

การจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น โดยวิธีผลต่างเชิงพื้นที่

ELECTRICAL CHARACTERISTICS SIMULATION OF PN JUNCTION
WITH FINITE DIFFERENCE METHOD



สมชาติ พนากษม
SOMCHIAT PANAKASEM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-324-044-6

การจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น โดยวิธีผลต่างสืบเนื่อง

ELECTRICAL CHARACTERISTICS SIMULATION OF PN JUNCTION
WITH FINITE DIFFERENCE METHOD



สมชาติ พนาเกษม

SOMCHAT PANAKASEM

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....44099
วัน, เดือน, ปี 28 ต.ค. 2545

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2545

ISBN 974-324-044-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS SIMULATION OF PN JUNCTION
WITH FINITE DIFFERENCE METHOD**

The seal of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang is a circular emblem. It features a central sunburst with rays emanating from a central point. Below the sunburst are three traditional Thai stupas (chedis) of varying heights, flanked by ornate floral and scrollwork patterns. The entire design is enclosed within a circular border containing Thai text.

SOMCHAT PANAKASEM

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2002

ISBN 974-324-044-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น โดยวิธีผลต่างสืบเนื่อง
ELECTRICAL CHARACTERISTICS SIMULATION OF PN JUNCTION
WITH FINITE DIFFERENCE METHOD

ชื่อนักศึกษา นายสมชาติ พนาเกษม

รหัสประจำตัว 42061128

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิสุทธิ จูติรุ่งเรือง

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สมเกียรติ	ศุภเดช	
ผศ.ดร.เต็มพงษ์	เพ็ชรกุล	
ผศ.สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	
รศ.ดร.วันชัย	วีรจจา	
รศ.ดร.วิสุทธิ	จูติรุ่งเรือง	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 30 กรกฎาคม 2545 เวลา 14.00-16.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-404)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัคร)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....๑๐.....เดือน.....กุมภาพันธ์.....พ.ศ.....๒๕๔๕.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น โดยวิธีผลต่าง
สี่เหลี่ยม

นักศึกษ

นายสมชาติ พนาเกษม

รหัสประจำตัว

42061128

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.

2545

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอการศึกษาการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพีเอ็น ทั้งหนึ่งมิติและสองมิติ โดยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม ซึ่งวิธีนี้จะนำสมการปัวร์ซอง สมการความต่อเนื่อง ของอิเล็กตรอนและสมการความต่อเนื่องของโฮล มาทำเป็นสมการผลต่างสี่เหลี่ยมทั้งหนึ่งมิติและสองมิติ เพื่อศึกษาค่าของศักย์ไฟฟ้าสถิต ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ความหนาแน่นของโฮล สนามไฟฟ้า อัตราการเกิดและการรวมตัวของพาหะ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มีการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าหนึ่งมิติ โดยมีการเปลี่ยนค่าของแรงดันทั้งแรงดันไบอัสตรง ไบอัสกลับและไม่มีแรงดัน ความแตกต่างของระยะห่างระหว่าง mesh อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารเจือ ส่วนในการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าสองมิติได้มีการป้อนแรงดันไบอัสเท่ากับศูนย์เท่านั้น โดยกำหนดความแตกต่างของระยะห่างระหว่าง mesh และความเข้มข้นของสารเจือต่างกันเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ภายในชิ้นสารกึ่งตัวนำ

Thesis Title	Electrical Characteristics Simulation of PN Junction with Finite Difference Method
Student	Mr.Somchat Panakasem
Student ID.	42061128
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2002
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr.Wisut Titiroongruang

ABSTRACT

This thesis presents the electrical characteristic simulation of one and two dimensional pn junction with finite difference method. The principle of this method is to use the physical equations that consist of Poisson equation ,continuity equation for electron and hole to make one and two dimensional finite difference equation to study electrostatic potential ,electron concentration , hole concentration ,electric field and generation and recombination of carriers. This thesis presents the electrical characteristic simulation of one dimensional with a change of value's voltages that consists of forward bias, reward bias and no voltage, the difference of the distance between mesh and concentration. Also, the electrical characteristic simulation of two dimensional only give bias voltage to zero that fix difference of the distance between mesh and concentration in various values to study a change of the electrical characteristics in a semiconductor.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้ความรู้ ความคิดริเริ่ม คำปรึกษาและคำชี้แนะ แนวทางในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ตลอดจนทำให้ผู้เขียนมีความสามารถในการทำวิจัยและพัฒนาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์โยอิชิ ยาซุมุระ ผู้เชี่ยวชาญพิเศษ ที่ให้คำปรึกษา และแนวทางในการแก้ปัญหาโปรแกรมต่าง ๆ เป็นอย่างดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ที่คอยให้คำปรึกษาตลอดจนแนวทางในการแก้ปัญหาและได้เสียสละเวลามาประชุมด้วยทุกครั้ง

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่คอยห่วงใยและให้การสนับสนุนในการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณ คุณจริยา นามเสนาะ พี่ ๆ น้อง ๆ ห้องปฏิบัติการสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทุกคนที่ให้อกำลังใจและความช่วยเหลือตลอดมาและขอขอบคุณเจ้าหน้าที่บัณฑิตศึกษาที่คอยให้คำแนะนำ

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ภายใต้โครงการผลิตบัณฑิตศึกษาภายในประเทศ ที่สนับสนุนค่าเรียนและงบวิจัยต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการศึกษา และขอขอบคุณทุนสนับสนุนวิทยานิพนธ์

สมชาติ พนาเกษม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 กล่าวนำ.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์.....	1
1.3 ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	3
2.1 สมการปีว์รชอง.....	3
2.2 สมการความต่อเนื่อง.....	5
2.3 สมการพื้นฐานสำหรับสารกึ่งตัวนำ.....	6
บทที่ 3 การประยุกต์วิธีผลต่างสี่บเนื่อง.....	7
3.1 บทนำ.....	7
3.2 หลักการของวิธีผลต่างสี่บเนื่อง.....	7
3.3 การประยุกต์ผลต่างสี่บเนื่องกับสมการปีว์รชอง.....	9
3.4 การประยุกต์ผลต่างสี่บเนื่องกับสมการความต่อเนื่อง.....	10
3.5 สรุป.....	13
บทที่ 4 วิธีการแก้สมการไม่เป็นเชิงเส้น.....	16
4.1 บทนำ.....	16
4.2 วิธี Newton Method.....	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....	20
5.1 สมการพื้นฐานสำหรับการทดลอง.....	20
5.2 การประยุกต์วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม.....	22
5.3 การกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขต.....	25
5.4 การกำหนดค่าเริ่มต้น.....	29
5.5 การแก้ปัญหาด้วยวิธี Newton Method.....	30
5.6 ผลการทดลอง.....	31
5.6.1 การทดลองการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าหนึ่งมิติและระยะห่างระหว่าง mesh เท่ากัน.....	31
5.6.2 การทดลองการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าหนึ่งมิติและระยะห่างระหว่าง mesh ไม่เท่ากัน.....	42
5.6.3 การทดลองการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าหนึ่งมิติและระยะห่างระหว่าง mesh ไม่เท่ากันและความเข้มข้นของสารเจือต่างกัน.....	53
5.6.4 การทดลองการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าสองมิติและระยะห่างระหว่าง mesh ไม่เท่ากัน.....	64
บทที่ 6 บทสรุปและวิจารณ์.....	67
6.1 บทสรุปและวิจารณ์.....	67
6.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยและพัฒนาต่อ.....	68
บรรณานุกรม.....	69
ภาคผนวก.....	70
ภาคผนวก ก. Flow chart.....	71
ภาคผนวก ข. โปรแกรมการจำลองหนึ่งมิติ.....	73
ภาคผนวก ค. โปรแกรมการจำลองสองมิติ.....	94
ภาคผนวก ง. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	134

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ประวัติผู้เขียน.....139



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 การกำหนดตำแหน่งต่าง ๆ โดยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม.....	8
4.1 หลักการของวิธีนิวตันในการประมาณหาค่าในตำแหน่งต่าง ๆ.....	16
5.1 การแบ่งชิ้นสารกึ่งตัวนำออกเป็นส่วนย่อย ๆ ที่เท่ากันในลักษณะหนึ่งมิติ.....	22
5.2 การแบ่งชิ้นสารกึ่งตัวนำออกเป็นส่วนย่อย ๆ ที่ไม่เท่ากันในลักษณะหนึ่งมิติ.....	22
5.3 การแบ่งชิ้นสารกึ่งตัวนำออกเป็นส่วนย่อย ๆ ที่ไม่เท่ากันในลักษณะสองมิติ.....	22
5.4 การจำลองโครงสร้างของรอยต่อพีเอ็นหนึ่งมิติโดยระยะห่างระหว่าง mesh เท่ากัน.....	31
5.5 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตโดยตำแหน่งของ mesh ขณะให้แรงดัน 0 โวลต์.....	32
5.6 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตโดยตำแหน่งจริง ขณะให้แรงดัน 0 โวลต์.....	32
5.7 ผลความหนาแน่นของพาหะโดยตำแหน่งของ mesh ขณะให้แรงดัน 0 โวลต์.....	33
5.8 ผลความหนาแน่นของพาหะโดยตำแหน่งจริง ขณะให้แรงดัน 0 โวลต์.....	33
5.9 ผลของการเกิดของประจุ ขณะให้แรงดัน 0 โวลต์.....	34
5.10 ผลของสนามไฟฟ้าขณะให้แรงดัน 0 โวลต์.....	34
5.11 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตโดยตำแหน่งของ mesh ขณะให้แรงดัน 0.517 โวลต์.....	35
5.12 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตโดยตำแหน่งจริง ขณะให้แรงดัน 0.517 โวลต์.....	35
5.13 ผลความหนาแน่นของพาหะโดยตำแหน่งของ mesh ขณะให้แรงดัน 0.517 โวลต์.....	36
5.14 ผลความหนาแน่นของพาหะโดยตำแหน่งจริง ขณะให้แรงดัน 0.517 โวลต์.....	36
5.15 ผลของการรวมตัวของประจุ ขณะให้แรงดัน 0.517 โวลต์.....	37
5.16 ผลของสนามไฟฟ้าขณะให้แรงดัน 0.517 โวลต์.....	37
5.17 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตโดยตำแหน่งของ mesh ขณะให้แรงดัน -0.517 โวลต์.....	38
5.18 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตโดยตำแหน่งจริง ขณะให้แรงดัน -0.517 โวลต์.....	38
5.19 ผลความหนาแน่นของพาหะโดยตำแหน่งของ mesh ขณะให้แรงดัน -0.517 โวลต์.....	39
5.20 ผลความหนาแน่นของพาหะโดยตำแหน่งจริง ขณะให้แรงดัน -0.517 โวลต์.....	39
5.21 ผลของการเกิดของประจุ ขณะให้แรงดัน -0.517 โวลต์.....	40
5.22 ผลของสนามไฟฟ้าขณะให้แรงดัน -0.517 โวลต์.....	40
5.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสกับแรงดัน.....	41
5.24 การจำลองโครงสร้างของรอยต่อพีเอ็นหนึ่งมิติ และระยะห่างระหว่าง mesh ไม่เท่ากัน.....	42
5.25 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตโดยตำแหน่งของ mesh ขณะให้แรงดัน 0 โวลต์.....	43
5.26 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตโดยตำแหน่งจริง ขณะให้แรงดัน 0 โวลต์.....	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.27 ผลความหนาแน่นของพาหะโดยตำแหน่งของ mesh ขณะให้แรงดัน 0 โวลต์.....	44
5.28 ผลความหนาแน่นของพาหะโดยตำแหน่งจริง ขณะให้แรงดัน 0 โวลต์.....	44
5.29 ผลของการเกิดของประจุ ขณะให้แรงดัน 0 โวลต์.....	45
5.30 ผลของสนามไฟฟ้าขณะให้แรงดัน 0 โวลต์.....	45
5.31 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตโดยตำแหน่งของ mesh ขณะให้แรงดัน 0.2 โวลต์.....	46
5.32 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตโดยตำแหน่งจริง ขณะให้แรงดัน 0.2 โวลต์.....	46
5.33 ผลความหนาแน่นของพาหะโดยตำแหน่งของ mesh ขณะให้แรงดัน 0.2 โวลต์.....	47
5.34 ผลความหนาแน่นของพาหะโดยตำแหน่งจริง ขณะให้แรงดัน 0.2 โวลต์.....	47
5.35 ผลของการรวมตัวของประจุ ขณะให้แรงดัน 0.2 โวลต์.....	48
5.36 ผลของสนามไฟฟ้าขณะให้แรงดัน 0.2 โวลต์.....	48
5.37 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตโดยตำแหน่งของ mesh ขณะให้แรงดัน -0.2 โวลต์.....	49
5.38 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตโดยตำแหน่งจริง ขณะให้แรงดัน -0.2 โวลต์.....	49
5.39 ผลความหนาแน่นของพาหะโดยตำแหน่งของ mesh ขณะให้แรงดัน -0.2 โวลต์.....	50
5.40 ผลความหนาแน่นของพาหะโดยตำแหน่งจริง ขณะให้แรงดัน -0.2 โวลต์.....	50
5.41 ผลของการเกิดของประจุ ขณะให้แรงดัน -0.2 โวลต์.....	51
5.42 ผลของสนามไฟฟ้าขณะให้แรงดัน -0.2 โวลต์.....	51
5.43 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสกับแรงดัน.....	52
5.44 การจำลองโครงสร้างของรอยต่อพีเอ็นหนึ่งมิติ โดยระยะห่างระหว่าง mesh ต่างกันและความ เข้มข้นของสารเจือต่างกัน.....	53
5.45 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตโดยตำแหน่งของ mesh ขณะให้แรงดัน 0 โวลต์.....	54
5.46 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตโดยตำแหน่งจริง ขณะให้แรงดัน 0 โวลต์.....	54
5.47 ผลความหนาแน่นของพาหะโดยตำแหน่งของ mesh ขณะให้แรงดัน 0 โวลต์.....	55
5.48 ผลความหนาแน่นของพาหะโดยตำแหน่งจริง ขณะให้แรงดัน 0 โวลต์.....	55
5.49 ผลของการรวมตัวของประจุ ขณะให้แรงดัน 0 โวลต์.....	56
5.50 ผลของสนามไฟฟ้าขณะให้แรงดัน 0 โวลต์.....	56
5.51 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตโดยตำแหน่งของ mesh ขณะให้แรงดัน 0.2 โวลต์.....	57
5.52 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตโดยตำแหน่งจริง ขณะให้แรงดัน 0.2 โวลต์.....	57
5.53 ผลความหนาแน่นของพาหะโดยตำแหน่งของ mesh ขณะให้แรงดัน 0.2 โวลต์.....	58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.54 ผลความหนาแน่นของพาหะโดยตำแหน่งจริง ขณะให้แรงดัน 0.2 โวลต์.....	58
5.55 ผลของการรวมตัวของประจุ ขณะให้แรงดัน 0.2 โวลต์.....	59
5.56 ผลของสนามไฟฟ้าขณะให้แรงดัน 0.2 โวลต์.....	59
5.57 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตโดยตำแหน่งของ mesh ขณะให้แรงดัน -0.2 โวลต์.....	60
5.58 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตโดยตำแหน่งจริง ขณะให้แรงดัน -0.2 โวลต์.....	60
5.59 ผลความหนาแน่นของพาหะโดยตำแหน่งของ mesh ขณะให้แรงดัน -0.2 โวลต์.....	61
5.60 ผลความหนาแน่นของพาหะโดยตำแหน่งจริง ขณะให้แรงดัน -0.2 โวลต์.....	61
5.61 ผลของการเกิดของประจุ ขณะให้แรงดัน -0.2 โวลต์.....	62
5.62 ผลของสนามไฟฟ้าขณะให้แรงดัน -0.2 โวลต์.....	62
5.63 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสกับแรงดัน.....	63
5.64 การจำลองโครงสร้างของรอยต่อพีเอ็นสองมิติ โดยระยะห่างระหว่าง mesh ต่างกันและความเข้มข้นของสารเจือต่างกัน.....	64
5.65 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตในลักษณะ 2 มิติ ขณะให้แรงดัน 0 โวลต์.....	65
5.66 ผลของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในลักษณะ 2 มิติ ขณะให้แรงดัน 0 โวลต์.....	65
5.67 ผลของความหนาแน่นของโฮลในลักษณะ 2 มิติ ขณะให้แรงดัน 0 โวลต์.....	66

บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ และคอมพิวเตอร์ได้มีการพัฒนาและส่งเสริมให้มีความเจริญก้าวหน้าอย่างไม่หยุดนิ่ง โดยเฉพาะชิ้นส่วนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะเริ่มจากระบบหลอดสุญญากาศมาเป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ที่มีลักษณะที่เป็นดิสครีท (Discrete) และมาเป็นวงจรรวม (Integrated Circuit) หรือเรียกว่าไอซี (IC) ซึ่งเป็นชิ้นสารกึ่งตัวนำเล็ก ๆ ซึ่งสามารถทำงานได้เทียบเท่ากับตัวต้านทาน ตัวประจุไฟฟ้า ไดโอด หรือทรานซิสเตอร์ เป็นสิบ ๆ หรือร้อย ๆ ตัวรวมกัน ทั้งนี้เนื่องจากภายในชิ้นสารกึ่งตัวนำประกอบด้วยชิ้นของวัสดุต่าง ๆ (ซิลิคอน, โบรอน, อลูมิเนียม, แกลเลียม ฯลฯ) ซึ่งสามารถทำงานได้เช่นเดียวกับชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ที่มาประกอบเข้าเป็นวงจรรวมอิเล็กทรอนิกส์เช่น วงจรขยาย หรือวงจรรวม เป็นต้น

ในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ สิ่งหนึ่งที่จะต้องรู้ก่อนกระบวนการสร้าง (Fabrication) คือ การจำลอง (Simulation) คุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำนั้นเสียก่อน เพื่อประหยัดเวลาและต้นทุนในการสร้างและสามารถเข้าใจถึงปรากฏการณ์ต่าง ๆ ได้ เช่นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารเจือ หรือการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไบอัสให้กับชิ้นสาร เป็นต้น

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อต้องการแสดงการกระจายของศักย์ไฟฟ้าสถิตตลอดชิ้นสารกึ่งตัวนำทั้งในลักษณะ 1 มิติและ 2 มิติ
2. เพื่อต้องการแสดงการกระจายความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลตลอดชิ้นสารกึ่งตัวนำทั้งในลักษณะ 1 มิติและ 2 มิติ
3. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นสารกึ่งตัวนำ
4. เพื่อต้องการนำเสนอผลการผลต่างสืบเนื่องมาประยุกต์ใช้กับสมการพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำ
5. เพื่อต้องการแสดงการกระจายของสนามไฟฟ้าในรอยต่อสารกึ่งตัวนำ
6. เพื่อต้องการแสดงการเกิดและการรวมตัวของพาหะในรอยต่อสารกึ่งตัวนำ

1.3 ทฤษฎีและแนวความคิดในวิทยานิพนธ์

ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้มีการนำสมการพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำมาประยุกต์ใช้ซึ่งได้แก่สมการปัวร์ซอง สมการความต่อเนื่องสำหรับอิเล็กตรอนและสมการความต่อเนื่องสำหรับโฮล มาทำเป็นสมการผลต่างสืบเนื่อง เพื่อที่จะศึกษาค่าของศักย์ไฟฟ้าสถิต ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ความหนาแน่นของโฮล บนตำแหน่งต่าง ๆ ของสารกึ่งตัวนำทั้งในลักษณะหนึ่งมิติและสองมิติโดยได้ทำการเปลี่ยนแปลงแรงดันและความเข้มข้นของสารเจือและมิตีของชิ้นงาน

1.4 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทและภาคผนวกอีก 3 ภาค โดยในแต่ละบทมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำจะเป็นการกล่าวนำ ถึงวัตถุประสงค์และทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งรายละเอียดของวิทยานิพนธ์ในแต่ละบท

บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการ ที่ใช้ในการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

บทที่ 3 เป็นการกล่าวถึงหลักการของวิธีผลต่างสืบเนื่อง และการประยุกต์ผลต่างสืบเนื่องกับสมการปัวร์ซองและการประยุกต์ผลต่างสืบเนื่องกับสมการความต่อเนื่อง

บทที่ 4 เป็นการกล่าวถึงการแก้สมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อหาค่าตัวแปรของศักย์ไฟฟ้าสถิต ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ความหนาแน่นของโฮล และการใช้ตัวทำซ้ำ (iterative)

บทที่ 5 เป็นการกล่าวถึงการทดลอง โดยเริ่มจากการนำสมการพื้นฐานมาทำเป็นสมการผลต่างสืบเนื่องแล้วทำการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยมีการจำลองทั้งในลักษณะหนึ่งมิติและสองมิติ และมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารเจือและแรงดันไบอัสเพื่อศึกษาค่าของศักย์ไฟฟ้าสถิต ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ความหนาแน่นของโฮล สนามไฟฟ้า การเกิดและการรวมตัวของพาหะในรอยต่อสารกึ่งตัวนำ

บทที่ 6 จะเป็นการสรุปและวิจารณ์ผลการทดลองที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์พร้อมทั้งได้นำเสนอแนวทางในการวิจัยและพัฒนาต่อไป

ในส่วนสุดท้ายของวิทยานิพนธ์ จะเป็นภาคผนวกซึ่งจะรวบรวมโปรแกรมต่าง ๆ ของแต่ละการจำลองไว้ ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ภาคผนวก ก. โปรแกรมการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าหนึ่งมิติ

ภาคผนวก ข. โปรแกรมการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าสองมิติ

ภาคผนวก ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

ประวัติผู้เขียน

บทที่ 2

ทฤษฎีและสมการที่ใช้ในการจำลอง

2.1 บทนำ

ในการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อสารกึ่งตัวนำนั้น ซึ่งจะประกอบด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งโดยปกติจะเรียกกันว่าสมการพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำ (basic semiconductor equations) ซึ่งสมการเหล่านี้สมการพิสูจน์ได้จากสมการแมคเวล (Maxwell's equations) (2.1) (2.2) (2.3) และ (2.4) ตามลำดับ

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\text{div } \vec{D} = \rho \quad (2.3)$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (2.4)$$

เมื่อ

\vec{H} = ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Intensity)

\vec{B} = ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Flux density)

\vec{E} = สนามไฟฟ้า (Electric Field)

\vec{D} = ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า (Electric Flux density)

\vec{J} = ความหนาแน่นกระแส (Current Density)

ρ = ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า (Electric charge density)

2.2 สมการปัวร์ซอง (Poisson's Equation)

สมการปัวร์ซองมีที่มาจากสมการแมคเวล (2.3) อย่างไรก็ตามสามารถนำสมการที่ (2.3) ให้มีความสัมพันธ์ระหว่าง Electric Displacement Vector \vec{D} กับสนามไฟฟ้า \vec{E}

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad (2.5)$$

โดยที่ ϵ คือค่า Permittivity Tensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นมีความต้องการที่จะให้สนามไฟฟ้า \vec{E} มีความสัมพันธ์กับค่าของศักย์ไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Potential; ψ) โดยการนำสมการที่ (2.4) มาหาความสัมพันธ์ดังนี้

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A}, \text{div } \vec{A} = 0 \quad (2.6)$$

เมื่อ \vec{A} คือ Vector Potential

จากนั้นจะนำสมการที่ (2.6) แทนลงในสมการที่ (2.2) จะได้

$$\text{rot} \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (2.7)$$

ถ้า " $\text{rot } \vec{Z} = 0$ " จากสมการดิฟเฟอเรนเชียลพื้นฐาน ดังนั้น

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \text{grad } \psi \quad (2.8)$$

จากนั้นนำสมการที่ (2.8) แทนลงในสมการที่ (2.5) จะได้

$$\vec{D} = -\epsilon \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \epsilon \text{grad } \psi \quad (2.9)$$

$$\text{div} \left(\epsilon \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) + \text{div}(\epsilon \text{grad } \psi) = -\rho \quad (2.10)$$

ดังนั้นถ้าในเทอมแรกของสมการที่ (2.10) เป็นศูนย์ เนื่องจากค่า permittivity สามารถพิจารณาให้เป็น homogeneous ดังนั้นจะได้สมการที่ (2.10) ขึ้นมาใหม่ซึ่งเรียกกันว่าสมการปัวร์ซอง

$$\text{div}(\epsilon \cdot \text{grad } \psi) = -\rho \quad (2.11)$$

ซึ่งค่าความหนาแน่นของประจุสามารถกระจายออกได้ดังสมการที่ (2.12)

$$\rho = q(p - n + C) \quad (2.12)$$

เมื่อ C คือ net ionized impurity concentration ($N_d^+ - N_a^-$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุดท้ายนี้จะได้สมการปัวร์ซองซึ่งจะใช้ในการวิเคราะห์ดังนี้

$$\operatorname{div} \cdot \operatorname{grad} \psi = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (2.13)$$

$$\operatorname{div} \cdot \operatorname{grad} \psi = \frac{q}{\varepsilon}(n - p - C) \quad (2.14)$$

2.3 สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equations)

สมการความต่อเนื่องสามารถหาได้จากสมการแมกเวลล์ที่ (2.1) ถ้าใส่ตัวปฏิบัติการ (operator) “div” ให้กับสมการที่ (2.1) จะได้

$$\operatorname{div} \operatorname{rot} \vec{H} = \operatorname{div} \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2.15)$$

ในขณะเดียวกันสามารถแบ่งความหนาแน่นกระแส \vec{J} ให้เป็น \vec{J}_p และ \vec{J}_n โดยที่

\vec{J}_p คือความหนาแน่นของกระแสโดยโฮล

\vec{J}_n คือความหนาแน่นของกระแสโดยอิเล็กตรอน

$$\vec{J} = \vec{J}_p + \vec{J}_n \quad (2.16)$$

ซึ่งจะกำหนดให้ประจุทั้งหมดในชั้นสารกึ่งตัวนำเป็นประจุที่ไม่แปรเปลี่ยนกับเวลา ยกเว้น อิเล็กตรอนและโฮล ดังนั้น

$$\frac{\partial C}{\partial t} = 0 \quad (2.17)$$

จากนั้นนำสมการที่ (2.12) และ (2.16) แทนลงใน (2.15) และนำสมการที่ (2.17) มาประกอบด้วยจะได้

$$\operatorname{div}(\vec{J}_p + \vec{J}_n) + q \frac{\partial}{\partial t}(p - n) = 0 \quad (2.18)$$

สามารถกระจายสมการที่ (2.18) ได้เป็น

$$\operatorname{div} \vec{J}_n - q \frac{\partial n}{\partial t} = q \cdot R \quad (2.19)$$

$$\operatorname{div} \vec{J}_p + q \frac{\partial p}{\partial t} = -q \cdot R \quad (2.20)$$

โดยที่ R คือค่าการเกิดหรือการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮล ถ้าค่า R มีค่าเป็นบวกหมายถึงการรวมตัวและถ้าค่า R เป็นลบหมายถึงการการเกิด

2.4 สมการพื้นฐานสำหรับสารกึ่งตัวนำ

ในวิชานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดสมการพื้นฐานสำหรับสารกึ่งตัวนำ เพื่อใช้ในการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อสารกึ่งตัวนำ ทั้งหนึ่งมิติและสองมิติ เพื่อหาค่าของศักย์ไฟฟ้าสถิต, ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน, ความหนาแน่นของโฮล, สนามไฟฟ้า, การเกิดและการรวมตัวของพาหะในรอยต่อสารกึ่งตัวนำและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันโดยสมการพื้นฐานสำหรับสารกึ่งตัวนำประกอบด้วยสมการปัวร์ซอง(2.21), สมการความต่อเนื่องสำหรับอิเล็กตรอน (2.22), สมการความต่อเนื่องสำหรับโฮล (2.23), สมการกระแสอิเล็กตรอน (2.24) และสมการกระแสโฮล (2.25) ดังนี้

$$\operatorname{div} \operatorname{grad} \psi = \frac{q}{\epsilon} (n - p - C) \quad (2.21)$$

$$\operatorname{div} \vec{J}_n - q \frac{\partial n}{\partial t} = q \cdot R \quad (2.22)$$

$$\operatorname{div} \vec{J}_p + q \frac{\partial p}{\partial t} = -q \cdot R \quad (2.23)$$

$$\vec{J}_n = q \cdot n \cdot \mu_n \cdot \vec{E}_n + q \cdot D_n \cdot \operatorname{grad} n \quad (2.24)$$

$$\vec{J}_p = q \cdot n \cdot \mu_p \cdot \vec{E}_p - q \cdot D_p \cdot \operatorname{grad} p \quad (2.25)$$

บทที่ 3

การประยุกต์วิธีผลต่างสี่บเนื้อง

3.1 บทนำ

วิธีการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ โดยวิธีผลต่างสี่บเนื้องจะนำสมการปัวร์ของ (3.1) สมการความต่อเนื่องสำหรับอิเล็กตรอน (3.2) และสมการความต่อเนื่องสำหรับโฮล (3.3) มาทำเป็นรูปแบบของวิธีผลต่างสี่บเนื้อง

$$\lambda^2 \operatorname{div} \operatorname{grad} \psi - (n - p - C) = 0 \quad (3.1)$$

$$\operatorname{div}(D_n \cdot \operatorname{grad} n - \mu_n \cdot n \cdot \operatorname{grad} \psi) - R(\psi, n, p) = \frac{\partial n}{\partial t} \quad (3.2)$$

$$\operatorname{div}(D_p \cdot \operatorname{grad} p + \mu_p \cdot p \cdot \operatorname{grad} \psi) - R(\psi, n, p) = \frac{\partial p}{\partial t} \quad (3.3)$$

สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้จำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าในสภาวะคงตัว (Steady State) ซึ่งจะทำให้ได้สมการใหม่ดังนี้

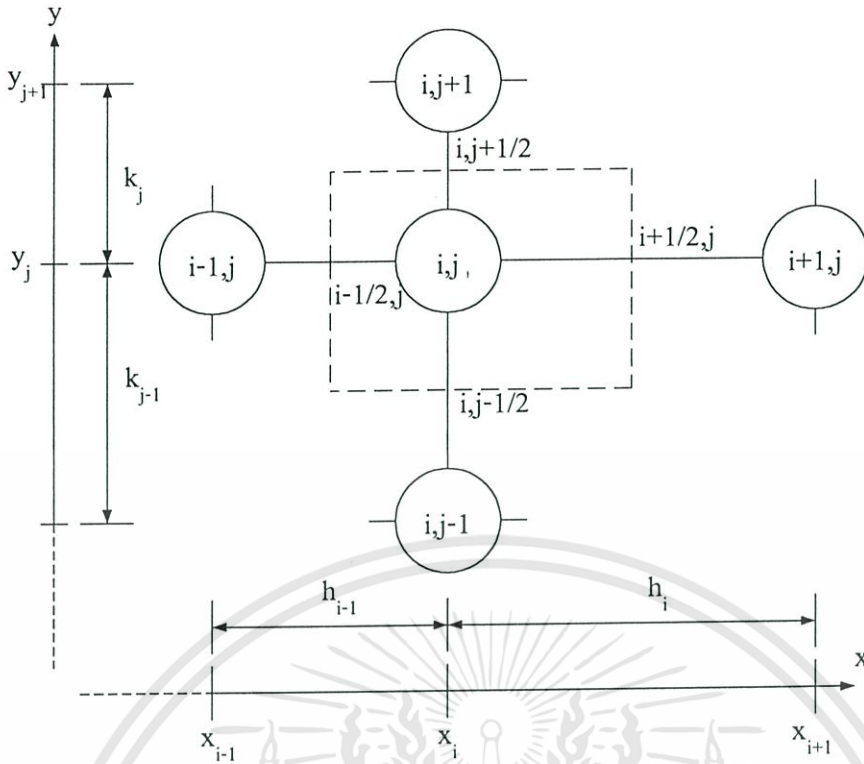
$$\lambda^2 \operatorname{div} \operatorname{grad} \psi - (n - p - C) = 0 \quad (3.4)$$

$$\operatorname{div}(D_n \cdot \operatorname{grad} n - \mu_n \cdot n \cdot \operatorname{grad} \psi) - R(\psi, n, p) = 0 \quad (3.5)$$

$$\operatorname{div}(D_p \cdot \operatorname{grad} p + \mu_p \cdot p \cdot \operatorname{grad} \psi) - R(\psi, n, p) = 0 \quad (3.6)$$

3.2 หลักการของวิธีผลต่างสี่บเนื้อง

หลักการของวิธีผลต่างสี่บเนื้องจะนำชิ้นสารกึ่งตัวนำมาแบ่งออกเป็นส่วนย่อย ๆ ให้มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม โดยมีการกำหนดให้ NX คือจำนวนเส้นที่แบ่งบนแกน X และ NY คือจำนวนเส้นที่แบ่งบนแกน Y ดังนั้นจะมีจุดตัดบนชิ้นสารกึ่งตัวนำเท่ากับ $NX \cdot NY$ จุด ซึ่งจะเป็นจำนวนจุดที่จะต้องหาสำหรับสมการ (3.4) (3.5) และ (3.6)



รูปที่ 3.1 การกำหนดตำแหน่งต่างๆ โดยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม
จากรูปที่ 3.1 จะกำหนดได้ว่า

$$h_i = x_{i+1} - x_i, \quad i = 1, NX - 1 \quad (3.7)$$

$$k_j = y_{j+1} - y_j, \quad j = 1, NY - 1 \quad (3.8)$$

จะกำหนดให้เป็นรูปแบบดังนี้

$$u_{i,j} = u(x_i, y_j) \quad i = 1, NX, \quad j = 1, NY \quad (3.9)$$

$$u_{i+\frac{1}{2},j} = u\left(\frac{x_i + x_{i+1}}{2}, y_j\right) \quad i = 1, NX - 1, \quad j = 1, NY \quad (3.10)$$

$$u_{i,j+\frac{1}{2}} = u\left(x_i, \frac{y_j + y_{j+1}}{2}\right) \quad i = 1, NX, \quad j = 1, NY - 1 \quad (3.11)$$

จากนั้นจะนำสมการที่ (3.4) (3.5) และ (3.6) มาเขียน “div” และ “grad” ที่ชัดเจนยิ่งขึ้น

$$\lambda^2 \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right) - n + p + C = 0 \quad (3.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D_n \frac{\partial n}{\partial x} - \mu_n \cdot n \cdot \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_n \frac{\partial n}{\partial y} - \mu_n \cdot n \cdot \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) - R(\psi, n, p) = 0 \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D_p \frac{\partial p}{\partial x} + \mu_p \cdot p \cdot \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_p \frac{\partial p}{\partial y} + \mu_p \cdot p \cdot \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) - R(\psi, n, p) = 0 \quad (3.14)$$

3.3 การประยุกต์ผลต่างสืบเนื่องกับสมการปัวร์ซอง

กำหนดให้ $u_{i,j}$ เป็นตัวแปร จะกำหนดให้ first order partial derivatives by

$$\frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{i,j} = \frac{u_{i+\frac{1}{2},j} - u_{i-\frac{1}{2},j}}{h_i + h_{i-1}} \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{i,j} = \frac{u_{i,j+\frac{1}{2}} - u_{i,j-\frac{1}{2}}}{k_j + k_{j-1}} \quad (3.16)$$

จากนั้นนำสมการที่ (3.15) และ (3.16) แทนลงในสมการ (3.12) จะได้สมการปัวร์ซองคือ

$$\lambda^2 \left(\frac{\frac{\partial \psi}{\partial x} \Big|_{i+\frac{1}{2},j} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \Big|_{i-\frac{1}{2},j}}{\frac{h_i + h_{i-1}}{2}} + \frac{\frac{\partial \psi}{\partial y} \Big|_{i,j+\frac{1}{2}} - \frac{\partial \psi}{\partial y} \Big|_{i,j-\frac{1}{2}}}{\frac{k_j + k_{j-1}}{2}} \right) - n_{i,j} + p_{i,j} + C_{i,j} = 0 \quad (3.17)$$

ซึ่งกำหนดได้ว่า

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} \Big|_{i+\frac{1}{2},j} = \frac{\psi_{i+1,j} - \psi_{i,j}}{h_i} \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} \Big|_{i-\frac{1}{2},j} = \frac{\psi_{i,j} - \psi_{i-1,j}}{h_{i-1}} \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} \Big|_{i,j+\frac{1}{2}} = \frac{\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j}}{k_j} \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} \Big|_{i,j-\frac{1}{2}} = \frac{\psi_{i,j} - \psi_{i,j-1}}{k_{j-1}} \quad (3.21)$$

จากนั้นนำสมการที่ (3.18) (3.19) (3.20) และ (3.21) แทนลงในสมการที่ (3.17) จะได้สมการปัวร์ซอง ที่อยู่ในรูปแบบของวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม

$$\lambda^2 \left(\frac{\frac{\psi_{i+1,j} - \psi_{i,j}}{h_i} - \frac{\psi_{i,j} - \psi_{i-1,j}}{h_{i-1}}}{\frac{h_i + h_{i-1}}{2}} + \frac{\frac{\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j}}{k_j} - \frac{\psi_{i,j} - \psi_{i,j-1}}{k_{j-1}}}{\frac{k_j + k_{j-1}}{2}} \right) - n_{i,j} + p_{i,j} + C_{i,j} = 0 \quad (3.22)$$

3.4 การประยุกต์ผลต่างสี่เหลี่ยมกับสมการความต่อเนื่อง

สมการความต่อเนื่องสำหรับอิเล็กตรอน (3.13) และสมการความต่อเนื่องสำหรับโฮล (3.14) เป็นสมการก่อนการประยุกต์ด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D_n \frac{\partial n}{\partial x} - \mu_n \cdot n \cdot \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_n \frac{\partial n}{\partial y} - \mu_n \cdot n \cdot \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) - R(\psi, n, p) = 0 \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D_p \frac{\partial p}{\partial x} + \mu_p \cdot p \cdot \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_p \frac{\partial p}{\partial y} + \mu_p \cdot p \cdot \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) - R(\psi, n, p) = 0 \quad (3.14)$$

ดังนั้นนำสมการทั้งสองมาทำเป็นสมการด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมจะได้ว่า

$$\frac{(-J_{nx}) \Big|_{i+\frac{1}{2},j} - (-J_{nx}) \Big|_{i-\frac{1}{2},j}}{\frac{h_i + h_{i-1}}{2}} + \frac{(-J_{ny}) \Big|_{i,j+\frac{1}{2}} - (-J_{ny}) \Big|_{i,j-\frac{1}{2}}}{\frac{k_j + k_{j-1}}{2}} - R(\psi, n, p) \Big|_{i,j} = 0 \quad (3.23)$$

$$\frac{(J_{px}) \Big|_{i+\frac{1}{2},j} - (J_{px}) \Big|_{i-\frac{1}{2},j}}{\frac{h_i + h_{i-1}}{2}} + \frac{(J_{py}) \Big|_{i,j+\frac{1}{2}} - (J_{py}) \Big|_{i,j-\frac{1}{2}}}{\frac{k_j + k_{j-1}}{2}} - R(\psi, n, p) \Big|_{i,j} = 0 \quad (3.24)$$

ซึ่ง

$$J_{nx} = \mu_n \cdot n \cdot \frac{\partial \psi}{\partial x} - D_n \frac{\partial n}{\partial x} \quad (3.25)$$

$$J_{ny} = \mu_n \cdot n \cdot \frac{\partial \psi}{\partial y} - D_n \frac{\partial n}{\partial y} \quad (3.26)$$

$$J_{px} = \mu_p \cdot p \cdot \frac{\partial \psi}{\partial x} + D_p \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J_{py} = \mu_p \cdot p \cdot \frac{\partial \psi}{\partial y} + D_p \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3.28)$$

จะได้

$$J_{nx} \Big|_{i+\frac{1}{2},j} = D_n \Big|_{i+\frac{1}{2},j} \frac{B \left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i+1,j}}{U_t} \right) n_{i,j} - B \left(\frac{\psi_{i+1,j} - \psi_{i,j}}{U_t} \right) n_{i+1,j}}{h_i} \quad (3.29)$$

$$J_{ny} \Big|_{i,j+\frac{1}{2}} = D_n \Big|_{i,j+\frac{1}{2}} \frac{B \left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i,j+1}}{U_t} \right) n_{i,j} - B \left(\frac{\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j}}{U_t} \right) n_{i,j+1}}{k_j} \quad (3.30)$$

$$J_{px} \Big|_{i+\frac{1}{2},j} = D_p \Big|_{i+\frac{1}{2},j} \frac{B \left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i+1,j}}{U_t} \right) p_{i+1,j} - B \left(\frac{\psi_{i+1,j} - \psi_{i,j}}{U_t} \right) p_{i,j}}{h_i} \quad (3.31)$$

$$J_{py} \Big|_{i,j+\frac{1}{2}} = D_p \Big|_{i,j+\frac{1}{2}} \frac{B \left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i,j+1}}{U_t} \right) p_{i,j+1} - B \left(\frac{\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j}}{U_t} \right) p_{i,j}}{k_j} \quad (3.32)$$

$$J_{nx} \Big|_{i-\frac{1}{2},j} = D_n \Big|_{i-\frac{1}{2},j} \frac{B \left(\frac{\psi_{i-1,j} - \psi_{i,j}}{U_t} \right) n_{i-1,j} - B \left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i-1,j}}{U_t} \right) n_{i,j}}{h_{i-1}} \quad (3.33)$$

$$J_{ny} \Big|_{i,j-\frac{1}{2}} = D_n \Big|_{i,j-\frac{1}{2}} \frac{B \left(\frac{\psi_{i,j-1} - \psi_{i,j}}{U_t} \right) n_{i,j-1} - B \left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i,j-1}}{U_t} \right) n_{i,j}}{k_{j-1}} \quad (3.34)$$

$$J_{px} \Big|_{i-\frac{1}{2},j} = D_p \Big|_{i-\frac{1}{2},j} \frac{B \left(\frac{\psi_{i-1,j} - \psi_{i,j}}{U_t} \right) p_{i,j} - B \left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i-1,j}}{U_t} \right) p_{i-1,j}}{h_{i-1}} \quad (3.35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J_{py} \Big|_{i,j-\frac{1}{2}} = D_p \Big|_{i,j-\frac{1}{2}} \frac{B\left(\frac{\psi_{i,j-1} - \psi_{i,j}}{U_t}\right) p_{i,j} - B\left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i,j-1}}{U_t}\right) p_{i,j-1}}{k_{j-1}} \quad (3.36)$$

นำสมการที่ (3.29) (3.30) (3.33) และ (3.34) แทนลงในสมการที่ (3.23) ซึ่งจะได้สมการความต่อเนื่องสำหรับอิเล็กตรอนในรูปแบบของวิธีผลต่างสี่บเนื่อง

$$\begin{aligned} & D_n \Big|_{i+\frac{1}{2},j} \frac{B\left(\frac{\psi_{i+1,j} - \psi_{i,j}}{U_t}\right) n_{i+1,j} - B\left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i+1,j}}{U_t}\right) n_{i,j}}{h_i \frac{h_i + h_{i-1}}{2}} - \\ & - D_n \Big|_{i-\frac{1}{2},j} \frac{B\left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i-1,j}}{U_t}\right) n_{i,j} - B\left(\frac{\psi_{i-1,j} - \psi_{i,j}}{U_t}\right) n_{i-1,j}}{h_{i-1} \frac{h_i + h_{i-1}}{2}} + \\ & + D_n \Big|_{i,j+\frac{1}{2}} \frac{B\left(\frac{\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j}}{U_t}\right) n_{i,j+1} - B\left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i,j+1}}{U_t}\right) n_{i,j}}{k_j \frac{k_j + k_{j-1}}{2}} - \\ & - D_n \Big|_{i,j-\frac{1}{2}} \frac{B\left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i,j-1}}{U_t}\right) n_{i,j} - B\left(\frac{\psi_{i,j-1} - \psi_{i,j}}{U_t}\right) n_{i,j-1}}{k_{j-1} \frac{k_j + k_{j-1}}{2}} - R(\psi, n, p) \Big|_{i,j} = 0 \quad (3.37) \end{aligned}$$

จากสมการที่ (3.31) (3.32) (3.35) และ (3.36) แทนลงในสมการที่ (3.24) ซึ่งจะได้สมการความต่อเนื่องสำหรับโหนดในรูปแบบของวิธีผลต่างสี่บเนื่อง

$$\begin{aligned} & D_p \Big|_{i+\frac{1}{2},j} \frac{B\left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i+1,j}}{U_t}\right) p_{i+1,j} - B\left(\frac{\psi_{i+1,j} - \psi_{i,j}}{U_t}\right) p_{i,j}}{h_i \frac{h_i + h_{i-1}}{2}} - \\ & - D_p \Big|_{i-\frac{1}{2},j} \frac{B\left(\frac{\psi_{i-1,j} - \psi_{i,j}}{U_t}\right) p_{i,j} - B\left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i-1,j}}{U_t}\right) p_{i-1,j}}{h_{i-1} \frac{h_i + h_{i-1}}{2}} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + D_p \Big|_{i,j+\frac{1}{2}} \frac{B\left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i,j+1}}{U_t}\right) p_{i,j+1} - B\left(\frac{\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j}}{U_t}\right) p_{i,j}}{k_j \frac{k_j + k_{j-1}}{2}} - \\
& - D_p \Big|_{i,j-\frac{1}{2}} \frac{B\left(\frac{\psi_{i,j-1} - \psi_{i,j}}{U_t}\right) p_{i,j} - B\left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i,j-1}}{U_t}\right) p_{i,j-1}}{k_{j-1} \frac{k_j + k_{j-1}}{2}} - R(\psi, n, p) \Big|_{i,j} = 0 \quad (3.38)
\end{aligned}$$

3.5 สรุป

ในการที่จะหาค่าของศักย์ไฟฟ้าสถิต (ψ) ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (n) ความหนาแน่นของโฮล (p) ที่จุดต่าง ๆ บนชิ้นสารกึ่งตัวนำมีความจำเป็นที่จะต้องสร้างสมการ โดยวิธีผลต่างสืบเนื่องซึ่งประกอบด้วยสมการปัวร์ซอง สมการความต่อเนื่องของอิเล็กตรอนและสมการความต่อเนื่องของโฮลในรูปแบบสองมิติตามลำดับ เพื่อความสะดวกในการเขียนโปรแกรมจึงจัดสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
& \psi_{i,j-1} \cdot \lambda^2 \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2k_{j-1}} + \psi_{i-1,j} \cdot \lambda^2 \cdot \frac{k_{j-1} + k_j}{2h_{i-1}} \\
& - \psi_{i,j} \cdot \lambda^2 \cdot \left(\frac{h_{i-1} + h_i}{2k_{j-1}} + \frac{k_{j-1} + k_j}{2h_{i-1}} + \frac{k_{j-1} + k_j}{2h_i} + \frac{h_{i-1} + h_i}{2k_j} \right) \\
& + \psi_{i+1,j} \cdot \lambda^2 \cdot \frac{k_{j-1} + k_j}{2h_i} + \psi_{i,j+1} \cdot \lambda^2 \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2k_j} \\
& - (n_{i,j} - p_{i,j} - C_{i,j}) \frac{h_{i-1} + h_i}{2} \frac{k_{j-1} + k_j}{2} = 0 \quad (3.39)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& n_{i,j-1} \cdot D_n \Big|_{i,j-\frac{1}{2}} \cdot B\left(\frac{\psi_{i,j-1} - \psi_{i,j}}{U_t}\right) \frac{h_{i-1} + h_i}{2k_{j-1}} \\
& n_{i-1,j} \cdot D_n \Big|_{i-\frac{1}{2},j} \cdot B\left(\frac{\psi_{i-1,j} - \psi_{i,j}}{U_t}\right) \frac{k_{j-1} + k_j}{2h_{i-1}} \\
& - n_{i,j} (D_n \Big|_{i,j-\frac{1}{2}} \cdot B\left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i,j-1}}{U_t}\right) \frac{h_{i-1} + h_i}{2k_{j-1}} \\
& + D_n \Big|_{i-\frac{1}{2},j} \cdot B\left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i-1,j}}{U_t}\right) \frac{k_{j-1} + k_j}{2h_{i-1}} \\
& + D_n \Big|_{i+\frac{1}{2},j} \cdot B\left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i+1,j}}{U_t}\right) \frac{k_{j-1} + k_j}{2h_i}
\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
& + D_n \Big|_{i,j+\frac{1}{2}} \cdot B \left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i,j+1}}{U_t} \right) \frac{h_{i-1} + h_i}{2k_j} \\
& + n_{i+1,j} \cdot D_n \Big|_{i+\frac{1}{2},j} \cdot B \left(\frac{\psi_{i+1,j} - \psi_{i,j}}{U_t} \right) \frac{k_{j-1} + k_j}{2h_i} \\
& + n_{i,j+1} \cdot D_n \Big|_{i,j+\frac{1}{2}} \cdot B \left(\frac{\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j}}{U_t} \right) \frac{h_{i-1} + h_i}{2k_j} \\
& - R_{i,j} \frac{h_{i-1} + h_i}{2} \frac{k_{j-1} + k_j}{2} = 0
\end{aligned} \tag{3.40}$$

$$\begin{aligned}
& p_{i,j-1} \cdot D_p \Big|_{i,j-\frac{1}{2}} \cdot B \left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i,j-1}}{U_t} \right) \frac{h_{i-1} + h_i}{2k_{j-1}} \\
& + p_{i-1,j} \cdot D_p \Big|_{i-\frac{1}{2},j} \cdot B \left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i-1,j}}{U_t} \right) \frac{k_{j-1} + k_j}{2h_{i-1}} \\
& - p_{i,j} \cdot \left(D_p \Big|_{i,j-\frac{1}{2}} B \left(\frac{\psi_{i,j-1} - \psi_{i,j}}{U_t} \right) \frac{h_{i-1} + h_i}{2k_{j-1}} \right. \\
& \quad + D_p \Big|_{i-\frac{1}{2},j} \cdot B \left(\frac{\psi_{i-1,j} - \psi_{i,j}}{U_t} \right) \frac{k_{j-1} + k_j}{2h_{i-1}} \\
& \quad + D_p \Big|_{i+\frac{1}{2},j} \cdot B \left(\frac{\psi_{i+1,j} - \psi_{i,j}}{U_t} \right) \frac{k_{j-1} + k_j}{2h_i} \\
& \quad \left. + D_p \Big|_{i,j+\frac{1}{2}} \cdot B \left(\frac{\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j}}{U_t} \right) \frac{h_{i-1} + h_i}{2k_j} \right) \\
& + p_{i+1,j} \cdot D_p \Big|_{i+\frac{1}{2},j} \cdot B \left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i+1,j}}{U_t} \right) \frac{k_{j-1} + k_j}{2h_i} \\
& + p_{i,j+1} \cdot D_p \Big|_{i,j+\frac{1}{2}} \cdot B \left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i,j+1}}{U_t} \right) \frac{h_{i-1} + h_i}{2k_j} \\
& - R_{i,j} \frac{h_{i-1} + h_i}{2} \frac{k_{j-1} + k_j}{2} = 0
\end{aligned} \tag{3.41}$$

และสามารถที่จะนำสมการในรูปสองมิติมาลดรูปให้อยู่ในรูปสมการหนึ่งมิติได้ซึ่งประกอบด้วยสมการปัวร์ซอง สมการความต่อเนื่องของอิเล็กตรอนและสมการความต่อเนื่องของโฮลตามลำดับ

$$F_1 = \lambda^2 \left(\left(\frac{\psi_{i+1} - \psi_i}{h_i} - \frac{\psi_i - \psi_{i-1}}{h_{i-1}} \right) \cdot \frac{2}{h_i + h_{i-1}} \right) - n_i + p_i + c \tag{3.42}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_2 = D_n \frac{1}{h_i} \left[B_1 \left(\frac{\psi_{i+1} - \psi_i}{U_t} \right) n_{i+1} - B_2 \left(\frac{\psi_i - \psi_{i+1}}{U_t} \right) n_i \right] + D_n \frac{1}{h_i} \left[-B_3 \left(\frac{\psi_i - \psi_{i-1}}{U_t} \right) n_i + B_4 \left(\frac{\psi_{i-1} - \psi_i}{U_t} \right) n_{i-1} \right] - R_i \quad (3.43)$$

$$F_3 = -D_p \frac{1}{h_i} \left[B_1 \left(\frac{\psi_{i+1} - \psi_i}{U_t} \right) p_i - B_2 \left(\frac{\psi_i - \psi_{i+1}}{U_t} \right) p_{i+1} \right] + D_n \frac{1}{h_i} \left[-B_3 \left(\frac{\psi_i - \psi_{i-1}}{U_t} \right) p_{i-1} + B_4 \left(\frac{\psi_{i-1} - \psi_i}{U_t} \right) p_i \right] - R_i \quad (3.44)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

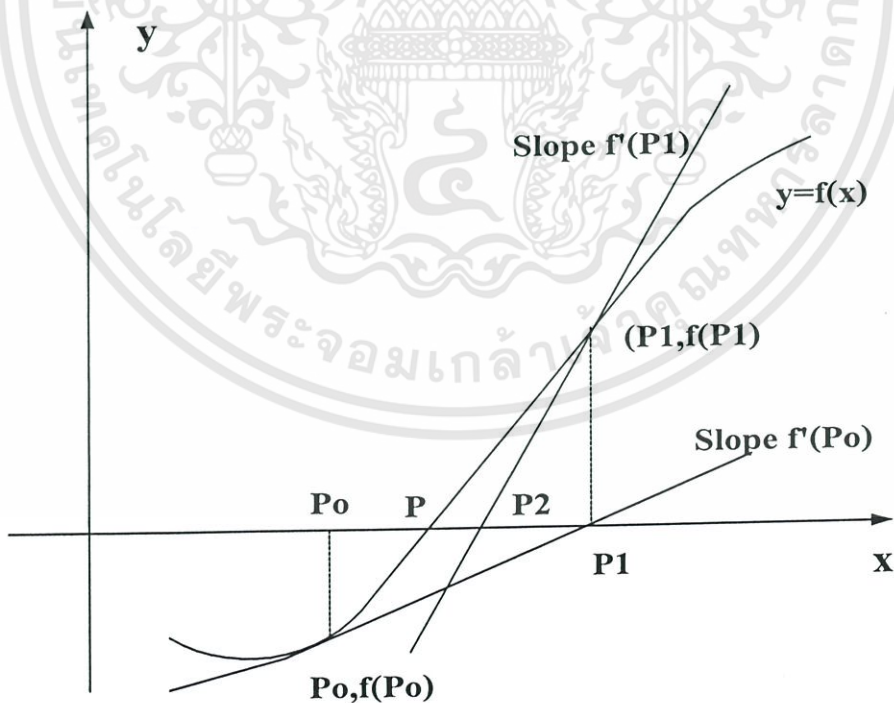
วิธีการแก้สมการไม่เป็นเชิงเส้น

4.1 บทนำ

ในการแก้สมการไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งประกอบด้วยสมการปัวร์ของ สมการความต่อเนื่องของ อิเล็กตรอนและโฮล เพื่อที่จะประมาณหาค่าของศักย์ไฟฟ้าสถิต ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน และความหนาแน่นของโฮล ตลอดชั้นสารกึ่งตัวนำทั้งในลักษณะหนึ่งมิติและสองมิติ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกวิธีการการแก้สมการไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีนิวตัน ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมที่สุด และวิธีนิวตันสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้โดยง่าย เนื่องจากการแก้สมการไม่เป็นเชิงเส้น เป็นขั้นตอนสุดท้ายในการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่องก่อนจะนำค่าที่ได้ทั้งหมดมาแสดงผล

4.2 วิธี Newton Method

วิธีนิวตันเป็นวิธีที่ดีที่สุดวิธีหนึ่งที่ใช้ในการหาค่าต่าง ๆ บนเส้นสมการดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 หลักการของวิธีนิวตันในการประมาณหาค่าในตำแหน่งต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการของวิธีนิวตันจะต้องกำหนดค่าเริ่มต้น (p_0) ให้กับสมการและจะกำหนดให้ $f(x) = 0$ และค่าความชันของเส้นสมการของกราฟที่จุด $(p_0, f(p_0))$ คือ $f'(p_0)$ ดังนั้นจะประมาณเส้นสมการได้ดังนี้

$$y - f(p_0) = f'(p_0)(x - p_0) \tag{4.1}$$

เนื่องจากเส้นสมการนี้ตัดแกน x ซึ่งจะทำให้ค่าบนแกน y มีค่าเท่ากับศูนย์และการประมาณในจุดที่ถัดไปที่จุด p_1 จะได้

$$0 - f(p_0) = f'(p_0)(p_1 - p_0) \tag{4.2}$$

ซึ่งจะจัดสมการได้ดังนี้

$$p_1 = p_0 - \frac{f(p_0)}{f'(p_0)} \tag{4.3}$$

ฉะนั้นรูปแบบของวิธีนิวตันในการประมาณค่าที่จุด p_{n+1} เมื่อ $f(x) = 0$ คือ

$$p^{k+1} = p^k - \frac{f(p^k)}{f'(p^k)} \quad \text{เมื่อ } k \geq 0 \tag{4.4}$$

วิธีนิวตันนี้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับ n ตัวแปร โดยอาศัยวิธีร่วมกับวิธี Jacobain โดยที่ $f'(p_n)$ สามารถเปลี่ยนเป็น $\frac{\partial f_i}{\partial x_j}$ โดยที่ Jacobian Matrix สามารถกำหนดได้ดังนี้

$$J(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_n} \end{bmatrix}$$

$$p^{k+1} = p^k - \frac{f(p^k)}{J(x^k)} \tag{4.5}$$

$$\text{ซึ่งจะได้} \quad p^{k+1} = p^k - [J(x^k)]^{-1} f(p^k) \quad \text{เมื่อ } k \geq 0 \quad (4.6)$$

สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดชื่อของระบบสมการ discrete equations

$$F(w) = 0 \quad (4.7)$$

$$F = \begin{pmatrix} f_\psi(w) \\ f_n(w) \\ f_p(w) \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

$$w = \begin{pmatrix} \psi \\ n \\ p \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

F คือฟังก์ชันซึ่งประกอบด้วยฟังก์ชันของ f_ψ, f_n และ f_p ซึ่งฟังก์ชันเหล่านี้จะสอดคล้องกับสมการปัวร์ซองและสมการความต่อเนื่องของอิเล็กตรอนและโฮล ซึ่งฟังก์ชัน w จะประกอบด้วยค่าศักย์ไฟฟ้าสถิต (ψ) ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (n) และความหนาแน่นของโฮล (p) ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้า ฉะนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนด

$$F(\psi, n, p) = \begin{pmatrix} F_1(\psi, n, p) \\ F_2(\psi, n, p) \\ F_3(\psi, n, p) \end{pmatrix} = 0 \quad (4.10)$$

โดยที่ F_1 คือ สมการปัวร์ซอง

F_2 คือ สมการความต่อเนื่องสำหรับอิเล็กตรอน

F_3 คือ สมการความต่อเนื่องสำหรับโฮล

วิธีการของนิวตันสามารถเขียนได้ดังนี้จากสมการ

$$p^{k+1} = p^k - [J(x^k)]^{-1} f(p^k) \quad (4.11)$$

สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะได้รูปแบบของวิธีนิวตันดังนี้

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \psi} & \frac{\partial F_1}{\partial n} & \frac{\partial F_1}{\partial p} \\ \frac{\partial F_2}{\partial \psi} & \frac{\partial F_2}{\partial n} & \frac{\partial F_2}{\partial p} \\ \frac{\partial F_3}{\partial \psi} & \frac{\partial F_3}{\partial n} & \frac{\partial F_3}{\partial p} \end{bmatrix}^k \cdot \begin{bmatrix} \delta\psi^k \\ \delta n^k \\ \delta p^k \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} F_1(\psi^k, n^k, p^k) \\ F_2(\psi^k, n^k, p^k) \\ F_3(\psi^k, n^k, p^k) \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

โดยที่ $\delta\psi^k = \psi^{k+1} - \psi^k$ (4.13)

$$\delta n^k = n^{k+1} - n^k \quad (4.14)$$

$$\delta p^k = p^{k+1} - p^k \quad (4.15)$$



บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ การทดลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าในลักษณะหนึ่งมิติและสองมิติ

ในลักษณะการทดลองหนึ่งมิติจะมีการแบ่งชิ้นสารกึ่งตัวนำออกเป็นส่วนย่อย ๆ ที่เท่ากัน และการแบ่งชิ้นสารกึ่งตัวนำออกเป็นส่วนย่อย ๆ ที่ต่าง ๆ กันขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การใช้และการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ให้กับชิ้นสารกึ่งตัวนำและความเข้มข้นของสารเจือในชิ้นสารกึ่งตัวนำ

ในลักษณะการทดลองสองมิติจะมีการแบ่งชิ้นสารกึ่งตัวนำออกเป็นส่วนย่อย ๆ ที่ต่างกัน และการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ให้กับชิ้นสารกึ่งตัวนำ

5.1 สมการพื้นฐานสำหรับการทดลอง

สมการพื้นฐานสำหรับการทดลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกำหนดให้อยู่ในสภาวะคงตัว (steady state) โดยมีสมการพื้นฐานสามสมการดังนี้

สมการปัวร์ซอง

$$\nabla^2 \psi = \frac{q}{\epsilon} (n - p - c) \quad (5.1)$$

สมการความต่อเนื่องของอิเล็กตรอน

$$\text{div} J_n - q \frac{\partial n}{\partial t} = qR(\psi, n, p) \quad (5.2)$$

สมการความต่อเนื่องของโฮล

$$\text{div} J_p + q \frac{\partial p}{\partial t} = -qR(\psi, n, p) \quad (5.3)$$

และมีสมการประกอบคือ

สมการความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

$$n = n_i \exp\left(\frac{q(\psi - \varphi_n)}{kT}\right) \quad (5.4)$$

สมการความหนาแน่นของโฮล

$$p = n_i \exp\left(\frac{q(\varphi_p - \psi)}{kT}\right) \quad (5.5)$$

จะพบว่าสมการที่ต้องพิจารณามีถึงสามสมการ (5.1-5.3) โดยที่ J_n และ J_p สามารถกำหนดได้ดังนี้

$$J_n = -q(\mu_n n \cdot \text{grad}\psi - D_n \text{grad}n) \quad (5.6)$$

$$J_p = -q(\mu_p p \cdot \text{grad}\psi + D_p \text{grad}p) \quad (5.7)$$

จากนั้นนำสมการที่ (5.6) และ (5.7) แทนลงในสมการ (5.2) และ (5.3) ตามลำดับจะสามารถจัดรูปสมการ (5.1) (5.2) และ (5.3) ได้ดังนี้คือ

$$\nabla^2 \psi - \frac{q}{\epsilon} (n - p - c) = 0 \quad (5.8)$$

$$\text{div}(D_n \cdot \text{grad}n - \mu_n n \cdot \text{grad}\psi) - R(\psi, n, p) = \frac{\partial n}{\partial t} \quad (5.9)$$

$$\text{div}(D_p \cdot \text{grad}p + \mu_p p \cdot \text{grad}\psi) - R(\psi, n, p) = \frac{\partial p}{\partial t} \quad (5.10)$$

สำหรับในวิชานี้พันธะฉบับนี้จะศึกษาในส่วนของสภาวะคงตัวดังนั้นในเทอมของ $\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial t} = 0$

จะได้

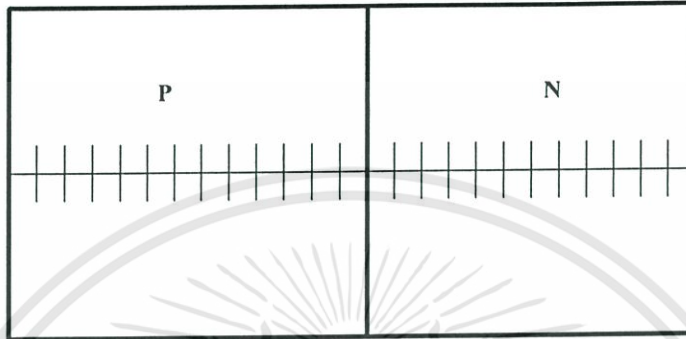
$$\lambda^2 \nabla^2 \psi - n + p + c = 0 \quad (5.11)$$

$$\text{div}(D_n \cdot \text{grad}n - \mu_n n \cdot \text{grad}\psi) - R(\psi, n, p) = 0 \quad (5.12)$$

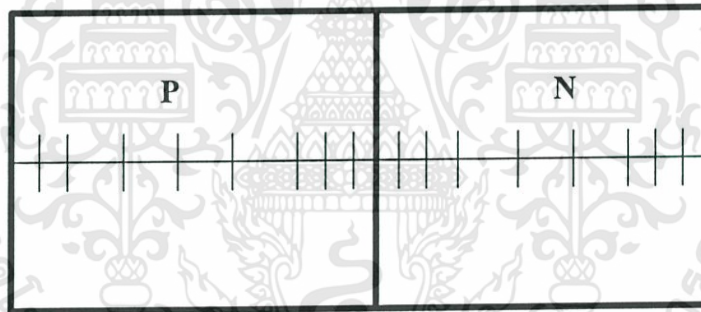
$$\text{div}(D_p \cdot \text{grad}p + \mu_p p \cdot \text{grad}\psi) - R(\psi, n, p) = 0 \quad (5.13)$$

5.2 การประยุกต์วิธีผลต่างสี่บเนื่อง

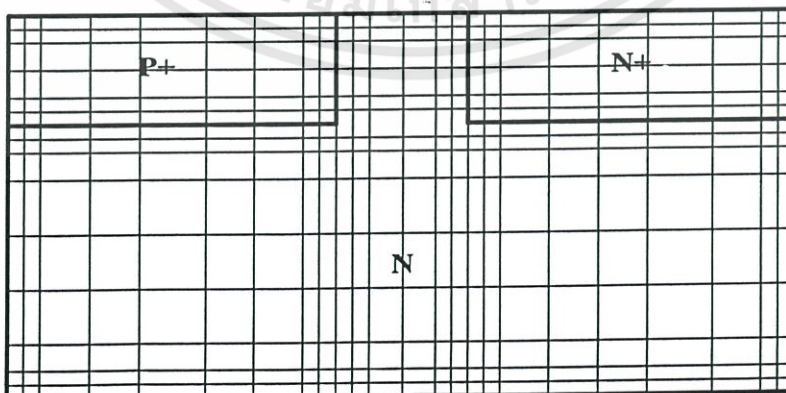
ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้วิธีผลต่างสี่บเนื่อง (Finite Difference) ประยุกต์เข้ากับสมการปัวร์ซอง สมการความต่อเนื่องของอิลีคตรอนและสมการความต่อเนื่องของโฮล โดยได้ทำการแบ่งชั้นสารกึ่งตัวนำออกเป็นส่วนย่อย ๆ เท่ากัน ซึ่งเรียกว่า mesh และอีกกรณีหนึ่งได้ทำการแบ่งชั้นสารกึ่งตัวนำออกเป็นส่วนย่อย ๆ ไม่เท่ากันซึ่งเรียกว่า mesh เช่นกัน ดังรูป



รูปที่ 5.1 การแบ่งชั้นสารกึ่งตัวนำออกเป็นส่วนย่อย ๆ ที่เท่ากันในลักษณะหนึ่งมิติ



รูปที่ 5.2 การแบ่งชั้นสารกึ่งตัวนำออกเป็นส่วนย่อย ๆ ที่ไม่เท่ากันในลักษณะหนึ่งมิติ



รูปที่ 5.3 การแบ่งชั้นสารกึ่งตัวนำออกเป็นส่วนย่อย ๆ ที่ไม่เท่ากันในลักษณะสองมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการผลต่างสี่เหลี่ยมหนึ่งมิติโดยที่แบ่งชั้นสารกึ่งตัวนำออกเป็นช่วงย่อย ๆ ที่เท่ากัน

$$F_1 = \frac{\lambda^2}{h^2} (\psi_{i+1} + \psi_{i-1} - 2\psi_i) - n_i + p_i + c \quad (5.14)$$

$$F_2 = D_n \frac{1}{h} \left[B_1 \left(\frac{\psi_{i+1} - \psi_i}{U_t} \right) n_{i+1} - B_2 \left(\frac{\psi_i - \psi_{i+1}}{U_t} \right) n_i \right] + D_n \frac{1}{h} \left[-B_3 \left(\frac{\psi_i - \psi_{i-1}}{U_t} \right) n_i + B_4 \left(\frac{\psi_{i-1} - \psi_i}{U_t} \right) n_{i-1} \right] \quad (5.15)$$

$$F_3 = -D_p \frac{1}{h} \left[B_1 \left(\frac{\psi_{i+1} - \psi_i}{U_t} \right) p_i - B_2 \left(\frac{\psi_i - \psi_{i+1}}{U_t} \right) p_{i+1} \right] + D_n \frac{1}{h} \left[-B_3 \left(\frac{\psi_i - \psi_{i-1}}{U_t} \right) p_{i-1} + B_4 \left(\frac{\psi_{i-1} - \psi_i}{U_t} \right) p_i \right] \quad (5.16)$$

สมการผลต่างสี่เหลี่ยมหนึ่งมิติโดยที่แบ่งชั้นสารกึ่งตัวนำออกเป็นช่วงย่อย ๆ ที่ไม่เท่ากัน

$$F_1 = \lambda^2 \left(\left(\frac{\psi_{i+1} - \psi_i}{h_i} - \frac{\psi_i - \psi_{i-1}}{h_{i-1}} \right) \cdot \frac{2}{h_i + h_{i-1}} \right) - n_i + p_i + c \quad (5.17)$$

$$F_2 = D_n \frac{1}{h_i} \left[B_1 \left(\frac{\psi_{i+1} - \psi_i}{U_t} \right) n_{i+1} - B_2 \left(\frac{\psi_i - \psi_{i+1}}{U_t} \right) n_i \right] + D_n \frac{1}{h_i} \left[-B_3 \left(\frac{\psi_i - \psi_{i-1}}{U_t} \right) n_i + B_4 \left(\frac{\psi_{i-1} - \psi_i}{U_t} \right) n_{i-1} \right] - R_i \quad (5.18)$$

$$F_3 = -D_p \frac{1}{h_i} \left[B_1 \left(\frac{\psi_{i+1} - \psi_i}{U_t} \right) p_i - B_2 \left(\frac{\psi_i - \psi_{i+1}}{U_t} \right) p_{i+1} \right] + D_n \frac{1}{h_i} \left[-B_3 \left(\frac{\psi_i - \psi_{i-1}}{U_t} \right) p_{i-1} + B_4 \left(\frac{\psi_{i-1} - \psi_i}{U_t} \right) p_i \right] - R_i \quad (5.19)$$

สมการผลต่างสี่เหลี่ยมสองมิติโดยที่แบ่งชั้นสารกึ่งตัวนำออกเป็นช่วงย่อย ๆ ที่ไม่เท่ากัน

$$\begin{aligned} F_1 = & \psi_{i,j-1} \cdot \lambda^2 \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2k_{j-1}} + \psi_{i-1,j} \cdot \lambda^2 \cdot \frac{k_{j-1} + k_j}{2h_{i-1}} \\ & - \psi_{i,j} \cdot \lambda^2 \cdot \left(\frac{h_{i-1} + h_i}{2k_{j-1}} + \frac{k_{j-1} + k_j}{2h_{i-1}} + \frac{k_{j-1} + k_j}{2h_i} + \frac{h_{i-1} + h_i}{2k_j} \right) \\ & + \psi_{i+1,j} \cdot \lambda^2 \cdot \frac{k_{j-1} + k_j}{2h_i} + \psi_{i,j+1} \cdot \lambda^2 \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2k_j} \\ & - (n_{i,j} - p_{i,j} - C_{i,j}) \frac{h_{i-1} + h_i}{2} \frac{k_{j-1} + k_j}{2} = 0 \end{aligned} \quad (5.20)$$

$$\begin{aligned}
F_2 = & n_{i,j-1} \cdot D_n \Big|_{i,j-\frac{1}{2}} \cdot B \left(\frac{\psi_{i,j-1} - \psi_{i,j}}{U_t} \right) \frac{h_{i-1} + h_i}{2k_{j-1}} \\
& + n_{i-1,j} \cdot D_n \Big|_{i-\frac{1}{2},j} \cdot B \left(\frac{\psi_{i-1,j} - \psi_{i,j}}{U_t} \right) \frac{k_{j-1} + k_j}{2h_{i-1}} \\
& - n_{i,j} (D_n \Big|_{i,j-\frac{1}{2}} \cdot B \left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i,j-1}}{U_t} \right) \frac{h_{i-1} + h_i}{2k_{j-1}} \\
& + D_n \Big|_{i-\frac{1}{2},j} \cdot B \left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i-1,j}}{U_t} \right) \frac{k_{j-1} + k_j}{2h_{i-1}} \\
& + D_n \Big|_{i+\frac{1}{2},j} \cdot B \left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i+1,j}}{U_t} \right) \frac{k_{j-1} + k_j}{2h_i} \\
& + D_n \Big|_{i,j+\frac{1}{2}} \cdot B \left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i,j+1}}{U_t} \right) \frac{h_{i-1} + h_i}{2k_j}) \\
& + n_{i+1,j} \cdot D_n \Big|_{i+\frac{1}{2},j} \cdot B \left(\frac{\psi_{i+1,j} - \psi_{i,j}}{U_t} \right) \frac{k_{j-1} + k_j}{2h_i} \\
& + n_{i,j+1} \cdot D_n \Big|_{i,j+\frac{1}{2}} \cdot B \left(\frac{\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j}}{U_t} \right) \frac{h_{i-1} + h_i}{2k_j} \\
& - R_{i,j} \frac{h_{i-1} + h_i}{2} \frac{k_{j-1} + k_j}{2} = 0
\end{aligned} \tag{5.21}$$

$$\begin{aligned}
F_3 = & p_{i,j-1} \cdot D_p \Big|_{i,j-\frac{1}{2}} \cdot B \left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i,j-1}}{U_t} \right) \frac{h_{i-1} + h_i}{2k_{j-1}} \\
& + p_{i-1,j} \cdot D_p \Big|_{i-\frac{1}{2},j} \cdot B \left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i-1,j}}{U_t} \right) \frac{k_{j-1} + k_j}{2h_{i-1}} \\
& - p_{i,j} \cdot (D_p \Big|_{i,j-\frac{1}{2}} \cdot B \left(\frac{\psi_{i,j-1} - \psi_{i,j}}{U_t} \right) \frac{h_{i-1} + h_i}{2k_{j-1}} \\
& + D_p \Big|_{i-\frac{1}{2},j} \cdot B \left(\frac{\psi_{i-1,j} - \psi_{i,j}}{U_t} \right) \frac{k_{j-1} + k_j}{2h_{i-1}} \\
& + D_p \Big|_{i+\frac{1}{2},j} \cdot B \left(\frac{\psi_{i+1,j} - \psi_{i,j}}{U_t} \right) \frac{k_{j-1} + k_j}{2h_i} \\
& + D_p \Big|_{i,j+\frac{1}{2}} \cdot B \left(\frac{\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j}}{U_t} \right) \frac{h_{i-1} + h_i}{2k_j}) \\
& + p_{i+1,j} \cdot D_p \Big|_{i+\frac{1}{2},j} \cdot B \left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i+1,j}}{U_t} \right) \frac{k_{j-1} + k_j}{2h_i} \\
& + p_{i,j+1} \cdot D_p \Big|_{i,j+\frac{1}{2}} \cdot B \left(\frac{\psi_{i,j} - \psi_{i,j+1}}{U_t} \right) \frac{h_{i-1} + h_i}{2k_j}
\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-R_{i,j} \frac{h_{i-1} + h_i}{2} \frac{k_{j-1} + k_j}{2} = 0 \quad (5.22)$$

โดยที่

F_1 คือ Poisson 's equation

F_2 คือ สมการความต่อเนื่องของอิเล็กตรอน

F_3 คือ สมการความต่อเนื่องของโฮล

$\psi_{i,j}$ คือ ศักย์ไฟฟ้าสถิตในตำแหน่งแถวที่ i และหลักที่ j

$n_{i,j}$ คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในตำแหน่งแถวที่ i และหลักที่ j

$p_{i,j}$ คือ ความหนาแน่นของโฮลในตำแหน่งแถวที่ i และหลักที่ j

D_n คือ สัมประสิทธิ์การแพร่สำหรับอิเล็กตรอน

D_p คือ สัมประสิทธิ์การแพร่สำหรับโฮล

h_i คือ ระยะห่างระหว่าง mesh ในแนวแกน x

k_j คือ ระยะห่างระหว่าง mesh ในแนวแกน y

U_t คือ thermal voltage

B คือ ฟังก์ชัน Bernuli

$C_{i,j}$ คือ ความหนาแน่นของสารเจือที่ถูกลอยในตำแหน่งแถวที่ i และหลักที่ j

φ_n คือ ระดับพลังงานควอไซต์ Fermi ของอิเล็กตรอน

φ_p คือ ระดับพลังงานควอไซต์ Fermi ของโฮล

i คือตำแหน่งที่ต่าง ๆ บนชั้นสารกึ่งตัวนำในแนวแกน x

j คือตำแหน่งที่ต่าง ๆ บนชั้นสารกึ่งตัวนำในแนวแกน y

5.3 การกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขต

ในการคำนวณการจำลองด้วยวิธีผลต่างสลับเนื่อง จะต้องมีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของชั้นสารกึ่งตัวนำก่อน เนื่องจากในวิชานีพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอทั้งในลักษณะหนึ่งมิติและสองมิติของชั้นสารกึ่งตัวนำ จึงกำหนดเงื่อนไขขอบเขตออกเป็นสามลักษณะ ในลักษณะแรกจะเป็นการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของชั้นสารในลักษณะหนึ่งมิติโดยแบ่งชั้นสารออกเป็นส่วนย่อย ๆ เท่ากัน ฉะนั้นเงื่อนไขขอบเขตจะมีเพียงสองด้านเท่านั้นคือ

ในส่วนของชั้นสาร P

$$\psi(0) = -\frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_a}{2n_i} + \sqrt{\left(\frac{N_a}{2n_i} \right)^2 + 1} \right) + V_{ap} \quad (5.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p(0) = \frac{\sqrt{N_a^2 + 4n_i^2} + N_a}{2} \quad (5.24)$$

$$n(0) = \frac{n_i^2}{p(0)} \quad (5.25)$$

ในส่วนของชั้นสาร N

$$\psi(50) = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_d}{2n_i} + \sqrt{\left(\frac{N_d}{2n_i} \right)^2 + 1} \right) \quad (5.26)$$

$$n(50) = \frac{\sqrt{N_d^2 + 4n_i^2} + N_d}{2} \quad (5.27)$$

$$p(50) = \frac{n_i^2}{n(50)} \quad (5.28)$$

ประการที่สอง โดยการกำหนดขอบเขตของชั้นสารกึ่งตัวนำในลักษณะหนึ่งมิติ โดยการแบ่งชั้นสารออกเป็นส่วนย่อยๆ ไม่เท่ากัน
ในส่วนของชั้นสาร P

$$\psi(0) = -\frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_a}{2n_i} + \sqrt{\left(\frac{N_a}{2n_i} \right)^2 + 1} \right) + V_{ap} \quad (5.29)$$

$$p(0) = \frac{\sqrt{N_a^2 + 4n_i^2} + N_a}{2} \quad (5.30)$$

$$n(0) = \frac{n_i^2}{p(0)} \quad (5.31)$$

ในส่วนของชั้นสาร N

$$\psi(68) = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_d}{2n_i} + \sqrt{\left(\frac{N_d}{2n_i} \right)^2 + 1} \right) \quad (5.32)$$

$$n(68) = \frac{\sqrt{N_d^2 + 4n_i^2} + N_d}{2} \quad (5.33)$$

$$p(68) = \frac{n_i^2}{n(68)} \quad (5.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของชั้นสารกึ่งตัวนำในลักษณะสองมิติ

$$\psi(i = 0 \text{ to } 13, j = 60) = \psi_{b|p} + V_{ap} \quad (5.35)$$

$$\psi_{b|p} = -\frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_a}{2n_i} + \sqrt{\left(\frac{N_a}{2n_i} \right)^2 + 1} \right) \quad (5.36)$$

$$p(i = 0 \text{ to } 13, j = 60) = \frac{\sqrt{N_a^2 + 4n_i^2} + N_a}{2} \quad (5.37)$$

$$n(i = 0 \text{ to } 13, j = 60) = \frac{n_i^2}{p(i = 0 \text{ to } 13, j = 60)} \quad (5.38)$$

$$\psi(i = 48 \text{ to } 61, j = 60) = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_{d+}}{2n_i} + \sqrt{\left(\frac{N_{d+}}{2n_i} \right)^2 + 1} \right) \quad (5.39)$$

$$n(i = 48 \text{ to } 61, j = 60) = \frac{\sqrt{N_{d+}^2 + 4n_i^2} + N_{d+}}{2} \quad (5.40)$$

$$p(i = 48 \text{ to } 61, j = 60) = \frac{n_i^2}{n(i = 48 \text{ to } 61, j = 60)} \quad (5.41)$$

$$\psi(i = 1 \text{ to } 61, j = 0) = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_d}{2n_i} + \sqrt{\left(\frac{N_d}{2n_i} \right)^2 + 1} \right) \quad (5.42)$$

$$n(i = 1 \text{ to } 61, j = 0) = \frac{\sqrt{N_d^2 + 4n_i^2} + N_d}{2} \quad (5.43)$$

$$p(i = 1 \text{ to } 61, j = 0) = \frac{n_i^2}{n(i = 1 \text{ to } 61, j = 0)} \quad (5.44)$$

การกำหนดขอบเขตในส่วนของ $i = 0, j = 0 \text{ to } 59$ และ $i = 61, j = 0 \text{ to } 59$ จะทำการคำนวณในลักษณะหนึ่งมิติเนื่องจากจะสังเกตได้ว่าค่า i จะคงที่จะเปลี่ยนแปลงแต่ค่า j เมื่อได้ผลของ ψ, n, p แล้วจะนำไปเป็นการกำหนดขอบเขตของ $\psi(i = 0, j = 0 \text{ to } 59)$

$$n(i = 0, j = 0 \text{ to } 59), p(i = 0, j = 0 \text{ to } 59), \psi(i = 61, j = 0 \text{ to } 59)$$

$$n(i = 61, j = 0 \text{ to } 59), p(i = 61, j = 0 \text{ to } 59)$$

การกำหนดขอบเขตในส่วนของ interface region โดยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะอยู่ในส่วนของ $i = 13 \text{ to } 48, j = 60$ โดยจะยึดหลักการกำหนดขอบเขตของ Neumann boundary ซึ่งได้แก่

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} \Big|_{i,60} - Q_{\text{int}} \Big|_{i,60} = 0 \quad j_{ny} \Big|_{i,60} - R^{\text{surf}} \Big|_{i,60} = 0 \quad j_{py} \Big|_{i,60} + R^{\text{surf}} \Big|_{i,60} = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} \Big|_{i,121/2} = -\frac{\partial \psi}{\partial y} \Big|_{i,119/2} + 2 \cdot Q_{\text{int}} \Big|_{i,60} \quad (5.45)$$

$$j_{ny} \Big|_{i,121/2} = -j_{ny} \Big|_{i,119/2} + 2 \cdot R^{\text{surf}} \Big|_{i,60} \quad (5.46)$$

$$j_{py} \Big|_{i,121/2} = -j_{py} \Big|_{i,119/2} - 2 \cdot R^{\text{surf}} \Big|_{i,60} \quad (5.47)$$

$$F_{1\text{int}} = \lambda^2 \cdot \left(\frac{\frac{\psi_{i+1,60} - \psi_{i,60}}{h_i} - \frac{\psi_{i,60} - \psi_{i-1,60}}{h_{i-1}}}{\frac{h_{i-1} + h_i}{2}} + \frac{\varepsilon \cdot \frac{\psi_{i,61} - \psi_{i,60}}{k_{60}} - \varepsilon_{\text{sem}} \cdot \frac{\psi_{i,60} - \psi_{i,59}}{k_{59}} + Q_{\text{int}} \Big|_{i,60}}{\frac{\varepsilon_{\text{inx}} \cdot k_{60} + \varepsilon_{\text{sem}} \cdot k_{59}}{2}} \right) - \frac{\varepsilon_{\text{sem}} \cdot k_{59}}{\varepsilon_{\text{ins}} \cdot k_m + \varepsilon_{\text{sem}} \cdot k_{59}} \cdot (n_{i,60} - p_{i,60} - C_{i,60}) = 0 \quad (5.48)$$

$$F_{2\text{int}} = \frac{(-j_{nx} \Big|_{i+1/2,60}) - (-j_{nx} \Big|_{i-1/2,60})}{\frac{h_{i-1} + h_i}{2}} + \frac{2 \cdot j_{ny} \Big|_{i,119/2} - 2 \cdot R^{\text{surf}} \Big|_{i,60}}{k_{59}} - R \Big|_{i,60} = 0 \quad (5.49)$$

โดย

$$j_{nx} \Big|_{i+1/2,60} = D_n \Big|_{i+1/2,60} \cdot \frac{B_5 \left(\frac{\psi_{i,60} - \psi_{i+1,60}}{U_t} \right) \cdot n_{i,60} - B_7 \left(\frac{\psi_{i+1,60} - \psi_{i,60}}{U_t} \right) \cdot n_{i+1,60}}{h_i} \quad (5.60)$$

$$j_{nx} \Big|_{i-1/2,60} = D_n \Big|_{i-1/2,60} \cdot \frac{B_2 \left(\frac{\psi_{i-1,60} - \psi_{i,60}}{U_t} \right) \cdot n_{i-1,60} - B_4 \left(\frac{\psi_{i,60} - \psi_{i-1,60}}{U_t} \right) \cdot n_{i,60}}{h_{i-1}} \quad (5.61)$$

$$j_{ny} \Big|_{i,119/2} = D_n \Big|_{i,119/2} \cdot \frac{B_1 \left(\frac{\psi_{i,59} - \psi_{i,60}}{U_t} \right) \cdot n_{i,59} - B_3 \left(\frac{\psi_{i,60} - \psi_{i,59}}{U_t} \right) \cdot n_{i,60}}{k_{m-1}} \quad (5.62)$$

อัตราการเกิดและการรวมตัวใหม่ในเนื้อสาร (bulk generation/recombination rate) มีค่าเป็น

$$R \Big|_{i,j} = \frac{n_{i,j} \cdot p_{i,j} - n_i^2}{\tau_{i,j} \cdot (n_{i,j} + p_{i,j} + 2n_i)} \quad (5.63)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการเกิดและการรวมตัวใหม่บริเวณผิวหน้า (surface recombination rate)

$$R^{surf}|_{i,60} = \frac{n_{i,60} \cdot p_{i,60} - n_i^2}{\frac{1}{s_n} \text{ or } \frac{1}{s_p} \cdot (n_{i,60} + p_{i,60} + 2n_i)} \quad (5.64)$$

$$F_{3int} = \frac{(j_{px}|_{i+1/2,60}) - (j_{px}|_{i-1/2,60})}{\frac{h_{i-1} + h_i}{2}} - \frac{2 \cdot j_{py}|_{i,119/2} + 2 \cdot R^{surf}|_{i,60}}{k_{59}} - R|_{i,60} = 0 \quad (5.65)$$

$$j_{px}|_{i+1/2,60} = D_p|_{i+1/2,60} \cdot \frac{B_5 \left(\frac{\psi_{i,60} - \psi_{i+1,60}}{U_t} \right) \cdot p_{i+1,60} - B_7 \left(\frac{\psi_{i+1,60} - \psi_{i,60}}{U_t} \right) \cdot p_{i,60}}{h_i} \quad (5.66)$$

$$j_{px}|_{i-1/2,60} = D_p|_{i-1/2,60} \cdot \frac{B_2 \left(\frac{\psi_{i-1,60} - \psi_{i,60}}{U_t} \right) \cdot p_{i,60} - B_4 \left(\frac{\psi_{i,60} - \psi_{i-1,60}}{U_t} \right) \cdot p_{i-1,60}}{h_{i-1}} \quad (5.67)$$

$$j_{py}|_{i,119/2} = D_p|_{i,119/2} \cdot \frac{B_1 \left(\frac{\psi_{i,59} - \psi_{i,60}}{U_t} \right) \cdot p_{i,60} - B_3 \left(\frac{\psi_{i,60} - \psi_{i,59}}{U_t} \right) \cdot p_{i,59}}{k_{m-1}} \quad (5.68)$$

5.4 การกำหนดค่าเริ่มต้น

ในการแก้สมการหาค่าตัวแปรนอกจากจะต้องกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแล้วจะต้องมีการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปรแล้วจากนั้นจะช่วยให้โปรแกรมเริ่มทำการคำนวณ โดยเริ่มจากค่าเริ่มต้นจนไปจนถึงค่าสุดท้ายค่าหนึ่ง

ค่าเริ่มต้นในส่วน โปรแกรมหนึ่งมิติโดยการแบ่งส่วนย่อย ๆ ออกเท่ากัน โดยแบ่งออกเป็น 50 จุด

ในส่วนชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะกำหนดให้

$$\psi(0) = 0; p(0) = N_a \text{ และ } n(0) = \frac{n_i^2}{p(0)} \quad (5.69)$$

ในส่วนชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จะกำหนดให้

$$\psi(50) = 0; n(50) = N_d \text{ และ } p(50) = \frac{n_i^2}{n(50)} \quad (5.70)$$

ค่าเริ่มต้นในส่วนโปรแกรมหนึ่งมิติโดยการแบ่งส่วนย่อย ๆ ออกไม่เท่ากัน โดยแบ่งออกเป็น 68 จุด
ในส่วนชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะกำหนดให้

$$\psi(0) = 0; p(0) = N_a \text{ และ } n(0) = \frac{n_i^2}{p(0)} \quad (5.71)$$

ในส่วนชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จะกำหนดให้

$$\psi(68) = 0; n(68) = N_d \text{ และ } p(68) = \frac{n_i^2}{n(68)} \quad (5.72)$$

ค่าเริ่มต้นในส่วนโปรแกรมสองมิติโดยการแบ่งแกน x ออกเป็น 61 จุดและแกน y ออกเป็น 60 จุด

$$\psi(j = 1 \text{ to } 60, j = 1 \text{ to } 59) = 0 \quad (5.73)$$

$$p(j = 1 \text{ to } 22, j = 57 \text{ to } 59) = N_a \quad (5.74)$$

$$n(j = 1 \text{ to } 22, j = 57 \text{ to } 59) = \frac{n_i^2}{p(j = 1 \text{ to } 22, j = 57 \text{ to } 59)} \quad (5.75)$$

$$n(j = 23 \text{ to } 44, j = 57 \text{ to } 59) = N_d \quad (5.76)$$

$$p(j = 23 \text{ to } 44, j = 57 \text{ to } 59) = \frac{n_i^2}{n(j = 23 \text{ to } 44, j = 57 \text{ to } 59)} \quad (5.77)$$

$$n(j = 1 \text{ to } 60, j = 1 \text{ to } 56) = N_d \quad (5.78)$$

$$p(j = 1 \text{ to } 60, j = 1 \text{ to } 56) = \frac{n_i^2}{n(j = 1 \text{ to } 60, j = 1 \text{ to } 56)} \quad (5.79)$$

$$n(j = 44 \text{ to } 60, j = 57 \text{ to } 59) = N_a \quad (5.80)$$

$$p(j = 44 \text{ to } 60, j = 57 \text{ to } 59) = \frac{n_i^2}{n(j = 44 \text{ to } 60, j = 57 \text{ to } 59)} \quad (5.81)$$

5.5 การแก้ปัญหาคำนวณด้วยวิธี Newton Method

ในวิชานิพนธ์เล่มนี้จะใช้วิธี Newton Method ในการแก้สมการไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งจะประกอบด้วยสามสมการหลักซึ่งประกอบด้วยสมการปัวร์ซอง สมการความต่อเนื่องของอิเล็กตรอน และสมการความต่อเนื่องของโฮล ซึ่งจะแก้สมการทั้งสามเพื่อหาค่าของศักย์ไฟฟ้าสถิต ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและความหนาแน่นของโฮล ซึ่งจะกำหนดให้

$$F(\psi, n, p) = \begin{bmatrix} F_1(\psi, n, p) \\ F_2(\psi, n, p) \\ F_3(\psi, n, p) \end{bmatrix} = 0 \quad (5.82)$$

สามารถนำสมการ F_1, F_2, F_3 มาทำเป็นวิธีนิวตัน สามารถเขียนอยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \psi} & \frac{\partial F_1}{\partial n} & \frac{\partial F_1}{\partial p} \\ \frac{\partial F_2}{\partial \psi} & \frac{\partial F_2}{\partial n} & \frac{\partial F_2}{\partial p} \\ \frac{\partial F_3}{\partial \psi} & \frac{\partial F_3}{\partial n} & \frac{\partial F_3}{\partial p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\psi^k \\ \delta n^k \\ \delta p^k \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} F_1(\psi^k, n^k, p^k) \\ F_2(\psi^k, n^k, p^k) \\ F_3(\psi^k, n^k, p^k) \end{bmatrix} \quad (5.83)$$

โดยที่

$$\delta\psi^k = \psi^{k+1} - \psi^k \quad (5.84)$$

$$\delta n^k = n^{k+1} - n^k \quad (5.85)$$

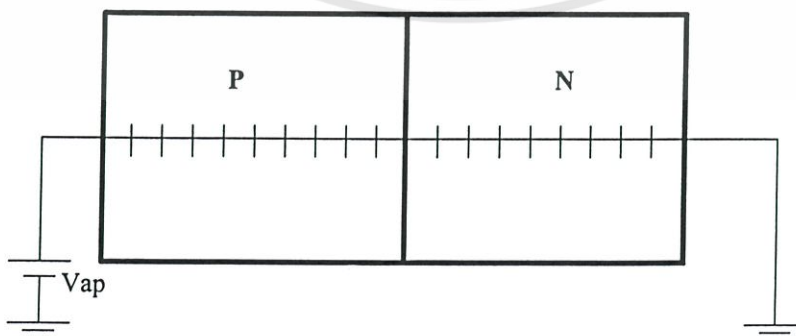
$$\delta p^k = p^{k+1} - p^k \quad (5.86)$$

โดยที่ k คือค่าทำซ้ำ (iterative)

5.6 ผลการทดลอง

ในการทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ประเภทแรกคือการทดลองการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าหนึ่งมิติและระยะห่างระหว่าง mesh เท่ากัน โดยมีการป้อนแรงดันจากภายนอกในสภาวะแรงดันไบอัสตรง แรงดันไบอัสกลับ และไม่ป้อนแรงดัน ประเภทที่สองคือการทดลองการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าหนึ่งมิติและระยะห่างระหว่าง mesh ไม่เท่ากัน โดยมีการป้อนแรงดันจากภายนอกในสภาวะแรงดันไบอัสตรง แรงดันไบอัสกลับ และไม่ป้อนแรงดัน ประเภทสุดท้ายคือการทดลองการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าสองมิติและระยะห่างระหว่าง mesh ไม่เท่ากัน โดยมีการป้อนแรงดันจากภายนอกในสภาวะแรงดันไบอัสตรง แรงดันไบอัสกลับ และไม่ป้อนแรงดัน

5.6.1 การทดลองการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าหนึ่งมิติและระยะห่างระหว่าง mesh เท่ากัน



รูปที่ 5.4 การจำลองโครงสร้างของรอยต่อ PN หนึ่งมิติโดยระยะห่างระหว่าง mesh เท่ากัน

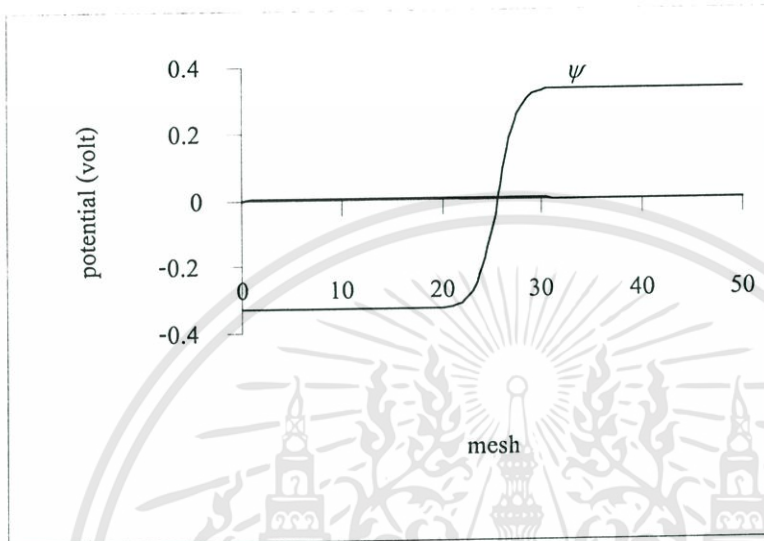
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในการทดลองครั้งนี้ได้กำหนดคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำซิลิคอนไว้ดังนี้

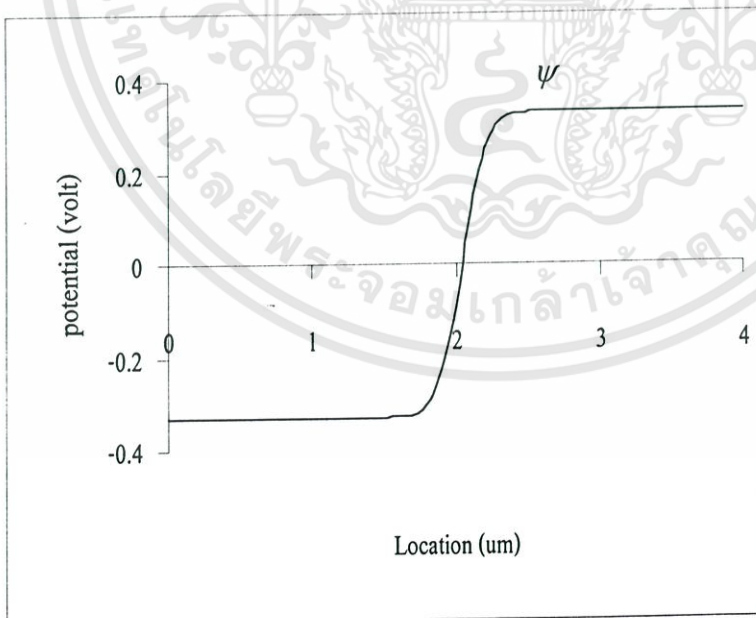
$$T = 300K, N_d = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}, N_a = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}, E_g = 1.12 \text{ eV} D_{np} = 30 \text{ cm}^2 / \text{sec},$$

$$D_{pp} = 9 \text{ cm}^2 / \text{sec} D_{pn} = 9 \text{ cm}^2 / \text{sec}, D_{nn} = 30 \text{ cm}^2 / \text{sec} \tau_{np} = 3 \times 10^{-6} \text{ sec},$$

$$\tau_{pn} = 2 \times 10^{-6} \text{ sec}, n_i = 1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}, \text{length} = 4 \mu\text{m}, h = 80 \text{ nm}$$

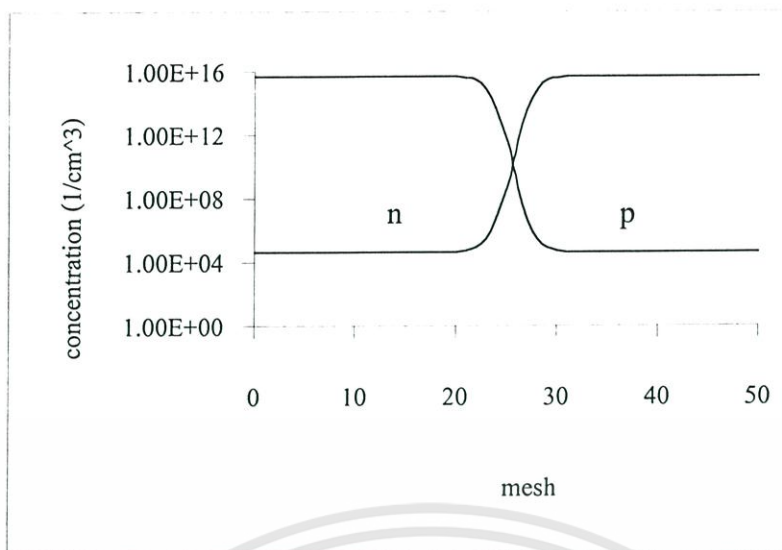


รูปที่ 5.5 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตโดยตำแหน่งของ mesh ขณะให้แรงดัน 0 โวลต์

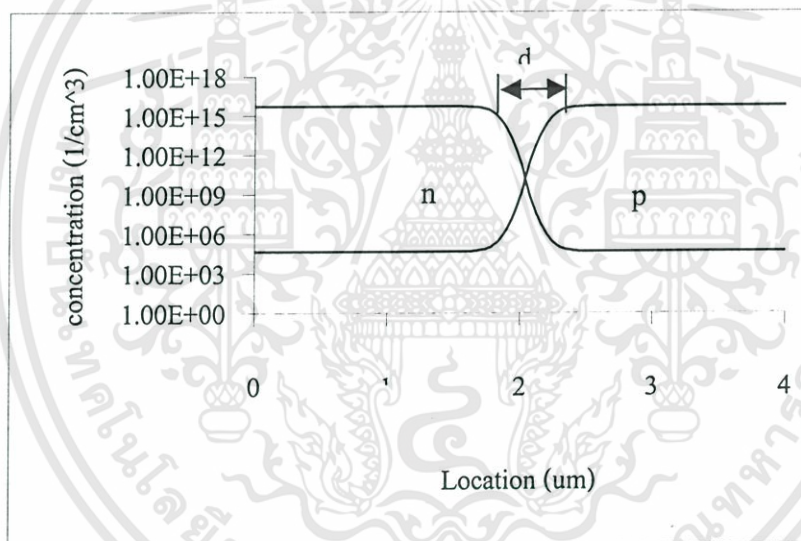


รูปที่ 5.6 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตโดยตำแหน่งจริงขณะให้แรงดัน 0 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



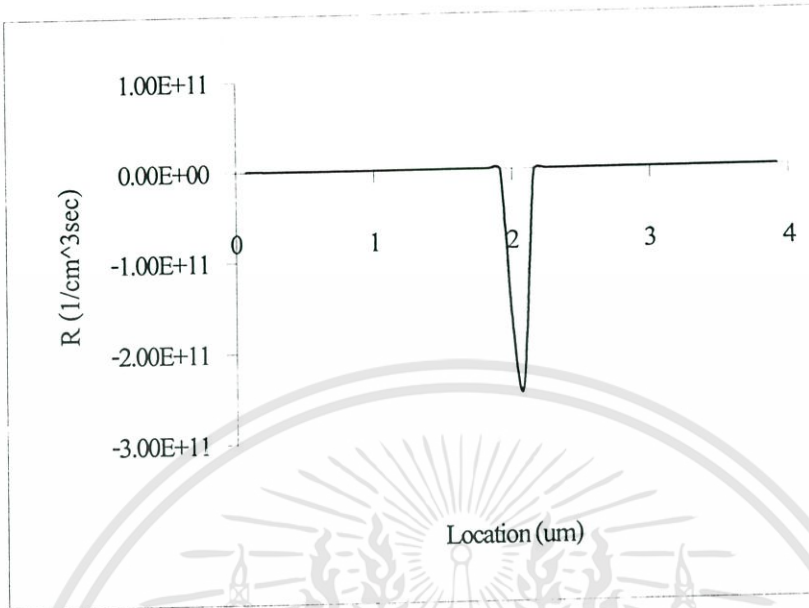
รูปที่ 5.7 ผลความหนาแน่นของพาหะ โดยตำแหน่งของ mesh ขณะให้แรงดัน 0 โวลต์



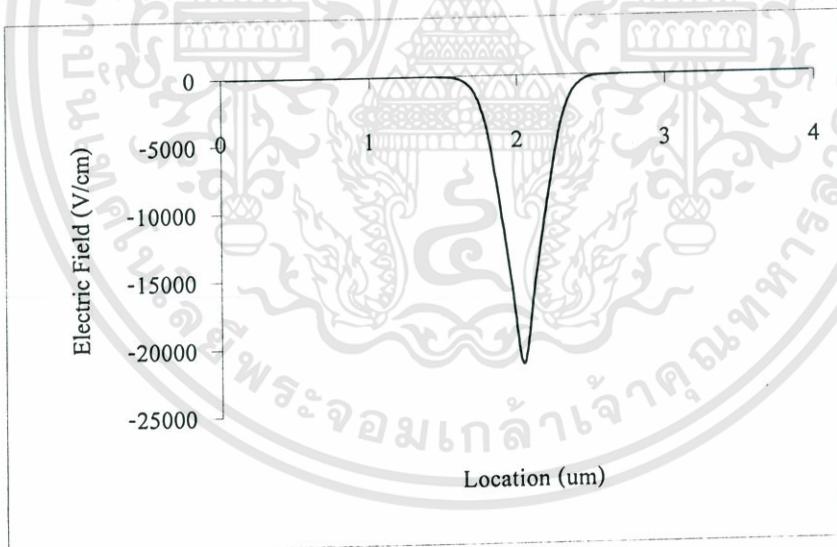
รูปที่ 5.8 ผลของความหนาแน่นของพาหะ โดยตำแหน่งจริง ขณะให้แรงดัน 0 โวลต์

จากผลการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพีเอ็นในลักษณะหนึ่งมิติ ขณะไม่ให้แรงดันไบอัส จะทำให้ทราบค่าของศักย์ไฟฟ้าสถิต ณ ตำแหน่งต่าง ๆ บนชิ้นสารกึ่งตัวนำว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร โดยที่ผลต่างของศักย์ไฟฟ้าสถิตมีค่า 0.66 โวลต์ และศักย์ไฟฟ้าสถิตมีค่า 0 โวลต์ที่รอยต่อพีเอ็น ส่วนในรูป 5.8 จะทำให้ทราบค่าการกระจายความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตลอดชิ้นสารกึ่งตัวนำและจะเห็นว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและ

โวลต์จะมีค่าลดลงในบริเวณเขตปลอดพาหะ (depletion region) และที่รอยต่อพีเอ็นจะมีความหนาแน่นเท่ากันที่ปริมาณ $1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ และบริเวณเขตปลอดพาหะมีบริเวณกว้าง $0.7 \mu\text{m}$

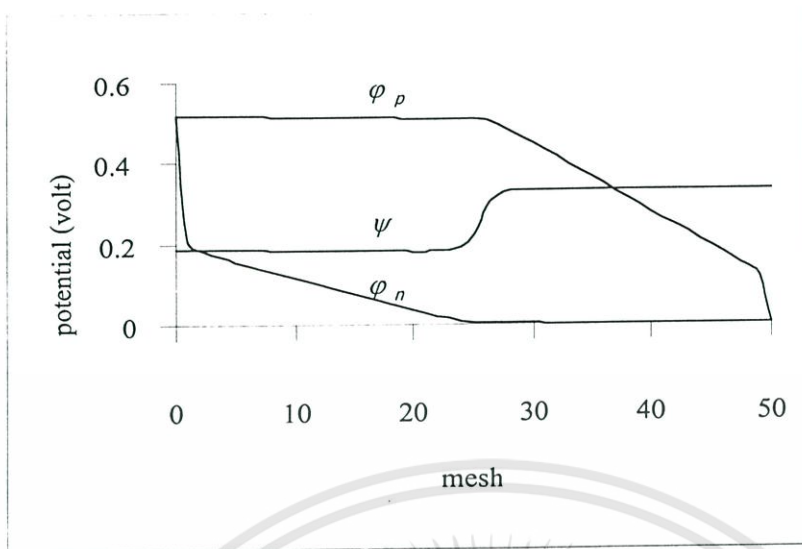


รูปที่ 5.9 ผลของการเกิดของประจุ ขณะให้แรงดัน 0 โวลต์

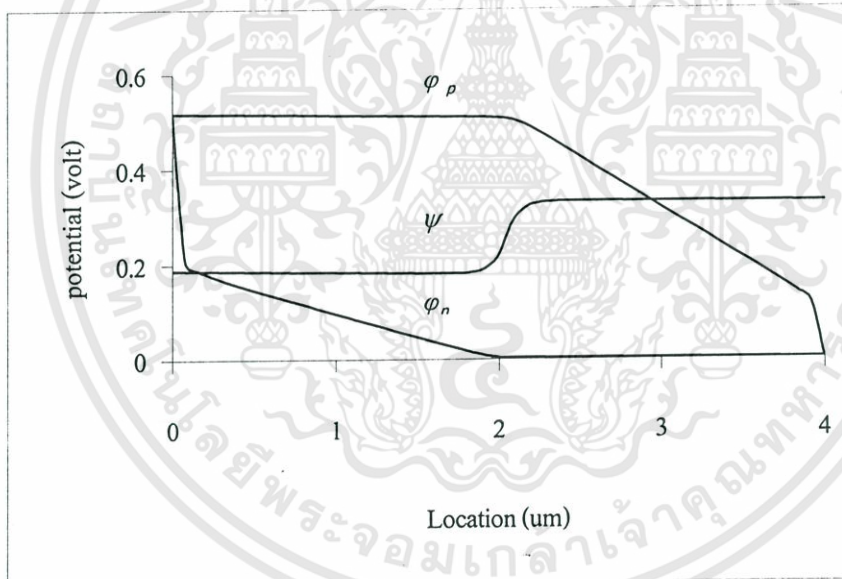


รูปที่ 5.10 ผลของสนามไฟฟ้าขณะให้แรงดัน 0 โวลต์

จากผลการทดลองขณะไม่ให้แรงดันไบอัสที่รอยต่อจะมีการเกิดของประจุซึ่งมีค่าสูงสุดที่รอยต่อพีเอ็น และสนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงสุดที่รอยต่อพีเอ็นซึ่งมีค่าเท่ากับ $-2.1 \times 10^4 \text{ V/cm}$



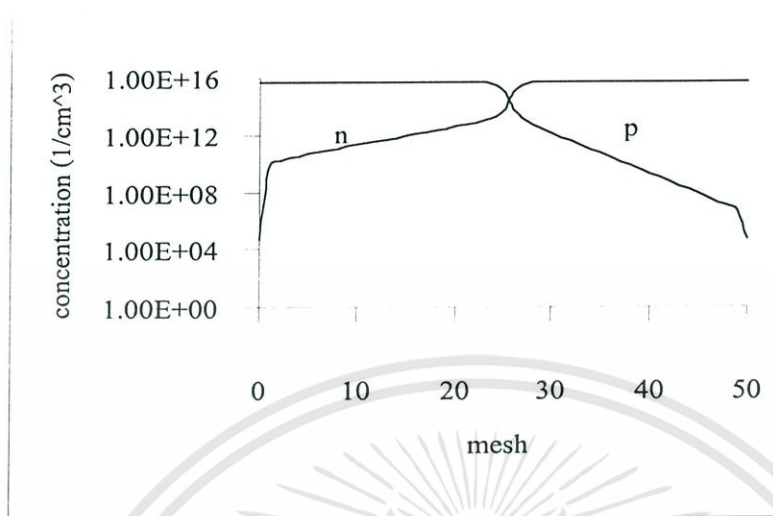
รูปที่ 5.11 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตโดยตำแหน่งของ mesh ขณะให้แรงดัน 0.517 โวลต์



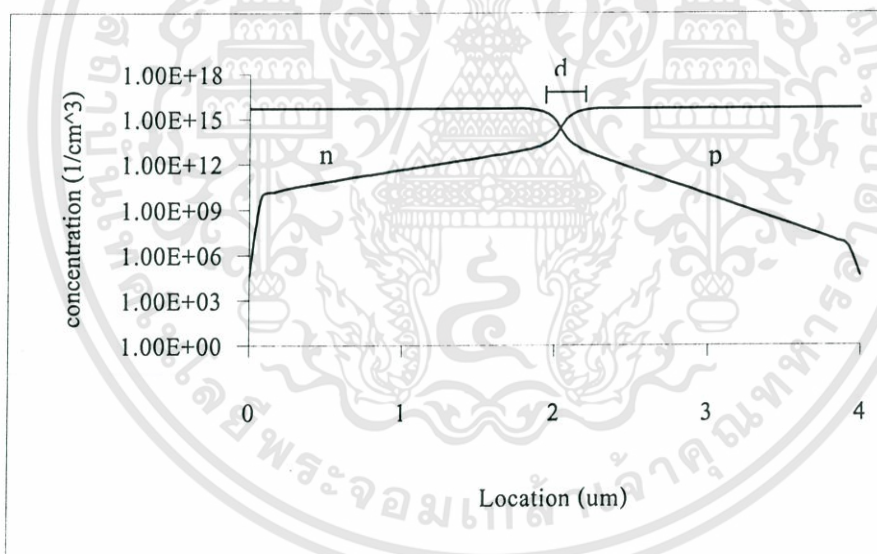
รูปที่ 5.12 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตโดยตำแหน่งจริงขณะให้แรงดัน 0.517 โวลต์

จากผลการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพีเอ็นในลักษณะหนึ่งมิติ ขณะให้แรงดันไบอัสตรงเท่ากับ 0.517 โวลต์ เมื่อมีการให้แรงดันไบอัสตรงให้กับชิ้นสารกึ่งตัวนำจะมีผลทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าสถิตมีการเปลี่ยนแปลง โดยที่ผลต่างของศักย์ไฟฟ้าสถิตมีค่าลดลงเหลือ 0.14 โวลต์ และที่รอยต่อพีเอ็นมีค่าศักย์ไฟฟ้าสถิตเท่ากับ 0.22 โวลต์ ส่วนค่าของระดับพลังงานควอไซต์เฟอร์มิของอิเล็กตรอน (ϕ_n) จะมีค่าลดลงในบริเวณชิ้นสารชนิดพี และมีค่าเท่ากับศูนย์ในชิ้นสารชนิดเอ็น

ส่วนค่าของระดับพลังงานควอไซต์เฟอร์มิของโฮล (φ_p) จะมีค่าคงที่เท่ากับ 0.517 โวลต์ ในบริเวณชั้นสารชนิดพี และมีค่าลดลงในบริเวณชั้นสารชนิดเอ็น

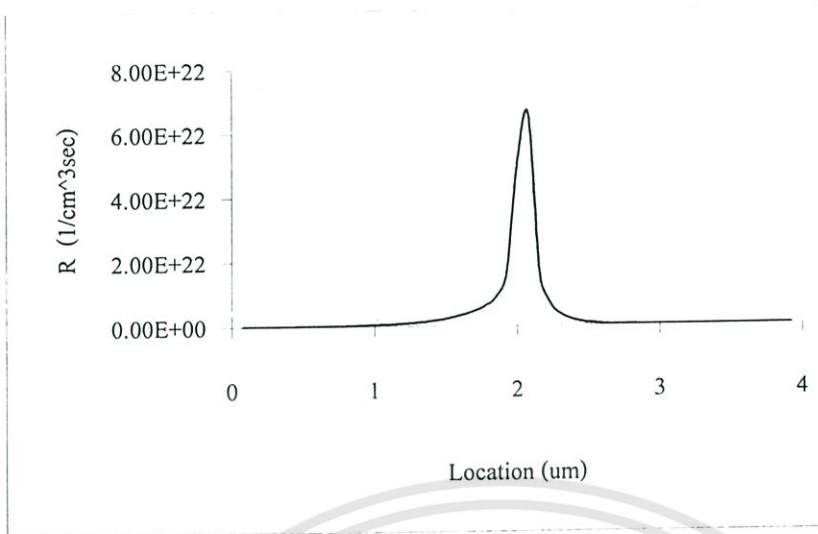


รูปที่ 5.13 ผลความหนาแน่นของพาหะ โดยตำแหน่ง mesh ขณะให้แรงดัน 0.517 โวลต์

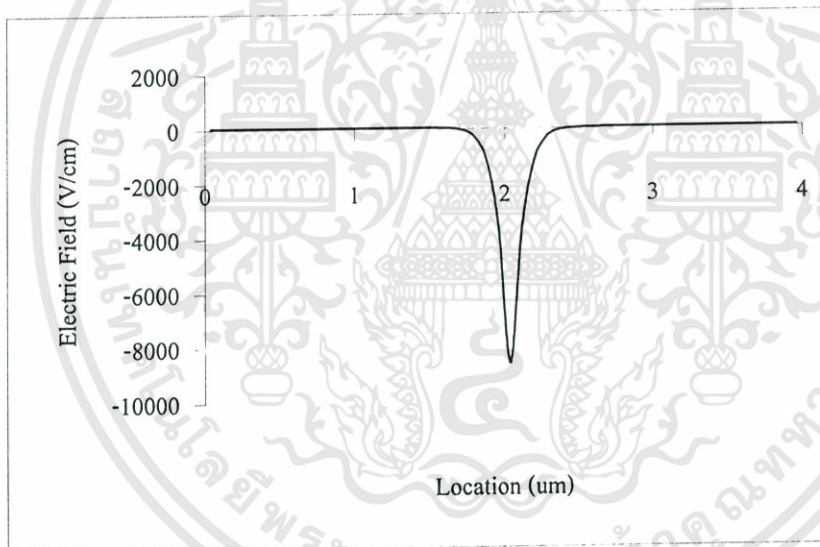


รูปที่ 5.14 ผลความหนาแน่นของพาหะ โดยตำแหน่งจริง ขณะให้แรงดัน 0.517 โวลต์

จะเห็นว่าในขณะที่ให้แรงดันไบอัสตรงจะทำให้อิเล็กตรอนและโฮลข้ามรอยต่อได้ง่ายขึ้น และบริเวณเขตปลอดพาหะลดลงเหลือ $0.3 \mu\text{m}$ และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลจะเท่ากันที่บริเวณรอยต่อ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $6.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$

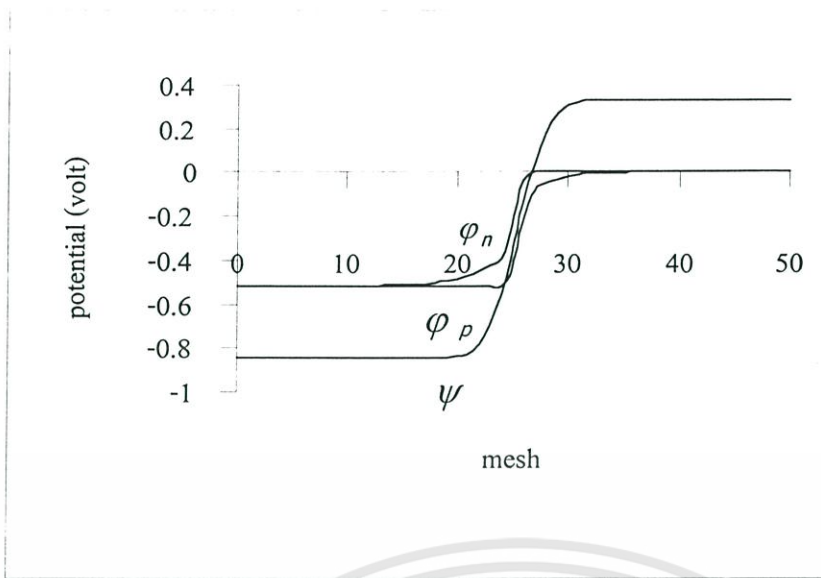


รูปที่ 5.15 ผลการรวมตัวของประจุ ขณะให้แรงดัน 0.517 โวลต์

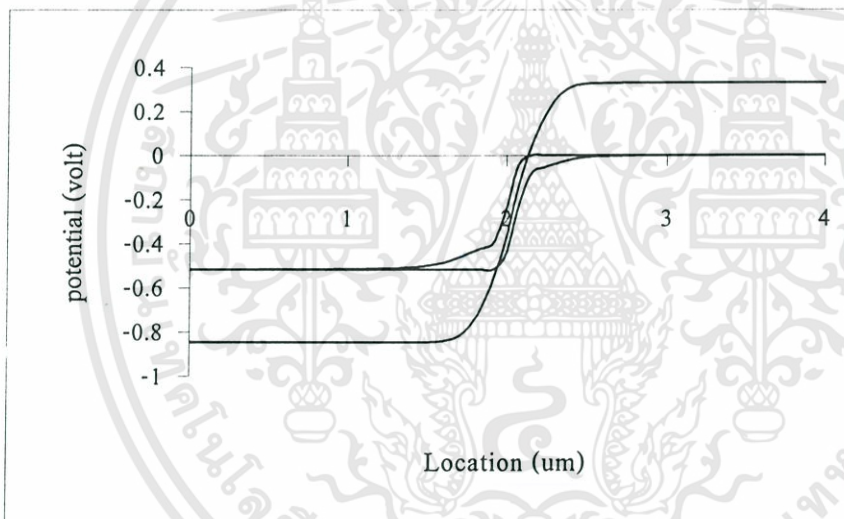


รูปที่ 5.16 ผลของสนามไฟฟ้าขณะให้แรงดัน 0.517 โวลต์

จากผลการทดลองขณะให้แรงดันไบอัสตรง 0.517 โวลต์ จะทำให้ที่รอยต่อเกิดการรวมตัวของประจุซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ $6.54 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$ และสนามไฟฟ้ามีค่าลดลงขณะให้แรงดันไบอัสตรง 0.517 โวลต์ ที่รอยต่อมีสนามไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ $-8.5 \times 10^3 \text{ V/cm}$

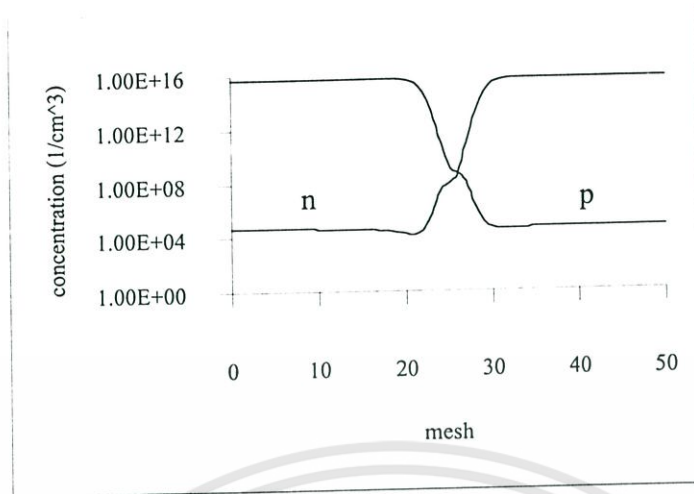


รูปที่ 5.17 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิต โดยตำแหน่งของ mesh ขณะให้แรงดัน -0.517 โวลต์

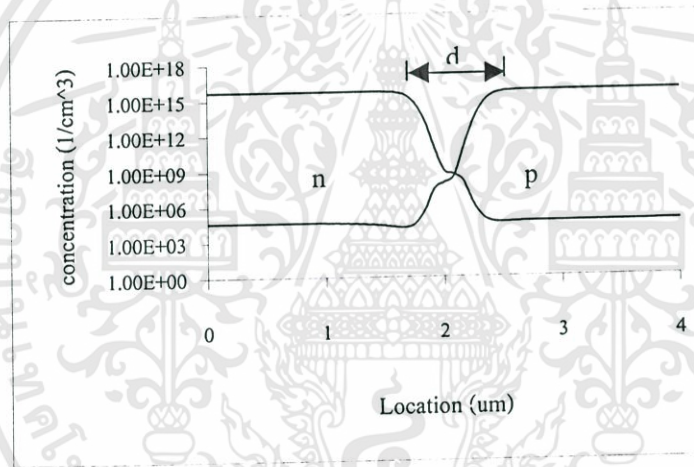


รูปที่ 5.18 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิต โดยตำแหน่งจริง ขณะให้แรงดัน -0.517 โวลต์

จากผลการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพีเอ็นในลักษณะหนึ่งมิติขณะให้แรงดันไบอัสกลับ (reverse bias) มีค่า -0.517 โวลต์ เมื่อมีการให้แรงดันไบอัสกลับให้กับชิ้นสารกึ่งตัวนำ จะมีผลทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าสถิตมีการเปลี่ยนแปลง โดยที่ผลต่างของศักย์ไฟฟ้าสถิตมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1.17 โวลต์ และค่าของศักย์ไฟฟ้าสถิตที่บริเวณรอยต่อมีค่า -0.37 โวลต์ ส่วนค่าของระดับพลังงานควอไซต์เฟอร์มิของอิเล็กตรอน (φ_n) และระดับพลังงานควอไซต์เฟอร์มิของโฮล (φ_p) จะมีการเปลี่ยนแปลงในบริเวณเขตปลอดพาหะ

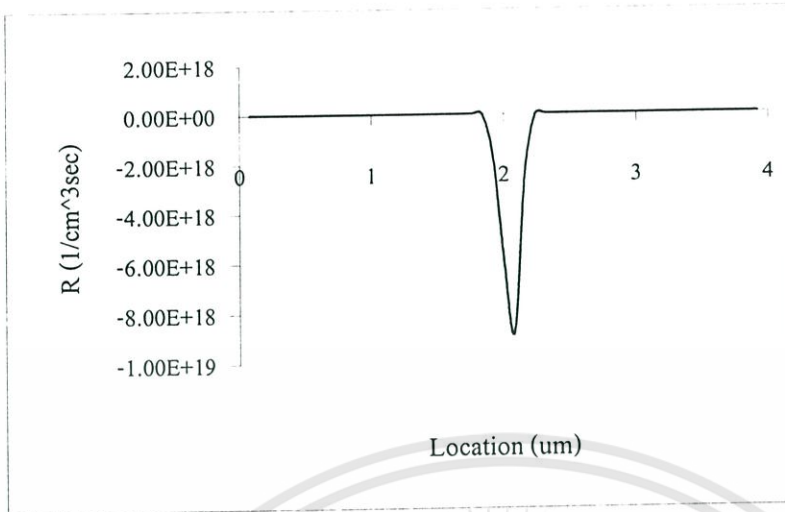


รูปที่ 5.19 ผลความหนาแน่นของพาหะโดยตำแหน่ง mesh ขณะให้แรงดัน -0.517 โวลต์

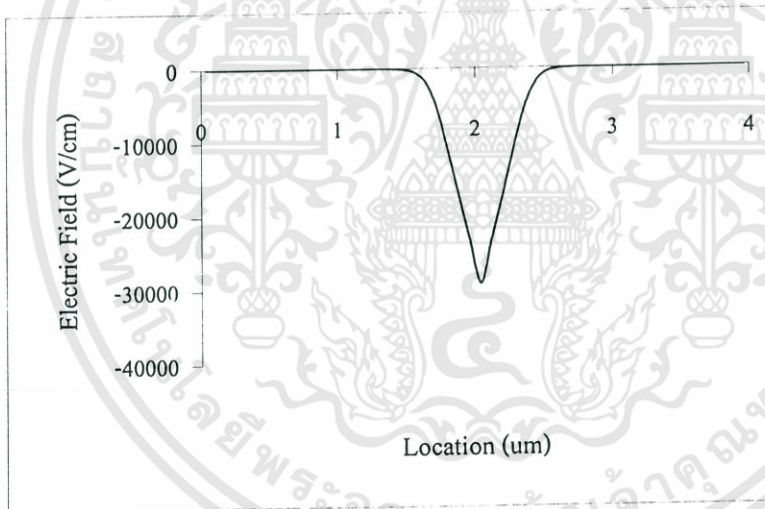


รูปที่ 5.20 ผลความหนาแน่นของพาหะโดยตำแหน่งจริง ขณะให้แรงดัน -0.517 โวลต์

จะเห็นว่าในขณะให้แรงดันไบอัสกลับจะทำให้ไอเล็กตรอนและโฮลข้ามรอยต่อได้ยากขึ้น และบริเวณเขตปลอดพาหะจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $0.86 \mu m$ และความหนาแน่นของไอเล็กตรอนที่บริเวณรอยต่อมีค่าเท่ากับ $8.88 \times 10^7 cm^{-3}$ และความหนาแน่นของโฮลที่บริเวณรอยต่อมีค่าเท่ากับ $9.12 \times 10^7 cm^{-3}$

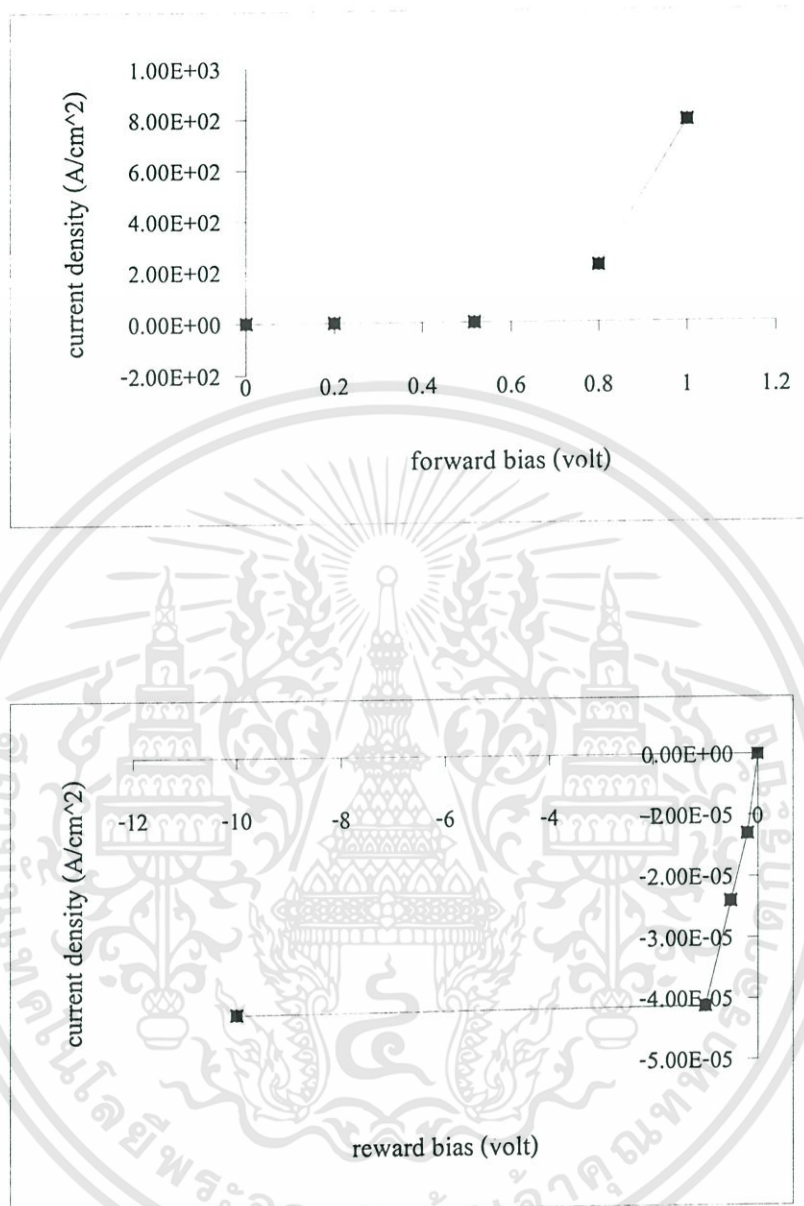


รูปที่ 5.21 ผลการเกิดของประจุขณะให้แรงดัน -0.517 โวลต์



รูปที่ 5.22 ผลของสนามไฟฟ้าขณะให้แรงดัน -0.517 โวลต์

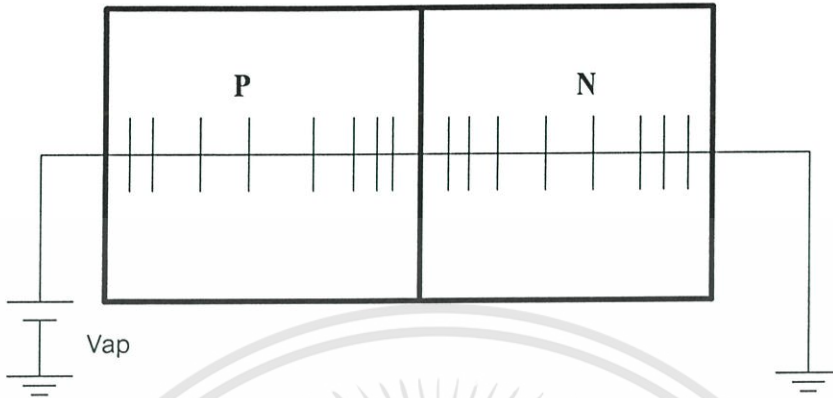
จากผลการทดลองขณะให้แรงดันไบอัสกลับ -0.517 โวลต์ จะทำให้ที่รอยต่อมีการเกิดของประจุเนื่องจากค่า R มีค่าเป็นลบ และมีค่าสูงสุดเท่ากับ $-8.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$ และสนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้นขณะได้รับแรงดันไบอัสกลับและมีค่าสูงสุดเท่ากับ $-2.9 \times 10^4 \text{ V/cm}$



รูปที่ 5.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสกับแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6.2 การทดลองการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าหนึ่งมิติและระยะห่างระหว่าง mesh ไม่เท่ากัน



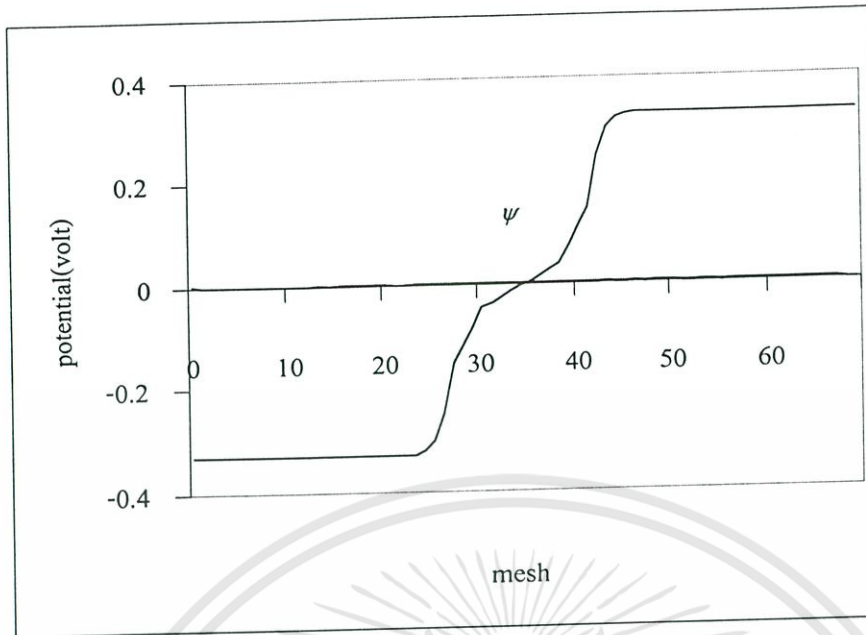
รูปที่ 5.24 การจำลองโครงสร้างของรอยต่อพีเอ็นหนึ่งมิติ และระยะห่างระหว่าง mesh ไม่เท่ากัน

โดยทำการแบ่งชั้นสารกึ่งตัวนำออกเป็นส่วนย่อย ๆ ซึ่งเรียกว่า mesh ดังรูปที่ 5.24 โดยกำหนดดังนี้

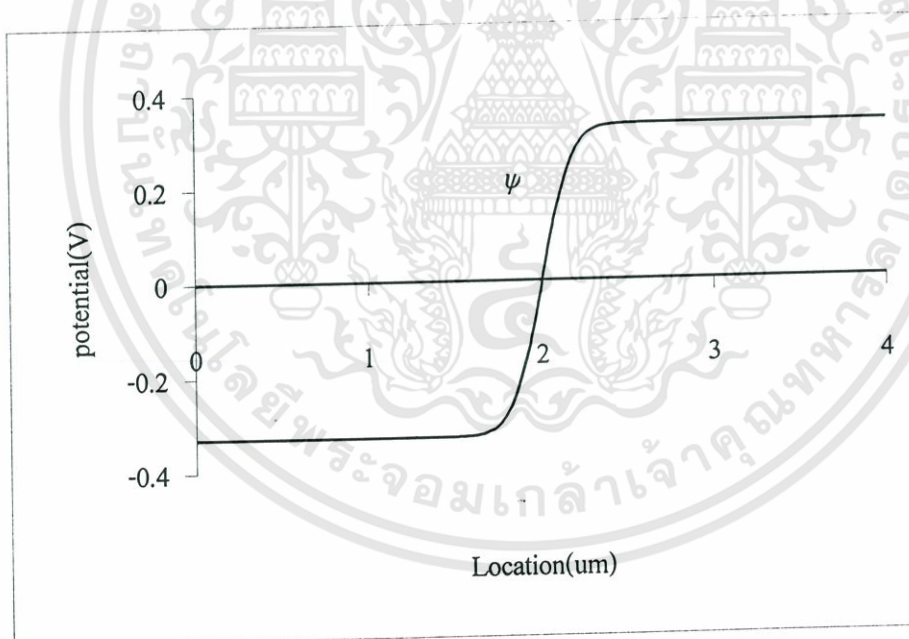
$$h(0) \text{ to } h(3) = 20 \text{ nm}, h(4) \text{ to } h(26) = 80 \text{ nm}, h(27) \text{ to } h(29) = 20 \text{ nm}, \\ h(30) \text{ to } h(37) = 5 \text{ nm}, h(38) \text{ to } h(40) = 20 \text{ nm}, h(41) \text{ to } h(63) = 80 \text{ nm} \text{ และ} \\ h(64) \text{ to } h(67) = 20 \text{ nm}, \text{ Length} = 4 \mu\text{m}$$

ในการทดลองนี้ได้กำหนดคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำซิลิคอนไว้ดังนี้

$$T = 300 \text{ K}, N_d = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}, N_a = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}, E_g = 1.12 \text{ eV} \\ D_{np} = 30 \text{ cm}^2 / \text{sec}, D_{pp} = 9 \text{ cm}^2 / \text{sec} \\ D_{pn} = 9 \text{ cm}^2 / \text{sec}, D_{nn} = 30 \text{ cm}^2 / \text{sec} \\ \tau_{np} = 3 \times 10^{-6} \text{ sec}, \tau_{pn} = 2 \times 10^{-6} \text{ sec} \\ n_i = 1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$



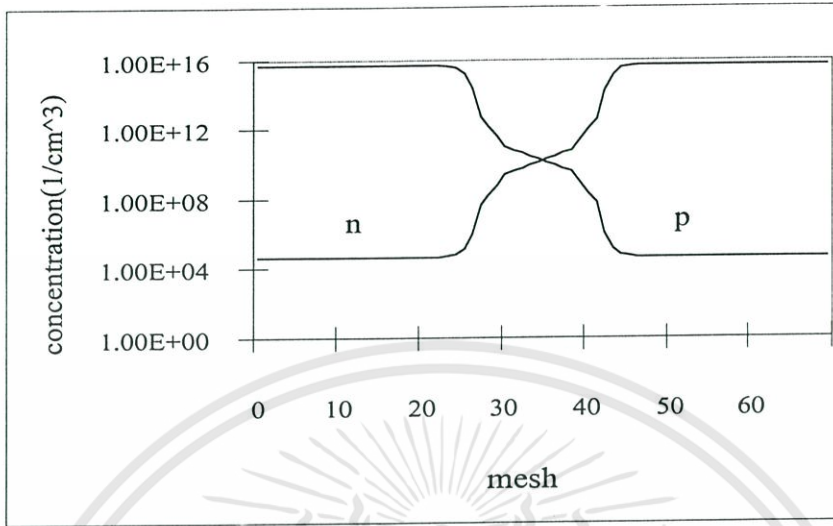
รูปที่ 5.25 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตโดยตำแหน่งของ mesh ขณะให้แรงดัน 0 โวลต์



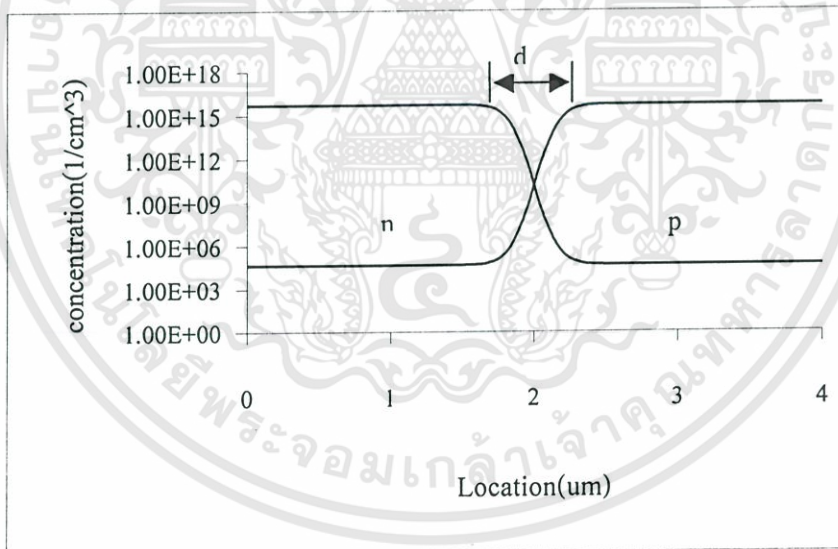
รูปที่ 5.26 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตโดยตำแหน่งจริง ขณะให้แรงดัน 0 โวลต์

จากผลการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพีเอ็นในลักษณะหนึ่งมิติ โดยที่ระยะห่างระหว่าง mesh ต่างกัน ขณะไม่ให้แรงดันไบอัส ในรูป 5.26 จะทำให้ทราบค่าของศักย์ไฟฟ้าสถิต ณ

ตำแหน่งต่าง ๆ บนชิ้นสารกึ่งตัวนำ โดยที่ผลต่างของศักย์ไฟฟ้าสถิตมีค่า 0.66 โวลต์ และศักย์ไฟฟ้าสถิตจะมีค่า 0 โวลต์ ที่รอยต่อพีเอ็น

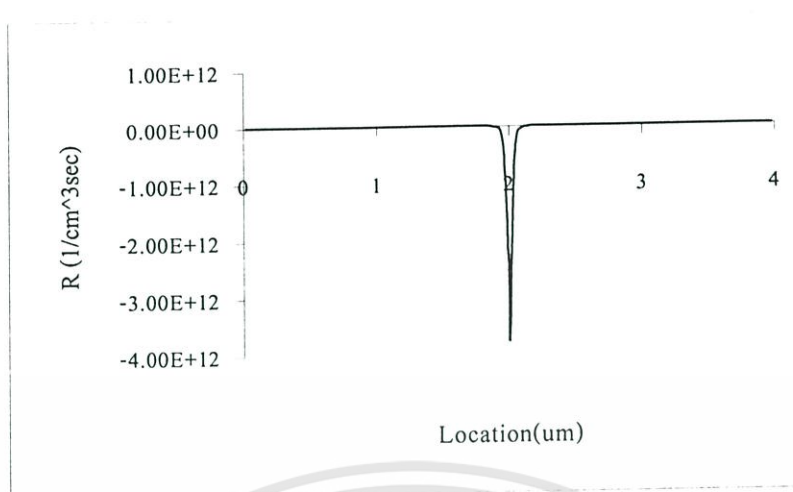


รูปที่ 5.27 ผลความหนาแน่นของพาหะ โดยตำแหน่ง mesh ขณะให้แรงดัน 0 โวลต์

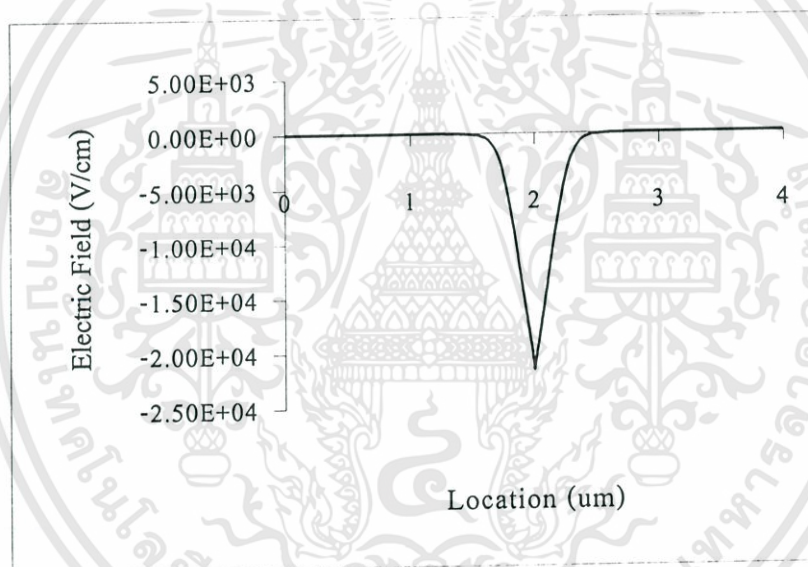


รูปที่ 5.28 ผลความหนาแน่นของพาหะ โดยตำแหน่งจริง ขณะให้แรงดัน 0 โวลต์

จากรูปที่ 5.28 จะทำให้ทราบค่าการกระจายความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลในบริเวณเขตปลอดพาหะและบริเวณเขตปลอดพาหะมีความกว้าง $0.7 \mu m$ และที่บริเวณรอยต่อพีเอ็น จะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลเท่ากันที่ $1.5 \times 10^{10} cm^{-3}$ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ 5.6.1 จะเห็นว่าในส่วน of บริเวณเขตปลอดพาหะจะสามารถมองเห็นได้ชัดเจนกว่า

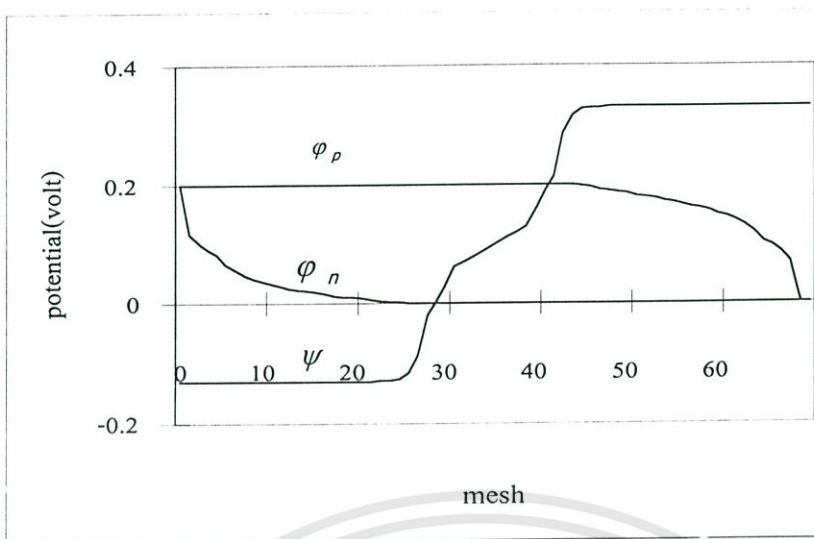


รูปที่ 5.29 ผลของการเกิดของประจุ ขณะให้แรงดัน 0 โวลต์

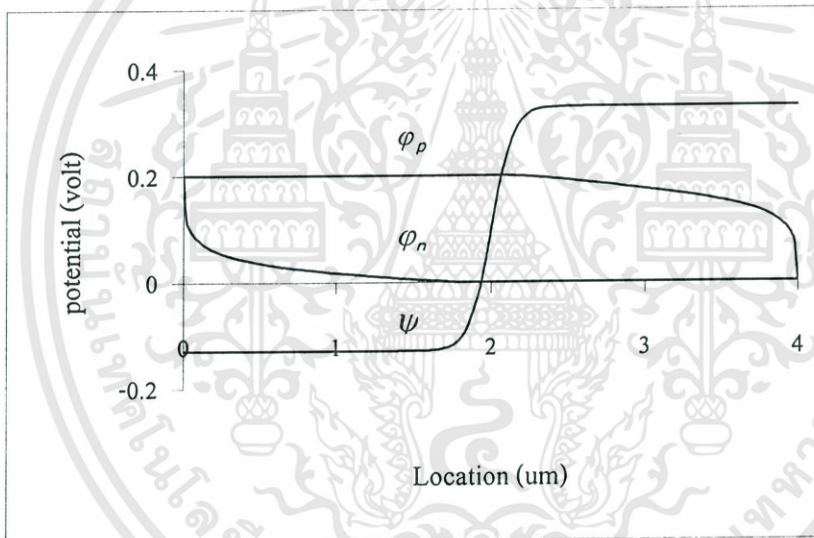


รูปที่ 5.30 ผลของสนามไฟฟ้าขณะให้แรงดัน 0 โวลต์

จากผลการจำลองขณะไม่ให้แรงดันไบอัสที่รอยต่อจะมีการเกิดของประจุ ซึ่งจะมีค่าสูงสุดที่รอยต่อพีเอ็นและสนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงสุดที่รอยต่อพีเอ็นและมีค่าเท่ากับ $-2.14 \times 10^4 \text{ V/cm}$



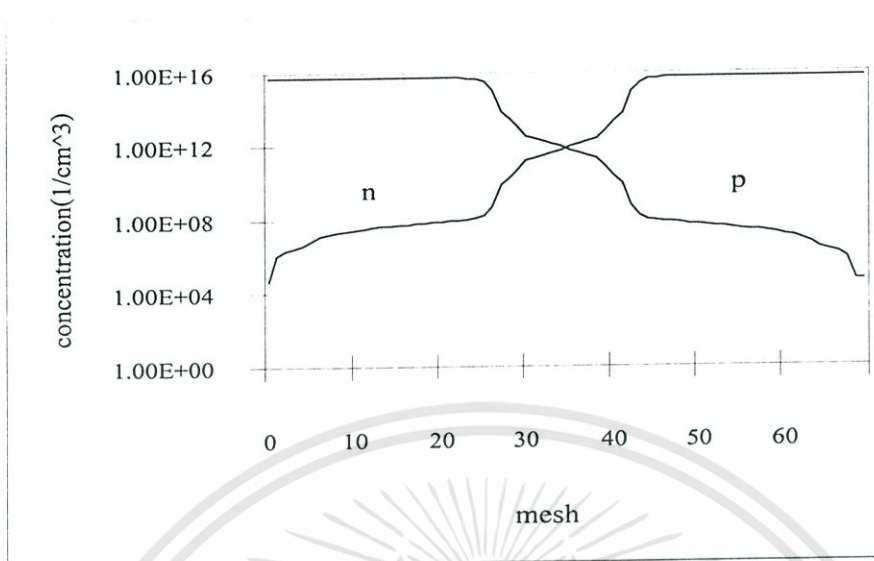
รูปที่ 5.31 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตโดยตำแหน่งของ mesh ขณะให้แรงดัน 0.2 โวลต์



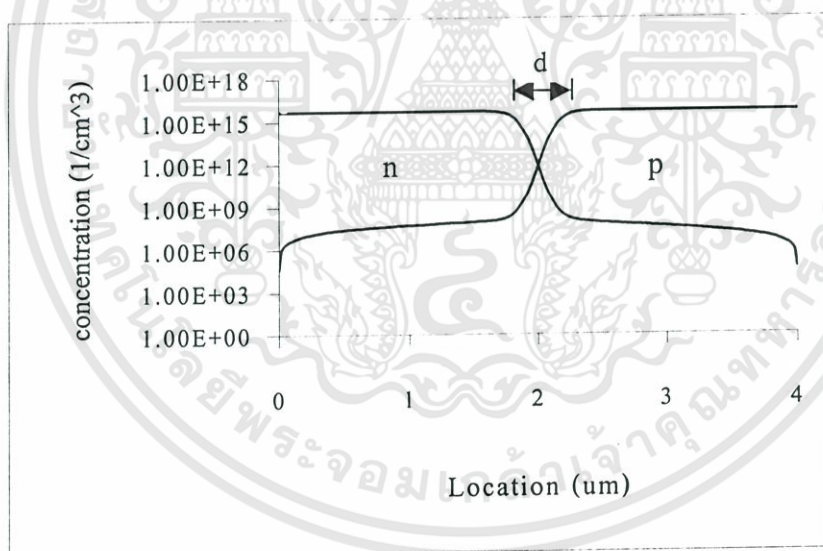
รูปที่ 5.32 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตโดยตำแหน่งจริงขณะให้แรงดัน 0.2 โวลต์

จากผลการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพีเอ็นในลักษณะหนึ่งมิติ โดยมีระยะ mesh ต่างกัน ขณะให้แรงดันไบอัสตรงเท่ากับ 0.2 โวลต์ เมื่อมีการให้แรงดันไบอัสตรงให้กับชิ้นสารกึ่งตัวนำจะมีผลทำให้ค่าผลต่างของศักย์ไฟฟ้าสถิตมีค่าลดลงเหลือ 0.46 โวลต์ และที่รอยต่อพีเอ็นมีค่าศักย์ไฟฟ้าสถิตเท่ากับ 0.1 โวลต์ ส่วนค่าของระดับพลังงานควอไซต์เฟอร์มิของอิเล็กทรอนิกส์ (φ_n) จะมีค่าลดลงในบริเวณชิ้นสารพี และมีค่าเท่ากับศูนย์ ในชิ้นสารชนิดเอ็น ส่วนค่าของระดับพลังงานควอไซต์เฟอร์มิของโฮล (φ_p) จะมีค่าเท่ากับ 0.2 โวลต์ ในบริเวณชิ้นสารพี และมีค่าลดลงในบริเวณชิ้นสารชนิดเอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

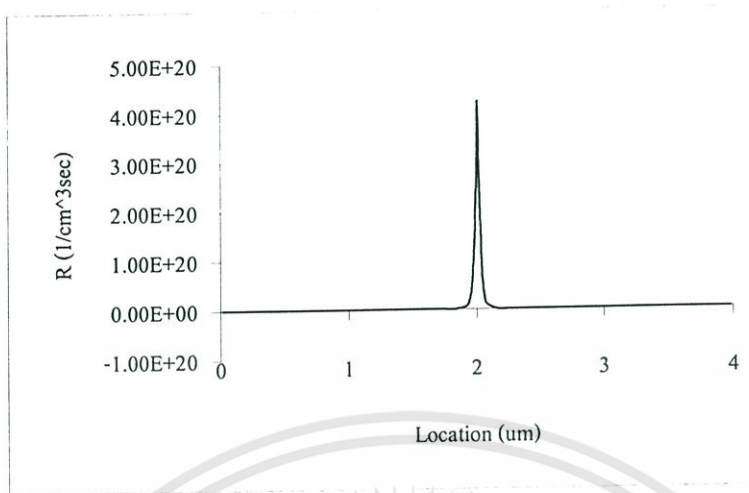


รูปที่ 5.33 ผลความหนาแน่นของพาหะ โดยตำแหน่ง mesh ขณะให้แรงดัน 0.2 โวลต์

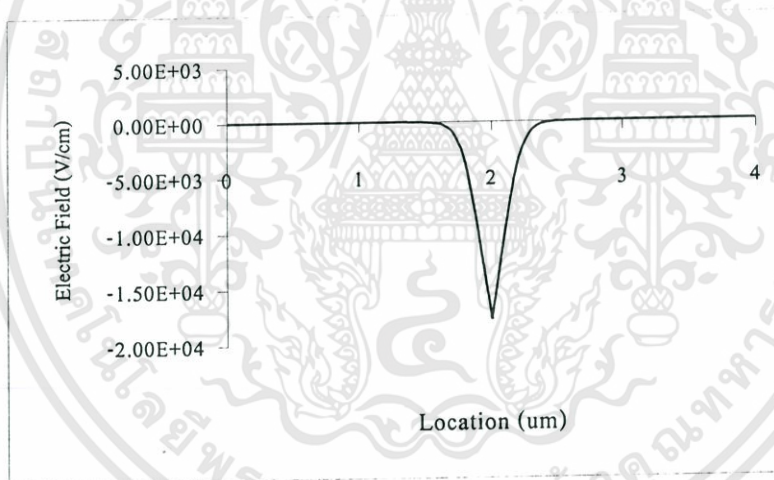


รูปที่ 5.34 ผลความหนาแน่นของพาหะ โดยตำแหน่งจริง ขณะให้แรงดัน 0.2 โวลต์

จากรูป 5.34 ขณะให้แรงดันไบอัสตรง 0.2 โวลต์ ทำให้อิเล็กตรอนและโฮลข้ามรอยต่อได้ง่ายขึ้นและบริเวณเขตปลอดพาหะลดลงเหลือ $0.6 \mu\text{m}$ และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลจะเท่ากันที่บริเวณรอยต่อซึ่งมีค่าเท่ากับ $7.04 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$

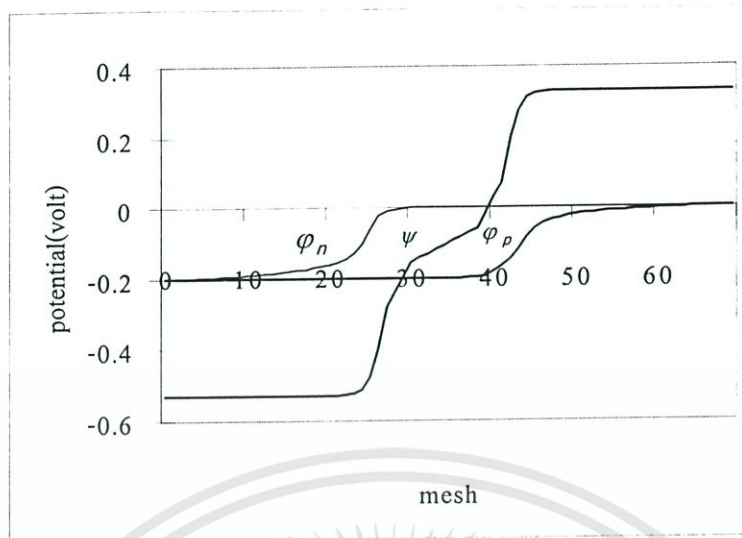


รูปที่ 5.35 ผลการรวมตัวของประจุอิสระให้แรงดัน 0.2 โวลต์

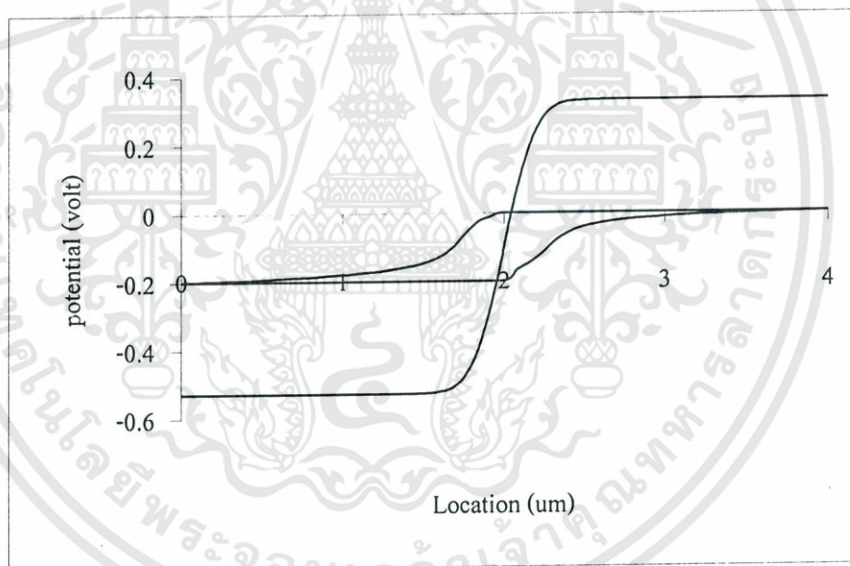


รูปที่ 5.36 ผลของสนามไฟฟ้าขณะให้แรงดัน 0.2 โวลต์

จากผลการทดลองขณะให้แรงดันไบอัสตรง 0.2 โวลต์ ที่รอยต่อจะมีการรวมตัวของประจุเกิดขึ้น และมีค่าสูงสุดเท่ากับ $4.2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$ และสนามไฟฟ้าจะเกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อเนื่องจากเป็นบริเวณเขตปลอดพาหะและมีค่าสูงสุดเท่ากับ $-1.7 \times 10^4 \text{ V/cm}$



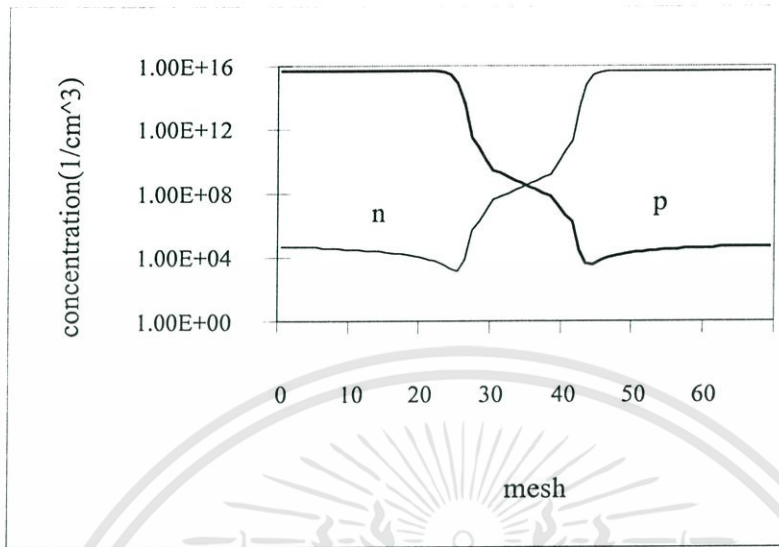
รูปที่ 5.37 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตโดยตำแหน่งของ mesh ขณะให้แรงดัน -0.2 โวลต์



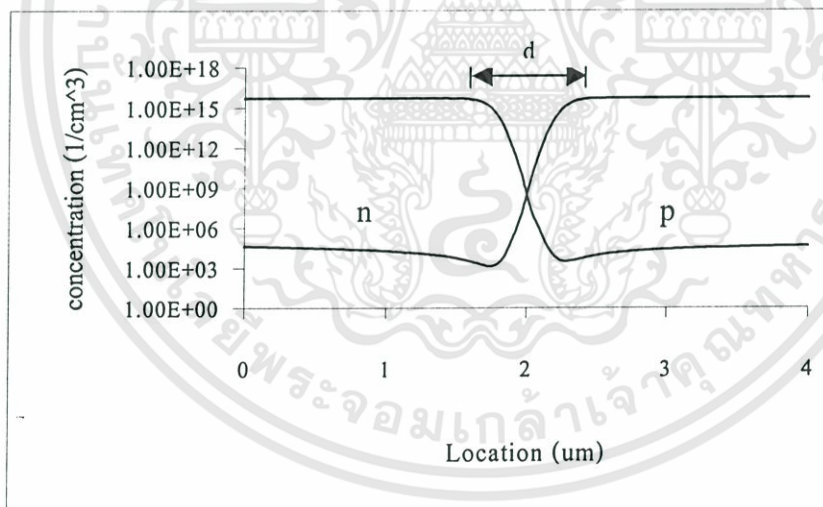
รูปที่ 5.38 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตโดยตำแหน่งจริง ขณะให้แรงดัน -0.2 โวลต์

จากผลการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพีเอ็นในลักษณะหนึ่งมิติ ขณะให้แรงดันไบอัสกลับ (reverse bias) มีค่า -0.2 โวลต์ ในรูป 5.38 เมื่อมีการให้แรงดันไบอัสกลับจะทำให้ผลต่างของศักย์ไฟฟ้าสถิตมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.86 โวลต์ และค่าของศักย์ไฟฟ้าสถิตที่บริเวณรอยต่อมีค่า -0.1 โวลต์ ส่วนค่าของระดับพลังงานควอไซต์เฟอร์มิของอิเล็กตรอน (φ_n) ในส่วนชั้นสารพีจะมีค่า -0.2 โวลต์ และจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงค่า 0 โวลต์ที่ตำแหน่ง $2.24\mu m$ ค่าของระดับพลังงานควอไซต์

เฟอร์มิของโฮล (ϕ_p) ในชั้นสารพีจะมีค่า -0.2 โวลต์ ที่ตำแหน่ง $0 \mu m$ จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงค่า 0.01 โวลต์ ที่ตำแหน่ง $3.2 \mu m$



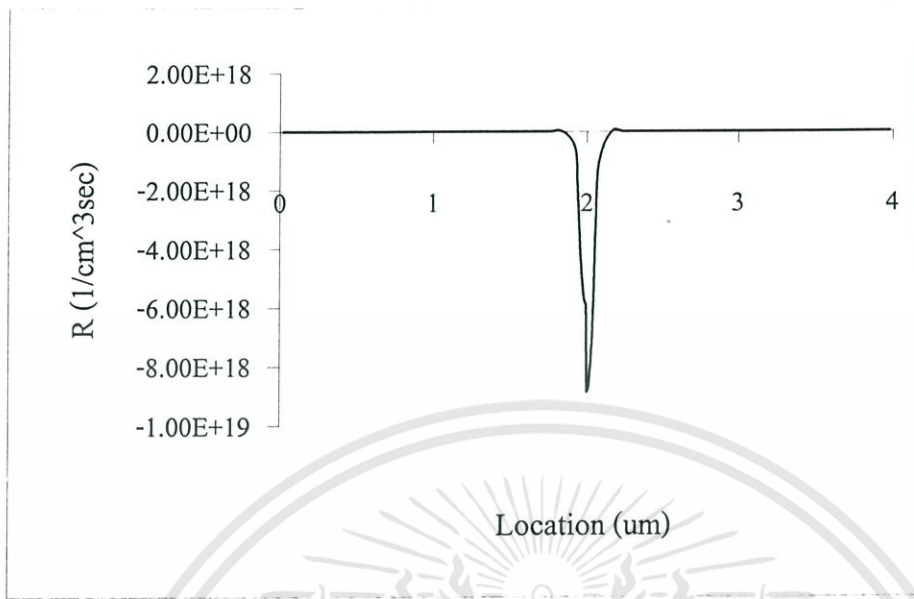
รูปที่ 5.39 ผลความหนาแน่นของพาหะโดยตำแหน่ง mesh ขณะให้แรงดัน -0.2 โวลต์



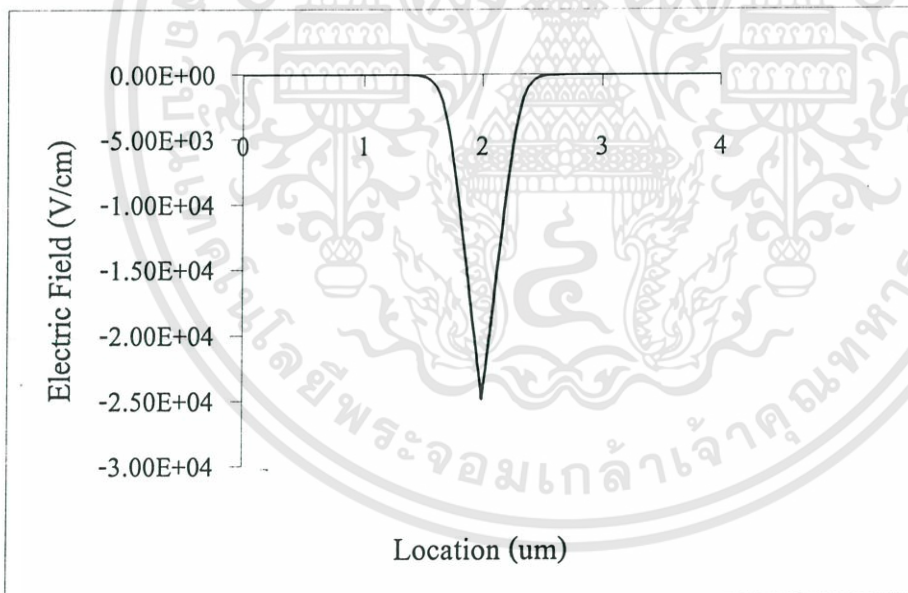
รูปที่ 5.40 ผลความหนาแน่นของพาหะโดยตำแหน่งจริง ขณะให้แรงดัน -0.2 โวลต์

จากรูปที่ 5.40 ขณะให้แรงดันไบอัส -0.2 โวลต์ ทำให้อิเล็กตรอนและโฮลข้ามรอยต่อได้ยากขึ้น เนื่องจากค่าของศักย์ไฟฟ้าสถิตมีค่าสูงขึ้น และบริเวณเขตปลอดพาหะกว้างขึ้นถึง $0.75 \mu m$ และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลจะเท่ากันที่บริเวณรอยต่อมีเท่ากับ $3 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

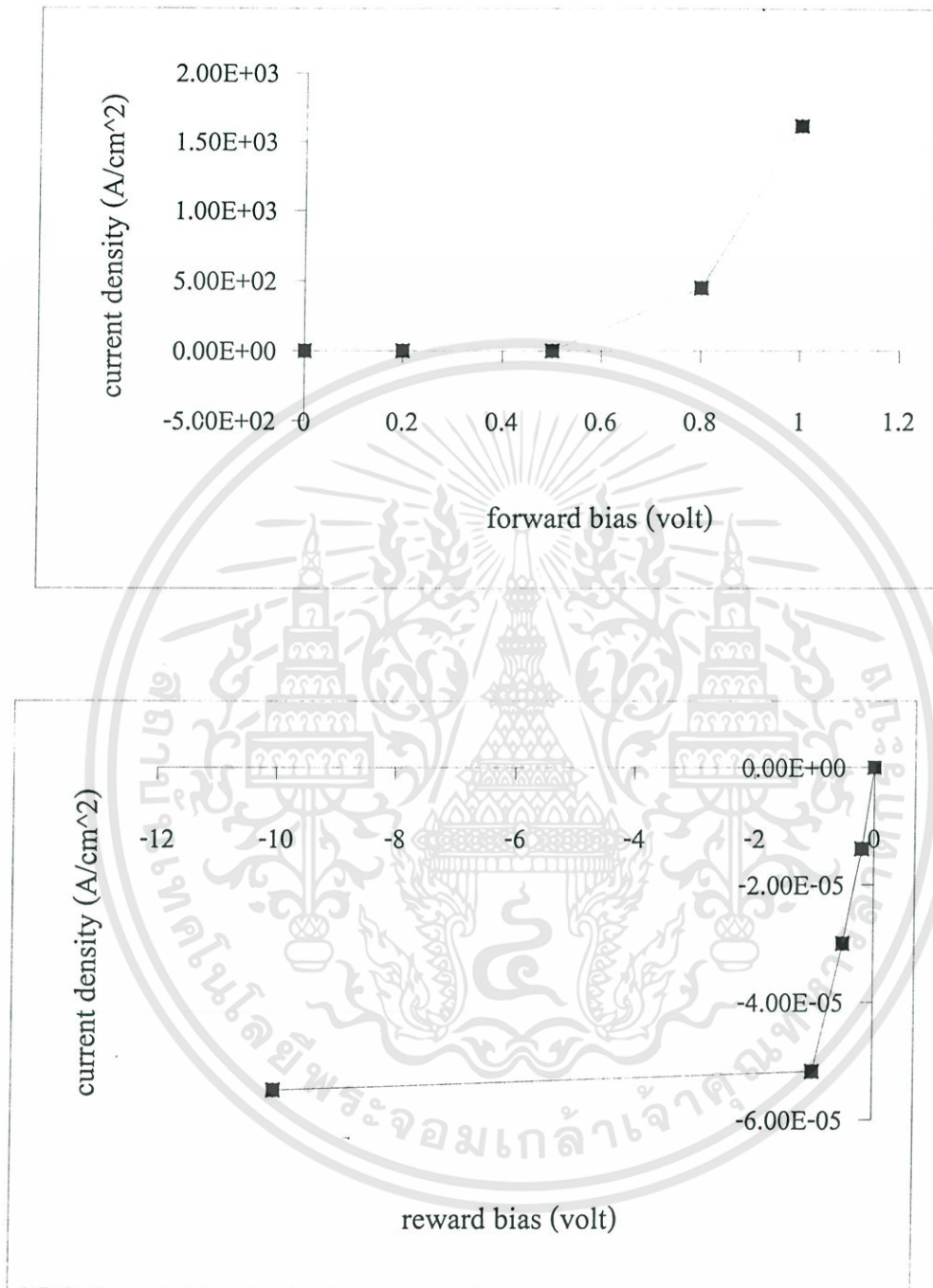


รูปที่ 5.41 ผลการเกิดของประจุ ขณะให้แรงดัน -0.2 โวลต์



รูปที่ 5.42 ผลของสนามไฟฟ้า ขณะให้แรงดัน -0.2 โวลต์

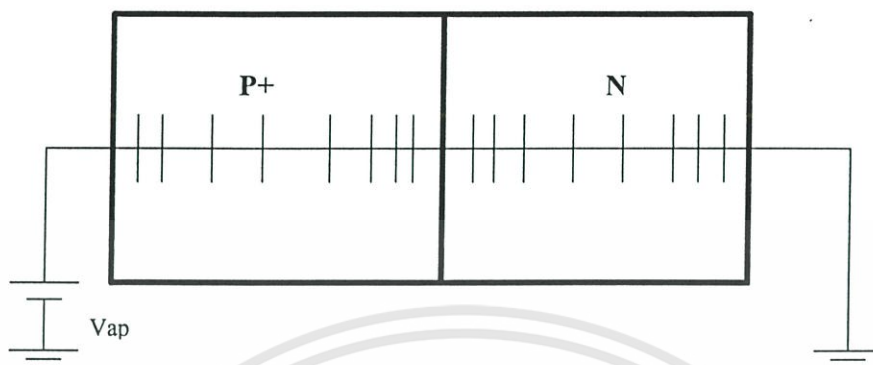
จากผลการทดลองขณะให้แรงดันไบอัสกลับ -0.2 โวลต์ ที่รอยต่อจะมีการเกิดของประจุเกิดขึ้น และมีค่าสูงสุดที่รอยต่อซึ่งมีค่าเท่ากับ $-8.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$ และสนามไฟฟ้าจะเกิดขึ้นที่บริเวณเขตปลอดพาหะและมีค่าสูงสุดเท่ากับ $-2.48 \times 10^4 \text{ V/cm}$



รูปที่ 5.43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสกับแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6.3 การทดลองการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าหนึ่งมิติ ระยะห่างระหว่าง mesh ต่างกัน และความเข้มข้นของสารเจือชนิดพีและเอ็นต่างกัน



รูปที่ 5.44 การจำลองโครงสร้างของรอยต่อพีเอ็นหนึ่งมิติ โดยระยะห่างระหว่าง mesh ต่างกัน และความเข้มข้นของสารเจือต่างกัน

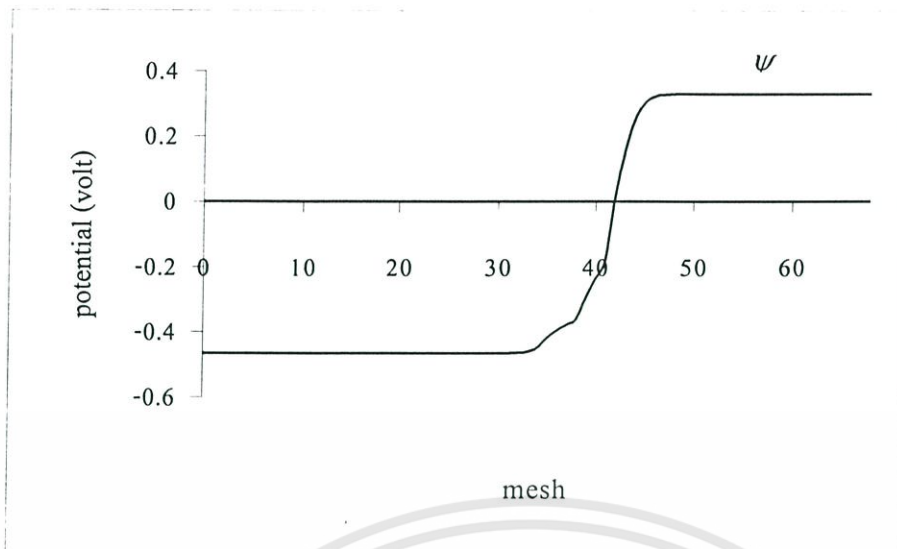
โดยทำการแบ่งชิ้นสารกึ่งตัวนำออกเป็นช่วงย่อย ๆ ซึ่งเรียกว่า mesh ดังรูปที่ 5.44 โดยกำหนดดังนี้ $h(0) \text{ to } h(3) = 20 \text{ nm}$, $h(4) \text{ to } h(26) = 80 \text{ nm}$, $h(27) \text{ to } h(29) = 20 \text{ nm}$, $h(30) \text{ to } h(37) = 5 \text{ nm}$, $h(38) \text{ to } h(40) = 20 \text{ nm}$, $h(41) \text{ to } h(63) = 80 \text{ nm}$ และ $h(64) \text{ to } h(67) = 20 \text{ nm}$, $length = 4 \mu\text{m}$

ในการทดลองนี้ได้กำหนดคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำซิลิคอนไว้ดังนี้

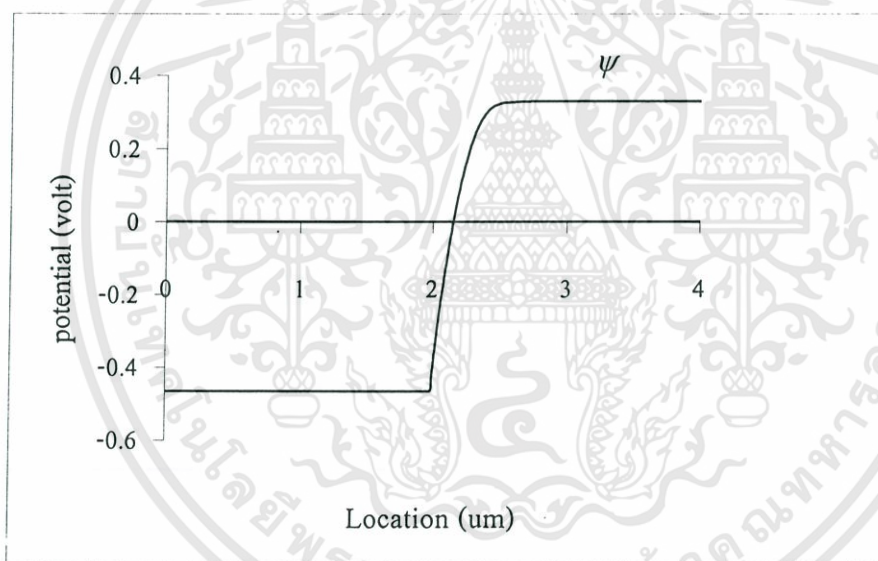
$$T = 300\text{K}, N_d = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}, N_a = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}, E_g = 1.12 \text{ eV}, D_{np} = 20 \text{ cm}^2 / \text{sec},$$

$$D_{pp} = 5 \text{ cm}^2 / \text{sec}, D_{pn} = 9 \text{ cm}^2 / \text{sec}, D_{nn} = 30 \text{ cm}^2 / \text{sec}, \tau_{np} = 1 \times 10^{-6} \text{ sec},$$

$$\tau_{pn} = 2 \times 10^{-6} \text{ sec}, n_i = 1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$



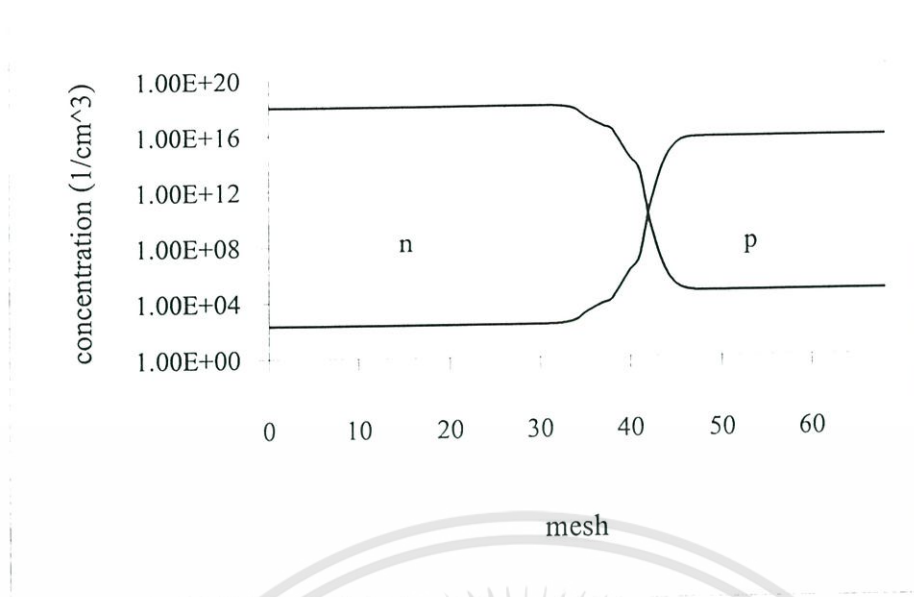
รูปที่ 5.45 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตโดยตำแหน่ง mesh ขณะได้แรงดัน 0 โวลต์



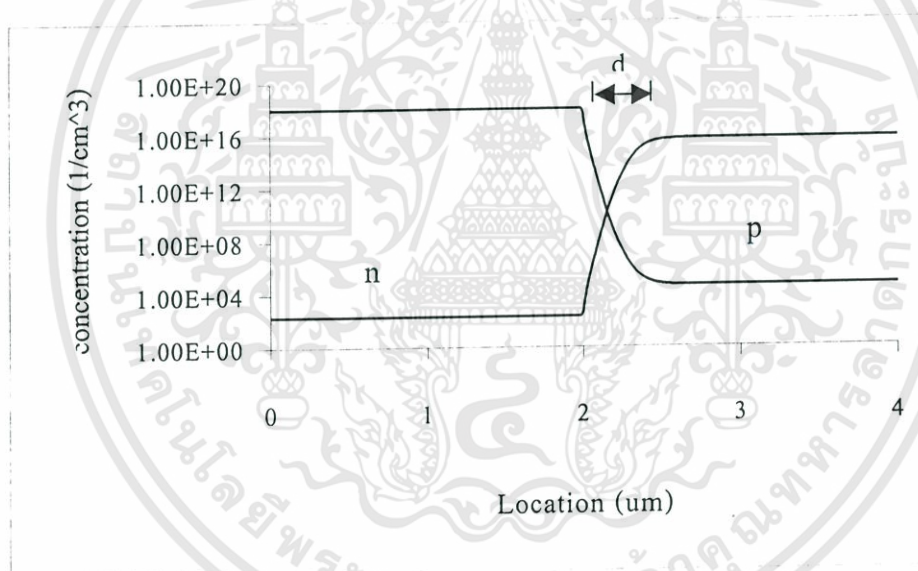
รูปที่ 5.46 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตโดยตำแหน่งจริงขณะให้แรงดัน 0 โวลต์

จากผลการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพีเอ็นในลักษณะหนึ่งมิติ ขณะไม่ให้แรงดันไบอัส และความเข้มข้นของสารเจือชนิดพีและเอ็นต่างกัน โดยที่ผลต่างของศักย์ไฟฟ้าสถิตมีค่า 0.8 โวลต์ และศักย์ไฟฟ้าสถิตจะมีค่า 0 โวลต์ ที่ไม่ใช่รอยต่อพีเอ็น แต่จะเล็ดลอดเข้าไปในเนื้อสารชนิดเอ็น เนื่องจากมีความเข้มข้นของสารเจือต่ำกว่า โดยศักย์ไฟฟ้าสถิตมีค่า 0 โวลต์ ที่ตำแหน่ง 2.12 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

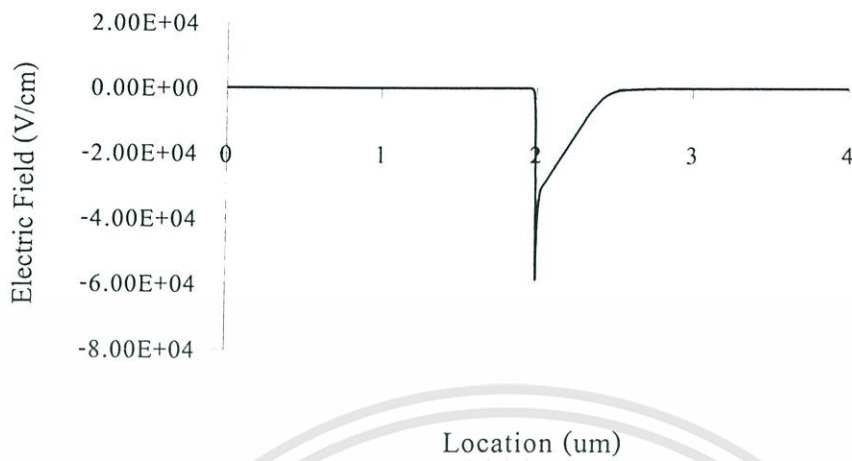


รูปที่ 5.47 ผลความหนาแน่นของพาหะ โดยตำแหน่ง mesh ขณะให้แรงดัน 0 โวลต์

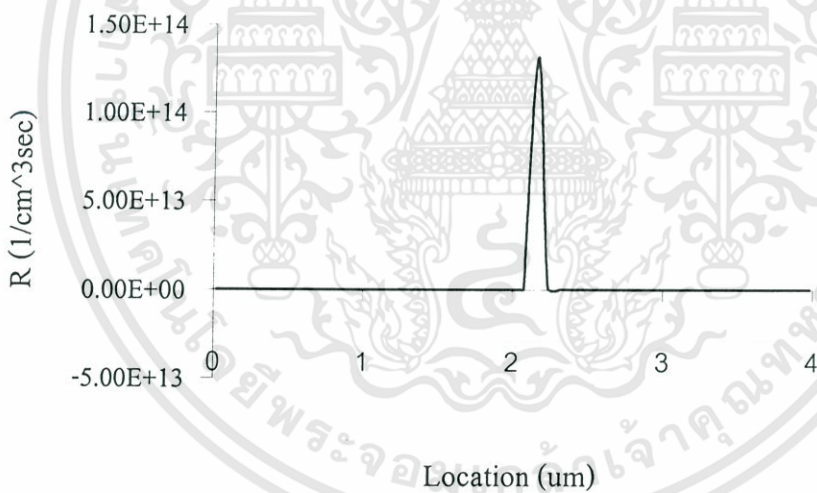


รูปที่ 5.48 ผลความหนาแน่นของพาหะ โดยตำแหน่งจริง ขณะให้แรงดัน 0 โวลต์

จะทำให้ทราบค่าการกระจายความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลที่ตำแหน่งต่าง ๆ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลเท่ากันที่ค่า 10^{10} cm^{-3} และตำแหน่งที่ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลเท่ากัน ไม่ได้อยู่ที่รอยต่อพีเอ็นแต่เลื่อนเข้ามาในชั้นสารชนิดเอ็นที่ตำแหน่ง $2.12 \mu\text{m}$ และบริเวณเขตปลอดพาหะมีความกว้าง $0.46 \mu\text{m}$



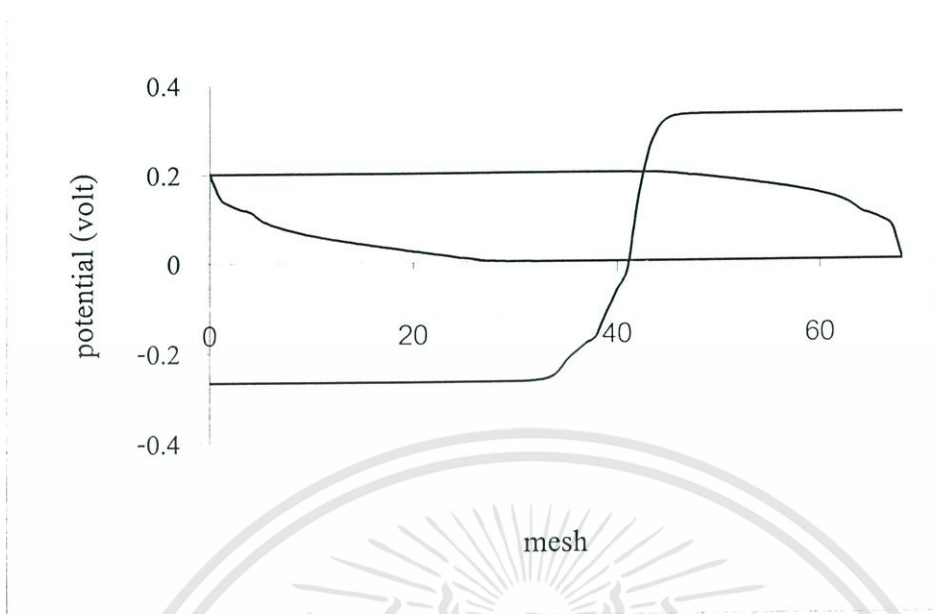
รูปที่ 5.49 ผลการเกิดและการรวมตัวของประจุขณะให้แรงดัน 0 โวลต์



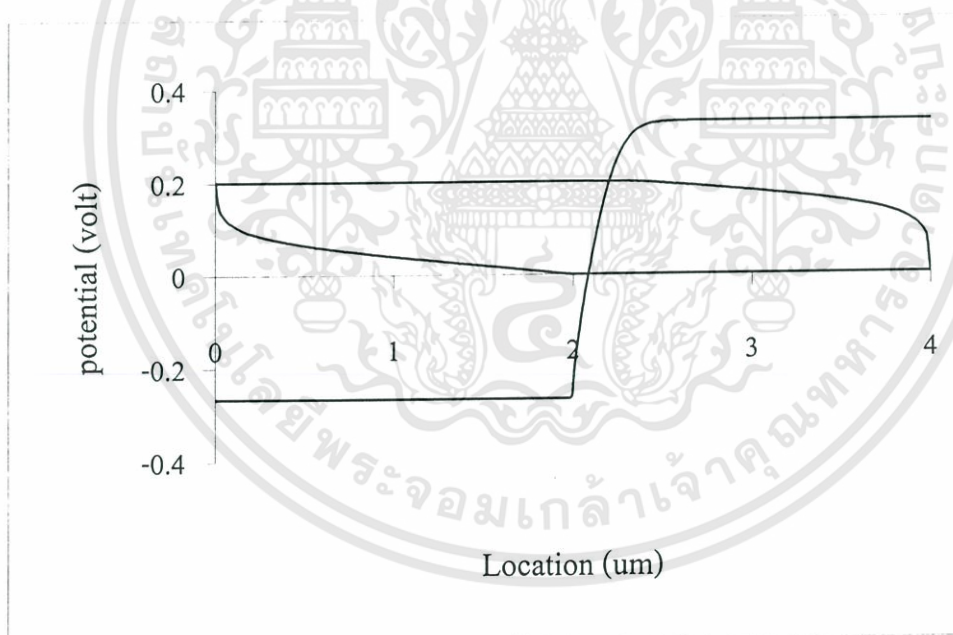
รูปที่ 5.50 ผลของสนามไฟฟ้าขณะให้แรงดัน 0 โวลต์

จากผลการทดลองขณะให้แรงดันไบอัสจะสังเกตว่า บริเวณในชั้นสารเอ็นจะมีการรวมตัวของประจุที่บริเวณเขตปลอดพาหะ และมีค่าสูงสุดเท่ากับ $1.3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$ และสนามไฟฟ้าจะเกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อแต่ละจะเลื่อมเข้าไปในเนื้อสารเอ็นเนื่องจากมีค่าความเข้มข้นของสารเจือต่ำกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



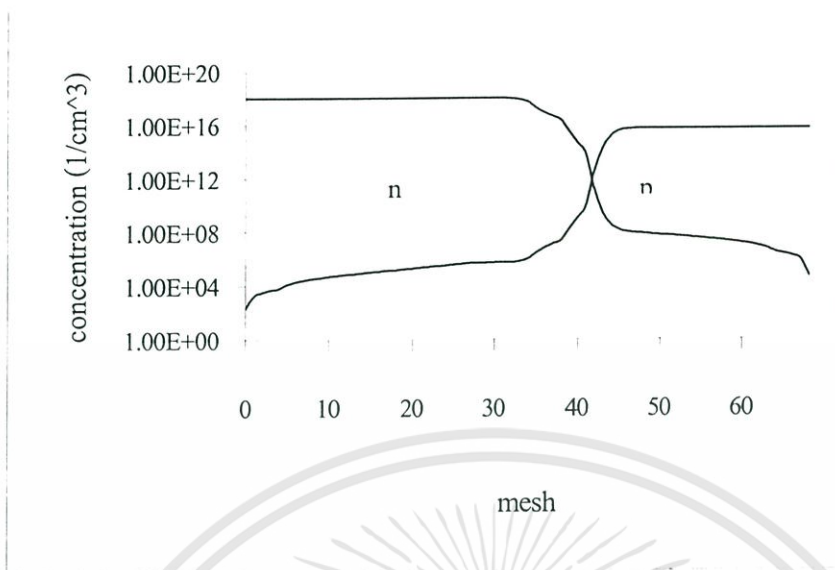
รูปที่ 5.51 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตโดยตำแหน่ง mesh ขณะให้แรงดัน 0.2 โวลต์



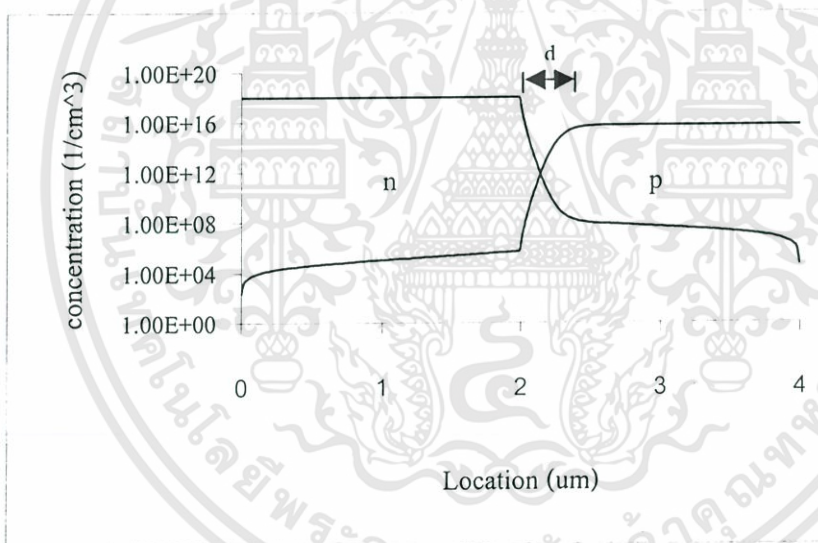
รูปที่ 5.52 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตโดยตำแหน่งจริงขณะให้แรงดัน 0.2 โวลต์

จากผลการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพีเอ็น ในลักษณะหนึ่งมิติ ขณะให้แรงดันไบอัสตรงเท่ากับ 0.2 โวลต์ และความเข้มข้นของสารเจือชนิดพีและเอ็นต่างกัน จะทำให้ผลต่างของศักย์ไฟฟ้าสถิตมีค่า 0.596 โวลต์ ซึ่งมีค่าลดลงเนื่องจากได้รับแรงดันไบอัสตรงจากภายนอก และศักย์ไฟฟ้าสถิตจะมีค่า 0 โวลต์ที่ตำแหน่ง $2.1\mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

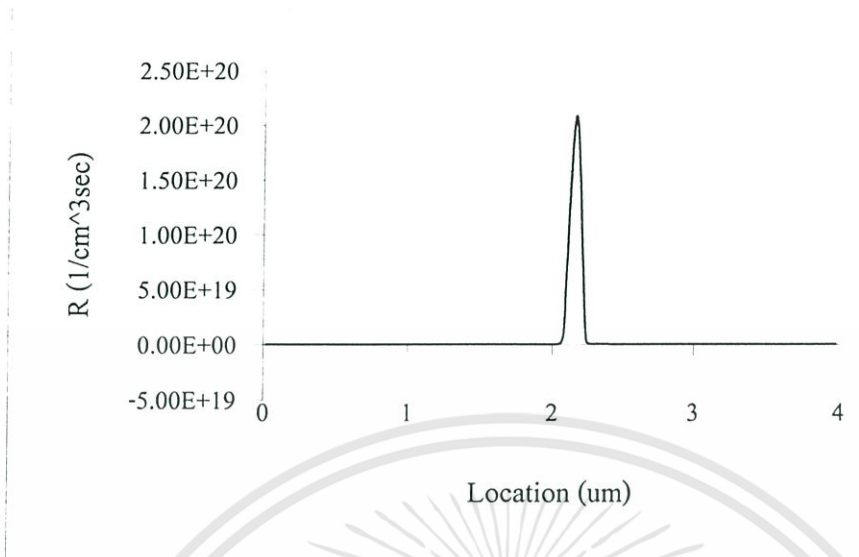


รูปที่ 5.53 ผลความหนาแน่นของพาหะ โดยตำแหน่ง mesh ขณะให้แรงดัน 0.2 โวลต์

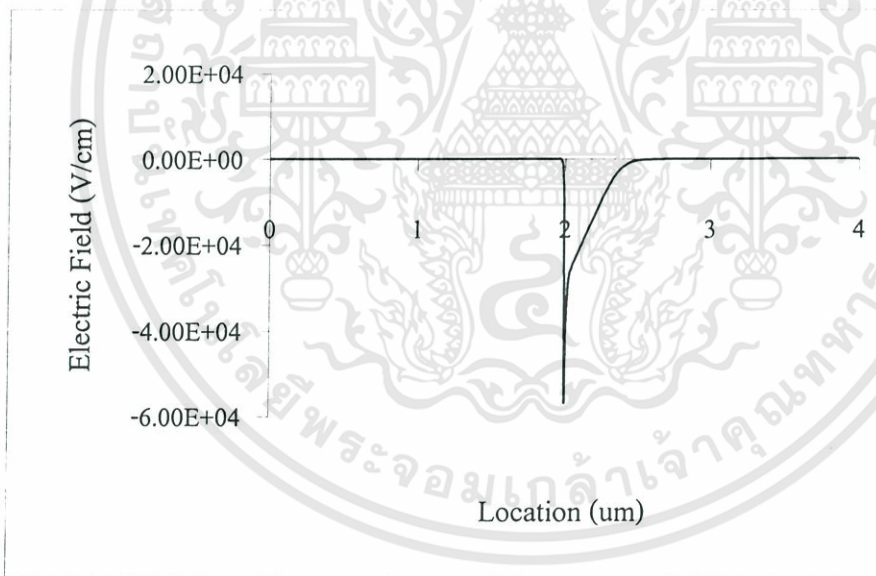


รูปที่ 5.54 ผลความหนาแน่นของพาหะ โดยตำแหน่งจริงขณะให้แรงดัน 0.2 โวลต์

จากรูปที่ 5.54 เมื่อชิ้นงานได้รับแรงดันไบอัสตรงจะทำให้อิเล็กตรอนและโฮลข้ามรอยต่อได้มากขึ้นและความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลเท่ากันที่ $2 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ที่ตำแหน่ง $2.14 \mu\text{m}$ และความกว้างของบริเวณปลอดพาหะเท่ากับ $0.48 \mu\text{m}$



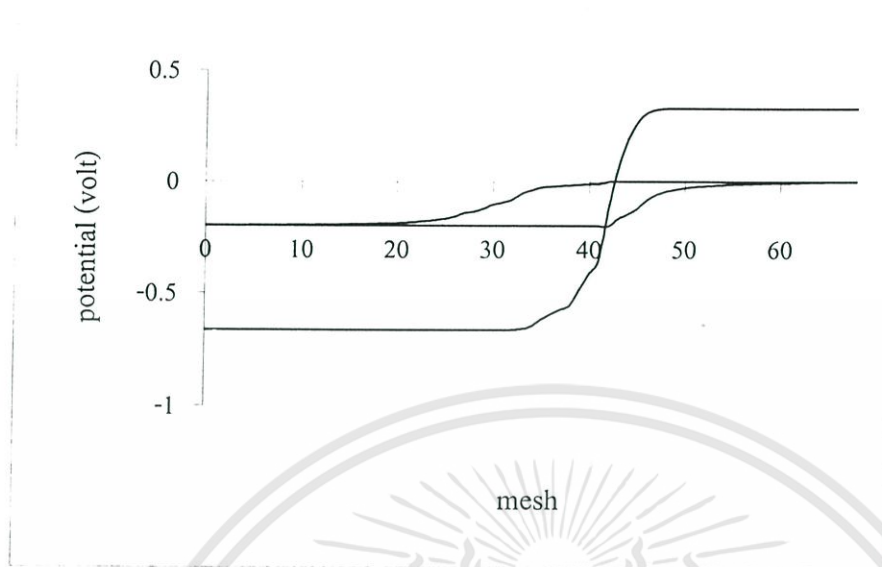
รูปที่ 5.55 ผลของการรวมตัวของประจุขณะให้แรงดัน 0.2 โวลต์



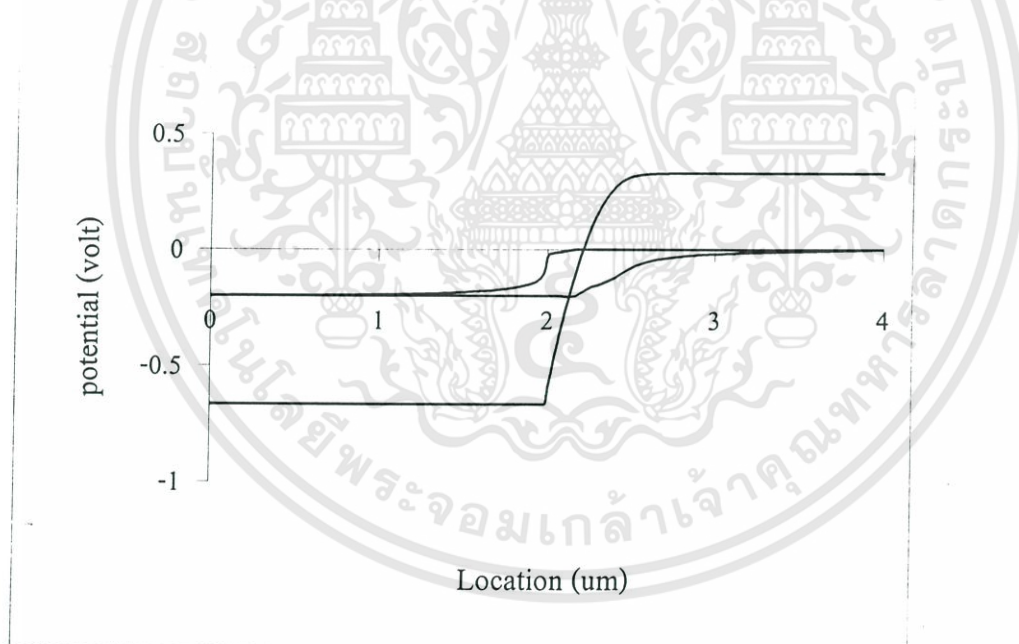
รูปที่ 5.56 ผลของสนามไฟฟ้าขณะให้แรงดัน 0.2 โวลต์

จากผลการทดลองขณะให้แรงดันไปอัสตรง 0.2 โวลต์ ที่รอยต่อจะเกิดการรวมตัวของประจุในบริเวณเนื้อสารเอ็นเนื่องจากมีความเข้มข้นของสารเจือปนน้อยกว่า และสนามไฟฟ้าส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นบริเวณเนื้อสารเอ็นและสนามไฟฟ้าสูงสุดมีค่าเท่ากับ $-5.63 \times 10^4 \text{ V/cm}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



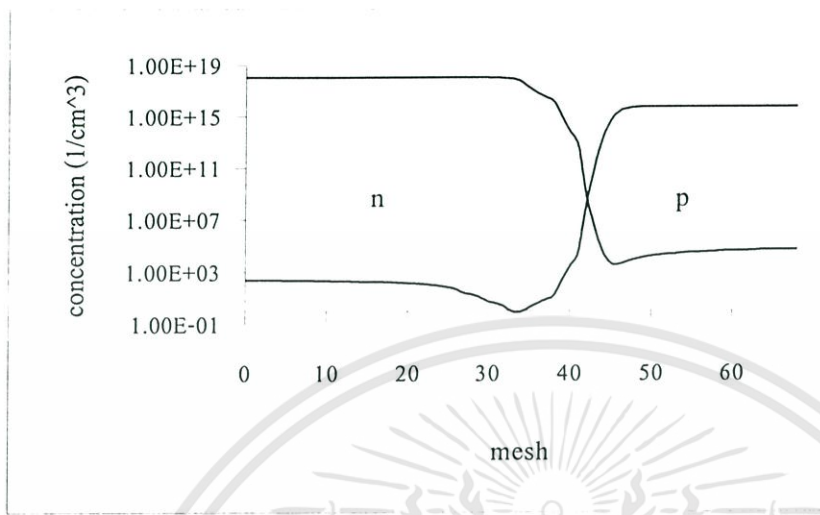
รูปที่ 5.57 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตโดยตำแหน่งของ mesh ขณะให้แรงดัน -0.2 โวลต์



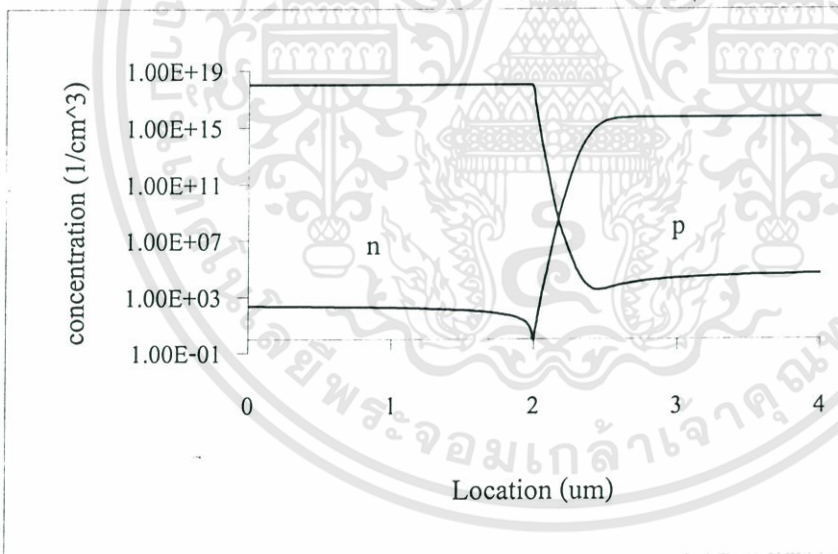
รูปที่ 5.58 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตโดยตำแหน่งจริง ขณะให้แรงดัน -0.2 โวลต์

จากผลการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพีเอ็นในลักษณะหนึ่งมิติ ขณะให้แรงดันไบอัสเท่ากับ -0.2 โวลต์ และความเข้มข้นของสารเจือชนิดพีและเอ็นต่างกัน จะทำให้ผลต่างของ

ศักย์ไฟฟ้าสถิตมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1 โวลต์ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากได้รับแรงดันไบอัสกลับจากภายนอก และศักย์ไฟฟ้าสถิตมีค่า 0 โวลต์ ที่ตำแหน่ง $2.2 \mu\text{m}$

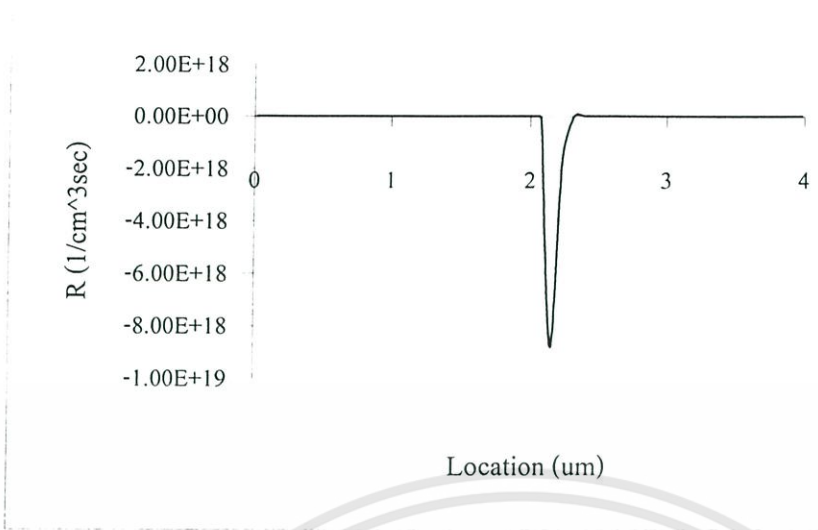


รูปที่ 5.59 ผลความหนาแน่นของพาหะ โดยตำแหน่ง mesh ขณะให้แรงดัน -0.2 โวลต์

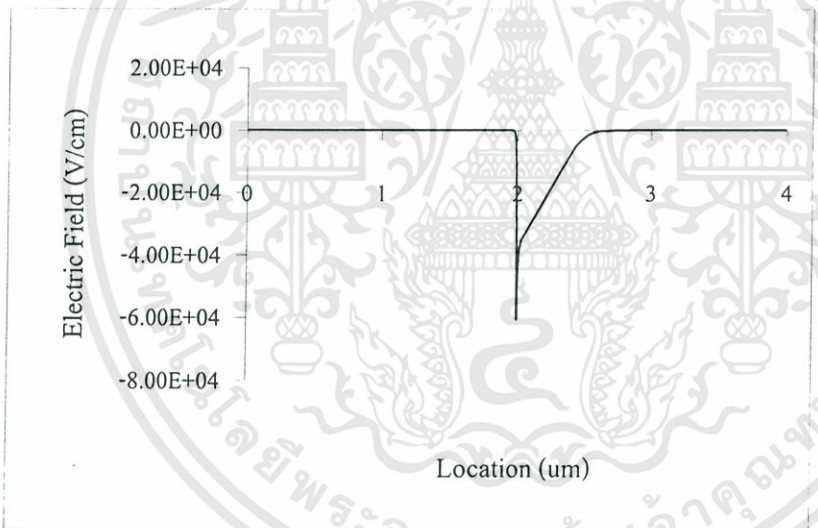


รูปที่ 5.60 ผลความหนาแน่นของพาหะ โดยตำแหน่งจริง ขณะให้แรงดัน -0.2 โวลต์

จากรูปที่ 5.60 แสดงให้เห็นถึงการกระจายความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลที่ตำแหน่ง
 ชั้นต่าง ๆ บนชั้นสารกึ่งตัวนำในลักษณะหนึ่งมิติ ซึ่งบริเวณปลอดพาหะมีความกว้างถึง $0.57 \mu\text{m}$
 และบริเวณเขตปลอดพาหะส่วนมากจะอยู่ในชั้นสารเอ็น

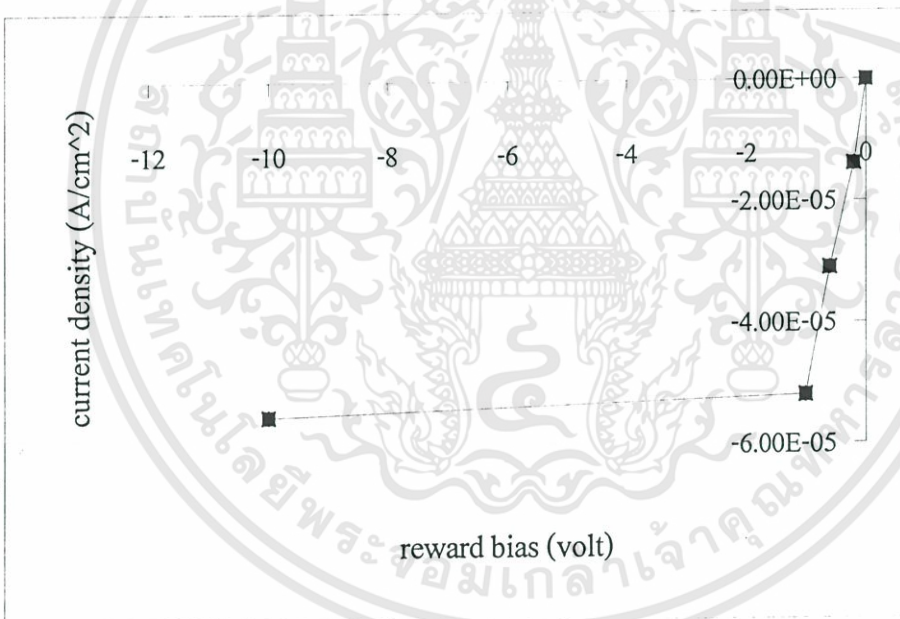
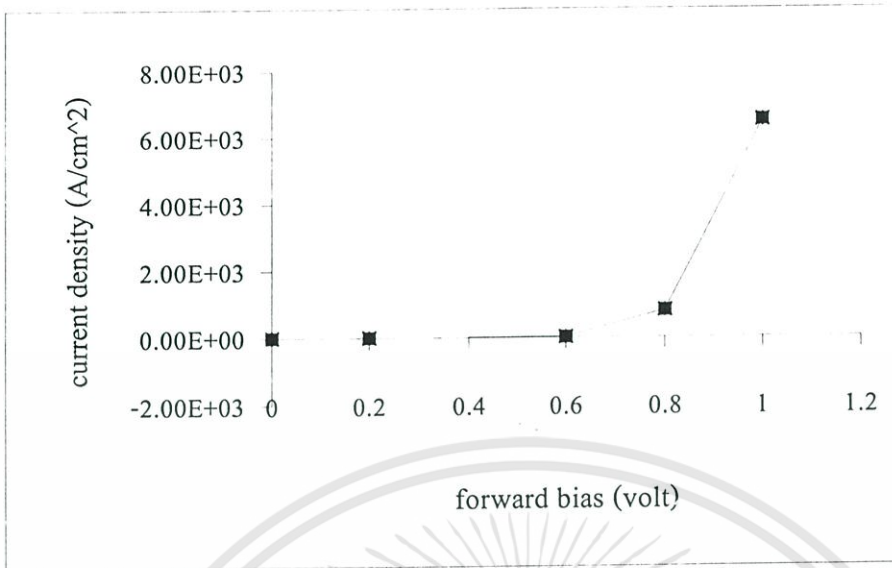


รูปที่ 5.61 ผลการเกิดของประจุขณะให้แรงดัน -0.2 โวลต์



รูปที่ 5.62 ผลของสนามไฟฟ้าขณะให้แรงดัน -0.2 โวลต์

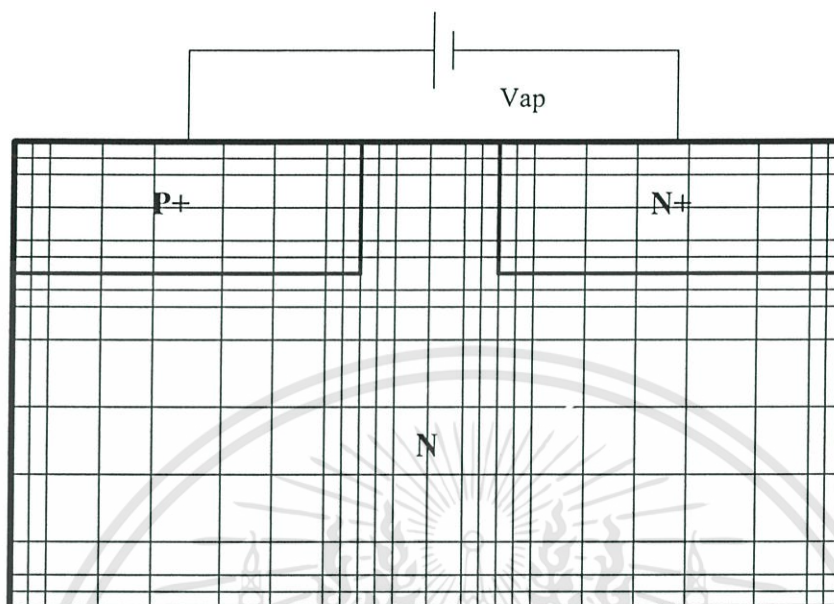
จากผลการทดลองขณะให้แรงดันไบอัส -0.2 โวลต์ ที่รอยต่อจะเกิดการกำเนิดของประจุในบริเวณเนื้อสารเอ็น และมีค่าสูงสุดเท่ากับ $-8.79 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$ และสนามไฟฟ้าส่วนใหญ่จะอยู่ในชั้นสารเอ็นและมีค่าสูงสุดเท่ากับ $-5.98 \times 10^4 \text{ V/cm}$



รูปที่ 5.63 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสกับแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6.4 การทดลองการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าสองมิติ และระยะห่างระหว่าง mesh ต่างกัน



รูปที่ 5.64 การจำลองโครงสร้างของรอยต่อพีเอ็น สองมิติโดยระยะห่างระหว่าง mesh ต่างกันและความเข้มข้นของสารเจือต่างกัน

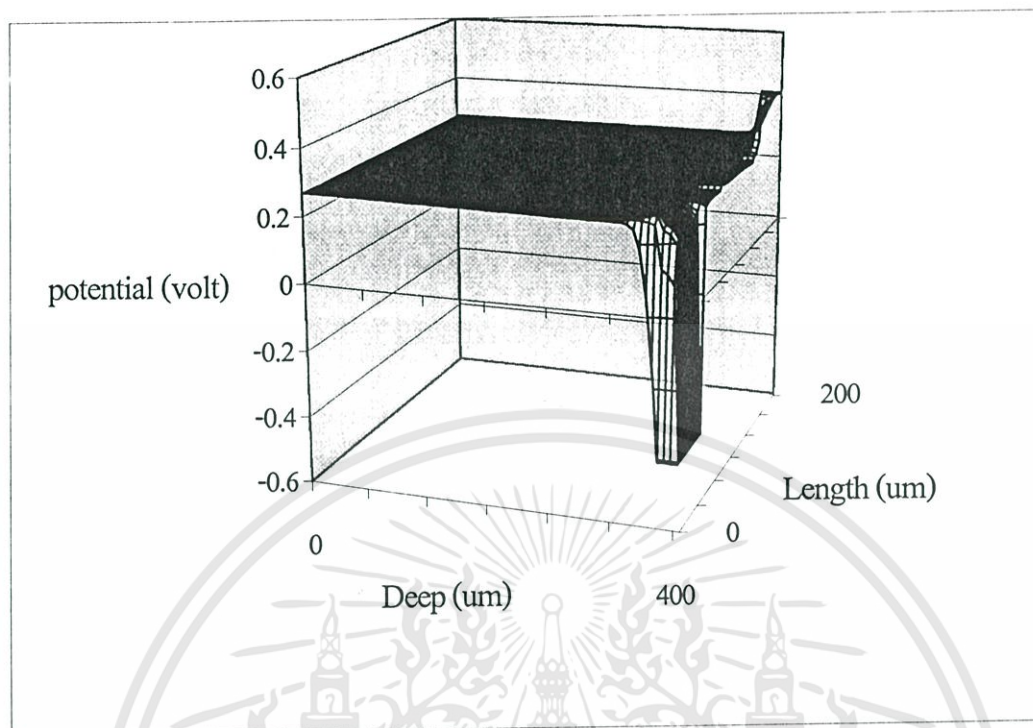
โดยทำการแบ่งชิ้นสารกึ่งตัวนำออกเป็นส่วนย่อย ๆ ซึ่งเรียกว่า mesh ดังรูปที่ 5.64 โดยกำหนดระยะห่างระหว่าง mesh ดังนี้

$$\begin{aligned}
 h(0) \text{ to } h(3) &= 1.25 \mu\text{m}, h(4) = 5 \mu\text{m}, h(5) \text{ to } h(11) = 10 \mu\text{m}, h(12) = 5 \mu\text{m}, \\
 h(13) &= 2.5 \mu\text{m}, h(14) \text{ to } h(37) = 0.3125 \mu\text{m}, h(38) \text{ to } h(39) = 5 \mu\text{m}, \\
 h(40) \text{ to } h(47) &= 1.25 \mu\text{m}, h(48) = 5 \mu\text{m}, h(49) \text{ to } h(55) = 10 \mu\text{m}, h(56) = 5 \mu\text{m}, \\
 h(57) \text{ to } h(60) &= 1.25 \mu\text{m}, k(0) \text{ to } k(3) = 1.25 \mu\text{m}, k(4) = 5 \mu\text{m}, \\
 k(5) \text{ to } k(42) &= 10 \mu\text{m}, k(43) = 5 \mu\text{m}, k(44) \text{ to } k(60) = 0.3125 \mu\text{m} \\
 \text{length} &= 200 \mu\text{m}, \text{depth} = 400 \mu\text{m}
 \end{aligned}$$

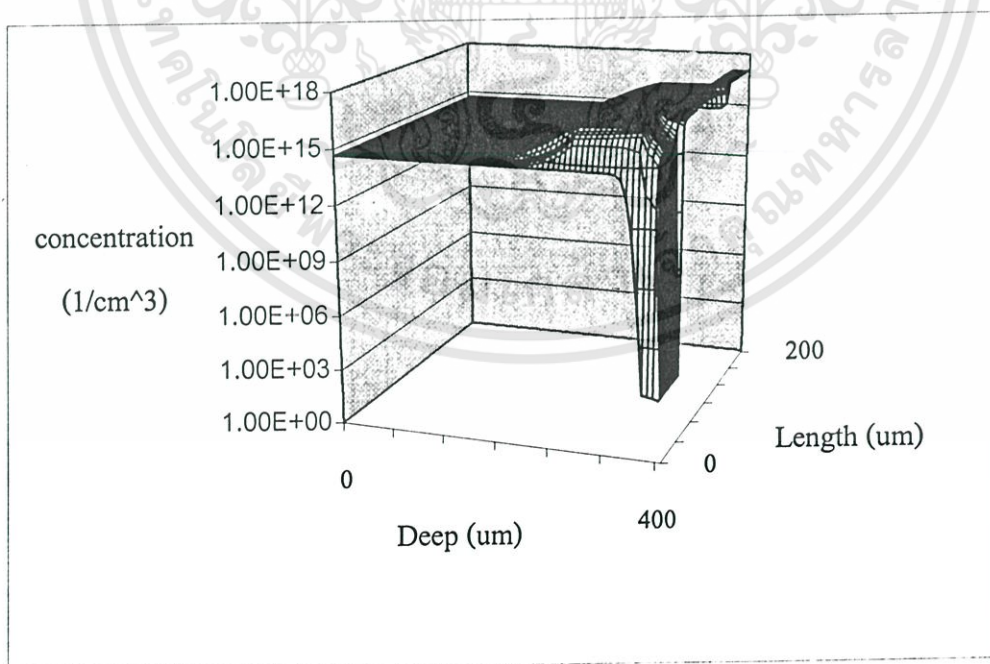
โดยในการทดลองนี้ได้กำหนดคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำซิลิคอนไว้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 T &= 300\text{K}, N_{d+} = 10^{17} \text{ cm}^{-3}, N_d = 5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}, N_{a+} = 10^{17} \text{ cm}^{-3} \\
 D_{nn+} &= 20 \text{ cm}^2/\text{sec}, D_{pn+} = 9 \text{ cm}^2/\text{sec}, D_{np+} = 20 \text{ cm}^2/\text{sec}, D_{pp+} = 9 \text{ cm}^2/\text{sec} \\
 \tau_{pn+} &= 8 \times 10^{-7} \text{ sec}, \tau_{np+} = 1.05 \times 10^{-7} \text{ sec}, \tau_{pn} = 1.05 \times 10^{-5} \text{ sec} \\
 S_n &= 0.1 \text{ cm}/\text{sec}, S_p = 0.1 \text{ cm}/\text{sec}, Q_{\text{int}} = 1.6 \times 10^{19} \text{ coul}/\text{cm}^2
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

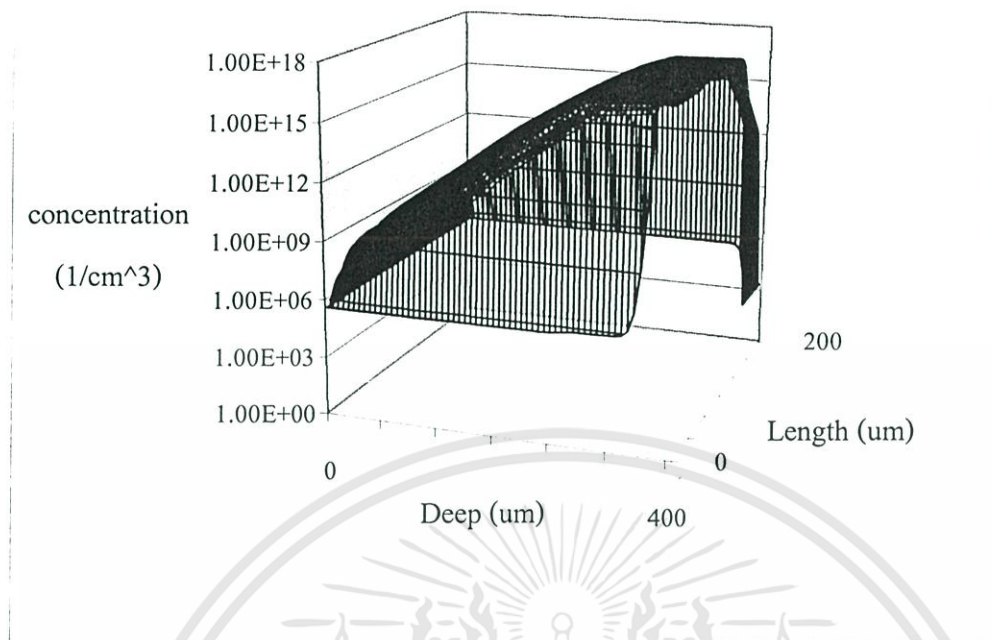


รูปที่ 5.65 ผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตในลักษณะ 2 มิติ ขณะให้แรงดัน 0 โวลต์



รูปที่ 5.66 ผลของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในลักษณะ 2 มิติ ขณะให้แรงดัน 0 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.67 ผลของความหนาแน่นของโฮลในลักษณะ 2 มิติขณะให้แรงดัน 0 โวลต์

ในการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพีเอ็นในลักษณะสองมิติดังรูปที่ 5.64 จะกำหนดให้ชิ้นงานมีความยาว $200 \mu\text{m}$ และมีความลึก $400 \mu\text{m}$ และระยะการแพร่สารเจือของ $P +$ และ $N +$ นั้นเท่ากับ $1 \mu\text{m}$ จากผลการทดลองหาค่าศักย์ไฟฟ้าสถิตที่ตำแหน่งต่างบนชิ้นสารกึ่งตัวนำ จะได้ดังรูปที่ 5.65 ผลต่างของศักย์ไฟฟ้าสถิตระหว่างชิ้นสาร $P +$ กับ $N +$ ในทางด้านความลึกจะมีค่าเท่ากับ 0.677 โวลต์และผลต่างของศักย์ไฟฟ้าสถิตระหว่างชิ้นสาร $P +$ กับ $N +$ ในทางด้านความยาวจะมีค่าเท่ากับ 0.81 โวลต์และในส่วนของศักย์ไฟฟ้าสถิตที่ตำแหน่ง ๆ บนชิ้นสารกึ่งตัวนำเราสามารถหาค่าได้ซึ่งในโปรแกรมจะมีการจำลองตลอดทั้งชิ้นงาน จากรูปที่ 5.66 เป็นการแสดงผลของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในลักษณะสองมิติขณะไม่ได้ให้แรงดันจะเห็นได้ว่าที่ฐานรองจะมีค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเท่ากับ $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ และบริเวณในส่วนของชิ้นสาร $P +$ จะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเท่ากับ $2.1 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ จากรูปที่ 5.66 สามารถที่จะหาค่าของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ตำแหน่งต่าง ๆ และเห็นถึงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในชิ้นสารกึ่งตัวนำ จากรูปที่ 5.67 เป็นการแสดงผลของความหนาแน่นของโฮลในลักษณะสองมิติขณะไม่ได้ให้แรงดันจะเห็นได้ว่าความหนาแน่นของโฮลมีการลดลงในบริเวณของฐานรองและบริเวณ $N +$ จะมีความหนาแน่นของโฮลเท่ากับ $2.1 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$

บทที่ 6

บทสรุปและวิจารณ์

6.1 บทสรุปและวิจารณ์

ในการนำเสนอหลักการและวิธีการหาความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลและศักย์ไฟฟ้าสถิตในชั้นสารกึ่งตัวนำทั้งในลักษณะหนึ่งมิติและสองมิติ ที่ได้เสนอขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ได้ทำการวิจัยโดยการจำลองโดยวิธีผลต่างสลับเนื่อง ซึ่งจะทำให้เห็นถึงปรากฏการณ์ของรอยต่อพีเอ็นยิ่งขึ้น ทั้งในลักษณะการเปลี่ยนแปลงแรงดัน ความเข้มข้นของสารเจือ และลักษณะของชั้นงาน ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งการจำลองดังนี้

1. การจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าในลักษณะหนึ่งมิติโดยกำหนดระยะห่างระหว่าง mesh เท่ากันคือ 80nm และความยาวชั้นงาน $4\mu m$ $N_d = N_a = 5 \times 10^{15} cm^{-3}$ จะเห็นว่าในขณะไม่ได้ป้อนแรงดันไบอัสจะมีค่าของศักย์ไฟฟ้าสถิตเท่ากับ 0.66 โวลต์ และบริเวณเขตปลอดพาหะมีบริเวณกว้าง $0.7\mu m$ สนามไฟฟ้าสูงสุดมีค่า $-2.1 \times 10^4 V/cm$ และเกิดการเกิดของประจุในบริเวณเขตปลอดพาหะซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ $-2.4 \times 10^{11} cm^{-3} sec^{-1}$

2. การจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าในลักษณะหนึ่งมิติโดยกำหนดระยะห่างระหว่าง mesh ไม่เท่ากันเพื่อจะดูการเปลี่ยนแปลงในบริเวณเขตปลอดพาหะได้ดียิ่งขึ้น และความยาวชั้นงาน $4\mu m$ $N_d = N_a = 5 \times 10^{15} cm^{-3}$ จะเห็นว่าในขณะไม่ได้ป้อนแรงดันไบอัสจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าสถิตเท่ากับ 0.66 โวลต์ และบริเวณเขตปลอดพาหะมีความกว้าง $0.7\mu m$ สนามไฟฟ้าสูงสุดมีค่า $-2.1 \times 10^4 V/cm$ และเกิดการเกิดของประจุในบริเวณเขตปลอดพาหะซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ $-2.4 \times 10^{11} cm^{-3} sec^{-1}$ จะเห็นได้ว่าผลการทดลองที่แล้วกับผลการทดลองนี้จะมีผลการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เหมือนกัน เนื่องจากได้กำหนดคุณสมบัติทางไฟฟ้าเหมือนกันแต่ในผลการทดลองนี้จะมีรายละเอียดของผลการทดลองที่ชัดเจนกว่าเนื่องจากได้กำหนดความกว้างระหว่างที่ละเอียดยิ่งขึ้น

3. การจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าในลักษณะหนึ่งมิติโดยกำหนดระยะห่างระหว่าง mesh ไม่เท่ากันและความเข้มข้นของสารเจือต่างกันคือ $N_d = 10^{18} cm^{-3}$ $N_a = 5 \times 10^{15} cm^{-3}$ และชั้นงานยาว $4\mu m$ จะเห็นได้ว่าในขณะไม่ได้ป้อนแรงดันไบอัสจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าสถิตเท่ากับ 0.8 โวลต์ และบริเวณเขตปลอดพาหะมีความกว้าง $0.46\mu m$ สนามไฟฟ้าสูงสุดมีค่า $-3.476 \times 10^4 V/cm$ และเกิดการเกิดของประจุในบริเวณเขตปลอดพาหะซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ $1.3 \times 10^{14} cm^{-3} sec^{-1}$

4. การจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพีเอ็นในลักษณะสองมิติโดยกำหนดระยะห่างระหว่าง mesh ไม่เท่ากัน และความเข้มข้นของสารเจือต่างกันโดยชั้นงานมีขนาดยาว $200\mu m$ และมีความลึกของชั้นงานเท่ากับ $400\mu m$ ความเข้มข้นของสารเจือในบริเวณฐานรองมีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ และความเข้มข้นของสารเจือในบริเวณ P+มีค่าเท่ากับ 10^{17} cm^{-3} และความเข้มข้นของสารเจือในบริเวณ N+ มีค่าเท่ากับ 10^{17} cm^{-3} ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไบอัสให้กับชั้นสารกึ่งตัวนำทั้งในลักษณะแรงดันไบอัสตรงและไบอัสกลับให้กับชั้นสารกึ่งตัวนำเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพาหะ ศักย์ไฟฟ้าสถิต สนามไฟฟ้า การเกิดหรือการรวมตัวของประจุในบริเวณเขตปลอดพาหะ ซึ่งวิธีของผลต่างสี่ขั้วจะเห็นการเปลี่ยนแปลงพาหะในบริเวณเขตปลอดพาหะได้อย่างชัดเจน ดังนั้นจึงเป็นเหตุจูงใจที่จะได้พัฒนาการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้ากับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ

6.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยและการพัฒนาต่อ

การจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพีเอ็นทั้งหนึ่งมิติและสองมิติโดยวิธีผลต่างสี่ขั้ว เป็นงานจำลองที่มีประโยชน์อย่างมาก เนื่องจากในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนมากจะเป็นรอยต่อพีเอ็น ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ได้ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้จำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยวิธีผลต่างสี่ขั้ว โดยเขียนโปรแกรมต่าง ๆ เป็นแบบโปรแกรมวิชวลเบสิก ซึ่งมีข้อดีคือง่ายต่อการเข้าใจและนำไปใช้ และที่สำคัญคือสะดวกต่อการแสดงผล แต่มีข้อเสียคือเมื่อเป็นการจำลองในลักษณะที่มีจำนวน mesh มาก ๆ จะใช้เวลาในประมวลผลนาน

บรรณานุกรม

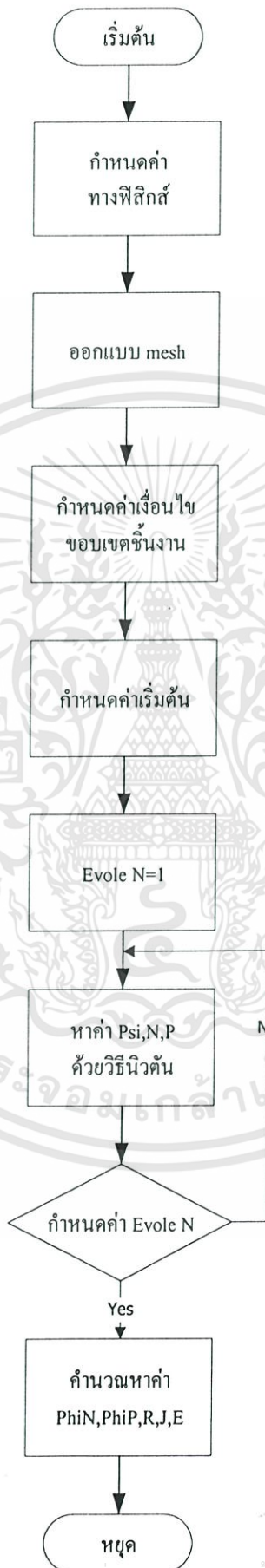
- [1] Sze,S.M. **Physics of Semiconductor Devices**. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons. 1981.
- [2] สมเกียรติ สุภเดช. **สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ**. คณะวิศวกรรมศาสตร์,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] S. Selberherr. **Analysis and Simulation of Semiconductor Device**. Springer-Verlag Wein New York. 1984
- [4] C.M. Snoden. **Semiconductor Device Modelling**. Peter Peregrinus Ltd. London.1988
- [5] C. Kincaid and W. Cheney. **Numerical Analysis**. 2nd ed. Brooks Publishing Company. 1996
- [6] F. Gerald and O. Wheatley. **Applied Numerical Analysis**. 6th ed.Addison-Wesley. 1999





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยการเขียนโปรแกรมวิซัวร์เบสิกนั้นจะเริ่มจากการกำหนดคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่าง ๆ ซึ่งจะสามารถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติได้ตามต้องการเพื่อศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงเช่นแรงดัน ความเข้มข้นของสารเจือ อุณหภูมิ สัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอนหรือโฮล เป็นต้น จากนั้นจะต้องทำการออกแบบ mesh ให้กับชิ้นสารกึ่งตัวนำว่ามีความต้องการให้ชิ้นงานที่กำหนดมีขนาดเท่าไรและมีความกว้างระหว่าง mesh เป็นอย่างไร ซึ่งผู้ออกแบบสามารถกำหนดคณภูณณ์ต่าง ๆ ได้ จากนั้นเมื่อกำหนด mesh เสร็จแล้ว ก็จะทำงานกำหนดค่าของศักย์ไฟฟ้าสถิต ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน และความหนาแน่นของโฮลบริเวณขอบของชิ้นงานถ้าเป็นชิ้นงานในลักษณะหนึ่งมิติก็จะมีขอบของชิ้นงานสองด้าน ส่วนในชิ้นงานลักษณะสองมิติก็จะมีขอบเขตของชิ้นงานสี่ด้านซึ่งจะต้องกำหนดให้ครบก่อน จากนั้นจะเป็นกำหนดค่าเริ่มต้นก็คือการกำหนดค่าของศักย์ไฟฟ้าสถิต ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ความหนาแน่นของโฮล ทุกตำแหน่งของ mesh ภายในชิ้นสารกึ่งตัวนำ จากนั้นจะทำการเข้าสู่โปรแกรมในการรันหาค่าในตำแหน่งต่าง ๆ โดยวิธีนิวตัน โดยจะทำการกำหนดค่าของ Evole N ไว้ที่ค่าหนึ่ง เมื่อโปรแกรมได้ทำการรันถึงค่าของ Evole N ที่กำหนดไว้ ก็จะให้โปรแกรมแสดงผลที่โปรแกรมเอ็กซ์เชล จากนั้นจะนำค่าของของศักย์ไฟฟ้าสถิต ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ความหนาแน่นของโฮล มาประยุกต์เข้ากับสมการทางฟิสิกส์เพื่อหาค่าของ ระดับพลังงานควอไซต์เฟอร์มิ สำหรับอิเล็กตรอนและโฮล สนามไฟฟ้า การเกิดหรือการรวมตัวของประจุ และความหนาแน่นของกระแสเมื่อเปรียบเทียบกับแรงดัน

ภาคผนวก ข.

โปรแกรมการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าแบบหนึ่งมิติ

```
Sub h_map()
```

```
Worksheets("sheet2").Select
```

```
Set Targetrange = Range("N1:T100")
```

```
For i = 0 To NM - 1 Step 1
```

```
Targetrange.Cells(i + 2, 1) = i
```

```
Targetrange.Cells(i + 2, 2) = h(i) * x0
```

```
Next i
```

```
End Sub
```

```
Sub Tau_map()
```

```
Worksheets("sheet2").Select
```

```
Set Targetrange = Range("K1:T100")
```

```
For i = 1 To NM - 1 Step 1
```

```
Targetrange.Cells(i + 2, 1) = i
```

```
Targetrange.Cells(i + 2, 2) = Tau(i) * Tau0
```

```
Next i
```

```
End Sub
```

```
Sub C_map()
```

```
Worksheets("sheet2").Select
```

```
Set Targetrange = Range("G1:J100")
```

```
For i = 0 To NM Step 1
```

```
Targetrange.Cells(i + 2, 1) = i
```

```
Targetrange.Cells(i + 2, 2) = C(i) * C0
```

```
Next i
```

```
End Sub
```

```

Sub Dn_Dp_map()
Worksheets("sheet2").Select
Set Targetrange = Range("A1:J100")
For i = 0 To JM - 1 Step 1
    Targetrange.Cells(i + 2, 1) = i + 1 / 2
    Targetrange.Cells(i + 2, 2) = Dn(i + 1 / 2) * D0
    Targetrange.Cells(i + 2, 3) = Dp(i + 1 / 2) * D0
Next i
For i = JM To NM - 1 Step 1
    Targetrange.Cells(i + 2, 1) = i + 1 / 2
    Targetrange.Cells(i + 2, 2) = Dn(i + 1 / 2) * D0
    Targetrange.Cells(i + 2, 3) = Dp(i + 1 / 2) * D0
Next i
End Sub

```

Option Explicit

Sub Embryo()

```

Dim Start, Ended As Date
Worksheets("sheet1").Select
Set Targetrange = Range("A2:Z100")
Start = Now
    Targetrange.Cells(10, 12) = Start
Module3.Diffusivity_to_Mesh
Module3.Lifetime_to_Mesh
Module3.Primary
Module3.Doping_to_Mesh
Module3.Spacing_Map
Assist.Dn_Dp_map
Assist.C_map
Assist.Tau_map
Assist.h_map

```

Module3.Boundary

Module4.Initial

Targetrange.Cells(8, 12) = Vap

For EvolveN = 1 To 1000

Module5.Ctrl

Targetrange.Cells(7, 12) = EvolveN

Targetrange.Cells(43, 12) = EvolveN

Targetrange.Cells(60, 12) = EvolveN

Next EvolveN

For i = 1 To 67 Step 1

Targetrange.Cells(i + 1, 9) = Nk(i)

Targetrange.Cells(i + 1, 2) = Psi(i)

Targetrange.Cells(i + 1, 4) = N(i)

Targetrange.Cells(i + 1, 6) = P(i)

Targetrange.Cells(i + 1, 3) = dltPsi(i)

Targetrange.Cells(i + 1, 5) = dltN(i)

Targetrange.Cells(i + 1, 7) = dltP(i)

Targetrange.Cells(i + 1, 8) = R(i):

Next i

Module5.QuasiFermi_GR

Module5.Current

Ended_at = Now

Targetrange.Cells(11, 12) = Ended_at

End Sub

Option Explicit

Public Const Vap As Single = 0

Public Targetrange As Range

Public Const Nd As Single = 5E+15

Public Const Na As Single = 5E+15

Public Const Planckh As Single = 6.62617E-34

Public Const pi As Single = 3.14159265358979

Public Const q As Single = 1.60218E-19

Public Const NM As Integer = 68

Public Const JM As Integer = 34

Public Const T As Single = 300

Public Const m0 As Single = 9.1095E-31

Public Const Bk As Single = 1.38066E-23

Public Const Dc As Single = 11.9

Public Const NI As Single = 14500000000#

Public Const Nc As Single = 2.8E+19

Public Const Nv As Single = 1.04E+19

Public Const Eg As Single = 1.12

Public Const Dnp As Single = 30

Public Const Dpp As Single = 9

Public Const Dnn As Single = 30

Public Const Dpn As Single = 9

Public Const TauNp As Single = 0.000003

Public Const TauPn As Single = 0.000002

Public Const Ut As Single = 1

Public Const epsrn0 As Single = 8.85418E-14

Public Dp(100) As Single

Public Tau(100) As Single

Public C(100) As Single

Public Dn(100) As Single

Public h(100) As Single

Public Const Length As Single = 0.0004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Public Const spacing As Single = 0.000008

Public Const spc1 As Single = 0.000002

Public Const spc2 As Single = 0.0000005

Public epsrnSem As Single

Public sqrRMDA As Single

Public D0 As Single

Public Tau0 As Single

Public Psi0 As Single

Public x0 As Single

Public RR0 As Single

Public C0 As Single

Public j0 As Single

Public POhm, Nohm As Single

Public PsiBohm As Single

Public PsiOhm As Single

Public RRR(100) As Single

Public Jgrt As Single

Public Nk(100) As Integer

Public Jn(100), Jp(100) As Single

Public PhiN(100), PhiP(100) As Single

Public F1, F2, F3 As Double

Public i As Single

Public j, k As Integer

Public EvolveN As Long

Public B, B1, B2, B3, B4 As Double

Public x, x1B, x2B, x3B, x4B As Double

Public RnF1byRnPsi As Double

Public RnF1byRnN As Double

Public RnF1byRnP As Double

Public RnF2byRnPsi As Double'

Public RnF2byRnN As Double

Public RnF2byRnP As Double

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Public RnF3byRnPsi As Double
 Public RnF3byRnN As Double
 Public RnF3byRnP As Double
 Public dltPsi(1 To 100) As Double
 Public dltN(1 To 100) As Double
 Public Psi(0 To 100) As Double
 Public P(0 To 100) As Double
 Public dltP(1 To 100) As Double
 Public N(0 To 100) As Double
 Public R(0 To 100) As Double
 Public PsiCt2 As Single
 Public PCt1 As Single
 Public PCt2 As Single
 Public PsiBct2 As Single
 Public PsiCt1 As Single
 Public NCt1 As Single
 Public PsiBct1 As Single
 Public NCt2 As Single
 Public DDn, DDp As Single
 Public Const x1 As Double = -1E+308
 Public Const x2 As Double = -0.000000000001
 Public Const x3 As Double = 0.000000000001
 Public Const x4 As Double = 700#
 Public Const x5 As Double = -0.00001
 Public Const x6 As Double = 0.00001
 Public Const one As Double = 1#
 Public Const zero As Double = 0#

Option Explicit

Sub Primary()

```
Worksheets("sheet1").Select
Set Targetrange = Range("A2:Z100")
For i = 0 To NM
    Targetrange.Cells(i + 1, 1) = i
Next i
C0 = Na
epsmSem = epsrn0 * Dc
sqrRMDA = Psi0 * epsrnSem / (x0 ^ 2 * q * C0)
x0 = Length
RR0 = D0 * C0 / (x0 ^ 2)
Psi0 = Bk * T / q
D0 = Dnn
Tau0 = x0 / D0
j0 = -q * D0 * C0 / x0
Targetrange.Cells(79, 2) = Psi0
Targetrange.Cells(85, 2) = j0
Targetrange.Cells(82, 2) = C0
Targetrange.Cells(84, 2) = RR0
Targetrange.Cells(80, 2) = x0
Targetrange.Cells(81, 2) = sqrRMDA
Targetrange.Cells(86, 2) = D0
Targetrange.Cells(83, 2) = Tau0
```

End Sub

Sub Diffusivity_to_Mesh()

```
For i = 0 To JM - 1 Step 1 '
    Dn(i + 1 / 2) = Dnp / D0
    Dp(i + 1 / 2) = Dpp / D0
```

Next i

```
For i = JM To NM - 1 Step 1 / 2
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Dn(i + 1 / 2) = Dnn / D0$$

$$Dp(i + 1 / 2) = Dpn / D0$$

Next i

End Sub

Sub Lifetime_to_Mesh()

For i = 0 To JM Step 1

$$\text{Tau}(i) = \text{TauNp} / \text{Tau0}$$

Next i

For i = JM + 1 To NM Step 1

$$\text{Tau}(i) = \text{TauPn} / \text{Tau0}$$

Next i

End Sub

Sub Doping_to_Mesh()

For i = 0 To JM Step 1

$$C(i) = -Na / C0$$

Next i

For i = JM + 1 To NM Step 1

$$C(i) = Nd / C0$$

Next i

End Sub

Sub Spacing_Map()

Dim hh As Single

$$hh = \text{spc1} / x0$$

For i = 0 To 3

$$h(i) = hh$$

Next i

$$hh = \text{spacing} / x0$$

For i = 4 To 26

$$h(i) = hh$$

```

Next i
hh = spc1 / x0
For i = 27 To 29
h(i) = hh
Next i
hh = spc2 / x0
For i = 30 To 37
h(i) = hh
Next i
hh = spc1 / x0
For i = 38 To 40
h(i) = hh
Next i
hh = spacing / x0
For i = 41 To 63
h(i) = hh
Next i
hh = spc1 / x0
For i = 64 To NM - 1
h(i) = hh
Next i
End Sub

```

Sub Boundary()

Worksheets("sheet1").Select

Set Targetrange = Range("A2:Z100")

Dim zzz As Single

$POhm = (1 / 2) * (Sqr(C(0) ^ 2 + 4 * (NI / C0) ^ 2) - C(0))$

$Nohm = (NI / C0) ^ 2 / POhm$

$N(0) = Nohm$

$P(0) = POhm$

$$\text{Nohm} = (1 / 2) * (\text{Sqr}(\text{C}(\text{NM})^2 + 4 * (\text{NI} / \text{C0})^2) + \text{C}(50))$$

$$\text{POhm} = (\text{NI} / \text{C0})^2 / \text{Nohm}$$

$$\text{N}(\text{NM}) = \text{Nohm}$$

$$\text{P}(\text{NM}) = \text{POhm}$$

$$\text{Targetrange.Cells}(1, 6) = \text{P}(0)$$

$$\text{Targetrange.Cells}(1, 4) = \text{N}(0)$$

$$\text{Targetrange.Cells}(\text{NM} + 1, 4) = \text{N}(\text{NM})$$

$$\text{Targetrange.Cells}(\text{NM} + 1, 6) = \text{P}(\text{NM})$$

$$\text{zzz} = -\text{C}(0) * \text{C0} / (2 * \text{NI})$$

$$\text{PsiBohm} = -(\text{Bk} * \text{T} / \text{q}) * \text{Log}(\text{zzz} + \text{Sqr}(\text{zzz} * \text{zzz} + 1)) / \text{Psi0}$$

$$\text{Targetrange.Cells}(80, 9) = \text{PsiBohm} * \text{Psi0}$$

$$\text{PsiOhm} = \text{PsiBohm} + (\text{Vap} / \text{Psi0})$$

$$\text{Psi}(0) = \text{PsiOhm}$$

$$\text{Targetrange.Cells}(1, 2) = \text{Psi}(0)$$

$$\text{zzz} = \text{C}(\text{NM}) * \text{C0} / (2 * \text{NI})$$

$$\text{PsiBohm} = (\text{Bk} * \text{T} / \text{q}) * \text{Log}(\text{zzz} + \text{Sqr}(\text{zzz} * \text{zzz} + 1)) / \text{Psi0}$$

$$\text{Targetrange.Cells}(80, 8) = \text{PsiBohm} * \text{Psi0}$$

$$\text{Psi}(\text{NM}) = \text{PsiBohm}$$

$$\text{Targetrange.Cells}(\text{NM} + 1, 2) = \text{Psi}(\text{NM})$$

End Sub

Option Explicit

Sub Initial()

Worksheets("sheet1").Select

Set Targetrange = Range("A2:S100")

For i = 1 To JM

$$\text{Psi}(i) = 0$$

$$\text{P}(i) = \text{Na} / \text{C0}$$

$$\text{N}(i) = (\text{NI} / \text{C0})^2 / \text{P}(i)$$

$$\text{Targetrange.Cells}(i + 1, 2) = \text{Psi}(i)$$

$$\text{Targetrange.Cells}(i + 1, 4) = \text{N}(i)$$

$$\text{Targetrange.Cells}(i + 1, 6) = \text{P}(i)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Next i
For i = JM + 1 To NM - 1 Step 1
    Psi(i) = 0
    N(i) = Nd / C0
    P(i) = (NI / C0) ^ 2 / N(i)
    Targetrange.Cells(i + 1, 2) = Psi(i)
    Targetrange.Cells(i + 1, 4) = N(i)
    Targetrange.Cells(i + 1, 6) = P(i)

```

```

Next i
End Sub

```

```

Option Explicit

```

```

Sub Ctrl()

```

```

Worksheets("sheet1").Select

```

```

Set Targetrange = Range("A2:BZ100")

```

```

For i = 1 To NM - 1 Step 1

```

```

    Targetrange.Cells(4, 11) = i

```

```

Module6.Innner_Mesh

```

```

Next i

```

```

For i = NM - 1 To 1 Step -1

```

```

    Targetrange.Cells(4, 11) = i

```

```

    Targetrange.Cells(31, 11) = i

```

```

    Targetrange.Cells(52, 11) = i

```

```

Module6.Innner_Mesh

```

```

Next i

```

```

End Sub

```

```

Sub Current()

```

```

For i = 0 To NM - 1 Step 1

```

```

    Module8.CurrentDens

```

```

Next i

```

```

For i = 0 To NM - 1 Step 1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Next i

End Sub

Sub QuasiFermi_GR()

Module8.Imref_N_P

Dim RR As Single

For i = 1 To NM - 1

RRR(i) = RR0 * R(i)

Targetrange.Cells(i + 1, 38) = i

Targetrange.Cells(i + 1, 39) = RRR(i)

Targetrange.Cells(i + 1, 50) = i

Targetrange.Cells(i + 1, 51) = Abs(RRR(i))

Next i

Module8.Gen_Rec_Current

Targetrange.Cells(1, 42) = Jgrt

End Sub

Option Explicit

Sub Inner_Mesh()

Dim GR As Double

Dim RnB1byRnx1B, RnB2byRnx2B, RnB3byRnx3B, RnB4byRnx4B As Double

Dim RnRbyRnN, RnRbyRnP As Double

For k = 1 To 1000

Targetrange.Cells(4, 13) = k

$$F1 = \text{sqrRMDA} * (1 / h(i) * (\text{Psi}(i + 1) - \text{Psi}(i)) - 1 / h(i - 1) * (\text{Psi}(i) - \text{Psi}(i - 1))) * 2 / (h(i - 1) + h(i)) - N(i) + P(i) + C(i))$$

$$GR = (N(i) * P(i) - (NI / C0) ^ 2) / \text{Tau}(i) / (N(i) + P(i) + 2 * (NI / C0))$$

R(i) = GR

x1B = (Psi(i + 1) - Psi(i)) / Ut: x = x1B: B1 = Bern(x)

x2B = (Psi(i) - Psi(i + 1)) / Ut: x = x2B: B2 = Bern(x)

$$x3B = (\text{Psi}(i) - \text{Psi}(i - 1)) / \text{Ut}; x = x3B; B3 = \text{Bern}(x)$$

$$x4B = (\text{Psi}(i - 1) - \text{Psi}(i)) / \text{Ut}; x = x4B; B4 = \text{Bern}(x)$$

$$\begin{aligned} F2 = & N(i - 1) * \text{Dn}(i - 1 / 2) * B4 / h(i - 1) - N(i) * \text{Dn}(i - 1 / 2) * B3 / h(i - 1) _ \\ & - N(i) * \text{Dn}(i + 1 / 2) * B2 / h(i) + N(i + 1) * \text{Dn}(i + 1 / 2) * B1 / h(i) _ \\ & - R(i) * (h(i - 1) + h(i)) / 2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F3 = & P(i - 1) * \text{Dp}(i - 1 / 2) * B3 / h(i - 1) - P(i) * \text{Dp}(i - 1 / 2) * B4 / h(i - 1) _ \\ & - P(i) * \text{Dp}(i + 1 / 2) * B1 / h(i) + P(i + 1) * \text{Dp}(i + 1 / 2) * B2 / h(i) _ \\ & - R(i) * (h(i - 1) + h(i)) / 2 \end{aligned}$$

$$\text{RnF1byRnPsi} = -\text{sqrRMDA} * (1 / h(i) + 1 / h(i - 1)) * 2 / (h(i) + h(i - 1))$$

$$\text{RnF1byRnN} = -1$$

$$\text{RnF1byRnP} = 1$$

$$x = x1B: \text{DerivB}(x): \text{RnB1byRnx1B} = \text{DerivB}(x)$$

$$x = x2B: \text{DerivB}(x): \text{RnB2byRnx2B} = \text{DerivB}(x)$$

$$x = x3B: \text{DerivB}(x): \text{RnB3byRnx3B} = \text{DerivB}(x)$$

$$x = x4B: \text{DerivB}(x): \text{RnB4byRnx4B} = \text{DerivB}(x)$$

$$\text{RnRbyRnN} = (P(i) + (NI / C0)) ^ 2 / \text{Tau}(i) / (N(i) + P(i) + 2 * (NI / C0)) ^ 2$$

$$\text{RnRbyRnP} = (N(i) + (NI / C0)) ^ 2 / \text{Tau}(i) / (N(i) + P(i) + 2 * (NI / C0)) ^ 2$$

$$\begin{aligned} \text{RnF2byRnPsi} = & -N(i - 1) * \text{Dn}(i - 1 / 2) * \text{RnB4byRnx4B} / \text{Ut} / h(i - 1) _ \\ & - N(i) * \text{Dn}(i - 1 / 2) * \text{RnB3byRnx3B} / \text{Ut} / h(i - i) _ \\ & - N(i) * \text{Dn}(i + 1 / 2) * \text{RnB2byRnx2B} / \text{Ut} / h(i) _ \\ & - N(i + 1) * \text{Dn}(i + 1 / 2) * \text{RnB1byRnx1B} / \text{Ut} / h(i) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{RnF2byRnN} = & -\text{Dn}(i - 1 / 2) * B3 / h(i - 1) - \text{Dn}(i + 1 / 2) * B2 / h(i) _ \\ & - \text{RnRbyRnN} * (h(i - 1) + h(i)) / 2 \end{aligned}$$

$$\text{RnF2byRnP} = -\text{RnRbyRnP} * (h(i - 1) + h(i)) / 2$$

$$\text{RnF3byRnPsi} = P(i - 1) * \text{Dp}(i - 1 / 2) * \text{RnB3byRnx3B} / \text{Ut} / h(i - 1) _$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$+ P(i) * Dp(i - 1 / 2) * RnB4byRnx4B / Ut / h(i - 1) _$$

$$+ P(i) * Dp(i + 1 / 2) * RnB1byRnx1B / Ut / h(i) _$$

$$+ P(i + 1) * Dp(i + 1 / 2) * RnB2byRnx2B / Ut / h(i)$$

$$RnF3byRnN = -RnRbyRnN * (h(i - 1) + h(i)) / 2$$

$$RnF3byRnP = -Dp(i - 1 / 2) * B4 / h(i - 1) - Dp(i + 1 / 2) * B1 / h(i) _$$

$$- RnRbyRnP * (h(i - 1) + h(i)) / 2$$

Module7.simle_elim

If Abs(dltPsi(i)) < 0.0000000001 _

And Abs(dltN(i)) < 0.0000000001 _

And Abs(dltP(i)) < 0.0000000001 Then

Exit For

End If

Next k

$$Nk(i) = k - 1$$

End Sub

Sub SOR()

Dim omega As Single

Dim Psik, Nk, Pk As Double

Dim DPsikm, DNkm, DPkm As Double

Dim DPsikm1, DNkm1, DPkm1 As Double

$$\omega = 0.2$$

$$Psik = Psi(i) - dltPsi(i)$$

$$Nk = N(i) - dltN(i)$$

$$Pk = P(i) - dltP(i)$$

$$DPsikm = dltPsi(i)$$

$$DNkm = dltN(i)$$

$$DPkm = dltP(i)$$

$$F1 = \text{sqrRMDA} * (1 / h(i) * (Psi(i + 1) - Psik) - 1 / h(i - 1) * (Psik - Psi(i - 1))) * _$$

$$2 / (h(i - 1) + h(i)) - (Nk + DNkm) + (Pk + DPkm) + C(i)$$

$$DPsikm1 = -\omega * F1 / RnF1byRnPsi$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

x1B = (Psi(i + 1) - (Psik + DPsikm1)) / Ut: x = x1B: B1 = Bern(x)
x2B = ((Psik + DPsikm1) - Psi(i + 1)) / Ut: x = x2B: B2 = Bern(x)
x3B = ((Psik + DPsikm1) - Psi(i - 1)) / Ut: x = x3B: B3 = Bern(x)
x4B = (Psi(i - 1) - (Psik + DPsikm1)) / Ut: x = x4B: B4 = Bern(x)
F2 = N(i - 1) * Dn(i - 1 / 2) * B4 / h(i - 1) _
    - Nk * Dn(i - 1 / 2) * B3 / h(i - 1) _
    - Nk * Dn(i + 1 / 2) * B2 / h(i) _
    + N(i + 1) * Dn(i + 1 / 2) * B1 / h(i) _
    - (Nk * (Pk + DPkm) - (NI / C0) ^ 2) / _
    Tau(i) / (Nk + (Pk + DPkm) + 2 * (NI / C0)) * (h(i - 1) + h(i)) / 2
    DNkm1 = -omega * F2 / RnF2byRnN
F3 = P(i - 1) * Dp(i - 1 / 2) * B3 / h(i - 1) _
    - Pk * Dp(i - 1 / 2) * B4 / h(i - 1) _
    - Pk * Dp(i + 1 / 2) * B1 / h(i) _
    + P(i + 1) * Dp(i + 1 / 2) * B2 / h(i) _
    - ((Nk + DNkm1) * Pk - (NI / C0) ^ 2) / _
    Tau(i) / ((Nk + DNkm1) + Pk + 2 * (NI / C0)) * (h(i - 1) + h(i)) / 2
    DPkm1 = -omega * F3 / RnF3byRnP
Psi(i) = Psi(i) + DPsikm1
N(i) = N(i) + DNkm1
P(i) = P(i) + DPkm1
If i >= 34 And i <= 46 Then
    Targetrange.Cells(i + 1, 11) = DPsikm1
    Targetrange.Cells(i + 1, 12) = DNkm1
    Targetrange.Cells(i + 1, 13) = DPkm1
End If
End Sub

Option Explicit
Sub simle_elim()
Dim A(3, 3) As Double
Dim B(3) As Double

```

Dim x(3) As Double

Dim ii, jj As Integer

Dim cc, dd, ee, ff, gg, hh As Double

A(1, 1) = RnF1byRnPsi: A(1, 2) = RnF1byRnN: A(1, 3) = RnF1byRnP

A(2, 1) = RnF2byRnPsi: A(2, 2) = RnF2byRnN: A(2, 3) = RnF2byRnP

A(3, 1) = RnF3byRnPsi: A(3, 2) = RnF3byRnN: A(3, 3) = RnF3byRnP

B(1) = -F1

B(2) = -F2

B(3) = -F3

cc = A(2, 1) * A(1, 2) - A(1, 1) * A(2, 2)

dd = A(2, 1) * A(1, 3) - A(1, 1) * A(2, 3)

ee = A(2, 1) * B(1) - A(1, 1) * B(2)

ff = A(3, 1) * A(2, 2) - A(2, 1) * A(3, 2)

gg = A(3, 1) * A(2, 3) - A(2, 1) * A(3, 3)

hh = A(3, 1) * B(2) - A(2, 1) * B(3)

x(3) = (ee * ff - cc * hh) / (ff * dd - cc * gg)

x(2) = (cc * hh - cc * gg * x(3)) / (cc * ff)

x(1) = (B(3) - (A(3, 2) * x(2) + A(3, 3) * x(3))) / A(3, 1)

dltPsi(i) = x(1): dltN(i) = x(2): dltP(i) = x(3)

Psi(i) = dltPsi(i) + Psi(i): N(i) = dltN(i) + N(i)

P(i) = dltP(i) + P(i)

End Sub

Function Bern(x)

If -1E+308 < x And x < x2 Then

Bern = x / (Exp(x) - one)

ElseIf x2 < x And x < x3 Then

Bern = 2 * one / (2 * one + x)

ElseIf x3 < x And x <= x4 Then

Bern = x / (Exp(x) - one)

Else

Bern = x * Exp(-x)

End If

End Function

Function DerivB(x)

Dim Nom, Denom, Result As Double

If x <= x5 Then

$$\text{DerivB} = (\text{Exp}(x) - x * \text{Exp}(x) - 1) / ((\text{Exp}(x) - 1) ^ 2)$$

ElseIf x >= x5 And x <= x6 Then

$$\text{DerivB} = -(1 + x) / (2 + 2 * x + x ^ 2)$$

Else

$$\text{DerivB} = (\text{Exp}(-x) - x * \text{Exp}(-x) - (\text{Exp}(-x)) ^ 2) / (1 - 2 * \text{Exp}(-x) + (\text{Exp}(-x)) ^ 2)$$

$$\text{DerivB} = (\text{Exp}(x) - x * \text{Exp}(x) - 1) / ((\text{Exp}(x) - 1) ^ 2)$$

End If

End Function

Option Explicit

Sub CurrentDens()

Dim jjn, jjp As Single

$$N(i + 1 / 2) = N(i) / (1 + \text{Exp}((\text{Psi}(i) - \text{Psi}(i + 1)) / 2 / \text{Ut})) + N(i + 1) / (1 + \text{Exp}((\text{Psi}(i + 1) - \text{Psi}(i)) / 2 / \text{Ut}))$$

$$P(i + 1 / 2) = P(i) / (1 + \text{Exp}((\text{Psi}(i + 1) - \text{Psi}(i)) / 2 / \text{Ut})) + P(i + 1) / (1 + \text{Exp}((\text{Psi}(i) - \text{Psi}(i + 1)) / 2 / \text{Ut}))$$

$$Jn(i + 1 / 2) = Dn(i + 1 / 2) * N(i + 1 / 2) * (\text{Phi}N(i + 1) - \text{Phi}N(i)) / h(i) * j0$$

$$Jp(i + 1 / 2) = Dp(i + 1 / 2) * P(i + 1 / 2) * (\text{Phi}P(i + 1) - \text{Phi}P(i)) / h(i) * j0$$

Targetrange.Cells(i + 1, 32) = i + 1 / 2

Targetrange.Cells(i + 1, 33) = Jn(i + 1 / 2)

Targetrange.Cells(i + 1, 34) = Jp(i + 1 / 2)

Targetrange.Cells(i + 1, 35) = Jn(i + 1 / 2) + Jp(i + 1 / 2)

Targetrange.Cells(i + 1, 45) = i + 1 / 2

Targetrange.Cells(i + 1, 46) = Abs(Jn(i + 1 / 2))

Targetrange.Cells(i + 1, 47) = Abs(Jp(i + 1 / 2))

Targetrange.Cells(i + 1, 48) = Abs(Jn(i + 1 / 2)) + Abs(Jp(i + 1 / 2))

End Sub

Sub Imref_N_P()

Dim z As Single

For i = 0 To NM Step 1

z = (Bk * T / q) * Log(N(i) / (NI / C0)) / Psi0

PhiN(i) = Psi(i) - z

z = (Bk * T / q) * Log(P(i) / (NI / C0)) / Psi0

PhiP(i) = Psi(i) + z

Targetrange.Cells(i + 1, 22) = i

Targetrange.Cells(i + 1, 23) = Psi(i) * Psi0

Targetrange.Cells(i + 1, 24) = PhiN(i) * Psi0

Targetrange.Cells(i + 1, 25) = PhiP(i) * Psi0

Targetrange.Cells(i + 1, 27) = i

Targetrange.Cells(i + 1, 28) = N(i) * C0

Targetrange.Cells(i + 1, 29) = P(i) * C0

Next i

End Sub

Sub Gen_Rec_Current()

Dim deltaJgrt As Single

Jgrt = 0

deltaJgrt = 0

For i = 1 To 24

deltaJgrt = q * RRR(i) * spacing

Jgrt = Jgrt + deltaJgrt

Next i

For i = 25 To 28 '

deltaJgrt = q * RRR(i) * spc1

Jgrt = Jgrt + deltaJgrt

Next i

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

For i = 29 To 52
    deltaJgrt = q * RRR(i) * spacing
    Jgrt = Jgrt + deltaJgrt
Next i
For i = 53 To NM - 1
    deltaJgrt = q * RRR(i) * spc1
    Jgrt = Jgrt + deltaJgrt
Next i
End Sub

```

Option Explicit

```

Sub Babe_theOffSpring()
    Worksheets("Sheet1").Select
    Set Targetrange = Range("A1:BZ200")
    Module3.Diffusivity_to_Mesh
    Module3.Primary
    Module3.Lifetime_to_Mesh
    Module3.Spacing_Map
    Module3.Doping_to_Mesh
    Worksheets("Sheet1").Select
    Set Targetrange = Range("A1:BZ200")
    For i = 0 To 68
        Psi(i) = Targetrange.Cells(i + 2, 2)
        N(i) = Targetrange.Cells(i + 2, 4)
        P(i) = Targetrange.Cells(i + 2, 6)
    Next i

```

Dim RTNEV As Long

RTNEV = Targetrange.Cells(7, 13)

Dim Start_to_run_at As Date

Start_to_run_at = Now

Targetrange.Cells(11, 12) = Start_to_run_at

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Worksheets("Sheet1").Select
Set Targetrange = Range("A1:BZ200")
For EvolveN = RTNEV To RTNEV + 400
Module5.Ctrl
'Targetrange.Cells(7, 13) = EvolveN
Targetrange.Cells(6, 13) = EvolveN
Next EvolveN
```

```
Worksheets("Sheet1").Select
Set Targetrange = Range("A1:BZ200")
For i = 1 To 67 Step 1
Targetrange.Cells(i + 2, 9) = Nk(i)
Targetrange.Cells(i + 2, 2) = Psi(i)
Targetrange.Cells(i + 2, 4) = N(i)
Targetrange.Cells(i + 2, 6) = P(i)
Targetrange.Cells(i + 2, 3) = dltPsi(i)
Targetrange.Cells(i + 2, 5) = dltN(i)
Targetrange.Cells(i + 2, 7) = dltP(i)
Targetrange.Cells(i + 2, 8) = R(i):
Next i
Module5.QuasiFermi_GR
Module5.Current
Worksheets("Sheet1").Select
Set Targetrange = Range("A1:BZ200")
Dim Ended_at As Date
Ended_at = Now
Targetrange.Cells(12, 12) = Ended_at
```

End Sub

Option Explicit

Sub E_Field()

Dim E_F(100)

Worksheets("Sheet2").Select

```
Set Targetrange = Range("A1:BZ200")
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

For i = 0 To NM - 1 Step 1
    h(i) = Targetrange.Cells(i + 2, 15)
Next i
Worksheets("Sheet1").Select
Set Targetrange = Range("A1:BZ200")
Psi0 = Targetrange.Cells(80, 2)
For i = 0 To NM - 1
    Psi(i) = Targetrange.Cells(i + 2, 2)
    Psi(i + 1) = Targetrange.Cells(i + 3, 2)
    E_F(i + 1 / 2) = -(Psi(i + 1) - Psi(i)) / h(i) * Psi0
    Targetrange.Cells(i + 2, 70) = i + 1 / 2
    Targetrange.Cells(i + 2, 71) = E_F(i + 1 / 2)
Next i
End Sub

```



ภาคผนวก ค.

โปรแกรมการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าแบบสองมิติ

Option Explicit

Sub Scaling_factor()

$$R0 = D0 * C0 / (x0 ^ 2)$$

$$\text{Tau0} = x0 / D0$$

$$\text{Psi0} = Bk * T / q$$

$$\text{sqrRMDA} = \text{Psi0} * \text{epsrnSem} / (x0 ^ 2 * q * C0)$$

$$D0 = Dnn$$

$$C0 = Na$$

$$x0 = \text{Length}$$

$$\text{epsrnSem} = \text{epsrn0} * Dc$$

End Sub

Sub Map_parameters()

For i = i_A To i_C

For j = j_C To j_A

$$C(i, j) = -Na / C0$$

Next j

Next i

For i = i_E To i_G

For j = j_G To j_E

$$C(i, j) = Nd_{mn} / C0$$

Next j

Next i

For i = i_A To No_of_i

For j = 0 To j_C - 1

$$C(i, j) = Nd / C0$$

Next j

Next i

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

For i = i_C + 1 To i_E - 1
  For j = j_C To No_of_j
    C(i, j) = Nd / C0
  Next j
Next i

```

```

For i = i_A To i_C - 1
  For j = j_C To j_A
    Dn(i, j) = Dnp / D0
    Dn(i, j + 1 / 2) = Dnp / D0
    Dn(i + 1 / 2, j) = Dnp / D0
    Dp(i, j) = Dpp / D0
    Dp(i, j + 1 / 2) = Dpp / D0
    Dp(i + 1 / 2, j) = Dpp / D0
    Dp(i, j + 1 / 2) = Dpp / D0
  Next j
Next i

```

```

For i = i_C To i_E - 1
  For j = j_C To j_E
    Dn(i, j) = Dnn / D0
    Dn(i, j + 1 / 2) = Dnn / D0
    Dn(i + 1 / 2, j) = Dnn / D0
    Dp(i, j) = Dpn / D0
    Dp(i, j + 1 / 2) = Dpn / D0
    Dp(i, j + 1 / 2) = Dpn / D0
  Next j
Next i

```

```

For i = 0 To No_of_i
  For j = 0 To j_C - 1
    Dn(i, j) = Dnn / D0
    Dn(i, j + 1 / 2) = Dnn / D0
    Dn(i + 1 / 2, j) = Dnn / D0
  
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Dp(i, j) = Dpn / D0
  Dp(i, j + 1 / 2) = Dpn / D0
    Dp(i + 1 / 2, j) = Dpn / D0
  Next j
Next i
For i = i_E To i_G
  For j = j_G To j_E
    Dn(i, j) = Dn_nn / D0
      Dn(i, j + 1 / 2) = Dn_nn / D0
        Dn(i + 1 / 2, j) = Dn_nn / D0
      Dp(i, j) = Dp_nn / D0
        Dp(i, j + 1 / 2) = Dp_nn / D0
          Dp(i + 1 / 2, j) = Dp_nn / D0
        Next j
      Next i
    For i = i_A To i_C
      For j = j_C To j_A
        Tau(i, j) = TauNp / Tau0
      Next j
    Next i
  For i = i_A To No_of_i
    For j = 0 To j_C - 1
      Tau(i, j) = TauPn / Tau0
    Next j
  Next i
  For i = i_C + 1 To i_E - 1
    For j = j_C To No_of_j
      Tau(i, j) = TauPn / Tau0
    Next j
  Next i
  For i = i_E To i_G
    For j = j_G To j_E

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    Tau(i, j) = TauPn_nn
Next j
Next i
Dim hh As Single
Dim kk As Single
hh = spc3 / x0
For i = 0 To 3
    h(i) = hh
Next i:
hh = spc1 / x0
h(4) = hh:
hh = base / x0
For i = 5 To 11
    h(i) = hh
Next i:
hh = spc1 / x0
h(12) = hh:
hh = spc2 / x0
h(13) = hh:
hh = spc5 / x0
For i = 14 To 37
    h(i) = hh
Next i:
hh = spc1 / x0
For i = 38 To 39
    h(i) = hh
Next i:
hh = spc3 / x0
For i = 40 To 47
    h(i) = hh
Next i:
hh = spc1 / x0 'for i=48

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    h(48) = hh:
    hh = base / x0
    For i = 49 To 55
        h(i) = hh
    Next i
    hh = spc1 / x0
    h(56) = hh:
    hh = spc3 / x0
    For i = 57 To 60
        h(i) = hh
    Next i
    kk = spc3 / x0
    For j = 0 To 3
        k(j) = kk
    Next j:
    kk = spc1 / x0
    k(4) = kk:
    kk = base / x0
    For j = 5 To 42
        k(j) = kk
    Next j:
    kk = spc1 / x0
    k(43) = kk:
    kk = spc5 / x0
    For j = 44 To 60
        k(j) = kk
    Next j

```

End Sub

Option Explicit

Public Const Vap As Single

Public Targetrange As Range

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Public Const i_A As Integer = 0
 Public Const j_A As Integer = 60
 Public Const i_G As Integer = 61
 Public Const j_G As Integer = 57
 Public Const i_E As Integer = 44
 Public Const j_E As Integer = 60
 Public Const i_C As Integer = 22
 Public Const j_C As Integer = 57
 Public Const No_of_i As Integer = 61
 Public Const No_of_j As Integer = 60
 Public Const Length As Single = 0.04
 Public Const base As Single = 0.001
 Public Const spc1 As Single = 0.0005
 Public Const spc2 As Single = 0.00025
 Public Const spc3 As Single = 0.000125
 Public Const spc5 As Single = 0.00003125
 Public h(0 To 100) As Single
 Public k(0 To 100) As Single
 Public i, j As Single
 Public Const Nd_mn As Single = 1E+17
 Public Const Nd As Single = 5000000000000000#
 Public Const Na As Single = 1E+17
 Public Const Dnp As Single = 20
 Public Const Dpp As Single = 8
 Public Const Dnn As Single = 30
 Public Const Dn_mn As Single = 20
 Public Const Dp_mn As Single = 9
 Public Const Dpn As Single = 11
 Public Const TauNp As Single = 0.00000105
 Public Const TauPn_mn As Single = 0.0000008
 Public Const TauPn As Single = 0.0000105
 Public C(100, 100) As Single

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Public Dn(100, 100) As Single
 Public Loc(0 To 100) As Single
 Public Loca(0 To 100) As Single
 Public Dp(100, 100) As Single
 Public Tau(100, 100) As Single
 Public Const T As Single = 300
 Public Const epsrn0 As Single = 8.85418E-14
 Public Const Bk As Single = 1.38066E-23
 Public Const q As Single = 1.60218E-19
 Public Const Dc As Single = 11.9
 Public epsrnSem As Single
 Public Psi0 As Single
 Public x0 As Single
 Public Tau0 As Single
 Public sqrRMDA As Single
 Public R0 As Single
 Public C0 As Single
 Public D0 As Single

 Option Explicit
 Sub Show_Map()
 Worksheets("Scaling").Select
 Set Targetrange = Range("A1:Z100")
 Targetrange.Cells(1, 2) = Psi0
 Targetrange.Cells(2, 2) = x0
 Targetrange.Cells(3, 2) = sqrRMDA
 Targetrange.Cells(4, 2) = C0
 Targetrange.Cells(5, 2) = Tau0
 Targetrange.Cells(6, 2) = RR0
 Targetrange.Cells(7,2) = j0
 Targetrange.Cells(8,2) = D0
 Module1.Scaling_factor

```

Module1.Map_parameters
Worksheets("Doping").Select
Set Targetrange = Range("A1:CZ100")
For i = 0 To No_of_i
    Targetrange.Cells(1, i + 2) = i
    Targetrange.Cells(No_of_j + 4, i + 2) = i
For j = 0 To No_of_j
    Targetrange.Cells(j + 2, 1) = j
    Targetrange.Cells(j + 2, No_of_i + 4) = j
    Targetrange.Cells(j + 2, i + 2) = C(i, j) * C0
Next j
Next i
Module1.Map_parameters
Module1.Scaling_factor
Worksheets("Dn").Select
Set Targetrange = Range("A1:IV300")
For i = 0 To No_of_i
    Targetrange.Cells(1, 2 * i + 2) = i
    Targetrange.Cells(1, 2 * i + 3) = i + 1 / 2
Next i
For j = 0 To No_of_j
    Targetrange.Cells(2 * j + 2, 1) = j
    Targetrange.Cells(2 * j + 3, 1) = j + 1 / 2
Next j
For i = 0 To No_of_i
    For j = 0 To No_of_j
        Targetrange.Cells(2 * j + 3, 2 * i + 2) = Dn(i, j + 1 / 2) * D0
        Targetrange.Cells(2 * j + 2, 2 * i + 3) = Dn(i + 1 / 2, j) * D0
    Next j
Next i

```

```

Worksheets("Dp").Select
Set Targetrange = Range("A1:IV300")
For i = 0 To No_of_i
    Targetrange.Cells(1, 2 * i + 2) = i
    Targetrange.Cells(1, 2 * i + 3) = i + 1 / 2
Next i
For j = 0 To No_of_j
    Targetrange.Cells(2 * j + 2, 1) = j
    Targetrange.Cells(2 * j + 3, 1) = j + 1 / 2
Next j
For i = 0 To No_of_i
    For j = 0 To No_of_j
        Targetrange.Cells(2 * j + 3, 2 * i + 2) = Dp(i, j + 1 / 2) * D0
        Targetrange.Cells(2 * j + 2, 2 * i + 3) = Dp(i + 1 / 2, j) * D0
    Next j
Next i
Worksheets("Lifetime").Select
Set Targetrange = Range("A1:CZ100")
For i = 0 To No_of_i
    Targetrange.Cells(1, i + 2) = i
    Targetrange.Cells(No_of_j + 4, i + 2) = i
    For j = 0 To No_of_j
        Targetrange.Cells(j + 2, 1) = j
        Targetrange.Cells(j + 2, No_of_i + 4) = j
        Targetrange.Cells(j + 2, i + 2) = Tau(i, j) * Tau0
    Next j
Next i

```

```
Worksheets("h(i)").Select
```

```
Set Targetrange = Range("A1:CZ100")
```

```
For i = 0 To 60
```

```
Targetrange.Cells(1, i + 2) = i
```

```
Targetrange.Cells(2, i + 2) = h(i) * x0
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Next i
Worksheets("k(j)").Select
Set Targetrange = Range("A1:CZ100")
For j = 0 To 60
    Targetrange.Cells(j + 2, 1) = j
    Targetrange.Cells(j + 2, 2) = k(j) * x0
Next j
Worksheets("Loc(i)").Select
Set Targetrange = Range("A1:CZ100")
For i = 0 To No_of_i
    Targetrange.Cells(1, i + 2) = Loc(i) * 10000
Next i
Worksheets("Loca(i)").Select
Set Targetrange = Range("A1:CZ100")
For i = 0 To No_of_j
    Targetrange.Cells(j + 2, 2) = Loca(j) * 10000
Next i
End Sub

Sub About_Boundary_cntrl()
    [DomainMesh&PhysicalParameter.xls].[Module1].Scaling_factor
    [DomainMesh&PhysicalParameter.xls].[Module1].Map_parameters
    Module1.EmitterAndBase_contct
    Module1.Artificial1
    Module1.Artificial2
    Module1.Artificial3
    Module1.InitialValue
    Module5.Show_Psi_N_P
End Sub

Sub EmitterAndBase_contct()
    Dim z As Double

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Dim Pohm, Nohm As Double

Dim PsiBohm As Double

Dim PsiOhm As Double

Pohm = (1 / 2) * (Sqr(C(0, 60) ^ 2 + 4 * (NI / C0) ^ 2) - C(0, 60))

Nohm = (NI / C0) ^ 2 / Pohm

For i = 0 To 13

 j = 60:

 N(i, j) = Nohm

 P(i, j) = Pohm

 Next i

Nohm = (1 / 2) * (Sqr(C(61, 60) ^ 2 + 4 * (NI / C0) ^ 2) + C(61, 60))

Pohm = (NI / C0) ^ 2 / Nohm

For i = 48 To 61

 j = 60:

 N(i, j) = Nohm

 P(i, j) = Pohm

 Next i

z = -C(0, 60) * C0 / (2 * NI)

PsiBohm = -(Bk * T / q) * Log(z + Sqr(z * z + 1)) / Psi0

PsiOhm = PsiBohm + (Vap / Psi0)

For i = 0 To 13

 j = 60:

 Psi(i, j) = PsiOhm

 Next i

z = C(61, 60) * C0 / (2 * NI)

PsiBohm = (Bk * T / q) * Log(z + Sqr(z * z + 1)) / Psi0

PsiOhm = PsiBohm + 0

For i = 48 To 61

 j = 60:

 Psi(i, j) = PsiOhm

 Next i

End Sub

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sub Artificial3()

Dim z As Single

Dim Pohm, Nohm As Single

Dim PsiBohm As Single

Dim PsiOhm As Single

Pohm = (1 / 2) * (Sqr(C(0, 0) ^ 2 + 4 * (NI / C0) ^ 2) - C(0, 0))

Nohm = (NI / C0) ^ 2 / Pohm 'scaled value

j = 0:

For i = 0 To No_of_i

N(i, j) = Nohm

P(i, j) = Pohm

Next i

z = C(0, 0) * C0 / (2 * NI)

PsiBohm = (Bk * T / q) * Log(z + Sqr(z * z + 1)) / Psi0

PsiOhm = PsiBohm

j = 0:

For i = 0 To No_of_i

Psi(i, j) = PsiOhm

Next i

End Sub

Sub Artificial1()

Worksheets("sheet1").Select

Set Targetrange = Range("A2:BZ100")

Dim Evolve_No

Dim kN As Integer

Dim ii, jj As Integer

For ii = 2 To 9

For jj = 1 To 62

Targetrange.Cells(jj, ii) = ""

Next jj

Next ii

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

i = 0:
  For j = 1 To 59 'for 1=<j=<No_of_j-1
    Psi(i, j) = 0
  Next j
i = 0:
  For j = j_C To j_A - 1
    N(i, j) = N(i, No_of_j)
    P(i, j) = P(i, No_of_j)
  Next j
  For j = 1 To j_C - 1
    N(i, j) = N(i, 0)
    P(i, j) = P(i, 0)
  Next j
Targetrange.Cells(8, 12) = Vap
i = 0:
Targetrange.Cells(1, 2) = Psi(i, 0)
Targetrange.Cells(1, 4) = N(i, 0)
Targetrange.Cells(1, 6) = P(i, 0)
Targetrange.Cells(61, 2) = Psi(i, 60)
Targetrange.Cells(61, 4) = N(i, 60)
Targetrange.Cells(61, 6) = P(i, 60)
i = 0:
For Evolve_No = 1 To 20000
  Targetrange.Cells(6, 13) = Evolve_No
For j = 1 To No_of_j - 1 Step 1
  Targetrange.Cells(4, 11) = j
  Module3.Innner_Mesh
Next j
For j = No_of_j - 1 To 1 Step -1
  Targetrange.Cells(4, 11) = j
  Module3.Innner_Mesh
Next j

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Next Evolve_No
i = 0:
For j = 1 To No_of_j - 1 Step 1
    Targetrange.Cells(j + 1, 9) = Nkk_j(j)
    Targetrange.Cells(j + 1, 2) = Psi(i, j)
    Targetrange.Cells(j + 1, 4) = N(i, j)
    Targetrange.Cells(j + 1, 6) = P(i, j)
    Targetrange.Cells(j + 1, 3) = dltPsi(i, j)
    Targetrange.Cells(j + 1, 5) = dltN(i, j)
    Targetrange.Cells(j + 1, 7) = dltP(i, j)
    Targetrange.Cells(j + 1, 8) = R(i, j)
Next j
i = 0:
For j = 0 To No_of_j
    Targetrange.Cells(j + 1, 16) = Psi(i, j) * Psi0
    Targetrange.Cells(j + 1, 19) = N(i, j) * C0
    Targetrange.Cells(j + 1, 20) = P(i, j) * C0
Next j
End Sub
Sub Artificial2()
Worksheets("sheet2").Select
Set Targetrange = Range("A2:BZ100")
Dim Evolve_No
Dim kN As Integer
Dim ii, jj As Integer
For ii = 2 To 9
    For jj = 1 To 62
        Targetrange.Cells(jj, ii) = ""
    Next jj
Next ii
i = 61:
For j = 1 To 59

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Psi(i, j) = 0
Next j
i = 61:
  For j = j_G To j_E - 1
    N(i, j) = N(i, No_of_j)
    P(i, j) = P(i, No_of_j)
  Next j
  For j = 1 To j_G - 1
    N(i, j) = N(i, 0)
    P(i, j) = P(i, 0)
  Next j
Targetrange.Cells(8, 12) = Vap
i = 61:
Targetrange.Cells(1, 2) = Psi(i, 0)
Targetrange.Cells(1, 4) = N(i, 0)
Targetrange.Cells(1, 6) = P(i, 0)
Targetrange.Cells(61, 2) = Psi(i, 60)
Targetrange.Cells(61, 4) = N(i, 60)
Targetrange.Cells(61, 6) = P(i, 60)
i = No_of_i
For Evolve_No = 1 To 10000
  Targetrange.Cells(6, 13) = Evolve_No
  For j = 1 To No_of_j - 1 Step 1
    Targetrange.Cells(4, 11) = j
    Module3.Innner_Mesh
  Next j
  For j = No_of_j - 1 To 1 Step -1
    Targetrange.Cells(4, 11) = j
    Module3.Innner_Mesh
  Next j
Next Evolve_No
i = No_of_i '=61

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

For j = 1 To No_of_j - 1 Step 1
    Targetrange.Cells(j + 1, 9) = Nkk_j(j)
    Targetrange.Cells(j + 1, 2) = Psi(i, j)
    Targetrange.Cells(j + 1, 4) = N(i, j)
    Targetrange.Cells(j + 1, 6) = P(i, j)
    Targetrange.Cells(j + 1, 3) = dltPsi(i, j)
    Targetrange.Cells(j + 1, 5) = dltN(i, j)
    Targetrange.Cells(j + 1, 7) = dltP(i, j)
    Targetrange.Cells(j + 1, 8) = R(i, j)
Next j
i = No_of_i
For j = 0 To No_of_j
    Targetrange.Cells(j + 1, 16) = Psi(i, j) * Psi0
    Targetrange.Cells(j + 1, 19) = N(i, j) * C0
    Targetrange.Cells(j + 1, 20) = P(i, j) * C0
Next j
End Sub

Sub InitialValue()
    For i = 1 To No_of_i - 1
        For j = 1 To No_of_j
            Psi(i, j) = 0
        Next j
    Next i

    For i = 1 To i_C
        For j = j_C To No_of_j
            N(i, j) = N(0, 60) 'equal to the value at A
            P(i, j) = P(0, 60) 'equal to the value at A
        Next j
    Next i

    For i = i_C + 1 To i_E - 1
        For j = j_G To No_of_j

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

N(i, j) = N(0, 0)
P(i, j) = P(0, 0)
Next j
Next i
For i = 1 To No_of_i - 1
  For j = 1 To j_G - 1
    N(i, j) = N(0, 0)
    P(i, j) = P(0, 0)
  Next j
Next i
For i = i_E To No_of_i - 1
  For j = j_G To No_of_j
    N(i, j) = N(61, 60)
    P(i, j) = P(61, 60)
  Next j
Next i
End Sub

Option Explicit
Public Const Vap As Single = 0
Public Const Qint As Single = 1.602E-19
Public Const Sn As Single = 0.1
Public Const Sp As Single = 0.1
Public s0 As Single
Public Const epsrn0 As Single = 8.85418E-14
Public Const Ut As Single = 1
Public Const NI As Single = 14500000000#
Public Rsrff(14 To 47, 60 To 60) As Double
Public epsrnS, epsrnI As Single
Public Pohm, Nohm As Single
Public PsiBohm As Single
Public PsiOhm As Single

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Public kk As Integer
 Public Const Dc As Single = 11.9
 Public Const DcIns As Single = 3.9
 Public Nkk_i(100) As Integer
 Public Nkk_j(100) As Integer
 Public Nkk(100, 100) As Integer
 Public F1, F2, F3 As Double
 Public F1int, F2int, F3int As Double
 Public RepeatNo_of_Evolution As Long
 Public B, B1, B2, B3, B4 As Double
 Public x, x1B, x2B, x3B, x4B As Double
 Public Psi(0 To 100, 0 To 100) As Double
 Public N(0 To 100, 0 To 100) As Double
 Public P(0 To 100, 0 To 100) As Double
 Public dltPsi(100, 100), dltN(100, 1000), dltP(100, 100) As Double
 Public R(100, 100) As Double
 Public RnF1byRnPsi As Double
 Public RnF1byRnN As Double
 Public RnF1byRnP As Double
 Public RnF2byRnPsi As Double
 Public RnF2byRnN As Double
 Public RnF2byRnP As Double
 Public RnF3byRnPsi As Double
 Public RnF3byRnN As Double
 Public RnF3byRnP As Double
 Public RnF1intbyRnPsi As Double
 Public RnF1intbyRnN As Double
 Public RnF1intbyRnP As Double
 Public RnF2intbyRnPsi As Double
 Public RnF2intbyRnN As Double
 Public RnF2intbyRnP As Double
 Public RnF3intbyRnPsi As Double

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Public RnF3intbyRnN As Double

Public RnF3intbyRnP As Double

Public Const x1 As Double = -1E+308

Public Const x2 As Double = -0.000000000001

Public Const x3 As Double = 0.000000000001

Public Const x4 As Double = -0.000001

Public Const x5 As Double = 0.000001

Public Const x6 As Double = 700#

Public Const one As Double = 1#

Public Const zero As Double = 0#

Sub Inner_Mesh()

Dim s1, s2, s3, s4, s5, ss As Double

Dim t1, t2, t3, t4, TT As Double

Dim GR As Double

Dim RnB1byRnx1B, RnB2byRnx2B, RnB3byRnx3B, RnB4byRnx4B As Double

Dim RnRbyRnN, RnRbyRnP As Double

For kk = 1 To 1000

F1 = sqrt(RMDA * (1 / k(j)) * (Psi(i, j + 1) - Psi(i, j)) - 1 / k(j - 1) * (Psi(i, j) - Psi(i, j - 1))) * 2 /
(k(j - 1) + k(j)) - N(i, j) + P(i, j) + C(i, j)

GR = (N(i, j) * P(i, j) - (NI / CO) ^ 2) / Tau(i, j) / (N(i, j) + P(i, j) + 2 * (NI / CO))

R(i, j) = GR

x1B = (Psi(i, j + 1) - Psi(i, j)) / Ut: x = x1B: B1 = Bern(x)

x2B = (Psi(i, j) - Psi(i, j + 1)) / Ut: x = x2B: B2 = Bern(x)

x3B = (Psi(i, j) - Psi(i, j - 1)) / Ut: x = x3B: B3 = Bern(x)

x4B = (Psi(i, j - 1) - Psi(i, j)) / Ut: x = x4B: B4 = Bern(x)

F2 = N(i, j - 1) * Dn(i, j - 1 / 2) * B4 / k(j - 1) - N(i, j) * Dn(i, j - 1 / 2) * B3 / k(j - 1) _
- N(i, j) * Dn(i, j + 1 / 2) * B2 / k(j) + N(i, j + 1) * Dn(i, j + 1 / 2) * B1 / k(j) _
- R(i, j) * (k(j - 1) + k(j)) / 2

F3 = P(i, j - 1) * Dp(i, j - 1 / 2) * B3 / k(j - 1) - P(i, j) * Dp(i, j - 1 / 2) * B4 / k(j - 1) _
- P(i, j) * Dp(i, j + 1 / 2) * B1 / k(j) + P(i, j + 1) * Dp(i, j + 1 / 2) * B2 / k(j)
- R(i, j) * (k(j - 1) + k(j)) / 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{RnF1byRnPsi} = -\text{sqrRMDA} * (1 / \text{k(j)} + 1 / \text{k(j} - 1)) * 2 / (\text{k(j)} + \text{k(j} - 1))$$

$$\text{RnF1byRnN} = -1$$

$$\text{RnF1byRnP} = 1$$

$$x = x1B: \text{DerivB}(x): \text{RnB1byRnx1B} = \text{DerivB}(x)$$

$$x = x2B: \text{DerivB}(x): \text{RnB2byRnx2B} = \text{DerivB}(x)$$

$$x = x3B: \text{DerivB}(x): \text{RnB3byRnx3B} = \text{DerivB}(x)$$

$$x = x4B: \text{DerivB}(x): \text{RnB4byRnx4B} = \text{DerivB}(x)$$

$$\text{RnRbyRnN} = (\text{P}(i, j) + (\text{NI} / \text{C0})) ^ 2 / \text{Tau}(i, j) / (\text{N}(i, j) + \text{P}(i, j) + 2 * (\text{NI} / \text{C0})) ^ 2$$

$$\text{RnRbyRnP} = (\text{N}(i, j) + (\text{NI} / \text{C0})) ^ 2 / \text{Tau}(i, j) / (\text{N}(i, j) + \text{P}(i, j) + 2 * (\text{NI} / \text{C0})) ^ 2$$

$$\text{RnF2byRnPsi} = -\text{N}(i, j - 1) * \text{Dn}(i, j - 1 / 2) * \text{RnB4byRnx4B} / \text{Ut} / \text{k(j} - 1) _$$

$$- \text{N}(i, j) * \text{Dn}(i, j - 1 / 2) * \text{RnB3byRnx3B} / \text{Ut} / \text{k(j} - 1) _$$

$$- \text{N}(i, j) * \text{Dn}(i, j + 1 / 2) * \text{RnB2byRnx2B} / \text{Ut} / \text{k(j)} _$$

$$- \text{N}(i, j + 1) * \text{Dn}(i, j + 1 / 2) * \text{RnB1byRnx1B} / \text{Ut} / \text{k(j)}$$

$$\text{RnF2byRnN} = -\text{Dn}(i, j - 1 / 2) * \text{B3} / \text{k(j} - 1) - \text{Dn}(i, j + 1 / 2) * \text{B2} / \text{k(j)} _$$

$$- \text{RnRbyRnN} * (\text{k(j} - 1) + \text{k(j)}) / 2$$

$$\text{RnF2byRnP} = -\text{RnRbyRnP} * (\text{k(j} - 1) + \text{k(j)}) / 2$$

$$\text{RnF3byRnPsi} = \text{P}(i, j - 1) * \text{Dp}(i, j - 1 / 2) * \text{RnB3byRnx3B} / \text{Ut} / \text{k(j} - 1) _$$

$$+ \text{P}(i, j) * \text{Dp}(i, j - 1 / 2) * \text{RnB4byRnx4B} / \text{Ut} / \text{k(j} - 1) _$$

$$+ \text{P}(i, j) * \text{Dp}(i, j + 1 / 2) * \text{RnB1byRnx1B} / \text{Ut} / \text{k(j)} _$$

$$+ \text{P}(i, j + 1) * \text{Dp}(i, j + 1 / 2) * \text{RnB2byRnx2B} / \text{Ut} / \text{k(j)}$$

$$\text{RnF3byRnN} = -\text{RnRbyRnN} * (\text{k(j} - 1) + \text{k(j)}) / 2$$

$$\text{RnF3byRnP} = -\text{Dp}(i, j - 1 / 2) * \text{B4} / \text{k(j} - 1) - \text{Dp}(i, j + 1 / 2) * \text{B1} / \text{k(j)} _$$

$$- \text{RnRbyRnP} * (\text{k(j} - 1) + \text{k(j)}) / 2$$

Module4.simple_elim

If Abs(dltPsi(i, j)) < 0.0000000001 _

And Abs(dltN(i, j)) < 0.0000000001 _

And Abs(dltP(i, j)) < 0.0000000001 Then

Exit For

End If

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Next kk

Nkk_j(j) = kk - 1

Module3.SOR

End Sub

Sub SOR()

Dim omega As Single

Dim Psik, Nk, Pk As Double

Dim DPsikm, DNkm, DPkm As Double

Dim DPsikm1, DNkm1, DPkm1 As Double

omega = 0.2

Psik = Psi(i, j)

Nk = N(i, j)

Pk = P(i, j)

DPsikm = dltPsi(i, j)

DNkm = dltN(i, j)

DPkm = dltP(i, j)

F1 = sqrRMDA * (1 / k(j) * (Psi(i, j + 1) - Psik) - 1 / k(j - 1) * (Psik - Psi(i, j - 1))) *
2 / (k(j - 1) + k(j)) - (Nk + DNkm) + (Pk + DPkm) + C(i, j)

DPsikm1 = -omega * F1 / RnF1byRnPsi

x1B = (Psi(i, j + 1) - (Psik + DPsikm1)) / Ut: x = x1B: B1 = Bern(x)

x2B = ((Psik + DPsikm1) - Psi(i, j + 1)) / Ut: x = x2B: B2 = Bern(x)

x3B = ((Psik + DPsikm1) - Psi(i, j - 1)) / Ut: x = x3B: B3 = Bern(x)

x4B = (Psi(i, j - 1) - (Psik + DPsikm1)) / Ut: x = x4B: B4 = Bern(x)

F2 = N(i, j - 1) * Dn(i, j - 1 / 2) * B4 / k(j - 1) - Nk * Dn(i, j - 1 / 2) * B3 / k(j - 1) _

- Nk * Dn(i, j + 1 / 2) * B2 / k(j) + N(i, j + 1) * Dn(i, j + 1 / 2) * B1 / k(j) _

- (Nk * (Pk + DPkm) - (NI / C0) ^ 2) /

- Tau(i, j) / (Nk + (Pk + DPkm) + 2 * (NI / C0)) * (k(j - 1) + k(j)) / 2

DNkm1 = -omega * F2 / RnF2byRnN

F3 = P(i, j - 1) * Dp(i, j - 1 / 2) * B3 / k(j - 1) - Pk * Dp(i, j - 1 / 2) * B4 / k(j - 1) _

- Pk * Dp(i, j + 1 / 2) * B1 / k(j) + P(i, j + 1) * Dp(i, j + 1 / 2) * B2 / k(j) _

- ((Nk + DNkm1) * Pk - (NI / C0) ^ 2) / _

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Tau}(i, j) / ((Nk + DNkm1) + Pk + 2 * (NI / C0)) * (k(j - 1) + k(j)) / 2$$

$$\text{DPkm1} = -\text{omega} * F3 / \text{RnF3byRnP}$$

$$\text{Psi}(i, j) = \text{Psi}(i, j) + \text{DPsikm1}$$

$$N(i, j) = N(i, j) + \text{DNkm1}$$

$$P(i, j) = P(i, j) + \text{DPkm1}$$

End Sub

Option Explicit

Sub simple_elim()

Dim A(3, 3) As Double

Dim B(3) As Double

Dim x(3) As Double

Dim ii, jj As Integer

Dim cc, dd, ee, ff, gg, hh As Double

$$A(1, 1) = \text{RnF1byRnPsi}; A(1, 2) = \text{RnF1byRnN}; A(1, 3) = \text{RnF1byRnP}$$

$$A(2, 1) = \text{RnF2byRnPsi}; A(2, 2) = \text{RnF2byRnN}; A(2, 3) = \text{RnF2byRnP}$$

$$A(3, 1) = \text{RnF3byRnPsi}; A(3, 2) = \text{RnF3byRnN}; A(3, 3) = \text{RnF3byRnP}$$

$$B(1) = -F1$$

$$B(2) = -F2$$

$$B(3) = -F3$$

$$cc = A(2, 1) * A(1, 2) - A(1, 1) * A(2, 2)$$

$$dd = A(2, 1) * A(1, 3) - A(1, 1) * A(2, 3)$$

$$ee = A(2, 1) * B(1) - A(1, 1) * B(2)$$

$$ff = A(3, 1) * A(2, 2) - A(2, 1) * A(3, 2)$$

$$gg = A(3, 1) * A(2, 3) - A(2, 1) * A(3, 3)$$

$$hh = A(3, 1) * B(2) - A(2, 1) * B(3)$$

$$x(3) = (ee * ff - cc * hh) / (ff * dd - cc * gg)$$

$$x(2) = (cc * hh - cc * gg * x(3)) / (cc * ff)$$

$$x(1) = (B(3) - (A(3, 2) * x(2) + A(3, 3) * x(3))) / A(3, 1)$$

$$\text{dltPsi}(i, j) = x(1)$$

$$\text{dltN}(i, j) = x(2)$$

$$\text{dltP}(i, j) = x(3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Psi}(i, j) = \text{dltPsi}(i, j) + \text{Psi}(i, j)$$

$$\text{N}(i, j) = \text{dltN}(i, j) + \text{N}(i, j)$$

$$\text{P}(i, j) = \text{dltP}(i, j) + \text{P}(i, j)$$

End Sub

Function Bern(x)

If $-1\text{E}+308 < x$ And $x < x^2$ Then

$$\text{Bern} = x / (\text{Exp}(x) - \text{one})$$

ElseIf $x^2 < x$ And $x < x^3$ Then

$$\text{Bern} = 2 * \text{one} / (2 * \text{one} + x)$$

ElseIf $x^3 < x$ And $x \leq x^4$ Then

$$\text{Bern} = x / (\text{Exp}(x) - \text{one})$$

Else

$$\text{Bern} = x * \text{Exp}(-x)$$

End If

End Function

Function DerivB(x)

Dim Nom, Denom, Result As Double

If $x \leq x^5$ Then

$$\text{DerivB} = (\text{Exp}(x) - x * \text{Exp}(x) - 1) / ((\text{Exp}(x) - 1) ^ 2)$$

ElseIf $x \geq x^5$ And $x \leq x^6$ Then

$$\text{DerivB} = -(1 + x) / (2 + 2 * x + x ^ 2)$$

Else

$$\text{DerivB} = (\text{Exp}(-x) - x * \text{Exp}(-x) - (\text{Exp}(-x)) ^ 2) / (1 - 2 * \text{Exp}(-x) + (\text{Exp}(-x)) ^ 2)$$

$$\text{DerivB} = (\text{Exp}(x) - x * \text{Exp}(x) - 1) / ((\text{Exp}(x) - 1) ^ 2)$$

End If

End Function

Option Explicit

Sub Show_Psi_N_P()

Module1.EmitterAndBase_contot

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Worksheets("Psi").Select
Set Targetrange = Range("A1:CZ100")
For i = 0 To No_of_i
    For j = 0 To No_of_j + 1
        Targetrange.Cells(j + 2, i + 2) = ""
    Next j
Next i
For i = 0 To No_of_i
    Targetrange.Cells(1, i + 2) = i
    Targetrange.Cells(No_of_j + 4, i + 2) = i
    For j = 0 To No_of_j + 1
        Targetrange.Cells(j + 2, 1) = j
        Targetrange.Cells(j + 2, No_of_i + 4) = j
        Targetrange.Cells(j + 2, i + 2) = Psi(i, j) * Psi0
    Next j
Next i
Worksheets("N").Select
Set Targetrange = Range("A1:CZ100")
For i = 0 To No_of_i
    For j = 0 To No_of_j
        Targetrange.Cells(j + 2, i + 2) = ""
    Next j
Next i
'End clear
For i = 0 To No_of_i
    Targetrange.Cells(1, i + 2) = i
    Targetrange.Cells(No_of_j + 4, i + 2) = i
    For j = 0 To No_of_j
        Targetrange.Cells(j + 2, 1) = j
        Targetrange.Cells(j + 2, No_of_i + 4) = j
        Targetrange.Cells(j + 2, i + 2) = N(i, j) * C0
    Next j

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Next i
Worksheets("P").Select
Set Targetrange = Range("A1:CZ100")
For i = 0 To No_of_i
    For j = 0 To No_of_j + 1
        Targetrange.Cells(j + 2, i + 2) = ""
    Next j
Next i
For i = 0 To No_of_i
    Targetrange.Cells(1, i + 2) = i
    Targetrange.Cells(No_of_j + 4, i + 2) = i
For j = 0 To No_of_j
    Targetrange.Cells(j + 2, 1) = j
    Targetrange.Cells(j + 2, No_of_i + 4) = j
    Targetrange.Cells(j + 2, i + 2) = P(i, j) * C0
Next j
Next i
End Sub

Sub Interface_inner()
Dim Trm1, Trm2 As Double
Dim Trm3 As Double
Dim jjnx_phlf, jjnx_mhlf As Double
Dim jjny_mhlf As Double
Dim jjpx_phlf, jjpx_mhlf As Double
Dim jjpy_mhlf As Double
Dim Rnjjnx_phlfRnPsi, Rnjjnx_mhlfRnPsi, Rnjjny_mhlfRnPsi As Double
Dim Rnjjnx_phlfRnN, Rnjjnx_mhlfRnN, Rnjjny_mhlfRnN As Double
Dim Rnjjpx_phlfRnPsi, Rnjjpx_mhlfRnPsi, Rnjjpy_mhlfRnPsi As Double
Dim Rnjjpx_phlfRnP, Rnjjpx_mhlfRnP, Rnjjpy_mhlfRnP As Double
epsrnS = Dc * epsrn0: epsrnI = DcIns * epsrn0
For kN = 1 To 1000

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Targetrange.Cells(13, 5) = kN

$$\text{Trm1} = ((\text{Psi}(i + 1, j) - \text{Psi}(i, j)) / h(i) - (\text{Psi}(i, j) - \text{Psi}(i - 1, j)) / h(i - 1)) / (h(i - 1) + h(i)) * 2:$$

$$\begin{aligned} \text{Trm2} = & (\text{epsrnl} * (\text{Psi}(i, j + 1) - \text{Psi}(i, j)) / k(j) - \\ & \text{epsrnS} * (\text{Psi}(i, j) - \text{Psi}(i, j - 1)) / k(j - 1) + \text{Qint}) / \\ & (\text{epsrnl} * k(j) + \text{epsrnS} * k(j - 1)) * 2: \end{aligned}$$

$$\text{Trm3} = \text{epsrnS} * k(j - 1) / (\text{epsrnl} * k(j) + \text{epsrnS} * k(j - 1)) * (\text{N}(i, j) - \text{P}(i, j) - \text{C}(i, j)):$$

$$\text{F1int} = \text{sqrRMDA} * (\text{Trm1} + \text{Trm2}) - \text{Trm3}$$

$$x1B = (\text{Psi}(i, j - 1) - \text{Psi}(i, j)) / \text{Ut}; x = x1B; B1 = \text{Bern}(x):$$

$$x2B = (\text{Psi}(i - 1, j) - \text{Psi}(i, j)) / \text{Ut}; x = x2B; B2 = \text{Bern}(x):$$

$$x3B = (\text{Psi}(i, j) - \text{Psi}(i, j - 1)) / \text{Ut}; x = x3B; B3 = \text{Bern}(x):$$

$$x4B = (\text{Psi}(i, j) - \text{Psi}(i - 1, j)) / \text{Ut}; x = x4B; B4 = \text{Bern}(x):$$

$$x5B = (\text{Psi}(i, j) - \text{Psi}(i + 1, j)) / \text{Ut}; x = x5B; B5 = \text{Bern}(x):$$

$$x7B = (\text{Psi}(i + 1, j) - \text{Psi}(i, j)) / \text{Ut}; x = x7B; B7 = \text{Bern}(x)$$

$$R(i, j) = (\text{N}(i, j) * \text{P}(i, j) - (\text{NI} / \text{C0})^2) / \text{Tau}(i, j) / ((\text{N}(i, j) + \text{P}(i, j) + 2 * \text{NI} / \text{C0}))$$

$$\text{Rsrfl}(i, j) = (\text{N}(i, j) * \text{P}(i, j) - (\text{NI} / \text{C0})^2) / (1 / (\text{Sn} / \text{s0})) / (\text{N}(i, j) + \text{P}(i, j) + 2 * \text{NI} / \text{C0})$$

$$\text{jjnx_phlf} = \text{Dn}(i + 1 / 2, j) * (B5 * \text{N}(i, j) - B7 * \text{N}(i + 1, j)) / h(i)$$

$$\text{jjnx_mhlfl} = \text{Dn}(i - 1 / 2, j) * (B2 * \text{N}(i - 1, j) - B4 * \text{N}(i, j)) / h(i - 1):$$

$$\text{jjny_mhlfl} = \text{Dn}(i, j - 1 / 2) * (B1 * \text{N}(i, j - 1) - B3 * \text{N}(i, j)) / k(j - 1):$$

$$\begin{aligned} \text{F2int} = & (-\text{jjnx_phlf} + \text{jjnx_mhlfl}) * 2 / (h(i - 1) + h(i)) + \\ & 2 * \text{jjny_mhlfl} - 2 * \text{Rsrfl}(i, j)) / k(j - 1) - R(i, j) \end{aligned}$$

$$\text{jjpx_phlf} = \text{Dp}(i + 1 / 2, j) / h(i) * (B5 * \text{P}(i + 1, j) - B7 * \text{P}(i, j)):$$

$$\text{jjpx_mhlfl} = \text{Dp}(i - 1 / 2, j) * (B2 * \text{P}(i, j) - B4 * \text{P}(i - 1, j)) / h(i - 1):$$

$$\text{jjpy_mhlfl} = \text{Dp}(i, j - 1 / 2) * (B1 * \text{P}(i, j) - B3 * \text{P}(i, j - 1)) / k(j - 1):$$

$$\begin{aligned} \text{F3int} = & (\text{jjpx_phlf} - \text{jjpx_mhlfl}) * 2 / (h(i - 1) + h(i)) + \\ & (-2 * \text{jjpy_mhlfl} - 2 * \text{Rsrfl}(i, j)) / k(j - 1) - R(i, j) \end{aligned}$$

$$\text{RnF1intbyRnPsi} = -2 * \text{sqrRMDA} * (1 / h(i - 1) / h(i) + 1 / k(j - 1) / k(j)) * _$$

$$(\text{epsrnl} * k(j - 1) + \text{epsrnS} * k(j)) / (\text{epsrnl} * k(j) + \text{epsrnS} * k(j - 1)):$$

$$\text{RnF1intbyRnN} = -\text{epsrnS} * k(j - 1) / (\text{epsrnl} * k(j) + \text{epsrnS} * k(j - 1))$$

$$\text{RnF1intbyRnP} = \text{epsrnS} * k(j - 1) / (\text{epsrnl} * k(j) + \text{epsrnS} * k(j))$$

$$x = x1B; \text{DerivB}(x); \text{RnB1byRnx1B} = \text{DerivB}(x):$$

$$x = x2B; \text{DerivB}(x); \text{RnB2byRnx2B} = \text{DerivB}(x):$$

$$x = x3B; \text{DerivB}(x); \text{RnB3byRnx3B} = \text{DerivB}(x):$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x = x4B: \text{DerivB}(x): \text{RnB4byRnx4B} = \text{DerivB}(x):$$

$$x = x5B: \text{DerivB}(x): \text{RnB5byRnx5B} = \text{DerivB}(x):$$

$$x = x7B: \text{DerivB}(x): \text{RnB7byRnx7B} = \text{DerivB}(x):$$

$$\text{Rnjninx_phlfRnPsi} = \text{Dn}(i + 1 / 2, j) / \text{Ut} / \text{h}(i) * _$$

$$(\text{RnB5byRnx5B} * \text{N}(i, j) + \text{RnB7byRnx7B} * \text{N}(i + 1, j)):$$

$$\text{Rnjninx_mhlfrRnPsi} = -\text{Dn}(i - 1 / 2, j) / \text{Ut} / \text{h}(i - 1) * _$$

$$(\text{RnB2byRnx2B} * \text{N}(i - 1, j) + \text{RnB4byRnx4B} * \text{N}(i, j)):$$

$$\text{Rnjjnny_mhlfrRnPsi} = -\text{Dn}(i, j - 1 / 2) / \text{Ut} / \text{k}(j - 1) * _$$

$$(\text{RnB1byRnx1B} * \text{N}(i, j - 1) + \text{RnB3byRnx3B} * \text{N}(i, j)):$$

$$\text{RnF2intbyRnPsi} = -2 / (\text{h}(i - 1) + \text{h}(i)) * (\text{Rnjninx_phlfRnPsi} - _$$

$$\text{Rnjninx_mhlfrRnPsi}) + 2 / \text{k}(j - 1) * \text{Rnjjnny_mhlfrRnPsi}$$

$$\text{Rnjninx_phlfRnN} = \text{Dn}(i + 1 / 2, j) / \text{h}(i) * \text{B5}:$$

$$\text{Rnjninx_mhlfrRnN} = -\text{Dn}(i - 1 / 2, j) / \text{h}(i - 1) * \text{B4}:$$

$$\text{Rnjjnny_mhlfrRnN} = -\text{Dn}(i, j - 1 / 2) / \text{k}(j - 1) * \text{B3}:$$

$$\text{RnRbyRnN} = (\text{P}(i, j) + \text{NI} / \text{CO}) ^ 2 / \text{Tau}(i, j) / (\text{N}(i, j) + \text{P}(i, j) + 2 * \text{NI} / \text{CO}) ^ 2:$$

$$\text{RnRsurfbyRnN} = (\text{P}(i, j) + \text{NI} / \text{CO}) ^ 2 / (1 / (\text{Sn} / \text{s0})) / (\text{N}(i, j) + \text{P}(i, j) + 2 * \text{NI} / \text{CO}) ^ 2:$$

$$\text{RnF2intbyRnN} = 2 / (\text{h}(i - 1) + \text{h}(i)) * (-\text{Rnjninx_phlfRnN} + \text{Rnjninx_mhlfrRnN}) + _$$

$$2 / \text{k}(j - 1) * (\text{Rnjjnny_mhlfrRnN} - \text{RnRsurfbyRnN}) - \text{RnRbyRnN}$$

$$\text{RnRsurfbyRnP} = (\text{N}(i, j) + \text{NI} / \text{CO}) ^ 2 / (1 / (\text{Sn} / \text{s0})) / (\text{N}(i, j) + \text{P}(i, j) + 2 * \text{NI} / \text{CO}) ^ 2:$$

$$\text{RnRbyRnP} = (\text{N}(i, j) + \text{NI} / \text{CO}) ^ 2 / \text{Tau}(i, j) / (\text{N}(i, j) + \text{P}(i, j) + 2 * \text{NI} / \text{CO}) ^ 2:$$

$$\text{RnF2intbyRnP} = -2 / \text{k}(j - 1) * \text{RnRsurfbyRnP} - \text{RnRbyRnP}$$

$$\text{Rnjjpx_phlfRnPsi} = \text{Dp}(i + 1 / 2, j) / \text{Ut} / \text{h}(i) * _$$

$$(\text{RnB5byRnx5B} * \text{P}(i + 1, j) + \text{RnB7byRnx7B} * \text{P}(i, j)):$$

$$\text{Rnjjpx_mflfrRnPsi} = -\text{Dp}(i - 1 / 2, j) / \text{Ut} / \text{h}(i - 1) * _$$

$$(\text{RnB2byRnx2B} * \text{P}(i, j) + \text{RnB4byRnx4B} * \text{P}(i - 1, j)):$$

$$\text{Rnjjpy_mhlfrRnPsi} = -\text{Dp}(i, j - 1 / 2) / \text{Ut} / \text{k}(j - 1) * _$$

$$(\text{RnB1byRnx1B} * \text{P}(i, j) + \text{RnB3byRnx3B} * \text{P}(i, j - 1)):$$

$$\text{RnF3intbyRnPsi} = 2 / (\text{h}(i - 1) + \text{h}(i)) * (\text{Rnjjpx_phlfRnPsi} - \text{Rnjjpx_mflfrRnPsi}) - _$$

$$2 / \text{k}(j - 1) * \text{Rnjjpy_mhlfrRnPsi}$$

$$\text{RnF3intbyRnN} = -2 / \text{k}(j - 1) * \text{RnRsurfbyRnN} - \text{RnRbyRnN}$$

$$\text{Rnjjpx_phlfRnP} = -\text{Dp}(i + 1 / 2, j) / \text{h}(i) * \text{B7}:$$

$$\text{Rnjjpx_mflfrRnP} = \text{Dp}(i - 1 / 2, j) / \text{h}(i - 1) * \text{B2}:$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Rnjjpy_mhlfRnP = Dp(i, j - 1 / 2) / k(j - 1) * B1:
RnF3intbyRnP = 2 / (h(i - 1) + h(i)) * (Rnjpx_phlfRnP - Rnjpx_mflfRnP) - _
                2 / k(j - 1) * (Rnjpy_mhlfRnP + RnRsurfbyRnP) RnRbyRnP
RnF1byRnPsi = RnF1intbyRnPsi
RnF1byRnN = RnF1intbyRnN
RnF1byRnP = RnF1intbyRnP
RnF2byRnPsi = RnF2intbyRnPsi
RnF2byRnN = RnF2intbyRnN
RnF2byRnP = RnF2intbyRnP
RnF3byRnPsi = RnF3intbyRnPsi
RnF3byRnN = RnF3intbyRnN
RnF3byRnP = RnF3intbyRnP
F1 = F1int
    F2 = F2int
        F3 = F3int
            Module4.simple_elim
If Abs(dltPsi(i, j)) < 0.0000000001 _
    And Abs(dltN(i, j)) < 0.0000000001 _
    And Abs(dltP(i, j)) < 0.0000000001 Then
Exit For
End If
Next kN
Nkk(i, j) = kN - 1
    Psi(i, j) = Psi(i, j) + dltPsi(i, j)
    N(i, j) = N(i, j) + dltN(i, j)
    P(i, j) = P(i, j) + dltP(i, j)
Targetrange.Cells(2, 10) = Nkk(i, j)
    Targetrange.Cells(2, 5) = i
    Targetrange.Cells(2, 6) = j
        Targetrange.Cells(5, 2) = Psi(i, j)
        Targetrange.Cells(5, 4) = N(i, j)
        Targetrange.Cells(5, 6) = P(i, j)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Targetrange.Cells(5, 3) = dltPsi(i, j)
Targetrange.Cells(5, 5) = dltN(i, j)
Targetrange.Cells(5, 7) = dltP(i, j)
Targetrange.Cells(5, 8) = R(i, j)

```

```
End Sub
```

```
Option Explicit
```

```
Sub Two_dim()
```

```
Worksheets("sheet8").Select
```

```
Set Targetrange = Range("A1:Z100")
```

```
s0 = D0 / x0
```

```
Targetrange.Cells(1, 11) = Vap
```

```
For RepeatNo_of_Evolution = 1 To 50
```

```
Targetrange.Cells(12, 5) = RepeatNo_of_Evolution
```

```
  j = 60:
```

```
    For i = 14 To 47
```

```
      Targetrange.Cells(14, 5) = i
```

```
      Targetrange.Cells(15, 5) = j
```

```
      Module6.Interface_inner
```

```
    Next i
```

```
  For j = 59 To 1 Step -1
```

```
    For i = 1 To No_of_i - 1
```

```
      Targetrange.Cells(14, 5) = i
```

```
      Targetrange.Cells(15, 5) = j
```

```
      Module8.Inner_mesh
```

```
    Next i
```

```
  Next j
```

```
For j = 59 To 1 Step -1
```

```
  For i = No_of_i - 1 To 1 Step -1
```

```
    Targetrange.Cells(14, 5) = i
```

```
    Targetrange.Cells(15, 5) = j
```

```
    Module8.Inner_mesh
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Next i

Next j

j = 60:

For i = 47 To 14 Step -1

Targetrange.Cells(14, 5) = i

Targetrange.Cells(15, 5) = j

Module6.Interface_inner

Next i

Targetrange.Cells(7, 5) = RepeatNo_of_Evolution

Next RepeatNo_of_Evolution

End Sub

Sub Inner_mesh()

For kN = 1 To 1000

Targetrange.Cells(13, 5) = kN

$$F1 = \text{Psi}(i, j - 1) * \text{sqrRMDA} * (h(i - 1) + h(i)) / 2 / k(j - 1) +$$

$$\text{Psi}(i - 1, j) * \text{sqrRMDA} * (k(j - 1) + k(j)) / 2 / h(i - 1) -$$

$$\text{Psi}(i, j) * \text{sqrRMDA} * ((h(i - 1) + h(i)) / 2 / k(j - 1) +$$

$$(k(j - 1) + k(j)) / 2 / h(i - 1) +$$

$$(k(j - 1) + k(j)) / 2 / h(i) +$$

$$(h(i - 1) + h(i)) / 2 / k(j)) +$$

$$\text{Psi}(i + 1, j) * \text{sqrRMDA} * (k(j - 1) + k(j)) / 2 / h(i) +$$

$$\text{Psi}(i, j + 1) * \text{sqrRMDA} * (h(i - 1) + h(i)) / 2 / k(j) -$$

$$(N(i, j) - P(i, j) - C(i, j)) * (h(i - 1) + h(i)) / 2 * (k(j - 1) + k(j)) / 2$$

x1B = (Psi(i, j - 1) - Psi(i, j)) / Ut: x = x1B: B1 = Bern(x)

x2B = (Psi(i - 1, j) - Psi(i, j)) / Ut: x = x2B: B2 = Bern(x)

x3B = (Psi(i, j) - Psi(i, j - 1)) / Ut: x = x3B: B3 = Bern(x)

x4B = (Psi(i, j) - Psi(i - 1, j)) / Ut: x = x4B: B4 = Bern(x)

x5B = (Psi(i, j) - Psi(i + 1, j)) / Ut: x = x5B: B5 = Bern(x)

x6B = (Psi(i, j) - Psi(i, j + 1)) / Ut: x = x6B: B6 = Bern(x)

x7B = (Psi(i + 1, j) - Psi(i, j)) / Ut: x = x7B: B7 = Bern(x)

x8B = (Psi(i, j + 1) - Psi(i, j)) / Ut: x = x7B: B8 = Bern(x)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R(i, j) = (N(i, j) * P(i, j) - (NI / C0) ^ 2) / \text{Tau}(i, j) * (N(i, j) + P(i, j) + 2 * NI / C0))$$

$$F2 = N(i, j - 1) * Dn(i, j - 1 / 2) * B1 * (h(i - 1) + h(i)) / 2 / k(j - 1) + _$$

$$N(i - 1, j) * Dn(i - 1 / 2, j) * B2 * (k(j - 1) + k(j)) / 2 / h(i - 1) - _$$

$$N(i, j) * (Dn(i, j - 1 / 2) * B3 * (h(i - 1) + h(i)) / 2 / k(j - 1) + _$$

$$Dn(i - 1 / 2, j) * B4 * (k(j - 1) + k(j)) / 2 / h(i - 1) + _$$

$$Dn(i + 1 / 2, j) * B5 * (k(j - 1) + k(j)) / 2 / h(i) + _$$

$$Dn(i, j + 1 / 2) * B6 * (h(i - 1) + h(i)) / 2 / k(j)) + _$$

$$N(i + 1, j) * Dn(i + 1 / 2, j) * B7 * (k(j - 1) + k(j)) / 2 / h(i) + _$$

$$N(i, j + 1) * Dn(i, j + 1 / 2) * B8 * (h(i - 1) + h(i)) / 2 / k(j) - _$$

$$R(i, j) * (h(i - 1) + h(i)) / 2 * (k(j - 1) + k(j)) / 2$$

$$F3 = P(i, j - 1) * Dp(i, j - 1 / 2) * B3 * (h(i - 1) + h(i)) / 2 / k(j - 1) + _$$

$$P(i - 1, j) * Dp(i - 1 / 2, j) * B4 * (k(j - 1) + k(j)) / 2 / h(i - 1) - _$$

$$P(i, j) * (Dp(i, j - 1 / 2) * B1 * (h(i - 1) + h(i)) / 2 / k(j - 1) + _$$

$$Dp(i - 1 / 2, j) * B2 * (k(j - 1) + k(j)) / 2 / h(i - 1) + _$$

$$Dp(i + 1 / 2, j) * B7 * (k(j - 1) + k(j)) / 2 / h(i) + _$$

$$Dp(i, j + 1 / 2) * B8 * (h(i - 1) + h(i)) / 2 / k(j)) + _$$

$$P(i + 1, j) * Dp(i + 1 / 2, j) * B5 * (k(j - 1) + k(j)) / 2 / h(i) + _$$

$$P(i, j + 1) * Dp(i, j + 1 / 2) * B6 * (h(i - 1) + h(i)) / 2 / k(j) - _$$

$$R(i, j) * (h(i - 1) + h(i)) / 2 * (k(j - 1) + k(j)) / 2$$

$$\text{RnF1byRnPsi} = -\text{sqrRMDA} * ((h(i - 1) + h(i)) / 2 / k(j - 1) + _$$

$$(k(j - 1) + k(j)) / 2 / h(i - 1) + _$$

$$(k(j - 1) + k(j)) / 2 / h(i) + _$$

$$(h(i - 1) + h(i)) / 2 / k(j))$$

$$\text{RnF1byRnN} = -(h(i - 1) + h(i)) / 2 * (k(j - 1) + k(j)) / 2$$

$$\text{RnF1byRnP} = (h(i - 1) + h(i)) / 2 * (k(j - 1) + k(j)) / 2$$

$$x = x1B: \text{DerivB}(x): \text{RnB1byRnx1B} = \text{DerivB}(x)$$

$$x = x2B: \text{DerivB}(x): \text{RnB2byRnx2B} = \text{DerivB}(x)$$

$$x = x3B: \text{DerivB}(x): \text{RnB3byRnx3B} = \text{DerivB}(x)$$

$$x = x4B: \text{DerivB}(x): \text{RnB4byRnx4B} = \text{DerivB}(x)$$

$$x = x5B: \text{DerivB}(x): \text{RnB5byRnx5B} = \text{DerivB}(x)$$

$$x = x6B: \text{DerivB}(x): \text{RnB6byRnx6B} = \text{DerivB}(x)$$

$$x = x7B: \text{DerivB}(x): \text{RnB7byRnx7B} = \text{DerivB}(x)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x = x8B: \text{DerivB}(x): \text{RnB8byRnx8B} = \text{DerivB}(x)$$

$$\text{RnF2byRnPsi} = -N(i, j - 1) * Dn(i, j - 1 / 2) * \text{RnB1byRnx1B} * 1 / \text{Ut} * (h(i - 1) + h(i)) / 2 / k(j - 1)$$

$$- N(i - 1, j) * Dn(i - 1 / 2, j) * \text{RnB2byRnx2B} * 1 / \text{Ut} * (k(j - 1) + k(j)) / 2 / h(i - 1) _$$

$$- N(i, j) * (Dn(i, j - 1 / 2) * \text{RnB3byRnx3B} * 1 / \text{Ut} * (h(i - 1) + h(i)) / 2 / k(j - 1) + _$$

$$Dn(i - 1 / 2, j) * \text{RnB4byRnx4B} * 1 / \text{Ut} * (k(j - 1) + k(j)) / 2 / h(i - 1) + _$$

$$Dn(i + 1 / 2, j) * \text{RnB5byRnx5B} * 1 / \text{Ut} * (k(j - 1) + k(j)) / 2 / h(i) + _$$

$$Dn(i, j + 1 / 2) * \text{RnB6byRnx6B} * 1 / \text{Ut} * (h(i - 1) + h(i)) / 2 / k(j)) _$$

$$- N(i + 1, j) * Dn(i + 1 / 2, j) * \text{RnB7byRnx7B} * 1 / \text{Ut} * (k(j - 1) + k(j)) / 2 / h(i) _$$

$$- N(i, j + 1) * Dn(i, j + 1 / 2) * \text{RnB8byRnx8B} * 1 / \text{Ut} * (h(i - 1) + h(i)) / 2 / k(j)$$

$$\text{RnRbyRnN} = (P(i, j) + \text{NI} / \text{C0}) ^ 2 / \text{Tau}(i, j) / (N(i, j) + P(i, j) + 2 * \text{NI} / \text{C0}) ^ 2$$

$$\text{RnF2byRnN} = -Dn(i, j - 1 / 2) * B3 * (h(i - 1) + h(i)) / 2 / k(j - 1) _$$

$$- Dn(i - 1 / 2, j) * B4 * (k(j - 1) + k(j)) / 2 / h(i - 1) _$$

$$- Dn(i + 1 / 2, j) * B5 * (k(j - 1) + k(j)) / 2 / h(i) _$$

$$- Dn(i, j + 1 / 2) * B6 * (h(i - 1) + h(i)) / 2 / k(j) _$$

$$- \text{RnRbyRnN} * (h(i - 1) + h(i)) / 2 * (k(j - 1) + k(i)) / 2$$

$$\text{RnRbyRnP} = (N(i, j) + \text{NI} / \text{C0}) ^ 2 / \text{Tau}(i, j) / (N(i, j) + P(i, j) + 2 * \text{NI} / \text{C0}) ^ 2$$

$$\text{RnF2byRnP} = -\text{RnRbyRnP} * (h(i - 1) + h(i)) / 2 * (k(j - 1) + k(j)) / 2$$

$$\text{RnF3byRnPsi} = _$$

$$P(i, j - 1) * Dp(i, j - 1 / 2) * \text{RnB3byRnx3B} * 1 / \text{Ut} * (h(i - 1) + h(i)) / 2 / k(j - 1) _$$

$$+ P(i - 1, j) * Dp(i - 1 / 2, j) * \text{RnB4byRnx4B} * 1 / \text{Ut} * (k(j - 1) + k(j)) / 2 / h(i - 1) _$$

$$+ P(i, j) * (Dp(i, j - 1 / 2) * \text{RnB1byRnx1B} * 1 / \text{Ut} * (h(i - 1) + h(i)) / 2 / k(j - 1) + _$$

$$Dp(i - 1 / 2, j) * \text{RnB2byRnx2B} * 1 / \text{Ut} * (k(j - 1) + k(j)) / 2 / h(i - 1) + _$$

$$Dp(i + 1 / 2, j) * \text{RnB7byRnx7B} * 1 / \text{Ut} * (k(j - 1) + k(j)) / 2 / h(i) + _$$

$$Dp(i, j + 1 / 2) * \text{RnB8byRnx8B} * 1 / \text{Ut} * (h(i - 1) + h(i)) / 2 / k(j)) _$$

$$+ P(i + 1, j) * Dp(i + 1 / 2, j) * \text{RnB5byRnx5B} * 1 / \text{Ut} * (k(j - 1) + k(j)) / 2 / h(i) _$$

$$+ P(i, j + 1) * Dp(i, j + 1 / 2) * \text{RnB6byRnx6B} * 1 / \text{Ut} * (h(i - 1) + h(i)) / 2 / k(j)$$

$$\text{RnF3byRnN} = -\text{RnRbyRnN} * (h(i - 1) + h(i)) / 2 * (k(j - 1) + k(j)) / 2$$

$$\text{RnF3byRnP} = -Dp(i, j - 1 / 2) * B1 * (h(i - 1) + h(i)) / 2 / k(j - 1) _$$

$$- Dp(i - 1 / 2, j) * B2 * (k(j - 1) + k(j)) / 2 / h(i - 1) _$$

$$- Dp(i + 1 / 2, j) * B7 * (k(j - 1) + k(j)) / 2 / h(i) _$$

$$- Dp(i, j + 1 / 2) * B8 * (h(i - 1) + h(i)) / 2 / k(j) _$$

$$- \text{RnRbyRnP} * (h(i - 1) + h(i)) / 2 * (k(j - 1) + k(j)) / 2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Module4.simple_elim

If Abs(dltPsi(i, j)) < 0.0000000001 _

And Abs(dltN(i, j)) < 0.0000000001 _

And Abs(dltP(i, j)) < 0.0000000001 Then

Exit For

End If

Next kN

Nkk(i, j) = kN - 1

Psi(i, j) = Psi(i, j) + dltPsi(i, j)

N(i, j) = N(i, j) + dltN(i, j)

P(i, j) = P(i, j) + dltP(i, j)

Targetrange.Cells(2, 10) = Nkk(i, j)

Targetrange.Cells(2, 5) = i

Targetrange.Cells(2, 6) = j

Targetrange.Cells(5, 2) = Psi(i, j)

Targetrange.Cells(5, 4) = N(i, j)

Targetrange.Cells(5, 6) = P(i, j)

Targetrange.Cells(5, 3) = dltPsi(i, j)

Targetrange.Cells(5, 5) = dltN(i, j)

Targetrange.Cells(5, 7) = dltP(i, j)

Targetrange.Cells(5, 8) = R(i, j)

End Sub

Option Explicit

Sub All_for_Two_Dim()

[DomainMesh&PhysicalParameter.xls].[Module1].Scaling_factor

[DomainMesh&PhysicalParameter.xls].[Module1].Map_parameters

Worksheets("Psi").Select

Set Targetrange = Range("A1:CZ100")

For i = 0 To 61

For j = 0 To 61

Psi(i, j) = Targetrange.Cells(2 + j, 2 + i) / Psi0

```

Next j
Next i
Worksheets("N").Select
    Set Targetrange = Range("A1:CZ100")
For i = 0 To 61
    For j = 0 To 60
N(i, j) = Targetrange.Cells(2 + j, 2 + i) / C0
        Next j
Next i
Worksheets("P").Select
Set Targetrange = Range("A1:CZ100")
For i = 0 To 61
    For j = 0 To 60
P(i, j) = Targetrange.Cells(2 + j, 2 + i) / C0
        Next j
Next i
Module7.Two_dim
Module10.Show_Eval_Psi_N_P
End Sub

Option Explicit
Sub Show_Eval_Psi_N_P()
Worksheets("EvalPsi").Select
Set Targetrange = Range("A1:CZ100")
For i = 0 To No_of_i
Targetrange.Cells(1, i + 2) = i
Targetrange.Cells(No_of_j + 4, i + 2) = i
    For j = 0 To No_of_j + 1
        Targetrange.Cells(j + 2, 1) = j
        Targetrange.Cells(j + 2, No_of_i + 4) = j
        Targetrange.Cells(j + 2, i + 2) = Psi(i, j) * Psi0
    Next j

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Next i
Worksheets("EvalN").Select
Set Targetrange = Range("A1:CZ100")
For i = 0 To No_of_i
    Targetrange.Cells(1, i + 2) = i
    Targetrange.Cells(No_of_j + 4, i + 2) = i
For j = 0 To No_of_j
    Targetrange.Cells(j + 2, 1) = j
    Targetrange.Cells(j + 2, No_of_i + 4) = j
    Targetrange.Cells(j + 2, i + 2) = N(i, j) * C0

```

```
Next j
```

```

Next i
Worksheets("EvalP").Select
Set Targetrange = Range("A1:CZ100")
For i = 0 To No_of_i
    Targetrange.Cells(1, i + 2) = i
    Targetrange.Cells(No_of_j + 4, i + 2) = i
For j = 0 To No_of_j
    Targetrange.Cells(j + 2, 1) = j
    Targetrange.Cells(j + 2, No_of_i + 4) = j
    Targetrange.Cells(j + 2, i + 2) = P(i, j) * C0

```

```
Next j
```

```

Next i
Worksheets("Eval R").Select
Set Targetrange = Range("A1:CZ100")
For i = 0 To No_of_i
    Targetrange.Cells(1, i + 2) = i
    Targetrange.Cells(No_of_j + 4, i + 2) = i
For j = 0 To No_of_j
    Targetrange.Cells(j + 2, 1) = j
    Targetrange.Cells(j + 2, No_of_i + 4) = j
    Targetrange.Cells(j + 2, i + 2) = R(i, j) * R0

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    Next j
  Next i
End Sub

Option Explicit

Sub All_for_Two_Dim_OffSpring()
[DomainMesh&PhysicalParameter.xls].[Module1].Scaling_factor
[DomainMesh&PhysicalParameter.xls].[Module1].Map_parameters

s0 = D0 / x0

Worksheets("EvalPsi").Select
Set Targetrange = Range("A1:CZ100")
For j = 0 To 61
For i = 0 To 61
Psi(i, j) = Targetrange.Cells(2 + j, 2 + i) / Psi0
  Next i
Next j
Worksheets("EvalN").Select
Set Targetrange = Range("A1:CZ100")
For j = 0 To 60
For i = 0 To 61
  N(i, j) = Targetrange.Cells(2 + j, 2 + i) / C0
Next i
Next j
Worksheets("EvalP").Select
Set Targetrange = Range("A1:CZ100")
For j = 0 To 60
  For i = 0 To 61
    P(i, j) = Targetrange.Cells(2 + j, 2 + i) / C0 'scaled
  Next i
Next j

```



```

Next j
j = 60:
  For i = 47 To 14 Step -1 '
    Targetrange.Cells(14, 5) = i
    Targetrange.Cells(15, 5) = j
    Module6.Interface_inner
  Next i
  Targetrange.Cells(7, 5) = RepeatNo_of_Evolution
Next RepeatNo_of_Evolution
Module10.Show_Eval_Psi_N_P
Dim Ended_at As Date
Worksheets("sheet8").Select
Set Targetrange = Range("A1:CZ100")
Ended_at = Now
Targetrange.Cells(3, 13) = Ended_at
End Sub

Option Explicit
Sub IMREF_potetial()
Dim phi_N(0 To 100, 0 To 100) As Single
Dim phi_P(0 To 100, 0 To 100) As Single
Psi0 = Bk * T / q
C0 = Na
Worksheets("EvalPsi").Select
Set Targetrange = Range("A1:CZ100")
For j = 0 To 61
  For i = 0 To 61
    Psi(i, j) = Targetrange.Cells(2 + j, 2 + i) / Psi0
  Next i
Next j
Worksheets("EvalN").Select
Set Targetrange = Range("A1:CZ100")

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

For j = 0 To 60
For i = 0 To 61
    N(i, j) = Targetrange.Cells(2 + j, 2 + i) / C0
Next i
Next j
Worksheets("EvalP").Select
Set Targetrange = Range("A1:CZ100")
For j = 0 To 60
    For i = 0 To 61
        P(i, j) = Targetrange.Cells(2 + j, 2 + i) / C0 'scaled
    Next i
Next j
For i = 0 To 61
    For j = 24 To 60
        phi_N(i, j) = Psi(i, j) - Log(N(i, j) / (NI / C0))
        phi_P(i, j) = Psi(i, j) + Log(P(i, j) / (NI / C0))
    Next j
Next i
Worksheets("Phi_N").Select
Set Targetrange = Range("A1:CZ100")
For i = 0 To No_of_i
    Targetrange.Cells(1, i + 2) = i
    Targetrange.Cells(No_of_j + 4, i + 2) = i
For j = 24 To No_of_j'
    Targetrange.Cells(j + 2, 1) = j
    Targetrange.Cells(j + 2, No_of_i + 4) = j
    Targetrange.Cells(j + 2, i + 2) = phi_N(i, j) * Psi0
Next j
Next i
Worksheets("Phi_P").Select
Set Targetrange = Range("A1:CZ100")
For i = 0 To No_of_i

```

```

Targetrange.Cells(1, i + 2) = i
    Targetrange.Cells(No_of_j + 4, i + 2) = i
For j = 0 To No_of_j
    Targetrange.Cells(j + 2, 1) = j
    Targetrange.Cells(j + 2, No_of_i + 4) = j
    Targetrange.Cells(j + 2, i + 2) = phi_P(i, j) * Psi0
Next j
Next i
End Sub

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพีเอ็นหนึ่งมิติโดย วิธีผลต่างสืบเนื่อง

Electrical Characteristic Simulation of One Dimensional PN Junction with Finite Difference Method

สมชาติ พนาเกษม สราวุธ วิศวแสงสุข สุรศักดิ์ เนียมเจริญ โยอิชิ ยาซุมุระ วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง
ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้ นำเสนอการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อชนิดพีเอ็นหนึ่งมิติด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่อง หลักการวิธีนี้เกิดจากการนำเอาสมการฟิสิกส์ ซึ่งประกอบด้วยสมการปัวร์ซอง สมการความต่อเนื่องของอิเล็กตรอนและสมการความต่อเนื่องของโฮล มาทำเป็นสมการผลต่างสืบเนื่องหนึ่งมิติ โดยมีพารามิเตอร์ที่สนใจคือ ศักย์ไฟฟ้าสถิต ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและความหนาแน่นของโฮลจากนั้นทำการหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีนิวตัน ซึ่งจะช่วยให้ทราบค่าของตัวแปรต่าง ๆ บนสารกึ่งตัวนำที่ตำแหน่งต่าง ๆ กันแล้ว จากนั้นนำมาเขียนเป็นกราฟ เพื่อแสดงค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ของรอยต่อสารกึ่งตัวนำ

Abstract

This paper presents the electrical characteristic simulation of one dimensional pn junction with finite difference method. The principle of this method is to use the physical equations that consist of Poisson equation, continuity equation for electron and hole to make one dimensional finite difference equation. The interesting parameters are electrostatic potential, electron concentration and hole concentration. Then, the parameter values are carried out by Newton method. So, this method can show the values of parameters in semiconductor at various positions. Thus, the values are plotted in graph for showing the various properties of semiconductor junction.

1. บทนำ

ในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำจะใช้การจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เพื่อประหยัดเวลาและต้นทุนในการสร้างและเข้าใจถึงปรากฏการณ์ต่าง ๆ ดังนั้นในบทความนี้จึงได้เสนอการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้า

ของรอยต่อพีเอ็นซึ่งเป็นรอยต่อที่มีความสำคัญมากแล้วทำการศึกษาค่าศักย์ไฟฟ้าสถิต ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ความหนาแน่นของโฮล ที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนชิ้นสารกึ่งตัวนำด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่องซึ่งจะทำให้เข้าใจถึงปรากฏการณ์ต่าง ๆ ได้ดียิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทฤษฎีและหลักการ

2.1 สมการพื้นฐานของปัญหา [1]

สมการพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ในบทความนี้จะกำหนดให้อยู่ในสภาวะคงตัว (steady state) โดยมีสมการพื้นฐานดังนี้คือ

สมการ Poisson

$$\nabla^2 \psi = \frac{q}{\epsilon} (n - p - c) \quad (1)$$

สมการความต่อเนื่องของอิเล็กตรอน

$$\text{div} J_n - q \frac{\partial n}{\partial t} = qR(\psi, n, p) \quad (2)$$

สมการความต่อเนื่องของโฮล

$$\text{div} J_p + q \frac{\partial p}{\partial t} = -qR(\psi, n, p) \quad (3)$$

สมการความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

$$n = n_i \exp\left(\frac{q(\psi - \varphi_n)}{kT}\right) \quad (4)$$

สมการความหนาแน่นของโฮล

$$p = n_i \exp\left(\frac{q(\varphi_p - \psi)}{kT}\right) \quad (5)$$

จะพบว่าสมการที่ต้องพิจารณามีถึงสามสมการ โดยที่

J_n และ J_p สามารถกำหนดได้ดังนี้

$$J_n = -q(\mu_n n \cdot \text{grad} \psi - D_n \text{grad} n) \quad (6)$$

$$J_p = -q(\mu_p p \cdot \text{grad} \psi + D_p \text{grad} p) \quad (7)$$

จากนั้นเราสามารถนำสมการ (6) และ (7) แทนลงในสมการ (2) และ (3) ตามลำดับและจัดรูปสมการ (1),(2) และ (3) ได้ดังนี้คือ

$$\nabla^2 \psi - \frac{q}{\epsilon} (n - p - c) = 0 \quad (8)$$

$$\text{div}(D_n \cdot \text{grad} n - \mu_n n \cdot \text{grad} \psi) - R(\psi, n, p) = \frac{\partial n}{\partial t} \quad (9)$$

$$\text{div}(D_p \cdot \text{grad} p + \mu_p p \cdot \text{grad} \psi) - R(\psi, n, p) = \frac{\partial p}{\partial t} \quad (10)$$

สำหรับในบทความนี้จะระบอศึกษาในส่วนของสภาวะคงตัว ดังนั้นในเทอมของ $\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial t} = 0$

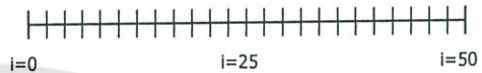
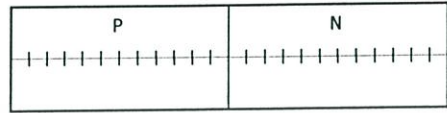
$$\lambda^2 \nabla^2 \psi - n + p + c = 0 \quad (11)$$

$$\text{div}(D_n \cdot \text{grad} n - \mu_n n \cdot \text{grad} \psi) - R(\psi, n, p) = 0 \quad (12)$$

$$\text{div}(D_p \cdot \text{grad} p + \mu_p p \cdot \text{grad} \psi) - R(\psi, n, p) = 0 \quad (13)$$

2.2 การประยุกต์วิธีผลต่างสืบเนื่อง

ใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องประยุกต์สมการ Poisson สมการความต่อเนื่องของอิเล็กตรอนและสมการความต่อเนื่องของโฮล โดยทำการแบ่งชิ้นสารออกเป็นช่วงย่อย ๆ ซึ่งเรียกว่า mesh ดังรูปที่ 1. หลังจากนั้นจะนำสมการดังกล่าวมาทำเป็นสมการผลต่างสืบเนื่อง 1 มิติ ดังนี้



รูปที่ 1. แสดงการแบ่งชิ้นสารออกเป็นช่วงย่อย ๆ

$$F_1 = \frac{\lambda^2}{h^2} (\psi_{i+1} + \psi_{i-1} - 2\psi_i) - n_i + p_i + c$$

$$F_2 = D_n \frac{1}{h} \left[B_1 \left(\frac{\psi_{i+1} - \psi_i}{U_t} \right) n_{i+1} - B_2 \left(\frac{\psi_i - \psi_{i+1}}{U_t} \right) n_i \right] + D_n \frac{1}{h} \left[-B_3 \left(\frac{\psi_i - \psi_{i-1}}{U_t} \right) n_i + B_4 \left(\frac{\psi_{i-1} - \psi_i}{U_t} \right) n_{i-1} \right]$$

$$F_3 = -D_p \frac{1}{h} \left[B_1 \left(\frac{\psi_{i+1} - \psi_i}{U_t} \right) p_i - B_2 \left(\frac{\psi_i - \psi_{i+1}}{U_t} \right) p_{i+1} \right] + D_p \frac{1}{h} \left[-B_3 \left(\frac{\psi_i - \psi_{i-1}}{U_t} \right) p_{i-1} + B_4 \left(\frac{\psi_{i-1} - \psi_i}{U_t} \right) p_i \right]$$

โดยที่

F_1 คือ Poisson 's Equation

F_2 คือ สมการความต่อเนื่องของอิเล็กตรอน

F_3 คือ สมการความต่อเนื่องของโฮล.

ψ คือ ศักย์ไฟฟ้าสถิตย์

n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

p คือ ความหนาแน่นของโฮล

D_n คือ สัมประสิทธิ์การแพร่สำหรับอิเล็กตรอน

D_p คือ สัมประสิทธิ์การแพร่สำหรับโฮล

h คือ ระยะห่างระหว่าง mesh

U_t คือ thermal voltage

B คือ ฟังก์ชัน Bernuli

C คือ ความหนาแน่นของสารเจือที่ถูกไอออนไนซ์

φ_n คือ ระดับพลังงานควอไซต์ Fermi ของอิเล็กตรอน

φ_p คือ ระดับพลังงานควอไซต์ Fermi ของโฮล

i คือ ตำแหน่งที่ต่าง ๆ บนชิ้นสารกึ่งตัวนำ

2.3 การกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขต[2]

ในการออกแบบการคำนวณการจำลองด้วยวิธีผลต่างสลับเนื่อง จะต้องมีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของชั้นงานเนื่องจากการเป็นกราค่าในหนึ่งมิติ ดังนั้นขอบเขตของชั้นงานจึงมีเพียงสองด้านเท่านั้น โดยขอบเขตอยู่ในช่วง $i = 0$ ถึง $i = 50$

ในส่วนของชั้นสาร P

$$\psi(0) = \psi_1$$

$$\psi_{b1} = -\frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_a}{2N_i} + \sqrt{\left(\frac{N_a}{2N_i} \right)^2 + 1} \right)$$

$$\psi_1 = \psi_{b1} + V_{ap}$$

$$\rho(0) = \frac{\sqrt{N_a^2 + 4N_i^2} + N_a}{2}$$

$$n(0) = \frac{N_i^2}{\rho(0)}$$

ในส่วนของชั้นสาร N

$$\psi(50) = \psi_2$$

$$\psi_2 = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_d}{2N_i} + \sqrt{\left(\frac{N_d}{2N_i} \right)^2 + 1} \right)$$

$$n(50) = \frac{\sqrt{N_d^2 + 4N_i^2} + N_d}{2}$$

$$\rho(50) = \frac{N_i^2}{n(50)}$$

2.4 การกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปร[3]

ในการแก้สมการหาค่าตัวแปรนั้นมีความจำเป็นอย่างยั้งที่เราจะต้องกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปรแล้วจากนั้นจะค่อยให้โปรแกรมเริ่มทำการคำนวณโดยค่าเริ่มต้นจะกำหนดดังนี้ในส่วน p-region จะกำหนดให้ $\psi(i) = 0$, $\rho(i) = N_a$ และ $n(i) = N_i^2 / \rho(i)$ และในส่วน n-region จะกำหนดให้ $\psi(i) = 0$ $n(i) = N_d$ และ $\rho(i) = N_i^2 / n(i)$

2.5 การแก้ปัญหาด้วยวิธี Newton Gauss Seidel[1],[3]

ตามปกติวิธีการแก้สมการไม่เป็นเชิงเส้น เราสามารถใช้วิธีของนิวตัน (Newton method) ร่วมกับวิธีเกาส์ไฮด์เดล (Gauss Seidel) และสามารถประมาณค่าด้วยวิธีการทำซ้ำ ซึ่งสามารถกำหนดได้ว่า

$$F(\psi, n, \rho) = \begin{bmatrix} F_1(\psi, n, \rho) \\ F_2(\psi, n, \rho) \\ F_3(\psi, n, \rho) \end{bmatrix} = 0$$

สามารถนำสมการ F_1, F_2, F_3 มาทำเป็นวิธีนิวตันสามารถเขียนอยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

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

โดยที่

$$\delta\psi^k = \psi^{k+1} - \psi^k$$

$$\delta n^k = n^{k+1} - n^k$$

$$\delta\rho^k = \rho^{k+1} - \rho^k$$

โดยที่ k คือค่าทำซ้ำ (iterative)

จากนั้นนำสมการ F_1, F_2 และ F_3 มาทำการอนุพันธ์เทียบกับค่า ψ, n และ ρ เพื่อนำค่าไปแสดงผลด้วยวิธีนิวตัน

$$\frac{\partial F_1}{\partial \psi} = -\frac{2\lambda^2}{h^2}$$

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

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

$$\frac{\partial F_2}{\partial \psi} = -D_n \frac{1}{h} \frac{1}{U_t} \left(\frac{\partial B_1}{\partial x_1} n_{i+1} + \frac{\partial B_2}{\partial x_2} n_i + \frac{\partial B_3}{\partial x_3} n_i + \frac{\partial B_4}{\partial x_4} n_{i-1} \right)$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial n} = D_n \frac{1}{h} \left[B_2 \left(\frac{\psi_i - \psi_{i+1}}{U_t} \right) + B_3 \left(\frac{\psi_i - \psi_{i-1}}{U_t} \right) \right]$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial \rho} = 0$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial \psi} = D_p \frac{1}{h} \frac{1}{U_t} \left(\frac{\partial B_1}{\partial x_1} \rho_i + \frac{\partial B_2}{\partial x_2} \rho_{i+1} + \frac{\partial B_3}{\partial x_3} \rho_{i-1} + \frac{\partial B_4}{\partial x_4} \rho_i \right)$$

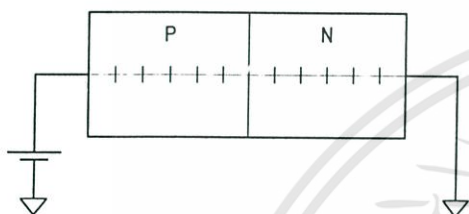
$$\frac{\partial F_3}{\partial n} = 0$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial \rho} = -D_n \frac{1}{h} \left[B_1 \left(\frac{\psi_{i+1} - \psi_i}{U_t} \right) + B_4 \left(\frac{\psi_{i-1} - \psi_i}{U_t} \right) \right]$$

3. การเขียนโปรแกรมในการจำลอง

ในการคำนวณค่าของศักย์ไฟฟ้าสถิตย์, ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและหนาแน่นของโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็น โดยอาศัยหลักการวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมมาประยุกต์ใช้กับสมการพื้นฐานดังที่แสดงมาข้างต้นและสามารถแก้สมการด้วยวิธี นิวตันแกสส์ไซด์เดล จากนั้นนำมาเขียนโปรแกรมด้วย Visual Basic

4. ผลการคำนวณและวิเคราะห์ผล



รูปที่ 2. แสดงการจำลองโครงสร้างของรอยต่อ pn

ในบทความนี้ได้กำหนดคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดคอนไว้ดังนี้

$$T = 300K, N_d = 5 \times 10^{15} cm^{-3}$$

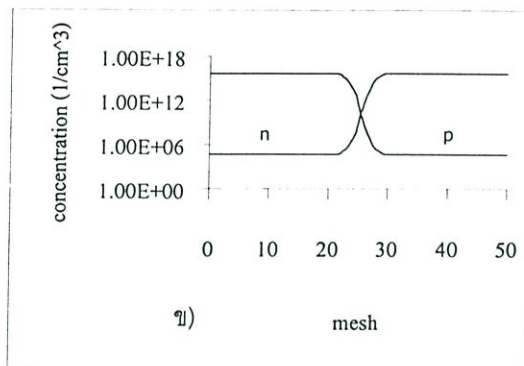
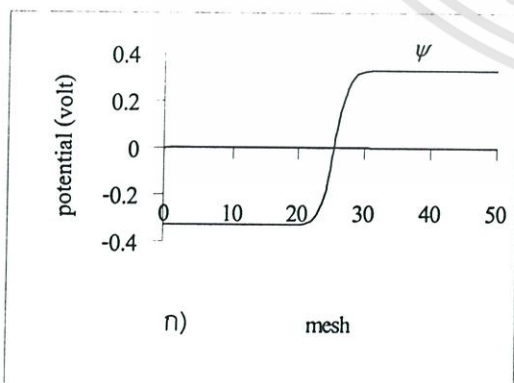
$$N_a = 5 \times 10^{15} cm^{-3}, E_g = 1.12eV$$

$$D_{np} = 30cm^2 / sec, D_{pp} = 9cm^2 / sec$$

$$D_{pn} = 9cm^2 / sec, D_{nn} = 30cm^2 / sec$$

$$\tau_{np} = 3 \times 10^{-6} sec, \tau_{pn} = 2 \times 10^{-6} sec$$

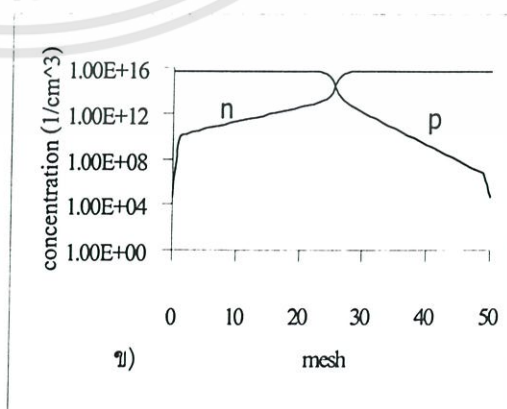
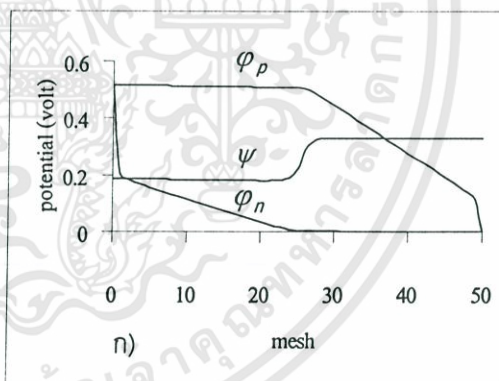
$$N_i = 1.45 \times 10^{10} cm^{-3}$$



รูปที่ 3. ผลการจำลองขณะให้แรงดันไบอัสเท่ากับ 0 V ก) แสดงผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตย์

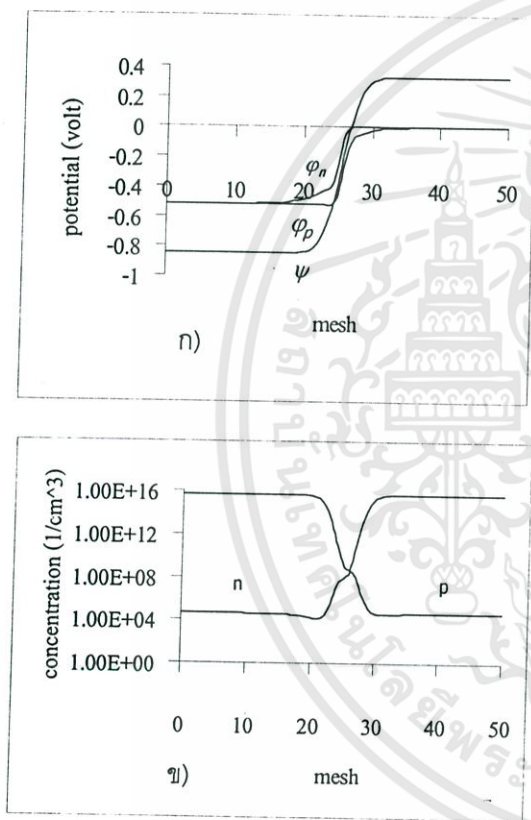
ข) แสดงผลของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮล

จากผลการจำลองขณะไม่ให้แรงดันไบอัสทำให้ทราบค่าของศักย์ไฟฟ้าสถิตย์ที่จุดต่าง ๆ โดยที่ผลต่างของศักย์ไฟฟ้าสถิตย์มีค่า 0.66 โวลต์และศักย์ไฟฟ้าสถิตย์จะมีค่า 0 โวลต์ที่รอยต่อพีเอ็นและทำให้ทราบค่าการกระจายความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลที่จุดต่าง ๆ ตลอดชิ้นงานและการลดลงของอิเล็กตรอนและโฮลในบริเวณเขตปลอดพาหะและจำนวนของอิเล็กตรอนและโฮลจะเท่ากันที่รอยต่อพีเอ็น



รูปที่ 4. ผลการจำลองขณะให้แรงดันไบอัสเท่ากับ 0.517V
ก) แสดงผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตย์

ข) แสดงผลของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮล
จากผลการจำลองขณะให้แรงดันไบอัส 0.517
โวลต์ ทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสถิตย์มีค่าลดลงเหลือ
0.149 โวลต์และความกว้างของบริเวณปลอดพาหะลดลง
และอิเล็กตรอนในส่วนของ n สามารถข้ามรอยต่อไปใน
ส่วนของ p ได้เพิ่มขึ้นและโฮลในส่วนของ p สามารถ
ข้ามรอยต่อไปในส่วนของ n ได้เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4. เนื่อง
จากค่าของศักย์ไฟฟ้าสถิตย์มีค่าลดลง



รูปที่ 5. ผลการจำลองขณะให้แรงดันไบอัสเท่ากับ
-0.517 V

ก) แสดงผลของศักย์ไฟฟ้าสถิตย์

ข) แสดงผลความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮล

จากผลการจำลองขณะให้แรงดันไบอัส -0.517
โวลต์ทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสถิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น
1.176 โวลต์และความกว้างของบริเวณปลอดพาหะเพิ่ม
ขึ้นและอิเล็กตรอนในส่วนของ n สามารถข้ามรอยต่อไป
ส่วนของ p ได้น้อยลงและโฮลในส่วนของ p สามารถ

ข้ามรอยต่อไปในส่วนของ n ได้น้อยลงเนื่องจากค่าของ
ศักย์ไฟฟ้าสถิตย์มีค่าเพิ่มขึ้น

5. สรุป

ในบทความนี้ได้แสดงผลการคำนวณด้วยวิธีผล
ต่างสืบเนื่องเพื่อแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าสถิตย์ ความหนาแน่น
ของอิเล็กตรอนและความหนาแน่นของโฮล บนชั้นสารกึ่ง
ตัวนำในแต่ละจุด (mesh) ซึ่งผลการคำนวณสามารถ
เปลี่ยนแปลงแรงดันไบอัสค่าต่าง ๆ ได้ และค่าคุณสมบัติ
ทางฟิสิกส์ของชั้นสารกึ่งตัวนำได้ ทำให้สามารถเห็นถึง
การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าในหนึ่งมิติ และต่อ
ไปยังสามารถนำสมการผลต่างสืบเนื่องหนึ่งมิติไปทำเป็น
สองมิติได้เพื่อดูคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ของอุปกรณ์
ประเภท planar

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์
และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ให้การสนับสนุนงบ
วิจัยและทดลองจนค่าเล่าเรียน ภายใต้โครงการทุนบัณฑิต
ศึกษาภายในประเทศ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] S.M. Sze, "Physics of Semiconductor Device,"
Wiley Inter Science 2nd Edition, 1981.
- [2] S. Selberherr, "Analysis and Simulation of
Semiconductor Device," Springer-Verlag Wein
New York, 1984.
- [3] C.M. Snowden, "Semiconductor Device
Modelling," Peter Peregrinus Ltd. London, 1988.
- [4] C. Kincaid and W. Cheney, "Numerical Analysis,"
Brooks Publishing Company, 2nd Edition, 1996.
- [5] F. Gerald and O. Wheatley, "Applied Numerical
Analysis," Addison-Wesley, 6th Edition, 1999.
- [6] สมเกียรติ ศุภเดช, "ตั้งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ,"
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ.2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายสมชาติ พนาเกษม
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 24 ธันวาคม พ.ศ.2517
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาอิเล็กทรอนิกส์ เกียรตินิยมอันดับสอง
สถาบันที่สำเร็จการศึกษา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2541
ผลงานวิจัย	การจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพีเอ็นหนึ่งมิติโดยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม วิจัยสารลาดกระบัง ปีที่ 18 ฉบับที่ 1 หน้า 19
ทุนที่ได้รับ	ทุนกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ภายใต้โครงการทุนบัณฑิตศึกษาภายในประเทศ เป็นระยะเวลา 2 ปี ทุนสนับสนุนวิทยานิพนธ์ ประจำปีงบประมาณ 2544