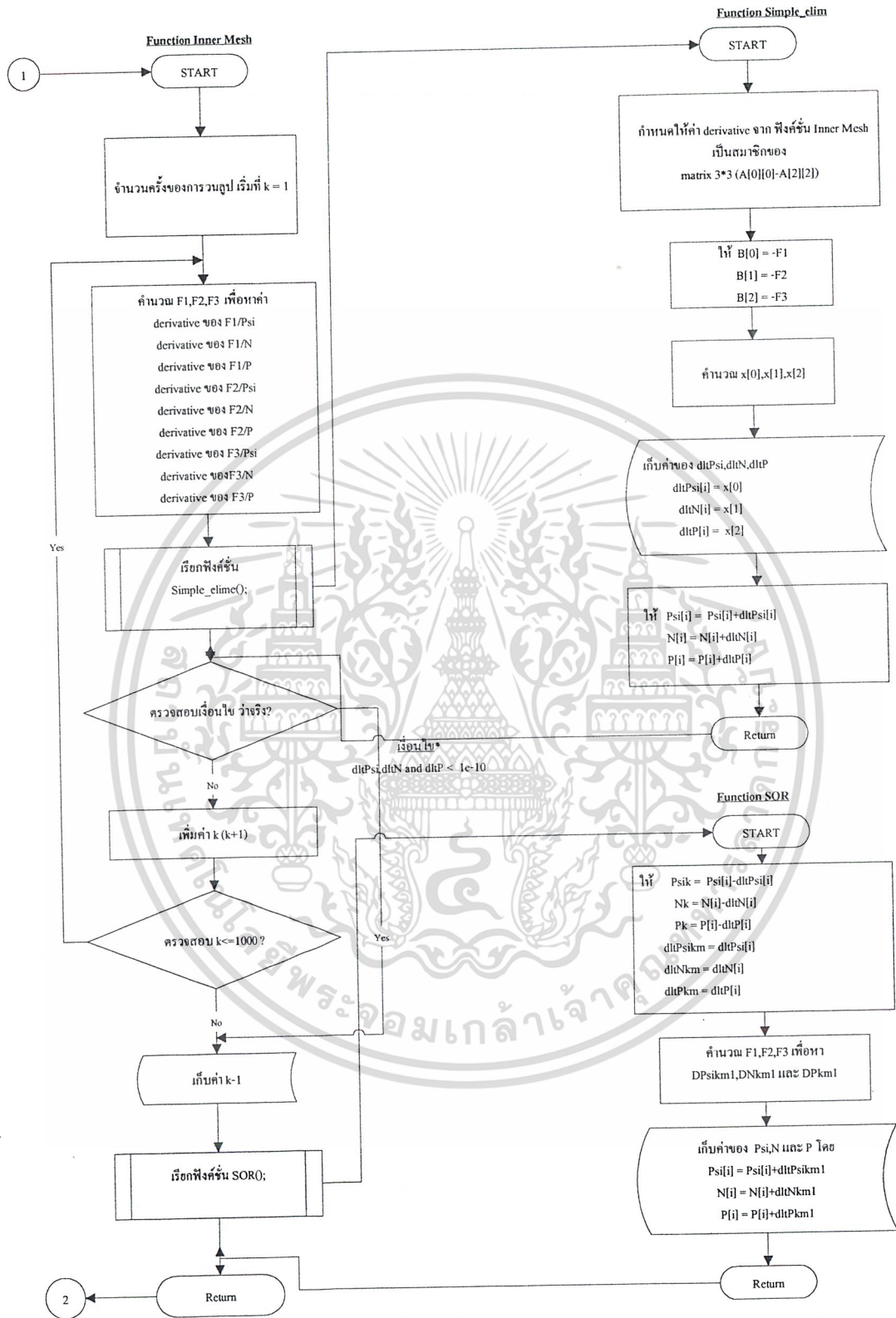


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับขั้นตอนการทำงานในส่วนการคำนวณค่า
Potential Concentration และ Current density



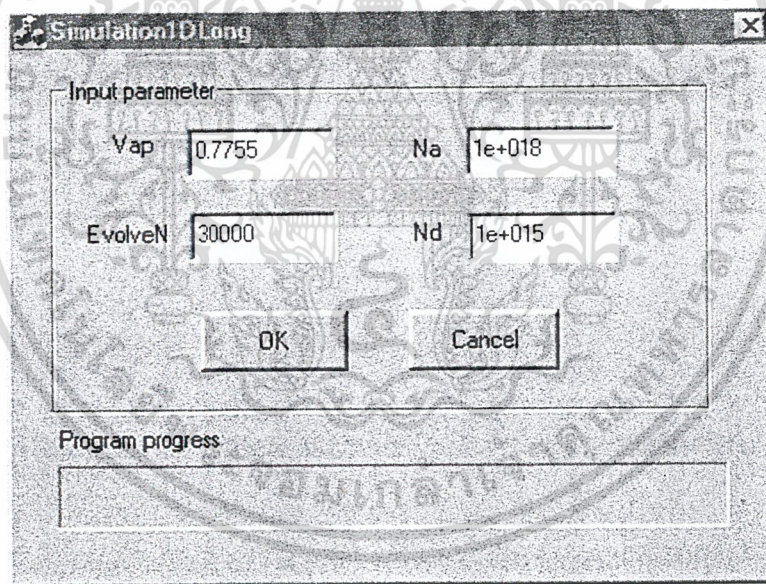
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 ใต้อะลือกของโปรแกรมแบบ 1 มิติ

ในการใช้งานโปรแกรม ได้มีการสร้างใต้อะลือกบนโปรแกรมวิซวลซีเป็นส่วนติดต่อกับผู้ใช้ (user interface) ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการใช้งานโปรแกรม เมื่อทำการรันโปรแกรม ใต้อะลือกนี้จะปรากฏขึ้น และสามารถเริ่มต้นการทำงาน โดยป้อนค่าอินพุตต่างๆ แล้วกดปุ่ม OK โปรแกรมก็จะเริ่มทำงานตามลำดับการทำงานของโปรแกรมที่แสดงไว้ใน flowchart ข้างต้น พร้อมทั้งนี้ โปรแกรมจะแสดงความก้าวหน้าของการทำงานที่ โพรเกรสบาร์ (progress bar) และเมื่อการทำงาน ของโปรแกรมเสร็จสิ้น โปรแกรมจะแสดงกรอบข้อความ (message box) โดยจะแจ้งให้ทราบว่า การทำงานของโปรแกรมเสร็จสิ้นแล้ว ผู้ใช้สามารถตรวจสอบผลลัพธ์ของโปรแกรมได้ที่ไฟล์ของ เอ็กซ์เซล ซึ่งในส่วนของผลลัพธ์ของ โปรแกรมจำลองการทำงานของไดโอดรอยต่อพีเอ็นแบบ 1 มิติ นี้ จะแยกออกเป็น 2 ไฟล์ โดยไฟล์แรกเป็นไฟล์ของค่าศักดาไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นของพาหะทั้งสองและค่าตรวจสอบความถูกต้องจากการคำนวณวนซ้ำ(k) อีกไฟล์จะเป็นไฟล์ของค่าความหนาแน่นกระแสโฮล ค่าความหนาแน่นกระแสอิเล็กตรอนและค่าความหนาแน่นกระแสรวม



รูป 3.4 ใต้อะลือกของโปรแกรมจำลองการทำงานของไดโอดรอยต่อพีเอ็นแบบ 1 มิติ

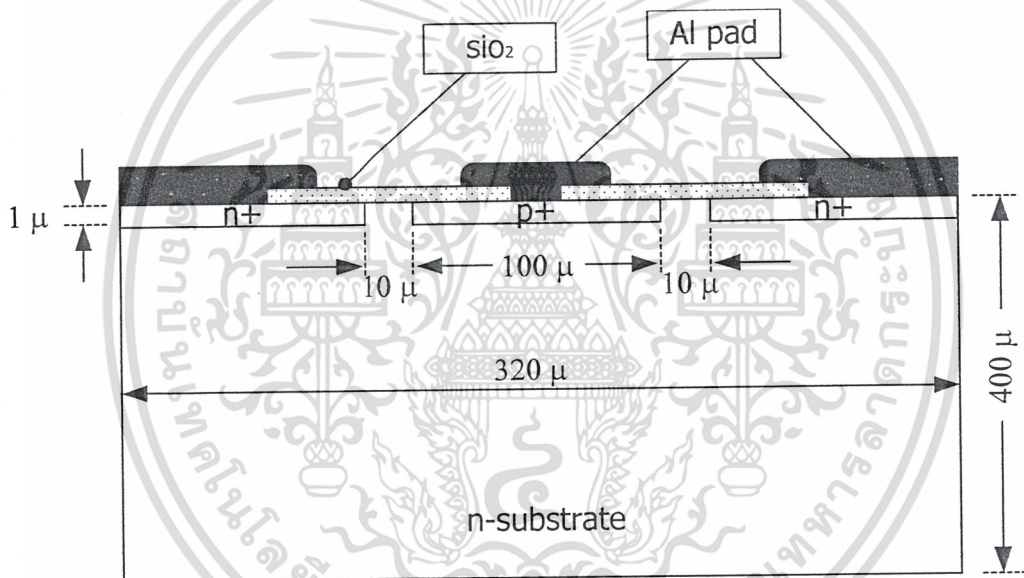
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การออกแบบโปรแกรมแบบคำนวณ 2 มิติ

4.1 จำลองไดโอดรอยต่อพีเอ็น

ในการออกแบบแบบจำลองของไดโอดรอยต่อพีเอ็นในแบบ 2 มิติจะมีลักษณะต่างไปจากแบบ 1 มิติ โดยในการจำลองแบบ 2 มิติจะมีการพิจารณาผลของโลหะและซิลิกอน ไดออกไซด์ที่อยู่บนผิวหน้าของไดโอดรอยต่อพีเอ็น นอกจากนี้การจำลองไดโอดรอยต่อพีเอ็นแบบ 2 มิตินี้ยังต้องมีการพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตเพิ่มเติมจากแบบ 1 มิติ รวมถึงการออกแบบเมซซิ่งมีการออกแบบในลักษณะแถวหลายๆแถวเป็นลักษณะสี่เหลี่ยมผืนผ้า



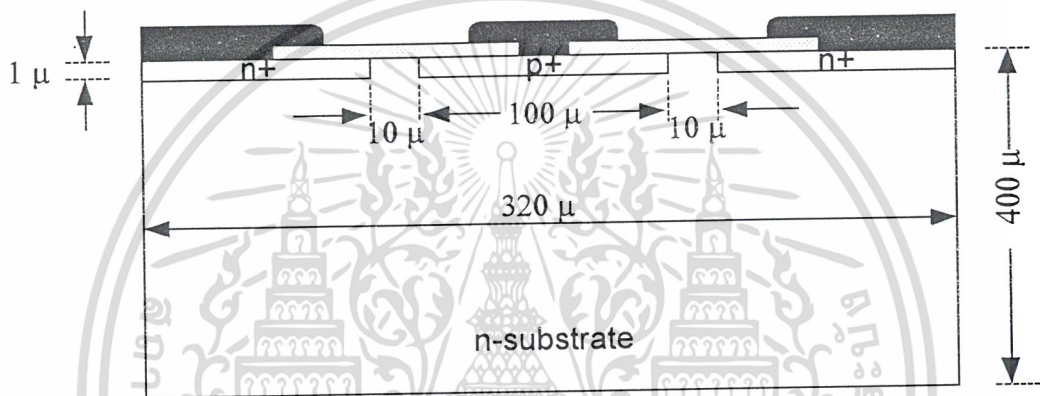
รูป 4.1 แบบจำลองไดโอดรอยต่อพีเอ็นแบบ 2 มิติ

ไดโอดรอยต่อพีเอ็นที่จะทำการจำลองนี้มีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นความหนา 400 ไมครอน และมีความลึกของส่วนพีและเอ็นพลัส 1 ไมครอน ยาว 100 ไมครอน ระยะของส่วนเอ็นระหว่างพีและเอ็นพลัสเป็น 10 ไมครอน ระยะของอะลูมิเนียมบนส่วนเอ็นพลัสจากขอบทั้งสองด้านเป็น 60 ไมครอน และระยะของอะลูมิเนียมบนส่วนพีเป็น 20 ไมครอน ความหนาของซิลิกอน ไดออกไซด์ 5000 อังสตรอม

4.2 การออกแบบความกว้างของเมฆ

การออกแบบความกว้างของเมฆในกรณี 2 มิติ ต้องมีการออกแบบความกว้างทั้งในทางแนวตั้งและแนวนอน โดยการกำหนดความกว้างนั้นก็ทำการกำหนดในลักษณะเดียวกันกับแบบ 1 มิติ กล่าวคือจะออกแบบบริเวณที่เป็นรอยต่อมีขนาดที่ละเอียดมากกว่า สำหรับการออกแบบในโปรแกรมนี้มีการกำหนดความกว้างแต่ละเมฆดังนี้

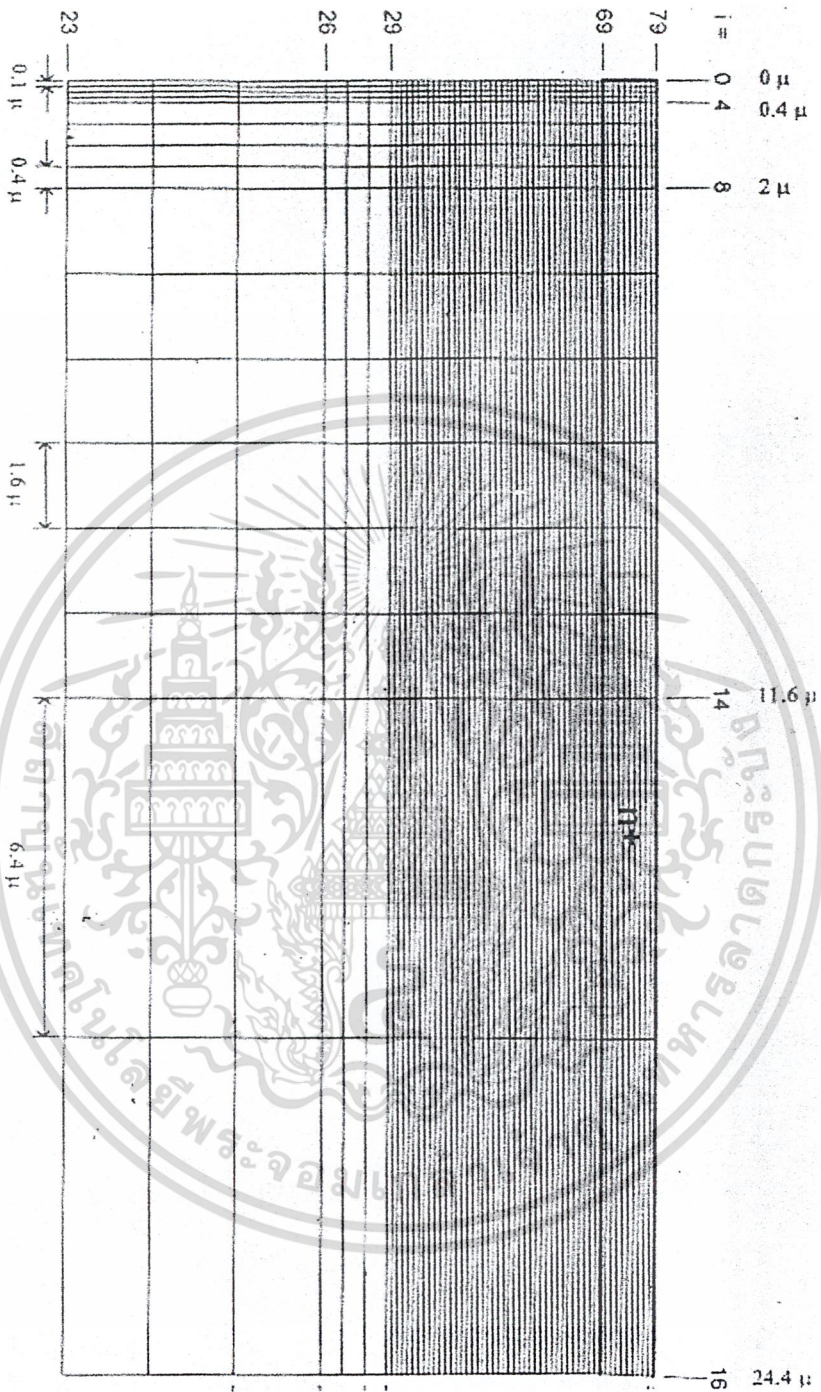
spc1 = 0.1 μm	spc2 = 0.4 μm	spc3 = 1.6 μm
spc4 = 6.4 μm	spc5 = 25.6 μm	spc6 = 102.4 μm



page 37	page 38	page 39	page 40	page 41	page 42
page 43					
page 44					
page 45					

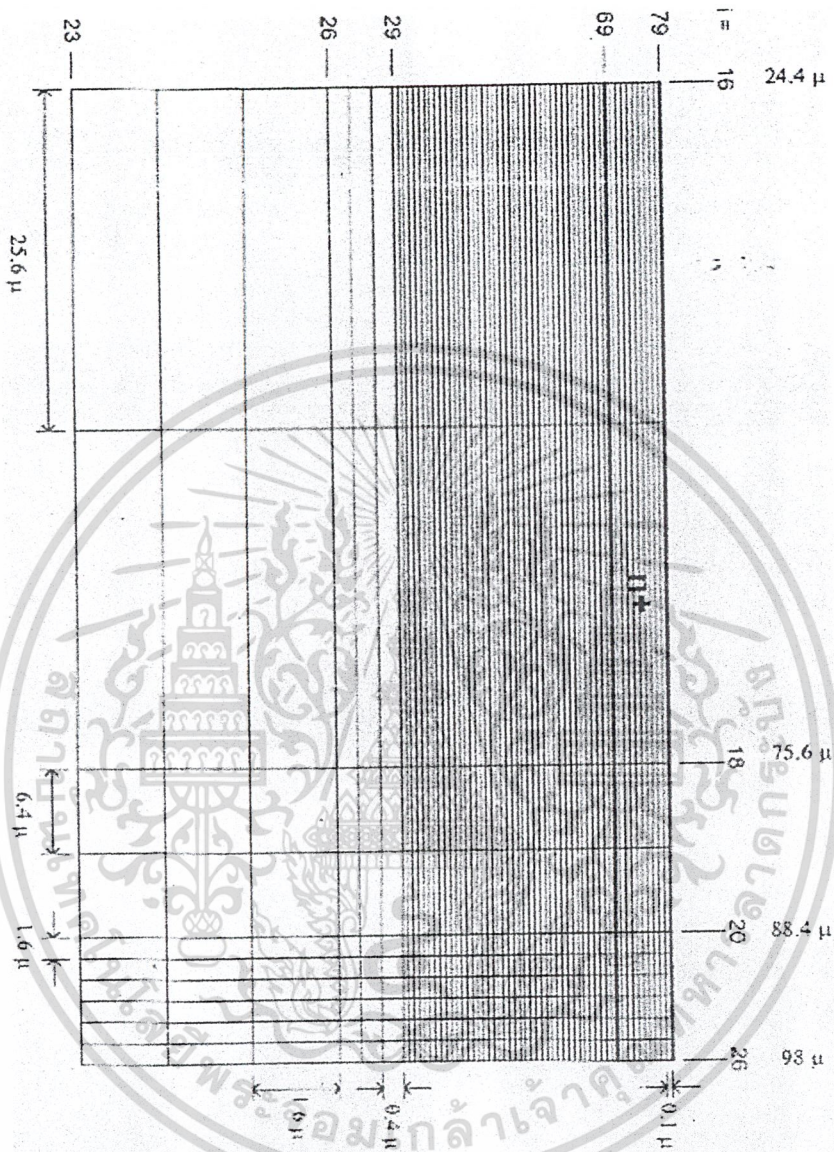
รูป 4.2 การออกแบบความกว้างของเมฆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



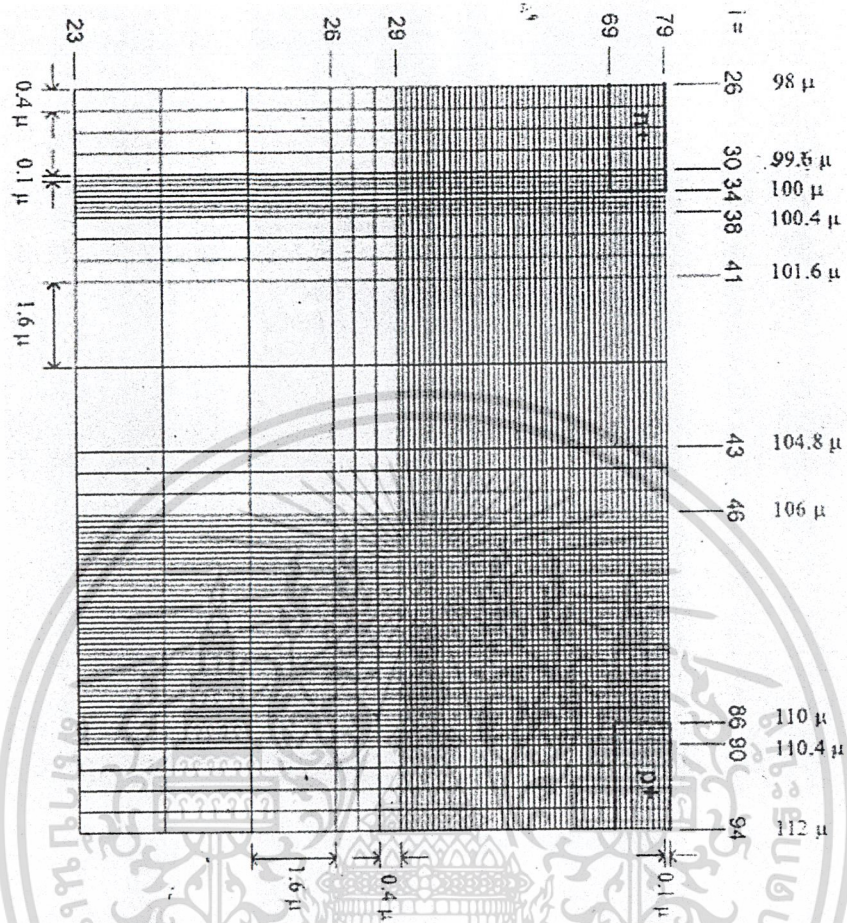
รูป 4.3 การออกแบบเมช i . เท่ากับ 0 ถึง 15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



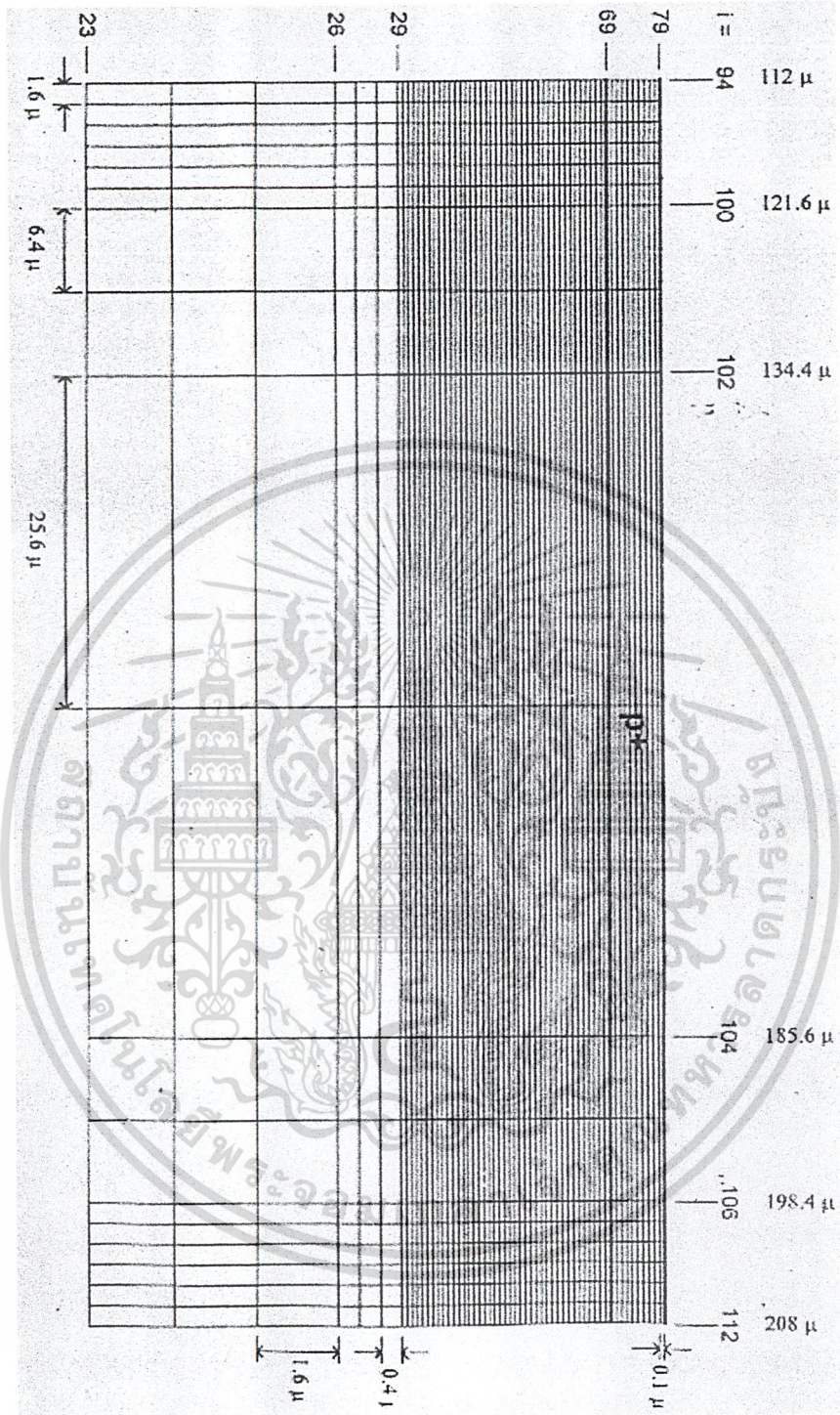
รูป 4.4 การออกแบบเมช i.เท่ากับ 16 ถึง 25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



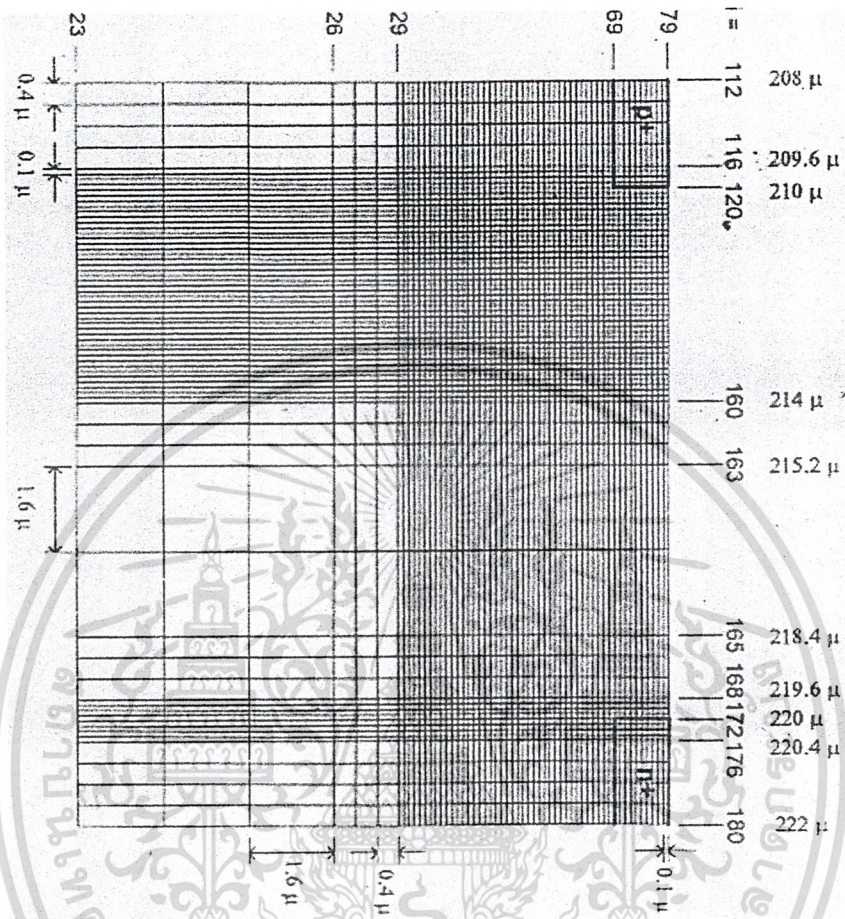
รูป 4.5 การออกแบบเมช i เท่ากับ 26 ถึง 93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



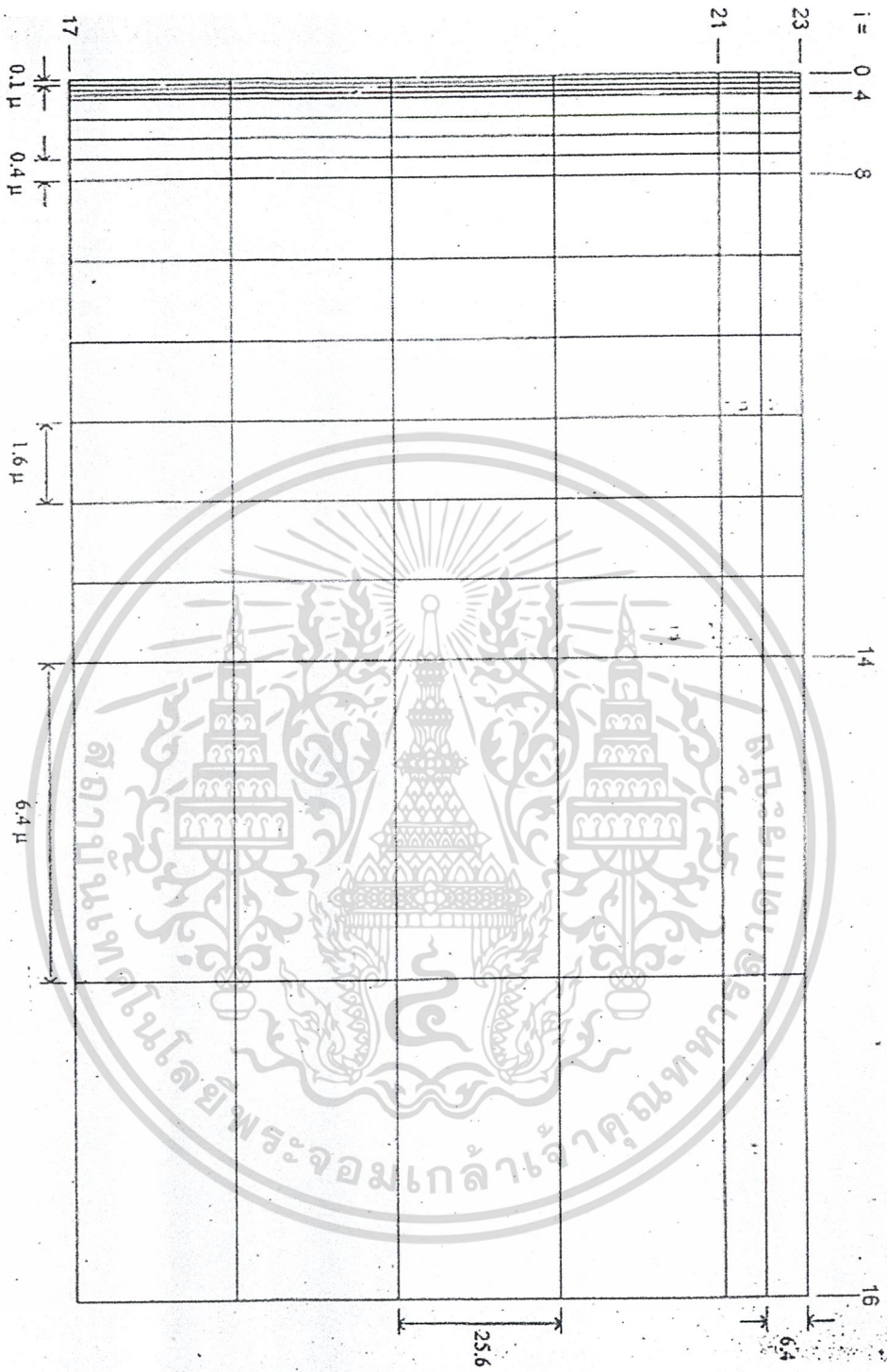
รูป 4.6 การออกแบบเมช i เท่ากับ 94 ถึง 111

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



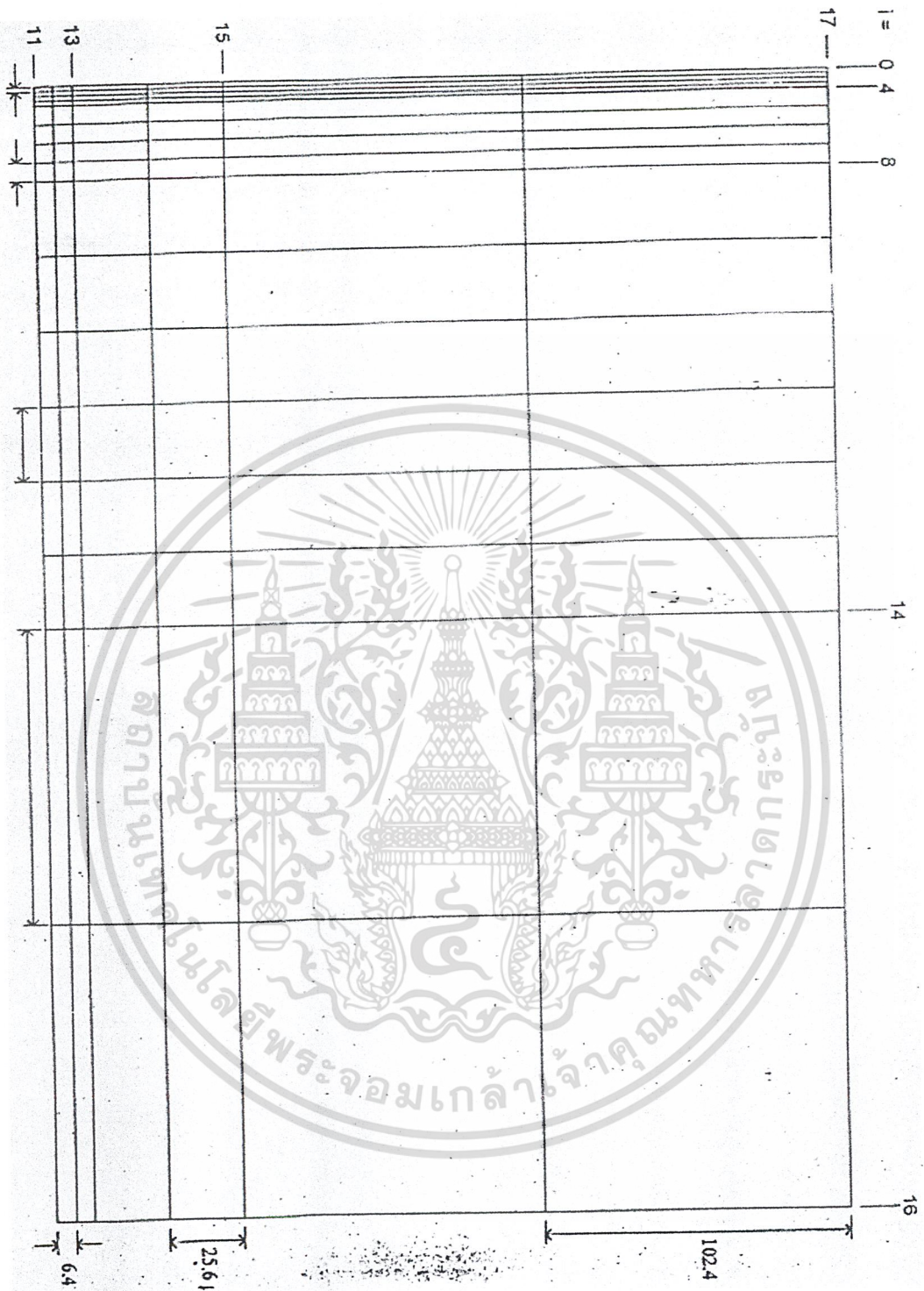
รูป 4.7 การออกแบบเมช i. เท่ากับ 112 ถึง 179

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



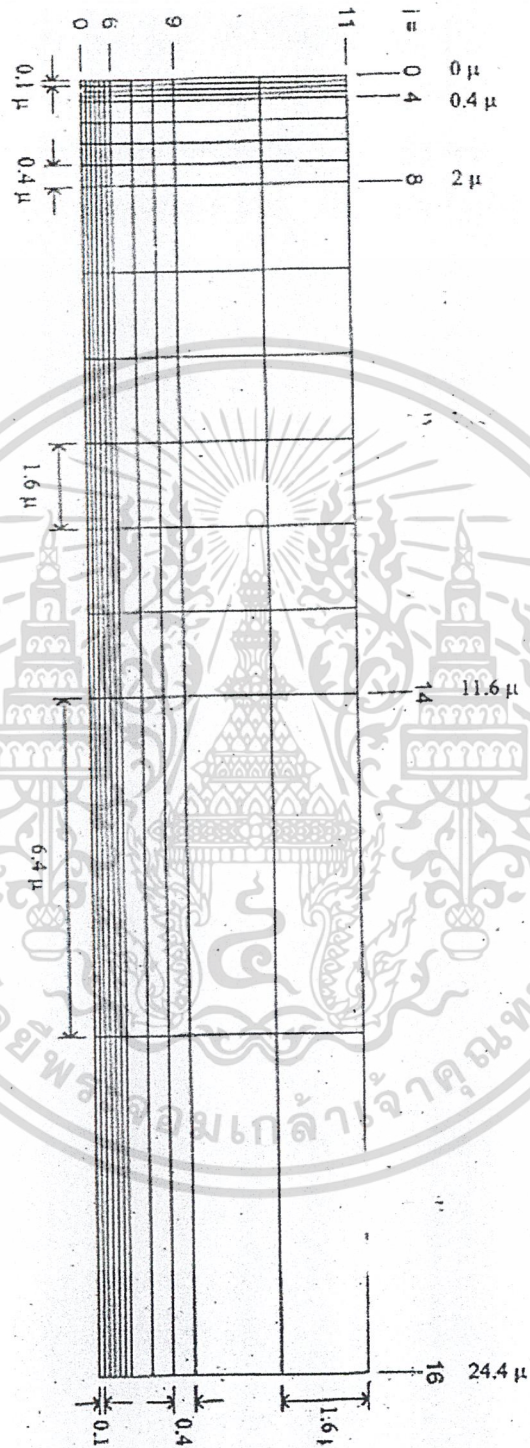
รูป 4.9 การออกแบบเมฆ j เท่ากับ 17 ถึง 22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.10 การออกแบบเมช j เท่ากับ 11 ถึง 16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.10 การออกแบบเมซจ เท้ากับ 0 ถึง 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การออกแบบการคำนวณในโปรแกรม

4.3.1 การสเกลตัวแปร (Scaling factors)

ในส่วนของการออกแบบการสเกลตัวแปรของโปรแกรมแบบ 2 มิตินี้ มีการใช้หลักการเดียวกันกับแบบ 1 มิติ กล่าวคือ จะใช้ค่าที่มีค่าสูงสุดของชนิดตัวแปรนั้นๆ เป็นค่าของตัวแปรสเกล เพื่อนำไปสเกลตัวแปรอื่นๆ ที่เป็นชนิดเดียวกันให้มีค่าปริมาณน้อยๆ ใช้ในการคำนวณในโปรแกรม ทั้งนี้เพราะการใช้ค่าที่มีต่างกันมากๆ จะทำให้เกิดการผิดพลาดได้

ตัวอย่างการกำหนดค่าตัวแปรสเกลเช่น

ค่าความยาว ใช้ค่าความหนาแผ่นซิลิกอนซึ่งเป็นค่าความยาวสูงสุดซึ่งเท่ากับ 400 ไมครอน

ค่าความหนาแน่นพาหะ ใช้ค่าความหนาแน่นโฮลซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ $1E18 \text{ 1/cm}^3$

ค่าความคล่องพาหะ ใช้ค่าความคล่องของอิเล็กตรอนซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ $30 \text{ cm}^2/\text{sec}$

และค่าอื่นๆ ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$x_0 = 0.04 \text{ cm}$$

$$\psi_0 = \frac{kT}{q} \text{ volt}$$

$$C_0 = Na = 1E18$$

$$D_0 = D_{nn} = 30 \text{ cm}^2 / \text{sec}$$

$$\lambda^2 = \frac{\psi_0 \epsilon_s}{2 x_0 q C_0}$$

$$\tau_0 = \frac{x_0^2}{D_0} \text{ sec}$$

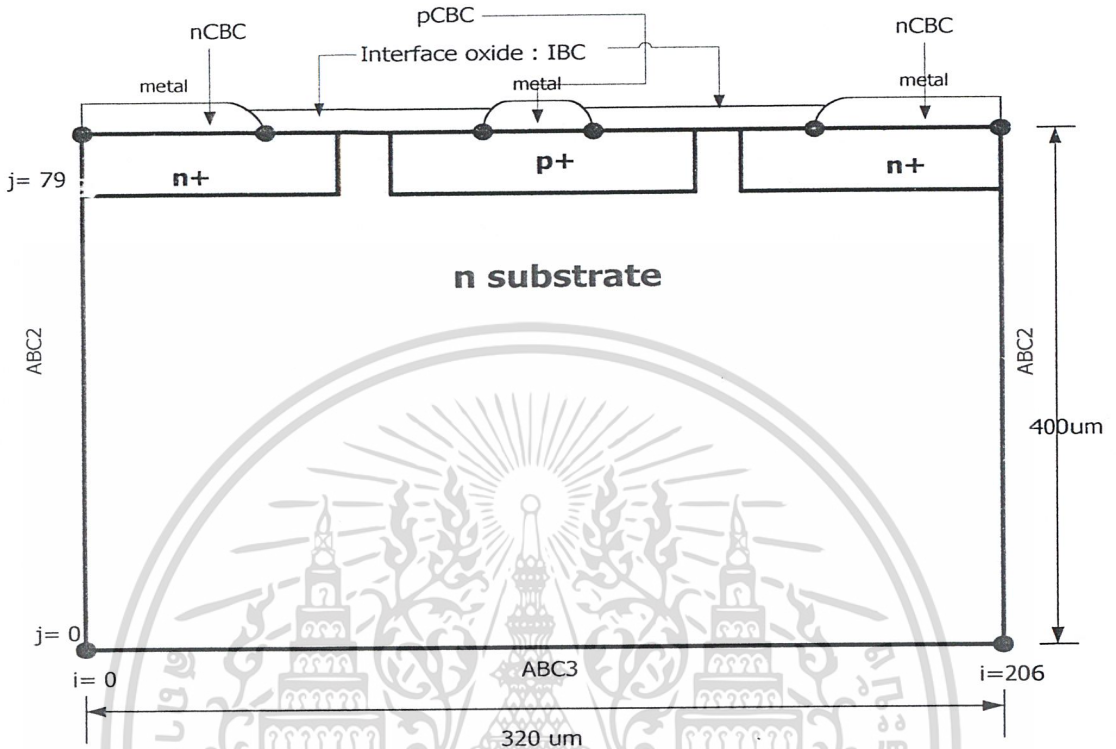
$$R_0 = \frac{D_0 C_0}{x_0^2} \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$$

$$j_0 = \frac{-q D_0 C_0}{x_0} \text{ Acm}^{-2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions)

เป็นการกำหนดค่าเริ่มต้นของ Psi, P และ N ที่บริเวณขอบแต่ละส่วนดังนี้



รูป 4.11 การออกแบบเงื่อนไขขอบเขตบริเวณต่างๆ

1. บริเวณอิมิตเตอร์คอนแทก (p Contact Boundary Condition : pCBC) ตำแหน่ง i=102 ถึง 104

$$\Psi = \Psi_{b|p} + V_{ap}$$

$$p = \frac{\sqrt{C^2 + 4n_I^2} - C}{2}, C = -Na$$

$$n = \frac{n_I^2}{p}$$

$$\text{โดยที่ } \Psi_{b|p} = -\frac{kT}{q} \ln \left[\frac{Na}{2n_I} + \sqrt{\left(\frac{Na}{2n_I}\right)^2 + 1} \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. บริเวณเบสคอนแทก (n Contact Boundary Condition : nCBC) ตำแหน่ง $i=0$ ถึง 18 ที่ $j=79$ และตำแหน่ง $i=188$ ถึง 206 ที่ $j=79$

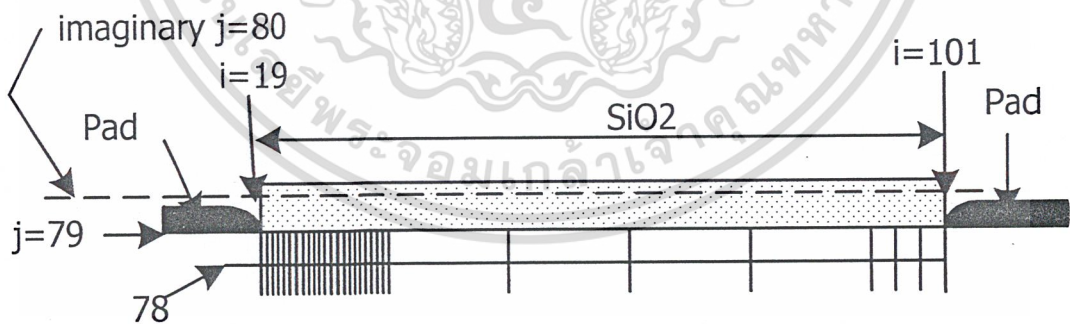
$$\Psi = \Psi_{b|n+}$$

$$n = \frac{\sqrt{C^2 + 4n_I^2} + C}{2}, C = Ndn +$$

$$p = \frac{n_I^2}{n}$$

$$\text{โดยที่ } \Psi_{b|n+} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{Ndn + \sqrt{\left(\frac{Ndn +}{2n_I}\right)^2 + 1}}{2n_I} \right]$$

3. บริเวณอินเทอร์เฟซ (Boundary Condition of Interface : IBC) ซึ่งเป็นบริเวณด้านบนสุดของไดโอดที่อยู่ใต้ซิลิกอนไดออกไซด์ ในโปรแกรมคือบริเวณเมช $i = 19$ ถึง 101 และ $i = 105$ ถึง 187 แต่สำหรับการคำนวณจะทำการคำนวณเพียงส่วนเดียวคือส่วนของเมช $i = 19$ ถึง 101 และให้ค่าที่เมช $i=187$ เท่ากับ เมช $i=19$, ค่าที่เมช $i=186$ เท่ากับ เมช $i=20$, ค่าที่เมช $i=185$ เท่ากับ เมช $i=21$ ตามลำดับ บริเวณเงื่อนไขขอบเขตที่อินเทอร์เฟซแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 4.12 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตบริเวณอินเทอร์เฟซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณนี้เราก็จะพิจารณา $\psi_{i,j}, n_{i,j}, p_{i,j}$ เช่นเดียวกันและกำหนดให้เป็นเงื่อนไขขอบเขต โดยมีค่าดังนี้

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} \Big|_{i,j} = 0, \quad j_{ny} \Big|_{i,j} = 0, \quad j_{py} \Big|_{i,j} = 0$$

โดยการคำนวณค่าบริเวณอินเตอร์เฟซนี้ ก็ต้องมีการคำนวณวนซ้ำเพื่อให้ได้ค่า

$$\psi_{i,j}, n_{i,j}, p_{i,j}$$

ดังนั้นจึงมีต้องมีการจัดสมการดังนี้

$$F_{1\text{int}} = \lambda^2 \cdot \left(\frac{\psi_{i+1,m} - \psi_{i,m}}{h_i} - \frac{\psi_{i,m} - \psi_{i-1,m}}{h_{i-1}} \right) \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2} + \frac{\varepsilon_{ins} \cdot \frac{\psi_{i,m+1} - \psi_{i,m}}{k_m} - \varepsilon_{sem} \cdot \frac{\psi_{i,m} - \psi_{i,m-1}}{k_{m-1}} + Q_{\text{int}i,m}}{\varepsilon_{ins} \cdot k_m + \varepsilon_{sem} \cdot k_{m-1}} + \frac{\varepsilon_{sem} \cdot k_{m-1}}{\varepsilon_{ins} \cdot k_m + \varepsilon_{sem} \cdot k_{m-1}} \cdot (n_{i,m} - p_{i,m} - C_{i,m}) = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย ϵ_{ins} และ ϵ_{sem} เป็นเพอร์มิตติวิตีของซิลิกอนและซิลิกอนไดออกไซด์ (permittivity of SiO₂ and silicon.) และกำหนดให้ค่าศักดาไฟฟ้าในซิลิกอนไดออกไซด์มีค่าเป็นศูนย์ $\psi_{i,m+1} = 0$ volt

$$F_{2int} = \frac{\left(-j_{rx}|_{i+1/2,m}\right) - \left(-j_{rx}|_{i-1/2,m}\right)}{\frac{h_{i-1} + h_i}{2}} + \frac{2 \cdot j_{ny}|_{i,m-1/2} - 2 \cdot R^{surf}|_{i,m}}{k_{m-1}}$$

$$-R|_{i,m} = 0$$

where,

$$j_{rx}|_{i+1/2,m} = D_n|_{i+1/2,m} \cdot \frac{B_5 \left(\frac{\psi_{i,m} - \psi_{i+1,m}}{U_t} \right) \cdot n_{i,m} - B_7 \left(\frac{\psi_{i+1,m} - \psi_{i,m}}{U_t} \right) \cdot n_{i+1,m}}{h_i},$$

$$j_{rx}|_{i-1/2,m} = D_n|_{i-1/2,m} \cdot \frac{B_2 \left(\frac{\psi_{i-1,m} - \psi_{i,m}}{U_t} \right) \cdot n_{i-1,m} - B_4 \left(\frac{\psi_{i,m} - \psi_{i-1,m}}{U_t} \right) \cdot n_{i,m}}{h_{i-1}},$$

$$j_{ny}|_{i,m-1/2} = D_n|_{i,m-1/2} \cdot \frac{B_1 \left(\frac{\psi_{i,m-1} - \psi_{i,m}}{U_t} \right) \cdot n_{i,m-1} - B_3 \left(\frac{\psi_{i,m} - \psi_{i,m-1}}{U_t} \right) \cdot n_{i,m}}{k_{m-1}}$$

โดยอัตราการเกิดและรวมตัวใหม่บริเวณเนื้อสาร (bulk generation/recombination rate) มีค่าเป็น

$$R|_{i,m} = \frac{n_{i,m} \cdot p_{i,m} - n_i^2}{\tau_{i,m} \cdot (n_{i,m} + p_{i,m} + 2 \cdot n_i)}$$

อัตราการเกิดและรวมตัวใหม่บริเวณผิวหน้า (surface recombination rate)

$$R^{surf}|_{i,m} = \frac{n_{i,m} \cdot p_{i,m} - n_i^2}{\frac{1}{S_n} \text{ or } \frac{1}{S_p} \cdot (n_{i,m} + p_{i,m} + 2 \cdot n_i)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_{3int} = \frac{j_{px}|_{i+1/2,m} - j_{px}|_{i-1/2,m}}{\frac{h_{i-1} + h_i}{2}} + \frac{-2 \cdot j_{py}|_{i,m-1/2} - 2 \cdot R^{surf}|_{i,m}}{k_{m-1}} - R|_{i,m} = 0$$

where

$$j_{px}|_{i+1/2,m} = D_p|_{i+1/2,m} \cdot \frac{B_5 \left(\frac{\psi_{i,m} - \psi_{i+1,m}}{U_t} \right) \cdot p_{i+1,m} - B_7 \left(\frac{\psi_{i+1,m} - \psi_{i,m}}{U_t} \right) \cdot p_{i,m}}{h_i}$$

$$j_{px}|_{i-1/2,m} = D_p|_{i-1/2,m} \cdot \frac{B_2 \left(\frac{\psi_{i-1,m} - \psi_{i,m}}{U_t} \right) \cdot p_{i,m} - B_4 \left(\frac{\psi_{i,m} - \psi_{i-1,m}}{U_t} \right) \cdot p_{i-1,m}}{h_{i-1}}$$

$$j_{py}|_{i,m-1/2} = D_p|_{i,m-1/2} \cdot \frac{B_1 \left(\frac{\psi_{i,m-1} - \psi_{i,m}}{U_t} \right) \cdot p_{i,m} - B_3 \left(\frac{\psi_{i,m} - \psi_{i,m-1}}{U_t} \right) \cdot p_{i,m-1}}{k_{m-1}}$$

โดยอัตราการเกิดและรวมตัวใหม่บริเวณเนื้อสาร (bulk generation/recombination rate) มีค่าเป็น

$$R|_{i,m} = \frac{n_{i,m} \cdot p_{i,m} - n_I^2}{\tau_{i,m} \cdot (n_{i,m} + p_{i,m} + 2 \cdot n_I)}$$

อัตราการเกิดและรวมตัวใหม่บริเวณผิวหน้า (surface recombination rate)

$$R^{surf}|_{i,m} = \frac{n_{i,m} \cdot p_{i,m} - n_I^2}{\frac{1}{S_n} \text{ or } \frac{1}{S_p} \cdot (n_{i,m} + p_{i,m} + 2 \cdot n_I)}$$

จัดรูป derivative ของ F_{1int} , F_{2int} และ F_{3int} เทียบ ψ, n, p เป็นดังนี้ เพื่อตั้งเมตริกหา

$$\delta\psi(i,j), \delta n(i,j), \delta p(i,j)$$

$$\frac{\partial F_{1int}}{\partial \psi} = -2 \lambda^2 \cdot \left(\frac{1}{h_{i-1} \cdot h_i} + \frac{1}{k_{m-1} \cdot k_m} \cdot \frac{\epsilon_{ins} \cdot k_{m-1} + \epsilon_{sem} \cdot k_m}{\epsilon_{ins} \cdot k_m + \epsilon_{sem} \cdot k_{m-1}} \right)$$

$$\frac{\partial F_{1int}}{\partial n} = - \frac{\epsilon_{sem} \cdot k_{m-1}}{\epsilon_{ins} \cdot k_m + \epsilon_{sem} \cdot k_{m-1}}$$

$$\frac{\partial F_{1int}}{\partial p} = \frac{\epsilon_{sem} \cdot k_{m-1}}{\epsilon_{ins} \cdot k_m + \epsilon_{sem} \cdot k_{m-1}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial F_{2int}}{\partial \psi} = -\frac{2}{h_{i-1} + h_i} \cdot \left(\frac{\partial j_{nx}|_{i+1/2,m}}{\partial \psi} - \frac{\partial j_{nx}|_{i-1/2,m}}{\partial \psi} \right) + \frac{2}{k_{m-1}} \cdot \frac{\partial j_{ny}|_{i,m-1/2}}{\partial \psi}$$

where

$$\frac{\partial j_{nx}|_{i+1/2,m}}{\partial \psi} = D_n|_{i+1/2,m} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{1}{h_i} \cdot \left(\frac{\partial B_5}{\partial x_5} \cdot n_{i,m} + \frac{\partial B_7}{\partial x_7} \cdot n_{i+1,m} \right)$$

$$\frac{\partial j_{nx}|_{i-1/2,m}}{\partial \psi} = -D_n|_{i-1/2,m} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{1}{h_{i-1}} \cdot \left(\frac{\partial B_2}{\partial x_2} \cdot n_{i-1,m} + \frac{\partial B_4}{\partial x_4} \cdot n_{i,m} \right)$$

$$\frac{\partial j_{ny}|_{i,m-1/2}}{\partial \psi} = -D_n|_{i,m-1/2} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{1}{k_{m-1}} \cdot \left(\frac{\partial B_1}{\partial x_1} \cdot n_{i,m-1} + \frac{\partial B_3}{\partial x_3} \cdot n_{i,m} \right)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_{2int}}{\partial n} = & \frac{2}{h_{i-1} + h_i} \cdot \left(\frac{\partial j_{nx}|_{i+1/2,m}}{\partial n} + \frac{\partial j_{nx}|_{i-1/2,m}}{\partial n} \right) + \\ & + \frac{2}{k_{m-1}} \cdot \left(\frac{\partial j_{ny}|_{i,m-1/2}}{\partial n} - \frac{\partial R^{surf}|_{i,m}}{\partial n} \right) - \frac{\partial R|_{i,m}}{\partial n} \end{aligned}$$

where

$$\frac{\partial j_{nx}|_{i+1/2,m}}{\partial n} = D_n|_{i+1/2,m} \cdot \frac{1}{h_i} \cdot B_5 \left(\frac{\psi_{i,m} - \psi_{i+1,m}}{U_t} \right)$$

$$\frac{\partial j_{nx}|_{i-1/2,m}}{\partial n} = -D_n|_{i-1/2,m} \cdot \frac{1}{h_{i-1}} \cdot B_4 \left(\frac{\psi_{i,m} - \psi_{i-1,m}}{U_t} \right)$$

$$\frac{\partial j_{ny}|_{i,m-1/2}}{\partial n} = -D_n|_{i,m-1/2} \cdot \frac{1}{k_{m-1}} \cdot B_3 \left(\frac{\psi_{i,m} - \psi_{i,m-1}}{U_t} \right)$$

และ

$$\frac{\partial R^{surf}|_{i,m}}{\partial n} = \frac{(p_{i,m} + n_I)^2}{\frac{1}{S_n} \text{ or } \frac{1}{S_p} \cdot (n_{i,m} + p_{i,m} + 2 \cdot n_I)^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial R|_{i,m}}{\partial n} = \frac{(p_{i,m} + n_I)^2}{\tau_{i,m} \cdot (n_{i,m} + p_{i,m} + 2 \cdot n_I)^2}$$

$$\frac{\partial F_{2int}}{\partial p} = -\frac{2}{k_{m-1}} \cdot \frac{\partial R^{surf}|_{i,m}}{\partial p} - \frac{\partial R|_{i,m}}{\partial p}$$

ซึ่ง

$$\frac{\partial R^{surf}|_{i,m}}{\partial p} = \frac{(n_{i,m} + n_I)^2}{\frac{1}{s_n} \text{ or } \frac{1}{s_p} \cdot (n_{i,m} + p_{i,m} + 2 \cdot n_I)^2}$$

$$\frac{\partial R|_{i,m}}{\partial p} = \frac{(n_{i,m} + n_I)^2}{\tau_{i,m} \cdot (n_{i,m} + p_{i,m} + 2 \cdot n_I)^2}$$

$$\frac{\partial F_{3int}}{\partial \psi} = \frac{2}{h_{i-1} + h_i} \cdot \left(\frac{\partial j_{px}|_{i+1/2,m}}{\partial \psi} - \frac{\partial j_{px}|_{i-1/2,m}}{\partial \psi} \right) - \frac{2}{k_{m-1}} \cdot \frac{\partial j_{py}|_{i,m-1/2}}{\partial \psi}$$

where

$$\frac{\partial j_{px}|_{i+1/2,m}}{\partial \psi} = D_p|_{i+1/2,m} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{1}{h_i} \cdot \left(\frac{\partial B_5}{\partial x_5} \cdot p_{i+1,m} + \frac{\partial B_7}{\partial x_7} \cdot p_{i,m} \right)$$

$$\frac{\partial j_{px}|_{i-1/2,m}}{\partial \psi} = -D_p|_{i-1/2,m} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{1}{h_{i-1}} \cdot \left(\frac{\partial B_2}{\partial x_2} \cdot p_{i,m} + \frac{\partial B_4}{\partial x_4} \cdot p_{i-1,m} \right)$$

$$\frac{\partial j_{py}|_{i,m-1/2}}{\partial \psi} = -D_p|_{i,m-1/2} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{1}{k_{m-1}} \cdot \left(\frac{\partial B_1}{\partial x_1} \cdot p_{i,m} + \frac{\partial B_3}{\partial x_3} \cdot p_{i,m-1} \right)$$

$$\frac{\partial F_{3int}}{\partial n} = -\frac{2}{k_{m-1}} \cdot \frac{\partial R^{surf}|_{i,m}}{\partial n} - \frac{\partial R|_{i,m}}{\partial n}$$

ซึ่ง

$$\frac{\partial R^{surf}|_{i,m}}{\partial n} = \frac{(p_{i,m} + n_I)^2}{\frac{1}{s_n} \text{ or } \frac{1}{s_p} \cdot (n_{i,m} + p_{i,m} + 2 \cdot n_I)^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial R|_{i,m}}{\partial n} = \frac{(p_{i,m} + n_I)^2}{\tau_{i,m} \cdot (n_{i,m} + p_{i,m} + 2 \cdot n_I)^2}$$

$$\frac{\partial F_{31int}}{\partial p} = \frac{2}{h_{i-1} + h_i} \cdot \left(\frac{\partial j_{px}|_{i+1/2,m}}{\partial p} - \frac{\partial j_{px}|_{i-1/2,m}}{\partial p} \right) -$$

$$\frac{2}{k_{m-1}} \cdot \left(\frac{\partial j_{py}|_{i,m-1/2}}{\partial p} + \frac{\partial R^{surf}|_{i,m}}{\partial p} \right) - \frac{\partial R|_{i,m}}{\partial p}$$

where

$$\frac{\partial j_{px}|_{i+1/2,m}}{\partial p} = -D_p|_{i+1/2,m} \cdot \frac{1}{h_i} \cdot B_7 \left(\frac{\psi_{i+1,m} - \psi_{i,m}}{U_t} \right)$$

$$\frac{\partial j_{px}|_{i-1/2,m}}{\partial p} = D_p|_{i-1/2,m} \cdot \frac{1}{h_{i-1}} \cdot B_2 \left(\frac{\psi_{i-1,m} - \psi_{i,m}}{U_t} \right)$$

$$\frac{\partial j_{py}|_{i,m-1/2}}{\partial p} = D_p|_{i,m-1/2} \cdot \frac{1}{k_{m-1}} \cdot B_1 \left(\frac{\psi_{i,m-1} - \psi_{i,m}}{U_t} \right)$$

$$\frac{\partial R^{surf}|_{i,m}}{\partial p} = \frac{(n_{i,m} + n_I)^2}{\frac{1}{s_n} \text{ or } \frac{1}{s_p} \cdot (n_{i,m} + p_{i,m} + 2 \cdot n_I)^2}$$

$$\frac{\partial R|_{i,m}}{\partial p} = \frac{(n_{i,m} + n_I)^2}{\tau_{i,m} \cdot (n_{i,m} + p_{i,m} + 2 \cdot n_I)^2}$$

4. บริเวณขอบของแบบจำลอง (Artificial boundary conditions)

เป็นบริเวณเงื่อนไขขอบเขตด้านข้างของแบบจำลอง (Artificial boundary conditions 2 ABC2) ทั้งสองด้าน เพื่อใช้เป็นค่าเงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณในส่วนของ 2 มิติ แต่สำหรับการหาค่าที่บริเวณเงื่อนไขขอบเขตนี้จะทำการคำนวณในลักษณะการคำนวณแบบ 1 มิติ ไม่สามารถกำหนดค่าต่างๆ ได้โดยตรงเพราะเป็นบริเวณที่มีสารกึ่งตัวนำความเข้มข้นพาหะต่างกันอยู่ (ส่วนของเอ็นพลัสและส่วนของเอ็น) ดังนั้นในการคำนวณในส่วนนี้ จึงสามารถนำเอาโปรแกรมจำลองการทำงานไดโอดพีเอ็นแบบ 1 มิติมาประยุกต์ใช้เพื่อคำนวณหาค่า

ซึ่งในการคำนวณจะคำนวณในแนวของ j เริ่มตั้งแต่ j=0 (ส่วนของเอ็น) ถึง j=79 (ส่วนของเอ็นพลัส) โดยที่ i = 0 และให้แรงดันไบอัสเป็นศูนย์ (Vap=0 Volt) และเมื่อทำการคำนวณเสร็จก็เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ค่าเงื่อนไขขอบเขตที่ขอบด้านขวา ($i=206$) เท่ากับค่าเงื่อนไขขอบเขตที่คำนวณได้ ซึ่งเป็นค่าเงื่อนไขขอบเขตที่ขอบด้านซ้าย ($i=0$) ทำให้ประหยัดเวลาขึ้นเพราะมีการคำนวณเพียงด้านเดียวเท่านั้น สำหรับขั้นตอนการคำนวณเพื่อหาค่าศักย์ไฟฟ้า และค่าความหนาแน่นพาหะให้ใช้วิธีการเกี่ยวกับการคำนวณในแบบ 1 มิติโดยทำการเปลี่ยนเมฆจาก i เป็น j เท่านั้น

สำหรับบริเวณเงื่อนไขขอบเขตด้านล่างของแบบจำลอง (Artificial boundary conditions 3 ABC3) ไม่ต้องมีการคำนวณเหมือนบริเวณเงื่อนไขขอบเขตด้านข้าง ของแบบจำลอง (Artificial boundary conditions 2 ABC2) เพราะไม่มีรอยต่อของชนิดสารกึ่งตัวนำที่ต่างกัน กล่าวคือเป็นบริเวณที่มีเฉพาะสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นเท่านั้น ดังนั้นเราจึงสามารถกำหนดค่าต่างๆ ได้โดยตรงซึ่งเป็นค่าของส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น เป็นดังนี้

$$\Psi = \Psi_{b|n}$$

$$n = \frac{\sqrt{C^2 + 4n_I^2} + C}{2}, C = Nd$$

$$p = \frac{n_I}{n}$$

$$\text{โดยที่ } \Psi_{b|n} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{Nd}{2n_I} + \sqrt{\left(\frac{Nd}{2n_I}\right)^2 + 1} \right]$$

4.3.3 สร้างสมการเพื่อคำนวณ

สร้างสมการ F1, F2 และ F3 โดยสมการทั้งสามนี้มีความสัมพันธ์กันและจะเป็นตัวแปรที่จะนำไปคำนวณเพื่อหาค่าที่เราต้องการไม่ว่าจะเป็น ค่าศักย์ไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นของโฮลและค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

โดย F1 ได้จากสมการปัวซอง (Poisson's Equation) สำหรับ F2 และ F3 ได้จากสมการความต่อเนื่อง (Continuity Equations) และสามารถจัดเป็นสมการในการคำนวณในโปรแกรมจำลองการทำงานไดโอดรอยต่อพีเอ็นแบบ 2 มิติเป็นดังนี้

$$\begin{aligned}
F_1 = & \psi_{i,j-1} \cdot \lambda^2 \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2 \cdot k_{j-1}} + \\
& \psi_{i-1,j} \cdot \lambda^2 \cdot \frac{k_{j-1} + k_j}{2 \cdot h_{i-1}} - \\
& \psi_{i,j} \cdot \lambda^2 \cdot \left(\frac{h_{i-1} + h_i}{2 \cdot k_{j-1}} + \frac{k_{j-1} + k_j}{2 \cdot h_{i-1}} + \frac{k_{j-1} + k_j}{2 \cdot h_i} + \frac{h_{i-1} + h_i}{2 \cdot k_j} \right) + \\
& \psi_{i+1,j} \cdot \lambda^2 \cdot \frac{k_{j-1} + k_j}{2 \cdot h_i} + \\
& \psi_{i,j+1} \cdot \lambda^2 \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2 \cdot k_j} - \\
& (n_{i,j} - p_{i,j} - c_{i,j}) \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2} \cdot \frac{k_{j-1} + k_j}{2} = 0
\end{aligned}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
F_2 = & n_{i,j-1} \cdot D_{n_{i,j-1/2}} \cdot B_1 \left(\frac{\psi_{i,j-1} - \psi_{i,j}}{U_t} \right) \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2 \cdot k_{j-1}} + \\
& n_{i-1,j} \cdot D_{n_{i-1/2,j}} \cdot B_2 \left(\frac{\psi_{i-1,j} - \psi_{i,j}}{U_t} \right) \cdot \frac{k_{j-1} + k_j}{2 \cdot h_{i-1}} - \\
& \left(\begin{aligned}
& D_{n_{i,j-1/2}} \cdot B_3 \left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i,j-1}}{U_t} \right) \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2 \cdot k_{j-1}} + \\
& D_{n_{i-1/2,j}} \cdot B_4 \left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i-1,j}}{U_t} \right) \cdot \frac{k_{j-1} + k_j}{2 \cdot h_{i-1}} + \\
& n_{i,j} \cdot \left(\begin{aligned}
& D_{n_{i+1/2,j}} \cdot B_5 \left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i+1,j}}{U_t} \right) \cdot \frac{k_{j-1} + k_j}{2 \cdot h_i} + \\
& D_{n_{i,j+1/2}} \cdot B_6 \left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i,j+1}}{U_t} \right) \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2 \cdot k_j} \end{aligned} \right) + \\
& n_{i+1,j} \cdot D_{n_{i+1/2,j}} \cdot B_7 \left(\frac{\psi_{i+1,j} - \psi_{i,j}}{U_t} \right) \cdot \frac{k_{j-1} + k_j}{2 \cdot h_i} + \\
& n_{i,j+1} \cdot D_{n_{i,j+1/2}} \cdot B_8 \left(\frac{\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j}}{U_t} \right) \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2 \cdot k_j} - \\
& R_{i,j} \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2} \cdot \frac{k_{j-1} + k_j}{2} = 0
\end{aligned} \right)
\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 F_3 &= p_{i,j-1} \cdot D_{\rho|_{i,j-1/2}} \cdot B_3 \left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i,j-1}}{U_t} \right) \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2 \cdot k_{j-1}} + \\
 & p_{i-1,j} \cdot D_{\rho|_{i-1/2,j}} \cdot B_4 \left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i-1,j}}{U_t} \right) \cdot \frac{k_{j-1} + k_j}{2 \cdot h_{i-1}} - \\
 & p_{i,j} \cdot \left[\begin{aligned}
 & D_{\rho|_{i,j-1/2}} \cdot B_1 \left(\frac{\psi_{i,j-1} - \psi_{i,j}}{U_t} \right) \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2 \cdot k_{j-1}} + \\
 & D_{\rho|_{i-1/2,j}} \cdot B_2 \left(\frac{\psi_{i-1,j} - \psi_{i,j}}{U_t} \right) \cdot \frac{k_{j-1} + k_j}{2 \cdot h_{i-1}} + \\
 & D_{\rho|_{i+1/2,j}} \cdot B_7 \left(\frac{\psi_{i+1,j} - \psi_{i,j}}{U_t} \right) \cdot \frac{k_{j-1} + k_j}{2 \cdot h_i} + \\
 & D_{\rho|_{i,j+1/2}} \cdot B_8 \left(\frac{\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j}}{U_t} \right) \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2 \cdot k_j} \end{aligned} \right] + \\
 & p_{i+1,j} \cdot D_{\rho|_{i+1/2,j}} \cdot B_5 \left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i+1,j}}{U_t} \right) \cdot \frac{k_{j-1} + k_j}{2 \cdot h_i} + \\
 & p_{i,j+1} \cdot D_{\rho|_{i,j+1/2}} \cdot B_6 \left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i,j+1}}{U_t} \right) \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2 \cdot k_j} - \\
 & R_{i,j} \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2} \cdot \frac{k_{j-1} + k_j}{2} = 0
 \end{aligned}$$

ซึ่ง
$$R_{i,j} = \frac{n_{i,j} \cdot p_{i,j} - n_I^2}{\tau_{i,j} \cdot (n_{i,j} + p_{i,j} + 2 \cdot n_I)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดรูป Derivatives ของ ψ, n, p เป็นดังนี้ เพื่อตั้งเมตริกหา delta ของ ψ, n, p จาก วิธีของนิวตัน

$$\frac{\partial F_1}{\partial \psi} = -\lambda^2 \cdot \left(\frac{h_{i-1} + h_i}{2 \cdot k_{j-1}} + \frac{k_{j-1} + k_j}{2 \cdot h_{i-1}} + \frac{k_{j-1} + k_j}{2 \cdot h_i} + \frac{h_{i-1} + h_i}{2 \cdot k_j} \right)$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial n} = -\frac{h_{i-1} + h_i}{2} \cdot \frac{k_{j-1} + k_j}{2}$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial p} = \frac{h_{i-1} + h_i}{2} \cdot \frac{k_{j-1} + k_j}{2}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_2}{\partial \psi} = & -n_{i,j-1} \cdot D_{n_{i,j-1/2}} \cdot \frac{\partial B_1}{\partial x_1} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2 \cdot k_{j-1}} \\ & - n_{i-1,j} \cdot D_{n_{i-1/2,j}} \cdot \frac{\partial B_2}{\partial x_2} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{k_{j-1} + k_j}{2 \cdot h_{i-1}} \\ & - n_{i,j} \cdot \left(\begin{aligned} & D_{n_{i,j-1/2}} \cdot \frac{\partial B_3}{\partial x_3} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2 \cdot k_{j-1}} + \\ & D_{n_{i-1/2,j}} \cdot \frac{\partial B_4}{\partial x_4} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{k_{j-1} + k_j}{2 \cdot h_{i-1}} + \\ & D_{n_{i+1/2,j}} \cdot \frac{\partial B_5}{\partial x_5} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{k_{j-1} + k_j}{2 \cdot h_i} + \\ & D_{n_{i,j+1/2}} \cdot \frac{\partial B_6}{\partial x_6} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2 \cdot k_j} \end{aligned} \right) \\ & - n_{i+1,j} \cdot D_{n_{i+1/2,j}} \cdot \frac{\partial B_7}{\partial x_7} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{k_{j-1} + k_j}{2 \cdot h_i} \\ & - n_{i,j+1} \cdot D_{n_{i,j+1/2}} \cdot \frac{\partial B_8}{\partial x_8} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2 \cdot k_j} - \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
\frac{\partial F_2}{\partial n} &= -D_n|_{i,j-1/2} \cdot B_3 \left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i,j-1}}{U_t} \right) \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2 \cdot k_{j-1}} \\
&\quad - D_n|_{i-1/2,j} \cdot B_4 \left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i-1,j}}{U_t} \right) \cdot \frac{k_{j-1} + k_j}{2 \cdot h_{i-1}} \\
&\quad - D_n|_{i+1/2,j} \cdot B_5 \left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i+1,j}}{U_t} \right) \cdot \frac{k_{j-1} + k_j}{2 \cdot h_i} \\
&\quad - D_n|_{i,j+1/2} \cdot B_6 \left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i,j+1}}{U_t} \right) \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2 \cdot k_j} \\
&\quad - \frac{\partial R_{i,j}}{\partial n} \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2} \cdot \frac{k_{j-1} + k_j}{2} \\
\frac{\partial F_2}{\partial p} &= \frac{\partial R_{i,j}}{\partial p} \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2} \cdot \frac{k_{j-1} + k_j}{2} \\
\frac{\partial F_3}{\partial \psi} &= p_{i,j-1} \cdot D_{p,i,j-1/2} \cdot \frac{\partial B_3}{\partial x_3} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2 \cdot k_{j-1}} \\
&\quad + p_{i-1,j} \cdot D_{p,i-1/2,j} \cdot \frac{\partial B_4}{\partial x_4} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{k_{j-1} + k_j}{2 \cdot h_{i-1}} \\
&\quad + p_{i,j} \cdot \left(\begin{aligned} &D_{p,i,j-1/2} \cdot \frac{\partial B_1}{\partial x_1} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2 \cdot k_{j-1}} + \\ &D_{p,i-1/2,j} \cdot \frac{\partial B_2}{\partial x_2} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{k_{j-1} + k_j}{2 \cdot h_{i-1}} + \\ &D_{p,i+1/2,j} \cdot \frac{\partial B_7}{\partial x_7} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{k_{j-1} + k_j}{2 \cdot h_i} + \\ &D_{p,i,j+1/2} \cdot \frac{\partial B_8}{\partial x_8} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2 \cdot k_j} \end{aligned} \right) \\
&\quad + p_{i+1,j} \cdot D_{p,i+1/2,j} \cdot \frac{\partial B_5}{\partial x_5} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{k_{j-1} + k_j}{2 \cdot h_i} \quad \frac{\partial B_1}{\partial x} \\
&\quad + p_{i,j+1} \cdot D_{p,i,j+1/2} \cdot \frac{\partial B_6}{\partial x_6} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2 \cdot k_j}
\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial F_3}{\partial n} = -\frac{\partial R_{i,j}}{\partial n} \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2} \cdot \frac{k_{j-1} + k_j}{2}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_3}{\partial p} = & -D_{\rho|_{i,j-1/2}} \cdot B_1 \left(\frac{\psi_{i,j-1} - \psi_{i,j}}{U_t} \right) \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2 \cdot k_{j-1}} \\ & - D_{\rho|_{i-1/2,j}} \cdot B_2 \left(\frac{\psi_{i-1,j} - \psi_{i,j}}{U_t} \right) \cdot \frac{k_{j-1} + k_j}{2 \cdot h_{i-1}} \\ & - D_{\rho|_{i+1/2,j}} \cdot B_7 \left(\frac{\psi_{i+1,j} - \psi_{i,j}}{U_t} \right) \cdot \frac{k_{j-1} + k_j}{2 \cdot h_i} \\ & - D_{\rho|_{i,j+1/2}} \cdot B_8 \left(\frac{\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j}}{U_t} \right) \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2 \cdot k_j} \\ & - \frac{\partial R_{i,j}}{\partial p} \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2} \cdot \frac{k_{j-1} + k_j}{2} \end{aligned}$$

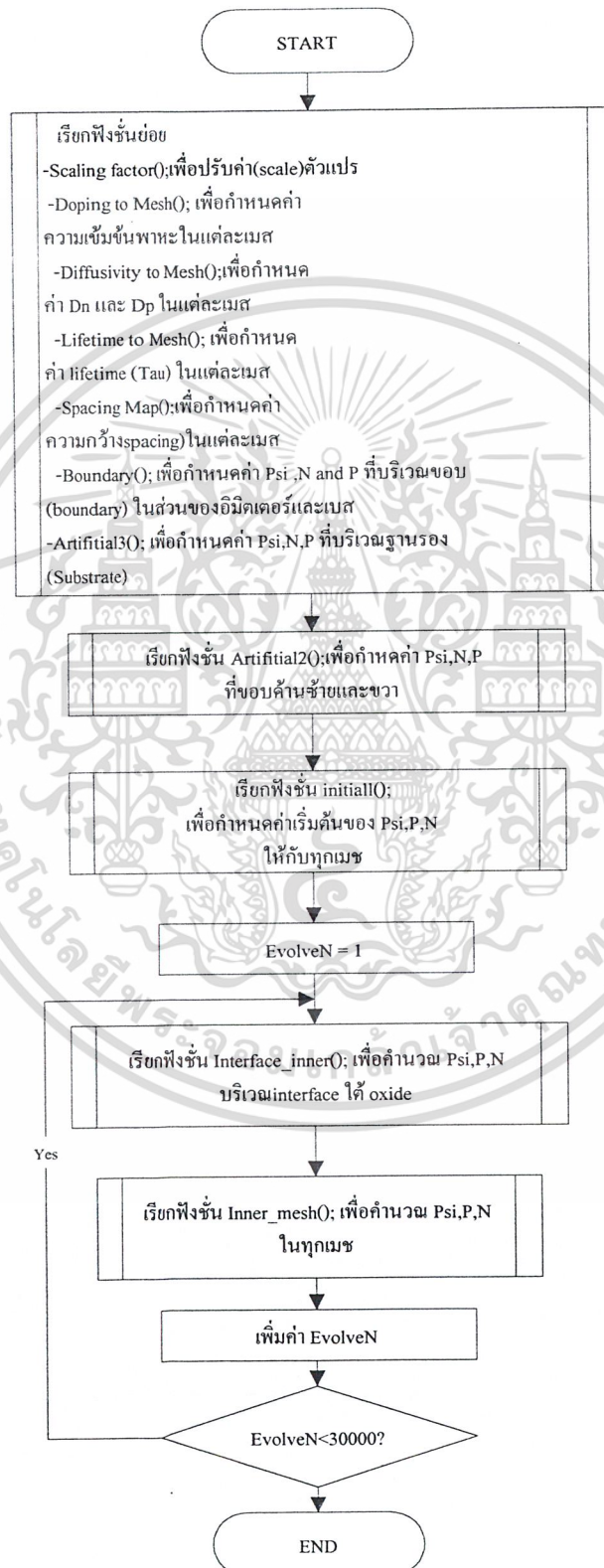
ตั้งเมตริก เพื่อหาค่าของ $(\delta\psi(i,j), \delta n(i,j), \delta p(i,j))$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \psi} & \frac{\partial F_1}{\partial n} & \frac{\partial F_1}{\partial p} \\ \frac{\partial F_2}{\partial \psi} & \frac{\partial F_2}{\partial n} & \frac{\partial F_2}{\partial p} \\ \frac{\partial F_3}{\partial \psi} & \frac{\partial F_3}{\partial n} & \frac{\partial F_3}{\partial p} \end{bmatrix}^k \cdot \begin{bmatrix} \delta\psi^k \\ \delta n^k \\ \delta p^k \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} F_1(\psi^k, n^k, p^k) \\ F_2(\psi^k, n^k, p^k) \\ F_3(\psi^k, n^k, p^k) \end{bmatrix}$$

โดยที่มีเงื่อนไขไว้ว่าค่า delta ต้องน้อยกว่า 1×10^{-10}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

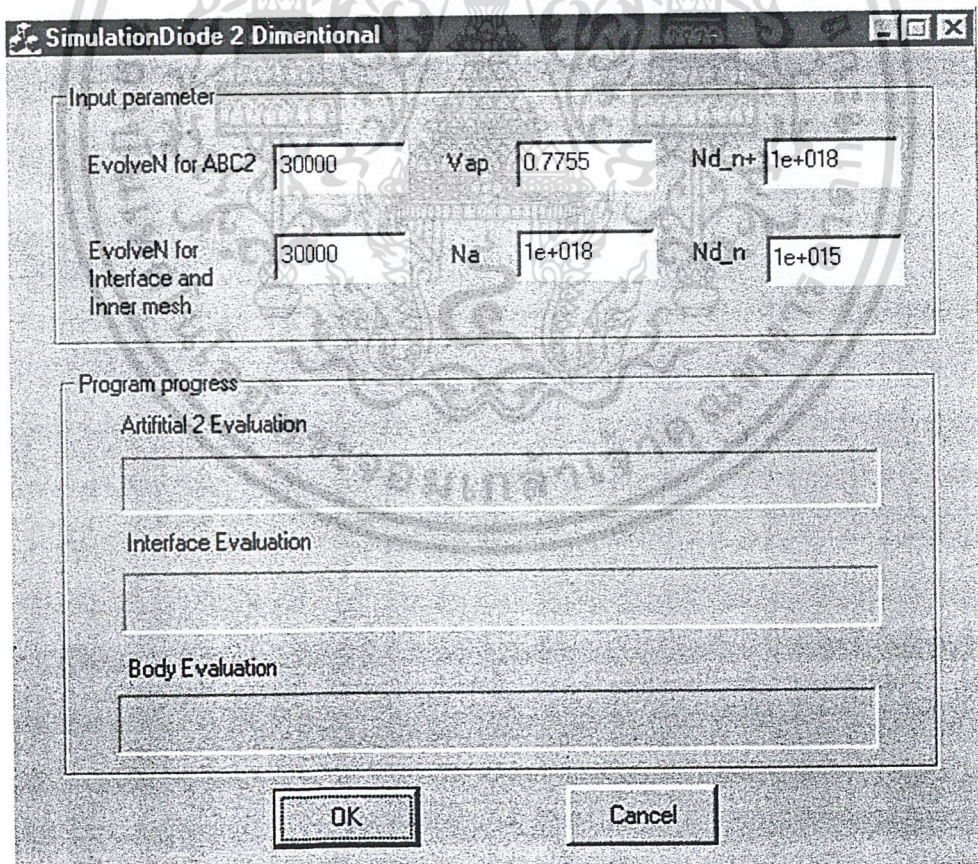
4.5 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ไอโอะล็อกของโปรแกรมแบบ 2 มิติ

ในการใช้งานโปรแกรม ได้มีการสร้างไอโอะล็อกบนโปรแกรมวิชวลซีเป็นส่วนติดต่อกับผู้ใช้ (user interface) ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการใช้งาน โปรแกรม เมื่อทำการรันโปรแกรม ไอโอะล็อกนี้จะปรากฏขึ้นและสามารถเริ่มต้นการทำงานโดยการป้อนค่าอินพุตต่างๆแล้วกดปุ่ม OK โปรแกรมก็จะเริ่มทำงานตามลำดับการทำงานของโปรแกรมที่แสดงไว้ใน flowchart ข้างต้น พร้อมทั้งโปรแกรมจะแสดงความก้าวหน้าของการทำงานที่ โพรเกรสบาร์ (progress bar) และเมื่อการทำงานของโปรแกรมเสร็จสิ้น โปรแกรมจะแสดงกรอบข้อความ (message box) โดยจะแจ้งให้ทราบว่า การทำงานของโปรแกรมเสร็จสิ้นแล้ว ผู้ใช้สามารถตรวจสอบผลลัพธ์ของโปรแกรมได้ที่ไฟล์ของเอ็กซ์เซล ซึ่งผลลัพธ์ที่คำนวณ ได้ถูกเก็บไว้เป็นไฟล์เอ็กซ์เซลแต่จะถูกแยกเป็นไฟล์ Psi1,Psi2,Psi3-,Psi4 สำหรับค่าศักดาไฟฟ้า แยกเป็นไฟล์ P1,P2,P3,P4 สำหรับความหนาแน่นโวล และแยกเป็นไฟล์ N1,N2,N3,N4 สำหรับความหนาแน่นอิเล็กตรอน ก่อนทำการวิเคราะห์ค่าต่างๆ จึงต้องรวมไฟล์ทั้งสี่รวมเป็นไฟล์เดียวก่อน



รูป 4.13 ไอโอะล็อกของโปรแกรมจำลองการทำงานของไดโอดรอยต่อพีเอ็นแบบ 2 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลลัพธ์โปรแกรมในส่วนการคำนวณแบบ 1 มิติ

ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรมจำลองการทำงานไดโอดรอยต่อพีเอ็นแบบ 1 มิติ นี้ จะถูกเก็บเป็นไฟล์ของเอ็กซ์เซล ซึ่งจะจัดเรียงตำแหน่งเมช(i) ตำแหน่งระยะจริงของไดโอด (Length) ศักย์ไฟฟ้า(Psi) ค่าความหนาแน่นโฮล(P) ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน(N) และค่าตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำจากการคำนวณ (k) ซึ่งจะเห็นว่าค่าที่คำนวณ ได้เป็นค่าคุณสมบัติต่างๆของ ไดโอดที่ตำแหน่งใดๆที่อ้าง โดยตำแหน่งเมช(i) และสามารถเทียบได้กับระยะจริงของไดโอด (Length) ดังนั้นจึงสามารถทำการวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติต่างๆ จากการพล็อตกราฟของค่าที่คำนวณ ได้จากค่าในไฟล์นี้

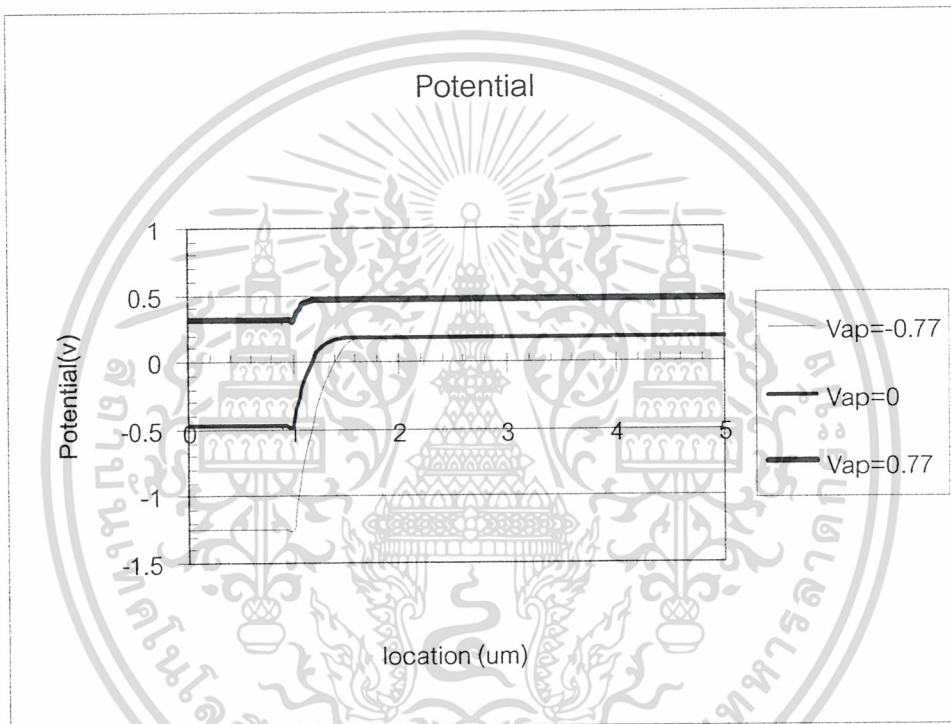
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Mesh	Length	Psi	P	N	R	k	
2	0	0	0.309	1E+18	210	0	0	
3	1	0.1	0.309	1E+18	2.55E+11	0.000283	0	
4	2	0.2	0.309	1E+18	5.1E+11	0.000567	0	
5	3	0.3	0.309	1E+18	7.65E+11	0.00085	0	
6	4	0.4	0.309	1E+18	1.02E+12	0.00113	0	
7	5	0.5	0.309	1E+18	1.28E+12	0.00142	0	
8	6	0.6	0.309	1E+18	1.53E+12	0.0017	0	
9	7	0.7	0.309	1E+18	1.79E+12	0.00199	0	
10	8	0.8	0.309	1E+18	2.04E+12	0.00227	0	
11	9	0.9	0.309	1E+18	2.3E+12	0.00256	0	
12	10	1	0.309	9.91E+17	2.58E+12	0.00286	0	
13	11	1.1	0.441	6.07E+15	4.23E+14	0.264	0	
14	12	1.2	0.471	1.85E+15	1.39E+15	0.528	0	
15	13	1.3	0.48	1.32E+15	1.92E+15	0.522	0	
16	14	1.4	0.482	1.2E+15	2.09E+15	0.508	0	

รูป 5.1 รูปแบบไฟล์เอ็กซ์เซลที่ทำการจัดเก็บค่าที่คำนวณได้ในการคำนวณแบบ 1 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1 ค่าศักดาไฟฟ้า

ทำการรันโปรแกรมโดยใช้จำนวนวนซ้ำ(EvolveN)ประมาณ 30,000 รอบ ทั้งนี้เพื่อความถูกต้อง แม่นยำมากที่สุด สำหรับกรณีศักดาไฟฟ้า จะทำการเปรียบเทียบและพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าศักดาไฟฟ้าบริเวณรอยต่อ เมื่อมีการไบอัสในลักษณะต่างๆกัน ในที่นี้เลือกค่าแรงดันไบอัสตรง 0.77 โวลต์ แรงดันไบอัสกลับ -0.77 โวลต์ และไม่มีการไบอัส(แรงดันไบอัสเป็นศูนย์) แล้วพล็อตกราฟเปรียบเทียบดังนี้



รูป 5.2 ค่าศักดาไฟฟ้าของไดโอดรอยต่อพีเอ็น

จากค่าที่อ่านได้พบว่า ขณะที่ไดโอดอยู่ในสภาวะสมดุล จะเกิดการแพร่ข้ามรอยต่อและทำให้บริเวณรอยต่อมีสภาพเป็นอ็อนลบสำหรับด้านพีและอ็อนบวกสำหรับด้านเอ็น และประจุของอ็อนดังกล่าวนี้จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณรอยต่อ และเนื่องจากการที่มีสนามไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อพีเอ็นจึงทำให้เกิด ศักดาไฟฟ้าบริเวณรอยต่อ หรือที่เรียกว่า แรงดันภายใน(built in voltage) และในการคำนวณโดยโปรแกรมนี้ อ่านค่าได้ 0.65 โวลต์ และเมื่อไบอัสตรง แรงดันไบอัสภายนอกจะไปหักล้างศักดาไฟฟ้าภายในรอยต่อ จึงทำให้ศักดาไฟฟ้าภายในรอยต่อมีค่าลดลงและจากผลลัพธ์ของโปรแกรม ศักดาไฟฟ้าภายในรอยต่อมีค่าลดลงเป็น 0.15 โวลต์ และสำหรับกรณีที่ไดโอดได้รับไบอัสย้อนกลับ แรงดันไบอัสภายนอกจะไปช่วยเพิ่มศักดาไฟฟ้าภายในรอยต่อ จึงทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

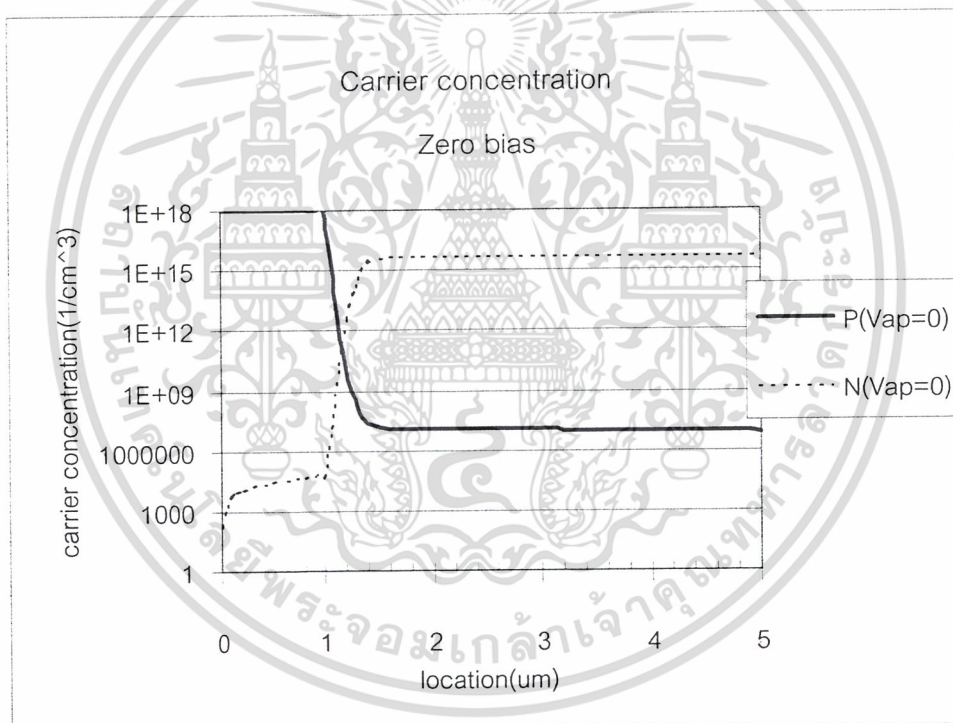
ให้ศักดาไฟฟ้าภายในรอยต่อมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและจากผลลัพธ์ของโปรแกรม ศักดาไฟฟ้าภายในรอยต่อมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1.43 โวลต์

5.2 ค่าความหนาแน่นของพาหะ

ในกรณีความหนาแน่นของพาหะ จะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของพาหะทั้งอิเล็กตรอนและโฮลที่บริเวณรอยต่อพีเอ็น ซึ่งจะมีลักษณะที่ต่างกัน เมื่อไดโอดได้รับการไบอัสที่ต่างกัน ซึ่งในโปรแกรมนี้จะแสดงผลลัพธ์ที่คำนวณได้ในรูปของไฟล์เอ็กซ์เซล เมื่อพล็อตกราฟได้ดังนี้

กรณีที่ไดโอดไม่ได้รับไบอัส

ทำการป้อนแรงดัน ไบอัสเป็นศูนย์โวลต์ ($V_{ap}=0$) และทำการรันโปรแกรมโดยใช้จำนวนวนซ้ำ (EvolveN) 30,000 รอบ จากผลลัพธ์ที่คำนวณได้ นำมาพล็อตกราฟได้ดังนี้

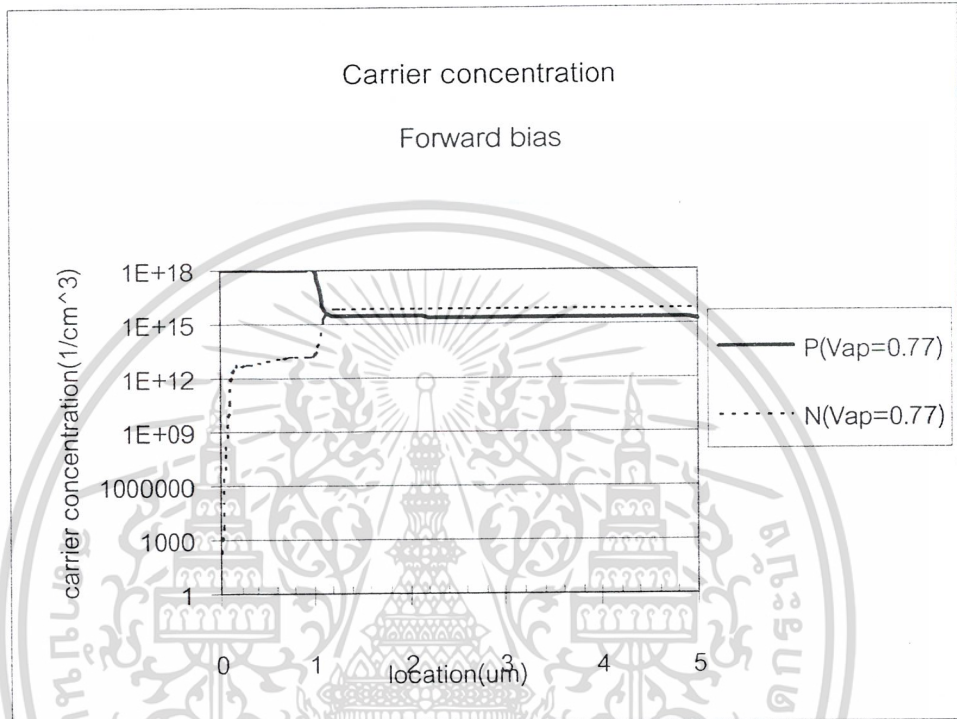


รูป 5.3 ความหนาแน่นพาหะขณะที่ไดโอดยังไม่มีกรไบอัส

จากรูป 5.2 จะเห็นการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นพาหะที่บริเวณรอยต่อไดโอดรอยต่อพีเอ็น ซึ่งอยู่ที่ตำแหน่ง 1 ไมครอน โดยโฮลซึ่งเป็นพาหะข้างมากทางฝั่งพีก็จะแพร่เข้ามายังฝั่งเอ็นซึ่งมีความหนาแน่นโฮลอยู่น้อยกว่า ในทำนองเดียวกันอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะข้างมากทางฝั่งเอ็นก็จะแพร่เข้ามายังฝั่งพีซึ่งมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอยู่น้อยกว่า

กรณีไดโอดได้รับไบอัสตรง

ทำการป้อนแรงดัน ไบอัสตรงเป็น 0.77 โวลท์ ($V_{ap}=0.77$) และทำการรันโปรแกรมโดยใช้จำนวนวนซ้ำ 30,000 รอบ จากผลลัพธ์ที่คำนวณได้ นำมาพล็อตกราฟได้ดังนี้

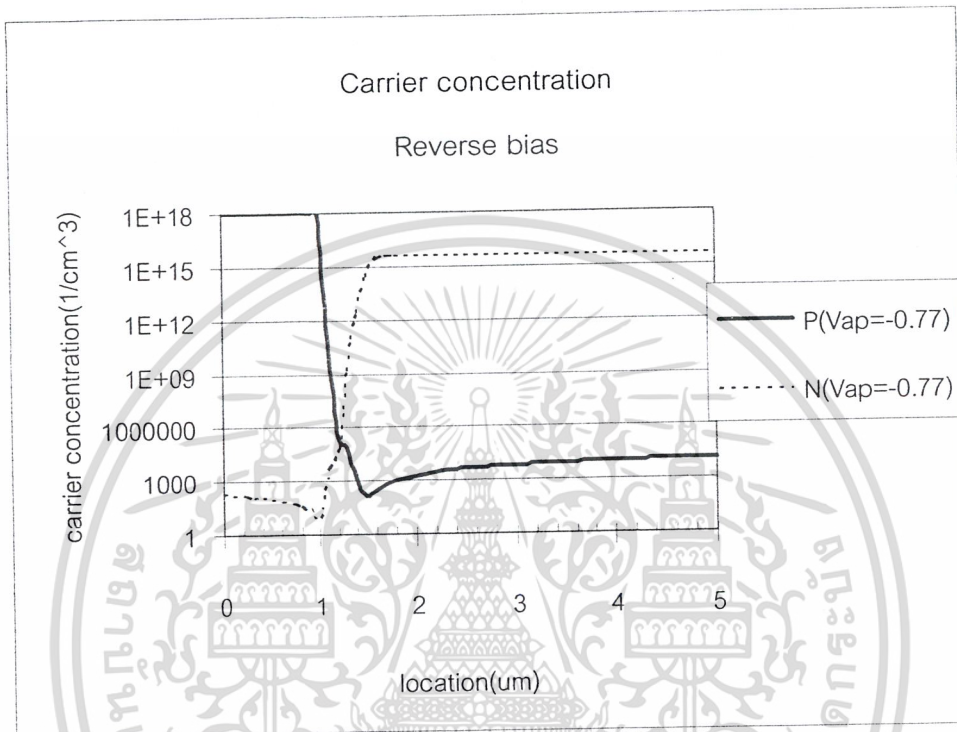


รูป 5.4 ความหนาแน่นพาหะขณะที่ไดโอดได้รับ ไบอัสตรง

จากรูป 5.4 จะเห็นว่าเมื่อรอยต่อได้รับ ไบอัสตรง ปริมาณของโฮลทางด้านเอ็นบริเวณใกล้ๆกับรอยต่อจะเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะโฮลจากทางด้านพีถูกเข้ามาทางด้านเอ็น และทำนองเดียวกันเมื่ออิเล็กตรอนถูกฉีดเข้าไปทางฝั่งพี ปริมาณของอิเล็กตรอนทางด้านพีบริเวณใกล้ๆกับรอยต่อจะเพิ่มขึ้น และเมื่ออ่านค่าเปรียบเทียบกับกรณีที่ยังไม่ได้รับ ไบอัสพบว่า กรณีมีการไบอัสจะมีการฉีดของพาหะมากกว่า ทั้งนี้ก็เพราะขณะที่ไดโอดได้รับไบอัสตรงศักดาไฟฟ้าภายในรอยต่อลดลงจึงทำให้การเคลื่อนที่ข้ามของพาหะไปยังด้านตรงข้าม เป็นไปโดยสะดวกมากกว่า

กรณีโคโอดได้รับไบอัสย้อนกลับ

ทำการป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับเป็น -0.77 โวลต์ ($V_{ap} = -0.77$) และทำการรันโปรแกรมโดยใช้จำนวนวนซ้ำ 30,000 รอบ จากผลลัพธ์ที่คำนวณได้ นำมาพล็อตกราฟได้ดังนี้

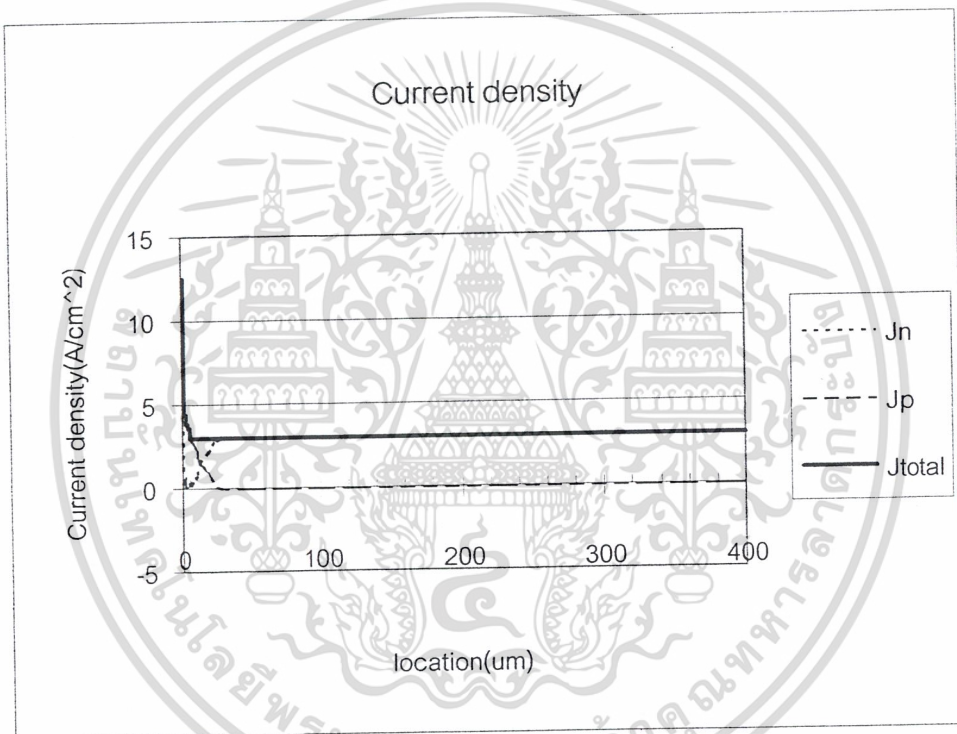


รูป 5.5 ความหนาแน่นพาหะขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ

จากรูป 5.5 จะเห็นว่าเมื่อรอยต่อได้รับไบอัสย้อนกลับ ค่าศักดาไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อจะมีค่าสูงขึ้นทำให้พาหะข้างมากแพร่ข้ามรอยต่อไม่ได้ แต่พาหะที่แพร่ข้ามได้คือโฮลทางด้านเอ็นและอิเล็กตรอนทางด้านพี ซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อยจะไหลข้ามรอยต่อได้ ดังนั้นจึงปริมาณความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยบริเวณใกล้ๆกับบริเวณปกคลุมพาหะ(ที่ตำแหน่ง 1-1.5 ไมครอน)มีจำนวนลดลง

5.3 ค่าความหนาแน่นกระแส

ค่าความหนาแน่นกระแสรวมของไดโอดเกิดจากค่าความหนาแน่นกระแสของโฮลบวกกับความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอน โดยผลลัพธ์ในส่วนของค่าความหนาแน่นกระแสจะเก็บไว้ในรูปแบบของไฟล์เอ็กซ์เซล แต่ละไฟล์กับค่าศักดาไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นพาหะ เพราะจะพิจารณาค่าความหนาแน่นกระแสที่จุดกึ่งกลางระหว่างเมซ ซึ่งต่างจากค่าศักดาไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นพาหะ ที่คำนวณหาค่าที่จุดเมซต่างๆ ซึ่งเมื่อพล็อตกราฟของค่าความหนาแน่นกระแสทั้งหมดได้ดังนี้



รูป 5.6 ค่าความหนาแน่นกระแสของไดโอดรอยต่อพีเอ็น

จากรูป 5.6 เป็นค่าความหนาแน่นกระแสขณะที่ไดโอดรอยต่อพีเอ็นได้รับไบอัสตรง โดยจากกราฟจะเห็นว่า ลักษณะกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง กระแสมีค่าเท่ากันตลอด ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่สามารถยืนยันว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมจำลองนี้ เชื่อถือได้ และจากกราฟจะเห็นว่าค่าความหนาแน่นที่อ่านได้มีค่าประมาณ 3.5 A/cm^2

บทที่ 6

ผลลัพธ์โปรแกรมในส่วนการคำนวณแบบ 2 มิติ

ในส่วนของการคำนวณแบบ 2 มิติ เนื่องจากแบบจำลองมีขนาดใหญ่และมีจำนวนจุดที่คำนวณมาก จึงทำให้รูปกราฟที่แสดงผลในส่วนของการคำนวณแบบ 2 มิติ และการจัดเก็บผลลัพธ์จะต่างจากแบบ 1 มิติ กล่าวคือผลลัพธ์จะถูกแยกเก็บคนละแผ่นงาน(sheet) และผลลัพธ์ที่คำนวณได้ที่เมฆ(j,i) ก็จะถูกเก็บในตำแหน่งเมฆ(j,i) เนื่องจากมีค่าที่คำนวณได้จำนวนมากและปัญหาทางด้านเทคนิคที่ยังไม่สามารถพล็อตกราฟเทียบกับระยะจริงของไดโอดได้ จึงทำให้การวิเคราะห์สามารถมองได้เพียงแนวโน้มโดยรวมเท่านั้น แต่จากการที่เรามีผลลัพธ์ในทุกจุดบนแบบจำลองทำให้เราสามารถเลือกวิเคราะห์เฉพาะส่วนที่เราสนใจได้ ซึ่งในที่นี้จะเลือกพิจารณาบริเวณรอยต่อของพีและเอ็น

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387
3	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387
4	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387
5	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387
6	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387
7	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387
8	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387
9	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387
10	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387
11	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387
12	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387	0.288387

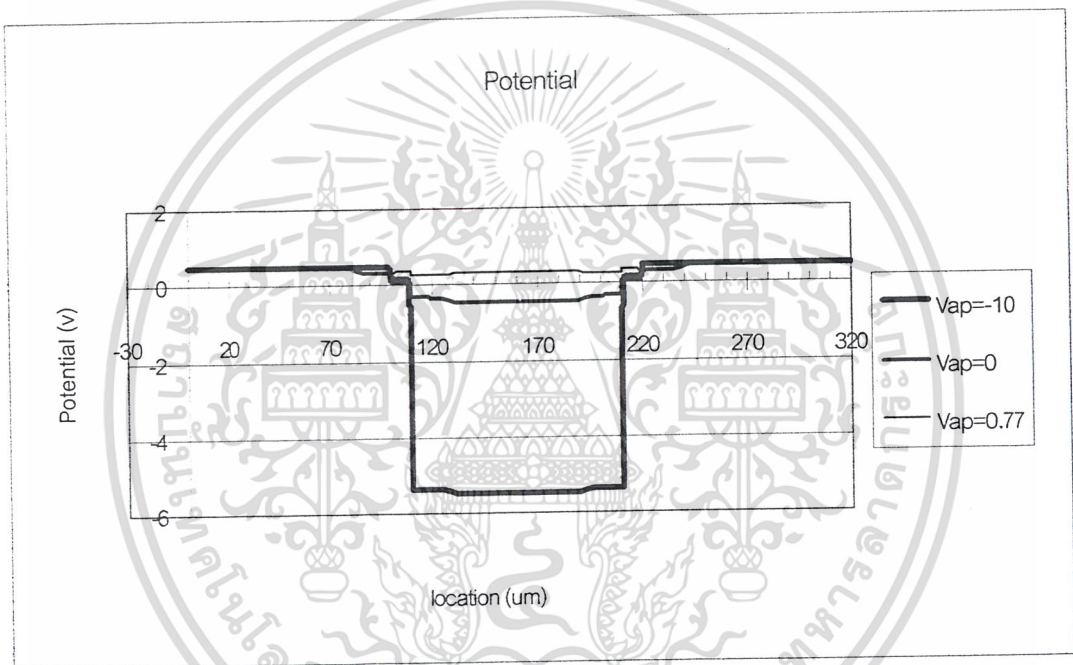
รูป 6.1 การเก็บผลลัพธ์ที่คำนวณได้ในไฟล์ของเอ็กซ์เซล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1 ค่าศักดาไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นพาหะบริเวณผิวหน้าไดโอด

ค่าศักดาไฟฟ้า

เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่บริเวณผิวหน้า(surface) จะใช้เป็นค่าเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ในการคำนวณค่าทั้งหมด จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาค่าศักดาไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นพาหะบริเวณผิวหน้าของไดโอดโดยที่ตำแหน่ง 0-100 ไมครอน และ 220-320 ไมครอนเป็นส่วนของเอ็นพลัส ที่ตำแหน่ง 100-110 ไมครอน และ 210-220 ไมครอน เป็นส่วนของเอ็น และที่ตำแหน่ง 110-210 ไมครอน เป็นส่วนของพี ซึ่งสามารถพล็อตกราฟได้ดังนี้

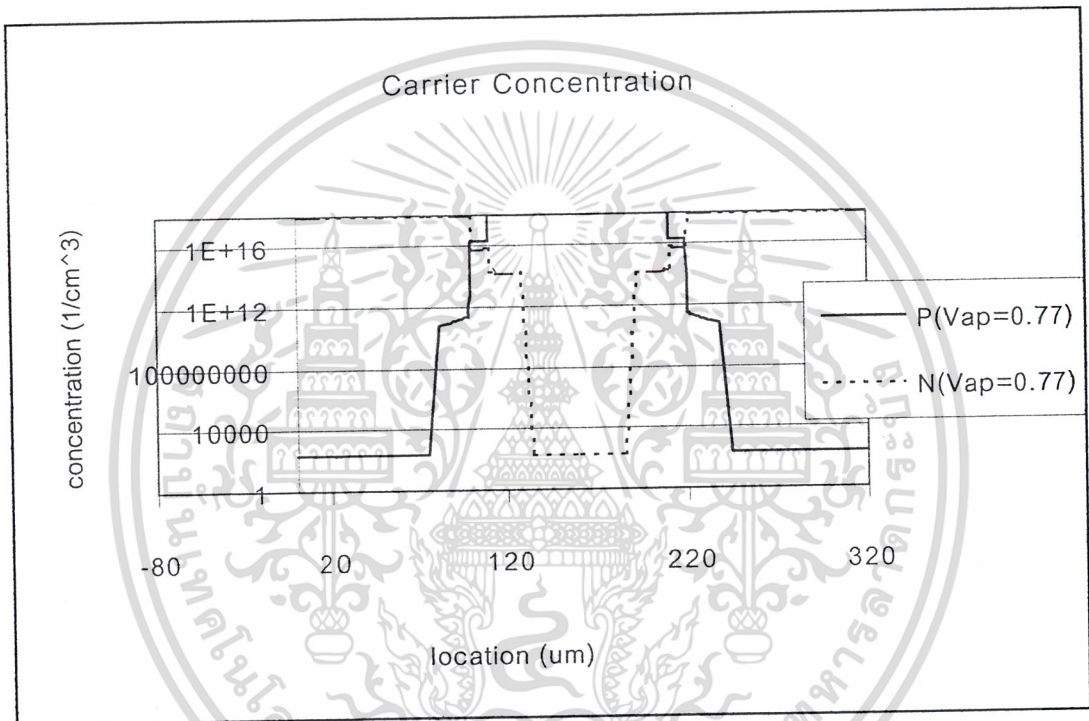


รูป 6.2 ค่าศักดาไฟฟ้าบริเวณผิวหน้าไดโอดที่ไบอัสต่างๆ

ที่สภาวะสมดุลจะเกิดสนามไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณรอยต่อ และเนื่องจากการที่มีสนามไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อพีเอ็นนี้เองจึงทำให้เกิด ศักดาไฟฟ้าบริเวณรอยต่อ หรือที่เรียกว่า แรงดันภายใน(built in voltage) และในการคำนวณ โดยโปรแกรมนี้ อ่านค่าได้ 0.75 โวลต์ และเมื่อไบอัสตรง แรงดันไบอัสภายนอกจะ ไปหักล้างศักดาไฟฟ้าภายในรอยต่อ จึงทำให้ศักดาไฟฟ้าภายในรอยต่อมีค่าลดลง และจากผลลัพธ์ของโปรแกรม ศักดาไฟฟ้าภายในรอยต่อมีค่าลดลงเป็น 0.1 โวลต์ และสำหรับกรณี ที่ไดโอดได้รับไบอัสย้อนกลับ แรงดันไบอัสภายนอกจะ ไปช่วยเพิ่มศักดาไฟฟ้าภายในรอยต่อ จึงทำให้ศักดาไฟฟ้าภายในรอยต่อมีค่าเพิ่มขึ้นและจากผลลัพธ์ของโปรแกรม ศักดาไฟฟ้าภายในรอยต่อมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 6 โวลต์

ความหนาแน่นของพาหะ

ในส่วนของค่าความหนาแน่นพาหะทั้งอิเล็กตรอนและโฮล ก็ต้องมีการพิจารณาก่อนเช่นเดียวกับค่าศักดาไฟฟ้า เพราะต้องใช้ค่าความหนาแน่นพาหะที่บริเวณผิวหน้านี้เป็นค่าเงื่อนไขขอบเขต โดยที่ตำแหน่ง 0-100 ไมครอน และ 220-320 ไมครอนเป็นส่วนของเอ็นพลัส ที่ตำแหน่ง 100-110 ไมครอน และ 210-220 ไมครอน เป็นส่วนของเอ็น และที่ตำแหน่ง 110-210 ไมครอน เป็นส่วนของพี



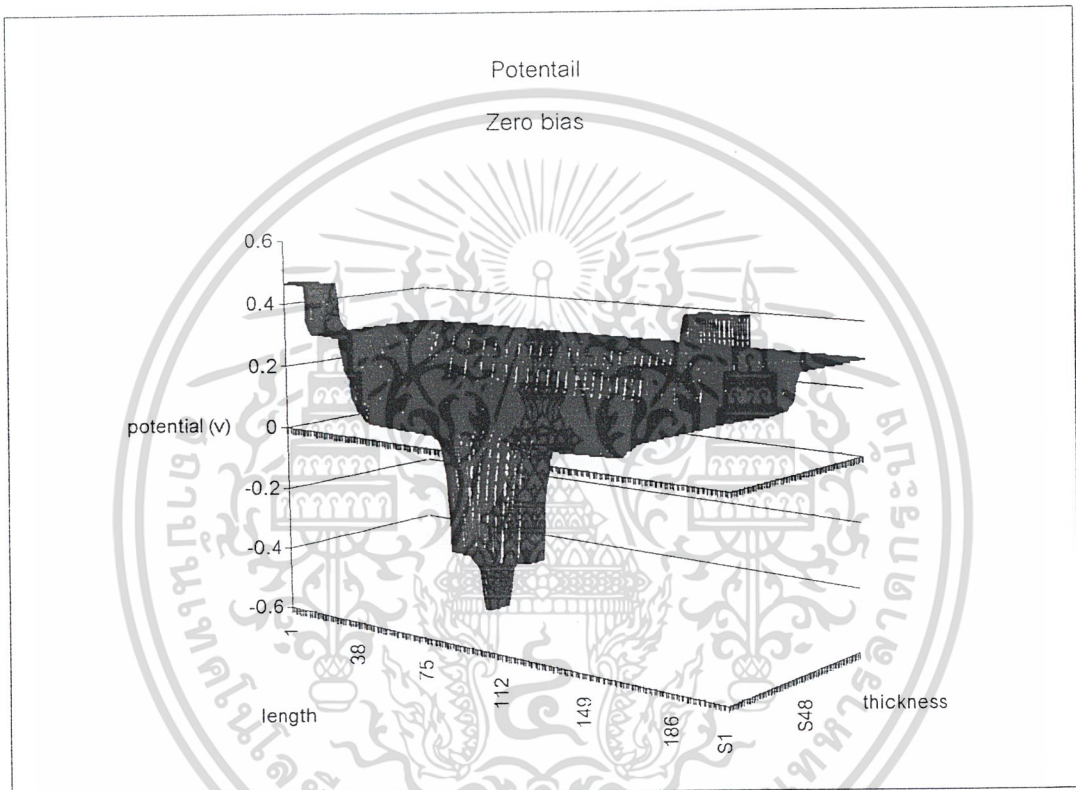
รูป 6.3 ค่าความหนาแน่นพาหะที่บริเวณผิวหน้าไดโอดขณะได้รับไบอัสตรง

จากรูป 6.3 เริ่มพิจารณาจากความหนาแน่นอิเล็กตรอน บริเวณรอยต่อเอ็นและพี อิเล็กตรอนจากเอ็นจะแพร่ข้ามไปยังฝั่งพี กรณีมีไบอัสตรง อิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะส่วนมากสามารถแพร่ข้ามไปได้ ในทำนองเดียวกัน โฮลที่ด้านพีก็จะแพร่ข้ามมายังฝั่งเอ็น ได้มาก ทำให้โฮลซึ่งเป็นพาหะข้างน้อยมีปริมาณมากขึ้นที่บริเวณรอยต่อพีเอ็น

6.2 ค่าศักดาไฟฟ้าของไดโอด

กรณีที่ไดโอดยังไม่ได้รับไบอัส

ทำการคำนวณโปรแกรมแบบ 2 มิติโดยที่ทำการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไบอัส เริ่มจากแบบที่ไดโอดยังไม่ได้รับการไบอัส ($V_{ap}=0$) ซึ่งค่าของศักดาไฟฟ้าทั้งหมดในทุกๆจุดที่มีการคำนวณได้ จะเก็บไว้ในไฟล์ของเอ็กเซล และทำการพล็อตรูปภาพได้ดังนี้



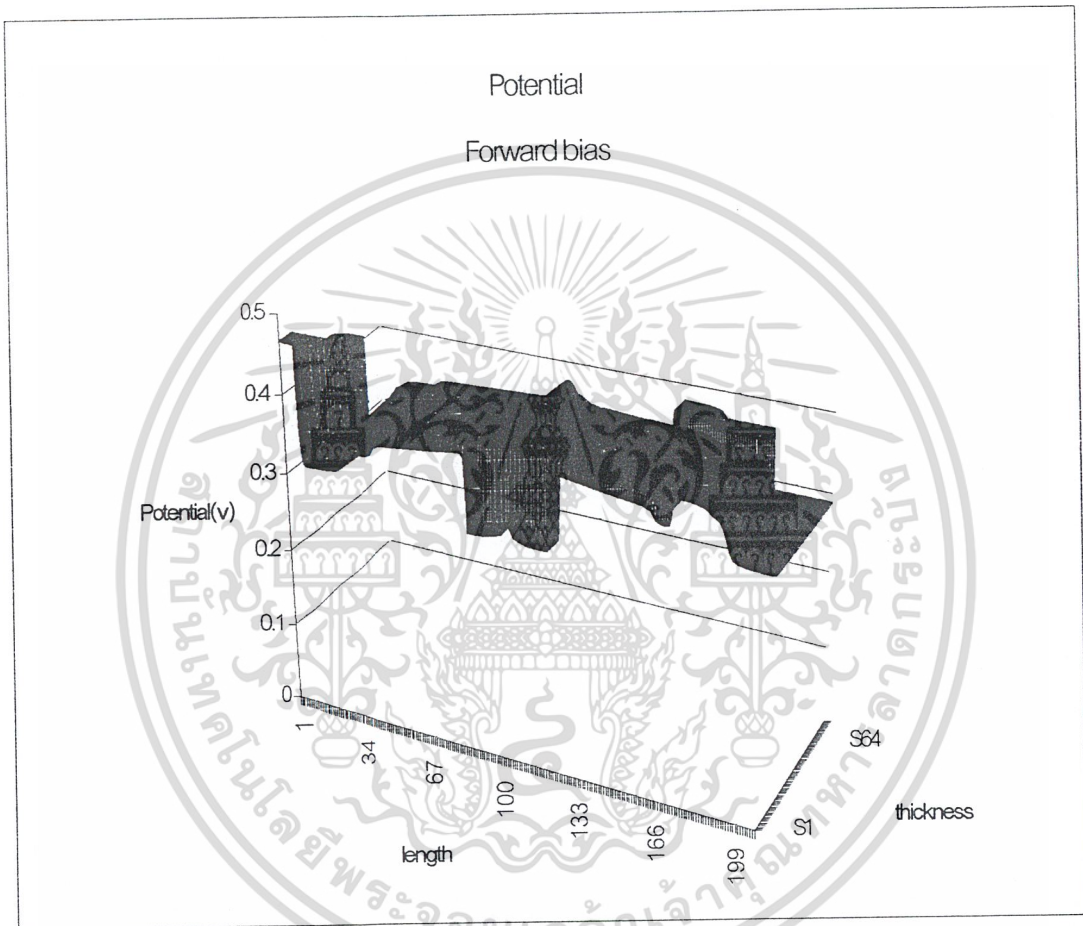
รูป 6.4 ศักดาไฟฟ้าของไดโอดรอยต่อพีเอ็นขณะที่ยังไม่ได้รับ ไบอัส

จากรูป 6.4 หากมองรูปภาพในแนวยาวซึ่งเป็นส่วนของ n+, n, p+, n, n+ ตามลำดับ จะพบว่าศักดาไฟฟ้าบริเวณรอยต่อพีและเอ็น ซึ่งก็คือ แรงดันภายใน(built in voltage) ซึ่งค่าที่ได้ประมาณ 0.75 โวลต์ ซึ่งก็ตรงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ นอกจากนี้จะเห็นว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนที่บริเวณพื้นผิวซิลิกอนไดออกไซด์(mesh i.=19-101 และ i.=105-187)และพื้นที่บริเวณคอนแทคของส่วนเอ็นพลัส(mesh i.=0-18 และ 188-206) จะมีค่าศักดาที่สูงกว่าและเมื่อระยะห่างออกมาที่ส่วนอื่นก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลง และที่คอนแทคของส่วนพี (mesh i.=102-104) ก็จะมีลักษณะเช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีไดโอดได้รับไบอัสตรง

ทำการรันโปรแกรมเช่นเดียวกับกรณีที่ยังไม่มีการไบอัสให้ไดโอด เพียงแต่เปลี่ยนแรงดันไบอัสเป็น 0.77 โวลต์ เมื่อโปรแกรมทำการรันเสร็จ ผลลัพธ์ของค่าศักดาไฟฟ้าทั้งหมดในทุกๆจุดที่มีการคำนวณได้จะเก็บไว้ในไฟล์ของเอ็กเซล และทำการพล็อตรูปภาพได้ดังนี้



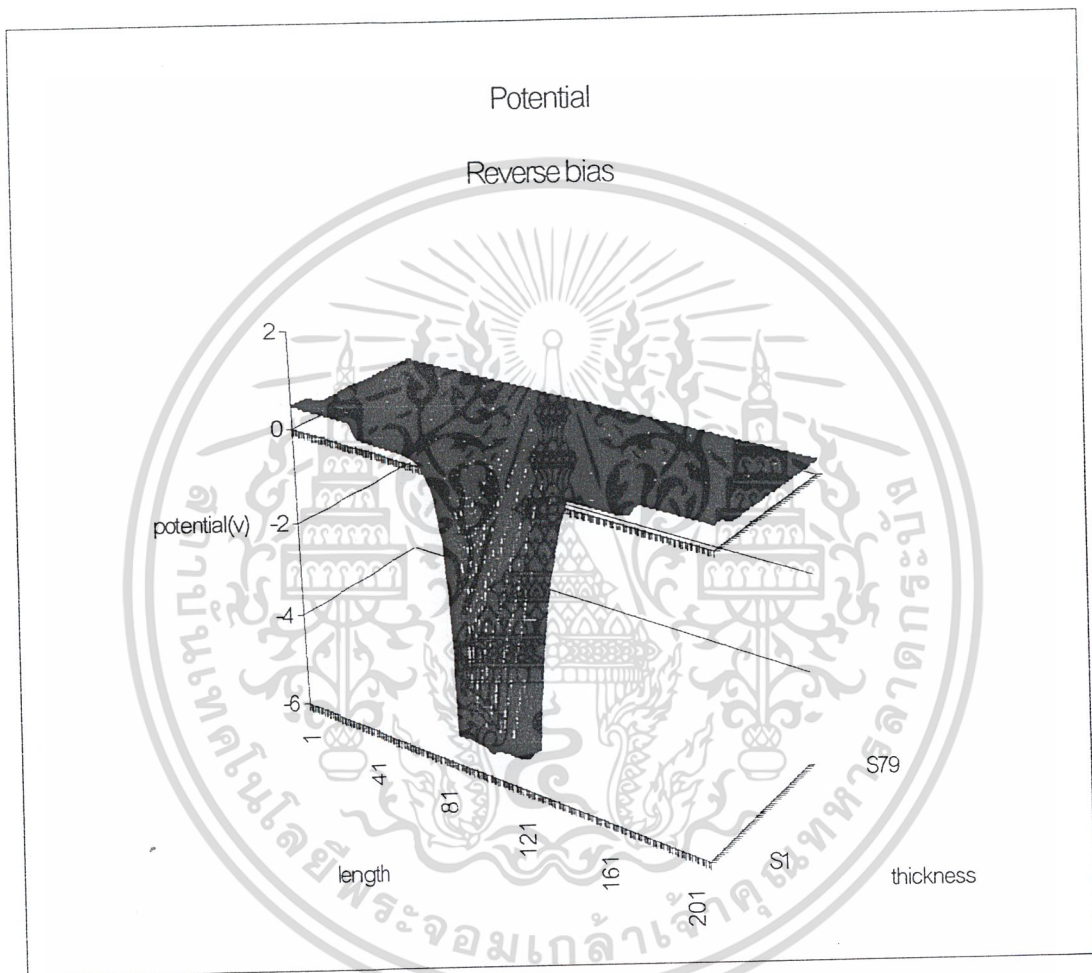
รูป 6.5 แสดงศักดาไฟฟ้าของไดโอดรอยต่อพีเอ็นขณะได้รับไบอัสตรง

จากรูป 6.5 แสดงศักดาไฟฟ้าของไดโอดรอยต่อพีเอ็นขณะได้รับไบอัสตรง มองรูปภาพในแนวยาวซึ่งเป็นส่วนของ n^+, n, p^+, n, n^+ ตามลำดับ พบว่าค่าศักดาไฟฟ้าบริเวณรอยต่อพีและเอ็น มีค่าลดลง ทั้งนี้ก็เนื่องจาก แรงดันไบอัสจากภายนอกไปหักล้างกับแรงดันภายใน ซึ่งค่าที่อ่านได้จากกราฟประมาณ 0.1 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีไดโอดได้รับไบอัสย้อนกลับ

ทำการรันโปรแกรมเช่นเดียวกับกรณีที่ยังไม่มีการไบอัสให้ไดโอด เพียงแต่เปลี่ยนแรงดันไบอัสเป็น -10 โวลต์ เมื่อโปรแกรมทำการรันเสร็จ ผลลัพธ์ของค่าศักดาไฟฟ้าทั้งหมดในทุกๆจุดที่มีการคำนวณ ได้จะเก็บไว้ในไฟล์ของเอ็กเซล และทำการพล็อตรูปกราฟได้ดังนี้



รูป 6.6 แสดงศักดาไฟฟ้าของไดโอดรอยต่อพีเอ็นขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ

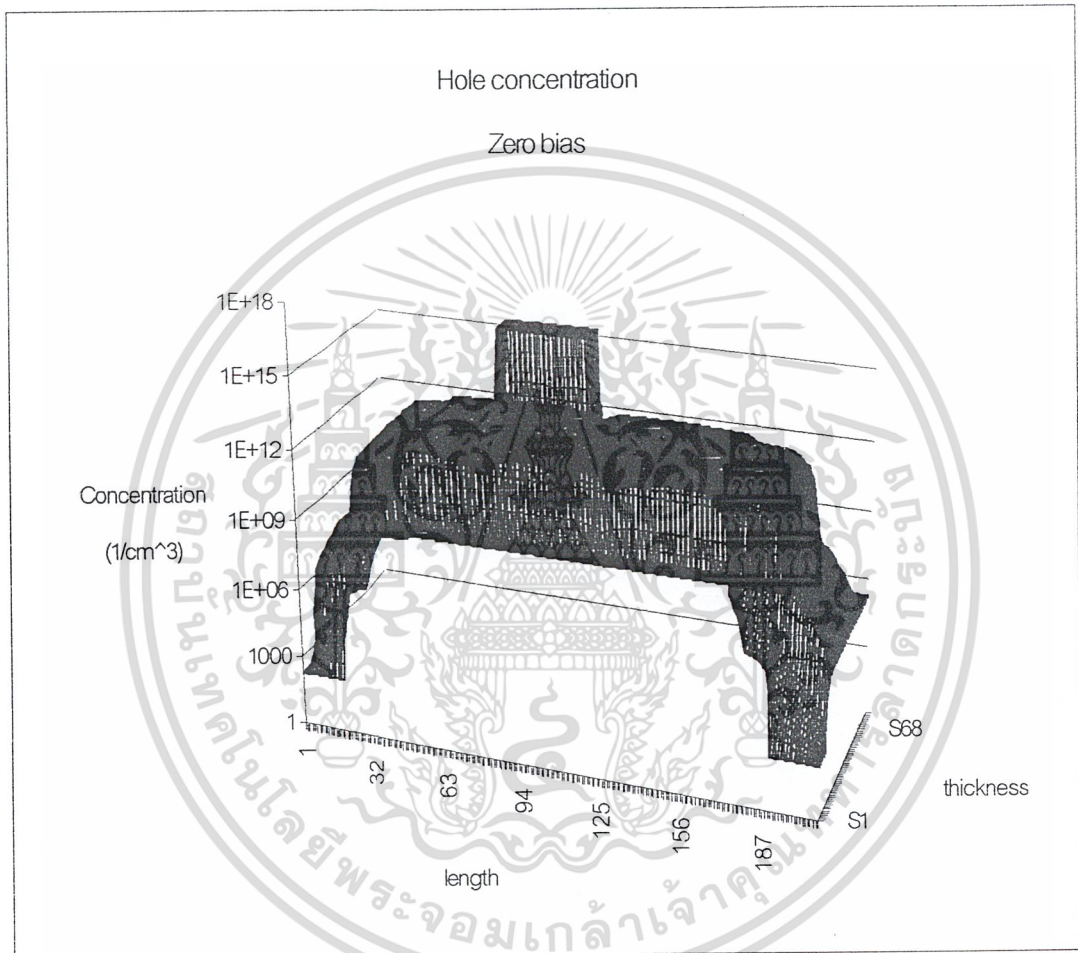
จากรูป 6.6 แสดงศักดาไฟฟ้าของไดโอดรอยต่อพีเอ็นขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ พบว่าค่าศักดาไฟฟ้าบริเวณรอยต่อพีและเอ็น มีค่าเพิ่มขึ้นมาก ทั้งนี้ก็เนื่องจาก แรงดันไบอัสจากภายนอกไปเสริมกับแรงดันภายในของไดโอดรอยต่อพีเอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 ค่าความหนาแน่นของโฮล

กรณีที่ไดโอดยังไม่ได้รับไบอัส

จากการทำงานของโปรแกรมแบบ 2 มิติ เมื่อเราทำการรันโปรแกรมก็จะทำให้ได้ค่าคุณสมบัติต่างๆของไดโอดที่ตำแหน่งที่เมซต่างๆ ในกรณีค่าของความหนาแน่นโฮลจะถูกเก็บไว้ในไฟล์ชื่อ P ซึ่งเราสามารถพล็อตรูปภาพได้ดังนี้

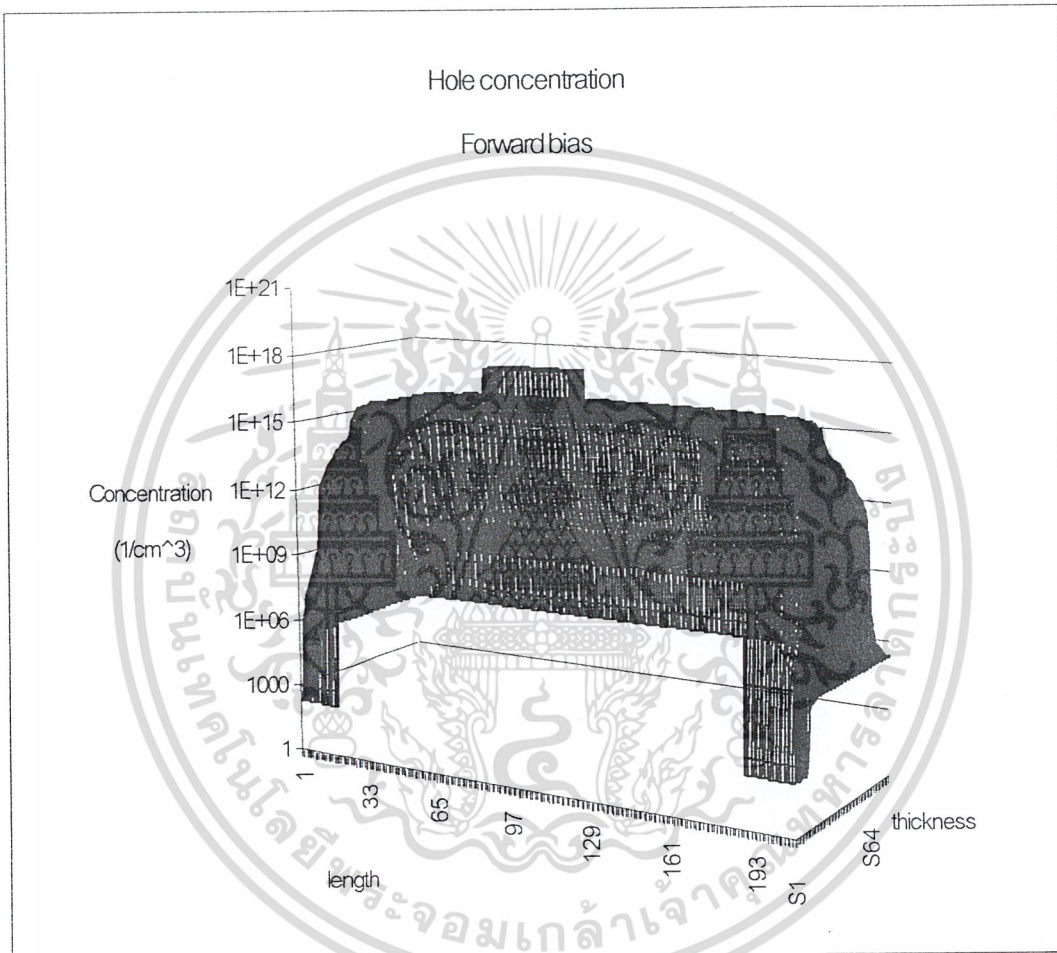


รูป 6.7 ความหนาแน่นของโฮลขณะที่ไดโอดยังไม่ได้รับไบอัส

จากรูป 6.7 แสดงความหนาแน่นของโฮลขณะที่ไดโอดยังไม่ได้รับไบอัส โฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนมากในพี (บริเวณที่มีค่าสูงสุดในรูปภาพ) จะแพร่ข้ามไปยังส่วนเอ็นซึ่งอยู่ด้านข้างทั้งสองด้าน และจะหยุดแพร่ข้ามเมื่อสมดุลย์ โดยจากกราฟจะเห็นว่าโฮลซึ่งเป็นพาหะข้างน้อยในเอ็นและเอ็นพลัสมีค่ามากเฉพาะบริเวณรอยต่อและค่อยๆ ลงเมื่อระยะห่างออกไปจากรอยต่อ

กรณีที่ได้โอดได้รับไบอัสตรง

ในกรณีนี้ได้ผลลัพธ์จากการเปลี่ยนค่าแรงดันไบอัส(Vap)เป็น 0.77 โวลท์ แล้วรันโปรแกรมด้วยจำนวนการวนซ้ำ(EvolveN) 30000 รอบ ค่าผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณจะถูกเก็บเป็นไฟล์เอ็กซ์เซลเช่นเดียวกันกับกรณีอื่นๆ ซึ่งจะทำให้เราพล็อตรูปภาพ จากไฟล์ผลลัพธ์ที่ได้ดังนี้



รูป 6.8 ความหนาแน่นของโฮลขณะที่ไดโอดได้รับไบอัสตรง

จากรูป 6.8 แสดงความหนาแน่นของโฮลขณะที่ไดโอดได้รับไบอัสตรงโฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนมากในพี (บริเวณที่มีค่าสูงสุดในรูปภาพ) จะแพร่ข้ามไปยังส่วนอื่นซึ่งอยู่ด้านข้างทั้งสองด้านได้สะดวกขึ้นเพราะค่าศักดาไฟฟ้าบริเวณรอยต่อลดต่ำลง แต่หากเปรียบเทียบกับกรณีที่ไดโอดยังไม่ได้รับไบอัส พบว่าปริมาณโฮลที่แพร่ข้ามมีปริมาณสูงกว่า

กรณีศึกษาไดโอดได้รับไบอัสย้อนกลับ

เนื่องจากเราต้องการเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆของไดโอดที่แรงดันไบอัสต่างๆ กัน ในกรณีของไบอัสย้อนกลับก็เป็นกรณีหนึ่งที่จะทำการพิจารณา จากไฟล์ผลลัพธ์ที่ได้จากการรันโปรแกรมในกรณีไบอัสย้อนกลับ ค่าความหนาแน่นของโฮลก็เป็นส่วนหนึ่ง ซึ่งสามารถพล็อตกราฟได้ดังนี้



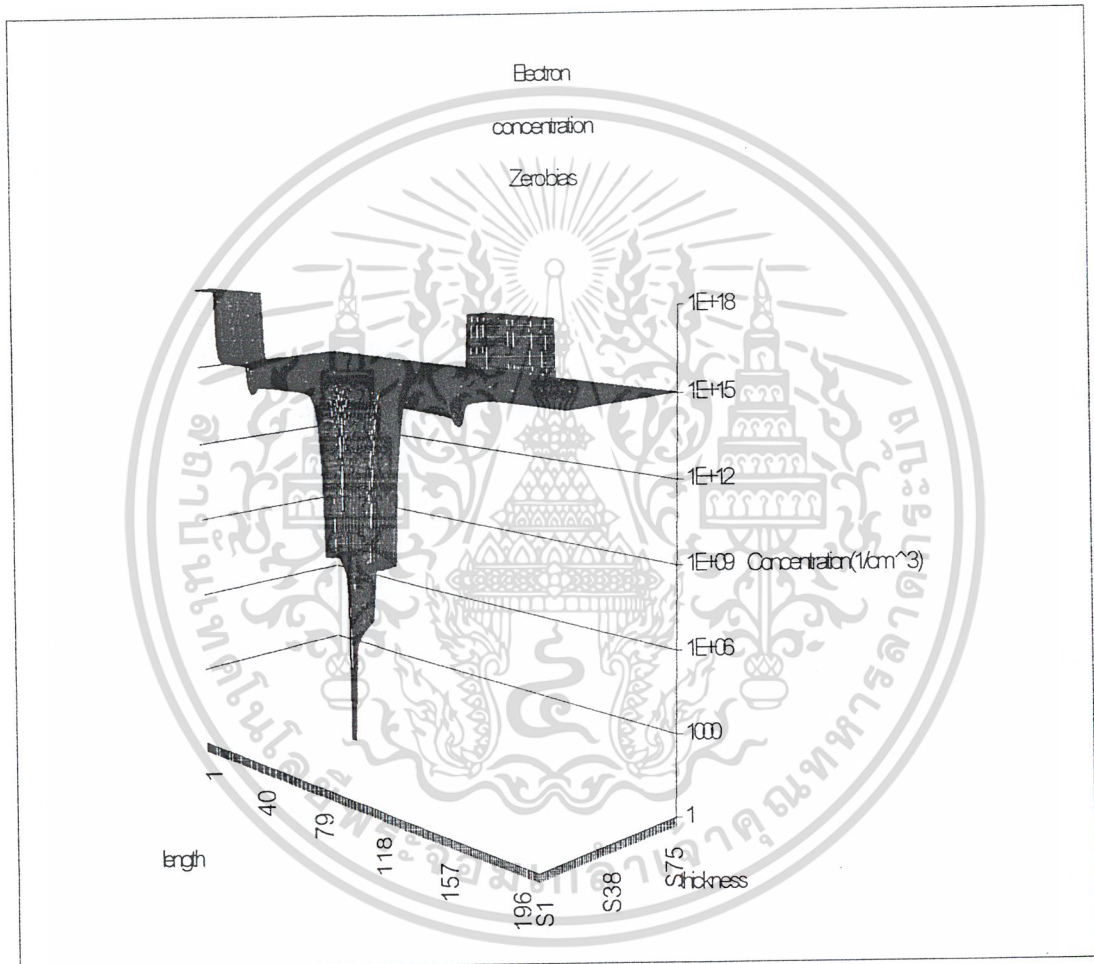
รูป 6.9 ความหนาแน่นของโฮลขณะที่ได้โอดได้รับไบอัสย้อนกลับ

จากรูป 6.9 แสดงความหนาแน่นของโฮลขณะที่ได้โอดได้รับไบอัสย้อนกลับ ค่าศักดาไฟฟ้าบริเวณรอยต่อที่สูงขึ้นทำให้การแพร่ของพาหะส่วนมากยากขึ้น มีเฉพาะพาหะข้างน้อยที่แพร่ข้ามได้ จึงทำให้ความหนาแน่นพาหะส่วนน้อยใกล้รอยต่อมีจำนวนลดลง โดยจะเห็นการเปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจนที่บริเวณรอยต่อ

6.4 ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

กรณีที่ไม่ได้อัดยังไม่ได้รับไบอัส

ค่าคุณสมบัติของไดโอดอีกอย่างที่จะทำการพิจารณา คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนซึ่งผลลัพธ์ก็ได้มาจากการรันโปรแกรมพร้อมกับค่าศักดาไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นโฮล แต่จะแยกเป็นอีกส่วนอย่างชัดเจน และสามารถพล็อตรูปภาพเพื่อทำการวิเคราะห์ได้ดังนี้

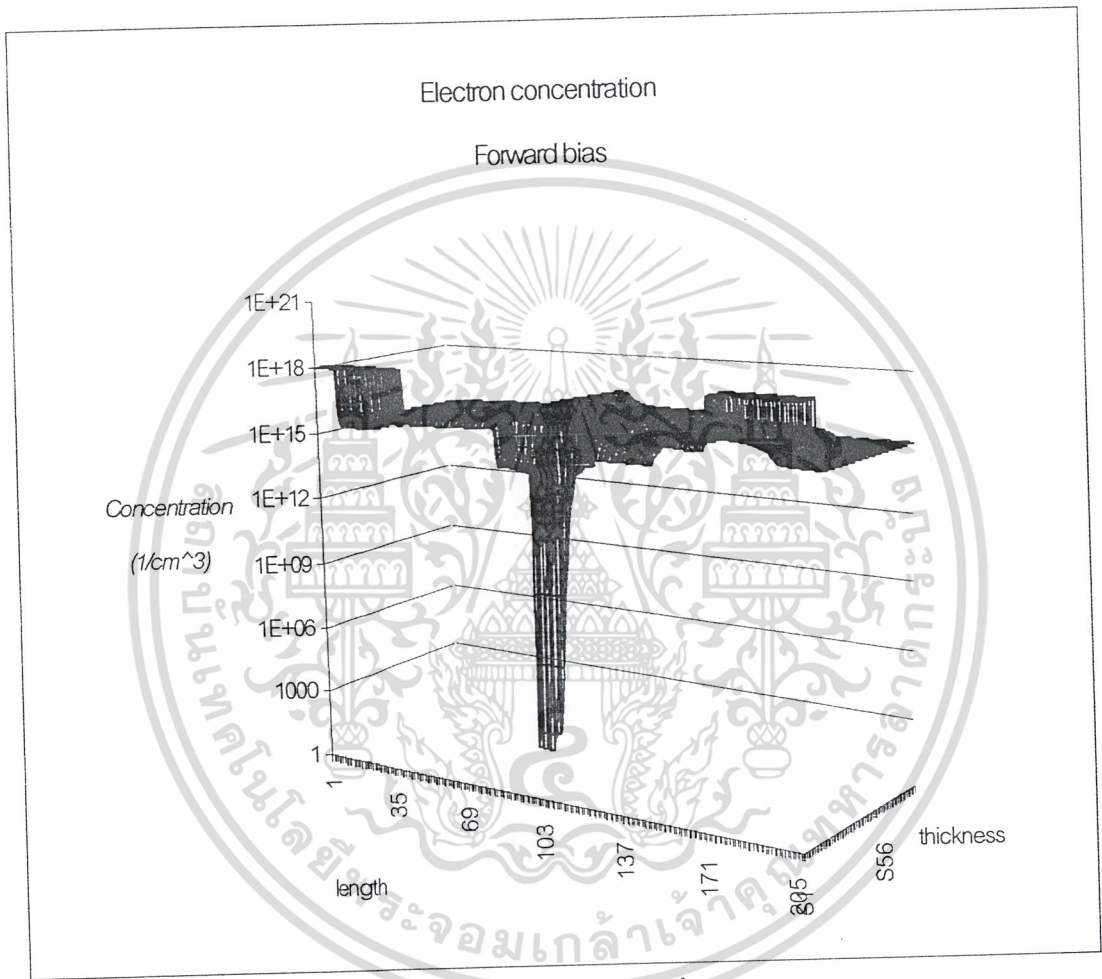


รูป 6.10 ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนขณะที่ไดโอดยังไม่ได้รับไบอัส

จากรูป 6.10 แสดงความหนาแน่นของอิเล็กตรอนขณะที่ไดโอดยังไม่ได้รับไบอัส จะเห็นว่าอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะส่วนมากในเอ็น จะแพร่ข้ามไปยังส่วนพีซึ่งมีเป็นอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อย โดยจะเห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กตรอนที่บริเวณรอยต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ไดโอดได้รับไบอัสตรง
 กรณีไดโอดได้รับไบอัสตรง ค่าของความหนาแน่นอิเล็กตรอนก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้น
 โดยค่าที่ได้และได้นำมาพล็อตกราฟ นี้ก็จะได้มาจากการรันโปรแกรมในกรณีของไดโอดเมื่อได้รับ
 ไบอัสตรงเช่นเดียวกัน



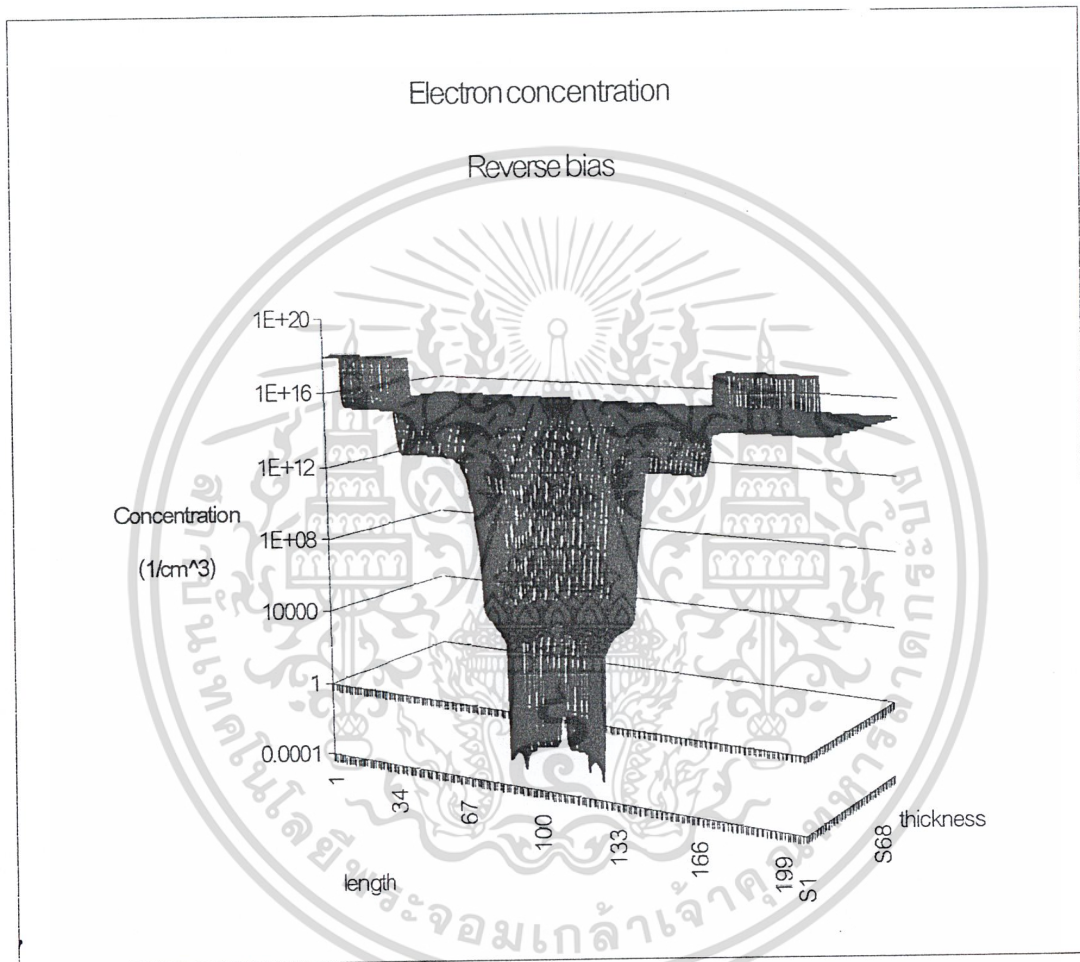
รูป 6.11 ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนขณะที่ไดโอดได้รับไบอัสตรง

จากรูป 6.11 แสดงความหนาแน่นของอิเล็กตรอนขณะที่ไดโอดได้รับไบอัสตรง จะเห็นว่า
 อิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะข้างน้อยของพี จะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นที่บริเวณรอยต่อ ทั้งนี้เนื่องจาก
 อิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะส่วนมากในเอ็น จะแพร่เข้ามาไปยังส่วนพีซึ่งอยู่บริเวณตรงกลางในรูปกราฟ
 โดยจะเห็นว่าอิเล็กตรอนมีค่ามากเฉพาะบริเวณรอยต่อและค่อยๆ ลงเมื่อระยะห่างออกไปจากรอย
 ต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ได้โอดได้รับไบอัสย้อนกลับ

ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่ได้จากการรันโปรแกรมจำลองการทำงานของไดโอดรอยต่อพีเอ็นแบบ 2 มิติ นี้ก็จะถูกเก็บไว้ในไฟล์เดียวกันกับค่าอื่นๆของกรณีไดโอดได้รับไบอัสย้อนกลับ ซึ่งจากไฟล์ผลลัพธ์สามารถแสดงรูปภาพได้ดังนี้



รูป 6.12 ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนขณะที่ไดโอดได้รับไบอัสย้อนกลับ

จากรูป 6.12 แสดงความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ขณะที่ไดโอดได้รับไบอัสย้อนกลับ ค่าศักดาไฟฟ้าบริเวณรอยต่อที่สูงขึ้นทำให้การแพร่ของพาหะส่วนมากยากขึ้น มีเฉพาะพาหะข้างน้อยที่แพร่ข้ามได้ จึงทำให้ความหนาแน่นพาหะส่วนน้อยใกล้ๆรอยต่อ(mesh 86 และ mesh 120)มีจำนวนลดลง โดยจะเห็นการเปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจนที่บริเวณรอยต่อ

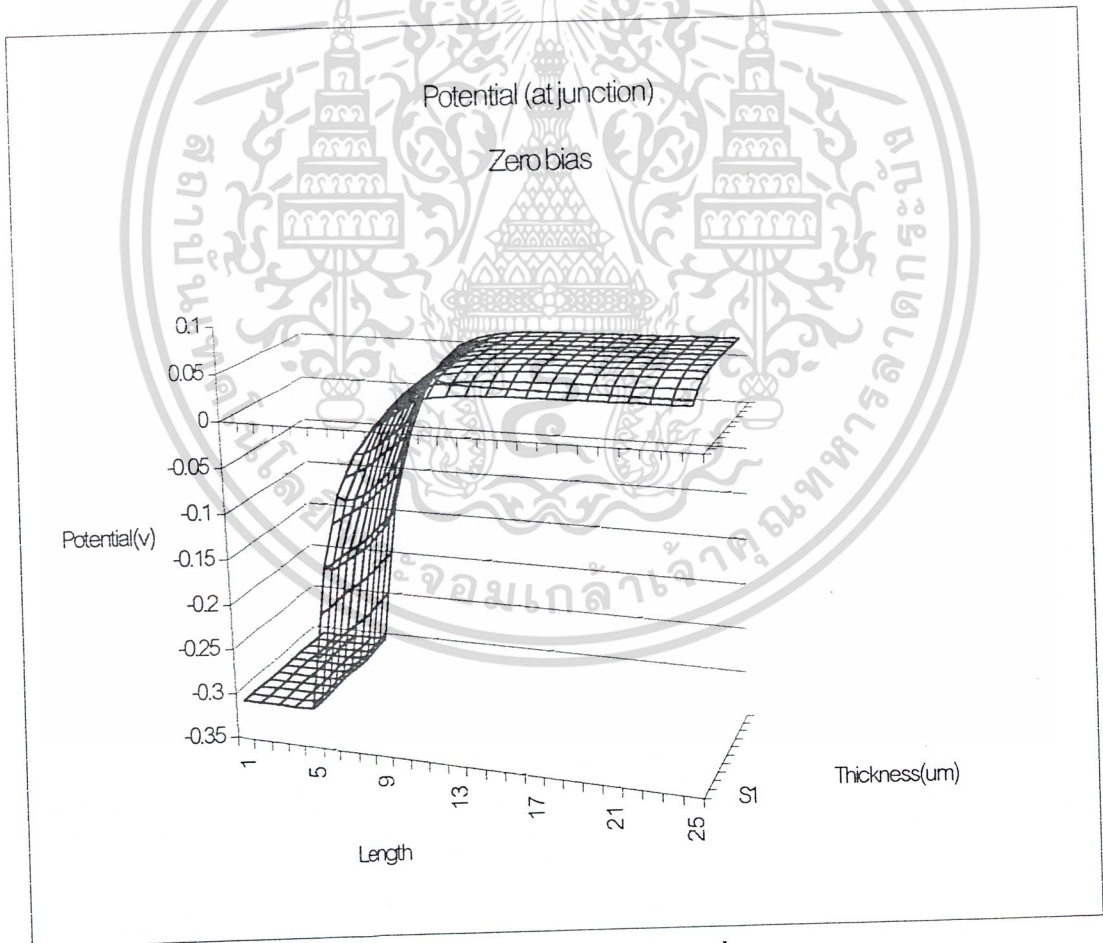
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.5 การพิจารณาค่าศักดาไฟฟ้าที่รอยต่อพีและเอ็น

จากข้อดีของโปรแกรมจำลองการทำงานไดโอดรอยต่อพีเอ็นแบบ 2 มิติ ที่มีค่าที่คำนวณได้ในทุกๆ ตำแหน่งของไดโอดรอยต่อพีเอ็นเก็บไว้ในไฟล์ผลลัพธ์ ทำให้สามารถเลือกที่จะดูค่าการเปลี่ยนแปลงที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งที่เราสนใจได้และในที่นี้จะเลือกพิจารณาค่าศักดาไฟฟ้าที่รอยต่อของพีพลัสและเอ็นกรณีนี่มีแรงดันไบอัสต่างๆกัน

กรณีที่ไดโอดยังไม่ได้รับไบอัส

เป็นการพิจารณาค่าศักดาไฟฟ้าที่ตำแหน่งเมฆแนวลีก $j=69$ ถึง 79 และแนวยาว $i = 116$ ถึง 140 แต่ละเมฆห่าง 0.1 ไมครอนและเป็นส่วนของพีพลัสในเมฆที่ $116-120$ และเป็นส่วนของเอ็นในเมฆที่ $120-140$ ดังนั้นในรูปนี้จึงเริ่มจากเป็นส่วนของพีพลัส 0.4 ไมครอนและเป็นส่วนของเอ็น 2 ไมครอน



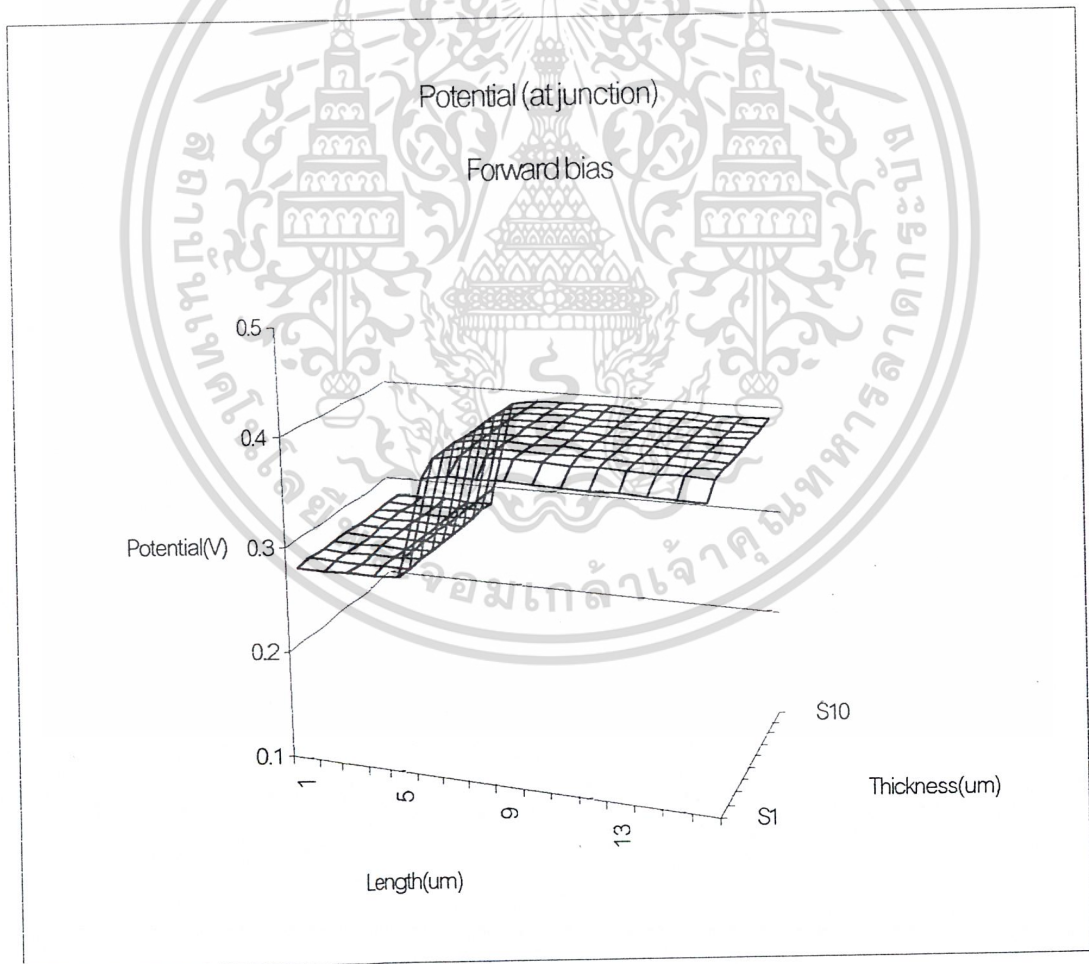
รูป 6.13 แสดงศักดาไฟฟ้าที่รอยต่อพีเอ็นขณะที่ยังไม่ได้รับไบอัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปกราฟ 6.13 จะเห็นว่าศักดาไฟฟ้าบริเวณรอยต่อพีเอ็นมีค่าประมาณ 0.4 โวลต์และบริเวณความยาว 0.4 ไมครอนเป็นบริเวณรอยต่อ ดังนั้นบริเวณที่มีแรงดันตกคร่อม ก็คือ บริเวณปลอดพาหะซึ่งจะเห็นว่า ส่วนใหญ่บริเวณปลอดพาหะจะอยู่ในส่วนของด้านเอ็นและจากกราฟอ่านค่าความกว้างบริเวณปลอดพาหะได้ประมาณ 1 ไมครอน

กรณีที่ได้โอดได้รับไปอัสตรง

เป็นการพิจารณาศักดาไฟฟ้าที่ตำแหน่งเมฆแนวลึก $j=69$ ถึง 79 และแนวยาว $i = 116$ ถึง 130 แต่ละเมฆห่าง 0.1 ไมครอนและเป็นส่วนของพีพลัสในเมฆที่ 116-120 และเป็นส่วนของเอ็นในเมฆที่ 120-130 ดังนั้นในรูปนี้จึงเริ่มจากเป็นส่วนของพีพลัส 0.4 ไมครอนและเป็นส่วนของเอ็น 1 ไมครอน



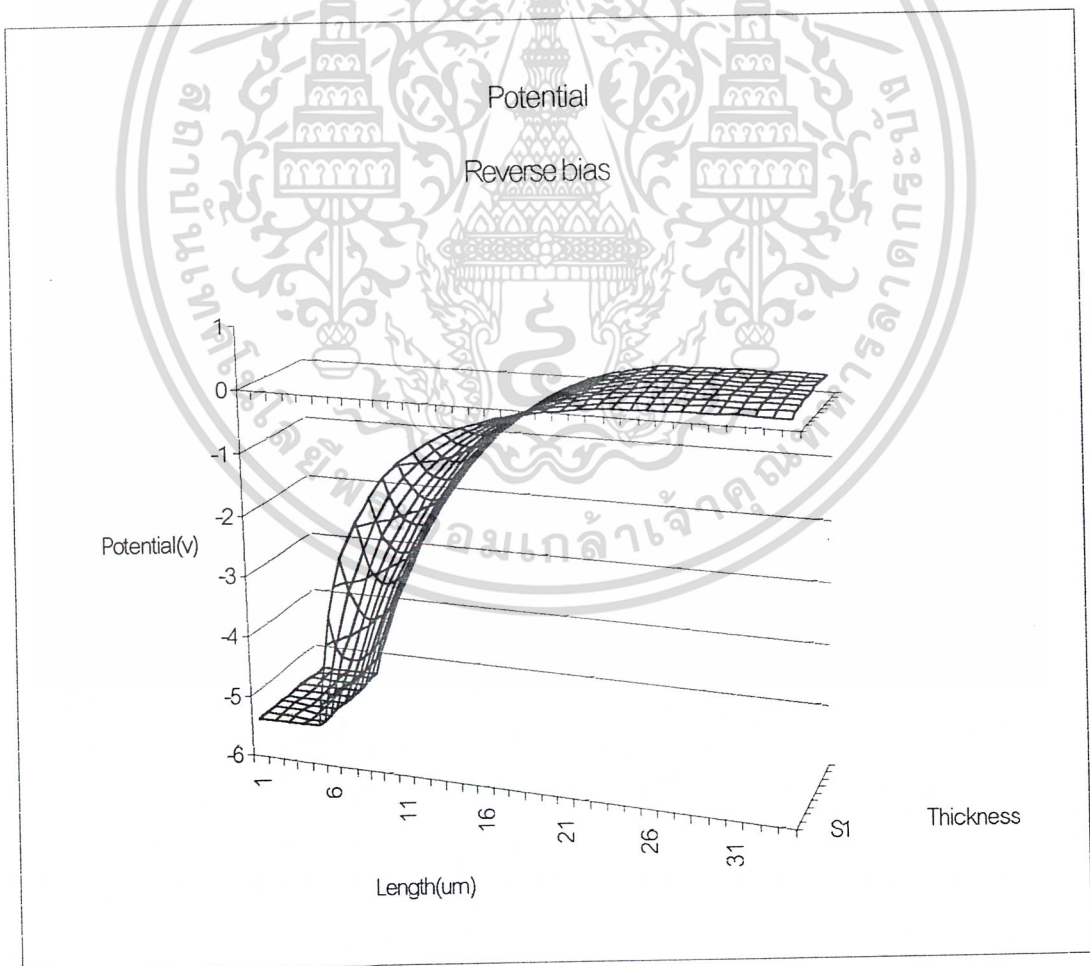
รูป 6.14 แสดงศักดาไฟฟ้าที่รอยต่อพีเอ็นขณะได้รับ ไปอัสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปกราฟ 6.14 จะเห็นว่าศักดาไฟฟ้าบริเวณรอยต่อพีเอ็นมีค่าลดลงจากกรณียังไม่มีการไบอัส คือมีค่าประมาณ 0.1 โวลต์และที่บริเวณความยาว 0.4 ไมครอนเป็นบริเวณรอยต่อ และค่าความกว้างบริเวณปลอดพาหะลดลงมาก จากกราฟอ่านค่าได้ประมาณ 0.1 ไมครอน ซึ่งเป็นการยืนยันกับทฤษฎีที่ว่า เมื่อมีการไบอัส ค่าศักดาไฟฟ้าบริเวณรอยต่อจะลดลงและบริเวณปลอดพาหะจะแคบลง

กรณีที่ไดโอดได้รับไบอัสย้อนกลับ

เป็นการพิจารณาศักดาไฟฟ้าที่ตำแหน่งเมชแนวตั้ง $j=69$ ถึง 79 และแนวยาว $i = 116$ ถึง 150 แต่ละเมชห่าง 0.1 ไมครอนและเป็นส่วนของพีพลัสในเมชที่ 116-120 และเป็นส่วนของเอ็นในเมชที่ 120-150 ดังนั้นในรูปนี้จึงเริ่มจากเป็นส่วนของพีพลัส 0.4 ไมครอนและเป็นส่วนของเอ็น 3 ไมครอน



รูป 6.15 แสดงศักดาไฟฟ้าที่รอยต่อพีเอ็นขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

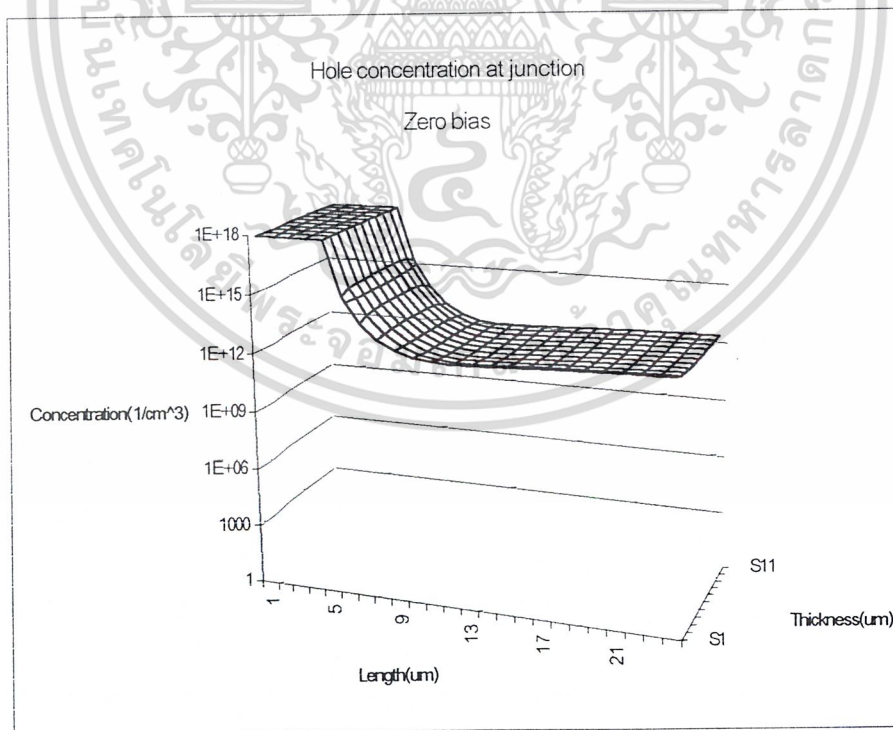
จากกราฟ 6.15 จะเห็นว่าศักดาไฟฟ้าบริเวณรอยต่อพีเอ็นมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจากกรณียังไม่มี การไบอัส คืออ่านค่าได้ประมาณ 5.5 โวลท์และที่บริเวณความยาว 0.4 ไมครอนเป็นบริเวณรอยต่อ จะเห็นว่าค่าความกว้างบริเวณปลอดพาหะขยายกว้างเพิ่มขึ้น จากกราฟอ่านค่าได้ประมาณ 2 ไมครอน ซึ่งเป็นการยืนยันกับทฤษฎีที่ว่า เมื่อไดโอดรอยต่อพีเอ็นได้รับ ไบอัสย้อนกลับ ค่าศักดาไฟฟ้าบริเวณรอยต่อจะเพิ่มขึ้นและบริเวณปลอดพาหะจะกว้างขึ้น

6.6 การพิจารณาความหนาแน่นพาหะที่รอยต่อพีและเอ็น

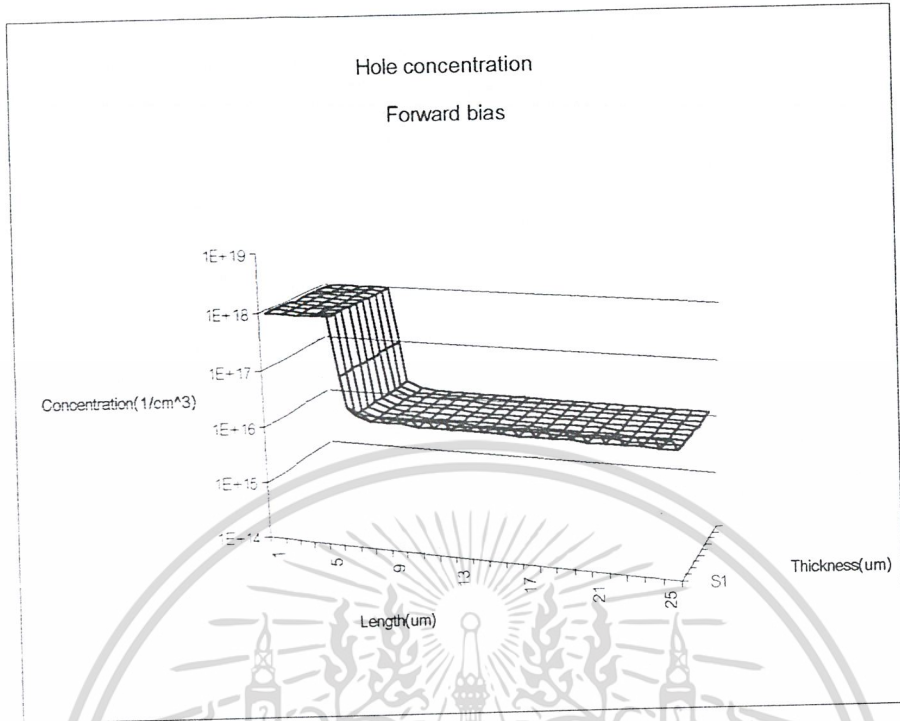
จากผลลัพธ์ที่มีอยู่ ทำให้สามารถเลือกที่จะดูค่าการเปลี่ยนแปลงที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง ที่เราสนใจได้และในที่นี้จะเลือกพิจารณาค่าความหนาแน่นพาหะทั้งสองที่รอยต่อของพีพลัสและ เอ็นกรณีมีแรงดันไบอัสต่างๆกัน

ค่าความหนาแน่นของโฮล

เลือกพิจารณาค่าความหนาแน่น โฮลที่รอยต่อพีพลัสและเอ็น โดยจะดูปริมาณความหนาแน่นโฮลที่สามารถแพร่ข้ามได้ในกรณียัง ไม่ได้รับ ไบอัสและเมื่อ ได้รับ ไบอัสตรง ตำแหน่งเมฆแนว ลึก $j=69$ ถึง 79 และแนวยาว $i=116$ ถึง 140 แต่ละเมฆห่าง 0.1 ไมครอนและเป็นส่วนของพีพลัส ในเมฆที่ $116-120$ และเป็นส่วนของเอ็นในเมฆที่ $120-140$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

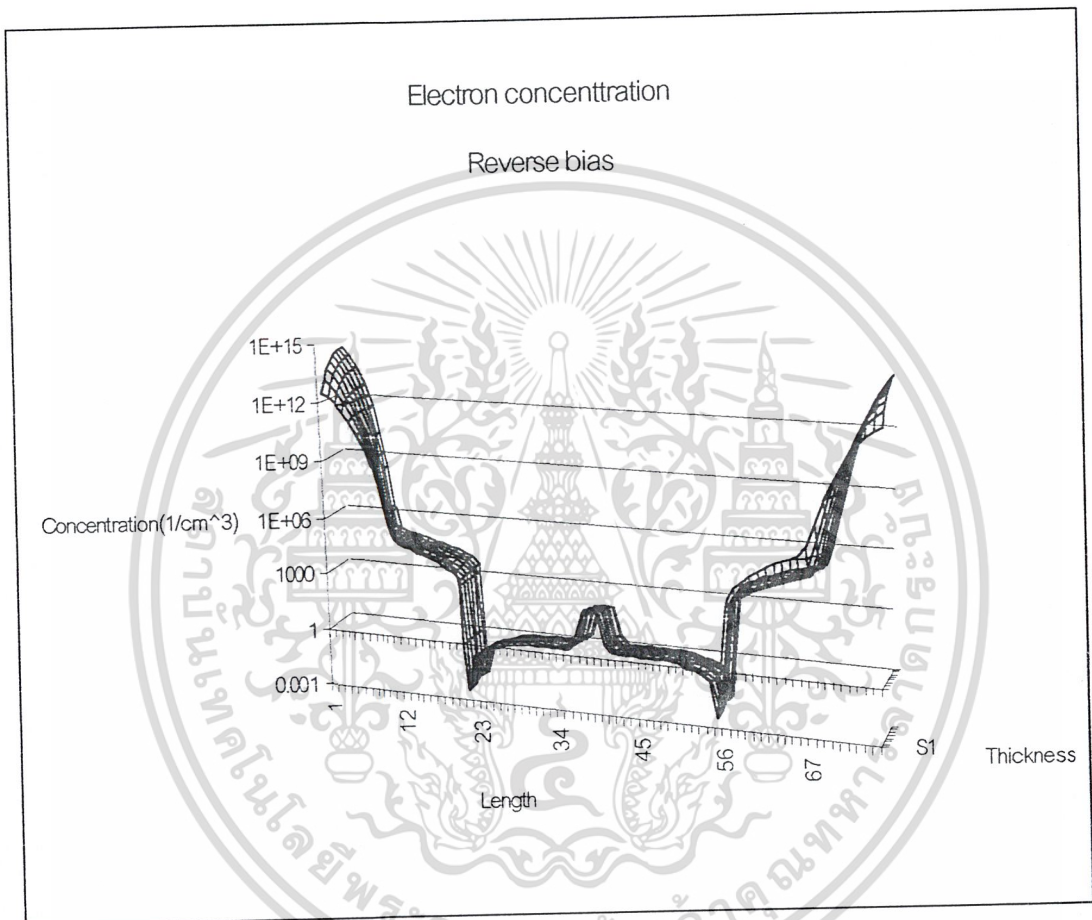


รูป 6.16 แสดงเปรียบเทียบความหนาแน่นโฮลบริเวณรอยต่อพีเอ็นกรณีไม่มีและมีไบอัสตรง

ในรูปนี้พิจารณาค่าแห่งเมฆแนวตั้ง $j=69$ ถึง 79 และแนวยาว $i = 116$ ถึง 140 แต่ละเมฆห่าง 0.1 ไมครอนและเป็นส่วนของฟิล์มในเมฆที่ $116-120$ และเป็นส่วนของเอ็นในเมฆที่ $120-140$ จึงเริ่มจากเป็นส่วนของฟิล์ม 0.4 ไมครอนและเป็นส่วนของเอ็น 2 ไมครอน ซึ่งเป็นการแสดงเปรียบเทียบความหนาแน่นโฮลบริเวณรอยต่อพีเอ็นกรณีไม่มีและมีไบอัส ซึ่งสามารถบอกได้ว่ากรณีที่มีไบอัสตรงปริมาณของโฮลที่ฉีดเข้ามา มีปริมาณมากกว่า จากกราฟอ่านค่าได้ประมาณ $1E16$ ขณะที่กรณีไม่มีไบอัส ปริมาณโฮลที่แพร่เข้าไปด้านเอ็นมีปริมาณเพียง $1E12$

ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

เป็นการพิจารณาค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างพีพลัสและเอ็นทั้งสองด้าน ด้านซ้ายที่ตำแหน่งที่ 21 ในภาพ และรอยต่อระหว่างพีพลัสและเอ็นด้านขวาที่ตำแหน่งที่ 55 ในภาพ (ส่วนของพีพลัสคือตั้งแต่ตำแหน่งที่ 21 ถึง 55)



รูปที่ 6.17 ความหนาแน่นอิเล็กตรอนขณะที่ไดโอดได้รับไบอัสย้อนกลับ

จากรูปที่ 6.17 เป็นการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อยในส่วนของพี และ จากเหตุผลที่ว่า แรงดันไบอัสย้อนกลับจะทำให้อิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อยไหลข้ามรอยต่อได้ จึงทำให้ปริมาณความหนาแน่นพาหะข้างน้อยใกล้รอยต่อลดลง ซึ่งจะเห็นได้จากรูปกราฟที่ตำแหน่งที่ 21 สำหรับรอยต่อด้านซ้ายและตำแหน่งที่ 55 สำหรับรอยต่อด้านขวา

บทที่ 7

วิเคราะห์และสรุปผล

เนื่องจากโปรแกรมจำลองการทำงานไดโอดรอยต่อพีเอ็นนี้ เป็นงานที่พัฒนาขึ้นจากโปรแกรมเดิมที่เขียนขึ้นด้วยโปรแกรมภาษาวิชวลเบสิกซึ่งได้รับการยอมรับว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมเดิม ค่าต่างๆ ที่ได้สามารถแทนคุณสมบัติทางกายภาพของไดโอดรอยต่อพีเอ็นได้ ดังนั้นในลำดับแรก จึงทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรมเดิมเทียบกับโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นใหม่พบว่า ค่าที่ได้จากโปรแกรมทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันมาก จึงยอมรับได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นใหม่โดยใช้โปรแกรมภาษาวิชวลซีสามารถยอมรับได้

โดยจากผลลัพธ์ในการจำลองทั้งแบบ 1 มิติและ 2 มิติ จะเห็นได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้ตรงกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ ของไดโอดรอยต่อพีเอ็นไม่ว่าจะเป็น ค่าศักดาไฟฟ้าบริเวณรอยต่อ (Potential : Psi), ความเข้มข้นพาหะ(Carrier concentration : P,N)และความหนาแน่นกระแส (Current density :J)

ในส่วนของโปรแกรมจำลองการทำงานไดโอดรอยต่อพีเอ็นแบบ 1 มิติ จะเป็นวิธีการที่ง่าย รวดเร็ว ซึ่งเวลาที่ใช้ในการประมวลผลลดลงอย่างมาก โดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นใหม่โดยใช้โปรแกรมภาษาวิชวลซีนี้ ใช้เวลาในการประมวลผล 10,000 รอบ (EvolveN = 10,000) ใช้เวลาเพียง 30 วินาที ขณะที่โปรแกรมเดิมที่เขียนขึ้นด้วยโปรแกรมภาษาวิชวลเบสิกใช้เวลา 6 ชั่วโมง ดังนั้นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นใหม่โดยใช้ภาษาวิชวลซีจึงช่วยลดเวลาในการประมวลผลของโปรแกรมลงอย่างมาก ทำให้การใช้งานโปรแกรม สะดวกและรวดเร็วขึ้นมาก จึงเหมาะสมสำหรับผู้เริ่มต้นที่ต้องการศึกษาการจำลองการทำงานสารกึ่งตัวนำด้วยโปรแกรมภาษาวิชวลซี จากผลลัพธ์ที่ได้ทำให้เราสามารถนำผลลัพธ์ดังกล่าวมาวิเคราะห์ ทำความเข้าใจ เปรียบเทียบกับทฤษฎี แต่ถ้าหากต้องการวิเคราะห์ข้อมูลที่ละเอียด ครอบคอบมากกว่าก็ควรใช้โปรแกรมจำลองการทำงานไดโอดรอยต่อพีเอ็นแบบ 2 มิติ

โปรแกรมจำลองการทำงานไดโอดรอยต่อพีเอ็นแบบ 2 มิติ จะเป็นแบบจำลองที่ต้องคำนวณทั้งในสองแนวตามที่เราออกแบบ ดังนั้นจึงมีจำนวนจุดที่ต้องคำนวณค่ามาก ทำให้ใช้เวลาประมวลผลค่อนข้างที่จะใช้เวลามากพอสมควร แต่หากเทียบกับการคำนวณด้วยโปรแกรมภาษาวิชวลเบสิกแล้ว การคำนวณด้วยโปรแกรมภาษาวิชวลซีจะยังคงใช้เวลาในการประมวลผลน้อยกว่ามาก โดยการคำนวณด้วยโปรแกรมภาษาวิชวลเบสิกใช้เวลาหลายเดือนในการประมวลผล ขณะที่การคำนวณด้วยโปรแกรมภาษาวิชวลซีใช้เวลาประมาณ 3 วัน ซึ่งเราสามารถลดเวลาการประมวล

ผลนี้ลงได้ โดยการออกแบบจุดที่จะคำนวณ (เมฆ) ให้มีจำนวนน้อยลง แต่ทั้งนี้ก็ต้องคำนึงถึงความละเอียดในแต่ละบริเวณที่จะพิจารณาด้วย

แม้ว่าการคำนวณด้วยโปรแกรมจำลองการทำงานไดโอดรอยต่อพีเอ็นแบบ 2 มิติจะใช้เวลาในการประมวลผลค่อนข้างนานแต่ผลลัพธ์ที่ได้จะมีความละเอียด ครอบคลุมทุกบริเวณ ตั้งแต่บริเวณผิวหน้าไปจนถึงฐานรอง จึงทำให้เราสามารถวิเคราะห์บริเวณต่างๆ ได้สะดวกไม่ว่าจะเป็นที่บริเวณรอยต่อพีและเอ็น หรือดูการเปลี่ยนแปลงค่าคุณสมบัติต่างๆ ตลอดผิวหน้าของไดโอด หรือการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติต่างๆ จากผิวหน้าลึกกลงไปจนถึงฐานรอง แต่ปัญหาทางด้านเทคนิคในโปรแกรมเอ็กซ์เซลที่ยังไม่สามารถพล็อตรูปภาพเทียบกับระยะจริงของไดโอดรอยต่อพีเอ็นได้ จึงอาจทำให้การวิเคราะห์ต้องเปรียบเทียบกับแบบจำลองก่อนการวิเคราะห์ว่าเป็นที่ตำแหน่งจริงใดของไดโอด ในส่วนนี้จึงเป็นส่วนหนึ่งที่ต้องมีการพัฒนาต่อไป รวมถึงการลดจำนวนเมฆที่ใช้ในแบบจำลอง เพราะหากมีการออกแบบให้มีจำนวนเมฆที่น้อยลงจะทำให้การประมวลผลของโปรแกรมจำลองการทำงานไดโอดรอยต่อพีเอ็นแบบ 2 มิติจะใช้เวลาลดน้อยลง

ในโปรแกรมจำลองการทำงานไดโอดรอยต่อพีเอ็นแบบ 2 มิตินี้ยังไม่สามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นกระแสได้ แต่จากการที่มีผลลัพธ์ของค่าศักดาไฟฟ้า และค่าความหนาแน่นพาหะทั้งสองแล้ว ผู้พัฒนาต่อสามารถนำข้อมูลผลลัพธ์ที่ได้ไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นกระแสของไดโอดได้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้เป็นโครงการที่นำเอาโปรแกรมเดิมมาพัฒนาเพื่อให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น การทำโครงการนี้ก็ได้อุปสรรคบ้างเช่นกันแต่สุดท้ายก็สำเร็จไปได้ด้วยดีทั้งนี้ก็เพราะได้รับ คำปรึกษา พร้อมทั้งคำแนะนำจาก รศ.โยอิชิ ยาซุมุระ ผศ.ดร.เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล และพีโสภณ พรหมชัย และรวมถึงความรู้พื้นฐานต่างๆที่สำคัญที่นำมาใช้ในการพัฒนาโปรแกรมจำลองการทำงานไดโอดรอยต่อพีเอ็นนี้ ก็ด้วยการได้รับความรู้จากท่านคณาจารย์ทั้งหลายที่ถ่ายทอดผ่านความรู้ในทางวิชาการต่างๆจึงขอขอบพระคุณทุกท่านไว้ ณ ที่นี้ด้วย และจะได้นำความรู้ที่ได้จากการทำโครงการชิ้นนี้ไปประยุกต์ใช้ในงานอื่นๆ ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

- 1.ผศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล , “ฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ” , คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , กรุงเทพฯ ฯ 2543.
- 2.รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช , “เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์” คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , กรุงเทพฯ ฯ 2542.
- 3.รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช , “สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ” , พิมพ์ครั้งที่ 8 , คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , กรุงเทพฯ ฯ 2543.
- 4.Beck Zaratian , “Microsoft Visual C++ 6.0 Programmer’s guide” , Microsoft Press Ltd., Washington ,1998.
- 5.Gevold W. , “The pn junction diode” (The modular series on solid state devices ; V.2) , Addison-Wesley publishing company ,1989.
- 6.Ivor Horton , “Beginning Visual C++6” , Wvox Press Ltd. ,Birmingham , UK ,1998.
- 7.Siegfried Selberherr , “Analysis and Simulation of semiconductor Devices” , Springer-Verlag Wien New York, 1984.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้