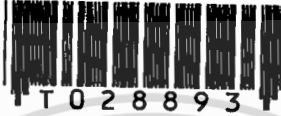


การวิเคราะห์และพัฒนาตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยใช้ทรานซิสเตอร์หลายขา
ANALYSING AND DEVELOPMENT OF MAGNETIC FIELD SENSOR
USING MULTI-COLLECTOR BIPOLAR TRANSISTOR



นายชูเกียรติ ชัยมาติกุล
MR. CHUKIEAT CHAIMATIKUL

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 28893
วัน, เดือน, ปี 10 พ.ย. 2540

พ.ศ.2540

ISBN 974-622-015-2

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ANALYSING AND DEVELOPMENT OF MAGNETIC FIELD SENSOR
USING MULTI-COLLECTOR BIPOLAR TRANSISTOR**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

1997

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์และพัฒนาตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยใช้ ทรานซิสเตอร์หลายขา
นักศึกษา	นายชูเกียรติ ชัยมาทิกุล
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.	2540

บทคัดย่อ

ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก มักจะใช้ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กจำพวกฮอลล์เจเนอเรเตอร์ ซึ่งปัญหาส่วนใหญ่ที่จะต้องพบในการใช้งานฮอลล์เจเนอเรเตอร์ก็คือ ความไม่มีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิ, ความไวในการตรวจจับต่ำ และความเป็นเชิงเส้นในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กไม่ดีนัก เป็นต้น แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบใหม่ขึ้นมา โดยใช้ทรานซิสเตอร์แบบหลายขาเป็นตัวตรวจจับ ซึ่งจะทำให้ความไวในการตรวจจับสูงขึ้น และให้ความเป็นเชิงเส้นที่ดีกว่า เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถออกแบบให้มีโครงสร้างหลายๆ แบบ ซึ่งจะทำได้สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้หลายๆทิศทาง (เช่นทิศทางแกน X, Y และ Z) โดยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะได้วิเคราะห์และเปรียบเทียบคุณสมบัติทางด้านความไวในการตรวจจับ, ความมีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิ และ ความเป็นเชิงเส้นในการตรวจจับ ของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กทั้งแบบฮอลล์เจเนอเรเตอร์ และแบบทรานซิสเตอร์หลายขาเพื่อเป็นแนวทางการพิจารณาในการประยุกต์ใช้งานต่อไป

จากผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบจะได้ผลออกมา โดยตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบทรานซิสเตอร์หลายขาจะมีความไวในการตรวจจับ, ความเป็นเชิงเส้นในการตรวจจับ และ ความมีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิที่ดีกว่าตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบฮอลล์เจเนอเรเตอร์

Thesis title	Analysing and Development of Magnetic Field Sensor Using Multi-Collector Bipolar Transistor
Student	Mr. Chukieat Chaimatikul
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Kobchai Dejhan
Level of Study	Master of Engineering in Electrical Engineering
Department	Telecommunications Engineering Faculty of Engineering King Mongkut 's Institute of Technology Ladkrabang
Year	1997

ABSTRACT

To detect the magnetic field, the Hall effect sensor or Hall generator is used. However, there are many problems such as instability according to the temperature variation, low sensitivity and poor linearity. The new developments of the magnetic-field sensor by using multi-collector transistor are carried out in this study to obtain the high sensitivity and good linearity. There are various structures of sensor. To detect all of three components x,y and z, various structures of the sensor are examined. This thesis also investigate the appropriate of hall-effect sensor and multi-collector transistor with the application of the magnetic field detection.

The result indicate that the magnetic-field sensor by using multi-collector transistor are carried out in this study to obtain the high sensitivity, good linearity and stability according to the temperature variation.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีก็เพราะได้รับความเมตตาจากรองศาสตราจารย์
ดร. กอบชัย เศรษฐาญ ที่ได้ให้ความกรุณาให้คำแนะนำ, คำปรึกษา และสนับสนุนแก่ผู้วิจัย
ตลอดมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ คุณมะลิวัลย์ สุนประชา ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการจัดพิมพ์วิทยานิพนธ์
ฉบับนี้ด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณบริษัท แสงชัยมิเตอร์ จำกัดที่ได้ให้ความช่วยเหลือทาง
ด้านข้อมูลต่าง ๆ ที่จะใช้ในการวิจัยและสนับสนุนการวิจัยจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลง
ด้วยดี

ชูเกียรติ ชัยมาติกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
คำอธิบายอักษรย่อ.....	IX
บทที่	
1. บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
ทฤษฎีหรือแนวคิดที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
วิธีที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย.....	3
2. โครงสร้าง และการทำงานของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบฮอลล์เจเนอเรเตอร์.....	4
โครงสร้างและการทำงานเบื้องต้นของฮอลล์เจเนอเรเตอร์.....	4
สิ่งที่ต้องพิจารณาเบื้องต้นในการออกแบบ.....	9
การพิจารณาถึงวัสดุที่ใช้ในการสร้าง.....	12
คุณสมบัติต่าง ๆ ของฮอลล์เจเนอเรเตอร์.....	13
ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก.....	17
ความเป็นเชิงเส้นในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก.....	20
เสถียรภาพการทำงานอันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ.....	22

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่		
3.	โครงสร้าง และการทำงานของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบทรานซิสเตอร์ หลายขา.....	25
	โครงสร้างและเทคโนโลยีในการสร้าง.....	25
	2-D INTEGRATED MAGNETIC FIELD SENSOR.....	31
	3-D INTEGRATED MAGNETIC FIELD SENSOR.....	34
	การทดลองและผลการทดลองจากการใช้ทรานซิสเตอร์หลายขาตรวจจับ สนามแม่เหล็ก.....	35
4.	การวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆของตัวตรวจจับแบบทรานซิสเตอร์หลายขา.....	41
	ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก.....	41
	ความเป็นเชิงเส้นในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก.....	46
	เสถียรภาพการทำงานอันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ.....	47
5.	การเปรียบเทียบคุณสมบัติของตัวตรวจจับแบบฮอลล์เจเนอเรเตอร์ และแบบทรานซิสเตอร์หลายขา.....	49
	ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก.....	49
	ความเป็นเชิงเส้นในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กและเสถียรภาพการทำงาน อันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ.....	55
6.	บทสรุป.....	61
	บรรณานุกรม.....	62
	ประวัติผู้เขียน.....	65

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

1. แสดงค่าพารามิเตอร์ของคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กของวัสดุ
ที่ใช้ในการสร้างฮอลล์เจเนอเรเตอร์.....10
2. แสดงค่าของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก $[B(T)]$ ซึ่งได้จากการคำนวณ
เมื่อเปลี่ยนค่าของ V_c ไปที่ค่าต่าง ๆ.....37
3. แสดงผลการทดลองโดยแสดงถึงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กกับค่าความแตกต่างของกระแสไฟที่ขาคอเล็คเตอร์ทั้งสองขาของ
อุปกรณ์ตรวจจับ.....38



สารบัญภาพ

หน้า

1. แสดงปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall Effect).....	2
2. แสดงขนาดรูปร่างของแผ่นฮอลล์.....	5
3. แสดงตัวอย่างส่วนหนึ่งของฮอลล์เจเนอเรเตอร์พร้อมสายตัวนำก่อนที่จะถูกห่อหุ้มด้วย แผ่นวัสดุป้องกัน.....	13
4. แสดงฮอลล์โปรปความละเอียดสูง.....	14
5. แสดงวงจรของฮอลล์เจเนอเรเตอร์ในรูปแบบของ two port network.....	15
6. แสดงวงจรสมมูลย์เทเวนิน.....	16
7. แสดงเวกเตอร์โคอะแกรมความหนาแน่นของการไหลของกระแสไฟอันเนื่องจาก อิเล็กตรอน.....	18
8. แสดงแรงดันเออร์ทัสของแผ่นฮอลล์รูปสี่เหลี่ยม.....	19
9. แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า R_H (Hall coefficient) ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ.....	21
10. แสดงการชดเชยการเปลี่ยนแปลงการทำงานอันเนื่องมาจากอุณหภูมิ.....	23
11. แสดงโครงสร้างของ LATERAL MAGNETOTRANSISTOR.....	26
12. แสดงวงจรไบอัสของ LATERAL MAGNETOTRANSISTOR.....	27
13. แสดงภาพตัดขวางของ LATERAL MAGNETOTRANSISTOR.....	28
14. แสดง 2-D Lateral Magnetotransistor ที่สร้างขึ้นโดยใช้เทคโนโลยีของ CMOS.....	32
15. แสดงวงจรพื้นฐานของ 2-D Lateral Magnetotransistor (LMT).....	33
16. แสดงการเบี่ยงเบนของการไหลของพาหะประจุอันเป็นผลมาจาก B_z	35
17. แสดงวงจรที่ใช้ในการทดลอง.....	35
18. แสดงส่วนกำเนิดสนามแม่เหล็กสำหรับการทดลอง.....	36
19. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $B(T)$ กับ ΔI_c ที่ได้จากการทดลอง.....	38
20. แสดงความสัมพันธ์ของกระแสคอลเล็กเตอร์ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงไปตาม การเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก :B.....	40

VII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

21. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไวในการตรวจจับความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ของฮอลล์เจเนอเรเตอร์กับค่าความหนาของแผ่นฮอลล์ (d).....	51
22. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าทางเอาต์พุทของฮอลล์เจเนอเรเตอร์ (V_H) กับค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B).....	52
23. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความไวในการตรวจจับกับขนาดของ W_{eff}	53
24. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟคอลลีคเตอร์ของตัวตรวจจับแบบ Lateral Magnetotransistor กับค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก	54
25. แสดงความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงระหว่างกระแสไฟคอลลีคเตอร์กับอุณหภูมิบรรยากาศ.....	58
26. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของ Hall Mobility กับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิบรรยากาศ.....	59

คำอธิบายตัวย่อ

B	ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (Tesla; T)
E	ความเข้มของสนามไฟฟ้า ($V m^{-1}$)
I	กระแสไฟฟ้า (A)
I_C	กระแสไฟฟ้าที่ขาคอลเล็กเตอร์ (A)
J	ความหนาแน่นของกระแสไฟ ($A m^{-2}$)
L	ความยาว (เมตร ; m)
n	จำนวนของอิเล็กตรอนในปริมาตรหนึ่งหน่วย (Electron / m^3)
q	ประจุไฟฟ้า (C)
r_{LB}, r_{OB}	ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของฮอลล์เจเนอเรเตอร์ (V / T)
r_n	Hall factor
R_h	ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall coefficient) ($m^3 C^{-1}$)
S_r	ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของทรานซิสเตอร์หลายขา (% / T)
μ	ค่าความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (Electron mobility) ($m^2 V^{-1} s^{-1}$)
μ_H	Hall mobility
w, W	ความกว้าง (m)
v, v_d	ค่าความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ของประจุ (Drift velocity) ($m s^{-1}$)
V_h	แรงดันไฟฮอลล์ (V)

บทที่ 1

บทนำ

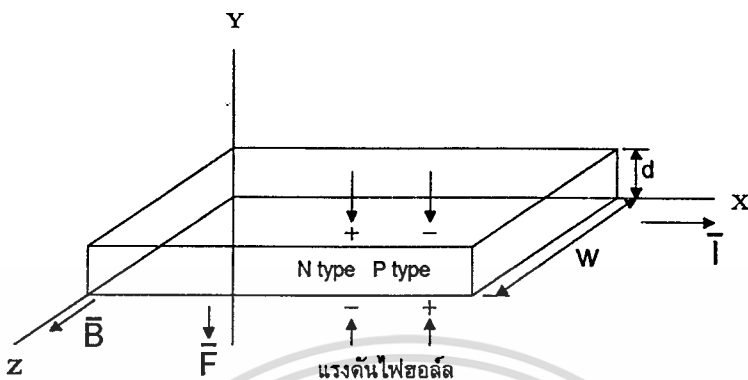
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กที่ถูกนำมาใช้งานในด้านต่าง ๆ ในปัจจุบัน เช่น ใช้เป็นตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้าในวงจรแควมปีมิเตอร์ หรือ ใช้ตรวจจับระยะการเคลื่อนที่ของวัตถุ มักจะใช้ตัวตรวจจับประเภทที่สร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำจำพวกฮอลล์เจเนอเรเตอร์ [1, 2] โดยการทำงานของฮอลล์เจเนอเรเตอร์พอจะกล่าวคร่าว ๆ ได้ดังนี้คือ ถ้าหากมีกระแสไฟ (I) ไหลผ่านสารกึ่งตัวนำในทิศทางหนึ่ง และในขณะนั้นถ้ามีความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ค่าหนึ่งตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแสไฟแล้ว จะปรากฏมีสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (E) ขึ้น โดยจะเกิดในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแสไฟ และทิศทางของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก การทำงานดังกล่าวเราเรียกว่าปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall Effect)

จากรูปที่ 1 ถ้ากระแสไฟไหลผ่านสารกึ่งตัวนำในทิศทางจากซ้ายไปขวา และความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) มีทิศทางดังภาพแล้ว จะทำให้พาหะส่วนใหญ่ซึ่งอาจเป็นโฮล หรือ อิเล็กตรอนเกิดการเคลื่อนที่ โดยความเร็วในการเคลื่อนที่จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ผลดังกล่าวจะก่อให้เกิดแรง (F) ขึ้นในแนวตั้ง ซึ่งแรงที่เกิดขึ้นนี้จะไปผลักให้โฮล หรืออิเล็กตรอนเคลื่อนไปอยู่ใกล้ผิวของสารกึ่งตัวนำ ถ้านำโวลต์มิเตอร์ไปวัดที่ผิวของสารกึ่งตัวนำจะเห็นว่ามีความดันไฟฟ้าเกิดขึ้น

รูปที่ 1

แสดงปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall Effect) [3]



ถ้าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type) แล้ว พาหะส่วนใหญ่ก็คืออิเล็กตรอน ซึ่งขั้วของแรงดันไฟที่เกิดขึ้นก็จะเป็นลบ (โดยขั้วด้านล่างจะเป็นขั้วลบ) แต่ถ้าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type) จะมีขั้วที่ตรงกันข้าม ทั้งนี้เนื่องจากพาหะส่วนใหญ่เป็นโฮล

แต่ปัญหาที่พบและมักเกิดขึ้นในการใช้อุปกรณ์จำพวกฮอลล์เจเนอเรเตอร์เป็นตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กก็คือความไวในการตรวจจับต่ำ, ความมีเสถียรภาพในการทำงานต่ออุณหภูมิต่ำ และความเป็นเชิงเส้นต่อสนามแม่เหล็กไม่ดี เป็นต้น [4]

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอหลักการในการตรวจจับสนามแม่เหล็กอีกหลักการหนึ่ง โดยจะการศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กชนิดใหม่แบบทรานซิสเตอร์หลายขา ขึ้นมาใช้งานแทนตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบฮอลล์เจเนอเรเตอร์

ทฤษฎีหรือแนวคิดที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

หลักการคร่าว ๆ ของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบทรานซิสเตอร์หลายขา ก็คือ การเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสไฟที่ขาคอลเล็กเตอร์ เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านผิวหน้าซีพของตัวตรวจจับซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดต่อไปในบทที่ 3 และนอกจากนี้ยังสามารถสร้างให้ตัวตรวจจับชนิดนี้สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทุกทิศทาง (ทิศทางในแนวแกน X, Y และ Z) อีกด้วย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กชนิดใหม่แบบทรานซิสเตอร์หลายขาจะเป็นตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กที่มีความไวสูงขึ้น, มีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิที่คี่ขึ้น และมีความเป็นเชิงเส้นที่ดีกว่าการใช้อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กจำพวกฮอลล์เจเนอเรเตอร์

ขอบเขตของการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะได้กล่าวถึงโครงสร้างและการทำงานของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กตั้งแต่จำพวกฮอลล์เจเนอเรเตอร์ รวมทั้งการวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆของอุปกรณ์จำพวกฮอลล์เจเนอเรเตอร์ จากนั้นจะกล่าวถึงโครงสร้าง และการทำงานของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบทรานซิสเตอร์หลายขา, การวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ของตัวตรวจจับแบบทรานซิสเตอร์หลายขา, การเปรียบเทียบคุณสมบัติของอุปกรณ์ตรวจจับทั้งสองแบบ ตลอดจนแนวทางการพัฒนาเอาตัวตรวจจับแบบทรานซิสเตอร์หลายขามาใช้งานทดแทนตัวตรวจจับแบบเก่าจำพวกฮอลล์เจเนอเรเตอร์

วิธีที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยนี้จะเริ่มต้นจากการทำความเข้าใจถึงทฤษฎีและหลักการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กทั้งแบบฮอลล์เจเนอเรเตอร์ และแบบทรานซิสเตอร์หลายขา จากนั้นก็ทำการวิเคราะห์เพื่อกำหนดสมการที่จะใช้แสดงคุณสมบัติต่างๆ ของอุปกรณ์ตรวจจับที่เกี่ยวข้องกับสิ่งที่จะทำการวิจัย และที่คาดหวังไว้ สำหรับการทดสอบถึงทฤษฎี และสมการที่ได้กำหนดไว้นั้น เนื่องจากการทำวิจัยครั้งนี้ไม่สามารถที่จะทำการสร้างตัวตรวจจับแบบทรานซิสเตอร์หลายขาบนฐานรอง (Substrate) ขึ้นเดียวกันได้ตามทฤษฎีที่ได้กำหนดไว้ ดังนั้นจึงทำการทดสอบโดยการนำเอาทรานซิสเตอร์ที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ (ใช้ทรานซิสเตอร์แบบ Array) มาต่อวงจรรวมกันตามวงจรสมบูรณที่ที่กำหนดขึ้นมา พร้อมทั้งนำเอาไมโครคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการคำนวณ และแสดงความสัมพันธ์ของสมการที่ได้กำหนดขึ้นมาด้วย

บทที่ 2

โครงสร้าง และการทำงานของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบฮอลล์เจเนอเรเตอร์

โครงสร้าง และการทำงานเบื้องต้นของฮอลล์เจเนอเรเตอร์

อิเล็กตรอนและโฮลในวัสดุประเภทโลหะและสารกึ่งตัวนำจะมีคุณสมบัติที่เหมือนกับอนุภาคของประจุไฟฟ้า ซึ่งการเคลื่อนที่ของมันจะอยู่ภายใต้กฎเกณฑ์ของแรงนิวตัน (Newtonian mechanics) ถ้าสมมติให้มีอิเล็กตรอนที่มีพลังงานกลที่เท่ากันทุก ๆ ตัว และมีคุณสมบัติเป็นประจุ $-e$, มีมวลเท่ากับ M กำลังเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าที่มีทิศทางและขนาดเท่ากับ E ($V m^{-1}$) ด้วยความเร็วเท่ากับ v ($m s^{-1}$) และมีความเร่งในการเคลื่อนที่เท่ากับ $d^2 v / dt^2$ ดังนั้น แรงที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะมีค่าเท่ากับ

$$\vec{F}_e = -e \vec{E} \quad (N) \quad (2.1)$$

และถ้าหากมีสนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่น B มากระทำต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนก็จะทำให้เกิดแรงที่เกิดจากการเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่น B ขึ้นมีค่าเป็น

$$\vec{F}_m = -e (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (N) \quad (2.2)$$

เมื่อนำเอาค่าของแรงที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าและแรงที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กมารวมกัน ก็จะได้แรงที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน โดยแรงที่เกิดขึ้นนี้จะเรียกว่าแรงลอเรนซ์ (Lorentz force)

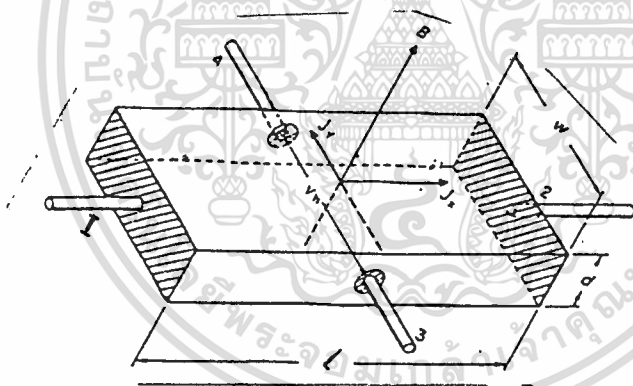
$$\begin{aligned} \vec{F} &= \vec{F}_e + \vec{F}_m \\ &= -e \vec{E} + -e (\vec{v} \times \vec{B}) \\ &= -e \{ \vec{E} + (\vec{v} \times \vec{B}) \} \end{aligned} \quad (2.3)$$

แรงที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนดังที่กล่าวมา จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่สนามแม่เหล็กมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall - Effect)

สำหรับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในวัสดุรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังแสดงในรูปที่ 2 แรงลอเรนซ์จะมีผลทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเกิดการเบี่ยงเบนไปในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางของกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 2

แสดงขนาดรูปร่างของแผ่นฮอลล์ โดยสนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่น \vec{B} จะเหนี่ยวนำในทิศทางของแกน Z, ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าแผ่นฮอลล์ (J_x) และ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากปรากฏการณ์ของฮอลล์ (J_y) จะมีทิศทางตามแนวแกน X และ Y ตามลำดับ และส่วนที่แลเงาบนแผ่นฮอลล์ก็คือขั้วอุปกรณ์ซึ่งจะมีอยู่ 4 ขั้ว



จาก(2.1)
$$\vec{F}_e = -e\vec{E}$$

$$\vec{E} = -\vec{F}_e / e$$

ถ้าหาก \vec{E} มีค่าคงที่ และ วัสดุที่ใช้สร้างฮอลล์เจเนอเรเตอร์มีคุณสมบัติเหมือนกันตลอดทั่วแผ่น ดังนั้นค่าความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนก็จะมีค่าคงที่ตลอดเวลาด้วย โดยความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่นี้เราจะเรียกว่า Drift velocity (v_d) ซึ่ง \vec{v}_d นี้จะมีทิศทางเดียวกันกับทิศทางของ \vec{E} และจะมีความสัมพันธ์กับค่าความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (Electron mobility ; μ) ดังแสดงในสมการที่ 2.4 [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{v}_d = \mu \bar{E} \quad (2.4)$$

ซึ่ง $\bar{v}_d =$ Drift velocity (m s^{-1})

$\mu =$ Electron mobility ($\text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)

จากสมการ (2.1) และ (2.4) จะได้ $\mu = -e\bar{v}_d/\bar{F}_e$

ดังนั้นส่วนประกอบของเวกเตอร์ความเร็ว (\bar{v}_d) ในทิศทางต่างๆ ที่สภาวะคงที่จะเป็นดังนี้

$$v_x = -\mu F_x / e \quad (2.5)$$

โดย $F_x = -e[E_x + B(v_x \times v_z)]$
 $= -e(E_x - v_y B)$ (2.6)

แทน (2.6) ใน (2.5) จะได้

$$v_x = \mu(E_x - v_y B) \quad (2.7)$$

$$v_y = -\mu F_y / e \quad (2.8)$$

โดย $F_y = -e[E_y + B(v_y \times v_z)]$
 $= -e(E_y + v_x B)$ (2.9)

แทน (2.9) ใน (2.8) จะได้

$$v_y = \mu(E_y + v_x B) \quad (2.10)$$

$$v_z = -\mu F_z / e \quad (2.11)$$

โดย $F_z = -e[E_z + B(v_z \times v_z)]$
 $= -eE_z + 0$
 $= -eE_z$ (2.12)

$$v_z = -\mu E_z \quad (2.13)$$

E_z จะมีค่าเป็น 0 (ศูนย์) ดังนั้น $v_z = 0$

จากกฎของโอห์ม $\bar{J} = \sigma \bar{E}$ ซึ่งจะกำหนดจากความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นระหว่าง \bar{E} และเวกเตอร์ความหนาแน่นของกระแสไฟ (\bar{J}) โดย σ คือค่าความนำทางไฟฟ้ของวัสดุที่มีความยาวหนึ่งหน่วย ($1/\Omega \text{ m}$) และจาก [6] สมการแสดงความหนาแน่นของกระแสไฟที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะมีควมสัมพันธ์ดังนี้ $\bar{J} = -nev_d$ โดย \bar{J} คือเวกเตอร์ปริมาณของกระแสไฟต่อ

พื้นที่หนึ่งหน่วย ($A \text{ m}^2$), n คือจำนวนของอิเล็กตรอนในปริมาตรหนึ่งหน่วย และ \bar{v}_d คือ Drift velocity ดังนั้นส่วนประกอบของเวกเตอร์ \bar{J} จะเป็นดังนี้ [7]

$$J_x = -nev_x = \sigma \{ (E_x - \mu B E_y) / (1 + \mu^2 B^2) \} \quad (2.14)$$

$$J_y = -nev_y = \sigma \{ (E_y + \mu B E_x) / (1 + \mu^2 B^2) \} \quad (2.15)$$

ถ้ามีแผ่นฮอลล์เจเนอเรเตอร์รูปสี่เหลี่ยมที่มีคุณสมบัติเหมือนกันตลอดทั่วแผ่น ดังแสดงในภาพที่ 2 และถ้าหากขั้วเอาต์พุตของแผ่นฮอลล์ไม่ได้ต่อเข้ากับโหลดใดๆ ดังนั้นกระแสเอาต์พุต J_y ตามสมการ (2.15) จะมีค่าเป็น 0 ($J_y = 0$)

$$\text{ดังนั้น} \quad E_y = -\mu B E_x \quad (2.16)$$

จากสมการ (2.7) $v_y = 0$ ดังนั้น

$$v_x = \mu E_x \quad (2.17)$$

นำกฎของโอห์ม ($\bar{J} = \sigma \bar{E}$) มาใช้ในสมการ (2.16) และ (2.17) จะได้

$$E_x = J_x / \sigma \quad (2.18)$$

แทนสมการ (2.18) ใน (2.16) จะได้

$$\begin{aligned} E_y &= -(\mu / \sigma) J_x B \\ &= -R_h J_x B \end{aligned} \quad (2.19)$$

โดย R_h คือค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall coefficient) จะมีค่าเท่ากับ μ / σ ($\text{m}^3 \text{C}^{-1}$)

R_h จะเป็นค่าลบถ้าพาหะส่วนใหญ่เป็นอิเล็กตรอน และจะเป็นบวกถ้าพาหะส่วนใหญ่เป็นโฮล โดยค่า R_h นี้จะเป็นค่าคงที่ที่จะต้องนำไปคูณกับผลคูณระหว่าง J_x กับ B ซึ่งจะให้ผลลัพธ์ออกมาเป็นค่าแรงดันไฟ E_y

ถ้าหากมีกระแสไฟอินพุต (I_1) ไหลผ่านแผ่นฮอลล์ โดยกระแสไฟ I_1 มีค่าเท่า $J_x \cdot w \cdot d$ และเมื่อทำการอินทิเกรตหาค่าแรงดัน E_y ตลอดความกว้างของแผ่นฮอลล์ ก็จะได้ค่าแรงดันไฟฮอลล์ (V_h) ดังนี้

$$\begin{aligned}
 V_h &= \int_0^w E_y dy \\
 &= E_y \Big|_0^w \\
 &= -R_h J_x B \Big|_0^w \\
 &= -(R_h I_1 B) / (w.d) \Big|_0^w \\
 V_h &= -(R_h I_1 B) / d \quad (2.20)
 \end{aligned}$$

แรงดันไฟ V_h นี้จะได้ออกมาจากการวัดโดยใช้โวลต์มิเตอร์วัดคร่อมที่ขั้วเอาต์พุต(ขั้วที่3 และ4) ของแผ่นฮอลล์เจเนอเรเตอร์ ที่แสดงในภาพที่ 2.1 โดยผลคูณของค่าตัวแปรอินพุต 2 ตัวคือ I_1 และ B ในสมการที่ (2.20) ก็จะได้เป็นค่าแรงดันไฟฮอลล์ V_h ออกมา

2.1. วิธีการหาค่าของ Mobility เพื่อเป็นแนวทางในการหาค่าของ Hall coefficient [8]

จากภาพที่แสดงถึงปรากฏการณ์ของฮอลล์ (รูปที่ 1) เมื่อปรากฏการณ์อยู่ในสภาวะสมดุล (Equilibrium state) จะทำให้แรงที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า (q) ผ่านสนามไฟฟ้า E ($F_e = q E$) มีค่าที่สมดุลกับแรงที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า (q) ผ่านสนามแม่เหล็ก B ($F_m = B q v_d$)

$$\text{ดังนั้นจะทำให้} \quad q E = B q v_d \quad (2.21)$$

โดย $E =$ ความเข้มสนามไฟฟ้า ($V m^{-1}$)

$q =$ ประจุไฟฟ้า (C)

$B =$ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (T หรือ $V s m^{-2}$)

$v_d =$ Drift velocity ($m s^{-1}$)

จากรูปที่ 1 แรงดันไฟฮอลล์ V_h (V) จะมีค่าเท่ากับความเข้มสนามไฟฟ้า E ($V m^{-1}$) คูณกับความหนาของแผ่นฮอลล์ d (m) ดังนั้น $V_h = E d$

จากสมการแสดงความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (J) [6]

$$J = nq v_d = \rho v_d = I/wd \quad (\text{A m}^{-2}) \quad (2.22)$$

โดย n = จำนวนของอิเล็กตรอนในปริมาตรหนึ่งหน่วย

$$\rho = nq = \text{ความหนาแน่นของประจุ} \quad (\text{C m}^{-3})$$

I = กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแผ่นฮอลล์ (A)

w = ความกว้างของแผ่นฮอลล์ (m)

จากสมการ (2.21) และ (2.22) จะได้

$$V_h = Ed = B v_d d = (BJd)/\rho = BI/\rho w \quad (\text{V}) \quad (2.23)$$

จากสมการ (2.23) ค่าของ V_h , B , I และ w จะสามารถวัดค่าออกมาได้ ดังนั้นเมื่อนำเอาค่าต่าง ๆ ที่วัดได้มาแทนในสมการ (2.23) ก็จะทำให้ได้ค่าของ ρ ออกมา

จากสมการแสดงค่าความนำทางไฟฟ้า (σ) [9]

$$\sigma = nq\mu = \rho\mu \quad (2.24)$$

โดยค่าความนำทางไฟฟ้าของวัสดุนี้จะสามารถวัดค่าออกมาได้ในหน่วย $1/\Omega \text{ m}$ ดังนั้นเมื่อนำเอาค่า σ ที่วัดได้ และ ค่า ρ ที่ได้จากสมการที่ (2.23) มาแทนในสมการ (2.24) ก็จะทำให้ได้ค่า Mobility ; μ ออกมา ซึ่งค่าของ μ จะสัมพันธ์กับค่า R_H ดังแสดงในสมการ (2.19)

สิ่งที่ต้องพิจารณาเบื้องต้นในการออกแบบ

สิ่งที่สำคัญเป็นอย่างยิ่งสำหรับการออกแบบฮอลล์เจเนอเรเตอร์ก็คือ ความจำเป็นที่จะต้องรักษาค่า R_H (จากสมการ 2.20) ให้มีค่าคงที่ตลอดเวลา ซึ่งจะเป็นผลทำให้อัตราส่วนระหว่างค่า V_h กับค่า I_1 และ B คงที่ตามไปด้วย โดยความสำคัญของค่าที่ใช้แสดงถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (Electron mobility ; μ) สำหรับปรากฏการณ์ของฮอลล์จะแสดงไว้อย่างชัดเจนอยู่แล้วในสมการ (2.19) และ (2.20) และค่าของ μ นี้ควรมีค่ามาก ๆ ทั้งนี้เพราะว่าค่า R_H จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าของ μ ($R_H = \mu/\sigma$) ดังนั้นถ้าต้องการให้ฮอลล์เจเนอเรเตอร์มีความไวในการตรวจจับสูง ก็จะต้องเลือกวัสดุที่มีคุณสมบัติด้านความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสูง ๆ โดยจะต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ ถึงแม้ว่าจะค่าความนำไฟฟ้าที่ต่ำและมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ต่ำก็ตาม วัสดุที่เหมาะสมสำหรับความต้องการดังกล่าวจะเป็น

วัสดุที่เป็นผลสมระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ (Intermetallic semiconducting) ซึ่งจะอยู่ในตารางธาตุคอลัมน์ III และ V

วัสดุประเภทโลหะจะไม่ถูกนำมาพิจารณาในการสร้างฮอลล์เจเนอเรเตอร์ ทั้งนี้เพราะว่ามีคุณสมบัติด้านความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ต่ำ ส่วนวัสดุประเภทสารกึ่งตัวนำนั้นจะมีการไหลของประจุได้ดีถ้ามีการกระตุ้นหรือไบอัส [10]

สำหรับฮอลล์เจเนอเรเตอร์ที่จะนำมาใช้งาน จะถูกสร้างจากวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ถูกเติมสารเจือด้วยโคเนอร์ (donor) ที่มีความหนาแน่น N_D ; โดยจะถูกพิจารณาจากการที่มันสามารถกระจายไอออนได้สูงสุดตลอดย่านอุณหภูมิการใช้งาน ค่าความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ (n_i) ของอิเล็กตรอนจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าแถบพลังงานช่องว่าง หรือ bandgap E_g ที่ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ โดยวัสดุที่มีค่า bandgap ที่กว้างจะเหมาะสำหรับการใช้สร้างฮอลล์เจเนอเรเตอร์มากกว่าวัสดุที่มีค่า bandgap ที่แคบ

แต่อย่างไรก็ตามสารกึ่งตัวนำที่มี bandgap ที่กว้างก็จะมีคุณสมบัติด้านความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่มี bandgap ที่แคบกว่าดังแสดงในตาราง 1

ตารางที่ 1

แสดงค่าพารามิเตอร์ของคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กของวัสดุที่ใช้ในการสร้างฮอลล์เจเนอเรเตอร์ [11]

ประเภทวัสดุ	$\mu_n(300\text{ K})$ ($\text{cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}^{-1}$)	$\mu_p(300\text{ K})$ ($\text{cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}^{-1}$)	E_{g0} (eV)	R_h ($\text{cm}^3\text{ C}^{-1}$)
Ge	$3.9 \cdot 10^3$	$1.9 \cdot 10^3$	0.75	$-3.67 \cdot 10^5$
Si	$1.5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^2$	1.16	-10^3
InSb	$7.0 \cdot 10^4$	$7 \cdot 10^2$	0.23	$-4 \cdot 10^2$
InAs	$2.3 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^2$	0.43	$-1.2 \cdot 10^2$

สมรรถนะการทำงานของฮอล์เจเนอเรเตอร์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของบรรยากาศเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับความร้อนที่เกิดขึ้นภายในตัวของฮอล์เจเนอเรเตอร์เองอันเนื่องมาจากกระแสไฟอินพุท (I_1) ที่ไหลผ่านตัวมันนั่นเอง

ดังนั้นความเป็นเชิงเส้นของแรงดันไฟฮอล์ V_h อันเนื่องมาจากกระแสไฟที่ป้อนเข้าทางอินพุท I_1 (ดูความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.20) จะมีความเป็นเชิงเส้นที่ดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับค่าความสูญเสียทางความร้อนที่เกิดขึ้นมา สำหรับวิธีการแก้ไขเบื้องต้นนั้นสามารถทำได้โดยการเลือกใช้แผ่นฮอล์ที่ไม่มีกรเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติตามอุณหภูมิ สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันฮอล์ V_h อันเนื่องมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟอินพุท I_1 จะอธิบายได้ดังนี้

ถ้ากำหนดให้ Q คือปริมาณของการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีการนำพาระหว่างผิวหน้าทั้งสองของแผ่นฮอล์ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับค่าความสูญเสียกำลังงานสูงสุด P_{max} (ในรูปของค่า r.m.s.) ต่อพื้นที่ผิวหน้าหนึ่งหน่วย A โดยจะแสดงดังนี้

$$Q = P_{max} / A \quad (2.25)$$

โดยที่

$$P_{max} = I_{1m}^2 * R_{in}$$

และ

$$A = 2WL$$

เมื่อ I_{1m} = กระแสไฟอินพุทสูงสุดขณะ $\Delta T = 0$

R_{in} = ค่าความต้านทานอินพุทของแผ่นฮอล์ (ในรูปที่ 2)

W = ความกว้างของแผ่นฮอล์

L = ความยาวของแผ่นฮอล์

ดังนั้น

$$Q = (I_{1m}^2 * R_{in}) / 2WL \quad (2.26)$$

จะได้ค่าแรงดันไฟฮอล์ขณะเปิดวงจรทางเอาต์พุทค่าสูงสุด (V_{hm}) เท่ากับ

$$\begin{aligned} V_{hm} &= W.B [2Q/d]^{1/2} [\mu/ne]^{1/2} \\ &= W.B [\mu R_h]^{1/2} [2Q/d]^{1/2} [12] \end{aligned} \quad (2.27)$$

โดยค่าอุณหภูมิบรรยากาศและความร้อนที่เกิดขึ้นจากที่กล่าวมาจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไม่เพียงเฉพาะแต่ค่าความหนาแน่นของประจุเท่านั้น แต่ยังจะทำให้คุณสมบัติด้านความสามารถในการเคลื่อนที่ของประจุเปลี่ยนแปลงอีกด้วย สำหรับความเป็นเชิงเส้นในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของฮอล์เจเนอเรเตอร์ ซึ่งก็คือความเป็นเชิงเส้นในการเปลี่ยนแปลงของค่า V_h

ต่อ B นั้น นอกจากจะขึ้นอยู่กับค่ากระแสไฟอินพุท $12(I_1)$ ดังที่กล่าวมาแล้ว ยังขึ้นอยู่กับปรากฏการณ์อื่น ๆ ของฮอลล์อีก เช่นแฟกเตอร์ทางขนาดรูปร่างของฮอลล์เจเนอเรเตอร์ เป็นต้น ซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป และจากสมการที่ (2.20) จะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าทางเอาต์พุทของฮอลล์เจเนอเรเตอร์ขณะเปิดวงจรจะขึ้นอยู่กับความหนา (d) ของแผ่นฮอลล์ (รูปร่างสี่เหลี่ยม) โดยแรงดันไฟฮอลล์ทางเอาต์พุทจะมีค่าสูงขึ้นถ้าหากความหนาของแผ่นฮอลล์มีค่าน้อยลง ดังนั้นจึงเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะใช้แผ่นวัสดุบางๆหรือแผ่นฟิล์มสร้างตัวฮอลล์เจเนอเรเตอร์ และโดยปกติวิธีการสร้างเพื่อลดความหนาลงให้มากที่สุด จะใช้การสร้างด้วยวิธีการพิมพ์จากแม่พิมพ์ ซึ่งจะสามารถสร้างให้มีความหนาน้อยที่สุดประมาณ 10 ไมโครเมตร [13]

ดังนั้นสิ่งที่ต้องพิจารณาเบื้องต้นในการออกแบบและสร้างฮอลล์เจเนอเรเตอร์ก็คือ การเลือกวัสดุที่เหมาะสมเพื่อนำมาใช้ในการสร้าง โดยต้องเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติด้านความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (μ) ที่สูง, มีแถบพลังงานช่องว่าง หรือ bandgap ที่กว้างและมีขนาดรูปร่างและความหนาของแผ่นฮอลล์ที่เหมาะสม โดยในเรื่องความหนาของแผ่นฮอลล์นั้นได้กล่าวไปแล้วว่าควรจะมีค่าน้อยที่สุด ส่วนคุณสมบัติทางขนาดรูปร่างอื่น ๆ จะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

การพิจารณาถึงวัสดุที่ใช้ในการสร้าง

การเลือกวัสดุที่เหมาะสมเป็นสิ่งที่สำคัญสูงสุดสิ่งหนึ่งสำหรับการออกแบบ และการสร้างฮอลล์-เจเนอเรเตอร์ การควบคุมให้วัสดุมีความบริสุทธิ์และมีคุณสมบัติเหมือนกันโดยตลอดจะเป็นสิ่งที่ทำให้ได้วัสดุที่จะนำมาใช้ในการสร้างมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามที่ต้องการ อย่างไรก็ตามการใช้วัสดุหลายๆประเภทที่มีลักษณะเป็นก้อนผลึกก็เพียงพอสำหรับการนำมาใช้ในการสร้างฮอลล์-เจเนอเรเตอร์ โดยวัสดุที่พาหะประจุส่วนใหญ่เป็นอิเล็กตรอน (สารกึ่งตัวนำชนิด N) มักจะถูกเลือกนำมาใช้ในการสร้างฮอลล์เจเนอเรเตอร์มากกว่าสารกึ่งตัวนำชนิด P เพราะว่าสารกึ่งตัวนำชนิด N จะมีคุณสมบัติด้านความสามารถในการเคลื่อนที่ของประจุสูงกว่าสารกึ่งตัวนำชนิด P (ดูรายละเอียดในตารางที่ 2.1) โดยวัสดุชนิด InSb (Indium antimonide) และ InAs (Indium arsenide) จะเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้ในการสร้างฮอลล์เจเนอเรเตอร์กันมากในปัจจุบัน [14] ทั้งนี้เพราะว่ามีค่าความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (μ_n) ที่สูงกว่าวัสดุชนิด Ge และ Si (อ้างอิงจากตาราง 1) และจากการที่อินเดียมแอนติโมนไนด์ (InSb) มีคุณสมบัติด้านความสามารถ

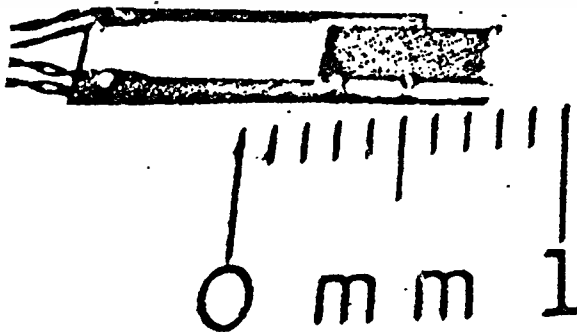
ในการเคลื่อนที่ของอิเล็กทรอนิกส์ที่สูงจึงเป็นวัสดุที่เหมาะสมที่สุดในตาราง 2.1 ที่จะใช้ในการสร้างฮอลล์เจเนอเรเตอร์

คุณสมบัติต่าง ๆ ของฮอลล์เจเนอเรเตอร์

โดยปกติทั่วไปฮอลล์เจเนอเรเตอร์จะมีความหนาน้อยกว่า 100 ไมโครเมตร โดยจะสร้างขึ้นจากวัสดุประเภทที่เป็นลักษณะกึ่งนำ โดยใช้เทคนิคการขัดถู (abrasion), การ lapping และการทำแม่พิมพ์โดยแผ่นฮอลล์จะถูกติดตั้งบนแผ่นฉนวนแบบเซรามิก ที่มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวอันเนื่องมาจากความร้อนที่เท่ากัน เพื่อเป็นตัวรองรับแรงกระทำต่างๆ และป้องกันไม่ให้แผ่นฮอลล์เกิดการแตกหัก ในรูปที่ 3 จะแสดงตัวอย่างส่วนหนึ่งของฮอลล์เจเนอเรเตอร์พร้อมสายตัวนำก่อนที่จะถูกห่อหุ้มด้วยแผ่นวัสดุป้องกัน ซึ่งจะเป็แผ่นวัสดุเซรามิกชนิดเดียวกับที่ใช้เป็นฐานรอง โดยวัสดุผสมระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ ในตารางชุดข้อที่ 3 และ 4 จะถูกวางอยู่บนฐานรองที่เป็นฉนวน วิธีการสร้างแบบนี้จะถูกใช้สำหรับการสร้างฮอลล์เจเนอเรเตอร์ที่มีโครงสร้างขนาดเล็กและเล็กมาก และโครงสร้างแบบแผ่นฟิล์มนี้จะมีข้อดีมากกว่าการสร้างจากกึ่งนำ ทั้งนี้เนื่องจากเทคนิคการแยกแยะการพิมพ์ภาพสามารถที่จะสร้างฮอลล์เจเนอเรเตอร์ที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนได้ เช่น ฮอลล์โปรบความละเอียดสูง ดังแสดงในรูปที่ 4

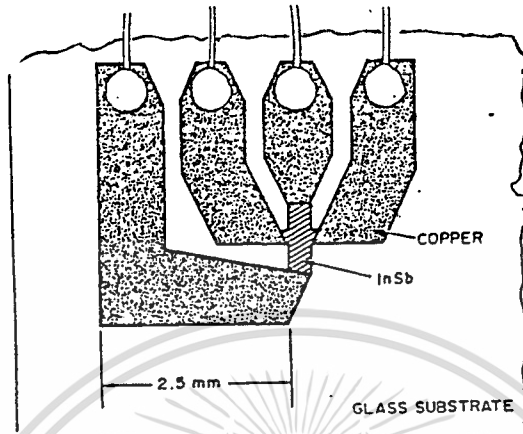
รูปที่ 3

แสดงตัวอย่างส่วนหนึ่งของฮอลล์เจเนอเรเตอร์พร้อมสายตัวนำก่อนที่จะถูกห่อหุ้มด้วยแผ่นวัสดุป้องกัน



รูปที่ 4

แสดงฮอลล์โปรปความละเอียดสูง



ค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของฮอลล์เจเนอเรเตอร์แบบแผ่นฟิล์มจะสามารถปรับปรุงให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการได้ โดยการกำหนดความหนาของแผ่นฟิล์มให้เหมาะสมที่สุด ยิ่งกว่านั้น ความสูญเสียทางด้านความร้อนเนื่องจากการแผ่กระจาย และการนำกระแสไฟจะเกิดขึ้นในแผ่นฟิล์มบาง ๆ มากกว่าวัสดุแบบก้อนผลึก

ฮอลล์เจเนอเรเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยวงจรสมมูลย์ 4 ขั้ว และสามารถจะอธิบายในเทอมของค่าพารามิเตอร์ทางอินพุต และเอาต์พุตของมัน ได้ดังนี้

$$V_1 = R_{11}I_1 + R_{12}I_2 \quad (2.28)$$

$$V_2 = R_{21}I_1 + R_{22}I_2 \quad (2.29)$$

สมการอันดับแรก (2.28) จะอ้างอิงถึงวงจรทางอินพุตเมื่อ I_1 คือกระแสไฟทางอินพุตที่เกิดจากการป้อนแรงดันไฟ V_1 และ R_{11} คือความต้านทานอินพุต ซึ่งกำหนดได้ในเทอมของ $R_{11} = (V_1/I_1)_{I_2=0}$ ค่า V_1 และ I_1 นี้ จะเป็นผลทำให้เกิดแรงดันฮอลล์ที่ตกคร่อมอยู่ที่ขั้วเอาต์พุต ซึ่งจะทำให้เกิด I_2 และถ้าพาหนะประจุส่วนใหญ่เป็นอิเล็กตรอนก็จะทำให้ได้ค่า $R_{12} = -(R_H B/d)$ โอห์ม เมื่อ R_H มีหน่วยเป็น $m^3 C^{-1}$, B มีหน่วยเป็นเทสลา (Tesla) หรือ Weber / m^2 และ d มีหน่วยเป็นเมตร (m)

สมการอันดับที่สอง (2.29) จะเป็นสมการของวงจรทางเอาต์พุต พารามิเตอร์ $R_{22} = (V_2/I_2)_{I_1=0}$ ซึ่งจะเป็นค่าความต้านทานเอาต์พุตของฮอลล์เจเนอเรเตอร์ในสภาวะที่ไม่มีโหลด และเมื่อฮอลล์เจเนอเรเตอร์ถูกต่อกับโหลดโดยใช้ความต้านทาน R_L คร่อมที่ขั้วเอาต์พุต โดยมีความต้าน

ทานอินพุทเท่ากับ R_{in} , ความต้านทานเอาต์พุทเท่ากับ R_{out} และมีอัตราขยายทางด้านแรงดัน และกระแสไฟ A_V และ A_I ดังนี้

รูปที่ 5

แสดงวงจรของฮอัสต์เจนเนอเรเตอร์ในรูปแบบของ two port network



โดยที่ V_s คือ แหล่งจ่ายไฟที่ป้อนเข้าทางอินพุทของฮอัสต์เจนเนอเรเตอร์

R_s คือ ความต้านทานภายในของแหล่งจ่ายไฟที่ป้อนเข้าทางอินพุทของฮอัสต์เจนเนอเรเตอร์

R_L คือ ความต้านทานโหลด

ก่อนอื่นมาคำนวณหาค่าความต้านทานทางอินพุท (R_{in}) ของฮอัสต์เจนเนอเรเตอร์ก่อน ดัง

ต่อไปนี้

จากสมการ (2.29)

$$V_2 = R_{21} I_1 + R_{22} I_2$$

$$\text{โดย } V_2 = -I_2 R_L \quad (2.30)$$

แทนสมการ (2.30) ใน (2.29)

$$I_2 = [-R_{21} / (R_{22} + R_L)] I_1 \quad (2.31)$$

แทนสมการ (2.31) ใน (2.28) ;

$$V_1 = \{R_{11} - [R_{12} R_{21} / (R_{22} + R_L)]\} I_1$$

ดังนั้นความต้านทานทางอินพุท (R_{in}) จะมีค่าเท่ากับ

$$R_{in} = V_1 / I_1 = R_{11} - [R_{12} R_{21} / (R_{22} + R_L)] \quad (2.32)$$

การคำนวณหาค่าความต้านทานทางเอาต์พุต (R_{out})

จาก Two port network ในภาพที่ 2.4, $V_1 = V_S - R_S I_1$ แล้วนำไปแทนในสมการ (2.28) จะ

ได้

$$V_S - R_S I_1 = R_{11} I_1 + R_{12} I_2$$

$$V_S = (R_{11} + R_S) I_1 + R_{12} I_2$$

$$I_1 = (V_S - R_{12} I_2) / (R_{11} + R_S) \quad (2.33)$$

แทนสมการ (2.33) ใน (2.29)

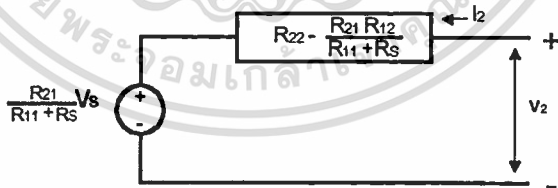
$$V_2 = [R_{21} V_S / (R_{11} + R_S)] - [R_{21} R_{12} / (R_{11} + R_S)] I_2 + R_{22} I_2$$

$$V_2 = [R_{21} V_S / (R_{11} + R_S)] + \{R_{22} - [R_{21} R_{12} / (R_{11} + R_S)]\} I_2 \quad (2.34)$$

วงจรสมมูลย์เทวินิน (Thevenin equivalent circuit) สามารถเขียนได้โดยตรงจากสมการ (2.34) ได้ดังรูปที่ 6 ดังต่อไปนี้

รูปที่ 6

แสดงวงจรสมมูลย์เทวินินจากสมการ (2.34)



จากรูปที่ 6 ค่าความต้านทานทางเอาต์พุต (R_{out}) จะมีค่าเท่ากับ

$$R_{out} = R_{22} - [R_{21} R_{12} / (R_{11} + R_S)] \quad (2.35)$$

การคำนวณหาค่าอัตราขยายทางด้านกระแสไฟ (A_i)

จากสมการ (2.31)

$$I_2 = [-R_{21} / (R_{22} + R_L)] I_1$$

$$\text{ดังนั้น } A_i = I_2 / I_1 = -R_{21} / (R_{22} + R_L) \quad (2.36)$$

การคำนวณหาค่าอัตราขยายทางด้านแรงดันไฟ (A_v)

จากสมการ (2.31)

$$\begin{aligned} V_2 &= R_{21}I_1 + R_{22}I_2 \\ &= (R_{21}V_1 / R_{in}) - (R_{22}V_2 / R_L) \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น } A_v = V_2 / V_1 = R_{21}R_L / [R_{in}(R_L + R_{22})] \quad (2.37)$$

สำหรับสมการที่แสดงค่า R_{in} , R_{out} , A_i และ A_v ซึ่งคำนวณหาได้ดังสมการที่ (2.32), (2.35), (2.36 และ (2.37) ตามลำดับนั้น จะเกี่ยวข้องกับค่ากระแสไฟทางอินพุท, ความเป็นเชิงเส้นของแรงดันไฟทางเอาต์พุทต่อการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก และการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติตามอุณหภูมิ เป็นต้น ซึ่งองค์ประกอบต่างๆ ดังกล่าวจะมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของฮอลล์เจนเนอเรเตอร์ ดังจะได้อธิบายดังต่อไปนี้

ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก

ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของฮอลล์เจนเนอเรเตอร์ขณะเปิดวงจรทางด้านเอาต์พุท (r_{OB}) สามารถที่กำหนดได้เป็น $r_{OB} = V_h / B$ โดย V_h คือแรงดันไฟเอาต์พุทของฮอลล์เจนเนอเรเตอร์ และ B คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก โดยปกติค่าความไวในการตรวจจับนี้มักจะไม่เป็นเชิงเส้นต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า B ทั้งนี้เนื่องจากผลจากขนาดมิติต่าง ๆ ของฮอลล์เจนเนอเรเตอร์ โดยขนาดโครงสร้างของแผ่นฮอลล์รูปสี่เหลี่ยมมักจะมีผลสำคัญต่อความไวในการตรวจจับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอัตราส่วนของความยาวกับความกว้าง $[l / w]$ และลักษณะรูปร่าง, ขนาดของฮอลล์เจนเนอเรเตอร์ สำหรับตำแหน่งของขั้วอิเล็กโทรด จากรูปที่ 2 เราอาจจะมองได้ว่าขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองขั้ว ซึ่งเป็นจุดที่ถูกใช้ป้อนกระแสไฟอินพุท อาจจะมีการลัดวงจรกันทันทีเนื่องจากทั้งสองขั้วอยู่ใกล้ชิดกันมาก ดังนั้นในสมการที่ (2.20) ซึ่งแสดงค่า $V_h = -R_h I B / d$ จะเป็นจริงได้ถ้าหากอัตราส่วนของ l / w มีค่าเป็นอนันต์ ($l / w \rightarrow \infty$) และในขณะที่สนามแม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล็กมีค่าเป็นศูนย์ การไหลพุ่งของกระแสไฟอินพุทจะตั้งฉากกับระนาบพื้นผิวของแผ่นฮอลล์ดังรูปที่ 2 แต่ถ้าหากมีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน การไหลพุ่งของกระแสดังกล่าวก็จะเบี่ยงเบนไปเป็นมุม θ ซึ่งเราเรียกว่า Hall angle

ดังนั้นค่าของ V_h จึงต้องคูณด้วยแฟกเตอร์สำหรับการแก้ไขทางด้านขนาดรูปร่างนั่นก็คือ ต้องคูณด้วยค่า Hall angle และอัตราส่วนของ l/w [15] ซึ่งสมการแสดงค่าของ V_h จะเปลี่ยนเป็น

$$V_h = [-R_h \cdot I \cdot B / d] F(l/w, \theta) \quad (2.38)$$

รูปที่ 7

แสดงเวกเตอร์โคอะแกรมความหนาแน่นของการไหลของกระแสไฟอินพุทเนื่องจากอิเล็กตรอน (J_n)

โดย J_n จะทำมุม θ_n กับ J_x และความหนาแน่นการไหลของกระแสไฟอินพุทเนื่องจากโฮล (J_p)

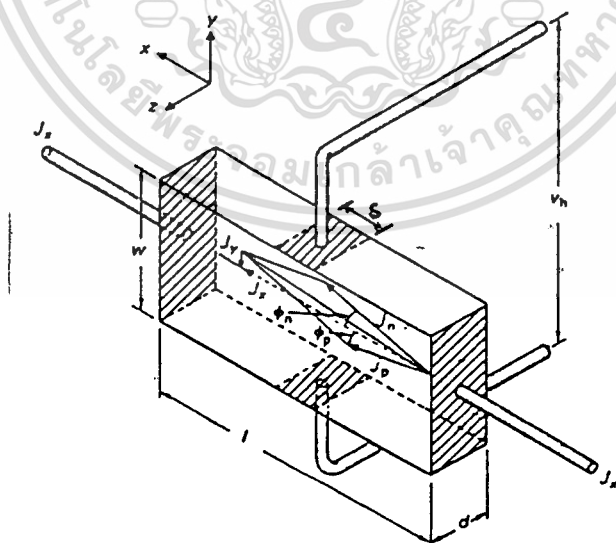
โดย J_p จะทำมุม θ_p กับ J_x ; J_y คือ ความหนาแน่นการไหลของกระแสไฟที่เกิดขึ้น

จากปรากฏการณ์ของฮอลล์ ในแผ่นฮอลล์รูปสี่เหลี่ยม โดยความหนาแน่น

เส้นแรงแม่เหล็กจะมีทิศทางตามแนวแกน Z; J_x คือ ความหนาแน่น

ของกระแสไฟอินพุทซึ่งมีทิศทางตามแนวแกน X และ V_h คือ

แรงดันเอทาน์พุทของฮอลล์เจเนอเรเตอร์

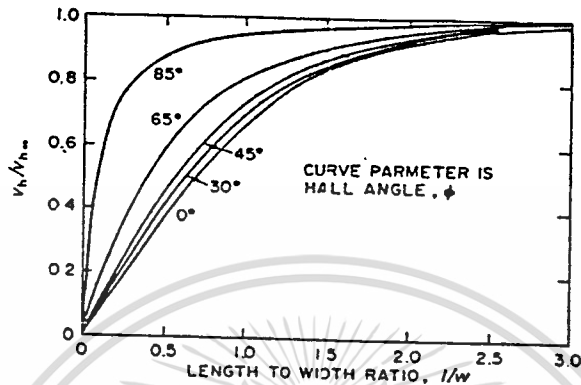


ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟเอทาน์พุทของแผ่นฮอลล์รูปสี่เหลี่ยม ซึ่งจะเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนของความยาวต่อความกว้าง (l/w) และ Hall angle (θ) จะแสดงดังในรูปที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 8

แสดงแรงดันเฮลล์ของแผ่นสอล์รูปร่างสี่เหลี่ยม ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนของความยาวต่อความกว้าง (l/w) และ Hall angle (θ) [16]



นอกจากค่า V_h จะมีผลจากค่าแฟกเตอร์สำหรับการแก้ไขทางด้านรูปร่างของสอล์ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ยังมีผลจากขนาดของขั้วอิเล็กโทรดอีกด้วย โดยค่าของ V_h จะเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนของ s/w โดย s ก็คือความยาวของขั้วอิเล็กโทรด และ w คือ ความกว้างของแผ่นสอล์ [17]

ดังนั้นจะได้

$$V_h = [-R_h \cdot I \cdot B / d] F(l/w, s/w, \theta) \quad (2.39)$$

จากสมการ (2.39) สามารถสรุปได้ว่า ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของสอล์เจเนอเรเตอร์ที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมขณะเปิดวงจรด้านเอาต์พุต (r_{OB}) จะมีความไวดังนี้

$$r_{OB} = V_h / B = [-R_h \cdot I / d] F(l/w, s/w, \theta) \quad (2.40)$$

จะเห็นได้ว่าแฟกเตอร์ที่มีผลต่อความไวในการตรวจจับก็คือ อัตราส่วนของ $l/w, s/w$ และ Hall angle (θ) และเมื่อทำการต่อโหลด (R_L) เข้าที่ขั้วเอาต์พุตของสอล์เจเนอเรเตอร์ ความต้านทาน R_L จะมีผลต่อค่าความต้านทานอินพุต (R_{in}) ดังสมการ (2.32), มีผลต่ออัตราขยายกระแสไฟ (A_v) ดังสมการ (2.36) ซึ่งจะมีผลต่อเนื่องถึงความไวในการตรวจจับของสอล์เจเนอเรเตอร์ขณะต่อโหลด (r_{LB}) ด้วย

เมื่อทำการต่อ R_L เข้าทางด้านเอาต์พุตของฮอลล์เจนเนอเรเตอร์ ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าทางเอาต์พุตที่ตกคร่อมโหลด (R_L) จะเป็นดังนี้

$$V_{hL} = I_2 \cdot R_L \quad (2.41)$$

จากสมการ (2.39)

$$V_h = [-R_h I B / d] F (l/w, s/w, \theta)$$

โดย $I =$ กระแสไฟฟ้าทางอินพุต $= I_1$

$$\text{ดังนั้น } V_h = (-R_h / d) I_1 \cdot B F (l/w, s/w, \theta)$$

$$\text{จาก } A_i = I_2 / I_1 = -R_{21} / (R_{22} + R_L)$$

ดังนั้นจะได้ค่าความไวในการตรวจจับเมื่อมีโหลดมาต่อดังนี้

$$r_{LB} = \{(-R_h / d) \cdot I_1 F (l/w, s/w, \theta)\} / \{1 + (R_{22} / R_L)\} \quad (2.42)$$

และถ้าหาก $R_L \gg R_{22}$ ก็จะทำให้ $r_{LB} = r_{OB}$

จากสมการ (2.42) จะเห็นได้ว่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของฮอลล์เจนเนอเรเตอร์รูปสี่เหลี่ยม จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ l/w , s/w , Hall angle (θ) และค่าของ R_L อีกด้วย

ความเป็นเชิงเส้นในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก

ความเป็นเชิงเส้นในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของฮอลล์เจนเนอเรเตอร์ก็คือ ความเป็นเชิงเส้นในการเปลี่ยนแปลงของค่า V_h ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า B หรืออาจจะกล่าวได้ง่ายๆ ว่าอัตราส่วนของค่า V_h/B ต้องมีค่าคงที่ตลอดย่านการเปลี่ยนแปลงของค่า B จึงจะถือได้ว่าฮอลล์เจนเนอเรเตอร์ตัวนั้นๆ มีความเป็นเชิงเส้นที่ดี จากหัวข้อ 2.5 จะเห็นได้ว่าสิ่งที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับอัตราส่วนของ V_h/B ก็คือความไวในการตรวจจับ (r_{LB} หรือ r_{OB}) โดยสมการ (2.42) ซึ่งเป็นสมการที่แสดงถึงความไวในการตรวจจับของฮอลล์เจนเนอเรเตอร์ขณะที่ต่อกับโหลด จะเป็นดังนี้

$$r_{LB} = \{(-R_h / d) \cdot I_1 F (l/w, s/w, \theta)\} / \{1 + (R_{22} / R_L)\}$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าตัวแปรที่มีผลต่อความเป็นเชิงเส้นของฮอลล์เจนเนอเรเตอร์ก็คือค่าของ R_h และค่าความต้านทานโหลด (R_L) ซึ่งค่าของ R_h นั้น มักจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 9

รูปที่ 9

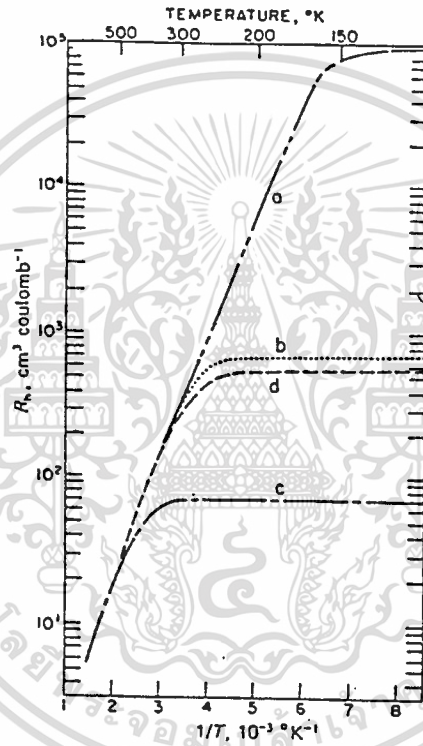
แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า R_H (Hall coefficient) ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของวัสดุ

ชนิดอินเดียมแอนติโมนิไนด์ (InSb) ; โดย (a),(b),(c) คือเส้นกราฟของก้อนผลึก InSb

ที่มีความเข้มข้นของสารเจือปน $\approx 10^{14}$, $9 \cdot 10^{15}$ และ $10^{17}/\text{cm}^3$

ตามลำดับ(d) คือเส้นกราฟของ InSb ในรูปของแผ่นฟิล์ม

$(1.4 \cdot 10^{10}/\text{cm}^3)$ [18]



จากสมการ (2.42) และรูปที่ 9 สรุปได้ว่าถ้าต้องการใช้งานฮอลล์เจเนอเรเตอร์ (ที่สร้างขึ้นจากวัสดุชนิดอินเดียมแอนติโมนิไนด์) โดยให้มีความเป็นเชิงเส้นในการตรวจจับตลอดย่านอุณหภูมิใช้งาน 0 - 55 °C หรือ 273 - 328 K ก็จะต้องใช้วัสดุที่มีค่า R_H คงที่ตลอดย่านอุณหภูมิใช้งานดังกล่าว และวัสดุที่เหมาะสมที่สุดก็คือ InSb ที่มีความเข้มข้นของการเจือปน $10^{17}/\text{cm}^3$ (เส้นกราฟ C)

ส่วนความต้านทานโหลด (R_L) นั้น จะต้องเลือกใช้โหลดที่มีค่าความต้านทานที่คงที่ตลอดย่านอุณหภูมิใช้งานและตลอดย่านของกระแสโหลดที่จะไหลผ่านด้วย

เสถียรภาพการทำงานอันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

ค่าสัมประสิทธิ์ทางไฟฟ้าและการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟอันเนื่องจากสนามแม่เหล็กของวัสดุประเภทสารกึ่งตัวนำ จะถูกนำมาพิจารณาสำหรับการสร้างฮอลล์เจเนอเรเตอร์ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวจะมีการเปลี่ยนแปลงโดยขึ้นอยู่กับค่าของอุณหภูมิด้วย ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์, ค่าความต้านทานทางอินพุทและเอาต์พุทของฮอลล์เจเนอเรเตอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงโดยขึ้นอยู่กับความร้อนอันเนื่องจากกระแสไฟที่ไหลผ่านตัวฮอลล์เจเนอเรเตอร์ขณะทำงานอยู่ในอุณหภูมิบรรยากาศ ดังนั้นถ้าต้องการให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ใดๆ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงการทำงานใดๆ อันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในช่วงการทำงาน เช่น -20°C ถึง $+50^{\circ}\text{C}$ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านั้นจะต้องสร้างขึ้นจากวัสดุที่มีพลังงานช่องว่าง (energy bandgap) ที่กว้างเพียงพอ ซึ่งจะทำให้ประจุไฟฟ้าที่ถูกกักเก็บขึ้นมาอันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมิมีปริมาณสัดส่วนเพียงเล็กน้อยจากความหนาแน่นของพาหะประจุรวมทั้งหมด สำหรับวัสดุในตารางธาตุ 3 และ 4 นั้น สารกึ่งตัวนำชนิด N ต้องมีความหนาแน่นของโค-นอร์บริสุทธิที่มีปริมาณสูงเพียงพอ เพื่อที่จะขยายย่าน extrinsic ให้ไปถึง $+50^{\circ}\text{C}$ อย่างไรก็ตาม ยังมีวิธีการบางอย่างที่จะลดผลอันเนื่องจากอุณหภูมิ เช่น โดยการลดความไว และประสิทธิภาพการทำงานของมันลง ซึ่งจะทำให้โดยการทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (μ) มีค่าต่ำลงโดยวิธีการทำให้อิเล็กตรอนมีการเคลื่อนแบบกระจัดกระจาย และยังมีอีกวิธีหนึ่งก็คือการใช้อุปกรณ์อื่นๆ เข้ามาต่อร่วมในวงจรฮอลล์เจเนอเรเตอร์เพื่อเป็นการชดเชยผลจากการเปลี่ยนแปลงการทำงานอันเนื่องจากอุณหภูมินั้นเองซึ่งทำการ โหลดที่ขั้วเอาต์พุทของฮอลล์เจเนอเรเตอร์ด้วยตัวต้านทานที่เป็นเชิงเส้น R_L ต่ออนุ-กรมกับเทอร์มิสเตอร์ R_T ก็สามารถใช้เป็นการชดเชยได้

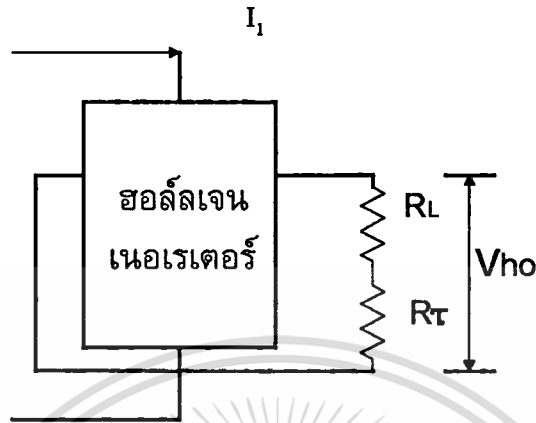
จากรูปที่ 10 แรงดันไฟทางเอาต์พุทของฮอลล์เจเนอเรเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากอุณหภูมิ $V_{HL(T)}$ ซึ่งได้จากการวัดคร่อมที่ R_L จะมีค่าดังนี้

$$I_L = V_{HL} / R_L \quad (2.43)$$

โดย $I_L =$ กระแสที่ไหลผ่านโหลด

รูปที่ 10

แสดงการชดเชยการเปลี่ยนแปลงการทำงานอันเนื่องจากอุณหภูมิโดยใช้ R_L และ R_T



V_{HL} = แรงดันฮอลล์ที่ตกคร่อมโหลด

R_L = ความต้านทานโหลด

R_T = เทอร์มิสเตอร์

จากข้างต้นเราทราบแล้วว่าแรงดันฮอลล์จะมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ฉะนั้น

$$I_{L(T)} = V_{HL(T)} / R_L \quad (2.45)$$

ดังนั้นจะได้ค่าแรงดันเอาต์พุตของฮอลล์เจนเนอเรเตอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิดังนี้

$$\begin{aligned} V_{ho(T)} &= I_{L(T)} \cdot R_{22} + I_{L(T)} \cdot (R_L + R_T) \\ &= [V_{HL(T)} / R_L] \cdot R_{22(T)} + [V_{HL(T)} / R_L] (R_L + R_T) \\ &= [V_{HL(T)} R_{22(T)}] / R_L + V_{HL(T)} + [V_{HL(T)} R_T] / R_L \\ &= V_{HL(T)} + [V_{HL(T)} / R_L] [R_{22(T)} + R_T] \\ &= V_{HL(T)} \cdot [1 + R_{22(T)} + R_T] / R_L \end{aligned}$$

โดยแรงดันไฟที่ตกคร่อม R_L ก็คือ $V_{HL(T)}$

$$\text{ดังนั้น} \quad V_{HL(T)} = V_{ho(T)} / \{ 1 + [R_{22(T)} + R_T] / R_L \} \quad (2.45)$$

ถ้าหากฮอลล์เงินเนอเรเตอร์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติตามการเปลี่ยนแปลงของ อุณหภูมิระหว่างค่าที่จำกัดไว้ตั้งแต่ T_1 ถึง T_2 ดังนั้นจะทำให้ $V_{HL(T1)} = V_{HL(T2)}$ และเงื่อนไขนี้จะต้อง ถูกรักษาไว้ตลอดช่วงการเปลี่ยนแปลงของค่า B และ I_1 โดยค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงค่า ความต้านทานตามอุณหภูมิของ R_T และค่าของ R_L จะต้องทำการเลือกให้เหมาะสมที่สุด



บทที่ 3

โครงสร้าง และการทำงานของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบทรานซิสเตอร์หลายขา

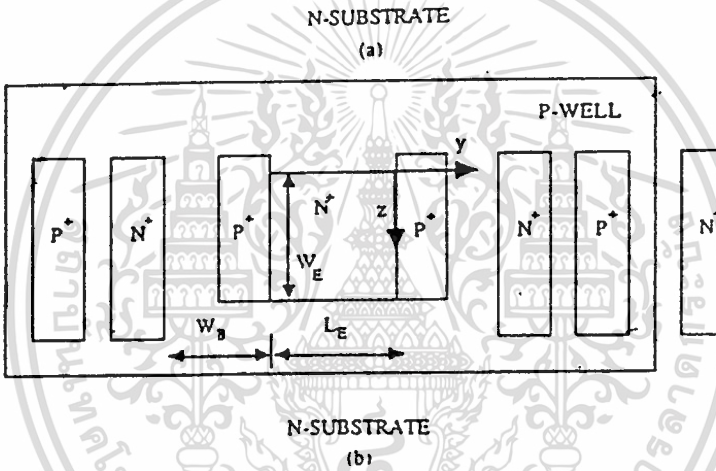
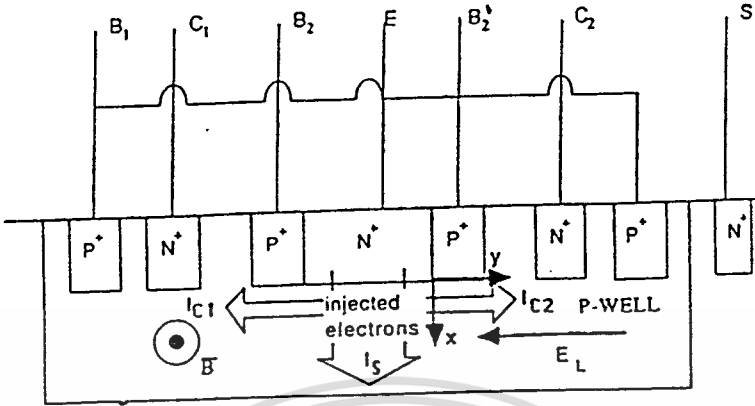
โครงสร้างและเทคโนโลยีในการสร้าง

โครงสร้างของ Magnetotransistor จะประกอบด้วยแถบ (STRIPES) P^+ 2 แถบวางอยู่ที่แนวขอบของอิมิตเตอร์ และขนานกับคอลเล็กเตอร์ดังแสดงในภาพที่ 3.1 แถบ P^+ จะทำให้เกิดผล 2 ประการดังนี้คือ ประการที่หนึ่ง มันจะบังคับให้เกิดการไหลพุ่งของประจุแบบ Lateral จากอิมิตเตอร์ไปยังคอลเล็กเตอร์ (ถ้าแถบ P^+ ถูกไบอัสด้วยแรงดันไฟ V_r และ V_r มีค่าน้อยกว่า หรือเท่ากับแรงดันอิมิตเตอร์, V_E) การบังคับให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนจะเป็นผลมาจากการไบอัสกลับระหว่างรอยต่อของแถบ P^+ กับอิมิตเตอร์ ในความเป็นจริงแล้วแถบเล็กๆ ทางด้านล่างของอิมิตเตอร์ซึ่งติดกันกับแถบ P^+ แต่ละด้านจะถูกไบอัสกลับไว้ ความกว้างของแถบที่ถูกไบอัสกลับนี้จะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มค่าของ V_r และแรงดันไฟทั้งทลายของรอยต่ออิมิตเตอร์ n^+ และแถบ P^+ จะถูกจำกัดไว้ที่ขนาดของ V_r ประการที่สอง ผลของการไบอัสแถบ P^+ นี้จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าแบบ Lateral, E_L ซึ่งขนาดของ สนามไฟฟ้านี้จะเป็นไปตามค่าแรงดันแตกต่างกันระหว่างขั้ว B_1 และ B_2 เมื่ออุปกรณ์ทำงานในสภาวะปกติโดย $V_r < V_E < V_{b1}$ สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้การเคลื่อนที่ของประจุเกิดการหักเห เช่นจะทำให้การไหลพุ่งของอิเล็กตรอนเกิดการไหลแบบ Lateral จากขาอิมิตเตอร์ไปยังขาคอลเล็กเตอร์ (ดังภาพที่ 11 a)

รูปที่ 11

แสดงโครงสร้างของ LATERAL MAGNETOTRANSISTOR (a) แสดงภาพตัดขวาง

(b) แสดงภาพด้านบน $L_E = 100 \mu\text{m}$, $W_E = 50 \mu\text{m}$ และ $W_B = 8 \mu\text{m}$ [19]



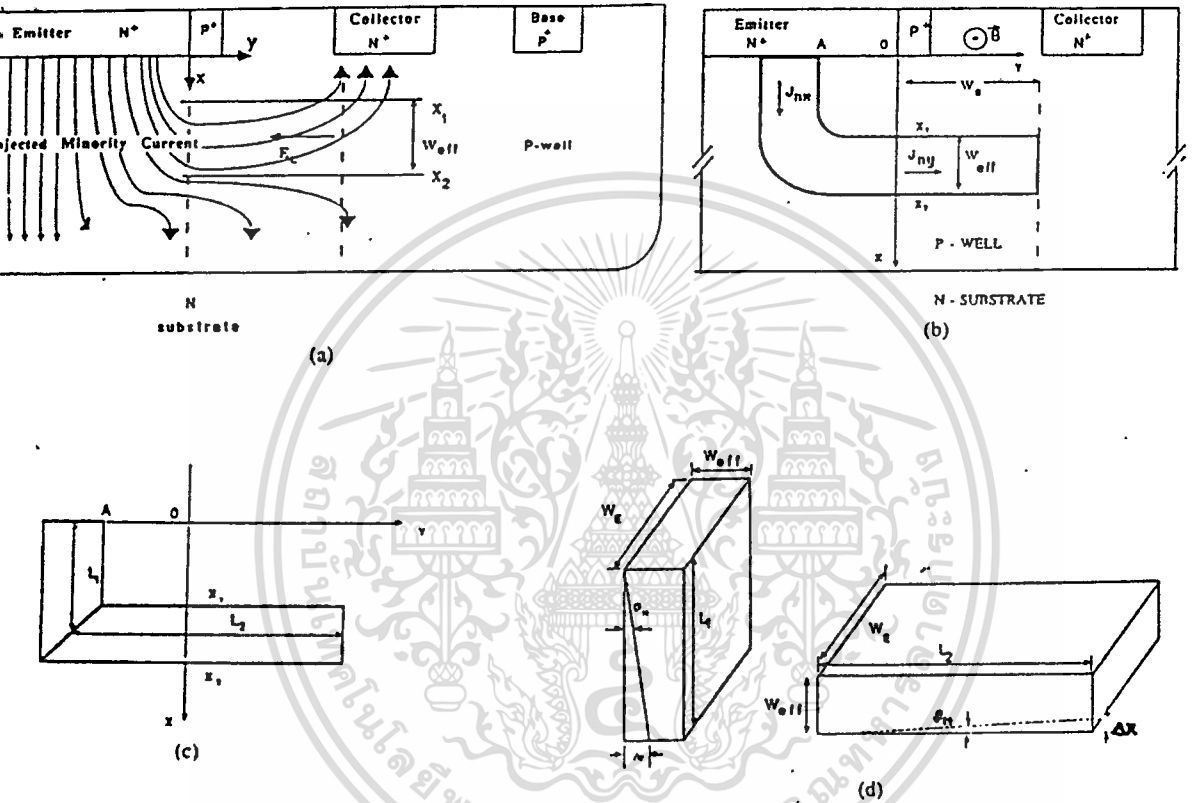
โครงสร้างของอุปกรณ์จะถูกสร้างขึ้นตามกระบวนการมาตรฐานของการสร้าง CMOS 4 μm [19] ส่วนของเบสจะถูกสร้างขึ้นจาก P-WELL, ส่วนของอีมิเตอร์และคอลเล็กเตอร์ทั้ง 2 ขา จะถูกสร้างขึ้นโดยกระบวนการโด๊ป (doping) ตามมาตรฐานในการสร้างขั้วซอร์ส (SOURCE) และเดรน (DRAIN) ของ MOS แบบเอ็น-แชนแนล แถบ P⁺ ที่อยู่ด้านข้างของอีมิเตอร์และเบส B₁ จะถูกสร้างขึ้นโดยกระบวนการโด๊ปตามมาตรฐานในการสร้าง MOS แบบพี-แชนแนล, P-WELL จะถูกแพร่สารเจือถึง 10 μm คอลเล็กเตอร์ และ อีมิเตอร์จะถูกแพร่สารเจือถึง 1.2 μm ขนาดของการมาส์กจะแสดงดังภาพที่ 4.1b

วงจรไบอัสจะแสดงดังภาพที่ 3.2 ค่าของ I_b , V_s , V_c , V_{r1} และ V_{r2} จะเป็นค่าที่กำหนดจุดทำงานของอุปกรณ์ ในการทำงานปกติ ค่า V_{r1} และ V_{r2} จะมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย ทั้งนี้ก็เพื่อจะใช้กำจัดค่าออฟเซตของกระแสคอลเล็กเตอร์ ($I_{c2} - I_{c1}$) และเพื่อความสะดวกเราจะกำหนดให้ $V_r = (V_{r1} + V_{r2})/2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 13

แสดงภาพตัดขวางด้านขวา ; (a) แสดงการไหลของ Minority current ; (b) แสดงภาพขอบเขตการไหลของกระแสไฟฟ้าไปยังขั้วคอลเล็กเตอร์ ; (c) กระแสคอลเล็กเตอร์จะมีลักษณะเป็นตัว L ; (d) กระแสคอลเล็กเตอร์ที่ไหลเป็นลักษณะตัว L จะถูกแบ่งออกเป็นส่วนแนวตั้ง และแนวนอน [20]



จากรูปที่ 13 ถ้าตั้งสมมติฐานว่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (B) เป็นสาเหตุทำให้เกิดการเคลื่อนที่ที่เป็นเชิงเส้นของประจุส่วนน้อย (minority carrier) ใน base-region โดยการเบี่ยงเบนของประจุส่วนน้อยจะเป็นไปตามกฎของ Lorentz force ในที่นี้เราจะพิจารณาผลที่เกิดจากสนามแม่เหล็กเพียงครั้งด้านหนึ่งของอุปกรณ์เท่านั้น การไหลของประจุส่วนน้อยภายในครั้งด้านหนึ่งของอุปกรณ์จะแสดงในภาพตัดขวางด้านครึ่งขวาของโครงสร้าง เพื่อให้ง่ายขึ้นเราจะสมมติให้การไหลของอิเล็กตรอนจากอิมิตเตอร์ไปยังคอลเล็กเตอร์มีรูปร่างเป็นลักษณะเหมือนท่อนำกระแสไฟที่มีพื้นที่หน้าตัดที่คงที่ มีความหนาแน่นของกระแสที่เท่ากันโดยตลอด และจะมีเฉพาะพาหะประจุภายในส่วนท่อนี้เท่านั้นที่ทำให้เกิดการไหลของกระแสคอลเล็กเตอร์ในอุปกรณ์ เพื่อความง่ายในการวิเคราะห์ถึงการเบี่ยงเบนของประจุ ดังนั้นการไหลของประจุรูปร่างตัว L จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ การไหลทางแนวตั้งหนึ่งส่วน และการไหลทางแนวนอนอีกหนึ่งส่วน ความหนาแน่นของกระแสในแต่ละส่วนคือ J_{nx} และ J_{ny} ในการกำหนดขอบเขตของแต่ละส่วนเราจะกำหนดให้ขอบด้านบนและด้านล่างของส่วนการไหลทางแนวนอนอยู่ที่ระนาบ X_1 และ X_2 ดังนั้นกระแสอิเล็กตรอนที่ไหลไปยังคอลเล็กเตอร์จะไหลอยู่ในช่วง

$$X_1 < x < X_2 \quad (3.1)$$

ระยะระหว่างระนาบ X_1 และ X_2 จะถูกกำหนดให้เป็น $W_{eff} = X_2 - X_1$ (โดยค่า W_{eff} นี้จะสามารถหาค่าได้โดยการทดลอง ซึ่งจะกล่าวถึงในภายหลัง) ความยาวของส่วนการไหลทางแนวตั้ง L_1 สามารถแสดงในเทอมของระนาบ X_1, X_2 ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} L_1 &= X_1 + (X_2 - X_1)/2 \\ &= X_1 + W_{eff}/2 \end{aligned}$$

$$\text{หรือ } L_1 = (X_1 + X_2)/2 \quad (3.2)$$

$$L_2 = W_B + X_1 + W_{eff}/2$$

$$\text{หรือ } L_2 = W_B + L_1 \quad (3.3)$$

โดย $W_B =$ ระยะที่อ้างในรูปที่ 13(b)

กระแสไฟทั้งหมดที่ถูกรวบรวมด้วยขั้วคอลเล็กเตอร์ทางด้านขวา ในขณะที่สนามแม่เหล็กเป็นศูนย์คือ I_{c20} ซึ่งจะสามารถแสดงในเทอมของความหนาแน่นของกระแส (J_{ny}) จากการไหลของอิเล็กตรอนแบบ Laterally ได้ดังนี้

$$I_{c20} = J_{ny} W_{eff} W_E \quad (3.4)$$

เมื่อ $W_E =$ ความกว้างของอิมิตเตอร์

เพื่อที่จะหาค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแส I_{c2} ตามการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก (B) ซึ่งเราจะหาได้โดยการรวมผลที่เกิดจากการไหลของอิเล็กตรอนทาง vertical และ lateral เข้าด้วยกัน โดยการไหลของอิเล็กตรอนนี้จะเบี่ยงเบนไปเป็นมุม θ_H

$$\tan(\theta_H) = \mu_H B$$

เมื่อ $\mu_H =$ Electron Hall Mobility

ดังนั้นการหาค่า I_{c2} ที่เปลี่ยนแปลงตามการเบี่ยงเบนทาง vertical สามารถคำนวณได้จากการอินทิเกรตความหนาแน่นของกระแส J_{nx} ในระนาบ $X=L_1$ ที่เบี่ยงเบนไปเป็นระยะ Δy และความกว้างของอิมิตเตอร์ W_E

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{c2v} = J_{nx} \cdot W_E \Delta y \quad (3.5)$$

เมื่อ $\tan(\theta_H) = \Delta y/L_1$

ดังนั้น $\Delta y = L_1 \mu_H B$

$$I_{c2v} = J_{nx} W_E L_1 \mu_H B \quad (3.6)$$

การเปลี่ยนแปลงของกระแสคอลเล็กเตอร์ I_{c2} ตามการเบี่ยงเบนของส่วนประกอบ lateral จะคำนวณได้โดยการอินทิเกรตค่าความหนาแน่นของกระแส J_{ny} ในระนาบ $y = W_B$ ที่เบี่ยงเบนไปเป็นระยะ Δx และความยาวอีมีตเตอร์ W_E

$$I_{c2l} = J_{ny} W_E \Delta x \quad (3.7)$$

เมื่อ $\Delta x = L_2 \mu_H B$

$$I_{c2l} = J_{ny} W_E L_2 \mu_H B \quad (3.8)$$

ถ้าสมมติให้การไหลของกระแสมีความต่อเนื่องและคงที่ตลอดพื้นที่ตัดขวาง ดังนั้นความหนาแน่นของกระแส $J_{nx} = J_{ny}$

จากสมการ (3.4), (3.6) และ (3.8) จะได้

$$J_{ny} = I_{c20}/(W_{eff} W_E) = J_{nx}$$

$$I_{c2v} = \mu_H (L_1/W_{eff}) I_{c20} B \quad (3.9)$$

$$I_{c2l} = \mu_H (L_2/W_{eff}) I_{c20} B \quad (3.10)$$

เมื่อรวมกระแส I_{c2v} และ I_{c2l} เข้าด้วยกัน จะได้

$$I_{c2} = \mu_H ((L_1 + L_2)/W_{eff}) I_{c20} B \quad (3.11)$$

เนื่องจากโครงสร้างของอุปกรณ์จะมีสมมูลกัน ดังนั้น

$$I_{c1} = -I_{c2}$$

$$I_{c10} = I_{c20}$$

ดังนั้น เราสามารถคำนวณค่าของ I_{c1} และ I_{c2} ได้ดังนี้

$$I_{c1} = I_{c10} + \Delta I_{c1} \quad (3.12)$$

$$I_{c2} = I_{c20} + \Delta I_{c2} \quad (3.13)$$

เนื่องจากโครงสร้างของอุปกรณ์จะมีสมมาตรกัน $\Delta I_{c1} = -\Delta I_{c2}$

$$I_{c1} = I_{c10} (1 - \mu_H ((L_1 + L_2)/W_{eff}) B) \quad (3.14)$$

$$I_{c2} = I_{c20} (1 + \mu_H ((L_1 + L_2)/W_{eff}) B) \quad (3.15)$$

จากสมการ (3.14) และ (3.15) จะเห็นว่าถ้าต้องการให้กระแสคอลเล็กเตอร์มีค่าสูงสุด (ซึ่งจะเป็นผลโดยตรงต่อความไวในการตรวจจับด้วย) จะต้องทำให้ค่า W_{eff} มีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งค่า W_{eff} นี้จะถูกกำหนดโดยระนาบ X_1 และ X_2 โดย W_{eff} นี้จะเป็นฟังก์ชันของ V_r (stripe potential) และ V_s (substrate potential) นอกจากนั้นยังมีค่า I_b ซึ่งจะมีผลต่อขนาดของ W_{eff} อีกด้วย ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดต่อไปในบทที่ 4

2-D INTEGRATED MAGNETIC FIELD SENSOR [21]

โครงสร้างของ 2-D (2-Direction) ตามพื้นฐานของ Lateral Magnetotransistor จะแสดงในรูปที่ 14 โดยโครงสร้างจะประกอบด้วยขั้วอิมิตเตอร์หนึ่งขั้ว, ขั้วคอลเล็กเตอร์ที่สมมาตรกัน 4 ขั้ว และที่ฐานรองของอุปกรณ์จะมีขั้วเบสทั้งหมด 4 ขั้วอยู่ในแต่ละด้านของขั้วอิมิตเตอร์ โดยโครงสร้างนี้จะถูกออกแบบให้มีความสมมาตรกันโดยตลอด หน้าสัมผัสของขั้วต่าง ๆ จะถูกต่อเข้าด้วยกันโดยใช้กระบวนการ Metalization โดยจะมีแถบ (region) p^+ ที่แถบวางอยู่ที่มุมทั้งสี่ของอิมิตเตอร์ แถบ p^+ ทั้งสี่แถบนี้จะมีไว้เพื่อบังคับขั้วขั้วยังไม่ให้การไหลพุ่งแบบ Lateral ของอิเล็กตรอน (ซึ่งจะไหลจากขั้วอิมิตเตอร์) ที่จะไหลผ่านตรงบริเวณมุมของอิมิตเตอร์ อุปกรณ์นี้จะสร้างขึ้นตามกระบวนการมาตรฐานการสร้าง CMOS $3 \mu m$ โดยการปลูกฝังและการแพรวขั้วต่าง ๆ จะกระทำบนฐาน P-WELL ขั้วอิมิตเตอร์ n^+ และขั้วคอลเล็กเตอร์ n^+ อีก 4 ขั้ว จะถูกสร้างขึ้นโดยการใช้กระบวนการการโคปตามมาตรฐานของการสร้างขั้วซอส และขั้วเดรนของ MOS แบบ n-channel แถบ p^+ ที่มุมทั้งสี่มุมของอิมิตเตอร์ และขั้วเบสจะถูกสร้างขึ้นโดยการใช้กระบวนการการโคปตามมาตรฐานของการสร้าง MOS แบบ p-channel

แถบ p^+ ทั้งสี่แถบ ซึ่งอยู่ที่มุมทั้งสี่มุมของอิมิตเตอร์ จะทำให้อิเล็กตรอนเกิดการไหลแบบ lateral พุ่งไปยังคอลเล็กเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 14 ซึ่งในรูปนี้จะทำให้สามารถเข้าใจได้อย่างง่ายดายถึงผลการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟที่เกิดขึ้นในแนวรอยต่อของอิมิตเตอร์และเบสในรูปที่ 14 (b) จะแสดงภาพทางด้านข้างของอุปกรณ์ซึ่งจะเห็นรอยต่อ n^+p^+ ที่บริเวณมุมของอิมิตเตอร์ ใน

ขณะที่บริเวณตรงกลางของ

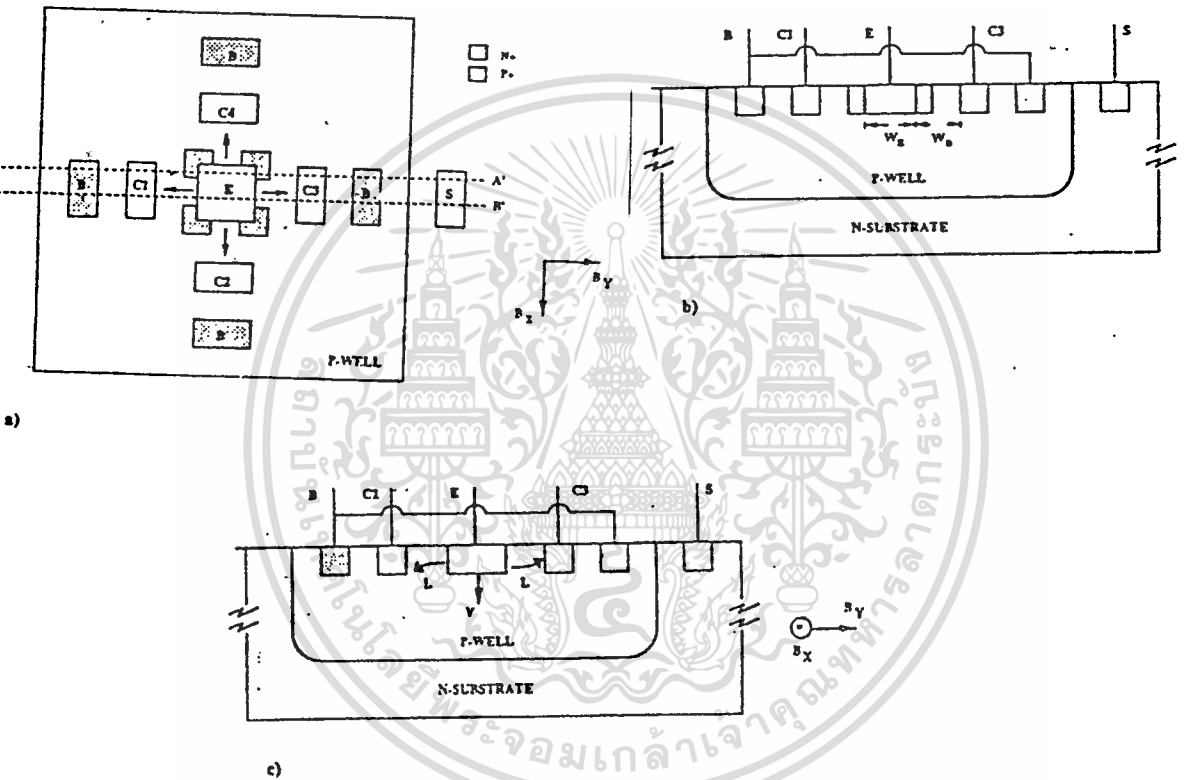
รูปที่ 14

แสดง 2-D Lateral Magnetotransistor ที่สร้างขึ้นโดยใช้เทคโนโลยีของ CMOS ขนาด 3 um (a)

ภาพมองจากด้านบน (b) ภาพตัดด้าน A-A' จะเห็นการไหลทุ่งแบบ Lateral,

$W_E = 12 \text{ um}, W_B = 12 \text{ um}$ (c) ภาพตัดด้าน B-B' แสดงการไหลแบบ

L-Lateral และ V-Lateral [21]



อิมิตเตอร์จะเป็นรอยต่อ n^+p (รูปที่ 14(c)) ดังนั้นที่บริเวณมุมของอิมิตเตอร์ก็จะเกิดแรงดัน V_{b1} ซึ่งจะมีค่าสูงกว่าแรงดันที่เกิดตรงกลางของอิมิตเตอร์ ดังนั้นการไหลของประจุแบบ Lateral จากอิมิตเตอร์ที่ผ่านทางมุมของอิมิตเตอร์จะมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับการไหลผ่านทางบริเวณตรงกลางของอิมิตเตอร์จึงสามารถสรุปได้ว่าผลของแถบ p^+ ที่มุมของอิมิตเตอร์จะบังคับให้การไหลแบบ Lateral ของอิเล็กตรอนให้ไหลไปในทิศทางแกน X ก่อน และจากนั้นจึงไหลในทิศทางแกน Y ไปยังขั้วคอลเล็กเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของอุปกรณ์

วงจรพื้นฐานของ 2-D LMT จะแสดงในรูปที่ 14 โดยอุปกรณ์นี้จะถูกวิเคราะห์ภายใต้การทำงานในโครงสร้างของวงจรมิตเตอร์ร่วม ขั้วเบสจะถูกไบอัสโดยแหล่งจ่ายกระแสไฟคงที่ ในขณะที่ขั้วคอลเล็กเตอร์ทั้ง 4 ขั้ว จะถูกไบอัสด้วยแหล่งจ่ายไฟ V_C และขั้วซับสเตรทจะถูกไบอัสด้วย V_S

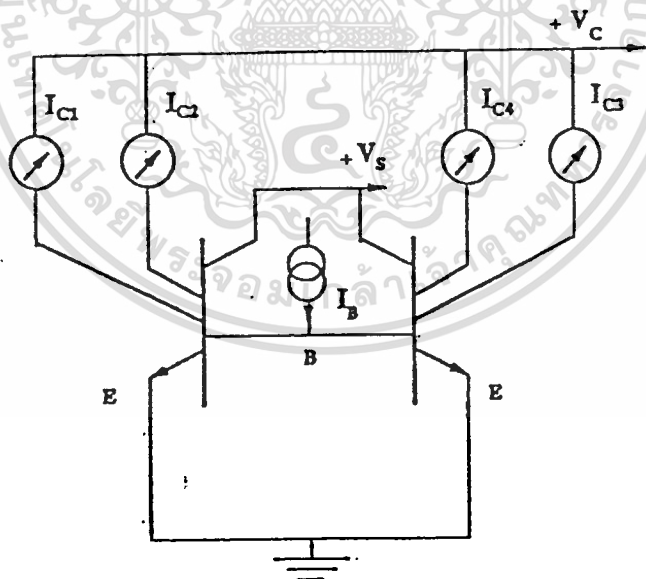
การทำงานพื้นฐานของอุปกรณ์จะเป็นดังนี้ เมื่อรอยต่ออิมิตเตอร์ - เบส ถูกไบอัสตรงโดยการให้แหล่งจ่ายกระแสไฟคงที่ที่ป้อนเข้าที่ขั้วเบส ซึ่งจะทำให้ไอเลคตรอนจะเคลื่อนที่เข้าไปใน neutral base region ในลักษณะส่วนประกอบของ Lateral สี่ส่วน (ในทิศทาง X และ Y) และส่วนประกอบของ

รูปที่ 15

แสดงวงจรพื้นฐานของ 2-D Lateral Magnetotransistor (LMT) $V_C =$ แรงดันไฟคอลเล็กเตอร์,

$V_S =$ แรงดันไฟของฐานรอง(substrate), $I_B =$ กระแสไฟเบส, $I_{Ci} =$

กระแสไฟคอลเล็กเตอร์, $i = 1-4$



Vertical หนึ่งส่วน (ในทิศทาง Z) การไหลทางแนวตั้งของพาหะประจุ จะเริ่มต้นจากด้านล่างของอิมิตเตอร์ที่ถูกรวบรวมสะสมโดยขั้วซับสเตรท และการไหลในแนวนอนนี้ไม่ได้มีส่วนทำให้อุปกรณ์มีความไวเพิ่มขึ้นแต่อย่างใดในอีกด้านหนึ่งส่วนประกอบการไหลแบบ Lateral ทั้งสี่ส่วนจะมีความ

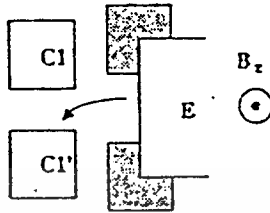
ถ้าค้ำยต่อความไวของอุปกรณ์มาก พหุประจุของการไหลแบบ Lateral ทั้งสี่ส่วนนี้จะถูกรวบรวมสะสมโดยขั้วคอลเล็กเตอร์ทั้งสี่ขั้ว (คอนเล็กเตอร์แต่ละขั้วจะใช้สำหรับการรวบรวมประจุของการไหลแบบ Lateral ในแต่ละส่วน) ในสภาวะปรกติถ้าไม่มีสนามแม่เหล็กผ่านบริเวณผิวหน้าของอุปกรณ์ กระแสไฟคอลเล็กเตอร์ในแต่ละขั้วจะมีค่าเท่ากันเนื่องจากอุปกรณ์มีลักษณะที่สมมาตรกัน เมื่อมีการป้อนสนามแม่เหล็กที่มีส่วนประกอบ 2 ส่วน คือ B_x และ B_y ค่ากระแสไฟคอลเล็กเตอร์ก็จะเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเป็นไปตามกฎของ Lorentz force (การเบี่ยงเบนของพหุประจุจะแปรเปลี่ยนไปตามการป้อนสนามแม่เหล็ก) ตัวอย่างเช่น ส่วนประกอบของ B_x ซึ่งจะขนานกับผิวหน้าของชิพ และมีทิศทางเคลื่อนที่ในแนวแกน X จะเป็นผลทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของพหุประจุที่กำลังไหลอยู่ในแนวแกน Y และจะเป็นผลทำให้ I_{c3} มีค่าเพิ่มขึ้น และ I_{c1} มีค่าลดลง ดังนั้นค่าความแตกต่างระหว่าง I_{c3} และ I_{c1} ก็สามารถที่จะใช้แสดงผลของการตรวจจับ B_x ได้ ซึ่ง B_x นี้จะไม่ผลต่อการไหลของ I_{c2} และ I_{c4} เนื่องจากการไหลของส่วนประกอบนี้จะขนานกับ B_x แต่การไหลของกระแสไฟคอลเล็กเตอร์ทั้งสองค่านี้จะมีผลอันเนื่องมาจาก B_y โดยจะเป็นไปในทำนองเดียวกับการไหลของกระแสไฟ I_{c3} และ I_{c1} ที่มีผลเนื่องจาก B_x ดังนั้นค่าความแตกต่างระหว่าง I_{c4} และ I_{c2} ก็สามารถที่จะใช้แสดงผลของการตรวจจับ B_y ได้เช่นเดียวกัน

3-D INTEGRATED MAGNETIC FIELD SENSOR

โครงสร้างของ 3-D LMT จะมีลักษณะที่คล้ายกับ 2-D LMT มาก โดยจะแตกต่างกันเฉพาะจำนวนของขาคอลเล็กเตอร์ โครงสร้างของ 3-D LMT นี้จะมีคอลเล็กเตอร์ 8 ขา ซึ่งจะเพิ่มขึ้นจากจำนวนขาคอลเล็กเตอร์ของ 2-D LMT อีก 4 ขา กล่าวคือขั้วคอลเล็กเตอร์แต่ละขั้ว ของโครงสร้างแบบ 2-D LMT จะถูกแบ่งออกเป็นขั้วคอลเล็กเตอร์อีก 2 ขั้ว ดังแสดงในรูปที่ 16 จากโครงสร้างประเภทนี้จะทำให้อุปกรณ์มีความไวต่อส่วนประกอบของสนามแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ในแนว B_z

รูปที่ 16

แสดงการเบี่ยงเบนของกรไหลของพาหะประจุอันเป็นผลมาจาก B_z [22]

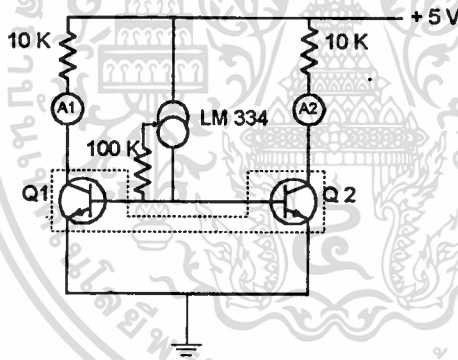


การทดลองและผลการทดลองจากการใช้ทรานซิสเตอร์หลายขาตรงจับสนามแม่เหล็ก

1. วงจรที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 17

แสดงวงจรที่ใช้ในการทดลอง

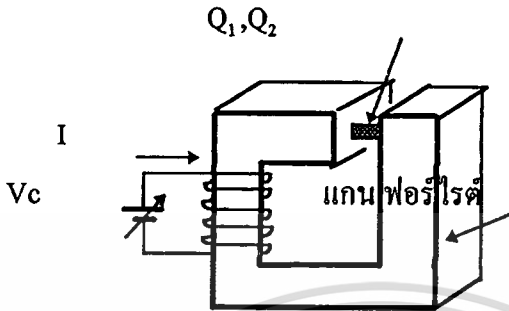


ที่ $B = 0$ ค่ากระแสไฟที่ขาคอลเล็กเตอร์ของ $Q1$ (I_{C1}) และ $Q2$ (I_{C2}) เท่ากับ $105 \mu A$ โดย $Q1$ และ $Q2$ จะเป็นทรานซิสเตอร์แบบ Array (เบอร์ 2SC1583) และเนื่องจากวงจรที่ใช้ในการทดลองนี้จะใช้ IC เบอร์ LM 334 เป็นตัวจ่ายกระแสที่ ซึ่งคุณสมบัติของ LM 334 นี้จะให้กระแสไฟเอ๊าท์พุท (ซึ่งใช้ไบอัสให้กับขาเบสของ $Q1$ และ $Q2$) ที่เปลี่ยนแปลงค่อนข้างสูงต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ดังนั้นในการทดลองควรจะต้องรักษาอุณหภูมิแวดล้อมให้คงที่มากที่สุด [23]

2. ส่วนกำเนิดสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 18

แสดงส่วนกำเนิดสนามแม่เหล็กสำหรับการทดลอง



3. การคำนวณหาค่า B (ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก)

เนื่องจากการทดลองนี้ไม่ได้ใช้เครื่องมือวัดค่าของ B ดังนั้นค่า B ในการทดลองนี้จึงใช้วิธีการคำนวณดังนี้

$$\text{จากความสัมพันธ์ } NI = H L \quad [24] \quad (3.16)$$

เมื่อ $N =$ จำนวนรอบของการพันขดลวด (รอบ)

$I =$ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน (A)

$H =$ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก ($A \text{ turns m}^{-1}$)

$L =$ ความยาวของแกนเฟอร์ไรต์ + ระยะของช่องอากาศ (gap) (m)

$$\text{และจาก } B = \mu H \quad [24] \quad (3.17)$$

เมื่อ $B =$ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (T)

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

$$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \text{ (H/m)}$$

$\mu_r =$ อัตราส่วนเปรียบเทียบว่าสารนั้น ๆ มีคุณสมบัติ

ซึมซาบแม่เหล็กเป็นกี่เท่าของ μ_0

จากสมการ (3.16) และ (3.17) จะได้

$$B = \mu_0 \mu_r NI/L \quad (3.18)$$

$$NI = \int H dL \text{ (ของแกนเฟอร์ไรต์)} + \int H dg \text{ (ของช่องอากาศ)}$$

$$NI = HL \text{ (แกนเฟอร์ไรต์)} + Hg \text{ (อากาศ)}$$

จาก (3.17)

$$NI = B L / \mu_0 \mu_r + B g / \mu_0$$

$$= B / \mu_0 \{ (L / \mu_r) + g \} \quad (3.19)$$

ปกติ μ_r จะมีค่าสูงมาก ดังนั้น $1 / \mu_r \rightarrow 0$ จะได้ $NI = B g / \mu_0$

และจะได้ $B = NI \mu_0 / g \quad (3.20)$

สำหรับการทดลองนี้ $N = 1020$ รอบ และ $g = 5 \text{ mm}$ ให้นำไปแทนในสมการ (3.20)

ดังนั้น $B = 0.2564 I \quad (3.21)$

โดยที่ $I = V_c / R_L$

$R_L =$ ค่าความต้านทานของขดลวด (ในการทดลองนี้ $R_L = 17 \Omega$)

ในการทดลอง V_c จะถูกเปลี่ยนแปลงไปที่ค่าต่าง ๆ ซึ่งจะทำได้ค่า B ตามตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2

แสดงค่าของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก $[B(T)]$ ซึ่งได้จากการคำนวณเมื่อเปลี่ยนค่าของ V_c ไปที่ค่าต่างๆ

V_c (V)	I (A)	B (T)
0	0	0
5	0.294	0.038
10	0.588	0.075
15	0.882	0.113
20	1.176	0.151
25	1.471	0.189

4. ผลการทดลอง

ตารางที่ 3

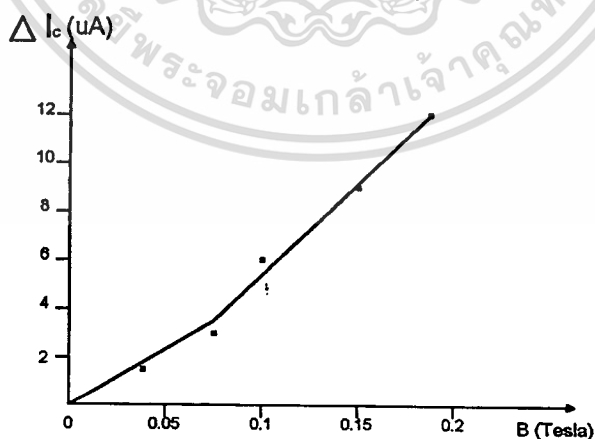
แสดงผลการทดลองโดยแสดงถึงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กกับค่าความแตกต่างของกระแสไฟที่ขาคอลเล็กเตอร์ทั้งสองขาของอุปกรณ์ตรวจจับ

B (T)	I_{c1} (μA)	I_{c2} (μA)	ΔI_c (μA)
0	105	105	0
0.038	104	105.5	1.5
0.075	103	106	3
0.113	101	107	6
0.151	100	109	9
0.189	99	111	12

จากผลการทดลองซึ่งแสดงในตารางในข้อ 3.4.4 จะสามารถเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง B (T) กับ ΔI_c (μA) ได้ดังนี้

รูปที่ 19

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง B (T) กับ ΔI_c (μA) ซึ่งได้จากการทดลอง



5. ผลการคำนวณโดยใช้คอมพิวเตอร์

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าเราสามารถนำเอาทรานซิสเตอร์หลายขามาใช้ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กได้เช่นเดียวกับอุปกรณ์ตรวจจับแบบฮอลล์เจเนอเรเตอร์ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ผ่านมา ในการทดลองนี้เนื่องจากไม่สามารถสร้างตัวทรานซิสเตอร์หลายขาบนฐานรองขึ้นเดียวกันได้ ดังนั้นจึงได้นำเอาทรานซิสเตอร์ที่มีใช้กันทั่วไปมาต่อวงจรให้เป็นเช่นเดียวกับวงจรสมมูลย์ตามที่ได้กำหนดไว้ในโครงสร้างและเทคโนโลยีในการสร้าง ซึ่งจะทำการทดลองคลาดเคลื่อนไปบ้างเนื่องจากทรานซิสเตอร์แต่ละตัวอาจมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน และตามทฤษฎีที่ต้องการแล้วอุปกรณ์ตรวจจับแบบทรานซิสเตอร์หลายขาที่จะสร้างขึ้นมาจะต้องถูกสร้างบนฐานรองขึ้นเดียวกัน

ดังนั้นเพื่อให้เห็นการทำงานที่ชัดเจนขึ้นจึงได้นำเอาคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการคำนวณและแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟคอลเล็กเตอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งในการคำนวณนี้จะใช้ซอฟต์แวร์ Mathcad Plus 5.0 ช่วยในการคำนวณดังนี้

จากสมการ (3.14) และ (3.15)

$$I_{c1} = I_{c10} (1 - \mu_H ((L_1 + L_2)/W_{eff}) B)$$

$$I_{c2} = I_{c20} (1 + \mu_H ((L_1 + L_2)/W_{eff}) B)$$

จากรูปที่ 11 และ 13 ถ้ากำหนดให้ $L_2 \approx W_B + L_E = 108 \mu\text{m}$, $L_1 \approx$ ความหนาของ P-well / 2 = $10 \mu\text{m} / 2 = 5 \mu\text{m}$, $W_{eff} \approx$ P-well / 3 = $10 \mu\text{m} / 3 = 3.33 \mu\text{m}$ และถ้าตัวตรวจจับถูกสร้างขึ้นจากวัสดุที่มี Hall mobility ของอิเล็กตรอน (μ_H) = $1200 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ [25] และถ้าหากกำหนดให้ $I_{c10} = I_{c20} = 100 \mu\text{A}$ ดังนั้นค่ากระแสคอลเล็กเตอร์ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงไปที่ค่าต่าง ๆ ตามการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ;B (โดย B มีหน่วยเป็น Tesla ; T) ดังนี้

$$\text{กำหนดให้ } g(B) = I_{c2} = I_{c20} (1 + \mu_H ((L_1 + L_2)/W_{eff}) B) \quad (3.22)$$

แทนค่าคงที่ต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ข้างต้นลงในสมการ (3.22) และจะสามารถคำนวณหาค่า I_{c2} เมื่อเปลี่ยนค่า B ตั้งแต่ -5 T ถึง 5 T ได้ดังนี้

รูปที่ 20

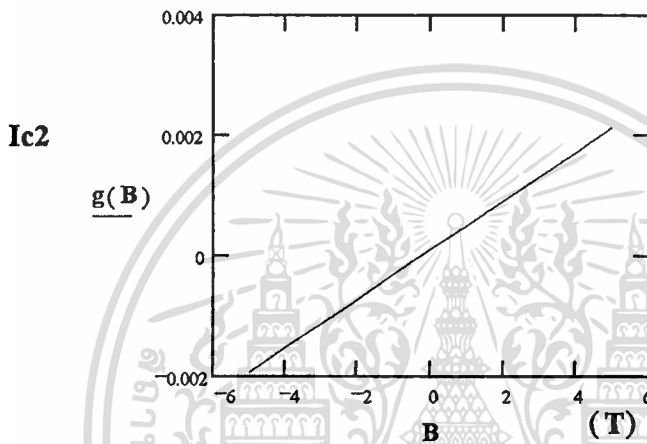
แสดงความสัมพันธ์ของกระแสคอลเล็กเตอร์ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลง
ของค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก

$$g(\mathbf{B}) := 100 \cdot 10^{-6} \cdot \left[1 + \left(\frac{1200}{10000} \cdot \frac{5 \cdot 10^{-6} + 108 \cdot 10^{-6}}{3.33 \cdot 10^{-6}} \right) \cdot \mathbf{B} \right]$$

$$\mathbf{B} := -5..5$$

$$g(\mathbf{B})$$

(A)



-0.002
-0.002
-0.001
$-7.144 \cdot 10^{-4}$
$-3.072 \cdot 10^{-4}$
$1 \cdot 10^{-4}$
$5.072 \cdot 10^{-4}$
$9.144 \cdot 10^{-4}$
0.001
0.002
0.002

ค่าของฟังก์ชัน $g(\mathbf{B})$ ก็คือค่าของ I_{c2} ซึ่งจะมีหน่วยเป็น Amp. และ ค่าของ \mathbf{B} จะมีหน่วย
เป็นเทสลา (T) จากผลการทดลองและการคำนวณที่ได้จะเป็นแนวทางเพื่อนำเอาผลที่ได้ไปเปรียบ
เทียบกับตัวตรวจจับแบบฮอลล์เจเนอเรเตอร์ต่อไป เช่นการเปรียบเทียบทางด้านความไว, ความ
เป็นเชิงเส้น, ความมีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิ เป็นต้น

บทที่ 4

การวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ของตัวตรวจจับแบบทรานซิสเตอร์หลายขา

การวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ของตัวตรวจจับในบทนี้จะเป็นการวิเคราะห์ถึงคุณสมบัติของ Lateral Magnetotransistor ซึ่งได้กล่าวถึงรายละเอียดทางโครงสร้าง และการทำงานไปแล้วในบทที่ 3 โดยคุณสมบัติต่าง ๆ ที่จะทำการวิเคราะห์จะมีดังต่อไปนี้

ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก

ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบทรานซิสเตอร์หลายขาซึ่งในที่นี้จะกล่าวเฉพาะความไวสัมพัทธ์ในการตรวจจับ (S_r) จะสามารถกำหนดได้โดยสมการดังต่อไปนี้ [20]

$$S_r = [1/I_{C0}] * [\Delta I_C / B] \quad (4.1)$$

$$\text{เมื่อ } \Delta I_C = \Delta I_{C2} - \Delta I_{C1}$$

$$I_{C0} = I_{C10} + I_{C20}$$

จากสมการ (3.12), (3.13), (3.14) และ (3.15)

$$\Delta I_C = \Delta I_{C2} - \Delta I_{C1} = I_{C2} - I_{C20} - (I_{C1} - I_{C10})$$

สำหรับโครงสร้างของอุปกรณ์ที่สมมูลย์กันตลอด จะทำให้ $I_{C10} = I_{C20}$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } \Delta I_C = I_{C2} - I_{C1} &= I_{C20}(1 + \mu_H[(L_1 + L_2)/W_{eff}]B) - I_{C10}(1 - \mu_H[(L_1 + L_2)/W_{eff}]B) \\ &= I_{C20} + I_{C20}\mu_H[(L_1 + L_2)/W_{eff}]B - I_{C10} + I_{C10}\mu_H[(L_1 + L_2)/W_{eff}]B \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น } S_r = \{[I_{C20} - I_{C10} + (I_{C20} + I_{C10})\mu_H[(L_1 + L_2)/W_{eff}]B] / (I_{C10} + I_{C20})\} * \{1/B\}$$

$$S_r = \{(I_{C20} - I_{C10}) / (I_{C10} + I_{C20}) + \mu_H[(L_1 + L_2)/W_{eff}]B\} * \{1/B\} \quad (4.2)$$

สำหรับโครงสร้างของอุปกรณ์ที่สมมูลย์กันตลอด ดังนั้น $I_{C10} = I_{C20}$

จากสมการ (5.2) ค่าความไวสัมพัทธ์ของอุปกรณ์เท่ากับ

$$\begin{aligned} S_r &= \mu_H \{(L_1+L_2)/W_{eff}\} B^* \{1/B\} \\ &= \mu_H (L_1+L_2) / W_{eff} \quad (\%/ \text{ Tesla}) \quad (4.3) \end{aligned}$$

จากสมการ (5.3) จะเห็นว่าถ้าต้องการให้ความไวสัมพัทธ์ (S_r) มีค่าสูงสุด ก็จะต้องทำให้ W_{eff} มีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งค่า W_{eff} นี้จะถูกกำหนดโดยระนาบ X_1 และ X_2 โดย W_{eff} นี้จะเป็นฟังก์ชันของ V_r (stripe potential) และ V_s (substrate potential) นอกจากนั้นยังมีค่า I_b โดยจะมีผลต่อขนาดของ W_{eff} อีกด้วย ซึ่งค่า V_r , V_s และ I_b จะมีผลต่อการทำงานและมีผลต่อความไวในการตรวจจับของอุปกรณ์ดังนี้

1. ผลของ V_r [20]

จากรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่าแรงดันไฟ V_r ซึ่งเป็นแรงดันไฟลบ จะถูกป้อนเข้าที่แถบ P^+ โดยจะเป็นผลต่อตำแหน่งของระนาบ X_1 และ X_2 ซึ่งความสัมพันธ์ของระนาบทั้งสองจะเป็นเชิงเส้นกับ V_r ดังนี้

$$X_1 = X_{10} - C_1 V_r \quad (4.4)$$

$$X_2 = X_{20} - C_2 V_r \quad (4.5)$$

เมื่อ X_{10} และ X_{20} คือตำแหน่งของระนาบทั้งสอง ในขณะที่ $V_r = 0$

C_1 และ C_2 คือค่าคงที่

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ (4.4) และ (4.5) } W_{eff} &= X_2 - X_1 = X_{20} - C_2 V_r - (X_{10} - C_1 V_r) \\ &= X_{20} - X_{10} + (C_1 - C_2) V_r \end{aligned}$$

$$\text{ถ้าให้ } W_{eff0} = X_{20} - X_{10} \text{ และ } K_r = C_1 - C_2$$

$$W_{eff} = W_{eff0} + K_r V_r \quad (4.6)$$

ที่ Critical value, V_{rc} จะทำให้ W_{eff} มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น

$$V_{rc} = -W_{eff0}/K_r \quad (4.7)$$

$$\text{หรือ } W_{eff0} = -V_{rc} K_r$$

จาก (4.7) $W_{\text{eff}} = -V_{\text{rc}} K_{\text{r}} + K_{\text{r}} V_{\text{r}}$

$$W_{\text{eff}} = K_{\text{r}}(V_{\text{r}} - V_{\text{rc}}) \quad (4.8)$$

จากสมการ (4.3) และ (4.8) จะได้ค่าความไวสัมพัทธ์ดังนี้

$$S_{\text{r}} = \mu_{\text{H}} (L_1 + L_2) / K_{\text{r}}(V_{\text{r}} - V_{\text{rc}}) \quad (4.9)$$

จากสมการ (4.9) จะเห็นว่า V_{r} จะมีผลต่อค่าความไวสัมพัทธ์ของอุปกรณ์ตรวจจับ และจากสมการ (4.8) ถ้าค่าของ V_{r} มีค่าเข้าใกล้ค่า V_{rc} ก็จะทำให้ W_{eff} มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ และจะทำให้ค่าความไวสัมพัทธ์มีค่ามากขึ้นเข้าสู่ค่าอนันต์ (infinity)

2. ผลของ V_{s} [20]

V_{s} เป็นแรงดันไฟระหว่างฐานรองอุปกรณ์ (substrate) กับรอยต่อ p-well ซึ่งจะถูกป้อนแรงดันแบบไบอัสกลับไว้ โดย Depletion region ที่รอยต่อของ p-well กับ substrate จะแสดงด้วยสมการเชิงเส้นที่สัมพันธ์กับระนาบ X_1 และ X_2 ดังนี้

$$X_1 = X_{1\text{s}} - C_{\text{s}1} (W_{\text{L}}/2)$$

$$X_2 = X_{2\text{s}} - C_{\text{s}2} (W_{\text{L}}/2)$$

เมื่อ $X_{1\text{s}}$ และ $X_{2\text{s}}$ คือ ตำแหน่งระนาบของ X_1 และ X_2 ใดๆ ในขณะที่ V_{s} มีค่าคงที่

$C_{\text{s}1}$ และ $C_{\text{s}2}$ คือ ค่าอัตราส่วน (ค่าคงที่)

$W_{\text{L}}/2$ คือ ความกว้างของ depletion region ตรงรอยต่อทางด้าน p-well

ความกว้างของรอยต่อระหว่าง p-well และ substrate สามารถจะพิจารณาให้เปลี่ยนแปลงในลักษณะเป็นเชิงเส้นได้ และ W_{L} จะสามารถกำหนดได้เป็น

$$W_{\text{L}} = (12 \epsilon / q \cdot a)^{1/3} (V_{\text{bi}} + V_{\text{s}} - V_{\text{Bn}})^{1/3} \quad (4.10)$$

เมื่อ ϵ = ค่า dielectric permittivity ของ ซิลิกอน

a = impurity gradient ที่รอยต่อ

q = elementary charge

V_{bi} = ค่าแรงดันไฟที่เกิดขึ้นตรงรอยต่อ

V_{Bn} = ค่าแรงดันไฟภายใน neutral base region ที่ขอบของ depletion region

ถ้าแทน $V_B = V_{bi} - V_{Bn}$

และ $C_W = (12 / q \cdot a)^{1/3}$

ดังนั้น $W_L = C_W (V_S - V_B)^{1/3}$

จาก $W_{eff} = X_2 - X_1$

ดังนั้น $W_{eff} = X_{2s} - C_{s2} (W_L/2) - (X_{1s} - C_{s1} (W_L/2))$

$$= X_{2s} - X_{1s} - (W_L/2)(C_{s2} - C_{s1})$$

$$= W_{effs} - (C_W (V_S - V_B)/2)^{1/3} (C_{s2} - C_{s1})$$

$$= W_{effs} - K_S (V_S - V_B)^{1/3} \quad (4.11)$$

- 36 -

เมื่อ $W_{effs} = X_{2s} - X_{1s}$

$$K_S = C_W (C_{s2} - C_{s1})/2$$

จากสมการ (4.11) ถ้า V_S มีค่ามากขึ้นก็จะทำให้ W_{eff} มีค่าน้อยลงและเมื่อเพิ่ม V_S ถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่ง (V_{sc}) ก็จะทำให้ค่า W_{eff} มีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งจะทำให้กระแสคอลเล็กเตอร์หยุดไหล ดังนั้น

$$W_{effs} = K_S (V_{sc} - V_B)^{1/3} \quad (4.12)$$

จากสมการ (4.11) $W_{eff} = K_S (V_{sc} - V_B)^{1/3} - K_S (V_S - V_B)^{1/3}$

$$= K_S (V_{sc} - V_B)^{1/3} - (V_S - V_B)^{1/3} \quad (4.13)$$

เมื่อ V_{sc} = ค่าวิกฤตของแรงดัน substrate ที่ทำให้ W_{eff} มีค่าลดลงเป็นศูนย์ จาก (4.3) และ (3.12) จะได้ค่าความไวสัมพัทธ์ดังนี้

$$S_{rF} = u_H(L_1+L_2)/K_S[(V_{sc} - V_B)^{1/3} - (V_S - V_B)^{1/3}] \quad (4.14)$$

3. ผลของ I_b [20]

กระแสเบส I_b จะเป็นค่าคงที่ ซึ่งจะถูกใช้เพื่อทำการไบอัสตรงที่รอยต่ออิมิตเตอร์และเบสของอุปกรณ์ โดยการคาดการณ์ไว้ว่าการเพิ่มขนาดของ I_b จะมีผลต่อขนาดของ W_{eff} โดยผลที่เกิดขึ้นจะเหมือนกับผลที่เกิดจากการลดขนาดของแรงดันไฟ V_T ความสัมพันธ์ระหว่าง X_1 และ X_2

กับ I_b จะเป็นในลักษณะเชิงเส้นซึ่งจะแสดงได้ดังนี้

$$X_1 = X_{1b} - C_{b1}I_b$$

$$X_2 = X_{2b} - C_{b2}I_b$$

เมื่อ X_{1b} และ X_{2b} คือ ตำแหน่งระนาบของ X_1 และ X_2 ใดๆ ในขณะที่ I_b มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง

C_{b1} และ C_{b2} คือ ค่าอัตราส่วน (ค่าคงที่)

จาก
$$W_{\text{eff}} = X_2 - x_1$$

$$W_{\text{eff}} = X_{2b} - X_{1b} - I_b(C_{b2} - C_{b1})$$

$$W_{\text{eff}} = W_{\text{effb}} - C_B I_b \quad (4.15)$$

เมื่อ
$$W_{\text{effb}} = X_{2b} - X_{1b}$$

$$C_B = C_{b2} - C_{b1}$$

เมื่อลดค่า I_b ลงก็จะทำให้ W_{eff} มีค่าลดลง และเมื่อลดถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่ง (I_{bc}) ก็จะทำให้ W_{eff} ลดลงเป็นศูนย์ กระแสไฟคอลเล็กเตอร์ก็จะหยุดไหล

$$W_{\text{effb}} = C_B I_{bc}$$

จาก (4.15)
$$W_{\text{eff}} = C_B I_{bc} - C_B I_b$$

$$W_{\text{eff}} = C_B (I_{bc} - I_b) \quad (4.16)$$

จาก (4.3) และ (4.16) จะได้ค่าความไวสัมพัทธ์ ดังนี้

$$S_r = \mu_H (L_1 + L_2) / C_B (I_{bc} - I_b) \quad (4.17)$$

จาก (4.16) ถ้าลดค่า I_b ลงจนมีค่าใกล้เคียงกับ I_{bc} ก็จะทำให้ W_{eff} มีค่าเข้าใกล้ศูนย์และจาก (4.3) เมื่อค่า W_{eff} มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ก็จะทำให้ค่าความไวสัมพัทธ์ (S_r) มีค่าเข้าใกล้ค่าอนันต์ (infinity)

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความไวสัมพัทธ์ในการตรวจจับ (S_r) ของตัวตรวจจับแบบทรานซิสเตอร์หลายขาก็คือค่าของ Hall mobility (μ_H) และค่าของ W_{eff} โดยในการออกแบบจะต้องพยายามทำให้ค่าของ W_{eff} มีค่าเข้าใกล้ศูนย์มากที่สุด โดยการทำให้ค่าของแรงดันไฟ V_r , V_g และ กระแสไฟที่ขาเบส I_b มีค่าเข้าใกล้กับค่า V_{rc} , V_{sc} และ I_{bc} ตามลำดับ ซึ่งค่า

ของ V_{rc} , V_{sc} และ I_{bc} นี้จะได้ออกจากการทดลอง

ความเป็นเชิงเส้นในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก

ความเป็นเชิงเส้นในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบทรานซิสเตอร์หลายขา ก็คือความเป็นเชิงเส้นของการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันไฟระหว่างขาคอลเล็กเตอร์ทั้งสองขา (ΔV) ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (ΔB) นั่นเอง

$$\begin{aligned} \text{จากรูปที่ 12} \quad \Delta V &= V_{c2} - V_{c1} \\ &= I_{c2}R_L - I_{c1}R_L \\ &= (I_{c2} - I_{c1})R_L \\ &= I_c R_L \end{aligned} \quad (4.18)$$

โดย R_L ก็คือ ความต้านทานโหลด

สำหรับความเป็นเชิงเส้นที่ได้นั้นอัตราส่วนของ $\Delta V/\Delta B$ จะต้องมีค่าคงที่ตลอดย่านการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ที่จะทำการตรวจจับ

จากสมการกำหนดค่าความไวในการตรวจจับของตัวตรวจจับแบบทรานซิสเตอร์หลายขาที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก

$$\begin{aligned} S_r &= [1/I_{c0}] * [\Delta I_c / B] \\ &= [\Delta V / (R_L I_{c0})] [1/B] \end{aligned} \quad (4.19)$$

จากสมการ (4.19) ซึ่งเป็นสมการแสดงความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก จะเห็นได้ว่าถ้า ต้องการให้อัตราส่วนของ $\Delta V/B$ ให้คงที่ตลอดเวลา ซึ่งจะหมายถึงความเป็นเชิงเส้นในการตรวจจับที่ดีจะต้องทำให้ค่าของ S_r , R_L และ I_{c0} มีค่าคงที่ตลอดเวลา โดยค่าของ S_r ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\mu_H((L_1+L_2)/W_{off})$ จะมีค่าคงที่ก็ต่อเมื่อค่าของ μ_H และ W_{off} เป็นค่าคงที่ตลอดเวลา สำหรับค่าของ μ_H (Hall mobility) นั้น มักจะมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ซึ่งเราสามารถแก้ไขได้โดยการสร้างวงจรถดเชยไว้บนชิพของตัวตรวจจับ ส่วนค่าของ W_{off} นั้นจะเป็นฟังก์ชันของ V_T (stripe potential), V_S (substrate potential) และ I_B ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 4.1 สำหรับค่า

ของ I_{CO} ซึ่งหมายถึงค่ากระแสไฟคอลเล็กเตอร์ขณะความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) เป็นศูนย์ และค่าของความต้านทานโหลด R_L นั้นก็จะมีผลต่อความเป็นเชิงเส้นด้วย

จึงสรุปได้ว่าถ้าจะทำให้ตัวตรวจจับแม่เหล็กแบบทรานซิสเตอร์หลายขามีความเป็นเชิงเส้นที่ดี จะต้องรักษาให้ μ_H และ W_{eff} ให้คงที่ตลอดย่านการใช้งาน และควรสร้างวงจรชดเชย อุณหภูมิเพื่อชดเชยการเปลี่ยนแปลงของ μ_H ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขณะใช้งานด้วย

เสถียรภาพการทำงานอันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

จากสมการ 3.14 และ 3.15 ซึ่งเป็นสมการที่ใช้แสดงค่าของกระแสไฟคอลเล็กเตอร์ I_{c1} และ I_{c2} ของตัวตรวจจับโดย

$$I_{c1} = I_{c10} [1 - \mu_H \{(L_1 + L_2) / W_{eff}\} B]$$

$$I_{c2} = I_{c20} [1 + \mu_H \{(L_1 + L_2) / W_{eff}\} B]$$

จากสมการ 3.14 และ 3.15 ตัวแปรที่จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิก็คือ ค่ากระแสไฟคอลเล็กเตอร์ (I_{CO}) และค่าของ Hall mobility โดยการเปลี่ยนแปลงค่าของกระแสไฟคอลเล็กเตอร์ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมินั้นจะสามารถแสดงได้ดังนี้

จากสมการกำหนดค่ากระแสไฟที่ชาคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์ [26]

$$I_C = \alpha I_E + I_{CO} (1 - \exp^{V_C / V_T}) \quad (4.20)$$

เมื่อ α คือ อัตราขยายกระแสไฟของวงจรเบสร่วม

I_{CO} คือ กระแสไฟรั่วไหล

V_C คือ แรงดันไฟที่ชาคอลเล็กเตอร์

V_T คือ volt - equivalent of temperature

จากสมการแสดงค่าของกระแสไฟอีมิเตอร์ของทรานซิสเตอร์

$$I_E = I_C + I_B \quad (4.21)$$

จาก (5.20) $I_C = \alpha (I_B + I_C) + I_{CO} (1 - \exp^{V_C / V_T})$

$$I_C = (\alpha / 1 - \alpha) I_B + (1 / 1 - \alpha) I_{CO} (1 - \exp^{V_C / V_T}) \quad (4.22)$$

กำหนดให้ β คืออัตราขยายกระแสไฟของทรานซิสเตอร์มีค่า

$$\beta = \alpha / 1 - \alpha \quad (4.23)$$

แทน (4.23) ลงใน (4.22) จะได้

$$I_C = I_{C10} = I_{C20} = \beta I_B + (\beta + 1) I_{C0} (1 - \exp^{-V_C/V_T}) \quad (4.24)$$

ซึ่งสมการ (4.24) ก็คือสมการของกระแสไฟคอลเล็กเตอร์ขณะความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเป็นศูนย์นั่นเอง

จากสมการของ Einstein ได้กำหนดให้

$$D_n / \mu_n = V_T \quad (4.25)$$

เมื่อ D_n = Diffusion constant (cm^2/s) โดยวัสดุประเภทซิลิกอนจะมีค่าเท่ากับ $34 \text{ cm}^2/\text{s}$

และ $V_T = kt/q$ (4.26)

เมื่อ $q = 1.6 * 10^{-19} \text{ (C)}$

$k = \text{Boltzmann's constant} = 1.38 * 10^{-23} \text{ J/ K}$

$t = \text{อุณหภูมิบรรยากาศ (K)}$

แทน (4.26) ลงใน (4.25) จะได้

$$\mu_n = D_n * q / k * t \quad (4.27)$$

และจาก [20] ความสัมพันธ์ระหว่าง Hall mobility ; μ_H กับ Electron mobility ; μ_n จะ

เป็นดังนี้

$$\mu_H = r_n \mu_n \quad (4.28)$$

โดย r_n คือค่า Hall factor

จากสมการ (4.27) และ (4.28) จะเห็นได้ว่า ค่าของ Hall mobility จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โดยถ้าหากอุณหภูมิบรรยากาศมีค่าสูงขึ้นก็จะทำให้ค่าของ Hall mobility มีค่าต่ำลง และจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟคอลเล็กเตอร์ดังแสดงในสมการ (4.24)

บทที่ 5

การเปรียบเทียบคุณสมบัติของตัวตรวจจับแบบฮอลล์เงินนอเรเตอร์และ แบบทรานซิสเตอร์หลายขา

จากรายละเอียดในบทที่ 1 กล่าวถึงประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษาวิจัยตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กชนิดใหม่แบบทรานซิสเตอร์หลายขา โดยผู้วิจัยได้คาดหวังไว้ว่าตัวตรวจจับแบบทรานซิสเตอร์หลายขานี้จะเป็นตัวตรวจจับที่มีคุณสมบัติที่มีความไวในการตรวจจับสูงขึ้น, มีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิที่ต่ำขึ้น และมีความเป็นเชิงเส้นที่ดีกว่าการใช้อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กจำพวกฮอลล์เงิน-นอเรเตอร์ ดังนั้นในการเปรียบเทียบคุณสมบัติของตัวตรวจจับทั้งสองแบบนี้ จะทำการเปรียบเทียบในคุณสมบัติต่างๆ ที่คาดหวังไว้ดังที่กล่าวข้างต้น โดยวิธีการเปรียบเทียบทางผู้วิจัยจะใช้ผลการทดลองในบทที่ 3 หัวข้อ 3.4 มาพิจารณาประกอบกับการใช้ซอฟต์แวร์ Mathcad Plus 5.0 เข้ามาช่วยในการคำนวณ และแสดงผลการเปรียบเทียบจากสมการที่หาได้

ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก

ในบทที่ 2 และ 4 ได้กล่าวถึงรายละเอียดทางคุณสมบัติด้านความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของตัวตรวจจับทั้งสองแบบไปแล้ว ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญอันหนึ่งที่จะต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบและสร้าง ตลอดจนนำมาพิจารณาในการเลือกใช้งาน

จากบทที่ 2 สมการที่ 2.42 จะเป็นสมการที่แสดงถึงค่าความไวในการตรวจจับของฮอลล์เงินนอเรเตอร์ รูปร่างสี่เหลี่ยม ขณะที่เอาท์พุทต่อเข้ากับโหลด R_L ดังนี้

$$r_{LB} = \{(-R_h / d) \cdot I_1 F(l/w, s/w, \theta)\} / \{1 + (R_{22} / R_L)\}$$

โดยถ้าเลือกค่าของ $R_L \gg R_{22}$ จะทำให้

$$r_{LB} = r_{OB} = (-R_h / d) \cdot I_1 F(l/w, s/w, \theta) \quad (5.1)$$

โดยที่ $F(1/w, s/w, \theta)$ จะมีค่าเท่ากับ [27]

$$F(1/w, s/w, \theta) = \{1 - \exp[-(\pi/2w) * (\theta / \tan \theta)]\} * [1 - (2s/\pi w) * (\theta / \tan \theta)] \quad (5.2)$$

จากสมการ (5.1) จะเห็นได้ว่าถ้าต้องการให้ฮอลล์เจนเนอเรเตอร์ที่สร้างขึ้นจากวัสดุต่าง ๆ มีค่าความไวในการตรวจจับสูงขึ้นจะต้องทำให้ความหนาของแผ่นฮอลล์เจนเนอเรเตอร์ (d) มีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้และในปัจจุบันนี้ได้มีเทคนิคการสร้างที่สามารถทำให้ d มีค่าเพียง 10 ไมโครเมตร และนอกจากนี้ค่าความไวในการตรวจจับของฮอลล์เจนเนอเรเตอร์ยังขึ้นอยู่กับค่าแฟกเตอร์สำหรับการแก้ไขทางด้านรูปร่างของฮอลล์เจนเนอเรเตอร์ $[F(1/w, s/w, \theta)]$ อีกด้วย

จากที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นว่าถ้าต้องการให้ฮอลล์เจนเนอเรเตอร์ที่สร้างขึ้นจากวัสดุต่าง ๆ มีค่าความไวในการตรวจจับสูงขึ้นจะต้องทำให้ความหนาของแผ่นฮอลล์เจนเนอเรเตอร์ (d) มีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ดังนั้นค่าความหนาของแผ่นฮอลล์เจนเนอเรเตอร์ซึ่งมีรูปร่างแสดงดังในรูปที่ 7 จะมีผลทำให้ค่าความไวในการตรวจจับความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) เปลี่ยนแปลงดังกราฟที่แสดงในรูปที่ 21



รูปที่ 21

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไวในการตรวจจับความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ของฮอลล์เจเนอเรเตอร์กับค่าความหนาของแผ่นฮอลล์ (d) โดยวัสดุที่ใช้ในการสร้าง

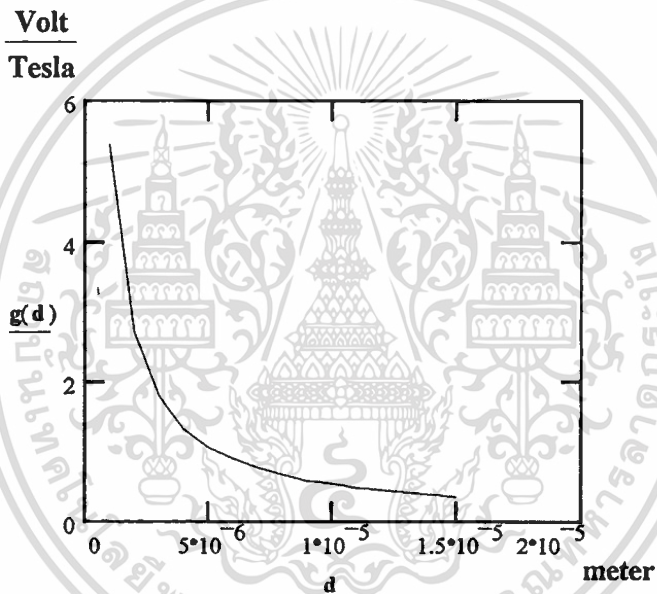
ฮอลล์เจเนอเรเตอร์เป็นชนิดอินเดียมแอนติโมนด์ (InSb) โดยมีขนาดของ

$l = 50 \text{ } \mu\text{m}$, $w = l/2 = 25 \text{ } \mu\text{m}$, $w/10 = 2.5 \text{ } \mu\text{m}$ และค่า R_H ซึ่งแสดง

ในรูปที่ 17 เส้นกราฟ C มีค่าเท่ากับ $70 \text{ cm}^2 \text{ coulomb}^{-1}$ ที่

Hall Angle = 45° และกระแสไฟทางอินพุท

100 mA 18]

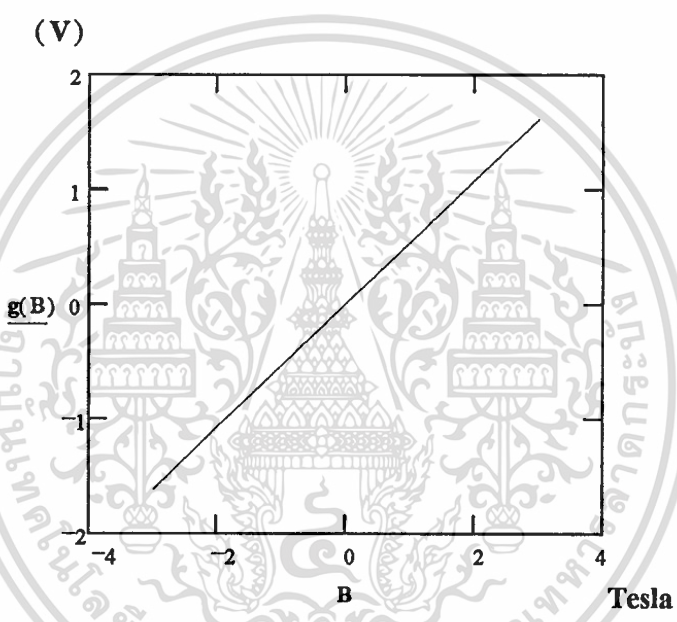


จากรูปที่ 21 จะเห็นได้ว่าถ้าแผ่นฮอลล์เจเนอเรเตอร์มีความหนามากขึ้นก็จะทำให้ความไวในการตรวจจับมีค่าต่ำลง โดยที่ค่าความหนาน้อยที่สุดที่สามารถสร้างได้คือ 10 ไมโครเมตร ฮอลล์เจเนอเรเตอร์จะมีความไวในการตรวจจับ 0.5 โวลต์/เทสลา

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าทางเอาต์พุทของฮอลล์เจเนอเรเตอร์ (V_H) กับค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) จะแสดงได้ดังในรูปที่ 22

รูปที่ 22

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าทางเอาต์พุตของฮอลล์เจเนอเรเตอร์ (V_H) กับค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) โดยวัสดุที่ใช้ในการสร้างฮอลล์เจเนอเรเตอร์เป็นชนิดอินเดียมแอนติโมนิไนด์ (InSb) โดยมีขนาดของ $l = 50 \mu m$, $w = l/2 = 25 \mu m$, $d = 10 \mu m$, $s = w/10 = 2.5 \mu m$ และค่า R_H ซึ่งแสดงในภาพที่ 3.7 เส้นกราฟ c มีค่าเท่ากับ $70 \text{ cm}^3 \text{ coulomb}^{-1}$ ที่ Hall Angle = 45° และกระแสไฟฟ้าทางอินพุต 100 mA [18]



จากกราฟในรูปที่ 22 ความไวในการตรวจจับของฮอลล์เจเนอเรเตอร์จะมีค่าเท่ากับ 0.52 โวลต์/เทสลา หรือ 100 % / เทสลา

สำหรับความไวในการตรวจจับของตัวตรวจจับแบบทรานซิสเตอร์หลายขาซึ่งได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 4 โดยสมการที่ (4.3) จะเป็นสมการที่แสดงถึงค่าความไวสัมพัทธ์ในการตรวจจับดังนี้

$$S_r = \mu_H (L_1 + L_2) / W_{eff}$$

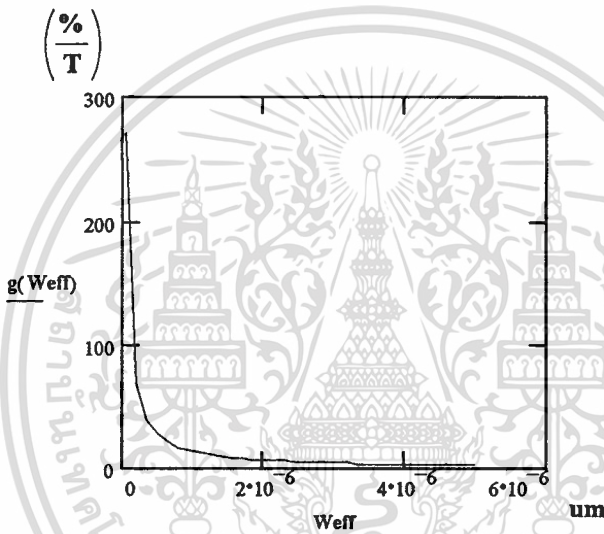
จากบทที่ 4 ได้กล่าวสรุปไว้ว่าถ้าต้องการให้ตัวตรวจจับแบบทรานซิสเตอร์หลายขา มีความไวในการตรวจจับสูงสุดจะต้องทำให้ W_{eff} มีค่าเข้าใกล้ศูนย์มากที่สุด โดยขนาดของ W_{eff} จะสัมพันธ์กับความไวในการตรวจจับดังในรูปที่ 23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 23

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความไวในการตรวจจับกับขนาดของ W_{eff} โดยกำหนดให้ตัวตรวจจับแบบ Lateral Magnetotransistor ในรูปที่ 11 และ 13 มีขนาดของ $L_2 = W_B + L_E = 108 \text{ um}$, $L_1 \approx$ ความหนาของ P-well / 2 = $10 \text{ um} / 2 = 5 \text{ um}$ โดยตัวตรวจจับถูกสร้างขึ้นจากวัสดุที่มีค่า Hall mobility ของอิเล็กตรอน (μ_H) = $1200 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ [25]

$$g(\text{Weff}) := \frac{1200 \cdot 5 \cdot 10^{-6} + 108 \cdot 10^{-6}}{10000 \cdot \text{Weff}} \quad \text{Weff} := 0.05 \cdot 10^{-6}, .2 \cdot 10^{-6} .. 5 \cdot 10^{-6}$$



จากกราฟในรูปที่ 23 ค่าความไวในการตรวจจับจะมีค่าเท่ากับ 250 % / เทสลา (ที่ $W_{\text{eff}} = 0.05 \text{ um}$) และจะเห็นได้ว่าถ้าสามารถทำให้ขนาดของ W_{eff} มีค่าเข้าใกล้ศูนย์มากเท่าไรก็ยิ่งจะทำให้ความไวในการตรวจจับสูงมากขึ้น ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่างของกระแสไฟคอลเล็กเตอร์ (ΔI_c) ของตัวตรวจจับแบบ Lateral Magnetotransistor กับค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) จะเป็นดังนี้

จากสมการ 3.14 และ 3.15 กระแสไฟคอลเล็กเตอร์จะมีค่าดังนี้

$$I_{C1} = I_{C10}(1 - \mu_H ((L1+L2)/\text{Weff})B)$$

$$I_{C2} = I_{C20}(1 + \mu_H ((L1+L2)/\text{Weff})B)$$

ดังนั้น $\Delta I_C = I_{C2} - I_{C1}$ โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่างของกระแสไฟคอลเล็กเตอร์ (ΔI_C) ของตัวตรวจจับแบบ Lateral Magnetotransistor กับค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) จะในรูปที่ 24

รูปที่ 24

ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟคอลเล็กเตอร์ของตัวตรวจจับแบบ Lateral Magnetotransistor กับ

ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B) มีขนาดของ $L_2 = W_B + L_E = 108 \text{ um}$, $L_1 \approx$ ความหนา

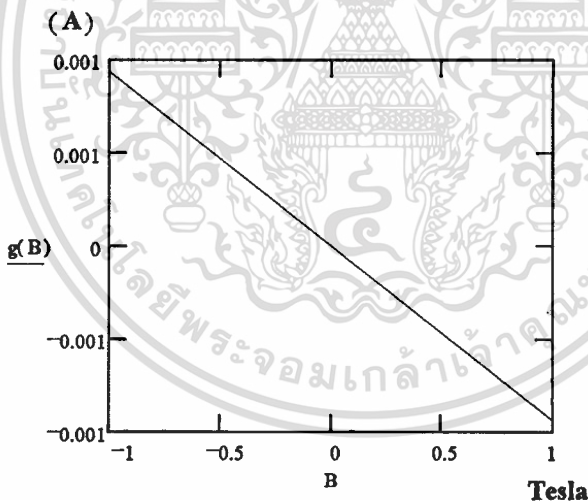
ของ P-well / 2 = $10 \text{ um} / 2 = 5 \text{ um}$, $W_{\text{eff}} \approx$ P-well / 3 = $10 \text{ um} / 3 = 3.33 \text{ um}$

โดยตัวตรวจจับถูกสร้างขึ้นจากวัสดุที่มีค่า Hall mobility ของ

อิเล็กตรอน (μ_n) = $1200 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ [25]

$$g(\mathbf{B}) := \left[500 \cdot 10^{-6} \cdot \left[\left(1 + \frac{1200 \cdot 5 \cdot 10^{-6} + 108 \cdot 10^{-6}}{10000 \cdot 3.33 \cdot 10^{-6}} \right) - 1 - \frac{1200 \cdot 5 \cdot 10^{-6} + 108 \cdot 10^{-6}}{10000 \cdot 3.33 \cdot 10^{-6}} \right] \right] \cdot \mathbf{B}$$

$\mathbf{B} := -1..1$



จากกราฟในรูปที่ 24 ความไวในการตรวจจับของตัวตรวจจับแบบ Lateral Magnetotransistor จะมีค่าเท่ากับ 933 uA / เทสลา

จากกราฟความสัมพันธ์ที่ได้ในรูปที่ 21 ถึง 24 สามารถที่จะสรุปการเปรียบเทียบในเรื่องของความไวในการตรวจจับของตัวตรวจจับทั้งสองแบบดังนี้คือ

$$V_h = [-R_h \cdot I_1 \cdot B / d] \cdot F(l/w, s/w, \theta) \quad \dots$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าตัวแปรหลักที่จะทำให้ค่าแรงดันไฟ (V_h) มีการเปลี่ยนแปลงไปก็คือค่าของ Hall coefficient (R_h) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าของ R_h จากที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 เห็นได้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าไปตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิบรรยากาศ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้ในการสร้างฮอลล์เจนเนอเรเตอร์ โดยถ้าต้องการให้ฮอลล์เจนเนอเรเตอร์ที่สร้างขึ้นมาีมีความเป็นเชิงเส้นที่ดีตลอดย่านอุณหภูมิใช้งาน (โดยทั่วไปคือ $0 - 55^\circ \text{C}$) ก็ต้องพิจารณาเลือกวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่า R_h น้อยที่สุดตลอดย่านอุณหภูมิใช้งาน เช่นจากภาพที่ 2.8 ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของค่า R_h ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของวัสดุชนิดอินเดียมแอนติโมไนต์ (InSb) จากการพิจารณาจากกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าของ R_h ในเส้นต่าง ๆ จะเห็นได้ว่ากราฟ c ซึ่งเป็นกราฟของก้อนผลึก InSb ที่มีความเข้มข้นของสารเจือปน $10^{17} / \text{cm}^3$ จะเป็นวัสดุที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการสร้างฮอลล์เจนเนอเรเตอร์

สำหรับความเป็นเชิงเส้นในการตรวจนับและเสถียรภาพการทำงานอันเป็นผลมาจากอุณหภูมิของตัวตรวจนับแบบทรานซิสเตอร์หลายข่าพิจารณาจากสมการแสดงค่ากระแสไฟคอลเล็กเตอร์ I_{C1} และ I_{C2} จากสมการ 3.14 และ 3.15

$$I_{C1} = I_{C10}(1 - \mu_H ((L1+L2)/W_{eff})B)$$

$$I_{C2} = I_{C20}(1 + \mu_H ((L1+L2)/W_{eff})B)$$

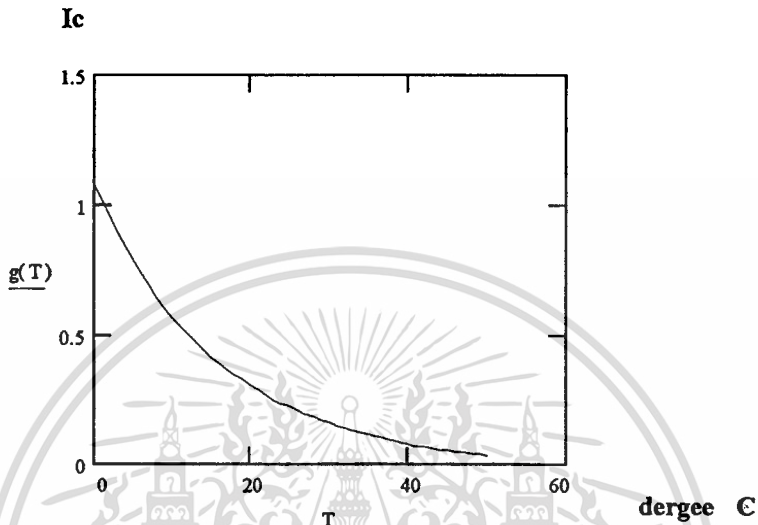
จากสมการจะเห็นได้ว่าตัวแปรสำคัญที่จะทำให้ค่ากระแสไฟคอลเล็กเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงไปก็คือค่าของกระแสไฟคอลเล็กเตอร์ขณะความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์ (I_{C10} และ I_{C20}) และค่าของ Electron Hall Mobility (μ_H) โดยกระแสไฟ I_{C10} และ I_{C20} จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิดังรายละเอียดที่ได้กล่าวไปแล้ว

$$I_C = I_{C10} = I_{C20} = -\beta I_B + (-\beta + 1) I_{C0} (1 - \exp^{V_C/V_T})$$

กราฟแสดงความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงระหว่างกระแสไฟคอลเล็กเตอร์ กับอุณหภูมิบรรยากาศจะแสดงดังในรูปที่ 25

รูปที่ 25

กราฟแสดงความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงระหว่างกระแสไฟคอลเล็กเตอร์กับอุณหภูมิ
บรรยากาศ ที่ $\beta = 50$, กระแสไฟรั่วไหล = 1 nA, $V_C = 0.3$ v



- 46 -

จากกราฟในรูปที่ 25 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิบรรยากาศมีการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นก็จะทำให้กระแสไฟคอลเล็กเตอร์มีค่าต่ำลง

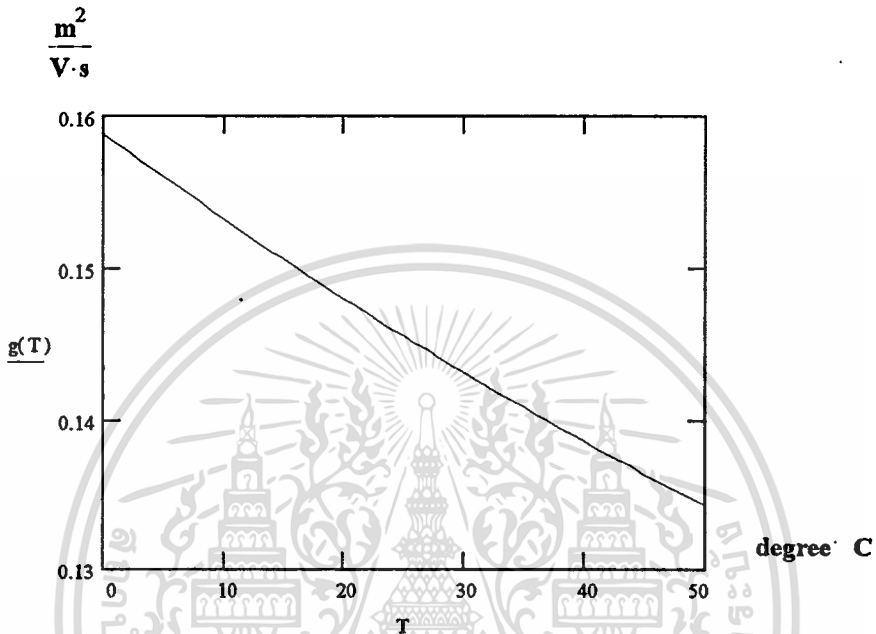
ส่วนค่าของ Electron Hall Mobility นั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิเช่นกันดังแสดงในสมการ (4.27) และ (4.28)

$$\mu_H = r_n \mu_n = r_n * D_n * q / k * t$$

โดยความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของ Electron Hall Mobility กับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิบรรยากาศ จะแสดงดังในรูปที่ 26

รูปที่ 26

ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของ Electron Hall Mobility กับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ
บรรยากาศของวัสดุประเภทซิลิกอนซึ่งมี $D_n = 34 \text{ cm}^2/\text{s}$ [26] และ $r_n = 1.1$ [20]



จากรูปที่ 26 จะเห็นได้ว่าค่าของ Electron Hall Mobility จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของบรรยากาศมีการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้น

ดังนั้นจะสามารถสรุปผลการเปรียบเทียบในเรื่องของความเป็นเชิงเส้นในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก และเสถียรภาพการทำงานอันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของตัวตรวจจับทั้งสองแบบได้ดังนี้คือ โดยหลักการทำงานพื้นฐานแล้วตัวตรวจจับทั้งสองแบบต่างก็มีผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเช่นเดียวกัน ซึ่งจะทำให้มีผลต่อเนื่องถึงความแม่นยำในการตรวจจับด้วย แต่ตัวตรวจจับแบบฮอลล์เจเนอเรเตอร์จะมีข้อจำกัดในเรื่องของการสร้างกล่าวคือถ้าต้องการสร้างให้ตัวตรวจจับมีความเป็นเชิงเส้นที่ดีและมีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิที่ดี ความสำคัญสูงสุดจะอยู่ที่การพิจารณาเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น แต่ตัวตรวจจับแบบทรานซิสเตอร์หลายขางจะมีข้อดีตรงที่ผู้ออกแบบสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ป้อนให้ตัวตรวจจับได้ในภายหลัง เช่น การปรับค่าต่าง ๆ ซึ่งได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 4 เช่น V_r , V_s และค่า I_b เป็นต้น

จึงสรุปจากเหตุผลข้างต้นได้ว่าตัวตรวจจับแบบทรานซิสเตอร์หลายขาจะเป็นตัวตรวจจับที่มีความเป็นเชิงเส้นในการตอบสนองต่อความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก และมีเสถียรภาพการทำงานอันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ที่ดีกว่าตัวตรวจจับแบบฮอลล์เจเนอเรเตอร์



บทที่ 6

บทสรุป

ในการใช้อุปกรณ์จ่ายพอกซอลต์เงินเนอเรเตอร์เป็นตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กมักจะพบปัญหาคือความไวในการตรวจจับต่ำ, ความมีเสถียรภาพในการทำงานต่ออุณหภูมิต่ำ และความ เป็นเชิงเส้นต่อสนามแม่เหล็กไม่ดี เป็นต้น ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอหลักการใหม่ ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยการศึกษาและพัฒนาตัวตรวจจับชนิดใหม่แบบทรานซิสเตอร์ หลายขาขึ้นมาใช้งานแทนตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบซอลต์เงินเนอเรเตอร์ โดยหลักการ ทำงานของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบทรานซิสเตอร์หลายขา ก็คือ เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านผิว หน้าชีพของตัวตรวจจับ ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสไฟที่ขาคอลเล็กเตอร์ ซึ่งจะได้ กล่าวถึงรายละเอียดไปแล้วในบทที่ 3 และนอกจากนี้ยังสามารถสร้างให้ตัวตรวจจับชนิดนี้ สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทุกทิศทาง (ทิศทาง X,Y และ Z) อีกด้วย

ซึ่งตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กชนิดใหม่แบบทรานซิสเตอร์หลายขานี้จะเป็นตัวตรวจจับ สนามแม่เหล็กที่มีความไวสูงขึ้น โดยผลจากการวิเคราะห์ในบทที่ 5 จะเห็นได้ว่าความไวของตัว ตรวจจับแบบทรานซิสเตอร์หลายขาจะมีค่าสูงถึง 250 % / เทสลา ในขณะที่ซอลต์เงินเนอเรเตอร์ จะมีความไว 100 % / เทสลา ซึ่งจะสูงกว่า 2.5 เท่า และยังสามารถทำให้ความไวในการตรวจจับ ของตัวตรวจจับแบบทรานซิสเตอร์หลายขามีค่าสูงกว่านี้อีก (ดูรายละเอียดในบทที่ 4) นอกจากนี้ ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบทรานซิสเตอร์หลายขานี้ยังมีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิที่ดีขึ้น และ มี ความเป็นเชิงเส้นที่ดีกว่าการใช้อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กจ่ายพอกซอลต์เงินเนอเรเตอร์ ทั้งนี้ เพราะว่าตัวตรวจจับแบบซอลต์-เงินเนอเรเตอร์จะมีข้อจำกัดในเรื่องของการสร้าง กล่าวคือถ้าต้อง การสร้างให้ตัวตรวจจับมีความเป็นเชิงเส้นที่ดีและมีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิที่ดีความสำคัญสูงสุด จะอยู่ที่การพิจารณาเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 แต่ตัวตรวจจับสนาม แม่เหล็กแบบทรานซิสเตอร์หลายขาจะมีข้อดีตรงที่ผู้ออกแบบสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ จะไปอัสให้กับตัวตรวจจับได้ในภายหลังซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่จะปรับจะมีผลต่อคุณสมบัติ การทำงานของตัวตรวจจับแบบทรานซิสเตอร์ เช่น การปรับค่า V_p , V_s และค่า I_b เป็นต้น โดยดูราย ละเอียดได้ในบทที่ 4

บรรณานุกรม

- [1] H.H.Wieder., "Hall Generators and Magnetoresistors," Pion Limiter, 207 Brondes bary Park, Lordon NW2 5JN, pp. 63-66, pp. 95-104, 1971.
- [2] RS Components Ltd., "Data Library,"
- [3] JOHN D. KRAUS, "Electromagnetics.," Third Edition, McGraw-Hill Book Company, pp. 18, 1985.
- [4] VICTOR ZIEREN and BART P.M. DUYN DAM, "Magnetic-Field-Sensitive Multicollector n-p-n Transistor," IEEE Transactions on Electron Devices, VOL. ED-29, No. 1, January 1982.
- [5] JOHN D. KRAUS, "Electromagnetics.," Third Edition, McGraw-Hill Book Company, pp.112-113, 1985.
- [6] JOHN D. KRAUS, "Electromagnetics.," Third Edition, McGraw-Hill Book Company, pp.7, 1985.
- [7] H.H.Wieder., "Hall Generators and Magnetoresistors," Pion Limiter, 207 Brondes bary Park, Lordon NW2 5JN, pp. 1, 1971.
- [8] Jacob Millman, "Microelectronics," McGraw - Hill International Book Company, pp. 18, 1983.
- [9] Jacob Millman, "Microelectronics," McGraw - Hill International Book Company, pp. 8, 1983

- [10] H.H.Wieder., "Hall Generators and Magnetoresistors," Pion Limiter, 207 Brondes bary Park, Lordon NW2 5JN, pp. 4, 1971.
- [11] H.H.Wieder., "Hall Generators and Magnetoresistors," Pion Limiter, 207 Brondes bary Park, Lordon NW2 5JN, pp. 7, 1971.
- [12] H.H.Wieder., "Hall Generators and Magnetoresistors," Pion Limiter, 207 Brondes bary Park, Lordon NW2 5JN, pp. 4, 1971.
- [13] H.H.Wieder., "Hall Generators and Magnetoresistors," Pion Limiter, 207 Brondes bary Park, Lordon NW2 5JN, pp. 6, 1971.
- [14] H.H.Wieder., "Hall Generators and Magnetoresistors," Pion Limiter, 207 Brondes bary Park, Lordon NW2 5JN, pp. 7, 1971.
- [15] H.H.Wieder., "Hall Generators and Magnetoresistors," Pion Limiter, 207 Brondes bary Park, Lordon NW2 5JN, pp. 25, 1971
- [16] H.H.Wieder., "Hall Generators and Magnetoresistors," Pion Limiter, 207 Brondes bary Park, Lordon NW2 5JN, pp. 23, 1971.
- [17] H.H.Wieder., "Hall Generators and Magnetoresistors," Pion Limiter, 207 Brondes bary Park, Lordon NW2 5JN, pp. 25, 1971.
- [18] H.H.Wieder., "Hall Generators and Magnetoresistors," Pion Limiter, 207 Brondes bary Park, Lordon NW2 5JN, pp. 9, 1971.

- [19] Lj. Ristic, T. Smy, H. P. Baltes, "A Lateral Magnetotransistor Structure with a Linear Response to the Magnetic Field," IEEE Transactions on Electronic Devices, vol. 36, No. 6, pp. 1077, June 1989.
- [20] Lj. Ristic, T. Smy, H. P. Baltes, "A Lateral Magnetotransistor Structure with a Linear Response to the Magnetic Field," IEEE Transactions on Electronic Devices, vol. 36, No. 6, pp. 1079, June 1989.
- [21] Lj. Ristic, M.T. Doan, M.Paranjape, "Multi-Dimensional Sensing of Magnetic Field," Proc. 33 rd, Midwest Symposium on Circuits and Systems, Canada, pp. 858-861, 1990.
- [22] Lj. Ristic, M.T. Doan, M.Paranjape, "Multi-Dimensional Sensing of Magnetic Field," Proc. 33 rd, Midwest Symposium on Circuits and Systems, Canada, pp. 860, 1990.
- [23] National Semiconductor, "Linear Applications Handbook,"
- [24] JOHN D. KRAUS, "Electromagnetics.", Third Edition, McGraw-Hill Book Company, pp. 240, 1985.
- [25] Lj. Ristic, T. Smy, H. P. Baltes, "A Lateral Magnetotransistor Structure with a Linear Response to the Magnetic Field," IEEE Transactions on Electronic Devices, vol. 36, No. 6, pp. 1081, June 1989.
- [26] Jacob Millman, "Microelectronics," McGraw - Hill International Book Company, pp. 9, pp. 62, 1983.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายชูเกียรติ ชัยมาทิกุล
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 13 ธันวาคม 2511
สถานที่เกิด	จังหวัดลำปาง
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีการควบคุม ทางอุตสาหกรรม
สถานที่สำเร็จการศึกษา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2534
ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์	การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยหาความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กต่ออุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ
ประสบการณ์การทำงาน	วิศวกรฝ่ายบำรุงรักษาไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เมื่อปี 2534-2535 - วิทยากรบรรยาย โครงการเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ปี 2534-2536 - วิทยากรพิเศษ ของสำนักพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อ อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
อาชีพปัจจุบัน	พนักงานในตำแหน่ง วิศวกรบริษัท แสงชัยมิเตอร์ จำกัด