

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การจำลองแบบเซลล์แสงอาทิตย์ใน 1 มิติ



1- DIMENSION SIMULATION OF SOLAR CELLS



ภา ชธาธิรัตน์
PHAO CHATHIRAT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ 2547

จพ.
๑ 8127
2547

เลขหมู่.....

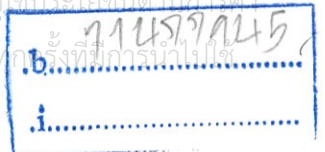
เลขทะเบียน..... 58611

วัน,เดือน,ปี..... 27 กค 2549

ISBN 974-15-1314-9

ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่ยังมีการนำไปใช้



1- DIMENSION SIMULATION OF SOLAR CELLS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRONICS ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2004

ISBN 974-15-1314-9
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2004

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองแบบเซลล์แสงอาทิตย์ใน 1 มิติ
นักศึกษา	นางสาวภา ชาริรัตน์
รหัสประจำตัว	43061331
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ	2547
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.สมศักดิ์ เชียรศิริกุล
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.โยอิชิ ยาซุมุระ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงถึงวิธีการนำการจำลองแบบเซลล์แสงอาทิตย์ในหนึ่งมิติ ช่วยในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อ p-n สำหรับปัญหาที่น่าสนใจต่างๆ เช่น การลดลงของศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอยต่อ p-n และศักย์ไฟฟ้าที่คงที่นอกบริเวณรอยต่อตามแนวความยาวของตัวเซลล์ โดยพิจารณาค่าความหนาแน่นพาหะอิเล็กตรอนและโฮลที่เป็นพาหะส่วนน้อยที่เข้าสู่ด้าน p และด้าน n ซึ่งเป็นตัวแปรสำหรับการคำนวณค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า รวมถึงค่าการเกิด/การรวมตัวใหม่ของพาหะ และค่าความหนาแน่นกระแสบริเวณปลอดพาหะ ค่าอัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสงบริเวณผิวหน้านั้นจะมากที่สุดและลดลงตามระยะความลึกของตัวเซลล์ อัตราการเกิดพาหะที่ผิวหน้านี้อาจจะเข้าร่วมกับพาหะอิเล็กตรอนทางด้าน n และโฮลทางด้าน p และใช้เพื่อคำนวณค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ารวมทั้งหมดที่เกิดจากแสงนี้ ส่วนแสงที่มีความยาวคลื่นแบบต่อเนื่องจะส่งผลในการเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้าที่ตัวเซลล์ แสงที่มีความยาวคลื่นเดียวจะทำให้เกิดการดูดกลืนโฟตอนได้ไม่เต็มที่ จะทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าลดลงจากเดิม นอกจากนี้ยังมีปัญหาที่สำคัญมากเข้ามาเกี่ยวข้อง คือการสะท้อนแสงบริเวณผิวหน้าของเซลล์แสงอาทิตย์ หากมีการสะท้อนแสงที่ผิวมากจะส่งผลในการเกิดอิเล็กตรอนและโฮลน้อยลง ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงในแต่ละค่ามีผลในการเกิดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มเติม และพิจารณาระยะความลึกของรอยต่อ p-n หากมีความลึกของรอยต่อมาก แสงจะเข้าไปยังบริเวณรอยต่อน้อย หรือหากอยู่ตื้นเกินไป จะทำให้เกิดการรวมพาหะที่ผิวหน้ามาก ตัวแปรที่กล่าวถึงข้างต้นแสดงให้เห็นว่ามีความสำคัญมากในการหาประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

Thesis Title	1- Dimension Simulation of Solar Cells
Student	Miss. Phao Chathirat
Student ID.	43061331
Degree	Master of Engineering
Programme	Electronics Engineering
Year	2004
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Somsak Cheersirikul
Co-Advisor	Assoc.Prof. Yoichi Yasumura

ABSTRACT

This thesis utilizes a solar cell model in one dimension to analyze the electrical properties of p-n junction solar cell, including the decreasing of electric potential in the p-n junction and the constant electric potential along this cell. These are explained by considering the electron and hole carrier densities, both carriers are minority carriers entering the p and n region. Carriers mentioned above are main parameters for current density calculations, carriers generation and recombination and current density in the depletion region. Carrier generation rate from exposed light is maximum at the surface and decreasing along the cell depth. The carrier generation rate at the surface is added up to electron in the n region and to holes in the p region. This rate is a parameter for electric current density calculation resulted from exposed light. Light with continuous wavelength increases electric current whereas single wavelength light with poor photon absorption results in reducing this electric current density. There are also problems from light reflections around the solar cell surface. With the high level of surface reflection, the electron and hole generations will decrease. The light reflection coefficients for reflections and electric current density are then analyzed in addition with the dept of p-n junction which is the limiting factor for light intensity, or high junction dept lower light intensity in low junction dept and vice versa. Parameters mentioned above show that they are very vital for determining the solar cell efficiency of operation.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ.สมศักดิ์ เทียรศิริกุล เป็นอย่างสูงสำหรับคำแนะนำ ความรู้ และความเอาใจใส่ดูแลต่างๆ ที่ได้รับ เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ด้วยดีตลอดมา และขอขอบพระคุณ Assoc.Prof Yoichi Yasumura ที่ให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการ และการเขียนโปรแกรม Visual C++ เป็นอย่างดีตลอดมา และ อีกท่านหนึ่งที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์คือขอขอบพระคุณ รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล และขอขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่าน และเจ้าหน้าที่ในศูนย์วิจัย อิเล็กทรอนิกส์ ที่ให้ความอำนวยความสะดวกในการค้นคว้าข้อมูลต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณอาจารย์คณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน

ขอขอบคุณ นายโสภณ พรหมชัย ที่ช่วยให้คำปรึกษาในการเขียนโปรแกรม Visual C++ เป็นอย่างดีตลอดมา และเพื่อนๆ พี่ๆ ที่ช่วยในการอำนวยความสะดวกเรื่องทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

และสุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสละดี คุณแม่เกษร คุณน้ำ ยาย และน้องๆ ที่คอยห่วงใยสุขภาพและให้การสนับสนุนการศึกษาในครั้งนี้

ภา ชารัตน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
สัญลักษณ์.....	XI
ศัพท์เทคนิค.....	XIV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
	1.7
บทที่ 2 เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น.....	5
2.1 ปรากฏการณ์ที่รอยต่อพี-เอ็นอยู่ในภาวะสมดุล.....	5
2.2 กระบวนการเกิดและการรวมตัวใหม่ของพาหะ.....	7
2.2.1 กระแสการเกิดเมื่อได้รับแรงดันย้อนกลับ.....	8
2.2.2 กระแสการรวมตัวใหม่ไปอัสไปข้างหน้า.....	10
2.3 คุณสมบัติพื้นฐานของแสง.....	12
2.3.1 การเป็นคลื่นของแสง.....	12
2.3.2 การเป็นอนุภาคของแสง.....	15
2.4 การดูดกลืนแสงพื้นฐาน.....	17
2.4.1 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ.....	17
2.5 ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิกของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น.....	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 กลไกการดูดกลืนแสงและการผลิตกระแสไฟฟ้าโฟโต.....	26
2.7 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์.....	29
2.8 ลักษณะสมบัติของพารามิเตอร์ที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์.....	30
บทที่ 3 การออกแบบโปรแกรมและการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์.....	35
3.1 การออกแบบการคำนวณในโปรแกรม.....	35
3.2 สร้างสมการที่ใช้คำนวณ.....	37
3.3 กรณีกำหนดเงื่อนไขขอบเขต.....	40
3.4 การสเกลตัวแปร.....	44
3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและ Quasi-Fermi potential.....	45
3.6 การจำลองแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ ที่เกี่ยวข้องกับการเซลล์แสงอาทิตย์กรณีที่ได้รับแสง.....	46
3.6.1 การหาค่ากระแสไฟฟ้าโฟโตในย่าน N^+	46
3.6.2 การหาค่ากระแสไฟฟ้าโฟโตในย่าน P	50
3.7 การออกแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในลักษณะหนึ่งมิติ.....	52
3.8 การออกแบบความกว้างของเมช.....	55
3.9 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม.....	57
3.10 ไดอะล็อกของโปรแกรมที่ใช้งานแบบ 1 มิติ.....	59
บทที่ 4 ผลลัพธ์โปรแกรมในส่วนการคำนวณแบบ 1 มิติ.....	60
4.1 ผลของการคำนวณหาค่าศักย์ไฟฟ้า.....	61
4.2 ผลของการคำนวณความหนาแน่นของพาหะกรณีที่ยังไม่มีแสง.....	62
4.3 ผลของการคำนวณความหนาแน่นของพาหะเนื่องจากแสงอาทิตย์.....	64
4.4 ค่าอัตราการเกิด/การรวมตัวใหม่ของพาหะ.....	65
4.5 ค่าอัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสง.....	68
4.6 ผลของการคำนวณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า.....	74

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6.1 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เกิดจาก อัตราการผลิต/การรวมตัวใหม่ของพาหะ.....	74
4.6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า.....	75
4.7 ผลของการคำนวณค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสง.....	76
4.7.1 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของ อัตราการผลิตพาหะเนื่องจากแสง.....	76
4.7.2 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสง กรณีที่ยังไม่มีสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง.....	77
4.7.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสง กับสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง.....	78
4.7.4 ความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสง กับค่าระยะความลึกของรอยต่อพี-เอ็น.....	81
4.8 ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์.....	82
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	84
เอกสารอ้างอิง.....	87
ภาคผนวก ก.....	89
ภาคผนวก ข.....	90
ประวัติผู้เขียน.....	134

สารบัญตาราง

ตาราง

หน้า

- 1 ตารางเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นพหุหะที่ได้กับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสง.....82



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ก่อนที่จะเกิดรอยต่อ.....	5
2.2 แสดงรอยต่อพี-เอ็นเมื่อสัมผัสกันแล้วเข้าสู่สภาวะสมดุล.....	6
2.3 กระบวนการเกิดในรอยต่อพี-เอ็นเมื่อไบอัสย้อนกลับ.....	8
2.4 ขนาดเปรียบเทียบของอัตราการรวมตัวใหม่ตลอดบริเวณ ปลอดพาหะของรอยต่อพี-เอ็นเมื่อได้รับไบอัสไปข้างหน้า.....	11
2.5 ความถี่และความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่างๆ.....	13
2.6 สเปกตรัมความไวต่อแสงของสายตามนุษย์.....	14
2.7 การทดลองการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก.....	16
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความถี่ของแสงใน ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกกระแสไฟฟ้าจะเริ่มไหลเมื่อความถี่ของแสงสูงกว่าค่าๆหนึ่ง.....	16
2.9 แสดงการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล โดยแสงในสารกึ่งตัวนำ.....	18
2.10 การดูดกลืนทางแสงที่ระยะทางที่แตกต่างกัน.....	18
2.11 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเป็นความสัมพันธ์กับ ความยาวคลื่นของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ.....	20
2.12 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอัตราการเกิดพาหะ เมื่อเทียบกับความลึกของเซลล์แสงอาทิตย์.....	22
2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับความยาวคลื่นและอุณหภูมิ	23
2.14 ก แสดงการเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลที่ด้านเอ็นและพี.....	24
2.14 ข แสดงพาหะส่วนเกินแพร่ข้ามย่านปลอดพาหะ.....	24
2.14 ค แสดงการเคลื่อนที่อิเล็กตรอนและโฮลไหลข้ามรอยต่อโดยสนามไฟฟ้า.....	25
2.14 ง แสดงการเกิดแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด(Open Circuit Voltage; V_{OC}).....	25
2.15 กลไกการดูดกลืนแสงแบบต่างๆในรอยต่อพี-เอ็น.....	27
2.16 การลดลงของกำลังของแสงตามระยะทางความลึกจากผิว ของสารกึ่งตัวนำย่านปลอดพาหะอยู่ระหว่างตำแหน่ง x_1 และ x_2	28
2.17 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น.....	29
2.18 แสดงลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์.....	31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 แสดงแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นที่ยังไม่มีการได้ปด้านหลัง.....	53
3.2 แสดงค่าความหนาแน่นพาหะส่วนเกินที่ได้จากการดูดกลืนแสงในด้านเอ็นและด้านพี.....	53
3.3 แสดงแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นในลักษณะ 1 มิติ.....	54
3.4 กำหนดตำแหน่งและระยะห่างระหว่างเมซ.....	55
3.5 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำการออกแบบเมซ.....	56
3.6 แสดงการออกแบบเมซที่ใช้ในการคำนวณ.....	56
3.7 แสดง Flow chart การทำงานของโปรแกรมจำลองแบบเซลล์แสงอาทิตย์ใน 1 มิติ.....	57
3.8 ไดอะล็อกของโปรแกรมจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ใน แบบ 1 มิติ.....	59
4.1 ค่าศักย์ไฟฟ้า (Potential) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีรอยต่อพี-เอ็น.....	61
4.2 แสดงค่าความหนาแน่นพาหะอิเล็กตรอนและโฮล กรณีที่ยังไม่มีการไบแอส.....	62
4.3 แสดงค่าความหนาแน่นพาหะอิเล็กตรอนและโฮล กรณีที่มีการไบแอสย้อนกลับ.....	63
4.4 แสดงค่าความหนาแน่นพาหะอิเล็กตรอนและโฮล กรณีที่ได้รับแสง.....	64
4.5 แสดงอัตราการเกิด/การรวมตัวใหม่ของพาหะที่บริเวณปลอดพาหะ กรณีที่ป้อนแรงดันไบแอสตรง $V_{ap} = 0.5$ volt.....	65
4.6 แสดงอัตราการเกิด/การรวมตัวใหม่ที่บริเวณปลอดพาหะ กรณีที่ป้อนแรงดันไบแอสย้อนกลับ $V_{ap} = -0.5$ volt.....	66
4.7 แบบจำลองโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์.....	68
4.8 ก แสดงอัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสงที่ความยาวคลื่น 0.805 ไมโครเมตร.....	68
4.8 ข แสดงอัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสงที่ความยาวคลื่น 0.930 ไมโครเมตร.....	69
4.8 ค แสดงอัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสงที่ความยาวคลื่น 0.965 ไมโครเมตร.....	69
4.8 ง แสดงอัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสงที่ความยาวคลื่น 1.094 ไมโครเมตร.....	70
4.9 แสดงอัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสงอาทิตย์ทุกความยาวคลื่น.....	71
4.10 แสดง Flow chart ขั้นตอนการคำนวณหาอัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสง.....	73

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 แสดงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากอัตราการเกิด/การรวมตัวใหม่ของพาหะที่มีการป้อนแรงดันไบอัสตรง $V_{ap} = 0.5$ volt.....	74
4.12 แสดงความสัมพันธ์ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าไบอัสตรง.....	75
4.13 แสดงความสัมพันธ์ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าไบอัสย้อนกลับ.....	76
4.14 แสดงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากอัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสง.....	77
4.15 แสดงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากรณีไม่มีสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง.....	78
4.16 แสดงการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสงและสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง.....	79
4.17 แสดงการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสงที่มีสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงและไม่มีสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง.....	80
4.18 แสดงความสัมพันธ์ที่ความลึกของรอยต่อพี-เอ็นมีผลต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสง.....	81

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์

	ความหมาย
c	ความเร็วแสง
c_0	ความเร็วแสงที่เดินทางในสุญญากาศ
D_e	สัมประสิทธิ์การแพร่ซึมของอิเล็กตรอน
D_h	สัมประสิทธิ์การแพร่ซึมของโฮล
E	สนามไฟฟ้า
E_g	ช่องว่างแถบพลังงาน
$E_{h\nu}$	พลังงานโฟตอน
E_v	แถบวาเลนซ์
$F.F$	ค่าฟิลล์แฟกเตอร์
G	อัตราการเกิดอิเล็กตรอนและโฮลเนื่องจากแสง
h	ค่าคงที่ของพลังค์
J_{Gen}	ความหนาแน่นกระแสแสง-R-G
J_{ph}	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเนื่องจากแสง
J_e	ความหนาแน่นกระแสอิเล็กตรอน
J_h	ความหนาแน่นกระแสโฮล
J_0	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามืด
J_s	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าย้อนกลับ
J_{sc}	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร
J_{total}	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ารวม
L_e	ระยะการแพร่ซึมของอิเล็กตรอน
L_h	ระยะการแพร่ซึมของโฮล
N_a	ความเข้มข้นอะตอมสารเจือในสารกึ่งตัวนำเอ็น
N_d	ความเข้มข้นอะตอมสารเจือในสารกึ่งตัวนำพี
N'	โฟตอนฟลักซ์
n	ค่าดัชนีหักเหแสง
P_m	พลังงานสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์จริงๆ
P_m	พลังงานสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์ในทางอุดมคติ
p	ความหนาแน่นจำนวนโฮล

สัญลักษณ์(ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
q	ประจุไฟฟ้า
R	สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง
V	ความต่างศักย์ไฟฟ้า
V_a	แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมไดโอด
V_{ap}	แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้
V_{bi}	แรงดันไฟฟ้าภายใน
V_m	แรงดันสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์
V_o	แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต
V_{oc}	แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร
W	ค่าความกว้างของช่องปลอดพาหะ
x	ระยะทาง
z	มุมระหว่างแนวของลำแสงที่ทำกับแนวตั้ง
α	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
ϵ	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก
ϵ_0	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ
Φ	ค่าฟังก์ชันงาน
Φ_s	ค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ
λ	ความยาวคลื่นแสง
σ	สภาพความนำไฟฟ้า
σ_D	สภาพความนำไฟฟ้ามืด
σ_{Ph}	สภาพความนำไฟฟ้าทางแสง
τ	อายุของพาหะ
τ_e	อายุของอิเล็กตรอน
τ_p	อายุของโฮล
υ	ความถี่แสง
μ	สภาพคล่องของพาหะ
μ_e	สภาพคล่องของอิเล็กตรอน
μ_p	สภาพคล่องของโฮล

สัญลักษณ์(ต่อ)

สัญลักษณ์

ความหมาย

$\varphi(x)$

Electrostatic potential

δ_n

ความเข้มข้นพาหะส่วนเกินอิเล็กตรอน

δ_p

ความเข้มข้นพาหะส่วนเกินโฮล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศัพท์เทคนิค

กระแสการรวมตัว	Recombination
การสะท้อน	Reflection
การหักเหของแสง	Refraction
ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	Dielectric constant
ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน	Carrier concentration electron
ค่าความหนาแน่นโฮล	Carrier concentration hole
ค่าความหนาแน่นกระแสอิเล็กตรอน	Current electron density
ค่าความหนาแน่นกระแสโฮล	Current hole density
ศักดาไฟฟ้า	Potential
ชั้นแอร์แมสซีโร	Air Mass Zero, AM0
ชั้นแอร์แมสวัน	Air Mass One, AM1
ฐานรอง	Substrate
แถบพลังงานต้องห้าม	Forbidden energy band
ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก	Photoelectric effect
อัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล	Generation rate

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแรกได้แก่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนผลึกเดี่ยว ซึ่งได้รับการพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1954 การใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์เริ่มแรกจากการใช้งานในอวกาศในปี ค.ศ. 1958 และเมื่อปี ค.ศ. 1970 ได้เกิดปัญหาวิกฤตการณ์น้ำมันขึ้น เซลล์แสงอาทิตย์จึงได้รับความสนใจอย่างจริงจังเพื่อใช้ในการเป็นแหล่งพลังงานสำรองโดยในปัจจุบันนี้มีความต้องการใช้เซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นทุกๆปี โดยในปี ค.ศ. 1995 ปริมาณการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วโลกรวมกันประมาณ 760 MW และมีปริมาณการผลิตทั่วโลกประมาณ 100 MW ต่อปี และเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานทดแทนชนิดหนึ่งที่ได้รับการยอมรับว่าสะอาดไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมขณะใช้งาน เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานโดยใช้แหล่งพลังงานจากแสงอาทิตย์ ซึ่งมีไม่จำกัดและในการติดตั้งแต่ละครั้งจะมีอายุการใช้งานประมาณ 20 ปี ประโยชน์ของเซลล์แสงอาทิตย์นอกจากจะเป็นแหล่งพลังงานให้กับอุปกรณ์ต่างๆในยานอวกาศแล้วยังมีประโยชน์ต่อชุมชนเมืองและชนบทที่อยู่ห่างไกลที่จะติดต่อสื่อสารกับชุมชนเมือง รวมถึงเป็นแหล่งพลังงานให้กับเครื่องมือสื่อสารให้กับกลุ่มนักวิจัย ที่ต้องการเข้าไปทำงานในพื้นที่ทุรกันดารและพื้นที่ห่างไกลความเจริญต่างๆ ดังนั้นถ้าเราใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพเราก็จะประหยัดพลังงานได้มากรวมทั้งเป็นการรักษาสีเขียวของโลกได้อีกด้วย ดังนั้นถ้าเราได้มีพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นเท่าใด เราก็จะได้รับประโยชน์จากแสงอาทิตย์มากขึ้นตามไปด้วย และทางด้านเทคโนโลยีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์นั้นได้มีการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาแก้ปัญหากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เนื่องจากกระบวนการสร้างนั้นมีหลายขั้นตอนอาจเกิดความผิดพลาดในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ฉะนั้นการออกแบบจำลองการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นก็เป็แนวทางอีกทางหนึ่ง ที่ช่วยแก้ปัญหาในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ก่อนที่จะมีการสร้างตัวเซลล์แสงอาทิตย์จริง และค่าพารามิเตอร์ที่มีส่วนในการลดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการออกแบบจำลองโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็นที่คล้ายกับโครงสร้างจริงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานในปัจจุบัน ฉะนั้นในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆในโปรแกรมที่จำลองแบบเซลล์แสงจะเป็นตัวช่วยในการหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในตัวเซลล์ เพื่อหาประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในการจำลองแบบเซลล์แสงอาทิตย์ในหนึ่งมิติ เพื่อทำการศึกษาถึงคุณสมบัติและพฤติกรรมต่างๆ ของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น และศึกษาคุณสมบัติการทำงานเบื้องต้นของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น ที่มีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญทั้งของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น และเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น เช่น

1. การแสดงลักษณะการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าในตัวของอุปกรณ์
2. การแสดงลักษณะการกระจายตัวของความหนาแน่นพาหะทั้งอิเล็กตรอนและโฮลที่ยังไม่ได้รับแสงอาทิตย์
3. การแสดงลักษณะการกระจายตัวของความหนาแน่นพาหะทั้งอิเล็กตรอนและโฮลที่มีการรับแสงอาทิตย์
4. การแสดงการเกิด/การรวมตัวใหม่ของพาหะบริเวณรอยต่อพี-เอ็น
5. แสดงค่าอัตราการเกิดพาหะเมื่อได้รับแสงอาทิตย์ที่บริเวณผิวหน้า
6. การแสดงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ไหลในเซลล์แสงอาทิตย์
7. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแส และแรงดัน
8. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะความลึกของรอยต่อมีผลในการเกิดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสง
9. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงมีผลต่อการเกิดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสง
10. การแสดงแสงในช่วงความยาวคลื่นแต่ละช่วงมีผลในการเกิดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสง

นอกจากนี้แล้ว การจำลองแบบเซลล์แสงอาทิตย์ในหนึ่งมิติของรอยต่อแบบพี-เอ็น ยังสามารถปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญตามได้ตามวัตถุประสงค์ของผู้ที่ต้องการปรับปรุงโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ใหม่ หรือถ้าต้องการที่จะประยุกต์ใช้การจำลองแบบหนึ่งมิติให้เป็นแบบสองมิติหรือหลายมิติก็สามารถทำการศึกษาต่อไปได้

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

การจำลองแบบหนึ่งมิตินี้ สามารถนำมาเป็นเครื่องมือในการออกแบบโครงสร้างรอยต่อของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์นั้นได้ ซึ่งเป็นแนวทางในการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น คล้ายกับโครงสร้างของไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น เนื่องจากการวิเคราะห์ข้อมูลขั้นพื้นฐานของไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น มีความคล้ายคลึงกับเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีที่ยังไม่ได้รับแสงอาทิตย์ เพราะฉะนั้นผู้ทำวิทยานิพนธ์จึงได้นำการออกแบบจำลองของไดโอดที่มีโครงสร้างแบบพี-เอ็นมาทำการวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีที่ยังไม่ได้รับแสงอาทิตย์ เช่น คุณสมบัติค่าการกระจายตัวของความหนาแน่นพาหะทั้งอิเล็กตรอนและโฮล ค่าการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ ค่าอัตราการเกิด/การรวมตัวใหม่ของพาหะบริเวณรอยต่อพี-เอ็น และในส่วนของารได้รับแสงอาทิตย์ คือการคำนวณหาค่าอัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสง ค่าความหนาแน่นพาหะอิเล็กตรอนและโฮลที่ได้รับแสงอาทิตย์จะมีค่ามากกว่าตอนสมดุลความร้อน และนำค่าเหล่านี้มาเป็นตัวพารามิเตอร์ในการคำนวณค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสง ความดันนั้นโครงสร้างรอยต่อพี-เอ็นจึงเป็นส่วนที่สำคัญในการวิเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

การจำลองแบบเซลล์แสงอาทิตย์ใน 1 มิติในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำสมการพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำ เช่นสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสอง ได้แก่ สมการบัวร์ของหนึ่งมิติ สมการความต่อเนื่องของอิเล็กตรอนและโฮลมาแก้สมการเพื่อหาผลเฉลย โดยการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยวิธีนิวตัน วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม และระเบียบวิธีการทำซ้ำ เพื่อให้ผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่แท้จริงมากที่สุด โดยผลลัพธ์ที่ได้นั้นจะเป็นค่าศักย์ไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นของพาหะทั้งอิเล็กตรอนและโฮลที่บริเวณต่างๆ ของอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ สมการของค่าอัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสงตกถึงที่บริเวณผิวหน้าที่ยื่นอยู่กัระยะความยาวของเซลล์แสงอาทิตย์ สมการค่าพลังงานโฟตอน ซึ่งค่าเหล่านี้สามารถนำไปวิเคราะห์ถึงคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์

1.5 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการประยุกต์ใช้โปรแกรมการจำลองแบบหนึ่งมิติของรอยต่อพี-เอ็นมาจำลองแบบเซลล์แสงอาทิตย์ใน 1 มิติ โดยในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้มีขอบเขตของการศึกษา คือ

1. เป็นการพิจารณาในหนึ่งมิติ
2. พิจารณาพลังงานแสงอาทิตย์ที่ Air Mass 1.5(AM 1.5) ซึ่งมีพลังงานรวมทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

83.2 มิลลิวัตต์ ต่อตารางเซนติเมตร

3. ใช้ค่าพารามิเตอร์สัมประสิทธิ์การแพร่ของพาหะ (D_n, D_p) และอายุของพาหะส่วนน้อย (τ_n, τ_p) คงที่ขึ้นกับค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือเริ่มต้น
 4. ใช้สารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นฐานรองโดยที่ด้านบนบริเวณผิวหน้าทำการได้ปสารเจือชนิดเอ็น และด้านหลังทำการได้ปสารเจือชนิดพี
 5. ภาษาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้เป็นภาษา Visual C++
- สำหรับเนื้อหาของของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะประกอบด้วยเนื้อหาทั้งหมด 5 บท สามารถแยกเป็นส่วนๆ ได้ดังต่อไปนี้
1. บทนำ
 2. เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น
 3. การออกแบบโปรแกรมและการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์
 4. ผลลัพธ์โปรแกรมในสถานการณ์คำนวณแบบ 1 มิติ
 5. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

ศึกษาถึงความเป็นมาของเซลล์แสงอาทิตย์การทำงานเบื้องต้นของเซลล์แสงอาทิตย์ และแสงอาทิตย์ที่มีความยาวคลื่นในช่วงสารกึ่งตัวนำสามารถตอบสนองได้ แล้วทำการออกแบบตัวเซลล์ที่ทำการศึกษาด้วยโปรแกรมวาดรูป ออกแบบความกว้างของเมฆให้เหมาะสมและครบตามระยะความยาวของตัวเซลล์ นอกจากนั้นจะเริ่มต้นศึกษาการทำงานของโปรแกรมการจำลองแบบใน 1 มิติ และปรับปรุงอัลกอริทึมการคำนวณของโปรแกรมให้สามารถคำนวณได้เร็วขึ้น สามารถเปลี่ยนค่า เพิ่มค่าตัวแปรต่างๆ ได้อย่างสะดวก หลังจากนั้นจึงทำการเขียนค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณลงในตัวของโปรแกรม แล้วโปรแกรมที่เราเขียนขึ้นจะทำการประมวลผลออกมาในเชิงตัวเลข และทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการจำลองแบบเซลล์แสงอาทิตย์ แล้วยังมีการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ ที่จำเป็นในการคำนวณอีกด้วย เช่น ค่าช่วงความยาวคลื่น ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของพาหะ (D_n, D_p) อายุของพาหะส่วนน้อย (τ_n, τ_p) ค่าความเข้มข้นสารเจือชนิดเอ็นที่ทำการได้ปด้านหน้า เป็นต้นที่สามารถนำไปคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้า สนามไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นพาหะทั้งอิเล็กตรอนและโฮล ค่าการเกิด/การรวมตัวใหม่ของพาหะ ค่าอัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสง ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ค่าฟิลล์แพกเตอร์ ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น และสุดท้ายจะเป็นการสรุปถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองแบบของเซลล์แสงอาทิตย์ใน 1 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

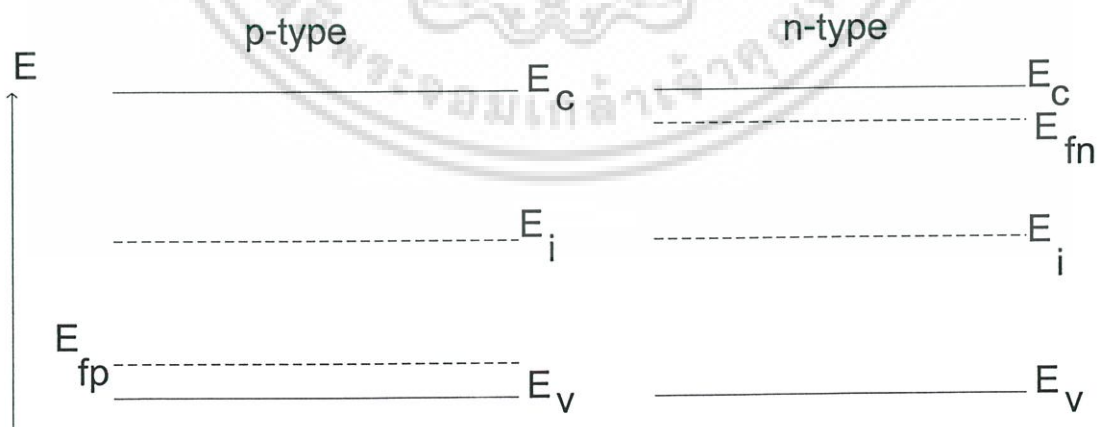
บทที่ 2

เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น

เซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่แล้วมักมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบรอยต่อพี – เอ็น คล้ายๆกับโครงสร้างของไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น และคุณลักษณะทางด้านที่ยังไม่ได้รับแสงจะเหมือนกับไดโอดเพราะฉะนั้นวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงให้คุณสมบัติของไดโอดที่มีโครงสร้างแบบรอยต่อพี-เอ็นเพื่อใช้อธิบายการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างที่ลักษณะที่คล้ายกันมาก แล้วยังมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ยังเหมือนกันเพราะฉะนั้นผู้ทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงได้นำโครงสร้างของไดโอดในบางส่วนมาทำการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการ เพื่อต้องการไปใช้ในการคำนวณหาพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ และยังทำให้ทราบถึงการทำงานของไดโอดที่มีการทำงานที่ใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์

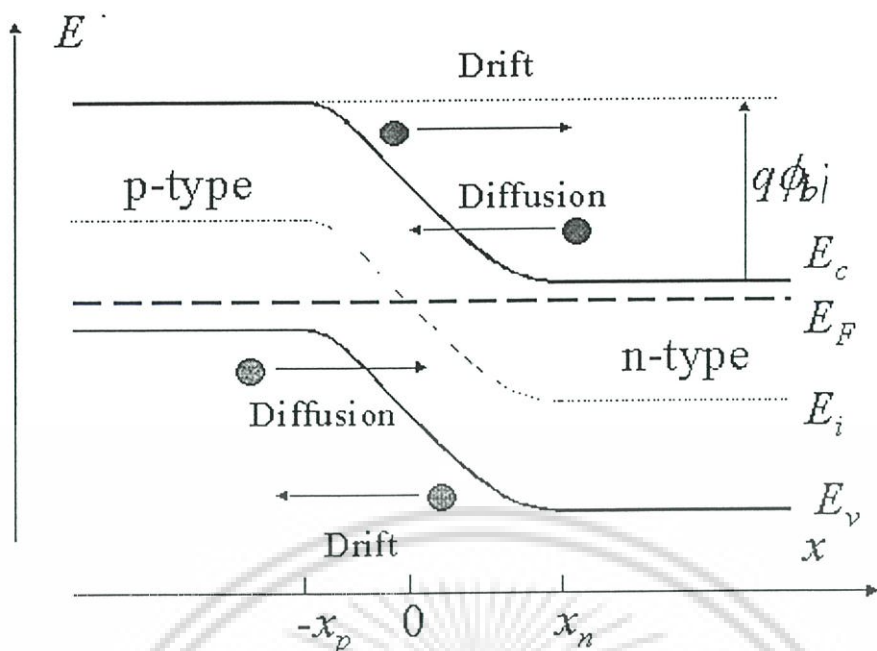
2.1 ปฏิกิริยาการที่รอยต่อพี-เอ็นอยู่ในภาวะสมดุล

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและความหนาแน่นโฮลในแถบความนำแถบวาเลนซ์ ภาวะที่สมดุลความร้อนตามลำดับ ที่สภาวะสมดุลความร้อนความหนาแน่นพาหะเหล่านี้จะอิสระต่อกัน ซึ่งจากรูปที่ 2.1 เป็นการแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ก่อนการสัมผัสกัน จะสังเกตว่าสารกึ่งตัวนำชนิดพีมีระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่สูงกว่าแถบวาเลนซ์ และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีระดับพลังงานเฟอร์มิต่ำกว่าแถบความนำก่อนที่จะสัมผัสกัน ซึ่งการเขียนโครงสร้างแถบพลังงานนั้นจะพิจารณาระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_F) เป็นส่วนสำคัญดังรูปที่ 2.1[1]



รูปที่ 2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆก่อนที่จะเกิดรอยต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงรอยต่อพี-เอ็นเมื่อสัมผัสกันแล้วเข้าสู่สภาวะสมดุล

เมื่อรอยต่อพี-เอ็นถูกสร้างขึ้นแล้ว โอลทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี(P) มีความหนาแน่นมากกว่าโอลทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และอิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น(N) มีความหนาแน่นมากกว่าอิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี(P) ดังนั้นด้วยความหนาแน่นของประจุพาหะที่แตกต่างกันทั้งสองด้านจึงทำให้เกิดการแพร่ของประจุพาหะจากด้านที่มีความหนาแน่นมากไปยังด้านที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า คือ โอลทางด้านพีในบริเวณใกล้รอยต่อจะแพร่เข้าไปในด้านเอ็น และอิเล็กตรอนทางด้านเอ็นในบริเวณใกล้รอยต่อจะแพร่เข้าไปทางด้านพี การแพร่นี้จะกระทำผ่านรอยต่อพี-เอ็น ทำให้เกิดการรวมตัว (recombination) ของพาหะทั้งสองระหว่างโอลและอิเล็กตรอน ซึ่งผลของการรวมตัวนี้เอง จะทำให้อะตอมสารเจือบริเวณใกล้ๆ กับรอยต่อพี-เอ็น กลายเป็นไอออน(ion) และแสดงอำนาจไฟฟ้าออกมาได้ ซึ่งอะตอมของสารเจือชนิดเอ็นทางด้านจะสูญเสียอิเล็กตรอน ทำให้แสดงตัวเป็นไอออนบวก และอะตอมสารเจือชนิดพีทางด้านพีจะสูญเสียโอลไป ซึ่งทำให้แสดงตัวเป็นไอออนลบ เมื่อเป็นเช่นนี้จะทำให้เกิดการสะสมประจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น จะแสดงไว้ในรูปที่ 2.2 ซึ่ง ณ บริเวณรอยเกิดสนามไฟฟ้าภายในจะไปขัดขวางการแพร่ข้ามรอยต่อของโอลและอิเล็กตรอน ดังนั้นการแพร่ข้ามรอยต่อของประจุพาหะทั้งสองชนิด จะค่อยๆ ลดลง จนกระทั่งสนามไฟฟ้าภายในที่เกิดขึ้นนั้นมีอำนาจมากพอที่จะยับยั้งไม่ให้ประจุพาหะทั้งสองชนิดแพร่ข้ามรอยต่อไปได้ การแพร่จึงหยุดลงเข้าสู่สภาวะสมดุล

(Equilibrium) ซึ่งลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานระดับเฟอร์มิของด้านทั้งสองของรอยต่อจะต้องต่อเนื่องเป็นระดับเดียวกันตลอดผ่านรอยต่อพี-เอ็นดังรูปด้านบน ซึ่งกำหนดให้

E_{fp} คือระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำด้านพี

E_{fn} คือระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำด้านเอ็น

E_g คือระดับพลังงานที่อยู่กึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน(Energy gap)ของสารกึ่งตัวนำ

E_C คือระดับพลังงานแถบความนำ

E_V คือระดับพลังงานแถบวาเลนซ์

จากภาวะสมดุลแล้วทำให้บริเวณภายในรอยต่อนี้ไม่มีประจุพาหะทั้งสองชนิดคงมีแต่อะตอมของสารเจือชนิดเอ็นและชนิดพี ซึ่งอยู่ในสภาพไอออนบวกและไอออนลบ อยู่ในบริเวณปลอดพาหะและสนามไฟฟ้าที่อยู่บริเวณนี้จะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้า และเกิดแรงดันไฟฟ้าภายใน (built in voltage, V_{bi}) อีกด้วย ซึ่งแรงดันนี้เองที่เป็นกำแพงศักย์ ต่อต้านการเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อของประจุพาหะ

2.2 กระบวนการเกิดและการรวมตัวใหม่ของพาหะ

ในการหาความสัมพันธ์ของกระแส-แรงดันในทางอุดมคติ เราจะไม่ได้คิดผลกระทบต่างๆที่เกิดขึ้นภายในบริเวณประจุค้าง ในความเป็นจริงมีองค์ประกอบกระแสอื่นถูกผลิตขึ้นภายในบริเวณประจุค้างแห่งนี้ ทำให้คุณสมบัติกระแส-แรงดัน ของไดโอดรอยต่อพี-เอ็นจะเบี่ยงเบนไปจากอุดมคติ ของกระแสที่เพิ่มเข้ามานี้เกิดจากกระบวนการรวมตัวใหม่ ซึ่งอัตราการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮลส่วนเกินจากทฤษฎีของ Shockley -Read -Hall ดังสมการต่อไปนี้[2]

$$R = \frac{C_n C_p N_t (np - n_i^2)}{C_n (n + n') + C_p (p + p')} \quad (2.1)$$

เมื่อกำหนดให้

C_n, C_p คืออัตราการจับอิเล็กตรอนและโฮล ต่อพื้นที่

n, p คือความหนาแน่นพาหะอิเล็กตรอนและโฮล

n', p' คือความหนาแน่นพาหะอิเล็กตรอนและโฮลค่าที่ขึ้นอยู่กับพลังงาน

จากสมการหารทั้งเศษและส่วนด้วย $C_n C_p N_t$ และใช้นิยามของ τ_{n0}, τ_{p0} เราอาจจะเขียนใหม่ได้ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R = \frac{(np - n_i^2)}{\tau_{p0}(n + n_i) + \tau_{n0}(p + n_i)} \quad (2.2)$$

โดยที่ τ_{p0}, τ_{n0} คืออายุของโฮลและอายุของอิเล็กตรอนพาหะส่วนน้อยที่สภาวะสมดุล

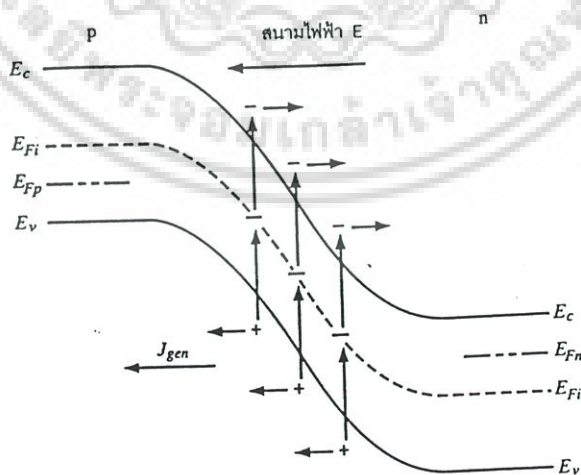
N_t คือค่าความหนาแน่นแตรปที่จับพาหะ

2.2.1 กระแสการเกิดเมื่อได้รับแรงดันย้อนกลับ

สำหรับรอยต่อพีเอ็นภายใต้แรงดันไบอัสย้อนกลับเราได้ทราบแล้วว่าอิเล็กตรอนและโฮลที่เคลื่อนที่ได้จะถูกกวาดออกจากบริเวณปลอดพาหะ ซึ่ง $n \approx p \approx 0$ จากอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะจากสมการที่ 2.1 จะกลายเป็น

$$R = \frac{-C_n C_p N_t n_i^2}{C_n n + C_p p} \quad (2.3)$$

เครื่องหมายลบหมายถึงอัตราการรวมตัวใหม่มีค่าเป็นลบ หรือการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลภายในบริเวณประจุค้างที่ได้รับไบอัสย้อนกลับ การรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮลส่วนเกินเป็นกระบวนการที่กำลังพยายามที่จะปรับให้เข้าสู่สมดุลใหม่อีกครั้ง เพราะว่าความเข้มข้นของอิเล็กตรอนและโฮลต้องเท่ากับศูนย์ที่บริเวณปลอดพาหะภายใต้การไบอัสย้อนกลับ อิเล็กตรอนและโฮลกำลังถูกผลิตผ่านทางระดับแตรป(trap) และพยายามสร้างสมดุลความร้อนขึ้นใหม่ กระบวนการเกิดนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กระบวนการเกิดในรอยต่อพีเอ็นเมื่อไบอัสย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่ออิเล็กตรอนและโฮลถูกสร้างขึ้นมาจะถูกกวาดออกมาจากบริเวณปลอดพาหะโดยสนามไฟฟ้า การไหลของประจุจะเป็นทิศทางกระแสย้อนกลับอิมิตัว กระแสการเกิดไบอัสย้อนกลับ (Reverse-bias generation current) มีสาเหตุมาจากการเกิดของอิเล็กตรอน และโฮลในบริเวณประจุค้าง ซึ่งจะรวมกับกระแสอิมิตัวไบอัสย้อนกลับ เราจะคำนวณความหนาแน่นของกระแสการเกิดไบอัสย้อนกลับ โดยสมมุติ $n' = n_i, p' = n_i$ ของสมการที่ 2.3 จะกลายเป็น

$$R = \frac{-n_i}{\frac{1}{N_t C_p} + \frac{1}{N_t C_n}} \quad (2.4)$$

โดยที่ R คือ อัตราการเกิด/การรวมตัวใหม่ของพาหะ เราจะใช้นิยามของเวลาชีวิต(lifetime) จะเปลี่ยนสมการที่(2.4) เป็น

$$R = \frac{-n_i}{\tau_{p0} + \tau_{n0}} \quad (2.5)$$

และเปลี่ยนค่าเวลาชีวิต(lifetime)ใหม่ให้เป็นค่าเฉลี่ยของ τ_{n0}, τ_{p0} คือ

$$\tau_0 = \frac{\tau_{p0} + \tau_{n0}}{2} \quad (2.6)$$

ฉะนั้นอัตราการรวมตัวใหม่จะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$R = \frac{-n_i}{2\tau_0} = -G \quad (2.7)$$

โดยที่ G คืออัตราการเกิดพาหะอิเล็กตรอนและโฮลในบริเวณปลอดพาหะ อัตราการรวมตัวใหม่ค่าลบหมายถึงอัตราการเกิดของอิเล็กตรอนและโฮลในบริเวณปลอดพาหะ ความหนาแน่นกระแสการเกิดหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$J_{Gen} = \int_0^w eGdx \quad (2.8)$$

ซึ่งการคำนวณค่าความหนาแน่นกระแสสมการนี้จะหาโดยการอินทิเกรตตลอดบริเวณปลอดพาหะ

$$J_{\text{Gen}} = \frac{en_i W}{2\tau_0} \quad (2.9)$$

โดย W คือบริเวณปลอดพาหะ
ความหนาแน่นกระแสไปอัสย้อนกลับทั้งหมดคือ ผลรวมของความหนาแน่นกระแสอิมิตัวย้อนกลับ
ในอุดมคติกับความหนาแน่นกระแสการเกิดตั้งสมการต่อไปนี้

$$J_R = J_S + J_{\text{Gen}} \quad (2.10)$$

เนื่องจาก J_S คือความหนาแน่นกระแสอิมิตัวย้อนกลับ
 J_{Gen} คือความหนาแน่นกระแสอัตราการเกิดในบริเวณปลอดพาหะ
ซึ่งความหนาแน่นกระแสอิมิตัวย้อนกลับในทางอุดมคติ J_S ไม่ขึ้นกับแรงดันไบอัสย้อนกลับ และ
 J_{Gen} เป็นความสัมพันธ์กับความกว้างบริเวณปลอดพาหะ W ซึ่งสัมพันธ์กับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

2.2.2 กระแสการรวมตัวใหม่ไบอัสไปข้างหน้า

เมื่อรอยต่อพี-เอ็นไบอัสย้อนกลับ อิเล็กตรอนและโฮลจะต้องถูกกวาดออกไปจากบริเวณ
ปลอดพาหะทั้งหมด ดังนั้น $n \cong p \cong 0$ ภายใต้การไบอัสไปข้างหน้า อิเล็กตรอน และโฮลถูกฉีดข้าม
บริเวณปลอดพาหะ ดังนั้นเราทำให้มีพาหะส่วนเกินในบริเวณปลอดพาหะ มีความเป็นไปได้ที่จะ
เกิดการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลภายในบริเวณปลอดพาหะ และไม่ได้เป็นส่วนของการ
กระจายพาหะส่วนน้อยจากสมการที่ 2.2

ถ้าสมมุติว่าระดับแฟร์มิลีอยู่ระดับเฟอร์มีค่า $n' = p' = n_i, \tau_{n0} = \tau_{p0} = \tau_0$

$$n = n_i \exp\left(\frac{eV_a}{2KT}\right) \quad (2.11)$$

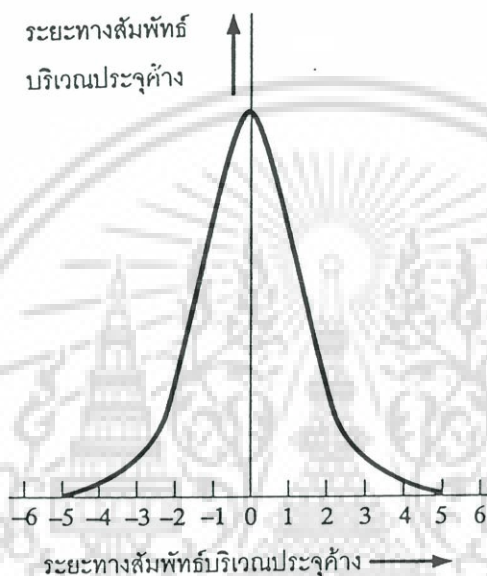
$$p = n_i \exp\left(\frac{eV_a}{2KT}\right) \quad (2.12)$$

เมื่อ V_a คือแรงดันไบอัสภายนอก โดยที่ V_a จะมีค่าเป็นบวกสำหรับกรณีไบอัสตรง และ V_a
จะมีเป็นลบสำหรับกรณีไบอัสย้อนกลับ

ฉะนั้นสมการที่(2.2) และกรณีนี้ ($V_a \gg KT/e$)

$$R = \frac{n_i}{2\tau_0} \left(\frac{eV_a}{2KT} \right) \quad (2.13)$$

ซึ่งสมการนี้คืออัตราการรวมตัวสูงสุด สำหรับอิเล็กทรอนิกส์และโฮลที่ปรากฏที่ศูนย์กลางของรอยต่อพี-เอ็น ได้รับไบอัสไปได้หน้า



รูปที่ 2.4 ขนาดเปรียบเทียบของอัตราการรวมตัวใหม่ตลอดบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อพี-เอ็น เมื่อได้รับไบอัสไปข้างหน้า

ฉะนั้นเราจะได้ความหนาแน่นกระแสการรวมตัวใหม่ดังนี้

$$J_{rec} = \int_0^w eRdx \quad (2.14)$$

ซึ่งการอินทิเกรตตลอดบริเวณปลอดพาหะ ในกรณีนี้อัตราการรวมตัวใหม่จะไม่คงที่ตลอดบริเวณปลอดพาหะ เราได้คำนวณอัตราการรวมตัวใหม่สูงสุดที่ศูนย์กลางของบริเวณปลอดพาหะ

คือ

$$J_{\text{rec}} = \frac{ex' n_i}{2\tau_0} \left(\frac{eVa}{2KT} \right) \quad (2.15)$$

เมื่อกำหนดให้ x' คือความยาวตลอดที่อัตราการรวมตัวใหม่สูงสุดยังมีผลอยู่

2.3 คุณสมบัติพื้นฐานของแสง[3]

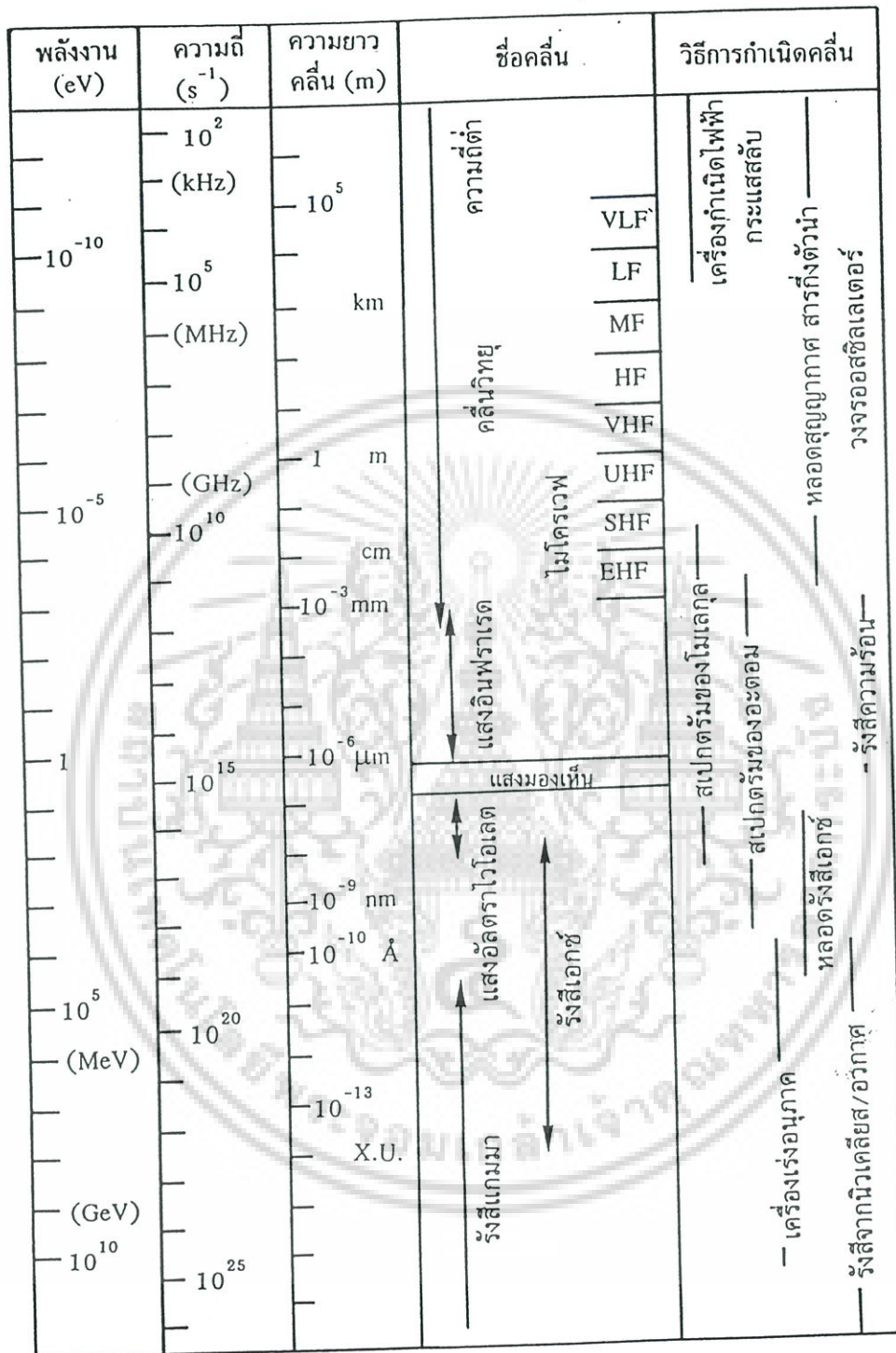
แสงมีคุณสมบัติเป็นทั้งคลื่น (wave) และอนุภาค (particle) ปรากฏการณ์ที่เราเห็นในชีวิตประจำวัน เช่น การสะท้อน (reflection) การแทรกสอดแสง (interference) และการหักเหแสง (refraction) แสดงให้เห็นว่าแสงมีคุณสมบัติเป็นคลื่น ส่วนปรากฏการณ์ที่แสดงให้เห็นหรืออธิบายได้ว่าแสงเป็นอนุภาค ได้แก่ การส่องแสงเข้าสู่ผิวโลหะแล้วทำให้เกิดอิเล็กตรอนกระเด็นหลุดออกสู่สุญญากาศ ซึ่งเรียกว่า ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (external photoelectric effect) หรือการเพิ่มขึ้นของค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเมื่อถูกแสง และกล่าวถึงโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็น และคุณสมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำซิลิคอน

2.3.1 การเป็นคลื่นของแสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งถ้าให้ λ เป็นความยาวคลื่นแสง V คือความถี่ของคลื่นแสง และ C_0 คือความเร็วของแสงที่เดินทางในสุญญากาศ ($C_0 = 2.99792458 \times 10^8$ m/s) จะมีความสัมพันธ์ดังนี้

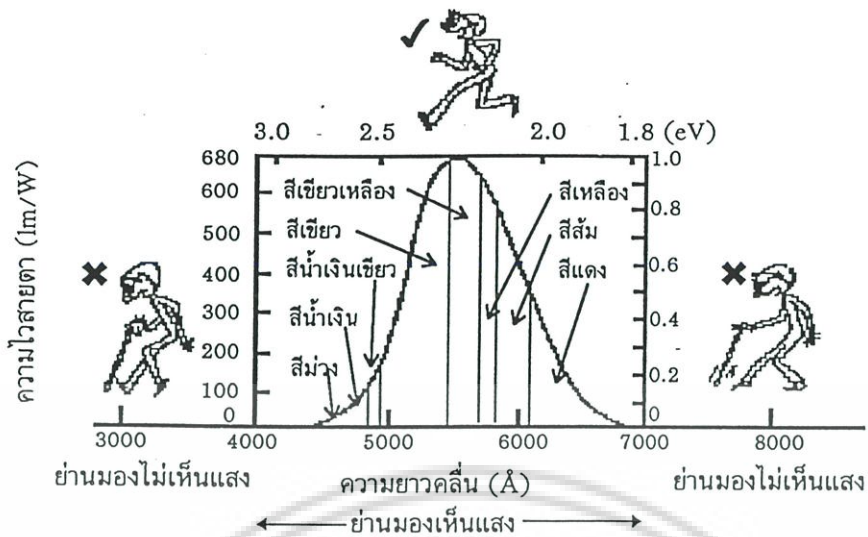
$$\lambda = \frac{C_0}{V} \quad (2.16)$$

แสงที่ตามนุษย์เรามองเห็นเรียกว่า แสงมองเห็น (visible light) ซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ 400~700 nm แสงมองเห็นนี้ในสเปกตรัมแสงมีการแบ่งเป็นแสงสีต่างๆ ได้แก่ แสงสีม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง ส้ม และ แดง ในจำนวนแสงสีต่างๆ เหล่านี้สีที่ตามนุษย์มีความไว (sensitivity) มากที่สุดคือแสงสีเขียวดังรูปที่ 2.5 แสดงตารางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่างๆ และรูปที่ 2.6 แสดงกราฟความไวของสายตาของมนุษย์ที่มีต่อแสงความยาวคลื่นต่างๆ (eye-sensitive curve)



รูปที่ 2.5 ความถี่และความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 สเปกตรัมความไวต่อแสงของสายตามนุษย์

ถ้าให้แสงเดินทางในวัตถุที่มีเนื้อเรียบตลอดและเป็นวัตถุไอโซโทรปี (isotropy) แสงจะเดินทางเป็นเส้นตรง แต่ถ้าแสงเดินทางจากวัตถุหนึ่งไปอีกวัตถุชนิดหนึ่ง ที่ขอบของวัตถุทั้งสองนั้นแสงจะหักเหหรือสะท้อนกลับได้ การเดินทางของแสงในวัตถุที่มีค่าดัชนีหักเหแสงเท่ากับ n จะทำให้ความเร็วของแสงช้ากว่าในสุญญากาศ กล่าวคือความเร็วแสง c ในวัตถุเท่ากับ

$$c = \frac{c_0}{n} \quad (2.17)$$

ค่าดัชนีหักเหแสง n ของวัตถุใดๆ จะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นและความถี่ของแสงด้วย และค่าดัชนีหักเหแสงนี้ จะมีความสัมพันธ์กับค่าคงตัวไดอิเล็กทริก ϵ ของวัตถุ (dielectric constant) ดังนี้

$$n = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}} \quad (2.18)$$

โดยที่ ϵ_0 คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ = 8.854182×10^{-12} F/m

2.3.2 การเป็นอนุภาคของแสง

ในทางฟิสิกส์แบบควอนตัม คลื่นแสงถูกพิจารณาว่าเป็นโฟตอน(Photon) หรือแสงนอกจากจะมีคุณสมบัติเป็นคลื่นแล้วยังมีคุณสมบัติเป็นอนุภาคด้วย และอนุภาคของแสงจะมีพลังงานอยู่ภายในตัวของมันและถ้าแสงมีความถี่เท่ากับ ν อนุภาคของแสงหนึ่งตัวจะมีพลังงานเท่ากับ $h\nu$ โดยที่ h คือค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) = $4.136 \times 10^{-15} \text{ eV}$ และแสงที่มีความยาวคลื่น λ ใดๆจะมีพลังงานโฟตอนเป็น

$$E_{\text{Photon}} = h\nu = \frac{hc_0}{\lambda_{(\mu\text{m})}} = \frac{1.24}{\lambda_{(\mu\text{m})}} \quad (2.19)$$

เมื่อพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างพลังงาน(Energy gap : E_G) ของสารกึ่งตัวนำ หรือ $E_{\text{Photon}} \geq E_{G(\text{Semi})}$ สารกึ่งตัวนำจะดูดกลืนพลังงานแสง ทำให้มีคู่อิเล็กตรอน-โฮล เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำ ความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจึงเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแสงแต่กรณีที่ $E_{\text{Photon}} < E_{G(\text{Semi})}$ การดูดกลืนแสงจะไม่เกิดขึ้น ดังนั้น ขนาดความถี่ต่ำสุด ν_{min} หรือ ความยาวคลื่นสูงสุด λ_{max} ของคลื่นแสงที่จะทำให้เกิดการดูดกลืนแสงได้ แสงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\nu_{\text{min}} \geq \frac{E_G}{h}$$

หรือ

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{hc_0}{E_G} = \frac{1.24}{E_G} \mu\text{m} \quad (2.20)$$

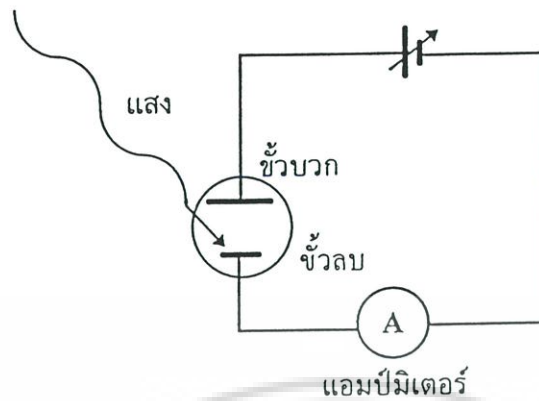
โดย ν_{min} คือ ความถี่ต่ำสุดที่สามารถทำให้เกิดการดูดกลืนแสงได้บางครั้ง

λ_{max} คือ ความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถทำให้เกิดการดูดกลืนแสงได้บางครั้ง

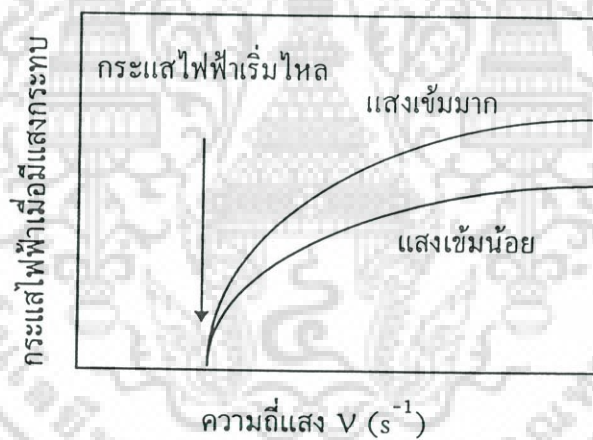
E_G คือ ขนาดความกว้างของช่องว่างแถบพลังงาน (Energy gap) ของสารกึ่งตัวนำ

ตัวอย่างปรากฏการณ์หนึ่งที่แสดงว่าแสงเป็นอนุภาคได้แก่ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (photoelectric effect) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการส่องแสงลงบนผิวของโลหะที่วางอยู่ในสุญญากาศแล้วทำให้อิเล็กตรอนที่ผิวโลหะหลุดจากผิวโลหะจะมีการอธิบายได้ดังนี้ ในหลอดสุญญากาศมีแผ่นขั้วไฟฟ้าบวกและลบบรรจุอยู่ และขั้วไฟฟ้าเหล่านี้ถูกต่อออกไปสู่วงจรภายนอก ซึ่งมีแบตเตอรี่ไบอัสอยู่ เมื่อส่องแสงลงบนขั้วไฟฟ้าลบจะพบว่า ถ้าแสงมีความถี่สูงกว่าค่าหนึ่ง จะทำให้มีกระแสไหลในวงจร แต่ถ้าแสงมีความถี่ต่ำเกินไป ก็จะไม่มีการไหลในวงจрдังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 การทดลองการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความถี่ของแสงในปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก
กระแสไฟฟ้าจะเริ่มไหลเมื่อความถี่ของแสงสูงกว่าค่าๆหนึ่ง

ปรากฏการณ์นี้ไอน์สไตน์ได้อธิบายไว้ว่าเมื่อแสงที่มีความถี่ ν เดินทางไปในปริภูมิ (space) แสงนั้นไม่ได้มีพลังงานเป็นค่าต่อเนื่อง แต่แสงจะเป็นอนุภาคที่มีพลังงานเท่ากับ $h\nu$ ที่วิ่งไปในปริภูมินั้นไอน์สไตน์ได้ตั้งชื่ออนุภาคแสงนี้ว่า light quantum ต่อมาเรารู้จักกันในชื่อ โฟตอน จากนั้นไอน์สไตน์ยังได้อธิบายรายละเอียดของปรากฏการณ์ในรูปที่ 2.8 ไว้ว่า พลังงานสูง

สุดของอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากโลหะ E มีค่าเท่ากับพลังงานของแสงที่ฉายลงบนผิวของโลหะ $h\nu$ ลบด้วยพลังงานที่จำเป็นในการดึงอิเล็กตรอนในโลหะให้หลุดออกมาข้างนอก $q\phi$ และเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$E = h\nu - q\phi \quad (2.21)$$

โดยที่ ϕ เรียกว่า เวิร์กฟังก์ชัน (Work function) และ $q\phi$ มีหน่วยเป็น eV

สูตรนี้บอกให้เราทราบว่า ค่าความถี่ต่ำสุดของแสงที่จะทำให้เกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเช่นนี้ได้ สามารถคำนวณได้โดยการให้ E ในสมการที่ (2.21) มีค่าเท่ากับศูนย์ จึงได้ว่า $h\nu = q\phi$ ซึ่ง ϕ เรียกว่า เวิร์กฟังก์ชัน (Work function) ของโลหะชนิดนั้นๆ และจากสูตรนี้พลังงานของอิเล็กตรอน E ที่กระเด็นหลุดออกจากโลหะมีค่าแปรผันตรงกับความถี่ ν ในปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกดังกล่าวบางข้อไม่สามารถให้เหตุผลอธิบายได้ด้วยทฤษฎีการเป็นคลื่นของแสง แต่สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีการเป็นอนุภาคของแสงซึ่งตั้งโดยไอน์สไตน์

2.4 การดูดกลืนแสงพื้นฐาน (Fundamental Absorption)

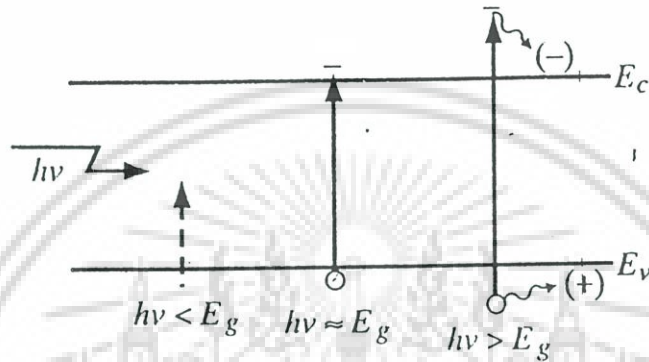
การดูดกลืนแสงที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนจากยอดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่จุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันในกรณีฉนวนและสารกึ่งตัวนำเรียกว่า การดูดกลืนแสงพื้นฐาน (fundamental absorption) และตำแหน่งหรือความยาวคลื่นแสงของสเปกตรัมมีการดูดกลืนแสงนี้ว่า ขอบของการดูดกลืนแสงพื้นฐาน (absorption edge) การดูดกลืนแสงชนิดนี้มีความสัมพันธ์กับลักษณะโครงสร้างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำมาก ในบางครั้งเราจำเป็นต้องแสดงลักษณะแถบพลังงานโดยให้ฟังก์ชันของเลขคลื่น (wave number : k) ของอิเล็กตรอน (ซึ่งก็คือโมเมนตัม เพราะว่ามีโมเมนตัมของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ $p = \hbar k$)

2.4.1 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ (Optical Absorption In Semiconductor)

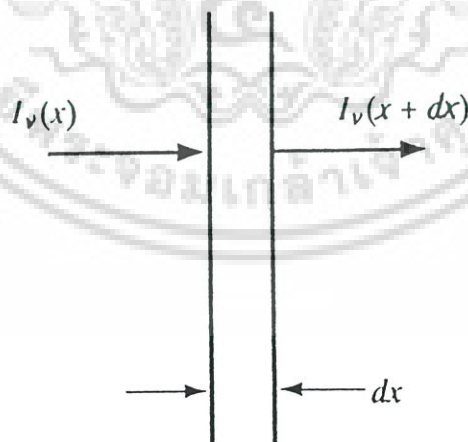
เมื่อสารกึ่งตัวนำถูกฉายด้วยแสง โฟตอนอาจจะถูกดูดกลืนหรืออาจจะเดินทางผ่านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานโฟตอนและช่องว่างแถบพลังงาน E_G ถ้าพลังงานโฟตอนมีค่าน้อยกว่า E_G โฟตอนจะไม่ถูกดูดกลืน ในกรณีนี้แสงจะเดินทางผ่านทะลุสารและสารกึ่งตัวนำจะเป็นตัวโปร่งแสง

ถ้า $E_{\text{Photon}} = h\nu > E_G$ โฟตอนจะทำปฏิกิริยาภายในกับวาเลนซ์อิเล็กตรอนจะยกระดับอิเล็กตรอนขึ้นสู่แถบความนำ แถบวาเลนซ์จะมีอิเล็กตรอนจำนวนมาก และแถบความนำจะมี

สถานะว่างจำนวนมาก ดังนั้นโอกาสของปฏิกิริยาภายในจะสูงเมื่อ $h\nu > E_G$ ปฏิกิริยาภายในนี้จะสร้างอิเล็กตรอนในแถบความนำและโฮลในแถบวาเลนซ์เกิดคู่ของอิเล็กตรอนโฮล กระบวนการดูดกลืนพื้นฐานสำหรับค่า $h\nu$ ที่แตกต่างกันแสดงได้ดังรูปที่ 2.9 เมื่อ $h\nu > E_G$ คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่ถูกสร้างและพลังงานส่วนเกินของอิเล็กตรอนและโฮลที่มาจากพลังงานจลน์ ซึ่งจะกระจายออกมาในรูปความร้อนในสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.9 การเกิดของคู่อิเล็กตรอน-โฮล โดยแสงในสารกึ่งตัวนำ[4]



รูปที่ 2.10 การดูดกลืนทางแสงที่ระยะทางที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้ม(intensity) ของฟลักซ์โฟตอนแสดงได้โดย $I_V(x)$ และแสดงในเทอมของ พลังงาน/ ซม²-วินาที รูปที่ 2.9 แสดงความเข้มโฟตอนที่ตกกระทบบนที่ตำแหน่ง x และฟลักซ์โฟตอนปรากฏที่ ระยะทาง $x + dx$ พลังงานที่ถูกดูดกลืนต่อหน่วยเวลาในระยะทาง dx คือ

$$\alpha I_V(x) dx \quad (2.22)$$

ซึ่ง α คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (absorption coefficient) สัมประสิทธิ์การดูดกลืนคือความ สัมพันธ์ระหว่างจำนวนของโฟตอนที่ถูกดูดกลืนต่อหน่วยระยะทาง ในที่นี้มีหน่วยเป็น cm^{-1}

จากรูปที่ 2.9 เราสามารถเขียนสมการได้

$$I_V(x + dx) - I_V(x) = \frac{dI_V(x)}{dx} \cdot dx = -\alpha I_V(x) dx \quad (2.23)$$

หรือ

$$\frac{dI_V(x)}{dx} = -\alpha I_V(x) \quad (2.24)$$

ถ้าเงื่อนไขเริ่มต้นคือ $I_V(0) = I_{V0}$ แล้วคำตอบสามารถหาได้จากสมการดิฟเฟอเรนเชียล สมการของ(2.24) คือ

$$I_V(x) = I_{V0} e^{-\alpha x} \quad (2.25)$$

ความเข้มของฟลักซ์โฟตอนจะลดลงอย่างเอกซโพเนนเชียลกับระยะทางตลอดสารกึ่งตัว นำ ถ้าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนมีค่ามากโฟตอนจะถูกดูดกลืนด้วยระยะทางที่สั้น

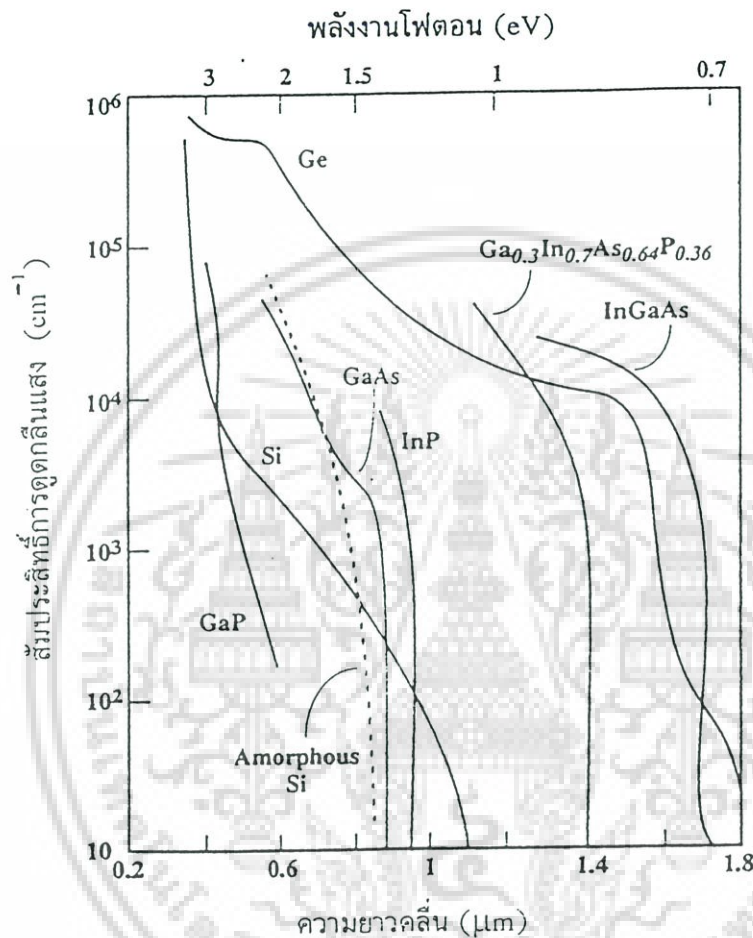
สัมประสิทธิ์การดูดกลืนในสารกึ่งตัวนำเป็นความสัมพันธ์กับพลังงานโฟตอนและช่องว่าง แถบพลังงานอย่างมาก รูปที่ 2.10 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืน α ถูกพรีดเป็นความสัมพันธ์กับ ความยาวคลื่นของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ สองสามชนิด สัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อ $h\nu > E_G$ หรือ $\lambda < 1.24/E_G$ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนมีค่าน้อยมากเมื่อ $h\nu < E_G$ ดังนั้น สารกึ่งตัวนำจะโปร่งแสงเมื่อพลังงานของโฟตอนอยู่ในช่วงนี้

ถ้าเราสมมุติว่าโฟตอนที่ถูกดูดกลืนหนึ่งตัวที่พลังงาน $h\nu$ สร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮล หนึ่งคู่ แล้วอัตราการเกิดของคู่อิเล็กตรอน-โฮล คือ

$$g = \frac{\alpha I_V(x)}{h\nu} \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งหน่วย $\#/ \text{cm}^3 \text{-sec}$ เราอาจจะสังเกตว่าอัตราส่วน $I_V(x)/h\nu$ คือฟลักซ์โฟตอน ถ้าโดยเฉลี่ยแล้วโฟตอนที่ถูกดูดกลืนหนึ่งตัวเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลน้อยกว่าหนึ่งคู่แล้วสมการ(2.26) จะต้องถูกคูณด้วยสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพ (efficiency factor)



รูปที่ 2.11 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเป็นความสัมพันธ์กับความยาวคลื่นของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ

สัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนในสารกึ่งตัวนำจะมีความสัมพันธ์กับพลังงานโฟตอนที่ตกกระทบหรือความยาวคลื่นเป็นอย่างมาก ซึ่งจากรูปที่ 2.11 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเป็นความสัมพันธ์กับความยาวคลื่นของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ เมื่อสัมประสิทธิ์การดูดกลืนมีค่าเพิ่มขึ้น พลังงานโฟตอนจะถูกดูดกลืนมากขึ้นและจะถูกดูดกลืนที่พื้นผิวสารกึ่งตัวนำมากกว่าในเนื้อสารที่ลึกลงไป ในกรณีนี้ถือว่าเราได้ผลิตพาหะส่วนเกินที่ไม่สม่ำเสมอให้แก่เซลล์แสงอาทิตย์ จำนวนโฟตอนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกดูดกลืนต่อ cm^3 ต่อ sec เป็นความสัมพันธ์กับระยะทาง x จากพื้นผิว และสามารถเขียนได้ว่า $\alpha N_0 e^{-\alpha x}$ ซึ่ง N_0 คือฟลักซ์ของโฟตอนที่ตกกระทบบนพื้นผิว ($\text{cm}^2 \text{sec}^{-1}$) ของสารกึ่งตัวนำ เราสามารถรวมโฟตอนที่สะท้อนจากพื้นผิวเข้าไป ให้ $R(\lambda)$ คือสัดส่วนของโฟตอนที่ถูกสะท้อน (สำหรับซิลิคอน $R \approx 35$ เปอร์เซ็นต์) ถ้าเราสมมติว่าโฟตอนที่ถูกดูดกลืนแต่ละตัวสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮล ขึ้นมาแล้วอัตราการเกิดของคู่อิเล็กตรอน-โฮล จะเป็นความสัมพันธ์กับระยะทางจากพื้นผิว x ความสามารถของสารกึ่งตัวนำในการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆกันกำหนดด้วยค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption Coefficient) ตามกฎของแลมเบิร์ต (Lambert's Law) ดังสมการต่อไปนี้ [5]

$$N(x) = N_0 \exp(-\alpha(\lambda).x) \quad (2.27)$$

โดยที่ x คือ ระยะทางจากผิวของสารกึ่งตัวนำ

N_0 คือ จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำต่อตารางเซนติเมตร

$\alpha(\lambda)$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของสารกึ่งตัวนำที่ความยาวคลื่นใดๆ

โดยทั่วไปแล้วยิ่งความกว้างของแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกันมีค่ามากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจะมีค่าลดลง นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ สภาพผิว ความหนาแน่นของสารเจือปน และความหนาแน่นของพาหะอิสระ

จากสมการที่ 2.27 เมื่อสารกึ่งตัวนำดูดกลืนโฟตอนที่ความยาวคลื่นต่างๆแล้วทำให้เกิดการสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น ดังนั้นจึงได้สมการอัตราการเกิดพาหะ (Generation Rate) [6] ดังสมการต่อไปนี้

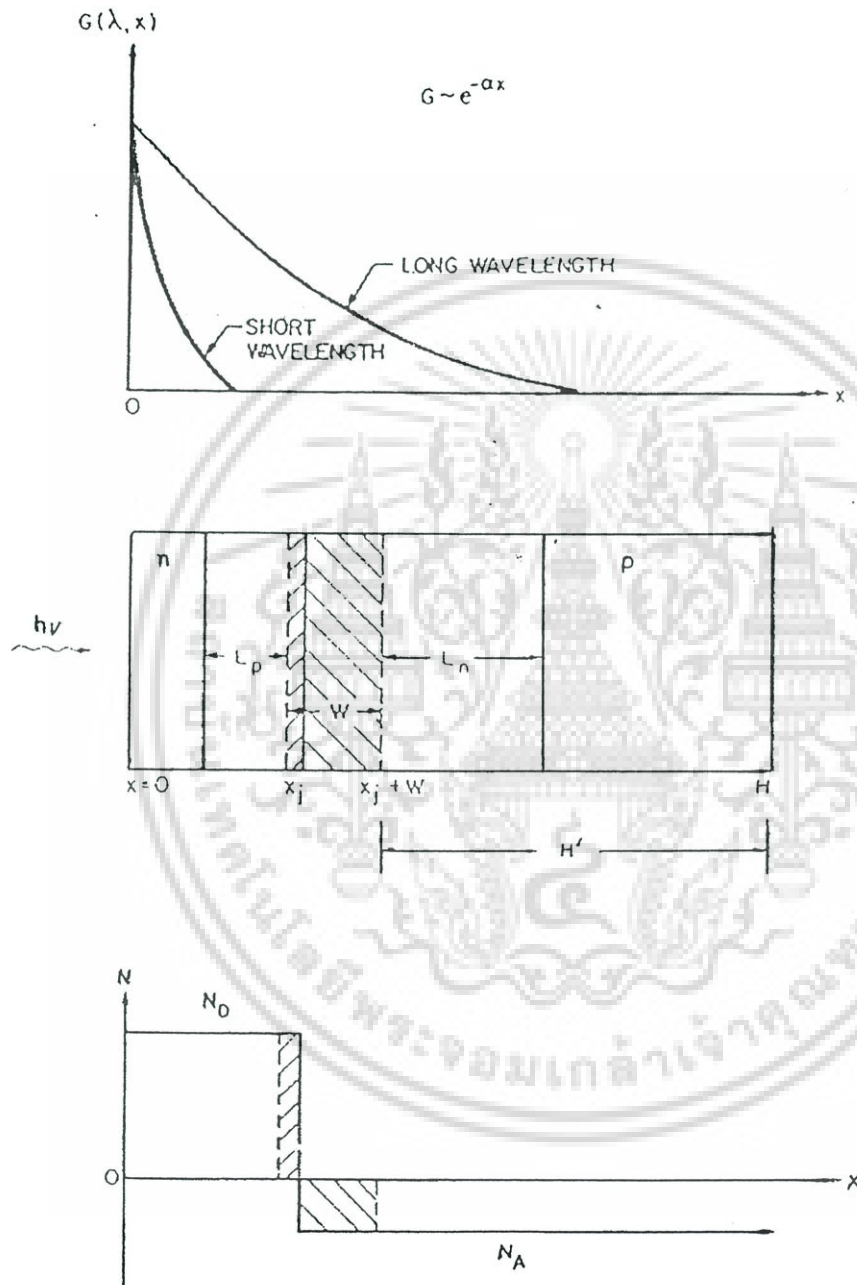
$$G(\lambda, x) = \frac{dN}{dx} = \alpha(\lambda).N_0(\lambda). \exp(-\alpha(\lambda).x) \quad (2.28)$$

เมื่อผิวหน้ามีการสะท้อนแสงเกิดขึ้นจากสมการที่ (2.28) จะเปลี่ยนเป็น

$$G(\lambda, x) = \alpha(\lambda).N_0(\lambda).(1-R) \exp(-\alpha(\lambda).x) \quad (2.29)$$

เมื่อ R คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (Reflection Coefficient)

ซึ่งตัวพารามิเตอร์แต่ละตัวอาจจะเป็นความสัมพันธ์กับความยาวคลื่นที่ตกกระทบ การดูดกลืนที่ไม่สม่ำเสมอจะลดกำลังงานสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถจะรับได้ จากสมการที่ 2.29 เราจะพบว่าอัตราการเกิดพาหะด้วยแสงจะมีค่าสูงสุดที่บริเวณผิวหน้าด้านรับแสงและจะลดลงแบบเอกซ์โปเนนเชียลตามระยะทางความลึกของสารกึ่งตัวนำดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอัตราการเกิดพาหะเมื่อเทียบกับความลึกของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นภายใต้แสงอาทิตย์ ผลรวมของอัตราการเกิดพาหะที่ความยาวคลื่นทั้งหมดคือ

$$G(\lambda, x) = \int_0^{\lambda_{\max}} \alpha(\lambda) \cdot N_0'(\lambda) \cdot (1-R) \cdot \exp(-\alpha(\lambda) \cdot x) dx \quad (2.30)$$

โดยที่ $N_0'(\lambda)$ คือฟोटอนฟลักซ์ต่อหน่วยความยาวคลื่นแสง

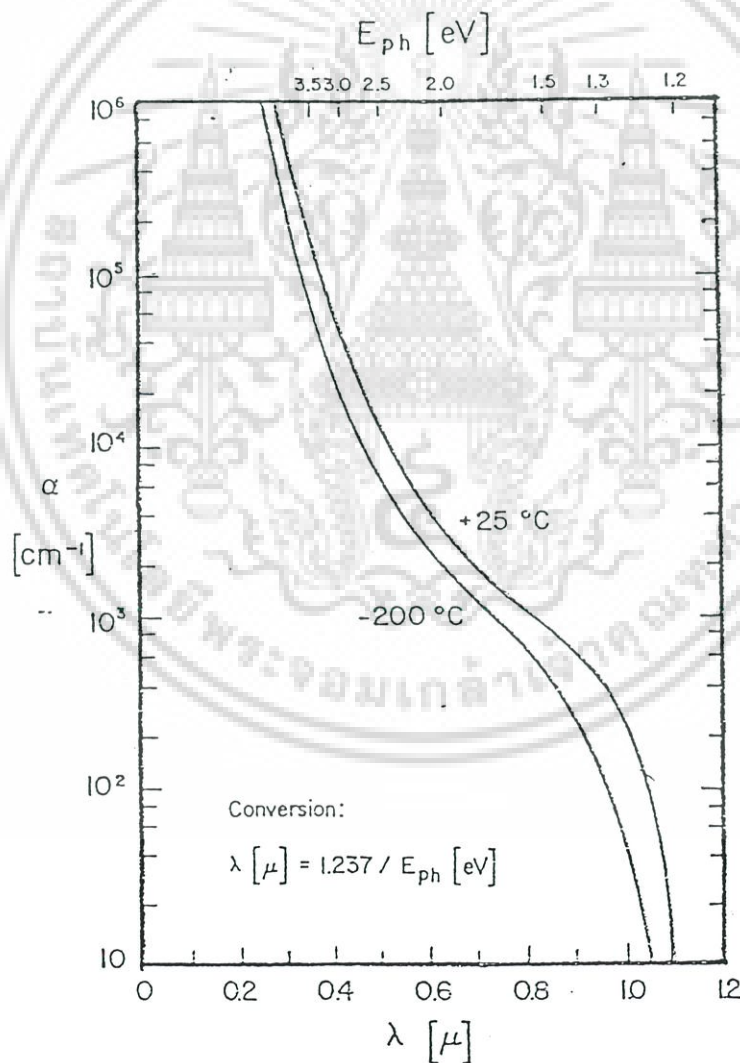
N_d, N_a คือค่าความหนาแน่นอะตอมสารเจือผู้ให้และผู้รับตามลำดับ

x_j คือระยะความลึกรอยต่อพี-เอ็น

L_p, L_n คือระยะทางแพร่ซึมของโฮลในด้านเอ็นและอิเล็กตรอนในด้านพีตามลำดับ

G คืออัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสงที่ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

เนื่องจากสารกึ่งตัวนำที่ผู้ทำวิทยานิพนธ์ได้ศึกษานั้น เป็นสารกึ่งตัวนำซิลิคอนฉะนั้นจึงได้นำกราฟที่มีความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับความยาวคลื่นและอุณหภูมิ[7]



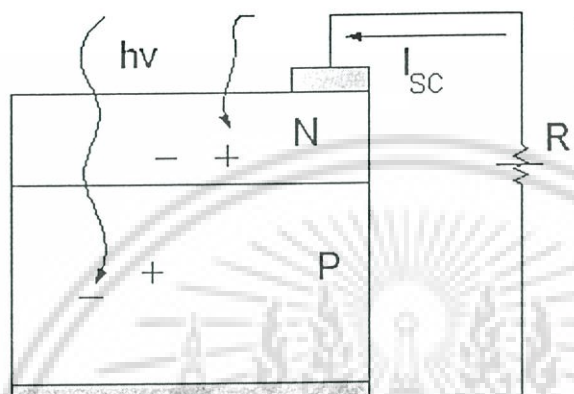
รูปที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับความยาวคลื่น และอุณหภูมิ[8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ปฏิกิริยาโฟโตโวลตาอิกของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น

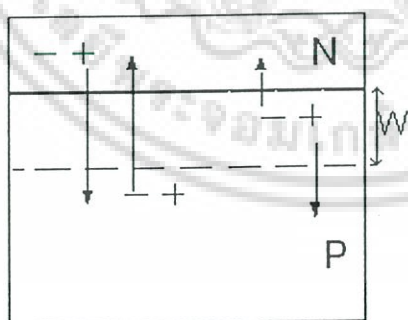
กระบวนการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2.14 ดังนี้คือ[9]

ขั้นที่ 1- เมื่อโฟตอนถูกดูดกลืน แล้วคู่อิเล็กตรอน-โฮลจะถูกสร้างขึ้นทางด้านเอ็นและทางด้านพีของรอยต่อพี-เอ็นดังแสดงในรูปที่ 2.14 ก



รูปที่ 2.14 ก แสดงการเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลที่ด้านเอ็นและพี

ขั้นที่ 2 พหุส่วนเกิน(Excess Minority Carrier) ซึ่งได้แก่อิเล็กตรอนทางด้านพี และโฮลทางด้านเอ็น ซึ่งพหุส่วนเกินทั้งสองจะมีการแพร่ซึมผ่านย่านปลอดพาหะ (Space Charge Region) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.14 ข

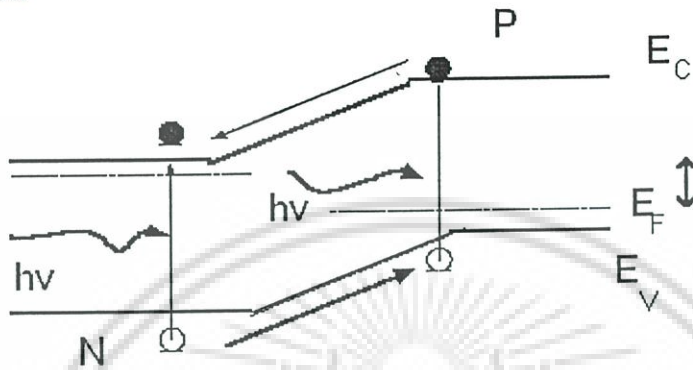


รูปที่ 2.14 ข แสดงพหุส่วนเกินแพร่ซึมผ่านย่านปลอดพาหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

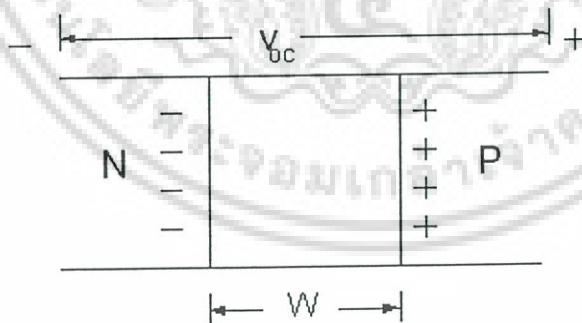
ขั้นที่ 3 สนามไฟฟ้าตรงบริเวณรอยต่อพี-เอ็น จะแยกพาหะนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นให้ไหลข้ามรอยต่อไปที่ขั้วโลหะก่อนที่จะมีการรวมตัวกัน(Recombine) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.14 ค

- คืออิเล็กตรอน
- คือโฮล



รูปที่ 2.14 ค แสดงการเคลื่อนที่อิเล็กตรอนและโฮลไหลข้ามรอยต่อโดยสนามไฟฟ้า

ขั้นที่ 4 ถ้ารอยต่อพี-เอ็นอยู่ในสภาพวงจรเปิด(Open Circuit) อิเล็กตรอนและโฮลที่สะสมอยู่ที่ 2 ข้างของรอยต่อพี-เอ็นจะสร้างแรงดันไฟฟ้าวงจรถัด(Open Circuit Voltage; V_{oc}) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ง และถ้ารอยต่ออยู่ในสภาพต่อลัดวงจรไว้(Short Circuit) จะเกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจร(Short Circuit Current; I_{sc})ให้ไหลดังแสดงในรูปที่ 2.14 ก



รูปที่ 2.14 ง แสดงการเกิดแรงดันไฟฟ้าวงจรถัด(Open Circuit Voltage; V_{oc})

รูปที่ 2.14 กระทบวนการเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า

ถ้าอิเล็กตรอนและโฮลบางส่วนถูกรวมตัว(Recombine) ไปก่อนที่จะถึงขั้วโลหะซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กรณีดังนี้คือ[10]

1. การรวมตัวภายในแวนผลึก(Bulk Recombination) ซึ่งเกิดการรวมตัวโดยผ่านระดับพลังงานระหว่างกลาง(Intermediate Level Centers)
2. การรวมตัวกันที่ผิว(Surface Recombination) ซึ่งเกิดจากสภาพผิว(Surface State) อาจเนื่องมาจาก สภาพแขวนขาด(Dangling Bond) สารเคมีตกค้าง(Cheical Residues) ออกไซด์(Oxide) อัตราการสูญเสียที่ผิวกำหนดได้จากความเร็วการรวมตัวที่ผิว(Surface Recombination Velocity)

2.6 กลไกการดูดกลืนแสงและการผลิตกระแสไฟฟ้าโฟโต

ในหัวข้อที่ผ่านมาได้อธิบายเกี่ยวกับหลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจะกล่าวไว้ว่า เซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตกระแสไฟฟ้าได้ก็ต่อเมื่อพลังงานโฟตอนของแสงอาทิตย์จะมีค่ามากกว่า หรือเท่ากับช่องว่างพลังงานของวัสดุสารกึ่งตัวนำ แต่เรายังไม่ได้มีการพิจารณากันอย่างละเอียดว่าการดูดกลืนแสงที่ดีหรือการผลิตพาหะโฟโตที่ดีนั้นเกิดขึ้นที่ส่วนในใดของเซลล์แสงอาทิตย์ ในหัวข้อนี้เราจะพิจารณากลไกการดูดกลืนแสงและการผลิตพาหะที่เกิดขึ้นที่ส่วนในใดของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบและการทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพให้มากขึ้น

จากรูปที่ 2.15 แสดงสภาพกำลังมีแสงส่องเข้าทางด้านชั้น n และกำลังมีการไบอัสแบบกลับที่รอยต่อพี-เอ็น หมายเลขต่างๆ ในรูปแสดงกลไกการดูดกลืนแสงในลักษณะต่างๆ โดยหมายเลขต่างๆ มีความหมายดังต่อไปนี้

1. เป็นการดูดกลืนแสงอาทิตย์ด้วยสารกึ่งตัวนำซึ่งอยู่เข้าไปด้านหลังและห่างไกลจากชั้นปลอดพาหะ(ในรูปนี้ชั้น n อยู่ด้านหลัง แต่อาจสลับกับชั้น p ก็ได้) ถ้าแสงมีพลังงานโฟตอนมากกว่า หรือเท่ากับช่องว่างพลังงานก็จะทำให้เกิดการดูดกลืนแสงและเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลได้ แต่เนื่องจากไม่มีสนามไฟฟ้าในชั้นนี้ดังนั้นพาหะที่เกิดจาก 1 นี้ จะเคลื่อนที่ได้ด้วยวิธีการแพร่เท่านั้น ซึ่งพาหะอิเล็กตรอนและโฮลส่วนใหญ่จะรวมตัวกันมากกว่าจึงไม่มีบทบาทต่อเอาต์พุตมากนัก
2. เป็นการดูดกลืนแสงอาทิตย์ในชั้น p ระหว่างแถบวาเลนซ์และระดับแอกเซ็ปเตอร์ แต่ในที่สุดพาหะอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ก็จะตกลงมารวมตัวกับโฮลจึงไม่มีบทบาทต่อเอาต์พุตเช่นกัน
3. เหมือนกรณีข้อ 2 แต่เป็นการเปลี่ยนสถานะระหว่างระดับโดเนอร์และแถบคอนดักชัน และไม่มีผลต่อเอาต์พุต

4. เป็นการดูดกลืนแสงอาทิตย์โดยโฮลอิสระ (free hole absorption) ในแถบวาเลนซ์ของชั้น p และเพียงแต่ระดับพลังงานของโฮลลดลงและระดับพลังงานของอิเล็กตรอนสูงขึ้นไปจึงไม่ก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต

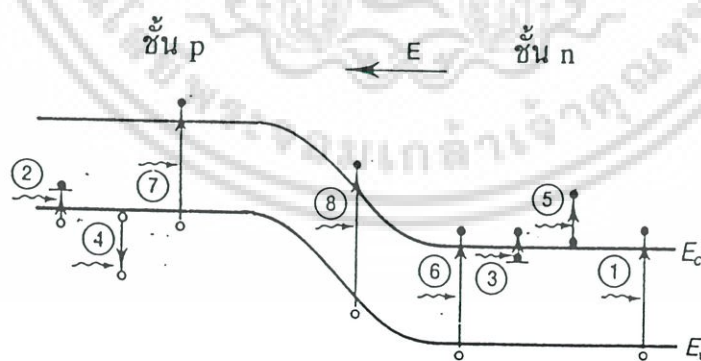
5. เหมือนกรณีข้อ 4 แต่เป็นการดูดกลืนแสงอาทิตย์ด้วยอิเล็กตรอนอิสระในแถบคอนดักชัน และไม่มีผลต่อเอาต์พุต

6. เป็นการดูดกลืนแสงในชั้น n ที่ตำแหน่งใกล้ชั้นปลอดพาหะมาก พาหะอิเล็กตรอนข้างมากจะแพร่เข้าไปสู่ชั้น p ทางด้านหลัง และพาหะโฮลข้างน้อยจะมีความน่าจะเป็นสูงในการแพร่เข้ามาไปในชั้นปลอดพาหะ และโฮลจะถูกสนามไฟฟ้าในชั้นปลอดพาหะกวาดให้ไหลผ่านไปสู่ชั้น p และโฮลเหล่านี้จะมีผลต่อเอาต์พุต

7. เป็นการดูดกลืนแสงในชั้น p ที่ตำแหน่งใกล้ชั้นปลอดพาหะมาก พาหะอิเล็กตรอนข้างน้อยจะมีความน่าจะเป็นสูงในการแพร่เข้ามาไปในชั้นปลอดพาหะ และอิเล็กตรอนจะถูกสนามไฟฟ้าในชั้นปลอดพาหะกวาดให้ไหลผ่านไปสู่ชั้น n และอิเล็กตรอนเหล่านี้จะมีผลต่อเอาต์พุต

8. เป็นการดูดกลืนแสงและผลิตคู่อิเล็กตรอน-โฮลในชั้นปลอดพาหะ พาหะอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นจะถูกสนามไฟฟ้าในชั้นปลอดพาหะกวาดและแยกออกจากกันให้ไหลไปสู่ n และ p ตามลำดับจะมีผลต่อเอาต์พุตมากที่สุด

จากที่กล่าวมาข้างต้นนี้ กลไกหมายเลข 6 - 8 โดยเฉพาะอย่างยิ่งหมายเลข 8 จะมีผลในการผลิตกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตมากที่สุด



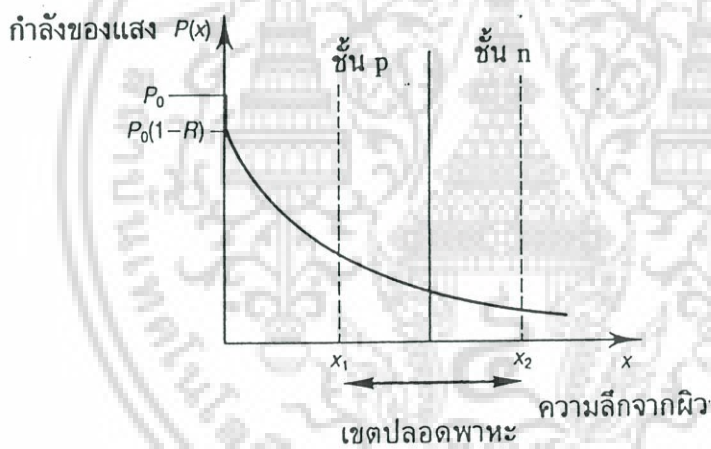
รูปที่ 2.15 กลไกการดูดกลืนแสงแบบต่างๆ ในรอยต่อพี-เอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากจำนวนของพาหะที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสงนั้นแปรผันตรงกับกำลังของแสง อาทิตยที่ตำแหน่งต่างๆในสารกึ่งตัวนำจึงมีความสำคัญมาก ขอให้พิจารณาในรูปที่ 2.16 ให้แกนในแนวนอนคือความลึก กล่าวคือตำแหน่งในสารกึ่งตัวและแกนในแนวตั้งคือกำลังของแสง ให้กำลังของแสงอินพุตเริ่มแรกมีค่า P_0 ให้สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่ผิวของสารกึ่งตัวนำคือ R ดังนั้นกำลังของแสงที่เข้าสู่สารกึ่งตัวนำคือ $P_0(1-R)$ ในขณะที่แสงเดินทางอยู่ในสารกึ่งตัวนำ แสงจะถูกดูดกลืนและกำลังของแสงจะลดลงอย่างเอ็กโพเนนเชียลตามระยะทางนี้

$$P(x) = P_0(1-R)\exp(-\alpha \cdot x) \quad (2.25)$$

โดยที่ α คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ

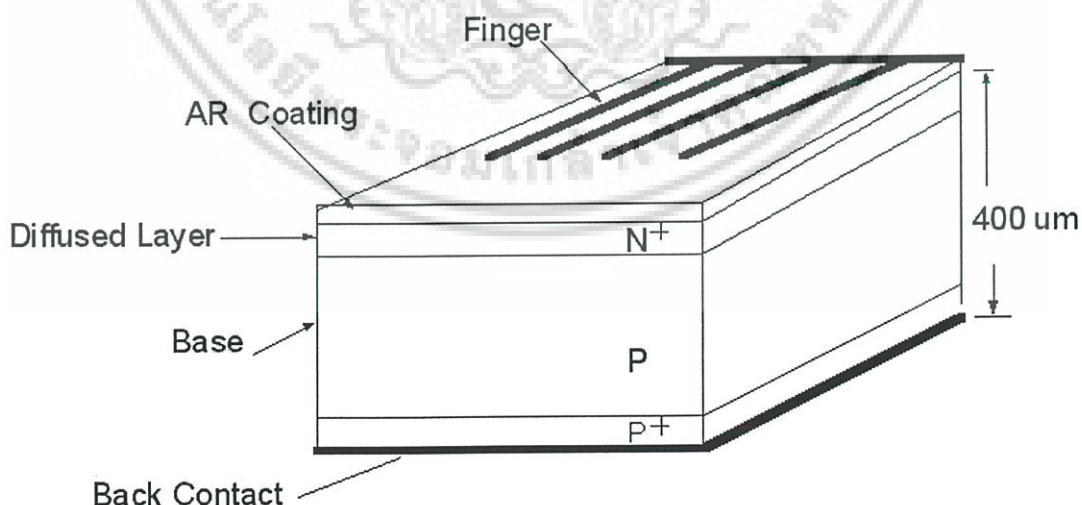


รูปที่ 2.16 การลดลงของกำลังของแสงตามระยะทางความลึกจากผิวของสารกึ่งตัวนำย่านปลอดพาหะอยู่ระหว่างตำแหน่ง x_1 และ x_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์

โครงสร้างหลักโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ได้แก่ โครงสร้างรอยต่อแบบพี-เอ็น ที่ทำด้วยซิลิคอนดังแสดงในรูปที่ 2.17 แวนผลึกซิลิคอนที่ใช้เป็นฐานจะมีความหนาประมาณ 200-400 ไมครอน ด้านที่รับแสงจะมีชั้นแพร่ซึมที่มีชนิดตรงกันข้ามกับชนิดที่ใช้กับฐานและมีความหนาประมาณ 0.2-1.0 ไมครอน การออกแบบให้ความลึกของรอยต่อพี-เอ็นของเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีค่าน้อยๆ เพราะต้องการให้แสงตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ทะลุถึงรอยต่อพี-เอ็นให้มากที่สุด หากรอยต่อพี-เอ็นอยู่ลึกเกินไปจะทำให้จำนวนพาหะที่เกิดขึ้นจากการดูดกลืนแสงแพร่ซึมถึงรอยต่อพี-เอ็นได้น้อยลง สามารถส่งผลให้ปริมาณการเกิดของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าโฟโต(Photo-current) ที่ได้มีจำนวนน้อยลง ดังนั้นซิลิโहरับแสงมักจะได้รับการออกแบบให้เป็นรูปปลายนิ้วมือหรือรูปแบบอื่นๆที่ใช้พื้นที่น้อยที่สุด เพื่อให้ได้พื้นที่รับแสงอาทิตย์ได้มากที่สุด และขณะเดียวกันซิลิโหรับแสงนั้นสามารถรวบรวมพาหะนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้มากที่สุด ส่วนซิลิโหวางด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องเป็นผิวสัมผัสแบบโอห์มมิกที่ดี ซึ่งฉาบไว้เต็มด้านหลังแผ่น ผิวทางด้านรับแสงที่นอกเหนือจากซิลิโหแล้วยังมีชั้นด้านการสะท้อนแสง (Anti-Reflection Coating) ปิดทับเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดกลืนแสงอีกด้วยชั้นด้านการสะท้อนแสงนี้อาจได้แก่ SiO_2 ซึ่งทำชั้นหนาประมาณ 800-1000 Å จากนั้นจึงนำเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ไปประกอบในแผงที่ห่อหุ้มมิดชิดสามารถป้องกันความชื้น ฝุ่นละออง เพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์มีคุณภาพดีตลอดไป



รูปที่ 2.17 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.17 ถ้าความหนาของแผ่นฐานน้อยกว่าค่าๆหนึ่ง จะทำให้อิเล็กตรอนที่เกิดจากแสงบางตัวแพร่ซึมไปรวมตัวกับโฮลที่ด้านหลังของแผ่นฐานได้ เพื่อป้องกันข้อบกพร่องนี้ จึงได้มีการออกแบบให้มีการเติมสารเจือปนด้านหลังของแผ่นฐานให้เป็นชนิด P^+ ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์จึงมีรอยต่อเป็น n^+pp^+ และเรียกโครงสร้างเช่นนี้ว่า โครงสร้าง BSF(back surface field) เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง BSF มีคุณสมบัติดังนี้[11]

1. มีการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นยาวได้ดีขึ้น เพราะอิเล็กตรอนที่แพร่ซึมไปด้านหลังกำแพงศักย์ของชั้น P^+ สะท้อนให้ไหลกลับไปด้านหน้า
2. ชั้น pp^+ ทำให้แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดเพิ่มขึ้น
3. ชั้น P^+ ช่วยลดความต้านทานอนุกรมของโฮลลง จึงทำให้ฟิลล์แพกเดอรัของเซลล์แสงอาทิตย์ดีขึ้น

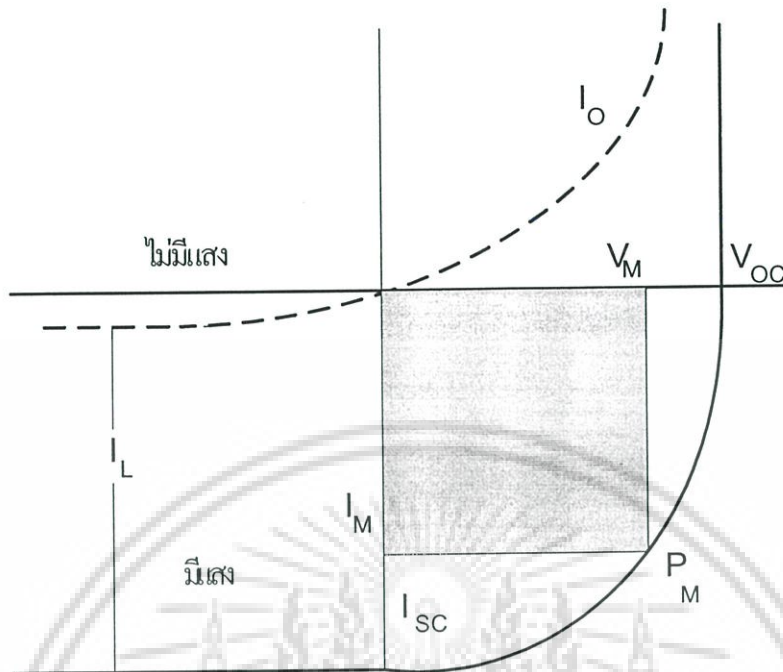
2.8 ลักษณะสมบัติ ของพารามิเตอร์ที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์

จากการศึกษาโครงสร้างหลักของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งมีลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า เช่นเดียวกับไดโอดโดยทั่วไป ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์จะขึ้นอยู่กับพื้นที่รับแสง กล่าวคือมีความสามารถในการเรียงกระแสไฟฟ้า(Current Rectification) ได้ ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์จึงมีลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ดังเส้นประในรูปที่ 2.18 ในสภาพไม่ถูกแสง และเมื่อมีการฉายแสงให้ตกกระทบบรรยากาศที่-เอ็น จะเกิดปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิกขึ้น ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าจะเปลี่ยนไปเป็นเส้นเต็มในรูปที่ 2.18 และพื้นที่ภายใต้เส้นโค้งที่แรงเงาคือ กำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์นั้นผลิตได้ แต่กำลังไฟฟ้าที่จะนำไปใช้งานจริงๆนั้น จะกำหนดได้จากการต่อโหลดที่เหมาะสมเพื่อให้ได้กระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าค่าสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 2.18

P_M คือ จุดพลังงานสูงสุด

V_{oc} คือค่าของแรงดันวงจรเปิด(Open circuit voltage) จะมีค่ามากน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของช่องว่างพลังงาน(Energy gap) ของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำเป็นเซลล์แสงอาทิตย์

I_M, V_M คือค่าของกระแสและแรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด



รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะสมบัติกระแส- แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

หลักการการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถตรวจสอบได้โดยการพิจารณาจากค่าพารามิเตอร์หลักๆ 3 ตัวคือ[12]

1. ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร(Short Circuit Current; I_{sc}) เป็นกระแสไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อค่ากระแสไฟฟ้าเป็นศูนย์ ถ้าช่องว่างพลังงานมีค่ามาก จะทำให้ V_{oc} มีค่ามากและกระแส I_{sc} มีค่าลดลง

2. แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด(V_{oc})

ข้อจำกัดพื้นฐานที่เป็นตัวกำหนดค่าสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด(V_{oc}) ยังไม่เป็นที่ทราบชัดเจน อย่างไรก็ตามสมการแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด(V_{oc}) คือ

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right) \quad (2.31)$$

โดยที่ I_0 คือกระแสไฟฟ้าย้อนกลับอิมิตัว และมีค่าเท่ากับ

$$I_0 = qA \left(\frac{D_n n_i^2}{L_n \cdot N_A} + \frac{D_p n_i^2}{L_p \cdot N_D} \right) \quad (2.32)$$

I_0 ควรมีค่าต่ำที่สุดจึงจะทำให้ได้ V_{OC} สูงสุด ในกรณีของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Si ผลการคำนวณค่าสูงสุดของ V_{OC} ได้ผลประมาณ 700 mV และค่าสูงสุดของฟิลล์แพกเตอร์ได้ประมาณ 0.84[3]

ในสมการที่(2.32) พารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งคือ ความหนาแน่นของพาหะ(n_i) ในกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดบริสุทธิ์ n_i มีค่าเท่ากับ

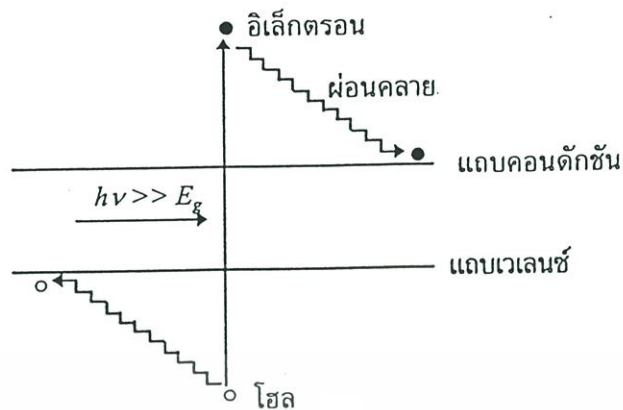
$$n_i^2 = N_C N_V \exp\left(-\frac{E_G}{KT}\right) \quad (2.33)$$

จากสมการที่(2.32)ผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่าง I_0 และช่องว่างพลังงาน E_G ที่พอจะเป็นที่ยอมรับกันมีค่าดังนี้

$$I_0 = 1.5 \times 10^5 \exp\left(\frac{-E_G}{KT}\right) \quad \text{A/cm}^2 \quad (2.34)$$

จากสมการที่(2.33) และ (2.34) ซึ่งให้เราทราบว่าถ้าช่องว่างพลังงานมีค่ามาก จะทำให้ V_{OC} มีค่ามากด้วย ซึ่งผลการวิเคราะห์นี้เป็นสิ่งที่ตรงข้ามกับกรณีของ I_{SC} (ถ้าช่องว่างพลังงานมีค่ามาก จะทำให้ I_{SC} มีค่าลดลง)

เหตุผลหนึ่งที่มีส่วนทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าน้อยได้แก่ การที่เมื่อเกิดการดูดกลืนโฟตอนที่มีพลังงานโฟตอนมากกว่าช่องว่างพลังงาน คู่ของอิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานโฟตอนสูงเช่นนี้ จะมีระดับพลังงานที่สูงกว่าขอบของแถบคอนดักชันและแถบวาเลนซ์มาก อิเล็กตรอนและโฮลจะผ่อนคลายพลังงานให้โฟนอนในรูปของความร้อน และอิเล็กตรอนจะตกลงมาอยู่ที่ขอบของแถบพลังงานดังกล่าวดังในรูปที่ 2.19 และไม่ได้มีส่วนร่วมในการผลิตกระแสไฟฟ้า ปรากฏการณ์การผ่อนคลายโฟนอนนี้มีส่วนในการจำกัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ไว้ถึง 44%[13]



รูปที่ 2.19 การผ่อนคลายพลังงานความร้อนของอิเล็กตรอนและโฮลในกรณีที่ดูดกลืนพลังงานแสงที่มีพลังงานโฟตอนมากกว่าช่องว่างพลังงาน

3. ค่าฟิลล์แฟกเตอร์(Fill Factor; FF)

เอาต์พุตพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งคือ ฟิลล์แฟกเตอร์(fill factor) เขียนย่อว่า FF ถ้าเรานิยามว่า $V_{oc} = V_{oc} / (nKT/q)$ ดังนั้นเราจะเขียนสมการของฟิลล์แฟกเตอร์ให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ว่า[14]

$$FF = \frac{V_{oc} - \ln(V_{oc} + 0.72)}{V_{oc} + 1} \quad (2.35)$$

เมื่อกำหนดให้ค่า n คือค่าแฟกเตอร์โดยที่ถ้าแฟกเตอร์ n เพิ่มขึ้น ก็จะทำให้ V_{oc} ลดลง ดังนั้นค่าฟิลล์แฟกเตอร์ก็จะต้องลดลงด้วยถ้า n มีค่าเพิ่มขึ้น(กำหนดให้ค่า $n=1$)

ประสิทธิภาพสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอนในทางทฤษฎี
ชอกลีย์ได้คำนวณหาค่าประสิทธิภาพสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน [14] สมมุติว่าโฟตอนที่มีค่ามากกว่าช่องว่างพลังงานถูกสารกึ่งตัวนำดูดกลืนและโฟตอนทุกตัวสามารถผลิตอิเล็กตรอนได้ และให้สเปกตรัมของแสงอาทิตย์มีรูปแบบสเปกตรัมของวัตถุดำที่อุณหภูมิ 6,000 K ผลการคำนวณได้ผลว่า ประสิทธิภาพสูงสุดได้จากผลึกที่มีช่องว่างพลังงาน 1.1 eV และมีประสิทธิภาพ 44% ผลการคำนวณนี้ไม่สามารถนำมาใช้ได้ในทางปฏิบัติ เพราะในเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นจริงจะมีการสูญเสียต่างๆ เกิดขึ้น ต่อไปจะแสดงวิธีการประเมินหาค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอนที่ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงดังสมการต่อไปนี้

$$\eta = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{P_{in}} \cdot 100\% \quad (2.36)$$

เมื่อ P_{in} คือกำลังแสงอินพุต(ภายใต้แสงอาทิตย์ความเข้ม AM 1.5 (83.2 mW/cm^2))



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบโปรแกรมและการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

ในการออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อหาคำนวนหาประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจำเป็นในการเข้าใจถึงข้อจำกัดต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงที่รับเข้ามาให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้าทั้งหมด รวมทั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่นการหาค่าความหนาแน่นของพาหะส่วนเกินที่เกิดจากการป้อนแรงดันที่สภาวะไม่ได้รับแสง และความหนาแน่นพาหะส่วนเกินที่เกิดจากการฉายแสงให้แก่เซลล์แสงอาทิตย์ รวมทั้งอัตราการเกิดพาหะที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น ที่เกี่ยวข้องกับการหาค่ากระแสไฟฟ้าโฟโต ซึ่งจะนำสู่การหาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร เพื่อนำค่าเหล่านี้มาปรับปรุงการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ให้ดียิ่งขึ้น และเหมาะสมกับการนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้งานในด้านต่างๆ

3.1 การออกแบบการคำนวณในโปรแกรม

ในขั้นตอนการออกแบบสมการที่ใช้ในโปรแกรมเริ่มต้นด้วยการพิจารณาสมการพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำซึ่ง เริ่มตั้งแต่พิจารณาที่มาจากค่าของศักดาไฟฟ้าจะสมการปัวซอง(Poisson's Equation) และความหนาแน่นของพาหะ จะพิจารณาจากสมการความต่อเนื่องของพาหะ(Carrier Continuity Equation) ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ดังนี้

สมการปัวซอง(Poisson's Equation)

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

ความสัมพันธ์ระหว่างระยะกระจัด และสนามไฟฟ้า $\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E}$

ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า $\vec{E} = -\text{grad}\phi$

แทนค่าจะได้

$$\text{div}(\epsilon \cdot \text{grad}\phi) = -\rho$$

$$\text{div}(\text{grad}\phi) = \frac{\rho}{\epsilon} \cdot (n - p - C) \quad (3.1)$$

ซึ่งค่า $C = N_d - N_a$

สมการความต่อเนื่องของพาหะ(Carrier Continuity Equations)

พิจารณาความหนาแน่นกระแสจากสมการMaxwell นี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แยกความหนาแน่นกระแสออก 2 ส่วน เป็นดังนี้ $\vec{J} = \vec{J}_n + \vec{J}_p$

สมมติว่า $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$ เมื่อ C is the ionized impurity density

และ $\rho = q(p - n + C)$

ดังนั้นแทนค่าสมการของ Maxwell จึงได้เป็น

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

ดังนั้นจะได้สมการความต่อเนื่องของพาหะทั้งสอง

สมการความต่อเนื่องสำหรับอิเล็กตรอนแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$\text{div} \vec{J}_n - q \frac{\partial n}{\partial t} = qR \quad (3.2)$$

สมการความต่อเนื่องสำหรับโฮลแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$\text{div} \vec{J}_p + q \frac{\partial p}{\partial t} = -qR \quad (3.3)$$

ฉะนั้นเราจะได้สมการความหนาแน่นกระแสเป็นดังนี้

$$\vec{J}_n = -q(\mu_n n \cdot \text{grad} \Phi - D_n \cdot \text{grad} n) \quad \text{สำหรับอิเล็กตรอน} \quad (3.4)$$

$$\vec{J}_p = -q(\mu_p p \cdot \text{grad} \Phi + D_p \cdot \text{grad} p) \quad \text{สำหรับโฮล} \quad (3.5)$$

โดยที่

Φ คือ ศักย์ไฟฟ้า

q คือ ประจุอิเล็กตรอน

ϵ คือ สภาพยอม (Permittivity) ของสารกึ่งตัวนำ

n, p คือ ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

C คือ ค่าความหนาแน่นอะตอมสารเจือสุทธิต่างที่แตกตัวเป็นไอออน

R คือ อัตราการเกิด/การรวมตัวใหม่สุทธิของพาหะอิเล็กตรอนและโฮล

μ_n, μ_p คือ สภาพคล่อง (Mobility) ของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D_n, D_p คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

J_n, J_p คือ ค่าความหนาแน่นกระแสอิเล็กตรอนและโฮล

3.2 สร้างสมการที่ใช้คำนวณ

โดยในการออกแบบการคำนวณในโปรแกรมจะเป็นลักษณะสามสมการและหาสามตัวแปรที่ไม่ทราบค่า โดยตัวแปร F_1, F_2 และ F_3 และตัวแปร derivative ของ F_1, F_2 และ F_3 เป็นตัวแปรที่ทราบค่าและจะใช้วิธีการตั้งเมตริกคำนวณหาตัวแปรที่ไม่ทราบค่าทั้งสามตัวแปรซึ่งในที่นี้คือ $\delta\varphi(i), \delta n(i), \delta p(i)$

สามารถแสดงสมการเพื่อหาตัวแปร F_1, F_2 และตัวแปร derivative ของ F_1, F_2 และ F_3 รวมถึงการหาค่า $\delta\varphi(i), \delta n(i), \delta p(i)$ ดังนี้

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

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

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ทำการจัดรูป Derivatives ของ F_1 , F_2 และ F_3 เทียบ Φ, n, p เป็นดังนี้ เพื่อตั้งเมตริกหา $\delta\Phi(i), \delta n(i), \delta p(i)$

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

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

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

$$\frac{\partial F_2}{\partial \Phi} = -n_{i-1} \cdot D_{n|i-1/2} \cdot \frac{dB_4}{dX_4} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{1}{h_{i-1}} - n_i \cdot D_{n|i-1/2} \cdot \frac{dB_3}{dX_3} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{1}{h_{i-1}}$$

$$-n_i \cdot D_{n|i+1/2} \cdot \frac{dB_2}{dX_2} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{1}{h_i} - n_{i+1} \cdot D_{n|i+1/2} \cdot \frac{dB_1}{dX_1} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{1}{h_i}$$

-0

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial F_3}{\partial \varphi} = n_{i-1} \cdot D_{p|i-1/2} \cdot \frac{dB_3}{dX_3} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{1}{h_{i-1}} + p_i \cdot D_{p|i-1/2} \cdot \frac{dB_4}{dX_4} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{1}{h_{i-1}}$$

$$+ p_i \cdot D_{p|i+1/2} \cdot \frac{dB_1}{dX_1} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{1}{h_i} + p_{i+1} \cdot D_{p|i+1/2} \cdot \frac{dB_2}{dX_2} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{1}{h_i}$$

- 0

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

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

โดยค่าที่แทนในสมการหาได้มาจากสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{dB_1}{dX_1} = \frac{\exp(\frac{\varphi_{i+1} - \varphi_i}{U_t}) - (\frac{\varphi_{i+1} - \varphi_i}{U_t}) \cdot \exp(\frac{\varphi_{i+1} - \varphi_i}{U_t}) - 1}{(\exp(\frac{\varphi_{i+1} - \varphi_i}{U_t}) - 1)^2}$$

$$\frac{dB_2}{dX_2} = \frac{\exp(\frac{\varphi_i - \varphi_{i+1}}{U_t}) - (\frac{\varphi_i - \varphi_{i+1}}{U_t}) \cdot \exp(\frac{\varphi_i - \varphi_{i+1}}{U_t}) - 1}{(\exp(\frac{\varphi_i - \varphi_{i+1}}{U_t}) - 1)^2}$$

$$\frac{dB_3}{dX_3} = \frac{\exp(\frac{\varphi_i - \varphi_{i-1}}{U_t}) - (\frac{\varphi_i - \varphi_{i-1}}{U_t}) \cdot \exp(\frac{\varphi_i - \varphi_{i-1}}{U_t}) - 1}{(\exp(\frac{\varphi_i - \varphi_{i-1}}{U_t}) - 1)^2}$$

$$\frac{dB_4}{dX_4} = \frac{\exp(\frac{\varphi_{i-1} - \varphi_i}{U_t}) - (\frac{\varphi_{i-1} - \varphi_i}{U_t}) \cdot \exp(\frac{\varphi_{i-1} - \varphi_i}{U_t}) - 1}{(\exp(\frac{\varphi_{i-1} - \varphi_i}{U_t}) - 1)^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

3.3 กรณีกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition)

ที่โหนดมิดคอนแทคที่ 1 ทางด้านหน้าคือสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (At ohmic contact 1)

$$\Phi_{\text{contact1}} = \Phi_{\text{builtinpotential}} - V_{\text{ap}} \quad (3.6)$$

$$n_{\text{contact1}} = \frac{\sqrt{C^2 + 4 \cdot n_I^2} + C}{2} \quad C = N_d$$

$$p_{\text{contact1}} = \frac{n_I^2}{n_{\text{contact1}}} \quad (3.7)$$

โดยที่การหาค่าศักย์ไฟฟ้าภายในคือสมการดังต่อไปนี้

$$\Phi_{\text{builtinpotential}} = \frac{KT}{q} \cdot \ln \left[\frac{N_d}{2 \cdot n_I} + \sqrt{\left(\frac{N_d}{2 \cdot n_I}\right)^2 + 1} \right] \quad (3.8)$$

ที่โหนดมิดคอนแทคที่ 2 ทางด้านหลังคือสารกึ่งตัวนำชนิดพี (At ohmic contact 2)

$$\Phi_{\text{contact2}} = \Phi_{\text{builtinpotential}} \quad (3.9)$$

$$p_{\text{contact2}} = \frac{\sqrt{C^2 + 4 \cdot n_I^2} - C}{2} \quad C = -N_a$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n_{\text{contact 2}} = \frac{n_I^2}{P_{\text{contact 2}}} \quad (3.10)$$

โดยที่การหาค่าศักย์ไฟฟ้าภายในคือสมการดังต่อไปนี้

$$\Phi_{\text{builtinpot ential}} = \frac{KT}{q} \cdot \ln \left[\frac{N_a}{2 \cdot n_I} + \sqrt{\left(\frac{N_a}{2 \cdot n_I}\right)^2 + 1} \right] \quad (3.11)$$

กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) ของ $\varphi(i), n(i), p(i)$

โดยที่ในบริเวณด้านเอ็นจะมีค่า

$$\varphi(i) = \varphi_{\text{contact 1}}, \quad n(i) = n_{\text{contact 1}}, \quad p(i) = p_{\text{contact 1}}$$

และที่ในบริเวณด้านพีจะมีค่า

$$\varphi(i) = \varphi_{\text{contact 2}}, \quad n(i) = n_{\text{contact 2}}, \quad p(i) = p_{\text{contact 2}}$$

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

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

โดยที่มีเงื่อนไขว่าค่า delta ต้องน้อยกว่า 1×10^{-10}

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \varphi} & 0 & 0 \\ \frac{\partial F_2}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_2}{\partial n} & 0 \\ \frac{\partial F_3}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_3}{\partial n} & \frac{\partial F_3}{\partial p} \\ \frac{\partial \varphi}{\partial \varphi} & \frac{\partial \varphi}{\partial n} & \frac{\partial \varphi}{\partial p} \end{bmatrix}^k \cdot \begin{bmatrix} \delta\varphi^k \\ \delta n^k \\ \delta p^k \end{bmatrix}^{m+1} = - \begin{bmatrix} F_1(\varphi^k, n^k, p^k) \\ F_2(\varphi^k, n^k, p^k) \\ F_3(\varphi^k, n^k, p^k) \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$- \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial F_1}{\partial n} & \frac{\partial F_1}{\partial p} \\ 0 & 0 & \frac{\partial F_2}{\partial p} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^k \bullet \begin{bmatrix} \delta\varphi^k \\ \delta n^k \\ \delta p^k \end{bmatrix}^m$$

โดยสมการที่ใช้มีค่าเป็น

$$\frac{\partial F_1^k}{\partial \varphi} \cdot \delta\varphi^{km+1} = -\omega \cdot F_1(\varphi^k, n^k + \delta n^{km}, p^k + \delta p^{km})$$

$$\frac{\partial F_2^k}{\partial n} \cdot \delta n^{km+1} = -\omega \cdot F_2(\varphi^k + \delta\varphi^{km+1}, n^k, p^k + \delta p^{km})$$

$$\frac{\partial F_3^k}{\partial p} \cdot \delta p^{km+1} = -\omega \cdot F_3(\varphi^k + \delta\varphi^{km+1}, n^k + \delta n^{km+1}, p^k)$$

และกำหนดให้ $\frac{\partial F_1^k}{\partial \varphi}, \frac{\partial F_2^k}{\partial n}, \frac{\partial F_3^k}{\partial p}$, เท่ากับ $\frac{\partial F_1}{\partial \varphi}, \frac{\partial F_2}{\partial n}, \frac{\partial F_3}{\partial p}$,

เมื่อค่าของ $\delta\varphi^{km+1} = \varphi^{km+1} - \varphi^{km}$

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

$$\delta p^{km+1} = p^{km+1} - p^{km}$$

$$F_1(\varphi^k, n^k + \delta n^{km}, p^k + \delta p^{km}), F_2(\varphi^k + \delta\varphi^{km+1}, n^k, p^k + \delta p^{km})$$

$$\text{และ } F_3(\varphi^k + \delta\varphi^{km+1}, n^k + \delta n^{km+1}, p^k)$$

เราจะได้สมการ F_1, F_2 และ F_3 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_1(\varphi^k, n^k + \delta n^{km}, p^k + \delta p^{km}) = \lambda^2 \cdot \left(\frac{1}{h_i} \cdot (\varphi_{i+1} - \varphi^k) - \frac{1}{h_{i-1}} \cdot (\varphi^k - \varphi_{i-1}) \right).$$

$$\frac{2}{h_{i-1} + h_i} - (n^k + \delta n^{km}) + (p^k + \delta p^{km}) + C_i$$

$$F_2(\varphi^k + \delta\varphi^{km+1}, n^k, p^k + \delta p^{km}) = n_{i-1} \cdot D_{n|i-1/2} \cdot B_4 \left(\frac{\varphi_{i-1} - (\varphi^k + \delta\varphi^{km+1})}{U_t} \right) \cdot \frac{1}{h_{i-1}}$$

$$- n^k \cdot D_{n|i+1/2} \cdot B_2 \left(\frac{(\varphi^k + \delta\varphi^{km+1}) - \varphi_{i+1}}{U_t} \right) \cdot \frac{1}{h_i}$$

$$- n^k \cdot D_{n|i-1/2} \cdot B_3 \left(\frac{(\varphi^k + \delta\varphi^{km+1}) - \varphi_{i-1}}{U_t} \right) \cdot \frac{1}{h_{i-1}}$$

$$+ n_{i+1} \cdot D_{n|i+1/2} \cdot B_1 \left(\frac{(\varphi_{i+1} - (\varphi^k + \delta\varphi^{km+1}))}{U_t} \right) \cdot \frac{1}{h_i}$$

$$- \frac{n^k \cdot (p^k + \delta p^{km}) - n_i^2}{\tau_i \cdot (n^k + (p^k + \delta p^{km}) + 2 \cdot n_i)} \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2}$$

$$F_3(\varphi^k + \delta\varphi^{km+1}, n^k + \delta n^{km+1}, p^k) = p_{i-1} \cdot D_{p|i-1/2} \cdot B_3 \left(\frac{(\varphi^k + \delta\varphi^{km+1}) - \varphi_{i-1}}{U_t} \right) \cdot \frac{1}{h_{i-1}}$$

$$- p^k \cdot D_{p|i-1/2} \cdot B_4 \left(\frac{\varphi_{i-1} - (\varphi^k + \delta\varphi^{km+1})}{U_t} \right) \cdot \frac{1}{h_{i-1}}$$

$$- p^k \cdot D_{p|i+1/2} \cdot B_1 \left(\frac{\varphi_{i+1} - (\varphi^k + \delta\varphi^{km+1})}{U_t} \right) \cdot \frac{1}{h_i}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$+ p_{i+1} \cdot D_{p|i+1/2} \cdot B_2 \left(\frac{(\varphi^k + \delta\varphi^{km+1}) - \varphi_{i+1}}{U_t} \right) \cdot \frac{1}{h_i}$$

$$- \frac{(n^k + \delta n^{km+1}) \cdot p^k - n_1^2}{\tau_i \cdot ((n^k + \delta n^{km+1}) + p^k + 2 \cdot n_1)} \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2}$$

โดยที่ ระยะห่างระหว่างเมชคือ $h_i = x_{i+1} - x_i$ ซึ่งตัวห้อย i นั้นหมายถึงที่เมช i และให้ F_1 แทน สมการปัวซองหนึ่งมิติ

F_2 แทน สมการความต่อเนื่องสำหรับอิเล็กตรอน

F_3 แทน สมการความต่อเนื่องสำหรับโฮล

3.4 การสเกลตัวแปร (About scaling factors)

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

$$\varphi_0 = \frac{KT}{q} \text{ (สเกลศักย์ไฟฟ้า, volt)}$$

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

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

$$\lambda^2 = \frac{\varphi_0 \cdot \epsilon_s}{x_0^2 \cdot q \cdot C_0} \text{ (สเกลสมการปัวซอง)}$$

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

$$R_0 = \frac{D_0 \cdot C_0}{x_0^2} \text{ (สเกลอัตราการผลิตและรวมตัว, cm}^{-3} \cdot \text{sec}^{-1}\text{)}$$

$$J_0 = \frac{-q \cdot D_0 \cdot C_0}{x_0} \text{ (สเกลค่าความหนาแน่นกระแส, A/cm}^2\text{)}$$

ความหนาแน่นกระแส (Current density, scaled values in all meshes)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและ Quasi-Fermi potential

$$J_n = -q \cdot \left(\frac{q}{KT} \right) \cdot D_n \cdot n(x) \cdot \text{grad} \phi_n \text{ สำหรับอิเล็กตรอน} \quad (3.12)$$

$$J_p = -q \cdot \left(\frac{q}{KT} \right) \cdot D_p \cdot p(x) \cdot \text{grad} \phi_p \text{ สำหรับโฮล} \quad (3.13)$$

สมการของความหนาแน่นกระแสระหว่าง meshes ได้เป็น

$$J_n(i+1/2) = D_{n|i+1/2} \cdot n(i+1/2) \cdot \frac{\phi_n(i+1) - \phi_n(i)}{h_i} \quad (3.14)$$

$$J_p(i+1/2) = D_{p|i+1/2} \cdot p(i+1/2) \cdot \frac{\phi_n(i+1) - \phi_n(i)}{h_i} \quad (3.15)$$

โดยที่ $n(i+1/2)$ และ $p(i+1/2)$

$$n(i+1/2) = \frac{n(i)}{1 + \exp\left(\frac{\phi(i) - \phi(i+1)}{2 \cdot U_t}\right)} + \frac{n(i+1)}{1 + \exp\left(\frac{\phi(i+1) - \phi(i)}{2 \cdot U_t}\right)} \quad (3.16)$$

$$p(i+1/2) = \frac{p(i)}{1 + \exp\left(\frac{\phi(i+1) - \phi(i)}{2 \cdot U_t}\right)} + \frac{p(i+1)}{1 + \exp\left(\frac{\phi(i) - \phi(i+1)}{2 \cdot U_t}\right)} \quad (3.17)$$

และสมการ ควาซี-เฟอร์มิ (Quasi-Fermi potential หรือ Imref potential)

$$\phi_n(i) = \phi(i) - \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{n(i)}{n_I} \right) \quad (3.18)$$

$$\phi_p(i) = \phi(i) + \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{p(i)}{n_I} \right) \quad (3.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉะนั้นทั้งกรณีที่ไม่ได้รับแสงและรับแสงความสัมพันธ์ความหนาแน่นพาหะจะได้ดังนี้คือ

$$n_{\text{light}}(i) = n_{\text{dark}}(i) + G(i) \cdot \tau(i) \quad (3.20)$$

$$p_{\text{light}}(i) = p_{\text{dark}}(i) + G(i) \cdot \tau(i) \quad (3.21)$$

จากสมการที่(3.17)และสมการ(3.18) เป็นสมการหาค่าความหนาแน่นพาหะอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ เราสามารถนำค่าสมการทั้งสองมารวมกับค่าความหนาแน่นพาหะส่วนเกินที่แพร่เข้าไปในแต่ละด้านได้จะแสดงในสมการที่(3.20)และสมการ(3.21) ซึ่งจะเป็นสมการที่สามารถหาค่าความหนาแน่นพาหะอิเล็กตรอนและโฮลที่ได้รับแสงอาทิตย์แล้ว

3.6 การจำลองแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับเซลล์แสงอาทิตย์กรณีที่ได้รับแสง

3.6.1 การหาค่ากระแสไฟฟ้าโฟโตในย่าน N^+

โดยเริ่มจากการใช้ continuity equation

$$D_p \frac{d^2}{dx^2} (p_n(x) - p_{n0}) + G(x) - \frac{(p_n(x) - p_{n0})}{\tau_p} = 0 \quad (3.22)$$

$$G(x) = \alpha \cdot N_1 \cdot (1 - R_1) \cdot \exp(-\alpha \cdot x) + \alpha \cdot N_2 (1 - R_2) \exp(-\alpha(H - x)) \quad (3.23)$$

$$\text{ให้ } N_1 = N_2 = N' \quad \text{และ } R = \frac{1 - R_2}{1 - R_1}$$

จะได้ว่า

$$G(x) = \alpha \cdot N' \cdot (1 - R_1) [\exp(-\alpha \cdot x) + R \cdot \exp(-\alpha(H - x))] \quad (3.24)$$

จากสมการ (3.22) จะได้ว่า

$$\frac{d^2}{dx^2}(p_n(x) - p_{n0}) - \frac{(p_n(x) - p_{n0})}{L_p^2} = -\alpha \cdot N' \frac{(1 - R_1)}{D_p} [\exp(-\alpha \cdot x) + R \cdot \exp(-\alpha(H - x))] \quad (3.25)$$

จะได้ solution คือ

$$p_n - p_{n0} = A \cos\left(\frac{x}{L_p}\right) + B \sinh\left(\frac{x}{L_p}\right) - \frac{\alpha \cdot N' (1 - R_1)}{D_p (\alpha^2 - 1/L_p^2)} [\exp(-\alpha \cdot x) + R \cdot \exp(-\alpha(H - x))] \quad (3.26)$$

$$\frac{\alpha \cdot N' (1 - R_1)}{D_p (\alpha^2 - 1/L_p^2)} = K$$

$$p_n - p_{n0} = A \cos\left(\frac{x}{L_p}\right) + B \sinh\left(\frac{x}{L_p}\right) - K \cdot [\exp(-\alpha \cdot x) + R \cdot \exp(-\alpha(H - x))] \quad (3.27)$$

จาก boundary condition จะได้ว่า

$$D_p \frac{d}{dx}(p_n - p_{n0}) = S_p (p_n - p_{n0}) \quad |x=0| \quad (3.28)$$

$$\text{และ } p_n - p_{n0} = 0 \quad |x=x_j| \quad (3.29)$$

เราสามารถแทนค่า boundary condition จากสมการที่(3.28)และ(3.29) ลงในสมการ (3.27)

$$\begin{aligned} D_p \frac{d}{dx}(p_n - p_{n0}) \Big|_{x=0} &= \frac{D_p B}{L_p} + K \cdot \alpha \cdot D_p (1 - R \cdot \exp(-\alpha \cdot H)) \\ &= S_p A - S_p K (1 + R \cdot \exp(-\alpha \cdot H)) \end{aligned} \quad (3.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_p A - \frac{D_p B}{L_p} = D_p K \alpha (1 - R \cdot \exp(-\alpha \cdot H)) + S_p K (1 + R \cdot \exp(-\alpha \cdot H)) = M \quad (3.31)$$

$$A \cosh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) + B \sinh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) = K [\exp(-\alpha \cdot x_j) + R \cdot \exp(-\alpha (H - x_j))] = N \quad (3.32)$$

$$A = \frac{L_p}{D_p} \left[\frac{M \sinh(x_j/L_p) + \frac{D_p}{L_p} \cdot N}{\frac{S_p L_p}{D_p} \sinh(x_j/L_p) + \cosh(x_j/L_p)} \right]$$

$$B = \frac{L_p}{D_p} \left[\frac{S_p N - M \cosh(x_j/L_p)}{\frac{S_p L_p}{D_p} \sinh(x_j/L_p) + \cosh(x_j/L_p)} \right]$$

กำหนดให้ $Z = \frac{S_p L_p}{D_p} \sinh(x_j/L_p) + \cosh(x_j/L_p)$

$$A = \frac{L_p}{D_p} \left[\frac{M \sinh(x_j/L_p) + \frac{D_p}{L_p} \cdot N}{Z} \right] \quad (3.33)$$

$$B = \frac{L_p}{D_p} \left[\frac{S_p N - M \cosh(x_j/L_p)}{Z} \right] \quad (3.34)$$

$$\text{จาก } J_p \Big|_{x=x_j} = -q D_p \frac{dp_n}{dx} \Big|_{x=x_j}$$

แทนค่าลงในสมการ จะได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
J_p &= -qD_p \left[\frac{A}{L_p} \sinh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) + \frac{B}{L_p} \cosh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) + K\alpha \left(\exp(-\alpha x_j) - R \cdot \exp(-\alpha(H - x_j)) \right) \right] \\
&= -qD_p \left[\frac{-\frac{M}{D_p} + N \left(\frac{1}{L_p} \sinh(x_j/L_p) + \frac{S_p}{D_p} \cosh(x_j/L_p) \right)}{Z} + K\alpha \left(\exp(-\alpha x_j) - R \cdot \exp(-\alpha(H - x_j)) \right) \right] \\
&= -qD_p \left[\frac{-K\alpha(1 - R \cdot \exp(-\alpha H)) - \frac{S_p K}{D_p} (1 + R \cdot \exp(-\alpha H)) + K(\exp(-\alpha x_j) + R \cdot \exp(-\alpha(H - x_j))) \left(\frac{1}{L_p} \sinh(x_j/L_p) + \frac{S_p}{L_p} \cosh(x_j/L_p) \right)}{\frac{S_p L_p}{D_p} \sinh(x_j/L_p) + \cosh(x_j/L_p)} + K\alpha \left(\exp(-\alpha x_j) - R \cdot \exp(-\alpha(H - x_j)) \right) \right] \\
J_p &= \frac{q\alpha N (1 - R_1) L_p}{(\alpha^2 L_p^2 - 1)} \left[\frac{\alpha L_p (1 - R \cdot \exp(-\alpha H)) + \frac{S_p L_p}{D_p} (1 + R \cdot \exp(-\alpha H))}{\frac{S_p L_p}{D_p} \sinh(x_j/L_p) + \cosh(x_j/L_p)} \right. \\
&\quad \left. - \frac{(\exp(-\alpha x_j) + R \cdot \exp(-\alpha(H - x_j))) \left(\sinh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) + \frac{S_p L_p}{D_p} \cosh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) \right)}{\frac{S_p L_p}{D_p} \sinh(x_j/L_p) + \cosh(x_j/L_p)} \right] \\
&\quad - \alpha L_p \left(\exp(-\alpha x_j) - R \cdot \exp(-\alpha(H - x_j)) \right) \tag{3.35}
\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนดให้

D_p คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ซึมของโฮล (cm^2/sec)

$n_p(x)$ คือ ความหนาแน่นจำนวนโฮลต่อพื้นที่ในชั้น n อยู่ในฟังก์ชันระยะทาง x (cm^{-3})

n_{p0} คือ ความหนาแน่นจำนวนโฮลในภาวะสมดุลเชิงความร้อน (cm^{-3})

$G(x)$ คือ อัตราการเกิดพาหะที่ได้จากแสง อยู่ในฟังก์ชันระยะทาง x

τ_p คือ อายุของโฮลในชั้น n (sec^{-1})

L_p คือ ระยะทางแพร่ซึมของโฮล สามารถหาได้จาก $L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau_p}$

3.6.2 การหาค่ากระแสไฟฟ้าโฟโตในย่าน p

โดยเริ่มจากการใช้ continuity equation

$$D_n \frac{d^2}{dx^2} (n_p(x) - n_{p0}) + G(x) - \frac{(n_p(x) - n_{p0})}{\tau_n} = 0 \quad (3.36)$$

$$G(x) = \alpha(\lambda) \cdot N' (1-R) \cdot \exp(-\alpha(\lambda) \cdot x) \quad (3.37)$$

เมื่อกำหนดให้

D_n คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ซึมของอิเล็กตรอนในชั้น p (cm^2/sec)

$n_p(x)$ คือ ความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนต่อพื้นที่ในชั้น p อยู่ในฟังก์ชันระยะทาง x (cm^{-3})

n_{p0} คือ ความหนาแน่นจำนวนอิเล็กตรอนในภาวะสมดุลเชิงความร้อน (cm^{-3})

τ_n คือ อายุของอิเล็กตรอนในชั้น p (sec^{-1})

เมื่อ L_n คือ ระยะทางแพร่ซึมของโฮล สามารถหาได้จาก $L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n}$

จาก boundary condition จะได้ว่า

$$D_n \frac{d(n_p - n_{p0})}{dx} = -S_n (n_p - n_{p0}) \quad |x=H| \quad (3.38)$$

$$n_p - n_{p0} = 0 \quad \left| x = x_j + w \right| \quad (3.39)$$

แทนค่า boundary condition ลงในสมการ (3.27) จะได้ดังนี้

$$(n_p - n_{p0}) = \frac{\alpha N' (1-R) \tau_n}{(\alpha^2 L_n^2 - 1)} \exp[-\alpha(x_j + w)] \left[\cosh \frac{(x - x_j - w)}{L_n} - \exp[-\alpha(x - x_j - w)] \right]$$

$$\frac{\left(\frac{S_n L_n}{D_n} \right) \left[\cosh \frac{H'}{L_n} - \exp(-\alpha H') \right] + \sinh \frac{H'}{L_n} + \alpha L_n \exp(-\alpha H')}{\left(\frac{S_n L_n}{D_n} \right) \sinh \frac{H'}{L_n} + \cosh \frac{H'}{L_n}} \sinh \frac{(x - x_j - w)}{L_n} \quad (3.40)$$

ฉะนั้นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของโพลคือ

$$J_n = \frac{q N' (1-R) \alpha L_n}{(\alpha^2 L_n^2 - 1)} \exp[-\alpha(x_j + w)]$$

$$x \left[\alpha L_n \frac{\left(\frac{S_n L_n}{D_n} \right) \left(\cosh \frac{H'}{L_n} - \exp(-\alpha H') \right) + \sinh \frac{H'}{L_n} + \alpha L_n \exp(-\alpha H')}{\left(\frac{S_n L_n}{D_n} \right) \sinh \frac{H'}{L_n} + \cosh \frac{H'}{L_n}} \right] \quad (3.41)$$

เมื่อเรากำหนดให้ $H' = H - (x_j + w)$

เนื่องจากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เกิดที่บริเวณด้านเอ็นและบริเวณด้านพีแล้วยังมีความหนาแน่นกระแสที่บริเวณด้านรอยต่อพีเอ็น

ซึ่งเราจะหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าบริเวณปลอดพาหะดังสมการ

$$J_{dr} = \int_{x_j}^{x_j+w} q\alpha N' (1-R)\exp(-\alpha x) dx$$

$$= qN' (1-R)\exp(-\alpha x_j)[1 - \exp(-\alpha w)]$$
(3.41)

โดยที่ α คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของสารกึ่งตัวนำ

H คือระยะความยาวของอุปกรณ์ทั้งหมด

H' คือระยะความยาวของอุปกรณ์ในส่วนของ $H' = H - (x_j + w)$

x คือตำแหน่ง

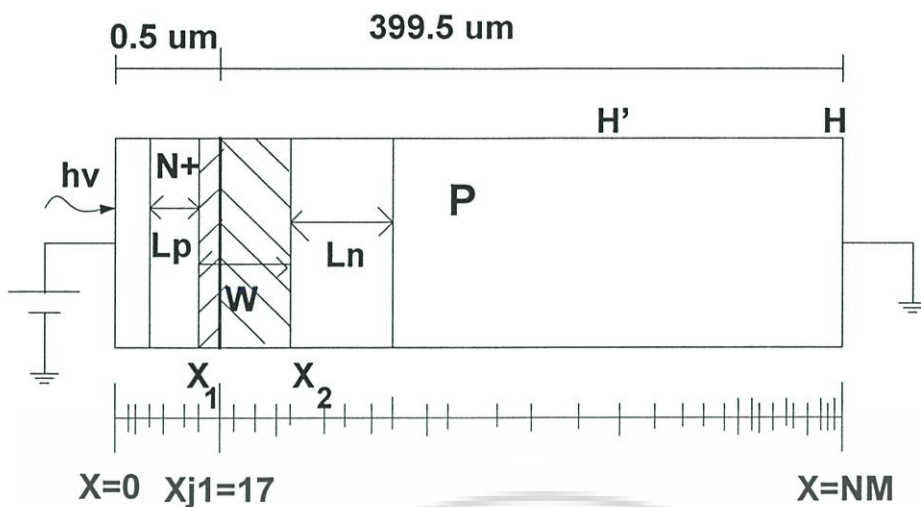
S_n คือความเร็วในการรวมตัว (surface recombination velocity) ของอิเล็กตรอนที่ผิวของเซลล์แสงอาทิตย์

S_p คือความเร็วในการรวมตัว (surface recombination velocity) ของโฮลที่ผิวของเซลล์แสงอาทิตย์

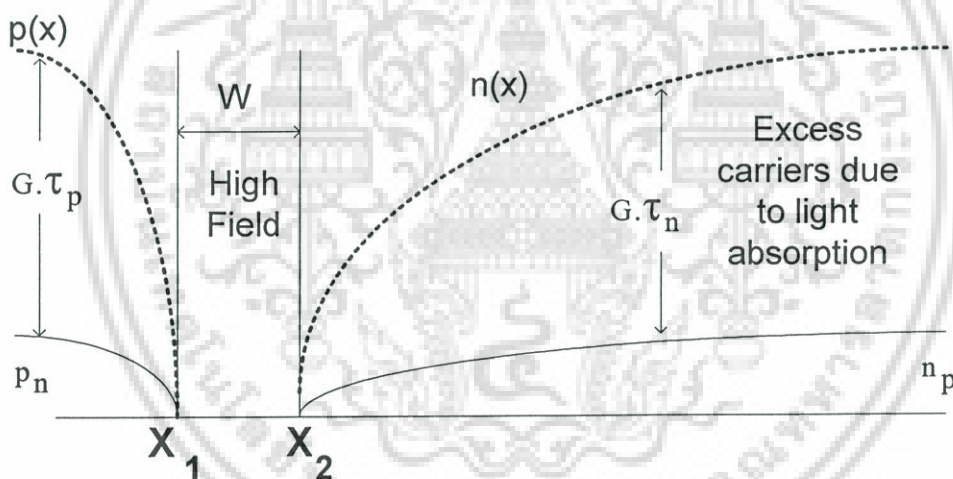
w คือความกว้างของชั้นปลอดพาหะ

3.7 การออกแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในลักษณะหนึ่งมิติ

ในการจำลองการออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีรอยต่อพี-เอ็น เราจะทำการจำลองโครงสร้างคล้ายกับโครงสร้างของไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็นดังรูปที่ 3.1 เพื่อกำหนดขอบเขตการคำนวณซึ่งรูปเป็นการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อพี-เอ็นที่มีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีหนาประมาณ 399.5 ไมครอน และมีการแพร่อะตอมสารเจือชนิดเอ็นที่มีความหนาประมาณ 0.5 ไมครอน ลงบนสารกึ่งตัวนำชนิดพีเพื่อสร้างรอยต่อพี-เอ็น ใช้ในการคำนวณหาพารามิเตอร์ที่สำคัญและมีการกำหนดขอบเขตของการเคลื่อนที่ของพาหะโดยที่ด้านเอ็นมีค่าตัวแปร x_1 เป็นตัวแปรที่กำหนดเขตปลอดพาหะด้านเอ็นและมีตัวแปร x_2 เป็นตัวแปรที่กำหนดขอบเขตปลอดพาหะด้านพี และบริเวณปลอดพาหะทางด้านเอ็นยังมีพาหะที่กลายเป็นอิออนบวก แล้วยังมีบริเวณปลอดพาหะทางด้านพีที่มีพาหะที่กลายเป็นอิออนลบ สังเกตว่ารูปที่ 3.1 นั้นเป็นโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ในแบบธรรมดาที่ยังไม่มีการได้ปัสสารเจือบริเวณด้านหลังซึ่งเป็นชนิดเดียวกับฐานรอง แล้วบริเวณด้านหน้าก็มีการฉายแสงเข้าไปด้วย และการกำหนดระยะความยาวของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยตัวแปร H ที่เป็นความยาวทั้งหมดคือประมาณ 400 ไมครอน พารามิเตอร์ที่แสดงในรูปด้านล่างนี้มีความจำเป็นในการประมวลผลในโปรแกรมคอมพิวเตอร์



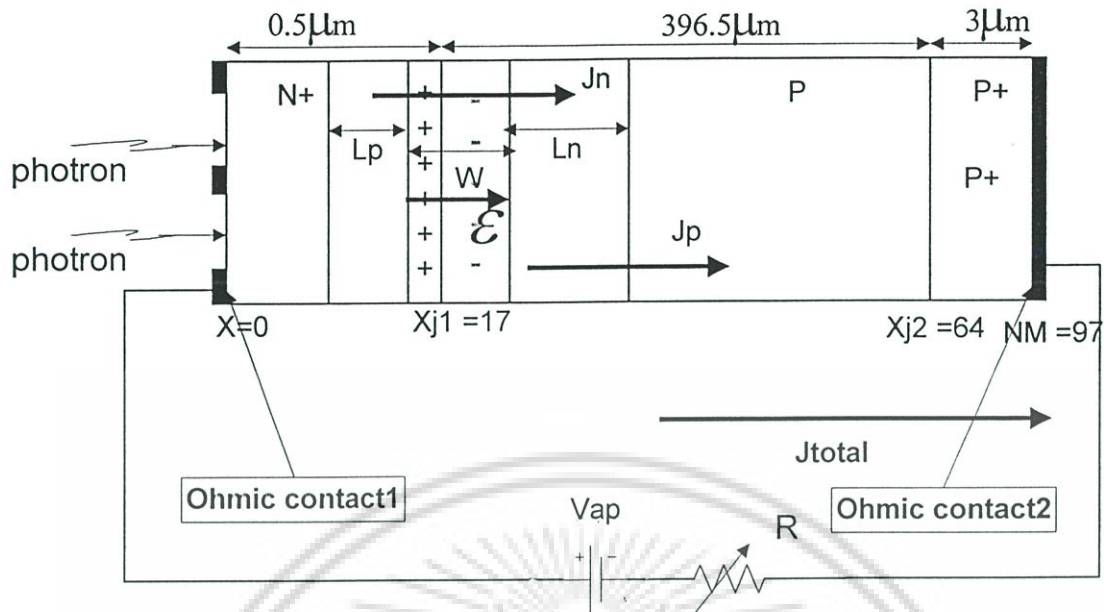
รูปที่ 3.1 แสดงแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นที่ยังไม่มีการได้ปัดด้านหลัง



รูปที่ 3.2 แสดงค่าความหนาแน่นพาหะส่วนเกินที่ได้จากการดูดกลืนแสงในด้านเอ็นและด้านพี

จากรูปที่ 3.2 เป็นการแสดงค่าความหนาแน่นพาหะส่วนเกินที่ได้จากการดูดกลืนแสงในด้านเอ็นและด้านพี ซึ่งพาหะส่วนมากในแต่ละด้านจะรวมพาหะส่วนน้อยในกลุ่มนี้ และบริเวณที่อยู่ระหว่างค่าตัวแปร x_1 และ x_2 คือบริเวณปลอดพาหะที่ตรงบริเวณนี้จะไม่มีความหนาแน่นพาหะเหลืออยู่เลย จะมีเฉพาะอิเล็กตรอนประจุไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าที่บริเวณนี้เท่านั้น สนามไฟฟ้าที่อยู่ตรงบริเวณรอยต่อพี-เอ็นจะมีมากที่สุดและจะลดลงเรื่อยๆไปตามระยะความยาวของตัวสารกึ่งตัวนำจนผ่านบริเวณปลอดพาหะไปแล้วจะไม่มีสนามไฟฟ้าอยู่เลยในสารกึ่งตัวนำทั้งด้านเอ็นและด้านพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดงแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นในลักษณะ 1 มิติ

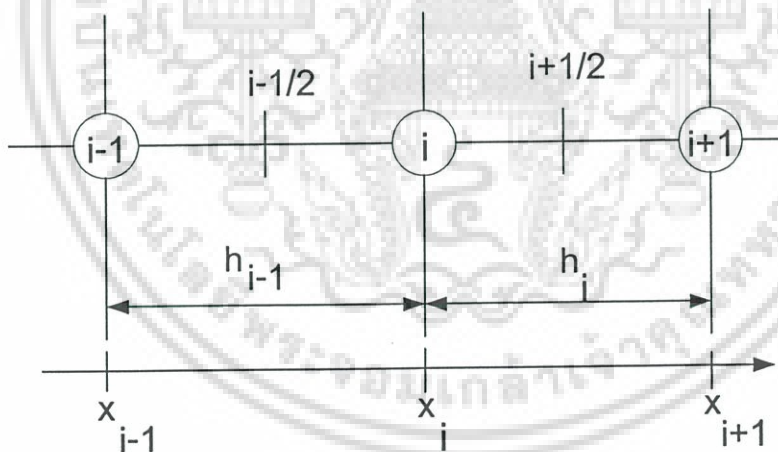
จากการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 3.3 ผู้ทำวิทยานิพนธ์ได้ใช้สารกึ่งตัวนำชนิดพี(p) เป็นฐานรองในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ทางด้านบนมีการได้ปัสสารเจือชนิดเอ็นลงบนบริเวณผิวหน้าเพื่อสร้างรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญมากในการวิเคราะห์หาคุณสมบัติการทำงานของพารามิเตอร์ต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ และที่บริเวณรอยต่อนี้เองจะเป็นบริเวณที่พาหะอิเล็กตรอนทางด้านเอ็นซึ่งมีความหนาแน่นมากเคลื่อนที่ผ่านไปยังสารกึ่งตัวนำชนิดพีซึ่งมีความหนาแน่นน้อยกว่าทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่บริเวณใกล้รอยต่อกลายเป็นโฮลอบ และโฮลที่เป็นความหนาแน่นพาหะส่วนมากทางด้านพีเคลื่อนที่ผ่านบริเวณรอยต่อไปทางด้านเอ็นซึ่งมีความหนาแน่นโฮลน้อยกว่าทำให้พาหะโฮลที่อยู่ใกล้บริเวณรอยต่อกลายเป็นอิเล็กตรอน และที่บริเวณนี้ยังเกิดสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อเนื่องจากการเคลื่อนที่ของพาหะซึ่งจะมีค่าสูงสุดที่รอยต่อ (x_j) พี-เอ็น แล้วจะลดลงไปเรื่อยๆตามระยะความยาวของสารกึ่งตัวนำแต่ละด้านจนมีค่าน้อยที่สุดทางด้านเอ็นและพี ซึ่งระยะทางซิมของอิเล็กตรอนทางด้านพีนั้นคือ L_n และระยะทางแพร่ซิมของโฮลไปทางด้านเอ็นนั้นคือ L_p การเคลื่อนที่ของพาหะนี้ทำให้การค่าความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอนและโฮล x_j คือตัวแปรที่กำหนดขึ้นให้แทนค่าระยะทางตามความลึกรอยต่อพี-เอ็น ในตัวแปรนี้สามารถนำมาวิเคราะห์การเกิดพาหะเนื่องจากแสงได้ เพราะจะทำการทดลองดูว่าการที่รอยต่ออยู่ตื้นเข้ามายังบริเวณผิวหน้าทำให้เกิดพาหะเนื่องจากแสงมากขึ้นเพียงใดเพื่อที่จะนำไปใช้ในการหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าไฟโตได้ ตัวแปร N^+ คืออะตอมสารเจือชนิดเอ็นที่เติมลงบนผิวหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารกึ่งตัวนำชนิดพีเนื่องจากต้องการสร้างรอยต่อและอะตอมสารเจือปนนี้ยังสามารถนำมาหาค่าความหนาแน่นไฟฟ้าได้หรือทำการเปรียบเทียบดูว่าถ้ามีการเติมอะตอมสารเจือที่ผิวมากน้อยจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นไฟฟ้าได้มากน้อยหรือไม่ และโครงสร้างนี้ยังมีการได้ปีที่ผิวด้านหลังหรือจะเรียกโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์นี้อีกอย่างหนึ่งว่า โครงสร้าง BSF(back surface field) ซึ่งมีคุณสมบัติตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่แล้ว แต่คุณสมบัติเด่นที่สุดคือสามารถทำให้แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{OC}) เพิ่มขึ้น จึงทำให้ฟิลล์แพกเตอร์ (FF) ของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นอีกด้วย

3.8 การออกแบบความกว้างของเมช

ในการออกแบบความกว้างเมชนั้นสำคัญกับการคำนวณของโปรแกรมอย่างมาก โดยเฉพาะขั้นตอนของการออกแบบกำหนดความกว้างเมช นั้นจะเห็นว่า บริเวณที่เรากำลังสนใจพิจารณาคูณสมบัติต่างๆเป็นพิเศษจะออกแบบให้มีความละเอียดสูงที่สุดซึ่งได้แก่บริเวณ contact1, contact 2 และยังมีบริเวณรอยต่อพี – เอ็น ทั้งนี้ก็เพื่อให้ได้ค่าต่างๆที่มีความละเอียดสูงที่สุดและเมื่อทำการออกแบบครบทุกเมชแล้วผลรวมของระยะทุกเมชจะต้องมีค่าเท่ากับขนาดของอุปกรณ์ที่เราทำการจำลองไว้ตั้งแต่ตอนแรก[18]



รูปที่ 3.4 กำหนดตำแหน่งและระยะห่างระหว่างเมช

โดยเราจะออกแบบให้มีความกว้างเมชมีค่าต่างๆดังนี้

$$\text{spc 1} = \text{spacing} = 0.01 \text{ um}$$

$$\text{spc 2} = \text{spacing} = 0.04 \text{ um}$$

$$\text{spc 3} = \text{spacing} = 0.16 \text{ um}$$

$$\text{spc 4} = \text{spacing} = 0.64 \text{ um}$$

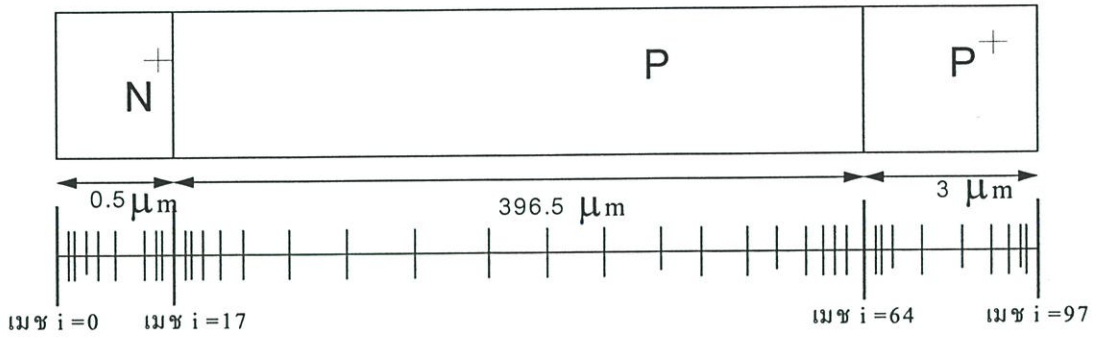
$$\text{spc 5} = \text{spacing} = 2.56 \text{ um}$$

$$\text{spc 6} = \text{spacing} = 10.24 \text{ um}$$

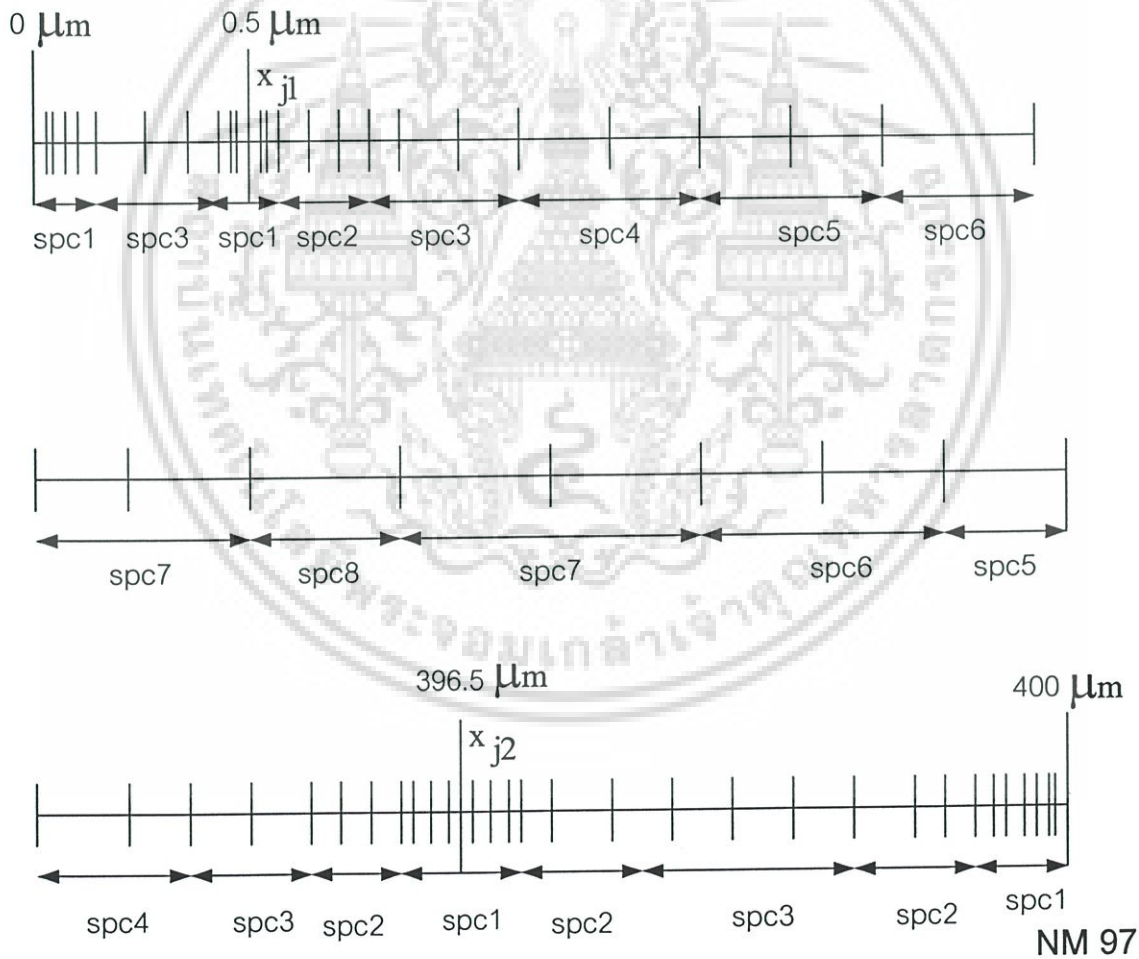
$$\text{spc 7} = \text{spacing} = 40.96 \text{ um}$$

$$\text{spc 8} = \text{spacing} = 163.84 \text{ um}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำการออกแบบเมฆ

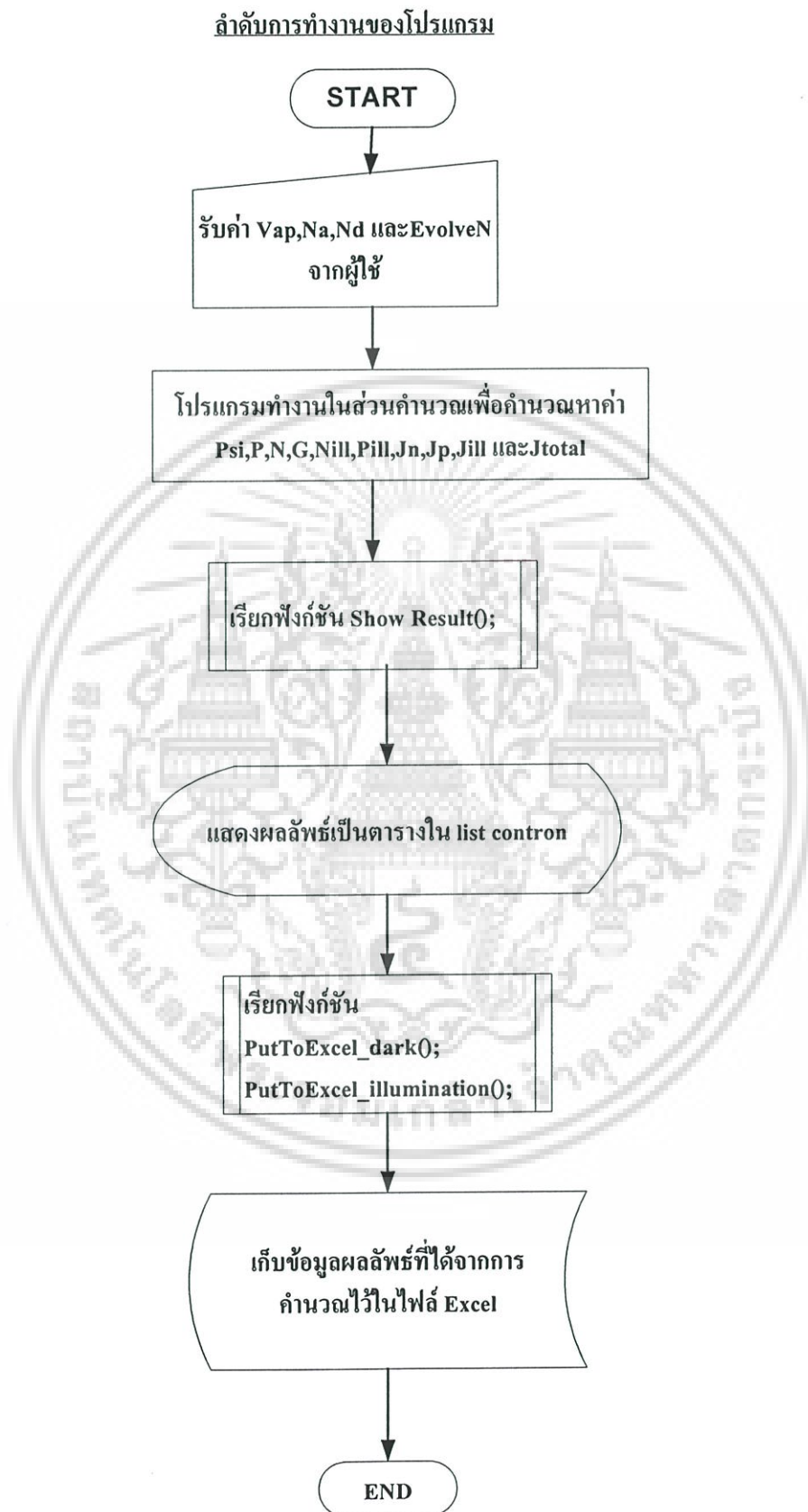


NM 97

รูปที่ 3.6 แสดงการออกแบบเมฆที่ใช้ในการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม



รูปที่ 3.7 แสดง Flow chart การทำงานของโปรแกรมจำลองแบบเซลล์แสงอาทิตย์ใน 1 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

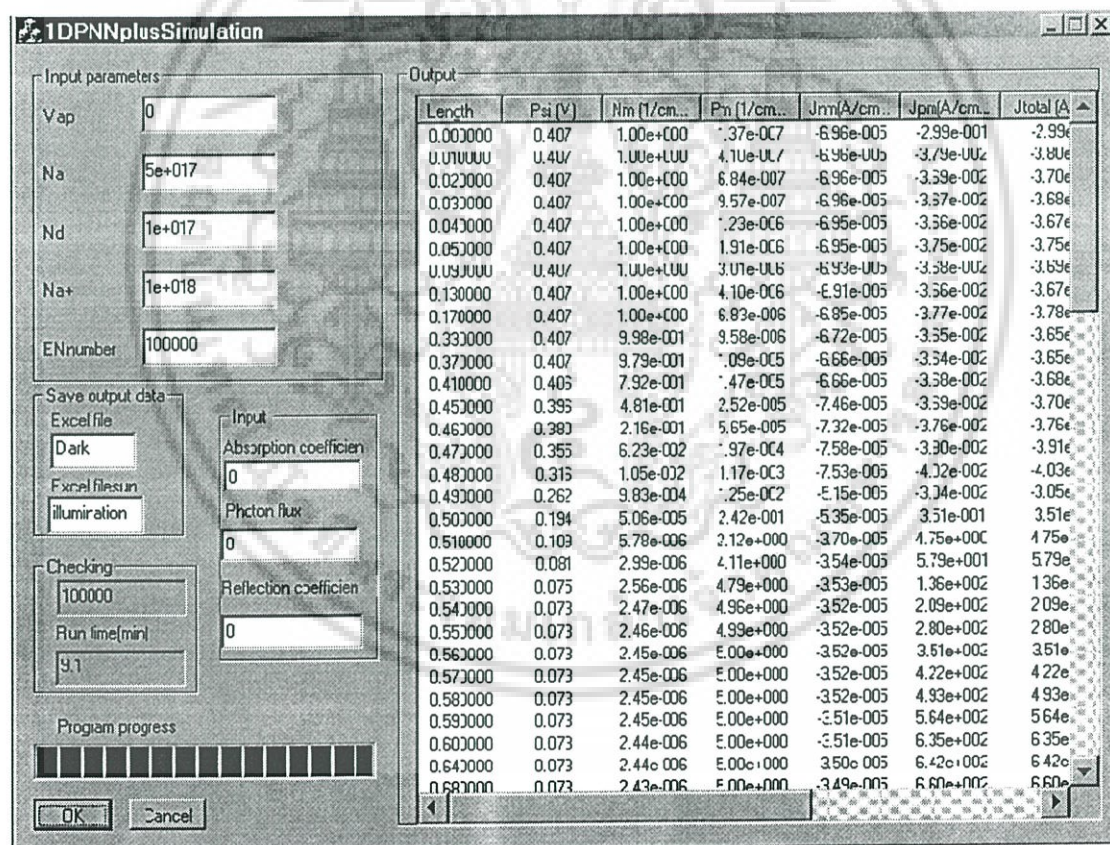
จากรูปที่ 3.7 เป็นการแสดง Flow chart การทำงานของโปรแกรมจำลองแบบเซลล์แสงอาทิตย์ใน 1มิติ สามารถแสดงลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมได้ดังต่อไปนี้

1. เริ่มจากการรับค่าตัวแปร V_{ap} , N_a , N_d และ EvolveN จากผู้ใช้งาน
2. หลังจากการรับค่าตัวแปรที่มีลักษณะคงที่เป็นตัวเลขแล้วต่อไปก็จะเป็นส่วนการทำงานของตัวโปรแกรมเพื่อคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งในส่วนนี้จะเป็นการหาผลเฉลยของสมการทางคณิตศาสตร์ โดยใช้โปรแกรมการจำลองแบบเซลล์แสงอาทิตย์ใน 1มิติที่ได้จากการพัฒนาโปรแกรมเดิมคือโปรแกรมการจำลองแบบรอยต่อพี-เอ็นหนึ่งมิติ[19] ซึ่งใช้วิธีผลต่างสืบเนื่อง วิธี Newton-SOR และวิธีการทำซ้ำ แก่สมการเพื่อหาผลเฉลยของสมการทางคณิตศาสตร์ของสารกึ่งตัวนำพื้นฐาน 3 สมการ
3. ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นค่าศักย์ไฟฟ้า(Psi) ค่าความหนาแน่นพาหะโฮล(p) ค่าความหนาแน่นพาหะอิเล็กตรอน(n) ค่าอัตราการเกิด/การรวมตัวใหม่(R) ค่าอัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสงเข้าที่บริเวณผิวหน้า(G) ค่าความหนาแน่นพาหะอิเล็กตรอนที่เกิดจากการรวมพาหะในส่วนที่ได้รับแสงกับไม่ได้รับแสง(Nill) ค่าความหนาแน่นพาหะโฮลที่เกิดจากการรวมพาหะในส่วนที่ได้รับแสงกับไม่ได้รับแสง(Pill) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าทั้งอิเล็กตรอนและโฮลที่ยังไม่มีการฉายแสงที่ผิวหน้า J_n, J_p ตามลำดับ และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอิเล็กตรอนที่เกิดจากการได้รับแสงและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าโฮลที่เกิดจากการได้รับแสง ผลรวมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และพารามิเตอร์ I_0, V_{OC}, FF, η
4. เรียกฟังก์ชัน Show Result เป็นฟังก์ชันที่แสดงผลลัพธ์ของข้อมูลที่ต้องการให้แสดงค่าแก่ผู้ใช้งานเพื่อความรวดเร็วในการอ่านข้อมูล
5. เป็นการแสดงผลลัพธ์ที่เป็นตารางใน list control ที่ผู้ใช้งานสะดวกในการเปิดแฟ้มงาน แต่ส่วนใหญ่แล้วผู้ใช้งานจะเก็บไว้ที่ Local Disk C
6. ทำการเรียกฟังก์ชัน PutToExcel_dark ซึ่งเป็นไฟล์ที่เก็บผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์หรือตัวแปรที่ใช้ในกรณีที่ยังไม่มีแสง
7. ทำการเรียกฟังก์ชัน PutToExcel_illumination ซึ่งเป็นไฟล์ที่เก็บผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์หรือตัวแปรที่ใช้ในกรณีที่มีแสงแล้ว
8. ข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลแล้วทุกค่าจะทำการเก็บไว้ในไฟล์ของ Excel เพื่อความสะดวกในการเก็บตัวเลขไว้ในตารางของ Excel และผลลัพธ์ที่ได้จะนำมาทำเป็นกราฟเส้นเพื่อวิเคราะห์ผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.10 โดอะลือกของโปรแกรมที่ใช้งานแบบ 1 มิติ

ในการใช้งานของโปรแกรมเซลล์แสงอาทิตย์แบบ 1 มิติ ได้มีการสร้างโดอะลือกบนโปรแกรมวิชวลซี พลัส เป็นส่วนติดต่อกับผู้ใช้(user interface) ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการใช้งานของโปรแกรม เมื่อทำการรันโปรแกรม โดอะลือกนี้จะปรากฏขึ้น และสามารถเริ่มต้นการทำงานของโปรแกรมที่แสดงไว้ใน flowchart ข้างบน และโปรแกรมยังได้แสดงความก้าวหน้าของการทำงานที่ โพรเกรสบาร์(progress bar) และเมื่อการทำงานของโปรแกรมเสร็จสิ้น โปรแกรมจะแสดงกรอบข้อความ(message box) โดยจะแจ้งให้ กับผู้ใช้(user interface) ทราบว่าการรันของโปรแกรมได้เสร็จสิ้นแล้ว ซึ่งผลลัพธ์ของโปรแกรมจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ 1 มิติ จะแยกออกเป็นไฟล์ 2 ไฟล์ คือไฟล์ Dark และ ไฟล์ illumination ทางด้านขวามือ ก็เป็นOutput จำลองของโปรแกรม ถ้าต้องการผลลัพธ์ที่นำไปใช้งานจะต้องเข้าไปที่ไฟล์เอ็กซ์เซล



รูปที่ 3.8 โดอะลือกของโปรแกรมจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ แบบ 1 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลลัพธ์โปรแกรมในสถานการณ์คำนวณแบบ 1 มิติ

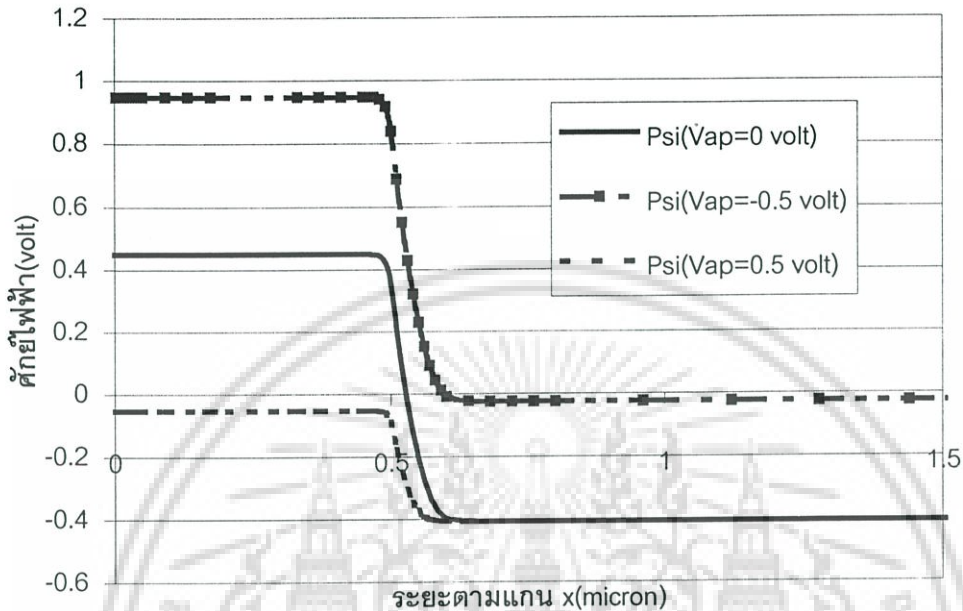
จากการจำลองแบบเซลล์แสงอาทิตย์ใน 1 มิติ จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำการออกแบบคำนวณสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นนั้นจะสามารถนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ได้ เช่น ผลของการคำนวณหาค่าศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น ที่มีการไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับ ผลของค่าความหนาแน่นของพาหะที่มีการสัมผัสกันกรณีที่ยังไม่มีแสงอาทิตย์เข้าที่ผิวหน้า ผลของค่าความหนาแน่นของพาหะที่มีแสงอาทิตย์เข้าที่ผิวหน้า ผลของค่าอัตราการเกิด/รวมตัวใหม่ที่ยังไม่มีแสงอาทิตย์ ผลของค่าอัตราการเกิด/รวมตัวใหม่ที่แสงอาทิตย์เข้าที่ผิวหน้า ค่าอัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสงที่มีการเปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนแต่ละค่าที่นำมาคำนวณหาอัตราการเกิดที่ความยาวคลื่นนั้น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากพาหะส่วนเกินที่ยังไม่ได้รับแสงอาทิตย์ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าแรงดันที่ไบอัส ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของอัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสง ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าโฟโต แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าโฟโตกับสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง แสดงการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าโฟโตที่มีสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงและไม่มีสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง แสดงความสัมพันธ์ที่ความลึกของรอยต่อมีผลต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า แสดงการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าโฟโตกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากอัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสง แสดงตารางเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นพาหะที่ได้ปसारเจือที่ผิวหน้ากับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าโฟโต ประสิทธิภาพการทำงานរបแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

เนื่องจากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผู้ทำวิทยานิพนธ์ได้คำนึงถึงนั้นจะเป็นรอยต่อแบบพี-เอ็นที่มีการประมวลผลได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ออกแบบคล้ายกับตัวเซลล์แสงอาทิตย์จริง ฉะนั้นค่าพารามิเตอร์ที่ได้ต่อไปนี้จะมผลในการปรับปรุงตัวเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีค่าเหมาะสมในการนำไปแบบจำลองไปสร้างอุปกรณ์จริง และการประมวลผลเชิงตัวเลขนี้สามารถนำมาวิเคราะห์ผลที่ได้ในรูปของกราฟเส้น

4.1 ผลของการคำนวณหาค่าศักย์ไฟฟ้า

เมื่อทำการรันโปรแกรมแล้ว สำหรับค่าของกรณีค่าศักย์ไฟฟ้า (Potential) จะทำการเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณของรอยต่อพี-เอ็นของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีการไบอัสในลักษณะแรงดันต่างๆ ซึ่งในที่นี้ผู้วิจัยได้เลือกมาแค่บางแรงดันเท่านั้น คือ ค่าแรงดันไบอัส

ตรง 0.5 โวลต์ แรงดันไบอัสกลับ คือ -0.5 โวลต์ และยังไม่มีการให้แรงดันไบอัส คือ 0 โวลต์ แล้วทำการพล็อตกราฟที่ได้ดังรูปที่ 4.1



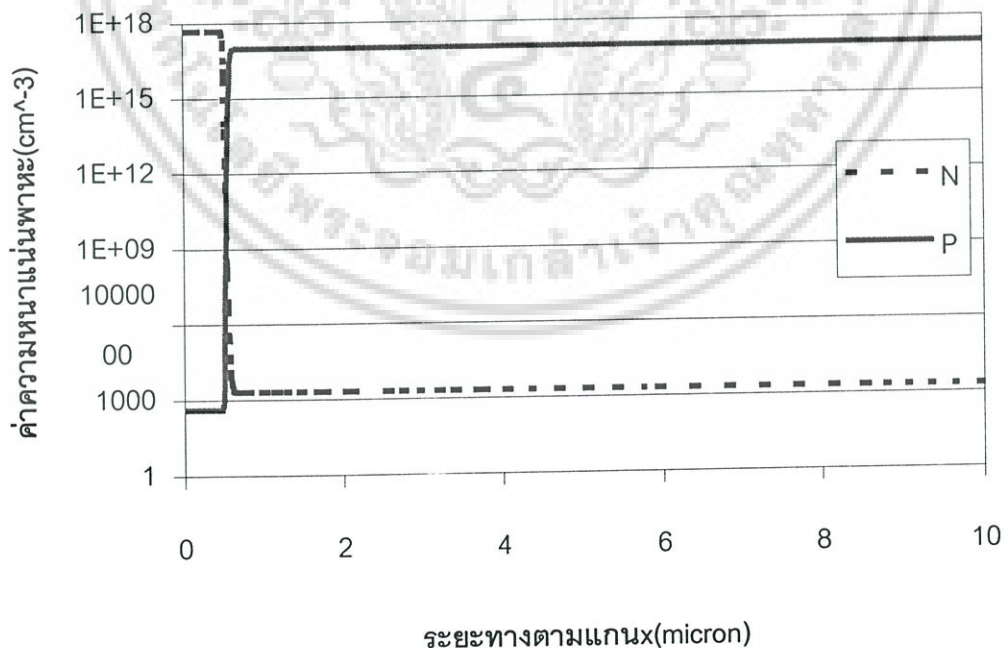
รูปที่ 4.1 ค่าศักย์ไฟฟ้า(Potential) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีรอยต่อพี-เอ็น

เนื่องจากสารกึ่งตัวนำเอ็นอยู่บนฐานรองของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ฉะนั้นรอยต่อแบบเอ็นต่อพีที่สภาวะสมดุล จะเกิดการแพร่ข้ามรอยต่อและทำให้บริเวณรอยต่อมีสภาพเป็นอ็อนลบสำหรับด้านพี และอ็อนบวกสำหรับด้านเอ็น และประจุของอ็อนดังกล่าวนี้จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณรอยต่อ และเนื่องจากการที่มีสนามไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อพี - เอ็น จึงทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้า (Potential) บริเวณรอยต่อ หรือบางที่เราจะเรียกว่า แรงดันภายใน(builtin voltage) และจากการคำนวณของโปรแกรมนี้ อ่านค่าศักย์ไฟฟ้าได้ประมาณ 0.448 โวลต์สำหรับกรณีรอยต่อเข้าสู่สภาวะสมดุลย์ ถ้าเรามีการไบอัสตรงหรือในที่นี้คือ $V_{ap} = 0.5$ โวลต์ เมื่อไบอัสตรง แรงดันไบอัสภายนอกจะไปหักล้างศักย์ไฟฟ้าภายในรอยต่อ จึงทำให้ศักย์ไฟฟ้าภายในรอยต่อมีค่าลดลง และจากผลลัพธ์ของโปรแกรม ศักย์ไฟฟ้าภายในรอยต่อมีค่าลดลงประมาณ 0.052 โวลต์ และสำหรับกรณีที่รอยต่อได้รับแรงดันย้อนกลับ แรงดันไบอัสภายนอกจะไปช่วยเพิ่มศักย์ไฟฟ้าภายในรอยต่อ จึงทำให้ศักย์ไฟฟ้าภายในรอยต่อมีค่าเพิ่มขึ้นและจากผลลัพธ์ของโปรแกรม ศักดาไฟฟ้าภายในรอยต่อมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.907 โวลต์ และทั้งสามกรณีสังเกตว่าเมื่อรอยต่ออยู่ที่ประมาณ 0.5

ไมครอน และเมื่อผ่านบริเวณรอยต่อไปแล้วแต่ละกรณีค่าศักย์ไฟฟ้าก็จะลดลงไปเรื่อยๆ ตามระยะทางความยาวของอุปกรณ์และคงที่ในที่สุดเมื่อผ่านรอยต่อพี-เอ็นไปแล้ว

4.2 ผลของการคำนวณความหนาแน่นของพาหะกรณีที่ยังไม่มีแสง

ความหนาแน่นของพาหะในกรณีที่ยังไม่มีการไบอัสแรงดันให้รอยต่อพี - เอ็น จะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของพาหะทั้งอิเล็กตรอนและโฮลที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น และบริเวณระยะตามความยาวอุปกรณ์ทั้งด้านเอ็นและทางด้านพี เนื่องจากบริเวณดังกล่าวจะมีลักษณะความแตกต่างของพาหะส่วนมากและพาหะส่วนน้อยขึ้นอยู่กับสารกึ่งตัวนำที่ใช้เป็นฐานรอง ซึ่งผู้ทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ใช้ฐานรองชนิดพี ฉะนั้นพาหะส่วนมากที่อยู่ทางด้านพีจึงเป็นโฮล และมีรอยต่อพีเอ็นที่กำหนดให้ในการทดลองมีความลึก(x_j)เท่ากับ 0.5 ไมครอน ความยาวทั้งหมดของตัวเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าประมาณ 400 ไมครอน เท่ากับตัวเซลล์อุปกรณ์จริง ฉะนั้นจึงได้ออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของพาหะที่ไม่ได้รับแสงอาทิตย์และค่าความหนาแน่นพาหะที่ได้รับแสงอาทิตย์ที่บริเวณผิวหน้าแล้วทำการเปรียบเทียบกันว่ามีค่าความแตกต่างกันอย่างไร และในกรณีที่ยังไม่มีการไบอัสแรงดันให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ และค่าความหนาแน่นพาหะที่มีการไบอัสแรงดันย้อนกลับให้กับเซลล์ ซึ่งจะมีการแสดงเป็นกราฟเส้นดังรูปด้านล่าง ซึ่งโปรแกรมที่ผู้วิจัยได้เขียนขึ้นจะพัฒนามาจากโปรแกรมจำลองการทำงานไดโอดรอยต่อพีเอ็นแบบ 1 มิติ ฉะนั้นโปรแกรมนี้จะแสดงผลพรีที่คำนวณได้ไว้ในรูปของไฟล์เอ็กซ์เซล เมื่อพล็อตกราฟได้ดังนี้

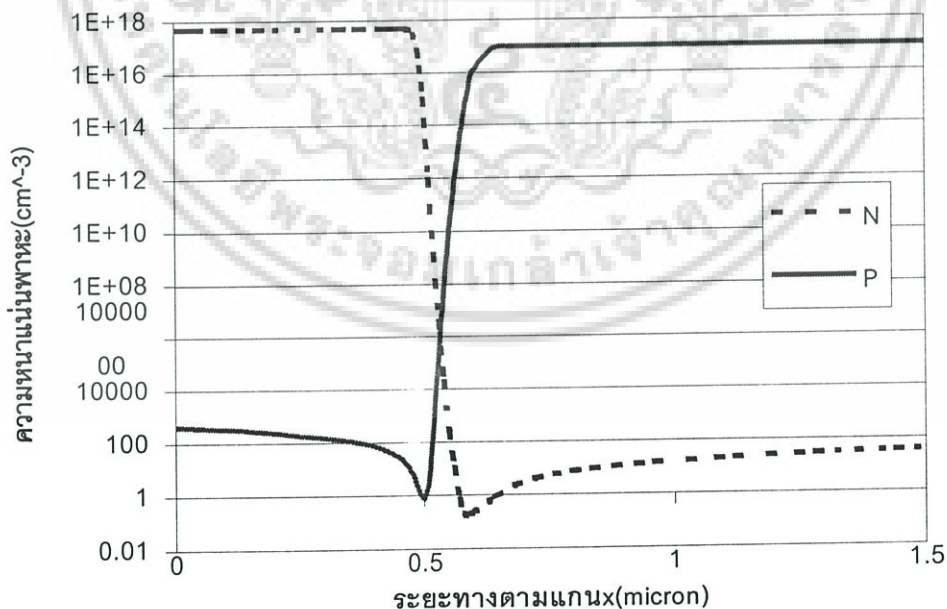


รูปที่ 4.2 แสดงค่าความหนาแน่นพาหะอิเล็กตรอนและโฮลกรณีที่ยังไม่มีการไบอัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 ด้านบนเป็นการคำนวณหาความหนาแน่นพาหะอิเล็กตรอนและโฮลขณะยังไม่มีการไบอัสแรงดันให้กับบริเวณรอยต่อ หรือ รอยต่อเข้าอยู่ในสภาพสมดุลความร้อน เมื่อโฮลเคลื่อนที่จากด้านพีข้ามบริเวณรอยต่อไปยังด้านตรงข้ามคือด้านเอ็น ซึ่งประจุเหล่านี้จะกลายเป็นโฮลพาหะส่วนเกินที่เป็นพาหะส่วนน้อย โดยพาหะส่วนเกินที่เป็นพาหะส่วนน้อยนี้จะแพร่ ,ดริฟท์ และเกิดกระบวนการรวมตัวกันใหม่ในเซลล์แสงอาทิตย์ และในนำทนองเดียวกัน เมื่ออิเล็กตรอนจากบริเวณเอ็นเคลื่อนที่ข้ามบริเวณรอยต่อเข้าไปยังด้านตรงกันข้ามคือด้านพี พาหะเหล่านี้จะกลายเป็นอิเล็กตรอนพาหะส่วนเกินที่เป็นพาหะส่วนน้อย และพาหะเหล่านี้จะแพร่,ดริฟท์ และเกิดกระบวนการรวมตัวกันใหม่ในตัวเซลล์ ทำให้พาหะส่วนเกินทั้งอิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่ไปรวมกับพาหะส่วนมากในด้านตรงกันข้ามทำให้มีค่าลดลงอย่างเอกซ์โพเนนเชียลของพาหะทั้งอิเล็กตรอนและโฮลในแต่ละด้าน

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์จะมีทั้งกรณีที่ยังไม่ได้รับแสงอาทิตย์และกรณีที่ได้รับแสงอาทิตย์ ถ้าหากตัวเซลล์ที่อยู่ในที่มืดไม่มีแสงอาทิตย์เข้าที่ผิวหน้า แนวทางแก้ไขของผู้ที่ทำเซลล์แสงอาทิตย์คือต้องมีการไบอัสแรงดันให้กับตัวเซลล์เอง และการไบอัสนี้ส่วนมากเซลล์แสงอาทิตย์จะมีการไบอัสแรงดันย้อนกลับให้เนื่องจากกระแสโฟโตที่เกิดขึ้นเป็นค่าที่ติดลบ ผู้ทำวิทยานิพนธ์จึงได้ออกแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งมีการไบอัสและไม่มีการไบอัสให้เหมาะสมและสะดวกในการวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป ซึ่งกราฟด้านล่างนี้จะเป็นการหาค่าความหนาแน่นพาหะอิเล็กตรอนและโฮลที่มีการไบอัสแรงดันย้อนกลับ $V_{ap} = -0.5$ volt ดังรูปที่ 4.3

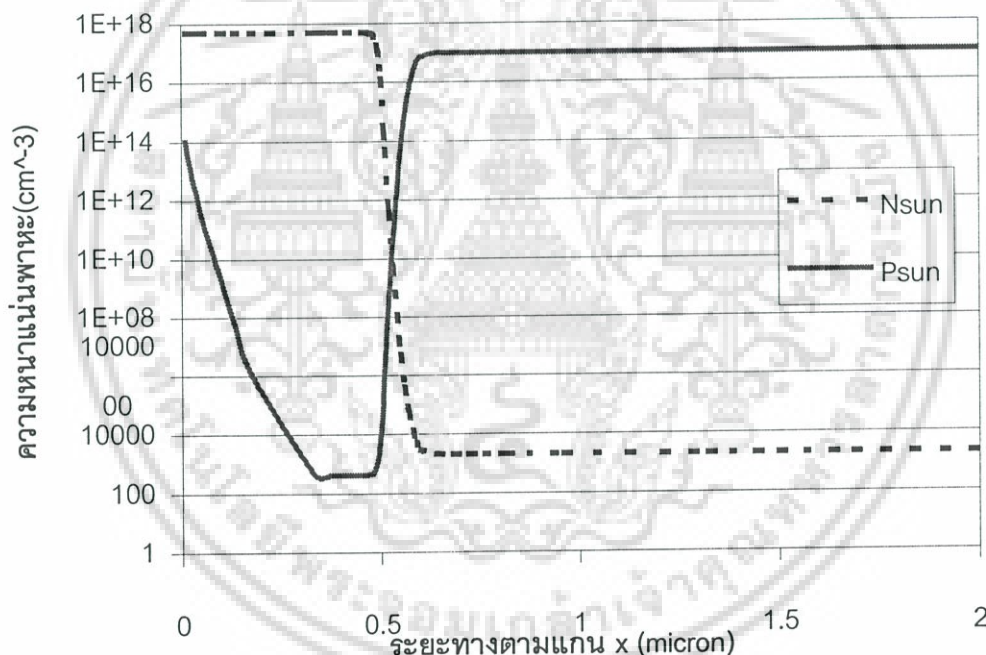


รูปที่ 4.3 แสดงค่าความหนาแน่นพาหะอิเล็กตรอนและโฮลกรณีที่มีการไบอัสย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลของการคำนวณความหนาแน่นของพาหะเนื่องจากแสงอาทิตย์

เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสงอาทิตย์บริเวณผิวหน้าทำให้ความหนาแน่นพาหะมีค่าเพิ่มขึ้นเพราะการออกแบบเมชที่ทำการหาค่าความหนาแน่นในกรณีที่ยังไม่มีแสงและค่าอัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสงจะมีค่าเท่ากันซึ่งเมช i ของค่าความหนาแน่นพาหะเท่ากับเมชที่ใช้ออกแบบค่าอัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสงคู่กับค่าอายุของพาหะในแต่ละด้านฉะนั้นในการคำนวณค่าความหนาแน่นพาหะเนื่องจากแสงจะได้จากผลรวมของค่าทั้งสองนี้จะแสดงในสมการที่(3.20) สำหรับค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนทางด้านเอ็น และสมการที่(3.21)สำหรับค่าความหนาแน่นโฮลทางด้านพี ระยะความยาวของอุปกรณ์จะมีค่าเท่า 400 ไมครอน ซึ่งตรงกับเมชสุดท้ายคือ $i=97$ จะแสดงรายละเอียดการคำนวณไว้ในภาคผนวกต่อไป และการแสดงผลพีในการคำนวณในไฟล์ เอ็กซ์เซล แล้วนำมาพล็อต กราฟเส้นแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงค่าความหนาแน่นพาหะอิเล็กตรอนและโฮลกรณีที่ได้รับแสง

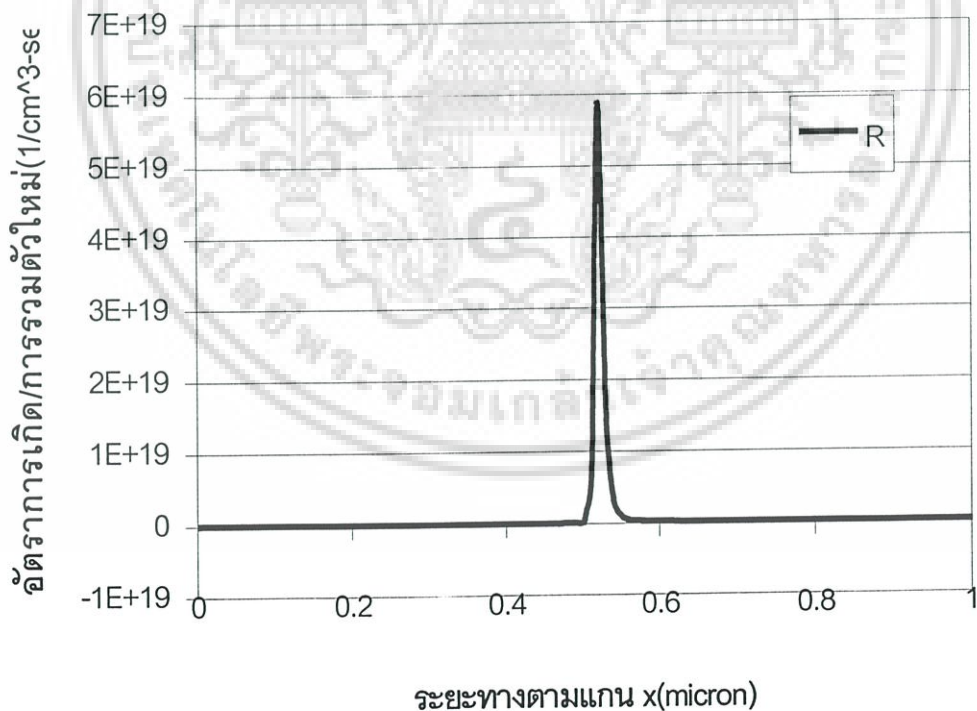
จากรูปที่ 4.4 แสดงอยู่ข้างบนเป็นการคำนวณหาค่าความหนาแน่นพาหะทั้งอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดจากแสงเข้าทางด้านเอ็นที่อยู่บริเวณผิวหน้าทำให้พาหะส่วนน้อยที่อยู่แต่ละด้านมีค่าเพิ่มขึ้นเช่น โฮลที่เป็นพาหะส่วนน้อยที่อยู่ทางด้านเอ็นจะมีค่าพาหะของโฮลที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากสารกึ่งตัวนำที่ใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีความสามารถดูดกลืนโฟตอนที่อยู่ในแสงอาทิตย์มา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระตุ้นกับพาหะอิเล็กตรอนที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำแถบวาเลนซ์ให้กระโดดข้ามแถบต้องห้ามไปยังแถบคอนดักชัน และอิเล็กตรอนที่เป็นพาหะส่วนน้อยทางด้านพีจะมีค่าเพิ่มขึ้นกว่าเดิมซึ่งจะสามารถเปรียบเทียบจากรูปที่ 4.2 เราจะแทนตัวแปร N_{sun} ด้วยค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่แสดงตลอด ซึ่งเป็นการคำนวณหาความหนาแน่นพาหะที่ยังไม่ได้รับแสงหรืออยู่ในภาวะสมดุลความร้อนสังเกตได้จากพาหะโฮลจากด้านเอ็นมีค่าเพิ่มขึ้นมากจากเดิม และพาหะอิเล็กตรอนจากด้านพีก็มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเกิดจากสนามไฟฟ้าภายในรอยต่อทำให้อิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่ไปในทิศทางทั้งสองด้าน ซึ่งความหนาแน่นพาหะที่ได้เป็นนั้นสามารถนำผลที่ได้คำนวณการเกิดความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าโฟโตได้ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

4.4 ค่าอัตราการเกิด/การรวมตัวใหม่ของพาหะ

ค่าอัตราการเกิด/รวมตัวใหม่ของพาหะที่คำนวณได้จากโปรแกรมนี้ ได้ผลเป็นค่าตัวเลขที่มีจำนวนหลายค่าตั้งแต่เมซแรก จนกระทั่งเมซสุดท้ายแล้วนำมาพล็อตกราฟเส้นได้ตามรูปที่ 4.5 ซึ่งเป็นแต่เมซที่น่าสนใจในหัวข้อนี้จะอยู่ระหว่างเมซ $i = 16$ ถึง เมซ $i = 27$ ซึ่งเป็นบริเวณปลอดพาหะพอดีจะสังเกตได้ตามรูปด้านล่าง

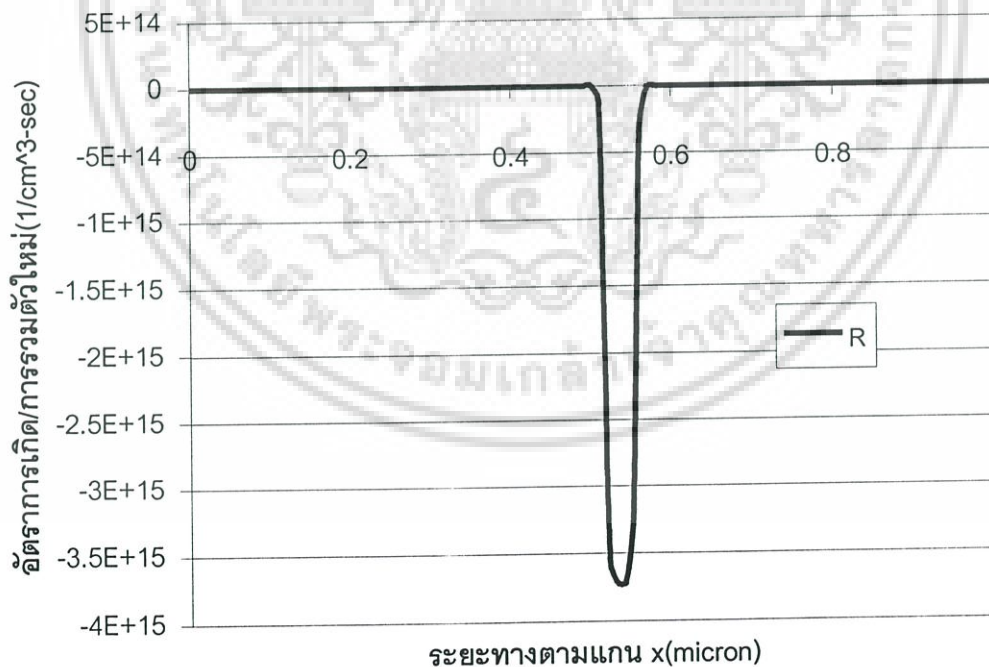


รูปที่ 4.5 แสดงอัตราการเกิด/การรวมตัวใหม่ที่บริเวณปลอดพาหะกรณีที่ใช้แรงดันไบอัสตรง

$$V_{\text{ap}} = 0.5 \text{ Volt}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 เป็นการแสดงอัตราการเกิด/การรวมตัวใหม่ที่บริเวณปลอดพาหะกรณีที่ป้อนแรงดันไบอัสตรง ซึ่งผู้ทำวิทยานิพนธ์ได้ใช้แรงดันที่ $V_{ap} = 0.5$ Volt เป็นค่าที่เหมาะสมในการทำการทดสอบการวิเคราะห์คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำที่นำมาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ และค่าอัตราการเกิด/การรวมตัวใหม่ของพาหะในกรณีไบอัสตรงมีค่าเท่ากับ $5.8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$ ซึ่งเป็นการแสดงค่าอัตราการเกิด/การรวมตัวใหม่ที่บริเวณปลอดพาหะ ซึ่งความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและความหนาแน่นของโฮลที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็นจะมีค่าที่สูงสุดสังเกตได้จากรอยพี-เอ็นอยู่ที่ระยะความลึก(x) เท่ากับ 0.5 ไมครอน หลังจากนั้นความหนาแน่นทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะเคลื่อนที่ออกจากบริเวณปลอดพาหะเนื่องจากที่บริเวณปลอดพาหะมีค่าสนามไฟฟ้ามากที่สุด ในบริเวณรอยต่อ และสนามไฟฟ้าก็จะกวาดพาหะทั้งสองออกไปแต่ละด้านของบริเวณรอยต่อ จนเข้าสู่สภาวะสมดุล และพาหะส่วนเกินจะลดลงไปรวมกับค่าความหนาแน่นส่วนมากในทิศทางตรงกันข้ามทำให้อัตราการรวมตัวของพาหะนี้จะน้อยมาก ถ้าหากมีการป้อนแรงดันย้อนกลับเท่ากับค่าต่อไปนี้ $V_{ap} = -0.5$ Volt ให้กับบริเวณรอยต่อค่าของอัตราการเกิด/การรวมตัวใหม่ของพาหะนี้จะมีลดลงกว่าเดิมมากเนื่องจาก กำแพงศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อมีค่าเพิ่มขึ้นเพื่อไปต่อต้านการเคลื่อนที่ของพาหะแต่ละด้านไม่ให้เคลื่อนที่ไปแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงอัตราการเกิด/การรวมตัวใหม่ที่บริเวณปลอดพาหะกรณีที่ป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับ $V_{ap} = -0.5$ Volt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

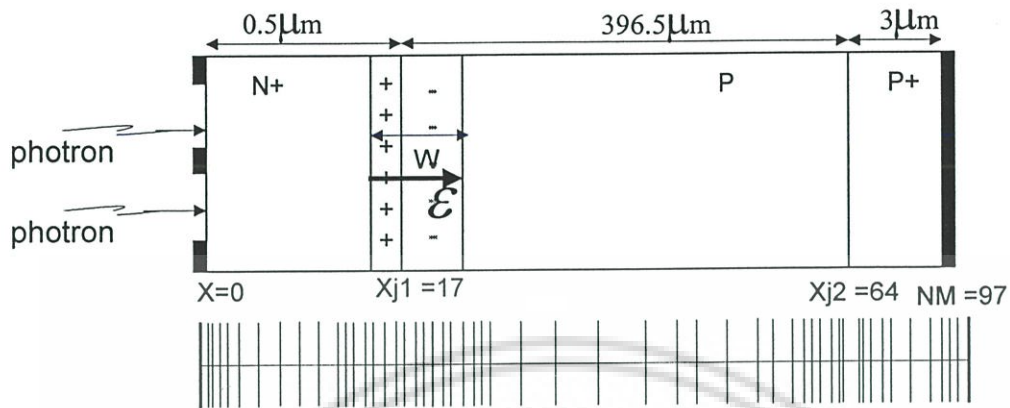
จากรูปที่ 4.6 ทางด้านบนจะสังเกตเห็นว่าค่าอัตราการเกิด/การรวมตัวใหม่ของพาหะจะมีค่าเป็นลบ ทั้งนี้เนื่องจากค่าที่คำนวณเป็นค่าลบจะแสดงเป็นค่าอัตราการเกิดคือ G และค่าที่ออกมาเป็นค่าบวกจะเป็นการรวมตัวใหม่คือ R ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ตามสมการต่อไปนี้ $G = -R$ จะเป็นค่าลบได้ก็ต่อเมื่อมีการป้อนแรงดันย้อนกลับเท่านั้น ค่าอัตราการเกิด/การรวมตัวใหม่ของพาหะอิเล็กตรอนและโฮลที่บริเวณปลอดพาหะตรงรอยต่อมีค่ามากที่สุดคือ $3.8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$ และจะลดลงตามจาการรอยต่อพี-เอ็นไปทางด้านเอ็นสำหรับโฮลแล้วไปรวมตัวใหม่กับพาหะส่วนมากคือพาหะอิเล็กตรอนแล้วจะเป็นพาหะส่วนเกินที่มีค่าน้อยมากเกือบเท่ากับศูนย์ทางด้านเอ็นและสำหรับพาหะอิเล็กตรอนแล้วจะไปรวมกับพาหะโฮลทางด้านพีกลายเป็นพาหะส่วนเกินด้านพีที่มีค่าน้อยมากเกือบเท่ากับศูนย์ที่ด้านพีเพราะด้านพีมีโฮลเป็นพาหะมากอยู่แล้ว แต่ค่าทั้งหมดมีเครื่องหมายเป็นลบ เพราะการป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับผลจะมีค่ากลับเครื่องหมายกันกับกรณีที่ป้อนแรงดันไบอัสตรงดังรูปด้านล่างต่อไปนี้

4.5 ค่าอัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสง

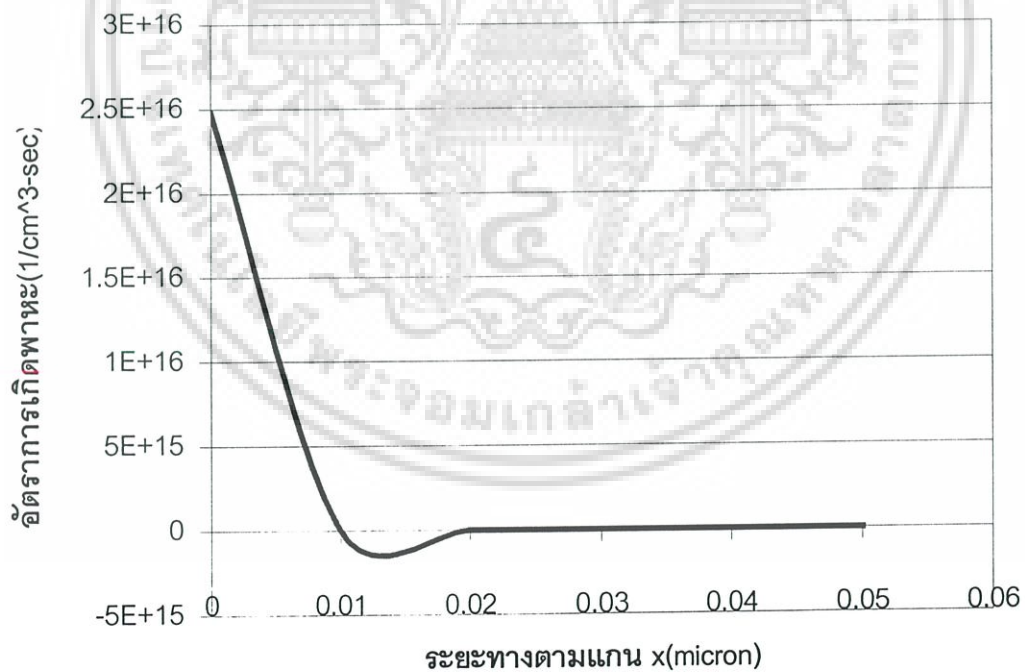
เนื่องจากแสงอาทิตย์ที่ส่องมายังบนพื้นผิวโลกเป็นแสงที่มีความถี่ของแสงและความยาวคลื่นของแสงอาทิตย์มีค่าแตกต่างกัน ฉะนั้นผู้ทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะทำการวิเคราะห์ค่าอัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสงที่เกิดจากความยาวคลื่นในช่วงต่างๆ และค่าอัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสงที่เป็นผลรวมความยาวคลื่นแสงทุกความยาวคลื่นหรือเรียกว่าความยาวคลื่นแสงแบบต่อเนื่อง แต่สารกึ่งตัวนำที่ได้นำมาทำเป็นเซลล์แสงอาทิตย์นั้นเป็นสารกึ่งตัวนำที่เป็นซิลิคอนที่มีการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงได้ประมาณ 0 ถึง 1.1 ไมโครเมตร แล้วยังมีความสามารถในการดูดกลืนโฟตอนในช่วงนี้ ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนที่ขึ้นอยู่กับค่าความยาวคลื่นแสงแต่ละค่ามาทำการคำนวณหาอัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสง

ในการหาอัตราการเกิดเนื่องจากแสงที่มีสมการขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นดังสมการที่(2.28) คือ $G(\lambda, x) = \alpha(\lambda) \cdot N_0(\lambda) \cdot \exp(-\alpha(\lambda) \cdot x)$ เป็นสมการที่ใช้ค่าความยาวคลื่นเพียงค่าเดียวเท่านั้น ดังนั้นจึงได้ใช้โปรแกรมการจำลองออกแบบค่าสมการทางคณิตศาสตร์สมการนี้เพื่อคำนวณค่าที่เกิดขึ้น[6] ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และจากการออกแบบโครงสร้างจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็นที่มีแสงอาทิตย์เข้าบริเวณผิวทางด้านหน้า และทางด้านหลังยังมีการได้ปัสสารเจือชนิดพีเพื่อทำให้อิเล็กตรอนที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสงทางด้านหน้าวิ่งผ่านรอยต่อพี-เอ็นเข้าไปทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีไม่ให้นายไปเนื่องจากเกิดการรวมตัวใหม่ของพาหะ ฉะนั้น

อิเล็กตรอนจำนวนนี้จะถูกสนามไฟฟ้าที่อยู่บริเวณรอยต่อพี-พีพัดกลับมายังบริเวณทางด้านหน้า ทำให้อิเล็กตรอนทางด้านหน้ามีค่ามากขึ้น

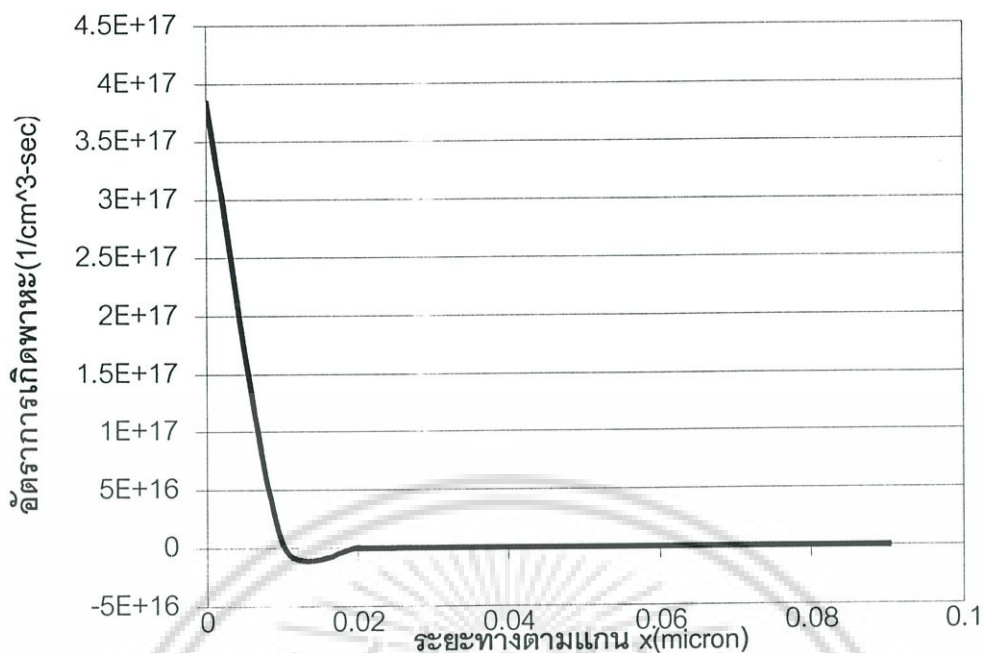


รูปที่ 4.7 แบบจำลองโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

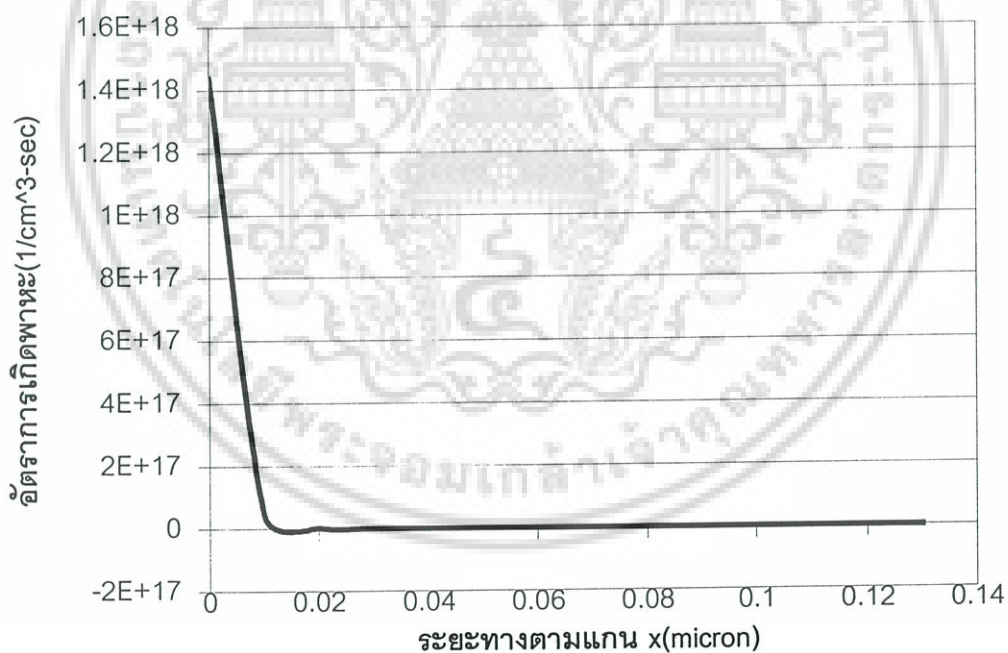


รูปที่ 4.8 ก แสดงอัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสงที่มีความยาวคลื่น 0.805 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

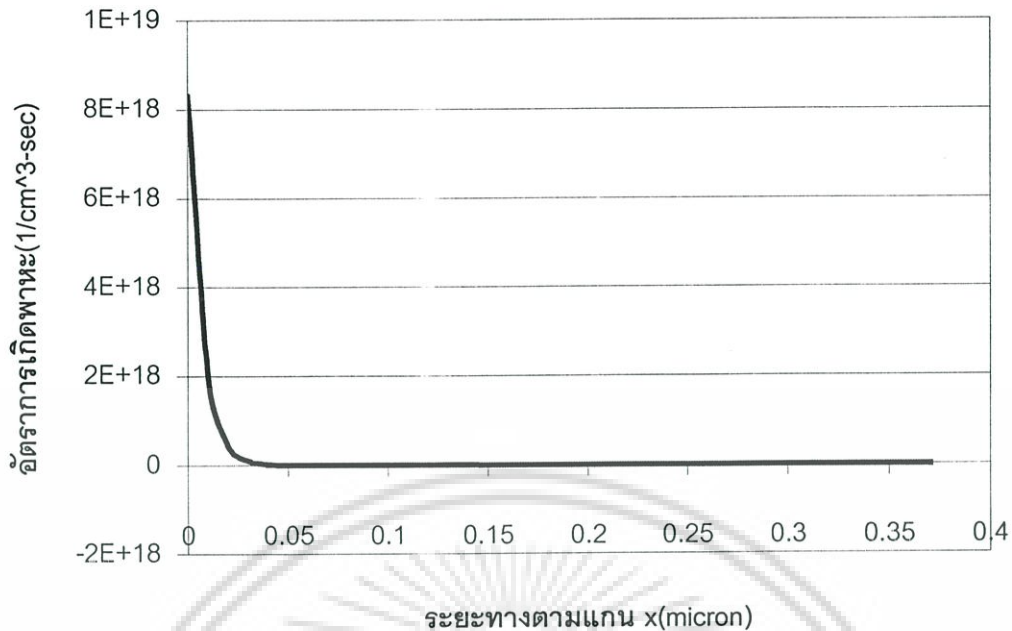


รูปที่ 4.8 ข แสดงอัตราการผลิตเนื่องจากแสงที่มีความยาวคลื่น 0.930 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.8 ค แสดงอัตราการผลิตเนื่องจากแสงที่มีความยาวคลื่น 0.965 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



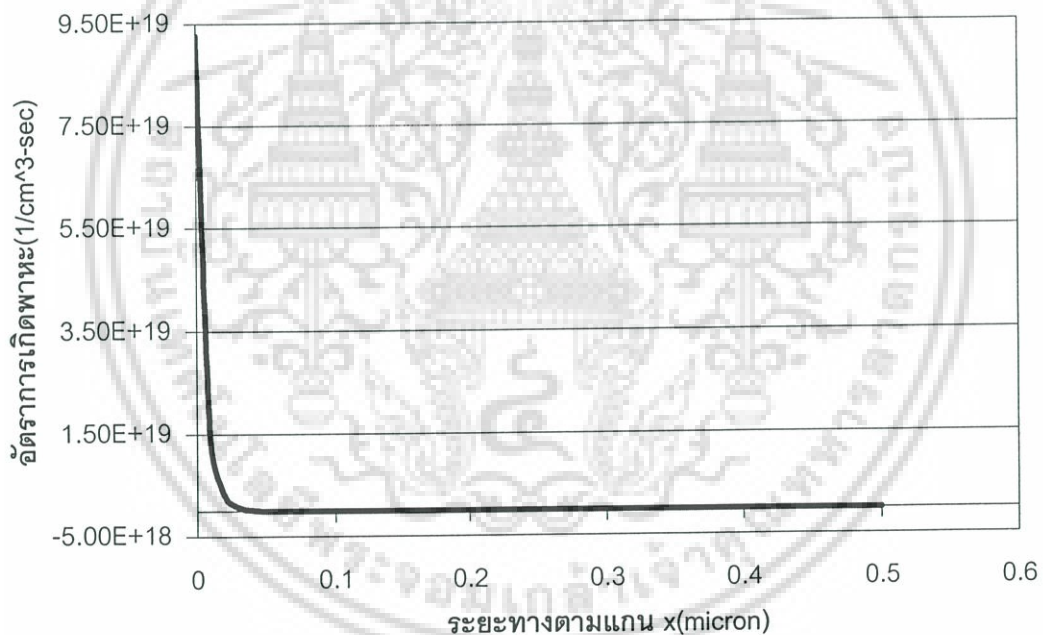
รูปที่ 4.8 ง แสดงอัตราการผลิตพาหะเนื่องจากแสงที่มีความยาวคลื่น 1.094 ไมโครเมตร

รูปที่ 4.8 แสดงอัตราการผลิตพาหะเนื่องจากแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆ

จากรูปที่ 4.8 เป็นการแสดงค่าอัตราการผลิตพาหะเนื่องจากที่เกิดจากค่าความยาวคลื่นเพียงแค่ว่าเดียวเท่านั้นจากสมการที่กล่าวไว้ด้านบน จากรูปที่ 4.8 ก นั้นจะได้ค่าอัตราการผลิตมากที่สุดที่บริเวณด้านรับแสงเท่ากับ $2.48 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งเมฆแรกและจะมีค่าลดลงไปเรื่อยๆตามระยะทางตามแกน x ซึ่งอยู่ประมาณเมฆสุดท้ายคือเมฆที่ 4 ระยะความลึกของตัวเซลล์ได้ประมาณ 0.04 ไมครอนได้ค่าอัตราการผลิตพาหะเนื่องจากแสงเท่ากับ $0.779 \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$ ซึ่งเป็นค่าที่น้อยมากเมื่อเทียบกับอัตราการผลิตที่บริเวณได้รับแสงอาทิตย์โดยตรง และรูปที่ 4.8 ข นั้นได้กำหนดค่าของความยาวคลื่น (λ) มากขึ้นมากอีกคือ 0.930 ไมโครเมตร ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) อยู่ที่ 450 cm^{-1} ได้ค่าอัตราการผลิตพาหะเนื่องจากที่ตำแหน่งเมฆแรกหรือที่บริเวณผิวหน้าเท่ากับ $3.83 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$ และจะมีค่าลดลงไปเรื่อยๆ ตามระยะความลึกของตัวเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะสามารถดูดกลืนโฟตอนเข้าไปยังสารกึ่งตัวนำได้ ซึ่งตำแหน่งเมฆสุดท้ายที่เกิดพาหะเนื่องจากแสงเท่ากับ $1.44 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$ แล้วจะมีค่าลดลงไปเรื่อยๆเหมือนรูปอื่นๆ และอัตราการผลิตพาหะน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ $0.826 \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$ ที่ตำแหน่งเมฆที่ 9 ระยะทางความลึกจากพื้นผิวด้านหน้าประมาณ 0.09 ไมครอน เหมือนรูปที่ 4.8 ข แต่ค่าอัตราการผลิตที่ระยะตำแหน่งนี้มีค่ามากกว่า และกราฟรูปสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ท้ายคือรูปที่ 4.8 เป็นการแสดงค่าอัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสงที่มีค่ามากที่สุดคือเท่ากับ $8.3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$ ที่ตำแหน่งเมฆแรกแล้วจะมีค่าลดลงไปเรื่อยๆ แบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะความลึกของตัวเซลล์แสงอาทิตย์ และที่ตำแหน่งเมฆที่ 9 ระยะความลึกของตัวเซลล์ที่นับจากบริเวณผิวทางด้านหน้าของตัวเซลล์ประมาณ 0.33 ไมครอน จะมีค่าอัตราการเกิดลดลงเหลือเท่ากับ $2.93 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$ ซึ่งที่รูปนี้เป็นการแสดงค่าอัตราการเกิดพาหะที่มีค่าความยาวคลื่นเท่ากับ 1.094 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นมากที่สุดที่สารกึ่งตัวนำซิลิคอนสามารถตอบสนองต่อแสงอาทิตย์ได้ ที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นการอธิบายอัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสงเพียงแต่ความยาวคลื่นเดียวและค่าสัมประสิทธิ์ค่าเดียวที่ได้จากกราฟรูปที่ 2.13 ในบทที่ 2 ซึ่งกล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าความยาวคลื่นและอุณหภูมิ [8] จากรูปที่ 4.8 ก ถึงรูปที่ 4.8 ง ก่อนที่กราฟจะเข้าสู่สมดุลจะมีค่าของกราฟบ้างช่วงที่มีการติดลบเนื่องจากอาจจะเกิดจากการคลาดเคลื่อนของการแบ่งระยะเมฆไม่เท่ากันจึงมีค่าคลาดเคลื่อน



รูปที่ 4.9 แสดงค่าอัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสงอาทิตย์ทุกความยาวคลื่น

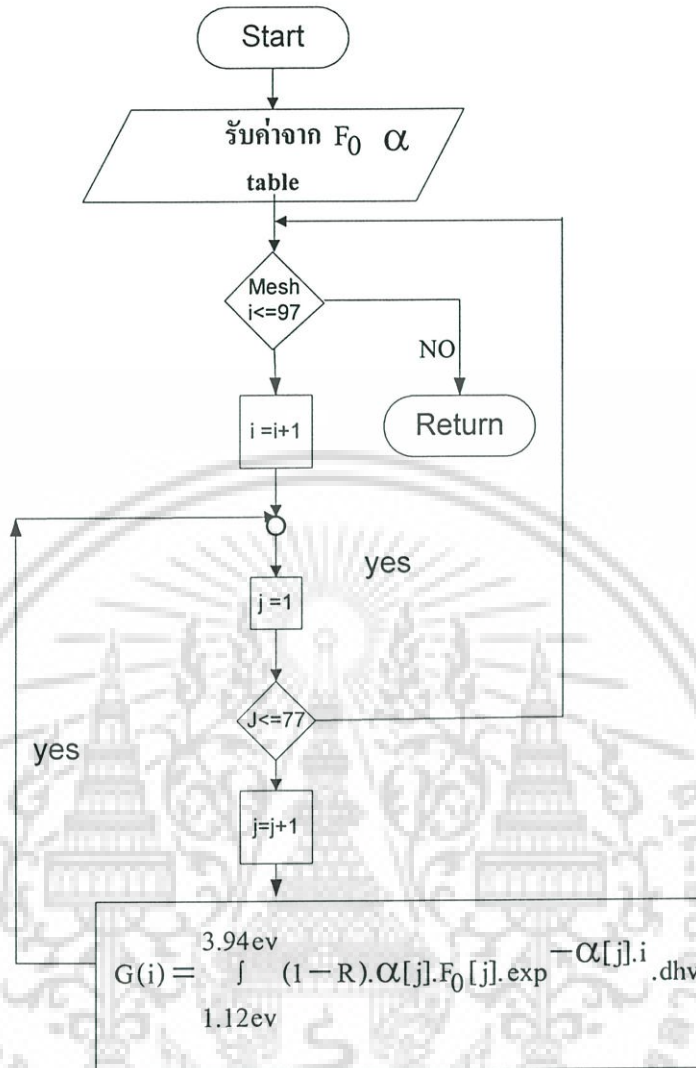
จากรูปที่ 4.9 เป็นการแสดงค่าอัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสงทุกความยาวคลื่นดังแสดงในสมการทางคณิตศาสตร์สมการที่(2.30)ในบทที่2เนื่องจากว่าโลกได้รับแสงอาทิตย์ที่มีค่าความยาวคลื่นทุกค่าแต่สารกึ่งตัวนำสามารถตอบสนองแสงอาทิตย์ได้บ้างค่าเท่านั้นดังที่กล่าวไว้ตอนแรก ดังนั้นจึงต้องคำนวณหาค่าผลรวมอัตราการเกิดเนื่องจากแสงทุกความยาวคลื่น แต่เนื่องจากการคำนวณนี้มีตัวเลขที่มีค่ามากเป็นจำนวนหลายค่าดังนั้นจึงได้ใช้โปรแกรมที่เขียนขึ้นมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์เพื่อการแจกจ่ายฟรีเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณค่าอัตราการเกิดพายุจะชอกล่าวในหัวข้อต่อไป ค่าอัตราการเกิดพายุเนื่องจากแสงในรูปแบบนี้มีค่ามากกว่าทุกรูปที่เคยแสดงเนื่องจากผลรวมของอัตราการเกิดทุกค่าในแต่ละความยาวคลื่นมารวมไว้ที่เมฆเดียว และที่ตำแหน่งเมฆแรกบริเวณผิวหน้าจะมีค่าอัตราการเกิดเท่ากับ $9.27 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$ แล้วมีค่าลดลงอย่างเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะความลึกของตัวเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งระยะความลึกที่เข้าไปได้มากที่สุดประมาณ 0.51 ไมโครเมตร และอยู่ที่ตำแหน่งเมฆที่ 17 เป็นระยะรอยต่อพี-เอ็นพอดิ ฉะนั้นแสงอาทิตย์ที่เข้ามาทางด้านหน้าที่มีความยาวคลื่นแบบต่อเนื่องนี้สารกึ่งตัวนำสามารถดูดกลืนเข้าไปได้ลึกกว่าความยาวคลื่นเพียงแค่ว่าค่าเดียวเท่านั้น จึงเกิดการพายุที่บริเวณรอยต่อได้มากแต่ที่รอยต่อพี-เอ็นมีค่าของสนามไฟฟ้าอยู่สูงมาก ฉะนั้นพายุที่เกิดในบริเวณรอยต่อจะถูกสนามไฟฟ้าผลักออกจากบริเวณรอยต่อหมดคงเหลือเพียงแค่อิออนบวกทางด้านเอ็นและอิออนลบทางด้านพีเท่านั้น และค่าอัตราการเกิดพายุเนื่องจากแสงค่านี้สามารถนำมาคำนวณหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแสงได้ซึ่งจะแสดงในหัวข้ออื่นต่อไป แล้วยังสามารถนำมาคูณกับค่าอายุของพายุอิเล็กตรอน (τ_n) ในด้านพีเพื่อให้ได้ค่าความหนาแน่นพายุเนื่องจากแสงดังแสดงในสมการที่(3.40) และสามารถนำมาคูณกับค่าอายุของพายุโฮล (τ_p) ในด้านเอ็นดังแสดงในสมการที่(3.17) จากนั้นจึงได้นำมาพิจารณาหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าทั้งอิเล็กตรอนและโฮล

จากการจำลองออกแบบโปรแกรมในส่วนการคำนวณหาค่าอัตราการเกิดพายุเนื่องจากแสงที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 0 ไมโครเมตร ถึง 1.1 ไมโครเมตร จะแสดงเป็น Flow chart ในรูปที่ 4.10 ซึ่งการเริ่มทำงาน ในส่วนของ Function Generation rate เป็นส่วนหนึ่งในโปรแกรมการจำลองแบบเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ได้ยกมาแสดงให้เห็นถึงการทำงานเบื้องต้น ตัวแปรที่กำหนดขึ้นมา นั้นคือค่า สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) มีทั้งหมด index ($j = 77$) ค่าโฟตอนฟลักซ์ (F_0) ทั้งหมด 77ค่า ซึ่งค่าทั้งหมดจะแสดงในตารางภาคผนวกด้านหลัง

Function Generation rate



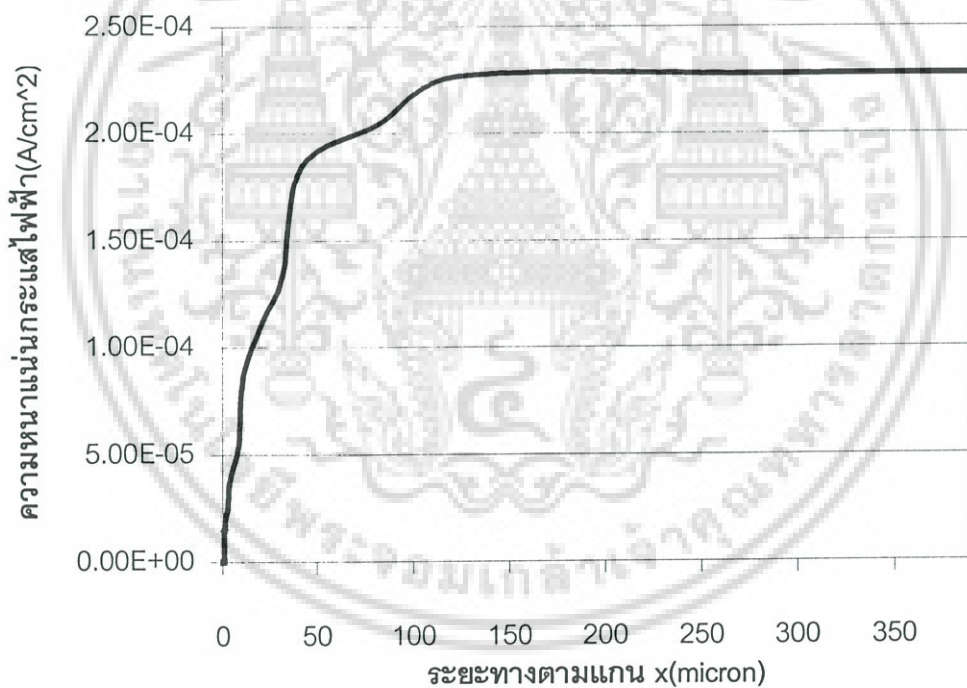
รูปที่ 4.10 แสดง Flow chart ขั้นตอนการคำนวณหาอัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสง

จากรูปที่ 4.10 เป็นการแสดงขั้นตอนการคำนวณหาอัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสง โดยเริ่มคำนวณตั้งแต่รับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) และโฟตอนฟลักซ์ (F_0) จากตารางเข้ามาในเมชที่ $i=1$ ซึ่งตำแหน่งเมชนี้จะสามารถรับค่า สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) และโฟตอนฟลักซ์ (F_0) ที่อยู่ใน j เท่ากับ 1 มาคำนวณจนถึงค่า j เท่ากับ 77 เมื่อครบทั้ง 77 ค่าแล้ว แทนค่าลงในสมการค่า $G(i)$ แล้วเมชต่อไปจะเป็นเมชที่ $i+1$ ซึ่งเป็นผลรวมค่าอัตราการเกิดพาหะจากเมชก่อนหน้านี้อันแล้ว รับค่า j ตั้งแต่ค่าที่ 1 จนถึงค่า j ที่ 77 มาคำนวณค่าเหมือนเดิม จนกระทั่งค่าตำแหน่งเมช i ครบทั้ง 97 เมช

4.6 ผลของการคำนวณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

จากการออกแบบจำลองโครงสร้างรอยต่อแบบพี-เอ็นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ารวมที่เกิดขึ้นนั้น จะพิจารณาโดยการรวมค่าความหนาแน่นกระแสอิเล็กตรอนและค่าความหนาแน่นกระแสโฮลเข้าด้วยกัน โดยผลลัพธ์ที่คำนวณได้จากโปรแกรมในส่วนค่าความหนาแน่นกระแสจะเก็บไว้ในไฟล์ของเอ็กซ์เซล แต่ผู้ทำวิจัยได้แยกเป็นไฟล์ย่อยในส่วนจากไฟล์หาค่าความหนาแน่นของพาหะ เพราะจะพิจารณาค่าความหนาแน่นกระแสที่จุดกึ่งกลางระหว่างเมซซึ่งต่างจากค่าศักดาไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นพาหะที่คำนวณหาค่าที่จุดเมซต่างๆ ซึ่งเมื่อนำค่ามาพล็อตกราฟของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าทั้งหมด และยังมีการทำไฟล์แยกเป็นไฟล์ที่มีค่าความหนาแน่นกระแสที่มีแสงอาทิตย์เข้าทางด้านหน้าและไฟล์อีกตัวคือไฟล์ที่ค่าความหนาแน่นกระแสที่ยังไม่มีแสงอาทิตย์

4.6.1 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากอัตราการเกิด/การรวมตัวใหม่ของพาหะ

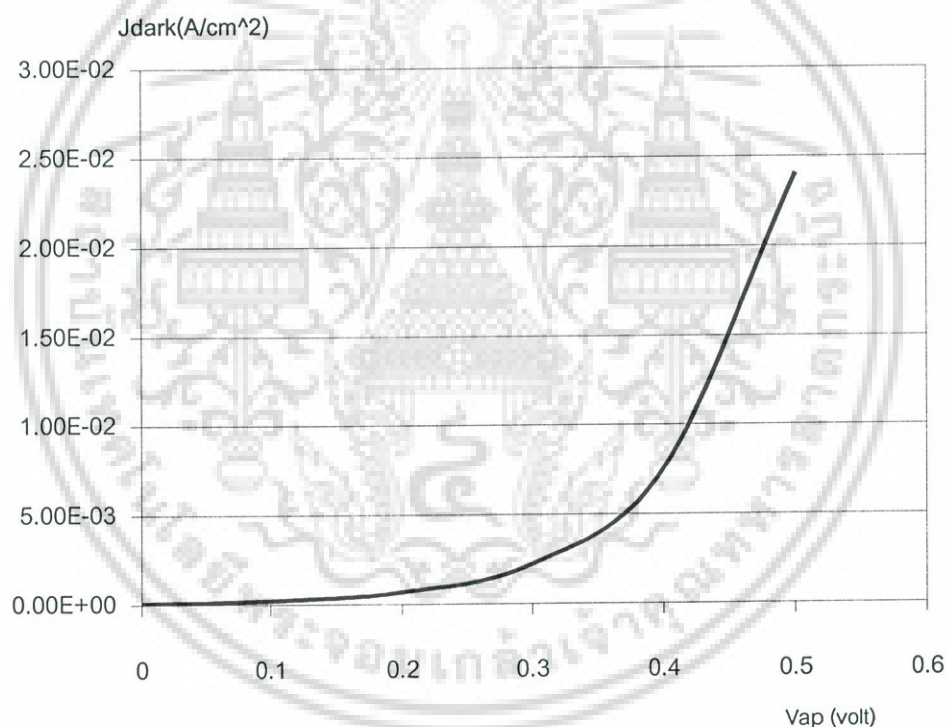


รูปที่ 4.11 แสดงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากอัตราการเกิด/การรวมตัวใหม่ของพาหะที่มีการป้อนแรงดันไบอัสตรง $V_{ap} = 0.5$ volt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.11 ในการคำนวณหาค่าความหนาแน่นกระแสที่เกิดจากอัตราการเกิด/การรวมตัวใหม่ของพาหะที่มีการไบอัสตรง จากกราฟเส้นในรูปจะมีลักษณะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆที่ค่าหนึ่งแล้วจะมีค่าคงที่ตลอดความยาวของอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นเช่นนี้เพราะค่าความหนาแน่นกระแสที่ได้จะหาจากการอินทิเกรตตลอดความยาวบริเวณปลอดพาหะ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของ Shockley-Read-Hall ในการนำค่าอัตราการเกิด/การรวมตัวใหม่ของพาหะที่อยู่บริเวณปลอดพาหะมาคำนวณหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า โดยวิธีการคำนวณในโปรแกรมจะนำผลการคำนวณในเมซแรก($i=1$)มารวมกับผลการคำนวณในเมซที่สอง และผลการคำนวณในเมซที่สองมารวมกับเมซถัดไปเรื่อยๆจนครบทุกเมซแต่การคำนวณนี้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะมีลักษณะเพิ่มขึ้นตั้งแต่เมซแรกเพราะเกิดจากผลการอินทิเกรตของสมการของ Shockley-Read-Hall

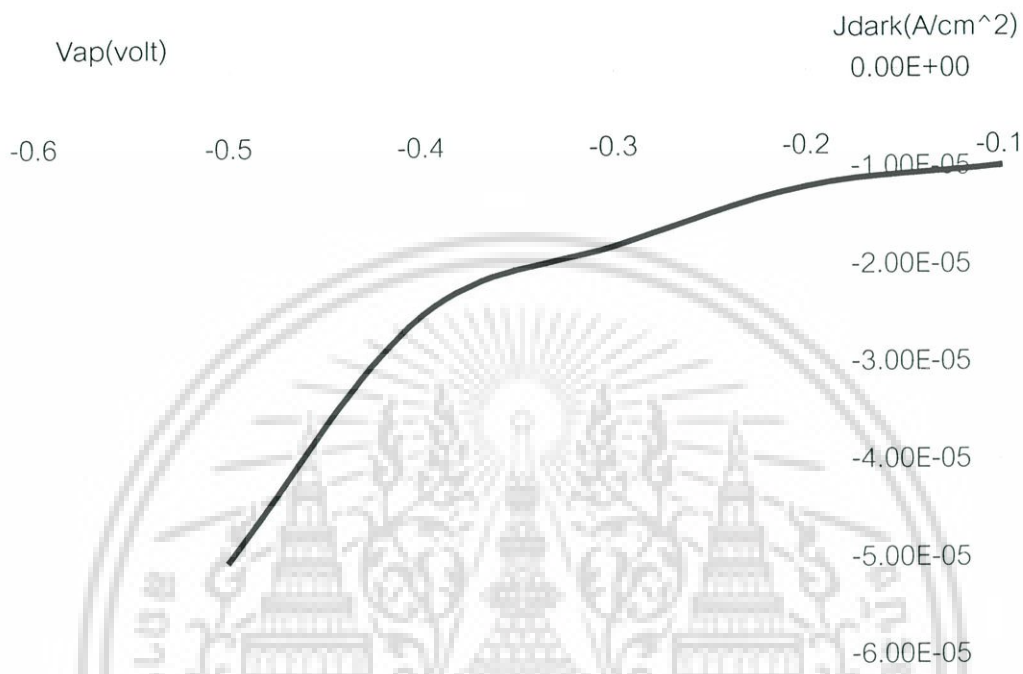
4.6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าไบอัสตรง

จากรูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ไบอัสตรงจากกราฟเส้นที่ได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและการบ่อนแรงดันให้กับรอยต่อพี-เอ็น พบว่าถ้ามีการบ่อนแรงดันที่เป็นบวกค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะมีความมากขึ้นไปเรื่อยๆ

จากกราฟเส้นรูปนี้ใช้แรงดันมากที่สุดคือประมาณ 0.5 volt และจากการป้อนแรงดันย้อนกลับในรูปที่ 4.13 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไบอัสย้อนกลับพบว่า ถ้ามีการป้อนแรงดันที่เป็นลบมากจะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสมากขึ้นเรื่อยๆและค่าที่ได้ยังมีผลของค่าความหนาแน่นติดลบด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าไบอัสย้อนกลับ

จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า เนื่องจากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากค่าอัตราการเกิด/การรวมตัวใหม่จะมีการอินทิเกรตค่าตั้งแต่เมฆแรกจนเมฆสุดท้าย และนำผลการคำนวณค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในเมฆสุดท้ายมาแสดงความสัมพันธ์กับค่าแรงดันที่ไบอัสเข้าไปคือตั้งแต่ $V_{ap} = -0.5$ volt จนถึง $V_{ap} = 0.5$ volt

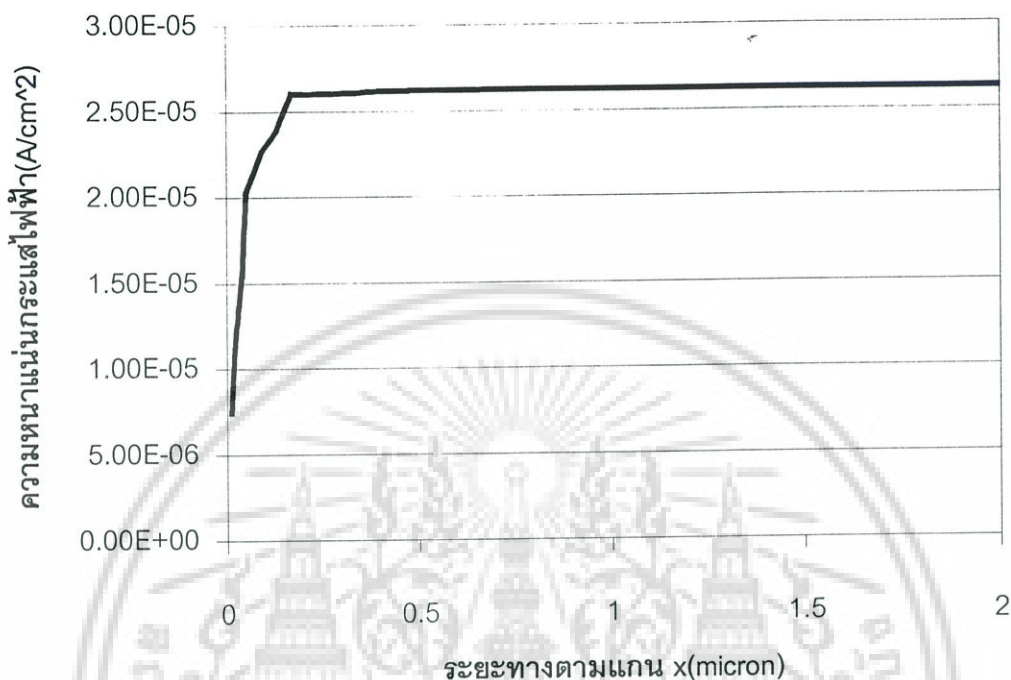
4.7 ผลของการคำนวณค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสง

4.7.1 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของอัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสง

เนื่องจากการคำนวณค่าอัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสงเป็นค่าความหนาแน่นพาหะส่วนหนึ่งนำมาคูณกับค่าอายุของพาหะแล้วนำมารวมกับค่าความหนาแน่นพาหะในสมดุลความร้อนกลายเป็นค่าความหนาแน่นในแต่ละด้าน ฉะนั้นค่าอัตราการเกิดพาหะ(Generation rate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พาหะตัวนี้จะคล้ายกับค่าอัตราการเกิด/การรวมตัวใหม่ของพาหะ จะสังเกตได้จากหน่วยคือ $\text{cm}^{-3} \text{sec}^{-1}$ เหมือนกัน ดังนั้นจึงนำค่า

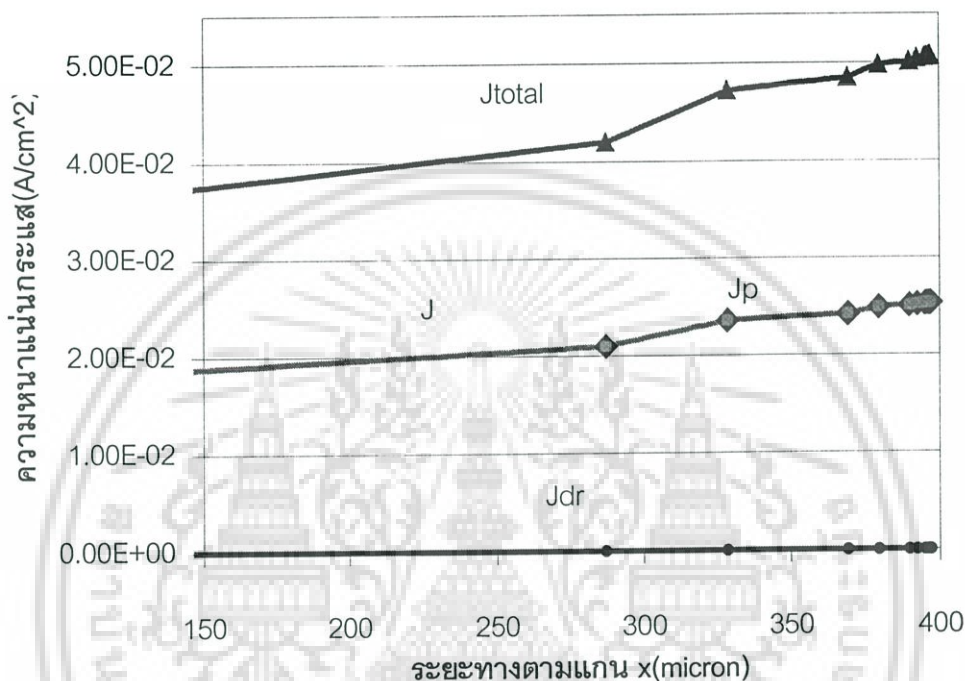


รูปที่ 4.14 แสดงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากอัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสง

จากรูปที่ 4.14 เป็นการแสดงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากอัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสง (Generation rate) ที่สามารถนำมาคำนวณหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสง เหมือนกับกรณีที่เซลล์แสงอาทิตย์ยังไม่มีแสงแต่มีการป้อนแรงดันให้กับตัวเซลล์ เนื่องจากแสงที่ให้ ณ บริเวณผิวหน้าเซลล์แสงอาทิตย์จะมีโฟตอนเข้ามากระตุ้นอิเล็กตรอนที่อยู่ทางด้านเอ็นให้เคลื่อนที่ผ่านบริเวณปลอดพาหะเข้ามาทางด้านพีซึ่งมีอิเล็กตรอนจำนวนน้อยมากเมื่อเทียบกับทางด้านเอ็น แต่พาหะที่แพร่ผ่านเข้ามาสามารถนำมาทำการคำนวณหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าได้ ซึ่งค่าที่ได้จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกรณีที่ยังไม่มีแสงแต่เราป้อนแรงดันไบอัสตรง และจากรูปนี้ก็ได้จากการอินทิเกรตค่าอัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสงตั้งแต่เมซแรกหรือค่าอัตราการเกิดพาหะที่บริเวณผิวหน้าซึ่งมีค่าพาหะมากที่สุด

4.7.2 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสงกรณีที่ไม่มีสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

เนื่องจากค่าอัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสงแบบต่อเนื่องทุกความยาวคลื่น เกิดในเซลล์แสงอาทิตย์ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้ นั้น จะเป็นผลรวมของค่าความหนาแน่นพาหะเนื่องจากแสงอาทิตย์เข้าทางด้านหน้าเซลล์ ซึ่งนำมาคำนวณค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสงได้ จะแสดงดังรูปที่ 4.15

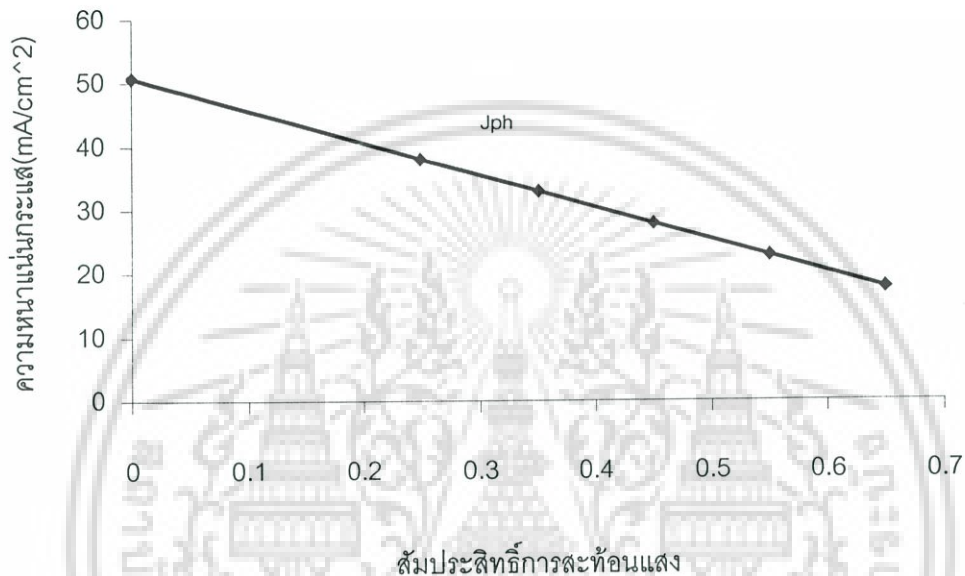


รูปที่ 4.15 แสดงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากรณีไม่มีสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

จากกราฟเส้นในรูปที่ 4.15 นั้นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสงที่ได้ จะเกิดจากผลรวมของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าโฮล และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เกิดในบริเวณปลอดพาหะ ซึ่งมีค่าน้อยมาก บางครั้งสามารถตัดสมการนี้ทิ้งได้เลย และจากกราฟนี้ยังไม่คิดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่บริเวณผิวหน้าด้านที่รับแสง จึงทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสงมีค่ามากซึ่งประมาณ 50.68 mA/cm^2 ค่าที่ได้นี้จะนำมาจากเมซซูดท้ายเพราะการคำนวณค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสงนั้นจะทำการรวมผลที่เมซแรกมาไว้ที่เมซที่สองและผลจากเมซที่สองมาไว้ในเมซถัดไปจนครบเมซสุดท้ายคือ $i=97$ มีระยะความยาวเท่ากับ 400 ไมโครเมตร แต่ที่แสดงในรูปจะเริ่มที่ 150 ไมโครเมตร เพราะค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสงจะเริ่มมีค่าคงที่แล้ว

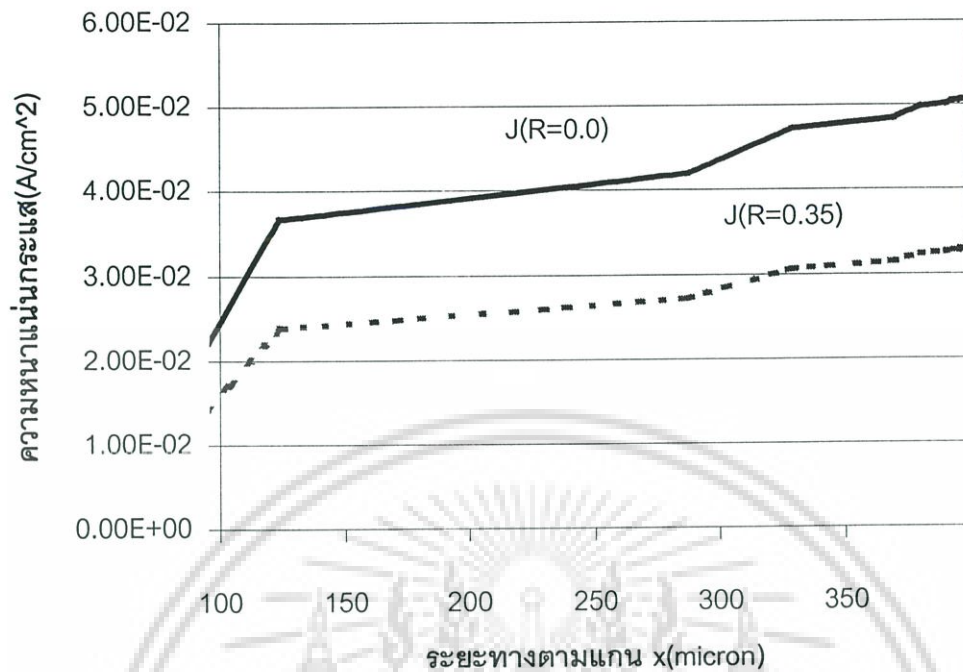
4.7.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสงกับสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสงที่เกิดในการใช้งานจริง นั้นต้องมีการคำนวณเกี่ยวกับการสูญเสียแสงที่เข้ามากระทบบนผิวหน้าเซลล์แสงอาทิตย์ที่เราใช้งาน ฉะนั้นจึงมีการออกแบบสมการที่เกี่ยวข้องกับสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง และทำการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟโต จะแสดงดังรูปที่ 4.16 ดังนี้



รูปที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสงและสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

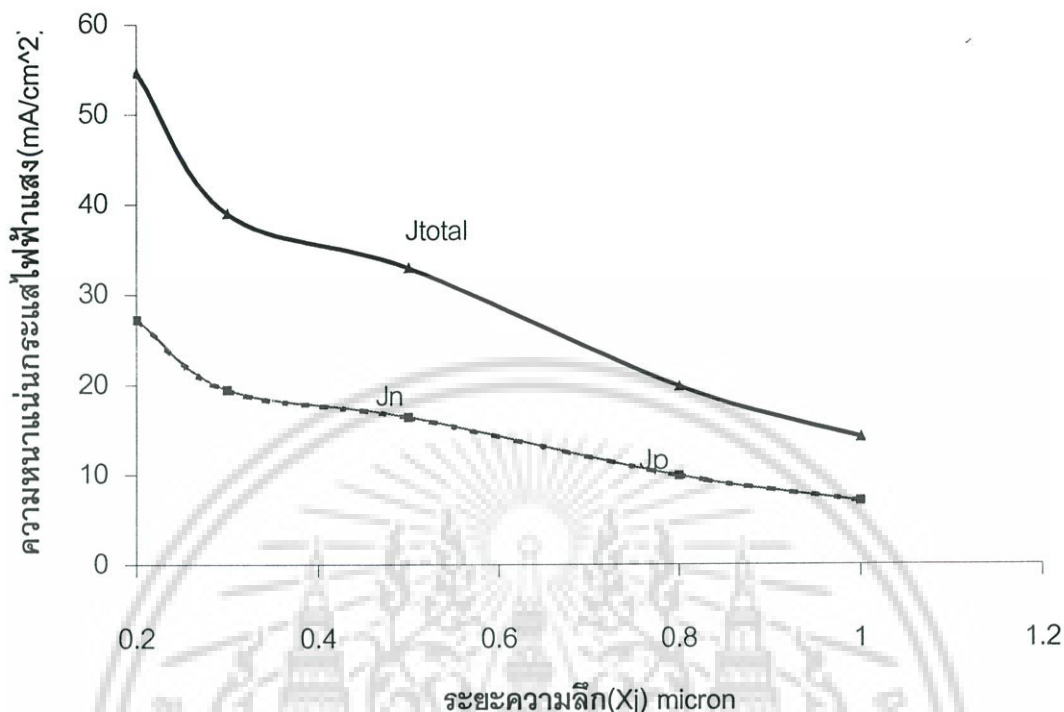
จากรูปที่ 4.16 เป็นการแสดงการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสงและสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงเนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นสารกึ่งตัวนำซิลิคอน และพื้นผิวหน้าที่รับแสงอาจจะมีการรับแสงอาทิตย์เข้ามาในตัวเซลล์ไม่เท่ากัน หรือบางครั้งอาจจะดูที่สารกึ่งตัวนำที่นำมาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ฉะนั้นจึงคำนวณค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสงที่เปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง จะได้ว่าถ้ามีการสะท้อนของแสงก่อนที่จะมีการดูดกลืนเข้าไปที่เนื้อสารมีค่ามากการดูดกลืนโฟตอนแสงจะมีค่าน้อย หรือถ้าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงมีค่าน้อยการดูดกลืนโฟตอนเข้ามาในเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟโตมีค่าที่มากขึ้น



รูปที่ 4.17 แสดงการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้แสงที่มีสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงและไม่มีสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

จากรูปด้านบน เมื่อมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่เกิดขึ้นบนด้านหน้าตัวเซลล์แล้ว ทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้แสงมีค่าลดลง จากที่ยังไม่มีการสะท้อน เช่น จากการยกตัวอย่างที่แสดงในกราฟเส้นที่พล็อต เส้นที่บเป็นเส้นแสดงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้แสงที่ไม่มีการสะท้อนกลับของแสงถ้าแสงเข้ามามากก็จะถูกดูดกลืนหมด ทำให้ค่าความหนาแน่นสูงกว่า แต่ในความเป็นจริงของการใช้งานจริงสารกึ่งตัวนำซิลิคอน สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแสงมีค่าประมาณ 0.35 ดังเส้นประที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.15 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้แสง มีค่าประมาณ 32.94 mA/cm² ที่ระยะความลึกของรอยต่อประมาณ 0.5 ไมครอน

4.7.4 ความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสงกับค่าระยะความลึกของรอยต่อพี-เอ็น



รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ที่ความลึกของรอยต่อพี-เอ็นมีผลต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสง

จากรูปที่ 4.18 พบว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสง (J_{ph}) มีค่าลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลเมื่อความลึกของรอยต่อพี-เอ็นของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการเกิดพาหะส่วนเกิน (Excess Minority Carrier) มีค่าแปรตามความลึกของรอยต่อซึ่งเป็นไปตามกฎของแลมเบิร์ต ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสงที่มีค่ามากที่สุด เมื่อค่าความลึกของรอยต่อมีค่าน้อย แต่ความลึกที่กำหนดให้มันจะต้องไม่น้อยเกินไปเพราะถ้ากำหนดค่าความลึกของรอยต่อน้อยไปจะทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะที่บริเวณผิวหน้ามากเกินไป แต่ในทางกลับกันค่าความลึกของรอยต่อมีค่าน้อยๆ จะทำให้ค่าความต้านทานอนุกรมมีค่าสูงด้วยถ้าหากต้องคำนึงถึงค่าความต้านทานด้วย ฉะนั้นจึงควรเลือกที่ความลึกของรอยต่อที่เหมาะสม โดยทั่วไปแล้วจะเลือกค่าที่ประมาณ 0.2 – 1.0 ไมครอน

4.8 ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

ในการสร้างการจำลองแบบเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญหลายตัว ที่จำเป็นในการหาประสิทธิภาพการทำงานของตัวเซลล์ หรือเพิ่มประสิทธิภาพให้ดีกว่าเดิม เช่น การเพิ่มค่าสารเจือที่โด๊ปทางด้านหน้าเพื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นพาหะอิเล็กตรอนทางด้านเอ็นและพาหะอิเล็กตรอนที่เป็นส่วนเกินทางด้านพี เนื่องจากอิเล็กตรอนเป็นพาหะที่มีการเคลื่อนที่ได้ดีเมื่อถูกโฟตอนกระตุ้น และนี่เป็นเหตุผลที่ทำให้เกิดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสงมากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงมีการสร้างตารางเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นพาหะที่โด๊ปกับการเกิดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสง ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{OC}) ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ (FF) และค่าประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ (η)

ตารางที่ 1 ตารางเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นพาหะที่โด๊ปกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสง

$$N_a = 5 \times 10^{17} \text{ (cm}^{-3}\text{)}, D_p = 7.28 \text{ cm}^2/\text{sec}, \tau_n = 2.4 \times 10^{-6} \text{ sec [20]}$$

N_d (cm^{-3})	J_{ph} หรือ J_{SC} (mA/cm^2)	V_{OC} (volt)	FF	η (%)
1×10^{18}	28.19	0.654	0.837	15.43
5×10^{18}	28.32	0.655	0.837	15.52
1×10^{19}	29.00	0.656	0.837	15.92
5×10^{19}	36.00	0.661	0.838	19.95
1×10^{20}	46.66	0.668	0.839	26.17

จากตารางที่ 1 เป็นตารางที่แสดงการเปรียบเทียบค่าสารเจือ N_d ที่โด๊ปลงบริเวณพื้นผิวหน้าของเซลล์แสงอาทิตย์ แล้วหาความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสงที่เกิดขึ้น หลังจากนั้นจึงทำการคำนวณค่าประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับการโด๊ปสารเจือทางด้านเอ็น ซึ่งในตารางนี้จะสังเกตเห็นว่าถ้าหากมีการโด๊ปสารเจือที่บริเวณผิวหน้าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสงมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ แต่มีอยู่ค่าหนึ่งที่มีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นหรือบางช่วงค่านี้ก็จะไม่เพิ่มขึ้นเลยนั่นคือค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{OC}) [3] ค่านี้จะอยู่ที่ค่าไม่เกิน 0.7 volt ตามทฤษฎีของสารกึ่งตัวนำที่เป็นซิลิคอน ถ้าจะทำให้ค่านี้เพิ่มขึ้นมากกว่านี้ต้องมีการโด๊ปสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เจือที่ด้านหลังให้มีค่ามากขึ้น และตัวสุดท้ายคือค่าประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นจะได้จากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสงที่มีค่าเพิ่มขึ้นแต่ในความเป็นจริง ถ้าทำการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จะมีการควบคุมการได้ปสารเจือไม่ให้มีค่ามากเกินไปเพราะจะทำให้เกิดความเร็วในการรวมตัว(surface recombination velocity) ของพาหะอิเล็กตรอนที่ผิวของเซลล์แสงอาทิตย์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

เนื่องจากโปรแกรมจำลองแบบการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นใน 1 มิติ นั้น เป็นงานที่ประยุกต์มาจากโปรแกรมจำลองการทำงานของไดโอดเนื่องจากคุณสมบัติของค่าพารามิเตอร์บางค่าที่อยู่ในสมการไดโอดสามารถหาจากสมการเดียวกันได้ เช่น ค่าของศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอยต่อ (Potential: Psi) ค่าความหนาแน่นพาหะ (Carrier concentration) ทั้งอิเล็กตรอนและโฮล ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากรณียังไม่มีกระแสแสง (Dark current density) ค่าอัตราการเกิด/การรวมตัวใหม่ของพาหะในบริเวณปลอดพาหะ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากอัตราการเกิด/การรวมตัวใหม่ของพาหะ ในกรณีที่เซลล์ยังไม่ได้รับแสงอาทิตย์ ฉะนั้นผู้ทำวิจัยจึงออกแบบโครงสร้างที่คล้ายกับโครงสร้างไดโอดที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น (pn) ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้ผู้วิจัยได้ออกแบบโครงสร้างที่มีความยาวทั้งหมด 400 ไมครอน ระยะความลึกของรอยต่อที่นับตั้งแต่เมซแรกมีระยะทาง 0.5 ไมครอน แต่ค่าระยะความลึกนี้สามารถเปลี่ยนได้ตามเงื่อนไขที่ผู้ทำวิจัยต้องการทดสอบเกี่ยวกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ฉะนั้นค่าระยะความลึกของรอยต่อพี-เอ็นจึงไม่ใช่ค่าคงที่ ทดสอบค่าความสัมพันธ์สารเจือที่โด๊ปลงบริเวณผิวหน้าหรือทางด้านเอ็นว่ามีผลต่อการเกิดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสงมากเพียงใด และค่าผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมในส่วนของการพารามิเตอร์ที่ยังไม่มีแสงเข้าทางด้านหน้าจะมีค่าเท่ากับโปรแกรมจำลองการทำงานของไดโอดที่มีโครงสร้างรอยต่อแบบพี-เอ็น เช่น ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อพี-เอ็นจากบทที่ 4 จะสังเกตว่าที่ด้านเอ็นจะมีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าด้านพี เนื่องจากเรากำหนดค่าความหนาแน่นพาหะด้านเอ็นมีค่าสูงกว่าทางด้านพี และศักย์ไฟฟ้าที่ผ่านบริเวณรอยต่อพี-เอ็นจะลดลงอย่างมากมาทางด้านพีและเมื่อผ่านบริเวณรอยต่อทางด้านพีไปแล้วศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ตลอดระยะความยาวของตัวเซลล์ แต่ถ้ามีการไบอัสค่าแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ด้านเอ็นจะมีค่าสูงขึ้นมากกว่าเดิม และลดลงเมื่อผ่านรอยต่อพี-เอ็น และถ้ามีการไบอัสแรงดันไฟฟ้าตรงศักย์ไฟฟ้าที่ด้านเอ็นจะมีค่าลดลงจากตอนที่ยังไม่มีไบอัส และเมื่อผ่านรอยต่อพี-เอ็นไปแล้วจะมีค่าคงที่ ค่าความหนาแน่นพาหะอิเล็กตรอนและโฮลกรณีเข้าสู่ภาวะสมดุลนั้น ค่าความหนาแน่นพาหะอิเล็กตรอนทางด้านเอ็นจะมีค่ามากที่สุดและลดลงเมื่อผ่านรอยต่อเข้าไปทางด้านพีกลายเป็นพาหะส่วนเกินในบริเวณสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่มีโฮลเป็นพาหะส่วนมาก ส่วนทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่มีโฮลเป็นพาหะส่วนมากเมื่อเกิดการสัมผัสกันแล้วโฮลทางด้านพีก็จะแพร่ผ่านรอยต่อพี-เอ็นไปทางด้านเอ็นกลายเป็นพาหะส่วนเกินหรือพาหะส่วนน้อยทางด้านเอ็น และค่าอัตราการเกิด/การรวมตัวใหม่ของพาหะที่บริเวณปลอดพาหะที่ขึ้นอยู่กับไบอัสแรงดันให้กับอุปกรณ์ เช่น ถ้ามีการไบอัสแรงดันภายนอก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ย้อนกลับค่าอัตราการเกิดที่บริเวณปลอดภัยจะมีค่ามากที่สุดที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็นแต่จากรูปที่ได้ในโปรแกรมจะมีค่าพาหะที่เป็นลบเนื่องจากกราฟที่เราป้อนแรงดันย้อนกลับ และค่าอัตราการเกิดจะมีค่าลดลงไปในทิศทางแต่ละด้านของสารกึ่งตัวนำ ค่าพารามิเตอร์ที่เราหาทั้งหมดนี้สามารถนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ยังไม่ได้รับแสงที่ผิวหน้า

ส่วนการคำนวณของโปรแกรมการจำลองแบบเซลล์แสงอาทิตย์ ใน 1 มิติ นั้นเป็นโปรแกรมที่พัฒนามาจากโปรแกรมเดิมของไดโอดเพียงแต่คำนวณค่าอัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสงที่มีความยาวคลื่นแบบต่อเนื่องเพราะในแสงอาทิตย์นั้นมีความยาวคลื่นหลายค่า ย่อมทำให้เกิดพลังงานโฟตอนที่ตกกระทบบนผิวหน้ามีหลายค่าเหมือนกัน ฉะนั้นผู้ทำวิจัยจึงได้คำนวณผลรวมของอัตราการเกิดของพาหะทุกความยาวคลื่น ให้มาเป็นค่าเดียวก่อนแล้วถึงจะตกกระทบลงบนผิวหน้าที่รับแสง โดยการคำนวณนั้นจะใช้โปรแกรมที่ออกแบบหาอัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสงและนำค่าที่ได้นั้นไปคำนวณหาความหนาแน่นพาหะทั้งอิเล็กตรอนและโฮล เพื่อที่เราสามารถนำค่าเหล่านี้ไปใช้ในสมการค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในทอมต่อไป

ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแสงที่ได้ในตอนแรกนั้นจะคิดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงเป็นศูนย์หรือมีค่าน้อยมากทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่ามากเหมือนค่าความหนาแน่นกระแสในอุดมคติ แต่ในการใช้งานจริงนั้นสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงจะมีค่าที่ไม่เป็นศูนย์ ฉะนั้นผู้ทำวิจัยจึงได้คำนวณค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง จึงสรุปได้ว่าถ้าแสงที่เข้าที่ผิวด้านหน้าแล้วมีการสะท้อนของแสงน้อยทำให้สารกึ่งตัวนำดูดกลืนจำนวนโฟตอนได้มาก เกิดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามาก แต่ถ้าแสงอาทิตย์ที่เข้ามาผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำมีการสะท้อนมากการดูดกลืนแสงน้อย ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าก็จะน้อยลงซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 แล้ว

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ออกแบบนั้นมีระยะของความลึกรอยต่อสารกึ่งตัวนำที่เป็นฐานรองและสารที่ทำการโด๊ปลงไป ซึ่งการออกแบบความลึกรอยต่อนี้มีผลกับค่าความหนาแน่นกระแสมากเหมือนกันจึงสรุปได้ว่า ถ้ามีการโด๊ปสารที่ตรงกันข้ามกับฐานรองมากความหนาแน่นพาหะที่อยู่ทางด้านหน้าจะแพร่เข้ามายังฐานรองมากรอยต่อที่เกิดขึ้นจะอยู่ตื้นหรืออยู่ใกล้กับผิวหน้าที่รับแสง ฉะนั้นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจึงได้ว่า ถ้าความลึกรอยต่อน้อยจะเกิดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากกว่าระยะความลึกเข้าไปในตัวอุปกรณ์มาก แต่ถ้าเกิดรอยต่ออยู่ที่ใกล้ผิวมากก็เป็นผลเสียอีกอย่างหนึ่งคือจะเกิดความเร็วในการรวมตัวที่ผิวด้านหน้ามากเกินไปทำให้เกิดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าน้อยลงเหมือนกัน ฉะนั้นระยะความลึกรอยต่อจะอยู่ประมาณ 0.2-1.0 ไมครอนตามที่ได้ทำการทดสอบมาแล้วจากบทที่ 4 ดังนั้นในการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ จึงควรหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวทางในการพัฒนาตัวโปรแกรมจำลองเซลล์แสงอาทิตย์นี้ สามารถนำไปออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีแสงเข้าทางด้านหน้าและด้านหลัง ซึ่งจะได้ค่าประสิทธิภาพการทำงานของตัวเซลล์ที่สูงกว่าการที่แสงเข้าเพียงด้านเดียว หรือในส่วโปรแกรมการออกแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในหนึ่งมิตินี้ สามารถนำไปพัฒนาออกแบบตัวโปรแกรมเป็นสองมิติหรือสามมิติ เพื่อความละเอียดของตัวพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล. ฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ. กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543.
- [2] รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช. เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์. กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542.
- [3] ดุสิต เครื่องาม. สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2542.
- [4] ผศ.ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล. อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ. กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.
- [5] บุญมาก ศิรินาวกุล. "การวิเคราะห์กระแสไฟฟ้าโฟโตในเซลล์แสงอาทิตย์แบบห้วต่อพี-เอ็น." วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2524.
- [6] Thomas, R.E., " Silicon Solar Cell (1) – Basic, " Solar Energy Conversion An Introduction Course, 785-803, Pergamon Press, 1978.
- [7] รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช. สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543.
- [8] Wolf, H.F., " Silicon Semiconductor Data, " Hungary: Pergamon Press, 1969.
- [9] Yang, E., Fundamental of Semiconductor Devices, 147-160. McGraw-Hill Book Co., New York, 1978.
- [10] Sze, S.M., Semiconductor Devices Physics and Technology, John Wiley and Son, 1985.
- [11] Fossum, J.G. "Physical Operation of Back-Surface-Field Silicon Solar Cells" IEEE Transaction on Electron Devices, ED-24, No.4, April 1977.
- [12] Redfield, D., "Fundamental Limitations on Silicon Solar-Cell Efficiency, " Proc. 15th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., 508-584, 1980.
- [13] W. Shockley and H.J. Queisser, "Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells", J. Applied Physics, 32,510(1961).
- [14] Y. Kuwano and A. Takeoka, Guide book for Solar Cell Applications, Power Publishing, Japan (1992).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] S.Selberherr. Analysis and Simulation of Semiconductor Devices. New York : Springer-Verlag Wien. 1984.
- [16] Hovel, H.J., Semiconductor Semimetals Vol 11 (A.C. Beer, R. K. Willardson) , New York, Academic Press, 1975.
- [17] โสภณ พรหมชัย, โยอิชิ ยาซุมูระ และเดิมพงษ์ เพ็ชรกุล. "การวิเคราะห์ผลของโครงสร้างที่มีต่อคุณลักษณะกระแส-แรงดันของไดโอดรอยต่อพี-เอ็น." การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า. ครั้งที่ 25. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2545. หน้า 169-173.
- [18] F.Gerald, O. Wheatley. Applied Numerical Analysis. 5th Ed. Addison-Wesley. 1999.
- [19] โสภณ พรหมชัย, โยอิชิ ยาซุมูระ และเดิมพงษ์ เพ็ชรกุล. "การวิเคราะห์ทึลไกกระแสและพฤติกรรมไดโอดรอยต่อพี-เอ็นโดยจำลองแบบหนึ่งมิติ." วิศวกรรมลาดกระบัง. ปีที่ 19, ฉบับที่ 4, ธันวาคม 2545. หน้า 19-24.
- [20] เภา ชาธิรัตน์, สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล และ โยอิชิ ยาซุมูระ. "การจำลองแบบเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อการหาประสิทธิภาพของตัวเซลล์". วิศวกรรมลาดกระบัง. ปีที่ 21, ฉบับที่ 2, มิถุนายน 2547. หน้า 55-60.

ภาคผนวก ก

ค่าคงที่ทางฟิสิกส์ที่ใช้ในการคำนวณ

ในส่วนนี้จะแสดงค่าคงที่ทางฟิสิกส์ที่มีการใช้ในการคำนวณจากการเขียนโปรแกรมจำลองแบบหนึ่งมิติรอยต่อพี-เอ็น

Bandgap of Si at 300 K	1.12	eV
Boltzmann constant	1.38066×10^{-23}	J/K
Dielectric constant of Si	11.9	
Electron charge	1.60218×10^{-19}	Coulomb
Electron rest mass	9.1095×10^{-31}	kg.
Intrinsic carrier concentration	1.45×10^{10}	cm^{-3}
Planck constant	6.62617×10^{-34}	J-s
Permittivity in vacuum	8.85418×10^{-14}	F/cm
Temperature	300	K
Thermal voltage at 300 K	0.0259	V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

โปรแกรมการจำลองแบบหนึ่งมิติรอยต่อพี-เอ็น

ในส่วนนี้จะแสดงการประกาศตัวแปรและฟังก์ชันที่ใช้ในการคำนวณ วิธีการคำนวณ และการจัดเก็บข้อมูลเป็นไฟล์ excel ทั้งกรณีไม่มีแสงอาทิตย์และมีการฉายแสงเข้าด้านเอ็น เป็นโปรแกรมจำลองแบบของรอยต่อพี-เอ็นที่ด้านเอ็น()มีระยะความยาว 0.5 ไมครอน ด้านพี()มีระยะความยาว 396.5 ไมครอน และบริเวณด้านหลังทำการได้ปัสสารเจือชนิดพี()มีระยะความยาว 3 ไมครอน การเขียนโปรแกรมจำลองแบบเขียนด้วยภาษา Visual version 6

```
// 1DPNNplusSimulationDlg.cpp : implementation file
#include "stdafx.h"
#include "1DPNNplusSimulation.h"
#include "1DPNNplusSimulationDlg.h"
#include <math.h>
#include <afxctl.h>
#include <afxdb.h>
#include <time.h>          //////////////// for difftime function
#ifdef _DEBUG
#define new DEBUG_NEW
#undef THIS_FILE
static char THIS_FILE[] = __FILE__;
#endif

/////----- Declare all of parameter, variable, constant, function -----

#define Planck 6.62617E-34 // Planck constant, J-s
#define pi 3.14159265358979 // pi,22/7
#define m0 9.1095E-31 // Electron rest mass, kg.
#define Bk 1.38066E-23 // Boltzmann constant, J/K
#define q 1.60218E-19 // Electron charge, coulomb
#define epsrn0 8.85418E-14 // Permittivity in vacuum
#define Dc 11.9 // Dielectric constant of Si
#define NI 1.45E+10 // Intrinsic carrier concentration
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#define Nc 2.8E+19 // Effective density of state in Cond.B
#define Nv 1.04E+19 // Effective density of state in Vale.B
#define Eg 1.12 // Bandgap of Si at 300 K,eV
#define T 300 // Temperature, kelvin
#define Ut 1.0 // Scaled thermal voltage
#define TNP 0.479E-05
#define MaxGen 6.94E+19
#define Ro 0.0
#define RT 0.0
#define R1 0.0
#define R2 0.0
#define Sn 0.0
#define Sp 100.0
#define Xj 0.5E-06
float Vap; // 0, 0.25852151, 0.51704302, 0.73808089 or negative values, Voltage
applied, volt
double Na; // Acceptor density in p-region
double Nap; // Donor density in n-region
double Nd; // Donor density in n+ region
double Alpha; // Absorption coefficient of light (1/cm)
double PF; // Photon flux (photon numbers /cm^2)
double Reflection; // Reflection coefficient
const double Correct=1e-2;
double
Lamda[78]={0,0.305,0.315,0.325,0.335,0.345,0.355,0.365,0.375,0.385,0.395,0.405,0.41
5,0.425,0.435,0.445,0.455,0.465,0.475,0.485,0.495,0.505,0.515,0.525,0.535,0.545,0.555
,0.565,0.575,0.585,0.595,0.605,0.615,0.625,0.635,0.645,0.655,0.665,0.675,0.685,0.695,
0.6983,0.7,0.71,0.72,0.7277,0.73,0.74,0.75,0.7621,0.77,0.78,0.79,0.8,0.8059,0.825,0.83,
0.835,0.8465,0.86,0.87,0.875,0.8875,0.9,0.9075,0.915,0.925,0.93,0.94,0.95,0.955,0.965,
0.975,0.985,1.018,1.082,1.094,1.098,};

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

double

```
Eph[78]={0,4.06,3.936,3.815,3.701,3.594,3.492,3.397,3.306,3.22,3.139,3.061,2.987,2.917,2.85,2.786,2.725,2.666,2.61,2.556,2.505,2.455,2.407,2.361,2.317,2.275,2.234,2.194,2.156,2.119,2.084,2.049,2.016,1.984,1.952,1.922,1.893,1.864,1.837,1.81,1.784,1.776,1.771,1.746,1.722,1.705,1.698,1.675,1.653,1.627,1.6103,1.589,1.569,1.55,1.540,1.503,1.493,1.485,1.464,1.441,1.425,1.417,1.397,1.377,1.367,1.355,1.34,1.333,1.319,1.305,1.298,1.284,1.271,1.258,1.218,1.146,1.133,1.129,};
```

double

```
photonflux[78]={0,2.03E+14,3.33E+15,1.86E+16,3.08E+16,4.08E+16,5.12E+16,6.55E+16,7.31E+16,7.41E+16,9.80E+16,1.53E+17,1.72E+17,1.80E+17,1.95E+17,2.42E+17,2.67E+17,2.77E+17,2.90E+17,2.89E+17,3.13E+17,3.16E+17,3.14E+17,3.30E+17,3.51E+17,3.50E+17,3.57E+17,3.64E+17,3.75E+17,3.79E+17,3.79E+17,3.85E+17,3.89E+17,3.91E+17,3.98E+17,4.01E+17,3.92E+17,4.12E+17,4.12E+17,4.15E+17,4.14E+17,3.43E+17,4.14E+17,4.13E+17,4.12E+17,3.57E+17,4.09E+17,4.05E+17,4.05E+17,2.82E+17,4.02E+17,4.01E+17,4.00E+17,3.98E+17,3.49E+17,3.88E+17,3.90E+17,3.85E+17,1.74E+17,3.72E+17,3.70E+17,3.68E+17,3.66E+17,3.66E+17,3.63E+17,3.59E+17,1.01E+17,7.67E+16,1.18E+17,1.11E+17,1.23E+17,1.36E+17,2.60E+17,2.47E+17,3.00E+17,2.65E+17,2.48E+17,2.69E+17,};
```

double

```
alpha[78]={0,7.21E+05,6.00E+05,4.00E+05,3.80E+05,3.50E+05,1.50E+05,1.30E+05,1.20E+05,1.15E+05,1.00E+05,4.00E+04,3.90E+04,3.70E+04,3.00E+04,2.50E+04,2.00E+04,1.70E+04,1.40E+04,1.35E+04,1.25E+04,8.80E+03,8.50E+03,8.00E+03,7.60E+03,7.00E+03,6.00E+03,5.50E+03,5.00E+03,4.60E+03,4.30E+03,4.00E+03,3.50E+03,3.20E+03,3.19E+03,3.15E+03,3.00E+03,2.80E+03,2.50E+03,2.20E+03,2.15E+03,2.00E+03,1.80E+03,1.75E+03,1.65E+03,1.60E+03,1.57E+03,1.55E+03,1.50E+03,1.40E+03,1.30E+03,1.25E+03,1.20E+03,1.00E+03,950,980,900,880,830,760,700,680,750,600,570,550,500,450,400,380,370,350,300,250,200,180,150,100,};
```

```
//***** Mesh specification *****//
```

```
const double Length = 0.0400; // Device length = 400 um.,cm.
```

```
const double spc1 = 0.000001; // Auxiliary spacing = 0.01 um.,cm.
```

```
const double spc2 = 0.000004; // Auxiliary spacing = 0.04 um.,cm.
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

const double spc3 = 0.000016; // Auxiliary spacing = 0.16 um.,cm.
const double spc4 = 0.000064; // Auxiliary spacing = 0.64 um.,cm.
const double spc5 = 0.000256; // Auxiliary spacing = 2.56 um.,cm.
const double spc6 = 0.001024; // Auxiliary spacing = 10.24 um.,cm.
const double spc7 = 0.004096; // Auxiliary spacing = 40.96 um.,cm.
const double spc8 = 0.016384; // Auxiliary spacing = 163.84 um.,cm.
const int NM = 97; // Number of mesh
const int JM1 = 17; // Mesh point of junction
const int JM2 = 64; // Mesh point of junction
//***** Diffusion coefficient *****/
const double TauNp = 0.00000195; // Lifetime of electron in p-region,sec
const double TauPn = 0.00000115; // Lifetime of hole in n-region,sec
const double TauNpp = 0.00000005; // Lifetime of hole in n+ -region,sec
const double Dnn = 33.4; // For electron in n-region at 300 K
const double Dnpp = 5.2; // For electron in n+ -region at 300
K
const double Dnp = 9.1; // For electron in p-region at 300 K
const double Dpp = 18.2; // For hole in p-region at 300 K
const double Dpn = 8.32; // For hole in n-region at 300 K
const double Dppp = 4.68; // For hole in n+ -region at 300 K
//***** Diode physical parameter *****/
double h[120]; // Scaled spacing
double C[120]; // Scale impurity concentration
double Dn[220]; // Scale electron diffusion
double Dp[220]; // Scale hole diffusion
double Tau[120]; // Scale life time for both carriers
double len[120]; // Scale device length
double W[120];
double HL[120];
//***** Scaling factor *****/
double epsrnSi; // Scaling factor of silicon permittivity

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

double sqrRMDA;           // Scaling factor of poison's eq.
double Psi0;              // Scaling factor of potential
double x0;                // Scaling factor of distance
double C0;                // Scaling factor of N,P,C
double D0;                // Scaling factor of diff.coefficient carrier
double Tau0;              // Scaling factor of life time of carrier
double GR0;               // Scaling factor of generation/recombination rate
double J0;                // Scaling factor of current density
double JI0;
double NI0;
double Gen0;
//***** Ohmic contact parameter *****/
double POhm;              // Hole concentration at ohmic contact
double NOhm;              // Electron concentration at ohmic contact
double PsiBohm;           // Built-in potential at ohmic contact
double PsiOhm;            // Electrostatic potential at ohmic contact
double PsiBct1;           // Built-in potential in p-region
double PsiBct2;           // Built-in potential in n-region
double PsiCt1;            // Potential at ohmic contact 1
double PsiCt2;            // Potential at ohmic contact 2
double PCt1;              // Hole density at ohmic contact 1
double PCt2;              // Hole density at ohmic contact 2
double NCt1;              // Electron density at ohmic contact 1
double NCt2;              // Electron density at ohmic contact 2
double zzz;               // Utility variable
//***** Scale & de-scale *****/
double PhiP[250];         // Scaled Quasi-Fermi potential of hole
double PhiN[250];         // Scaled Quasi-Fermi potential of Electron
double Jpm[250];          // Scaled hole current at middle of the interval
double Jnm[250];          // Scaled electron current at middle of the interval
double Pm[250];           // Scaled hole concentration at middle of the interval

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

double Nm[250];           // Scaled electron concentration at middle of the interval
double DDp;              // Scaled diffusion coefficient of hole for current density
eval.
double DDn;              // Scaled diffusion coefficient of electron for current
density eval.
double EField[250];     // Scaled mid-point electric field
double Jn_drift[250];
double Jp_drift[250];
double Jn_diff[250];
double Jp_diff[250];
double gradPsi;
double gradPhiN;
double gradPhiP;
double gradN;
double gradP;
double DGR[250];        // De-scale generation/recombination rate
double Jgr[250];        // De-scale total generation/recombination current
double dltJgr[250];
double JG[250];
double dltJG[250];
double GA[250];
double dltGA[250];
double GAt;
double dltGAt;
double GB[250];
double dltGB[250];
double GBt;
double dltGBt;
double Jt[250];
double JGt;
double dltJGt;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

double dltX[250];
double Gr[250];
double Gen[250];
double Jgrt;
double Jtotal;
double dltJgrt;
double dltx;
double JTotal[250];
double JT[250];
double JNsun[250];
double JPsun[250];
double JTsun [250];
double Nsun[250];
double Psun[250];
//***** Newton, SOR, Belnoulli variables*****//
const double omega0=1.0f; //initial
double Nomega[120]; //SOR relaxation parameter
int i,k,j;
int Nkk[250];
long EvolveN;
long MaxEvolveN;
double F1sor;
double F2sor;
double F3sor;
double RnF1kbyRnPsi;
double RnF2kbyRnN;
double RnF3kbyRnP;
double omega; //SORrelaxation parameter
int mm=0; //omega-change parameter
double B1,B2,B3,B4; // Value of Bernoulli function
double x,x1B,x2B,x3B,x4B; // Potential difference between neighbor meshes

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

double F1,F2,F3;           // Function
double RnF1byRnPsi;       // Derivative of F1/Psi
double RnF1byRnN;         // Derivative of F1/N
double RnF1byRnP;         // Derivative of F1/P
double RnF2byRnPsi;       // Derivative of F2/Psi
double RnF2byRnN;         // Derivative of F2/N
double RnF2byRnP;         // Derivative of F2/P
double RnF3byRnPsi;       // Derivative of F3/Psi
double RnF3byRnN;         // Derivative of F3/N
double RnF3byRnP;         // Derivative of F3/P
const double x1 = -1E+308; // X will be < this value!!
const double x2 = -1E-11;
const double x3 = 1E-11;
const double x4 = 700.00;
const double x5 = -1E-5;
const double x6 = 1E-5;
const double one = 1.00;
//***** Target parameter *****/
double Psi[120];           // Scaled potential
double P[120];             // Scaled hole concentration
double N[120];             // Scaled electron concentration
double dltPsi[120];        // Scaled potential between neighbor mesh
double dltP[120];          // Scaled hole between neighbor mesh
double dltN[120];          // Scaled electron between neighbor mesh
double R[120];             // Scaled generation/recombination rate
double Nill[250];
double Pill[250];
double JNill[120];
double JPill[120];
double Jtotal[250];
double Jdrw[120];

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

double ALpha[250];
double ph[250];
double Lp[250];
double Ln[250];    //de-scaled
double dltJNill[120];
double dltJPill[120];
double dltJdrw[120];
double lo[120];
double Vc[120];
double FF[120];
double NV[120];
//***** Function prototype *****/
void ScalingFactor();    // Function prototype of scaling or declare of function
void Doping_to_Mesh();    // Function prototype of doping
void Diffusivity_to_Mesh();    // Function prototype of diffusivity
void Lifetime_to_Mesh();    // Function prototype of lifetime or tau
void Spacing_Map();    // Function prototype of spacing in each mesh for p n
void Real_len();
void Boundary();    // Function prototype of boundary condition
void Initial();    // Function prototype of initial condition
void Control();    // Function prototype of control
void Inner_Mesh();    // Function prototype of inner mesh
void Simple_elim();    // Function prototype of simple_eliminate
void Imref_N_P();
void CurrentDens();    // Function prototype of Current density for both
regions
void GRCurrent();    // Function prototype of
Generation/Recombination current density
void ElectField();    // Function prototype of Electric field
void CurrentComponent();    // Function prototype of Current component
void Inner_meshSOR();

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void SORInner_mesh();
double Bern(double);          // Function prototype of Bernoulli function
double DerivB(double);       // Function prototype of derivative
void DeScaled();             // Function prototype of De-scaled output data
void Generationrate();       // Function prototype of Generation rate of eph at distance
void illumination();
void darksun();

////////////////////////////////////

// CAboutDlg dialog used for App About
class CAboutDlg : public CDialog
{
public:
    CAboutDlg();
// Dialog Data
//{{AFX_DATA(CAboutDlg)
enum { IDD = IDD_ABOUTBOX };
//}}AFX_DATA
// ClassWizard generated virtual function overrides
//{{AFX_VIRTUAL(CAboutDlg)
protected:
    virtual void DoDataExchange(CDataExchange* pDX); // DDX/DDV support
//}}AFX_VIRTUAL

// Implementation
protected:

//{{AFX_MSG(CAboutDlg)
//}}AFX_MSG
    DECLARE_MESSAGE_MAP()
};

CAboutDlg::CAboutDlg() : CDialog(CAboutDlg::IDD)
{
    //{{AFX_DATA_INIT(CAboutDlg)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    //}}AFX_DATA_INIT
}
void CAboutDlg::DoDataExchange(CDataExchange* pDX)
{
    CDialog::DoDataExchange(pDX);
    //{{AFX_DATA_MAP(CAboutDlg)
    //}}AFX_DATA_MAP
}
BEGIN_MESSAGE_MAP(CAboutDlg, CDialog)
    //{{AFX_MSG_MAP(CAboutDlg)
    // No message handlers
    //}}AFX_MSG_MAP
END_MESSAGE_MAP()
////////////////////////////////////
// CMy1DPNNplusSimulationDlg dialog
CMy1DPNNplusSimulationDlg::CMy1DPNNplusSimulationDlg(CWnd* pParent
/*=NULL*/)
: CDialog(CMy1DPNNplusSimulationDlg::IDD, pParent)
{
    //{{AFX_DATA_INIT(CMy1DPNNplusSimulationDlg)
    m_ENmax = 1000000;
    m_Excel = _T("Dark");
    m_Loop = 0;
    m_Vap = 0.0f;
    m_Timer = 0.0;
    m_Na = 1.0E+17;
    m_Nap = 1.0E+18;
    m_Nd = 5.0E+17;
    m_Reflection = 0.0;
    m_Excelsun = _T("illumination");
    m_Alpha = 0.0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

m_PF = 0.0;
//}}AFX_DATA_INIT

// Note that LoadIcon does not require a subsequent DestroyIcon in Win32
m_hIcon = AfxGetApp()->LoadIcon(IDR_MAINFRAME);
}

void CMy1DPNNplusSimulationDlg::DoDataExchange(CDataExchange* pDX)
{
    CDialog::DoDataExchange(pDX);
    //{{AFX_DATA_MAP(CMy1DPNNplusSimulationDlg)
    DDX_Control(pDX, IDC_LIST13, m_List);
    DDX_Control(pDX, IDC_PROGRESS, m_Progress);
    DDX_Text(pDX, IDC_EN, m_ENmax);
    DDX_Text(pDX, IDC_Excel, m_Excel);
    DDX_Text(pDX, IDC_Loop, m_Loop);
    DDX_Text(pDX, IDC_Vap, m_Vap);
    DDX_Text(pDX, IDC_Timer, m_Timer);
    DDX_Text(pDX, IDC_Na, m_Na);
    DDX_Text(pDX, IDC_Nap, m_Nap);
    DDX_Text(pDX, IDC_Nd, m_Nd);
    DDX_Text(pDX, IDC_Reflection, m_Reflection);
    DDX_Text(pDX, IDC_SOLAR, m_Excelsun);
    DDX_Text(pDX, IDC_Alpha, m_Alpha);
    DDX_Text(pDX, IDC_PF, m_PF);
    //}}AFX_DATA_MAP
}

BEGIN_MESSAGE_MAP(CMy1DPNNplusSimulationDlg, CDialog)
    //{{AFX_MSG_MAP(CMy1DPNNplusSimulationDlg)
    ON_WM_SYSCOMMAND()
    ON_WM_PAINT()
    ON_WM_QUERYDRAGICON()

    //}}AFX_MSG_MAP

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

END_MESSAGE_MAP()

////////////////////////////////////

// CMy1DPNNplusSimulationDlg message handlers
BOOL CMy1DPNNplusSimulationDlg::OnInitDialog()
{
    CDialog::OnInitDialog();

    // Add "About..." menu item to system menu.

    // IDM_ABOUTBOX must be in the system command range.
    ASSERT((IDM_ABOUTBOX & 0xFFFF) == IDM_ABOUTBOX);
    ASSERT(IDM_ABOUTBOX < 0xF000);
    CMenu* pSysMenu = GetSystemMenu(FALSE);
    if (pSysMenu != NULL)
    {
        CString strAboutMenu;
        strAboutMenu.LoadString(IDS_ABOUTBOX);
        if (!strAboutMenu.IsEmpty())
        {
            pSysMenu->AppendMenu(MF_SEPARATOR);
            pSysMenu->AppendMenu(MF_STRING, IDM_ABOUTBOX,
strAboutMenu);
        }
    }

    // Set the icon for this dialog. The framework does this automatically
    // when the application's main window is not a dialog
    SetIcon(m_hIcon, TRUE);           // Set big icon
    SetIcon(m_hIcon, FALSE);        // Set small icon

    // TODO: Add extra initialization here

    return TRUE; // return TRUE unless you set the focus to a control
}

void CMy1DPNNplusSimulationDlg::OnSysCommand(UINT nID, LPARAM lParam)
{

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if ((nID & 0xFFF0) == IDM_ABOUTBOX)
{
    CAboutDlg dlgAbout;
    dlgAbout.DoModal();
}
else
{
    CDialog::OnSysCommand(nID, lParam);
}
}

// If you add a minimize button to your dialog, you will need the code below
// to draw the icon. For MFC applications using the document/view model,
// this is automatically done for you by the framework.
void CMy1DPNNplusSimulationDlg::OnPaint()
{
    if (IsIconic())
    {
        CPaintDC dc(this); // device context for painting
        SendMessage(WM_ICONERASEBKGND, (WPARAM) dc.GetSafeHdc(),
0);

        // Center icon in client rectangle
        int cxIcon = GetSystemMetrics(SM_CXICON);
        int cyIcon = GetSystemMetrics(SM_CYICON);
        CRect rect;
        GetClientRect(&rect);
        int x = (rect.Width() - cxIcon + 1) / 2;
        int y = (rect.Height() - cyIcon + 1) / 2;

        // Draw the icon
        dc.DrawIcon(x, y, m_hIcon);
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    {
        CDialog::OnPaint();
    }
}

// The system calls this to obtain the cursor to display while the user drags
// the minimized window.
HCURSOR CMY1DPNNplusSimulationDlg::OnQueryDragIcon()
{
    return (HCURSOR) m_hIcon;
}

void CMY1DPNNplusSimulationDlg::OnOK()
{
    // ----- Start program calculation at here -----//
    UpdateData(TRUE);
    time_t start, finish;          // Declare for diff time function
    double elapsed_time;
    time( &start );                // Start time
    int MaxRange, stp;
    int div = 100;
    Vap = m_Vap;
    Nd = m_Nd;
    Na = m_Na;
    Nap = m_Nap;
    Alpha = m_Alpha;
    PF = m_PF;
    Reflection = m_Reflection;
    MaxEvolveN = m_ENmax;
    MaxRange = MaxEvolveN/div;
    m_Progress.SetRange(0,MaxRange);
    stp=MaxRange/100;

    m_Progress.SetStep(stp);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

m_Progress.SetPos(0);
ScalingFactor();          // calculate scaling factors
Doping_to_Mesh();        // scaling dopingLevel
Diffusivity_to_Mesh();  // scaling diffusion coefficient
Lifetime_to_Mesh();     // scaling lifetime
Spacing_Map();           // scaling spaceMap Call function
Real_len();              // cm descaled location
Boundary();              //scaled value of BoundaryConditions
Initial();                // scaled value of InitialConditions
for(EvolveN=1;EvolveN<= m_ENmax;EvolveN++) // Set repeating number at
here!
{
    if(EvolveN%(stp*div) == 0)
        m_Progress.SteplIt();
Control();                // scaled function
    m_Loop = EvolveN;     // show maximum En in dialog
    UpdateData(FALSE);
}
Imref_N_P(); //scaled values
for(i=0;i<= NM-1;i++)
{
Nm[i] = N[i]/( 1 + exp((Psi[i]-Psi[i+1])/2/Ut) )
        + N[i+1]/( 1 + exp((Psi[i+1]-Psi[i])/2/Ut) ); //scaled
Pm[i] = P[i]/( 1 + exp((Psi[i+1]-Psi[i])/2/Ut) )
        + P[i+1]/( 1 + exp((Psi[i]-Psi[i+1])/2/Ut) ); //scaled
CurrentDens();           // scaled function
CurrentComponent();      // scaled function
ElectField();            // scaled function
}
time( &finish );        // Stop time
elapsed_time = difftime( finish, start );

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

m_Timer = (elapsed_time/60) ;          ///// Show run-time in dialog
    UpdateData(FALSE);
    illumination();
    Generationrate();                  // descaled function
    GRCurrent();                       // descaled function
    darksun();
    DeScaled();                        // Call function De-scaled data
    ShowResult();
    PutToExcel_OutputDark();           // descaled Save data to Excel file
    PutToExcel_Outputillumination();
    MessageBox("Program complete!! You can see result in EXCEL
sheet",NULL,MB_OK|MB_ICONINFORMATION);
//CDialog::OnOK();
}
//----- PutToExcel function excute -----//

void CMY1DPNNplusSimulationDlg::PutToExcel_OutputDark()
{
    UpdateData(TRUE);
    CDatabase database;
    CString sDriver = "MICROSOFT EXCEL DRIVER (*.XLS)"; // exactly the same name as
in the ODBC-Manager
    CString sSql;
    CString sExcelFile = "c:\\"+ m_Excel;                // Filename and path for the file to
be created
    float intval;
    int indx;
    TRY
    {
        // Build the creation string for access without DSN

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

sSql.Format("DRIVER={%s};DSN=";FIRSTROWHASNAMES=1;READONLY=FALSE;CRE
ATE_DB=\"%s\";DBQ=%s", sDriver,sExcelFile,sExcelFile);

// Create the database (i.e. Excel sheet)
if( database.OpenEx(sSql,CDatabase::noOdbcDialog) )
{
// Create table structure
sSql = "CREATE TABLE PsiNP (Mesh NUMBER,Length NUMBER,Psi NUMBER,dltPsi
NUMBER,N NUMBER,dltN NUMBER,P NUMBER,dltP NUMBER,R NUMBER,k NUMBER,
omega NUMBER,Gr NUMBER,Gen NUMBER)";
database.ExecuteSQL(sSql);
// Insert data
for(indx=0;indx<=NM;indx++)
{
sSql.Format("INSERT INTO PsiNP
(Mesh,Length,Psi,dltPsi,N,dltN,P,dltP,R,k,omega,Gr,Gen) VALUES
(%d,%1f,%30f,%50f,%30e,%50f,%30e,%50f,%30f,%d,%30f,%50f,%50f)",indx,len
[indx],Psi[indx],dltPsi[indx],N[indx],dltN[indx],P[indx],dltP[indx],DGR[indx],Nkk
[indx],Nomega[indx],Gr[indx],Gen[indx]);
database.ExecuteSQL(sSql);
}
// Create table structure
sSql = "CREATE TABLE Current (Mesh NUMBER,Length NUMBER,Jn NUMBER,Jp
NUMBER,Jtotal NUMBER,Jn_drift NUMBER,Jp_drift NUMBER,Jn_diff NUMBER,Jp_diff
NUMBER,Jn_total NUMBER,Jp_total NUMBER,Jtotal2 NUMBER,dltJgr NUMBER,Jgr
NUMBER,k NUMBER)";
database.ExecuteSQL(sSql);
// Insert data
for(indx=0;indx<=NM-1;indx++)
{
intval = indx+0.5f;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

sSql.Format("INSERT INTO Current
(Mesh,Length,Jn,Jp,Jtotal,Jn_drift,Jp_drift,Jn_diff,Jp_diff,Jn_total,Jp_total,Jtotal2,dltJgr,J
gr,k) VALUES
(%lf,%lf,%.30f,%.30f,%.30f,%.30f,%.30f,%.30f,%.30f,%.30f,%.30f,%.30f,%.50f,%.50f,%d)
",intval,len[indx],Jnm[indx],Jpm[indx],(Jnm[indx]+Jpm[indx]),Jn_drift[indx],Jp_drift
[indx],Jn_diff[indx],Jp_diff[indx],(Jn_drift[indx]+Jn_diff[indx]),(Jp_drift[indx]+Jp_diff
[indx]),(Jn_drift[indx]+Jn_diff[indx]+Jp_drift[indx]+Jp_diff[indx]),dltJgr[indx],Jgr
[indx],Nkk[indx]);
database.ExecuteSQL(sSql);
}

// Create table structure
sSql = "CREATE TABLE Parameter (Vap NUMBER,Nd NUMBER,Na NUMBER,Nap
NUMBER,Jgrt NUMBER,TauNp NUMBER,TauPn NUMBER,TauNpp NUMBER,Dnn
NUMBER,Dnpp NUMBER,Dnp NUMBER,Dpp NUMBER,Dpn NUMBER,Dppp
NUMBER,JM1 NUMBER,JM2 NUMBER,NM NUMBER,Length NUMBER,RealEn
NUMBER,RunTime NUMBER)";
database.ExecuteSQL(sSql);
// Insert data
sSql.Format("INSERT INTO Parameter
(Vap,Nd,Na,Nap,Jgrt,TauNp,TauPn,TauNpp,Dnn,Dnpp,Dnp,Dpp,Dpn,Dppp,JM1,JM2,N
M,Length,RealEn,RunTime) VALUES
(%.10f,%.30e,%.30e,%.30e,%.50f,%.30f,%.30f,%.30f,%.30f,%.30f,%.30f,%.30f,%.
30f,%d,%d,%d,%.10f,%d,%.10f)",Vap,Nd,Na,Nap,Jgrt,TauNp,TauPn,TauNpp,Dnn,Dnpp
,Dnp,Dpp,Dpn,Dppp,JM1,JM2,NM,(Length*10000),m_Loop,m_Timer);
database.ExecuteSQL(sSql);
}

// Close database
database.Close();
}
CATCH_ALL(e)
{

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

TRACE1("Driver not installed: %s",sDriver);
}
END_CATCH_ALL;
}
//----- Function scaling excute -----//
void ScalingFactor()
{
    Psi0 = (Bk*T)/q;
    D0 = Dnn;
    C0 = Nd;
    x0 = Length;
    GR0 = (D0*C0)/(x0*x0);
    Tau0 = (x0*x0)/D0;
    epsrnSi = epsrn0*Dc;
    sqrRMDA = (Psi0*epsrnSi) / (x0*x0*q*C0);
    J0 = -(q*D0*C0)/x0;
    NI0 = NI/C0;
    Gen0= MaxGen;
    return;
}
//----- Function doping excute -----//
void Doping_to_Mesh()
{
    //***** In n+-region *****/
    for(i=0;i<=JM1;i++)
        C[i] = Nd/C0;

    //***** In p-region *****/
    for(i=JM1+1;i<=JM2;i++)
        C[i] = -Na/C0;

    //***** In p+ -region *****/

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for(i=JM2+1;i<=NM;i++)
    C[i] = -Nap/C0;
return;
}
//----- Function diffusivity execute -----//
void Diffusivity_to_Mesh()
{
//***** In n+-region *****/
for(i=0;i<=JM1-1;i++)
{
    Dn[2*i+1] = Dnn/D0;
    Dn[2*i-1] = Dnn/D0;
    Dp[2*i+1] = Dpn/D0;
    Dp[2*i-1] = Dpn/D0;
}
//***** In p-region *****/
for(i=JM1;i<=JM2-1;i++)
{
    Dn[2*i+1] = Dnp/D0;
    Dn[2*i-1] = Dnp/D0;
    Dp[2*i+1] = Dpp/D0;
    Dp[2*i-1] = Dpp/D0;
}
//***** In p+ -region *****/
for(i=JM2;i<=NM-1;i++)
{
    Dn[2*i+1] = Dnpp/D0;
    Dn[2*i-1] = Dnpp/D0;
    Dp[2*i+1] = Dppp/D0;
    Dp[2*i-1] = Dppp/D0;
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

return;
}
//----- Function lifetime execute -----//
void Lifetime_to_Mesh()
{
    /**** In n+-region ****//
    for(i=1;i<=JM1;i++)
        Tau[i] = TauPn / Tau0;
    /**** In p-region ****//
    for(i=JM1+1;i<=JM2;i++)
        Tau[i] = TauNp/Tau0;
    /**** In p+ -region ****//
    for(i=JM2+1;i<=NM-1;i++)
        Tau[i] = TauNpp/Tau0;
    return;
}
//----- Function spacing execute -----//
void Spacing_Map()
{
    /**** Set value of spacing in mesh in n+-region ****//
    for(i=0;i<=4;i++)
        h[i] = spc1/x0;
    for(i=5;i<=7;i++)
        h[i] = spc2/x0;
    for(i=8;i<=8;i++)
        h[i] = spc3/x0;
    for(i=9;i<=11;i++)
        h[i] = spc2/x0;
    for(i=12;i<=16;i++)
        h[i] = spc1/x0;
    /**** Set value of spacing in mesh in p -region ****//

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for(i=17;i<=26;i++)
    h[i] = spc1/x0;
for(i=27;i<=31;i++)
    h[i] = spc2/x0;
for(i=32;i<=35;i++)
    h[i] = spc3/x0;
for(i=36;i<=38;i++)
    h[i] = spc4/x0;
for(i=39;i<=41;i++)
    h[i] = spc5/x0;
for(i=42;i<=44;i++)
    h[i] = spc6/x0;
for(i=45;i<=46;i++)
    h[i] = spc7/x0;
for(j=47;j<=47;j++)
    h[i] = spc8/x0;
for(i=48;i<=49;i++)
    h[i] = spc7/x0;
for(i=50;i<=51;i++)
    h[i] = spc6/x0;
for(i=52;i<=53;i++)
    h[i] = spc5/x0;
for(i=54;i<=55;i++)
    h[i] = spc4/x0;
for(i=56;i<=59;i++)
    h[i] = spc3/x0;
for(i=60;i<=63;i++)
    h[i] = spc1/x0;

//***** Set value of spacing in mesh in p+-region *****/
for(i=64;i<=68;i++)
    h[i] = spc1/x0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for(i=69;i<=74;i++)
    h[i] = spc2/x0;
for(i=75;i<=77;i++)
    h[i] = spc3/x0;
for(i=78;i<=79;i++)
    h[i] = spc4/x0;
for(i=80;i<=83;i++)
    h[i] = spc3/x0;
for(i=84;i<=89;i++)
    h[i] = spc2/x0;
for(i=90;i<=96;i++)
    h[i] = spc1/x0;
return;
}
//-----Function real length execute -----//
void Real_len()
{
    double xx0;
    len[0] = 0;
    W[0] = 0;
    xx0 = x0 * 10000;
    for(i=1;i<=NM;i++)
    {
        len[i] = len[i-1] + ( h[i-1] * xx0 );
    }
    for(i=16;i<=25;i++)
    {
        W[i] = W[i-1] + ( h[i-1] * xx0 );
    }
    return;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
//----- Function boundary execute -----//
void Boundary()
{
    /**** Carrier concentration at ohmic contact 1 **** //
    NOhm = ( sqrt((C[0]*C[0])+(4*NIO*NIO))+C[0] ) / 2; //scaled
    POhm = (NIO*NIO)/NOhm; //scaled
    N[0] = NOhm; //scaled
    P[0] = POhm; //scaled

    /**** Built-in potential at ohmic contact 1 **** //
    zzz = C[0]*C0/(2*NI);
    PsiBohm = (Bk*T/q)*(log(zzz+sqrt((zzz*zzz)+1)))/Psi0;//scaled
    /**** Potential at ohmic contact 1 **** //
    PsiOhm = PsiBohm; //scaled
    Psi[0] = PsiOhm-(Vap/Psi0); //scaled
    /**** Carrier concentration at ohmic contact 2 **** //
    POhm = ( sqrt((C[NM]*C[NM])+(4*NIO*NIO))-C[NM] ) / 2;//scaled
    NOhm = (NIO*NIO)/POhm; //scaled
    ;
    P[NM] = POhm; //scaled
    N[NM] = NOhm; //scaled
    /**** Built-in potential at ohmic contact 2 **** //
    zzz = -C[NM]*C0/(2*NI);
    PsiBohm = -(Bk*T/q)*(log(zzz+sqrt((zzz*zzz)+1)))/Psi0;//scaled
    /**** Potential at ohmic contact 2 **** //
    Psi[NM] = PsiBohm;//scaled

    return;
}

//----- Function initial condition execute -----//
void Initial()
{
    for(i=1;i<=JM1;i++)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{
    Psi[i]=0;
    N[i] = Nd/C0;
    P[i] = (NIO*NIO)/N[i];
}
for(i=JM1+1;i<=JM2;i++)
{
    Psi[i]=0;
    P[i] = Na/C0;
    N[i] = (NIO*NIO)/P[i];
}
for(i=JM2+1;i<=NM-1;i++)
{
    Psi[i]=0;
    P[i] = Nap/C0;
    N[i] = (NIO*NIO)/P[i];
}
return;
}
//----- Function control execute -----//
void Control() //scaled function
{
    for(i=1;i<=NM-1;i++)
        Inner_Mesh();           // Call Inner mesh function
    for(i=NM-1;i>=1;i--)
        Inner_Mesh();           // Call Inner mesh function
    return;
}
//----- Function inner mesh execute -----//
void Inner_Mesh() //scaled

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

double kk_Psi;

double GR;          // scaled G/R rate

double RnB1byRnx1B,RnB2byRnx2B; // derivative of Bernoulli function

double RnB3byRnx3B,RnB4byRnx4B;

double RnRbyRnN,RnRbyRnP;      // derivative of G/R rate

//Go to F1 Newton task

kk_Psi=1;

LOOP: //label'LOOP'          // number step of Newton method

F1 = sqrRMDA * ( 1./h[i]*(Psi[i+1]-Psi[i]) - 1./h[i-1]*(Psi[i]-Psi[i-1]))
      * ( 2/(h[i-1]+h[i]) ) - N[i] + P[i] + C[i];

RnF1byRnPsi = -sqrRMDA * ( 1./h[i] + 1./h[i-1] ) * ( 2/(h[i]+h[i-1]) );

dltPsi[i]=-F1/RnF1byRnPsi;

//****DECISION****

if(fabs(dltPsi[i])<Correct)
{
  //****STORE****
  Psi[i]=Psi[i]+dltPsi[i];
  goto EXIT_F1;
}
else
{
  //****LOOP****
  Psi[i]=Psi[i]+dltPsi[i];
  kk_Psi=kk_Psi+1;
  goto LOOP;
}

EXIT_F1:

//go to Newton task

F1 = sqrRMDA * ( 1./h[i]*(Psi[i+1]-Psi[i]) - 1./h[i-1]*(Psi[i]-Psi[i-1]))
      * ( 2/(h[i-1]+h[i]) ) - N[i] + P[i] + C[i];

GR = ( N[i]*P[i]-(NIO*NIO) ) / Tau[i] / ( N[i] + P[i] + 2*NIO );

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

R[i]=GR;
x1B=(Psi[i+1]-Psi[i])/Ut;
x2B=(Psi[i]-Psi[i+1])/Ut;
x3B=(Psi[i]-Psi[i-1])/Ut;
x4B=(Psi[i-1]-Psi[i])/Ut;

```

```

B1=Bern(x1B);           // Call Bernoulli function
B2=Bern(x2B);           // Call Bernoulli function
B3=Bern(x3B);           // Call Bernoulli function
B4=Bern(x4B);           // Call Bernoulli function
F2 = ( N[i-1]*Dn[2*i-1]*B4/h[i-1] ) - ( N[i]*Dn[2*i-1]*B3/h[i-1] )
      - ( N[i]*Dn[2*i+1]*B2/h[i] ) + ( N[i+1]*Dn[2*i+1]*B1/h[i] )
      - ( R[i]*(h[i-1]+h[i])/2 );
F3 = ( P[i-1]*Dp[2*i-1]*B3/h[i-1] ) - ( P[i]*Dp[2*i-1]*B4/h[i-1] )
      - ( P[i]*Dp[2*i+1]*B1/h[i] ) + ( P[i+1]*Dp[2*i+1]*B2/h[i] )
      - ( R[i]*(h[i-1]+h[i])/2 );
RnF1byRnPsi = -sqrMDA * ( 1./h[i] + 1./h[i-1] ) * ( 2/(h[i]+h[i-1]) );
RnF1byRnN = -1;
RnF1byRnP = 1;
RnB1byRnx1B = DerivB(x1B); // Call derivative of Bernoulli function
RnB2byRnx2B = DerivB(x2B); // Call derivative of Bernoulli function
RnB3byRnx3B = DerivB(x3B); // Call derivative of Bernoulli function
RnB4byRnx4B = DerivB(x4B); // Call derivative of Bernoulli function
RnRbyRnN = ( (P[i]+NI0)*(P[i]+NI0) )
/ Tau[i] / ( (N[i]+P[i]+2*NI0) * (N[i]+P[i]+2*NI0) );
RnRbyRnP = ( (N[i]+NI0)*(N[i]+NI0) )
/ Tau[i] / ( (N[i]+P[i]+2*NI0) * (N[i]+P[i]+2*NI0) );
RnF2byRnPsi = -( N[i-1]*Dn[2*i-1]*RnB4byRnx4B/Ut/h[i-1] )
- ( N[i]*Dn[2*i-1]*RnB3byRnx3B/Ut/h[i-1] )
- ( N[i]*Dn[2*i+1]*RnB2byRnx2B/Ut/h[i] )
- ( N[i+1]*Dn[2*i+1]*RnB1byRnx1B/Ut/h[i] );
RnF2byRnN = -( Dn[2*i-1]*B3/h[i-1] ) - ( Dn[2*i+1]*B2/h[i] )

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

-( RnRbyRnN*((h[i-1]+h[i])/2) );
RnF2byRnP = -( RnRbyRnP*((h[i-1]+h[i])/2) );
RnF3byRnPsi = ( P[i-1]*Dp[2*i-1]*RnB3byRnx3B/Ut/h[i-1] )
+ ( P[i]*Dp[2*i-1]*RnB4byRnx4B/Ut/h[i-1] )
+ ( P[i]*Dp[2*i+1]*RnB1byRnx1B/Ut/h[i] )
+ ( P[i+1]*Dp[2*i+1]*RnB2byRnx2B/Ut/h[i] );
RnF3byRnN = -( RnRbyRnN*((h[i-1]+h[i])/2) );
RnF3byRnP = -( Dp[2*i-1]*B4/h[i-1] ) - ( Dp[2*i+1]*B1/h[i] )
-( RnRbyRnP*((h[i-1]+h[i])/2) );

/*****go to elimination method****
Simple_elim();
/******
//DECISION
if(fabs(dltPsi[i])<Correct
&& fabs(dltN[i])<Correct
&& fabs(dltP[i])<Correct)
{
//STORE
Psi[i]=Psi[i]+dltPsi[i];
N[i]=N[i]+dltN[i];
P[i]=P[i]+dltP[i];
Nomega[i]=0;
//
goto EXIT;
}
else
{
Inner_meshSOR();
goto EXIT;
}
//

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

EXIT:
    return;
}
void Inner_meshSOR() //scaled function
{
    /***ININITIAL SET***/
    RnF1kbyRnPsi = RnF1byRnPsi;
    RnF2kbyRnN = RnF2byRnN;
    RnF3kbyRnP = RnF3byRnP;
    Psik=Psi[i];
    Nk=N[i];
    Pk=P[i];
    DPsikm=dltPsi[i];
    DNkm=dltN[i];
    DPkm=dltP[i];
    mm=0; //omega-change parameter
    /***
LOOP3: //label
    omega=omega0*exp(-1.151292546*mm);
    //omega=omega0*exp(-0.460517018*mm); //omega0=1.0
    //omega=omega0*exp(-0.160943791*mm); //omega0=1.0
    /***CALCULATE***/
    SORInner_mesh();
    /***
    //DECISION
    if(fabs(DPsikm1)<Correct*1e-2
        &&fabs(DNkm1)<Correct*1e-2
        &&fabs(DPkm1)<Correct*1e-2)
    {
        //STORE

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Psi[i]=Psik+DPsikm1;
N[i]=Nk+DNkm1;
P[i]=Pk+DPkm1;
Nomega[i]=omega;
dltPsi[i]=DPsikm1;
dltN[i]=DNkm1;
dltP[i]=DPkm1;
//
goto EXIT; //exit for excute Newton task
}
else
{
DPsikm=DPsikm1;
DNkm=DNkm1;
DPkm=DPkm1;
mm=mm+1;
goto LOOP3;
}
EXIT: //
return;
}
void SORInner_mesh() //scaled function
{
double Rsor;//R/G rate for this function only
double x1B,x2B,x3B,x4B; //interim values

F1sor=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*F1sor/RnF1kbyRnPsi;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

x1B=(Psi[i+1]-(Psik+DPsikm1))/Ut;
x2B=((Psik+DPsikm1)-Psi[i+1])/Ut;
x3B=((Psik+DPsikm1)-Psi[i-1])/Ut;
x4B=(Psi[i-1]-(Psik+DPsikm1))/Ut;

B1=Bern(x1B);           // Call Bernoulli function
B2=Bern(x2B);           // Call Bernoulli function
B3=Bern(x3B);           // Call Bernoulli function
B4=Bern(x4B);           // Call Bernoulli function

Rsor=(Nk*(Pk+DPkm)-(NI0*NI0))/Tau[i]/(Nk+(Pk+DPkm)+(2*NI0));
F2sor=(N[i-1]*Dn[2*i-1]*B4/h[i-1] )-
        (Nk*Dn[2*i-1]*B3/h[i-1])-
        (Nk*Dn[2*i+1]*B2/h[i])+
        (N[i+1]*Dn[2*i+1]*B1/h[i])-
        Rsor*(h[i-1]+h[i])/2;
DNkm1=-omega*F2sor/RnF2kbyRnN;
//*****
Rsor=((Nk+DNkm1)*Pk-(NI0*NI0))/Tau[i]/((Nk+DNkm1)+Pk+(2*NI0));
F3sor=(P[i-1]*Dp[2*i-1]*B3/h[i-1])-
        (Pk*Dp[2*i-1]*B4/h[i-1])-
        (Pk*Dp[2*i+1]*B1/h[i] )+
        (P[i+1]*Dp[2*i+1]*B2/h[i])-
        (Rsor*(h[i-1]+h[i])/2);
DPkm1=-omega*F3sor/RnF3kbyRnP;
//*****8*****
return;
}

//----- Function simple_elim execute -----//
void Simple_elim()    //scaled function
{
    double A[3][3];
    double B[3];

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

double x[3];
double cc,dd,ee,ff,gg,hh;
A[0][0] = RnF1byRnPsi;
A[0][1] = RnF1byRnN;
A[0][2] = RnF1byRnP;
A[1][0] = RnF2byRnPsi;
A[1][1] = RnF2byRnN;
A[1][2] = RnF2byRnP;
A[2][0] = RnF3byRnPsi;
A[2][1] = RnF3byRnN;
A[2][2] = RnF3byRnP;
B[0] = -F1;
B[1] = -F2;
B[2] = -F3;
//***** Gaussian method *****//
cc = (A[1][0]*A[0][1]) - (A[0][0]*A[1][1]);
dd = (A[1][0]*A[0][2]) - (A[0][0]*A[1][2]);
ee = (A[1][0]*B[0]) - (A[0][0]*B[1]);
ff = (A[2][0]*A[1][1]) - (A[1][0]*A[2][1]);
gg = (A[2][0]*A[1][2]) - (A[1][0]*A[2][2]);
hh = (A[2][0]*B[1]) - (A[1][0]*B[2]);
x[2] = (ee*ff - cc*hh) / (ff*dd - cc*gg);
x[1] = (cc*hh - cc*gg*x[2]) / (cc*ff);
x[0] = ( B[2] - (A[2][1]*x[1]+A[2][2]*x[2]) ) / A[2][0];
dltPsi[i] = x[0];
dltN[i] = x[1];
dltP[i] = x[2];
return;
}
//----- Function Bernoulli execute -----//

```

```
double Bern(double x) //scaled function
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{
    double result;
    if(x1<x && x<x2)
        result = x/(exp(x)-one);
    else if(x2<x && x<x3)
        result=(2*one)/((2*one)+x);
    else if(x3<x && x<=x4)
        result=x/(exp(x)-one);
    else
        result=x*(exp(-x));
    return result;
}
//----- Function derivative execute -----//
double DerivB(double x) //scaled function
{
    double ans;
    if(x<=x5)
        ans=(exp(x)-(x*exp(x))-1)/((exp(x)-1)*(exp(x)-1));
    else if(x>=x5 && x<=x6)
        ans=-(1+x)/(2+(2*x)+(x*x));
    else
        ans=(exp(-x)-(x*exp(-x))-(exp(-x)*exp(-x)))
            /(1-(2*exp(-x))+(exp(-x)*exp(-x)));
    return ans;
}
//----- Function Imref execute -----//
void Imref_N_P() //scaled values
{
    double zn,zp;
    for(i=0;i<=NM;i++)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

zn = (Bk*T/q)*(log(N[i]/NI0))/Psi0;
    PhiN[i] = Psi[i]-zn;           //scaled Imref potential for
electrons
zn = (Bk*T/q)*(log(P[i]/NI0))/Psi0;
    PhiP[i] = Psi[i]+zp;           //scaled Imref potential for holes
}
return;
}
//----- Function CurrentDens execute -----//
void CurrentDens()
{
    Jnm[i] = Dn[2*i+1]*Nm[i]*(PhiN[i+1]-PhiN[i])/h[i] ; //scaled electron current dens.
    Jpm[i] = Dp[2*i+1]*Pm[i]*(PhiP[i+1]-PhiP[i])/h[i] ; //scaled hole current dens.
    return;
}
//----- Function Electric field execute -----//
void ElectField()
{
    EField[i]=-(Psi[i+1]-Psi[i])/h[i]; // scaled mid-point electric field
    return;
}
//----- Function Current component execute -----//
void CurrentComponent() //scaled function
{
    gradPsi = (Psi[i+1]-Psi[i])/h[i]; // scaled potential gradient
    gradN = (N[i+1]-N[i])/h[i]; // scaled electron gradient
    gradP = (P[i+1]-P[i])/h[i]; // scaled hole gradient
    Jn_drift[i] = Dn[2*i+1]*Nm[i]*gradPsi; // scaled drift current component of
electron
    Jp_drift[i] = Dp[2*i+1]*Pm[i]*gradPsi; // scaled drift current component of hole
    gradPhiN = (PhiN[i+1]-PhiN[i])/h[i];

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    Jn_diff[i] = -Dn[2*i+1]*gradN;          /*Nm[i]*(gradPsi-gradPhiN);   scaled
diffusion current component of electron

    gradPhiP = (PhiP[i+1]-PhiP[i])/h[i];
    Jp_diff[i] = Dp[2*i+1]*gradP;          /*Pm[i]*(gradPhiP-gradPsi);   scaled
diffusion current component of hole

    return;
}
//----- Function GRCurrent execute -----//
void GRCurrent()      //descaled function
{
    dltX[0] = 0;
    dltJgr[0] = 0;
    Jgr[0] = 0;
    JG[0]=0;
    dltJG[0]=0;
    dltx = 0;
    dltJgrt = 0;
    Jgrt = 0;
    dltJGt=0;
    JGt=0;
    for(i=1;i<NM-1;i++)
    {
        dltX[i] = h[i]*x0;                      //(len[i+1]-len[i])*0.0001;
        dltJgr[i] = q*(1./2)*(R[i]+R[i+1])*GR0*dltX[i];
        Jgr[i] = Jgr[i-1] + dltJgr[i];        // De-scaled G/R current dens.
        dltx = h[i]*x0;                      //(len[i+1]-len[i])*0.0001;
        dltJgrt = q*(1./2)*(R[i]+R[i+1])*GR0*dltx;
        Jgrt = Jgrt + dltJgrt;                // De-scaled G/R current dens.
        dltX[i] = h[i]*x0;                      //(len[i+1]-len[i])*0.0001;
        dltJG[i] = q*(1./2)*(Gen[i]+Gen[i+1])*dltX[i];
        JG[i] = JG[i-1] + dltJG[i];

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

dltx = h[i]*x0; //((len[i+1]-len[i])*0.0001;
dltJGt = q*(1./2)*(Gen[i]+Gen[i+1])*dltx;
JGt = JGt + dltJGt; // De-scaled G/R current dens.
}
return;
}
//-----Function Generation rate -----//
void Generationrate() //descaled function
{
double dltGr;
Gr[0]=0;
dltGr=0;
for(i=1;i<NM-1;i++)
{
dltGr= (Alpha*PF*(1-Reflection)*exp(-Alpha*len[i]));
Gr[i] = dltGr;
}
////////// Generation rate//////////
{
double dltGen;
Gen[0]=0;
for(i=1;i<=NM-1;i++)
{
dltGen=0;
for(j=1;j<=77-1;j++)
{
dltGen= dltGen + ((alpha[j]*(exp(-alpha[j]*len[i]))*photonflux[j])+(alpha[j+1]*
(exp(-alpha[j+1]*len[i]))*photonflux[j+1]));
}
Gen[i]= dltGen;
}
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

return;}

}
//-----Function illumination -----//
void illumination()
{
    double N;
    double M;
    double K;
    double Z;
    double dltALpha,dltph;
    ALpha[0]=0;
    ph[0]=0;
    JPill[0]=0;
    JNiil[0]=0;
    Jdrw[0]=0;
    dltJPill[0]=0;
    dltJNiil[0]=0;
    dltJdrw[0]=0;
    dltX[0] = 0;
    for(i=1;i<=NM-1;i++)
    {
        for(j=1;j<=NM-1;j++)
        {
            dltph=0;
            dltALpha=0;
            {
                dltph = photonflux[j];
                dltALpha=alpha[j];
            }
            ph[i] =dltph+ph[i];
            ALpha[i]=dltALpha+ALpha[i];

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}

dltX[i] = h[i]*x0;
HL[i]=len[i]-(Xj+W[i])*dltX[i];
Lp[i]=sqrt(Dp[2*i+1]*D0*Tau[i]);
Ln[i]=sqrt(Dn[2*i+1]*D0*Tau[i]);
N= (-q*ALpha[i]*ph[i]*(1-RT)*Lp[i])/(ALpha[i]*ALpha[i]*Lp[i]*Lp[i]-1);
M= (q*ALpha[i]*ph[i]*(1-RT)*Ln[i])/(ALpha[i]*ALpha[i]*Ln[i]*Ln[i]-1);
K= (Sp*Lp[i]/Dp[2*i+1]*D0)*(sinh(Xj/Lp[i])+cosh(Xj/Lp[i]));

Z= (Sn*Ln[i]/Dn[2*i+1]*D0)*sinh((len[i]-(Xj+W[i]))/Ln[i])+cosh((len[i]-(Xj+W[i]))/Ln
[i]);
dltJPill[i] =(N*(((Sp*Lp[i]/Dp[2*i+1]*D0)+ALpha[i]*Lp[i])-exp(-ALpha[i]*Xj)*(Sp*Lp[i]/Dp
[2*i+1]*D0)*cosh(Xj/Lp[i])+sinh(Xj/Lp[i]))/K-(ALpha[i]*Lp[i]*exp(-ALpha[i]*Xj))))*dltX[i];
JPill[i]= JPill[i-1]+dltJPill[i];
dltJNill[i]=((M*exp(-ALpha[i]*(Xj+W[i]))*((ALpha[i]*Ln[i])-(Sn*Ln[i]/Dn[2*i+1]*D0))*(cosh
(HL[i]/Ln[i])-exp(-ALpha[i]*HL[i])+sinh(HL[i]/Ln[i])+ALpha[i]*Ln[i]*exp(-ALpha[i]*HL
[i])/Z))))*dltX[i];
JNill[i] = JNill[i-1] + dltJNill[i];
dltJdrw[i]= (q*ph[i]*(1-RT)*exp(-ALpha[i]*Xj)*(1-exp(-ALpha[i]*W[i])))*dltX[i];
Jdrw[i] = Jdrw[i-1]+ dltJdrw[i];
JTotal[i]=JPill[i] +JNill[i] +Jdrw[i];
}
return;
}
//-----Function illumination -----//

void darksun()
{
dltX[0] = 0;
GA[0]=0;
dltGA[0]=0;
GB[0]=0;
dltGB[0]=0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for(i=0;i<= NM-1;i++)
{

    Nsun[2*i+1]= N[i]*C0+(Gen[i]*Tau[i]*Tau0);
    Psun[2*i+1]= P[i]*C0+(Gen[i]*Tau[i]*Tau0);
    dltX[i] = h[i]*x0; //((len[i+1]-len[i])*0.0001;
    dltGA[i] = q*Dn[2*i+1]*D0*(1./2)*(Nsun[i]+Nsun[i+1])*dltX[i];
    GA[i] = GA[i-1] + dltGA[i]; // De-scaled G/R current dens.
    dltx = h[i]*x0; //((len[i+1]-len[i])*0.0001;
    dltGAt = (Nsun[i]+Nsun[i+1])*dltx;
    GAt = GAt + dltGAt; // De-scaled
    dltGB[i] = q*Dp[2*i+1]*D0*(1./2)*(Psun[i]+Psun[i+1])*dltX[i];
    GB[i] = GB[i-1] + dltGB[i]; // De-scaled G/R current dens.
    dltx = h[i]*x0; //((len[i+1]-len[i])*0.0001;
    dltGBt = (Psun[i]+Psun[i+1])*dltx;
    GBt = GBt + dltGBt; // De-scaled

    Jt[i]=GA[i]+GB[i];
    Io[i] = (1.5e+05)*exp(-43.076);
    Vc[i] = ln((JTotal[i]/Io[i]) + 1);
    FF[i] = (Vc[i]-ln(Vc[i]+0.72))/(Vc[i]+1);
    NV[i] = 0.026*Vc[i]*(JTotal[i]*1E-03)*FF[i]*100;
}

return;

//----- Function De-scaled execute -----//
void DeScaled() //descaled function
{
    //////////////////////////////////// de-scale Psi P N ////////////////////////////////////
    for(i=0;i<=NM;i++)
    {
        Psi[i] = Psi[i]*Psi0;
        P[i] = P[i]*C0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

N[i] = N[i]*C0;
PhiP[i] = PhiP[i]*Psi0;
    PhiN[i] = PhiN[i]*Psi0;
Nsun[2*i+1]=Nsun[2*i+1];
Psun[2*i+1]=Psun[2*i+1];
}

```

```

////////// de-scale Current & GR rate //////////

```

```

for(i=0;i<=NM-1;i++)

```

```

{

```

```

    Jpm[i] = Jpm[i]*J0;

```

```

    Jnm[i] = Jnm[i]*J0;

```

```

    Jn_drift[i] = Jn_drift[i]*J0;

```

```

    Jp_drift[i] = Jp_drift[i]*J0;

```

```

    Jn_diff[i] = Jn_diff[i]*J0;

```

```

    Jp_diff[i] = Jp_diff[i]*J0;

```

```

    EField[i] = EField[i]*(Psi0/x0);

```

```

    DGR[i] = R[i]*GR0;

```

```

}

```

```

return;}

```

```

void CMy1DPNNplusSimulationDlg::ShowResult()

```

```

{

```

```

    int indx;

```

```

    m_List.InsertColumn(0,"Length",LVCFMT_CENTER,60, 0);

```

```

    m_List.InsertColumn(1,"Psi (V)",LVCFMT_CENTER,70, 1);

```

```

    m_List.InsertColumn(2,"Nm (1/cm^3)",LVCFMT_CENTER,70, 2);

```

```

    m_List.InsertColumn(3,"Pm (1/cm^3)",LVCFMT_CENTER,70, 3);

```

```

    m_List.InsertColumn(4,"Jnm(A/cm^2)",LVCFMT_CENTER,70, 4);

```

```

    m_List.InsertColumn(5,"Jpm(A/cm^2)",LVCFMT_CENTER,70, 5);

```

```

    m_List.InsertColumn(6,"Jtotal (A/cm^2)",LVCFMT_CENTER,90, 6);

```

```

    m_List.InsertColumn(7,"Gen",LVCFMT_CENTER,70, 7);

```

```

    m_List.InsertColumn(8,"k",LVCFMT_CENTER,30, 8);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

m_List.InsertColumn(9,"JPill(A/cm^2)",LVCFMT_CENTER,70, 9);
m_List.InsertColumn(10,"JNill(A/cm^2)",LVCFMT_CENTER,70, 10);
for ( indx = 0; indx <=NM; indx++)
{
    char str1[20],str2[20],str3[20];
    char str4[20],str5[20],str6[20];
    char str7[20],str8[20],str9[20];
    char str10[20],str11[20];
    sprintf(str1," %1f ",len[indx]);
    int idx =m_List.InsertItem(indx,str1);
    sprintf(str2," %3lf ",Psi[indx]);
    m_List.SetItemText(idx, 1,str2 );
    sprintf(str3," %2e ",Nm [indx]);
    m_List.SetItemText(idx, 2,str3);
    sprintf(str4," %2e ",Pm[indx]);
    m_List.SetItemText(idx, 3,str4);
    sprintf(str5," %2e ",(Jnm[indx]));
    m_List.SetItemText(idx, 4,str5);
    sprintf(str6," %2e ",(Jpm[indx]));
    m_List.SetItemText(idx, 5,str6);
    sprintf(str7," %2e ",(Jnm[indx]+Jpm[indx]));
    m_List.SetItemText(idx, 6,str7);
    sprintf(str8," %2e ",Gen[indx]);
    m_List.SetItemText(idx, 7,str8);
    sprintf(str9," %d ",JG[indx]);
    m_List.SetItemText(idx, 8,str9);
    sprintf(str10," %2e ",(JPill[indx]));
    m_List.SetItemText(idx, 9,str10);
    sprintf(str11," %2e ",(JNill[indx]));
    m_List.SetItemText(idx, 10,str11);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}
//----- PutToExcel function excute -----//

void CMy1DPNNplusSimulationDlg::PutToExcel_Outputillumination()
{
    UpdateData(TRUE);
    CDatabase database;
    CString sDriver = "MICROSOFT EXCEL DRIVER (*.XLS)"; // exactly the same name as
in the ODBC-Manager
    CString sSql;
    CString sExcelFile = "c:\\"+ m_Excelsun; // Filename and path for
the file to be created
    float intval;
    int indx;
    TRY
    {
        // Build the creation string for access without DSN
        sSql.Format("DRIVER={%s};DSN="";FIRSTROWHASNAMES=1;READONLY=FALSE;CRE
ATE_DB=\\\"%s\";DBQ=%s", sDriver,sExcelFile,sExcelFile);
        // Create the database (i.e. Excel sheet)
        if( database.OpenEx(sSql,CDatabase::noOdbcDialog) )
        {
            // Create table structure
            sSql = "CREATE TABLE GEN (Mesh NUMBER,Length NUMBER,Gen NUMBER,Nsun
NUMBER,Psun NUMBER)";
            database.ExecuteSQL(sSql);
            // Insert data
            for(indx=0;indx<=NM-1;indx++)
            {
                sSql.Format("INSERT INTO GEN (Mesh,Length,Gen,Nsun,Psun) VALUES
(%d,%1f,%50f,%50f,%50f)",indx,len[indx],Gen[indx],Nsun[2*indx+1],Psun[2*indx+1]);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นางสาว เกา ชาธิรัตน์
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 6 กรกฎาคม พ.ศ. 2519
สถานที่เกิด	จังหวัดหนองคาย
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตร์บัณฑิต(ฟิสิกส์)
สถานที่สำเร็จการศึกษา	มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2541



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้