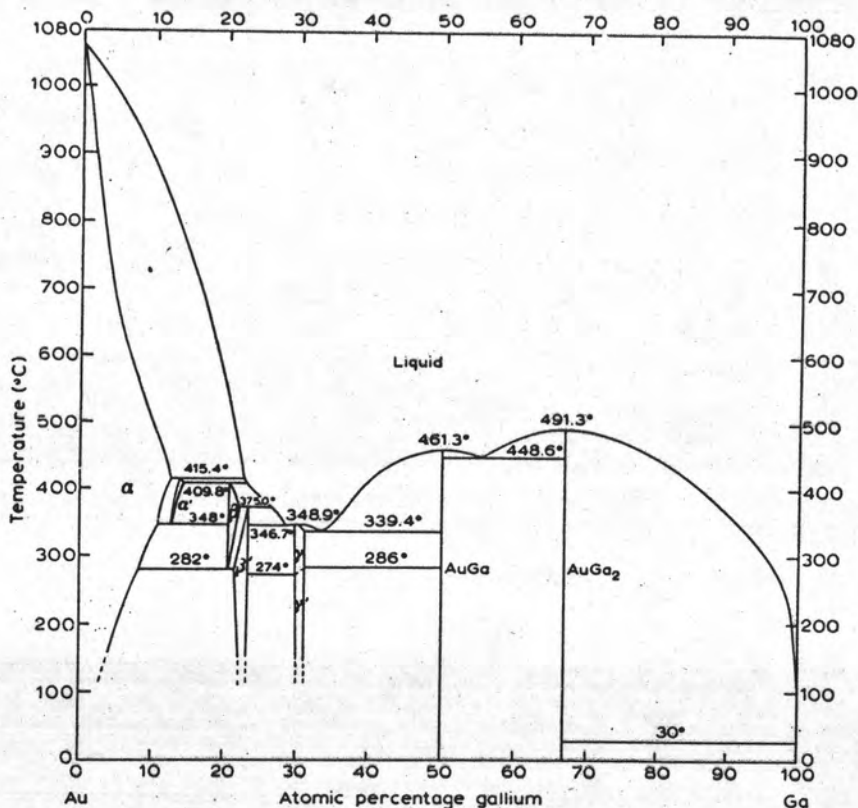


บทที่ 7

การอภิปรายผลการทดลอง

โลหะที่ใช้ในการทดลองนี้คือโลหะผสมทอง-เจอร์เมเนียม (Au-Ge) / นิกเกิล (Ni) สำหรับแกลเลียมอาร์เซไนด์ชนิดเอ็น โดยทองเป็นโลหะหลักและเจอร์เมเนียมเป็นสารเจือปน โดยนิกเกิลเป็นโลหะกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาในขณะที่ทำการแอนนัล และโลหะผสมทอง-สังกะสี (Au-Zn) สำหรับแกลเลียมอาร์เซไนด์ชนิดพี โดยทองเป็นโลหะหลักและสังกะสีเป็นสารเจือปน เราสามารถอธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นในการทดลองได้ดังนี้

ทองสามารถทำปฏิกิริยากับแกลเลียมในอุณหภูมิที่เหมาะสม โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะมีการดึงเอาแกลเลียมจากผิวของแกลเลียมอาร์เซไนด์ ซึ่งอุณหภูมิจะเป็นตัวการกำหนดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างทองและแกลเลียม โดยผลของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงในรูปของสารประกอบซึ่งเกิดจากการเรียงตัวใหม่เป็นผลึก (Recrystallization) ของสารประกอบของทองและแกลเลียมขึ้นบนผิวผลึกของแกลเลียมอาร์เซไนด์ ซึ่งอุณหภูมิของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างทองและแกลเลียมสามารถเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่า 250 องศาเซลเซียส โดยปกติทองและแกลเลียมจะทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างที่แตกต่างกันไปในแต่ละอุณหภูมิ ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของแกลเลียมและทองที่ทำปฏิกิริยากันเป็นสารประกอบ เช่น ที่อุณหภูมิ 350-400 องศาเซลเซียส โครงสร้างที่เกิดขึ้นจะมี Domain crystallization ในรูปของ $\beta(\text{Au}_7\text{Ga}_2)$ และที่อุณหภูมิ 400-450 องศาเซลเซียส โครงสร้างที่เกิดขึ้นจะมี Domain crystallization อยู่ในรูปของ $\alpha(\text{Au-Ga})$ ^{(15) (16) (17)} และสาเหตุสำคัญที่เลือกทองเป็นโลหะที่ใช้ในการสร้างผิวสัมผัสโอห์มมิกของแกลเลียมอาร์เซไนด์ เนื่องจากผลึกสารประกอบของทองและแกลเลียมมีค่า Lattice constant เป็น 0.997 เท่าของทอง ดังนั้น Mismatch ที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสมีค่าต่ำ เป็นเหตุผลให้ผิวสัมผัสของแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่ทำจากทอง จึงสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีกว่าโลหะชนิดอื่น ซึ่งจะไม่ขอกล่าวถึงรายละเอียดทางโลหะวิทยาของทองและแกลเลียมอาร์เซไนด์ในที่นี้



รูปที่ 7.1 เฟสไดอะแกรม (Phase diagram) ของทองและแกเลียม

แต่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขณะแอนนิลจะทำให้ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของผิวสัมผัสที่ได้ว่าดีหรือไม่ หากพิจารณาถึงกลไกที่ทำให้เกิดสมบัติของผิวสัมผัสโอห์มมิกอันได้แก่ Field Emission ซึ่งสิ่งเจือปนในโลหะผสม จะทำให้เกิดกลไกนี้ได้จากเงื่อนไข 2 ข้อได้แก่

1. การทำระดับความเข้มข้นของพาหะในสารกึ่งตัวนำมีค่าสูงที่บริเวณผิวสัมผัส เพื่อให้แบร์เรียร์ที่เกิดขึ้นแคบลงจนพาหะในสารกึ่งตัวนำสามารถเคลื่อนที่ทะลุได้ ซึ่งสารเจือปนในทองจะทำหน้าที่เป็นสารเจือปนที่ทำให้ระดับความเข้มข้นของพาหะในสารกึ่งตัวนำมีค่าสูงขึ้นเป็นชั้นบางๆที่ผิวสัมผัส เกิดจากการแพร่ซึมเข้าสู่บริเวณผิวของแกเลียมอาร์เซไนด์ โดยเข้าไปแทนที่ตำแหน่งที่ว่างของแกเลียมที่ขาดหายไปในขณะที่แอนนิล เนื่องจากการแพร่ซึมของแกเลียมเข้าสู่ชั้นของโลหะ ซึ่งปฏิกิริยานี้ขึ้นทำให้ตำแหน่งว่างของแกเลียมที่บริเวณผิวสัมผัส

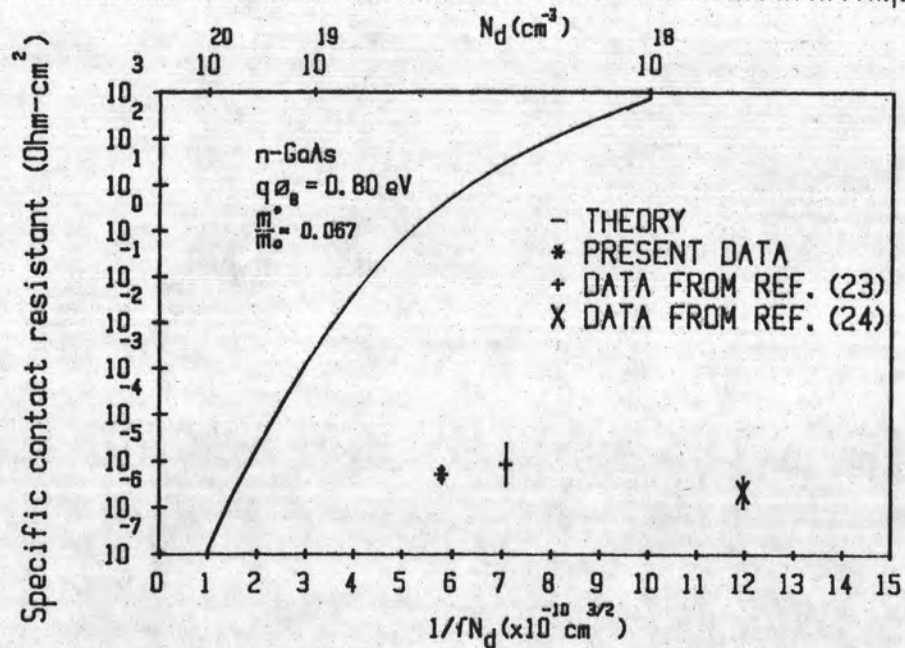
2. การทำให้ความสูงของแบร์เรียร์ที่เกิดขึ้นในผิวสัมผัสมีค่าน้อยสุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยธรรมชาติของแกลเลียมอาร์เซไนด์กับโลหะเกือบทุกชนิดให้ค่าความสูงของแบร์เรียร์ที่เกิดขึ้นในผิวสัมผัสมีค่าค่อนข้างคงที่ เนื่องจากมี Interface State เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสอันเป็นสาเหตุสำคัญ ซึ่งเกิดได้จากสาเหตุหลายประการ เช่น การเกิดตำแหน่งว่างที่ผิวเนื่องจากอะตอมของอาร์เซนิคขาดหายไป (Arsenic site vacancy)⁽¹⁸⁾ และชั้นของแกลเลียมออกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ผิวของแกลเลียมอาร์เซไนด์⁽¹⁹⁾ ซึ่งแกลเลียมออกไซด์มีสมบัติเป็นฉนวนกั้นระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำป้องกันการเคลื่อนที่ผ่านผิวสัมผัสของพาหะข้างมากในสารกึ่งตัวนำ สำหรับการทดลองนี้ได้มีการเตรียมผิวก่อนการฉาบโลหะ เพื่อลดตำแหน่งว่างที่ผิวเนื่องจากอะตอมของอาร์เซนิคขาดหายไป และกำจัดชั้นแกลเลียมออกไซด์ที่ผิวสัมผัสของแกลเลียมอาร์เซไนด์ ซึ่งเป็นการลดจำนวนของ Interface State ข้อสำคัญอีกประการหนึ่งคือการเลือกชนิดของโลหะที่มีส่วนผสมของโลหะที่เป็นสารเจือปนที่ใช้ในการสร้างผิวสัมผัส โลหะ-สารกึ่งตัวนำที่เหมาะสมสำหรับแกลเลียมอาร์เซไนด์ และอุณหภูมิแอนนัลที่เหมาะสม เพื่อให้ความสูงของแบร์เรียร์ของผิวสัมผัสมีค่าต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ จากการทดลองของ Robison⁽²⁰⁾ พบว่าโครงสร้างของ Ni/Au-Ge/n-GaAs อิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนัลมีผลต่อค่าแบร์เรียร์ ซึ่งอุณหภูมิของการแอนนัลที่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างของ Ni/Au-Ge/n-GaAs อยู่ในช่วง 400-500 องศาเซลเซียส

ในกรณีของแกลเลียมอาร์เซไนด์ชนิดเอ็นและโลหะทอง-เจอร์เมเนียม/นิกเกิล โดยปกติโลหะทอง-เจอร์เมเนียมจะหลอมละลายที่อุณหภูมิตั้งแต่ 360 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิ eutectic) ขึ้นไป แต่การทำละลายผิวของแกลเลียมอาร์เซไนด์นั้นไม่ตึง ดังนั้นนิกเกิลจะเป็นโลหะกระตุ้นให้เกิดการละลายแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่ผิว จึงทำให้ทองและแกลเลียมสามารถทำให้ปฏิกิริยากันได้ดีขึ้นในขณะแอนนัล พร้อมกับเป็นตัวการที่ทำให้ความสูงของแบร์เรียร์ที่เกิดขึ้นในผิวสัมผัสมีค่าลดลงหลังจากแอนนัล เนื่องจากนิกเกิลจะทำปฏิกิริยากับเจอร์เมเนียมและอาร์เซนิค และนิกเกิลจะเป็นตัวจับอาร์เซนิคในขณะแอนนัล ทำให้ Dislocation ที่เกิดขึ้นขณะแอนนัลมีน้อยกว่าโครงสร้างแบบเดียวกันแต่ไม่มีนิกเกิล⁽²⁰⁾⁽²¹⁾ หน้าที่สำคัญอีกข้อหนึ่งของนิกเกิลคือเป็นตัวการที่ทำให้อุณหภูมิของการแอนนัลมีค่าสูงกว่าค่าอุณหภูมิ eutectic ของทองและแกลเลียม (อุณหภูมิ Eutectic = 363 องศาเซลเซียส)

7.1 ผิวสัมผัสของแกเลียมอาร์เซไนด์ชนิดเอ็นและโลหะทอง-เจอร์เมเนียม/นิกเกิล
[โครงสร้าง Ni/Au-Ge/n-GaAs]

จากรูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานจำเพาะผิวสัมผัสกับอุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนัล แสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานจำเพาะผิวสัมผัสมีค่าต่ำสุดเมื่อใช้อุณหภูมิในช่วง 470-490 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการทดลองของ Robinson⁽²⁰⁾ และของ Rai และคณะ⁽²²⁾

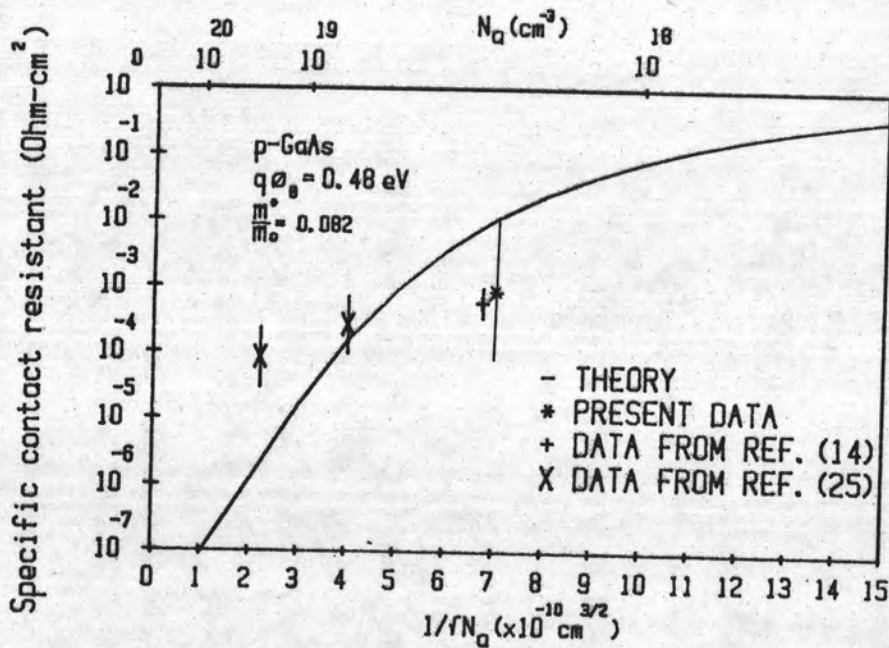
เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานจำเพาะผิวสัมผัสของตัวอย่างที่ได้และค่าความเข้มข้นพาหะของแกเลียมอาร์เซไนด์ที่ใช้ในการทดลองกับค่าทางทฤษฎี จากรูปที่ 7.1 พบว่าค่าความต้านทานจำเพาะผิวสัมผัสของตัวอย่างที่ได้มีค่าต่ำกว่าค่าทางทฤษฎี ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาของนิกเกิล-เจอร์เมเนียม-อาร์เซนิค ทำให้ความสูงของแบร์เรียร์ที่ผิวสัมผัสหลังการแอนนัลมีค่าลดลง⁽²⁰⁾ (ค่าแบร์เรียร์ของทองกับแกเลียมอาร์เซไนด์ชนิดเอ็น 0.8 eV) และการแพร่ซึมของเจอร์เมเนียมขณะแอนนัล ทำให้ความเข้มข้นพาหะที่ผิวของแกเลียมอาร์เซไนด์มีค่าสูงขึ้น จึงเป็นเหตุทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะผิวสัมผัสของตัวอย่างที่ได้มีค่าต่ำกว่าค่าทางทฤษฎี



รูปที่ 7.2 การเปรียบเทียบค่าความต้านทานจำเพาะผิวสัมผัสที่ได้จากการทดลองและค่าทางทฤษฎีของแกเลียมอาร์เซไนด์ชนิดเอ็น

7.2 ผิวสัมผัสของแกลเลียมอาร์เซไนด์ชนิดพีและโลหะทอง-สังกะสี
[โครงสร้าง Au-Zn/p-GaAs]

จากผลการทดลอง เมื่อนำค่าความต้านทานจำเพาะผิวสัมผัสของตัวอย่างที่ได้และค่าความเข้มข้นพาหะของแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่ใช้มาเขียนลงในกราฟ เพื่อเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎี จากรูปที่ 7.2. พบว่าค่าความต้านทานจำเพาะผิวสัมผัสของตัวอย่างที่ได้มีค่าต่ำกว่าค่าทางทฤษฎี สาเหตุเนื่องจากการแพร่ซึมของสังกะสีเข้าสู่แกลเลียมอาร์เซไนด์ในขณะแอนนัล ทำให้ความเข้มข้นของพาหะที่ผิวสัมผัสมีค่ามากกว่าความเข้มข้นของพาหะในแวนผลึกแกลเลียมอาร์เซไนด์ จึงทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะผิวสัมผัสของตัวอย่างที่ได้มีค่าต่ำกว่าค่าทางทฤษฎี⁽²⁵⁾ จากเส้นกราฟความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานจำเพาะผิวสัมผัสและความเข้มข้นพาหะของแกลเลียมอาร์เซไนด์จากเส้นกราฟที่ได้จากทฤษฎี พบว่าความเข้มข้นพาหะของแกลเลียมอาร์เซไนด์มีค่าประมาณ 4×10^{18} ต่อลบ.ซม. ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า Solid Solubility ของสังกะสีในแกลเลียมอาร์เซไนด์ แสดงให้เห็นว่ามีการแพร่ซึมของสังกะสีเกิดขึ้นขณะแอนนัล



รูปที่ 7.3 การเปรียบเทียบค่าความต้านทานจำเพาะผิวสัมผัสที่ได้จากการทดลองและค่าทางทฤษฎีของแกลเลียมอาร์เซไนด์ชนิดพี

อีกประการหนึ่งคือค่าความต้านทานจำเพาะผิวสัมผัสของตัวอย่างที่ผ่านการแอนนัลเกินกว่า 6 นาทีจะมีค่าเพิ่มอย่างมาก เนื่องจากการแอนนัลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อาร์เซนิคที่ผิวของแกลเลียมอาร์เซไนด์เกิดการระเหยออกจากผิว ดังนั้นจึงเกิดตำแหน่งว่างของอาร์เซนิคขึ้นในขณะแอนนัล ทำให้เกิด Dislocation ที่ผิวสัมผัสมีจำนวนเพิ่มขึ้นตามจำนวนตำแหน่งว่างของอาร์เซนิคที่เกิดขึ้น ซึ่งมีผลต่อสมบัติของผิวสัมผัสโอห์มมิกในรูปของการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานจำเพาะผิวสัมผัส เมื่อแอนนัลใช้เวลาเพิ่มขึ้น