



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

อุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งความไวสูงกินพลังงานต่ำ
Low Power and High Sensitivity Vertical Hall Device

รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ 2558
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

อุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งความไวสูงกินพลังงานต่ำ
Low Power and High Sensitivity Vertical Hall Device



รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ 2558

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

อุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งความไวสูงกินพลังงานต่ำ
Low Power and High Sensitivity Vertical Hall Device

รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ 2558
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) อุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งความไวสูงกินพลังงานต่ำ

แหล่งเงิน เงินรายได้

ประจำปีงบประมาณ 2558 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 2 ปี ตั้งแต่ 1 ต.ค. 2557 ถึง 30 ก.ย. 2559

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

รศ.ดร.เติมพงษ์ เพ็ชรกุล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอโมเดลใหม่ของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 คอนแทก นอกจากนี้ที่มีการศึกษาว่า แรงดันฮอลล์เกิดจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่กระทำต่อกระแสที่ไหลระหว่างคอนแทก ในการศึกษาครั้งนี้พบว่ายังมีการเบี่ยงเบนของกระแสจำนวนหนึ่งจากแหล่งจ่ายกระแสที่คอนแทกตรงกลางซึ่งมีผลต่อการเกิดแรงดันฮอลล์ ปริมาณกระแสเบี่ยงเบนนี้จะไหลผ่านความต้านทานในเนื้อสารกึ่งตัวนำที่อยู่ระหว่างคอนแทก ซึ่งส่งผลกระทบต่อแรงดันฮอลล์คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ 20-30 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงว่ากลไกการเบี่ยงเบนกระแสนี้มีนัยสำคัญต่อแรงดันฮอลล์ จากโมเดลที่นำเสนอนี้ทำให้สามารถนำไปสู่การออกแบบอุปกรณ์ฮอลล์ที่มีความไวสูงและกินพลังงานต่ำได้ จากการศึกษาโดยใช้วัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ค่าความเข้มข้นสารเจือ 10^{15} และ 10^{16} cm^{-3} ถ้าความไวของอุปกรณ์ที่ความเข้มข้นสารเจือต่ำจะมีค่ามากกว่าแต่เปอร์เซ็นต์ของการเบี่ยงเบนกระแสที่มีต่อแรงดันฮอลล์จะมีค่าสูงกว่า จากการศึกษาที่มีค่าประมาณ 20 – 30 % และ 30 – 40 % สำหรับแผ่นซิลิกอนที่มีความเข้มข้น 10^{15} และ 10^{16} cm^{-3} ตามลำดับ

คำสำคัญ: อุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 คอนแทก, sentaurus TCAD, การเลี้ยวเบนของพาหะ

Research Title: Low Power and High Sensitivity Vertical Hall Device

Researcher: Toempong Phetchakul

Faculty: Engineering

Department: Electronics

ABSTRACT

This project presents the new model of 5-contacts vertical Hall device. In spite of the study of Hall effect from Hall electrical field that acts upon the current between the contacts, the deviation current from the middle contact by Hall voltage is also studied. The deviation current passes through the bulk resistance between the contacts induce the voltage. It is around 20 – 30 percent of total output voltage. From this model, the 5-contacts vertical Hall would be considered for designing for high sensitivity and low power device. From the study, the N-type semiconductor at the lower concentration 10^{15} cm^{-3} gives the higher deviation current than the higher concentration 10^{16} cm^{-3} . The percent of voltage from deviation current is about 20 -30 % and 30 -40% in the case of doping concentration 10^{15} and 10^{16} cm^{-3} , respectively.

Keywords : 5-contacts vertical Hall device, sentaurus TCAD, carrier deflection

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 ผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร. อัมพร โพธิ์ไย ศูนย์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ในการให้ความเอื้อเฟื้อในการใช้เครื่องมือวิจัย ขอขอบคุณคุณสวัสดิพงษ์ พูนสวัสดิ์ และนายชลินทร์ สุทธิเนตร ในการมีส่วนร่วมวิจัยครั้งนี้



รศ.ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | II |
| กิตติกรรมประกาศ..... | III |
| สารบัญ..... | IV |
| สารบัญตาราง..... | VI |
| สารบัญภาพ..... | VII |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... | 1 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... | 1 |
| 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย..... | 2 |
| 1.5 สมมุติฐานงานวิจัย..... | 2 |
| 1.6 กรอบแนวความคิดในการวิจัย (ถ้ามี)..... | 2 |
| 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 3 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 4 |
| 2.1 หลักการปรากฏการณ์ฮอลล์..... | 4 |
| 2.2 เซ็นเซอร์แม่เหล็กแบบโครงสร้างฮอลล์เพลท (Hallplate sensor)..... | 12 |
| 2.3 ปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ (Magnetoresistance effect)..... | 13 |
| 2.3.1 Physical magnetoresistance effect..... | 15 |
| 2.3.2 Geometrical magnetoresistance effect..... | 15 |
| 2.4 พารามิเตอร์ที่มีช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์..... | 18 |
| 2.4.1 ผลของการชนกัน..... | 18 |
| 2.4.2 ผลของอุณหภูมิและความหนาแน่นของอะตอมสารเจือที่มีผลต่อความคล่องตัวของพาหะ..... | 20 |
| บทที่ 3 โปรแกรม Sentaurus TCAD และการจำลองแบบ..... | 23 |
| 3.1 บทนำ TCAD..... | 23 |
| 3.1.1 การจำลองแบบกระบวนการสร้าง (process simulation)..... | 23 |
| 3.1.2 การจำลองแบบการทำงานของตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (device simulation)..... | 24 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|-----------|
| 3.2 โปรแกรมการจำลองแบบ TCAD..... | 25 |
| 3.2.1 Sentaurus Workbench..... | 25 |
| 3.2.2 Sentaurus Process..... | 26 |
| 3.2.3 Sentaurus Structure Editor..... | 27 |
| 3.2.4 Sentaurus Device..... | 29 |
| 3.2.4.1 File..... | 29 |
| 3.2.4.2 Electrode..... | 30 |
| 3.2.4.3 Physics..... | 31 |
| 3.2.4.4 Plot..... | 31 |
| 3.2.4.5 Solve..... | 32 |
| 3.2.5 Tecplot SV..... | 32 |
| 3.2.6 Inspect..... | 33 |
| บทที่ 4 ผลการวิจัย..... | 34 |
| 4.1 การออกแบบ..... | 34 |
| 4.2 หลักการทำงานทั่วไป..... | 35 |
| 4.3 การจำลองแบบ..... | 36 |
| 4.4 ผลการจำลองแบบ..... | 37 |
| 4.5 อภิปรายผลการทดลอง..... | 38 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... | 43 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย..... | 43 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ..... | 43 |
| เอกสารอ้างอิง..... | 44 |
| ภาคผนวก..... | 45 |
| ภาคผนวก ก. บทความวิจัยที่ทำการเผยแพร่..... | 46 |
| ภาคผนวก ข. สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย..... | 51 |
| ประวัตินักวิจัย..... | 53 |

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

1 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการเบี่ยงเบนของกระแส.....40



สารบัญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น..... | 6 |
| 2.2 การเบี่ยงเบนของ (ก) อิเล็กตรอน (ข) โฮล ในฮอลล์เพลทซึ่งเป็นผลจากสนามไฟฟ้าในทิศทาง z..... | 8 |
| 2.3 สัมประสิทธิ์ฮอลล์ของสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิค (n_i)..... | 10 |
| 2.4 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของเซ็นเซอร์แม่เหล็กโครงสร้างแบบฮอลล์..... | 14 |
| 2.5 แสดงโครงสร้างของฮอลล์เซ็นเซอร์แนวตั้ง (ก) มุมมองด้านบน และ (ข) ภาคตัดขวาง..... | 15 |
| 2.6 แสดงโครงสร้างของฮอลล์เซ็นเซอร์แนวนอน (ก) มุมมองด้านบน และ (ข) ภาคตัดขวาง..... | 16 |
| 2.7 โครงสร้างแสดงปรากฏการณ์ของ Physical magnetoresistance effect..... | 17 |
| 2.8 โครงสร้างแสดงปรากฏการณ์ของ Geometrical magnetoresistance effect..... | 17 |
| 2.9 แสดงเส้นกระแสและเส้นศักย์ไฟฟ้าในโครงสร้างฮอลล์เพลทที่มีขนาดยาว (l) และขนาดสั้น (s) | 18 |
| 2.10 โครงสร้างของแมกนีโตรีซิสแตนซ์ (ก) แบบวงกลม (ดิสก์) และ (ข) แบบอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนฮอลล์เพลท..... | 18 |
| 2.11 โครงสร้างที่ให้ค่าความต้านทานต่ออนุกรมกันบนโครงสร้างฮอลล์เพลท..... | 19 |
| 2.12 แสดงความเร็วของอิเล็กตรอนที่เวลาต่างๆในผลึกสารของแข็ง เมื่อพิจารณาว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่โมโหลหรือสารกึ่งตัวนำและมีการชนกับแลตทิซ..... | 21 |
| 2.13 การเปลี่ยนแปลงสภาพคล่องของพาหะในสารกึ่งตัวนำซึ่งมีอะตอมสารเจือความเข้มข้นต่างๆกัน..... | 23 |
| 3.1 แสดงการจำลองแบบกระบวนการสร้าง..... | 26 |
| 3.2 แสดงการจำลองแบบตัวอุปกรณ์โดยการจำลองการทำงานด้วย TCAD..... | 26 |
| 3.3 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของการจำลองแบบการทำงานของตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ..... | 27 |
| 3.4 แสดงโปรแกรมการจำลองแบบส่วนต่างๆใน Sentaurus Workbench..... | 28 |
| 3.5 แสดงส่วนของการอิมพลานเทชั่นใน Sentaurus Process..... | 28 |
| 3.6 แสดงหน้าต่างโปรแกรมในส่วนของ Sentaurus Structure Editor | 29 |
| 3.7 แสดงหน้าสัมผัสไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ในการจำลองการทำงาน..... | 30 |
| 3.8 แสดงการจำลองตัวอุปกรณ์หลังจากการแบ่งกริด | 30 |
| 3.9 แผนผังไฟล์อินพุตและเอาต์พุตใน Sentaurus Device..... | 32 |
| 3.10 แสดงส่วนโปรแกรม Tecplot SV..... | 34 |
| 3.11 แสดงหน้าต่างในส่วนของ Inspect..... | 35 |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 4.1 โครงสร้างของอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิง..... | 34 |
| รูปที่ 4.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิง..... | 35 |
| รูปที่ 4.3 โครงสร้างของอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงที่จำลองด้วย Sentaurus TCAD..... | 36 |
| รูปที่ 4.4 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสบนอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิง..... | 37 |
| รูปที่ 4.5 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก..... | 38 |
| รูปที่ 4.6 ความแตกต่างของกระแสที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก..... | 38 |
| รูปที่ 4.7 วงจรสมมูลอย่างง่ายของอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิง..... | 39 |
| รูปที่ 4.8 กระแสที่เกิดการเบี่ยงเบนภายในอุปกรณ์..... | 39 |
| รูปที่ 4.9 กลไกการเบี่ยงเบนพาหะในอุปกรณ์..... | 41 |
| รูปที่ 4.10 การเบี่ยงเบนของกระแสขณะที่มีและไม่มีสนามแม่เหล็ก..... | 42 |



บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผลของโครงการวิจัย

อุปกรณ์ฮอลล์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่นิยมใช้กันอยู่แพร่หลาย มีอยู่ในรูปอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ใช้งานทั่วไปและมีอยู่ในวงจรรวม การใช้งานโดยการให้สนามแม่เหล็กที่ต้องการวัดกระทบในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวของอุปกรณ์ ในการวัดสนามแม่เหล็กมากกว่าหนึ่งทิศทาง เราสามารถใช้อุปกรณ์ฮอลล์มากกว่าหนึ่งตัววางในแนวที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กที่ทำการวัด เช่นถ้าต้องการวัดสนามแม่เหล็กสามทิศทางในแนวแกน X, Y และ Z อาจจะต้องใช้อุปกรณ์ฮอลล์สามตัววางตั้งฉากแนวสนามแม่เหล็ก

ในการใช้งานในวงจรรวมจะไม่ง่ายนักที่จะทำการวัดสนามแม่เหล็กในแนวทิศทางขนานกับวงจรรวม เพราะเหตุว่าอุปกรณ์ในวงจรรวมเป็นแบบพลาแนร์ หรือสร้างบนพื้นผิวของแผ่นซิลิกอนชิพ ทำให้การที่จะตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวขนานกับซิลิกอนชิพ จะต้องทำการสร้างอุปกรณ์ในแนวตั้งหรือแนวตั้ง (Vertical) เพื่อที่จะทำให้สนามแม่เหล็กตั้งฉากกับอุปกรณ์ที่ทำการวัด ซึ่งเป็นการสร้างที่ฝืนกับการสร้างแบบพลาแนร์ แต่อย่างไรก็ตามการสร้างอุปกรณ์ฮอลล์ในแนวตั้งหรือแนวตั้งสามารถทำได้ แต่เนื่องจากเป็นการสร้างที่ฝืนกับการสร้างปกติทำให้อุปกรณ์ฮอลล์ในแนวตั้งมีค่าความไว (Sensitivity) ไม่ดีเทียบเท่าอุปกรณ์ฮอลล์แบบพลาแนร์ ซึ่งการวัดสนามแม่เหล็กที่มากกว่าหนึ่งทิศทางในชิพวงจรรวมมีความจำเป็นที่จะต้องสร้างอุปกรณ์ทั้งในแนวราบปกติและแนวตั้งพร้อมกัน ซึ่งจะแตกต่างกับการวัดสนามแม่เหล็กนอกวงจรรวมที่สามารถนำอุปกรณ์ฮอลล์แบบพลาแนร์มาใช้ตามแนวทิศทางสนามแม่เหล็กที่ทำการวัดได้มากกว่าหนึ่งตัวทำให้ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องสร้างอุปกรณ์ฮอลล์ตามแนวตั้ง

ในงานวิจัยนี้ต้องการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กอุปกรณ์ฮอลล์ตามแนวตั้งให้ดีขึ้นเพื่อที่จะนำไปใช้งานกับอุปกรณ์ฮอลล์ในแนวราบในการใช้งานในวงจรรวมในการประยุกต์ใช้งานการวัดสนามแม่เหล็กมากกว่าหนึ่งทิศทางโดยการเพิ่มประสิทธิภาพจะพยายามรักษาการเปลี่ยนแปลงพลังงานชิงอุปกรณ์ให้เท่าเดิมหรือเพิ่มขึ้นน้อยที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 นำความรู้ไปประยุกต์กับสังคมและอุตสาหกรรม
- 1.2.2 พัฒนาบุคลากร นักศึกษาจากการวิจัยแบบพึ่งพิงตนเอง
- 1.2.3 สร้างองค์ความรู้ใหม่และประยุกต์องค์ความรู้เดิม
- 1.2.4 เผยแพร่ความรู้สู่สาธารณะในรูปแบบบทความในวารสารนานาชาติ

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 ออกแบบอุปกรณ์
- 1.3.2 ทดสอบผลจากการออกแบบ
- 1.3.3 สรุปผล เผยแพร่ผลงานในวารสารนานาชาติ

1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ทำการออกแบบโครงสร้างชนิดต่างๆ
- 1.4.2 ทดสอบแบบโครงสร้างชนิดต่างๆ
- 1.4.3 นำผลมาวิเคราะห์ และปรับปรุง
- 1.4.4 สรุปผล และเผยแพร่ผลงานวิจัย

1.5 สมมติฐานงานวิจัย

อุปกรณ์ฮอลล์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่เป็นที่นิยมสูงสุดอาศัยหลักการฮอลล์ที่กระแสดัดกับสนามแม่เหล็กเกิดแรงกระทำกับประจุที่เคลื่อนที่อิสระ ทำให้เกิดความต่างศักย์ในชั้นฮอลล์ อุปกรณ์ฮอลล์ที่ดีจะต้องออกแบบให้มีความยาวเพื่อที่จะทำให้ศักดาไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำขึ้นจากสนามแม่เหล็กมีค่าอิมตัวหรือค่าสูงสุดเพื่อที่จะไปสมดุลกับแรงที่กระทำต่อประจุพาหะที่เคลื่อนที่ ถ้าความยาวของอุปกรณ์ฮอลล์ไม่เพียงพอ ผลที่ได้คือแรงดันฮอลล์จะไม่อิมตัวหรือมีค่าสูงสุดตามการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กทำให้อุปกรณ์มีความไว (Sensitivity) ต่ำ ดังนั้นอุปกรณ์ฮอลล์แม้จะเป็นอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ แต่ก็ยังมีขีดของอุปกรณ์ไม่เล็กเหมือนอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์ทั่วไป อุปกรณ์ฮอลล์จึงมีมิติอุปกรณ์ขนาดหลายร้อยไมโครเมตร

อุปกรณ์ฮอลล์แบ่งได้เป็นสองชนิดตามลักษณะการสร้างอุปกรณ์ อุปกรณ์ฮอลล์แบบพลาเนอร์หรือแบบราบคืออุปกรณ์ฮอลล์ที่สร้างลงบนผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนชิพ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีตามปกติของการสร้างวงจรรวมการสร้างด้วยเทคนิคนี้มีมิติของอุปกรณ์ไม่ถูกจำกัดแต่อย่างใด อุปกรณ์ฮอลล์ที่ใช้ในห้องตลาดก็เป็นในลักษณะนี้ นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ฮอลล์อีกประเภทที่สร้างในแนวตั้งหรือแนวคิง อุปกรณ์ประเภทนี้จะมีข้อจำกัดในการสร้างอุปกรณ์ทั้งในด้านกายภาพของแผ่นซิลิกอนชิพและในเทคโนโลยีการสร้าง แต่อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ฮอลล์ประเภทนี้มีความจำเป็นในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางขนานกับซิลิกอนชิพ โดยเฉพาะในวงจรรวมที่ต้องการวัดสนามแม่เหล็กมากกว่าหนึ่งทิศทาง

จากข้อจำกัดดังกล่าวทำให้ค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์ในแนวตั้งมีค่าดีกว่าในแนวราบ เช่น ค่าความไวของอุปกรณ์ ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้อุปกรณ์ในแนวตั้งมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับแนวราบจึงต้องมีการพัฒนาอุปกรณ์แนวตั้งให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นซึ่งยังมีผู้วิจัยในประเด็นนี้น้อยมาก ดังนั้นเพื่อเป็นการพัฒนาอุปกรณ์แนวตั้งให้มีค่าความไวที่ดีขึ้นแนวทางของผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นไปที่ข้อจำกัดดังกล่าว โดยมีติกระแสูอุปกรณ์แนวตั้งมีค่าน้อยโดยโครงสร้าง ถ้าทำการเพิ่มมิติกระแสูแนวตั้งมากขึ้นจะเป็นการเพิ่มความไวของอุปกรณ์ไปในตัว การเพิ่มมิติกระแสูแนวตั้งจำเป็นที่จะไม่เพิ่มเทคนิคการสร้างเนื่องจากเทคนิคการสร้างอุปกรณ์แนวตั้งมีความยากลำบากและค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าแนวราบอยู่แล้ว นอกจากนี้ อุปกรณ์จะต้องไม่กินพลังงานเพิ่มขึ้น หรือเพิ่มขึ้นน้อยที่สุดจะทำให้การสิ้นเปลืองพลังงานของอุปกรณ์มีประสิทธิภาพที่ดี และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเพื่อวัดสนามแม่เหล็กในแนวขนานกับชิพวงจรรวมในการตรวจจับสนามแม่เหล็กมากกว่าหนึ่งทิศทาง

1.6 กรอบแนวความคิดในการวิจัย

อุปกรณ์ฮอลล์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่นิยมใช้กันอยู่แพร่หลาย มีอยู่ในรูปอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ใช้งานทั่วไปและมีอยู่ในวงจรรวม การใช้งานโดยการให้สนามแม่เหล็กที่ต้องการวัดกระทบในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวของอุปกรณ์ในการวัดสนามแม่เหล็กมากกว่าหนึ่งทิศทาง เราสามารถใช้อุปกรณ์ฮอลล์มากกว่าหนึ่งตัววางในแนวที่ตั้งฉากกับ

สนามแม่เหล็กที่ทำการวัด เช่นถ้าต้องการวัดสนามแม่เหล็กสามทิศทางในแนวแกน X, Y และ Z อาจจะต้องใช้อุปกรณ์ฮอลล์สามตัววางตั้งฉากแนวสนามแม่เหล็ก

ในการใช้งานในวงจรรวมจะไม่ง่ายนักที่จะทำการวัดสนามแม่เหล็กในแนวทิศทางขนานกับวงจรรวม เพราะเหตุว่าอุปกรณ์ในวงจรรวมเป็นแบบพลาแนร์ หรือสร้างบนพื้นผิวของแผ่นซิลิกอนชิพ ทำให้การที่จะตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวขนานกับซิลิกอนชิพ จะต้องทำการสร้างอุปกรณ์ในแนวตั้งหรือแนวตั้ง(Vertical) เพื่อที่จะทำให้สนามแม่เหล็กตั้งฉากกับอุปกรณ์ที่ทำการวัด ซึ่งเป็นการสร้างที่พินกับการสร้างแบบพลาแนร์ แต่อย่างไรก็ตามการสร้างอุปกรณ์ฮอลล์ในแนวตั้งหรือแนวตั้งสามารถทำได้ แต่เนื่องจากการสร้างที่พินกับการสร้างปกติทำให้อุปกรณ์ฮอลล์ในแนวตั้งมีความไว(Sensitivity)ไม่ดีเทียบเท่าอุปกรณ์ฮอลล์แบบพลาแนร์ ซึ่งการวัดสนามแม่เหล็กที่มากกว่าหนึ่งทิศทางในชิพวงจรรวมมีความจำเป็นที่จะต้องสร้างอุปกรณ์ทั้งในแนวราบปกติและแนวตั้งพร้อมกัน ซึ่งจะแตกต่างกับการวัดสนามแม่เหล็กนอกวงจรรวมที่สามารถนำอุปกรณ์ฮอลล์แบบพลาแนร์มาใช้ตามแนวทิศทางสนามแม่เหล็กที่ทำการวัดได้มากกว่าหนึ่งตัวทำให้ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องสร้างอุปกรณ์ฮอลล์ตามแนวตั้ง

ในงานวิจัยนี้ต้องการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กอุปกรณ์ฮอลล์ตามแนวตั้งให้ดีขึ้นเพื่อที่จะนำไปใช้งานกับอุปกรณ์ฮอลล์ในแนวราบในการใช้งานในวงจรรวมในการประยุกต์ใช้งานการวัดสนามแม่เหล็กมากกว่าหนึ่งทิศทางโดยการเพิ่มประสิทธิภาพจะพยายามรักษาการสิ้นเปลืองพลังงานของอุปกรณ์ให้เท่าเดิมหรือเพิ่มขึ้นน้อยที่สุด

1.7 ประโยชน์คาดว่าจะได้รับ

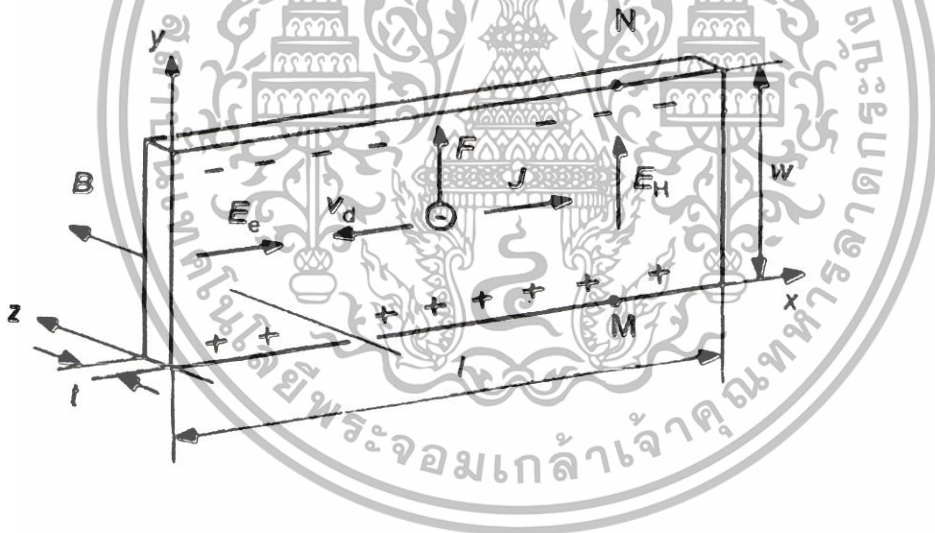
- 1.7.1 การออกแบบโดยอาศัยหลักปรากฏการณ์การทำงานใหม่
- 1.7.2 สร้างองค์ความรู้และประยุกต์ใช้ความรู้
- 1.7.3 ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ระดับนานาชาติ
- 1.7.4 แสดงผลงานในงานประชุมวิชาการ

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เซ็นเซอร์แม่เหล็ก (Magnetic Sensor) เป็นสิ่งประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำที่มนุษย์สร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการตรวจวัดสนามแม่เหล็ก โดยอาศัยหลักการการทำงานจากปรากฏการณ์หลายอย่างด้วยกัน เช่น ปรากฏการณ์ฮอลล์(Hall Effect), ปรากฏการณ์ความต้านทานแม่เหล็ก(Magnetoresistive Effect) หรือ ปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ เป็นต้น ซึ่งตลอดหลายปีที่ผ่านมา ปรากฏการณ์ฮอลล์และปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ได้นำมาใช้ประโยชน์ทั้งในด้านการศึกษาเรียนรู้ รวมถึงนำหลักการของฮอลล์มาใช้สร้างอุปกรณ์หลายชนิดเช่น คีย์บอร์ด(Keyboards), แมกนีโตมิเตอร์(Magnetometers), เซ็นเซอร์วัดระยะ(displacement sensors) รวมถึงแมกเนติกเซ็นเซอร์ (magnetic sensors) ต่างๆ มากมาย เป็นต้น

2.1 หลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)



รูปที่ 2.1 การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์สามารถอธิบายได้โดยใช้รูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงอุปกรณ์ฮอลล์เพลทในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่มีความกว้าง w ยาว l และหนา t เมื่อฮอลล์เพลทได้รับสนามไฟฟ้า E_e ในทิศทาง $+x$ จะทำให้เกิดมีแรงกระทำกับประจุพาหะ วัสดุเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นพาหะส่วนมากคืออิเล็กตรอนซึ่งมีประจุไฟฟ้าลบ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่แบบดริฟท์ด้วยความเร็วค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่า “ความเร็วดริฟท์” (Drift velocity: V_d) โดยมีทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าคือทิศลบ x และการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นลบจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า I_x ไหลในทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน หรือก็คือมีกระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางเดียวกันกับทิศของสนามไฟฟ้า เมื่อให้สนามแม่เหล็ก

B ในทิศทาง $+z$ และตั้งฉากกับทิศทางของกระแส I_x พบว่าจะมีแรงกระทำต่อพาหะเกิดขึ้น ซึ่งแรงที่กระทำต่อพาหะนี้ เรียกว่า “แรงลอเรนซ์ (Lorentz Force: F_L)” ทำให้อิเล็กตรอนเกิดการเบี่ยงเบนไปด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลทในทาง ทิศ $+y$ ส่วนทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลทในทิศทาง $-y$ จะเกิดประจุไฟฟ้าชนิดตรงกันข้ามอีกชนิดหนึ่งซึ่งก็คือ โฮล (hole) สิ่งนี้จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นซึ่งเรียกว่า สนามไฟฟ้าฮอลล์ E_H มีทิศทาง $+y$ สนามไฟฟ้าฮอลล์จะทำให้เกิด แรงไฟฟ้ากระทำกับอิเล็กตรอนทำให้อิเล็กตรอนถูกผลักไปทางทิศ $-y$ เมื่อแรงลอเรนซ์สมดุลกับแรงจากสนามไฟฟ้า ฮอลล์ จะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในทิศทาง $+x$ เช่นเดิมโดยไม่มีการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอีก เมื่อทำ การวัดแรงดันทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลทในทิศ y จะพบแรงดันฮอลล์ (V_H) ขึ้น ซึ่งแรงดันฮอลล์หาได้จากสมการที่ 2.1

$$V_H = R_H I_x B_z / t \quad (2.1)$$

R_H คือสัมประสิทธิ์ฮอลล์ (Hall constant) จากสมการที่ 2.1 จะเห็นว่าแรงดันฮอลล์จะแปรผกผันกับความหนาของ แผ่นฮอลล์เพลท

จากที่กล่าวก่อนหน้าว่าอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุเป็นลบจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ววริฟท์เฉลี่ยผ่านทางฮอลล์เพลทเมื่อได้รับ สนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนเกิดการเบี่ยงเบนเนื่องจากแรงลอเรนซ์ (F_L) ซึ่งแรงลอเรนซ์หาได้จากสมการที่ 2.2

$$\vec{F}_L = -q (\vec{v}_x \times \vec{B}_z) \quad (2.2)$$

v_x คือ ความเร็ววริฟท์เฉลี่ยของประจุพาหะในทิศทาง x

อิเล็กตรอนจะถูกเบี่ยงเบนด้วยแรงลอเรนซ์ ในทิศทาง $+y$ ไปทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลท ส่วนทิศทาง $-y$ ก็จะมีโฮล ประจุอีกชนิดหนึ่งซึ่งก็คือโฮล สิ่งนี้จะสร้างสนามไฟฟ้าฮอลล์ขึ้น เมื่อสนามไฟฟ้าฮอลล์สมดุลกับแรงลอเรนซ์จะทำให้พาหะเคลื่อนที่ในทิศทางเดิมโดยไม่มีการเบี่ยงเบนอีก สนามไฟฟ้าฮอลล์ในขณะนี้หาได้จากสมการที่ 2.3

$$E_H = v_x B_z \quad (2.3)$$

ความหนาแน่นกระแส J_x คือ

$$J_x = n q v_x \quad (2.4)$$

n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน $= -1.6 \times 10^{-19}$ คูลอมบ์ ดังนั้นจากสมการที่ 2.3 และ 2.4 สนามไฟฟ้าฮอลล์ E_H จะแสดงตามสมการที่ 2.5

$$E_H = -J_x B_z / nq \quad (2.5)$$

คูณทั้งสองข้างด้วยความกว้าง w ก็จะได้

$$E_H w = -J_x w t B_z / n q t \quad (2.6)$$

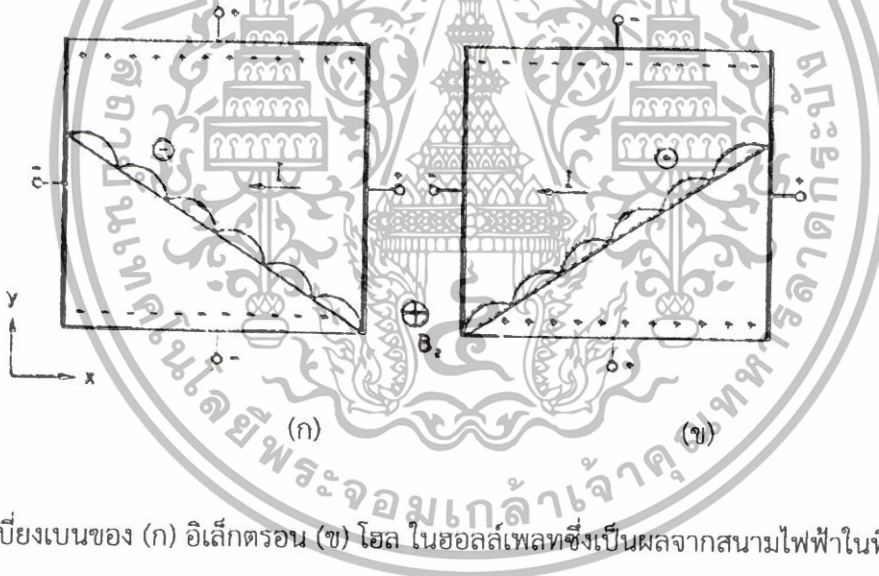
ดังนั้นแรงดันฮอลล์จะได้

$$V_H = -I_x B_z / n q t \quad (2.7)$$

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ 2.7 กับสมการที่ 2.1 จะได้สัมประสิทธิ์ฮอลล์ (R_H) ของอิเล็กตรอนตามสมการที่ 2.8

$$R_H \text{ (electrons)} = -1/nq \quad (2.8)$$

จากสมการที่ 2.8 จะเห็นว่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ (R_H) จะแปรผกผันกับความเข้มข้นอะตอมสารเจือ (Doping concentration) สิ่งนี้จึงอธิบายความจริงที่ว่าปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำจะมีมากกว่าในโลหะ อิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) ถูกเบี่ยงเบนด้วยผลของสนามแม่เหล็กแสดงในรูปที่ 2.2(ก) นำไปสู่แรงดันฮอลล์ที่มีค่าเป็นลบ โอลก็เป็นพาหะนำไฟฟ้าอีกชนิดหนึ่งในสารกึ่งตัวนำ แรงลอเรนซ์ F_L ของประจุพาหะที่เป็นบวกเช่นโฮลจะตรงข้ามกับประจุพาหะที่เป็นลบ ซึ่งส่วนของโฮลจะแสดงอยู่ในรูปที่ 2.2(ข) แรงดันฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor) มีค่าเป็นบวก



รูปที่ 2.2 การเบี่ยงเบนของ (ก) อิเล็กตรอน (ข) โฮล ในฮอลล์เพลทซึ่งเป็นผลจากสนามไฟฟ้าในทิศทาง z

จากรูปที่ 2.2 พาหะทั้งอิเล็กตรอนหรือโฮลเมื่อเคลื่อนที่ด้วยผลของสนามแม่เหล็กจะเกิดการชนกับแลตทิซ (lattice) หรืออะตอมสารเจือ^[20-22] แต่การชนความเร็วของพาหะจะลดลงเป็นศูนย์ และจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วอีกครั้งด้วยผลของสนามไฟฟ้าในทิศทาง x และแรงลอเรนซ์ F_L ในทิศทาง y สำหรับสัมประสิทธิ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะมีค่าเป็นบวกตามสมการที่ 2.9

$$R_H \text{ (holes)} = +1/pq \quad (2.9)$$

การได้มาถึงสัมประสิทธิ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำที่เติมด้วยอะตอมสารเจือชนิดพีและชนิดเอ็นอย่างเข้มข้นสามารถหาได้จากที่กล่าวมา แต่สำหรับสารกึ่งตัวนำที่เป็นสารชนิดอินทรีนซิกเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กพหุประจุทั้งสองชนิดจะเบี่ยงเบนไปทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลท เมื่อสนามไฟฟ้าฮอลล์สมดุลกับแรงลอเรนซ์จะทำให้กระแสไหลในทิศทางเดิมโดยไม่มีกระแสเบี่ยงเบนอีก ซึ่งสนามไฟฟ้าฮอลล์ในทิศทาง y แสดงตามสมการที่ 2.10

$$E_H = E_y = v_x B_z \quad (2.10)$$

เมื่อมีสนามไฟฟ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว drift velocity

$$v_x = -\mu_n E_x \quad (2.11)$$

ที่ μ_n คือความคล่องตัวของอิเล็กตรอนซึ่งมีค่าเป็นบวก สำหรับความหนาแน่นกระแสในทิศทาง x จะได้

$$J_{ny} = qn\mu_n E_x \quad (2.12)$$

จากสมการที่ 2.10 - 2.11 เราจะพบว่า

$$J_{ny} = -qn\mu_n^2 B_z E_x \quad (2.13)$$

สำหรับโฮลจะได้

$$J_{py} = +qp\mu_p^2 B_z E_x \quad (2.14)$$

สำหรับความหนาแน่นกระแสทั้งหมดในทิศทาง y แสดงในสมการที่ 2.15

$$J_y = q(n\mu_n + p\mu_p) E_x \quad (2.15)$$

จากสมการที่ 2.15 จะเท่ากับผลบวกของสมการที่ 2.13 กับ 2.14

$$q(n\mu_n + p\mu_p) E_x = -q(n\mu_n^2 - p\mu_p^2) B_z E_x \quad (2.16)$$

ดังนั้นสนามไฟฟ้า E_y จะแสดงตามสมการที่ 2.17

$$E_y = (p\mu_p^2 - n\mu_n^2) B_z E_x / (p\mu_p + n\mu_n) \quad (2.17)$$

จากสนามไฟฟ้าฮอลล์

$$E_y = R_H J_x B_z \quad (2.18)$$

และความหนาแน่นกระแส

$$J_x = q(n\mu_n + p\mu_p) E_x \quad (2.19)$$

จากสมการที่ 2.17, 2.18 และ 2.19 สัมประสิทธิ์ฮอลล์สำหรับสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิกแสดงตามสมการที่ 2.20

$$R_H = (p\mu_p^2 - n\mu_n^2) / q(p\mu_p + n\mu_n)^2 \quad (2.20)$$

สำหรับวัสดุชนิดเอ็น ($n \gg p$) สัมประสิทธิ์ฮอลล์

$$R_H = -1/nq \quad (2.21)$$

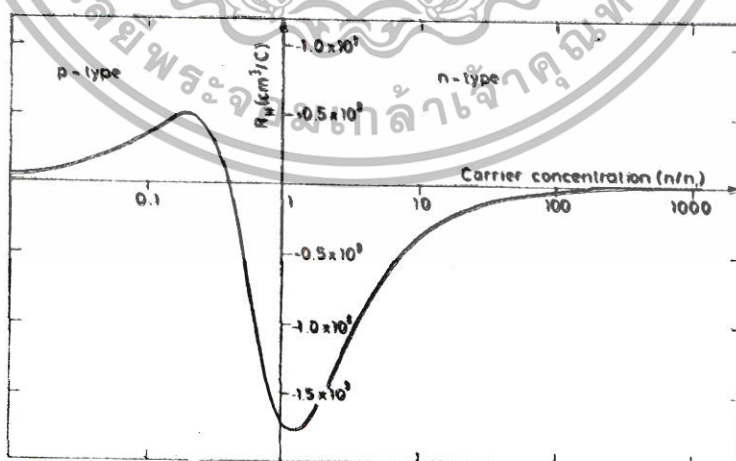
สำหรับวัสดุชนิดพี ($p \gg n$) สัมประสิทธิ์ฮอลล์

$$R_H = 1/pq \quad (2.22)$$

จะเห็นว่าในสมการที่ 2.21 และ 2.22 สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่ได้จะคล้ายกับกรณีในสารกึ่งตัวนำที่เติมด้วยอะตอมสารเจือชนิดพีและชนิดเอ็นอย่างเข้มข้นตามสมการที่ 2.8 และ 2.9 ตามลำดับ สัมประสิทธิ์ฮอลล์สำหรับสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิกแสดงดังสมการที่ 2.23

$$R_H = (\mu_p - \mu_n) / n_i q (\mu_p + \mu_n) \quad (2.23)$$

รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์กับความเข้มข้นอะตอมสารเจือ (Doping concentration) ในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดอินทรีนซิก (n_i) ซึ่งเปลี่ยนแปลงจากสารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จากรูปเราจะพบค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์เป็นศูนย์ที่บริเวณสารกึ่งตัวนำชนิดพี เนื่องจากโมบิลิตี้ (mobility) ที่แตกต่างกันของอิเล็กตรอนกับโฮล และจากรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นว่าในที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือน้อยจะทำให้สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่มีค่าสูงขึ้นได้



รูปที่ 2.3 สัมประสิทธิ์ฮอลล์ของสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิก (n_i)

ปรากฏการณ์ฮอลล์ยังเป็นวิธีที่นิยมนำมาวัดค่าความหนาแน่นของพาหะ, ชนิดของพาหะและสภาพคล่องของพาหะได้อีกด้วย

จากสมการ $J_x = pqv_x$ หรือ $v_x = \frac{J_x}{pq}$ (2.24)

และสนามไฟฟ้าฮอลล์ $E_H = E_y = J_x B_z / pq$ (2.25)

ดังนั้น $\frac{E_y}{J_x B_z} = \frac{1}{pq} = R_H$ (2.26)

จากรูป 2.1 เมื่อทำการวัดแรงดันฮอลล์ระหว่างขอบด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลทในทิศทาง y ซึ่งมีระยะความกว้างเท่ากับ w จะได้

$V_y = V_H = E_y w$ หรือ $E_y = \frac{V_H}{w}$ (2.27)

โดย V_H คือแรงดันฮอลล์ ซึ่งเป็นแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างด้านข้างของแท่งสารกึ่งตัวนำ โดยการแทนค่าสมการกระแส $J_x = \frac{I}{w \cdot t}$ และ $E_y = \frac{V_H}{w}$ ลงในสมการที่ 2.26 จะได้ว่า

$R_H = \frac{V_H}{w I B_z} \cdot w \cdot t$ หรือ $R_H = \frac{V_H \cdot t}{I B_z} = \frac{1}{pq}$ (2.28)

จากสมการที่ 2.28 ความหนาแน่นของโฮลคือ

$p = p_0 = \frac{1}{q R_H} = \frac{I_x B_z}{q \cdot t \cdot V_H}$ (2.29)

และสภาพต้านทานไฟฟ้า คือ

$\rho = R \frac{w \cdot t}{l} = \frac{V}{I} \frac{w \cdot t}{l}$ (2.30)

โดย R คือค่าความต้านทานไฟฟ้าของแท่งสาร (โอห์ม)

และจากสมการ $\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{pq\mu_p}$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\mu_p = \frac{1}{\rho \cdot p \cdot q} = \frac{1}{\rho} \cdot R_H \quad (2.31)$$

จากสมการ 2.29, 2.30 และ 2.31 จะเห็นว่าการทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ทำให้เราสามารถวัดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของแท่งสารกึ่งตัวนำได้ คือความหนาแน่นของพาหะ, สภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะได้เป็นอย่างดี

นอกจากนี้แล้วจากสมการ 2.31 โดยการวัดค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ (R_H) และสภาพต้านทาน (ρ) ที่อุณหภูมิค่าต่างๆจะทำให้เราสามารถคำนวณหาค่าสภาพคล่อง (μ_p) และค่าความหนาแน่นของพาหะที่อุณหภูมิต่างๆได้ ซึ่งข้อมูลนี้มีประโยชน์มากในการวิเคราะห์คุณสมบัติอื่นๆของสารกึ่งตัวนำ

ในทำนองเดียวกัน ในกรณีที่สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ค่าแรงดันฮอลล์ (R_H) จะมีค่าตรงข้ามกับกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดพีคือมีค่าเป็นลบ(-) คือ $R_H = -1/nq$ โดยเฉพาะแรงดันฮอลล์ (V_H) จะมีค่าตรงข้ามกับกรณีของสารชนิดพี คือมีค่าเป็นลบด้วย ดังนั้น การวัดแรงดันของฮอลล์ทำให้เราสามารถบ่งชี้ชนิดของสารกึ่งตัวนำว่าเป็นชนิดเอ็นหรือพีได้อีกด้วย

ขณะที่ค่าความไวในการตอบสนอง (Sensitivity: S) คือ เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงดันฮอลล์ต่อหนึ่งหน่วยกระแสและสนามแม่เหล็ก ซึ่งสามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$S = \frac{V_H}{I \cdot B} = \frac{R_H \cdot G}{t} = \frac{G}{n \cdot q \cdot t} \quad (2.32)$$

โดยที่ G คือ พารามิเตอร์โครงสร้าง (geometry factor) ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.33

$$G = \frac{V_H \cdot t}{R_H I_x B_z} \quad (2.33)$$

จากสมการที่ 2.32 จะเห็นได้ว่า ค่าความไวในการตอบสนองจะมีค่าสูงเมื่อฮอลล์เพลทมีความหนาแน่นของพาหะที่ต่ำ ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้าสุทธิในแท่งสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นผลของการรวมเวกเตอร์ของ E_H และ E_x ซึ่งไม่ได้มีทิศทางตรงไปตามแกน +x เนื่องจากแรงลอเรนซ์ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของพาหะซึ่งทำมุม θ_H กับแกน +x ซึ่งมุม θ_H ที่เกิดขึ้นเรียกว่า “มุมฮอลล์” (Hall angle) โดย

$$\tan \theta_H = \frac{E_H}{E_x} \quad (2.34)$$

โดยการแทนค่า $E_H = \frac{J_x \cdot B_z}{p \cdot e}$ และ $J_x = \sigma \cdot E_x$ ลงในสมการที่ 2.34 จะได้ว่า

$$\tan \theta_H = \frac{J_x \cdot B_z}{p \cdot e} \cdot \frac{\sigma}{J_x} = \frac{\sigma \cdot B_z}{p \cdot e}$$

หรือ
$$\tan \theta_H = \frac{\sigma \cdot B_z}{p \cdot e} = p \cdot e \cdot \mu_p \frac{B_z}{p \cdot e} = \mu_p \cdot B_z \quad (2.35)$$

ดังนั้นจะได้

$$\frac{\sigma}{p \cdot e} = \mu_p$$

หรือ
$$\mu_p = \sigma \cdot R_H \quad (2.36)$$

ในการวิเคราะห์ที่กล่าวมาแล้วนี้ ไม่ได้พิจารณาผลของการชนกันของพาหะกับแลตทิซ ดังนั้นค่าที่ได้จึงไม่ถูกต้องนัก ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ในกรณีที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับแลตทิซ R_{Hl} สามารถแสดงสมการความสัมพันธ์ได้โดย

$$R_{Hl} = \frac{3\pi}{8} R_H = 1.18 R_H \quad (2.37)$$

และ
$$\tan \theta = \frac{3\pi}{8} \mu_p \cdot B_z = \mu_{Hl} \cdot B_z \quad \text{หรือ} \quad \mu_{Hl} = \frac{\tan \theta_H}{B_z} = \frac{3\pi}{8} \mu_p$$

ดังนั้นจะได้ว่า
$$\mu_{Hl} = \mu_H = 1.18 \mu_p \quad (2.38)$$

เมื่อ μ_H คือ ค่าสภาพความคล่องตัวของฮอลล์ (Hall mobility)

และ μ_{Hl} คือ ค่าสภาพความคล่องตัวของฮอลล์ในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับแลตทิซ

ในกรณีที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ (Ionized impurity scattering) สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ในกรณีพิจารณาการชนกันกับของพาหะกับอะตอมสารเจือ R_{Hi} แสดงได้ดังสมการที่ (2.39)

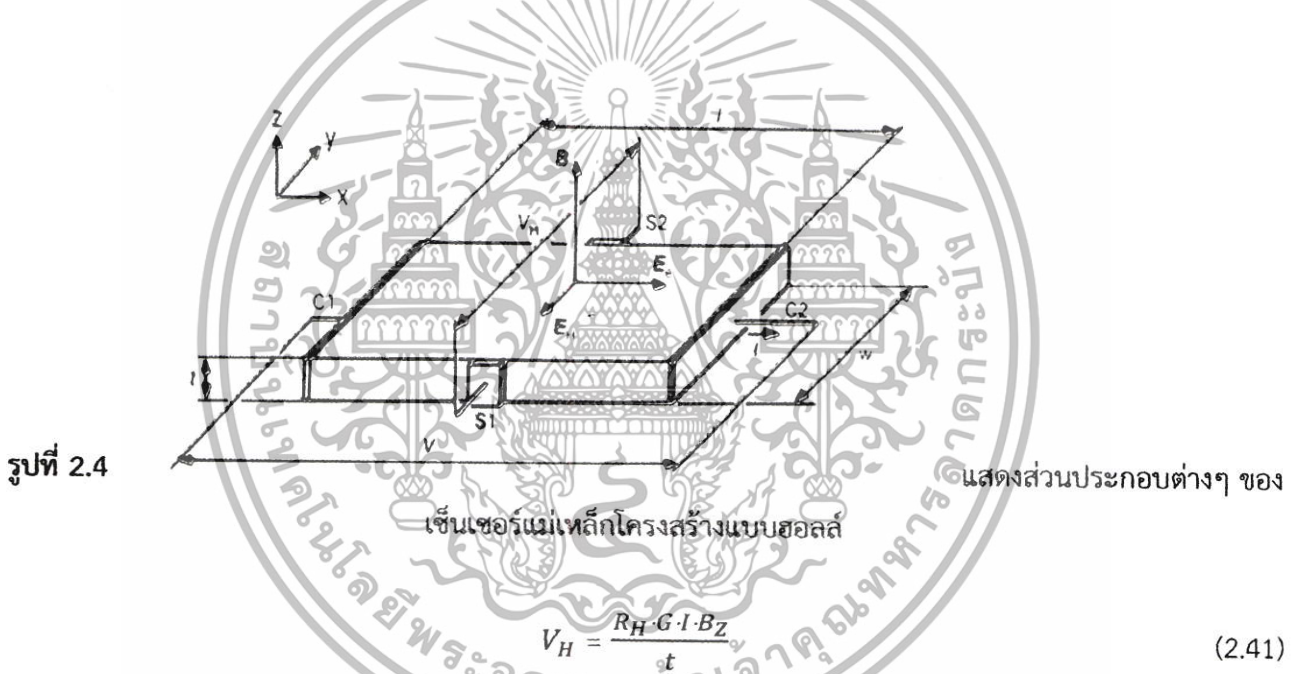
$$R_{Hi} = \frac{315\pi}{512} R_H = 1.93 R_H \quad (2.39)$$

และ
$$\mu_{Hi} = \frac{315\pi}{512} \mu_p = 1.93 \mu_p \quad (2.40)$$

เมื่อ μ_{Hh} คือ ค่าสภาพความคล่องตัวของโฮลในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ และ μ_p คือ ค่า Mobility ของโฮล

2.2 เซ็นเซอร์แม่เหล็กแบบโครงสร้างฮอลล์เพลท (Hallplate sensor)

เซ็นเซอร์แม่เหล็กแบบโครงสร้างฮอลล์เพลท เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่อาศัยหลักการปรากฏการณ์ของฮอลล์ในการทำงาน โดยลักษณะของอุปกรณ์ฮอลล์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งแสดงโครงสร้างของแผ่นฮอลล์ เซ็นเซอร์ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-substrate) ที่มีขนาดความกว้างเท่ากับ w ความยาวเท่ากับ l และความหนาของแผ่นฮอลล์เท่ากับ t โดยประกอบด้วยขั้วใช้งาน 4 ขั้วคือ C1, C2, S1 และ S2 เมื่อให้กระแสไฟฟ้าระหว่างขา C1 กับ C2 และสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับทิศทางกระแสจะปรากฏแรงดันฮอลล์ซึ่งเป็นค่าแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขา S1 กับ S2 โดยสามารถหาได้จากสมการที่ 2.41



โดยที่ R_H คือสัมประสิทธิ์ฮอลล์ G คือพารามิเตอร์โครงสร้าง t คือความหนาของอุปกรณ์ฮอลล์ B_z คือ ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้ง

เนื่องจากสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำพิจารณาจากพฤติกรรมของพาหะคือ อิเล็กตรอนและโฮล ซึ่งในกรณีอุปกรณ์ฮอลล์ที่อิเล็กตรอนมากกว่าโฮลมากๆ ($n \gg p$) สามารถแสดงสมการแรงดันฮอลล์ได้ดังนี้

$$V_H = \frac{r_n}{q \cdot n \cdot t} \cdot G \cdot B_z \cdot I \quad (2.42)$$

โดยที่ r_n คือ พารามิเตอร์การกระเจิง (scattering parameter)

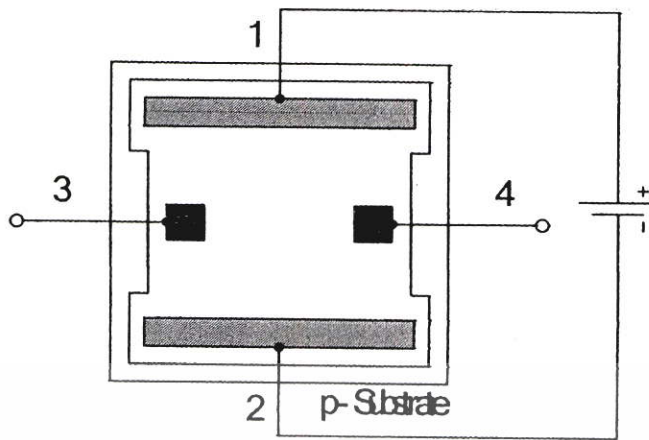
จากสมการที่ 2.41 และ 2.42 แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์โครงสร้าง G จะมีความสัมพันธ์กับแรงดันฮอลล์ โดยที่พารามิเตอร์โครงสร้าง G สามารถประมาณได้ดังสมการที่ 2.43

$$G = \left[1 - \exp\left(-\frac{\pi}{2} \cdot \frac{l}{w} \cdot \frac{\theta_H}{\tan \theta_H}\right) \right] \cdot \left[1 - \frac{2}{\pi} \cdot \frac{s}{w} \cdot \frac{\theta_H}{\tan \theta_H} \right] \quad (2.43)$$

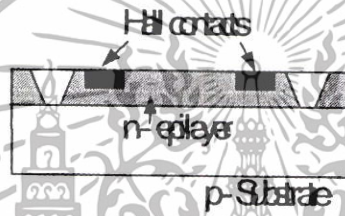
โดยในการออกแบบอุปกรณ์ฮอลล์จะกำหนดให้ค่า $G = 1$ ซึ่งพารามิเตอร์โครงสร้างจะเท่ากับหนึ่งได้ถ้าออกแบบให้ $l/w = 3$ และ $s/w < 1$ โดยตำแหน่งของขั้วเซนเซอร์จะออกแบบที่ระยะ $\frac{1}{2}$ ของความยาวฮอลล์เพลท ในปัจจุบัน เซ็นเซอร์แม่เหล็กแบบอุปกรณ์ฮอลล์สามารถแบ่งได้เป็นสองชนิดคือ ฮอลล์เซ็นเซอร์ชนิดแนวตั้งและแนวนอน ซึ่งแบ่งตามความสามารถในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยรูปที่ 2.5 (ก) และ 2.5(ข) แสดงมุมมองด้านบนและด้านภาคตัดขวางของฮอลล์เซ็นเซอร์แนวตั้งชนิดเอ็น ซึ่งสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งฉากกับอุปกรณ์โครงสร้างคือ ใช้ฐานรองชนิดพี และสร้างด้วยกระบวนการสร้างพื้นฐานของไบโพลาร์ กระแสจะไหลระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 และ 2 ขณะที่แรงดันฮอลล์ถูกวัดระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 3 และ 4 ความหนาแน่นอิเล็กตรอนประมาณ $10^{15} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ และมีความหนาแน่นอิพิทาเซียระหว่าง $5 - 10 \mu\text{m}$ โดยที่ออกแบบมิติของเพลทประมาณ $200 \times 200 \mu\text{m}$ สภาพความต้านทานไฟฟ้าของชั้นอิพิ (Epilayer) สามารถลดลงได้โดยใช้วิธีการยิงฝังประจุ (Ion implantation) ซึ่งเทคนิคนี้ทำให้ขนาดของแผ่นอุปกรณ์ฮอลล์มีความสม่ำเสมอได้ ฮอลล์เซ็นเซอร์ที่ใช้วัดตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งสามารถประยุกต์ใช้เพื่อตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวนอนได้โดยเรียกว่าอุปกรณ์ฮอลล์แนวนอน โดยแสดงดังรูปที่ 2.6(ก) และ 2.6(ข) โดยที่โครงสร้างนี้ถูกนำมาใช้เพื่อเป็นพื้นฐานที่จะสร้างเซ็นเซอร์แม่เหล็ก โดยพื้นที่ของอิเล็กโทรดออกแบบเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส และพาหะจะมีทิศทางการฉีดในลักษณะแนวตั้ง เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางขนานกับผิวของอุปกรณ์

2.3 ปรากฏการณ์แมกนีโตรซิสแตนซ์ (Magnetoresistance effect)

นอกจากปรากฏการณ์ฮอลล์ในโครงสร้างฮอลล์เพลท เรายังสามารถพบกับปรากฏการณ์แมกนีโตรซิสแตนซ์ได้อีกด้วย ซึ่งปรากฏการณ์แมกนีโตรซิสแตนซ์คือ ปรากฏการณ์ที่ค่าความต้านทานของวัสดุมีค่าเปลี่ยนแปลงกับสนามแม่เหล็ก การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานที่กล่าวมานี้มีสาเหตุหลักๆอยู่ 2 สาเหตุคือ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการกระจายความเร็วของประจุพาหะ หรือที่เรียกว่า (Physical magnetoresistance effect) และ การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานที่เกิดจากรูปร่างของตัวอุปกรณ์ หรือที่เรียกว่า (Geometrical magnetoresistance effect)

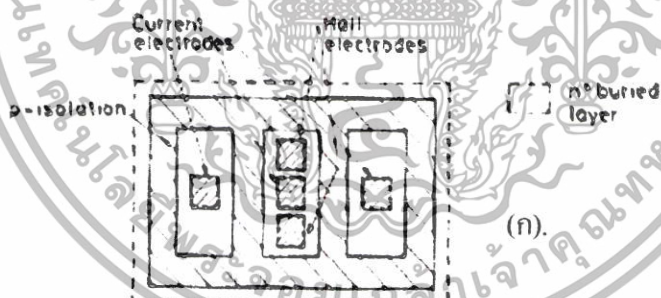


(ก).

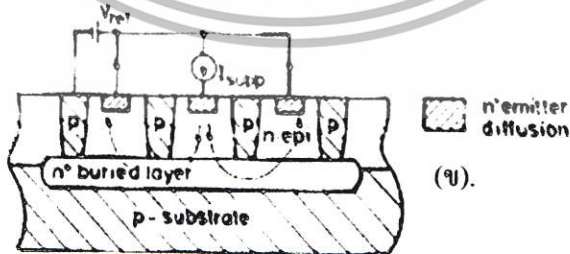


(ข).

รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของฮอลล์เซ็นเซอร์แวนดิง (ก) มุมมองด้านบน และ (ข) ภาคตัดขวาง



(ก).

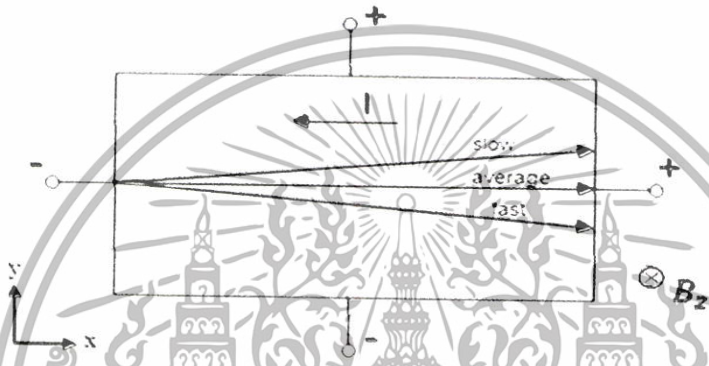


(ข).

รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของฮอลล์เซ็นเซอร์แวนอน (ก) มุมมองด้านบน และ (ข) ภาคตัดขวาง

2.3.1) Physical magnetoresistance effect

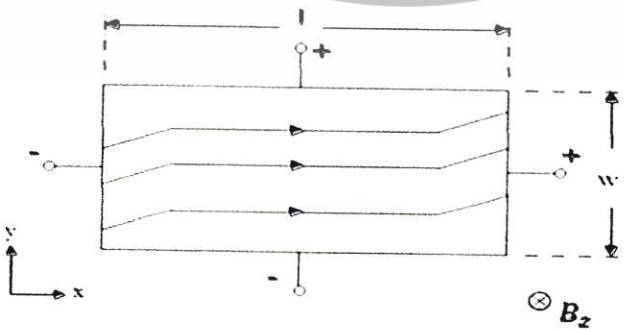
จากที่กล่าวมาเป็นการสมมุติว่าพาหะประจุทั้งหมดมีการกระจายความเร็วที่เท่ากัน แต่ในความเป็นจริงไม่เป็นเช่นนั้นซึ่งในกรณีของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำพาหะประจุจะมีการกระจายความเร็วขึ้นอยู่กับชนิดของสารกึ่งตัวนำและอุณหภูมิ ดังนั้นจึงมีผลทำให้พาหะประจุมีแรงลอเรนซ์ที่ต่างกัน ในกรณีนี้พาหะประจุบางตัวแรงลอเรนซ์จะใหญ่กว่าแรงเนื่องจากผลของสนามไฟฟ้าฮอลล์แต่พาหะประจุบางตัวอาจไม่เป็นเช่นนั้น สิ่งนี้มีผลทำให้พาหะประจุบางตัวเกิดการเบี่ยงเบนขึ้นส่วนพาหะประจุบางตัวเกิดการเบี่ยงเบนลงซึ่งแสดงในรูปที่ 2.7 ปรากฏการณ์นี้นำไปสู่ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานขึ้นเนื่องจากผลของสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 2.7 โครงสร้างแสดงปรากฏการณ์ของ Physical magnetoresistance effect

2.3.2) Geometrical magnetoresistance effect

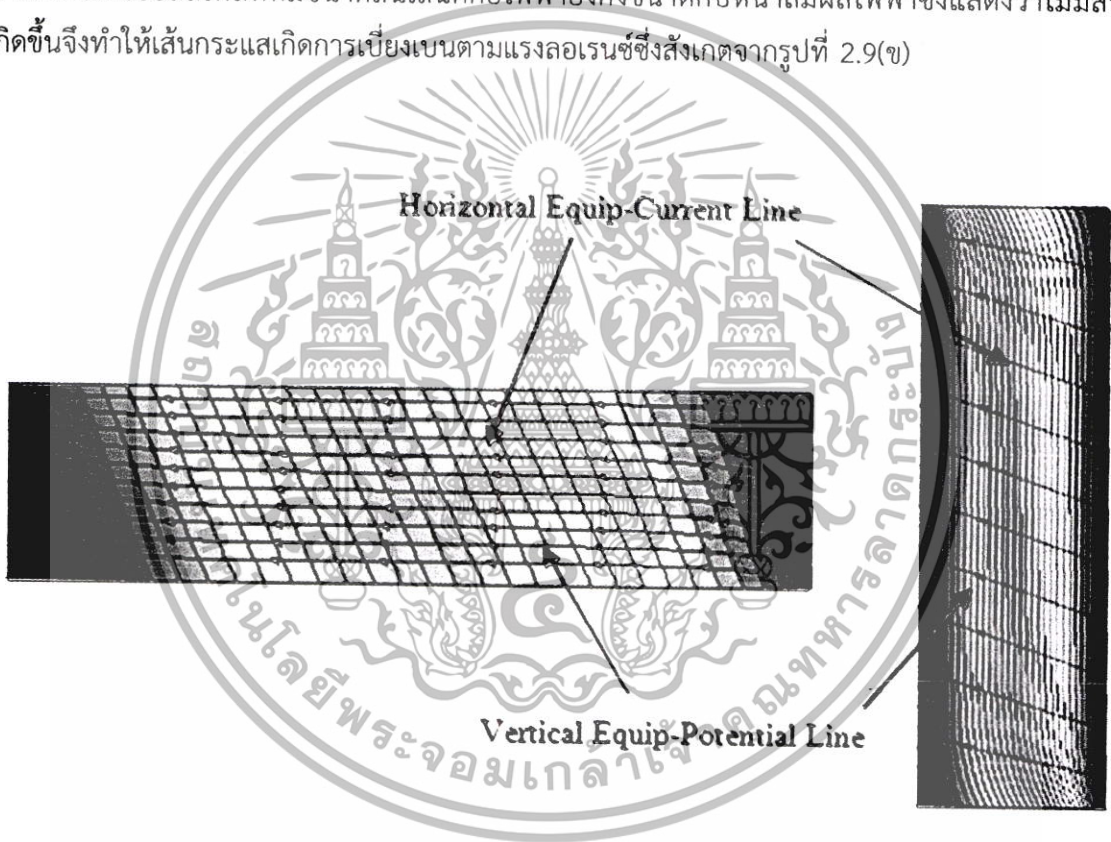
ปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดจากโครงสร้างของฮอลล์เพลทที่เป็นแผ่นยาวโดยปกติจะมีความยาวมากกว่าความกว้าง จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันฮอลล์ขึ้น แรงดันฮอลล์ที่เหนี่ยวนำจะสมดุลกับแรงลอเรนซ์ อย่างไรก็ตามเมื่อออกแบบให้ฮอลล์เพลทที่มีความกว้างมากกว่าความยาวจะมีผลทำให้แรงดันฮอลล์เพลทมีค่าลดลงและไม่สมดุลกับแรงลอเรนซ์ทำให้พาหะเกิดการเบี่ยงเบน ซึ่งการเบี่ยงเบนนี้นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน สาเหตุของความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากรูปร่างของตัวอุปกรณ์หรือที่เรียกว่า Geometrical magnetoresistance effect จากรูปที่



รูปที่ 2.8 โครงสร้างแสดงปรากฏการณ์ของ Geometrical magnetoresistance effect

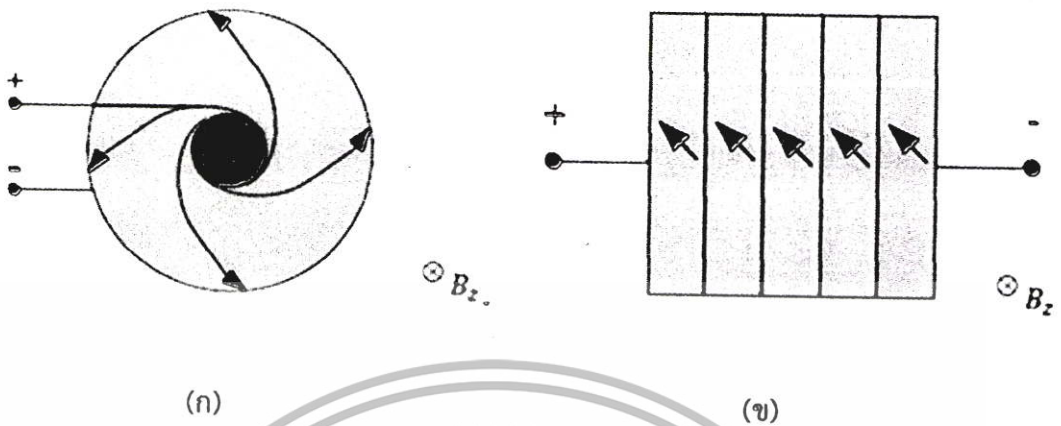
2.8 ปรัชญาการณั้แมกนีโตรีซิสเตนทึ่จะแสดงออกมามากเมือฮอลล์เพลทมีขนาดของความยาวที่สั้นเมื่อเปรียบเทียบกับความกว้างและผลแมกนีโตรีซิสเตนทึ่จะแสดงออกมามากที่สูดบริเวณขั้วสัมผัส

รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์และความหนาแน่นกระแสในฮอลล์เพลท จากตัวอย่างแสดงฮอลล์เพลทที่มีขนาดยาวและขนาดสั้น ความหนาแน่นกระแสถูกแทนที่ด้วยเส้นกระแส (Equip-current lines) (เส้นตรงมีหัวลูกศร) และสนามไฟฟ้าฮอลล์ถูกแทนที่ด้วยเส้นศักย์ไฟฟ้า (Equip-potential lines) (เส้นตรงไม่มีหัวลูกศร) ในบริเวณตรงส่วนกลางของฮอลล์เพลทที่มีขนาดยาวเส้นกระแseyกคงไหลโดยไม่มีกรเบี่ยงเบนเกิดขึ้นเนื่องจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ซึ่งสังเกตได้จากเส้นศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ในแนวตั้งมีการเบี่ยงเบนเกิดขึ้นดังรูป 2.9(ก) และในบริเวณส่วนกลางของแผ่นฮอลล์เพลทที่มีขนาดสั้นเส้นศักย์ไฟฟ้ายกคงขนาดกัหน้าสัมผัสไฟฟ้าซึ่งแสดงว่าไม่มีสนามไฟฟ้าฮอลล์เกิดขึ้นจึงทำให้เส้นกระแสเกิดการเบี่ยงเบนตามแรงลอเรนซึ่ซึ่งสังเกตจากรูปที่ 2.9(ข)



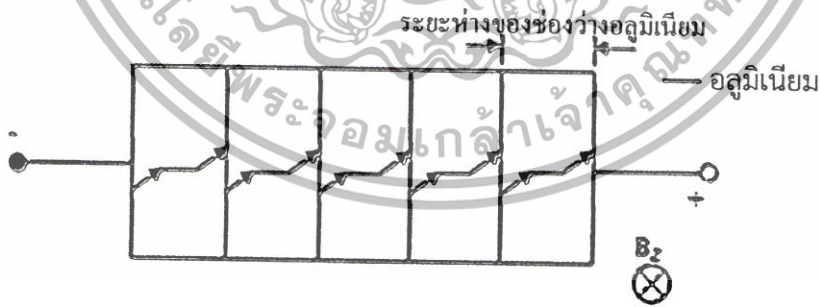
รูปที่ 2.9 แสดงเส้นกระแสและเส้นศักย์ไฟฟ้าในโครงสร้างฮอลล์เพลทที่มีขนาดยาว (l) และขนาดสั้น (s)

ซึ่งการทำให้ผลปรัชญาการณั้แมกนีโตรีซิสเตนทึ่มีค่ามากขึ้นจะต้องทำการออกแบบให้แรงดันฮอลล์มีค่าลดลงหรือไม่สามารถเกิดแรงดันฮอลล์ขึ้นได้เพื่อให้อาหะเกิดการเบี่ยงเบนเนื่องจากแรงลอเรนซึ่อย่างเต็มที่ ซึ่งมีสองวิธีดังแสดงอยู่ในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของแมกนีโตริซิสแตนท์ (ก) แบบวงกลม (ดิสก์) และ (ข) แบบอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนฮอลล์เพลท

จากรูปที่ 2.10(ก) แบบดิสก์จะมีวงกลมวงนอกและวงใน การออกแบบนี้มีผลทำให้ทิศทางของสนามไฟฟ้าฮอลล์เกิดขึ้นไม่ต่อเนื่อง ส่งผลให้ไม่สามารถเกิดแรงดันฮอลล์ขึ้นมาได้ ส่วนอีกหนึ่งวิธีแสดงในรูปที่ 2.10(ข) เป็นการอนุกรมค่าความต้านทานรวมของฮอลล์เพลทโดยอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (L/W) มีค่าน้อยนำมาต่ออนุกรมกัน ส่งผลให้ไม่มีแรงดันฮอลล์เกิดขึ้นมาได้ทำให้พหุเกิดการเบี่ยงเบนตามแรงลอเรนซ์เนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กอย่างไรก็ตามโครงสร้างที่ให้ค่าความต้านทานต่ออนุกรมกันบนโครงสร้างฮอลล์เพลทนี้ค่อนข้างคล้ายเปรียบในเรื่องการออกแบบที่ค่อนข้างยุ่งยากซับซ้อนและระยะห่างระหว่างช่องว่างของอลูมิเนียมมีผลกระทบกับปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแตนท์ดังแสดงในรูป 2.11



รูปที่ 2.11 โครงสร้างที่ให้ค่าความต้านทานต่ออนุกรมกันบนโครงสร้างฮอลล์เพลท

จากรูปที่ 2.11 โดยถ้าช่องว่างของอลูมิเนียมมีระยะห่างระหว่างอลูมิเนียมที่มากขึ้นก็จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์เกิดขึ้นในระหว่างช่องว่างของอลูมิเนียมได้ ซึ่งอาจส่งผลกับค่าแมกนีโตริซิสแตนท์ที่มีค่าลดลง โดยสนามไฟฟ้าฮอลล์จะทำให้การเบี่ยงเบนของพาหะลดลง ดังนั้นเพื่อลดปัญหาดังกล่าวเราจึงทำการออกแบบโครงสร้างของฮอลล์เพลทแบบใหม่

โดยการใช่วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทเพื่อช่วยในเรื่องของการออกแบบที่ค่อนข้างยุ่งยากเกี่ยวกับระยะห่างดังกล่าว

2.4 พารามิเตอร์ที่มีช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์

จากที่กล่าวก่อนหน้านี้ว่าอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุเป็นลบจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วทริฟท์เฉลี่ยผ่านทางฮอลล์เพลทเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดการเบี่ยงเบนเนื่องจากแรงลอเรนซ์ ซึ่งแรงลอเรนซ์หาได้จากสมการที่ 2.2 จากสมการ เราพบว่าแรงลอเรนซ์จะแปรเป็นสัดส่วนกับความเร็ว ทริฟท์ของอิเล็กตรอน ซึ่งความเร็วทริฟท์ของอิเล็กตรอนแปรโดยตรงกับความเข้มสนามไฟฟ้าตามสมการที่ 2.44

$$v = -\mu_n \cdot \mathcal{E}_x \quad (2.44)$$

จากสมการเครื่องหมายลบแสดงความเร็วของอิเล็กตรอนที่มีทิศตรงกันข้ามกับสนามไฟฟ้าและ μ_n คือค่าคงที่ค่าหนึ่งถูกเรียกว่า “สภาพคล่อง” หรือ โมบิลิตี (Mobility) จากสมการที่ (2.44) อาจเขียนใหม่เป็น

$$\mu_n = \frac{v}{\mathcal{E}} \quad (2.45)$$

ดังนั้นเรานิยามสภาพคล่องของพาหะได้ว่า ความเร็วของพาหะต่อหนึ่งหน่วยสนามไฟฟ้า และถูกพิจารณาเป็นค่าคงที่ ซึ่งค่าความคล่องตัวของพาหะเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากของสารกึ่งตัวนำ เพราะมันเป็นตัวบอกลึถึงว่าพาหะจะเคลื่อนที่ได้ดีเพียงใด ซึ่งภายในสารของแข็งประกอบด้วยอะตอมหรือแลตทิซที่มีอยู่อย่างหนาแน่น อะตอมเหล่านี้จะเป็นอุปสรรคและขัดขวางการเคลื่อนที่ของพาหะ ดังนั้นขณะที่พาหะเคลื่อนที่จึงเกิด “การชนกัน” (Collision) ระหว่างพาหะเช่นอิเล็กตรอนหรือโฮลกับอะตอม ซึ่งอาจเป็นอะตอมของสารกึ่งตัวนำเอง หรืออะตอมแปลกปลอมอื่นๆก็ได้ การชนกันนี้จะเกิดขึ้นตลอดเวลา เมื่อเกิดการชนกันความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจึงทำให้ความเร็วของอิเล็กตรอนมีค่าลดลงเป็นศูนย์ หลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่ง ความเร็วก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งมีการชนกันอีกครั้งหนึ่งความเร็วก็จะลดลงเป็นศูนย์อีก ซ้ำไปเช่นนี้เรื่อยๆ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า “การกระเจิง” (Scattering) จะเห็นว่าผลของการชนกัน จึงทำให้ความเร็วของอิเล็กตรอนถูกจำกัด และมีค่าเฉลี่ยค่าหนึ่ง เรียกว่า “ความเร็วทริฟท์” (Drift velocity)

2.4.1 ผลของการชนกัน

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในโลหะหรือสารกึ่งตัวนำ เราจะพิจารณาว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้โดยอิสระในสนามไฟฟ้าคงที่ค่าหนึ่ง และไม่มีสนามอื่นใดหรือสิ่งกีดขวางใดๆเข้ามาเกี่ยวข้องเช่น กรณีของอิเล็กตรอนที่มีมวล m_0

ได้รับสนามไฟฟ้าคงที่ค่าหนึ่ง ทำให้เกิดแรง F กระทำต่ออิเล็กตรอน และทำให้อิเล็กตรอนเกิดการเคลื่อนที่อย่างอิสระ โดยมีความเร่ง a กรณีนี้ความเร็วของอิเล็กตรอนสามารถหาได้ดังนี้

$$F = ma = m \frac{dv}{dt}$$

แต่แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้า \mathcal{E} ที่กระทำต่ออิเล็กตรอนคือ

$$F = -q\mathcal{E} = \text{ค่าคงที่}$$

ดังนั้นจะได้ว่า $m \frac{dv}{dt} = -q\mathcal{E}$ หรือความเร็วของอิเล็กตรอนก็คือ

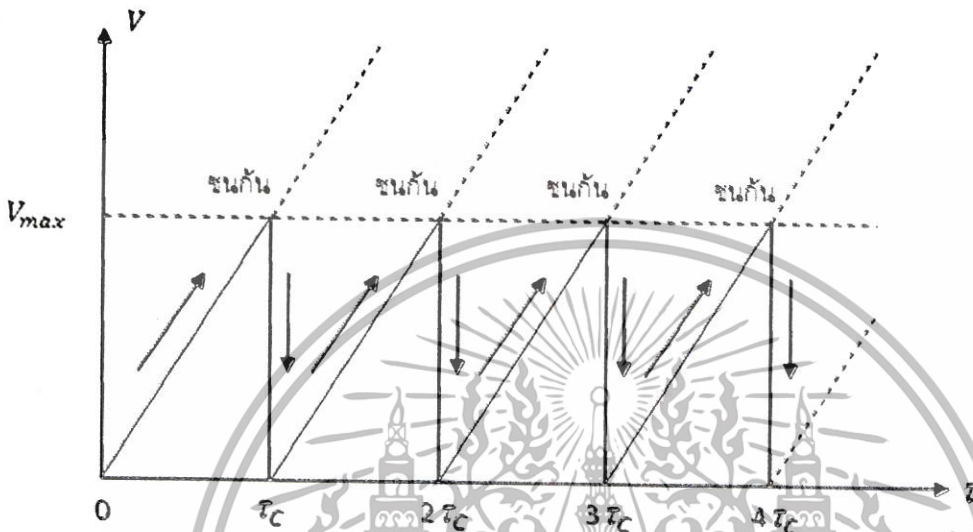
$$v(t) = \frac{-q\mathcal{E} \cdot t}{m} \quad (2.46)$$

จากสมการที่ 2.46 แสดงว่า ถ้าสนามไฟฟ้า \mathcal{E} คงที่ จะทำให้มีแรงค่าคงที่กระทำต่ออิเล็กตรอนตลอดเวลา ความเร็วของอิเล็กตรอนจึงเพิ่มขึ้นกับเวลา หรือก็คือมีความเร่งเกิดขึ้นนั่นเอง เครื่องหมายลบในสมการ (2.46) แสดงถึงทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นทิศตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าการสมมติว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่อย่างอิสระ โดยไม่มีสิ่งกีดขวางใดๆ เข้ามาเกี่ยวข้องไม่สามารถนำมาใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของพาหะในสารของแข็งได้ เพราะโดยความเป็นจริงแล้วภายในโลหะตัวนำหรือสารกึ่งตัวนำ ประกอบด้วยอะตอมหรือแลตทิซจำนวนมากมาย ซึ่งเป็นสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน จึงทำให้มีการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับแลตทิซอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นความเร็วจึงถูกควบคุมจากการชนกันนั่นเอง การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสารของแข็งจึงถูกพิจารณาว่าไม่เป็นไปโดยอิสระเช่นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสุญญากาศ ในการพิจารณาผลที่เกิดจากการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับแลตทิซ ถ้ากำหนดให้ τ_c คือเวลาเฉลี่ยระหว่างการชนกันในแต่ละครั้ง (Mean time between collision) ซึ่งหมายถึงช่วงเวลาของการเคลื่อนที่ซึ่งจะทำให้เกิดการชนกันหนึ่งครั้ง ดังนั้นในเวลา 1 วินาที จะเกิดการชนกันจำนวนเท่ากับ $1/\tau_c$ ครั้งหรือก็คือ จำนวนครั้งของการชนกันใน 1 วินาทีเท่ากับ $1/\tau_c$ ครั้ง หรืออาจเรียกว่า “ความถี่ของการชนกัน” เวลาก่อนที่จะเกิดการชนกันจะเป็นเวลาที่อิเล็กตรอนมีความเร็วสูงสุด คือ v_{max} ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงถูกจำกัดความเร็วที่ $t = \tau_c$ และจะได้ว่า

$$v_{max} = -\frac{q \cdot \mathcal{E} \cdot \tau_c}{m} \quad (2.47)$$

หลังการชนกันอิเล็กตรอนจะมีความเร็วลดลงเป็นศูนย์ทันที ต่อจากนั้นการเคลื่อนที่ก็จะเริ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง โดยความเร็วจะเริ่มจากศูนย์แล้วเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ กับเวลาจนถึงเวลา τ_c ความเร็วก็จะเป็ค่าสูงสุดตามสมการที่ (2.47) การเปลี่ยนแปลงความเร็วกับเวลา t ใดๆ ซึ่งอยู่ในช่วงก่อนการชนกัน ($0 < t < \tau_c$) อาจหาได้จากสมการที่ (2.47) และ

เขียนแสดงเป็นกราฟได้ดังในรูปที่ 2.12 จากรูปที่ 2.12 ซึ่งเป็นผลจากการพิจารณาว่าพาหะเคลื่อนที่โดยไม่มีสนามของแลตทิซเข้ามาเกี่ยวข้อง แต่มีการชนกันกับแลตทิซจะเห็นว่าความเร็วของอิเล็กตรอนยังคงแปรกับเวลาอย่างเชิงเส้น แต่มีความเร็วจำกัดได้สูงสุดที่ v_{max} เนื่องจากการชนกันเกิดขึ้น



รูปที่ 2.12 แสดงความเร็วของอิเล็กตรอนที่เวลาต่างๆในผลึกสารของแข็ง เมื่อพิจารณาว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในโลหะหรือสารกึ่งตัวนำและมีการชนกับแลตทิซ

2.4.2 ผลของอุณหภูมิและความหนาแน่นอะตอมสารเจือที่มีผลต่อความคล่องตัวของพาหะ

จากสมการที่ 2.47 เราสามารถเขียนค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนได้เป็นตามสมการที่ 2.48

$$\mu_n = \frac{q\tau_c}{m} \quad (2.48)$$

จากสมการที่ 2.48 เนื่องจากสภาพคล่องแปรโดยตรงกับเวลาเฉลี่ยระหว่างการชนกันของพาหะกับอะตอมในผลึกสารของแข็งในแต่ละครั้ง หรือ $\mu \propto \tau_c$ ซึ่ง τ_c เป็นเวลาเฉลี่ยระหว่างการชนกันของพาหะกับอะตอมในผลึกสารของแข็งในแต่ละครั้ง ซึ่งอะตอมใดๆ ในผลึกสารของแข็งในที่นี้อาจหมายถึงอะตอมของสารกึ่งตัวนำซึ่งเรียกว่า “แลตทิซ” (Lattice) หรืออาจเป็นอะตอมสารเจือ (Impurity atom) ที่ถูกเติมเข้าไปก็ได้ ดังนั้นจะได้ว่าใน 1 วินาที จะมีการชนกันรวมทั้งหมด $1/\tau_c$ ครั้ง และถ้าให้ τ_L เป็นเวลาเฉลี่ยระหว่างการชนกันของพาหะกับแลตทิซ และ τ_i เป็นเวลาเฉลี่ยระหว่างการชนกันเนื่องจากพาหะกับอะตอมสารเจือ จะได้ว่าใน 1 วินาที จะมีการชนกันของพาหะกับแลตทิซ $1/\tau_L$ ครั้ง และมีการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ $1/\tau_i$ ครั้ง ดังนั้นการชนกันทั้งหมด = การชนกับแลตทิซ + การชนกับอะตอมสารเจือ

หรือ
$$\frac{1}{\tau_C} = \frac{1}{\tau_L} + \frac{1}{\tau_i} \quad (2.49)$$

แต่เนื่องจากสภาพคล่องแปรโดยตรงกับเวลาเฉลี่ยระหว่างการชนกัน ดังนั้นสมการที่ 2.49 สามารถเขียนในรูปของสภาพคล่องได้เป็น

$$\frac{1}{\mu_T} = \frac{1}{\mu_L} + \frac{1}{\mu_i} \quad (2.50)$$

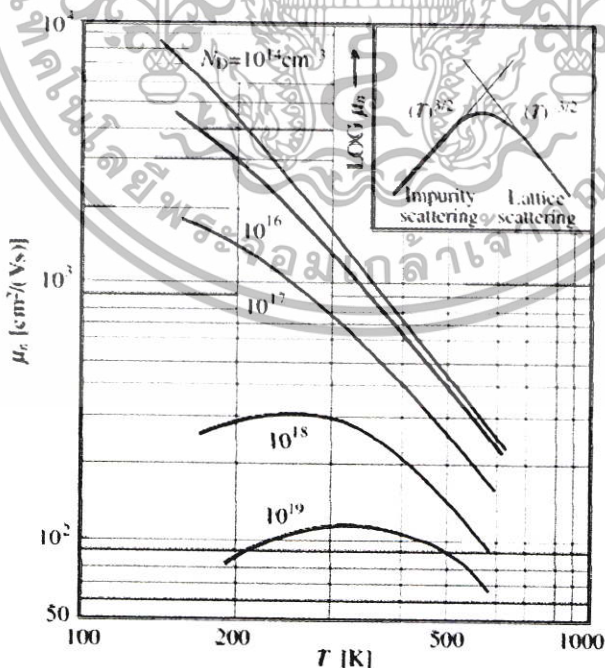
โดยที่

μ_T หมายถึงสภาพคล่องโดยรวมของพาหะ

μ_L หมายถึงสภาพคล่องเนื่องจากการชนกับแลตทิซ

μ_i หมายถึงสภาพคล่องเนื่องจากการชนกับอะตอมสารเจือ

ในกรณีของสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ หรือมีอะตอมสารเจือเพียงเล็กน้อย เช่นน้อยกว่า 10^{16} อะตอมต่อลบ.ซม. ผลของการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือจะมีน้อยกว่าการชนกับแลตทิซทำให้สภาพคล่องของพาหะแปรกับอุณหภูมิเท่านั้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการชนกับแลตทิซจะมีมากขึ้นทำให้สภาพคล่องมีค่าลดลง^[23,24] ดังแสดงในรูปที่ 2.13 เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นพลังงานจากความร้อนจะมีมากพอที่จะทำให้พาหะชนกับแลตทิซมากขึ้น ความเร็วจึงลดลง ดังนั้นในช่วงอุณหภูมิสูงนี้สภาพคล่องของพาหะจะลดลงและจะแปรผันกับ $T^{-3/2}$ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพคล่องของพาหะในสารกึ่งตัวนำที่ถูกเติมอะตอมสารเจืออย่างเข้มข้นจึงต่างไปจากกรณีสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (หรือเมื่อมีอะตอมสารเจือน้อย)



รูปที่ 2.13 การเปลี่ยนแปลงสภาพคล่องของพาหะในสารกึ่งตัวนำซึ่งมีอะตอมสารเจือความเข้มข้นต่างๆกัน

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่ถูกเติมด้วยอะตอมสารเจืออย่างเข้มข้น^[25,26] เช่น มากกว่า 10^{17} อะตอมต่อลบ.ซม. ในกรณีนี้สามารถแยกพิจารณาได้ดังนี้คือ เมื่ออุณหภูมิช่วงต่ำๆ จะมีการชนระหว่างพาหะกับแลตทิสน้อยมาก สภาพคล่องจึงถูกกำหนดด้วยผลของการชนกันระหว่างพาหะกับอะตอมสารเจือเพียงอย่างเดียว ยังมีอะตอมสารเจือมากจะมีการชนกันมาก ทำให้สภาพคล่องยังมีค่าต่ำ^[27] อย่างไรก็ตามในขณะนี้เมื่ออุณหภูมิเริ่มสูงขึ้นเล็กน้อย พลังงานจากความร้อนจะทำให้พาหะมีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้น พาหะจึงมีความเร็วมากขึ้น ดังนั้น ในช่วงนี้จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสภาพคล่องจะเพิ่มขึ้นด้วย จนกระทั่งที่อุณหภูมิค่าหนึ่งสภาพคล่องจะมีค่าสูงสุด^[28] ดังนั้นนอกจากสภาพคล่องจะเกิดจากการชนกับแลตทิส μ_L ซึ่งแปรกับ $\frac{1}{T^{3/2}}$ แล้ว สภาพคล่องยังเกิดขึ้นกับการชนกับอะตอมสารเจือ μ_i จะแปรกับ $\frac{T^{3/2}}{N}$ ซึ่ง N ในที่นี้หมายถึงความหนาแน่นของอะตอมสารเจือทั้งหมดที่มีอยู่ (หรือ $= N_D + N_A$)

จากที่กล่าวมาเราสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในโครงสร้างฮออลล์เพลทได้ ซึ่งในโครงสร้างฮออลล์เพลทผลของปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสเด่นที่ที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยมาก เนื่องจากสนามไฟฟ้าฮออลล์ทำให้การเบี่ยงเบนของพาหะที่เกิดขึ้นเบี่ยงเบนไม่เต็มที่ อย่างไรก็ตามเราพบว่า การเบี่ยงเบนของพาหะจะขึ้นอยู่กับแรงลอเรนซ์ ซึ่งแรงลอเรนซ์จะแปรโดยตรงกับสภาพคล่องของพาหะ ดังนั้นเพื่อให้การเบี่ยงเบนของพาหะมีการเบี่ยงเบนมากขึ้น เราจะต้องทำให้ค่าสภาพคล่องของพาหะมีค่าสูง ซึ่งค่าสภาพคล่องของพาหะจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออยู่ในเงื่อนไขต่อไปนี้

- 1.) อุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิต่ำ พลังงานความร้อนมีค่าน้อยทำให้อะตอมเกิดการสั่น (Thermal vibration) น้อยตามไปด้วย โครงสร้างของแลตทิสจึงอยู่ในสภาวะที่ค่อนข้างนิ่ง กรณีนี้โอกาสที่จะเกิดการชน จึงมีน้อยกว่าที่อุณหภูมิสูงซึ่งการสั่นของอะตอมเกิดขึ้นมาก การชนกันเนื่องจากสาเหตุดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า “การกระเจิงเนื่องจากแลตทิส” (Lattice scattering) หรือ “การกระเจิงเนื่องจากความร้อน” (Thermal scattering) ในทางอุดมคติที่ 0K อะตอมจะไม่มี การสั่นเลย โครงสร้างของแลตทิสจะอยู่ในสภาวะนิ่ง หรือมีลักษณะเป็น Stationary Lattice ดังนั้นการชนกันจะไม่เกิดขึ้นเลย ซึ่งจะทำให้ค่าสภาพคล่องมีค่าสูง
- 2.) ความเข้มข้นของอะตอมสารเจือ อะตอมสารเจือที่ถูกเติมลงไป ในสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดการรบกวนสนามศักย์เดิมของแลตทิส ดังนั้นในบริเวณอะตอมสารเจือสนามศักย์ของแลตทิสจึงมีค่าไม่สม่ำเสมอ เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านจะทำให้มีการหักเหเกิดขึ้นซึ่งเป็นผลให้มีโอกาสชนกันง่ายขึ้น ยิ่งอะตอมสารเจือมีจำนวนมากโอกาสการชนก็จะสูง ซึ่งการชนกรณีนี้ถูกเรียกว่า “การชนเนื่องจากสารเจือ” (Impurity scattering) จึงส่งผลให้สภาพคล่องของพาหะมีค่าลดลง ดังนั้นเพื่อให้สภาพคล่องของพาหะมีค่าสูงขึ้น เราจึงต้องเติมด้วยอะตอมสารเจือน้อยๆ

บทที่ 3

โปรแกรม Sentaurus TCAD และการจำลองแบบ

ในเนื้อหาของบทนี้เราจะกล่าวถึงเครื่องมือที่สำคัญในการจำลองแบบการทำงาน และการจำลองแบบที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ โปรแกรม Sentaurus TCAD (Technology CAD) คือโปรแกรมหนึ่งที่ใช้คอมพิวเตอร์ในการจำลองการทำงาน เพื่อพัฒนาขั้นตอนกระบวนการสร้างหรือพัฒนาตัวอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีทางด้านสารกึ่งตัวนำให้ดีที่สุด ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้เราจึงใช้โปรแกรมการจำลองแบบ TCAD เพื่อช่วยลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการดำเนินการทดสอบ เพื่อพัฒนาและปรับปรุงผลของแมกนีตรัสซิสแตนท์ในโครงสร้างฮอลล์เพลท ตลอดจนการออกแบบต่างๆ เพื่อเพิ่มปรากฏการณ์แมกนีตรัสซิสแตนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลท เช่นการออกแบบเพื่ออนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท และการออกแบบโครงสร้างแบบใหม่โดยใช้วงแหวนอูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท รวมถึงการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีส่วนช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีตรัสซิสแตนท์ให้มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ดีขึ้นด้วย

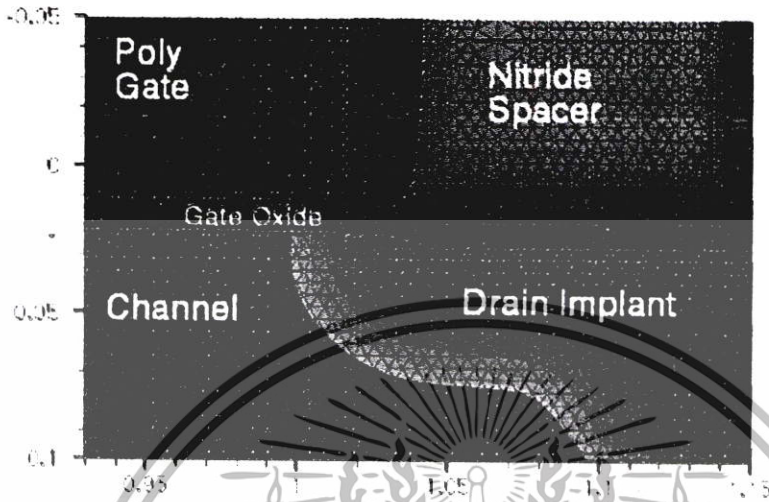
3.1 บทนำ TCAD

การจำลองการทำงาน TCAD ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะกับงานด้านอุตสาหกรรมเซมิคอนดักเตอร์ (semiconductor Industry) เพื่อลดค่าใช้จ่ายและเพิ่มความเร็วในการค้นคว้าวิจัยหรือพัฒนาขั้นตอนกระบวนการสร้างที่เกี่ยวข้อง ซึ่งผู้ผลิตตัวอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ (Semiconductor device) ใช้ TCAD สำหรับการวิเคราะห์ผลซึ่งก็คือการตรวจสอบ, วิเคราะห์, การศึกษาวิธีที่ดีที่สุดขั้นตอนกระบวนการสร้างและยังสามารถวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนกระบวนการสร้างในวงจรรวมได้อีกด้วย โดย TCAD แสดงให้เห็นส่วนประกอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับตัวอุปกรณ์ เช่น โครงสร้าง, ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ, สนามไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า, การฉีดพาหะ และการเบี่ยงเบนของพาหะเนื่องจากผลของสนามแม่เหล็ก โดย TCAD ประกอบด้วยส่วนหลักๆ อยู่ 2 ส่วนในการจำลองการทำงานได้แก่ การจำลองการทำงานที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนกระบวนการสร้าง (process simulation) และการจำลองการทำงานที่เกี่ยวข้องกับตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (device simulation) ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดต่างๆ ต่อไป

3.1.1 การจำลองแบบกระบวนการสร้าง (process simulation)

ในการจำลองแบบกระบวนการสร้างประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ เช่น etching, deposition, ion implantation, thermal annealing and oxidation ซึ่งเป็นการจำลองแบบที่อยู่บนพื้นฐานของสมการทางฟิสิกส์ ในส่วนของการจำลองแบบกระบวนการสร้างจะอยู่บนแผ่นฐานรอง เช่น ซิลิคอน จากนั้นส่วนของการจำลองแบบจะถูก

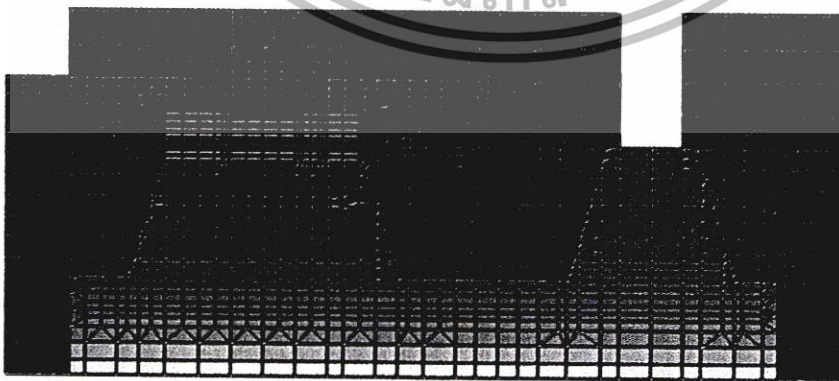
เมส (mesh) หรือกริด(grid) และถูกแทนที่ด้วย finite-element structure เพื่อใช้ในการคำนวณต่อไป ซึ่งในส่วนการจำลองแบบกระบวนการสร้างแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงการจำลองแบบกระบวนการสร้าง

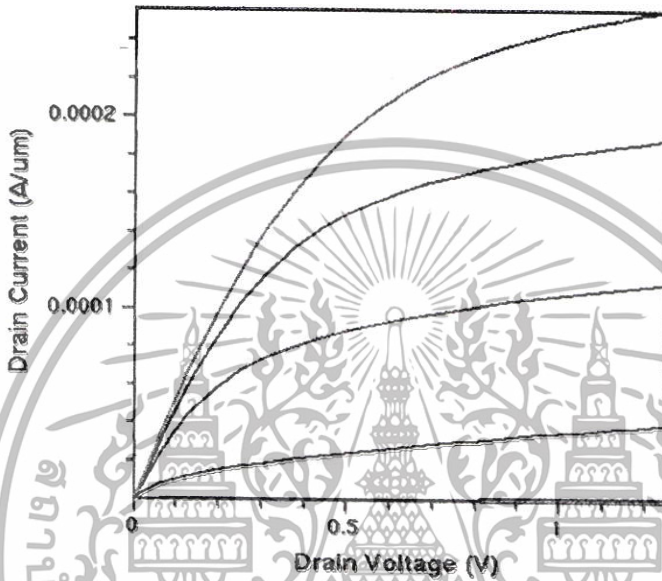
3.1.2 การจำลองแบบการทำงานของตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (device simulation)

ในการจำลองแบบตัวอุปกรณ์ใน TCAD เราสามารถที่จะจำลองแบบคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ ของตัวอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ เช่น คุณสมบัติทางแสงหรือสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะถูกเมส จากนั้นจะถูกแทนที่ด้วย finite-element structure ซึ่งแต่ละโนดของตัวอุปกรณ์จะมีคุณสมบัติทางด้านต่างๆ ที่รวมกันอยู่ เช่น ชนิดของวัสดุ (material type), ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ (doping concentration), ความหนาแน่นกระแส (current density), สนามไฟฟ้า (electric field), อัตราการเกิดและการรวมตัวใหม่ (generation and recombination rates) และคุณสมบัติอื่นๆ ซึ่งแต่ละโนดคุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้ จะถูกนำมาคำนวณซึ่งแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงการจำลองแบบตัวอุปกรณ์โดยการจำลองการทำงานด้วย TCAD

ในการจำลองแบบตัวอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ซั้วไฟฟ้าจะถูกสร้างขึ้นและกำหนดเงื่อนไขขอบเขต เช่น แรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าเป็นต้น การจำลองแบบตัวอุปกรณ์ใน TCAD จะแก้ปัญหาสมการต่างๆมากมายที่เกี่ยวข้องกับการจำลองแบบ เช่น สมการปัวซอง (Poisson equation), สมการความต่อเนื่องของพาหะ (carrier continuity equation) และสมการอื่นๆ หลังจากการแก้สมการเหล่านี้ ผลของกระแสไฟฟ้าที่ได้จะถูกแสดงออกมาในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของการจำลองแบบการทำงานของตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

3.2 โปรแกรมการจำลองแบบ TCAD

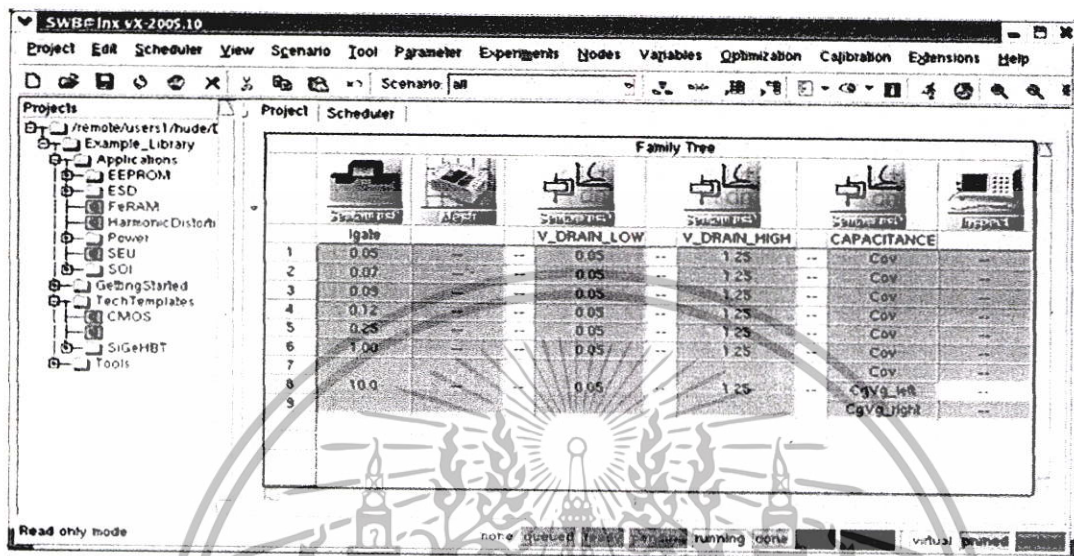
โปรแกรมการจำลองแบบ TCAD จะมีส่วนประกอบย่อยๆ อยู่ 7 ส่วนดังนี้

- 3.2.1 Sentaurus Workbench
- 3.2.2 Sentaurus Process
- 3.2.3 Sentaurus Structure Editor
- 3.2.4 Sentaurus Device
- 3.2.5 Tecplot SV
- 3.2.6 Inspect

3.2.1 Sentaurus Workbench

Sentaurus Workbench เป็นโปรแกรมส่วนหลักที่รวบรวมส่วนต่างๆในโปรแกรมการจำลองแบบ TCAD เข้าไว้ด้วยกันเช่น การจำลองแบบกระบวนการสร้าง(Sentaurus Process) ^[29], การจำลองแบบตัวอุปกรณ์ (Sentaurus

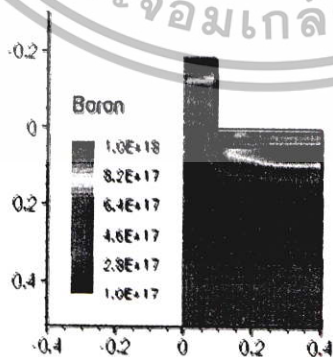
Device)^[30] และเครื่องมือในการวิเคราะห์(Inspect) เป็นต้น โดยโปรแกรม Sentaurus Workbench สามารถให้ผู้ใช้ กำหนดและเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆตามที่ต้องการได้เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการจำลองการทำงาน โดย TCAD ในส่วนของ Sentaurus Workbench แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงโปรแกรมการจำลองแบบส่วนต่างๆใน Sentaurus Workbench

3.2.2 Sentaurus Process

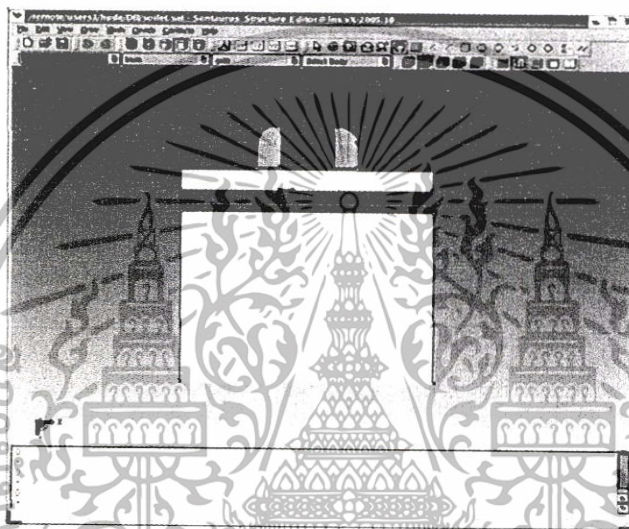
Sentaurus Process เป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับจำลองการทำงานที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนขบวนการสร้าง เช่น etching, deposition, ion implantation, thermal annealing and oxidation ซึ่งใน Sentaurus Process จะใช้ คำสั่งในการจำลองแบบการทำงานซึ่งจะประกอบด้วยคำสั่งต่างๆ เช่น การกำหนดชนิดและตำแหน่งฐานรอง, กระบวนการออกซิเดชัน (oxidation) หรือกระบวนการอิมพลาเนชัน (implantation) เป็นต้น โดยรูปที่ 3.5 แสดง กระบวนการจำลองแบบการอิมพลาเนชัน



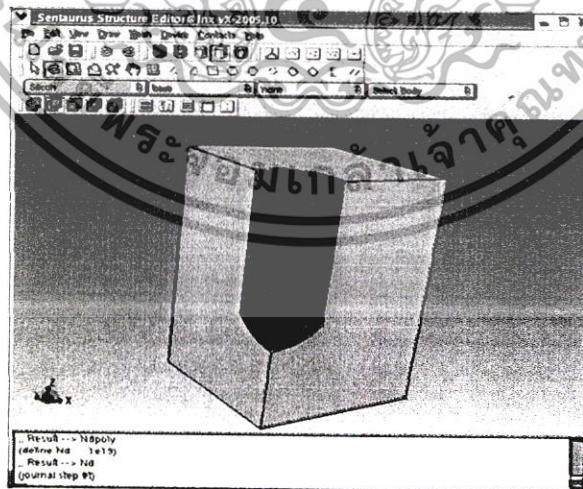
รูปที่ 3.5 แสดงส่วนของการอิมพลาเนชันใน Sentaurus Process

3.2.3 Sentaurus Structure Editor

Sentaurus Structure Editor เป็นส่วนของการออกแบบรูปร่างตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำโดยสามารถที่จะทำการจำลองแบบรูปร่างและขนาดของตัวอุปกรณ์ทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติ โดยขั้นตอนแรกของการจำลองการทำงานทั้งในรูปแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ เราจะทำการสร้างรูปร่างของตัวอุปกรณ์ เช่น สี่เหลี่ยมมุมฉาก(rectangles), รูปหลายเหลี่ยม (polygons), ลูกบาศก์(cuboids), รูปทรงกระบอก(cylinders), รูปทรงกลม(spheres) และรูปต่างๆ เป็นต้น ซึ่งรูปร่างและโครงสร้างที่มีความซับซ้อนเกิดจากรูปร่างง่ายๆเหล่านี้ ซึ่งหน้าต่างในส่วนของ Sentaurus Structure Editor^[31] แสดงในรูปที่ 3.6



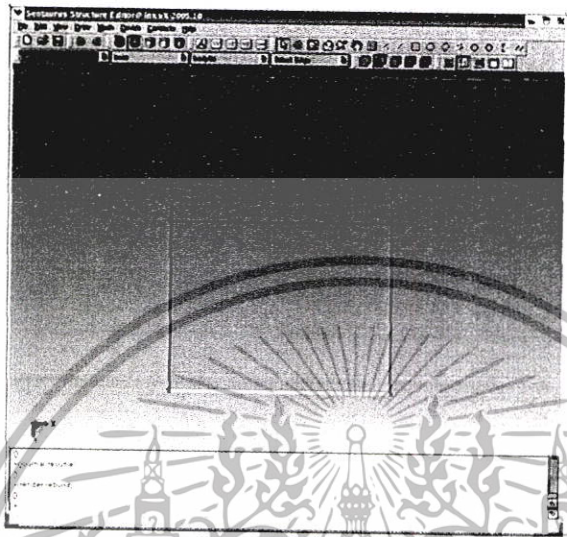
(ก) 2 มิติ



(ข) 3 มิติ

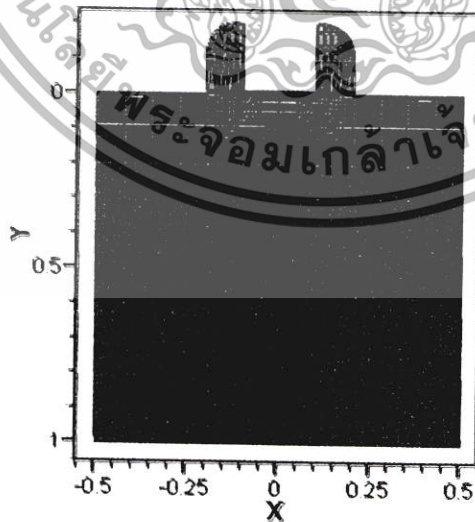
รูปที่ 3.6 แสดงหน้าต่างโปรแกรมในส่วนของ Sentaurus Structure Editor

ในส่วนการจำลองแบบทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติ เราสามารถที่จะกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าให้กับตัวอุปกรณ์เพื่อเชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดกระแสและแรงดันจากภายนอกโดยหลังจากกำหนดหน้าสัมผัสแล้วจะแสดงหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่ตัวอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งส่วนหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่ถูกกำหนดจะแสดงเส้นสีเกิดขึ้นตามคุณสมบัติหน้าสัมผัสที่ตั้งไว้



รูปที่ 3.7 แสดงหน้าสัมผัสไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ในการจำลองการทำงาน

จากนั้นในส่วนของ Sentaurus Structure Editor เราสามารถกำหนดความเข้มข้นอะตอมสารเจือในบริเวณหรือส่วนต่างๆที่สร้างขึ้นมา ต่อจากนั้นจะเป็นการแบ่งกริด(grid) ให้กับตัวอุปกรณ์เพื่อให้อุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานสามารถที่จะแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ รูปที่ 3.8 แสดงการจำลองแบบตัวอุปกรณ์หลังจากการสร้างรูปร่างตัวอุปกรณ์และการแบ่งกริดเสร็จแล้ว



รูปที่ 3.8 แสดงการจำลองตัวอุปกรณ์หลังจากการแบ่งกริด

หลังจากการกำหนดกริดเสร็จแล้วก็จะเป็นการสร้างตัวอุปกรณ์ที่เสร็จสมบูรณ์ ต่อจากนั้นก็เข้าสู่ในส่วนของการกำหนดคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการจำลองแบบตัวอุปกรณ์ ซึ่งในส่วนนี้จะอยู่ในส่วนของ Sentaurus Device ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

3.2.4 Sentaurus Device

Sentaurus Device คือการจำลองแบบคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ เช่นคุณสมบัติทางไฟฟ้า (electrical), ความร้อน(thermal) หรือแสง(optical) ในตัวอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ ซึ่งในคุณสมบัติต่างๆเหล่านี้จะประกอบด้วยโมเดลทางฟิสิกส์ต่างๆมากมายที่เราสามารถที่จะนำมาใช้กับตัวอุปกรณ์ เซมิคอนดักเตอร์หรือคุณสมบัติต่างๆที่เกี่ยวข้องกับสภาพเงื่อนไขในการจำลองแบบ Sentaurus Device จึงถูกใช้ในการประเมินตัวอุปกรณ์และเพื่อความเข้าใจในการทำงานของตัวอุปกรณ์เพื่อให้อุปกรณ์ภายใต้คุณสมบัติต่างๆทำงานได้ดีที่สุด ซึ่งในส่วน Sentaurus Device จะประกอบด้วยส่วนคำสั่งต่างๆมากมาย เช่น

3.2.4.1 File

3.2.4.2 Electrode

3.2.4.3 Physics

3.2.4.4 Plot

3.2.4.5 Solve

3.2.4.1 File

ในส่วน file จะเป็นการกำหนดไฟล์อินพุต และเอาต์พุต ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน เช่น

File {

* Input Files

Grid = "nmos_msh.tdr"

* Output Files

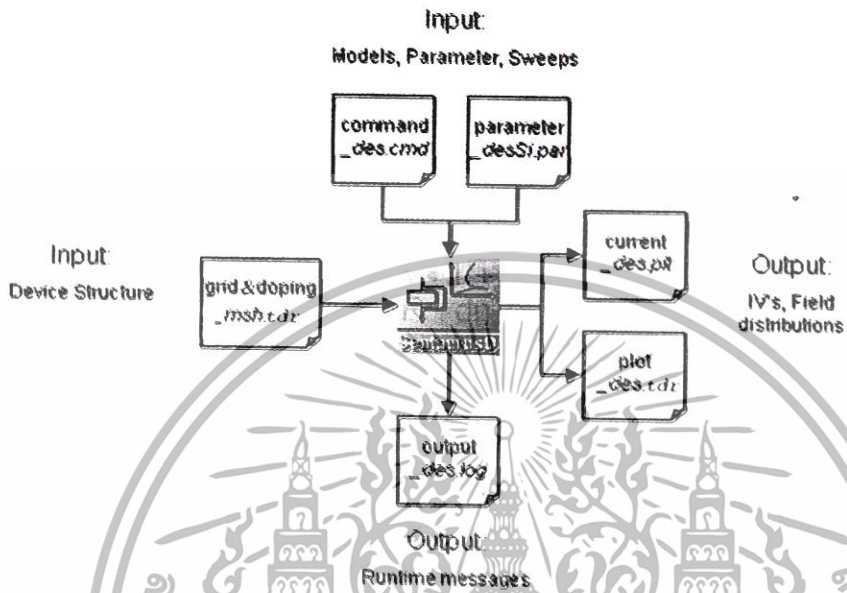
Current = "n1_des.plt"

Plot = "n1_des.tdr"

}

ในส่วนของ Input Files จะเป็นไฟล์ที่ได้หลังจากการสร้าง Sentaurus Structure Editor เสร็จแล้ว เช่นรูปร่างของตัวอุปกรณ์ก็จะประกอบไปด้วยขนาดและวัสดุที่ใช้ในการสร้างตัวอุปกรณ์, ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ, ลักษณะการโด๊ป, ตำแหน่งของหน้าสัมผัสไฟฟ้า และขนาดของการแบ่งกริด(grid) หรือเมส(mesh) เพื่อใช้ในการคำนวณ และในส่วน Output Files ก็จะเป็นไฟล์ที่ประกอบด้วยข้อมูลต่างๆที่ต้องการหลังจาก Sentaurus Device ดำเนินการ

เสร็จแล้ว ซึ่งไฟล์เอาต์พุตเหล่านี้ก็จะประกอบด้วยโมเดลทางฟิสิกส์ต่างๆที่ได้จากการคำนวณแล้ว เช่น ไฟล์ Current ก็ จะประกอบไปด้วยข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้า เป็นต้น ส่วนไฟล์ _des.log เราใช้สำหรับตรวจสอบ ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น ซึ่งไฟล์อินพุต เอาต์พุต ต่างๆแสดงดังในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แผนผังไฟล์อินพุตและเอาต์พุตใน Sentaurus Device

3.2.4.2 Electrode

ในส่วนของ Electrode เป็นการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ให้กับหน้าสัมผัสไฟฟ้า ซึ่งแต่ละหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่ถูกกำหนดอยู่ที่นี่จะต้องสอดคล้องกับชื่อหน้าสัมผัสที่ถูกกำหนดไว้ใน Sentaurus Structure Editor ในส่วนของ Electrode เราสามารถที่จะกำหนดคุณสมบัติของหน้าสัมผัสไฟฟ้าเช่น แรงดัน, กระแส, หน้าสัมผัสไฟฟ้าแบบช็อตกี, และคุณสมบัติอื่นๆ เช่น

```
Electrode {
    { Name="source" Voltage=0.0 }
    { Name="drain" Voltage=0.0 Resistor=100}
    { Name="gate" Voltage=0.0 Barrier=-0.55}
    { Name="base" Voltage=0.0 Current=0 Barrier=-0.55}
```

```
{ Name="HEMTgate" Voltage=0.0 Schottky Barrier=0.78}
```

```
}
```

3.2.4.3 Physics

ในส่วนของ Physics จะเป็นส่วนที่โมเดลทางฟิสิกส์ต่างๆที่ใช้ในการจำลองการทำงานจะถูกนำมาประกาศไว้ในส่วนนี้ ซึ่งตัวอย่างของโมเดลทางฟิสิกส์ เช่น โมเดลที่เกี่ยวกับสภาพคล่องของพาหะ (carrier mobility model), การเกิดและการรวมตัวใหม่ของพาหะ (band-gap narrowing model), การไอออไนซ์เนื่องจากการชน (impact ionization model) เป็นต้น ซึ่งตัวอย่างโมเดลทางฟิสิกส์เช่น

```
Physics {
```

```
  Mobility( DopingDep HighFieldSat )
```

```
}
```

ซึ่ง DopingDep หมายถึง การลดลงของสภาพคล่องของพาหะ เนื่องจากความเข้มข้นอะตอมสารเจือ

HighFieldSat หมายถึง ความเร็วอิ่มตัวของพาหะ (velocity saturation) เมื่ออยู่ในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูง

3.2.4.4 Plot

ในส่วน Plot เป็นส่วนที่เราใช้สำหรับดูการเปลี่ยนแปลงต่างๆที่เกิดขึ้นหลังจากทำการจำลองในส่วนของ Sentaurus Device เสร็จ โดยเราสามารถที่จะกำหนดในสิ่งที่เราต้องการทราบได้ เช่น ความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอนหรือโฮล, ศักย์ไฟฟ้า, สนามไฟฟ้า, โมบิลิตี้, ความเร็วของพาหะหรือ ความเข้มข้นสารเจือ เป็นต้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงต่างๆที่ได้จะเป็นการเปลี่ยนแปลงหลังจากการดำเนินการในส่วนของ Sentaurus Device เสร็จแล้วซึ่งถูกเก็บไว้ในไฟล์เอาต์พุตในส่วนของ File ที่กล่าวไว้ในตอนต้น ซึ่งตัวอย่างในส่วนของ Plot เช่น

```
Plot {
```

```
  eDensity hDensity eCurrent hCurrent
```

```
  Potential SpaceCharge ElectricField
```

```
  eMobility hMobility eVelocity hVelocity
```

```
  Doping DonorConcentration AcceptorConcentration
```

}

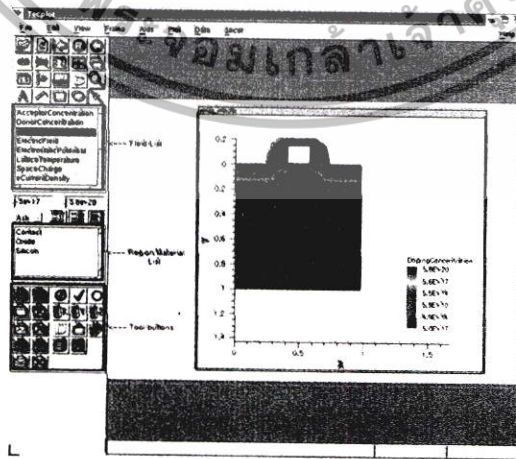
3.2.4.5 Solve

ในส่วนของ Solve จะเป็นส่วนในการกำหนดค่าแรงดันหรือกระแสให้กับหน้าสัมผัสไฟฟ้า และ สมการทางฟิสิกส์ต่างๆ เช่น สมการปัวซอง(Poisson equation), สมการความต่อเนื่องของพาหะ(carrier continuity equations) และสมการอื่นๆที่จำเป็นในการแก้สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการจำลองการทำงาน ซึ่งตัวอย่างของ Solve เช่น

```
Coupled(Iterations=100){ Poisson }  
  
Coupled{ Poisson Electron Hole }  
  
Quasistationary(  
  
  Goal{ Name="contact name" Voltage= voltage value }  
  
{ Coupled{ Poisson Electron Hole } }  
}
```

3.2.5 Tecplot SV

ส่วนของ Tecplot SV เป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับแสดงข้อมูลที่ได้จากการจำลองการทำงานตัวอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ในส่วนต่างๆที่ต้องการทราบซึ่งจะถูกกำหนดไว้แล้วในส่วน Plot โดย Tecplot SV จะแสดงการเปลี่ยนแปลงต่างๆ เช่น ความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอนหรือโฮล, ศักย์ไฟฟ้า, สนามไฟฟ้า, โมบิลิตี้, ความเร็วของพาหะ หรือ ความเข้มข้นสารเจือ เป็นต้น ซึ่งในส่วน Tecplot SV แสดงดังรูปที่ 3.10



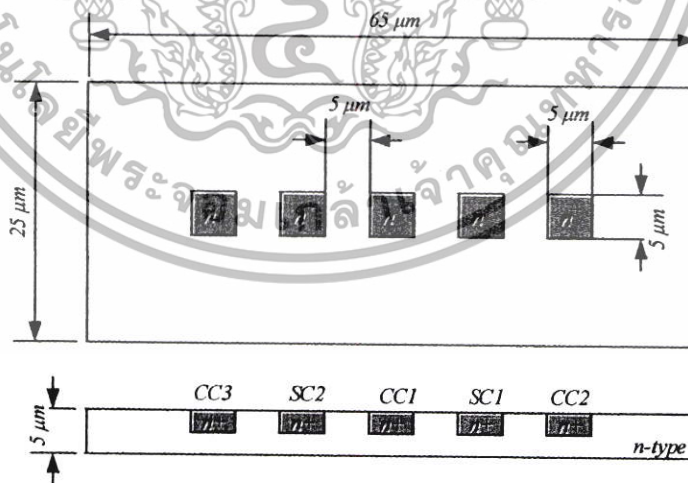
รูปที่ 3.10 แสดงส่วนโปรแกรม Tecplot SV

บทที่ 4

การออกแบบ การทดลอง ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

อุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งโดยทั่วไปจะอาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์อธิบายกลไกที่เกิดขึ้น โดยแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์จะเป็นไปตามสมการแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ของ Hall plate (สมการที่ 5) ซึ่งเรียกอุปกรณ์แบบนี้ว่าเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานแบบ Hall mode แต่ยังมีอุปกรณ์ตรวจสอบสนามแม่เหล็กอีกประเภทที่อาศัยการเบี่ยงเบนของพาหะเนื่องจากแรงโลเร็นตซ์ (Lorentz deflection) ทำให้เกิดความแตกต่างของกระแสเป็นเอาต์พุตที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก ซึ่งอุปกรณ์ประเภทนี้มีก็ถูกออกแบบให้มีรอยสัมผัสที่กระแสไหลผ่านด้านใดด้านหนึ่ง แยกออกเป็นสองรอยสัมผัสเพื่อที่จะใช้วัดความแตกต่างของกระแสที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กหรืออาจเรียกอุปกรณ์ที่ทำงานแบบนี้ว่าเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานแบบ Lorentz mode หากเปรียบเทียบอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งกับอุปกรณ์จำพวก Lorentz mode จะพบว่ามีการแยกรอยสัมผัสกระแสเช่นเดียวกับอุปกรณ์จำพวกนี้ ซึ่งอาจส่งผลให้มีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยเอาต์พุตที่เป็นความแตกต่างของกระแสเช่นเดียวกับแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาผลของการเบี่ยงเบนของกระแสในอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งเพื่อที่จะคาดการณ์ผลกระทบที่เกิดจากการเบี่ยงเบนของกระแสที่อาจส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ ซึ่งในอดีตที่ผ่านมาการจำลองแบบอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งด้วยตัวช่วยต่าง ๆ □ จะไม่ได้กล่าวถึงผลของการเบี่ยงเบนกระแสจากแรงโลเร็นตซ์ ที่อาจส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

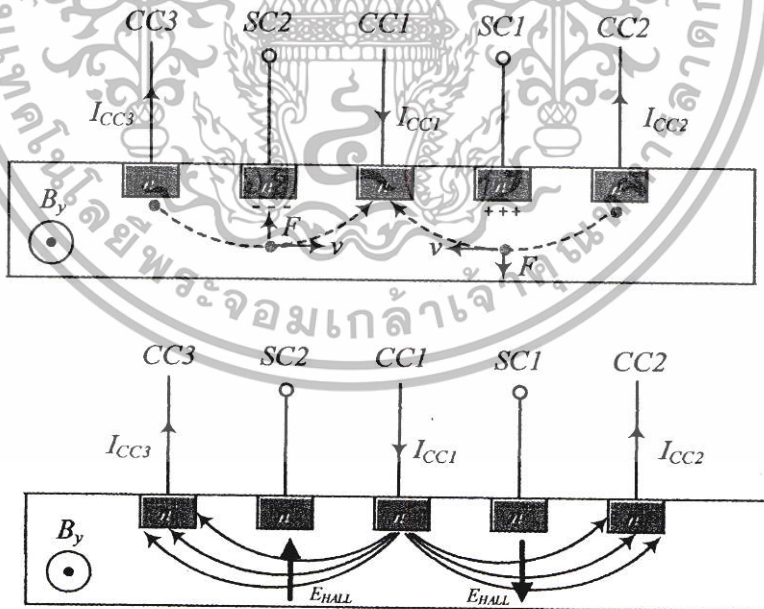
โดยงานวิจัยนี้จึงทำการจำลองแบบด้วยโปรแกรม Sentaurus TCAD ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์สำหรับออกแบบอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในเชิงพาณิชย์ (commercial software) ที่ถูกใช้จริงในอุตสาหกรรมการผลิตวงจรรวม การจำลองแบบด้วยซอฟต์แวร์มีข้อดีคือทำให้เราสามารถเห็นพฤติกรรมของพาหะภายในอุปกรณ์ได้ ดังนั้นจึงสามารถใช้ในการตรวจสอบและวิเคราะห์ผลของกลไกต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ ซึ่งในการวัดจริงไม่สามารถทำได้



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง

โครงสร้างของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งประกอบไปด้วยรอยสัมผัสห้าตัวของอุปกรณ์ที่สร้างอยู่บนฐานรองชนิด n ที่มีความเข้มข้นต่ำ บริเวณรอยสัมผัสจะถูกเจือด้วยฟอสฟอรัสความเข้มข้นสูงเพื่อสร้างเป็นรอยสัมผัสโอห์มิก โดยมีรอยสัมผัส 3 รอยทำหน้าที่เป็นรอยสัมผัสที่กระแสไหลเข้าและไหลออกซึ่งเรียกว่ารอยสัมผัสกระแส (current contact, CC) ส่วนอีกสองรอยสัมผัสจะใช้สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ ซึ่งจะเรียกว่ารอยสัมผัสรับรู้ (sense contact, SC) รอยสัมผัสกระแสทั้งสามจะแบ่งวางอยู่ตรงกลาง (รอยสัมผัส CC1) และประกบด้านข้างทั้งสอง (รอยสัมผัส CC2 และ CC3) ส่วนรอยสัมผัสรับรู้ (รอยสัมผัส SC1 และ SC2) จะวางอยู่ระหว่างรอยสัมผัสกระแสทั้งสามตามรูปที่ 1

การทำงานโดยทั่วไปของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งจะป้อนกระแสเข้าที่รอยสัมผัส CC1 ในขณะที่รอยสัมผัส CC2 และ CC3 ทำหน้าที่เป็นกราวด์ กระแสจะไหลจากรอยสัมผัส CC1 ไปยังรอยสัมผัส CC2 และ CC3 ผ่านรอยสัมผัสรับรู้ SC1 และ SC2 เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศขนานกับผิวของอุปกรณ์และตั้งฉากกับทิศทางของกระแส (B_y) สนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงลอเรนตซ์แก่พาหะภายในอุปกรณ์ อิเล็กตรอนที่เป็นพาหะข้างมากในอุปกรณ์จะเคลื่อนที่ในทิศตรงข้ามกับกระแส จากรอยสัมผัส CC2 และ CC3 ไปยังรอยสัมผัส CC1 เมื่อพิจารณาพาหะอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่อยู่ใต้รอยสัมผัสรับรู้ทั้งสอง อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากรอยสัมผัส CC3 ไปยัง CC1 จะถูกแรงลอเรนตซ์ผลักให้ไปสะสมยังบริเวณผิวที่รอยสัมผัส SC2 ในทางตรงกันข้ามอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากรอยสัมผัส CC2 ไปยัง CC1 จะถูกผลักลงมายังผิวล่างที่รอยสัมผัส SC1 การสะสมของพาหะดังกล่าวจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้าใต้รอยสัมผัส SC1 และ SC2 ตามรูปที่ 2 สนามไฟฟ้างดังกล่าวจะเรียกว่า สนามไฟฟ้าฮอลล์ (E_H) ซึ่งกลไกที่เกิดขึ้นเป็นปรากฏการณ์ฮอลล์โดยทั่วไป ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) จะสามารถหาได้จากผลต่างระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่รอยสัมผัส SC1 และ SC2 ซึ่งก็คือแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ ตามสมการ



รูปที่ 4.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง

$$V_{output} = V_{SC1} - V_{SC2} = V_H \quad (4.1)$$

ซึ่ง V_{SC1} , V_{SC2} คือแรงดันไฟฟ้าที่รอยสัมผัส SC1 และ SC2

ในการจำลองแบบอุปกรณ์ด้วย Sentaurus TCAD เราจะจำลองแบบตัวอุปกรณ์ที่มีความหนา 5 ไมครอน เนื่องจาก โดยทั่วไปแล้วตัวอุปกรณ์จะถูกสร้างเป็น well ลงบนฐานรองชนิด p อีกทีหนึ่ง เพื่อทำการแยกขาดทางไฟฟ้าให้ตัวอุปกรณ์ ซึ่งความลึกของ well โดยทั่ว ๆ ไปจะถูกกำหนดอยู่ที่ 5 ไมครอน การจำลองแบบจึงกำหนดความหนาของตัวอุปกรณ์ให้มีขนาด 5 ไมครอน เพื่อลดระยะเวลาในการจำลองแบบส่วนที่ไม่จำเป็น ฐานรองของตัวอุปกรณ์จะถูกกำหนดให้มีความเข้มข้น 10^{15} และ 10^{16} cm^{-3} เพื่อนำมาเปรียบเทียบผลที่เกิดจากการเบี่ยงเบนของกระแส รอยสัมผัสทั้งห้าจะถูกเจือด้วยความเข้มข้น $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ เพื่อสร้างเป็นรอยสัมผัสโอห์มิก (บริเวณสีแดง) ดังแสดงในรูปที่ 3 สำหรับการป้อนกระแสให้อุปกรณ์เราจะทำการป้อนกระแสขนาด 0.5 mA เข้าที่รอยสัมผัส CC1 และใส่สนามแม่เหล็กในทิศ y โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 จนถึง 0.4 เทสลา เพื่อดูการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์



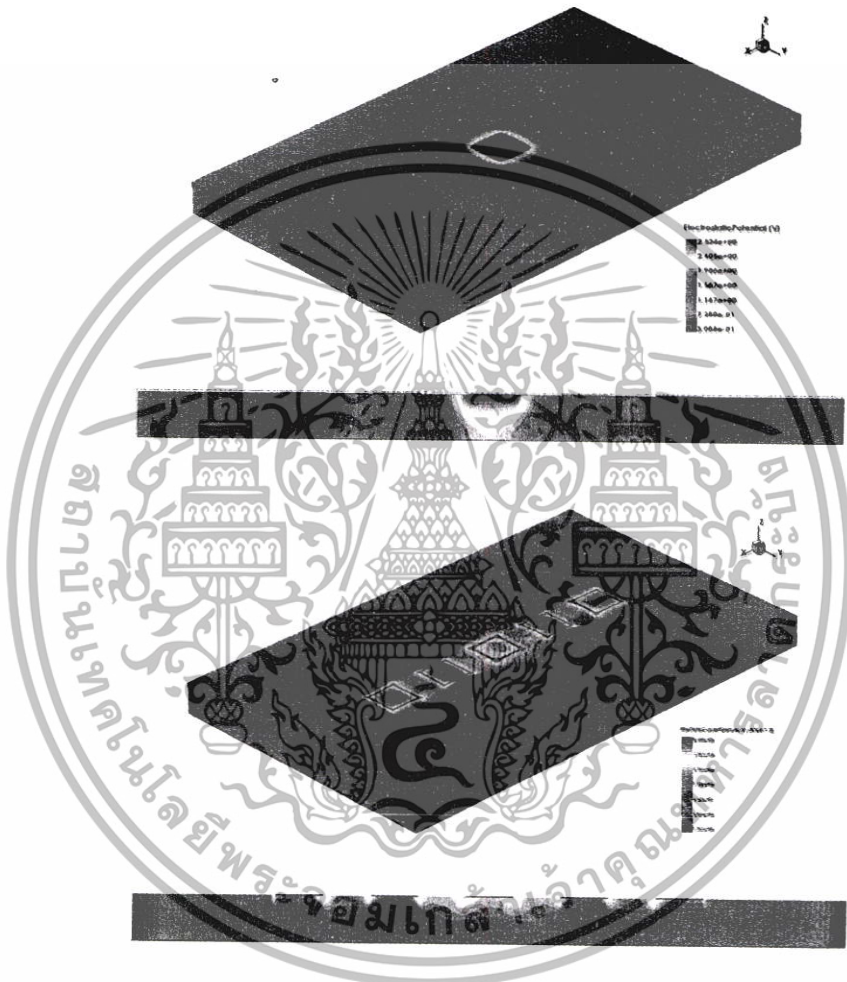
รูปที่ 4.3 โครงสร้างของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งที่จำลองด้วย Sentaurus TCAD

สำหรับการจำลองผลกระทบจากสนามแม่เหล็กภายในอุปกรณ์ ด้วยโปรแกรม Sentaurus TCAD การไหลของพาหะในอุปกรณ์จะใช้สมการขนส่งแบบ Galvanic transport [1] ที่มีพื้นฐานมาจากสมการความหนาแน่นกระแสการแพร่-ลอยเลื่อน โดยเพิ่มเทอมที่ขึ้นกับสนามแม่เหล็กเข้าไปดังสมการ

$$\vec{J}_\alpha = \mu_\alpha \vec{g}_\alpha + \mu_\alpha \frac{1}{1 + (\mu_\alpha^* B)^2} [\mu_\alpha^* \vec{B} \times \vec{g}_\alpha + \mu_\alpha^* \vec{B} \times (\mu_\alpha^* \vec{B} \times \vec{g}_\alpha)] \quad (4.2)$$

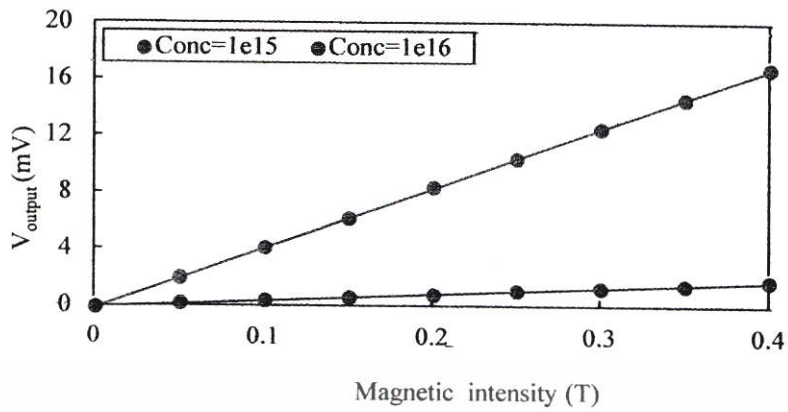
โดย $\alpha = n$ หรือ p , \vec{g}_α คือเวกเตอร์กระแสที่ไม่ขึ้นกับสภาพคล่องของพาหะ, μ_α^* คือสภาพคล่องฮอลล์, μ_α คือสภาพคล่องของพาหะ, \vec{B} คือเวกเตอร์สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำและ B คือขนาดของเวกเตอร์

ผลการจำลอง แสดงการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสในอุปกรณ์ที่มีฐานรองความเข้มข้น 10^{15} cm^{-3} (รูปที่ 4) โดยเฉดสีบ่งบอกถึงขนาดของศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแส จากรูปการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า บริเวณที่มีสีแดงเป็นบริเวณที่มีศักย์ไฟฟ้าสูง (รอยสัมผัส CC1) ซึ่งเป็นบริเวณที่ทำการป้อนกระแส ส่วนบริเวณที่มีสีน้ำเงินเป็นบริเวณที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำ (รอยสัมผัส CC2 และ CC3) ซึ่งเป็นกราวด์ของอุปกรณ์ สำหรับการกระจายตัวของความหนาแน่นกระแสก็บ่งบอกเช่นเดียวกับการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า



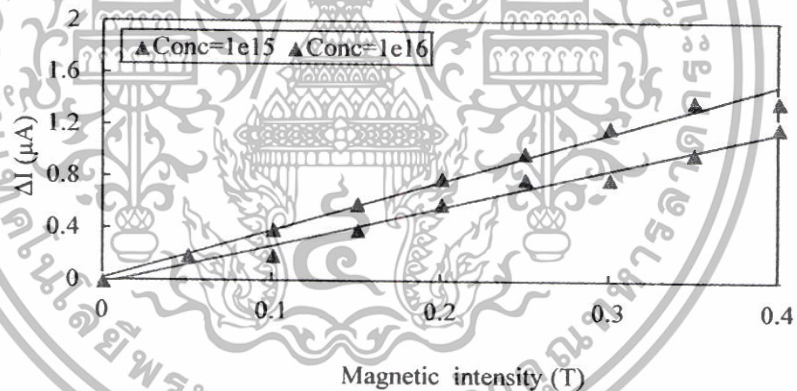
รูปที่ 4.4 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสบนอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง

จากการจำลองแบบด้วยโปรแกรม Sentaurus TCAD ได้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตต่อสนามแม่เหล็กสำหรับอุปกรณ์ที่มีความเข้มข้นของฐานรอง 10^{15} และ 10^{16} cm^{-3} ดังรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าผลการตอบสนองมีลักษณะเป็นเชิงเส้นที่ดี โดยมีความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่สัมพันธ์กับกระแส (current-related sensitivity, S_i) เท่ากับ 84.3 V/A-T และ 9.2 V/A-T สำหรับฐานรองที่มีความเข้มข้น 10^{15} และ 10^{16} cm^{-3} ตามลำดับ ซึ่งอุปกรณ์ที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าจะตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กดีกว่าตามสมการที่ (5)



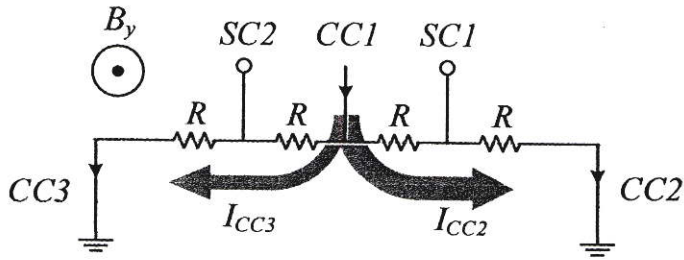
รูปที่ 4.5 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก

ผลที่ได้จากการจำลองพบว่า นอกจากแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแล้วยังมีความแตกต่างของกระแส (ΔI) ที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในลักษณะเดียวกัน (รูปที่ 6) ซึ่งการตอบสนองมีลักษณะคล้ายกับเอาต์พุตของอุปกรณ์ที่ทำงานแบบ Lorentz mode โดยอาศัยการเบี่ยงเบนของกระแสเป็นเอาต์พุตที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก เพราะฉะนั้นอาจเรียก ΔI ได้ว่ากระแสเบี่ยงเบน



รูปที่ 4.6 ความแตกต่างของกระแสที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก

โดยทั่วไปแล้วแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งจะเป็นไปตามสมการที่ (6) นั่นคือแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ทั้งหมดจะเป็นแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ ซึ่งแรงดันไฟฟ้าฮอลล์สามารถหาได้เช่นเดียวกับ Hall plate ตามสมการที่ (5) แต่จากผลการจำลองที่ได้ แสดงให้เห็นว่าเกิดความแตกต่างของกระแส ($I_{CC2} \neq I_{CC3}$) ซึ่งตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเช่นเดียวกับแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ หากพิจารณาวงจรสมมูลอย่างง่ายของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง (รูปที่ 7) จะพบว่าความแตกต่างของกระแสจะส่งผลให้เกิดความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าที่รอยสัมผัสรับรู้อันทั้งสอง (V_{SC1}, V_{SC2})

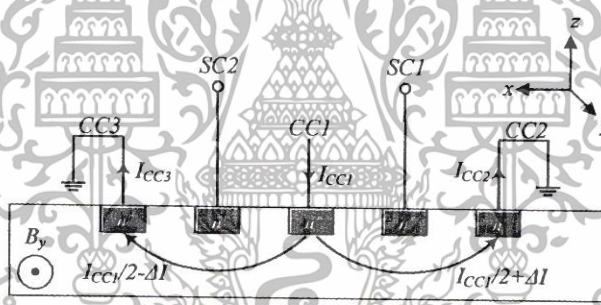


รูปที่ 4.7 วงจรสมมูลอย่างง่ายของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ที่วัดจากรอยสัมผัสรับรู้ทั้งสองจะประกอบไปด้วยแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ และแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการเบี่ยงเบนของกระแส (V_{Δ}) เราจึงสามารถเขียนสมการที่ (6) ได้ใหม่เป็น

$$V_{output} \equiv V_{SC1} - V_{SC2} = V_H + V_{\Delta} \quad (4.3)$$

โดยค่าความแตกต่างของกระแสที่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า V_{Δ} สามารถระบุได้ตามรูป



รูปที่ 4.8 กระแสที่เกิดการเบี่ยงเบนภายในอุปกรณ์

จากรูปกระแสเบี่ยงเบนสามารถหาได้จาก

$$\Delta I = \frac{|I_{CC2} - I_{CC3}|}{2} \quad (4.4)$$

โดย I_{CC2} และ I_{CC3} คือกระแสที่รอยสัมผัส CC2 และ CC3 ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$I_{CC2} = \frac{I_{CC1}}{2} + \Delta I \quad (4.5)$$

$$I_{CC3} = \frac{I_{CC1}}{2} - \Delta I \quad (4.6)$$

เมื่อ I_{CC1} คือกระแสที่ถูกป้อนเข้ารอยสัมผัส CC1 ดังนั้น

$$I_{CA} = I_{CC2} + I_{CC3} \quad (4.7)$$

ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสเบี่ยงเบน (V_{Δ}) สามารถหาได้ตามความสัมพันธ์

$$V_{\Delta} = (\Delta I)R - (-\Delta I)R \quad (4.8)$$

เมื่อ R คือความต้านทานเนื้อสารและ ΔI คือกระแสเบี่ยงเบนหรือผลต่างของกระแส

ค่าแรงดันไฟฟ้า V_{Δ} ที่ได้จากการจำลองจะแสดงอยู่ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการเบี่ยงเบนของกระแส

| B (T) | ความเข้มข้น 10^{15} cm^{-3} | | | ความเข้มข้น 10^{16} cm^{-3} | | |
|-------|---------------------------------------|-------------------|----------------|---------------------------------------|-------------------|----------------|
| | V_{output} (mV) | V_{Δ} (mV) | % V_{Δ} | V_{output} (mV) | V_{Δ} (mV) | % V_{Δ} |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 2.1 | 0.7 | 33.3 | 0.3 | 0.1 | 33.3 |
| 0.10 | 4.2 | 0.7 | 16.7 | 0.5 | 0.2 | 40.0 |
| 0.15 | 6.3 | 1.5 | 23.8 | 0.7 | 0.3 | 42.9 |
| 0.20 | 8.5 | 2.2 | 25.9 | 0.9 | 0.3 | 33.3 |
| 0.25 | 10.5 | 3.0 | 28.6 | 1.2 | 0.4 | 33.3 |
| 0.30 | 12.6 | 3.0 | 23.8 | 1.4 | 0.5 | 35.7 |
| 0.35 | 14.7 | 3.7 | 25.2 | 1.6 | 0.6 | 37.5 |
| 0.40 | 16.9 | 4.4 | 26.0 | 1.9 | 0.6 | 31.6 |

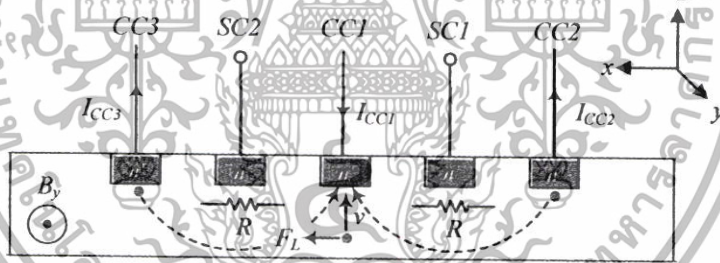
จากตารางจะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการเบี่ยงเบนของกระแสสำหรับอุปกรณ์ที่มีฐานรองความเข้มข้น 10^{15} cm^{-3} มีค่ามากกว่าอุปกรณ์ที่มีฐานรองความเข้มข้น 10^{16} cm^{-3} เนื่องจากอุปกรณ์ที่มีฐานรองความเข้มข้น 10^{15} cm^{-3} มีความต้านทานเนื้อสาร (R) ที่มากกว่าตามความสัมพันธ์ $R \propto \rho$ เมื่อสภาพต้านทานไฟฟ้าสำหรับฐานรองชนิดกเป็นไปตามสมการ

$$\rho \cong \frac{1}{qn\mu_n} \quad (4.9)$$

เมื่อ q คือประจุไฟฟ้า, n คือความเข้มข้นของอิเล็กตรอน, μ_n คือสภาพคล่องของอิเล็กตรอน

อุปกรณ์ที่มีฐานรองความเข้มข้น 10^{15} cm^{-3} ถึงแม้จะมีกระแสเบี่ยงเบนที่ต่ำกว่า (รูปที่ 6) อันเนื่องมาจากจำนวนพาหะที่น้อยกว่า แต่ด้วยสภาพต้านทานที่สูงกว่ามากจึงทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสเบี่ยงเบนที่มากตาม

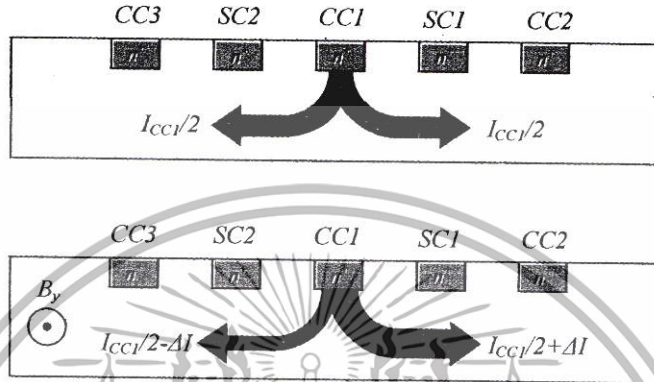
สำหรับเปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสเบี่ยงเบน ($\%V_{\Delta}$) เมื่อคิดเทียบกับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ทั้งหมด พบว่าอุปกรณ์ที่มีฐานรองความเข้มข้น 10^{16} cm^{-3} มีค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสเบี่ยงเบนสูงกว่า (ประมาณ 30 - 40%) อุปกรณ์ที่มีฐานรองความเข้มข้น 10^{15} cm^{-3} (ประมาณ 20 - 30%) หากพิจารณาสมการที่ (5) และ (14) เมื่อความเข้มข้นของฐานรองสูงขึ้นจะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าฮอลล์มีค่าลดลงพร้อมกันนั้นสภาพต้านทานของฐานรองจะลดลงไปพร้อมกันด้วย เมื่อสภาพต้านทานลดลงจึงส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการเบี่ยงเบนของกระแสลดลงไปด้วย แต่เทอมการลดลงระหว่างเทอมแรงดันไฟฟ้าฮอลล์และเทอมแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสเบี่ยงเบนจะลดลงในสัดส่วนที่แตกต่างกัน ซึ่งเทอมแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ลดลงในสัดส่วนที่มากกว่าเทอมแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสเบี่ยงเบน จึงทำให้เปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสเบี่ยงเบนของอุปกรณ์ที่มีฐานรองความเข้มข้น 10^{16} cm^{-3} มีค่าเปอร์เซ็นต์ที่สูง



รูปที่ 4.9 กลไกการเบี่ยงเบนพาหะในอุปกรณ์

การเบี่ยงเบนของกระแสที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งเกิดจากกลไกการเบี่ยงเบนของพาหะภายในอุปกรณ์ เมื่อพิจารณาพาหะข้างมากที่เป็นอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่อยู่ใต้รอยสัมผัส CC1 ตามรูปที่ 9 เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านอุปกรณ์ในทิศ y พาหะที่อยู่ใต้รอยสัมผัส CC1 (เคลื่อนที่ตามทิศ z) เหล่านี้จะถูกแรงลอเรนตซ์ผลักไปยังทิศ x ส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลของพาหะที่เคลื่อนที่จากรอยสัมผัส CC2 และ CC3 ไปยังรอยสัมผัส CC1 จึงทำให้กระแสทั้งสองฝั่งมีค่าแตกต่างกัน โดยกระแสอีกฝั่งจะเบี่ยงเบนไปยังอีกฝั่ง ดังนั้นกระแสฝั่งหนึ่งจะเพิ่มขึ้นส่วนอีกฝั่งจะลดลงในสัดส่วนที่เท่ากัน โดยฝั่งที่กระแสเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าฝั่งนั้นเพิ่มขึ้นตามในทางกลับกันกระแสอีกฝั่งที่ลดลงก็จะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ฝั่งนั้นลดลง เมื่อนำแรงดันไฟฟ้าที่รอยสัมผัสของแต่ละฝั่งมาหาความแตกต่างก็จะทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสเบี่ยงเบน หากสังเกตตามรูปที่ 9 พาหะที่เคลื่อนด้วยความเร็ว v ในทิศ z ถูกแรงลอเรนตซ์ผลักเบี่ยงเบนไปยังทิศ x จึงทำให้กระแสที่รอยสัมผัส CC2 มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันกระแสที่รอยสัมผัส CC3

จะลดลงเนื่องจากกระแสบางส่วนถูกเบี่ยงเบนไปยังฝั่งรอยสัมผัส CC2 ดังนั้นกระแสที่ไหลจากรอยสัมผัส CC1 ไปยังรอยสัมผัส CC2 จะเพิ่มขึ้นด้วยเทอมของกระแสเบี่ยงเบน ΔI เมื่อกระแสส่วนที่เพิ่มขึ้นวิ่งผ่านความต้านทานเนื้อสารระหว่างรอยสัมผัส CC1 และ CC2 บริเวณรอยสัมผัสรับรู้ SC1 จะมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น ในทางกลับกันกระแสที่ไหลจากรอยสัมผัส CC1 ไปยังรอยสัมผัส CC3 จะลดลงด้วยเทอมของ $-\Delta I$ จึงทำให้แรงดันไฟฟ้าบริเวณรอยสัมผัสรับรู้ SC2 ลดลง



รูปที่ 4.10 การเบี่ยงเบนของกระแสขณะที่มีและไม่มีสนามแม่เหล็ก

จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสเบี่ยงเบนมีสัดส่วนอยู่ที่ประมาณ 20-30% และ 30-40% สำหรับอุปกรณ์ที่มีฐานรองความเข้มข้น 10^{15} และ 10^{16} cm^{-3} ตามลำดับ โดยอุปกรณ์ที่มีความเข้มข้นต่ำจะมีแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสเบี่ยงเบนที่สูงกว่า ซึ่งการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการเบี่ยงของกระแสสำหรับกรณีนี้มีความสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากปรากฏการณ์ฮอลล์ ดังนั้นแล้วหากทำการออกแบบโดยคำนึงถึงปรากฏการณ์ทั้งสองที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ อาจพัฒนาตัวอุปกรณ์ให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นได้ด้วยผลการทดลองดังกล่าวจึงสรุปได้ว่า สำหรับอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของตัวอุปกรณ์นอกจากจะมีส่วนที่เกิดจากปรากฏการณ์ฮอลล์แล้ว ยังมีส่วนที่เกิดจากกลไกการเบี่ยงเบนของกระแสร่วมด้วย นั้นหมายความว่ากลไกการเบี่ยงของกระแสยังเป็นกลไกที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งสำหรับอุปกรณ์ชนิดนี้

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษากลไกการทำงานของอุปกรณ์ฮอลล์เพลตในแนวตั้ง ทำให้ทราบว่านอกจากกลไกการที่แรงดันฮอลล์ถูกเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กตัดกับกระแสแนวราบกับพื้นผิวเกิดแรงกระทำกับพาหะทำให้เกิดการสะสมประจุที่พื้นผิวแตกต่างกัน ทำให้เกิดค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เอARTH พูขึ้น ค่าแรงดันนี้คือค่าแรงดันฮอลล์ซึ่งจะแปรผันตามค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก แต่ยังมีปัจจัยอีกอย่างเกิดขึ้นในขณะเดียวกันนั่นคือการเบี่ยงเบนของกระแสที่บริเวณตรงกลางของขั้วกระแสรวม ไปยังขั้วกระแสทางด้านข้างทั้งซ้ายและขวา ทำให้ค่ากระแสทั้งสองมีค่าแตกต่างกัน ΔI ซึ่งค่าความแตกต่างของกระแสค่านี้จะทำให้เกิดค่าแรงดันตกคร่อมในเนื้อสารและบริเวณขั้วแรงดันทั้งสองข้างทำให้เกิดค่านี้อีกค่าหนึ่งและลดลงด้านหนึ่ง เป็นผลทำให้เกิดค่าความแตกต่างของแรงดันระหว่างขั้วเอARTH พูทั้งสอง ค่าแรงดันนี้คือค่าส่วนหนึ่งของแรงดันฮอลล์ ดังนั้นค่าแรงดันฮอลล์ที่เกิดขึ้นจึงมาจากกลไกการทำงานทั้งสองส่วนร่วมกัน ค่าแรงดันฮอลล์ที่ได้จากสองส่วนนี้จากที่ได้ศึกษาโดยใช้แผ่นฐานเป็นซิลิกอนชนิดเอ็น ปรากฏว่าค่าแรงดันฮอลล์ที่ได้มีค่าเสริมกันนั่นหมายความว่าค่าแรงดันฮอลล์มีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าปกติ เพื่อการออกแบบให้อุปกรณ์ฮอลล์มีค่าความไวสูงสุด ได้ทำการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นสารเจือ จากการศึกษพบว่า อุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งที่สร้างจากแผ่นฐานที่มีความเข้มข้นต่ำจะให้ค่าความไวอุปกรณ์ที่สูงกว่ามีเปอร์เซ็นต์ของแรงดันฮอลล์ที่เกิดจากกลไกการเบี่ยงเบนกระแสมีค่าน้อยกว่ากรณีแผ่นฐานมีความเข้มข้นสูงกว่า ดังนั้นจากการที่ค้นพบกลไกการเบี่ยงเบนกระแสจึงเป็นปัจจัยหนึ่งในการออกแบบอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งที่ความไวสูงที่กินพลังงานค่าเดียวกัน

ข้อเสนอแนะ

จากที่ได้ทำการค้นพบกลไกการทำงานที่แอบแฝงอยู่ในอุปกรณ์ฮอลล์แบบแนวตั้ง ทำให้การออกแบบควรรำถึงปัจจัยนี้ด้วย การเบี่ยงเบนกระแสในโครงสร้างอาจมีทั้งแง่ดีและไม่ดีต่อการทำงานของอุปกรณ์ได้ ดังนั้นปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อกลไกการทำงานนี้ควรจะถูกนำมาพิจารณาให้รอบด้าน อาทิเช่น ชนิดของพาหะ ความเข้มข้นสารเจือ ความหนาของชั้นแผ่นฐาน ความยาวของคอนแทค และระยะห่างระหว่างขั้วคอนแทค เป็นต้น และนำปัจจัยทั้งหมดมาประมวลในการออกแบบอุปกรณ์

เอกสารอ้างอิง

1. R.S. Popovic, "The vertical Hall-effect device", IEEE Electron Device Letters, vol. EDLS (9), pp. 357-358, 1984.
2. Z. Randjelovic, R.S. Popovic, "Characterization, simulation and macro modelling of vertical Hall devices", Microelectronics Journal, vol. 29, pp. 715-719, 1998.
3. Ch. Schott, Z. Randjelovic, J.-M. Waser and R.S. Popovic, "2D Nonlinearity simulation of the vertical Hall sensor using SESES", [1st International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems, Semiconductors, Sensors and Actuators, Santa Clara, CA, USA, April, 6-8, 1998].
4. A. M. J. Huizer and H. P. Baltes, "Numerical modeling of vertical Hall-effect devices", IEEE Electron Device Letters, vol. EDL-5, No.11, 1984
5. Nebojsa Jankovic, Sanja Aleksic and Dragan Pantic, "Simulation and Modeling of Integrated Hall Sensor Devices", [Proceeding of Small Systems Simulation Symposium 2012, Nis, Serbia 12th-14th February 2012].
6. P.A. Besse, Ch. Schott and R.S. Popovic, "Analytical study of vertical Hall-devices using an adapted conform mapping technique", [Proceedings of the International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems, Semiconductors, Sensors and Actuators MSM'98, April 6-8, 1998, Santa Clara, California, USA, Paper T4.6.4, pp. 660-665. ISBN 0-96661-35-0-3].
7. TCAD Sentaurus Manual, Synopsys, Version H-2013.3.
8. Pascal, J. ; Hebrard, L. ; Kammerer, J. ; Frick, V. ; Blonde, J.-P. "A Vertical Hall Device in Standard Submicron CMOS Technology" ICSENS, IEEE Sensors, 2007.
9. Steiner, R. ; Kroener, F. ; Olbrich, T. ; Baresch, R. ; Baltes, H. "In-plane sensitive vertical trench-Hall device" Electron Devices Meeting, IEDM '98. Technical Digest., International 1998
10. Baltes, H.P. ; Popovic, R.S. "Integrated semiconductor magnetic field sensors" Proceedings of the IEEE Vol.74, Issue: 8, 1986.
11. Phetchakul, T.; Poonsawat, S.; Poyai, A.; "The Effect of Deviation Current to 5-Contacts Vertical Hall Device" ECTI, 2016.
12. สวัสดิพงษ์ พูลสวัสดิ์, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล, อัมพร โพธิ์ไย "การจำลองแบบเพื่อการศึกษาผลกระทบของกระแสเบี่ยงเบนบนอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 รอยสัมผัส" การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8, 25-27 พฤษภาคม, ภูเก็ต, 2559.



The Effect of Deviation Current to 5-Contacts Vertical Hall Device

Toempong Phetchakul, Sawatdipong Poonsawat
 Department of Electronics, Faculty of Engineering,
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 Bangkok, Thailand
 toempong.ph@kmitl.ac.th, s8601172@kmitl.ac.th

Amporn Poyai
 Thai Microelectronics Center,
 National Electronics and Computer Technology Center,
 Chachoengsao, Thailand

Abstract— This paper presents the new model of 5-contacts vertical Hall device. Despite of the induced force from Hall electric field act upon the current along the contacts for induced Hall voltage, there are some deviation currents from the middle contact that contribute the Hall voltage. The deviation current pass through the bulk resistance causes the voltage drop between the voltage contacts. From this study for n-type substrate, the deviation current created voltage about 20-30 percent of the total Hall voltage that mean it is the importance mechanism for vertical Hall device. This study used 3-D simulation by Sentaurus TCAD.

Keywords— 5-contacts vertical Hall device; Sentaurus TCAD; carrier deflection

I. INTRODUCTION

The 5-contacts vertical Hall device (5C-VHD) is usually used for detect an in-plane component of magnetic field based on Hall Effect and devised by R.S. Popovic [1]. The potential applications range of 5C-VHD is large. They are widely used in the fields of automotive and contactless current sensors. A Hall device appears to be the most popular integrated structures for sensor applications.

In the past, it has been analyzed and simulated 2D-3D vertical Hall in a various ways [2-6]. Analysis and simulation of 5C-VHD regularly neglected about the carrier deflection which generated unbalance current to form deviation current. Voltage of this effect may affect to output device. However, the explanation about this effect is not mentioned up to date.

This paper concentrates on a simulation of Hall device to analytical study the effect from deviation current of this device by using Sentaurus TCAD.

II. STRUCTURE AND SIMULATION OF 5-CONTACTS OF VERTICAL HALL DEVICE

A. Structure

The 5-contacts vertical Hall device basically consists of n-doped silicon with five n+ electrodes at the surface forming a square structure. The three electrodes (placed at both side and middle) serve as current input and current output contacts are called current contacts (CC), whereas the signal electrodes are

called sense contacts (SC) which place between them. Structure and dimension of 5C-VHD is shown in Fig. 1. Normally, device is fabricated in CMOS well which is into p-substrate; therefore it is simulated at thickness 5 μ m because it is normal thickness of n-well. Concentration of n-well is 10¹⁵ cm⁻³ and n+ electrodes are fabricated by ion-implantation of phosphorus 5x10¹⁹ cm⁻³ for forming ohmic contacts.

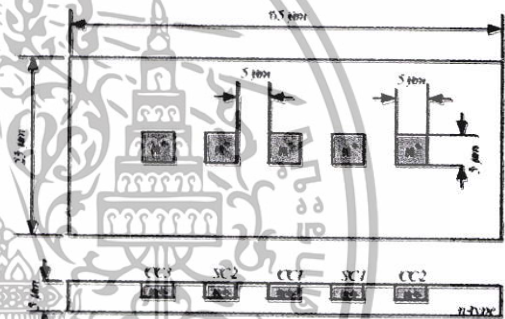


Fig. 1. The configuration of 5-contacts vertical Hall device

B. Simulation

In a conventional uses, the device is biased constant current thru contact CC1 whereas contacts CC2 and CC3 are grounded. After applied a magnetic field in direction of parallel to the device surface can be generated Hall electric field (E_H) under both sense contacts (SC1, SC2) in a z-axis (Fig. 2). This electric field can be explained by Hall effect. Output voltage (V_{out}) or Hall voltage (V_H) can consequently be measured by measuring the voltage between both senses contacts express as:

$$V_{out} = V_{SC1} - V_{SC2} = V_H \quad (1)$$

where V_{SC1} and V_{SC2} are voltage of sense contact SC1 and SC2.

For analysis of magnetic field effects in 5C-VHD by Sentaurus TCAD, the transport equation governing the flow of electrons and holes in the interior of the device must be set up and solved. To this end, the commonly used drift-diffusion-based model of the carrier current densities and must be augmented by magnetic field-dependent terms that account for the action of the transport equations governing the flow of electrons and holes in the interior of the device, the Lorentz force on the motion of the carriers [7]

$$\vec{J}_\alpha = \mu_\alpha \vec{g}_\alpha + \mu_\alpha \frac{I}{I + (\mu'_\alpha B)^2} \cdot [\mu'_\alpha \vec{B} \times \vec{g}_\alpha + \mu_\alpha \vec{B} \times (\mu'_\alpha \vec{B} \times \vec{g}_\alpha)] \quad (2)$$

where

$\alpha = n$ or p .

\vec{J}_α = carrier current density.

\vec{g}_α = current vector without mobility.

μ'_α = the Hall mobility.

\vec{B} = the magnetic induction vector.

B = the magnitude of this vector.

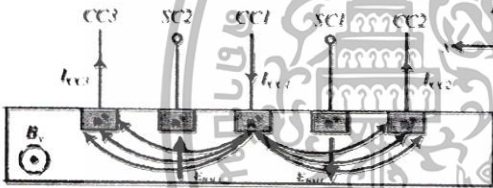


Fig. 2. The Hall effect in a 5-contacts vertical Hall device

The device is biased by constant current 0.5 mA thru contact CC1 and a magnetic field is applied along y-axis and varied in the range of 0 to 0.4 T which are conditions for 3-D simulation of 5C-VHD. Afterwards, output voltage and deviation current are plotted versus magnetic field.

III. SIMULATION RESULTS AND DISCUSSION

The device model for this simulation is shown in Fig. 3 which is related to dimensions in Fig. 1 and the concentration doping as mention before. This structure is designed as non-conventional structure which has 5 contacts. 3 current contacts and 2 voltage contacts by do not consider any mapping from conventional planar structure. The potential distribution of the device under applied bias 0.5 mA and magnetic field intensity (B) in y direction 0.4 T is shown in Fig. 4. It shows the equipotential line that can be measure in the term of Hall voltage output. Figure 5 shows the plot of output voltage (V_{output}) or Hall voltage as defined in (1) to the magnetic field in y and -y direction between 0-0.4 T. The output shows linearly

dependence both in y and -y direction with the value of current related sensitivity (S_I) is 84.2 V/TA. The output voltages occur from the induced Hall electric field in z-axis. As shown in Fig.2, the voltage at SC1 is positive (for electron carrier case) and SC2 is negative when the magnetic field in y direction is applied. It causes by the induced Hall electric field from current cross magnetic field vector. That was explained by this model for 5 contacts vertical Hall device mechanism.

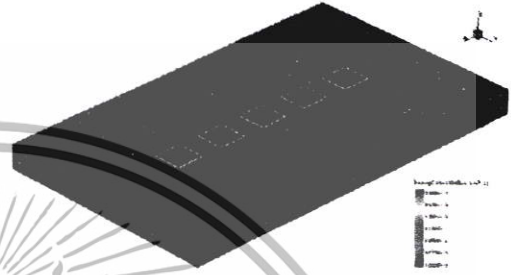


Fig. 3. 3-D Doping profile of 5-contacts vertical Hall device

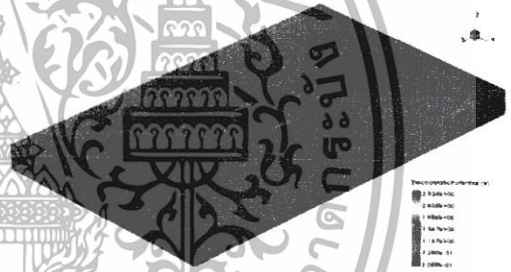


Fig. 4. Potential distribution of 5-contacts vertical Hall device for $I_{cc1}=0.5mA$ and $B=0.4T$

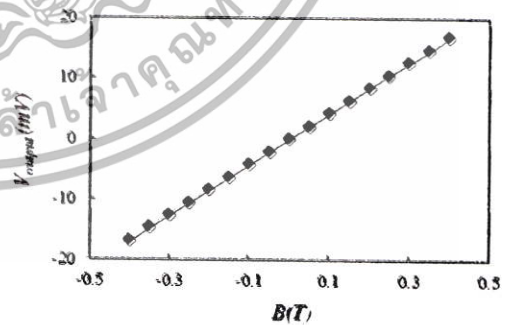


Fig. 5. Output voltage response of 5-contacts vertical Hall device to magnetic field.

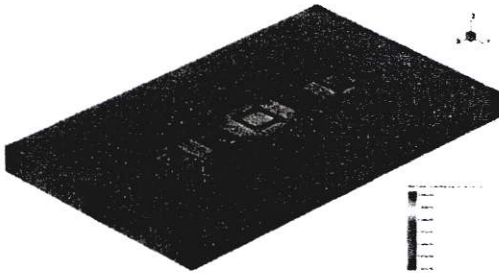


Fig. 6. Current density distributions of 5-contacts vertical Hall device for $I_{CC1}=0.5\text{mA}$ and $B=0.4\text{T}$

The current I_{CC2} and I_{CC3} are measured during applied magnetic field for investigation of the deviation current. The current density distribution in the same condition is shown in Fig. 6. It shows the equip-current line that can calculate the deviation current ΔI . The deviation current is given by

$$\Delta I = \frac{I_{CC2} - I_{CC3}}{2} \quad (3)$$

where I_{CC2} and I_{CC3} are current at contact CC2 and CC3 which can be written as:

$$I_{CC2} = \frac{I_{CC1} + \Delta I}{2}, I_{CC3} = \frac{I_{CC1} - \Delta I}{2} \quad (4)$$

where I_{CC1} is total biased current at contact CC1. I_{CC1} can be written as:

$$I_{CC1} = I_{CC2} + I_{CC3} \quad (5)$$

Fig. 7 shows the plot of deviation current versus magnetic field. It is linearly dependence. It means that magnetic field induced force affect to some current under the middle contact CC1.

As device has some more affect from carrier deflection which leads to equation (1) that can be rewritten as:

$$V_{output} = V_{SC1} - V_{SC2} = V_H + V_H' \quad (6)$$

where V_H' is generated voltage from deviation current.

Table 1 summarizes the simulation responses, V_{output} and deviation current, ΔI , and generated voltage, V_H' from deviation current which are calculated from (3) and (6), respectively. The percentage of V_H' calculated from (6) is shown in table 1. It shows that the voltage from the current deviation has a significant of output voltage. The percentages are in the range between 17.62 to 35.24 %.

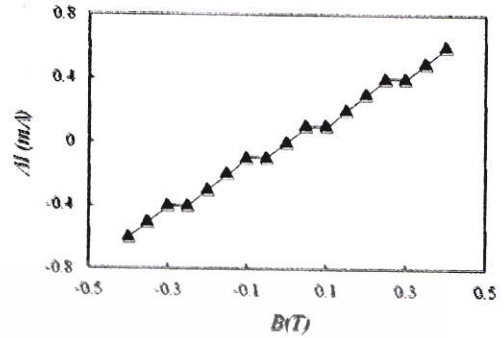


Fig. 7. Deviation current of 5-contacts vertical Hall device to magnetic field.

TABLE I. Results of Simulation, Output Voltage (V_{output}), Deviation current (ΔI), Generated Voltage from Deviation Current (V_H') and The Percentages of Generated Voltage from Deviation Current ($\%V_H'$)

| B (T) | V_{output} (mV) | ΔI (mA) | V_H' (mV) | $\%V_H'$ |
|---------|-------------------|-----------------|-------------|----------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.05 | 2.10 | 0.10 | 0.74 | 35.24 |
| 0.10 | 4.20 | 0.10 | 0.74 | 17.62 |
| 0.15 | 6.30 | 0.20 | 1.48 | 23.49 |
| 0.20 | 8.50 | 0.30 | 2.22 | 26.12 |
| 0.25 | 10.50 | 0.40 | 2.96 | 28.19 |
| 0.30 | 12.60 | 0.40 | 2.96 | 23.49 |
| 0.35 | 14.70 | 0.50 | 3.70 | 25.17 |
| 0.40 | 16.90 | 0.60 | 4.44 | 26.27 |

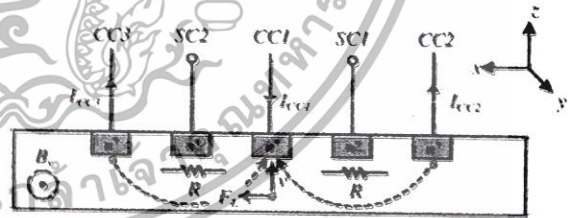


Fig. 8. The mechanism of carrier deflection.

The deviation current caused by carrier deflection mechanism is shown in Fig.8. The figure shows the carrier electron of n type substrate flow from CC3 and CC2 to CC1. The conventional current is in the opposite direction of electron current. When applied magnetic field in y direction B_y , the deflection current from the induced force F_L in x direction cause the carrier in the middle under CC1 deflect some currents

in x direction. The current I_{CC3} is greater than I_{CC2} . The deviation ΔI is now negative value. This causes the current I_{CC3} increased by ΔI and the current I_{CC2} decreased by $-\Delta I$. The deviation current pass through bulk resistance R between current contacts $CC1$ and $CC3$ creates more extra voltages drop at voltage contact $SC2$. In the same way, deviation current $-\Delta I$ pass through current contacts $CC1$ and $CC2$ create less extra voltages drop at the voltage contact $SC1$. The part of output voltage from deviation current can be written as

$$V_H = (\Delta I)R - (-\Delta I)R \quad (7)$$

$$V_H = 2(\Delta I)R \quad (8)$$

So the Hall voltage in 5-contacts vertical Hall device includes the output voltage from this effect.

IV. CONCLUSION

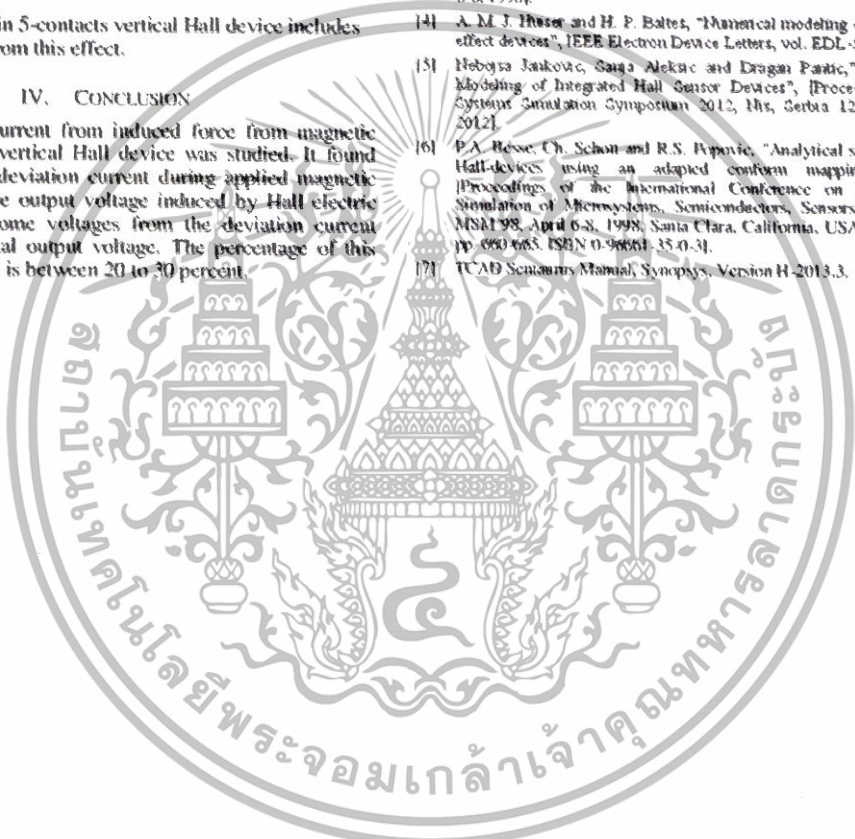
The deviation current from induced force from magnetic field of 5-contacts vertical Hall device was studied. It found that there was the deviation current during applied magnetic field. In spite of the output voltage induced by Hall electric field, there were some voltages from the deviation current including in the total output voltage. The percentage of this effect by calculation is between 20 to 30 percent.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for financial supporting of this project.

REFERENCES

- [1] R.S. Popovic, "The vertical Hall-effect device", IEEE Electron Device Letters, vol. EDLS (9), pp. 357-358, 1984.
- [2] Z. Radojlovic, R.S. Popovic, "Characterization, simulation and macro modelling of vertical Hall devices", Microelectronics Journal, vol. 29, pp. 715-719, 1998.
- [3] Ch. Schott, Z. Radojlovic, J.M. Waser and R.S. Popovic, "2D Nonlinearity simulation of the vertical Hall sensor using SESES", 11st International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems, Semiconductors, Sensors and Actuators, Santa Clara, CA, USA, April, 6-8, 1998.
- [4] A. M. J. Hüser and H. P. Baltes, "Numerical modeling of vertical Hall-effect devices", IEEE Electron Device Letters, vol. EDL-5, No.11, 1984.
- [5] Hrbysa Jankovic, Sasa Alekic and Dragan Pantic, "Simulation and Modeling of Integrated Hall Sensor Devices", [Proceeding of Small Systems Simulation Symposium 2012, IIS, Serbia 12th-14th February 2012].
- [6] P.A. Hesse, Ch. Schott and R.S. Popovic, "Analytical study of vertical Hall-devices using an adapted conform mapping technique", [Proceedings of the International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems, Semiconductors, Sensors and Actuators MSA198, April 6-8, 1998, Santa Clara, California, USA, Paper T4.6.4, pp. 690-685, ISBN 0-96661-35-0-3].
- [7] TCAD Sentaurus Manual, Synopsis, Version H-2013.3.





แบบรายงานการใช้จ่ายเงินโครงการวิจัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รายงานความก้าวหน้า ครั้งที่ 1 รอบ 6 เดือน ประจำปีงบประมาณ 2558

แหล่งงบประมาณแผ่นดิน) แบบปกติ แหล่งเงินรายได้

ชื่อโครงการภาษาไทย อุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งความไวสูงกินพลังงานต่ำ

ภาษาอังกฤษ Low Power and High Sensitivity Vertical Hall Device

ชื่อ-สกุลหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน/ผู้วิจัย (อ./ดร./ผศ./รศ./ศ.) รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ.2557 ถึงวันที่ 31 มีนาคม พ.ศ.2558

ระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี - เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ.2557 ถึงวันที่ 30 กันยายน พ.ศ.2558

ข้อมูลการรายงานค่าใช้จ่ายงบประมาณโครงการวิจัย

1. การเบิกจ่ายงบประมาณ (กรณีการจ่ายเงินถ้าจ่ายงวดเดียวให้ลบข้อที่ไม่เกี่ยวข้องออก)

งวดที่ 1 50,000 บาท 100 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ว/ด/ป) ธันวาคม 2557

2. สรุปงบประมาณค่าใช้จ่ายที่ใช้นับตั้งแต่เริ่มทำการวิจัยถึงปัจจุบัน (จำแนกตามหมวดค่าใช้จ่าย)

| หมวดค่าใช้จ่าย | งบประมาณรวมทั้งโครงการ | ค่าใช้จ่าย)บาท(| คงเหลือ (หรือเกิน) |
|----------------------------|------------------------|-----------------|--------------------|
| งบบุคลากร :ค่าจ้างชั่วคราว | - | - | - |
| งบดำเนินงาน | | | |
| ค่าตอบแทน | | - | - |
| ค่าใช้สอย | | - | - |
| ค่าวัสดุ | 50,000 | 50,000 | - |
| ค่าสาธารณูปโภค | | - | - |
| งบลงทุน: ค่าครุภัณฑ์ | | - | - |
| รวม | 50,000 | 50,000 | - |

(รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล)

ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

29 / กรกฎาคม / 2558

(.....)

ลงนามเจ้าหน้าที่การเงิน/เจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้อง

..... /

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์

ประวัติการศึกษา

| ชื่อย่อปริญญา | สาขา | สถาบันที่จบ | ปีที่จบ |
|---------------|--------------------|------------------|---------|
| วศบ. | อิเล็กทรอนิกส์ | สจล. | 2532 |
| วศม. | ไฟฟ้า | สจล. | 2535 |
| D. ENG | Solid State Device | Tokai University | 2541 |
| | | | |

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ อุปกรณ์เซนเซอร์สนามแม่เหล็ก
กระบวนการสร้างอุปกรณ์ไมครอิเล็กทรอนิกส์

รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์ (ด้านศิลปะ หรืออื่นๆ) ที่ได้รับ

| ปี พ.ศ. | ชื่อรางวัล | สถาบันที่ให้ |
|---------|-----------------------|--------------------------|
| 2559 | รางวัลผลงานวิจัยดีมาก | สำนักคณะกรรมการอุดมศึกษา |
| | | |
| | | |

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

| ปี พ.ศ. | ทุนการศึกษาและทุนวิจัย | สถาบันที่ให้ |
|---------|------------------------------|--------------------|
| 2536 | ทุนดูงานวิจัย | JSPS |
| 2538 | ทุนศึกษาปริญญาเอก | ทุนทบวงมหาวิทยาลัย |
| 2542 | ทุนโครงการร่วมมือไทย ญี่ปุ่น | JICA |
| 2558 | ทุนวิจัย | สกอ. |
| 2559 | ทุนวิจัย | วช. |

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. C. Leepattarapongpan, T. Phetchakul, N. Penpondee, P. Pengpad, A. Srihapat, W. Jeamsaksiri, E. Chaowicharat, C. Hruanun, A. Poyai "A merged magnetotransistor for 3-axis magnetic field measurement based on carrier recombination-deflection" *Microelectronics Journal*, 40 (2014) 565-573.
2. Weera Pengchan, Toempong Phetchakul, Amporn Poyai "The local generation and recombination lifetime based on forward diode characteristics diagnostics" *Journal of Crystal Growth*, Volume 362, 1 January 2013, Pages 300-303
3. C. Leepattarapongpan, T. Phetchakul, N. Penpondee, P. Pengpad, E. Chaowicharat, C. Hruanun, A. Poyai, "Magnetotransistor Based on the Carrier Recombination-Deflection Effect" *IEEE Sensors Journal*, Vol. 10, No. 2, 2010.

การเสนอผลงานวิชาการ

1. T. Phetchakul, C. Suthinet "Monitoring of Draft Beer Fermentation Process by Electronic Nose" *Advanced Materials Research* Vol. 911 (2014) pp 297-301.
2. W. Praepattarapisut, W. Pengchan, T. Phetchakul and A. Poyai "Defect Distribution and Yield Analysis Technique on Silicon Wafer" *Advanced Material Research*, Vol. 911, pp. 271-275, 2014.
3. T. Phetchakul, S. Muangthong, C. Leepattarapongpan and A. Poyai "A Simulation of 3-Axis Magnetotransistor Based on the Carrier Recombination-Reflection Effect" *The 11th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication and Information Technology, ECTI-CON 2014*, 14-17 May, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2014.
4. W. Praeptharapisut, W. Pengchan, T. Phetchakul and A. Poyai "Yield Analysis by Poisson Yield Model based on the Defect Analysis with Derivative Method" *The 11th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication and Information Technology, ECTI-CON 2014*, 14-17 May, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2014.
5. T. Phetchakul, S. Muangthong, C. Leepattarapongpan and A. Poyai "Mechanism of Merged Magnetotransistor" *The 36th Electrical Engineering Conference (EECON 36)*, 11-13 December,

-Kanchanaburi, Thailand, 2013.
6. W. Praepattarapisut, W. Pengchan, T. Phetchakul and A. Poyai "Defect Distribution Analysis by Derivative Technique for P-N Junction" The 36th Electrical Engineering Conference (EECON 36), 11-13 December, Kanchanaburi, Thailand, 2013.
 7. Toempong Phetchakul, Prateep Taisettavatkul, Wittawat Yamwong and Amporn Poyai, "Split-current Magnetoresistor" Advanced Materials Research, Vol. 739 (2013), pp. 489-492.
 8. T. Phetchakul, P. Taisettavatkul, W. Yamwong and Amporn Poyai, "Contributing Parameters for Magnetoresistance Effect of The New Design on Hall Plate Structure" 10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication and Information Technology, ECTI-CON 2013, 15-17 May 2013, Krabi, Thailand.
 9. T. Phetchakul, P. Taisettavatkul, W. Pengchan, W. Yamwong and A. Poyai "The New Design for Magnetoresistance Effect on Hall Plate Structure" 9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication and Information Technology, ECTI-CON 2012, 16-18 May 2012, Phetchaburi, Thailand.
 10. T. Phetchakul, W. Luanatikomkul, W. Yamwong, A. Poyai "The Mechanism of Dual Schottky Magnetodiode" 9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication and Information Technology, ECTI-CON 2012, 16-18 May 2012, Phetchaburi, Thailand.
 11. T. Phetchakul, W. Luanatikomkul, W. Yamwong, A. Poyai "The Study of Forward and Reverse Schottky Junction for Dual Magnetodiode" 7th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular System, IEEE-NEMS 2012, 5-8 March, Kyoto, Japan.
 12. T. Phetchakul, P. Taisettavatkul, W. Yamwong and A. Poyai, "A Simulation of Magnetoresistance Effect on Hall Plate Structure" The 7th Annual Conference of Thai Physics Society, Siam Physics Congress 2012, 9-12 May 2012, Pra Nakon Si Ayutthaya, Thailand.
 13. T. Phetchakul, W. Luanatikomkul, C. Leepattarapongpan, E. Chaowicharat, P. Pengpad and A. Poyai, "The Study of p-n and Schottky Junction for Magnetodiode" Advanced Materials Research, Vol. 378-379, 2012.
 14. W. Pengchan, T. Phetchakul, A. Poyai, "Improved extraction of the local carrier generation lifetime from forward diode characteristics", Advanced Material Research, Vol. 378-379, 2012.

15. W. Pengchan, T. Phetchakul, A. Poyai, "Non-uniform Defects Assessment by I-V and C-V characteristics of p-n junction" ICDS 2011, The 26th International Conference on Defects in Semiconductor, 17 – 22 July, Nelson, New Zealand, 2011.
16. C. Leepattarapongpan, T. Phetchakul, N. Penpondee, P. Pengpad, A. Srihapat, W. Jeamsaksiri, C. Hruanun and A. Poyai, "The Effect Injection Width and Temperature-Offset Compensation of Magnetotransistor", Proc. Eurosensors XXV, September 4-7, Athens, Greece, 2011.
17. W. Pengchan, T. Phetchakul, A. Poyai, "The Local Generation and Recombination Lifetime based on Forward Diode Characteristics Diagnostics", ICMAT 2011, The 6th International Conference on Material for Advanced Technologies, 26 June -1 July, Singapore, 2011.
18. T. Phetchakul, P. Sottip, C. Leepattarapongpan, N. Penpondee, P. Pengpad, A. Srihapat, C. Hruanun, and A. Poyai, "The Deflection Length and Emitter Width on Sensitivity of Magnetotransistor", IEEE-NEMS 2011, IEEE International Conference on Nano/Micro Engineering and Molecular Systems, February 20-23, Kaohsiung, Taiwan, 2011.
19. T. Phetchakul, A. Sangnual, and C. Sutthinet, "Investigation on Temperature Effect on Alcohol Sensing of Multi- Walled Carbon Nanotube", IEEE-NEMS 2011, IEEE International Conference on Nano/Micro Engineering and Molecular Systems, February 20-23, Kaohsiung, Taiwan, 2011.
20. W. Pengchan, T. Phetchakul, A. Poyai, "The Defects Analysis in CMOS Fabrication by Arrheenius Activation Energy Technique" IEEE-NEMS 2011, IEEE International Conference on Nano/Micro Engineering and Molecular Systems, February 20-23, Kaohsiung, Taiwan, 2011.

ผลงานสิทธิบัตร/สิ่งประดิษฐ์/งานสร้างสรรค์ (คิดปะ หรือ อื่นๆ)

1. ต้นแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์
2. ต้นแบบแมกนีโตไดโอด
3. ต้นแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามแกน
4. ต้นแบบเซนเซอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบ MSM