หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

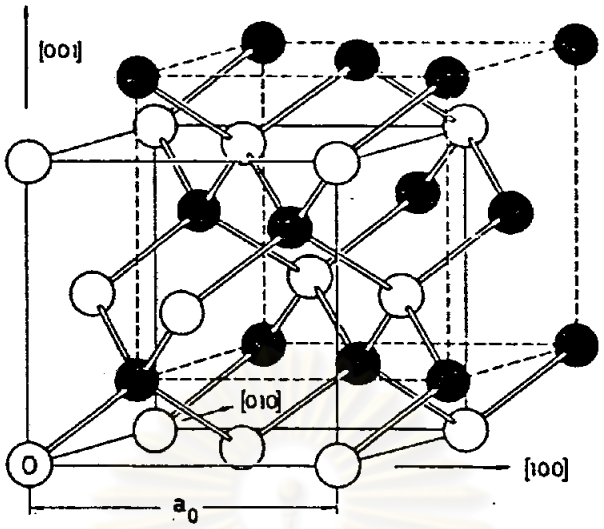
บทที่ 2

แกลเลียมอาร์เซไนด์

ปัจจุบันทั่วโลกได้ทำการค้นคว้าวิจัยสารกึ่งตัวนำที่มีสมบัติเฉพาะตัวต่าง ๆ กันได้นับเป็นจำนวนมาก ทั้งที่เป็นธาตุ สารประกอบและอัลลอยด์ใหม่ ๆ หว่าสารกึ่งตัวนำซึ่งมีการประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลายจริง ๆ นั้นก็ยังคงเป็นเยอรมันเนียม (Ge) หรือซิลิคอน หรือแกลเลียมอาร์-เซไนด์ หลังจากซิลิคอนเข้ามามีบทบาทแทนที่เยอรมันเนียมไปแล้ว เมื่อพิจารณาถึงความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและความเหมาะสมในการใช้งาน แกลเลียมอาร์เซไนด์ก็กำลังมีบทบาททำนองเดียวกันแม้จะเป็นได้เพียงแค่บางส่วน

แกลเลียมอาร์เซไนด์เป็นสมาชิกตัวหนึ่งในตระกูลสารประกอบ III-V ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ Zinc blende ดังรูปที่ 1 ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างของเพชรเพียงแต่มีอะตอมสองชนิดอยู่ร่วมกัน แต่ละอะตอมของแกลเลียมจะถูกล้อมรอบไปด้วยอาร์เซนิค 4 อะตอมและแต่ละอะตอมของอาร์เซนิคก็ถูกล้อมรอบไปด้วยแกลเลียม 4 อะตอมอยู่ตรงมุมของรูปเหลี่ยม tetra hedral อะตอมของแกลเลียมทั้งหมดเรียงรายประจำตำแหน่ง lattice points ของโครงสร้างแบบ face-centred cubic ชุดหนึ่ง และเหล่าอะตอมของอาร์เซนิคก็ครอบครองโครงสร้างแบบเดียวกันนั้นอีกชุดหนึ่ง ทรงลูกบาศก์ทั้งสองชุดเยื้องกันอยู่ตามแนวเส้นทแยงมุมของลูกบาศก์ (body diagonal) หรือทิศ <111> เป็นระยะ $\frac{1}{4}$ ของความยาวเส้นตรงดังกล่าว

ระยะระหว่างอะตอมใน lattice ถูกกำหนดโดยพันธะ (bonds) ระหว่างอะตอมในกรณีของเพชรนั้นพันธะเป็นแบบ covalent โดยแท้ ซึ่งแต่ละพันธะมีอิเลคตรอนประจำอยู่ 2 ตัว ความหนาแน่นของอิเลคตรอนมีความสมมาตรระหว่างอะตอมทั้งสอง แต่เนื่องจากความจริงที่ว่าระยะระหว่างอะตอมมีค่าเท่ากับผลบวกของรัศมี tetrahedral ของอะตอมแกลเลียมและอะตอมอาร์เซนิคในกรณีของแกลเลียมอาร์เซไนด์(8) ดังนั้นพันธะแบบเป็นกลาง (neutral bonding) ซึ่งอิเลคตรอนใช้เวลาส่วนใหญ่อยู่ใกล้อาร์เซนิคดูจะเป็นแบบจำลองที่อธิบายได้ดี อย่างไรก็ดีการคำนวณทางทฤษฎีแถบพลังงาน (9) แสดงให้เห็นว่าพันธะจะต้องมีลักษณะโน้มเอียงไปทางพันธะ ionic อยู่บ้าง ซึ่งการที่สามารถทำให้ผลึกปริแยกได้ง่ายมาก (cleavage)

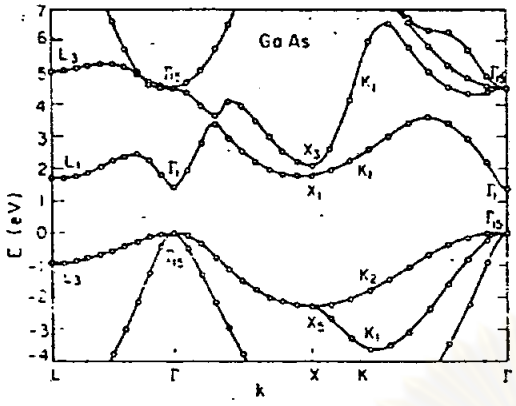


รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกแบบ Zinc blende วงกลมสีดำแทนตำแหน่งอะตอมของธาตุกลุ่ม III (ได้แก่ Ga) วงกลมสีขาวแทนตำแหน่งอะตอมของธาตุกลุ่ม V (ได้แก่ As)

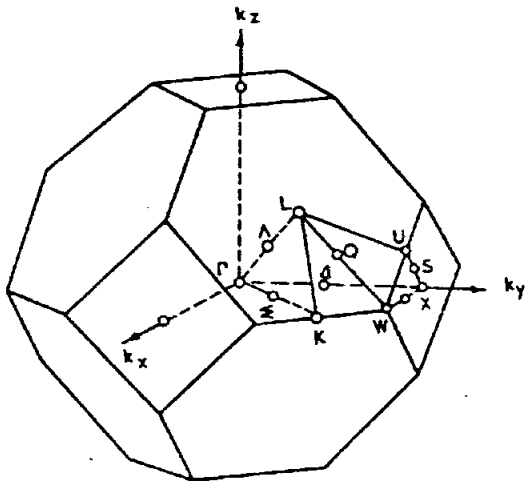
ตามระนาบ {110} เมื่อเทียบกับตามระนาบ {111} ก็ถือเป็นข้อสนับสนุนได้อีกประการหนึ่ง

ความรู้เกี่ยวกับโครงสร้างแถบพลังงานนับว่าเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งต่อการทำความเข้าใจสมบัติทางแสงและไฟฟ้าของผลึกแกลเลียมอาร์เซไนด์ โครงสร้างนี้สามารถคำนวณหาทางทฤษฎีได้จากหลายวิธีด้วยกัน ซึ่งที่ประสบความสำเร็จมากที่สุด 2 วิธี ก็คือใช้แบบจำลองศักย์เทียม (pseudo-potential model) ของ Cohen (10,11) และวิธีของ Van Vechten(9) โครงสร้างแถบพลังงานของแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองของ Cohen ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2 จุดวิกฤต (critical points) ต่าง ๆ ซึ่งแสดงในรูปที่ 2 ระบุตำแหน่งตัดกันระหว่าง Wave vector ที่สำคัญกับ Brillouin zone แรกของ Zinc blende lattice ใน 3 มิติ ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3 จุดวิกฤต Γ, X, L และ K มีความหมายสำคัญ เพราะการเกิดทรานซิชัน (transition) ของอิเลคตรอนจะเริ่มต้นหรือไปสิ้นสุดที่จุดเหล่านี้

จากแผนภูมิแถบพลังงานทำให้ทราบถึงสมบัติที่เป็นประโยชน์ของแกลเลียมอาร์เซไนด์คือ



รูปที่ 2.2 โครงสร้างแถบพลังงานของแกลเลียมอาร์เซไนด์คำนวณโดยวิธีศักย์เทียมของ Cohen (10)



รูปที่ 2.3 Brillouin zone แรก และจุดวิกฤตสำหรับ lattice ของโครงสร้าง Zinc blende

1. เป็นสารที่มีช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง (direct gap) ค่าต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า (conduction band) กับค่าสูงสุดของแถบวาเลนซ์ (valence band) เกิดขึ้นที่จุด Γ ซึ่ง K = 0 ความกว้างนั้นมีค่าถึง 1.58 อิเลคตรอนโวลต์ ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน

2. มวลยังผล (effective mass) ของอิเลคตรอนในแถบนำไฟฟ้ามีค่าต่ำ ทำให้คาดได้ว่าสภาพคล่องตัว (mobility) ของอิเลคตรอนจะมีค่าได้สูงมาก

3. การทรานซิชันของอิเลคตรอนภายในแถบนำไฟฟ้าเอง (intraband transition) สามารถเกิดระหว่างจุด Γ_1 ไปยัง X_1 และมีผลทำให้มวลยังผลของอิเลคตรอนสูงขึ้นอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถสังเกตได้

การที่มีช่องว่างแถบพลังงานแบบตรงนี้เองที่นอกจากจะทำให้ช่วงชีวิต (lifetime) ของพาหะมีค่าต่ำมาก ทำให้ทนต่อกัมมันตภาพรังสีพวกที่เป็นอิเลคตรอนหรือโปรตอนได้ดีแล้ว (12) เรายังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานแสงอย่างมีประสิทธิภาพในการทำไดโอดเปล่งแสง (Light emitting diode) ตลอดจนเลเซอร์ไดโอด (laser diodes) ความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ที่ได้นั้นอยู่ในย่านของแสงอินฟราเรด (infrared) ซึ่งใกล้เคียงกับค่าความยาวคลื่นซึ่งจะมีการสูญเสียพลังงานน้อยที่สุดในการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง

(fiber optics) ความกว้างของแถบพลังงานที่สอดคล้องกับสเปคตรัมของแสงอาทิตย์ได้ดีกว่า ทำให้สามารถนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ไปใช้ทำเซลแสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้ซิลิคอนได้ และนอกจากนี้ความกว้างที่มากกว่ายังมีผลทำให้สิ่งประดิษฐ์ต่าง ๆ สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าสิ่งประดิษฐ์ที่ทำจากซิลิคอนด้วย การเปล่งอิเลคตรอนโดยการกระตุ้นด้วยแสงซึ่งเป็นกลไกสำคัญใน photomultiplier ก็เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากในช่วงความถี่จากย่านใกล้อินฟราเรด (near infrared) ครอบคลุมไปถึงช่วงแสงที่มองเห็น (visible) โดยอาศัยสิ่งประดิษฐ์ negative electron affinity ซึ่งทำด้วยแกลเลียมอาร์เซไนด์ (13)

ที่อุณหภูมิห้องอิเลคตรอนในแกลเลียมอาร์เซไนด์มีสภาพคล่องตัว (μ = 8000 $cm^2 V^{-1}S^{-1}$) และความเร็วจำกัด (V_s = 2×10^7 cm S^{-1}) สูงกว่าในซิลิคอน (μ = 1600 $cm^2V^{-1}S^{-1}$; V_s = 9×10^6 cm S^{-1})และในเยอรมันเนียม (μ = 3900 $cm^2 V^{-1} S^{-1}$; V_s = 6×10^6 cm S^{-1})จึงเหมาะที่จะใช้ทำสิ่งประดิษฐ์ความไวสูงทำงานที่ความถี่ไมโครเวฟได้อย่างมีประสิทธิภาพ (14) อันได้แก่ microwave FET และ avalanche oscillators เป็นต้น สำหรับสมบัติประการที่ 3 นั้น เมื่อใช้สนามไฟฟ้าเป็นตัวทำให้อิเลคตรอนเกิดการทรานซิชันในลักษณะดังกล่าวจะเกิดผลของกันน์ (Gunn effect) ทำให้สภาพความต้านทานติดลบ (negative resistivity) ซึ่งประโยชน์หนึ่ง คือใช้ทำสิ่งประดิษฐ์พิเศษซึ่งเรียกว่า Gunn oscillator สามารถให้คลื่นความถี่ 1 GHz ถึง 90 GHz ซึ่งนับว่าสูงมาก

สำหรับในทางเทคโนโลยี พัฒนาการที่สำคัญและเหนือชั้นกว่ากรณีของซิลิคอน ก็ได้แก่ การที่สามารถทำแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่อยู่ในรูปสารกึ่งฉนวน (semi-insulating substrate) ซึ่งมีสภาพความต้านทานมากกว่า 10^{16} โอห์มเซนติเมตร และนอกเหนือไปจากการปรับความเข้มข้นและชนิดของสารเจือปนซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของการสร้างสิ่งประดิษฐ์ต่าง ๆ ตามปกติแล้ว การผสมผสานกันได้อย่างกลมกลืนกับสารอื่นส่วนใหญ่ในตระกูล III-V ด้วยกัน เป็นรูปของอัลลอยด์ก็ทำให้สามารถปรับแต่งช่องว่างแถบพลังงานหรือดัชนีหักเหได้ตามบริเวณหรือชั้นต่าง ๆ ในโครงสร้างสิ่งประดิษฐ์ชิ้นเดียวกันอีกด้วย

การจะพิจารณาใช้แกลเลียมอาร์เซไนด์สร้างสิ่งประดิษฐ์ใดก็คงจำต้องคำนึงถึงความคุ้มค่าเป็นหลักด้วยเพราะมันมีราคาแพง ประมาณได้ว่าอย่างเกรดถูกที่สุดก็ยังแพงกว่าซิลิคอนถึง 20 เท่า