การพัฒนาต้นแบบซอฟท์แวร์ที่ใช้ในการออกแบบบนเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ : กรณีศึกษาการออกแบบวงจรรวมขนาดเล็ก

CAD SOFTWARE PROTOTYPE ON MICROCOMPUTER : SSI DESIGN

T033104

วิสันต์ ตั้งวงษ์เจริญ

WISAN TANGWONGCHAROEN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2542

ISBN 974-622-429-8

ลขหมู่.....
ลขทะเบียน 33104
วัน, เดือน, ปี - 5 ก.ค. 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CAD SOFTWARE PROTOTYPE ON MICROCOMPUTER : SSI DESIGN

WISAN TANGWONGCHAROEN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF SCIENCE IN COMPUTER SCIENCE

AND INFORMATION TECHNOLOGY

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

1999

ISBN 974-622-429-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 1999

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาต้นแบบซอฟท์แวร์ที่ใช้ในการออกแบบบนเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์: กรณีศึกษาการออกแบบวงจรรวมขนาดเล็ก
นักศึกษา	นายวิสันต์ ตั้งวงษ์เจริญ
รหัสประจำตัว	35628013
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิทยาการคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ
ปีการศึกษา	2542
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.บุญธีร์ เครือตราชู
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง

บทคัดย่อ

ปัจจุบันวิวัฒนาการทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ได้ก้าวรุดหน้าไปอย่างรวดเร็ว เนื่องมาจากการค้นพบเทคโนโลยีใหม่ ๆ ในงานอิเล็กทรอนิกส์ และสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดใหม่ ๆ ซึ่งรวมไปถึงสิ่งประดิษฐ์ที่เรียกว่า วงจรรวม การสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำสามารถแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน คือ การออกแบบและกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ในขั้นตอนการออกแบบในระดับเลย์เอาท์ส่วนสำคัญที่สุดได้แก่ ขั้นตอนการกำหนดรูปแบบของวงจรเนื่องจากเป็นการกำหนดรูปแบบของกระจกต้นแบบที่ใช้ในกระบวนการสร้างด้วย ดังนั้นเพื่อให้การออกแบบเป็นไปอย่างสะดวกและรวดเร็วยิ่งขึ้น จึงได้นำคอมพิวเตอร์มาเป็นอุปกรณ์ช่วยในการออกแบบ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอการพัฒนาโปรแกรมต้นแบบสำหรับการออกแบบวงจรรวมขนาดเล็กบนเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ โดยในส่วนของโปรแกรมผู้ใช้สามารถทำการออกแบบวงจรในระดับเลย์เอาท์ สามารถตรวจสอบภาพตัดขวางของเลย์เอาท์ ตรวจสอบกฎการออกแบบ แสดงการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้า ทำการแปลเลย์เอาท์เป็น CIF(Caltech Intermediate Form) และสามารถทำการรับ-ส่งเลย์เอาท์บนเครือข่ายอินเตอร์เนตได้ ในการออกแบบโปรแกรมได้นำวิธีแนวทางเชิงวัตถุมาใช้ในการออกแบบทำให้การแก้ไขหรือปรับปรุงโปรแกรมกระทำได้สะดวกยิ่งขึ้น เช่น การเพิ่มกฎการออกแบบ สามารถสร้างคลาสจากคุณสมบัติการสืบทอดจากคลาสที่ได้ออกแบบ แล้วทำการเพิ่มคลาสที่สร้างนี้ลงในโปรแกรม โดยไม่ทำให้เกิดผลกระทบกับโปรแกรมเดิม ทำให้การออกแบบและพัฒนาโปรแกรมทำได้สะดวกยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	CAD Software Prototype on Microcomputer : SSI Design
Student	Mr.Wisan Tangwongcharoen
Student ID.	35628013
Degree	Master of Science
Programme	Computer Science and Information Technology
Year	1999
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr.Boontee Kruatrachue
Thesis Co-advisor	Assoc. Prof. Dr.Wisut Titiroongruang

ABSTRACT

In the present, electronic evolution takes forward quickly because of new found technology innovations in electronic field and semiconductor device including integrated circuit inventions. In general semiconductor device implementation can be divided into two step such as semiconductor device design and fabrication. The layout design is the most significant, which is the designation of not only circuit configuration but also the photolithographic mask layout for fabrication process. Consequently, computer software is brought to enhance the performance of the design step.

This thesis presents CAD software development prototype for small scale integrated circuits design on microcomputer. The software can allow users to design integrated circuits by layout level, examine cross-section image from layout, check layout design rule, simulate electric characteristics, translate layout to CIF (Caltech Intermediate Form) language sources and transfer layout through the Internet. In the software design phase, Object-oriented programming is applied to gain the benefit of the convenient software modification and improvement. For example, a design rule adding, a new implementing class can inherited properties from designed classes and is put into the software source without any effect to the software original functions. Apparently, the design and development of the software are enhanced.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เพราะได้รับความเมตตากรุณาจากท่านอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญธีร์ เครือตราชู และ รองศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง ซึ่งได้ให้คำปรึกษาในการแก้ไขปัญหาและคำแนะนำแนวทางในการทำวิจัยตลอดมา ผู้วิจัยรู้สึกเคารพและซาบซึ้งในความกรุณาจากท่าน ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ(ผู้ล่วงลับไปแล้ว) คุณแม่ พี่ ๆ น้อง ๆ ทุกคน และคุณวรนุช เฉิดชมจันทร์ ที่สนับสนุนและให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณ คุณนรินทร์ ธรรมารักษ์วัฒนะ หัวหน้าฝ่ายระบบและโปรแกรม รวมทั้งพี่ ๆ น้อง ๆ สำนักวิจัยและบริการคอมพิวเตอร์ ที่ให้ยืมอุปกรณ์คอมพิวเตอร์และให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ คุณภควัต สรวยสุวรรณ เจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ที่อำนวยความสะดวกในการทำวิจัยนี้ และขอขอบคุณน้องลัดดาวัลย์ สุภาดี น้องพัชรินทร์ บุญเร่งทรัพย์ น้องโยธิน วงศ์ประเสริฐ และน้อง ๆ ห้องปฏิบัติการซุปเปอร์คอนดัคเตอร์ทุกคนที่ช่วยให้วิทยานิพนธ์นี้เกิดเป็นรูปเป็นร่างขึ้นมาได้

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมรุ่นที่ได้ให้กำลังใจกันตลอดเวลาที่ศึกษาอยู่ และขอขอบคุณพี่บุญช่วยพร้อมทั้งเจ้าหน้าที่คณะเทคโนโลยีสารสนเทศที่ช่วยดำเนินการด้านต่าง ๆ ให้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณทุนการศึกษาจากมูลนิธิเพื่อการศึกษาคอมพิวเตอร์และการสื่อสาร(C&C) เป็นอย่างสูงที่ได้มอบทุนในการศึกษาเป็นระยะเวลา 2 ปี

สุดท้ายขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

วิสันต์ ตั้งวงษ์เจริญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VII

สารบัญภาพ.....VIII

สัญลักษณ์.....XI

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมา.....1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....3

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....4

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....5

2.1 การตรวจสอบกฎการออกแบบ (Design Rule Checking).....5

2.1.1 กฎการออกแบบของหมีดและคอนเวย์.....5

2.1.2 กฎการออกแบบอื่นๆ.....8

2.2 ภาษา CIF (Caltech Intermediate Form).....9

2.3 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี (Photolithography Process).....12

2.4 คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....15

2.4.1 คุณลักษณะของกระแสกับแรงดัน (I-V Characteristics).....15

2.4.2 แรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage).....17

บทที่ 3 การออกแบบ Object-Oriented แบบ Object Modeling Technique.....18

3.1 ลักษณะพื้นฐานการโปรแกรมเชิงวัตถุ.....18

3.1.1 แอปสแตรกชัน (Abstraction).....19

3.1.1.1 ออบเจค (Object).....19

3.1.1.2 เอ็นแคปซูเลชัน (Encapsulation).....20

3.1.1.3 คลาส (Class).....20

3.1.2 โพลิมอร์ฟีซึม (Polymorphism).....21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.3 อินเฮียริแทนส์ (Inheritance)……22

3.2 ออบเจคโมเดลลิ่ง (Object Modeling Technique: OMT)……22

3.2.1 ออบเจคโมเดล (Object Model)……23

3.2.1.1 ออบเจคไดอะแกรม (Object Diagram)……23

3.2.1.2 แอสโซซิเอชัน (Association)……24

3.2.1.3 อะกรีเกชัน (Aggregation)……26

3.2.1.4 เจนเนอรัลไลเซชัน (Generalization)……26

3.2.1.5 เปรียบเทียบอะกรีเกชันกับแอสโซซิเอชัน……27

3.2.1.6 เปรียบเทียบอะกรีเกชันกับเจนเนอรัลไลเซชัน……27

3.2.2 ไดนามิกโมเดล (Dynamic Model)……29

3.2.2.1 อีเวนท์ (Event)……29

3.2.2.2 สเตท (State)……31

3.2.2.3 โอเปอเรชัน (Operation)……32

3.2.2.4 สเตทไดอะแกรม (State Diagram)……33

3.2.3 ฟังก์ชันนัลโมเดล (Functional Model)……34

3.2.3.1 โพรเซส (Process)……35

3.2.3.2 ดาต้าโฟล (Data Flow)……35

บทที่ 4 การออกแบบโปรแกรมออกแบบวงจรรวมขนาดเล็ก……38

4.1 การออกแบบคลาสสำหรับโปรแกรมออกแบบวงจรรวมขนาดเล็ก……39

4.2 คลาส CreateLayoutPanel……43

4.3 คลาส CutLayoutPanel……48

4.4 คลาส DRCPanel……51

4.5 คลาส CIFPanel……54

4.6 คลาส SimulatePanel……56

4.7 คลาส Mask……58

4.8 คลาส TransferLayout……59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 โปรแกรมออกแบบวงจรรวม.....62

5.1 การพัฒนาโปรแกรม.....62

5.2 วิธีการใช้โปรแกรม.....62

5.2.1 การสร้างภาพเลย์เอาท์.....65

5.2.2 การแสดงภาพตัดขวาง.....66

5.2.3 การตรวจสอบกฎการออกแบบ.....66

5.2.4 แสดงภาษา CIF.....67

5.2.5 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้า.....68

5.2.6 แสดง Mask.....70

5.2.7 การรับ-ส่งแฟ้มเลย์เอาท์.....71

5.3 วิธีการใช้โปรแกรมสร้างคลาสกฎการออกแบบ.....71

บทที่ 6 ผลการทดลอง.....74

6.1 การออกแบบ PMOS.....74

6.2 การสร้างกระจกต้นแบบ.....76

6.3 การจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้า.....78

6.3.1 คุณสมบัติกระแสและแรงดัน.....79

6.3.2 แรงดันขีดเริ่ม.....80

6.4 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์.....81

บทที่ 7 สรุปและข้อเสนอแนะ.....83

7.1 การพัฒนาโปรแกรม.....83

7.2 ผลการทำงานของโปรแกรม.....83

7.3 ข้อเสนอแนะ.....84

บรรณานุกรม.....85

ภาคผนวก ก กระบวนการสร้างพีมอสทรานซิสเตอร์.....86

ประวัติผู้เขียน.....91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 แสดงค่าจำกัดของอุปกรณ์ประกอบวงจรรวมด้วยโครงสร้างทรานซิสเตอร์แบบ CMOIS.....9

2.2 แสดงคำสั่งและความหมายของไวยากรณ์ของ CIF.....10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

1.1 แสดงขั้นตอนของกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ.....2
2.1 แสดงความกว้างของเส้นดิฟฟิวชัน.....5
2.2 แสดงระยะห่างของเส้นดิฟฟิวชันกับเส้นดิฟฟิวชัน.....6
2.3 แสดงถ้ามีสายโพลีพาดทับเส้นดิฟฟิวชัน เช่นในกรณีของทรานซิสเตอร์ผ่านเส้นโพลี.....6
2.4 แสดงอิมแพลนต์จะต้องยื่นคลุมแชนเนลออกมาและอิมแพลนต์จะต้องห่างจากเส้นดิฟฟิวชัน.....6
2.5 แสดงคอนแท็กต์คัตบนชั้นดิฟฟิวชัน.....7
2.6 แสดงคอนแท็กต์คัตบนชั้นโพลี.....7
2.7 คอนแท็กต์คัตบนชั้นโลหะ.....7
2.8. แสดงระยะห่างระหว่างเส้นโลหะ.....7
2.9 แสดงโครงสร้างทรานซิสเตอร์แบบ MOS.....8
2.10 แสดง CIF.....10
2.11 กระบวนการเปิดช่องออกไซด์.....13
2.12 แสดงโฟโตมาส์ค สำหรับสร้างทรานซิสเตอร์.....14
2.13 แสดงกราฟแสดงคุณสมบัติ I-V ของมอสทรานซิสเตอร์ชนิด เอ็น-แชนแนลเอ็นฮานซ์เมนท์โหมด.....15
2.14 แสดงภาพด้านบนของมอสทรานซิสเตอร์ เพื่อให้เห็นความกว้าง W และความยาว L ของช่องทางเดินกระแส.....16
2.15 แสดงโครงสร้างอย่างง่ายของทรานซิสเตอร์ชนิดพีมอส.....16
2.16 กราฟแสดงแรงดันขีดเริ่ม.....17
3.1 แสดงโครงสร้างของโปรแกรมที่เป็นวัตถุ.....18
3.2 ออบเจคไดอะแกรม.....23
3.3 คลาสไดอะแกรม.....23
3.4 Instance Diagram.....24
3.5 ตัวอย่างแสดงความสัมพันธ์แบบมากต่อมาก.....25
3.6 ตัวอย่างอะกรีเกชัน.....26
3.7 อะกรีเกชันหลายระดับ.....26
3.8 ตัวอย่างเจนเนอรัลไลเซชัน.....27
3.9 ตัวอย่างอะกรีเกชัน.....27
3.10 แสดงความสัมพันธ์อะกรีเกชันกับเจนเนอรัลไลเซชัน.....28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

3.11 รีเดอร์ซีพอะกรีเกชัน.....28

3.12 ภาพเหตุการณ์สำหรับ phone call.....30

3.13 แสดงทางเดินของเหตุการณ์สำหรับ phone call.....31

3.14 แสดงสเตทไดอะแกรม.....33

3.15 แสดงสเตทไดอะแกรมสำหรับ phone call.....34

3.16 ตัวอย่างดาต้าโฟล.....36

3.17 ตัวอย่างดาต้าโฟลไดอะแกรม.....37

4.1 แสดงเลย์เอาท์ของวงจรรวมขนาดเล็ก.....38

4.2 แสดงคลาสสำหรับโปรแกรมการออกแบบวงจรรวมขนาดเล็ก.....40

4.3 แสดง MainFrame Class Diagram.....41

4.4 แสดง MainFrame Statechart.....42

4.5 แสดง DFD คลาส MainFrame.....43

4.6 แสดง CreateLayoutPanel Class Diagram.....44

4.7 แสดง CreateLayoutPanel Statechart.....45

4.8 แสดง Layout Class Diagram.....47

4.9 แสดง CutLayoutPanel Class Diagram.....49

4.10 แสดง CutLayoutPanel Statechart.....50

4.11 แสดง DFD คลาส CutLayoutPanel.....51

4.12 แสดง DRCPanel Class Diagram.....53

4.13 แสดง DRCPanel Statechart.....54

4.14 แสดง CIFPanel Class Diagram.....55

4.15 แสดง CIFPanel Statechart.....55

4.16 แสดง DFD คลาส CIFPanel.....56

4.17 แสดง SimulatePanel Class Diagram.....57

4.18 แสดง SimulatePanel Statechart.....58

4.19 แสดง Mask Class Diagram.....58

4.20 แสดง Mask Statechart.....59

4.21 แสดง Transfer Class Diagram.....60

4.22 แสดง TransferLayout Statechart.....60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.23 แสดง DFD คลาส TransferLayout.....61
5.1 แสดงรายละเอียดเมนูบาร์.....63
5.2 แสดงหน้าจอหลักของโปรแกรม.....64
5.3 แสดงการสร้างภาพเลย์เอาท์.....65
5.4 แสดงภาพตัดขวาง.....66
5.5 แสดงผลการตรวจสอบกฎการออกแบบ.....67
5.6 แสดงภาษา CIF ของเลย์เอาท์ที่ทำการออกแบบ.....68
5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน.....69
5.8 กราฟแสดงแรงดันขีดเริ่ม.....69
5.9 แสดง Mask ของเลย์เอาท์.....70
5.10 แสดงหน้าจอการรับส่งแฟ้มข้อมูลเลย์เอาท์.....71
5.11 แสดงหน้าจอโปรแกรมสร้างคลาสกฎการออกแบบ.....72
6.1 แสดงวงจรพีมอส.....75
6.2 แสดงเลย์เอาท์ของ PMOS.....75
6.3 Mask ที่ได้จากโปรแกรม (ก) มาส์คที่ 1 และ 2 (ข) มาส์คที่ 3 และ 4.....76
6.4 แสดงการตัดต้นแบบบนแผ่นพลาสติกลามิเนตด้วยเครื่องไมโครคัตเตอร์.....77
6.5 กล้องถ่ายภาพย่อส่วน step and repeat camera.....77
6.6 แสดงภาพกระจกต้นแบบที่ใช้เป็นโฟโตมาส์ค.....78
6.7 เครื่องมือทดสอบคุณสมบัติกระแสและแรงดันของ Hewlett Packard รุ่น 4061A.....78
6.8 กราฟแสดงคุณลักษณะของกระแสกับแรงดันที่ได้จากเครื่องมือทดสอบ.....79
6.9 กราฟแสดงคุณลักษณะของกระแสกับแรงดันที่ได้จากโปรแกรม.....79
6.10 กราฟแรงดันขีดเริ่มที่ได้จากเครื่องมือทดสอบ.....80
6.11 กราฟแรงดันขีดเริ่มที่ได้จากโปรแกรม.....80
6.12 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์.....81
6.13 แสดงเลย์เอาท์ของวงจรอินเวอร์เตอร์.....81
6.14 Mask วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากโปรแกรม (ก) มาส์คที่ 1 และ 2 (ข) มาส์คที่ 3 และ 4.....82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
β_n	Device Transconductance	Ampere/Volt^2
W	ความกว้างของช่องทางเดินกระแส	ไมโครเมตร
L	ความยาวของช่องทางเดินกระแส	ไมโครเมตร
V_{GS}	แรงดันระหว่างเกทและซอส	โวลต์
V_{Th}	แรงดันขีดเริ่มของ N-Channel MOS	โวลต์
V_{DS}	แรงดันระหว่างเดรนและซอส	โวลต์
k_n'	Process Transconductance	Ampere/Volt^2
μ_n	ความคล่องตัวอิเล็กตรอน	cm^2/V-s
C_{ox}	ค่าความจุไฟฟ้าของออกไซด์	พิโคฟารัส
ε_{ox}	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของออกไซด์	-
T_{ox}	ความหนาของเกทออกไซด์	อังสตรอม
I_{DS}	กระแสระหว่างเดรนและซอส	แอมแปร์
V_T	แรงดันขีดเริ่ม	โวลต์
λ	แฟคเตอร์การเปลี่ยนแปลงของกระแสเดรนกับแรงดันเดรน-ซอส	-
V_{Dsat}	แรงดันพินช์ออฟ	โวลต์
L	ความยาวของช่องทางเดินกระแส	ไมโครเมตร
μ_p	ความคล่องตัวโฮล	cm^2/V-s
V_{FB}	แรงดันแถบราบ	โวลต์
C_{ox}	ค่าความจุไฟฟ้าที่เกทต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่	พิโคฟารัส
ε_{Si}	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของซิลิกอน	-
q	ค่าประจุของอิเล็กตรอน	คูลอมบ์
N	จำนวนประจุในฐานรอง (ประจุที่ใช้ในการนำกระแสของ MOSFET ที่กำลังพิจารณาอยู่	cm^{-3}
ϕ_F	ค่าพลังงานจากระดับพลังงานของฐานรองถึงระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนหรือโฮลที่กำลังนำกระแสอยู่	โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ในปัจจุบันวิวัฒนาการทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ได้ก้าวรุดหน้าไปอย่างรวดเร็ว เนื่องมาจากการค้นพบเทคโนโลยีใหม่ ๆ ในงานอิเล็กทรอนิกส์และสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดใหม่ ๆ ซึ่งรวมไปถึงสิ่งประดิษฐ์ที่เรียกว่า วงจรรวม (Integrated Circuits) หรือ ไอซี อันเป็นชิ้นของสารกึ่งตัวนำชิ้นเล็ก ๆ ซึ่งสามารถทำงานได้เทียบเท่ากับตัวต้านทาน ตัวประจุไฟฟ้า ไดโอดหรือทรานซิสเตอร์เป็นสิบ ๆ หรือร้อย ๆ ตัวรวมกัน ทั้งนี้เนื่องจากว่าภายในชิ้นสารกึ่งตัวนำ หรือข้างบนของชิ้นสารกึ่งตัวนำนั้นประกอบด้วยชั้นของวัสดุต่าง ๆ (ซิลิกอน , โบรอน , อลูมิเนียม , แกลเลียม ฯลฯ) ซึ่งสามารถทำงานได้เช่นเดียวกับชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆที่มาประกอบเข้าเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เช่น วงจรขยาย หรือวงจรตรรก เป็นต้น และสิ่งประดิษฐ์วงจรรวมเหล่านี้ เป็นส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่องมืออุปกรณ์หรือ วงจรต่าง ๆ ในงานด้านอุตสาหกรรมทุกสาขา

การจำแนกวงจรรวมออกเป็นกลุ่มตามขนาดความจุหรือความหนาแน่นของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่บรรจุอยู่ในวงจรรวมนั้น ๆ ได้ดังนี้

1. วงจรรวมขนาดเล็ก (Small Scale Integrations) หรือเขียนย่อ ๆ ว่า SSI ได้แก่ไอซีที่มีชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ประมาณไม่เกิน 100 ตัว เช่น ไอซีประเภทเกทต่าง ๆ

2. วงจรรวมขนาดกลาง (Medium Scale Integrations) หรือเขียนย่อ ๆ ว่า MSI ได้แก่ไอซีที่มีชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ประมาณ 100-1,000 ตัว เช่น ไอซีเคาน์เตอร์ , มัลติเพลกเซอร์ และแอดเดอร์ เป็นต้น

3. วงจรรวมขนาดใหญ่ (Large Scale Integrations) หรือเขียนย่อ ๆ ว่า LSI ได้แก่ไอซีที่มีชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ประมาณ 1,000-20,000 ตัว เช่น ไมโครโปรเซสเซอร์ขนาด 8 บิท รอม(ROM) และแรม(RAM) เป็นต้น

4. วงจรรวมขนาดใหญ่มาก (Very Large Scale Integrations) หรือเขียนย่อ ๆ ว่า VLSI ได้แก่ไอซีที่มีชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ประมาณ > 20,000 ตัว เช่น ไมโครโปรเซสเซอร์ขนาด 16 บิท และ 32 บิท เป็นต้น

ขั้นตอนการออกแบบ จะประกอบด้วยขั้นตอนที่สำคัญ 3 ขั้นตอนด้วยกันคือ

1. Design Entry ผู้ออกแบบจะทำการกำหนดรายละเอียดหน้าที่การทำงานโดยรวมของวงจรที่ตนเองต้องการ (System Specification) กำหนด input และ output ที่ต้องการ จากนั้นจะเป็นการออกแบบย่อยลงไปในระดับ block ว่าประกอบไปด้วยกี่ส่วน แต่ละส่วนเชื่อมโยงกันอย่างไร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

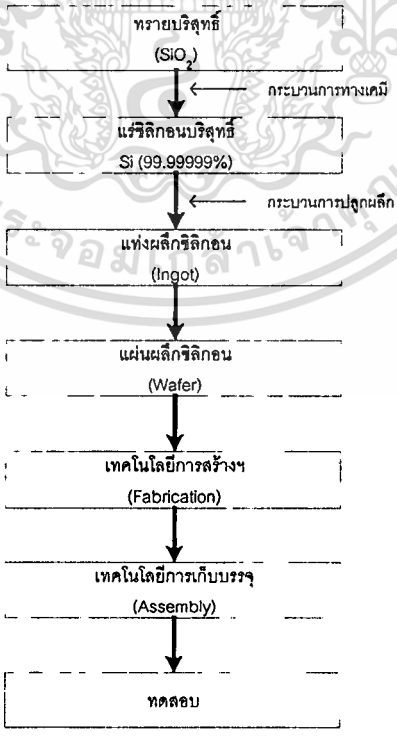
และมีหน้าที่อะไร ต่อจากนั้นจะเป็นการออกแบบในระดับ logic หรือเป็นภาพวงจรไฟฟ้า (Schematic) ว่าในแต่ละ block จะมีลักษณะอย่างไร

2. Simulation เป็นการจำลองการทำงานของ logic เพื่อใช้ตรวจสอบความถูกต้องในการทำงานของ logic ที่ผู้ออกแบบกำหนดไว้ ถ้ามีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นผู้ออกแบบจะได้ทราบและแก้ไขก่อนที่จะนำไปทำขั้นตอนต่อไป

3. Physical Layout เป็นการออกแบบในระดับ layout ของ logic ผู้ออกแบบหน้ากาก (Mask) ของวงจรรวม ซึ่งประกอบไปด้วยการจัดวางชั้นสารกึ่งตัวนำ ลักษณะจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมวางซ้อนทับหรือติดต่อกันไป ในการออกแบบจะต้องคำนึงถึงกฎและวิธีต่าง ๆ ในการออกแบบ เช่น กฎการออกแบบ(Design Rule Checking) กฎทางไฟฟ้า (Electrical Rule Checker) การจัดวางกลุ่มวงจร (Placement) การต่อสายเชื่อมโยงกลุ่มวงจรต่าง ๆ (Routing) เป็นต้น ในขั้นตอนนี้จะมีส่วนเกี่ยวเนื่องไปยังกระบวนการสร้าง Mask ในกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

กระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำถูกเรียกว่า เทคโนโลยีการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำในปัจจุบันนี้มีมากมายหลายชนิด เช่น ไดโอด ทรานซิสเตอร์และไอซี กระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์ต่าง ๆ เหล่านี้มีลักษณะคล้ายกัน จะแตกต่างกันไปบ้างก็เพียงบางขั้นตอนเท่านั้น

แผนผังแสดงขั้นตอนของกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโดยทั่ว ๆ ไปแสดงได้ดังนี้



ภาพที่ 1.1 แสดงขั้นตอนของกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุสารกึ่งตัวนำมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด เช่น เยอรมันเนียม ซิลิกอน แคดเมียมซัลไฟร์ แกลเลียมอาร์เซนายด์ และแกลเลียมฟอสไฟด์ เป็นต้น แต่สำหรับสิ่งประดิษฐ์ประเภทวงจรรวม (หรือไอซี) โดยทั่วไปใช้ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่เรารู้จักกันดีก็คือทราย ดังนั้นธาตซิลิกอนจะถูกแยกออกมาจากทรายจนได้ธาตุซิลิกอนบริสุทธิ์จากนั้นจึงนำไปผ่านกระบวนการปลูกผลึก (crystal Growth) กระทั่งได้ไมครอน ซึ่งเราเรียกว่า แผ่นผลึกซิลิกอน (Si wafer) แผ่นผลึกซิลิกอนที่ได้นี้อาจจะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) หรือชนิดพี (p-type) ก็ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของอะตอมสารเจือ (impurity atom) ที่เติมผสมลงไปในสารซิลิกอนขณะทำการปลูกผลึก แผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำจะถูกนำมาใช้เป็นวัสดุเริ่มต้นสำหรับการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ซึ่งเทคนิคที่สำคัญก็คือเทคนิคการสร้างรอยต่อพี-เอ็น (p-n junction technique) ด้วยเทคนิคเดียวกันนี้เองเราสามารถสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์พื้นฐานชนิดต่าง ๆ จะประกอบขึ้นด้วยสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพี หากแต่มีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไปเท่านั้น

เทคโนโลยีการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำจะประกอบไปด้วย

1. เทคนิคการสร้างแผ่นซิลิกอน วัสดุเริ่มต้นของการเตรียมแผ่นผลึกซิลิกอนก็คือ ทราย หรือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ทรายจะถูกนำมาใช้สำหรับการแยกธาตุซิลิกอนบริสุทธิ์ จากนั้นจึงนำธาตุซิลิกอนบริสุทธิ์ไปหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 1,500 องศาเซลเซียส และทำการปลูกผลึกจะได้แผ่นผลึกซึ่งเป็นวัสดุเริ่มต้นของกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำต่อไป

2. เทคนิคการสร้างชั้นออกไซด์ (SiO_2) ชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์ มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าและโปร่งแสง จึงถูกนำมาใช้เป็นชั้นสำหรับป้องกันผิวหน้าของสิ่งประดิษฐ์ นอกจากนี้ยังใช้เป็นกำบังสำหรับป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือไม่ให้แพร่ผ่านไปได้

3. เทคนิคการเปิดช่องออกไซด์ เป็นการเปิดช่องออกไซด์ที่จะเติมอะตอมสารเจือชนิดตรงข้ามเข้าไปในเนื้อซิลิกอน กระบวนการที่นิยมใช้ในการเปิดช่องออกไซด์ก็คือ กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี โดยใช้กระจกต้นแบบเป็นอุปกรณ์สำคัญ

4. เทคนิคการเติมอะตอมสารเจือ เมื่อแผ่นซิลิกอนถูกเปิดช่องแล้ว จะถูกนำไปเติมอะตอมสารเจือเพื่อสร้างรอยต่อพี-เอ็น โดยอะตอมสารเจือที่แพร่จะผ่านช่องออกไซด์ที่เปิดเข้าสู่เนื้อซิลิกอน ทำให้ได้ซิลิกอนชนิดเอ็นหรือพีตามต้องการ

5. เทคนิคการเคลือบฟิล์มบาง เป็นการแพร่สารเจือฟิล์มบางของอลูมิเนียมทำหน้าที่เป็นทางเดินของกระแส และทำเป็นขั้วต่อของสิ่งประดิษฐ์ต่าง ๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ขั้นตอนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนใหญ่ ๆ คือ ขั้นตอนการออกแบบและขั้นตอนกระบวนการสร้างเทคโนโลยีการสร้าง (เทคโนโลยีการสร้างสิ่งประดิษฐ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารกึ่งตัวนำ) หรือการเจือสาร ในปัจจุบันได้มีการนำเอาคอมพิวเตอร์มาเป็นอุปกรณ์ช่วยในการออกแบบ เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบส่วนใหญ่จะเป็นเครื่องในระดับ Workstation หรือ Mainframe และซอฟท์แวร์ช่วยออกแบบก็มีราคาแพง เช่น Mentor Graphic , Hilo , Daisy เป็นต้น ซึ่งเป็นซอฟท์แวร์จากต่างประเทศ จึงทำให้โอกาสที่จะทำการศึกษาและทดลองการออกแบบเป็นไปได้อย่างยากลำบาก ไม่แพร่หลายเท่าที่ควร อีกทั้งซอฟท์แวร์ที่ใช้ในการออกแบบส่วนใหญ่มิได้มีการเชื่อมต่อไปยังกระบวนการสร้างกล่าวคือ ในการทำหน้ากากต้นแบบ (Mask) ในกระบวนการสร้างจะต้องนำเลย์เอาท์ที่ได้จากการออกแบบมาเป็นต้นแบบในการสร้าง Mask อีกครั้งหนึ่ง ทำให้ผู้ออกแบบต้องทำการออกแบบและสร้าง Mask ในแต่ละชั้นสารเอง จึงไม่สะดวกในการปฏิบัติ

จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาขั้นตอนการออกแบบและเทคโนโลยีการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ เพื่อจะทำการพัฒนาซอฟท์แวร์ช่วยออกแบบในระดับเลย์เอาท์ ที่ตรวจสอบคุณสมบัติของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำนั้นๆ ได้จากภาพตัดขวางของชั้นสาร ทำการตรวจสอบการทำงานของวงจรเบื้องต้นได้ ตรวจสอบกฎสำหรับการออกแบบและสร้างกระจกต้นแบบ (Mask) ของแต่ละเลย์เอาท์ที่ได้ทำการออกแบบไว้ โดยพัฒนาซอฟท์แวร์สำหรับเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ เพื่อที่จะให้เป็นอุปกรณ์ที่มีราคาถูกและสามารถแพร่หลายไปยังบุคคลที่มีความสนใจได้อย่างกว้างขวาง อีกทั้งยังใช้เป็นอุปกรณ์ช่วยในการเรียนรู้การสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำและสามารถนำไปใช้ออกแบบสิ่งประดิษฐ์วงจรรวมได้จริง ในการวิจัยจะนำเลย์เอาท์ที่ได้ทำการออกแบบจากซอฟแวร์มาสร้างวงจรรวมขึ้นจริง ในห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อเป็นการวิจัยและพัฒนาซอฟท์แวร์ช่วยในการออกแบบวงจรรวมสำหรับเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์
2. เป็นอุปกรณ์ในการออกแบบกระจกต้นแบบ (Mask)ในกระบวนการสร้าง
3. เป็นอุปกรณ์ช่วยการเรียนรู้การออกแบบและกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การตรวจสอบกฎการออกแบบ (Design Rule Checking)

การออกแบบระบบวงจรรวมที่เป็นระดับล่างสุด วงจรในระดับนี้เราเรียกว่าเลย์เอาท์ (layout) ในการสร้างเลย์เอาท์นั้น เราจะเปลี่ยนทรานซิสเตอร์และสายไฟจากวงจรที่เราเห็นทั่วๆ ไป มาเป็นรูปลักษณะทางเรขาคณิตของทรานซิสเตอร์ หรือสายไฟต่างๆ เหล่านั้น รูปลักษณะทางเรขาคณิตที่เหมาะสมบนชั้นสารต่างๆ ก็คือเลย์เอาท์ของวงจรนั้น ตัวเลย์เอาท์นี้จะนำไปใช้เป็นแม่แบบในการผลิตซิลิกอนชิปต่อไป

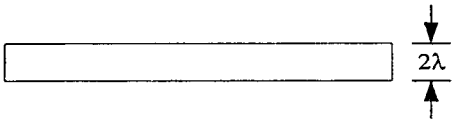
จากการศึกษาพบว่า เลย์เอาท์ของวงจร NMOS ประกอบไปด้วยชั้นสารต่างๆ 5 ชั้น การที่เราจะนำชั้นสารต่างๆ แต่ละชิ้นส่วนมาประกอบกันเป็นตัวทรานซิสเตอร์หรือสารไฟนั้น เราจะต้องคำนึงถึงกฎเกณฑ์ของการออกแบบด้วย ยกตัวอย่างเช่น ถ้าเรามีสายนำสัญญาณที่ทำจากดิฟฟิวชันเดินคู่ขนานไปกับสายที่ทำจากโพลี สายทั้ง 2 เส้นนี้ จะต้องวางห่างกันเป็นระยะค่าหนึ่ง สมมติในตัวอย่างนี้ เราต้องวางห่างกัน 1 แลมบ์ดา(ค่ากำหนดความกว้างของช่องทางเดินกระแส)เพราะเหตุว่าเมื่อเรานำเลย์เอาท์นี้ไปผลิตเป็นชิปออกมา จะได้ไม่มีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นบนตัวชิป ตัวอย่างของข้อผิดพลาดก็คือ สายคู่ขนานนั้นอาจแตะกันทำให้เกิดวงจรลัดได้ ถ้าไม่วางห่างกันตามที่กำหนด

กฎเกณฑ์ในการออกแบบ ซึ่งเป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในมหาวิทยาลัย และภาคอุตสาหกรรมในสหรัฐอเมริกา คือกฎการออกแบบของหมีดและคอนเวย์ (Mead and conway) ในที่นี้เราจะอธิบายถึง กฎการออกแบบนี้สำหรับวงจร NMOS ส่วนกฎเกณฑ์สำหรับวงจร CMOS และกฎการออกแบบของสถาบันอื่นๆ

2.1.1 กฎการออกแบบของหมีดและคอนเวย์

สาระสำคัญของกฎการออกแบบมีอยู่ 15 ข้อ ดังนี้คือ

1. ความกว้างของเส้นดิฟฟิวชัน ต้องไม่ต่ำกว่า 2λ

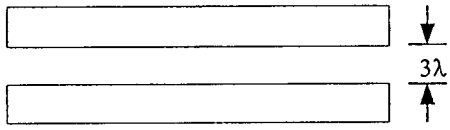


ภาพที่ 2.1 แสดงความกว้างของเส้นดิฟฟิวชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ความกว้างของเส้นโพลี ต้องไม่ต่ำกว่า 2λ

3. ระยะห่างของเส้นดิฟฟิวชันกับเส้นดิฟฟิวชัน ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 3λ

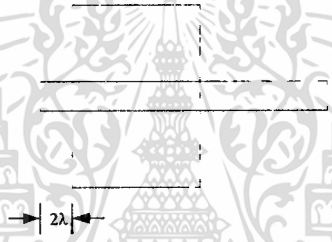


ภาพที่ 2.2 แสดงระยะห่างของเส้นดิฟฟิวชันกับเส้นดิฟฟิวชัน

4. ระยะห่างของเส้นโพลีกับเส้นโพลี ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 2λ

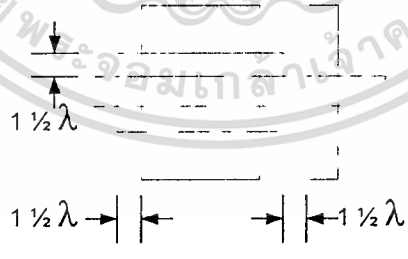
5. ระยะห่างของเส้นโพลีกับเส้นดิฟฟิวชัน ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 1λ

6. ถ้ามีสายโพลีพาดทับเส้นดิฟฟิวชัน เช่นในกรณีของทรานซิสเตอร์ผ่านเส้นโพลี จะต้องยื่นออกไปอย่างน้อย 2λ



ภาพที่ 2.3 แสดงถ้ามีสายโพลีพาดทับเส้นดิฟฟิวชัน เช่นในกรณีของทรานซิสเตอร์ผ่านเส้นโพลี

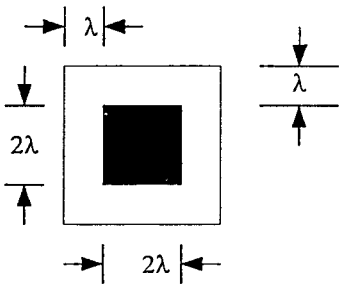
7. อิมแพลนต์จะต้องยื่นคลุมแชนเนลออกมาอย่างน้อย $1\frac{1}{2}\lambda$ และอิมแพลนต์จะต้องห่างจากเส้นดิฟฟิวชันอย่างน้อย $1\frac{1}{2}\lambda$ ด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 2.4 แสดงอิมแพลนต์จะต้องยื่นคลุมแชนเนลออกมาอย่างน้อย $1\frac{1}{2}\lambda$ และอิมแพลนต์จะต้องห่างจากเส้นดิฟฟิวชันอย่างน้อย $1\frac{1}{2}\lambda$ ด้วยเช่นกัน

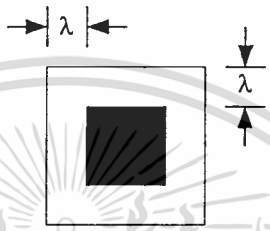
8. คอนแท็กต์คัตบนชั้นดิฟฟิวชัน ต้องมีขนาด $2\lambda \times 2\lambda$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



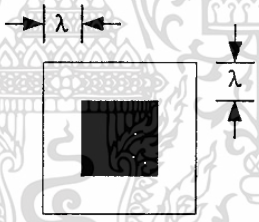
ภาพที่ 2.5 แสดงคอนแท็กต์คัตบนชั้นดิฟฟิวชัน ต้องมีขนาด $2\lambda \times 2\lambda$

9. คอนแท็กต์คัตบนชั้นโพลี



ภาพที่ 2.6 แสดงคอนแท็กต์คัตบนชั้นโพลี

10. คอนแท็กต์คัตบนชั้นโลหะ



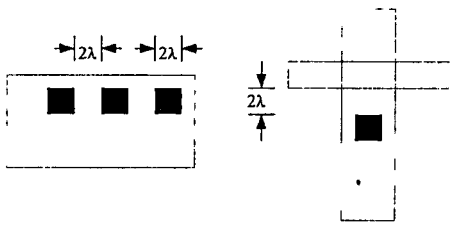
ภาพที่ 2.7 คอนแท็กต์คัตบนชั้นโลหะ

11. ระยะห่างระหว่างเส้นโลหะต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 3λ

12. ความกว้างของโลหะ ต้องอย่างน้อย 3λ

13. ระยะห่างระหว่างคัตอย่างน้อย 2λ

14. ถ้ามีเส้นโพลี พาดผ่านเส้นดิฟฟิวชันที่มีคัตอยู่ ระยะห่างระหว่างโพลีและคัตต้องอย่างน้อย 2λ



ภาพที่ 2.8 แสดงถ้ามีเส้นโพลี พาดผ่านเส้นดิฟฟิวชันที่มีคัตอยู่

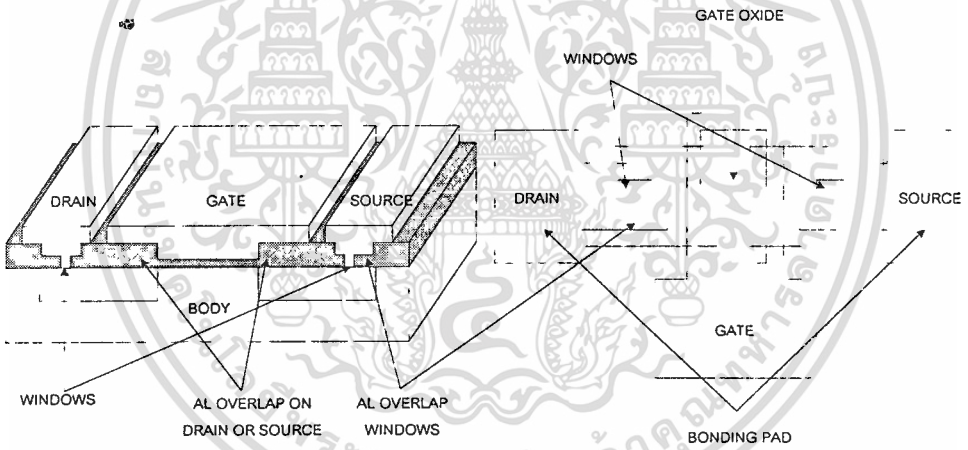
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. ในการเชื่อมต่อชั้นโพลีและชั้นดิฟฟิวชัน เราต้องใช้หลักการเชื่อมต่อเรียกว่า butting contact ทำได้โดยการวางเส้นดิฟฟิวชันและเส้นโพลีเหลื่อมกัน 1λ จากนั้นวางเส้นโลหะขนาด $4\lambda \times 6\lambda$ ทับลงบนกึ่งกลางรอยต่อ แล้วจึงวางคัตขนาด $2\lambda \times 4\lambda$ ลงบนกึ่งกลางของเส้นโลหะ

2.1.2 กฎการออกแบบอื่น ๆ

ในการออกแบบวงจรรวมนอกจากขนาดของทรานซิสเตอร์ตัวเดี่ยวๆ ที่คำนึงถึง และค่าระยะห่างระหว่างทรานซิสเตอร์ต่างๆ ในวงจรแล้ว ส่วนประกอบอื่นๆ เพื่อสร้างวงจรรวมขึ้นก็เป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องการศึกษา เพื่อหาขนาดทางเรขาคณิตที่เหมาะสมเพื่อผู้ออกแบบวงจรจะได้ทราบถึงข้อมูลในการออกแบบเบื้องต้น เพื่อใช้ในการออกแบบวงจรให้มีความถูกต้องและสามารถใช้งานได้

พิจารณาโครงสร้างภาพตัดขวางและรูปทรงเรขาคณิตด้านบนของทรานซิสเตอร์โครงสร้าง MOS หนึ่งตัวดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 แสดงโครงสร้างทรานซิสเตอร์แบบ MOS

จากรูปจะพบว่ายังมีส่วนประกอบอื่นๆ ในโครงสร้างทรานซิสเตอร์หนึ่งตัว ส่วนประกอบเหล่านั้นมีขนาดทางเรขาคณิตจำกัดค่าหนึ่งขึ้นกับเทคโนโลยีที่ใช้ในการสร้าง และในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังใช้เทคโนโลยีการแพร่สารเจือด้วยความร้อน ใช้การสกัดต่างๆ ด้วยสารละลาย และใช้การเคลือบโลหะต่างๆ ด้วยเครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศโดยความร้อน ดังนั้นขอสรุปขนาดรูปทรงทางเรขาคณิตที่เล็กที่สุดของส่วนประกอบของวงจรรวมดังตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าจำกัดของอุปกรณ์ประกอบวงจรรวมด้วยโครงสร้างทรานซิสเตอร์แบบ MOS

อุปกรณ์	ขนาดที่เล็กที่สุด (μm)
1. ช่องเปิดเพื่อสร้างขั้วสัมผัส	20×20
2. โลหะส่วนเกินช่องเปิดเพื่อสร้างขั้วสัมผัส	10
3. ชั้นฉนวนซิลิกอนไดออกไซด์เกินไปบนขั้วเดรนและขั้วซอสของทรานซิสเตอร์	10
4. ชั้นโลหะส่วนเกินชั้นฉนวนซิลิกอนไดออกไซด์บริเวณช่องทางเดินกระแส	10
5. ขนาดความกว้างของลายโลหะ	20
5.1 ระยะห่างของลายโลหะกับลายโลหะ	10
6. ขนาดของแถบโลหะที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับ อุปกรณ์ภายนอก (Bonding Pad)	200×200
7. ขนาดของช่องเติมสารเจือเพื่อสร้างขั้วเดรนหรือขั้วซอสของทรานซิสเตอร์เกินช่องเปิดสร้างขั้วสัมผัส	10

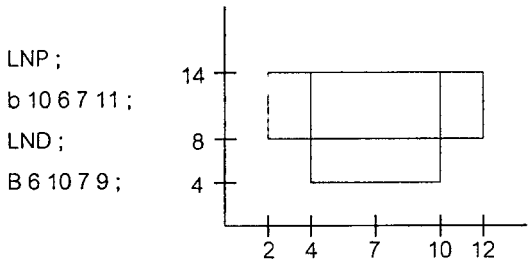
2.2 ภาษา CIF (Caltech Intermediate Form)

CIFเป็นภาษาที่ใช้ในการอธิบายรูปลักษณะของการเลย์เอาท์ VLSI จุดประสงค์ในการใช้ CIF ก็เพื่อที่จะใช้เป็นมาตรฐานและสื่อกลางของตัวเลย์เอาท์เพราะว่าเมื่อเรามีเลย์เอาท์ใดๆที่ได้เขียนอธิบายด้วยภาษา CIF ไว้แล้ว ต่อไปเมื่อจะนำเลย์เอาท์อันนี้ไปเป็นแม่แบบในการทำชิป เราสามารถที่จะใช้สร้างรูปวงจรต่างๆที่ได้เขียนเป็นภาษา CIF ไว้แล้ว เพื่อให้ปรากฏบนเครื่องวาดรูปหรือจอของคอมพิวเตอร์ได้ นอกจากนั้นแล้วเรายังสามารถนำ CIF ของวงจรเล็ก ๆ มาประกอบกันให้เป็นวงจรขนาดใหญ่ขึ้นได้

วงจร CIF ในระดับล่างสุดหรือที่เราเรียกว่า เลย์เอาท์นั้น สามารถมองได้ว่าเป็นการนำรูปสี่เหลี่ยมต่างๆมาวางซ้อนๆกัน ตามตำแหน่งต่างๆเพื่อให้ตำแหน่งนั้นๆเป็นทรานซิสเตอร์หรือว่าสายไฟ ตามแต่วงจรต้นแบบจะเป็นอย่างไร รูปสี่เหลี่ยมต่างๆนั้นก็จะมี 5 สี แต่ละสีจะบอกว่ารูปสี่เหลี่ยมนั้นจะเป็นชั้นโพลีซิลิกอน ดิฟฟิวชัน อิมแพลนต์ โลหะ หรือว่าคัต ถ้าเราจัดรูปสี่เหลี่ยมขนาดต่างๆให้แต่ละสี ตรงตามตำแหน่งที่ต้องการ เราก็จะได้วงจร VLSI

ดังนั้นภาษา CIF ก็คือภาษาที่บอกเราว่า รูปสี่เหลี่ยมแต่ละรูปเป็นสีอะไร มีขนาดกว้างยาวเท่าไร และอยู่ตรงไหน ดังเช่นในภาพที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.10 แสดงตัวอย่างภาษา CIF

B หมายถึง BOX ซึ่งก็คือรูป 2.10 เราจะเห็นว่า LNP เป็นตัวบอกว่า สี่เหลี่ยมที่ตามมาเป็นชั้นสารโพลีซิลิกอน รูปสี่เหลี่ยมรูปนี้ มีด้านตามแกน X ยาว 10 และด้านตามแกน Y ยาว 6 และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ X= 7 และ Y= 11 LNDจะบอกว่ารูปสี่เหลี่ยมที่ตามมาจะเป็นดิฟฟิวชันบรรทัดต่อมาจะบอกว่ารูปสี่เหลี่ยมนี้ มีด้านตามแกน X ยาวเท่ากับ 6 และมีด้านตามแกน Y ยาวเท่ากับ 10 และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ X= 7 และ Y= 9

โดยทั่วๆไปแล้ว ไวยากรณ์ของ CIF จะประกอบไปด้วยชุดของตัวอักษรภาษาอังกฤษจำนวนจำกัดจำนวนหนึ่งและตัวเลขในแต่ละชุดของ CIF ประกอบด้วยคำสั่งสลับกับเครื่องหมาย ; ทำหน้าที่เป็นตัวแยกแต่ละคำสั่งออกจากกัน คำสั่งทั้งหมดมี 10 คำสั่ง ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงคำสั่งและความหมายของไวยากรณ์ของ CIF

ลักษณะคำสั่ง	คำอธิบาย
$P_{x1\,y1\,x2\,y2}$	P คือรูปหลายเหลี่ยม x_1y_1และ x_2y_2 เป็นตัวเลขบอกว่า มุมของรูปหลายเหลี่ยมอยู่ที่ไหน เราต้องเรียงกันไป
$B_{x1\,y1\,x2\,y2}$	B คือ กล่องหรือรูปสี่เหลี่ยม x_1y_1 คือ ความกว้างและความยาวของรูปสี่เหลี่ยม xy คือตำแหน่งของจุดกึ่งกลางของรูปสี่เหลี่ยม
W a $x_1y_1x_2y_2$	W คือสายไฟ a คือความกว้างของสายไฟ x_1y_1 คือจุดเริ่มต้น x_2y_2 คือจุดปลาย
L name	L เป็นตัวบอกชนิดชั้นสาร name อาจเป็นหนึ่งใน 5 ชั้นสาร คือ NP , NM , ND , NI และ NC
DS abc	DS บอกจุดเริ่มต้นของวงจรย่อย a เป็นตัวเลข ซึ่งเป็นชื่อของวงจรย่อยนี้ b และ c เป็นตัวปรับตัวเลขในวงจรย่อยให้ถูกต้องเมื่อส่งไปทำซิลิกอนชิปจริงๆ
DF	DF บอกว่า วงจรย่อยทั้งหมดตรงนี้
DDa	DD เป็นตัวบอกว่า วงจรย่อยชื่อ a จะถูกหยิบทิ้งไป
C a	C จะเรียกวงจรย่อยชื่อ a ขึ้นมา
(comment digit user Text)	( ) จะบอกว่า ตัวหนังสือในระหว่างวงเล็บเป็นคำอธิบาย
E	บอกจุดทั้งหมดของชุดคำสั่ง CIF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไวยากรณ์ของ CIF จะเป็นดังนี้

cifFile	= {{blank}[command]semi}endCommand{blank}.
command	= primCommand |defDeleteCommand | defStart Command semi}
	{{blank}[primCommand]semi}defFinishCommand.
primCommand	= polygonCommand | boxCommand | roundFlashCommand |
	= wireCommand | layerCommand | callCommand |
	= userExtensionCommand | commentCommand.
polygonCommand	= "P" path.
boxCommand	= "B" integer sep integer sep point [sep point]
roundFlashCommand	= "R" integer sep point.
wireCommand	= "W" integer sep point.
layerCommand	= "L" {blank} shortname.
defStartCommand	= "D" {blank} "S" integer [sep integer sep integer].
defFinishCommand	= "D" {blank} "F".
callCommand	= "C" integer transformation.
userExtensionCommand	= digit userText.
commentCommand	= "(" commentText ")".
endCommand	= "E".
transformation	= {{blank}("T" point | "M"{blank} "X" | "M" {blank} "Y" |
	= "R" point)}.
path	= point{sep point}.
point	= sInteger sep sInteger.
sInteger	= {sep}{"_"}integerD.
integer	= {sep} integerD.
integerD	= digit{digit}.
shortname	= c[c][c][c].
c	= digit | upperChar.
userText	= {userChar}.
commentText	= {commentChar} | commentText "(" commentText ")" commentText.
semi	= {blank} ";"{blank}.
sep	= upperChar | blank.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

digit = “0” | “1” | “2” | “3” | “4” | “5” | “6” | “7” | “8” | “9” .

upperChar = “A” | “B” | “C” |…| “Z” .

blank = any ASCII character except digit.upperChar, “_”, “(” ,“)”, or “,”.

userChar = any ASCII character except “,”.

commentChar = any ASCII character except “(” or “)”.

2.3 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี (Photolithography process)

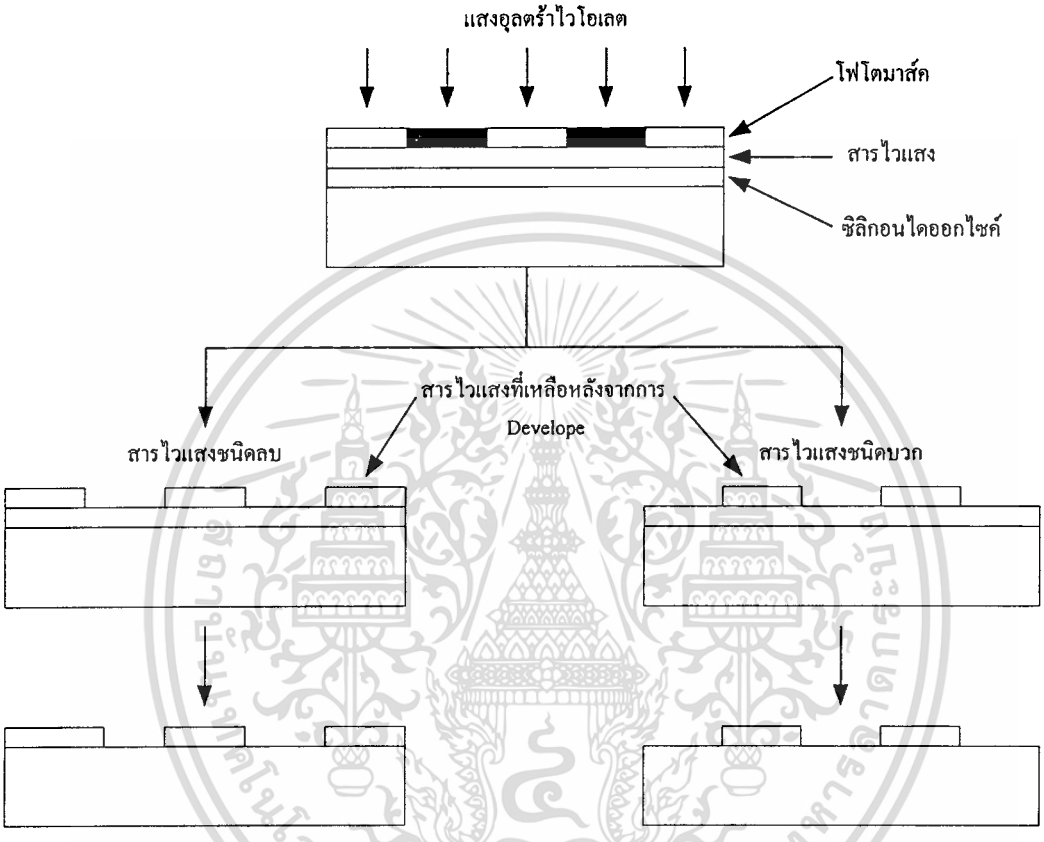
เป็นกระบวนการหนึ่งที่สำคัญในเทคโนโลยีการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ การสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ จำเป็นต้องเปิดช่องออกไซด์ออก เพื่อที่จะเติมอะตอมสารเจือชนิดตรงกันข้ามเข้าไปในเนื้อซิลิกอน กระบวนการที่นิยมใช้สำหรับการเปิดช่องออกไซด์ออกนี้ก็คือ “กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี” (Photolithography process) บางครั้งเรียกสั้น ๆ ว่า โฟโตเอชชิ่งค์ (Photo etching) วัสดุและอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับกระบวนการนี้ก็คือ กระจกต้นแบบ น้ำยาไวแสง น้ำยาล้าง (developer) น้ำยาละลายออกไซด์ เป็นต้น

กระจกต้นแบบหรือ Mask มีหลายแบบมีลักษณะคล้ายฟิล์มกระจก ภาพต้นแบบของตัวทรานซิสเตอร์ หรือสิ่งประดิษฐ์อื่น ๆ จะถูกนำมาถ่ายย่อลงบนกระจกต้นแบบให้มีขนาดให้มีขนาดเท่ากับขนาดจริงที่ต้องการ ซึ่งในระดับของ VLSI ขนาดที่เล็กที่สุดประมาณ 1 ไมครอน

น้ำยาไวแสง (Photo resist) เป็นสารไวแสงซึ่งมีอยู่ 2 ชนิดคือ แบบชนิดลบ (negative type) และชนิดบวก (positive type) สามารถเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสม

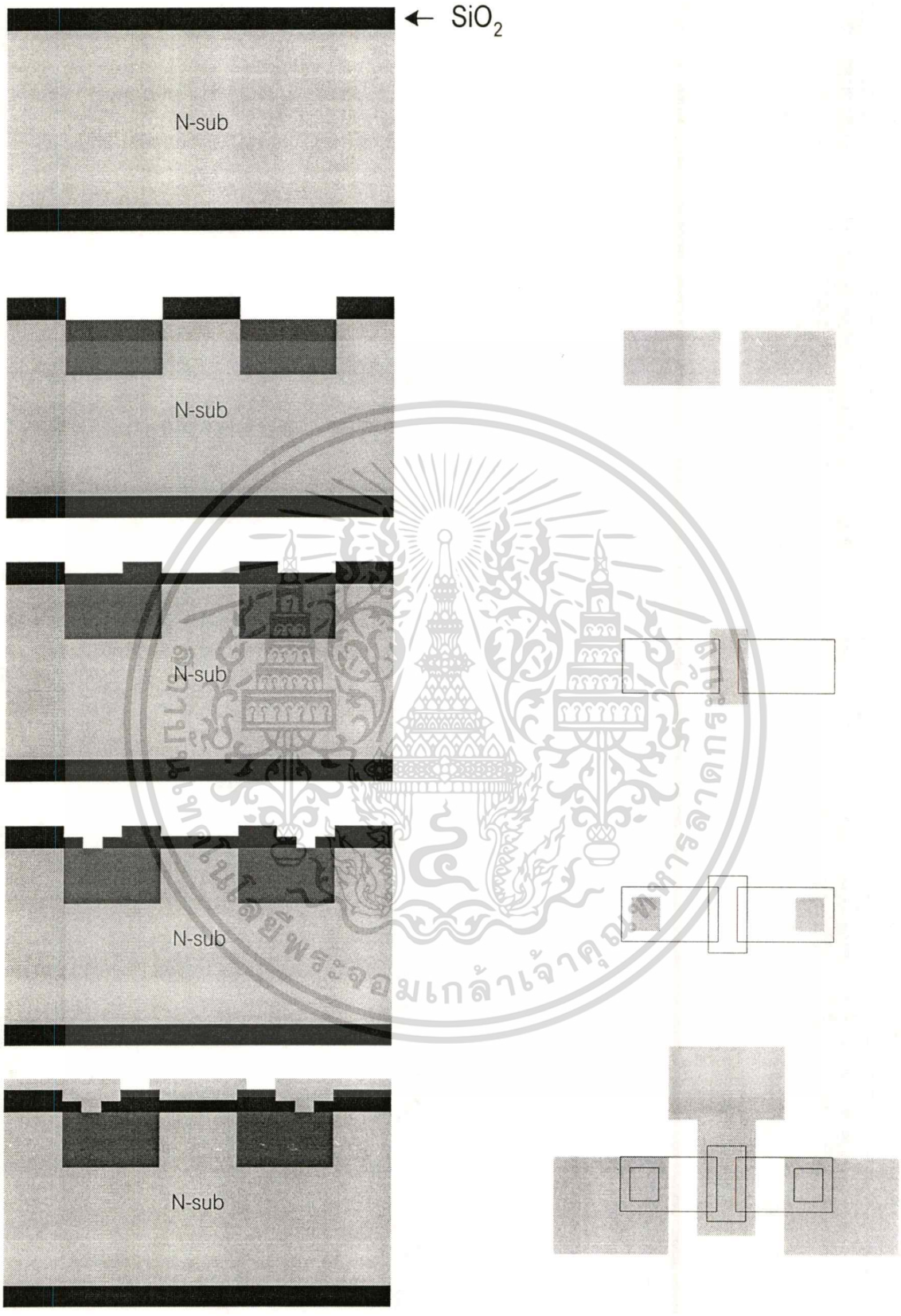
ขั้นตอนง่าย ๆ ของกระบวนการเปิดช่องออกไซด์ลำดับดังนี้คือ นำแผ่นผลึกซิลิกอนที่มีชั้นออกไซด์อยู่ที่ผิวหน้าไปเคลือบด้วยน้ำยาไวแสง โดยใช้อุปกรณ์ Spinner จากนั้นนำกระจกต้นแบบที่มีลวดลายปรากฏอยู่ ทาบกับแผ่นซิลิกอนแล้วฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลต จากนั้นนำแผ่นผลึกไปล้างน้ำยาล้าง (Developer) บริเวณของสารไวแสงที่ถูกแสงและไม่ถูกแสงจะมีปฏิกิริยากับน้ำยาล้างแตกต่างกัน ดังนั้นจึงทำให้เกิดภาพลวดลายเหมือนต้นแบบบนแผ่นผลึก นำแผ่นผลึกที่ได้ไปจุ่มลงในน้ำยาละลายออกไซด์ ชั้นของออกไซด์บริเวณที่ไม่มีสารไวแสงเคลือบอยู่และถูกละลายออกไปกลายเป็นช่องเปิดออก และมีลักษณะลวดลายเหมือนกระจกต้นแบบทุกประการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.11 กระบวนการเปิดช่องออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



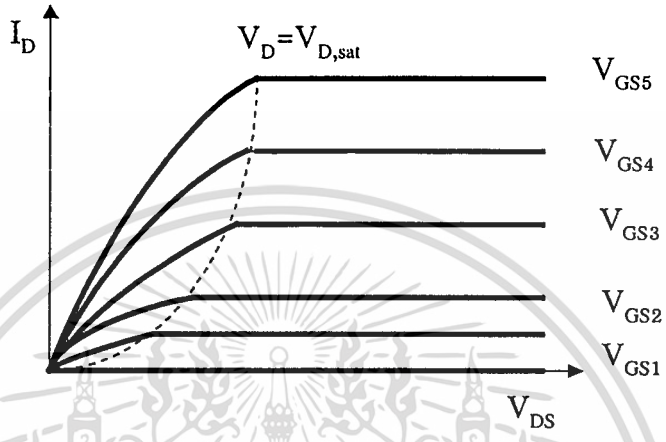
ภาพที่ 2.12 แสดงโฟโตมาส์ค สำหรับสร้างทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

2.4.1 คุณลักษณะของกระแสกับแรงดัน (I-V Characteristics)

การทำงานของมอสทรานซิสเตอร์สามารถแยกได้เป็น 2 ช่วง ดังแสดงในภาพ 2.13 คือ



ภาพที่ 2.13 แสดงกราฟแสดงคุณสมบัติ I-V ของมอสทรานซิสเตอร์ชนิด เอ็น-แชนแนลเอ็นฮานซ์เมนท์โหมด

1. ช่วงที่ไม่อิ่มตัว (ช่วงที่เป็นเชิงเส้น) ; Non –saturation or Linear region or Ohmic เมื่อ $V_D \le V_{Dsat}$ โดยที่ $V_{Dsat}=V_{GS}-V_T$

$$I_D = \frac{\beta_n}{2}\left[2\left(V_{GS}-V_T\right)V_D - V_D^2\right]$$

เมื่อ $\beta_n = k_n'\left(\frac{W}{L}\right)$ คือ Device Transconductance (Ampere/Volt^2)

W = ความกว้างของช่องทางเดินกระแส (Channel Width)

L = ความยาวของช่องทางเดินกระแส (Channel Length)

V_{GS} = แรงดันระหว่างเกทและซอส

V_T = แรงดันขีดเริ่ม (Threshold voltage) ของ N-Channel MOS

V_D = แรงดันระหว่างเดรนและซอส

และ $k_n' = \mu_n C_{ox}$ คือ Process Transconductance (Ampere/Volt^2)

μ_n = Electric mobility =550-600 cm^2/V-sec

$C_{ox} = \frac{\varepsilon_{ox}}{T_{ox}}$ = Oxide Capacitance (Farad/cm^2) ; $\varepsilon_{ox} = (3.9)(8.854\text{x}10^{-14})$ และ T_{ox} คือ ความหนาของเกทออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

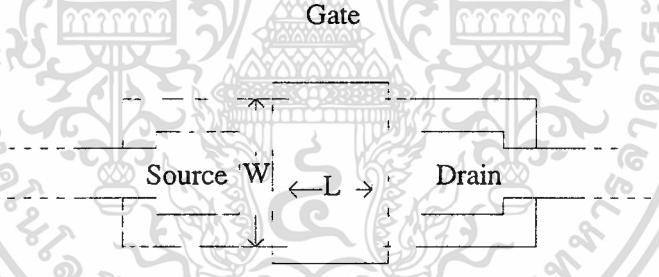
2. ช่วงอิ่มตัว ; Saturation regioin ; $V_{DS} > V_{Dsat}$

$$I_D = \frac{\beta_n}{2}\left(V_{GS} - V_T\right)^2\left[1 + \lambda\left(V_D - V_{Dsat}^2\right)\right]$$

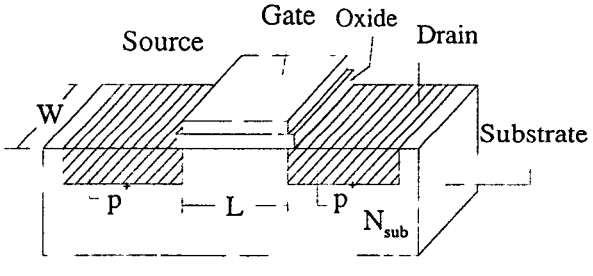
เมื่อ λ คือ Channel Length Modulation factor ; ($volt^{-1}$) หรือ แฟคเตอร์การเปลี่ยนแปลงของกระแสเดรนกับแรงดันเดรน-ซอส ซึ่งปกติแล้วมักให้ $\lambda = 0$ และ V_{Dsat} คือ แรงดันพินช์ออฟ (Pinch off voltage) ดังนั้น

$$I_D = \frac{\beta_n}{2}\left(V_{GS} - V_T\right)^2$$

ในทั้งสองกรณี จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่ากระแสเดรน นอกจากจะขึ้นอยู่กับค่าคงตัวจากกระบวนการสร้างเช่น $k'_n = \mu_n C_{ox}$ แล้วยังขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างทางเรขาคณิต คือ $\left(\frac{W}{L}\right)$ เมื่อ W คือความกว้างของช่องทางเดินกระแส (Channel Width) และ L คือความยาวของช่องทางเดินกระแส (Channel Length) ดังภาพที่ 2.17 และ 2.18 อีกด้วย และหากเป็น P-Channel MOS ก็ใช้สมการในลักษณะเดียวกัน (ใช้ Subscript p แทน n) พึงสังเกตว่า $k'_n \approx \frac{k'_n}{2}$ เพราะว่า อิเล็กตรอนมีความคล่องตัวมากกว่าโฮลประมาณ 2 เท่า $\left(\mu_n \approx 2\mu_p\right)$



ภาพที่ 2.14 แสดงภาพด้านบนของมอสทรานซิสเตอร์ เพื่อให้เห็นความกว้าง W และความยาว L ของช่องทางเดินกระแส



ภาพที่ 2.15 แสดงโครงสร้างอย่างง่ายของทรานซิสเตอร์ชนิดพีมอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 แรงดันขีดเริ่ม (Threshold voltage)

ในการออกแบบสร้าง MOS device ซึ่งในขณะนี้จะเน้นไปในลักษณะของวงจรรวมนั้น จะต้องคำนึงถึงการทำงานของ MOSFET แต่ละตัวให้สัมพันธ์กัน ดังนั้นจำเป็นต้องพิจารณารูปร่างทางเรขาคณิต และพารามิเตอร์ในการสร้างโดยพิจารณาจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_{DS} กับแรงดัน V_D ดังนี้

$$I_D = \mu \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{ox}}{T_{ox}} \frac{W}{L} \left[\frac{(V_{GS} - V_T)^2}{2} \right]$$

ซึ่งจะต้องกำหนดขนาดของ L , W และ T_{ox} ให้เหมาะสม รวมทั้งค่า V_T ซึ่งจะต้องกำหนดไว้ก่อนในขบวนการสร้างด้วยโดยที่

$$V_T = V_{FB} + \phi_F + \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{2q\varepsilon_{Si} N(\phi_F)}$$

โดยที่ $V_{FB} = 1.22 - \frac{2.22 \times 10^{-7}}{C_{OX}}$ คือแรงดันแถบราบ (flat band voltage)

C_{ox} คือ ค่าความจุไฟฟ้าที่เกทต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

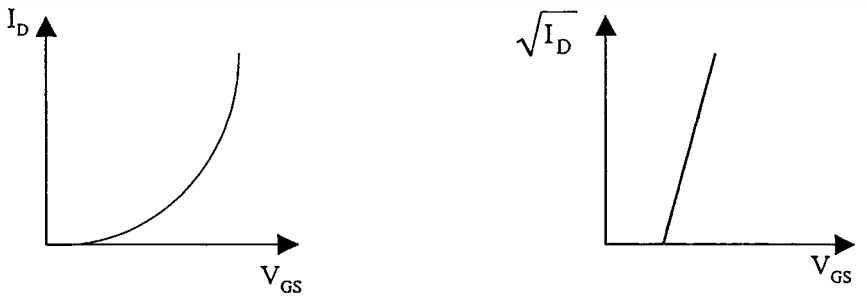
ε_{Si} มีค่า $11.7\varepsilon_0$

q มีค่า 1.6×10^{-19} คูลอมบ์ (C)

N คือจำนวนประจุในฐานรอง (ประจุที่ใช้ในการนำกระแสของ MOSFET ที่กำลังพิจารณาอยู่

ϕ_F คือค่าพลังงานจากระดับพลังงานของฐานรองถึงระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนหรือโฮลที่กำลังนำกระแสอยู่

เนื่องจากค่าของ V_T นั้นจะขึ้นกับค่าพารามิเตอร์หลายตัว จึงเป็นการไม่สะดวกในการควบคุมการกำหนดค่าของ V_T ทีละค่า ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการควบคุมการกำหนดค่าของ V_T จึงทำการจำลองแบบค่าของ V_T ที่ขึ้นกับพารามิเตอร์แต่ละตัวไว้เป็นกราฟความสัมพันธ์ ซึ่งจะทำให้สามารถเลือกค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เหมาะสมได้โดยง่ายดังรูป 2.16



ภาพที่ 2.16 กราฟแสดงแรงดันขีดเริ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

บทที่ 3

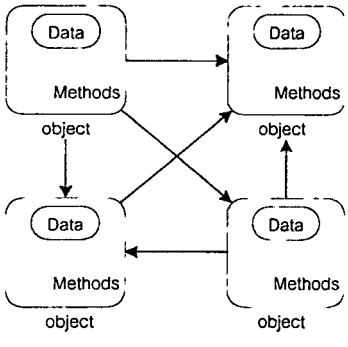
การออกแบบObject-Oriented แบบ Object Modeling Technique

3.1 ลักษณะพื้นฐานการโปรแกรมเชิงวัตถุ

การโปรแกรมเชิงวัตถุ (OOP ย่อมาจาก Object-Oriented Programming) เป็นวิธีการเขียนโปรแกรมแบบหนึ่งที่อ้างอิงแนวความคิดแบบเชิงวัตถุ (Object-Oriented หรือ OO) โดยจะมองโปรแกรมเป็นระบบที่สนใจ และมีออบเจคเป็นสมาชิกในโปรแกรม ในออบเจคหนึ่งจะประกอบไปด้วยส่วนโค้ดหรือรูทีน จัดการต่าง ๆ และส่วนของข้อมูลได้แก่ ตัวแปรในโปรแกรม

ในลักษณะการเขียนโปรแกรมแบบเดิมนั้น จะพยายามแบ่งงานทั้งหมดเป็นงานเล็ก ๆ แบ่งโปรแกรมออกเป็น โพรซีเยอร์หรือรูทีนย่อย ๆ เพื่อจัดการส่วนต่าง ๆ ในโปรแกรมดังนั้นคำว่าโปรแกรมในนิยามแบบเดิมจึงหมายถึงเซตของโพรซีเยอร์ เมื่อมองโปรแกรมเป็นโพรซีเยอร์แล้ว ขั้นตอนการออกแบบโปรแกรม จึงเป็นขั้นตอนของการจัดโครงสร้างของโพรซีเยอร์ต่าง ๆ ของโปรแกรมตามลำดับก่อนหลังจากใหญ่ไปหาเล็ก เรียกว่าการออกแบบจากบนลงล่าง (Waterfall design) ซึ่งจะเห็นว่ามีข้อบกพร่องคือ การเขียนโปรแกรมแบบเดิมไม่อาจแสดงการใช้งานข้อมูลสำคัญต่าง ๆ ที่มีในตัวโปรแกรมได้อย่างเป็นระเบียบ กล่าวคือ ทุก ๆ โพรซีเยอร์ในโปรแกรมมีสิทธิใช้งานข้อมูลทุกตัวเมื่อไรก็ได้ โดยที่ไม่ทราบอย่างแท้จริงว่าข้อมูลตัวใดมีความสำคัญกับโพรซีเยอร์หรือรูทีนใดบ้าง นั่นก็คือ การเขียนโปรแกรมแบบเดิมไม่สามารถควบคุมการใช้งานของข้อมูลในโปรแกรมได้

แต่สำหรับในการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุนั้น โปรแกรมจะมีนิยามเป็นเซตของออบเจคโดยที่ออบเจคถูกกำหนดให้เป็นหน่วยใหม่ที่สร้างขึ้นมา เพื่อรวมทั้งส่วนข้อมูลและโค้ดที่จัดการกับข้อมูลนั้นไว้ด้วยกัน เมื่อนิยามของการโปรแกรมเปลี่ยนไป การออกแบบโปรแกรมจึงกลายเป็นการออกแบบโครงสร้าง และความสัมพันธ์กันระหว่างออบเจคแต่ละตัวในโปรแกรมแทน



ภาพที่ 3.1 แสดงโครงสร้างของโปรแกรมที่เป็นวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 3.1 การเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุมองแต่ละส่วนของโปรแกรมเป็นออบเจค โดยที่แต่ละออบเจคมีวิธีการและข้อมูลของออบเจคแต่ละตัวนั้น ๆ เองนอกจากนี้ยังสามารถใช้วิธีการและข้อมูลของออบเจคตัวอื่น ๆ ได้

แนวความคิดแบบออบเจคโอเรียนเต็ดจะทำการกำหนดให้อยู่ภายใต้คุณสมบัติสำคัญอยู่ 3 ประการ คือ แอปสแตรกชัน (Abstraction), โพลิมอร์ฟิซึม (Polymorphism) และอินเฮียริแทนส์ (Inheritance)

3.1.1 แอปสแตรกชัน (Abstraction)

แอปสแตรกชัน หมายถึง การแทนคุณสมบัติที่สำคัญๆ ของบางสิ่งบางอย่างโดยนำรายละเอียดที่จำเป็นมา ออบเจคควรจะถูกแทนด้วยการรวมข้อมูล (Data) และ โพรเซส (Process) ที่เกี่ยวข้องเข้าไว้ด้วยกัน เพื่อเป็นตัวแทนของออบเจคนั้น ออบเจคจะถูกกำหนดโดยกลุ่มของแอทริบิวท์ (Attributes) ที่ใช้รวมกัน ใช้แทนออบเจคนั้น แอทริบิวท์ดังกล่าวนี้อาจมีชื่อเรียกว่าอินสแตนท์วาไรเอเบิล (Instance variable) หรือ คลาสวาไรเอเบิล (Class variable) นอกจากกลุ่มของแอทริบิวท์แล้ว ออบเจคสามารถจะกำหนดไปพร้อม ๆ กันกับกลุ่มของเมทธอร์ด (Method) ที่สามารถปฏิบัติการกับแอทริบิวท์ของออบเจคได้ โดยปกติแล้วแททริบิวตท์ของออบเจคจะไม่สามารถเข้าถึงได้จากภายนอก แต่เข้าถึงแอทริบิวท์เหล่านั้นได้โดยผ่านทางเมทธอร์ดของออบเจคนั้นเพียงอย่างเดียว

แนวความคิดการนำฟังก์ชันและข้อมูลเข้าด้วยกันนี้ เป็นสิ่งสำคัญของแนวความคิดในเรื่องชนิดของข้อมูลในการเขียนโปรแกรมทั่วไปเช่น ในขณะที่ 3 เป็นอินสแตนท์ของข้อมูลชนิดจำนวนเต็ม และจำนวนเต็มถูกกำหนดให้มีแอทริบิวท์หนึ่งตัวคือ ค่าของมันเอง แต่สามารถมีเมทธอร์ด (Operation) ทางคณิตศาสตร์ได้หลายตัว ตัวเลขจำนวนจริงที่ถูกกำหนดให้มีสิ่งต่าง ๆ ในลักษณะเดียวกัน แต่การเขียนโปรแกรมของการคูณสำหรับตัวเลขแบบโฟลตติ้งพอยต์ (Floation point) จะแตกต่างกับการคูณตัวเลขจำนวนเต็มธรรมดา ในลักษณะนี้เราจึงสามารถจัดการกับออบเจคที่มีความซับซ้อนได้

3.1.1.1 ออบเจค (Objects)

ออบเจค เป็นรูปแบบพื้นฐานของแนวความคิดแบบออบเจค ซึ่งออบเจคหมายถึงสิ่งใด ๆ ที่มีอยู่จริงและสามารถจับต้องได้หรือสิ่งใด ๆที่สามารถแสดงลักษณะใด ๆ ได้ โดยที่ลักษณะเหล่านั้นเป็นคุณสมบัติเฉพาะของแต่ละออบเจคที่สามารถแปรเปลี่ยนไปมาได้ตลอดการดงอยู่ของออบเจคเหล่านั้น หรือออบเจคคือตัวแปรของคลาส โดยมีรายละเอียดข้อมูล (Attributes) และขั้นตอนการทำงานหรือฟังก์ชันไว้ในออบเจคนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.2 เอ็นแคปซูเลชัน (Encapsulation)

เอ็นแคปซูเลชัน เป็นรายละเอียดของข้อมูลและวิธีการของออบเจค ที่ระบุให้ทราบถึงการที่จะได้มาซึ่งผลลัพธ์ โดยในระบบมีตัวประสานของออบเจคเป็นตัวจัดการให้ว่าต้องทำอะไรบ้าง ซึ่งการรวมกันของโครงสร้างระหว่างข้อมูลกับฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องจะทำให้ข้อมูลมีความมั่นคงขึ้น มีผลทำให้ไม่มีการเข้าถึงข้อมูลโดยตรงอีกต่อไป นั่นคือเป็นการทำการซ่อนข้อมูลที่เรียกว่าดาต้าไฮดิ้ง (Data Hiding) ซึ่งข้อดีของการทำเอ็นแคปซูเลชัน คือทำให้เราสามารถแบ่งระดับของการเข้าถึงข้อมูลได้ด้วยตัวเมทธอร์ดของตัวออบเจคเอง แต่มีข้อเสียคือทำให้ความเร็วในการทำงานของโปรแกรมลดลง

คุณสมบัติของเอ็นแคปซูเลชัน คือ

1. กำหนดขอบเขตที่ชัดเจนให้กับออบเจค
2. กำหนดส่วนของการอินเตอร์เฟส ซึ่งหมายความว่าออบเจคนั้นจะติดต่อกับออบเจคอื่นอย่างไร
3. ส่วนอิมพลีเม้นท์ไม่สามารถเข้าถึงข้อมูลนอกจากขอบเขตที่กำหนด

ตัวอย่างเช่น ออบเจคเกี่ยวกับการจัดส่งสินค้า คือ ORDER ประกอบด้วยรายละเอียด รหัสผู้ผลิต (CODE) รหัสสินค้า (ST_CODE) และจำนวนสินค้าที่จัดส่ง (SE_NUMBER) โดยได้กำหนดวิธีการไว้ว่า ให้สรุปยอดรวมการจัดส่งของผู้ผลิตแต่ละราย หากมีการจัดส่งของให้กับผู้ผลิตรายใดเพิ่มเติมในออบเจคของ ORDER จะมีการส่งข่าวสารสรุปยอดรวมการส่งของออกมาโดยอัตโนมัติ ซึ่งวิธีการนี้ผู้ที่ต้องการแสดงผลลัพธ์ไม่จำเป็นต้องระบุวิธีการแสดงผลอีก

3.1.1.3 คลาส (Class)

คลาส คือ กลุ่มของออบเจคที่แบ่งตามลักษณะเฉพาะและการใช้งาน หรือออบเจคที่มีคุณสมบัติพื้นฐานเหมือนกัน ซึ่งข้อมูลเชิงออบเจคที่เก็บอยู่ภายในคลาสจะเรียกว่าอินสแตนท์ (Instance) ของคลาส โดยที่อินสแตนท์จะเป็นส่วนขยายของคลาสและถูกเก็บอยู่ในส่วนของฐานข้อมูล ดังนั้นข้อมูลต่าง ๆที่เป็นตัวกำหนดคลาสจะถูกเข้าถึงและถ่ายทอดผ่านทางออบเจคของอินสแตนท์ และเมทธอร์ดของคลาสโดยคลาสจะห่อหุ้มคุณลักษณะทั้งหมดของออบเจคต่าง ๆ และกำหนดชนิดข้อมูล ที่บรรจุอยู่ในออบเจคพร้อมกับกำหนดเมทธอร์ดต่าง ๆ สำหรับการเข้าถึงข้อมูลไว้ด้วย

จากแนวความคิดในการปกปิดข้อมูลไม่ให้สามารถติดต่อโดยตรงจากภายนอกของออบเจค การติดต่อระหว่างออบเจคจึงเป็นการใช้แมสเสจติดต่อกัน ระหว่างออบเจคแมสเสจหนึ่งจะประกอบด้วย แอดเดรส (Address) ของออบเจคที่จะส่งแมสเสจนั้นไปถึง และคำสั่งที่ประกอบด้วยชื่อเมทธอร์ด และตามด้วยพารามิเตอร์ถ้ามี ถ้าออบเจคที่รับเมสเสจนั้นมีเมทธอร์ดที่ต้องทำการตอบข้อมูลบางตัวก็สามารถส่งกลับไปให้ออบเจคที่ส่งแมสเสจนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออบเจคต่าง ๆ จะกำหนดขึ้นในคลาส โดยผู้ใช้จะระบุถึงโครงสร้างข้อมูลและวิธีการจัดการข้อมูลข้อออบเจคต่าง ๆ ในคลาสหรือการกำหนดฟังก์ชันต่าง ๆ ที่กระทำกับข้อมูลนั่นเอง ดังนั้นคลาสมีความสำคัญสำหรับแนวความคิดนี้ ที่บอกถึงข้อมูลและฟังก์ชันที่จัดการกับออบเจค ตัวอย่างเช่น คำสั่งใน Java การนิยามรายละเอียดการถูกใช้งานของสมาชิกในคลาสสามารถทำได้ 2 แบบ คือ

แบบ Private หมายถึงข้อมูลและฟังก์ชันที่ระบุไว้ในส่วนนี้จะถูกใช้งานโดยฟังก์ชันที่ระบุไว้ใน Public ที่อยู่ภายในคลาสเดียวกันเท่านั้นเป็นการปกป้องไม่ให้โปรแกรมอื่น ๆ ที่อยู่ภายนอกคลาสมาใช้ข้อมูลได้คุณสมบัตินี้เรียกว่าการซ่อนข้อมูล (Data Hiding)

แบบ Public หมายถึงข้อมูลและฟังก์ชันต่าง ๆ ในส่วนของ Public จะสามารถใช้โดยคลาสที่อยู่ภายนอกได้

3.1.2 โพลิมอร์ฟิซึม (Polymorphism)

โพลิมอร์ฟิซึม คือ การที่คลาสหนึ่งๆ สามารถแปรเปลี่ยนไปได้หลายภาพแบบ ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมหรือสถานการณ์ในขณะนั้น ความสามารถอีกอย่างหนึ่งของโพลิมอร์ฟิซึมก็คือสามารถกำหนดการดำเนินการใหม่ให้กับตัวดำเนินการหรือแม้แต่ฟังก์ชันได้ เรียกว่าการทำโอเวอร์โหลดดิ้ง (Overloading) คือการเรียกใช้ฟังก์ชันหรือตัวดำเนินการเดิมให้ไปทำงานอีกอย่างหนึ่งได้ คุณลักษณะเด่นอีกอย่างหนึ่งของแนวความคิดออบเจคโอเรียนเต็ดจะแยกความแตกต่างของการใช้ชื่อที่เหมือนกันได้ด้วยจำนวนและชนิดของพารามิเตอร์

ตัวอย่างเช่นฟังก์ชันการพิมพ์สมมุติให้เรียกชื่อฟังก์ชัน PRINT เหมือนกัน ดังนี้

แบบที่ 1 : void print(char, width)

แบบที่ 2 : void print(int, width)

เมื่อมีการใช้ฟังก์ชัน PRINT( ) เข้ามาตัวแปรโปรแกรมจะทำหน้าที่เรียกฟังก์ชัน PRINT ที่อยู่ในภาพแบบตามชนิดของพารามิเตอร์ที่ส่งเข้ามา เช่น

ตัวอย่างแรก : PRINT(“OBJECT ORIENTED”, 20) จะนำแบบที่ 1 จากข้างบนมาใช้

ตัวอย่างที่สอง : PRINT(200000, 6) จะนำแบบที่ 2 จากข้างบนมาใช้

คำว่า โพลิมอร์ฟิซึม และโอเปอเรเตอร์โอเวอร์โหลดดิ้ง (Operator Overloading) คำทั้งสองนี้หมายถึงความสามารถที่จะใช้เครื่องหมายสัญลักษณ์เดียวกัน โดยมีความหมายที่แตกต่าง กันได้ เช่น เมื่อส่งแมสเสจ “บวก 5” ไปยังตัวเลขจำนวนเต็มและเลขจำนวนจริงออบเจคของตัวเลขแต่ละแบบทั้งสองก็จะทำการรันโปรแกรมในการบวกที่แตกต่างกัน ทั้งในแบบของจำนวนเต็มและจำนวนจริง แต่มันเป็นการง่ายที่จะใช้เครื่องหมาย + แทนความหมายทั้งสองรวมทั้งยังทำให้ภาษาโปรแกรมง่ายต่อการเรียนรู้และใช้งานอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 อินเฮียริแทนส์ (Inheritance)

อินเฮียริแทนส์ เป็นคุณสมบัติเด่นของแนวความคิดออบเจค คือ การสืบทอดคลาสโดยการทำการแปลงคุณสมบัติคลาสที่เคยใช้อยู่เดิม เรียกว่าซุปเปอร์คลาส (Superclass) หรือ เบสคลาส (Base Class) มาเป็นคลาสใหม่ที่สืบทอดมาจะรับคุณสมบัติของรายละเอียด และวิธีการต่าง ๆ จากคลาสเก่า เรียกว่าสับคลาส (Subclass) หรือดีไรฟ์คลาส (Derived Class) อินเฮียริแทนส์ เป็นการสร้างส่วนของคลาสใหม่ขึ้นมาโดยมีพื้นฐานมาจากคลาสเดิม แต่จะมีข้อมูลหรือมีฟังก์ชัน ที่พิเศษเป็นของตัวเองเพิ่มขึ้นมาจากคลาสเดิม ซึ่งก่อให้เกิดการแตกสายพันธ์ของออบเจค เป็นออบเจคใหม่ที่มีคุณสมบัติของออบเจคเดิมซ่อนอยู่

คลาสและอินสแตนท์ การขยายความของคลาสจะนำเสนอโดยกลุ่มของอินสแตนท์ที่มีคุณสมบัติเดียวกัน นั่นคือ ความสัมพันธ์ของคลาสแม่ (Superclass) และคลาสลูก (Subclass) จะถูกนำเสนอออกมา โดยผ่านทางอินสแตนท์

แอทริบิวท์ ซึ่งคลาสลูกจะสืบทอดแอทริบิวท์ต่าง ๆ จากคลาสแม่โดยตรง นั่นคือถ้ามีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่คลาสแม่แล้วคลาสลูกจะได้รับการเปลี่ยนแปลงโดยตรง การสืบทอดแอทริบิวท์ทั้งชื่อ ข้อจำกัด และความสัมพันธ์ต่าง ๆ ภายในแต่ละแอทริบิวท์ ซึ่งข้อจำกัดที่คลาสลูกได้รับนั้นอาจจะเป็นเพียงส่วนหนึ่งของคลาสแม่ หรือได้รับการถ่ายทอดมาทั้งหมด ซึ่งจะรวมทั้งการกำหนดค่า Default Value ด้วย

โอเปอเรชันจะถูกสืบทอดโดยคลาสลูก ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับ

1. คลาสลูกสามารถเพิ่มโอเปอเรชันเข้าไปได้โดยอัตโนมัติ
2. โอเปอเรชันของคลาสลูกสามารถเป็นส่วนขยายของคลาสแม่ได้

ข้อดีที่ได้จากคุณสมบัติการสืบทอด

1. การช่วยลดเวลาในการพัฒนาระบบ
2. ลดค่าใช้จ่ายผู้พัฒนา
3. ได้ระบบที่มีโครงสร้างเป็นระเบียบและปรับปรุงเปลี่ยนแปลงได้ง่าย

3.2 ออบเจคโมเดลลิ่ง (Object Modeling Technique : OMT)

ออบเจคโมเดลลิ่งหรือโอเอ็มที ประกอบด้วยโมเดลที่ใช้ในการอธิบายที่แตกต่างกัน 3 โมเดลด้วยกัน คือ

1. ออบเจคโมเดล (Object Model)
2. ไดนามิกโมเดล (Dynamic Model)
3. ฟังก์ชันนัลโมเดล (Functional Model)

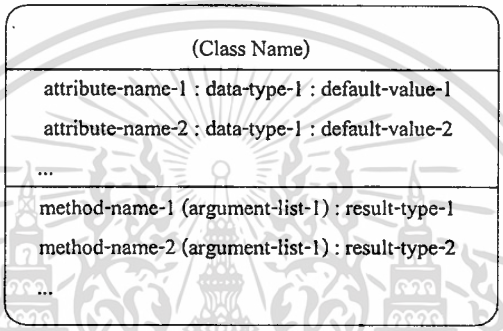
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 ออบเจคโมเดล (Object Model)

ออบเจคโมเดลเป็นโมเดลที่ใช้ในการอธิบายโครงสร้างของระบบ โดยแสดงออบเจคต่าง ๆ ความสัมพันธ์ระหว่างออบเจค แอทริบิวท์ (Attribute) และเมทธอร์ด (Method) ทั้งหมดของแต่ละ ออบเจค

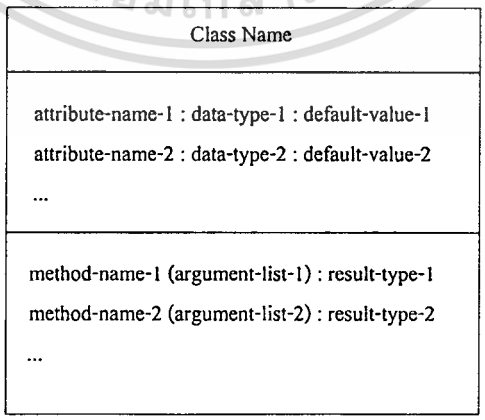
3.2.1.1 ออบเจคไดอะแกรม (Object Diagram)

แผนผังใช้แทนออบเจคคือ ออบเจคไดอะแกรม โดยใช้สัญลักษณ์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามุมมน ภายในรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามุมบนเขียนชื่อคลาสอยู่ภายในเครื่องหมายวงเล็บ บรรทัดถัดมาเป็นชื่อของออบเจค แอทริบิวท์และเมทธอร์ดทั้งหมดของออบเจค ดังแสดงในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 ออบเจคไดอะแกรม

แผนผังที่ใช้แทนคลาสคือรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ภายในรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะแบ่งเป็นสามส่วน ส่วนบนสุดจะเป็นชื่อของคลาส ส่วนที่สองตรงกลางเป็นแอทริบิวท์ และส่วนที่สามล่างสุดเป็นเมทธอร์ดซึ่งประกอบด้วยรายละเอียดปลีกย่อย เช่น รายการและชนิดของผลลัพธ์ อย่างไรก็ตามเมื่อนำมาเขียนแบบจำลองแล้ว ชื่อของแอทริบิวท์และเมทธอร์ดบางตัว อาจละไว้ได้ตามสมควร ดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 คลาสไดอะแกรม

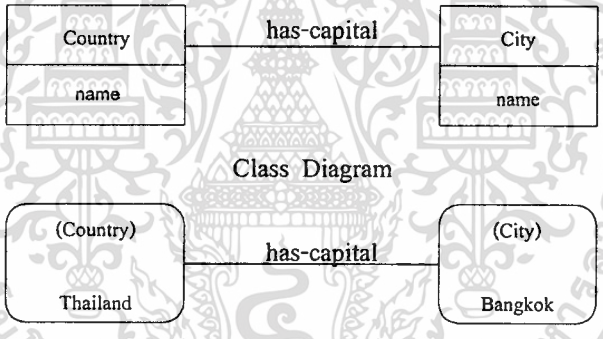
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.2 แอสโซซิเอชัน (Association)

สัญลักษณ์ของแอสโซซิเอชัน คือ เส้นตรงที่ลากต่อระหว่างคลาส ซึ่งใช้แสดงความสัมพันธ์ของออบเจคภายในคลาส มัลติพลิซิตี้ (Multiplicity) คือ การกำหนดจำนวนสมาชิกของคลาสหนึ่ง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสมาชิกของอีกคลาสหนึ่ง มีวิธีเขียนสัญลักษณ์บนแอสโซซิเอชันได้กับคลาส ดังนี้

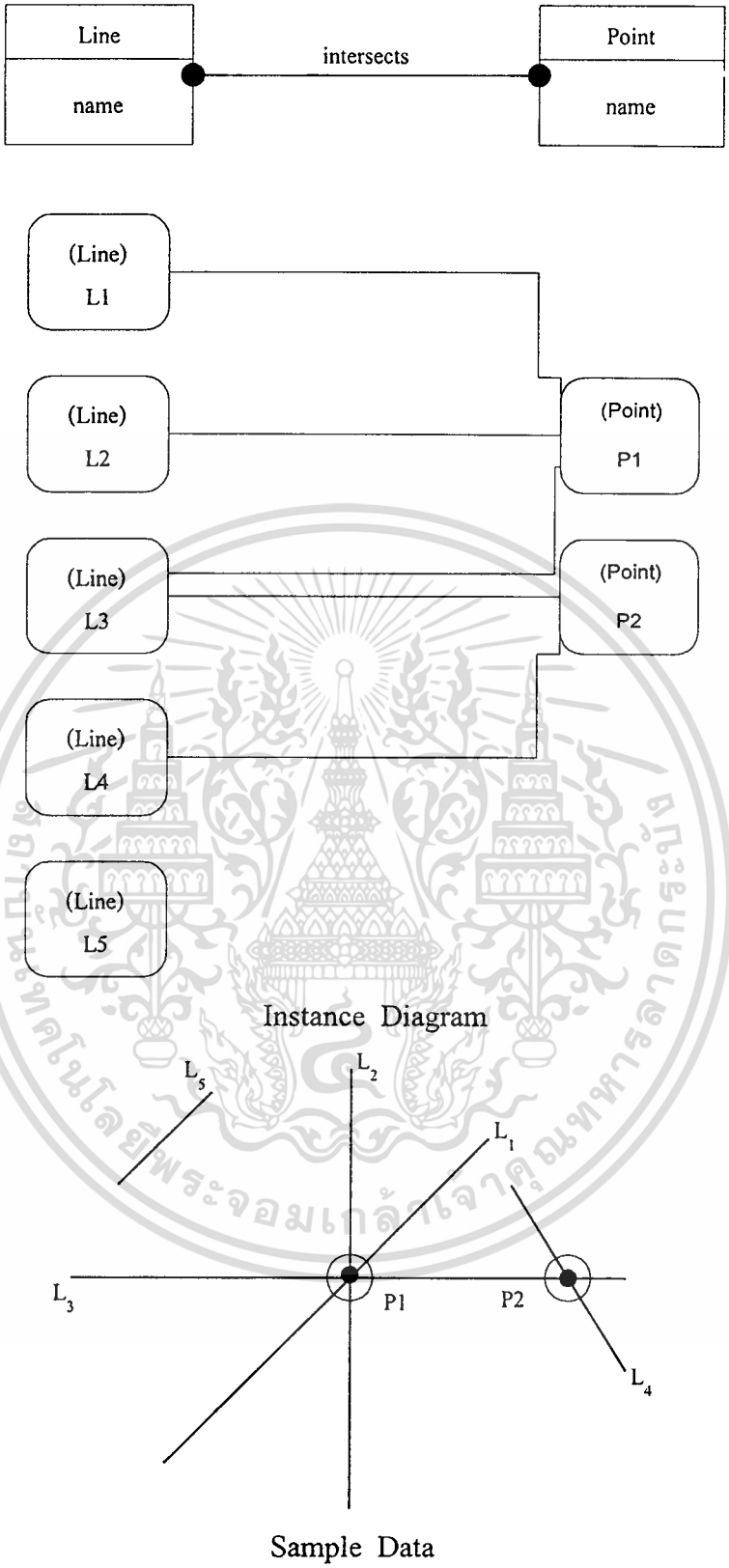
2 , 4	หมายถึง 2 หรือ 4
———	หมายถึง หนึ่ง
o———	หมายถึง ศูนย์หรือหนึ่ง
●———	หมายถึง ศูนย์หรือมากกว่าศูนย์

ดังตัวอย่างในภาพที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์แบบหนึ่งต่อหนึ่ง นั่นคือ ประเทศหนึ่งมีเมืองหลวงได้เพียงหนึ่งเมืองเท่านั้น ภาพที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์แบบมากต่อมาก นั่นคือจุด ๆ หนึ่งมีเส้นตรงตัดผ่านมากกว่าหนึ่งเส้น และเส้นตรงเส้นหนึ่งผ่านจุดตัดมากกว่าหนึ่งจุดหรือไม่ผ่านจุดใดเลย



ภาพที่ 3.4 Instance Diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

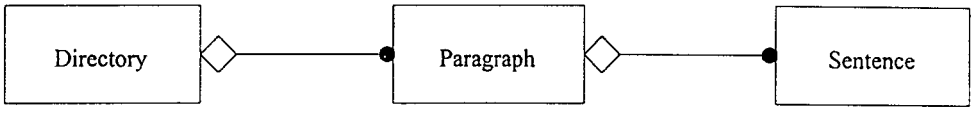


ภาพที่ 3.5 ตัวอย่างแสดงความสัมพันธ์แบบมากต่อมาก

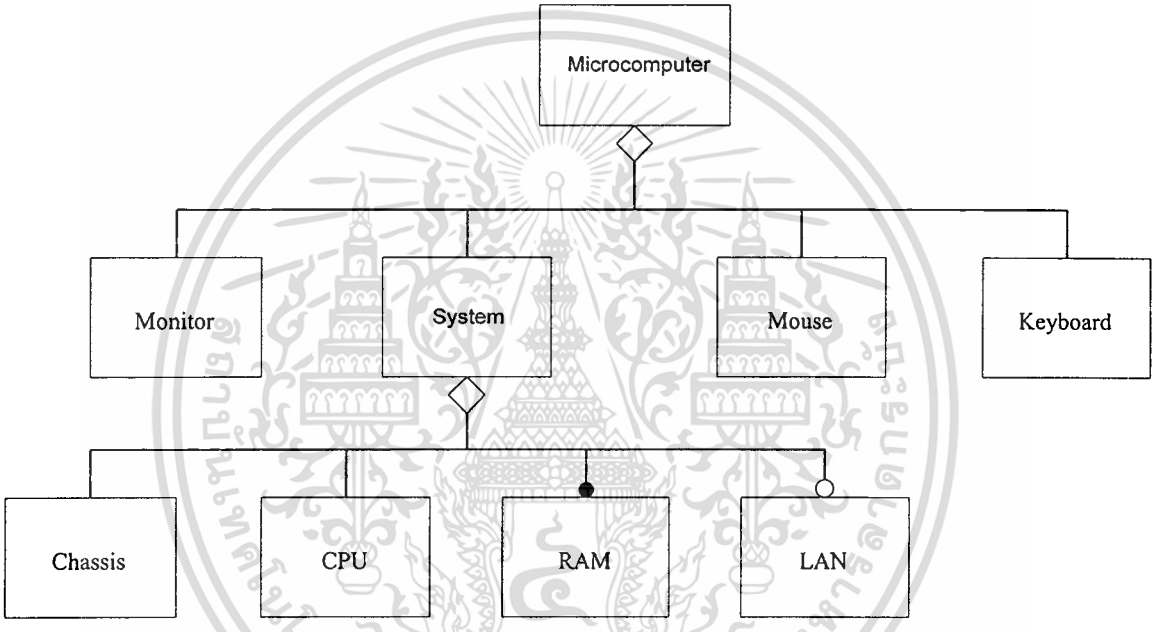
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.3 อะกรีเกชัน (Aggregation)

อะกรีเกชัน คือ ความสัมพันธ์แบบ “part-whole” หรือ “a-part-of” ใช้อธิบายความสัมพันธ์ในรูปแบบที่ออบเจคหนึ่งเป็นส่วนประกอบของอีกออบเจคหนึ่ง อะกรีเกชันใช้สัญลักษณ์สี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน



ภาพที่ 3.6 ตัวอย่างอะกรีเกชัน

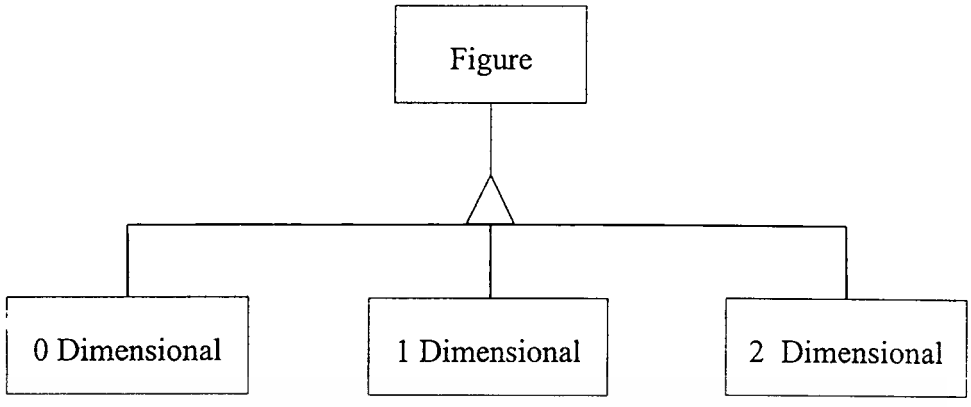


ภาพที่ 3.7 อะกรีเกชันหลายระดับ

3.2.1.4 เจนเนอรัลไลเซชัน (Generalization)

เจนเนอรัลไลเซชัน คือ ความสัมพันธ์ระหว่างคลาส ซึ่งคลาสใหม่ได้มาจากการดัดแปลงคลาสที่มีอยู่เดิมแล้ว โดยเรียกคลาสที่เป็นต้นแบบว่า ซุปเปอร์คลาส (Superclass) คลาสที่ดัดแปลงขึ้นมาใหม่เรียกว่า ซับคลาส (Subclass) สัญลักษณ์ที่ใช้คือรูปสามเหลี่ยม โดยยอดของสามเหลี่ยมชี้ไปที่ซุปเปอร์คลาสและฐานของสามเหลี่ยมสัมผัสกับแอสโซซิเอชัน ซึ่งติดต่อด้วยซับคลาส ดังตัวอย่างภาพที่ 3.8 เจนเนอรัลไลเซชันนี้อาจเรียกว่าความสัมพันธ์แบบ “a-kind-of” หรือ “is-a” แต่ละซับคลาสจะถ่ายทอดลักษณะทั้งหมดของซุปเปอร์คลาส และเพิ่มแอทริบิวท์, เมทธอร์ดที่เป็นลักษณะเฉพาะของซับคลาสนั้นเข้าไป

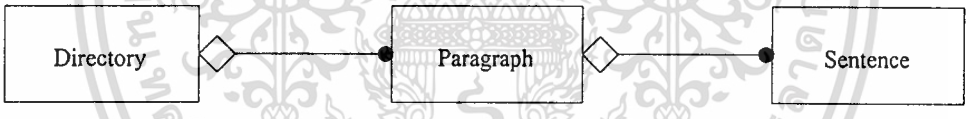
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.8 ตัวอย่างเจนเนอรัลไลเซชัน

3.2.1.5 เปรียบเทียบอะกรีเกชันกับแอสโซซิเอชัน

อะกรีเกชัน คือ รูปแบบพิเศษของเอสโซซิเอชัน ซึ่งมีแนวความคิดที่ไม่ได้แยกออบเจคออกจากกันอย่างเป็นอิสระ ถ้าออบเจคสองออบเจคมีความสัมพันธ์กันแบบออบเจคหนึ่งเป็นส่วนประกอบของอีกออบเจคหนึ่งโดยปกติแล้วออบเจคทั้งสองสามารถแยกออกจากกันเป็นอิสระต่อกันได้ อะกรีเกชันสามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้ดังรูปตัวอย่างในภาพที่ 3.9

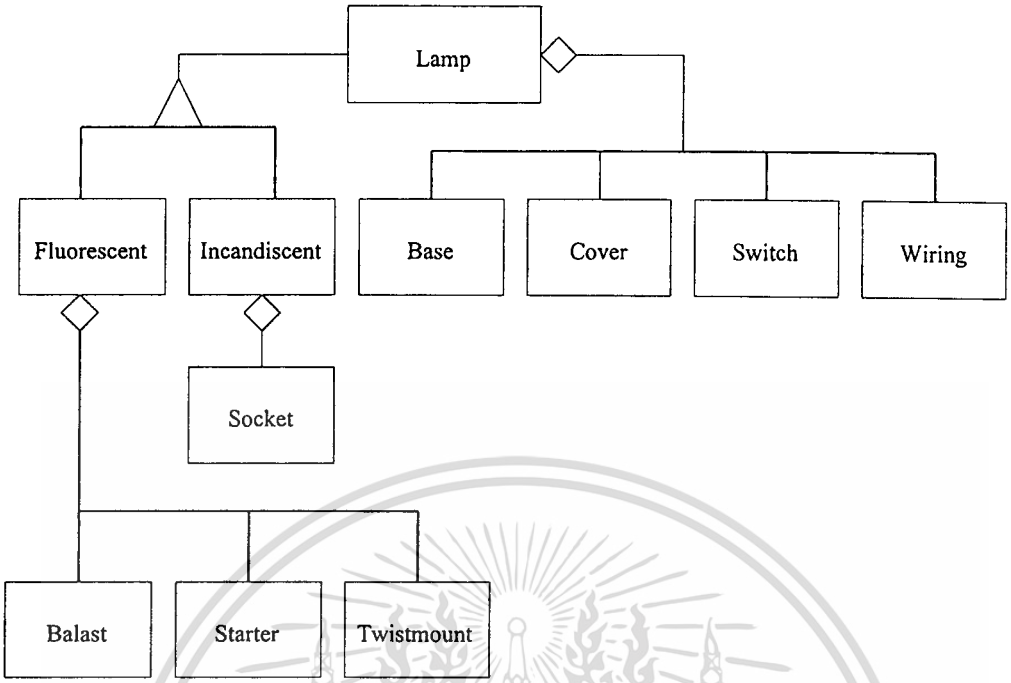


ภาพที่ 3.9 ตัวอย่างอะกรีเกชัน

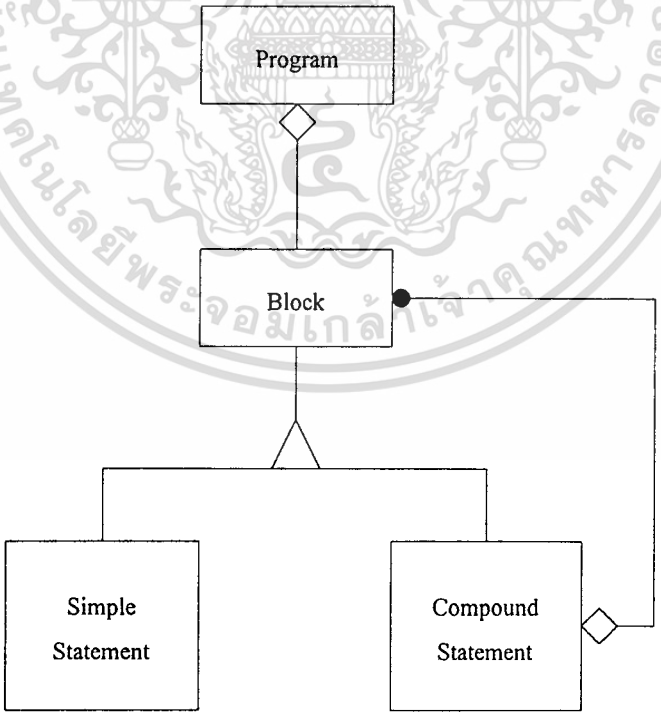
3.2.1.6 เปรียบเทียบอะกรีเกชันกับเจนเนอรัลไลเซชัน

อะกรีเกชันมักจะอ้างถึงออบเจคที่แตกต่างกัน แต่มีความสัมพันธ์กันในแง่ที่ออบเจคหนึ่งเป็นส่วนประกอบของอีกออบเจคหนึ่ง ส่วนเจนเนอรัลไลเซชันมักจะอ้างถึงคลาสโดยออบเจคที่เป็นสมาชิกของซับคลาสจะเป็นสมาชิกของซุปเปอร์คลาสด้วยเสมอ ดังนั้นบางครั้งจึงเรียกความสัมพันธ์แบบอะกรีเกชันว่า “and” และเรียกความสัมพันธ์แบบเจนเนอรัลไลเซชันว่า “or” อะกรีเกชันสามารถเป็นได้ทั้งแบบอะกรีเกชันคงที่ (Fixed aggregation), อะกรีเกชันเปลี่ยนแปลงได้ (Variable aggregation) หรือรีเคอซีพอะกรีเกชัน (Recursive aggregation) ตัวอย่างเช่นในภาพที่ 3.10 คืออะกรีเกชันแบบคงที่ ส่วนตัวอย่างของ Company ในภาพที่ 3.9 คือ อะกรีเกชันแบบเปลี่ยนแปลงได้ เพราะในบริษัทมีได้หลายฝ่ายและแต่ละฝ่ายมีได้หลายแบบ ตัวอย่างของ รีเคอซีพอะกรีเกชันคือ สมาชิกของอะกรีเกชันมีชนิดเป็นแบบเดียวกันกับอะกรีเกชันนั้น ตัวอย่างเช่น โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในภาพที่ 3.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.10 แสดงความสัมพันธ์อะกรีเกชันกับเจนเนอรัลไลเซชัน



ภาพที่ 3.11 รีเคอร์ซีพอะกรีเกชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ไดนามิกโมเดล (Dynamic Model)

โครงสร้างแบบคงที่ทำให้เราสามารถเข้าใจระบบได้ง่ายที่สุดเป็นอันดับแรก ซึ่งโครงสร้างนั้นก็คือโครงสร้างของออบเจคและความสัมพันธ์ระหว่างออบเจค ในช่วงเวลาเดียวกันเราพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นกับออบเจคและความสัมพันธ์ระหว่างออบเจคตลอดเวลา ลักษณะของระบบซึ่งเกี่ยวข้องกับเวลาและการเปลี่ยนแปลงคือไดนามิกโมเดล ซึ่งตรงกันข้ามกับความคงที่หรือออบเจคโมเดล ไดนามิกโมเดลอธิบายลำดับของโอเปอเรชันที่เกิดขึ้นเพื่อตอบสนองต่อสิ่งเร้าจากภายนอกระบบโดยไม่คำนึงถึงว่าโอเปอเรชันนั้นทำอะไร ทำกับอะไร หรือโอเปอเรชันถูกสร้างขึ้นอย่างไร แนวความคิดหลักของไดนามิกโมเดลคืออีเวนท์ (Event) ซึ่งแทนสิ่งเร้าจากภายนอกระบบและสเตท (state) ซึ่งแทนค่าของออบเจค

ออบเจคโมเดลอธิบายรูปแบบที่เป็นไปได้ของออบเจค แอทริบิวท์ และลิงค์ซึ่งมีอยู่ในระบบ ค่าของแอทริบิวท์และลิงค์ที่อยู่ในออบเจคเรียกว่า สเตท ตลอดเวลาออบเจคมีการกระตุ้นซึ่งกันและกันผลลัพธ์คือลำดับของการเปลี่ยนแปลงสเตท สิ่งเร้าจากออบเจคหนึ่งถึงอีกออบเจคหนึ่งคืออีเวนท์ การตอบสนองอีเวนท์ขึ้นกับสเตทของออบเจคขณะกำลังรับอีเวนท์นั้น สเตทไดอะแกรมคือแผนผังเนตเวอร์คของสเตทและอีเวนท์ ในทำนองเดียวกันออบเจคไดอะแกรมคือแผนผังเนตเวอร์คของคลาสกับความสัมพันธ์ของคลาส ไดนามิกโมเดลประกอบด้วยสเตทไดอะแกรมหลายสเตทไดอะแกรม โดยสเตทไดอะแกรมหนึ่งสำหรับคลาส ๆ หนึ่ง ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงหลาย สเตทไดอะแกรม โดยสเตทไดอะแกรมหนึ่งสำหรับคลาสหนึ่ง ๆ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมที่สำคัญและแสดงกิจกรรมของระบบทั้งระบบ

3.2.2.1 อีเวนท์ (Event)

อีเวนท์คือบางสิ่งบางอย่างที่เกิดขึ้น ณ เวลาหนึ่ง อีเวนท์ไม่มีช่วงเวลา ถึงแม้ว่าจะไม่มีอะไรเกิดขึ้นทันทีทันใดก็ตาม อีเวนท์หนึ่งอาจจะเกิดหลังอีเวนท์สองอีเวนท์อาจจะไม่มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกันเลย เช่น เที่ยวบิน 123 ออกจากชิคาโกก่อนหรือหลังเที่ยวบิน 456 ถึงโรม เรียกสองอีเวนท์ที่ไม่เกี่ยวข้องกันนี้พ้องกัน(Concurrent) ซึ่งไม่มีผลกระทบซึ่งกันและกันในโมเดลของระบบจะต้องไม่เขียนลำดับของอีเวนท์เพราะว่ามันสามารถเกิดขึ้นในลำดับใดก็ได้ อีเวนท์เป็นวิธีหนึ่งของการส่งผ่านข้อมูลจากออบเจคหนึ่งไปยังออบเจคอื่นซึ่งไม่เหมือนกับการเรียกซับรูทีน (Subroutine) ที่มีการส่งค่ากลับคืน ในความเป็นจริงออบเจคมีอยู่พร้อม ๆ กัน ออบเจคที่ส่งอีเวนท์ถึงอีกออบเจคหนึ่งอาจจะคาดหวังที่จะได้รับคำตอบ แต่คำตอบก็คืออีเวนท์อีกอีเวนท์หนึ่งที่แยกกันอยู่ภายใต้การควบคุมของออบเจคที่สองซึ่งอาจจะเลือกส่งหรือไม่ส่งคำตอบก็ได้ ทุก ๆ อีเวนท์คือสิ่งที่เกิดขึ้นไม่ซ้ำกันเรารวมกลุ่มของอีเวนท์เป็นอีเวนท์คลาสและตั้งชื่อเพื่อระบุโครงสร้างและพฤติกรรม ซึ่งโครงสร้างจะเป็นแบบระดับชั้น (Hierarchical) เช่นเดียวกับโครงสร้างของออบเจคคลาส ตัวอย่างเช่น เที่ยวบิน 123 จากชิคาโก และเที่ยวบิน 456 จากโรมคือสมาชิกของอีเวนท์คลาส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

"เที่ยวบินขึ้น" อีเวนท์คลาสมีแอทริบิวท์ระบุข้อมูลที่นำไปเช่นเดียวกับข้อมูลในออบเจค โดยเขียนแทนแอทริบิวท์ในวงเล็บหลังชื่อของอีเวนท์คลาส ตัวอย่างเช่น

airplane flight departs (airline , flight number . city)

input string entered (text)

phone receive lifted

อีเวนท์รวมเงื่อนไขที่ผิดพลาดไว้ด้วยเช่นเดียวกับอีเวนท์ที่เกิดขึ้นแบบปกติ ตัวอย่างเช่น การจราจรติดขัด อีเวนท์ที่ผิดพลาดไม่มีอะไรแตกต่างไปจากอีเวนท์ปกติเพียงแต่บอกว่ามันคือข้อผิดพลาด

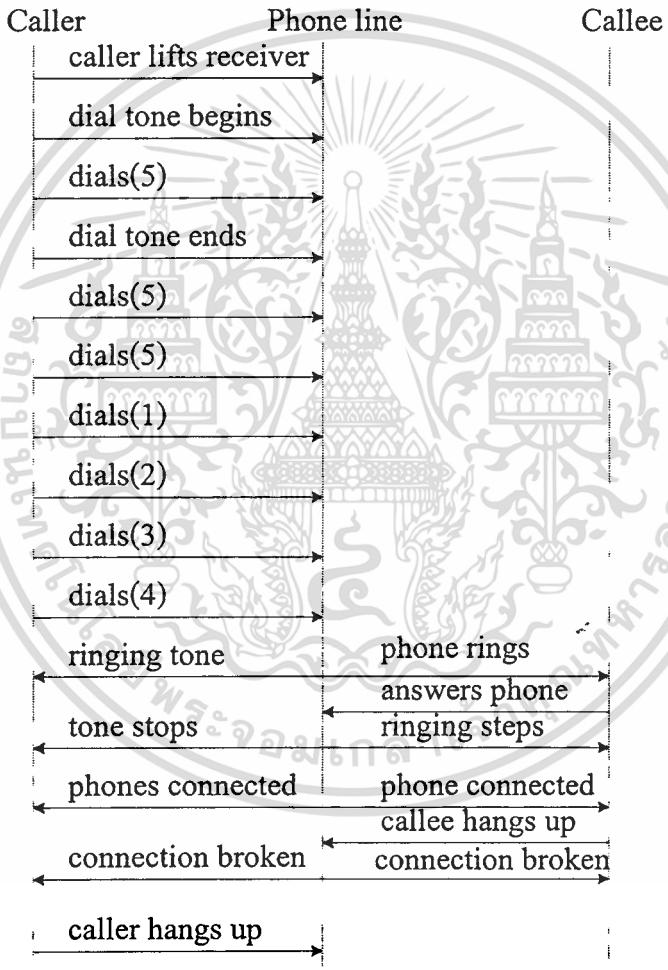
ภาพเหตุการณ์ (Senarios) คือลำดับของอีเวนท์ที่เกิดขึ้นในเวลาที่ระบบกำลังทำงาน ขอบเขตของภาพเหตุการณ์สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งอาจจะรวมทุกอีเวนท์ในระบบหรืออาจจะรวมเฉพาะบางออบเจคในระบบ ภาพเหตุการณ์สามารถเป็นรายการในอดีตของการทำงานของระบบ หรือแนวความคิดที่ได้จากประสบการณ์ ในการทำงาน ตัวอย่างภาพเหตุการณ์สำหรับการใช้โทรศัพท์ในภาพที่ 3.12 ซึ่งแสดงเฉพาะอีเวนท์ที่มีผลกระทบกับ phone line เท่านั้น

caller lifts receiver
dial tone begins
caller dials digit(5)
dial tone ends
caller digit(5)
caller dial digit(5)
caller dial digit(1)
caller dial digit(2)
caller dial digit(3)
caller dial digit(4)
called phone begins ringing
ringing tone appears in calling phone
called party answers
called phone stops ringing
ring tone disappears in calling phone
phone are connected
called party hangs up
phones are disconnected
caller hangs up

ภาพที่ 3.12 ภาพเหตุการณ์สำหรับ phone call

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ละอีเวนท์ส่งผ่านข้อมูลจากออบเจคหนึ่งไปยังออบเจคอื่น ตัวอย่างเช่น dial tone begins ส่งสัญญาณจากโทรศัพท์ไปยังผู้เรียก ขั้นตอนต่อไปหลังจากเขียนภาพเหตุการณ์คือการกำหนดออบเจคที่เป็นผู้รับและผู้ส่งของแต่ละอีเวนท์ ลำดับของอีเวนท์และออบเจคสามารถแสดงได้ทั้งสองแบบในภาพเหตุการณ์ที่ขยายเพิ่มขึ้นเรียกว่าแผนผังทางเดินของเหตุการณ์ (Event Trace Diagram) ซึ่งแสดงออบเจคแต่ละออบเจคด้วยเส้นดิ่งและแต่ละอีเวนท์ด้วยลูกศรในแนวนอนจากออบเจคผู้ส่งถึงออบเจคผู้รับ เริ่มจากบรรทัดแรกจนถึงบรรทัดสุดท้ายตามระยะเวลา โดยช่องว่างระหว่างลูกศรไม่มีความหมายอะไรเพียงแต่เป็นลำดับของอีเวนท์เท่านั้น ตัวอย่างทางเดินของเหตุการณ์สำหรับ phone call ดังแสดงในภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.13 แสดงทางเดินของเหตุการณ์สำหรับ phone call

3.2.2.2 สเตท (State)

สเตทคือนามธรรมของค่าแอทริบิวท์และลิงค์ของออบเจคซึ่งรวมค่าต่าง ๆ เข้าด้วยกันเป็นสเตท โดยรวมค่าเป็นกลุ่มตามคุณสมบัติที่มีอิทธิพลกับพฤติกรรมส่วนใหญ่ของออบเจค ตัวอย่างเช่น สเตทของธนาคารคือสามารถชำระหนี้ได้หรือไม่สามารถชำระหนี้ได้ซึ่งขึ้นกับทรัพย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สินของธนาคาร สเตทกำหนดการตอบสนองของออบเจคต่ออีเวนท์ที่เข้ามายังออบเจคซึ่งการตอบสนองอาจจะเปลี่ยนแปลงตามค่าของแอทริบิวท์ แต่การตอบสนองจะเป็นแบบเดียวกันสำหรับทุก ๆ ค่า ของข้อมูลในสเตทเดียวกันและอาจแตกต่างกันสำหรับค่าที่อยู่สเตทที่ต่างกันการตอบสนองของออบเจคต่ออีเวนท์อาจจะรวมแอคชันหรือการเปลี่ยนสเตทโดยออบเจคตัวอย่างเช่น ถ้าตัวเลขถูกหมุนในสเตท Dial tone และออบเจค phone line ออกจากสเตท Dial tone เข้าสู่สเตท Dialing ถ้าออบเจค receiver เข้ามาแทนที่ ออบเจค phone line จะตายไปและเข้าสู่สเตท Idle สเตทอยู่ตรงกลางระหว่างสองอีเวนท์ซึ่งเป็นอีเวนท์ที่ออบเจคได้รับ อีเวนท์แทนจุดในเวลานั้น สเตทแทนช่วงระยะเวลา ตัวอย่างเช่น หลังจากยกหูฟังและก่อนหมุนตัวเลขตัวแรก phone line จะอยู่ในสเตท Dial tone สเตทของออบเจคขึ้นกับลำดับของอีเวนท์ซึ่งออบเจคได้รับ ในเกือบทุกกรณีอีเวนท์ในอดีตจะถูกเก็บไว้โดยอีเวนท์ที่ตามมา ตัวอย่างเช่น อีเวนท์ซึ่งเกิดขึ้นก่อนวางหูฟังไม่มีผลกับพฤติกรรมในอนาคต สเตท Idle ลืมอีเวนท์ที่ได้รับก่อนอีเวนท์วางหู สเตทที่มีช่วงระยะเวลามักเกิดขึ้นในช่วงเวลาหนึ่ง สเตทที่เกี่ยวข้องกับการกระทำที่ต่อเนื่อง เช่น การทำให้เสียงโทรศัพท์ดัง หรือสเตทเกี่ยวข้องกับแอคติวิตี้(Activity) ที่ต้องใช้เวลาทำให้เสร็จสมบูรณ์ เช่น เที่ยวบินจากชิคาโกถึงซานฟรานซิสโก อีเวนท์และสเตทเป็นสิ่งที่คู่กันอีเวนท์หนึ่งจะแบ่งแยกสองสเตทและสเตทหนึ่งจะแบ่งแยกสองอีเวนท์ สเตทมักเกี่ยวข้องกับค่าของออบเจคซึ่งตรงกับเงื่อนไขใดเงื่อนไขหนึ่ง ค่าของแอทริบิวท์แต่ละค่ากำหนดสเตทที่แตกต่างกัน

เงื่อนไข (Condition) คือบูลลีนฟังก์ชัน (Boolean Function) ของค่าออบเจค เช่น "อุณหภูมิต่ำกว่าจุดแข็ง" เงื่อนไขจะเป็นจริงตามระยะเวลา เช่น "อุณหภูมิต่ำกว่าจุดแข็งจาก 15 พ.ย. 1921 จนกระทั่ง 3 มี.ค. 1922 " การแยกเงื่อนไขจากอีเวนท์ซึ่งไม่มีช่วงของระยะเวลาเป็นเรื่องที่สำคัญ สเตทสามารถกำหนดในรูปเงื่อนไขได้ ในทางกลับกันสเตทคือเงื่อนไข เงื่อนไขสามารถใช้เป็นเสมือนผู้คุมทรานซิชัน (Transition) ทรานซิชันที่มีผู้คุมนี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีอีเวนท์เกิดขึ้น และอีเวนท์เกิดขึ้นได้ก็เพราะเงื่อนไขเป็นจริง เช่น "เมื่อคุณออกจากบ้านในตอนเช้าถ้าฝนตก (เงื่อนไข) ดังนั้นคุณกางร่ม (สเตทถัดไป)" เงื่อนไขที่คุมทรานซิชันแสดงในรูปของนิพจน์บูลลีน ภายในวงเล็บตามหลังอีเวนท์

3.2.2.3 โอเปอเรชัน (Operation)

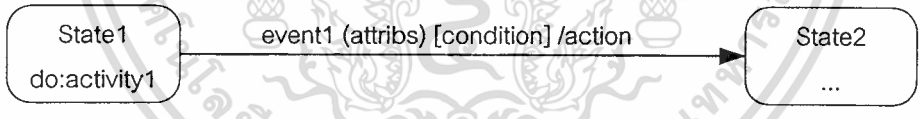
สเตทไดอะแกรมจะมีประโยชน์เพียงเล็กน้อยเท่านั้นถ้าใช้อธิบายเฉพาะรูปแบบของอีเวนท์ การอธิบายพฤติกรรมของออบเจคต้องกำหนดว่าออบเจคตอบสนองต่ออีเวนท์อย่างไร การที่โอเปอเรชันถูกกระทำก็เพื่อตอบสนองต่อสเตทหรืออีเวนท์ แอคติวิตี้คือโอเปอเรชันซึ่งต้องใช้เวลาเพื่อให้การกระทำสมบูรณ์ แอคติวิตี้เกี่ยวข้องกับสเตท แอคติวิตี้รวมโอเปอเรชันทั้งแบบต่อเนื่องและแบบเรียงลำดับ ตัวอย่างโอเปอเรชันแบบต่อเนื่องและแบบเรียงลำดับ ตัวอย่างโอเปอเรชันแบบต่อเนื่องเช่น ภาพบนจอโทรทัศน์ สัญลักษณ์ของแอคติวิตี้ตามหลัง "do:" ภายในสัญลักษณ์รูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่องสี่เหลี่ยมของสเตท เช่น "do: A" โดยแอคติวิตี้ A จะเริ่มทำงานเมื่อเข้าสู่สเตทและจะสิ้นสุดการทำงานเมื่อออกจากสเตท สเตทอาจจะควบคุมลำดับแอคติวิตี้ เช่น การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ซึ่งจะกระทำจนกว่าจะสมบูรณ์ หรือจนกว่าจะถูกเบรคทำให้ต้องหยุดการกระทำก่อนเวลา แอคชัน (Action) คือ โอเปอเรชันชั่วขณะ แอคชันเกี่ยวข้องกับอีเวนท์ แอคชันแทนโอเปอเรชันซึ่งช่วงระยะเวลาไม่มีความสำคัญในสเตทไดอะแกรม ความจริงแล้วโอเปอเรชันชั่วขณะจริง ๆ ไม่มีแต่จำลองโอเปอเรชันเป็นแอคติวิตี้ซึ่งมีอีเวนท์เริ่มต้น อีเวนท์จบ และอีเวนท์ภายในช่วงระยะเวลา เขียนชื่อของแอคชันตามหลังชื่อของอีเวนท์ โดยหน้าชื่อของแอคชันมีเครื่องหมาย "/"

3.2.2.4 สเตทไดอะแกรม (State Diagram)

สเตทไดอะแกรมเกี่ยวข้องกับอีเวนท์และสเตท อีเวนท์ทำให้เกิดการเปลี่ยนสเตท ซึ่งเรียกการเปลี่ยนสเตทว่าทรานสิชัน (Transition) สเตทไดอะแกรมคือกราฟที่มีสเตทเป็นโหนด (Node) และเส้นที่ลากต่อระหว่างโหนดคือทรานสิชัน โดยเขียนชื่อของอีเวนท์ที่สเตทนั้นได้รับกำกับบนทรานสิชัน สเตทใช้สัญลักษณ์เป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมมน และเขียนชื่อของสเตทภายในรูปสี่เหลี่ยมหรือจะไม่เขียนก็ได้โดยเขียนด้วยตัวอักษรทึบ เส้นลูกศรลากออกจากสเตทหนึ่งไปยังสเตทเป้าหมายแทนทรานสิชัน เขียนชื่อของอีเวนท์บนทรานสิชัน ซึ่งอาจจะมีแอทริบิวท์เขียนอยู่ภายในวงเล็บตามหลังหรือไม่มีก็ได้ ถ้ามีเงื่อนไขจะเขียนภายในเครื่องหมายวงเล็บใหญ่ต่อจากชื่อของอีเวนท์ และเขียนชื่อของแอคชันต่อหลังโดยมีเครื่องหมาย "/" นำหน้าชื่อแอคชัน ส่วนชื่อ ของแอคติวิตี้จะเขียนอยู่ในรูปกล่องสเตทคำสั่ง "do:" ดังแสดงในภาพที่ 3.14

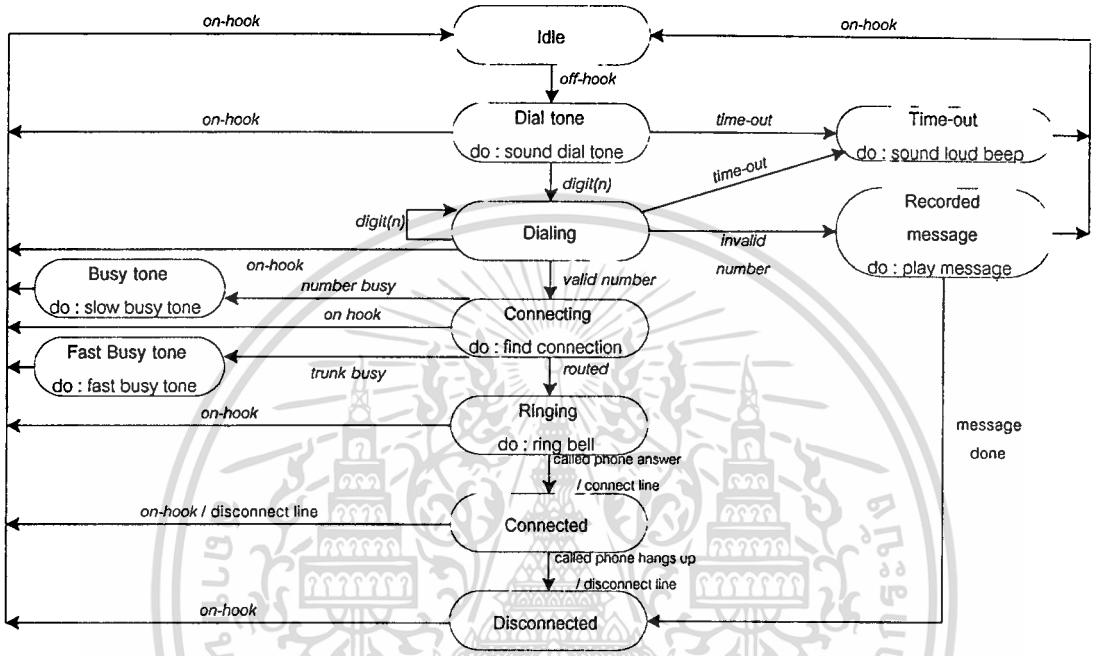


ภาพที่ 3.14 แสดงสเตทไดอะแกรม

สเตทไดอะแกรมกำหนดลำดับของสเตทซึ่งเป็นผลมาจากลำดับของอีเวนท์ ลำดับของอีเวนท์ตรงกับเส้นทางบนกราฟ สเตทไดอะแกรมอธิบายพฤติกรรมของแต่ละออบเจคคลาส เมื่อทุกสมาชิกของคลาสมีพฤติกรรมแบบเดียวกัน สมาชิกจะใช้สเตทไดอะแกรมร่วมกันเช่นเดียวกับที่ใช้ลักษณะของคลาสร่วมกัน เพียงแต่ว่าแต่ละออบเจคจะมีสเตทเป็นของตนเองและลำดับของอีเวนท์ได้รับจะแตกต่างกัน แต่ละออบเจคจะเป็นอิสระต่อกันและมีการกระทำในตำแหน่งของตนเอง สเตทไดอะแกรมสามารถแทนวงรอบแบบสั้น ๆ (One-shot lifecycle) หรือแบบต่อเนื่องได้ ไดอะแกรมแบบวงรอบสั้น ๆ จะมีสเตทเริ่มต้น (Initial) และสเตทสุดท้าย (Final) สเตทเริ่มต้นสร้างออบเจคแต่สุดท้ายทำลายออบเจค สัญลักษณ์ของสเตทเริ่มต้นเป็นวงกลมทึบลูกตาวัว (Bull's eye ⊙) โดยจะกำหนดชื่อเพื่อระบุเงื่อนไขการเริ่มต้นที่แตกต่างของเงื่อนไขการจบได้ เราสามารถที่จะมองไดอะแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของวงรอบสั้น ๆ เป็นซับรูทีนของสเตทไดอะแกรมได้ ซึ่งสามารถจะอ้างถึงได้หลายแห่งในไดอะแกรม ไดนามิกโมเดลคือสเตทไดอะแกรมหลาย ๆ ไดอะแกรมรวมกัน ออบเจคโมเดลแสดงโครงสร้างของระบบแบบคงที่ ขณะที่ไดนามิกโมเดลแสดงการควบคุมโครงสร้างของระบบ สเตทไดอะแกรมเหมือนกับออบเจคคลาสที่เป็นรูปแบบอธิบายรายละเอียดทั้งหมดและภาพเหตุการณ์เหมือนกับเป็นสมาชิกของไดนามิกโมเดล



ภาพที่ 3.15 แสดงสเตทไดอะแกรมสำหรับ phone call

3.2.3 ฟังก์ชันนัลโมเดล (Functional Model)

ฟังก์ชันนัลโมเดลแสดงผลลัพธ์การคำนวณโดยไม่ได้กำหนดว่าคำนวณอย่างไรและเมื่อไร ฟังก์ชันนัลโมเดลกำหนดความหมายของโอเปอเรชันในออบเจคโมเดล และแอคชันในไดนามิกโมเดล รวมทั้งข้อบังคับในออบเจคโมเดล โปรแกรมแบบไม่มีการโต้ตอบ เช่น คอมไพเลอร์มีไดนามิกโมเดลเพียงเล็กน้อยเพราะจุดมุ่งหมายของโปรแกรมคือฟังก์ชันการคำนวณซึ่งฟังก์ชันนัลโมเดลหลักโปรแกรมเช่นนี้ ออบเจคโมเดลสำคัญสำหรับปัญหาแบบโครงสร้างข้อมูล โปรแกรมแบบที่มีการโต้ตอบหลายโปรแกรมก็มีฟังก์ชันนัลโมเดลที่สำคัญด้วยเช่นกัน ตรงกันข้ามกับฐานข้อมูลมักจะมีฟังก์ชันนัลโมเดลเพียงเล็กน้อยเมื่อจุดประสงค์คือการเก็บและการจัดข้อมูลไม่ใช่การเคลื่อนย้ายข้อมูล ฟังก์ชันนัลโมเดลประกอบด้วยดาต้าโฟลไดอะแกรม (Data Flow Diagram) หลายไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์แห่งการกระทำของค่าที่คำนวณโดยระบบรวมทั้งค่าของอินพุท ค่าของผลลัพธ์และที่เก็บข้อมูลภายในระบบ ดาต้าโฟลไดอะแกรมคือกราฟที่แสดงดาต้าโฟลจากแหล่งข้อมูลในออบเจคอื่น ๆ ดาต้าโฟลไดอะแกรมไม่ได้แสดงข้อมูลข่าวสารการควบคุมเช่นเวลาที่โพรเซสทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือการตัดสินใจเลือกดาต้าโฟล การตัดสินใจเลือกนี้อยู่ในไดนามิกโมเดล ดาต้าโฟลไดอะแกรมไม่ได้แสดงการจัดข้อมูลในออบเจค การจัดข้อมูลนี้อยู่ในออบเจค ดาต้าโฟลไดอะแกรมประกอบด้วย

- โพรเซส (Process) ซึ่งทำการส่งผ่านข้อมูล
- ดาต้าโฟล (Data Flow) ซึ่งเคลื่อนย้ายข้อมูล
- ผู้กระทำ (actor) ออบเจคซึ่งสร้างและใช้ข้อมูล
- แหล่งเก็บข้อมูล (data store) ออบเจคซึ่งเก็บข้อมูล

3.2.3.1 โพรเซส (Process)

โพรเซสจะส่งผ่านค่าของข้อมูล โพรเซสในระดับต่ำสุดก็คือฟังก์ชันแท้ ๆ แผนผังของดาต้าโฟลทั้งหมดคือโพรเซสในระดับสูง ฟังก์ชันนัลโมเดลระบุเฉพาะเส้นทางของการกระทำที่เป็นไปได้เท่านั้นแต่ไม่ได้แสดงว่าเส้นทางใดจะเกิดการกระทำขึ้น ผลลัพธ์ของโพรเซสขึ้นกับพฤติกรรมของระบบตามที่กำหนดไว้ในไดนามิกโมเดล สัญลักษณ์ของโพรเซสคือรูปวงรีรูปไข่ โดยเขียนชื่อของโพรเซสไว้ภายใน แต่ละโพรเซสมีลูกศรที่เป็นข้อมูลอินพุทและเอาท์พุทเพื่อระบุบทบาทในการคำนวณได้ โพรเซสสามารถมีผลลัพธ์ได้มากกว่าหนึ่งผลลัพธ์ แผนผังแสดงเฉพาะรูปแบบของอินพุทและเอาท์พุท ต้องกำหนดการคำนวณค่าของผลลัพธ์จากค่าของอินพุทด้วย โพรเซสในระดับสูงสามารถขยายออกเป็นดาต้าโฟลไดอะแกรมได้มากเท่าที่ซับรูทีนสามารถแตกออกเป็นซับรูทีนในระดับต่ำ โพรเซสซึ่งแยกย่อยออกไปอีกไม่ได้แล้วต้องอธิบายด้วยภาษาที่เข้าใจง่ายหรือเป็นสมการการคำนวณ โพรเซสสร้างขึ้นเป็นเมทธอร์ด หรือส่วนหนึ่งของเมทธอร์ด ของโอเปอเรชันในออบเจค

3.2.3.2 ดาต้าโฟล (Data Flow)

ดาต้าโฟลเชื่อมต่อระหว่างผลลัพธ์ของออบเจค หรือโพรเซสกับอินพุทจากออบเจคหรือโพรเซสอื่น ดาต้าโฟลแทนค่าของข้อมูลที่เกิดจากการคำนวณ ค่าของข้อมูลไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปเพราะดาต้าโฟล ดาต้าโฟลแทนด้วยเส้นลูกศรซึ่งอยู่ระหว่างผู้สร้างและผู้ใช้ค่าของข้อมูล โดยบนลูกศรจะมีคำอธิบายเกี่ยวกับค่าของข้อมูล ซึ่งปกติจะเขียนเป็นชื่อหรือเป็นชนิดของข้อมูล ค่าเดียวกันสามารถส่งไปได้หลายที่ ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์เป็นส้อมที่หลายหัวลูกศรรวมกัน โดยที่ลูกศรผลลัพธ์ไม่ได้เขียนชื่อกำกับเพราะว่าใช้แทนค่าอินพุทเดียวกัน ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 3.16 ในบางครั้งค่าของข้อมูลแบบอะกรีเกชันแตกออกเป็นส่วนประกอบซึ่งแต่ละส่วนประกอบถูกส่งไปยังโพรเซสที่แตกต่างกัน ในกรณีนี้จะแสดงด้วยสัญลักษณ์ซส้อมซึ่งแต่ละลูกศรจะเขียนชื่อของส่วนประกอบกำกับ ส่วนประกอบที่รวมกันเป็นค่าอะกรีเกชันคือค่าที่อยู่ด้านตรงข้าม ดังแสดงในตัวอย่างในภาพที่ 3.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(a) (b)

ภาพที่ 3.16 ตัวอย่างดาต้าโฟล

แต่ละดาต้าโฟลจะแทนค่าซึ่งได้จากการคำนวณที่จุดใดจุดหนึ่ง ซึ่งในความเป็นจริงค่านี้ไม่จำเป็นต้องมีความสำคัญ โฟลที่อยู่ตรงส่วนขอบของดาต้าโฟลไดอะแกรมคืออินพุทและเอาท์พุท โฟลเหล่านี้อาจจะไม่ถูกเชื่อมต่อ (ถ้าไดอะแกรมเป็นเพียงส่วนหนึ่งของระบบ) หรืออาจจะเชื่อมต่อกับออบเจค

ผู้กระทำ (Actor) คือออบเจคที่มีการกระทำที่ขับเคลื่อนดาต้าโฟลโดยการสร้างและการใช้ค่า ผู้กระทำติดต่อกับอินพุทและเอาท์พุทของดาต้าโฟลผู้กระทำวางอยู่บนขอบนอกของกราฟดาต้าโฟลแต่จบการไหลของข้อมูลด้วยแหล่งข้อมูลและเก็บข้อมูลไว้ ดังนั้นบางครั้งจึงเรียกผู้กระทำนี้ว่าเทอร์มิเนเตอร์ (Terminators) การกระทำของผู้กระทำอยู่นอกขอบเขตของดาต้าโฟลไดอะแกรมแต่ควรจะเป็นส่วนหนึ่งของไดนามิกโมเดล ผู้กระทำแทนด้วยรูปสามเหลี่ยมเพื่อแสดงว่าเป็นออบเจค ลูกศรระหว่างผู้กระทำและไดอะแกรมคืออินพุทและเอาท์พุทของไดอะแกรม

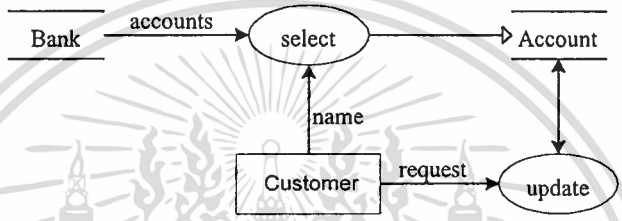
แหล่งเก็บข้อมูล (Data Store) คือออบเจคที่ไม่มีการกกระทำภายในดาต้าโฟลไดอะแกรม แต่เก็บข้อมูลสำหรับการกระทำล่าสุด แหล่งเก็บข้อมูลไม่เหมือนกับผู้กระทำเพราะแหล่งเก็บข้อมูลไม่ได้สร้างโอเปอเรชันใด ๆ บนแหล่งเก็บข้อมูลเพียงแต่ตอบรับที่จะเก็บข้อมูล แหล่งเก็บข้อมูลเขียนแทนด้วยเส้นคู่ขนานที่เขียนชื่อแหล่งเก็บข้อมูลไว้ภายใน ลูกศรเข้าไปที่แหล่งเก็บข้อมูลระบุข้อมูลข่าวสารหรือโอเปอเรชันซึ่งปรับปรุงแก้ไขข้อมูลที่เก็บไว้ในแหล่งเก็บข้อมูล ได้แก่การเพิ่ม การแปลงค่า หรือการลบค่าออก ลูกศรออกจากแหล่งเก็บข้อมูลระบุข้อมูลข่าวสารที่ดึงออกมาจากแหล่งเก็บข้อมูล ซึ่งอาจเป็นค่าทั้งหมดหรือค่าเพียงบางส่วน โครงสร้างของออบเจคจะต้องอธิบายในออบเจคโมเดล รวมทั้งต้องอธิบายโอเปอเรชันการแก้ไขและการกระทำ

ทั้งผู้กระทำและแหล่งเก็บข้อมูลคือออบเจค แต่ที่เรากำหนดให้แตกต่างกันก็เพราะพฤติกรรมและการใช้มีความแตกต่างกันถึงแม้ว่าในภาษาเชิงวัตถุจะสร้างเป็นออบเจคเหมือนกันหรือแหล่งเก็บข้อมูลอาจจะสร้างเป็นแฟ้มข้อมูลและผู้กระทำเป็นอุปกรณ์ภายนอก ดาต้าโฟลเป็นออบเจคด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงแม้ว่าในหลายกรณีที่ดาต้าโฟลคือค่าแท้ ๆ เช่น เลขจำนวนเต็ม (ในภาษาเชิงวัตถุออบเจคและค่าแท้ ๆ มักจะสร้างเหมือนกัน)

มุมมองที่แตกต่างกันระหว่างออบเจคคือออบเจคมีข้อมูลได้ค่าเดียวแต่แหล่งเก็บข้อมูลมีข้อมูลได้มากกว่าหนึ่งค่า ดังตัวอย่างในภาพที่ 3.17 นำชื่อของลูกค้าไปเลือกบัญชีจากธนาคารได้ผลลัพธ์เป็นออบเจคบัญชีนั้นซึ่งใช้เป็นแหล่งเก็บข้อมูลสำหรับโอเปอเรชันในการแก้ไข ดาต้าโฟลซึ่งสร้างออบเจคและจะใช้เป็นเป้าหมายของโอเปอเรชันอื่นระบุโดยใช้รูปสามเหลี่ยมกลวงที่ปลายของดาต้าโฟล ตรงกันข้ามโอเปอเรชันการแก้ไขซึ่งปรับยอดบัญชีในออบเจคบัญชีระบุโดยใช้หัวลูกศรเล็ก ๆ รูปสามเหลี่ยมกลวงที่ระบุค่าผลลัพธ์ของดาต้าโฟลเป็นออบเจคโดยปกติแล้วก็คือแหล่งเก็บข้อมูล



ภาพที่ 3.17 ตัวอย่างดาต้าโฟลไดอะแกรม

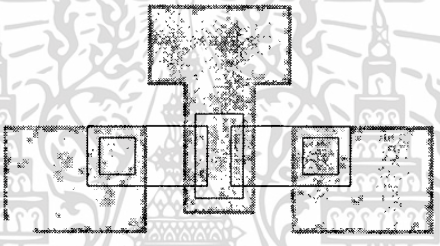
การควบคุมโฟลของข้อมูล (Control Flow) ดาต้าโฟลไดอะแกรมแสดงเส้นทางการคำนวณที่เป็นไปได้สำหรับค่าข้อมูล โดยไม่แสดงเส้นทางใดถูกกระทำและลำดับของการกระทำเป็นอย่างไร การตัดสินใจและการเรียงลำดับคือการควบคุมซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของไดนามิกโมเดล การตัดสินใจมีผลกับฟังก์ชันว่ามีหนึ่งฟังก์ชันหรือมากกว่าหนึ่งฟังก์ชันที่จะถูกกระทำไม่ใช่เป็นการให้ค่ากับฟังก์ชัน ถึงแม้ว่าการตัดสินใจเลือกฟังก์ชันนี้จะไม่ได้มีค่าอินพุทแต่ในบางครั้งก็มีประโยชน์ที่จะรวมการตัดสินใจเลือกฟังก์ชันนี้ไว้ในฟังก์ชันนัลโมเดลเพื่อว่าจะได้ไม่ลืมและยังเป็นการแสดงข้อมูลที่ขึ้นต่อกันอีกด้วยวิธีทำคือรวมการควบคุมดาต้าโฟลนี้เข้าไปไว้ในดาต้าโฟลไดอะแกรมด้วยการควบคุมดาต้าโฟลคือค่าบูลลีน (Boolean) ซึ่งจะมีผลกับโพรเซสว่าโพรเซสใดจะถูกกระทำ ตัวของการควบคุมดาต้าโฟลไม่ใช่เป็นค่าอินพุทของโพรเซส การควบคุมดาต้าโฟลแทนด้วยเส้นลูกศรปะจากโพรเซสที่สร้างค่าบูลลีนไปยังโพรเซสที่ถูกควบคุม การควบคุมดาต้าโฟลนั้นมีประโยชน์ แต่จะซ้ำกับข้อมูลข่าวสารในไดนามิกโมเดล ดังนั้นจึงควรใช้เท่าที่จำเป็นเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การออกแบบโปรแกรมออกแบบวงจรรวมขนาดเล็ก

การทำงานพื้นฐานของโปรแกรมออกแบบวงจรรวมขนาดเล็กมีดังนี้

1. ผู้ใช้สามารถออกแบบและสร้างวงจรรวมในระดับเลย์เอาท์ โดยผู้ใช้ทำการวาดเลย์เอาท์จากการเลือกชนิดและรูปทรงของชั้นสาร วาดลงในตำแหน่งที่ต้องการตามการออกแบบวงจรรวมที่ผู้ใช้ต้องการ ชั้นสารที่ใช้ในการออกแบบมี Diffusion, Polysilicon, Metal และ Contact เป็นต้น การเลือกชนิดชั้นสารในเลย์เอาท์จะแสดงสีที่แตกต่างกัน ดังเช่น ชั้น Metal แสดงด้วยสีฟ้า และContact แสดงด้วยสีดำ เป็นต้น การเลือกรูปทรงของชั้นสารจะเป็นรูปทรงทางเรขาคณิตเช่น Polygon, Box และ Round เป็นต้น รูปเลย์เอาท์ที่ได้จากการออกแบบจะเป็นรูปที่แสดงรูปทรงเรขาคณิตที่มีสีต่าง ๆ วางซ้อนทับกันดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 แสดงเลย์เอาท์ของวงจรรวมขนาดเล็ก

2. ตรวจสอบเลย์เอาท์จากภาพตัดขวาง การแสดงภาพตัดขวางของชั้นสาร เป็นการแสดงภาพตัดขวางตามตำแหน่งของเลย์เอาท์ที่ได้ทำการออกแบบ โดยแสดงลักษณะการวางซ้อนทับกันของชั้นสารต่าง ๆ เพื่อให้ผู้ใช้สามารถตรวจสอบได้ว่าในตำแหน่งนั้น ๆ ของเลย์เอาท์ มีการจัดวางชั้นสารถูกต้องตามการออกแบบที่ต้องการหรือไม่ ดังนั้นการแสดงภาพตัดขวางจึงเป็นเครื่องมือช่วยผู้ใช้ในการออกแบบเลย์เอาท์

3. ตรวจสอบกฎการออกแบบ ผู้ใช้จะต้องทำการตรวจสอบกฎการออกแบบเพื่อจะได้ทราบว่าเลย์เอาท์ที่ออกแบบนั้นสามารถนำไปใช้จริงในขบวนการผลิตหรือไม่ ดังนั้นกฎที่ใช้ในการตรวจสอบจึงจะต้องขึ้นอยู่กับผู้ใช้ว่าต้องการใช้กฎการออกแบบของวงจรใดหรือกฎการออกแบบของห้องปฏิบัติการใด เพราะกฎการออกแบบต่าง ๆ มีเงื่อนไขและค่าตัวแปรที่ใช้ตรวจสอบแตกต่างกัน

4. การตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า เป็นการแสดงผลการจำลองพฤติกรรมของวงจรที่ได้จากเลย์เอาท์ที่ทำการออกแบบ ดังเช่น แรงดันขีดเริ่ม(Threshold Voltage) และคุณลักษณะของกระแสกับแรงดัน (I-V Characteristics) โดยแสดงในรูปของกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

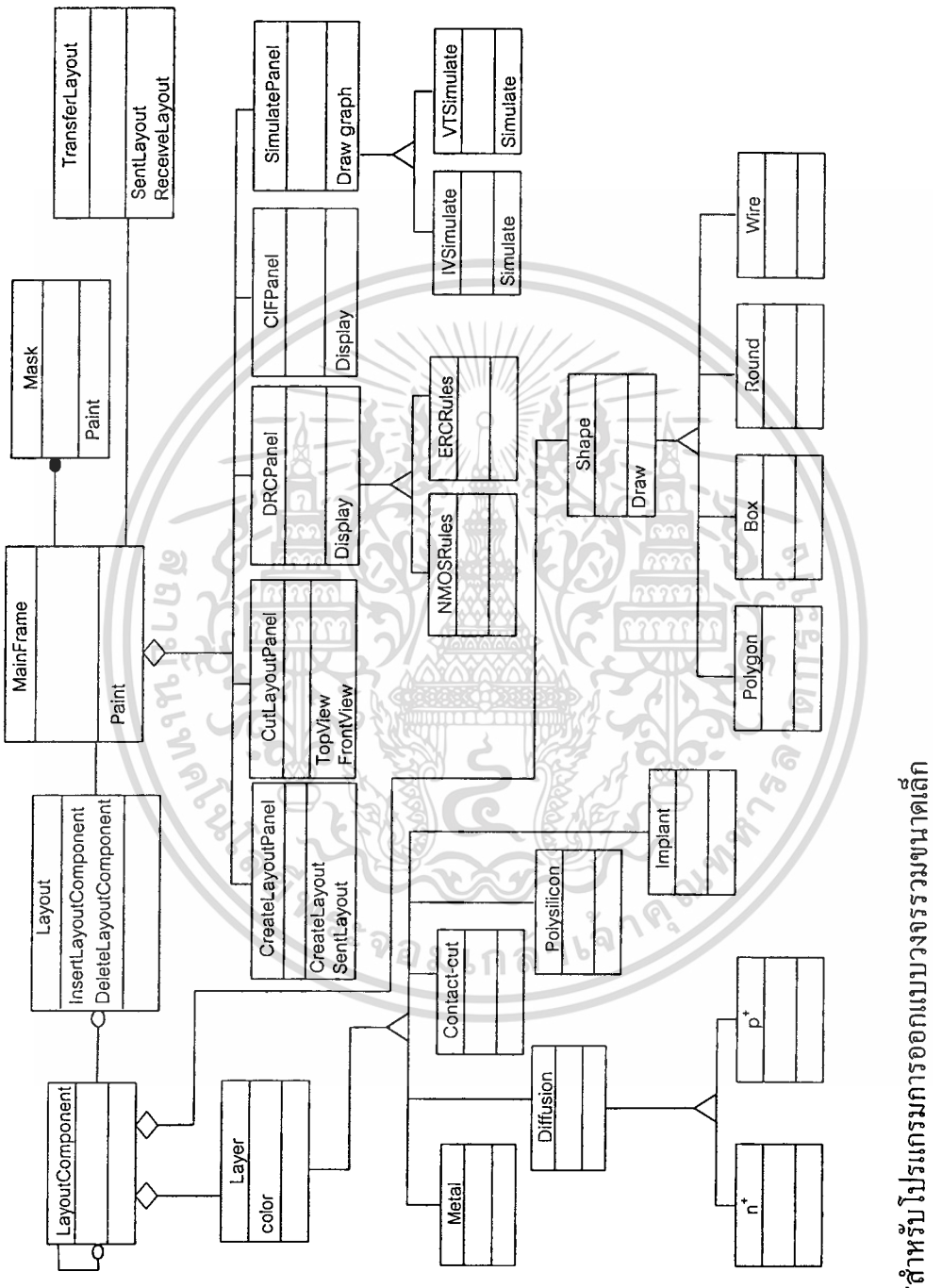
5. การแสดงภาษา CIF การทำงานในส่วนนี้โปรแกรมจะนำเลย์เอาท์ที่ผู้ใช้ออกแบบนำไปแปลงเป็นภาษา CIF ตามรูปแบบไวยากรณ์ของภาษา

6. การจำลอง Mask ของเลย์เอาท์ เป็นการแสดงให้ผู้ใช้ได้ทราบถึงขั้นตอนของกระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟีซึ่งอยู่ในขบวนการผลิต โดยแสดงในรูปของ Mask ว่าในการออกแบบเลย์เอาท์นั้น ๆ จะต้องใช้ Mask เท่าไรและแต่ละ Mask จะมีรูปทรงอย่างไร

4.1 การออกแบบคลาสสำหรับโปรแกรมออกแบบวงจรรวมขนาดเล็ก

การออกแบบคลาสจากการทำงานของโปรแกรมสามารถออกแบบได้ดังภาพที่4.2 มีคลาส Main Frame เป็นคลาสหลัก ประกอบด้วยคลาส CreateLayoutPanel เป็นคลาสที่ผู้ใช้ทำการสร้างเลย์เอาท์, คลาส CutLayoutPanel เป็นการแสดงภาพตัดขวางของเลย์เอาท์ตามตำแหน่งที่ผู้ใช้ต้องการดูภาพตัดขวาง, คลาส DRCPanel ทำการตรวจสอบกฎการออกแบบเลย์เอาท์, คลาส CIFPanel ทำการแสดงภาษา CIF ที่แปลมาจากเลเอาท์ที่ผู้ใช้ได้ทำการออกแบบ และคลาส SimulatePanel แสดงการจำลองพฤติกรรมของเลย์เอาท์ที่ออกแบบ คลาส MainFrame ทำการจำลอง Mask ของเลย์เอาท์ที่ได้ออกแบบโดยใช้การทำงานของคลาส Mask ในกรณีที่โปรแกรมทำงานอยู่บนเครื่องที่สามารถติดต่อกับเครือข่ายอินเตอร์เน็ต คลาส MainFrame สามารถใช้งานคลาส TransferLayout มีหน้าที่ในการรับและส่งข้อมูลเลย์เอาท์ไปยังเครื่อง Server ตามที่ผู้ใช้กำหนดผ่านทางเครือข่ายอินเตอร์เน็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.2 แสดงคลาสสำหรับโปรแกรมการออกแบบวงจรรวมขนาดเล็ก

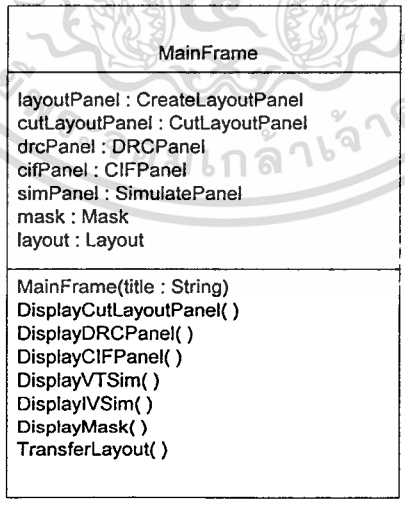
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลาส MainFrame มีแอทริบิวท์ คือ

- layoutPanel ชนิดเป็น CreateLayoutPanel ออบเจคในการสร้างเลย์เอาท์
- cutLayoutPanel ชนิดเป็น CutLayoutPanel ออบเจคแสดงภาพตัดขวาง
- drcPanel ชนิดเป็น DRCPanel ออบเจคตรวจสอบกฎการออกแบบ
- cifPanel ชนิดเป็น CIFPanel ออบเจคแสดงภาษา CIF ของเลย์เอาท์
- simPanel ชนิดเป็น SimulatePanel ออบเจคแสดงการจำลองพฤติกรรม เลย์เอาท์
- mask ชนิดเป็น Mask ออกเจคแสดง Mask
- layout ชนิดเป็น Layout เป็นเลย์เอาท์ที่ผู้ใช้ทำการออกแบบ

คลาส MainFrame มีเมทธอร์ด ดังนี้

- MainFrame ทำการสร้างส่วนประกอบของโปรแกรม
- DisplayCutLayoutPanel เรียกการทำงานในส่วนการแสดงภาพตัดขวาง
- DisplayDRCPanel เรียกการทำงานในส่วนการแสดงผลการตรวจสอบกฎการออกแบบ
- DisplayCIFPanel เรียกการทำงานในส่วนการแสดงภาษา CIF ของเลย์เอาท์
- DisplayVTSim เรียกการทำงานในส่วนแสดงกราฟแรงดันขีดเริ่ม
- DisplayIVSim เรียกการทำงานในส่วนแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแส
- DisplayMask เรียกการทำงานในส่วนการแสดง mask ที่ได้จากการออกแบบเลย์เอาท์
- TransferLayout เรียกการทำงานในส่วนการรับส่งเลย์เอาท์

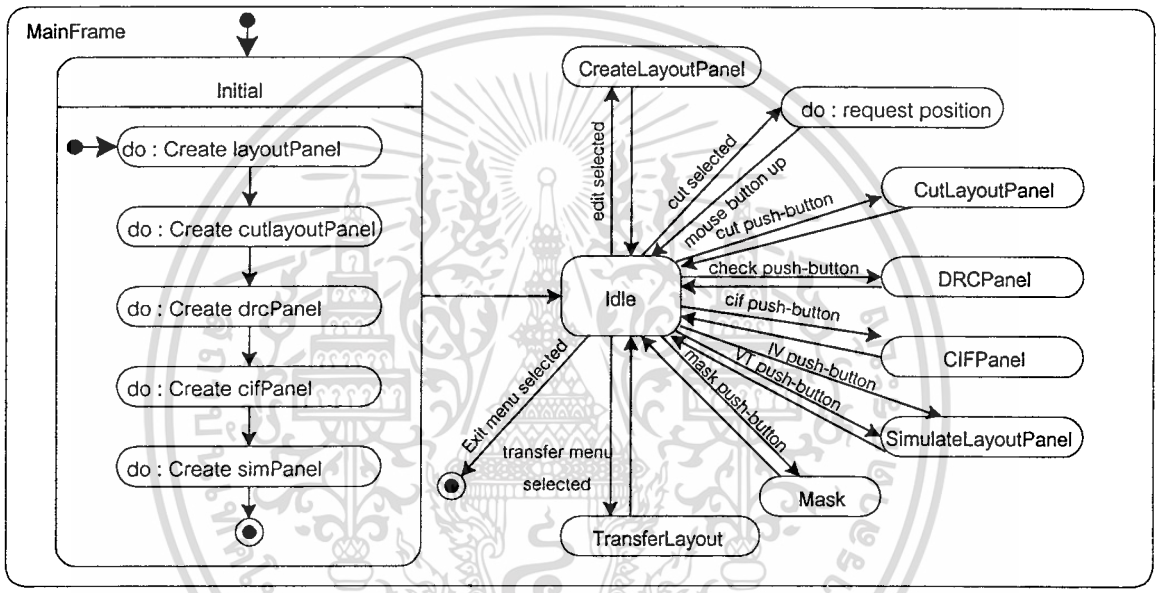


ภาพที่ 4.3 แสดง MainFrame Class Diagram

Statechart เริ่มต้นจากสถานะ Initial ทำการสร้างออบเจคซึ่งเป็นส่วนประกอบของคลาส MainFrame ดังนี้ สร้าง layout, cutLayoutPanel, drcPanel, cifPanel และ simPanel จากนั้นจะเข้าสู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

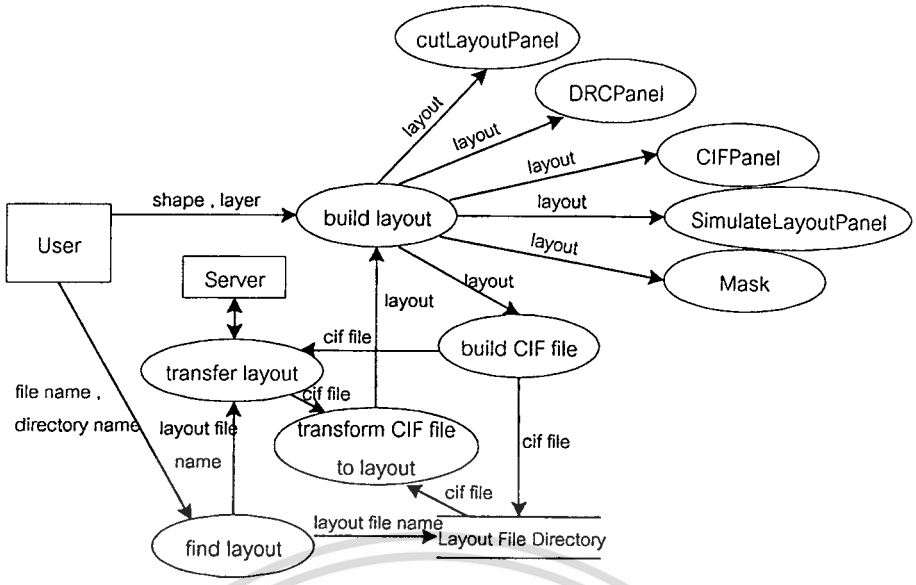
สถานะ Idle การเปลี่ยนสถานะจะขึ้นอยู่กับอีเวนท์ดังนี้ ถ้าผู้ใช้เลือกการ edit โปรแกรมจะเข้าสู่สถานะการวาดเลย์เอาท์ ถ้าผู้ใช้เลือกการ cut โปรแกรมจะอยู่ในสถานะการแสดงภาพตัดขวาง ถ้าผู้ใช้กดปุ่ม Check โปรแกรมจะเข้าสู่สถานะการตรวจสอบกฎการออกแบบ ถ้าผู้ใช้กดปุ่ม CIF โปรแกรมจะเข้าสู่สถานะการแสดงภาษา CIF ตามรูปแบบของเลย์เอาท์ที่ออกแบบ ถ้าผู้ใช้กดปุ่ม IV หรือ VT โปรแกรมจะเข้าสู่สถานะการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้า ถ้าผู้ใช้กดปุ่ม Mask โปรแกรมจะเข้าสู่สถานะการแสดง mask ตามรูปแบบเลย์เอาท์ที่ออกแบบ ถ้าผู้ใช้เลือกการ transfer จากเมนู โปรแกรมจะเข้าสู่สถานะการรับส่งข้อมูลเลย์เอาท์บนเครือข่ายอินเตอร์เน็ต และเมื่อผู้ใช้เลือก Exit จากเมนูโปรแกรมจะยุติการทำงาน



ภาพที่ 4.4 แสดง MainFrame Statechart

Data Flow Diagram จะแสดงการรับข้อมูลเข้าโปรแกรมจากผู้ใช้ได้ดังนี้ เริ่มจากผู้ใช้ทำการกำหนด layer และ shape วาดลงในโปรแกรม หรือผู้ใช้ทำการเปิดไฟล์ข้อมูล CIF ที่อยู่ในเครื่อง หรือผู้ใช้ทำการรับไฟล์ข้อมูลจากเครื่อง Server ผ่านเครือข่ายอินเตอร์เน็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.5 แสดง DFD คลาส MainFrame

4.2 คลาส CreateLayoutPanel

คลาส CreateLayoutPanel มีหน้าที่ในการสร้างเลย์เอาท์โดยเป็นส่วนที่ติดต่อกับผู้ใช้โดยตรง ซึ่งผู้ใช้ทำการเลือกชั้นสารและทำการเลือกรูปทรงและชั้นสารแล้วทำการวาดลงในพื้นที่ที่ทำการวาด อีกทั้งยังมีหน้าที่ส่งเลย์เอาท์ที่ผู้ใช้ทำการวาดไปยังส่วนต่าง ๆ ของโปรแกรมตามการทำงานที่ผู้ใช้ต้องการ

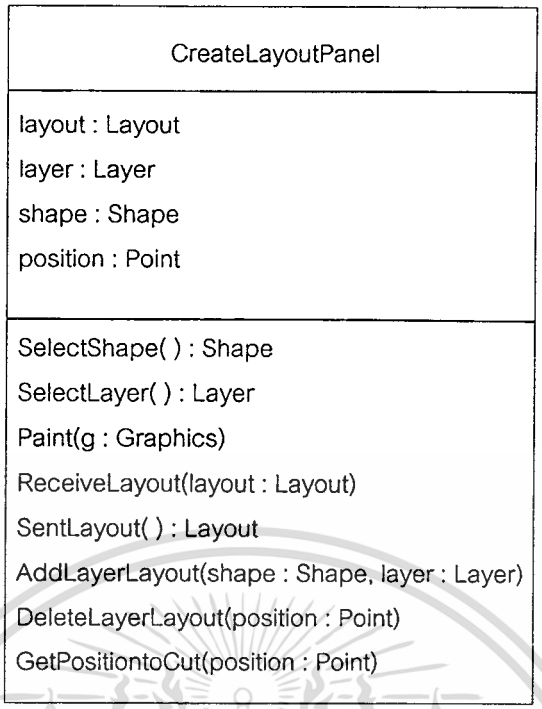
คลาส CreateLayoutPanel มีแอทริบิวท์ ดังนี้

- layout ชนิดเป็น Layout เป็นเลย์เอาท์ที่ทำการสร้าง
- layer ชนิดเป็น Layer ชนิดของชั้นสารที่จะทำการสร้าง
- shape ชนิดเป็น Shape รูปทรงเรขาคณิตที่ต้องการสร้าง
- position ชนิดเป็น Point เป็นจุดบนหน้าจอพื้นที่ที่ทำการสร้าง

มีเมทธอร์ดดังนี้

- SelectShape ทำการกำหนดรูปทรงทางเรขาคณิตที่จะใช้ทำการสร้าง
- SelectLayer ทำการกำหนดชั้นสารที่ต้องการสร้าง
- Paint แสดงเลย์เอาท์ที่กำลังสร้าง
- SentLayout ทำการส่งเลย์เอาท์ที่กำลังวาดให้กับส่วนอื่นๆ ของโปรแกรมที่ทำการร้องขอมา
- ReceiveLayout ทำการรับเลย์เอาท์เพื่อทำการวาดเลย์เอาท์อีกครั้งหนึ่ง
- AddLayerLayout ทำการสร้าง LayoutComponent และเพิ่มลงในเลย์เอาท์
- DeleteLayerLayout ทำการลบ LayoutComponent ออกจากเลย์เอาท์
- GetPositiontoCut รับการกำหนดบริเวณที่ต้องการทำภาพตัดขวาง

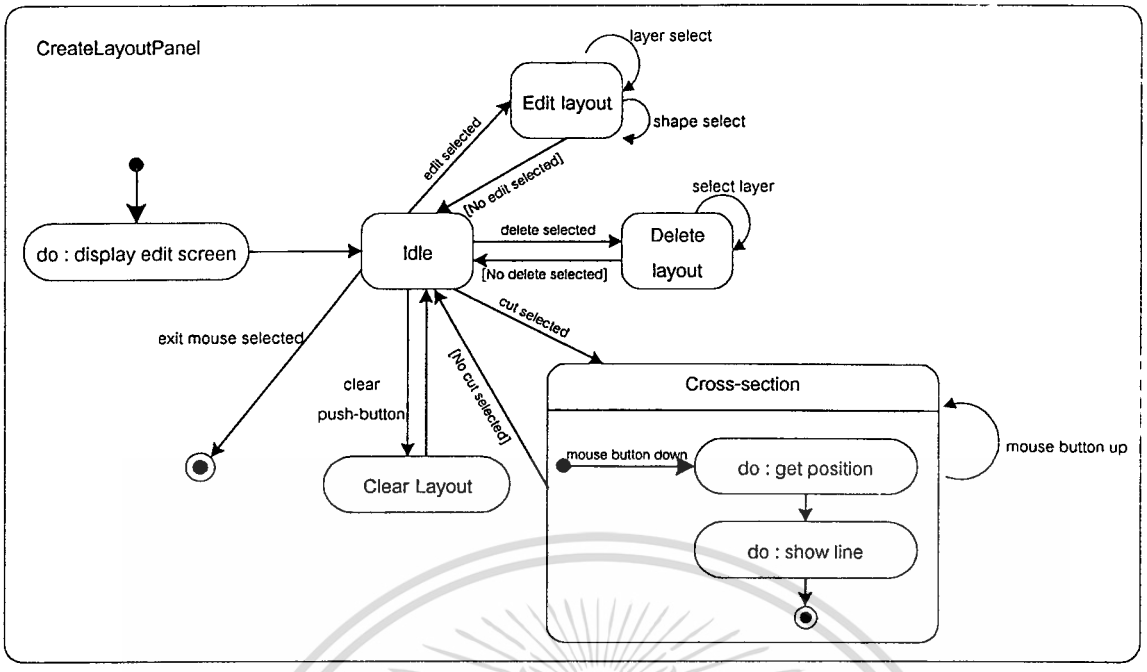
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.6 แสดง CreateLayoutPanel Class Diagram

Statechart ของ CreateLayoutPanel เริ่มจากการแสดงหน้าจอพื้นที่ให้ผู้ใช้ทำการวาดเลย์เอาท์ จากนั้นจะเข้าสู่สถานะ idle การเปลี่ยนสถานะจะมีดังนี้ เมื่อผู้ใช้เลือกการทำงาน edit โปรแกรมจะเข้าสู่สถานะ Edit layout ทำการสร้างเลย์เอาท์โดยการเลือก layer และ shape ตามผู้ใช้กำหนด เมื่อผู้ใช้ออกจากสถานะ edit จะกลับมาสู่สถานะ Idle ถ้าผู้ใช้เลือกการ delete โปรแกรมจะเข้าสู่สถานะ Delete layout โดยเมื่อผู้ใช้จะเลือก layer ที่ต้องการลบ ถ้าผู้ใช้เลือก cut โปรแกรมจะมาสถานะ cross-section โดยเมื่อผู้ใช้กด mouse โปรแกรมจะทำการรับตำแหน่งที่ mouse กด เพื่อนำตำแหน่งนั้นไปทำการแสดงภาพตัดขวางของเลย์เอาท์ เมื่อผู้ใช้กดปุ่ม Clear จะทำการลบภาพเลย์เอาท์ที่กำลังวาดอยู่ และจะสิ้นสุดการทำงาน เมื่อผู้ใช้เลือก Exit ที่เมนู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.7 แสดง CreateLayoutPanel Statechart

คลาส Layout เป็นคลาสสร้าง linked lists ของการสร้างเลย์เอาท์ที่ผู้ใช้ออกแบบกล่าวคือ เมื่อผู้ใช้ทำการสร้างเลย์เอาท์โดยเลือกชั้นสารและรูปทรง วาดลงบนตำแหน่งที่ต้องการนั้น หมายถึงคลาส Layout จะสร้าง Node ขึ้นมาและทำการเพิ่ม Node ลงใน linked lists ดังนั้นรูปเลย์เอาท์ที่ออกแบบโปรแกรมจะทำการเก็บข้อมูลเป็น linked การทำงานของโปรแกรมผู้ใช้สามารถออกแบบได้ครั้งละหนึ่งเลย์เอาท์นั่นคือในขณะใดขณะหนึ่งในโปรแกรมจะมี linked lists เพียงหนึ่ง linked lists เท่านั้น คลาส Layout จะทำการสร้างออบเจคจากคลาส LayoutComponent ซึ่งก็คือ Node ใน linked lists นั้นเอง คลาส Layout มีแอทริบิวท์ คือ

- name ชนิดเป็น String เป็นชื่อของเลย์เอาท์
- firstNode ชนิดเป็น LayoutComponent เป็นออบเจคชี้ต้น linked lists
- selectedNode ชนิดเป็น LayoutComponent เป็นออบเจคชี้ Node ที่ผู้ใช้ต้องการ

มีเมทธอร์ดคือ

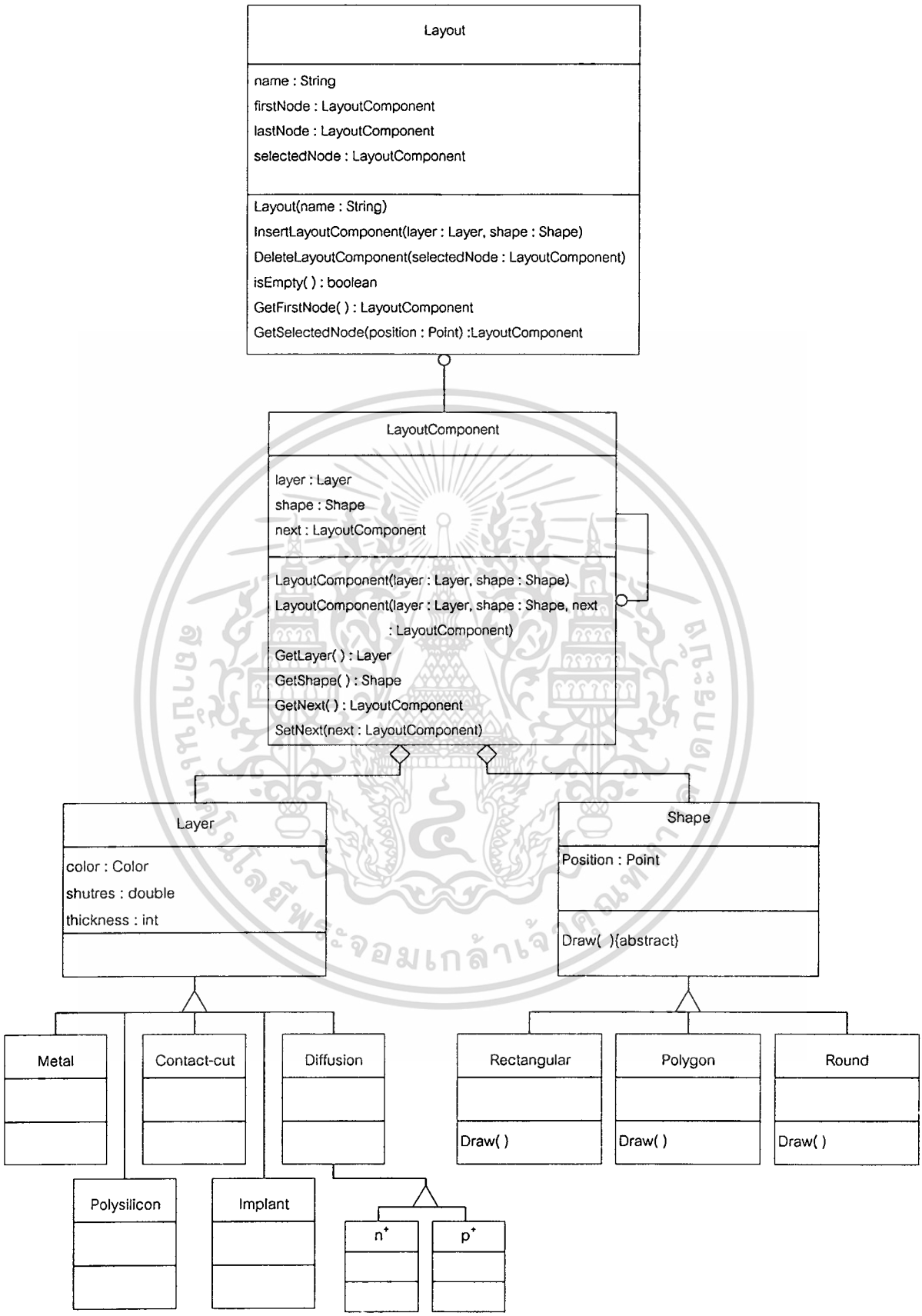
- Layout ทำการสร้าง linked lists ของ LayoutComponent
- InsertLayoutComponent ทำการเพิ่ม node ของ LayoutComponent ลงใน Layout
- DeleteLayoutComponent ทำการลบ node ของ LayoutComponennt ออกจาก Layout
- isEmpty ทำการตรวจสอบการสร้าง linked lists ของ LayoutComponent ว่ามีสมาชิกหรือไม่
- GetFirstNode จะให้ LayoutComponent ที่ชี้ต้น linked lists
- GetSelectedNode จะให้ LayoutComponent ที่อยู่ใน linked lists ตามตำแหน่งที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนคลาส LayoutComponent มีการออกแบบดังนี้ มีแอทริบิวท์คือ layer เป็นออบเจคจากคลาส Layer ซึ่งเป็นชั้นสารที่ออกแบบ, shape เป็นออบเจคจากคลาส Shape เป็นรูปทรงของ LayoutComponent และ next เป็นตัวชี้ LayoutComponent ตัวถัดไปใน linked lists ในส่วนเมทธอร์ดมีดังนี้ LayoutComponent ทำการสร้าง LayoutComponent, Getlayer จะเป็นชนิดของชั้นสารใน LayoutComponent ที่กำหนด, GetShape จะให้รูปทรงของ LayoutComponentนั้นและ GetNext จะให้ LayoutComponent ที่เชื่อมโยงอยู่กับตัวถัดไป

คลาส Layer จะทำการสืบทอดคุณสมบัติไปยัง subclass ตามชนิดของชั้นสารที่ผู้ใช้ต้องการ และคลาส Shape จะทำการสืบทอดคุณสมบัติตามชนิดของรูปทรงที่ชั้นสารต่าง ๆ สามารถจะเป็นรูปทรงนั้น ๆ ได้

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ภาพที่ 4.8 แสดง Layout Class Diagram

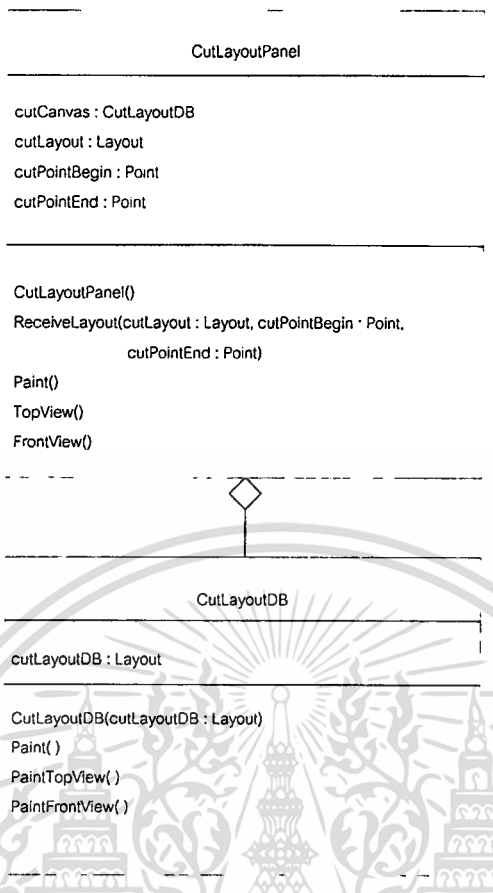
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 คลาส CutLayoutPanel

เป็นคลาสแสดงภาพตัดขวางของเลย์เอาท์ โดยรับตำแหน่งที่จะทำการตัดจากการกำหนดตำแหน่งจากผู้ใช้ การกำหนดตำแหน่งนี้จะทำในส่วนของคลาส CreateLayoutPanel แล้วแสดงภาพที่ได้ทางหน้าจอ โครงสร้างคลาสที่ออกแบบมีดังนี้ คลาส CutLayoutPanel เป็นคลาสที่ทำการรับเลย์เอาท์จากการออกแบบ รับตำแหน่งที่ผู้ใช้กำหนดในเลย์เอาท์เพื่อดูภาพตัดขวาง และให้ผู้ใช้เลือกลักษณะภาพของเลย์เอาท์ที่ทำการตัดขวางซึ่งในการออกแบบนี้มี 2 ลักษณะ คือ การแสดงภาพตัดขวางทางด้านบนของเลย์เอาท์ และการแสดงภาพตัดขวางทางด้านหน้าของเลย์เอาท์ คลาส CutLayoutPanel ยังประกอบด้วย คลาส CutLayoutDB ทำหน้าที่ในการแสดงภาพตัดขวาง โดยรับคำสั่งการทำงานจากคลาส CutLayoutPanel

คลาส CutLayoutPanel ประกอบด้วยแอทริบิวท์ ดังนี้ cutCanvas มีชนิดเป็น CutLayoutDB เป็นออบเจคจากคลาส CutLayoutDB, cutLayout มีชนิดเป็น Layout เป็นเลย์เอาท์ที่รับมาจากเลย์เอาท์ที่ผู้ใช้ออกแบบเพื่อใช้ในการสร้างภาพตัดขวาง, cutPointBegin และ cutPointEnd มีชนิดเป็น Point เป็นตำแหน่งเริ่มต้นและสิ้นสุดของการทำการตัดขวาง มีเมทธอร์ดคือ CutLayoutPanel เป็นการสร้างหน้าต่างในการแสดงภาพตัดขวาง, ReceiveLayout ทำการรับเลย์เอาท์และตำแหน่งการทำการตัดภาพ, Paint ทำการเรียกใช้เมทธอร์ด Paint ของคลาส CutLayoutDB ให้แสดงภาพตัดขวาง, TopView ทำการรับการเลือกการแสดงภาพตัดขวางทางด้านบนของเลย์เอาท์จากผู้ใช้และทำการเรียกใช้เมธอร์ด PaintTopView ของคลาส CutLayoutDB และ FrontView ทำการรับการเลือกแสดงภาพตัดขวางทางด้านหน้าของเลย์เอาท์ และทำการเรียกใช้เมทธอร์ด PaintFrontView ของคลาส CutLayoutDB

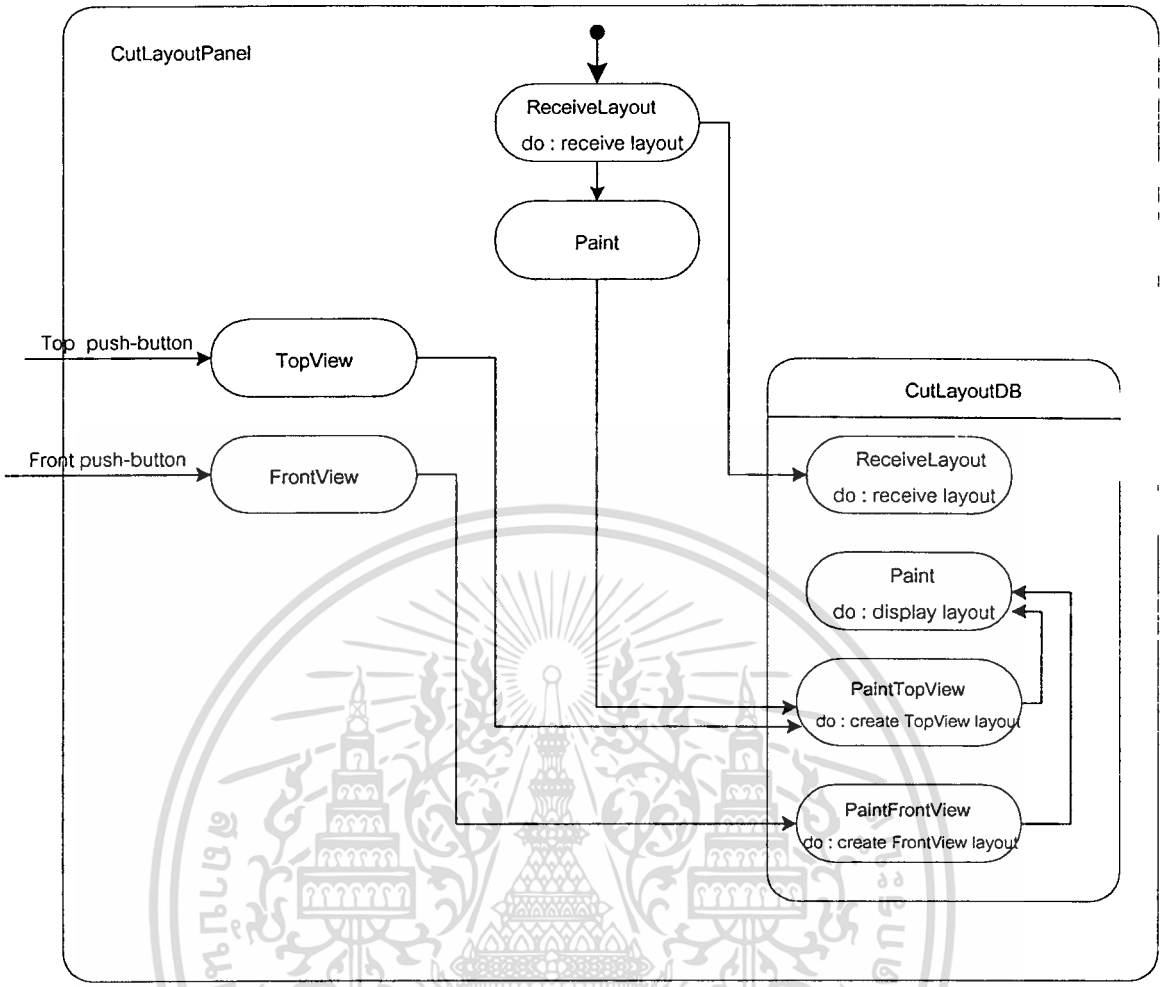
ส่วนประกอบของคลาส CutLayoutDB มีแอทริบิวท์คือ cutLayoutDB ทำการรับเลย์เอาท์, Paint แสดงภาพตัดขวางบนหน้าจอโดยแสดงภาพตัดขวางทางด้านบนของเลย์เอาท์เป็นการแสดงภาพครั้งแรก, PaintTopView แสดงภาพตัดขวางทางด้านบนของเลย์เอาท์และ PaintFrontView แสดงภาพตัดขวางทางด้านหน้าของเลย์เอาท์



ภาพที่ 4.9 แสดง CutLayoutPanel Class Diagram

Statechart ของคลาส CutLayoutPanel มีการเปลี่ยนสถานะไปยังสถานะในคลาส CutLayoutDB ดังนี้ เริ่มจากการรับเลย์เอาท์ จากนั้นจะมาอยู่ที่สถานะ Paint ซึ่งนำไปสู่สถานะ PaintTopView ในคลาส CutLayoutDB เป็นสถานะในการสร้างภาพตัดขวางทางด้านบนของเลย์เอาท์ เมื่อเสร็จสิ้นสถานะนี้จะไปสู่สถานะแสดงภาพ สถานะ TopView และ FrontView เป็นสถานะที่เกิดขึ้นจากการเลือกกดปุ่มการแสดงภาพตัดขวางคือ ถ้าผู้ใช้กดปุ่ม Top หมายถึงผู้ใช้ต้องการดูภาพตัดขวางทางด้านบนของเลย์เอาท์สถานะ TopView จะตอบสนองการกดปุ่มของผู้ใช้และทำการเปลี่ยนสถานะมายังสถานะ PaintTopView ในคลาส CutLayoutDB และทำการแสดงภาพ ถ้าผู้ใช้กดปุ่ม Front สถานะ FrontView จะตอบสนองการกดปุ่มนี้โดยทำการเปลี่ยนสถานะมายัง PaintFrontView ในคลาส CutLayoutDB ทำการสร้างภาพตัดขวางทางด้านหน้าของเลย์เอาท์และเปลี่ยนสถานะไปยังการแสดงผล

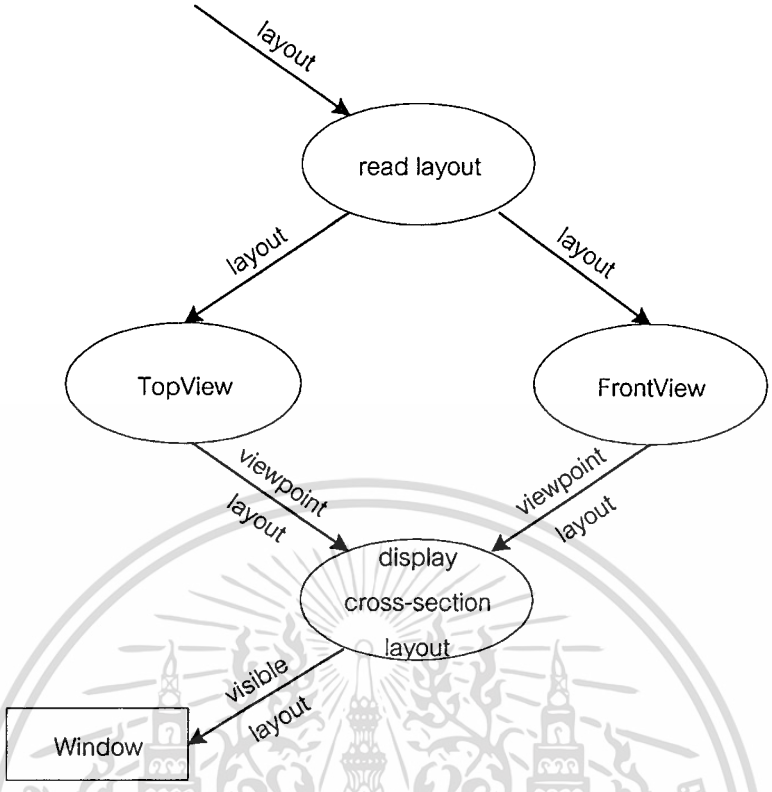
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.10 แสดง CutLayoutPanel Statechart

Data Flow Diagram ของการแสดงภาพตัดขวางมีดังนี้ ทำการรับข้อมูลเลย์เอาท์ที่ผู้ใช้ได้ทำการออกแบบต่อจากนั้นจะทำการสร้างภาพตัดขวางตามแต่ผู้ใช้จะเลือกแสดงภาพโดยที่ถ้าผู้ใช้เลือกการแสดงภาพตัดขวางทางด้านบนเลย์เอาท์จะมี process ที่ใช้คือ TopView และถ้าผู้ใช้ต้องการให้แสดงภาพตัดขวางทางด้านหน้าเลย์เอาท์ process ที่ใช้คือ FrontView ต่อจากนั้นจะส่งภาพที่ได้มาแสดงที่หน้าจอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.11 แสดง DFD คลาส CutLayoutPanel

4.4 คลาส DRCPanel

เป็นคลาสการตรวจสอบกฎการออกแบบ เมื่อวิเคราะห์กฎเกณฑ์การออกแบบจะพบว่าสามารถจำแนกลักษณะการตรวจสอบกฎการออกแบบได้ 5 รูปแบบคือ

1. การตรวจสอบขนาดของพื้นที่ของชั้นสาร
2. การตรวจสอบความกว้างของชั้นสาร
3. การตรวจสอบระยะห่างระหว่างชั้นสาร
4. การตรวจสอบความยาวของชั้นสารที่ยื่นออกไปจากชั้นสารที่พาดทับ
5. การตรวจสอบพื้นที่ชั้น Contact ที่วางอยู่บนชั้นสาร

การออกแบบคลาส DRCPanel มีแอทริบิวท์คือ scale มีชนิดเป็น double เป็นมาตราส่วนในการออกแบบและ checkLayout เป็นเลย์เอาท์ที่ใช้ในการตรวจสอบกฎการออกแบบ การออกแบบมีเมทธอร์ดดังนี้

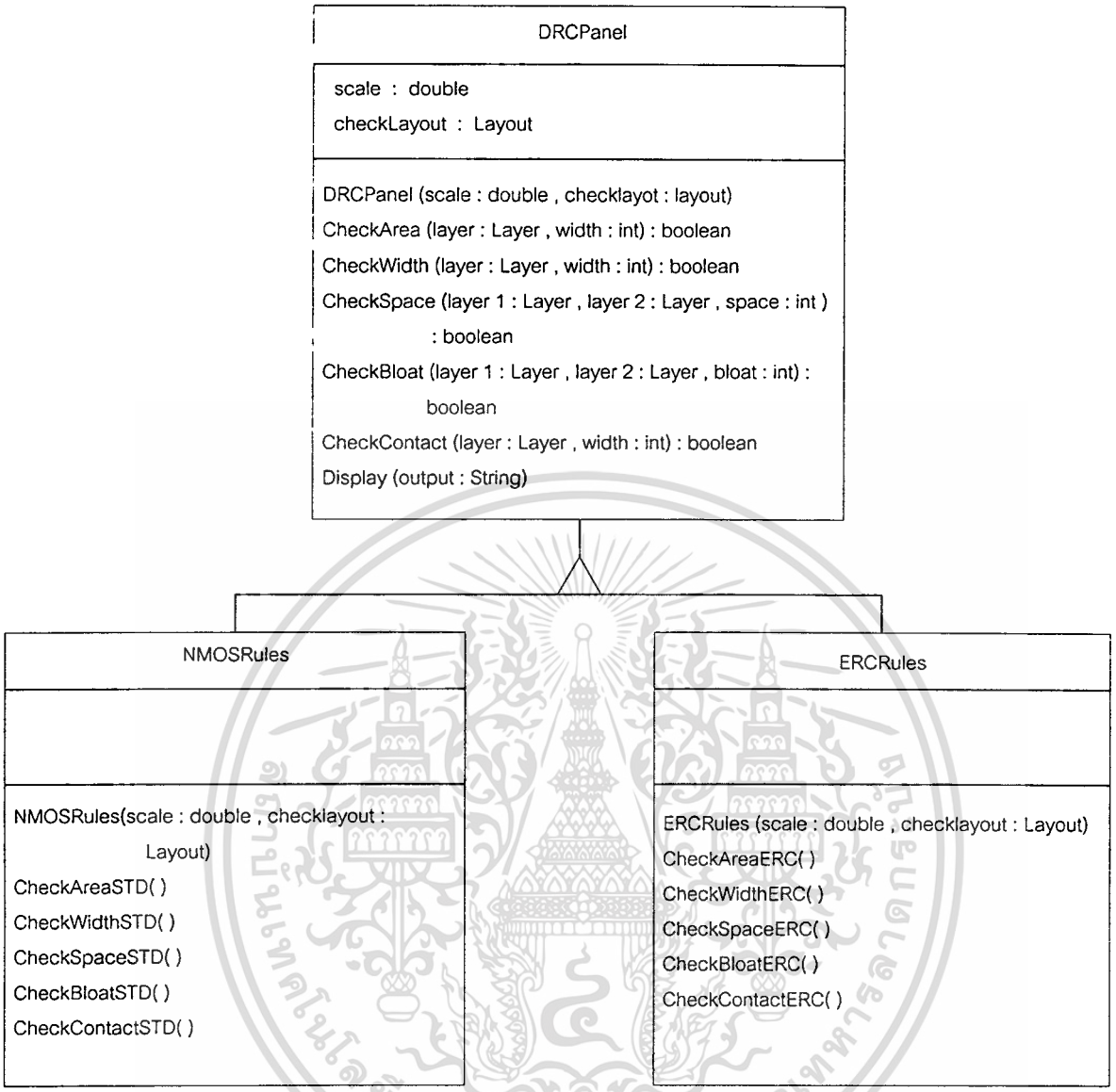
- DRCPanel ทำการรับค่ามาตราส่วนและเลย์เอาท์ที่ต้องการตรวจสอบกฎ
- CheckArea ทำการตรวจสอบขนาดของพื้นที่ของชั้นสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- CheckWidth ทำการตรวจสอบความกว้างของชั้นสาร
- CheckSpace ทำการตรวจสอบระยะห่างระหว่าง layer1 และ layer2
- CheckBloat ทำการตรวจสอบความยาวที่ยื่นออกไปของ layer2 เมื่อ layer2 พาดทับ layer1
- CheckContact ทำการตรวจสอบขนาดของ Contact เมื่อ Contact วางอยู่บน layer ที่กำหนด
- Display ทำการแสดงผลการตรวจสอบ

การสืบทอดคุณสมบัติจะได้ Subclass เป็นคลาสการตรวจสอบกฎต่าง ๆ ดังเช่นในภาพที่ 4.12 มีตัวอย่าง Subclass คือ NMOSRules เป็นกฎการออกแบบของหมีดและคอนเวย์ (Mead and Convay) สำหรับการออกแบบวงจร NMOS และ ERCRules เป็นคลาสกำหนดกฎการออกแบบวงจรในห้องปฏิบัติการ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งมีเมทธอร์ดคือ ERCRules ทำการรับมาตราส่วนที่ใช้ในการออกแบบ และเลย์เอาท์ที่ได้ทำการออกแบบ, CheckAreaERC ทำการตรวจสอบพื้นที่ของชั้นสาร ตามข้อกำหนดของกฎซึ่งจากกฎจะได้ว่า พื้นที่ของ Contact ต้องมีขนาดมากกว่า 400 μm^2 , CheckWidthERC เป็นการตรวจสอบกฎประเภทการตรวจสอบขนาดความกว้างของชั้นสารทั้งหมดที่มีอยู่ในกฎของERC ตามข้อกำหนดของกฎ จะได้ว่าความกว้างของ contact ต้องกว้างอย่างน้อย 10 μm และความกว้างของ Metal ต้องกว้างอย่างน้อย 20 μm กฎทั้งสองจะเป็นการดำเนินการของเมธอร์ดนี้ , CheckSpaceERC เป็นการตรวจสอบกฎประเภทตรวจสอบระยะห่างระหว่างชั้นสารที่มีทั้งหมดในกฎของERC, CheckBloatERC เป็นการตรวจสอบกฎประเภทขนาดของพื้นที่ในการยื่นออกไปจากชั้นสารเมื่อชั้นสารนั้นวางพาดทับอยู่บนอีกชั้นสารหนึ่งทั้งหมดที่มีอยู่ในกฎของ ERC และ CheckContactERC เป็นการตรวจสอบประเภทขนาดของ Contact ที่มีอยู่ทั้งหมดในกฎของ ERC

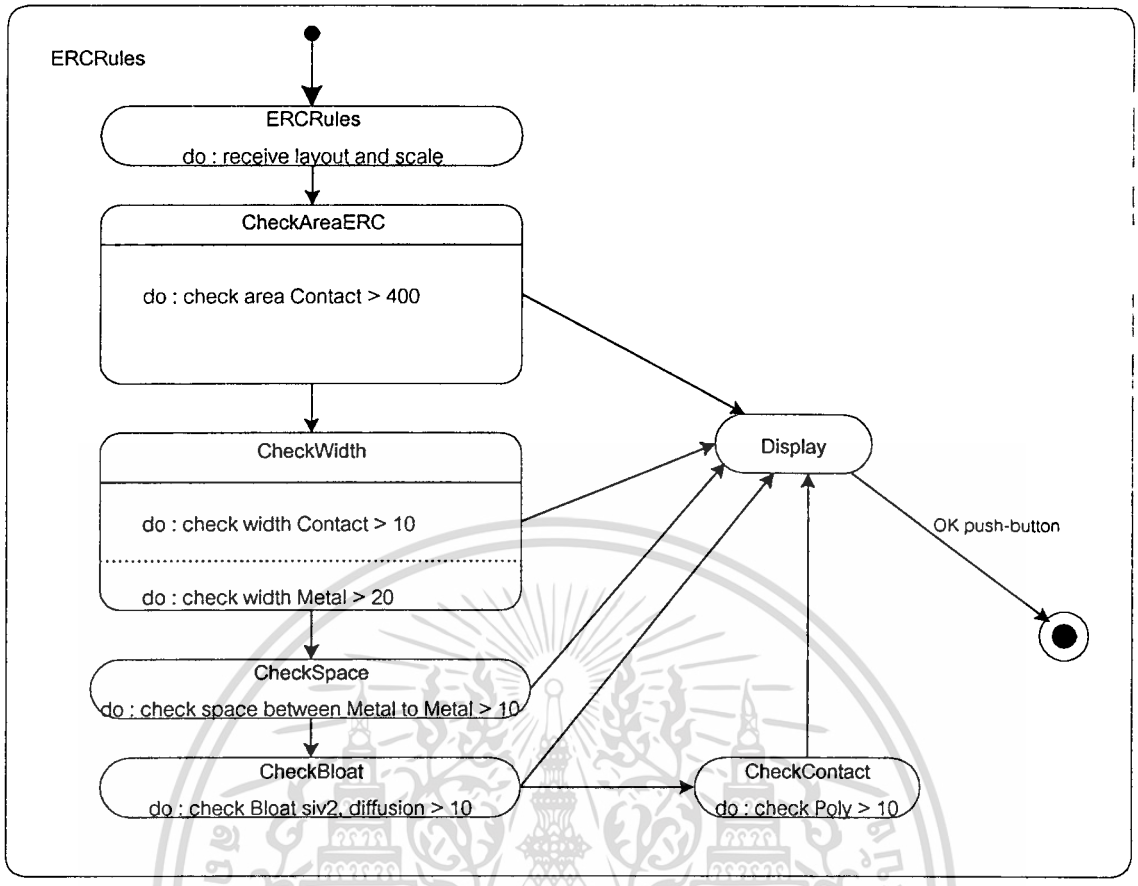
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.12 แสดง DRCPanel Class Diagram

Statechart เริ่มจากการรับเลย์เอาท์และมาตราส่วนที่ใช้ออกแบบ จากนั้นจะเข้าสู่สถานะการตรวจสอบกฎประเภทการตรวจสอบพื้นที่ของชั้นสารที่กำหนดไว้ในกฎ ในที่นี้จะมีการตรวจสอบชั้น Contact ต้องมีพื้นที่มากกว่า 400 μm^2 ต่อจากนั้นเข้าสู่สถานะการตรวจสอบกฎประเภทการตรวจสอบความกว้างของชั้นสาร โดยมีการตรวจสอบ 2 ชั้นสารคือ contact ต้องมีความกว้างอย่างน้อย 10 μm และ Metal ต้องมีความกว้างอย่างน้อย 20 μm จากนั้นจะเข้าสู่สถานะการตรวจสอบกฎประเภทการตรวจสอบระยะห่างชั้นสาร จากนั้นจะเข้าสู่สถานะการตรวจสอบกฎประเภทการตรวจสอบขนาดความกว้างที่ยื่นออกไปของชั้นสารเมื่อชั้นสารนั้นซ้อนทับอีกชั้นสารหนึ่ง และตรวจสอบกฎประเภทการตรวจสอบขนาดของ Contact ในแต่ละสถานะจะแสดงขั้นตอนการตรวจสอบหรือถ้าการตรวจสอบมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้น จะแสดงให้ผู้ใช้ได้ทราบทางหน้าจอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

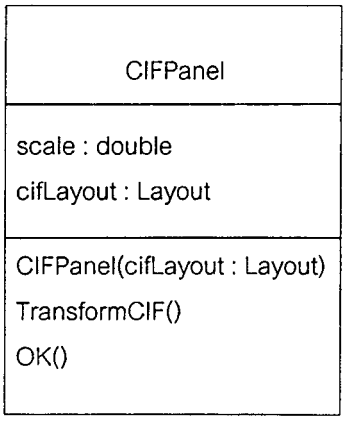


ภาพที่ 4.13 แสดง DRCPanel Statechart

4.5 คลาส CIFPanel

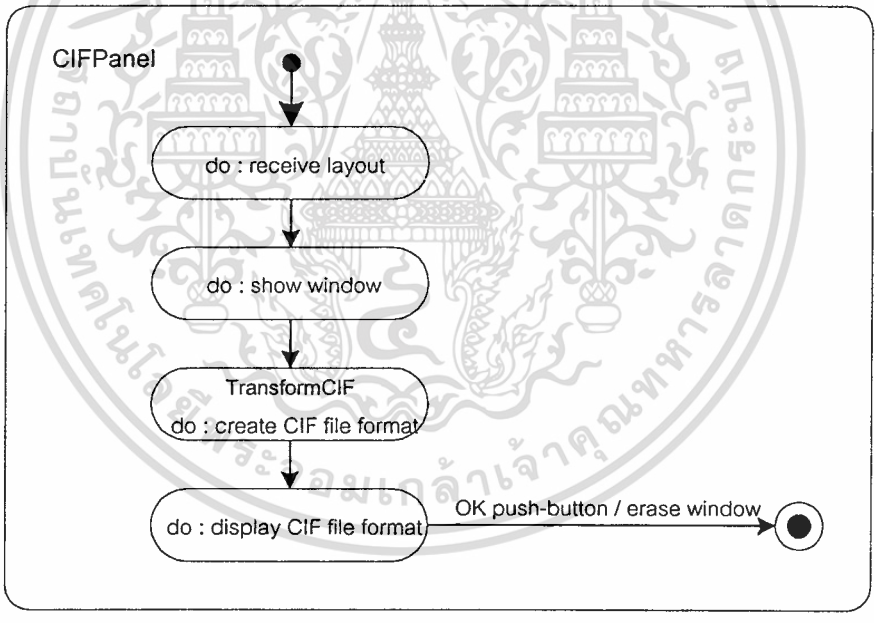
คลาส CIFPanel ทำการแปลงเลย์เอาท์ที่ได้ออกแบบเป็นข้อมูลไฟล์ในรูปแบบภาษา CIF โครงสร้างคลาส CIFPanel มีแอทริบิวท์ คือ scale มีชนิดเป็น double เป็นมาตราส่วนในการออกแบบ และ cifLayout มีชนิดเป็น Layout เป็นเลย์เอาท์ที่ต้องการแปลมีเมทธอร์ดคือ CIFPanel เป็นการรับเลย์เอาท์ที่ต้องการแปลเป็นภาษา CIF, TransformCIF เป็นการทำการแปลเลย์เอาท์เป็นไวยากรณ์ภาษา CIF และ OK เป็นการปิดหน้าต่างการแสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.14 แสดง CIFPanel Class Diagram

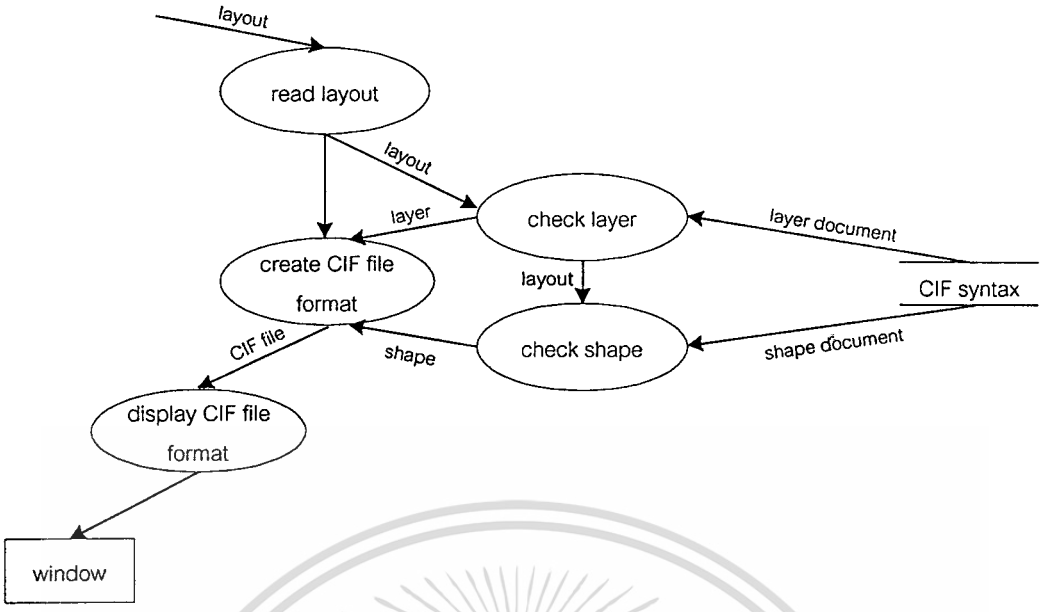
Statechart ของคลาส CIFPanel เริ่มจากการรับเลย์เอาท์ที่ต้องการคำนวณ แสดงหน้าต่างที่จะแสดงภาษา CIF ทำการแปลภาษาและแสดงผลทางหน้าต่างที่สร้างขึ้นเมื่อผู้ใช้กดปุ่ม "OK" จะทำการปิดหน้าต่างและออกมาจากสถานะของ CIFPanel



ภาพที่ 4.15 แสดง CIFPanel Statechart

Data Flow Diagram ของ CIFPanel แสดงดังรูป เริ่มจากการอ่านเลย์เอาท์จากนั้นทำการสร้างไฟล์ CIF โดยการนำเลย์เอาท์ที่รับมาทำการตรวจ layer และ shape ตามรูปแบบไวยากรณ์ของภาษา CIF จากนั้นทำการแสดงผลที่ได้ทางหน้าจอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.16 แสดง DFD คลาส CIFPanel

4.6 คลาส SimulatePanel

การตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าได้ทำการออกแบบให้โปรแกรมแสดง 2 คุณสมบัติ คือ การหาแรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage) และคุณลักษณะของกระแสกับแรงดัน (I-V Characteristics) การออกแบบคลาส จะได้คลาส SimulatePanel ซึ่งมีแอทริบิวท์ คือ

- simLayout มีชนิดเป็น Layout เป็นเลย์เอาท์ที่ใช้ในการคำนวณ
- Eo มีชนิดเป็น double เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสุญญากาศ
- Eox มีชนิดเป็น double เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของออกไซด์
- Un มีชนิดเป็น double เป็นค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอน
- Tox มีชนิดเป็น double เป็นความหนาชั้นออกไซด์
- Cox มีชนิดเป็น double เป็นค่าความจุออกไซด์ต่อหน่วยพื้นที่
- K มีชนิดเป็น double เป็นค่าทรานสคอนดัคแตนส์ของขบวนการสร้าง
- width มีชนิดเป็น integer เป็นขนาดความกว้างของช่องทางเดินกระแส
- long มีชนิดเป็น integer เป็นความยาวของช่องทางเดินกระแส

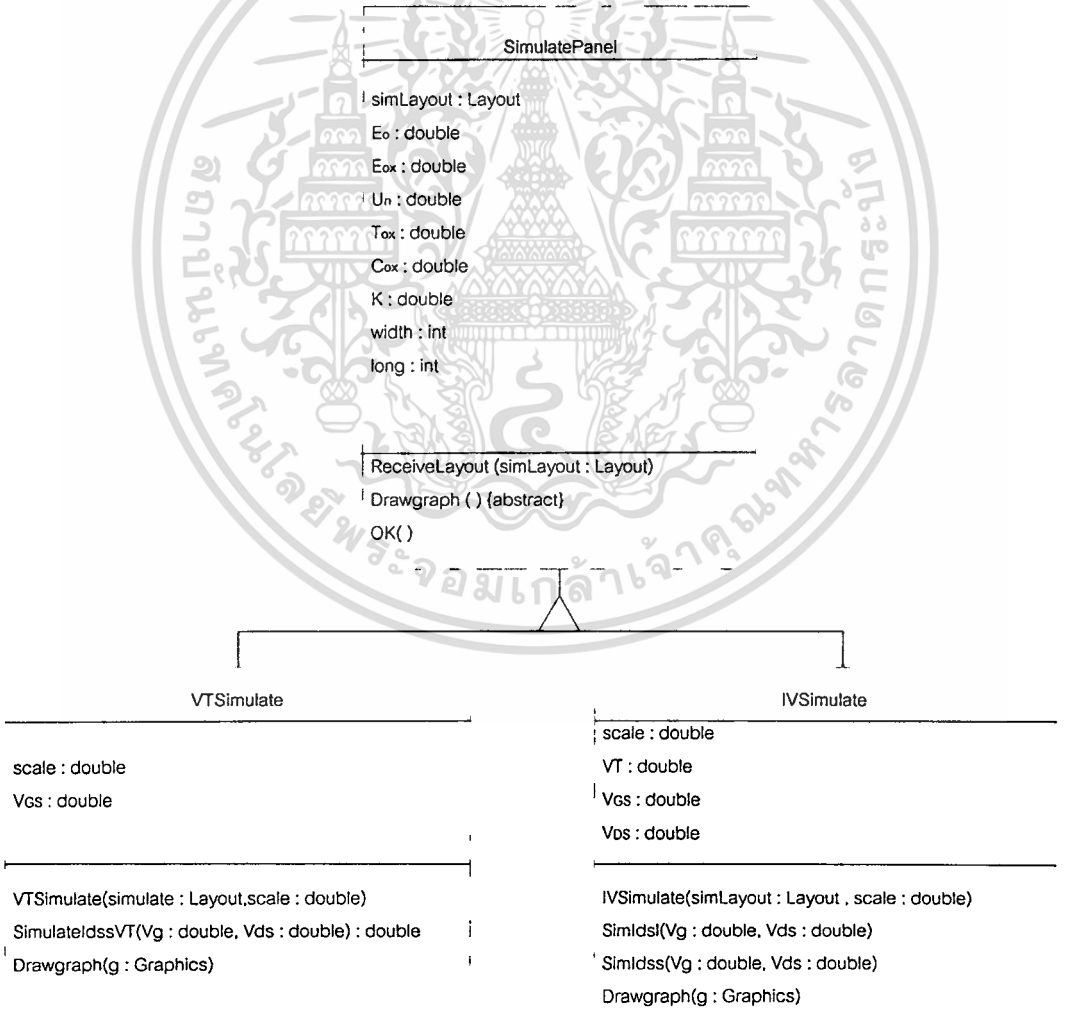
มีเมธอร์ดคือ

- ReceiveLayout ทำการรับคลาสเลย์เอาท์จาก MainFrame
- Drawgraph ทำการแสดงผลในรูปแบบกราฟ
- OK ทำการปิดหน้าต่างที่แสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลาส SimulatePanel จะทำการสร้าง subclass ตามการคำนวณได้เป็นสอง subclass คือ คลาส VTSimulate ทำการคำนวณหาแรงดันขีดเริ่ม มีแอทริบิวท์คือ scale มีชนิดเป็น double เป็นมาตราส่วนที่ใช้ในการออกแบบ และ V_{GS} มีชนิดเป็น double คือค่าแรงดันที่เกท ซึ่งใช้ในการคำนวณ มีเมทธอร์ดคือ VTSimulate ทำการรับเลย์เอาท์และค่ามาตราส่วนที่ทำการออกแบบ, SimulateIdssVT ทำการหาค่ากระแส และ Drawgraph ทำการวาดกราฟที่ได้จากการคำนวณ

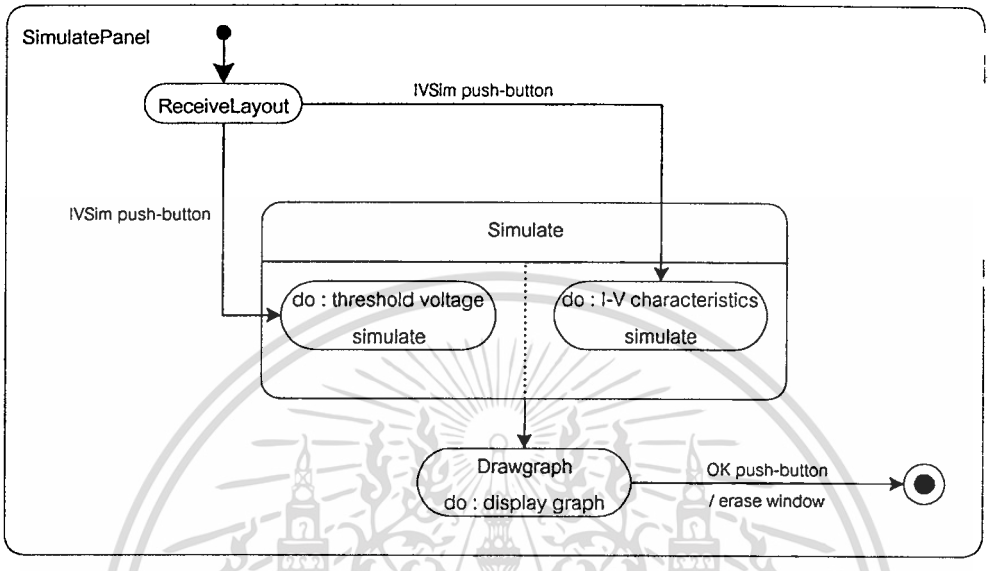
คลาส IVSimulate ทำการคำนวณหาคุณลักษณะของกระแสกับแรงดันมีแอทริบิวท์คือ scale มีชนิดเป็น double เป็นมาตราส่วนที่ใช้ในการออกแบบ, VT มีชนิดเป็น double เป็นค่าแรงดันขีดเริ่ม, V_{GS} มีชนิดเป็น double เป็นค่าเป็นแรงดัน, V_{DS} มีชนิดเป็น double เป็นค่าเป็นแรงดัน เดรน-ซอส มีเมทธอร์ดคือ IVSimulate ทำการรับเลย์เอาท์และมาตราส่วนที่ออกแบบ, SimIdsl ทำการคำนวณกระแสในช่วงไม่อิ่มตัว, SimIdss ทำการคำนวณกระแสในช่วงอิ่มตัว และ Drawgraph ทำการวาดกราฟที่ได้จากการคำนวณ



ภาพที่ 4.17 แสดง SimulatePanel Class Diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

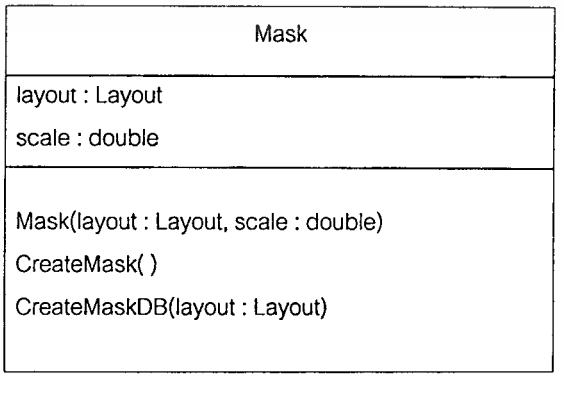
Statechart ของคลาส SimulatePanel เริ่มจาก ReceiveLayout ทำการรับเลย์เอท์จากการออกแบบจากนั้นนำเลย์เอาท์ที่ได้มาทำการคำนวณซึ่งขึ้นอยู่กับผู้ใช้ว่าผู้ใช้ต้องการดูกราฟการคำนวณใด จากนั้นจะทำการวาดกราฟที่ได้



ภาพที่ 4.18 แสดง SimulatePanel Statechart

4.7 คลาส Mask

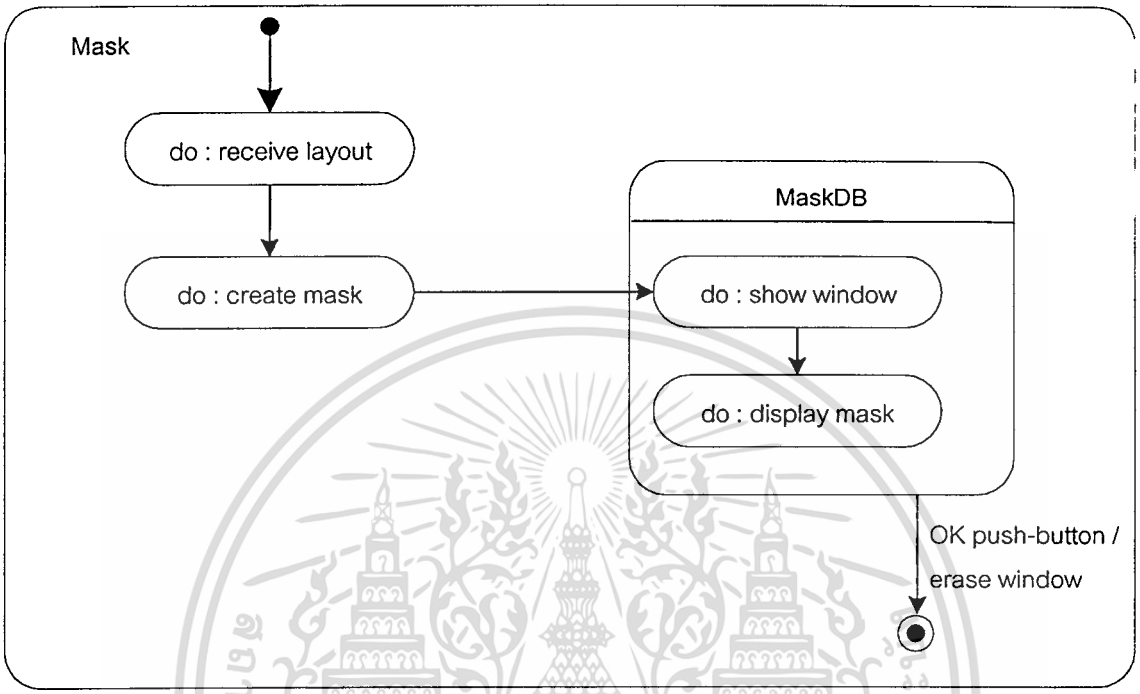
คลาส Mask จะทำการรับเลย์เอาท์จากคลาส MainFrame แล้วนำมาจำแนก Mask แบ่งตาม layer และ shape ที่ผู้ใช้ได้วาดไว้ในแต่ละ layer และนำ Mask ที่ได้แสดงบนหน้าจอทีละ Mask การออกแบบคลาสเป็นดังนี้ คลาส Mask มีแอทริบิวท์คือ layout มีชนิดเป็น Layout คือ เลย์เอาท์ที่ต้องการทราบรูปแบบ Mask มีเมทธอร์ดคือ Mask ทำการรับเลย์เอาท์, CreateMask ทำหน้าที่จำแนก Mask ทีละ layer และ CreateMaskDB สร้างหน้าต่างเพื่อแสดง Mask ที่ได้ ทีละ Mask



ภาพที่ 4.19 แสดง Mask Class Diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Statechart มีดังนี้ เริ่มต้นจากการรับเลย์เอาท์ ต่อจากนั้นทำการสร้าง Mask และเข้าสู่สถานะ MaskDB ทำการสร้างหน้าต่างและแสดงผลของ Mask ที่ได้ในแต่ละ Mask จะมีปุ่ม "OK" ให้ผู้เพื่อออกจากการแสดง Mask



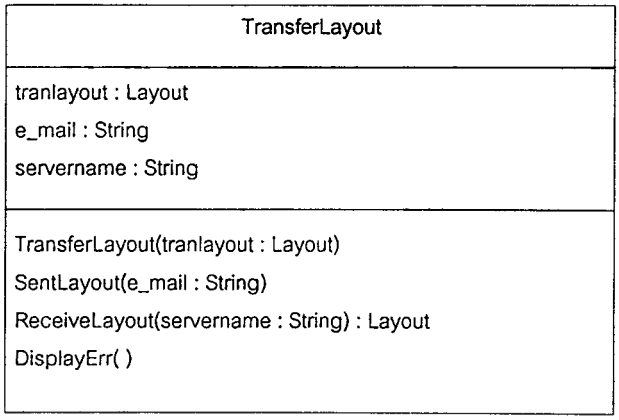
ภาพที่ 4.20 แสดง Mask Statechart

4.8 คลาส TransferLayout

การทำงานนของคลาส TransferLayout มีดังนี้ ทำการแสดงหน้าต่างเพื่อให้ผู้ใช้ได้เลือกการทำงานว่าจะส่งหรือจะรับข้อมูลเลย์เอาท์ ถ้าผู้ใช้จะทำการส่งเลย์เอาท์จะเป็นการนำเลย์เอาท์ที่ได้ออกแบบในขณะนี้ส่งไปยังเครื่องแม่ที่ผู้ใช้ระบุในรูปแบบของจดหมายอิเล็กทรอนิกส์ ถ้าผู้ใช้เลือกการรับข้อมูลเลย์เอาท์ โปรแกรมจะทำการรับข้อมูลจากเครื่องแม่และชื่อข้อมูลเลย์เอาท์ที่ผู้ใช้ระบุ

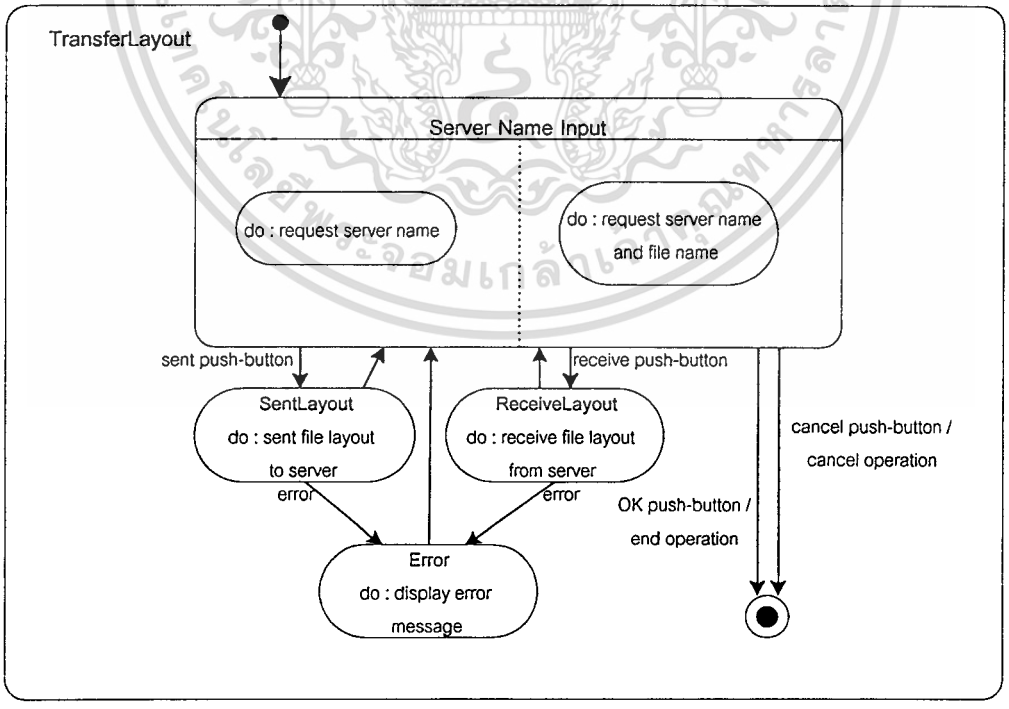
คลาส TransferLayout มีแอทริบิวท์ดังนี้ tranlayout ชนิดเป็น Layout เป็น ตัวแปรเลย์เอาท์ที่จะทำการรับหรือส่ง, e_mail เป็นตัวแปรสตริงระบุชื่อที่อยู่ของจดหมายอิเล็กทรอนิกส์และ servername เป็นตัวแปรสตริงระบุชื่อเครื่อง Web Server และชื่อไฟล์เลย์เอาท์ที่ต้องการ คลาส TransferLayout มีเมทธอร์ดดังนี้ TransferLayout ทำการรับเลย์เอาท์ที่ออกแบบไว้, SentLayout ทำการส่งเลย์เอาท์ในรูปแบบจดหมายอิเล็กทรอนิกส์ไปยังที่อยู่ที่ผู้ใช้กำหนด, ReceiveLayout ทำการรับข้อมูลเลย์เอาท์ ผลที่ได้จะเป็นเลย์เอาท์ตามข้อมูลที่ได้รับ และ DisplayErr แสดงข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น กับรูปแบบของคลาสแสดงดังภาพ 4.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.21 แสดง Transfer Class Diagram

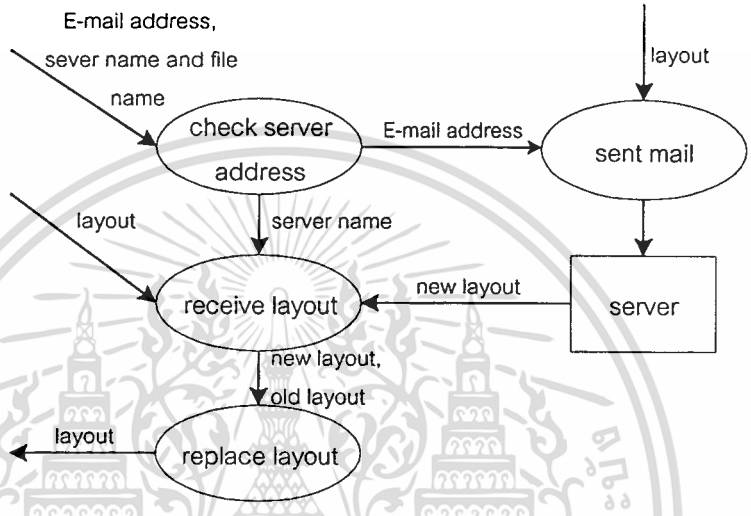
Statechart ของ TransferLayout มีดังนี้ เริ่มจากสถานะ Server Name Input ให้ผู้ใช้ทำการกรอกที่อยู่ของจดหมายอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำการส่งเลย์เอาท์ และถ้าต้องการรับเลย์เอาท์ผู้ใช้ต้องกรอกข้อมูลชื่อ server name และชื่อไฟล์เลย์เอาท์ที่ต้องการ จากนั้นถ้าผู้ใช้ทำการส่งเลย์เอาท์ได้ทำการกดปุ่มการส่งข้อมูลเลย์เอาท์ ถ้าผู้ใช้ต้องการรับข้อมูลเลย์เอาท์ให้กดปุ่มรับ เมื่อมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นเนื่องจากการส่งหรือรับข้อมูลเลย์เอาท์ข้อผิดพลาดนั้น ๆ จะแสดงให้ทราบในสถานะ Error state Statechart เป็นดังภาพ 4.22



ภาพที่ 4.22 แสดง TransferLayout Statechart

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Data Flow Diagram ของการรับส่งข้อมูลเริ่มจากการรับข้อมูลจากผู้ใช้ ถ้าต้องการส่งแฟ้มข้อมูลเลย์เอาท์ให้ทำการใส่ชื่อที่อยู่ของจดหมายอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการส่ง ถ้าผู้ใช้ต้องการทำการรับข้อมูลผู้ใช้จะต้องกรอกข้อมูล server name และ file name โปรแกรมจะทำการตรวจสอบเครื่องแม่ว่าทำการติดต่อได้หรือไม่ ถ้าได้จะทำการรับหรือส่งข้อมูลความต้องการ ถ้าเป็นการรับข้อมูล หลังจากขั้นตอนการรับข้อมูลเสร็จสิ้นแล้วโปรแกรมจะทำการเปลี่ยนข้อมูลที่มีอยู่ให้เป็นข้อมูลเลย์เอาท์ใหม่ที่รับเข้ามา แล้วทำการส่งต่อไปยังการแสดงภาพเลย์เอาท์ในขั้นตอนการสร้างเลย์เอาท์



ภาพที่ 4.23 แสดง DFD คลาส TransferLayout

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
โปรแกรมออกแบบวงจรรวมขนาดเล็ก

5.1 การพัฒนาโปรแกรม

การพัฒนาโปรแกรมโดยใช้คลาสที่ได้ทำการออกแบบมาพัฒนา JDK (Java Development Kit) รุ่น 1.1.6 และรันภายใต้ระบบปฏิบัติการไมโครซอฟท์วินโดว์ 95 ซึ่งภาษา Java เป็นภาษาที่สนับสนุนการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ อีกทั้งยังมีคลาสสนับสนุนการพัฒนาโปรแกรมให้สามารถใช้งานบนอินเตอร์เน็ตได้ ในส่วนของเครื่อง Web Server ได้ทำการทดสอบกับโปรแกรม Sambar Server รุ่น 4.2 ซึ่งเป็น Web Server ที่ศูนย์วิจัยอิล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

5.2 วิธีการใช้โปรแกรมออกแบบวงจรรวมขนาดเล็ก

โปรแกรมแสดงส่วนหลักบนหน้าจอคือ เมนูบาร์ ส่วนสร้างภาพเลย์เอาท์ และส่วนแสดงภาพตัดขวาง เมนูบาร์ประกอบไปด้วยเมนูต่าง ๆ ดังนี้

1. เมนู File เป็นเมนูการทำงานของไฟล์ มีเมนูย่อยดังนี้
   - New ทำหน้าที่สร้างเลย์เอาท์ใหม่
   - Open เปิดแฟ้มข้อมูลภาษา CIF ของเลย์เอาท์ที่ต้องการ
   - Save ทำการบันทึกเลย์เอาท์ที่ได้ออกแบบ ในรูปแบบภาษา CIF
   - Save as ทำการบันทึกเลย์เอาท์ที่ได้ออกแบบ โดยการกำหนดชื่อและนามสกุลของไฟล์ที่จะทำการบันทึกตามการกำหนดของผู้ใช้
   - Print ทำการพิมพ์เลย์เอาท์ที่ได้ออกแบบ
   - Transfer การรับและส่งไฟล์ของเลย์เอาท์ระหว่างโปรแกรมกับเครื่องแม่ ผ่านทางเครือข่ายอินเตอร์เน็ต
   - Notepad เปิดโปรแกรม Notepad
   - Exit โปรแกรมจบการทำงาน
2. เมนู Edit เป็นการกำหนดสถานะการทำงานส่วนสร้างภาพเลย์เอาท์ มีเมนูย่อยดังนี้
   - Edit กำหนดสถานะให้ผู้ใช้สามารถสร้างภาพเลย์เอาท์
   - Delete กำหนดสถานะการลบภาพเลย์เอาท์
   - Cross-section กำหนดสถานะการกำหนดตำแหน่งการสร้างภาพตัดขวาง
3. เมนู Design Rules เป็นการกำหนดกฎการออกแบบโดยมีเมนูย่อยเป็นกฎการออกแบบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ERC กฎการออกแบบของห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

NMOS กฎการออกแบบของหมีดและคอนเวย์สำหรับการออกแบบวงจร NMOS

User-defined กฎการออกแบบของผู้ใช้ โดยผู้ใช้ทำการกำหนดกฎขึ้นเองจากโปรแกรมสร้างคลาสกฎการออกแบบ

4. เมนู Options เป็นการกำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้

Set Edit ตั้งค่าสำหรับการสร้างภาพเลย์เอาท์

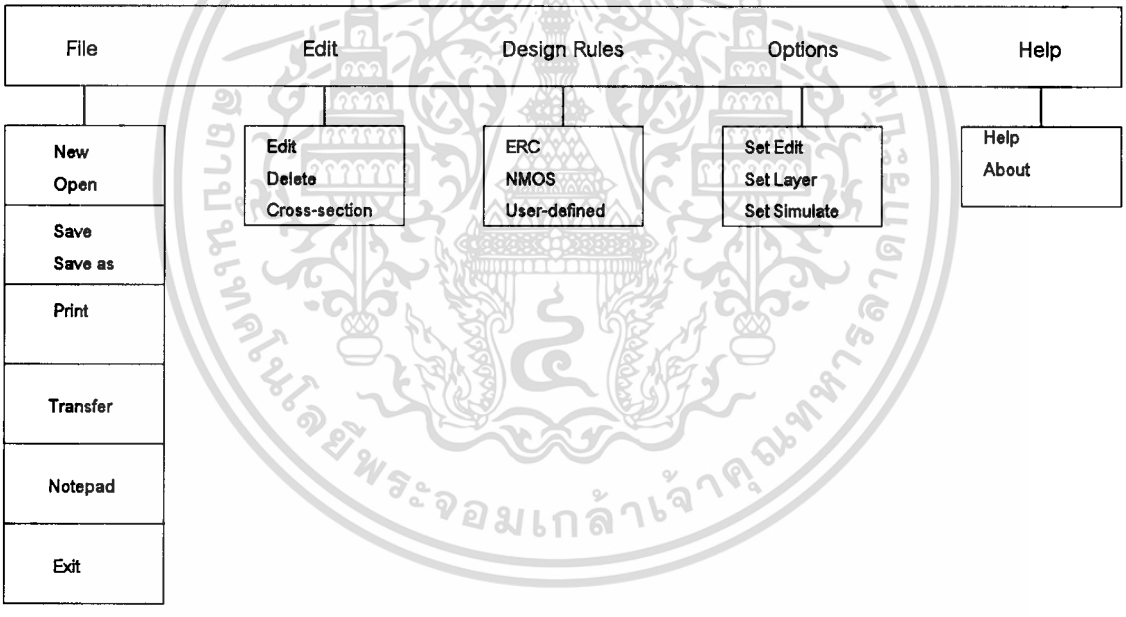
Set Layer ตั้งค่า layer ที่มีอยู่ในโปรแกรม

Set Simulate ตั้งค่าสำหรับการจำลองพฤติกรรมทางไฟฟ้าของวงจร

5. เมนูหลัก Help มีเมนูย่อย คือ

Help คำอธิบายของโปรแกรม

About แสดงรายละเอียดโปรแกรม



ภาพที่ 5.1 แสดงรายละเอียดเมนูบาร์

ส่วนการสร้างภาพเลย์เอาท์ เป็นบริเวณที่ให้ผู้ใช้ทำการสร้างภาพเลย์เอาท์โดยส่วนบนเป็นการกำหนด Layer และ Shape ของการวาดในแต่ละครั้งที่ผู้ใช้ทำการวาด บริเวณตรงกลางเป็นพื้นที่ในการวาดภาพเลย์เอาท์ ทางด้านล่างแสดงตำแหน่งของ cursor และทางด้านซ้ายแสดงปุ่ม กำหนดการแสดงผลลัพธ์ของเลย์เอาท์ตามคำสั่งของแต่ละปุ่มดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปุ่ม Clear ทำการลบภาพเลย์เอาท์ที่กำลังวาดและทำการลบภาพตัดขวางในส่วนการแสดงภาพตัดขวาง

ปุ่ม Cut แสดงภาพตัดขวางตามตำแหน่งที่ผู้ใช้กำหนด

ปุ่ม Check แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการตรวจสอบกฎการออกแบบ

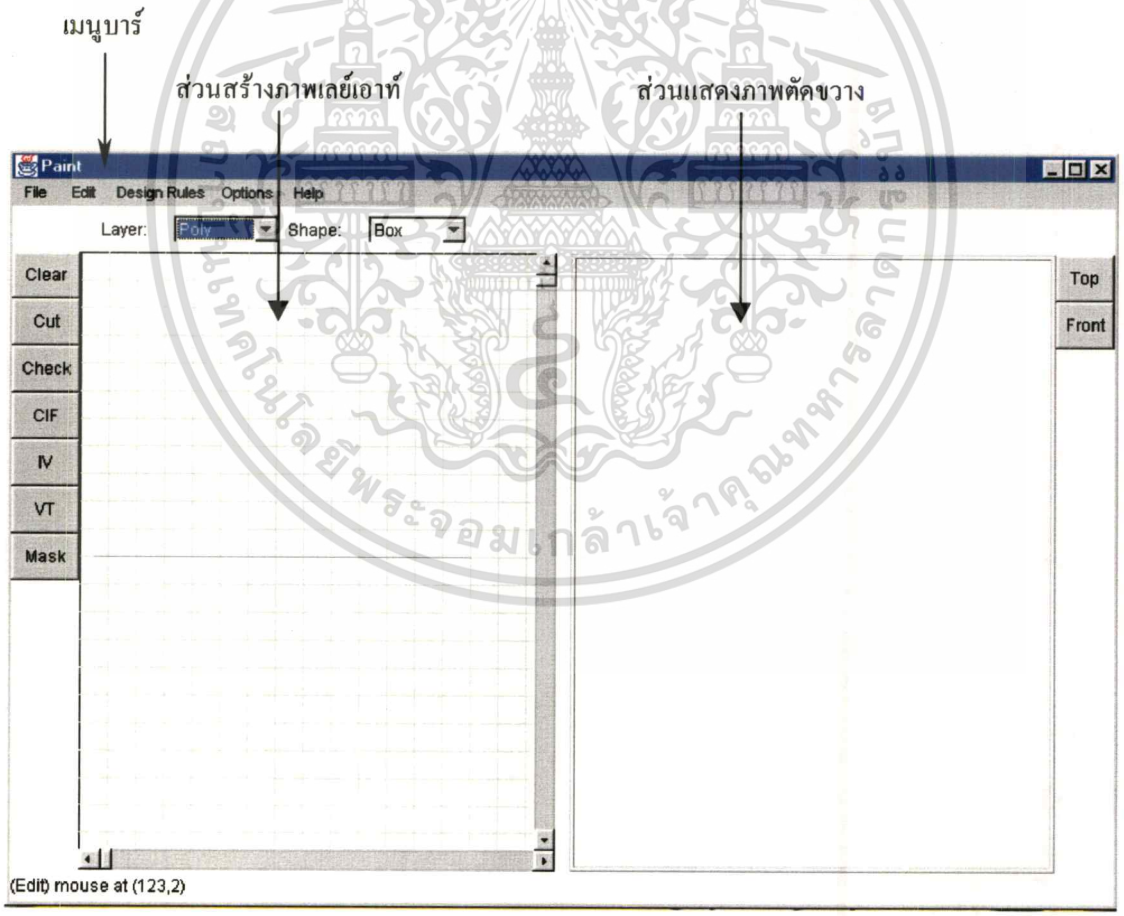
ปุ่ม CIF แสดงภาษา CIF ของเลย์เอาท์

ปุ่ม IV แสดงกราฟคุณลักษณะของกระแสกับแรงดัน

ปุ่ม VT แสดงกราฟแรงดันขีดเริ่ม

ปุ่ม Mask แสดง mask ของเลย์เอาท์

ส่วนแสดงภาพตัดขวาง บริเวณพื้นที่ส่วนตรงกลางเป็นบริเวณแสดงภาพตัดขวาง โดยภาพที่แสดงมีมาตราส่วนเช่นเดียวกับมาตราส่วนของภาพเลย์เอาท์ ทางด้านขวาเป็นปุ่มกำหนดลักษณะการแสดงภาพตัดขวางคือ ปุ่ม Top เป็นการกำหนดการแสดงภาพตัดขวางทางด้านบนของเลย์เอาท์ และปุ่ม Front เป็นการกำหนดการแสดงภาพตัดขวางทางด้านหน้าของเลย์เอาท์



ภาพที่ 5.2 แสดงหน้าจอหลักของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.1 การสร้างภาพเลย์เอาท์

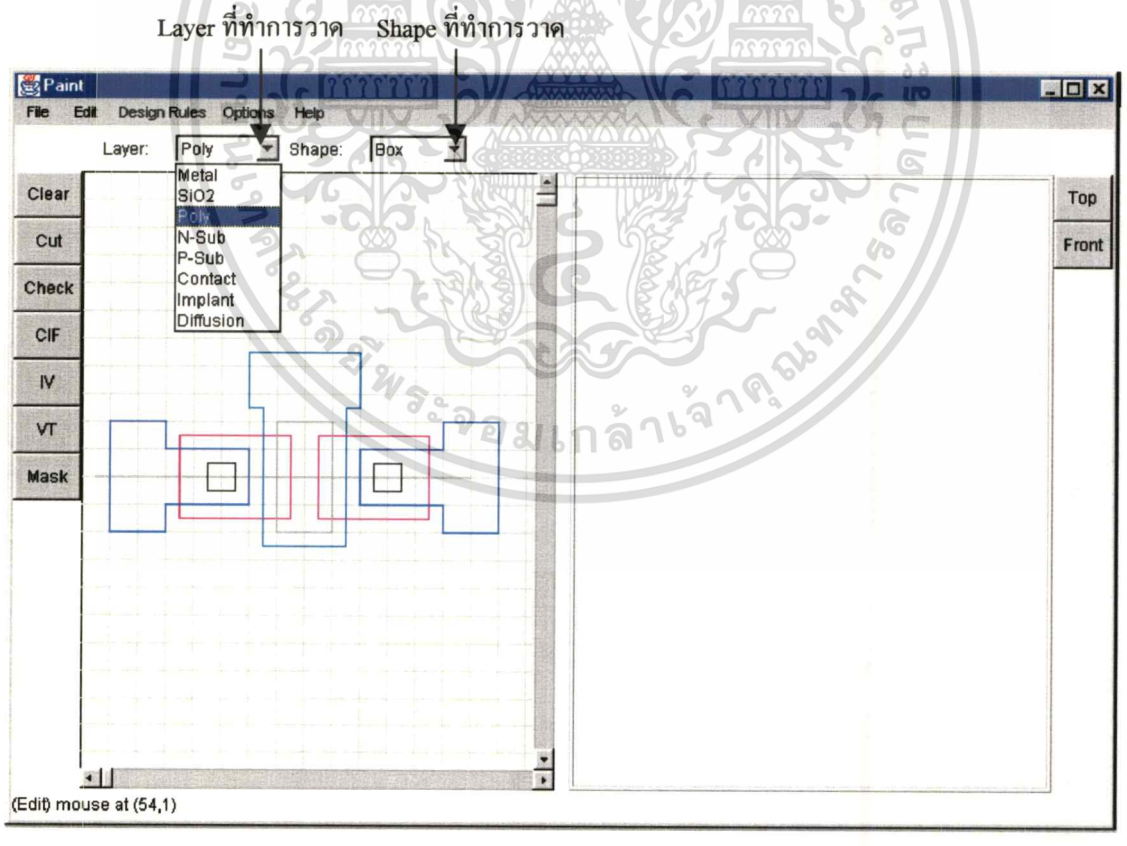
การสร้างภาพเลย์เอาท์มีสถานะสองสถานะคือ Edit เป็นสถานะให้ผู้ใช้สามารถทำการวาดภาพเลย์เอาท์ลงบนส่วนการสร้างภาพเลย์เอาท์และ Delete เป็นสถานะให้ผู้ใช้สามารถลบส่วนประกอบต่าง ๆ ของภาพเลย์เอาท์

การสร้างภาพเลย์เอาท์ มีขั้นตอนดังนี้

1. เลือกสถานะ Edit จากเมนูบาร์ Edit
2. เลือก Layer และ Shape ที่ต้องการทำการวาด
3. เลื่อน Mouse มายังตำแน่งที่ต้องการวาด
4. กดปุ่มซ้ายของ Mouse เพื่อทำการวาด

การลบส่วนประกอบของภาพเลย์เอาท์ มีขั้นตอนดังนี้

1. เลือกสถานะ Delete จากเมนูบาร์ Edit
2. เลื่อน Mouse มายังตำแหน่งของภาพเลย์เอาท์ที่ต้องการลบ และทำการกดปุ่มซ้ายของ Mouse เพื่อเลือก layer ที่ต้องการลบ
3. กดปุ่ม Del



ภาพที่ 5.3 แสดงการสร้างภาพเลย์เอาท์

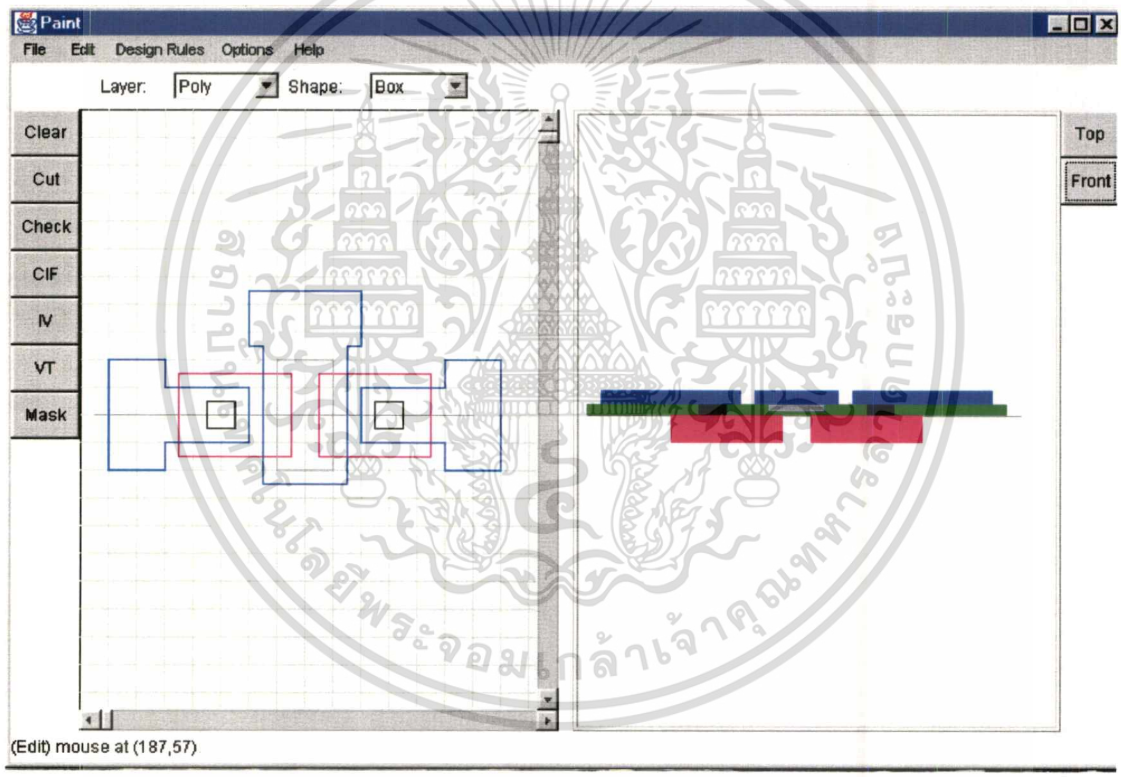
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 การแสดงภาพตัดขวาง

การแสดงภาพตัดขวาง มีขั้นตอนดังนี้

1. เลือกสถานะ Cross-section จากเมนูบาร์ Edit
2. กำหนดตำแหน่งการทำภาพตัดขวางโดยเลือก Mouse มายังส่วนการสร้างภาพเลย์เอาท์ และทำการกดปุ่มทางซ้ายของ Mouse
3. กดปุ่ม Cut เพื่อแสดงภาพตัดขวางในส่วนการแสดงภาพตัดขวาง

เมื่อผู้ใช้กดปุ่ม Cut การแสดงภาพตัดขวางเป็นภาพตัดขวางทางด้านบนของเลย์เอาท์ ถ้าต้องการให้แสดงภาพตัดขวางทางด้านหน้าของเลย์เอาท์ ผู้ใช้ต้องกดปุ่ม Front และถ้าต้องการภาพตัดขวางทางด้านบนของเลย์เอาท์อีกครั้ง ผู้ใช้ต้องกดปุ่ม Top เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาพเลย์เอาท์ ภาพตัดขวางจะไม่เปลี่ยนแปลงตามภาพเลย์เอาท์ที่เปลี่ยนจนกว่าผู้ใช้กดปุ่ม Cut



ภาพที่ 5.4 แสดงภาพตัดขวาง

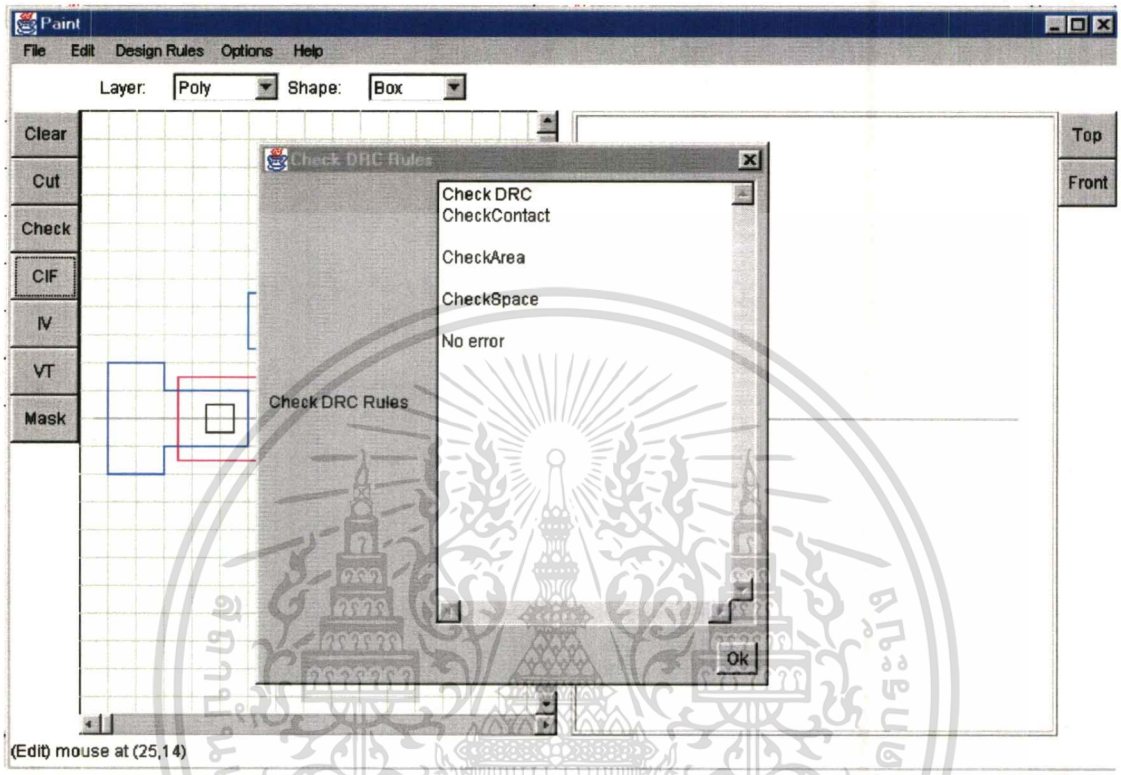
5.2.3 การตรวจสอบกฎการออกแบบ

การตรวจสอบกฎการออกแบบ มีขั้นตอนดังนี้

1. เลือกกฎการออกแบบที่ต้องการใช้ตรวจสอบเลย์เอาท์จากเมนูบาร์ Design Rules
2. กดปุ่ม Check

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าต่างที่ปรากฏจะแสดงขั้นตอนการตรวจสอบว่ามีขั้นตอนการตรวจสอบกฎใดผ่านหรือกฎใดไม่ผ่าน กดปุ่ม OK เมื่อต้องการปิดหน้าต่างการตรวจสอบกฎการออกแบบ

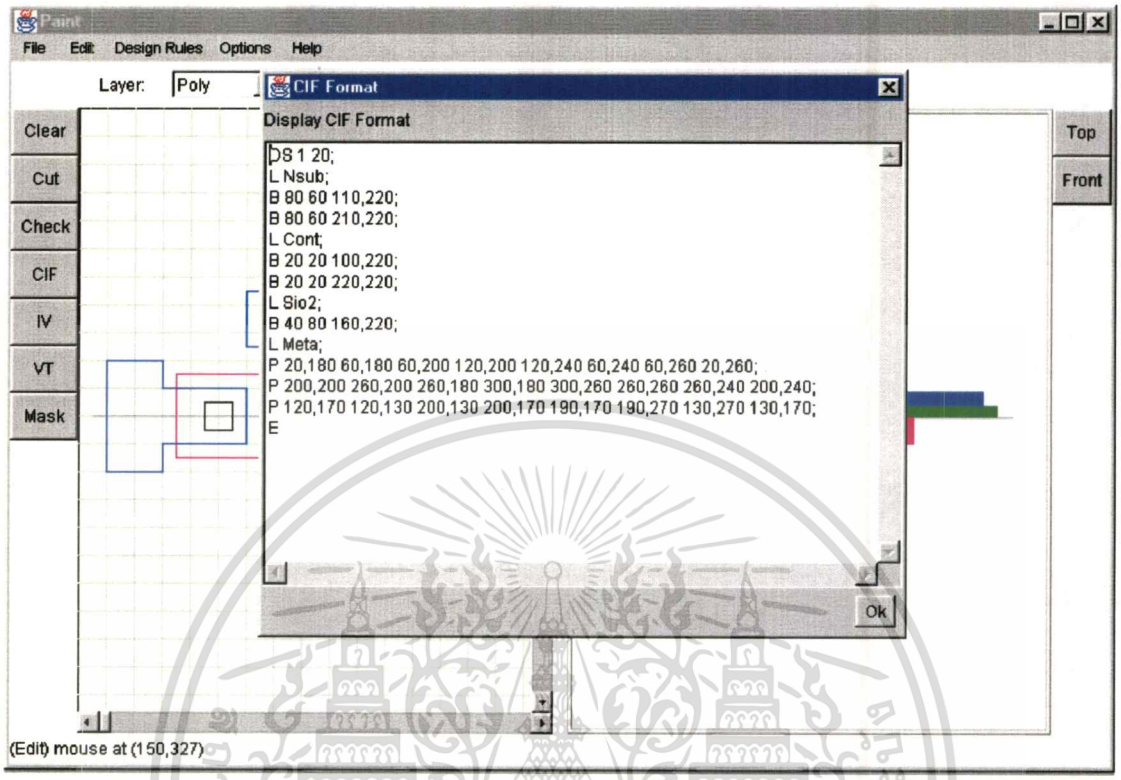


ภาพที่ 5.5 แสดงผลการตรวจสอบกฎการออกแบบ

5.2.4 แสดงภาษา CIF

การแสดงภาษา CIF ของเลย์เอาท์ที่ออกแบบ ให้ผู้ใช้กดปุ่ม CIF จะปรากฏหน้าต่างแสดงรายละเอียดภาษา CIF ขึ้น กดปุ่ม OK เมื่อต้องการปิดหน้าต่างแสดงภาษา CIF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

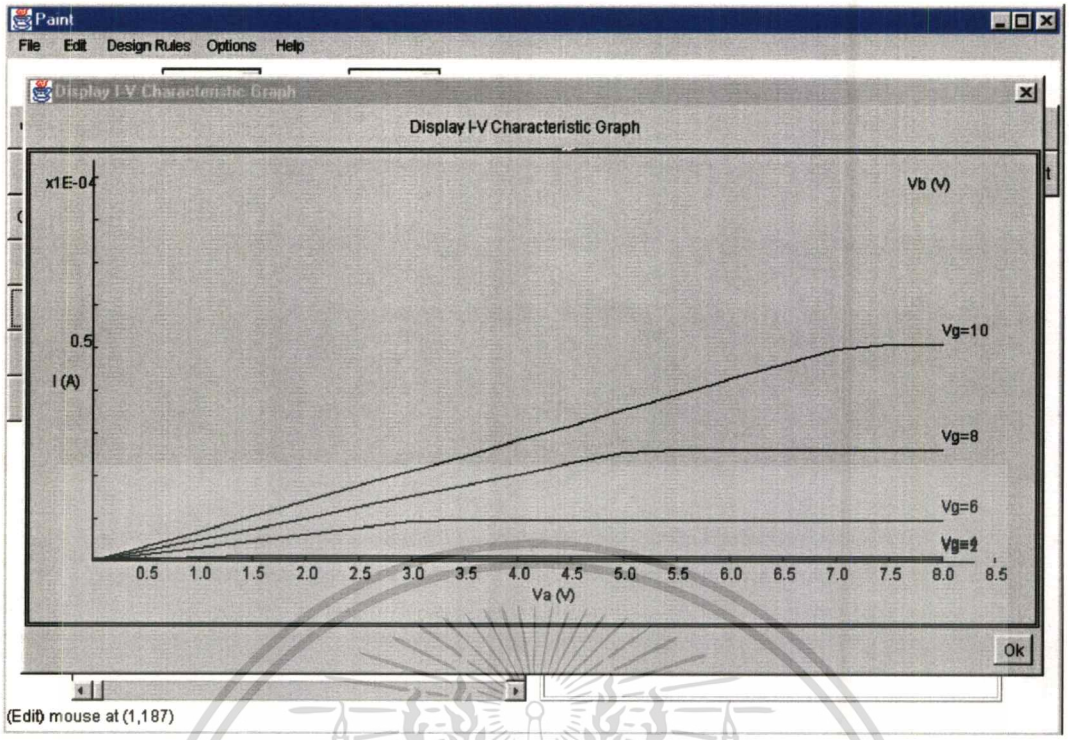


ภาพที่ 5.6 แสดงภาษา CIF ของเลย์เอาท์ที่ทำการออกแบบ

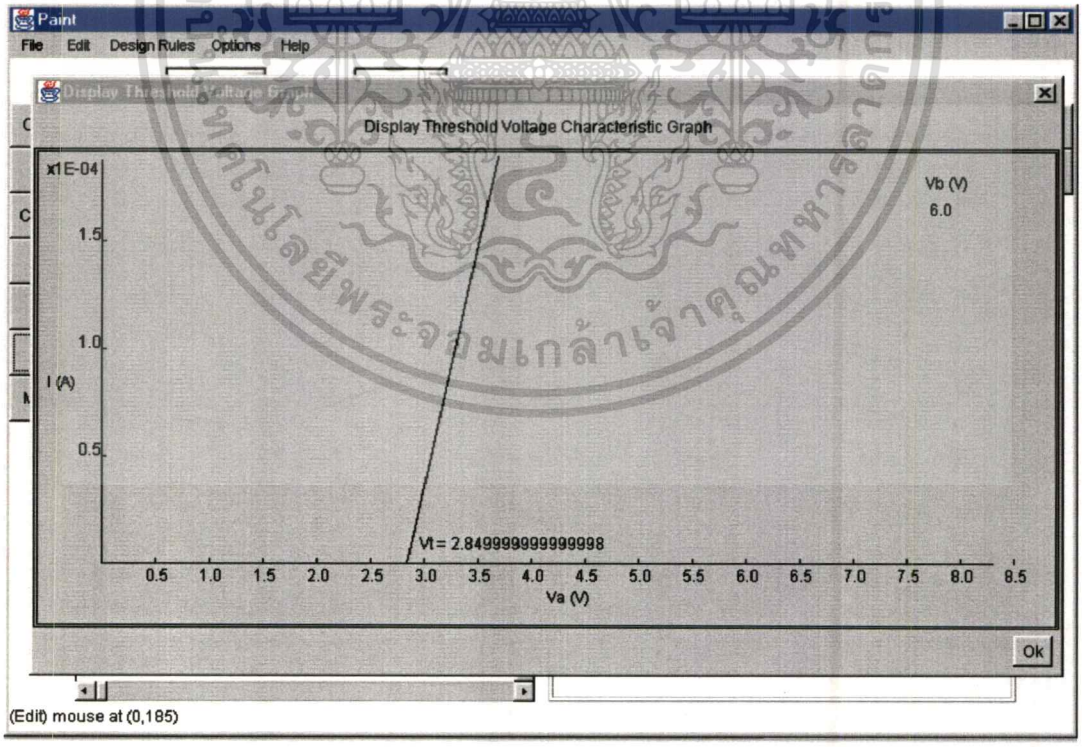
5.2.5 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้า

เมื่อกดปุ่ม IV โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างกราฟคุณลักษณะของกระแสกับแรงดันขึ้น กดปุ่ม OK เมื่อต้องการปิดหน้าต่าง และเมื่อกดปุ่ม VT โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างกราฟแรงดันขีดเริ่ม กดปุ่ม OK เมื่อต้องการปิดหน้าต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.7 กราฟแสดงคุณลักษณะของกระแสกับแรงดัน

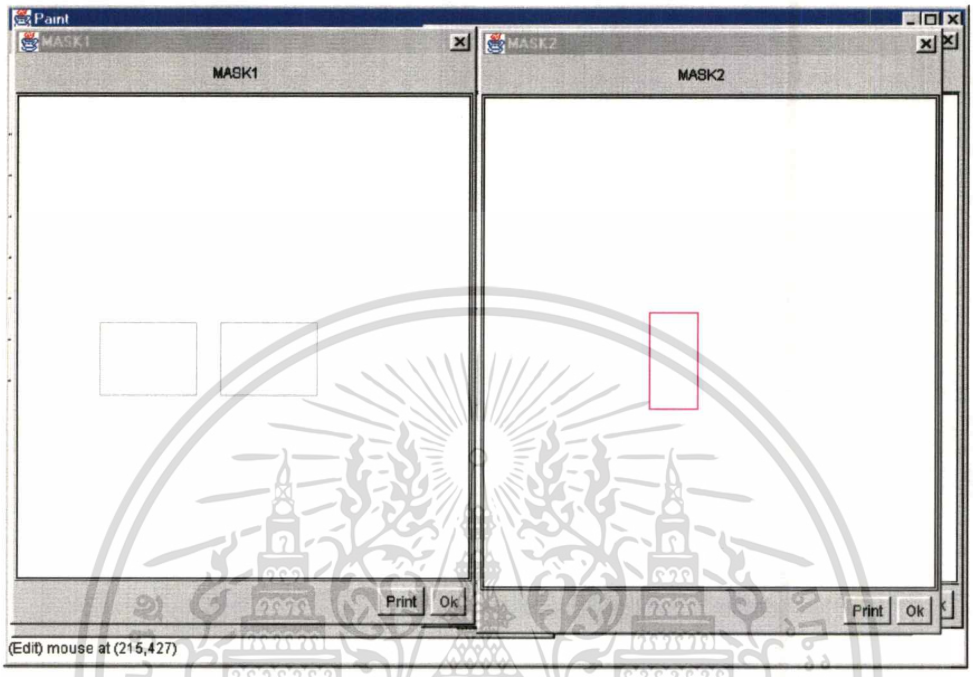


ภาพที่ 5.8 กราฟแสดงแรงดันขีดเริ่ม

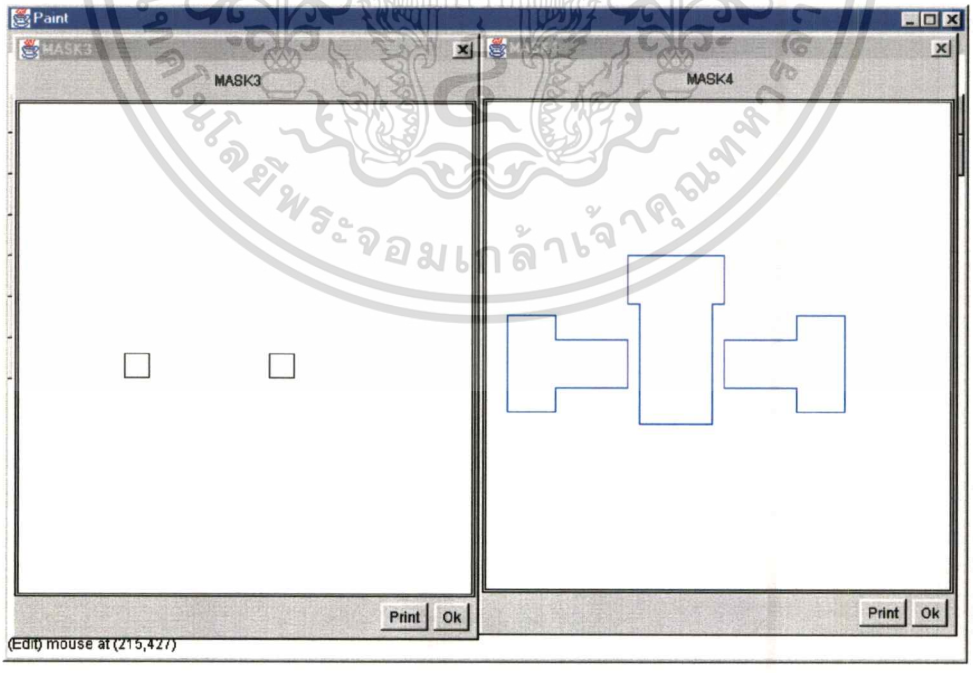
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.6 แสดง Mask

ทำการแสดง Mask เมื่อใช้ในขบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี โดยผู้ใช้กดปุ่ม Mask โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างแต่ละหน้าต่างซึ่งแต่ละหน้าต่างจะแสดงรูปลักษณะของแต่ละ Mask กดปุ่ม OK เพื่อเปิดหน้าต่างแต่ละหน้าต่าง



(ก)



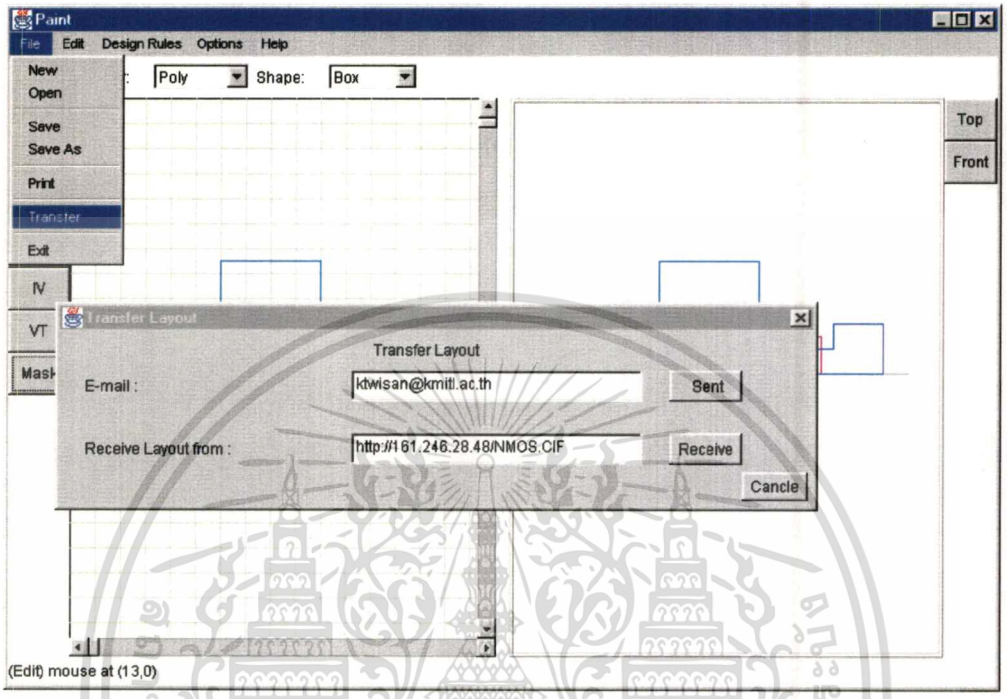
(ข)

ภาพที่ 5.9 แสดง Mask ของเลย์เอาท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.7 การรับ-ส่งแฟ้มเลย์เอาท์

เมื่อผู้ใช้เลือกคำสั่ง Transfer จากเมนูบาร์ File จะปรากฏหน้าต่างการรับส่งเลย์เอาท์ขึ้นถ้าผู้ใช้ต้องการส่งข้อมูลให้ผู้ใช้ที่ต้องการส่งและกดปุ่ม Sent ถ้าผู้ใช้ต้องการรับข้อมูลให้ทำการกรอกที่อยู่และชื่อเลย์เอาท์ที่ต้องการรับเข้าโปรแกรม จากนั้นกดปุ่ม Receive



ภาพที่ 5.10 แสดงหน้าจอการรับส่งแฟ้มข้อมูลเลย์เอาท์

5.3 วิธีการใช้โปรแกรมสร้างคลาสกฎการออกแบบ

โปรแกรมนี้เป็นโปรแกรมสร้างคลาสกฎการออกแบบที่ผู้ใช้สามารถกำหนดกฎการออกแบบขึ้นมาได้ตามความต้องการตามรูปแบบการตรวจสอบกฎทั้ง 5 รูปแบบที่ได้อธิบายในคลาส DRCPanel ซึ่งการสร้างคลาสของโปรแกรมนี้จะเป็นการสร้าง Subclass จากคลาส DRCPanel นั่นเอง

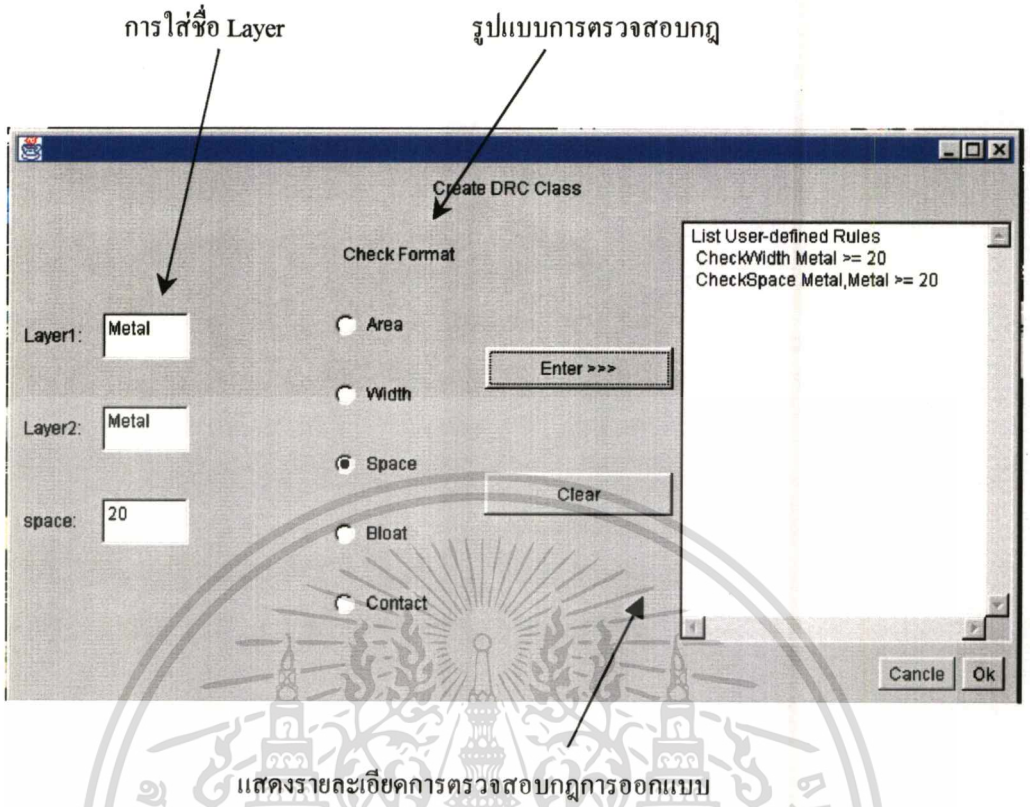
โปรแกรมประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักคือ

1. การกำหนด layer เป็นการกำหนด layer1 layer2 ที่ต้องการทำการตรวจสอบและ space เป็นการกำหนดขนาดของ layer ที่ต้องการตรวจสอบ

2. รูปแบบการตรวจสอบ มีทั้งหมด 5 รูปแบบ โดยผู้ใช้ต้องเลือกรูปแบบใดรูปแบบหนึ่ง

3. ส่วนแสดงรายละเอียดการตรวจสอบกฎการออกแบบ เป็นส่วนแสดงรายละเอียดรูปแบบกฎการออกแบบทั้งหมดที่ผู้ใช้กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.11 แสดงหน้าจอโปรแกรมสร้างคลาสกฎการออกแบบ

การสร้างคลาสกฎการออกแบบ มีขั้นตอนดังนี้

1. ป้อนชื่อ layer ที่ต้องการตรวจสอบ
2. ป้อนขนาดที่ต้องการตรวจสอบ
3. เลือกรูปแบบกฎการออกแบบที่ต้องการตรวจสอบ
4. กดปุ่ม Enter เพื่อให้โปรแกรมบันทึกกฎการออกแบบนี้ลงในรายละเอียดการตรวจสอบกฎการออกแบบของคลาสที่จะทำการสร้าง โดยในส่วนแสดงรายละเอียดการตรวจสอบกฎการออกแบบจะแสดงกฎการออกแบบที่กำหนดนี้ให้ผู้ใช้ทราบ
5. ถ้าผู้ใช้ต้องการยกเลิกกฎการออกแบบ ที่ปรากฏในส่วนแสดงรายละเอียดการตรวจสอบการออกแบบทั้งหมด ให้ผู้ใช้กดปุ่ม Clear
6. กระทำในขั้นตอนที่ 1-4 จนครบกฎการออกแบบทั้งหมดที่ต้องการสร้าง
7. กดปุ่ม OK เพื่อสร้างคลาสกฎการออกแบบนี้และออกจากโปรแกรม

การนำคลาสที่สร้างไปใช้ในโปรแกรมออกแบบวงจรรวมขนาดเล็กกระทำได้สองวิธีคือ วิธีที่หนึ่ง ผู้ใช้ต้องกำหนดการตรวจสอบกฎการออกแบบ โดยการเลือกเมนู Design Rules และเลือก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมนูย่อย User-defined จากนี้การตรวจสอบกฎการออกแบบของโปรแกรมก็จะเป็นการตรวจสอบกฎการออกแบบตามที่ผู้ใช้ได้สร้างกฎการออกแบบขึ้นจากโปรแกรมสร้างคลาสกฎการออกแบบ และวิธีที่สอง ผู้ใช้ทำการสำเนาไฟล์ชื่อ UDFRules.class ซึ่งเป็นคลาสที่สร้างขึ้นจากโปรแกรมเพื่อนำไปใช้กับโปรแกรมออกแบบวงจรรวมขนาดเล็กนี้ ที่ทำการรันอยู่บนเครื่องอื่น ๆ ที่มิได้ทำการสร้างกฎการออกแบบนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

ผลการทดลอง

ทำการทดสอบโปรแกรมโดยการออกแบบทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ PMOS การสร้างเลย์เอาท์จะเป็นไปตามกฎการออกแบบของห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง นำมาส์คที่ได้จากโปรแกรมไปทำการสร้างในกระบวนการสร้างพีมอสทรานซิสเตอร์บนไดอะแฟรมแผ่นผลึกซิลิกอน จากนั้นนำทรานซิสเตอร์ที่ได้ทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อเปรียบเทียบกับการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโปรแกรม

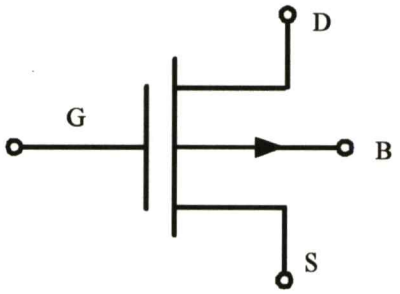
6.1 การออกแบบ PMOS

ออกแบบเลย์เอาท์โดยกำหนดให้ความกว้างและความยาวของส่วนต่างๆ เป็นดังนี้

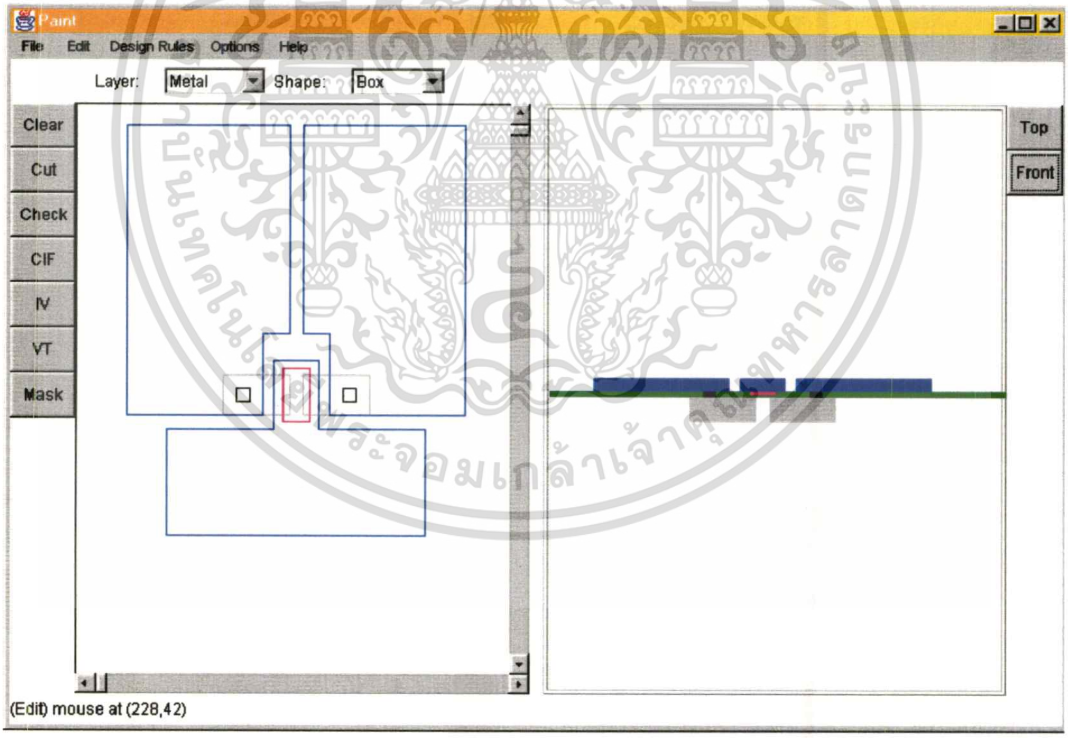
- ช่องทางเดินกระแส มีขนาด 60 และ 20 ไมโครเมตร ตามลำดับ
- ช่อง P-base มีขนาด 60 และ 100 ไมโครเมตร ตามลำดับ
- ออกไซด์ส่วนบริเวณเกท มีขนาด 80 และ 44 ไมโครเมตร ตามลำดับ
- ขั้วสัมผัสอลูมิเนียม มีขนาด 20 และ 20 ไมโครเมตร ตามลำดับ
- ลวดลายอลูมิเนียม มีขนาด 280 และ 240 ไมโครเมตร ตามลำดับ

วาดลวดลายเลย์เอาท์ให้มีขนาดใหญ่กว่าขนาดจริง 50 เท่า โดยใช้วงจรดังภาพที่ 6.1 มาสร้างเป็นเลย์เอาท์ดังภาพที่ 6.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 6.1 แสดงวงจรพีมอส

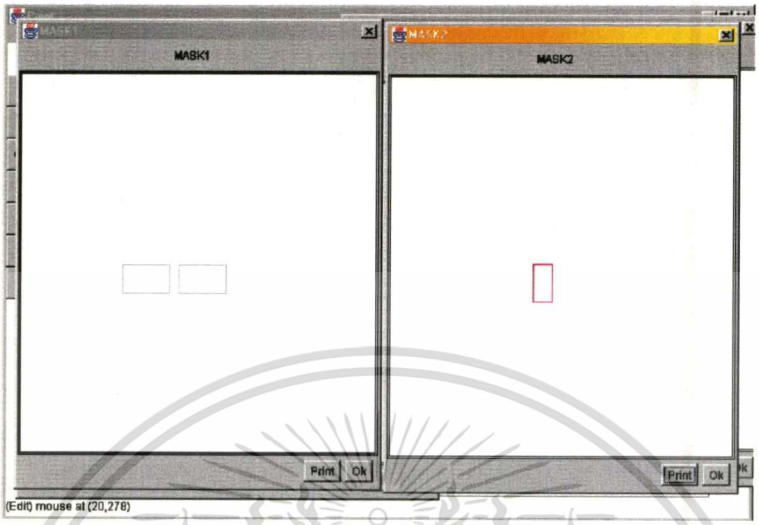


ภาพที่ 6.2 แสดงเลย์เอาท์ของ PMOS

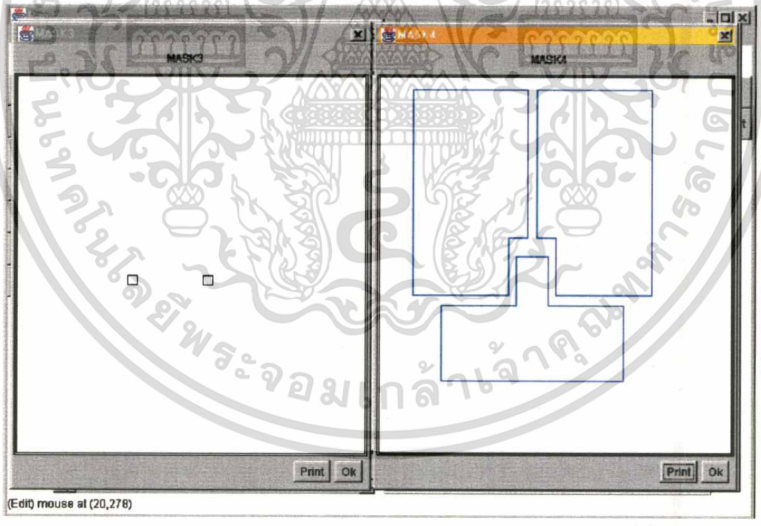
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 การสร้างกระจกต้นแบบ

มาส์คต้นแบบที่ได้จากโปรแกรม ซึ่งนำไปใช้ในกระบวนการสร้างมีดังภาพที่ 6.3



(ก)



(ข)

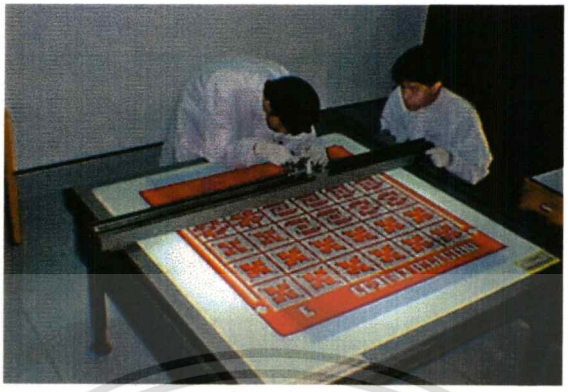
ภาพที่ 6.3 Mask ที่ได้จากโปรแกรม

(ก) มาส์คที่ 1 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อแพร่สารเจือโบรอนสำหรับ PMOS
มาส์คที่ 2 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อสร้างซิลิกอนไดออกไซด์ที่ส่วนเกท

(ข) มาส์คที่ 3 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อสร้างขั้วสัมผัสอลูมิเนียม
มาส์คที่ 4 ใช้สำหรับสร้างลวดลายอลูมิเนียม

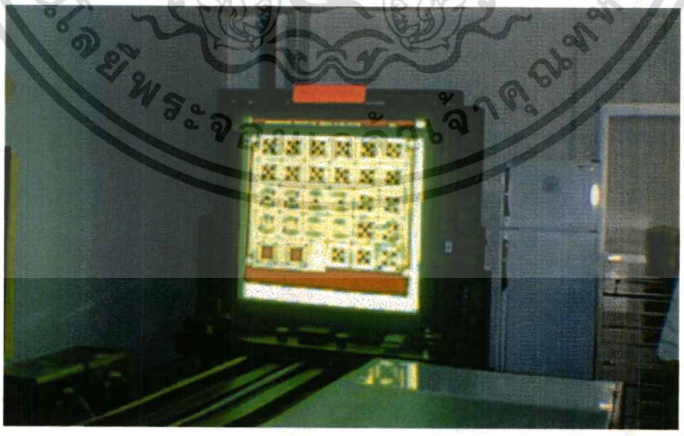
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำเลย์เอาท์ที่ได้ออกแบบจากโปรแกรมไปทำการตัดลวดลายต้นแบบบนแผ่นพลาสติกลา-มิเนตด้วยเครื่องไมโครคัตเตอร์ ซึ่งมีความละเอียด 0.1 มิลลิเมตร



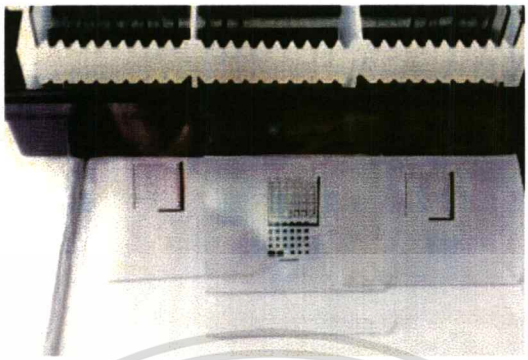
ภาพที่ 6.4 แสดงการตัดต้นแบบบนแผ่นพลาสติกลามิเนตด้วยเครื่องไมโครคัตเตอร์

ทำการสร้างกระจกต้นแบบโดยนำลวดลายต้นแบบมาย่อส่วนลงบนกระจกด้วยกล้องถ่ายภาพย่อส่วน 50 เท่า นำกระจกต้นแบบที่ได้ไปใช้ในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟีในกระบวนการสร้างพีมอสทรานซิสเตอร์บนไดอะแฟรมแผ่นผลึกซิลิกอน โดยใช้เทคนิคการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำซิลิกอนของห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ภาพที่ 6.5 กล้องถ่ายภาพย่อส่วน step and repeat camera

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 6.6 แสดงภาพกระจกต้นแบบที่ใช้เป็นโฟโตมาส์ค

6.3 การจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้า

ทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ PMOS ที่ได้ทำการสร้าง โดยในการทดสอบจะใช้เครื่องทดสอบค่ากระแสและแรงดันของ Hewlett packard รุ่น 4061A Semiconductor/Component test system ดังภาพที่ 6.7 โดยกำหนดให้

T_{ox} คือความหนาของเกทออกไซด์ = 1,000 Å

N คือจำนวนประจุในฐานรอง = 10^{16} cm^{-3}

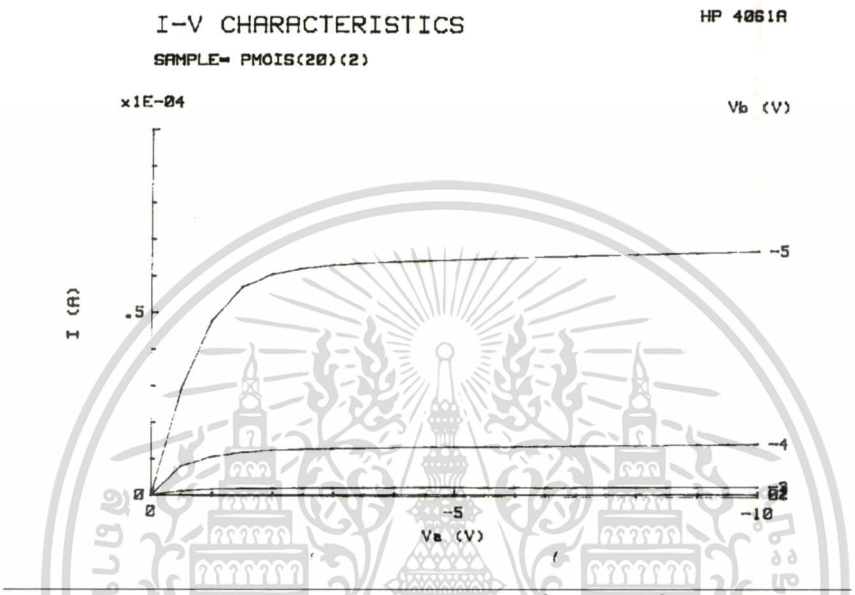
ϕ_F คือค่าพลังงานจากระดับพลังงานของฐานรองถึงระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนหรือโฮลที่กำลังนำกระแสอยู่ = 0.62 โวลต์

ภาพที่ 6.7 เครื่องมือทดสอบคุณสมบัติกระแสและแรงดันของ Hewlett Packard รุ่น 4061A

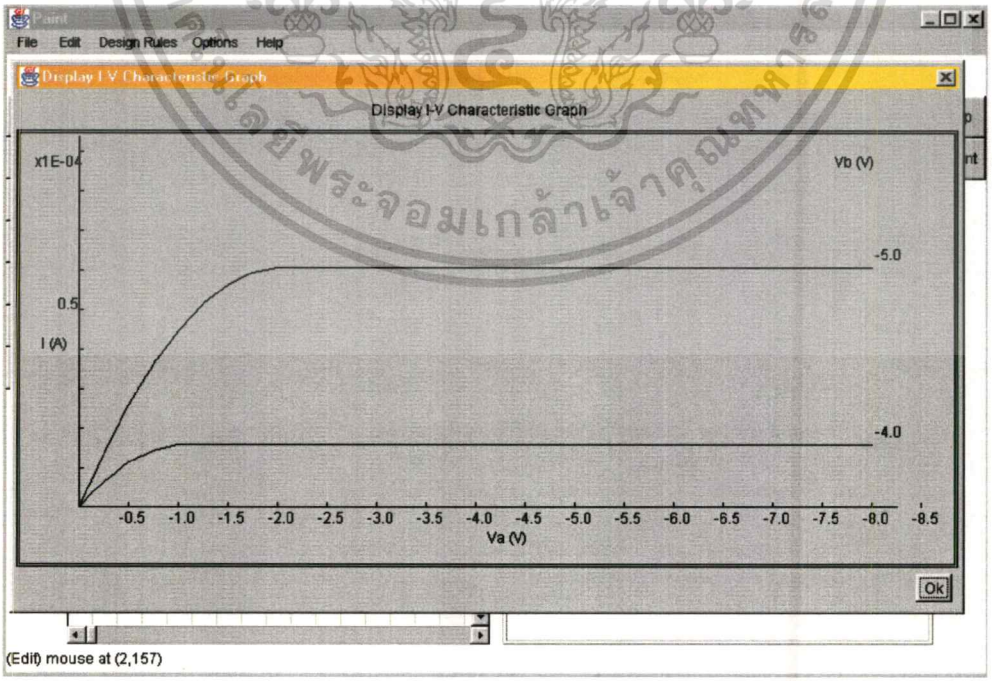
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.1 คุณลักษณะของกระแสกับแรงดัน

การทดสอบค่ากระแสและแรงดัน จะได้ดังภาพที่ 6.8 ซึ่งจากการจำลองจากโปรแกรม จะได้กราฟดังภาพที่ 6.9 พบว่าการจำลองของโปรแกรมในกราฟช่วงไม่อิ่มตัวจะมีความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบ 1.69%



ภาพที่ 6.8 กราฟแสดงคุณลักษณะของกระแสกับแรงดันที่ได้จากเครื่องมือวัด

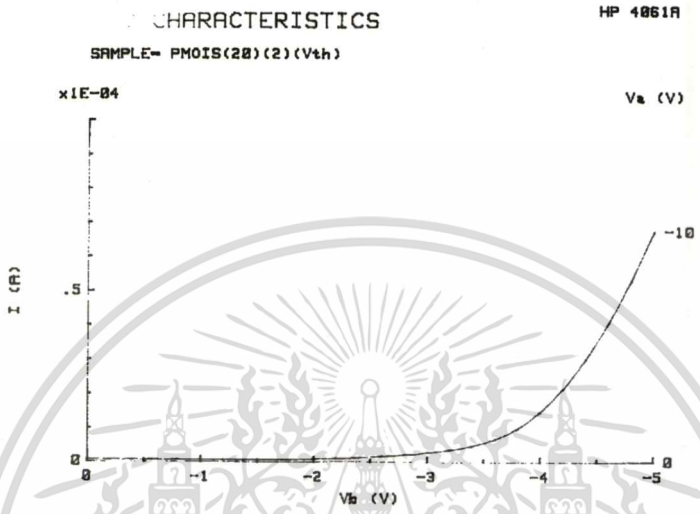


ภาพที่ 6.9 กราฟแสดงคุณลักษณะของกระแสกับแรงดันที่ได้จากโปรแกรม

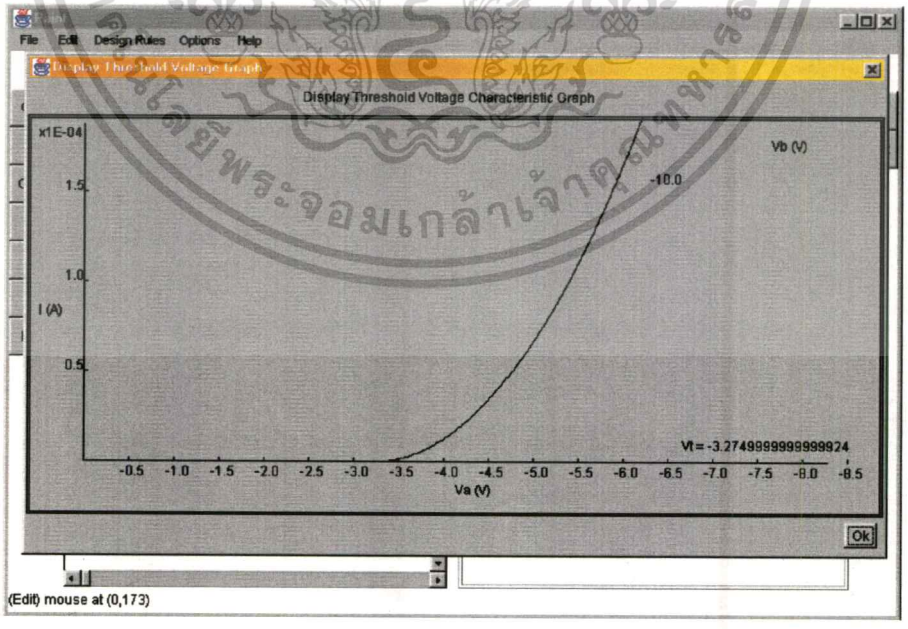
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.2 แรงดันขีดเริ่ม

การทดสอบค่าแรงดันขีดเริ่มจะได้ดังภาพที่ 6.10 จากการจำลองโปรแกรมจะได้ดังภาพที่ 6.11 จะพบว่าจากการจำลองของโปรแกรมจะมีความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบ 0.45%



ภาพที่ 6.10 กราฟแสดงแรงดันขีดเริ่มที่ได้จากเครื่องมือวัด

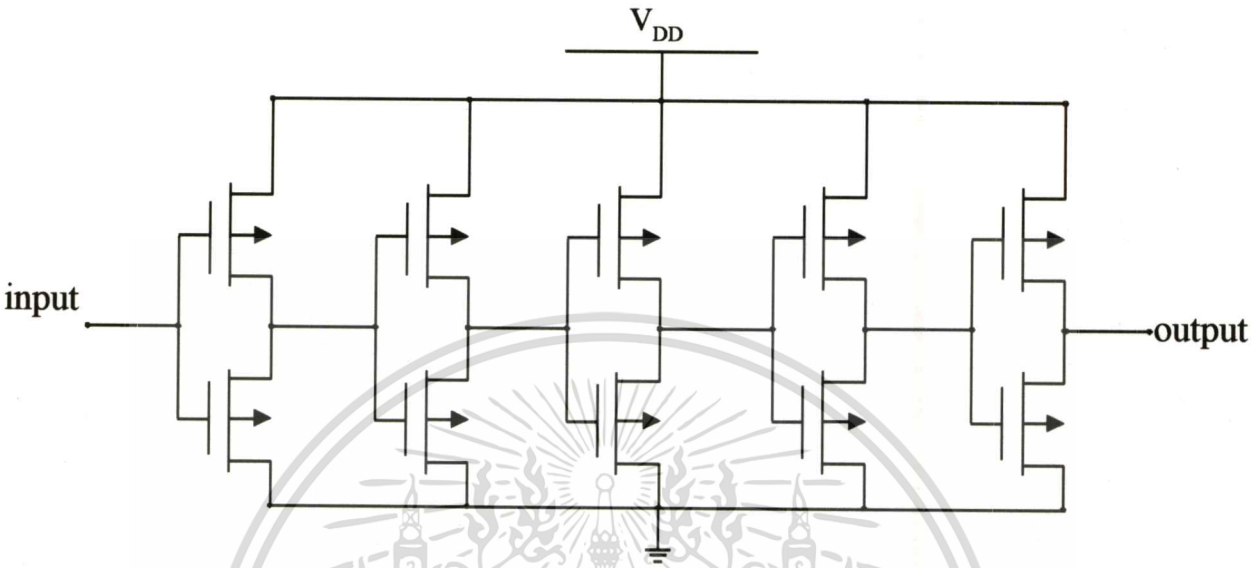


ภาพที่ 6.11 กราฟแสดงแรงดันขีดเริ่มที่ได้จากโปรแกรม

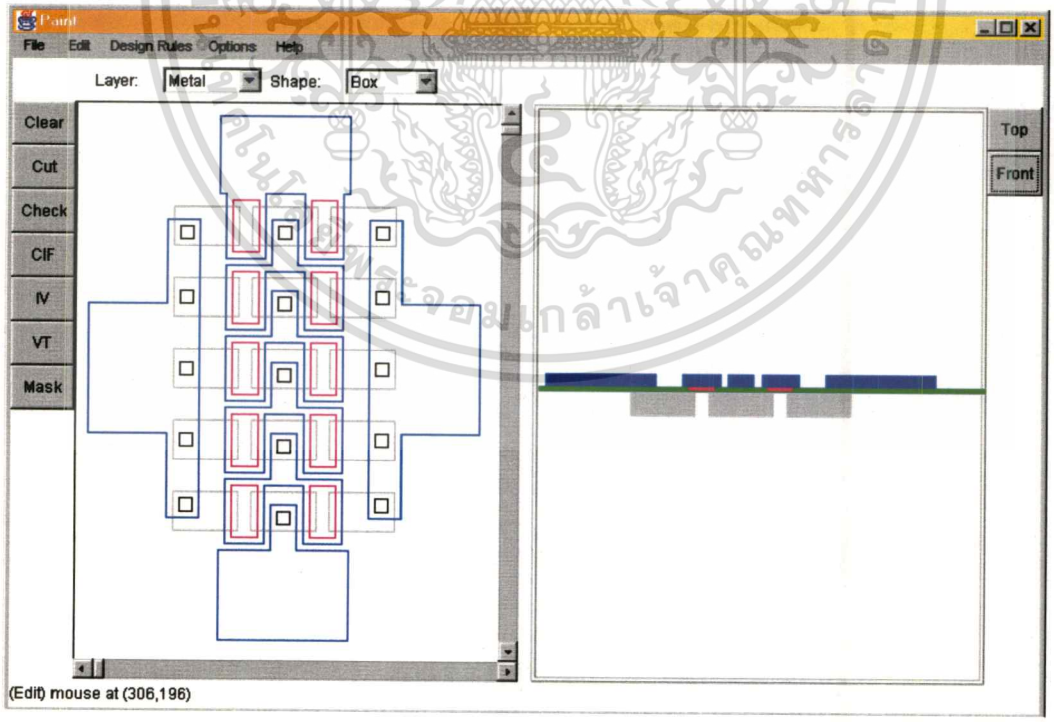
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์

การทดสอบโปรแกรมโดยการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์แบบมอสทรานซิเตอร์ จำนวน 5 วงจรตามภาพที่ 6.12 จะได้ดังภาพที่ 6.13



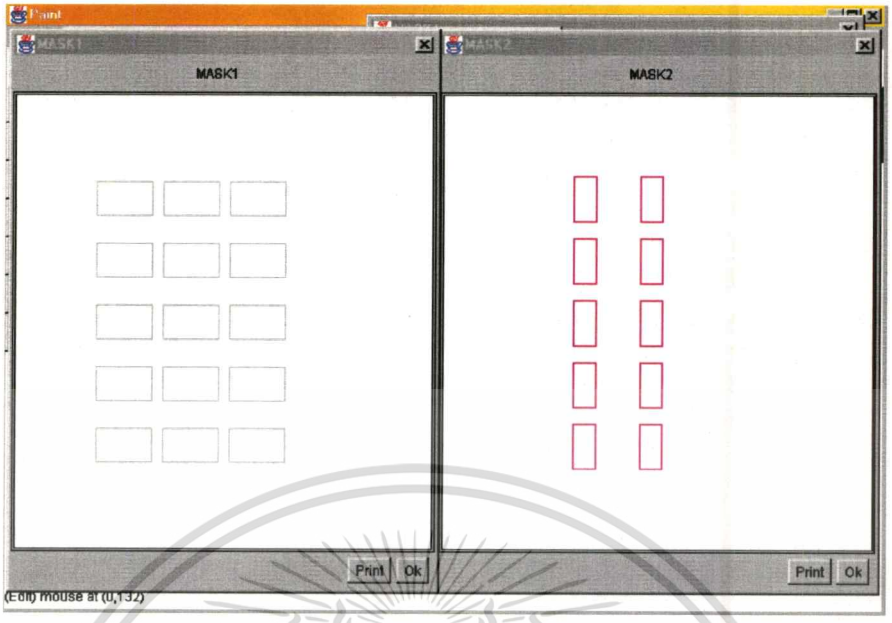
ภาพที่ 6.12 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์



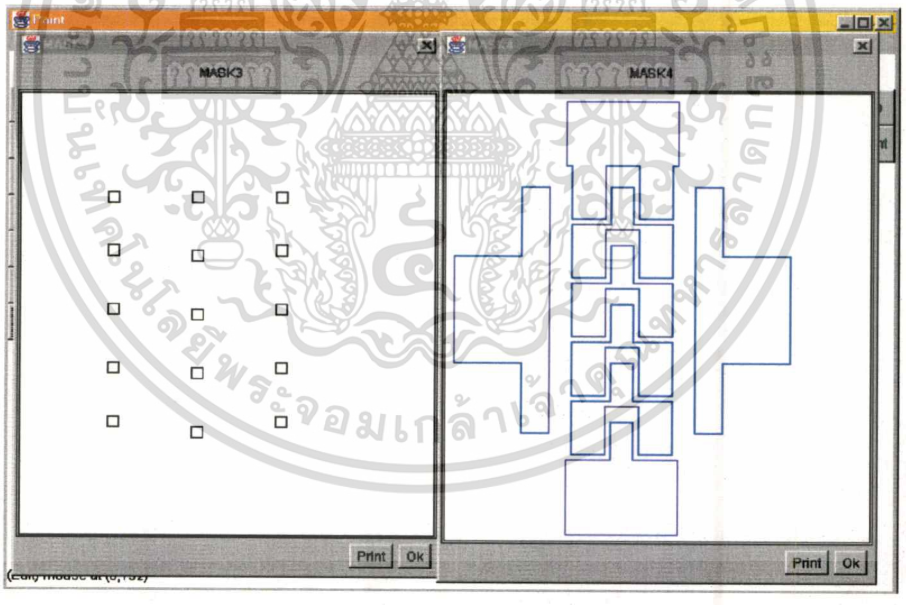
ภาพที่ 6.13 แสดงเลย์เอาท์ของวงจรอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาส์คที่ได้จากโปรแกรมเป็นดังภาพที่ 6.14



(ก)



(ข)

ภาพที่ 6.14 Mask ของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากโปรแกรม

(ก) มาส์คที่ 1 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อแพร่สารเจือโบรอน

มาส์คที่ 2 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อสร้างซิลิกอนไดออกไซด์ที่ส่วนเกท

(ข) มาส์คที่ 3 ใช้สำหรับเจาะช่องเพื่อสร้างขั้วสัมผัสอลูมิเนียม

มาส์คที่ 4 ใช้สำหรับสร้างลวดลายอลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7
สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 การพัฒนาโปรแกรม

การนำวิธีแนวทางเชิงวัตถุมาใช้ในการพัฒนาและออกแบบพัฒนาโปรแกรม ทำให้สามารถทำการแก้ไขปรับปรุงโปรแกรมได้สะดวกยิ่งขึ้น โดยมีผลกระทบกับโปรแกรมเดิมเพียงเล็กน้อย ซึ่งโปรแกรมการออกแบบวงจรรวมขนาดเล็ก มีข้อจำกัดในการใช้งานกับห้องปฏิบัติการที่ทำการสร้างวงจร เนื่องจากแต่ละห้องปฏิบัติการใช้เทคโนโลยีในการสร้างที่แตกต่างกันมีข้อกำหนดและกฎการออกแบบที่แตกต่างกัน ดังนั้นความสามารถในการปรับปรุง แก้ไขโปรแกรมได้ง่าย จึงเป็นคุณสมบัติที่จำเป็นสำหรับการพัฒนาโปรแกรมออกแบบวงจรรวม

เนื่องจากปัจจุบันมีการใช้งานอินเตอร์เน็ตกันอย่างกว้างขวาง ดังนั้นการพัฒนาโปรแกรมโดยใช้อินเตอร์เน็ตเป็นสื่อในการทำงานของโปรแกรม เป็นการเพิ่มการทำงานของโปรแกรม ให้ผู้ใช้สามารถเลือกการทำงานและเกิดความสะดวกในการใช้งานโปรแกรมยิ่งขึ้น

7.2 ผลการทำงานของโปรแกรม

จากการทดลองใช้โปรแกรม ความสามารถของโปรแกรมเป็นดังนี้

1. สามารถสร้างภาพเลย์เอาท์ได้ ตามคุณสมบัติของชั้นสาร และรูปทรงที่ต้องการ

2. สามารถสร้างภาพตัดขวางของเลย์เอาท์ ตามตำแหน่งที่ต้องการและสามารถเลือกมุมมองในการแสดงภาพ เพื่อใช้ประกอบการพิจารณาการออกแบบ

3. สามารถเลือกกฎการออกแบบ และตรวจสอบกฎการออกแบบของวงจรได้ ถ้ามีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นโปรแกรมจะรายงานบริเวณที่ผิดพลาดให้ทราบ การตรวจสอบกฎการออกแบบสามารถทำได้ถึงแม้ว่าผู้ใช้ยังสร้างภาพเลย์เอาท์ไม่สมบูรณ์

4. ผู้ใช้สามารถสร้างคลาสกฎการออกแบบได้จากโปรแกรมสร้างคลาสกฎการออกแบบ โดยผู้ใช้ทำการกำหนดกฎการออกแบบได้ตามความต้องการและนำคลาสที่สร้างนี้ไปใช้ในโปรแกรม

5. ผู้ใช้สามารถนำเลย์เอาท์ที่ได้ออกแบบนำไปใช้กับโปรแกรม การออกแบบวงจรรวมอื่น ๆ ได้ โดยการบันทึกเลย์เอาท์ในรูปแบบภาษา CIF หรือนำไฟล์ CIF ที่เป็นการออกแบบเลย์เอาท์จากโปรแกรมอื่น ๆ มาเปิดใช้งานได้ในโปรแกรมจะสามารถแสดงรูปภาษา CIF ของเลย์เอาท์ที่ทำการออกแบบได้ตลอดเวลาที่ผู้ใช้ทำการออกแบบ

6. สามารถแสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเลย์เอาท์ที่ได้ออกแบบ คือ แสดงกราฟคุณสมบัติของกระแสกับแรงดัน และแสดงกราฟแรงดันขีดเริ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. สามารถแสดงมาส์คที่ใช้ในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี ซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งในขั้นตอนการสร้างวงจรรวม

8. ทำการรับ-ส่งแฟ้มข้อมูลเลย์เอาท์ระหว่างโปรแกรมกับ Server ที่ให้บริการอินเตอร์เนต

7.3 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการทำวิทยานิพนธ์

1. ปรับปรุงโปรแกรมให้สามารถออกแบบเลย์เอาท์ของวงจรจำนวนมากขึ้นได้ซึ่งสิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ การจัดเก็บเลย์เอาท์ โดยอาจนำการจัดเก็บเลย์เอาท์แบบควอดทรี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำภาพตัดขวางและการตรวจสอบกฎการออกแบบ ให้กระทำได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

2. การตรวจสอบกฎการออกแบบ ในขณะที่ผู้ใช้ทำการวาดเลย์เอาท์จะเป็นแนวทางที่ช่วยอำนวยความสะดวกให้กับผู้ใช้ได้มากยิ่งขึ้น โดยผู้ใช้จะต้องทำการเลือกกฎการออกแบบที่ต้องการเสียก่อนจากนั้น ในขณะที่ทำการวาดเลย์เอาท์ในแต่ละส่วนโปรแกรมจะทำการตรวจสอบกฎการออกแบบทันที การปรับปรุงโปรแกรมจะกระทำที่เมทธอร์ด handleEvent คลาส CreateLayoutPanel

3. รูปแบบภาษาที่ใช้ในการอธิบายรูปแบบลักษณะของเลย์เอาท์นอกจากรูปแบบภาษา CIF แล้วยังมี GDS II(stream) และ TDB (Tanner Date Base) เป็นต้น ซึ่งแนวทางพัฒนาโปรแกรมให้สามารถอ่านและเขียน รูปแบบภาษาได้มากขึ้นจะทำให้ เลย์เอาท์ที่สร้างจากโปรแกรมสามารถนำไปใช้กับโปรแกรมอื่น ๆ ได้ โดยการปรับปรุงคลาสในการอ่านและบันทึกไฟล์เลย์เอาท์ให้รูปแบบภาษาที่ต้องการเป็นคลาส ดังเช่น สร้างคลาสGDSII เป็นคลาสของรูปแบบภาษา GDSII และทำการรับเลย์เอาท์จาก คลาสCreateLayoutPanel

4. ภาษา Java ที่ได้นำมาใช้ในการพัฒนาสามารถนำไปดัดแปลงให้เป็น Java Applet ซึ่งรันบนBrowser ได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการศึกษาและพัฒนาโดยใช้อินเตอร์เน็ตเป็นสื่อการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

จิรวัฒน์ ปานกลาง. 2535. "การศึกษา วิจัย และพัฒนาทรานซิสเตอร์โครงสร้าง CMOIS เป็นวงจรรวมขนาดเล็ก." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ภควัต สรวยสุวรรณ. 2540. "วงจรกำเนิดความถี่ควบคุมด้วยความดันอากาศโดยใช้โครงสร้างทรานซิสเตอร์แบบ CMOIS." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

วีระ เพ็งจันทร์. 2541. "การศึกษาการออกแบบและสร้างวงจรรวมสะท้อนกระแสโครงสร้างมอสแบบเกทโลหะ." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

บวร ปภัสราทร และคณะ. 2533. **เทคโนโลยีการออกแบบวงจรรวม.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ.

สุชาย ธนวเสถียร และคณะ. 2535. **การออกแบบวงจรรวม.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : บริษัทศรีอนันต์การพิมพ์ จำกัด.

David M. Papurt. 1995. **Inside The Object Model The Sensible Use of C++.** New York : SIGS Books.

H.M. Deitel and P.J. Deilel. 1997. **Java How to Program.** London : Prentice - Hall International, Inc.

James Rumbaugh. Et. al. 1991. **Object - Oreinted Modeling and Design.** New Jersey : Prentice - Hall International, Inc.

Kurt W. Derr. 1995. **Applying OMT.** New York : SIGS Books.

Malcolm R. Haskard and Ian C. May. 1988. **Analog VLSI Design NMOS and CMOS.** London : Prentice - Hall International, Inc.

Neil H.E. Weste and Kamran Eshraghian. 1994. **Principle of CMOS VLSI Design.** 2nd ed. Paris : Addison - Wesley Publishing Company.

W.Maly. 1987. **Atlas of IC Technologies.** California : The Benjamin/Cummings Publishing Company,Inc.

Wayne Wolf. 1994. **Modern VLSI Design A Systems Approach.** London : Prentice - Hall International, Inc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
กระบวนการสร้างพีมอสทรานซิสเตอร์

ในการสร้างทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบพีมอสบนไดอะแฟรมแผ่นผลึกซิลิกอนนั้นก็จะทำการออกแบบเป็นสองขั้นตอน คือ การกำหนดขั้นตอนของกระบวนการสร้าง และลำดับขั้นตอนของกระบวนการสร้าง

การกำหนดขั้นตอนของกระบวนการสร้าง

การสร้างอุปกรณ์ชนิดนี้ได้ใช้กระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำในแนวระนาบซึ่งเป็นกระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำวิธีหนึ่งที่นิยมกันมาก โดยอาศัยเทคนิคที่ใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำซิลิกอนของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยมีขั้นตอนการสร้างพื้นฐานดังนี้ คือ

1. การออกซิเดชัน (oxidation)
2. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี
3. การแพร่สารเจือ
4. การสร้างลวดลายโลหะ

กระบวนการที่กล่าวถึงในข้างต้นทั้ง 4 ขั้นตอนสามารถที่จะอธิบายแยกในแต่ละขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

กระบวนการออกซิเดชัน

ชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์สามารถสร้างได้โดยกระบวนการออกซิเดชัน โดยทิ้งให้แผ่นผลึกซิลิกอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแห้งหรือไอน้ำในอุณหภูมิ 1000-1200 ^{0}C โดยมีปฏิกิริยาเคมีของการเกิดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ ดังสมการต่อไป

1. กระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)

$$Si + O_2 \longrightarrow SiO_2$$

2. กระบวนการออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)

$$Si + 2H_2O \longrightarrow SiO_2 + 2H_2$$

สำหรับหน้าที่สำคัญของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ในกระบวนการสร้างอุปกรณ์ ประเภทแรกคือใช้เป็นส่วนปกคลุมผิวของซิลิกอน และป้องกันสิ่งเจือปนจากภายนอกที่ไม่ต้องการไม่ให้ทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยากับผิวซิลิกอน (passivation layer) ประการที่สองก็คือ เป็นหน้ากากป้องกันการแพร่สารเจือเข้าไปในส่วนที่ไม่ต้องการ ประการที่สามใช้เป็นส่วนเกทที่เรียกว่าเกทออกไซด์ซึ่งเป็นส่วนที่มีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากเป็นส่วนที่เหนี่ยวนำให้เกิดช่องทางเดินกระแส ประการสุดท้ายใช้เป็นฉนวนบนผิวซิลิกอน เพื่อป้องกันการลัดวงจรของลวดลายอลูมิเนียมกับผิวของซิลิกอนในส่วนอื่น ๆ

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี เป็นขบวนการที่ใช้สำหรับการถ่ายภาพต้นแบบจากกระจกต้นแบบลงบนผิวของแผ่นผลึกโดยการใช้น้ำยาไวแสง เพื่อเปิดช่องซิลิกอนสำหรับการแพร่อะตอมสารเจือในขอบเขตที่กำหนดจากกระจกต้นแบบ โดยที่ความสามารถในการเปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีขนาดเล็กมากและมีความถูกต้องแม่นยำจะขึ้นอยู่กับการปรับตำแหน่ง (alignment) และความคมชัดของกระจกต้นแบบ

กระบวนการแพร่สารเจือ

กระบวนการแพร่สารเจือเป็นการเติมและควบคุมปริมาณของอะตอมสารเจือให้เข้าไปในผลึกสารกึ่งตัวนำในบริเวณที่ต้องการทำให้เกิดรอยต่อพี-เอ็น โดยที่แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือสามารถแบ่งได้ตามประเภทของอะตอมสารเจือ 2 ประเภท คือ แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดเอ็น เช่น พลวง, สารหนู , ฟอสฟอรัสและแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดพี เช่น โบรอน สำหรับในห้องปฏิบัติการสารกึ่งตัวนำของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลือกที่จะใช้แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดเอ็นเป็น SiP_2O_7 และแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดพีเป็น BN

สำหรับขั้นตอนในการปฏิบัติของกระบวนการแพร่สารเจือสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอนคือ

1. การ Predeposition เป็นการแพร่ขั้นต้นเพื่อกำหนดและควบคุมปริมาณของสารเจือที่เข้าไปในแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำ

2. การ Drive-in เป็นการควบคุมความลึกของรอยต่อและกำหนดการกระจายของสารเจือ ที่เข้าไปในแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำ

กระบวนการสร้างลวดลายโลหะ

กระบวนการสร้างลวดลายโลหะเป็นการนำโลหะมาเคลือบที่ผิวแผ่นผลึกเพื่อทำหน้าที่เป็นรอยสัมผัสโอห์มมิคหรือเป็นแกนความนำต่อเชื่อมภายในระหว่างสิ่งประดิษฐ์ต่าง ๆ ในวงจรรวมหรือเป็นขั้วสำหรับต่อกับอุปกรณ์ภายนอก โดยบริเวณที่ต้องการสร้างรอยสัมผัสจะต้องถูกเปิดช่อง

เอกสารนี้ถูกสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลิกอนไดออกไซด์ก่อนที่จะทำการเคลือบโลหะ โดยบริเวณที่ต้องการสร้างรอยสัมผัสจะต้องถูกเปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์ ก่อนที่จะทำการเคลือบโลหะ โดยลักษณะของโลหะที่จะเคลือบจะมีลักษณะเป็นฟิล์มบาง (Thin-Film) โดยมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้คือ

1. ทำให้เกิดรอยผิวสัมผัสกับซิลิกอนที่มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำ
2. โลหะที่ใช้ต้องมีความนำไฟฟ้าสูง
3. ทำให้ติดแน่นกับผิวของซิลิกอนไดออกไซด์หรือสารไดอิเล็กทริกอื่น ๆ ได้ดี
4. สามารถต่อเข้ากับสายลวดความนำภายนอกได้ดี

สำหรับกระบวนการสร้างลวดลายโลหะที่ทำการสร้างที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จะเลือกใช้โลหะ (Al) โดยใช้เครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ เพื่อให้รอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมกับซิลิกอนเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิค

ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้าง

ในกระบวนการสร้างอุปกรณ์ชิ้นนี้ มีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังนี้

1. แผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น (Starting Wafer)

ใช้แผ่นผลึกเดี่ยวของซิลิกอนที่มีผิวหน้าขัดมันเป็นกระจกเงา ชนิดเอ็นระนาบของผลึกคือ (100) มีค่าพิกัดความต้านทาน 8-12 โอห์ม-เซนติเมตร มีค่าความหนาของแผ่นผลึกเป็น 400 ไมโครเมตร

2. การทำความสะอาดผิวแผ่นผลึกเริ่มต้น (Initial cleaning)
3. กระบวนการออกซิเดชันเริ่มแรก (First oxidation)

ทำการออกซิเดชันเพื่อการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ให้มีความหนาไม่ต่ำกว่า 5000 Å ให้กับแผ่นผลึกซิลิกอนที่ทำความสะอาดแล้ว

4. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี I

เป็นกระบวนการพิมพ์ลวดลายบนแผ่นผลึกซิลิกอนบนด้านหน้าของแผ่น เพื่อเปิดช่องของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์โดยใช้กระจกมาส์ค I ถ่ายลงที่ด้านหน้า โดยการเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบลงบนแผ่นผลึกซิลิกอนไว้ก่อน ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า Spinner แล้วทำการอบให้แห้ง แล้วนำไปทำการพิมพ์ภาพ ด้วยกระจกมาส์ค 1

5. การใช้สารละลายเคมีกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

เพื่อทำการกัดชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์ตรงบริเวณที่ต้องการเปิดออกด้วยสารบัฟเฟอร์

6. การลอกชั้นสารไวแสง

สารไวแสงที่ถูกแสง และยังคงค้างอยู่บนแผ่นผลึกซิลิกอน สามารถลอกทิ้งได้

7. ทำความสะอาดผิวผลึกอีกครั้ง
8. กระบวนการ p^+ deposition

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นกระบวนการแพร่สารเจือโบรอนด้วยแหล่งจ่ายสารเจือ BN (M-26) ทำการ Activation ในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจน แล้วทำการ Stabilize ในบรรยากาศของก๊าซ และทำการ Predeposition ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน

9. การลอกชั้น Boron glass ในกรดกัดแก้ว 5%

10. การทำความสะอาดผิวผลึก

เหมือนข้อ 7

11. กระบวนการ p^+ drive-in

ทำการขับลึกอะตอมสารเจือโบรอน พร้อมทั้งสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ขึ้นด้วย

12. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี II

ใช้กระจกมาส์ค 2 เป็นต้นแบบสำหรับการเปิดชั้นออกไซด์ บริเวณส่วนเกทออกเพื่อทำการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ใหม่ รายละเอียดเหมือนกับขั้นตอนที่ 4

13. การกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

เหมือนข้อ 5

14. การลอกชั้นไวแสง

เหมือนข้อ 6

15. การทำความสะอาดผิวผลึก

เหมือนข้อ 7

16. การสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์สำหรับส่วนเกท

ทำการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์บริเวณส่วนเกท โดยใช้การออกซิเดชันแบบแห้งจนได้ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์หนาประมาณ 700 Å

17. ทำการเปิดชั้นฉนวนซิลิกอนไดออกไซด์ด้านหลัง

ทำเหมือนข้อ 5

18. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี III

ใช้กระจกมาส์คที่ 3 เป็นต้นแบบสำหรับการเปิดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ออกที่บริเวณที่จะทำส่วนสัมผัสของขั้วไฟฟ้า รายละเอียดเหมือนข้อ 4

19. การกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

เหมือนข้อ 5

20. การลอกชั้นสารไวแสง

เหมือนข้อ 6

21. การทำความสะอาดผิวผลึก

เหมือนข้อ 7

22. การเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้อุปกรณ์ Vacuum evaporation ทำการเคลือบแผ่นผลึกด้วยชั้นอลูมิเนียม

23. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี IV

ใช้กระจกมาส์คที่ 4 เป็นต้นแบบสำหรับการกัดส่วนของอลูมิเนียมที่ไม่ต้องการออก ขั้นตอนนี้ใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ โดยมีขั้นตอนดังนี้คือ

- อบแห้งเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสง โดยใช้อุปกรณ์ Spinner ขนาด 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 วินาที
- อบครั้งแรกให้น้ำยาแห้งที่อุณหภูมิ 85-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที
- ฉายแสงผ่านมาส์คที่ IV ด้วยอุปกรณ์ Mask aligner เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างภาพโดยจุ่มลงในน้ำยา AZ-Developer 2 ครั้ง ๆ ละ 30 วินาที ล้างในน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าแห้งทันทีด้วยก๊าซไนโตรเจน

-อบครั้งที่สองให้แผ่นฟิล์มที่เหลืออยู่แห้งที่อุณหภูมิ 85-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที

24. การกัดชั้นอลูมิเนียม

สารละลายที่ใช้กัดชั้นอลูมิเนียมได้แก่ สารละลายซึ่งมีกรดฟอสฟอริคเป็นหลัก จุ่มแผ่นผลึกที่เสร็จจากขั้นตอนที่แล้วลงในสารละลาย ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-2 นาที

25. การลอกชั้นสารไวแสงชนิดบวก

- จุ่มแผ่นผลึกลงในอะซิโตน ประมาณ 1 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

26. กระบวนการ Sintering

ทำการ Sintering เพื่อให้ส่วนโลหะกับเนื้อซิลิกอนในส่วนขั้วสัมผัสเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิคโดยการทิ้งแผ่นผลึกไว้ในบรรยากาศไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายวิสันต์ ตั้งวงษ์เจริญ
วัน เดือน ปี เกิด	วันที่ 25 ธันวาคม พ.ศ. 2512
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
การศึกษาระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตรบัณฑิต (วิทยาการคอมพิวเตอร์) มหาวิทยาลัยศิลปากร เมื่อปีการศึกษา 2534
อาชีพปัจจุบัน	รับราชการ ตำแหน่งนักวิชาการคอมพิวเตอร์ 3 สำนักวิจัยและบริการคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้