

บทที่ 2

ทฤษฎี

ในบทนี้ กล่าวถึงรายละเอียดของความเป็นมาในการสร้างซิลิกอนบนฉนวน กระบวนการสร้างไมวมอกซ์ การตรวจสอบคุณภาพของไมวมอกซ์ ทฤษฎีเกี่ยวกับจุลทรรศน์อิเล็กตรอน จุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่านและส่องกราด การวิเคราะห์ภาพถ่ายดิฟเฟรคชัน และภาพถ่ายขยายสูง ทฤษฎีเกี่ยวกับตัวเก็บประจุมอสและสมบัติของกราฟความจุไฟฟ้า-แรงดัน โดยแยกเป็นหัวข้อดังนี้

1. ไมวมอกซ์

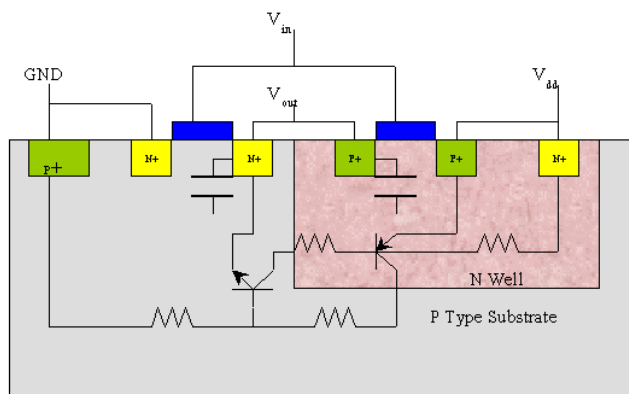
1.1 ความเป็นมาในการสร้างไมวมอกซ์

ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำพวกไมโครอิเล็กทรอนิกส์ และไอซี ทั้งแบบไบโพลาร์ (bipolar) และ มอส (MOS : metal oxide semiconductor) ในช่วงแรก ๆ มักจะสร้างสิ่งประดิษฐ์ต่าง ๆ ได้แก่ ทรานซิสเตอร์ ไดโอด ตัวต้านทาน ลงบนแผ่นผลึกเดี่ยวซิลิกอนโดยการแยกโคด¹ (isolation) ออกจากแผ่นฐานรอง ซึ่งมักพบปัญหาที่เกิดขึ้นกับการทำงานของสิ่งประดิษฐ์ คือ ทำให้เกิดความจุไฟฟ้าปรสิต² (parasitic capacitance) ส่งผลให้สิ่งประดิษฐ์ทำงานช้า และยังทำให้เกิดกระแสรั่วในปริมาณสูง ส่งผลให้สิ่งประดิษฐ์ทำงานผิดพลาด ต่อมามีการค้นพบว่าหากสร้างสิ่งประดิษฐ์ลงบนชั้นผลึกซิลิกอนบาง ๆ ที่วางอยู่บนชั้นฉนวน ซึ่งเรียกว่า ซิลิกอนบนฉนวน จะทำให้สิ่งประดิษฐ์ทำงานได้ดีขึ้น คือ สามารถลดความจุไฟฟ้าปรสิตที่เกิดจากบริเวณรอยต่อทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานได้เร็วขึ้น

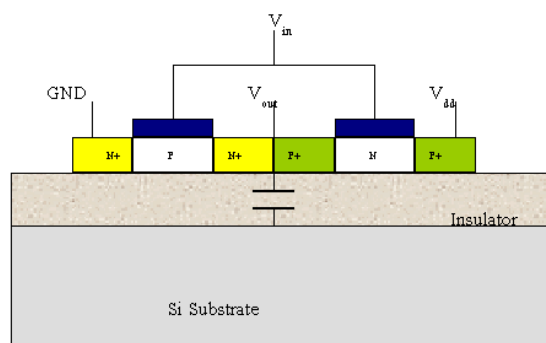
¹การแยกโคด เป็นกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเพื่อแยกองค์ประกอบต่าง ๆ ของสิ่งประดิษฐ์แต่ละตัวออกจากกัน แม้ว่าองค์ประกอบต่าง ๆ จะสร้างอยู่บนแผ่นฐานรองซิลิกอนเดียวกัน โดยที่มีการเชื่อมต่อเฉพาะเท่าที่จำเป็น

²ความจุไฟฟ้าปรสิต คือ ความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของซอส (source) และเดรน (drains) กับฐานรองในขณะการทำงานของทรานซิสเตอร์ ซึ่งส่งผลให้การสวิตช์ช้าลง (Neil, 1994: 183)

ภาพประกอบที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบภาคตัดขวางของสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างจากแผ่นผลึกเดี่ยวซิลิกอน และแผ่นฐานซิลิกอนบนฉนวน โดยที่ภาพ (ก) สร้างจากผลึกเดี่ยวซิลิกอน มีผนังรอยต่อที่ทำให้เกิดความต้านทานปรสิต (ข) สร้างจากแผ่นฐานซิลิกอนบนฉนวน ไม่มีผนังรอยต่อที่จะทำให้เกิดความต้านทานปรสิต และสามารถลดขนาดของวงจรถ่ายให้เล็กลงกว่าวงจรถ่ายที่สร้างจากแผ่นผลึกเดี่ยวซิลิกอน



(ก)



(ข)

ภาพประกอบที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างจาก (ก) แผ่นผลึกเดี่ยวซิลิกอน

(ข) แผ่นฐานซิลิกอนบนฉนวน

(ที่มา : <http://ece-www.colorado.edu/~bart/book/mosintro.htm>)

แผ่นฐานรองที่ใช้สร้างทรานซิสเตอร์มอส (mos transistor) หรือ มอสเฟต นั้นจะต้องเป็นผลึกเดี่ยวซิลิกอนที่มีความสมบูรณ์ การสร้างผลึกซิลิกอนบนชั้นฉนวนที่เป็นชั้นออกไซด์ที่ไม่ใช่ผลึกให้มีความสมบูรณ์นั้นเป็นสิ่งที่ทำได้ยากมาก เนื่องจากมักจะเกิดความบกพร่องขึ้น

และความบกพร่องดังกล่าวจะเป็นตัวลดคุณภาพของทรานซิสเตอร์มอสลง ในเรื่องของความเร็วของพาหะหรือความคล่องตัวและกระแสรั่ว

การสร้างซิลิกอนบนฉนวนนั้นทำมานานแล้วตั้งแต่ ค.ศ. 1960 ในช่วงแรกได้มีการสร้างซิลิกอนบนแซฟไฟร์ (Silicon On Sapphire : SOS) แซฟไฟร์เป็นผลึกอะลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งเป็นฉนวนที่ดีมาก เมื่อตัดอะลูมินาในทิศผลึกบางทิศสามารถใช้เป็นแผ่นฐานรองเพื่อปลูกชั้นซิลิกอนบาง ๆ (~0.5 ไมโครเมตร) ที่มีการจัดเรียงทิศผลึกในระนาบ (100) เมื่อสร้างซิมอสลงบนชั้นซิลิกอนที่สร้างบนแซฟไฟร์ ค่าความจุไฟฟ้าปรสิลดลงอย่างมาก แต่ข้อเสียของโครงสร้างนี้คือมีราคาแพง และชั้นซิลิกอนที่ปลูกมักมีคุณภาพค่อนข้างแย่ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของวัสดุทั้งสองมีค่าไม่เท่ากันจึงทำให้เกิดความบกพร่องขึ้นในผลึก และเกิดความเครียดที่ผิวรอยต่อ ดังนั้นจึงทำให้สิ่งประดิษฐ์มีสมบัติที่แยกลง มีกระแสรั่วสูงขึ้น และทำให้แรงดันหลายต่ำลง ข้อบกพร่องเหล่านี้จึงทำให้โครงสร้างซิลิกอนบนแซฟไฟร์ไม่ได้รับความนิยมเท่าที่ควร แม้ว่าเทคโนโลยีนี้ได้รับการพัฒนามานานกว่า 30 ปีแล้วก็ตาม (กรกฎ, 2540)

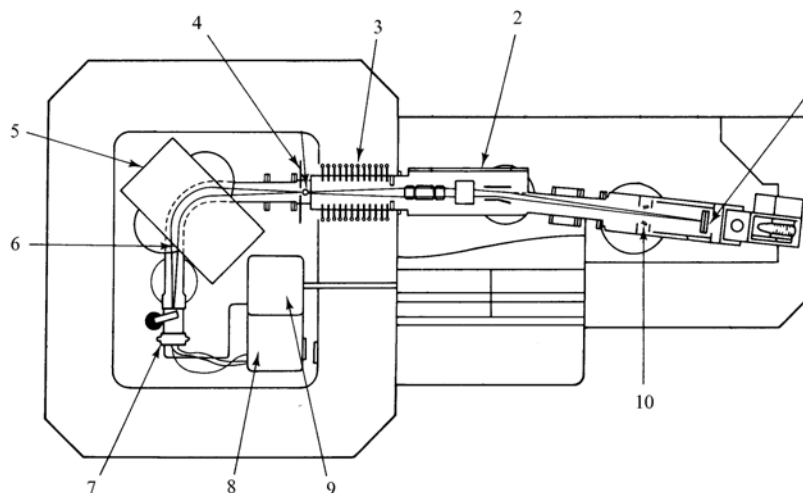
สหรัฐอเมริกาและญี่ปุ่นเป็นประเทศที่มีการทำการวิจัยเพื่อพัฒนาซิลิกอนบนฉนวนอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีความพร้อมทั้งในด้านของทุนและนักวิจัย จนกระทั่งบริษัทในญี่ปุ่นประสบความสำเร็จในการค้นพบสิ่งประดิษฐ์ช่องนำกระแสปลดพาหะเต็มที ที่สร้างจากซิลิกอนบนฉนวนที่มีชั้นซิลิกอนด้านบนที่บางมาก (น้อยกว่า 0.1 ไมโครเมตร) ทำให้ทรานซิสเตอร์มีความเร็วเพิ่มขึ้นอีก และเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้พลังงานต่ำ นอกจากนี้มีงานวิจัยอีกมากมายที่แสดงถึงผลดีของการใช้ซิลิกอนบนฉนวนเป็นวัสดุเริ่มต้นในการสร้างสิ่งประดิษฐ์ ได้แก่ ทำให้วงจรสามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงขึ้น และอันตรายในการฉายแสงลงบนโครงสร้างดังกล่าวนี้ลดลง เนื่องจากพาหะในแผ่นฐานรองที่ถูกละแสงตกกระทบจะไม่สามารถเคลื่อนเข้ามาในสิ่งประดิษฐ์ได้

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบัน จึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีของซิลิกอนบนฉนวนกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากซิลิกอนบนฉนวนเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะทำให้สิ่งประดิษฐ์มีสมรรถนะในการใช้งานสูงขึ้น และมีขนาดที่เล็กลง มีการคิดค้นเทคนิคการสร้างซิลิกอนบนฉนวนหลายวิธี ได้แก่ วิธีโซมอกซ์, วิธี BESOI ซึ่งย่อมาจาก Bond and Etch back SOI และวิธี Smart cut วิธีการที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือ โซมอกซ์ เนื่องจากชั้นซิลิกอนที่ได้จากกระบวนการนี้มีคุณภาพดี มีความบกพร่องน้อย และสามารถพัฒนาให้ชั้นซิลิกอนด้านบนและชั้นออกไซด์บางลงอย่างมาก ซึ่งทำให้เกิดผลดีต่อการสร้างสิ่งประดิษฐ์และต้นทุนในการผลิตก็ลดลงด้วย

1.2 กระบวนการสร้างไซม็อกซ์

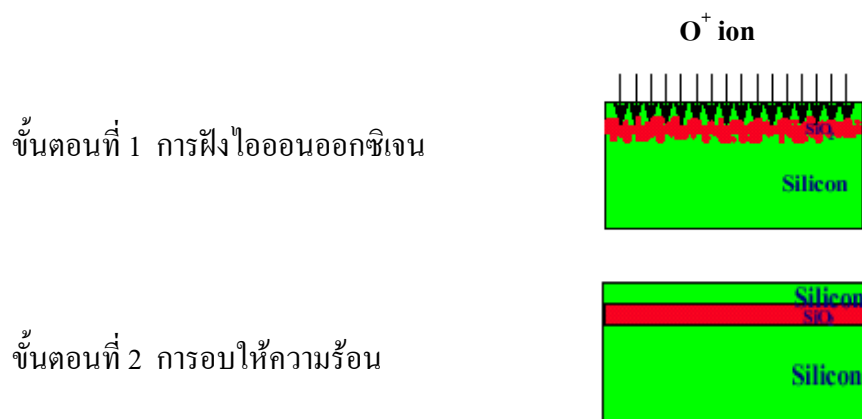
ไซม็อกซ์สร้างขึ้นตามกระบวนการของเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำที่มีความซับซ้อน ต้องการความแม่นยำในระดับสูงมาก และต้องทำในสิ่งแวดล้อมที่สะอาดมากด้วย มีการควบคุมอย่างระมัดระวังในด้านความชื้นอากาศ อุณหภูมิ ยิ่งไปกว่านั้น สารเคมีและวัสดุที่ใช้ต้องมีความบริสุทธิ์สูงมาก (อยู่ในระดับ 99.999 %) เพื่อป้องกันการเกิดสิ่งปนเปื้อนซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ ขั้นตอนหลัก ๆ ในการสร้างไซม็อกซ์ มี 2 ขั้นตอน ดังนี้ (Fortino, 1983)

1.2.1 การฝังไอออนออกซิเจนลงบนผลึกเดี่ยวซิลิกอน โดยเครื่องฝังไอออน (ion implanting machine) ภาพประกอบที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบภายในของเครื่องมือฝังไอออน ซึ่งเครื่องมือนี้ต้องทำงานภายใต้ภาวะสุญญากาศ แก๊สออกซิเจนจะถูกป้อนเข้าสู่แหล่งไอออน จากนั้นแก๊สจะแตกตัวเป็นไอออนภายในแหล่งไอออน อิเล็กโทรดสกัด (extractor electrode) จะทำหน้าที่ให้ไอออนออกจากแหล่งไอออน และไอออนของออกซิเจนจะถูกแยกออกโดยแม่เหล็กแยกมวลแบบวิเคราะห์ (analyzing mass separation magnet) จากนั้นลำไอออนจะเคลื่อนที่เข้าไปในสนามไฟฟ้า ซึ่งถูกเร่งให้มีพลังงานตามต้องการ พลังงานในการฝังไอออนของเครื่องจะอยู่ในช่วง 25-200 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งพลังงานที่ใช้จะเป็นตัวกำหนดความลึกของไอออนที่ฝังลงบนเว่นผลึก ขั้นตอนต่อไปไอออนจะถูกโฟกัสและเคลื่อนที่เข้ามาในบริเวณกวาดลำไอออน เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางของลำไอออนมีขนาดเล็ก (โดยทั่วไปมีค่า ~ 6 มิลลิเมตร) แต่ความต้องการคือต้องการให้การฝังไอออนเกิดอย่างสม่ำเสมอตลอดผิวหน้าเว่นผลึกที่เป็นเป้าซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15-20 เซนติเมตร จากการใช้เทคนิคการกวาดลำไอออนทำให้ลำไอออนกระทบผิวหน้าเว่นผลึกซึ่งถูกยึดไว้โดยปกติจะมีการทำให้ลำไอออนเลี้ยวเบนออกในช่วงระยะสั้น ๆ ก่อนที่จะถึงห้องบรรจุเป้าโดยการใช้อิเล็กโทรดคดลำไอออน (beam-bending electrodes) ที่เป็นคู่ทั้งนี้เพื่อเป็นการกำจัดไอออนที่เป็นกลางทางไฟฟ้า ซึ่งอาจหลงเหลืออยู่ในลำไอออน ซึ่งมักเกิดขึ้นเสมอในทางปฏิบัติ เนื่องจากการมีแก๊สตกค้างอยู่นั่นเอง หากมีไอออนชนกับโมเลกุลของแก๊สที่ตกค้างอยู่เหล่านี้จะทำให้ไอออนดึงอิเล็กตรอนจากโมเลกุลของแก๊สและกลายเป็นกลางทางไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม การชนกันลักษณะนี้โดยปกติโมเมนตัมและทิศทางของไอออนที่เป็นกลางจะไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้น ไอออนที่เป็นกลางจะไม่สามารถเลี้ยวเบนด้วยอิเล็กโทรดกวาดลำไอออนได้ด้วยเหตุนี้ หากไม่มีการทำให้ลำไอออนเลี้ยวเบนจะทำให้การฝังไอออนมีส่วนของไอออนที่เป็นกลางถูกฝังในเนื้อสารด้วยซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ สำหรับไอออนที่เป็นกลางนั้นจะถูกกำจัดออกไปโดยการชนกับแผ่นรวมจับลำไอออนที่เป็นกลาง



ภาพประกอบที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบภายในของเครื่องมือฝังไอออน 1 : เป่า, 2 : กล้องเลนส์และตัวกวาดไอออน, 3 : ท่อเร่งไอออน, 4 : ช่องบังคับไอออน, 5 : แม่เหล็กแยกมวลแบบวิกิระห์, 6 : ลำไอออน, 7 : แหล่งกำเนิดไอออน, 8 : แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่แหล่งกำเนิดไอออน, 9 : แหล่งก๊าซ, 10 : อิเล็กโทรดตัดลำไอออน (ที่มา : Fortino, 1983: 96)

1.2.2 การอบให้ความร้อน เนื่องจากข้อเสียหลักของวิธีการฝังไอออนคือ ทำให้ผิวหน้าของผลึกเกิดความเสียหายจากการแผ่พลังงาน (radiation damage) อันเนื่องมาจากการมีลำไอออนที่มีพลังงานสูงมากตกกระทบ นอกจากนี้หลังจากการฝังไอออน ไอออนออกซิเจนที่เข้าไปอยู่ในเนื้อซิลิกอนส่วนใหญ่จะยังไม่รวมตัวกัน ทั้งนี้เนื่องจากยังไม่ได้เข้าไปแทนที่อะตอมซิลิกอนในโครงผลึกแบบแทนที่ (substitutional) ดังนั้นหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการฝังไอออนแล้วมักทำการอบให้ความร้อนแก่ผลึกที่อุณหภูมิสูงประมาณ 900-1500°C ภายในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย ในช่วงเวลาหนึ่งเพื่อให้ไอออนออกซิเจนเกือบทั้งหมด (> 95 %) เคลื่อนเข้าไปแทนที่อะตอมซิลิกอนแบบเข้าแทนที่ ทำให้ซิลิกอนและไอออนออกซิเจนเปลี่ยนเป็นชั้นออกไซด์ (SiO₂) บาง ๆ และ การอบให้ความร้อนยังเป็นการทำให้ความเสียหายที่เกิดที่ผิวหน้าลดน้อยลง ดังนั้น โครงสร้างของไซมอกซ์หลังจากการอบให้ความร้อนแล้วจะมี 3 ชั้น คือ ชั้นซิลิกอน ชั้นออกไซด์ได้ผิวซิลิกอนและชั้นฐานซิลิกอน ภาพประกอบที่ 2.3 แสดงกระบวนการสร้างและโครงสร้างของไซมอกซ์



ภาพประกอบที่ 2.3 แสดงกระบวนการสร้างและโครงสร้างของไซมอกซ์

1.3 การศึกษาคุณภาพของไซมอกซ์

ไซมอกซ์เป็นวัสดุที่สำคัญเนื่องจากมันเป็นวัสดุเริ่มต้นในการสร้างสิ่งประดิษฐ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ สิ่งประดิษฐ์จะดีก็ต่อเมื่อสร้างจากไซมอกซ์ ที่มีคุณภาพที่ดี ตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อคุณภาพ (quality parameter) ของไซมอกซ์ มีดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงตัวแปรทางคุณภาพของไซมอกซ์ (ที่มา : <http://www.ibis.character.htm>)

สมบัติทางกายภาพ	สมบัติทางเคมี	สมบัติทางไฟฟ้า
ความหนาของชั้น ความสม่ำเสมอของชั้น อนุภาค ความบกพร่องในชั้นซิลิกอน ความบกพร่องในชั้นออกไซด์	ระดับความไม่บริสุทธิ์	ความนำไฟฟ้าของชั้นซิลิกอน กระแสรั่วในชั้น BOX

ในงานวิจัยนี้ศึกษาคุณภาพของไซมอกซ์ในด้านของสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้าเท่านั้น จึงจะกล่าวรายละเอียดเฉพาะคุณสมบัติทั้งสองข้อนี้

1.3.1 สมบัติทางกายภาพ

การศึกษาสมบัติทางกายภาพทำได้โดยการวัดความหนาของชั้นซิลิกอนด้านบนและชั้นออกไซด์ใต้ผิวซิลิกอนซึ่งบางมาก ๆ อาจใช้เทคนิคทางแสง (optical techniques) และอิลิปโซเมทรี หลักการทำงานของอิลิปโซเมทรี (อาทิต และ ชีรัช, 2541: 65) อาศัยหลักการทางแสง โดยให้แสงที่มีการโพลาไรเซชัน (polarization) ตกกระทบผลึกแล้วสะท้อนจากผิวหน้าแผ่นฟิล์ม แสงสะท้อนจะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบโพลาไรเซชัน ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าของแอมพลิจูด (amplitude) และเฟส (phase) ของแสง จึงสามารถคำนวณหาค่าความหนาและค่าดัชนีการหักเหของชั้นฟิล์มบางของแว่นผลึกได้ และเมื่อต้องการความละเอียดทางกายภาพสูง ๆ จะใช้เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดและชนิดส่องผ่าน โดยที่กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดจะให้ภาพพื้นผิวของวัตถุ ส่วนจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่านจะให้ภาพภาคตัดขวางของวัตถุ ซึ่งทำให้สามารถมองเห็นโครงสร้างจุลภาคของชั้นต่าง ๆ ของไซม็อกซ์และสามารถศึกษาได้ถึงระดับอะตอม ตรวจสอบความบกพร่องของชั้นต่าง ๆ ให้เป็นไปตามความต้องการของสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ที่จะสร้าง เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพมีความสัมพันธ์และเป็นตัวกำหนดสมบัติทางไฟฟ้า

1.3.2 สมบัติทางไฟฟ้า

การศึกษาคูณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากการทดลองใช้งานไซม็อกซ์ ก่อนที่จะนำไปสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์จริง ๆ มักทำการศึกษาโดยการสร้างไซม็อกซ์เป็นสิ่งประดิษฐ์ต่าง ๆ เช่น ตัวเก็บประจุมอส มอสเฟต ซิมอส เป็นต้น แล้ววัดค่าต่าง ๆ ทางไฟฟ้า เช่น พื้นที่ภาคตัดขวางในการจับ การจับพาหะส่วนน้อย การจับที่รอยต่อผิว (interface trap) ช่วงเวลาการเกิดการรวมตัวของพาหะส่วนน้อย (minority carrier generation lift time) ระดับพลังงานระดับลึกด้วยเทคนิค DLTS (ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 1) ค่าต่าง ๆ เหล่านี้บอกถึงปริมาณความบกพร่องที่มีอยู่ในพื้นที่ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ หรืออาจวัดค่าความจุไฟฟ้า-แรงดัน กระแสไฟฟ้า-แรงดัน (current-voltage) และวิเคราะห์กราฟจากการทดลองกับกราฟจากการคำนวณทางทฤษฎี จะกล่าวถึงรายละเอียดทฤษฎีการวัดค่าความจุไฟฟ้า-แรงดัน ในหัวข้อที่ 3

2. ทฤษฎีของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

วัตถุประสงค์ของการสร้างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ก็เพื่อความต้องการในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัตถุที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ซึ่งไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า และกล้องจุลทรรศน์แบบลำแสงก็ไม่สามารถแยกรายละเอียดของภาพที่ต้องการเห็นได้ เนื่องจาก

ความยาวคลื่นของแสงที่ตกกระทบบนตัวอย่างมีขนาดยาวกว่ารายละเอียดของโครงสร้างที่ต้องการศึกษา

2.1 หลักการของจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเบื้องต้น

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเป็นอุปกรณ์ซึ่งออกแบบขึ้นเพื่อช่วยให้เกิดการมองเห็นจุล-โครงสร้างด้วยตาเปล่าอย่างชัดเจน ซึ่งหมายถึงว่าต้องบรรลุความต้องการใช้งานในสิ่งต่อไปนี้ คือ ต้องมีความสามารถแยกรายละเอียดของภาพสูง (high resolution) มีกำลังขยายสูง (high magnification) และให้ความคมชัดของภาพดี

2.1.1 ขีดจำกัดการเลี้ยวเบน (diffraction limit)

ขีดจำกัดในการจำแนกรายละเอียดของภาพพิจารณาจากสมการการหักเหของแสงของ Abbe เมื่อลำแสงส่องผ่านจุดวัตถุผ่านเลนส์ แล้วทำให้เกิดภาพรูปร่างวงแหวนเรียกว่า Airy disk (Southworth, 1975) และกฎของเรลีย์ (Rayleigh) ให้หลักเกณฑ์ของกำลังแยก (resolving power) สำหรับกำลังแยกมากที่สุดของจุดวัตถุสองจุด หรือการแยกกันพอดีของจุดภาพทั้งสองเกิดเมื่อจุดสว่างตรงกลางของลวดลายการเลี้ยวเบนจากจุดกำเนิดอันหนึ่งอยู่ตรงกับจุดมืดแรกของลวดลายการเลี้ยวเบนจากจุดกำเนิดอีกจุดหนึ่ง (สมพงษ์, 2542) ทำให้ได้ค่ากำลังแยก

$$d_d = \frac{0.61\lambda}{n \sin \alpha} \quad (2.1)$$

เมื่อ α คือครึ่งหนึ่งของมุมกรวยที่แสงตกกระทบ

λ คือความยาวคลื่นของลำแสงที่ตกกระทบวัตถุ

n คือดัชนีหักเหของวัตถุที่อยู่ระหว่างวัตถุกับเลนส์

ในปี ค.ศ. 1924 เดอบรอย (de Broyle) พบว่าอิเล็กตรอนมีพฤติกรรมทางกายภาพคล้ายคลื่นที่มีความยาวคลื่น

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad (2.2)$$

เมื่อ h คือค่าคงที่ของแพรงค์ (Planck) มีค่า 6.624×10^{-34} จูล-วินาที

m คือมวลหยุดนิ่ง (rest mass) มีค่า 9×10^{-31} กิโลกรัม

v คือความเร็วของแสงมีค่า 2.998×10^8 เมตรต่อวินาที

เมื่อเร่งอิเล็กตรอนด้วยแรงดันไฟฟ้าสูง (acceleration voltage) พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนจะมีค่า

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV \quad (2.3)$$

เมื่อ e คือค่าประจุของอิเล็กตรอน มีค่า 1.602×10^{-19} คูลอมป์

V คือค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้เร่ง มีหน่วยเป็นโวลต์

ดังนั้นจากสมการ (2.4) และ (2.5) จะได้ (หน่วยเป็นนาโนเมตร)

$$\lambda = \frac{h}{(2meV)^{1/2}} = \frac{1.226}{\sqrt{V}} \quad (2.4)$$

ในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าที่ใช้เร่งอิเล็กตรอนที่มีค่าสูงมาก ๆ (มากกว่า 50 kV) ความเร็วของอิเล็กตรอนจะเข้าใกล้ความเร็วของแสง มวลของอิเล็กตรอนจะเปลี่ยนแปลงไปจากมวลที่หยุดนิ่ง ต้องใช้ทฤษฎีสัมพัทธภาพของไอน์สไตน์ในการคิดคำนวณ ดังนี้

$$m = \frac{m_0}{\left[1 - \frac{v^2}{c^2}\right]^{1/2}} \quad (2.5)$$

$$\text{และ} \quad mc^2 - m_0c^2 = eV \quad (2.6)$$

$$\text{จะได้} \quad \lambda \approx \frac{1.226}{\left[V + 0.978 \times 10^{-6}V^2\right]^{1/2}} \quad (\text{หน่วย: นาโนเมตร}) \quad (2.7)$$

(Cowley, 1992) สำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน จะมีค่าดัชนีหักเหของสุญญากาศ $n = 1$ กฎกำลังแยกของเรลีย์เขียนได้เป็น

$$d = \frac{0.61\lambda}{\sin \alpha} \quad (2.8)$$

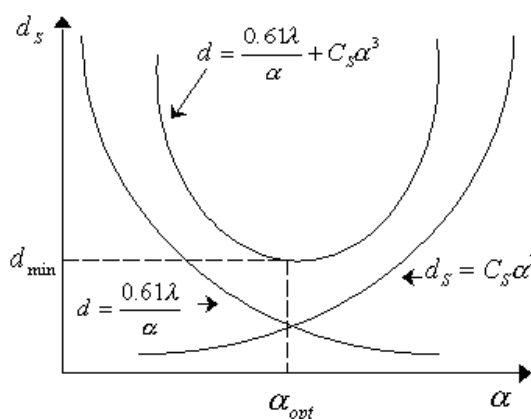
แต่อย่างไรก็ตามภาพของวัตถุที่มีความสามารถในการแยกสูงไม่ได้ต้องการเพียงแต่ความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนแต่ต้องมีเลนส์ที่เหมาะสมด้วย

2.1.2 ความคลาดเลนส์ (lens aberration)

ระบบเลนส์ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเป็นระบบเลนส์อิเล็กตรอนแบบแม่เหล็ก (magnetic electron lens) ซึ่งจะใช้สนามแม่เหล็กบังคับลำอิเล็กตรอนให้เกิดการเลี้ยวเบน เพื่อสร้างพฤติกรรมทางเลนส์ ที่ให้ผลต่อการเกิดภาพเหมือนกับเลนส์นูน เมื่อเร่งอิเล็กตรอนด้วยพลังงาน 100 kV ตามหลักการของกำลังแยกแล้วอิเล็กตรอนจะมีการจำแนกรายละเอียดภาพถึง 0.003 นาโนเมตร แต่ความจริงแล้วเลนส์อิเล็กตรอนยังเป็นตัวจำกัดให้กำลังแยกน้อยลงเพียง 0.2 นาโนเมตร ทั้งนี้เนื่องจากการบังคับให้เลนส์อิเล็กตรอนเป็นเลนส์ที่มีความสมบูรณ์ 100 % นั้นทำได้ยาก เนื่องจากมักจะมีปัญหาในเรื่องความคลาดเลนส์ (lens aberration) ซึ่งเกิดจากรูปร่างลักษณะ และสมบัติของเลนส์ ซึ่งมีผลทำให้ภาพที่เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งทำให้ภาพเสียความคมชัด หรืออาจผิดเพี้ยนไปจากวัตถุที่ทำให้เกิดภาพ เช่น การเกิดความคลาดทรงกลม (spherical aberration) ทำให้เกิดขีดจำกัดของการแยก (limit of resolution) เนื่องจากความคลาดทรงกลม (Seraphin, 2001)

$$d_s = C_s \alpha^3 \quad (2.9)$$

เมื่อ C_s คือ สัมประสิทธิ์ความคลาดทรงกลม (spherical aberration coefficient) การจำแนกที่เหมาะสมของเลนส์อิเล็กตรอนที่มีความคลาดทรงกลมเป็นไปดังภาพประกอบที่ 2.4



ภาพประกอบที่ 2.4 แสดงขีดจำกัดของการแยก (d_{min}) และขนาดของอเพอร์เจอร์ (α_{opt})

สำหรับเลนส์ที่มีความคลาดทรงกลม (ที่มา: Seraphin, 2001: 12)

เราสามารถเพิ่มกำลังขยายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนโดยการลดขนาดมุมของอเพอร์เจอร์ของเลนส์ใกล้วัตถุ เนื่องจากเงื่อนไขของขนาดอเพอร์เจอร์ที่เหมาะสม มีค่าดังสมการ

$$C_s \alpha^3 = \frac{0.61\lambda}{n \sin \alpha} \quad (2.10)$$

เมื่อ α มีค่าน้อยมากสามารถประมาณค่า $\sin \alpha \approx \alpha$ ดังนั้น จะได้

$$C_s \alpha^3 = \frac{0.61\lambda}{\alpha} \quad (2.11)$$

$$\alpha_{optimum} = \left(\frac{0.61\lambda}{C_s} \right)^{1/4} \approx \left(\frac{\lambda}{C_s} \right)^{1/4} \quad (2.12)$$

และค่ากำลังแยกที่เหมาะสมมีค่า

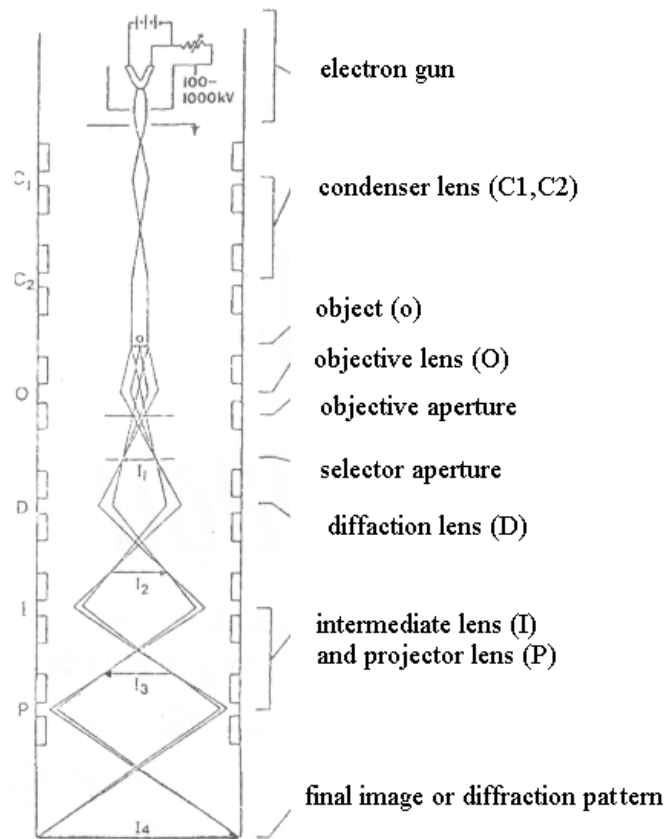
$$d_{min} = C_s \alpha_{optimum}^3 = C_s^{1/4} \lambda^{3/4} \quad (2.13)$$

2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน

2.2.1 ลักษณะทั่วไป

เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน หรือ TEM เป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุโดยการยิงลำอิเล็กตรอนผ่านชิ้นงานที่เตรียมให้บาง (น้อยกว่า 500 นาโนเมตร) และศึกษาลำอิเล็กตรอนที่เลี้ยวเบนจากระนาบต่าง ๆ ในชิ้นงานและผ่านออกมาทางด้านล่างของชิ้นงาน

ภาพประกอบที่ 2.5 เป็นแผนภาพแสดงส่วนประกอบภายในต่าง ๆ ของกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคปชนิดส่องผ่าน ซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน หรือปืนอิเล็กตรอน (electron gun) ที่ทำมาจากทังสเตน (W) แลนธานัมเฮกซะโบไรด์ (LaB_6) หรือทังสเตนเคลือบเซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO_2) ซึ่งใช้แรงดันไฟฟ้าเร่งอิเล็กตรอนสูงถึง 100-400 kV กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่านทำงานโดยใช้เลนส์คอนเดนเซอร์ (condenser lens) 2 อัน โฟกัสลำอิเล็กตรอนให้ขนานกับคอลัมน์ของกล้อง จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะผ่านชิ้นงานที่เตรียมให้บางและเกิดการเลี้ยวเบนลำอิเล็กตรอนที่เลี้ยวเบนจะถูกโฟกัสรวมกันเป็นจุดดิฟแฟรกชัน (diffraction spot) ที่ระนาบของจุดโฟกัสโดยเลนส์วัตถุ (objective lens) จากนั้นจะผ่านไปยังเลนส์แม่เหล็กอีก 3 ตัว คือเลนส์ดิฟแฟรกชัน (diffraction lens) เลนส์อินเทอมีเดียท (intermediate) เลนส์โปรเจกเตอร์ (projector lens) เพื่อขยายและแสดงภาพบนจอของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน

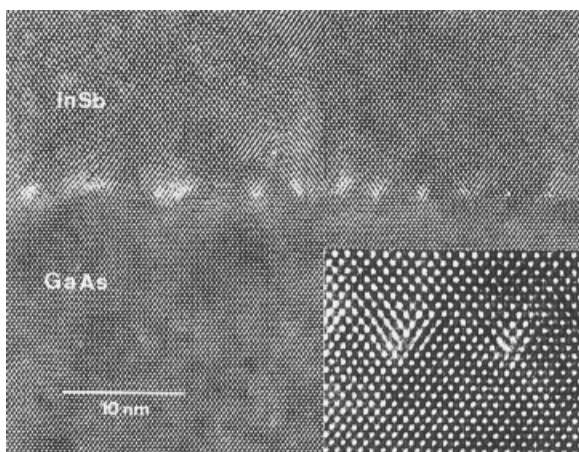


ภาพประกอบที่ 2.5 แผนภาพแสดงส่วนประกอบภายในต่าง ๆ ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (ที่มา: ชาญชนา, 2543: 47)

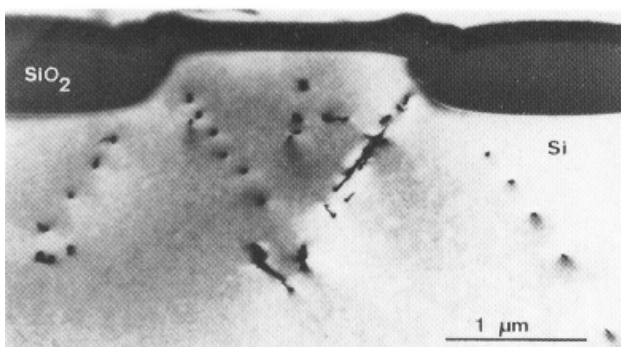
เมื่อใช้เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่านศึกษาชิ้นงานชิ้นหนึ่ง ภาพที่ได้มี 2 ชนิด คือ ภาพลวดลายการเลี้ยวเบนหรือนิยมเรียกว่า ภาพดิฟเฟรกชันซึ่งให้รายละเอียดโครงสร้าง การจัดเรียงตัวของอะตอมในวัสดุ และภาพขยายซึ่งให้กำลังขยายสูงถึง 1,000,000 เท่า (ชาญชนา, 2543 : Catti, 1992) จากภาพทั้งสองชนิดนี้ ผู้ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน สามารถแปลงผลข้อมูลที่ได้อย่างกว้างขวาง เช่น หากชิ้นงานมีความบกพร่องทั้งภาพขยายและภาพดิฟเฟรกชันจะแสดงตำแหน่งและลักษณะการเกิดข้อบกพร่องในชิ้นงานอย่างเด่นชัด

การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน ขึ้นอยู่กับกลไก สำคัญ 2 ชนิด คือ กลไกเฟสคอนทราสต์ (phase contrast) ที่มีกำลังแยกแยะสูง ที่ใช้ในการถ่ายภาพที่มีกำลังแยกแยะรายละเอียดน้อยกว่า 10 อังสตรอม ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.6 (ก) และกลไกดิฟเฟรกชันคอนทราสต์ (diffraction contrast) ที่ใช้ในการถ่ายภาพที่มีกำลังแยกแยะสูงกว่า 10 อังสตรอม ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.6 (ข)

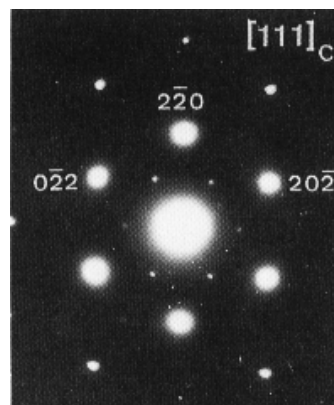
การถ่ายภาพด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน ผู้ใช้กล้องจะต้องเริ่มทำงานจากภาพดิฟเฟรกชัน ดังภาพประกอบที่ 2.6 (ก) แล้วใส่แอฟเฟอร์เจอร์วัตถุรอบ ๆ จุดดิฟเฟรกชัน (diffraction spot) ที่ต้องการศึกษา กลไกหลักที่ใช้ศึกษากันทั่วไปคือกลไกดิฟเฟรกชันคอนทราสต์เนื่องจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน ที่สามารถถ่ายภาพซึ่งมีกำลังแยกแยะน้อยกว่า 10 อังสตรอม ต้องเป็นกล้องที่มีความต่างศักย์ในการเร่งสูง (≥ 200 kV)



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพประกอบที่ 2.6 ตัวอย่างภาพที่ถ่ายด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (ก) กำลังขยายแยกแยะสูง ที่ถ่ายด้วยกลไกเฟสคอนทราสต์กำลังแยกแยะสูง (ข) ภาพขยายที่ถ่ายด้วยกลไกดิฟเฟรกชันคอนทราสต์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (ค) ภาพดิฟเฟรกชันของฟูลเลอร์ไรท์ (fullerite : C_{60}) (ที่มา: Amalinc, 1992: 40-142)

การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน (electron diffraction) ในจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนตกกระทบบระนาบหนึ่ง ๆ ในแผ่นชิ้นงานและเกิดการเลี้ยวเบนเป็นมุมเท่า ๆ กัน เมื่อลำอิเล็กตรอนที่เกิดการเลี้ยวเบนเลี้ยวเบนจากระนาบหนึ่ง ๆ ผ่านชิ้นงานออกมาจะถูกโฟกัสโดยเลนส์วัตถุให้มารวมกันที่จุดดิฟแฟรกชันการเลี้ยวเบนของลำอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน เป็นไปตามสมการของแบรกก์ (Bragg's equation) คือ

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (2.14)$$

โดยที่ d_{hkl} คือ ระยะระหว่างระนาบ (hkl)

θ คือ มุมตกกระทบบ

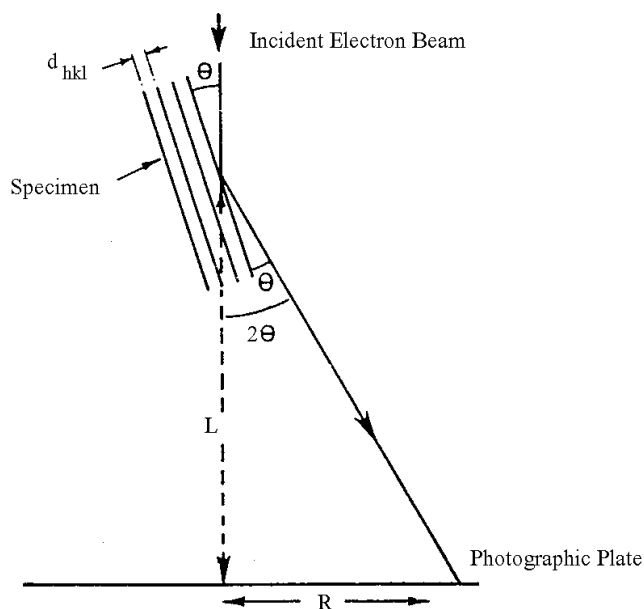
λ คือ ความยาวคลื่น และ

n คือ เลขจำนวนเต็ม (1,2,3...) ซึ่งบอกอันดับของการเลี้ยวเบน (order of diffraction)

สำหรับภาพดิฟแฟรกชันที่ศึกษากัน โดยทั่วไปในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน $n = 1$

2.2.2 การวิเคราะห์ภาพถ่ายจากเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน

2.2.2.1 การวิเคราะห์ภาพถ่ายดิฟแฟรกชัน



ภาพประกอบ 2.7 แสดงภาพการเกิดการเลี้ยวเบนอย่างง่ายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Andrews, 1981)

ภาพถ่ายดิฟเฟรคชันที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน ถ่ายโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนจากบริเวณที่เลือกไว้ เมื่ออิเล็กตรอนผ่านชิ้นงานและให้ภาพที่เป็นจุดดิฟเฟรคชันซึ่งมีระยะ R จากจุดกึ่งกลางของลวดลายการเลี้ยวเบนทั้งหมดดังภาพประกอบที่ 2.7 ระยะทางระหว่างชิ้นงานและจอภาพเรียกว่าความยาวของกล้อง (camera length) มีระยะ L จึงได้ความสัมพันธ์

$$\tan 2\theta = \frac{R}{L} \quad (2.15)$$

จากสมการของแบรกก์ (2.14) และมุมการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนซึ่งมีขนาดเล็กมากเพียง $1^\circ - 2^\circ$ จึงสามารถประมาณ

$$\tan 2\theta = 2 \sin \theta$$

จะได้
$$Rd_{hkl} = \lambda L \quad (2.16)$$

โดยที่ λL เป็นค่าคงที่ของกล้อง (camera constant) สำหรับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้เร่งอิเล็กตรอนค่าหนึ่ง จะให้ความยาวคลื่น λ ที่แรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ กัน และระยะ R วัดจากภาพถ่าย สามารถคำนวณหาค่า d_{hkl} ในระบบผลึกต่าง ๆ ได้จากความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์

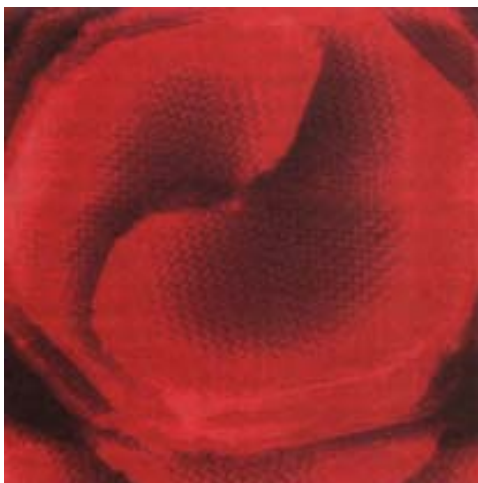
2.2.2.1 การวิเคราะห์ภาพกำลังขยายสูง

ภาพถ่ายกำลังขยายสูงแสดงถึงโครงสร้างผลึก (crystal structure) ของวัตถุ วัตถุแต่ละชนิดจะมีรูปร่างของโครงผลึกที่แตกต่างกัน ผลึกในอุดมคติ (ideal crystal) หรือ ผลึกสมบูรณ์ (perfect crystal) เป็นผลึกที่ไม่มีตำหนิหรือความบกพร่องของการจัดเรียงตัวของอะตอม รูปแบบอะตอมมีความเป็นระเบียบตามตำแหน่งต่าง ๆ ด้วยระยะห่างสม่ำเสมอทุกทิศทาง ดังนั้นการวิเคราะห์ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน จึงวิเคราะห์ในลักษณะความผิดปกติของโครงสร้างที่ต่างไปจากผลึกในอุดมคติ ซึ่งความบกพร่องที่เกิดขึ้นในผลึกมี 3 แบบด้วยกันคือ จุดบกพร่อง (point defects) ความบกพร่องแบบเส้นหรือแนวบกพร่อง (line defects or dislocations) และระนาบบกพร่อง (planar defects)

จุดบกพร่องเกิดขึ้นในเฉพาะจุดใดจุดหนึ่งของผลึก อาจเกิดเนื่องจากการหายไปของอะตอมทำให้เกิดความบกพร่องแบบที่ว่าง (vacancy) และการมีอะตอมเกินในโครงผลึก ทำให้เกิดความบกพร่องแบบอะตอมแทรก (interstitial) ความบกพร่องแบบที่ว่างและอะตอมแทรกเป็นความบกพร่องที่เกิดขึ้นกับผลึกที่บริสุทธิ์ซึ่งเป็นอะตอมชนิดเดียวกัน ส่วนความบกพร่องที่เกิดจากการมีอะตอมอื่นเข้ามาแทนที่อะตอมในโครงผลึกซึ่งเป็นอะตอมคนละชนิดกันทำให้โครงผลึกผิดเพี้ยนไป

เรียกว่า ความบกพร่องแบบแทนที่ (substitutional) ผลึกที่เป็นไอออนิกการเกิดที่ว่างหนึ่งอาจจะเกิดจากอะตอมที่เป็นบวกหรืออะตอมที่เป็นลบ ในกรณีที่เกิดที่ว่างของอะตอมคู่หนึ่งที่มีประจุตรงข้ามกัน เรียกว่า ความบกพร่องแบบโศซทกี (Schottky defect) หากมีอะตอมแทรกและที่ว่างของอะตอมคู่หนึ่งที่เกิดจากการเคลื่อนย้ายของประจุจากที่หนึ่งแล้วไปแทรกอยู่อีกที่หนึ่งก็จะเรียกว่าความบกพร่องแบบเฟรนเคิล (Frenkel defect) (Kittel, 1996)

ความบกพร่องแบบเส้นหรือแนวบกพร่อง เกิดจากการเลื่อน (slip) ไปของอะตอมในแนวใดแนวหนึ่งที่เกิดจากความเค้นเฉือน (shear stress) เมื่อมีการเลื่อนของระนาบเพียงบางส่วน จะทำให้เกิดเส้นแนวบกพร่อง (dislocation line) ลักษณะของการเลื่อนไปทำให้เกิดแนวบกพร่อง 2 ลักษณะ คือ แนวบกพร่องขอบ (edge dislocation) มีลักษณะของระนาบของอะตอมเกินในโครงสร้างผลึกทำให้ผลึกบิดเบี้ยว และแนวบกพร่องเกลียว (screw dislocation) ที่เกิดขึ้นเมื่อผลึกได้รับความเค้นเฉือนพร้อมกันและทิศสวนทางกัน ทำให้แนวของโครงสร้างผลึกบิดเบี้ยวและจะขดเป็นเกลียว ภาพประกอบ 2.8 แสดงภาพถ่ายกำลังขยายสูงของผลึกแกลเลียมไนไตรด์ (GaN) ที่เกิดความบกพร่องเกลียว

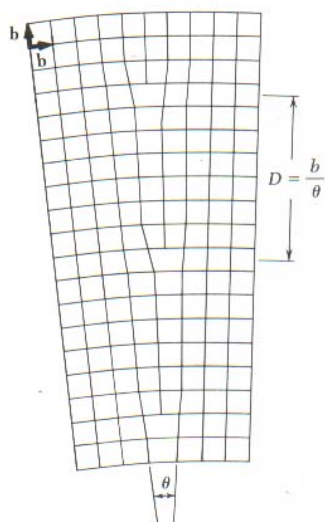


ภาพประกอบ 2.8 แสดงภาพถ่ายไมโครกราฟกำลังขยายสูงของผลึกแกลเลียมไนไตรด์ (GaN) (ที่มา: Queisser and Haller, 1998)

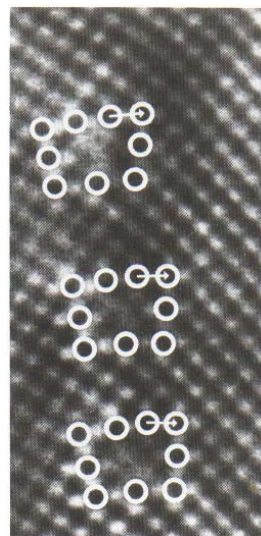
ระนาบบกพร่องเป็นความบกพร่องที่เกิดกับอะตอมหลายอะตอมและหลายแนวในระนาบหนึ่ง ๆ ความบกพร่องของระนาบเกิดขึ้นได้หลายแบบ ได้แก่ ขอบเกรน⁴ มุมต่ำ (low-angle grain

⁴เกรน หมายถึง บริเวณที่ผลึกเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน และทิศทางในแต่ละเกรนก็แตกต่างกันไป ขนาดและรูปร่างของเกรนถูกจำกัดด้วยเกรนอื่น ๆ ที่อยู่โดยรอบ

boundaries) เกิดจากแนวบกพร่องมาอยู่ในบริเวณเดียวกันมากกว่า 1 แนว ทำให้ขอบของผลึกเอียงเข้าหากัน ดังภาพประกอบที่ 2.9 เป็นลักษณะของขอบเอียงที่เกิดจากแนวบกพร่องขอบ



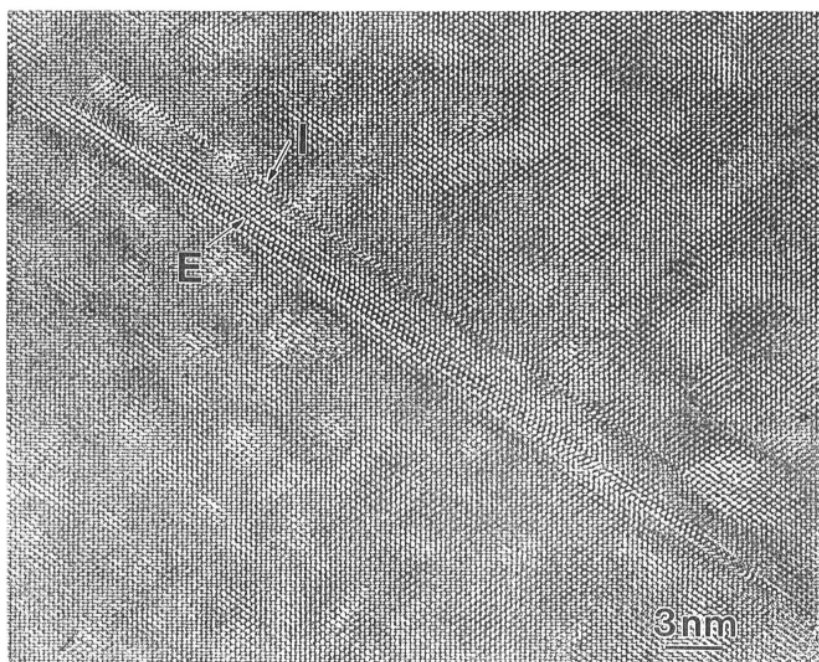
(ก)



(ข)

ภาพประกอบที่ 2.9 แสดงความบกพร่องแบบขอบแกรนมุมดำ (ก) ขอบเอียงเนื่องจากมีแนวบกพร่องขอบมากกว่า 1 แนว (ข) ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของ โมลิบดีนัม (molybdenum) (ที่มา: Kittel, 1996: 595)

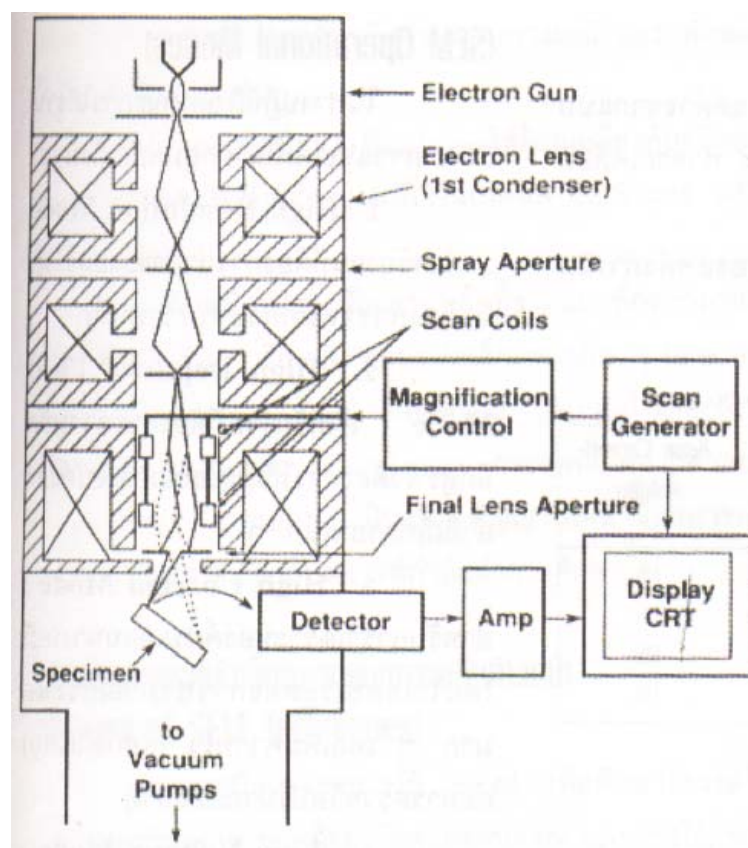
ระนาบแฝด (twin plane) เกิดจากมีการผิดรูปของระนาบในโครงผลึกที่ได้รับแรงเฉือนมาเสมอจนกระทั่งอะตอมบางแถวในระนาบนั้นเคลื่อนที่ไปตามแนวแรงกระทำ ทำให้ระนาบนั้นแยกเป็นระนาบที่มีลักษณะเหมือนกัน 2 ระนาบ ระนาบบกพร่องที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งคือ การเข้ากลุ่มผิดพลาด (stacking fault) เกิดจากระนาบไม่ได้อยู่ในอันดับถูกต้องในผลึก เนื่องจากอะตอมในระนาบนั้นขาดหายไปหรือมีอะตอมอื่นมาแทรก รูปร่างของการเข้ากลุ่มผิดพลาดแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือการเข้ากลุ่มผิดพลาดแบบอินทรินสิค (intrinsic stacking fault) ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนไปของระนาบที่เรียงตัวกันอยู่อย่างเป็นระเบียบ และการเข้ากลุ่มผิดพลาดแบบเอกทรินสิค (extrinsic stacking fault) ที่เกิดจากการเข้ามาแทรกของระนาบที่มีผลต่อระนาบอื่นที่เรียงกันอยู่อย่างเป็นระเบียบ (Jenkins, 1995) ภาพประกอบ 2.10 แสดงภาพถ่ายกำลังขยายสูงของความบกพร่องแบบการเข้ากลุ่มผิดพลาด



ภาพประกอบ 2.10 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่านของบริเวณชั้นซิลิกอนด้านบนของตัวอย่างไซมอกซ์ แสดงความบกพร่องแบบการเข้ากลุ่มผิดพลาด I: อินทรินสิก E: เอกทรินสิก (ที่มา: Seraphin, 1994: 348)

2.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด หรือ SEM เป็นเครื่องมือที่มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางในหลายสาขา เนื่องจากสามารถมองเห็นจุลโครงสร้างของพื้นผิวของวัสดุด้วยการเตรียมตัวอย่างได้หลายวิธี เพื่อให้เหมาะสมกับความต้องการในการศึกษา หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด คือ การใช้ปืนอิเล็กตรอนเป็นตัวให้กำเนิดอิเล็กตรอนเพื่อยิงลงไปบนชิ้นงาน อิเล็กตรอนจะถูกเร่งจากแหล่งกำเนิดให้เคลื่อนที่ลงตามคอลัมน์ (column) ด้วยแรงดันไฟฟ้าในช่วง 1-30 กิโลโวลต์ โดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะควบคุมโดยเลนส์คอนเดนเซอร์ซึ่งจะทำหน้าที่บีบลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดของหน้าตัดเล็กลงและปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยช่องเปิดแอฟเพอร์เจอร์ซึ่งมีขนาดต่างกัน จากนั้นเลนส์วัตถุจะปรับโฟกัสลำอิเล็กตรอนให้ไปตกกระทบที่ผิวของวัตถุเป้าหมายโดยใช้คอยล์กวาดภาพ (scan coil) ทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนบนผิวของวัตถุ แล้วนำสัญญาณที่ได้มาแปลงและแสดงผลทางจอภาพ ภาพประกอบที่ 2.11 แสดงองค์ประกอบที่สำคัญและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด



ภาพประกอบ 2.11 แสดงส่วนประกอบที่สำคัญและหลักการทำงานของจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (ที่มา: บัญชา, 2540: 56)

ในระบบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน นอกจากเทคนิคในการสร้างระบบเลนส์อิเล็กตรอน เพื่อให้ได้ความสามารถในการจำแนกภาพและกำลังขยายสูงแล้ว สิ่งสำคัญของระบบกล้องจุลทรรศน์คือการมองเห็นภาพที่ขยายแล้วด้วยตาเปล่าและการบันทึกภาพ เนื่องจากเราไม่สามารถมองเห็นอิเล็กตรอนด้วยตาเปล่าเหมือนแสง จึงต้องอาศัยอันตรกิริยาระหว่างลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบบนชิ้นงาน และได้รับผลในรูปสัญญาณอิเล็กตรอนที่เลือกมาสร้างกระบวนการเกิดภาพที่มองเห็น

สัญญาณต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับวัตถุ ประกอบด้วยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electrons) ซึ่งให้ข้อมูลลักษณะพื้นผิวและเป็นสัญญาณที่นำมาสร้างภาพมากที่สุด อิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับ (backscattered electrons) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนผสมทางเคมี เอกซเรย์ (x-ray) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับชนิดของธาตุองค์ประกอบ นอกเหนือไปจากสัญญาณหลักทั้ง 3 แบบที่กล่าวมาแล้ว ยังมีสัญญาณอื่น ๆ อีก เช่น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอื่น ๆ ไอเจอิเล็กตรอน

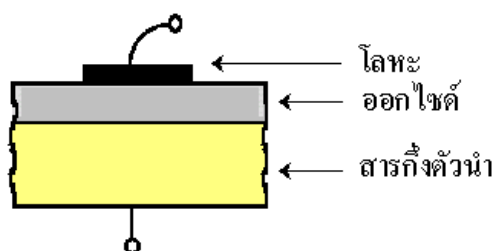
(auger electron) คลื่นเสียง (acoustic wave) เป็นต้น สัญญาณเหล่านี้สามารถให้ข้อมูลหลายอย่างเกี่ยวกับสสารที่กำลังทำการศึกษา

ในทางปฏิบัติ ลักษณะการใช้งานจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด อาจแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ การถ่ายภาพ และการวิเคราะห์ธาตุ ในงานวิจัยนี้ใช้เฉพาะการถ่ายภาพ ซึ่งสามารถถ่ายภาพได้ทั้งที่ก่้างขยายต่ำและก่้างขยายสูง ภาพที่ได้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับพื้นผิวที่ให้ความคมชัดลึกดี และสามารถวิเคราะห์ภาพได้ง่าย

3. ทฤษฎีตัวเก็บประจุมอสและสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน

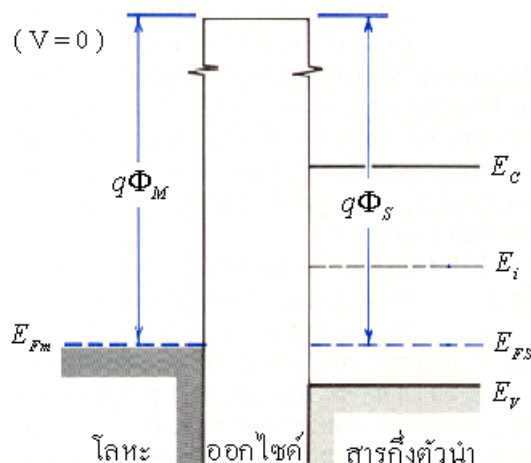
3.1 ตัวเก็บประจุมอสอุดมคติ (ideal MOS capacitor)

ตัวเก็บประจุมอสมีโครงสร้าง 3 ชั้น ประกอบด้วย ชั้นโลหะ ชั้นออกไซด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวน และชั้นสารกึ่งตัวนำดังภาพประกอบที่ 2.12



ภาพประกอบที่ 2.12 แสดงโครงสร้างตัวเก็บประจุมอส

ในการศึกษาสมบัติของตัวเก็บประจุมอสจะกำหนดลักษณะสมบัติตัวเก็บประจุมอสอุดมคติขึ้นเพื่อใช้เปรียบเทียบกับตัวเก็บประจุมอสจริง ๆ ตัวเก็บประจุมอสในอุดมคตินั้นจะกำหนดให้ค่าฟังก์ชันงาน (work function) ของโลหะ (Φ_M) เท่ากับค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ (Φ_S) และกำหนดให้ไม่มีประจุในชั้นออกไซด์และที่ระหว่างผิวของชั้นออกไซด์และชั้นสารกึ่งตัวนำ แผนภาพระดับพลังงานแสดงในภาพประกอบที่ 2.13 เป็นตัวเก็บประจุมอสที่มีชั้นสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดพี



ภาพประกอบที่ 2.13 แสดงระดับพลังงานของตัวเก็บประจุโมสชนิดพีในอุดมคติ E_C คือ แถบนำ (conduction band) ของสารกึ่งตัวนำ E_V คือ แถบวาเลนซ์ (valence band) ของสารกึ่งตัวนำ E_i คือ ระดับเฟอร์มี⁵ (fermi level) ของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ E_{FS} คือ ระดับเฟอร์มีของสารกึ่งตัวนำ E_{Fm} คือ ระดับเฟอร์มีของโลหะ (ที่มา: Streetman, 1995: 302)

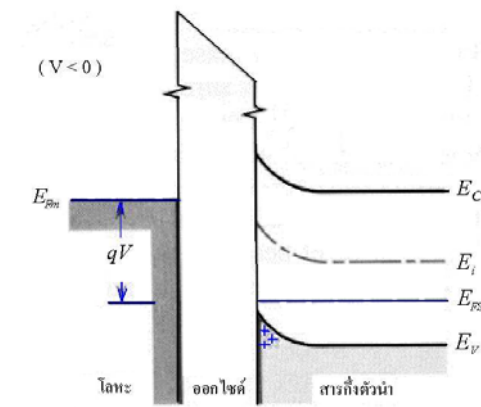
เนื่องจากฟังก์ชันงานของโลหะเท่ากับค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ เมื่อสร้างเป็นตัวเก็บประจุจะไม่มี การเคลื่อนที่ของประจุ ที่สถานะสมดุลของเนื้อสารความต่างศักย์เท่ากับศูนย์ และแถบพลังงานแบบราบ (flat band) แต่ถ้าให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วโลหะแก่ตัวเก็บประจุจะทำให้แถบพลังงานเกิดการโค้งงอ นั่นคือเมื่อ ให้แรงดันลบ ($V < 0$) ที่ขั้วโลหะจะทำให้พลังงานศักย์ของโลหะน้อยลง เกิดอิเล็กตรอนมากขึ้นบริเวณผิวโลหะ อิเล็กตรอนเหล่านี้ดึงดูดโฮลให้มาออกอยู่ที่ผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ จึงเรียกสภาวะนี้ว่า เกิดการสะสมกัน (accumulations) ของโฮล แถบพลังงานบริเวณผิวหน้าสารกึ่งตัวนำจะเกิดการโค้งงอตามความเข้มข้นของโฮลดังสมการ

$$p = n_i e^{(E_i - E_F) / kT} \quad (2.17)$$

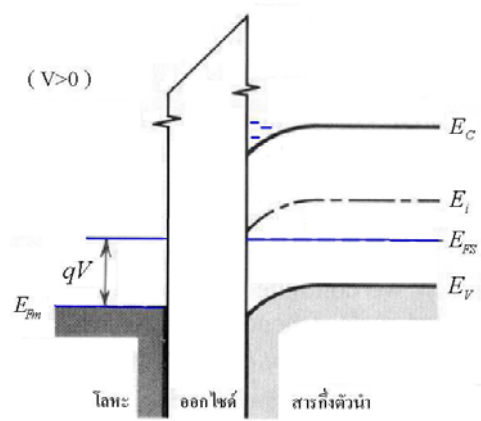
โดยที่ p คือความเข้มข้นของโฮล

n_i คือความเข้มข้นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์

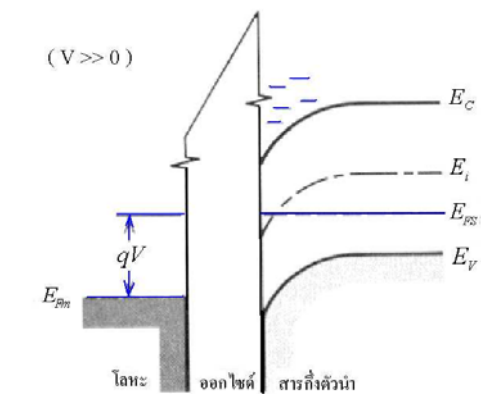
⁵ระดับเฟอร์มี เป็นระดับพลังงานเฉลี่ยของกลุ่มอิเล็กตรอนที่มีพลังงานมากที่สุดในวัตถุ (กรกฎ, 2540)



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพประกอบที่ 2.14 แสดงระดับพลังงานของตัวเก็บประจุออสคูมคติ เมื่อให้แรงดันไฟฟ้า

(ก) ลบ (ข) บวก (ค) ชีดเริ่ม (ที่มา :Streetman,1995: 302)

E_F ในสมการ (2.21) นี้เป็นระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำซึ่งยังคงแบนราบ เนื่องจากไม่มีกระแสไหลผ่านชั้นออกไซด์ จึงทำให้แถบพลังงาน E_i โค้งขึ้น และระดับเฟอร์มิของโลหะจะเพิ่มขึ้นจากเดิม ค่าที่เพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับค่าของแรงดันที่ใส่ ดังภาพประกอบที่ 2.22 (ก) เมื่อให้แรงดันบวก ($V > 0$) แก่ตัวเก็บประจุมอส ก็จะทำให้เกิดการผลักประจุบวกที่บริเวณผิวหน้าสารกึ่งตัวนำกลายเป็นชั้นปลอดพาหะ ที่มีประจุลบหนาแน่น จึงเรียกสภาวะนี้ว่าเกิด การปลอดพาหะ (depletion) ของประจุลบ และทำให้แถบพลังงาน E_i โค้งลง และทำให้ระดับเฟอร์มิของโลหะลดลงเท่ากับค่าของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้ ดังรูปที่ 2.22 (ข) และเมื่อให้ศักย์บวกเพิ่มขึ้น ($V \gg 0$) จนถึงค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่าแรงดันขีดเริ่มจะทำให้บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำมีความหนาแน่นของประจุลบมาก จึงเรียกสภาวะนี้ว่า เกิดการผกผัน (inversion) ของประจุ ดังภาพประกอบที่ 2.23 (ค)

เมื่อให้แรงดันไฟฟ้าแก่ตัวเก็บประจุมอส จะทำให้เกิดสภาวะต่าง ๆ ซึ่งเกิดประจุบนตัวเก็บประจุมอสแตกต่างกัน ในสภาวะการสะสม ซึ่งมีประจุบวกบริเวณผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ ดังภาพประกอบที่ 2.23 (ก) ในสภาวะนี้ตัวเก็บประจุทำหน้าที่เหมือนตัวเก็บประจุโดยทั่วไป ซึ่งมีค่าความจุเท่ากับค่าความจุของชั้นออกไซด์ ดังสมการ

$$C = C_{ox} = \frac{A\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \quad (2.18)$$

โดยที่ C_{ox} ความจุไฟฟ้าของชั้นออกไซด์
 A พื้นที่ของโลหะ
 ϵ_{ox} สภาพยอมรับได้ (permittivity) ของออกไซด์
 t_{ox} ความหนาของชั้นออกไซด์

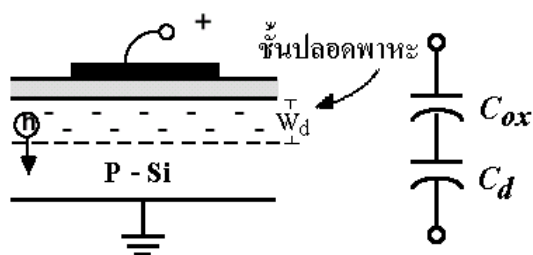
สภาวะการปลอดพาหะ ซึ่งทำให้เกิดชั้นปลอดพาหะขึ้นบริเวณผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุมอสเท่ากับค่าความจุของชั้นออกไซด์ต่ออนุกรมกับค่าความจุของชั้นปลอดพาหะดังภาพประกอบที่ 2.23 (ข) ค่าความจุหาได้จาก

$$C = \frac{C_{ox}C_d}{C_{ox} + C_d} \quad (2.19)$$

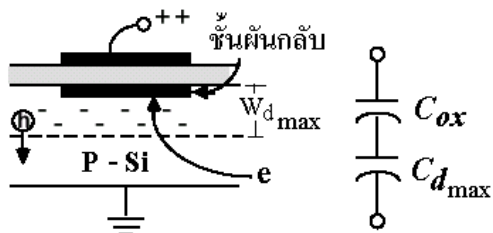
โดยที่ C_d เป็นความจุไฟฟ้าของชั้นปลอดพาหะ



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพประกอบที่ 2.15 แสดงลักษณะตัวเก็บประจุโมสใน (ก) สถานะการสะสม (ข) สถานะการ
 ปลอดพาหะ (ค) สถานะการผันกลับ (ที่มา:

<http://www.stanford.edu/class/ee216/handouts/7-MOS%20Capacitors.pdf>)

โดยที่

$$C_d = \frac{\epsilon_s A}{W_d} \quad (2.20)$$

ϵ_s คือ สภาพยอมรับได้ (permittivity) ของสารกึ่งตัวนำ

W_d คือ ความกว้างของชั้นปลอดพาหะซึ่งขึ้นอยู่กับศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้

C_d ในสถานะแถบราบหาได้จาก

$$C_d = \frac{\sqrt{2}\epsilon_s}{L_D} \quad (2.21)$$

ϵ_s สภาพยอมรับได้ (permittivity) ของสารกึ่งตัวนำ

$L_D = \sqrt{\frac{2kT\epsilon_s}{q^2 N_D}}$ เรียกว่า extrinsic Debye length ของโฮล

โดยที่ k คือ ค่าคงที่โบลต์แมน (Boltzmann' constant) เท่ากับ $1.380 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$

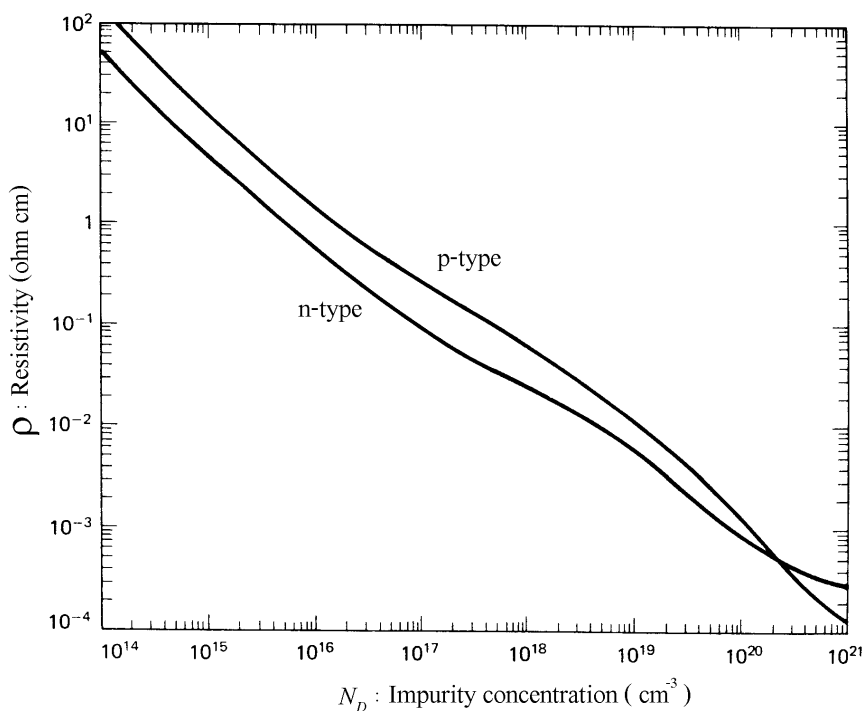
T คือ อุณหภูมิเป็น $^\circ\text{K}$ (300°K)

q คือ ประจุอิเล็กตรอน เท่ากับ $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$

N_D คือความเข้มข้นสารเจือปน (impurity concentration) ของสารกึ่งตัวนำ

ค่าความเข้มข้นสารเจือปนของสารกึ่งตัวนำมีความสัมพันธ์กับค่าสภาพต้านทาน (resistivity : ρ)

ดังภาพประกอบที่ 2.16



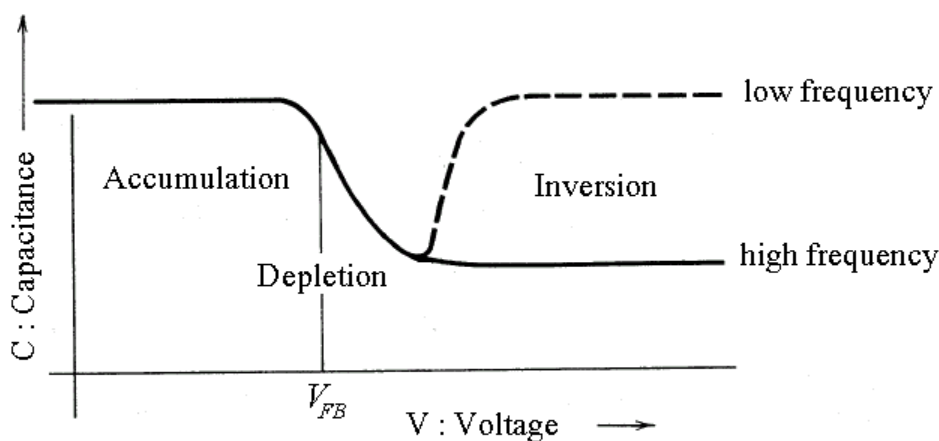
ภาพประกอบที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานของซิลิกอนชนิดเอ็นและชนิดพี

กับความเข้มข้นสารเจือ (ที่มา: Fortino, 1983: 11)

ในสภาวะการผันกลับ เขตปลอดพาหะจะมีความกว้างที่สุด ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้าจึงเท่ากับค่าความจุไฟฟ้าของชั้นออกไซด์ต่อเนื่องกับค่าความจุไฟฟ้าที่มีค่าน้อยที่สุดของชั้นปลอดพาหะ ดังภาพประกอบที่ 2.15 (ค) ค่าความจุไฟฟ้าในช่วงนี้จะขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณที่ป้อนให้คือ ที่ความถี่ต่ำ (< 50 Hz) อิเล็กตรอนในชั้นผันกลับสามารถตามสัญญาณกระแสสลับได้ทัน ดังนั้นความจุไฟฟ้าสัญญาณขนาดเล็กจะกลับมาเท่ากับค่าความจุไฟฟ้าในช่วงการสะสมในสมการที่ 2.18 และที่ความถี่สูง (>100 kHz) พาหะในชั้นผันกลับไม่สามารถเปลี่ยนปริมาณได้อย่างรวดเร็วตามความถี่และความกว้างของชั้นปลอดพาหะจะมีการสั่น (oscillation) ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าค้างอยู่ที่ค่าต่ำสุด

$$C = \frac{C_{ox} C_{d_{max}}}{C_{ox} + C_{d_{max}}} \quad (2.22)$$

จึงได้กราฟความจุไฟฟ้า-แรงดัน ของตัวเก็บประจุมอสอุดมคติ ชนิดพี ดังภาพประกอบที่ 2.17



ภาพประกอบที่ 2.17 แสดงกราฟความจุไฟฟ้า-แรงดัน ของตัวเก็บประจุมอสในอุดมคติ (ที่มา :

<http://www.stanford.edu/class/ee216/handouts/7-MOS%20Capacitors.pdf>)

3.2 ตัวเก็บประจุที่สร้างขึ้นจริง (real MOS capacitors)

ที่กล่าวผ่านมาแล้วข้างต้นเป็นตัวเก็บประจุมอดูลคคติ ซึ่งจะให้กราฟความจุไฟฟ้า-แรงดัน ดังภาพประกอบที่ 2.17 แต่สำหรับตัวเก็บประจุมอดูลจริง ๆ ที่สร้างขึ้น เช่น สร้างจากโลหะ อะลูมิเนียมและสารกึ่งตัวนำซิลิกอน นั้นค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันจะแตกต่างไปจากค่าในอุดมคติ เนื่องจากประการแรก คือ ฟังก์ชันงานของอะลูมิเนียมไม่เท่ากับฟังก์ชันงานของซิลิกอน และประการที่ 2 คือ การมีประจุภายในชั้นออกไซด์และระหว่างผิวของชั้นออกไซด์กับชั้นซิลิกอนซึ่งเรียกรวมกันว่าประจุไฟฟ้าที่รอยต่อผิว (interface charge)

3.2.1 ค่าฟังก์ชันงานของโลหะไม่เท่ากับค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ($\Phi_M \neq \Phi_S$)

ความแตกต่างของฟังก์ชันงาน (Φ_{MS}) หาได้จาก

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - \Phi_s \quad (2.23)$$

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - \left(\chi_s - \frac{E_g}{2q} - \Phi_B \right) \quad (2.24)$$

โดยที่ χ_s คือ อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (electron affinity) ของสารกึ่งตัวนำ มีค่า 4.15 eV สำหรับซิลิกอน

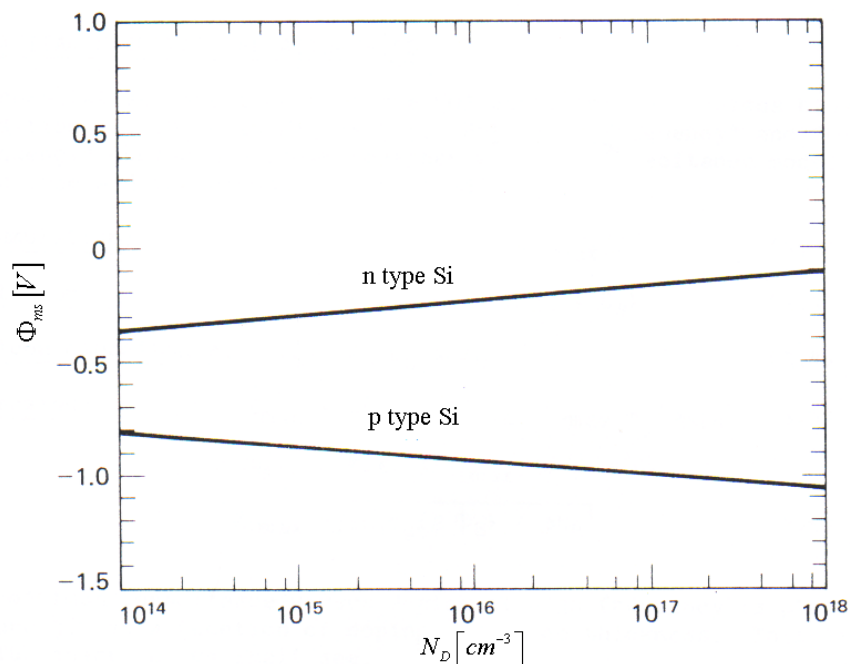
E_g คือ ช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำมีค่า -1.1 eV สำหรับซิลิกอน

Φ_B คือ ความต่างศักย์ระหว่างระดับเฟอร์มีของสารกึ่งตัวนำและสารบริสุทธิ์มีค่า

$$\Phi_B = \pm \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_D}{n_i} \right) \quad (2.25)$$

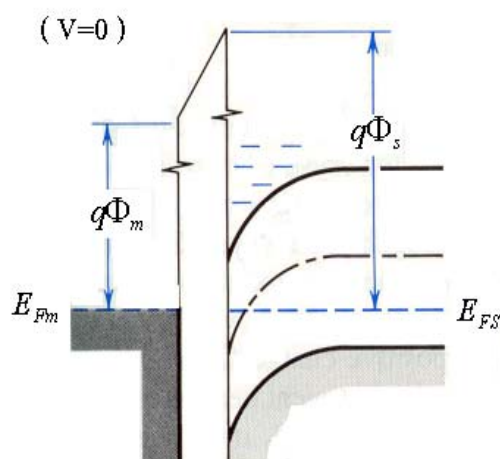
สำหรับซิลิกอน (+ สำหรับชนิดเอ็น - สำหรับชนิดพี) และ n_i คือ ความเข้มข้นพาหะของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ มีค่าประมาณ 10^{10} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ 300 °K สำหรับซิลิกอน

ความแตกต่างของฟังก์ชันงานของอะลูมิเนียมกับซิลิกอนมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นสารเจือปนของซิลิกอนชนิดเอ็นและชนิดพี ดังภาพประกอบที่ 2.18



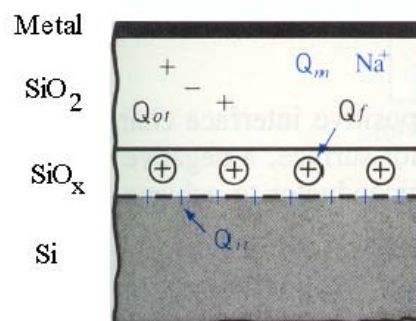
ภาพประกอบที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างฟังก์ชันงานของอะลูมิเนียมและซิลิกอนกับความเข้มข้นสารเจือปนของซิลิกอนชนิดเอ็นและชนิดพี (ที่มา: Fortino, 1983: 26)

เช่น ในกรณีที่ค่าฟังก์ชันงานของโลหะน้อยกว่าค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ($\Phi_M < \Phi_S$) เมื่อนำเนื้อสารมาประกบกัน ระดับเฟอร์มีของสารต่าง ๆ จะจัดเรียงตัวเองเพื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล จึงทำให้เกิดการโค้งงอของแถบพลังงานดังภาพประกอบที่ 2.19



ภาพประกอบที่ 2.19 ระดับพลังงานของตัวเก็บประจุที่มี การโค้งงอเนื่องจากความแตกต่างของฟังก์ชันงาน (ที่มา: Streetman, 1995: 311)

3.2.2 การมีประจุที่รอยต่อผิว ประจุเหล่านี้ประกอบไปด้วยประจุในชั้นออกไซด์และประจุระหว่างชั้นออกไซด์และชั้นสารกึ่งตัวนำ ประจุในชั้นออกไซด์มักจะเกิดจากการปนเปื้อนของโลหะในขั้นตอนการเตรียม ทำให้เกิดไอออนของประจุที่เคลื่อนที่ได้ (mobile ionic charge: Q_m) ส่วนใหญ่จะเกิดไอออนของโซเดียม (Na^+) ที่มีสาเหตุมาจากการทำความสะอาดไม่ดีพอ หรือการใช้เตาที่ผลิตจากวัสดุที่ประกอบด้วยโซเดียม ไอออนของโซเดียมเหล่านี้จะมีความคล่องตัวสูงในชั้นออกไซด์ ประจุในชั้นออกไซด์อาจเกิดจากความบกพร่องของผลึกทำให้เกิดประจุที่ทำหน้าที่จับอิเล็กตรอนหรือโฮลในชั้นออกไซด์ (trap charge: Q_{ot}) หรือบางทีอาจเกิดจากการออกซิเดชันที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้เกิดประจุที่ไม่เคลื่อนที่ในชั้นออกไซด์ (fixed charge: Q_f) ส่วนประจุระหว่างชั้นออกไซด์และชั้นสารกึ่งตัวนำ เกิดจากการตัดขาดของผลึกระหว่างชั้นออกไซด์กับชั้นสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดประจุที่ทำหน้าที่จับประจุที่รอยต่อ (interface trap: Q_{it}) ภาพประกอบที่ 2.20 แสดงประจุในชั้นออกไซด์และระหว่างผิว ประจุที่เกิดขึ้นในชั้นออกไซด์และระหว่างผิวส่วนใหญ่จะเป็นประจุบวกซึ่งประจุบวกเหล่านี้จะเหนี่ยวนำหรือดึงดูดประจุลบบริเวณผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ ทำให้บริเวณผิวหน้าสารกึ่งตัวนำมีประจุลบหนาแน่น ทำให้แถบพลังงานมีการโค้งงอเช่นเดียวกับในกรณีของการมีค่าฟังก์ชันงานที่ต่างกัน การโค้งงอของแถบพลังงานจะมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับปริมาณประจุที่เกิดขึ้นนี้

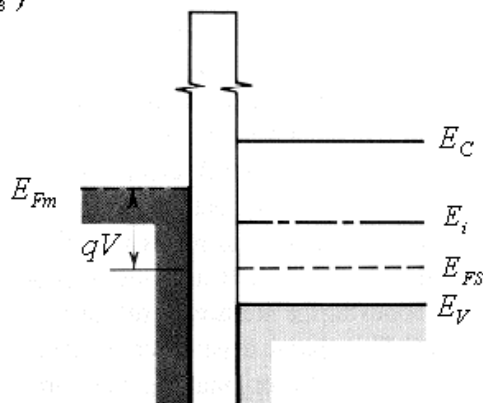


ภาพประกอบที่ 2.20 แสดงประจุในชั้นออกไซด์และระหว่างผิวของชั้นออกไซด์กับชั้นซิลิกอนใน ตัวเก็บประจุมอสจริง ๆ (ที่มา: Streetman, 1995: 311)

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าเท่ากับค่าของความแตกต่างของฟังก์ชันงานบวกกับค่าลบของศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากประจุที่รอยต่อผิว ซึ่งมีค่าประจุมรวมเป็น Q_{ox} จะทำให้แถบพลังงานของตัวเก็บประจุมอสแบบราบ เรียกสภาวะนี้ว่า สภาวะแถบราบ (flat band) ดังภาพประกอบที่ 2.21 และเรียกแรงดันไฟฟ้าที่ให้นี้ว่าแรงดันแถบราบ (flat band voltage : V_{FB}) นั่นคือ

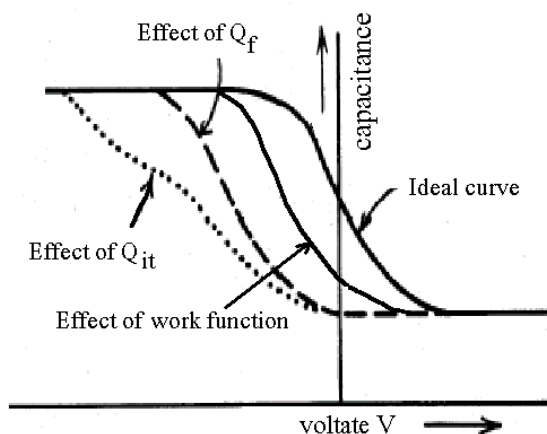
$$V = V_{FB} = \Phi_{ms} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} \quad (2.26)$$

$$(V = V_{FB})$$



ภาพประกอบที่ 2.21 แสดงสถานะแถบราบของตัวเก็บประจุโมสในความเป็นจริง

จะเห็นว่าสถานะแถบราบของตัวเก็บประจุโมสจริง ๆ ต่างจากสถานะแถบราบของตัวเก็บประจุโมสในอุดมคติซึ่งมีค่า $V_{FB} = 0$ เนื่องจากความแตกต่างที่กล่าวมานี้ จึงทำให้กราฟความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวเก็บประจุโมสจริง แตกต่างจากกราฟของตัวเก็บประจุโมสในอุดมคติ คือ กราฟของตัวเก็บประจุโมสที่สร้างขึ้นจริงจะเลื่อนจากกราฟในอุดมคติไปทางแรงดันค่าลบ ดังภาพประกอบที่ 2.22 การเลื่อนไปของค่าความจุไฟฟ้าขึ้นอยู่กับค่าความแตกต่างของค่าฟังก์ชันงาน และความหนาแน่นของประจุที่รอยต่อผิว



ภาพประกอบที่ 2.22 แสดงผลของความแตกต่างของฟังก์ชันงานและการมีประจุที่รอยต่อผิว ต่อกราฟความจุไฟฟ้า-แรงดัน (ที่มา :

<http://www.stanford.edu/class/ee216/handouts/7-MOS%20Capacitors.pdf>)