



รายงานโครงการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาตัวตรวจจับทางแสงโครงสร้างเชิงราบแบบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

โดย ดร.สัญญา คุณขาว

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
สัญญาเลขที่ MRG 5080004

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการศึกษาตัวตรวจจับทางแสงโครงสร้างเชิงราบแบบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

ผู้วิจัย ดร.สัญญา คุณขาว สังกัด มหาวิทยาลัยศรีปทุม

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

ในการวิจัยฉบับนี้ผมต้องขอบคุณบุคคลทุกท่านที่ได้ให้การสนับสนุนประสพผลสำเร็จได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Prof.Dr.Kazunori Sato และ รศ.ดร.วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง ที่ได้ให้ความรู้คำแนะนำต่องานวิจัยนี้ นอกจากนี้ต้องขอขอบคุณ ดร.รัชนีพร พุคยาภรณ์ พุกกะมาน และ ร.ศ.ดร.ณรงค์ อยู่ถนอม ที่ได้ให้การสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยศรีปทุม และคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม ที่เป็นกำลังใจในเวลาที่ยากลำบาก อีกทั้งยังมีอีกหลายท่านที่ได้ให้การช่วยเหลือข้าพเจ้าโดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณละเอียด แฉ่งใจ ที่ได้ช่วยดำเนินการในหลายสิ่งด้วยกัน แต่ทั้งนั้นก็ยังมียกบุคคลหนึ่งซึ่งข้าพเจ้าต้องกล่าวถึง คือบิดาและมารดา คุณพ่อน้อม และคุณแม่ เล็ก คุณขาว ที่ได้ส่งเสริมให้ข้าพเจ้าได้อบรมเลี้ยงดูให้การศึกษา จนข้าพเจ้าสามารถก้าวสู่จุดสูงสุดของการศึกษา และอาชีพ ในการเริ่มต้นของการก้าวสู่จุดหมายหลายประการด้วยกัน ณ ที่นี้ถ้าบุคคลใดที่ไม่ได้กล่าวนามข้าพเจ้ากราบขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

อีกทั้งขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ได้มอบทุนสนับสนุนงานวิจัย รหัสโครงการ MRG 5080004

ด้วยความรักที่ให้ตลอดกาลและสิ่งทั้งปวง
แม่อันเป็นที่รักยิ่ง

ดร.สัญญา คุณขาว

โครงการ การตรวจจับทางแสงโครงสร้างเชิงราบแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

ดร. สัญญา คุณขาว มหาวิทยาลัยศรีปทุม

sanya.kh@spu.ac.th

บทคัดย่อ

ตัวตรวจจับโครงสร้างสารกึ่งตัวนำโฟโตไดโอดโครงสร้างเชิงโครงสร้าง Metal-Semiconductor-Metal :MSM ประกอบขึ้นจากรอยสัมผัส โลหะ-สารกึ่งตัวนำแบบรอยต่อแบบช็อตต์คีย์ (Schottky barrier) สองรอยสัมผัสที่ต่อแบบหันหลังชนกัน (back-to-back) โดยในการวิจัยได้กำหนดไว้เป้าหมายไว้สองประการด้วยกัน คือ หนึ่งการแรก ได้นำเสนอถึงการแรงดันไบแอสที่ควบคุมกระแสแสงของตัวตรวจจับทางแสง MSM โดยที่กระแสแสงนี้จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของการเพิ่มขึ้นของความเข้มแสงและแรงดันไบแอส ที่มีระหว่างขั้วไฟฟ้าโลหะทั้งสองกว้างมาก ประกอบด้วยส่วนของบริเวณปลอดพาหะ และบริเวณนิวทรัลที่เป็นส่วนของเนื้อสารกึ่งตัวนำ การที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทดกว้างมากนี้เองทำให้บริเวณของส่วนปลอดพาหะ space-charge-region (SCR) นี้แพร่ขยายออกทางแนวนอน พบว่ากระแสแสงที่บริเวณปลอดพาหะนั้นจะมีปริมาณมากกว่าบริเวณนิวทรัล ประการที่สองเป็นการทดสอบวัดสัญญาณรบกวนที่ความถี่ต่ำในช่วง (10-100kHz) แสดงผลการตอบสนองของสัญญาณรบกวนในตัวตรวจวัดทางแสงได้อย่างเด่นชัด

การทดสอบวัดตัวตรวจจับโครงสร้างสารกึ่งตัวนำโฟโตไดโอดโครงสร้างเชิงโครงสร้าง Metal-Semiconductor-Metal :MSM จะทำการสร้างให้มีโครงสร้างที่เป็นแบบสองขั้วไฟฟ้าและแบบชี้ซ่อม ที่เตรียมขึ้นจากโลหะโมลิบดีนัมเป็นแบบแนวราบของ Mo/n-Si/Mo ที่ประกอบด้วยส่วนของบริเวณปลอด และบริเวณส่วนของนิวทรัล โดยทำการศึกษาถึงลักษณะด้านกระแสตรง และกระแสสลับ พบว่าผลของการเพิ่มขึ้นของกระแสแสงเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มแสง และแรงดันไบแอส จากผลของการตรวจจับด้านกระแสสลับ(1kHz-2MHz) ด้วยการวัดขนาดของสัญญาณจากการผสมสัญญาณรูปคลื่นไซน์ และจากการวิเคราะห์ด้วยฟูริเยร์ Fast Fourier Transform (FFT) พบว่าไม่มีผลจากสัญญาณข้างเคียงอื่นๆ

การทดสอบวัดสัญญาณรบกวน Shot noise ที่ความถี่ต่ำในช่วง 10-100 kHz เป็นผลจากประจุพาหะจากการกระตุ้นของแสงในโครงสร้างเชิงราบของ Mo/n-Si/Mo ที่มีส่วนของบริเวณที่เป็นกลาง (undepleted region) ที่ภายใต้เงื่อนไขของแรงดันไบแอส และ ความเข้มแสง การวัดกระแสสัญญาณรบกวนจะกระทำที่ระดับความเข้มแสง และแรงดันต่างๆ จากการทดลองพบว่าขนาดของกระแสรบกวน $S(\omega)$ นั้นมีอัตราส่วนของ noise ratio: Γ^2 มีค่าอยู่ระหว่าง 0.01 ถึง 1.0 ซึ่งขึ้นกับแรงดันไบแอส ในกรณีที่ $\Gamma^2 = 1.0$ ขนาดของกระแสรบกวนจะอยู่ที่ระดับ Full shot noise ซึ่งพบได้ในอุปกรณ์ที่เป็นแบบสองขั้วไฟฟ้าที่มีกระแสตรง / จากโครงสร้างเชิงราบที่มีขั้วไฟฟ้ากว้างมาก นั้นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในระดับสัญญาณรบกวน โดยที่อัตราส่วนของ noise ratio ไม่อาจอธิบายได้อย่างสมบูรณ์จากพาหะที่เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง และความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรีฟต์(พัดพา)อันเนื่องมาจากพาหะจากบริเวณปลอดพาหะ และกระแสจากการแพร่เนื่องจากพาหะ

ส่วนที่เป็นกลางนั้นค่อนข้างต่ำมาก พฤติกรรมของสัญญาณรบกวนที่ลดต่ำลงอย่างมากนี้เป็นผลกระทบจากการลดต่ำลงของอัตราสหสัมพันธ์ (autocorrelation) ซึ่งสัมพันธ์กันกับการลดต่ำลงของสัญญาณรบกวน

คำสำคัญ: โครงสร้างเชิงราบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ; ตัวตรวจวัดแสง; บริเวณปลอดพาหะ

Abstract

An MSM structure is simply composed of two back-to-back or face-to-face Schottky barriers placed flatwise and it has some advantages. In this research, Si-based planar MSM photosensing structures were treated with the emphasis on introducing further function. This research has two targets. The first is to introduce the voltage controllability of the output photocurrent obtained to an MSM optical sensing structure. The output photocurrent in planar MSM structures proposed reveals successfully to be the function of not only the optical illumination intensity level but also biasing voltage by employing widely separated electrode structure. The concept of metal-semiconductor barriers is reviewed first. Then, a new idea of planar MSM optical sensor structures having widely separated electrodes is proposed. Such a structure leaves undepleted region between the electrodes even under a bias. Therefore, this structure is expected to show the output photocurrent as the function of not only optical illumination intensity but applied bias due to laterally spreading of space-charge-region (SCR). This is because efficiency for generating current in the SCR is higher than that of undepleted region. Secondly, low frequencies (10kHz-100kHz) noise measurements of such structures are carried out and their noise characteristics are clarified.

With preparation and measurements of planar metal-semiconductor-metal structures is concerned. That is, it is mentioned that single slit and interdigitated planar Mo/n-Si/Mo structures with a long undepleted region are fabricated and their dc photoresponse characteristics are examined experimentally. It is shown that the photocurrent varies with both illumination intensity levels and bias applied. In addition, measurements of sinusoidally modulated low frequency (1kHz-2MHz) optical signal response of such structure are performed. It is confirmed that this structure keeps bias controllability of the detected signal to coincide with the results in dc photoresponse. No spurious effect was observed by a Fast Fourier Transform (FFT) analyzer at the frequencies examined.

Low frequency 3-100 kHz shot noise (white noise) emerging from photoinduced current in Mo/n-Si/Mo structures leaving undepleted region has been observed under different bias and optical intensity conditions. The measurements revealed that the current noise observed depends not only on the illumination intensity levels but also on bias voltage. The current noise observed is expressed as $S(\omega) = 2qI\Gamma^2$ and analyzed, where I and Γ^2 is the average current and noise factor, respectively. The measurements reveal that Γ^2 has strong bias dependence, lying $\Gamma^2 \sim 0.01$ to about unity corresponding to simple shot noise. Such experimental results are explained, stating that the reduction of crosscorrelation between drift and diffusion currents and autocorrelation of drift current component determining the level of noise occurs with decrease in SCR width bias-dependent. To explain the behavior of observed noise more properly, we propose, in addition to the mechanisms above, that the reduction in autocorrelation effect of each current component plays an important role to decrease the relevant noise to such extremely low levels. Such experimental results are explained, stating that the reduction of crosscorrelation between drift and diffusion currents and autocorrelation of drift current component determining the level of noise occurs with decrease in SCR width bias-dependent. Numerical simulation using 1D model supports the change in SCR width with bias.

Keywords: Planar metal-semiconductor-metal structure; Optical sensor; Space-charge-region; Photodetector; Electronic iris.

หน้าสรุปโครงการ (Executive Summary)
ทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่

1. ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การศึกษาตัวตรวจจับทางแสงโครงสร้างเชิงราบแบบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ
(ภาษาอังกฤษ) A study on planar metal-semiconductor-metal photodetectors

2. ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานที่สังกัด ที่อยู่ หมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ e-mail

นาย สันยญา คุณขาว

สถานที่ทำงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

61 ถนนพหลโยธิน จตุจักร แขวงเสนานิคม จังหวัด กรุงเทพมหานคร รหัสไปรษณีย์ 10900

โทรศัพท์ +66-2579-9120 ต่อ 2271 โทรสาร +66-2579-9120 ต่อ 2147

โทรศัพท์มือถือ 08-96980046 : e-mail : sanya100@hotmail.com: sanya.kh@spu.ac.th

3. สาขาวิชาที่ทำการวิจัย สาขาวิศวกรรมศาสตร์เกี่ยวกับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

5. ระยะเวลาดำเนินงาน 2 ปี

6. ได้เสนอโครงการนี้ หรือโครงการที่มีส่วนเหมือนกับเรื่องนี้อย่างบางส่วนเพื่อขอทุนต่อแหล่งทุนอื่นที่ใดบ้าง

☒ ไม่ได้เสนอต่อแหล่งทุนอื่น



เสนอต่อ

ชื่อโครงการที่เสนอ

.....

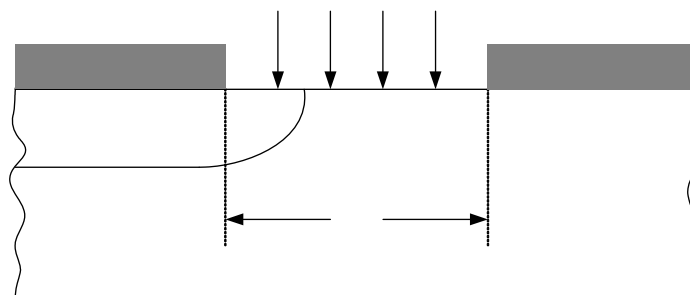
กำหนดทราบผล

(หรือสถานภาพที่ทราบ)

7. ปัญหาที่ทำการวิจัย และความสำคัญของปัญหา

ด้วยปริมาณความต้องการในงานด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว และความต้องการใช้ในชีวิตประจำวันเพื่ออำนวยความสะดวก ในปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่ใช้ซิลิคอน(Silicon)เป็นวัสดุพื้นฐานในการผลิต ด้วยเหตุผลนี้ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จึงมีขอบเขตการใช้ที่กว้างขวาง และต้นทุนไม่สูงนัก ด้วยสมบัติทางกายภาพ ไฟฟ้า และแสง ที่มีการประยุกต์ใช้งานอย่างมากที่เกี่ยวข้องทางแสงที่เรียกว่า “อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง” (Optical electronics) โดยเฉพาะในระบบการสื่อสารยุคใหม่ที่เป็นการสื่อสารด้วยคลื่นแสง ซึ่งการสื่อสาร หรือการตรวจจับสัญญาณแบบนี้มีประสิทธิภาพสูงกว่าทั้งความเร็ว ความแม่นยำ ที่ได้มีการศึกษาและผลิตขึ้นมาใช้งานในปัจจุบัน อาทิเช่น ตัวรับรู้ทางแสงแบบ p-n, pin, Schottky barrier และ avalanche photodetector ซึ่งตัวตรวจจับทางแสงนี้จะเป็นส่วนที่นำสัญญาณเข้าสู่กระบวนการระบบข้อมูลทางแสง ในตัวตรวจจับทางแสงนี้มีหลักการทำงานในการตรวจจับ และ/หรือ เปลี่ยนปริมาณความเข้มแสงแบบกระแส ตรง หรือสลับไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้านั้น จะเกิดจากกระบวนการทำงานในส่วนของบริเวณปลดพาหะ (Space Charge Region :SCR) โดยที่ตัวรับรู้ทางแสงนี้จะอยู่ภายใต้การไบอัสแบบย้อนกลับ (reverse bias) กับปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบเข้าสู่พื้นที่รับแสงของตัวอุปกรณ์ ดังนั้นปริมาณกระแสแสงจะขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงที่ตกกระทบพื้นที่รับแสง (active area) ซึ่งในปัจจุบันขณะนี้โครงสร้างเชิงราบแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-

โลหะ (planar-metal-semiconductor-metal : MSM) ได้รับการศึกษาเป็นอย่างมากเพื่อใช้เป็น โครงสร้างตัวตรวจจับทางแสง โดยมุ่งสนใจในการเพิ่มประสิทธิภาพของความเร็ว ความกว้างของแบนด์วิดท์ ในการตอบสนองสัญญาณไฟฟ้ากับความถี่ ซึ่งสามารถทำได้ถึง 110 GHz จากการสร้างอุปกรณ์ชิ้นงาน MSM ด้วยฐานรองซิลิคอน รวมทั้งจากแกเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) และ ซิลิคอนเจอร์มาเนียม (SiGe) ในส่วนของฐานรองประเภทนี้จะเป็นสารกึ่งตัวนำแบบ compound semiconductor ซึ่งมีราคาแพงอีกทั้งยังมีความเป็นพิษสูง ส่วนฐานรองจากซิลิคอนนั้นเป็นแบบผลึกเดี่ยว single นั้นมีราคาไม่แพงและง่ายต่อการสร้าง ดังนั้นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่เป็นตัวรับรู้ทางแสงที่เป็น โครงสร้างเชิงราบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (Planar Metal-Semiconductor-Metal: MSM) ได้รับความสนใจเป็นอย่างสูงในการประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง โดยที่โครงสร้างของตัวตรวจจับเป็นโครงสร้างที่ง่ายต่อการสร้างนี้มีกระบวนการผลิตที่ไม่ซับซ้อน ซึ่งสามารถนำไปประกอบเข้ากับเป็นวงจรรวม หรือใช้งานร่วมกันกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นเช่น (Field Effect transistors: FETs) นอกจากนั้นแล้วสารกึ่งตัวนำซิลิคอนยังได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ดังนั้นการขยายกระแสแสงจากภายในตัวรับรู้ทางแสงที่มีรอยต่อแบบช็อตต์คีย์ (Schottky) อันเนื่องมาจากผลของการทวีคูณแบบอะวาลันช์ (Avalanche multiplication) จึงเป็นสิ่งที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างยิ่งในการประยุกต์ใช้งานด้านความไวในการตอบสนองทางแสงให้สูงขึ้น ในการนำเสนองานวิจัยครั้งนี้ได้พิจารณา ตัวตรวจจับทางแสงที่เป็น โครงสร้างอย่างง่ายเชิงราบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ โดยมีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) ซึ่งสามารถจะพัฒนาความเร็วในการตรวจจับสัญญาณ (high-speed signal response) อันเนื่องมาจากมีค่าความจุไฟฟ้าต่ำ (Capacitance) นอกจากนั้นจะเป็นการศึกษาถึงปริมาณของกระแสแสงที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มปริมาณของแรงดันไบอัส รวมทั้งผลของการตอบสนองสัญญาณความถี่แบบสลับ อีกทั้งการวัดสัญญาณรบกวน(white noise) ที่เกิดขึ้นจากกระแสในโครงสร้างเชิงราบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างได้ง่ายโดยเป็นการสร้างฟิล์มโลหะเพียงชั้นเดียวเท่านั้นบนสารกึ่งตัวนำดังแสดงดังรูปที่1 ซึ่งแสดงโครงสร้างภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM โดยที่ผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับ สารกึ่งตัวนำทั้งสองข้างจะแสดงคุณสมบัติของช็อตต์คีย์แบเรียอร์ (Schottky barrier) 2 รอยสัมผัส โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วโลหะ D ซึ่งเป็นพื้นที่รับแสง ในการประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดแสง ซึ่งเมื่อการสร้างขั้วโลหะสามารถที่จะสร้างให้มีความหนาแน่นมากได้ ซึ่งต่างกับกับโลหะ-สารกึ่งตัวนำ โฟโตไดโอด (Schottky photodiode) ที่ต้องสร้างให้มีความบางมาก



รูปที่ 1. ภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM ที่มีโครงสร้างเป็นแบบเชิงราบ (planar)

โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างเชิงราบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ มักจะสร้างให้ระยะห่างระหว่างโลหะ D มีขนาดสั้นมาก เพื่อให้สามารถทำงานด้วยความเร็วสูง โดยที่ขั้วโลหะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง (Forward) เข้าที่ขั้วแอนโนด และแรงดันไบอัสย้อนกลับ (Reverse) เข้าที่ขั้วคาโทด ดังนั้นจะเกิดบริเวณปลอดพาหะ (depletion region) และบริเวณเนื้อสารซิลิคอน (neutral region) เมื่อมีแสงตกกระทบบนที่บริเวณรับแสง(active area) จะเกิดกระแสสองส่วนประกอบกัน คือกระแสกระแสแสงจากส่วนของบริเวณปลอดพาหะ (depletion region) ซึ่งเหมือนกับกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบโฟโต

ไดโอดต่างๆไป โดยมีสนามไฟฟ้าเป็นส่วนช่วยในการเคลื่อนที่ของพาหะแสง (photocarriers) เรียกกระแสแสงในส่วนนี้ว่า กระแสแสงโฟโตไดโอด และกระแสแสงส่วนที่เกิดในบริเวณเนื้อสารซิลิคอน(neutral region) ซึ่งอยู่นอกสนามไฟฟ้ามีการเคลื่อนที่ที่คล้อยคลึงกับกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบโฟโตคอนดักเตอร์โดยเกิดไม่ไกลจากขอบของส่วนปลอดพาหะมากนัก ซึ่งจะอยู่ในระยะการแพร่ (diffusion length) ของประจุพาหะ โฮล(Hole) ส่วนประจุพาหะโฮลที่เกิดนอกระยะการแพร่จะเกิดการรวมตัวจนหมด (recombination) และไม่มีผลต่อกระแสแสงรวม ดังนั้นกระแสแสงที่อยู่ในระยะการแพร่นี้เรียกว่ากระแสแสงโฟโตคอนดักเตอร์ ดังนั้นกระแสแสงรวมของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างเชิงราบแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วโลหะกว้างมากประกอบด้วยกระแสสองส่วนคือ กระแสโฟโตไดโอด (I_d) และกระแสแสงโฟโตคอนดักเตอร์ (I_p) ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

$$I_p = I_d + I_c \quad (1)$$

ดังนั้นการพิจารณากระแสสองส่วนนี้จะเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งต่อการควบคุมปริมาณกระแสแสง และการตอบสนองสัญญาณทางไฟฟ้าจากตัวตรวจวัดที่สร้างขึ้นมาต่อการวิจัยครั้งนี้

8. วัตถุประสงค์

1. สร้างสิ่งประดิษฐ์ตัวตรวจจับทางแสงที่เป็นโครงสร้างเชิงราบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

(Planar Metal-Semiconductor-Metal: MSM)

2. ศึกษาเงื่อนไขของกระแสแสง (photocurrent) เมื่อได้รับการจ่ายแรงดันไบอัส
3. วิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าจากรอยต่อแบบช็อตต์คีย์ (Schottky barrier) จากการขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะ (Depletion region)
4. ศึกษาถึงผลของการพึ่งพลาของการทวิคูณจากการเกิดอาวาลันซ์ ต่อปริมาณกระแสแสง
5. ศึกษาผลของการขยายสัญญาณกระแสตรงที่แรงดันไบอัสสูง
6. ศึกษาการตอบสนองสัญญาณทางไฟฟ้าแบบสลับ (AC signal response)
7. วิเคราะห์สัญญาณรบกวนแบบ white noise ที่ความถี่ต่ำ
8. วิเคราะห์เปรียบเทียบสมบัติทางไฟฟ้ากับตัวรับรู้ทางแสง (photodetector) ที่สร้างจากโรงงานอุตสาหกรรม
9. ระเบียบวิธีวิจัย

1. ดำเนินการจัดซื้อวัสดุ สารเคมี
2. ดำเนินการออกแบบและสร้างกระเจกต้นแบบ
3. ดำเนินการสร้างฟิล์มโลหะ และสร้างลวดลายโลหะจากกระบวนการ photolithography
4. ทำการวิเคราะห์ฟิล์มโลหะทำการปรับปรุงเงื่อนไข ให้ได้เงื่อนไขที่ดีที่สุด
5. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและไฟฟ้า
6. เขียนรายงานฉบับสมบูรณ์

10. จำนวนโครงการที่ผู้สมัครกำลังดำเนินการอยู่ โดยขอให้ระบุระยะเวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดของแต่ละ

โครงการ แหล่งทุน และงบประมาณสนับสนุนที่ได้รับ เวลาที่ใช้ทำโครงการวิจัยในแต่ละโครงการ

เป็นที่ข้อโม่งต่อสัปดาห์ ทั้งในฐานะหัวหน้าโครงการ ผู้ร่วมโครงการของแต่ละโครงการที่กำลังดำเนินการอยู่

บทคัดย่อภาษาไทย

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

กิตติกรรมประกาศ

บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 แนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	7
บทที่ 2 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (MSM)	8
2.1 กระบวนการทำงานทางแสง	9
2.2 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ	9
2.2.1 กลไกการดูดกลืนแสงและเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล	9
2.2.2 การรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล	12
2.2.3 ปฏิกิริยาการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ	13
2.3 คุณสมบัติสำคัญของตัวตรวจวัดแสง	15
2.3.1 ประสิทธิภาพควอนตัม	15
2.3.2 สภาพการตอบสนอง	16
2.3.3 ความเร็วในการตอบสนอง	16
2.3.4 สัญญาณรบกวนแบบซีด	16
2.4 ตัวตรวจวัดแสงแบบโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ	17
2.4.1 โครงสร้างและหลักการทำงาน	17
2.4.2 โครงสร้าง MSM ในภาวะสมดุล	18
2.4.3 โครงสร้าง MSM ในขณะที่ได้รับแรงดันไบแอส	19
2.4.4 การนำกระแสไฟฟ้าในโครงสร้าง MSM ในขณะที่ได้รับแรงดันไบแอส	19
2.4.5 ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ ในขณะที่ได้รับแรงดันไบแอส	22
2.4.6 ความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM ในขณะที่ได้รับแรงดันไบแอส	22
2.4.7 โครงสร้าง MSM ภายใต้เงื่อนไขการให้แสงตกกระทบ	24
2.5 แบบจำลองทางแสงของโครงสร้าง MSM	26

บทที่ 3 ตัวตรวจวัดแสงแบบใหม่โครงสร้างเชิงราบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ	27
3.1 หลักพื้นฐานการทำงานของจิวตรวจจับทางแสงโครงสร้างเชิงราบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ	27
3.2 สนามไฟฟ้า และความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่ได้รับแรงดันไบแอส	29
3.3 โครงสร้างเชิงราบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะภายใต้แสงตกกระทบ	32
3.4 โครงสร้างเชิงราบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะที่มีความกว้างระหว่างขั้วไฟฟ้ากว้างมาก	33
3.5 การเตรียมชิ้นงานและการทดลอง	36
3.6 ลวดลายสำหรับการสร้างชิ้นงาน	36
3.6.1 ลวดลายแบบช่องเดี่ยว	36
3.6.2 กระบวนการสร้าง	37
3.7 การทดลอง	40
3.7.1 การหาลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดัน	40
3.7.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันของ Mo/n-Si/Mo ในลักษณะสัญญาณแสงแบบ กระแสตรง	41
3.7.3 การศึกษาลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันของ Mo/n-Si/Mo ในลักษณะสัญญาณแสงแบบ กระแสสลับ	42
บทที่ 4 สมบัติทางไฟฟ้าด้านกระแสตรง และกระแสสลับ	44
4.1 การหาความหนาของฟิล์มโลหะ โมลิบดีนัมจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาด	44
4.2 การหาลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดันของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง	45
4.3 การวัดสัญญาณแสงของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ในลักษณะสัญญาณแบบกระแสตรง (dc)	46
4.3.1 การหาลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันด้วยเครื่องวัดคุณสมบัติทรานซิสเตอร์	47
4.3.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่ระยะห่างขั้ว ไฟฟ้ามีขนาดกว้าง	48
4.4 การวัดสัญญาณแสงของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ในลักษณะสัญญาณแบบกระแสสลับ (ac)	53
4.5 การวัดสัญญาณแสงของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่มีลวดลายแบบอินเตอร์ดิจิต	55
4.5.1 ลักษณะเฉพาะแบบกระแสตรง	56
4.5.2 ลักษณะเฉพาะแบบกระแสสลับ	57
4.6 การศึกษาลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีความกว้างแคบมาก	60
4.7 ลักษณะสมบัติของความจุไฟฟ้ากับแรงดัน ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดแคบมาก	66
4.7.1 การวัดสัญญาณแสงของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ในลักษณะสัญญาณ แบบกระแสสลับ (ac) ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดแคบ	67

บทที่ 5 สมบัติสัญญาณรบกวนของตัวรับรู้ทางแสงโครงสร้างเชิงราบแบบ MSM

ที่มีความกว้างระหว่างขั้วไฟฟ้ากว้างมาก 73

5.1 สัญญาณรบกวนแบบ Shot ของตัวรับรู้ทางแสงโครงสร้างเชิงราบแบบ
โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ 74

5.2 การวัดสัญญาณรบกวน 74

5.3 ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง 75

5.3.1 ผลของสัญญาณรบกวนที่ขึ้นกับกระแสแสง 76

5.4 สรุปผลการทดลอง 82

บทที่ 7 สรุป 84

เอกสารอ้างอิง

ภาคผนวก ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ

ภาคผนวก ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการในประเทศ

บทที่ 1

บทนำ

สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่เป็นตัวรับรู้ทางแสงที่เป็นโครงสร้างเชิงราบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (Metal-Semiconductor-Metal: MSM) ซึ่งในปัจจุบันโครงสร้างชนิดนี้กำลังเป็นที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างสูง ในการประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง

ในการศึกษางานวิจัยครั้งนี้เพื่อนำเสนอผลของกระแสแสงจากภายในตัวรับรู้ทางแสงที่มีรอยต่อแบบข้อต่อคัลบี้ ในบริเวณรอยต่อของเขตปลอดพาหะอันเนื่องจากแรงดันย้อนกลับ โดยการใช้ ตัวตรวจจับทางแสงที่เป็นโครงสร้างอย่างง่ายเชิงราบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ของโครงสร้าง Mo/n-Si/Mo ที่มีความกว้างระหว่างขั้วไฟฟ้าแบบกว้างมาก และแคบมากที่อยู่ในระดับ 2-2000 ไมโครเมตร โดยมีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) อยู่ภายใต้ความเข้มแสงการพิจารณาถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากกระแสแสง แบบกระแสตรง (DC photocurrent) ที่ภายใต้แรงดันก่อนการพังทลายจะพบว่าบริเวณปลอดพาหะนั้นได้ขยายออกจากขั้วไฟฟ้าด้านคาโทดจนถึงขั้วไฟฟ้าด้านแอนโนดซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากสองกลไกด้วยกันคือ การเกิดคู่ของอิเล็กตรอน-โฮล ที่บริเวณปลอดพาหะ และผลอันเนื่องมาจากการที่ประจุพาหะข้ามกำแพงศักย์ข้อต่อคัลบี้ได้อย่างรวดเร็ว

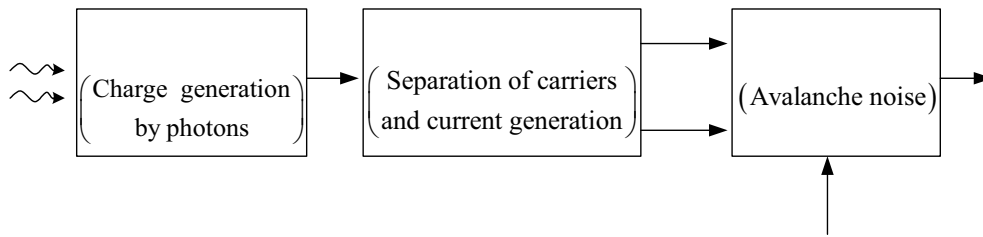
1.1 ความสำคัญของปัญหา

ด้วยปริมาณความต้องการในงานด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว และความต้องการใช้ในชีวิตประจำวันเพื่ออำนวยความสะดวก ในปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่ใช้ซิลิคอน (Silicon) เป็นวัสดุพื้นฐานในการผลิต ด้วยเหตุผลนี้ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จึงมีขอบเขตการใช้ที่กว้างขวาง และต้นทุนไม่สูงนัก ด้วยสมบัติทางกายภาพ ไฟฟ้า และแสง ที่มีการประยุกต์ใช้งานอย่างมากที่เกี่ยวข้องทางแสงที่เรียกว่า “อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง” (Optical electronics) โดยเฉพาะในระบบการสื่อสารยุคใหม่ที่เป็นการสื่อสารด้วยคลื่นแสง ซึ่งการสื่อสาร หรือการตรวจจับสัญญาณแบบนี้มีประสิทธิภาพสูงกว่าทั้งความเร็ว ความแม่นยำ ที่ได้มีการศึกษาและผลิตขึ้นมาใช้งานในปัจจุบันอาทิเช่น ตัวรับรู้ทางแสงแบบ p-n, pin, Schottky barrier และ avalanche photodetector ซึ่งตัวตรวจจับทางแสงนี้จะเป็นส่วนที่นำสัญญาณเข้าสู่กระบวนการระบบข้อมูลทางแสง ในตัวตรวจจับทางแสงนี้มีหลักการทำงานในการตรวจจับ และ/หรือ เปลี่ยนปริมาณความเข้มแสงแบบกระแส ตรง หรือสลับไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้านั้น จะเกิดจากกระบวนการทำงานในส่วนของบริเวณปลอดพาหะ (Space Charge Region :SCR) โดยที่ตัวรับรู้ทางแสงนี้จะอยู่ภายใต้การไบอัส

แบบข้อยกกลับ(reverse bias) กับปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบเข้าสู่พื้นที่รับแสงของตัวอุปกรณ์ ดังนั้นปริมาณกระแสแสงจะขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงที่ตกกระทบพื้นที่รับแสง (active area)

ซึ่งในปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่เป็นตัวรับรู้ทางแสงที่เป็นโครงสร้างเชิงราบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (Planar Metal-Semiconductor-Metal: MSM) ได้รับความสนใจเป็นอย่างสูงในการประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง โดยที่โครงสร้างของตัวตรวจจับเป็นโครงสร้างที่ง่ายต่อการสร้างนี้มีกระบวนการผลิตที่ไม่ซับซ้อน ซึ่งสามารถนำไปประกอบเข้ากับเป็นวงจรรวม หรือใช้งานร่วมกันกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นเช่น (Field Effect transistors: FETs) นอกจากนั้นแล้วสารกึ่งตัวนำซิลิคอนยังได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ดังนั้นการขยายกระแสแสงจากภายในตัวรับรู้ทางแสงที่มีรอยต่อแบบช็อตตี้ (Schottky) อันเนื่องมาจากผลของการทวีคูณแบบอะวาลันช์ (Avalanche multiplication) จึงเป็นสิ่งที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างยิ่งในการประยุกต์ใช้งานด้านความไวในการตอบสนองทางแสงให้สูงขึ้น ในการนำเสนองานวิจัยครั้งนี้ได้พิจารณา ตัวตรวจจับทางแสงที่เป็นโครงสร้างอย่างง่ายเชิงราบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ โดยมีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) ซึ่งสามารถจะพัฒนาความเร็วในการตรวจจับสัญญาณ (high-speed signal response) อันเนื่องจากมีค่าความจุไฟฟ้าต่ำ (Capacitance) นอกจากนั้นจะเป็นการศึกษาถึงปริมาณของกระแสแสงที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มปริมาณของแรงดันไบอัส รวมทั้งผลของการตอบสนองสัญญาณความถี่แบบสลับ อีกทั้งการวัดสัญญาณรบกวน(white noise) ที่เกิดขึ้นจากกระแสในโครงสร้างเชิงราบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

ด้วยปริมาณความต้องการในงานด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และความต้องการใช้ในชีวิตประจำวันเพื่ออำนวยความสะดวก ในปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่ใช้ซิลิคอน(Silicon)เป็นวัสดุพื้นฐานในการผลิต ที่มีการประยุกต์ใช้งานทางแสงที่เรียกว่า “อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง” (Optical electronics) โดยเฉพาะในระบบการสื่อสารยุคใหม่ที่เป็นการสื่อสารด้วยคลื่นแสง ที่ได้มีการศึกษาและผลิตขึ้นมาใช้งานในปัจจุบัน อาทิเช่น ตัวรับรู้ทางแสงแบบ p-n, pin, Schottky barrier และ avalanche photodetector ซึ่งตัวตรวจจับทางแสงนี้จะเป็นส่วนที่นำสัญญาณเข้าสู่กระบวนการระบบข้อมูลทางแสง ในตัวตรวจจับทางแสงนี้มีหลักการทำงานในการตรวจจับ และ/หรือ เปลี่ยนปริมาณความเข้มแสงแบบกระแส ตรง หรือสลับไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า นั่นจะเกิดจากกระบวนการทำงานในส่วนของบริเวณปลดพาหะ (Space Charge Region :SCR) โดยที่ตัวรับรู้ทางแสงนี้จะอยู่ภายใต้การไบอัสแบบข้อยกกลับ(reverse bias) กับปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบเข้าสู่พื้นที่รับแสงของตัวอุปกรณ์ ดังนั้นปริมาณกระแสแสงจะขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงที่ตกกระทบพื้นที่รับแสง (active area) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงขั้นตอนการตรวจจับกระแสแสงของตัวรับรู้ทางแสง

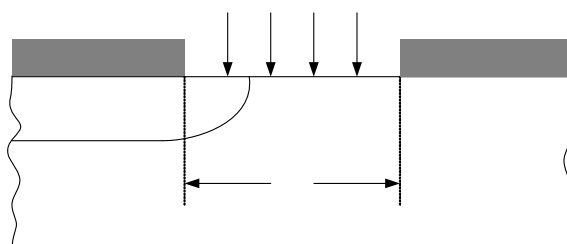
1.2 แนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย

Photoelectric

สำหรับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM มีจุดเด่นคือใช้โครงสร้างไฟฟ้ามีค่าต่ำ ทำให้ใช้เวลาในการตอบสนองสัญญาณมีค่าน้อย และมีโครงสร้างเป็นแบบพลาแนร์ ซึ่งเหมาะสำหรับสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย นอกจากนี้มีกระบวนการสร้างที่ไม่ซับซ้อนจึงมีราคาถูก อุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM จึงเป็นตัวตรวจวัดแสงที่น่าสนใจอีกตัวหนึ่ง โดยเฉพาะการเลือกใช้ซิลิคอนเป็นสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสามารถตอบสนองทางแสงในช่วงของแสงที่ตามองเห็นได้ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างมากมาย อย่างไรก็ตาม สำหรับเหตุผลที่สำคัญที่นักวิจัยส่วนใหญ่เลือกสารกึ่งตัวนำที่เป็นสารประกอบกลุ่ม III-V คาดว่ามาจากการพัฒนาระบบการสื่อสารความเร็วสูงด้วยสายไฟเบอร์อปติกในยุคที่สอง ซึ่งต้องใช้ความยาวคลื่นแสงในช่วง 1300-1600 nm ซึ่งจะทำให้การสูญเสียสัญญาณภายในเส้นไฟเบอร์อปติกมีค่าต่ำที่สุด แต่ตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้นจากซิลิคอนจะไม่ตอบสนองสัญญาณแสงในช่วงความยาวคลื่นนี้

ในปัจจุบันขณะนี้โครงสร้างเชิงราบแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (planar-metal-semiconductor-metal : MSM) ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเพื่อใช้เป็นโครงสร้างตัวตรวจจับทางแสง โดยมุ่งสนใจในการเพิ่มประสิทธิภาพของความเร็ว ความกว้างของแบนด์วิธ ในการตอบสนองสัญญาณไฟฟ้ากับความถี่ ซึ่งสามารถทำได้ถึง 110 GHz จากการสร้างอุปกรณ์ชิ้นงาน MSM ด้วยฐานรองซิลิคอน รวมทั้งจากแกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) และ ซิลิคอนเจอร์มาเนียม (SiGe) ในส่วนของฐานรองประเภทนี้จะป็นสารกึ่งตัวนำแบบ compound semiconductor ซึ่งมีราคาแพงอีกทั้งยังมีความเป็นพิษสูง ส่วนฐานรองจากซิลิคอนนั้นเป็นแบบผลึกเดี่ยว single นั้นมีราคาไม่แพงและง่ายต่อการสร้าง ดังนั้นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่เป็นตัวรับรู้ทางแสงที่เป็นโครงสร้างเชิงราบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (Planar Metal-Semiconductor-Metal: MSM) ได้รับความสนใจเป็นอย่างสูงในการประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง โดยที่โครงสร้างของตัวตรวจจับเป็นโครงสร้างที่ง่ายต่อการสร้างนี้มีกระบวนการผลิตที่ไม่ซับซ้อน ซึ่งสามารถนำไปประกอบเข้ากับเป็นวงจรรวม หรือใช้งานร่วมกันกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นเช่น (Field Effect transistors: FETs) นอกจากนั้นแล้วสารกึ่งตัวนำซิลิคอนยังได้

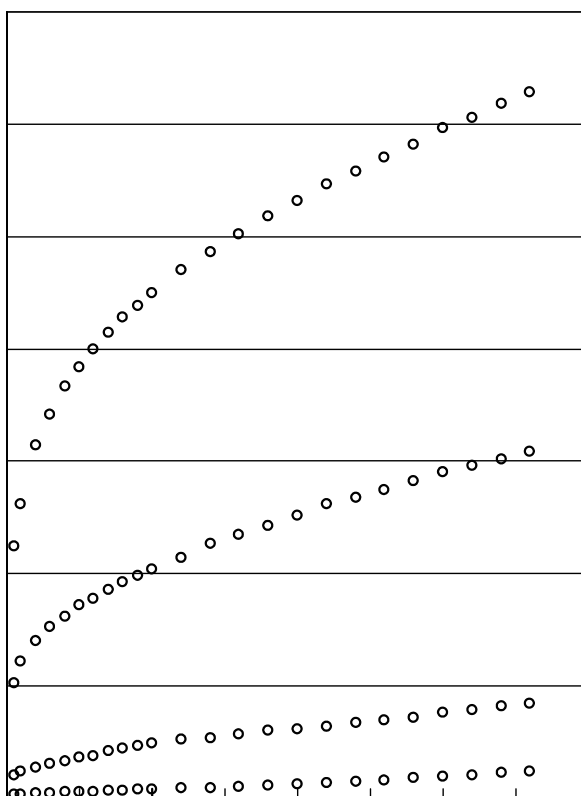
ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ดังนั้นการขยายกระแสแสงจากภายในตัวรับรู้ทางแสงที่มีรอยต่อแบบช็อตต์คีย์ (Schottky) อันเนื่องมาจากผลของการทวีคูณแบบอะวาลันช์ (Avalanche multiplication) จึงเป็นสิ่งที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างยิ่งในการประยุกต์ใช้งานด้านความไวในการตอบสนองทางแสงให้สูงขึ้น ในการนำเสนองานวิจัยครั้งนี้ได้พิจารณา ตัวตรวจจับทางแสงที่เป็นโครงสร้างอย่างง่ายเชิงราบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ โดยมีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) ซึ่งสามารถจะพัฒนาความเร็วในการตรวจจับสัญญาณ (high-speed signal response) อันเนื่องมาจากมีค่าความจุไฟฟ้าต่ำ (Capacitance) นอกจากนั้นจะเป็นการศึกษาถึงปริมาณของกระแสแสงที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มปริมาณของแรงดันไบอัส รวมทั้งผลของการตอบสนองสัญญาณความถี่แบบสลับ อีกทั้งการวัดสัญญาณรบกวน(white noise) ที่เกิดขึ้นจากกระแสในโครงสร้างเชิงราบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างได้ง่ายโดยเป็นการสร้างฟิล์มโลหะเพียงชั้นเดียวเท่านั้นบนสารกึ่งตัวนำดังแสดงดังรูปที่ 2 แสดงโครงสร้างภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM โดยที่ผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับ สารกึ่งตัวนำทั้งสองข้างจะแสดงคุณสมบัติของช็อตต์คีย์แบเรียอร์ (Schottky barrier) 2 รอยสัมผัส โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วโลหะ D ซึ่งเป็นพื้นที่รับแสงในการประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดแสง ซึ่งเมื่อการสร้างขั้วโลหะสามารถที่จะสร้างให้มีความหนาแน่นได้ ซึ่งต่างกับกับโลหะ-สารกึ่งตัวนำ โฟโตไดโอด (Schottky photodiode) ที่ต้องสร้างให้มีความบางมากๆ



รูปที่ 2. ภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM ที่มีโครงสร้างเป็นแบบเชิงราบ (planar)

โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างเชิงราบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ มักจะสร้างให้ระยะห่างระหว่างโลหะ D มีขนาดสั้นมาก เพื่อให้สามารถทำงานด้วยความเร็วสูง โดยที่ขั้วโลหะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง (Forward) เข้าที่ขั้วแอโนด และแรงดันไบอัสย้อนกลับ (Reverse) เข้าที่ขั้วคาโทด ดังนั้นจะเกิดบริเวณปลอดพาหะ (depletion region) และบริเวณเนื้อสารชิลิคอน(neutral region) เมื่อมีแสงตกกระทบบที่บริเวณรับแสง(active area) จะเกิดกระแสสองส่วนประกอบกัน คือกระแสกระแสแสงจากส่วนของบริเวณปลอดพาหะ (depletion region) ซึ่งเหมือนกับกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบโฟโตไดโอดทั่วๆไป โดยมีสนามไฟฟ้าเป็นส่วนช่วยในการเคลื่อนที่ของพาหะแสง (photocarriers) เรียกกระแสแสงในส่วนนี้ว่า กระแสแสงโฟโตไดโอด และกระแสแสงส่วนที่เกิดในบริเวณเนื้อสารชิลิคอน(neutral region) ซึ่งอยู่นอกสนามไฟฟ้ามีการเคลื่อนที่คล้ายคลึงกับกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบโฟโตคอนดักเตอร์โดยเกิดไม่ไกลจากขอบของส่วนปลอดพาหะมากนัก ซึ่งจะอยู่ในระยะการแพร่ (diffusion length) ของประจุพาหะ โฮล(Hole) ส่วนประจุพาหะโฮลที่เกิดนอกระยะการแพร่

จะเกิดการรวมตัวจนหมด (recombination) และไม่มีผลต่อกระแสแสงรวม ดังนั้นกระแสแสงที่อยู่ในระยะการแพร่นี้เรียกว่ากระแสแสงโฟโตคอนดักเตอร์ ดังนั้นกระแสแสงรวมของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างเชิงราบแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วโลหะกว้างมากประกอบด้วยกระแสสองส่วนคือ กระแสโฟโตไดโอด (I_d) และกระแสแสงโฟโตคอนดักเตอร์ (I_p) ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 3 ดังนั้นการพิจารณากระแสสองส่วนนี้จะเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งต่อการควบคุมปริมาณกระแสแสง และการตอบสนองสัญญาณทางไฟฟ้าจากตัวตรวจจับที่สร้างขึ้นมาต่อการวิจัยครั้งนี้



รูปที่ 3 ลักษณะกระแส กับแรงดันของตัวตรวจจับทางแสงโครงสร้างเชิงราบ MSM ที่มีระยะห่าง $100\ \mu\text{m}$

หลังจากปี ค.ศ. 1990 เป็นต้นมา จะพบเห็นรายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM อย่างต่อเนื่อง โดยมีเป้าหมาย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ให้ใช้งานทางด้านความเร็วสูง มากขึ้นในระดับหลายร้อยกิกะเฮิรต เนื่องจากคุณสมบัติเด่นของอุปกรณ์ที่มีค่าความจุไฟฟ้าภายในโครงสร้างต่ำกว่าอุปกรณ์ตรวจวัดแสงชนิดอื่นๆ และในปี ค.ศ. 1992 มีการรายงานผลการตอบสนองความถี่ของอุปกรณ์ได้สูงถึง 510 GHz [22] จากข้อจำกัดต่างๆ เหล่านี้ รวมทั้งหาวิธีการลดต้นทุนให้ต่ำลง จึงเป็นสาเหตุให้มีการศึกษา การวิจัย การพัฒนา และการสร้างตัวตรวจวัดแสงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งในปัจจุบันนี้ได้มีการสร้างตัวตรวจวัดแสง

ขึ้นมาหลายชนิด ประกอบด้วยวัสดุที่แตกต่างกันทำให้อุปกรณ์มีช่วงการใช้งานที่มีความหลากหลายและ
 เป็นไปตามความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งาน จากตารางที่ 1.1 ซึ่งแสดงคุณสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์
 และประสิทธิภาพของตัวตรวจจับแสงหลายชนิดที่ทำงานด้วยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic
 effect) พบว่า ตัวตรวจจับแสงที่สร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำที่เป็นซิลิคอน (Si) จะให้การตอบสนองในช่วงของแสง
 ที่ตามองเห็น และช่วงใกล้อินฟราเรด (near infrared : 800-1600 nm) ซึ่งมีความยาวคลื่นในช่วง 400-1110
 nm ในขณะที่ตัวตรวจจับแสงที่สร้างจากเยอรมันเนียม (Ge) หรือสารประกอบ InGaAs ให้การตอบสนอง
 อยู่ในช่วงแสงใกล้อินฟราเรดที่มีความยาวคลื่น 900-1700 nm เมื่อพิจารณาในเรื่องของอัตราการขยาย
 (gain) ทางแสง ตัวตรวจจับแสงแบบอะวาลานซ์โฟโตไดโอด หรือ APD จะได้รับความสนใจมากกว่า ทำให้
 สามารถตอบสนองความเข้มแสงในระดับต่ำๆ ได้ดี ในขณะที่ตัวตรวจจับแสงชนิดอื่นๆ ไม่มีอัตราการขยายทาง
 แสง แต่มีข้อด้อยตรงที่ต้องใช้แรงดันไบแอสสูงกว่าตัวตรวจจับแสงทั่วไป ในกรณีของพินโฟโตไดโอดจะมีข้อเด่น
 ในเรื่องกระแสมีดที่มีค่าต่ำ และมีประสิทธิภาพควอนตัมสูง

ตารางที่ 1.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ และทางไฟฟ้าของตัวตรวจจับแสงชนิดต่างๆ

Detector Type	p-i-n	APD	MSM	APD	p-i-n	APD	MSM
Semiconductor	Si	Si	Si	Ge	InGaAs	InGaAs	InGaAs
Structure	vertical	vertical	planar	vertical	vertical	vertical	planar
Useful Region (nm)	400-1110	400-1110	400-1110	800-1850	900-1700	900-1700	900-1700
Quantum Efficiency (%)	60-90	70-80	50-70	50-80	70 - 90	60-90	50-75
Gain	1	50-300	1	10-100	1	10-40	1
Carrier ionization ratio	-	0.01-0.1	-	0.6-0.9	-	0.20-0.5	-
Unmultiplied dark current (nA)	1	0.1	0.3-10	1-50	1 -10	0.5-5	2.5-20
Multiplied dark current (nA)	-	0.1-1	-	5-100	-	0.5-5	-
Detector Capacitance (pF)	1-5	1-5	0.2-0.7	1-5	0.2-2	0.2-2	0.01-0.4
Response Time (ns)	0.3-3	0.5-5	0.1-1	0.3-3	0.05-1	0.1-1	0.05-0.8
Cost	medium	medium	cheap	medium	expensive	expensive	medium

1.3 ขอบเขตการวิจัย

เพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ของการศึกษา ดังนั้นขอบเขตของงานวิจัยจึงเริ่มต้นจากการศึกษาโครงสร้าง MSM ทัวไปจากบทความต่างๆ แล้วกำหนดให้โลหะโมลิบดีนัมเป็นส่วนหนึ่งของขั้วไฟฟ้า จากนั้นทำการสร้างต้นแบบขนาดของขั้วไฟฟ้าแต่ละข้างมีขนาด $2 \times 2 \text{ mm}^2$ และระยะห่างขั้วไฟฟ้า 20-2000 μm ต้นแบบมีลักษณะเป็นแบบช่องเดี่ยวและอินเตอร์ดิจิต (interdigitated) หลังจากได้ต้นแบบแล้วจึงนำไปสร้างเป็นตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Mo/n-Si/Mo และเมื่อได้ตัวอุปกรณ์แล้วจึงนำมาทดสอบคุณสมบัติทางแสงในลักษณะของสัญญาณแสงแบบ dc และ ac สำหรับสัญญาณทางแสงแบบ dc เลือกใช้แหล่งกำเนิดแสงฮาโลเจน และ/หรือ He-Ne เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 633 nm ส่วนสัญญาณแสงแบบ ac จะเลือกแหล่งกำเนิดแสง He-Ne เลเซอร์และมอดูเลตสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่ในช่วง 100 Hz-1 MHz เข้ากับ He-Ne เลเซอร์ โดยใช้เครื่องอคูสโตออปติกมอดูเลเตอร์ (Acousto Optic Modulator : AOM) แล้วหาความสัมพันธ์ของส่วนประกอบกระแสไฟโตไดโอดและกระแสไฟโตคอนดัคเตอร์ ซึ่งขึ้นกับค่าความถี่ ขึ้น กับค่าความต้านทานโหลดภายนอก (load resistance : R_L) และขึ้นกับค่าแรงดันไบแอส จากนั้นพยายามอธิบายถึงความหมายทางกายภาพของผลการทดลองในรูปกลไกการเกิดกระแสแสง และชนิดของพาหะ แล้วนำไปหาแบบจำลองอย่างง่าย เพื่อยืนยันความถูกต้องของแนวความคิดที่เสนอไว้ตั้งแต่แรก

บทที่ 2

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (MSM)

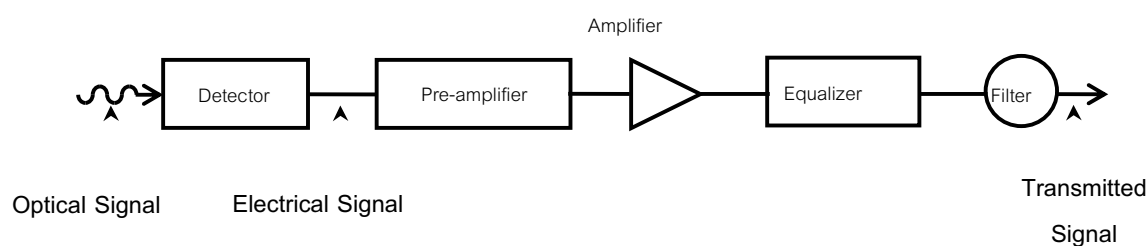
จากผลการวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่จะนำอุปกรณ์โครงสร้าง MSM ไปใช้งานในเชิงพาณิชย์ อย่างไรก็ตามผู้วิจัยจำนวนมากล้วนแต่มุ่งพัฒนาโครงสร้าง MSM เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานกับระบบการสื่อสารความเร็วสูง ในขณะที่การประยุกต์ใช้งานทางด้านอื่นๆ โครงสร้าง MSM สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ดีเช่นกัน ดังเช่น ใช้ในระบบเก็บข้อมูล หรือใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ไอริส (electronic iris) เป็นต้น ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะแสดงถึงคุณสมบัติที่สำคัญประการอื่นๆ ของโครงสร้าง MSM แทนที่จะเป็นคุณสมบัติทางด้านความเร็วเหมือนกับงานวิจัยทั่วไป ดังจะได้กล่าวต่อไป ซึ่งในปัจจุบันโครงสร้างเชิงราบแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (planar-metal-semiconductor-metal : MSM) ได้รับความนิยมนำไปใช้เป็นอย่างมากเพื่อใช้เป็นโครงสร้างตัวตรวจวัดทางแสง โดยมุ่งเน้นในการเพิ่มประสิทธิภาพของความเร็ว ความกว้างของแบนด์วิดท์ ในการตอบสนองสัญญาณไฟฟ้ากับความถี่ ซึ่งสามารถทำได้ถึง 110 GHz จากการสร้างอุปกรณ์ขึ้นงาน MSM ด้วยฐานรองซิลิคอน รวมทั้งจากแกเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) และ ซิลิคอนเจอร์มาเนียม (SiGe) ในส่วนของฐานรองประเภทนี้จะเป็นสารกึ่งตัวนำแบบ compound semiconductor ซึ่งมีราคาแพงอีกทั้งยังมีความเป็นพิษสูงในขั้นตอนการผลิต ส่วนฐานรองจากซิลิคอนนั้นเป็นแบบผลึกเดี่ยว single นั้นมีราคาไม่แพงและง่ายต่อการสร้าง

2.1 กระบวนการทำงานทางแสง

ในการทำงานของเครื่องรับสัญญาณแสงแบบเชิงเลข (digital op-tical receiver) แสดงให้เห็นส่วนของตัวตรวจวัดแสงที่อยู่หน้าสุดของเครื่องรับ จะเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า จากนั้นสัญญาณไฟฟ้าจะถูกขยายให้ใหญ่ขึ้น และสามารถเลือกสัญญาณในช่วงที่ต้องการจากส่วนของออสซิลเลเตอร์ และฟิลเตอร์ แล้วจึงนำสัญญาณไปประยุกต์ใช้งานต่อไป จากรูปที่ 2.1 นี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของตัวตรวจวัดแสง ซึ่งอาจถือได้ว่าเป็นหัวใจของเครื่องรับสัญญาณแสง

ตัวตรวจวัดแสงเป็นอุปกรณ์ทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่ดูดกลืนพลังงานแสง แล้วเปลี่ยนให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งปกติจะแสดงออกมาในรูปของกระแสแสง โดยทั่วไปกระบวนการตรวจวัดทางแสงจะมีอยู่ 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกเป็นขั้นตอนของการดูดกลืนพลังงานแสงหรือโฟตอนจากแสงที่ตกกระทบ แล้วทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (electron-hole pairs) ขึ้น ในขั้นตอนที่ 2 คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นดูดกลืนแสง ซึ่งในขั้นตอนนี้อาจเกิดกลไกการเพิ่มจำนวนของคู่อิเล็กตรอน-

โวลต์มากขึ้น (gain) หรือไม่มีการเพิ่มขึ้นของคู่อิเล็กตรอน-โฮลก็ได้ ในขั้นตอนที่ 3 คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นจะถูกรวบ รวมที่ขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ และเกิดเป็นกระแสไหลไปยังวงจรภายนอก ในบางครั้ง กระบวนการตรวจวัดทางแสงสามารถเพิ่มเติมส่วนของการแยกสัญญาณ (demodulation) เมื่อสัญญาณความถี่สูงทางแสงถูกเปลี่ยนกลับเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา



รูปที่ 2.1 แผนภาพการทำงานของเครื่องรับสัญญาณแสงแบบเชิงเลข

ในการเปลี่ยนแปลงสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนนั้นจะต้องสอดคล้องกับกฎของการอนุรักษ์โมเมนตัม กล่าวคือ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสถานะของพลังงานอิเล็กตรอน แต่ค่าโมเมนตัมของอิเล็กตรอนจะต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลง นั่นคือ ค่า k จะต้องไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำช่องแถบตรง ซึ่งอยู่ในแนวเดียวกันจึงเป็นการรักษาค่าของโมเมนตัมโดยปริยาย แต่การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรง ซึ่งมีจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าไม่ได้อยู่ในแนวเดียวกันกับจุดสูงสุดของแถบเวเลนซ์ จึงไม่มีสถานะพลังงานใดๆ ที่จะรองรับอิเล็กตรอนข้างบนในแนวตั้ง ดังนั้นอิเล็กตรอนจะกระโดดขึ้นไปสู่แถบนำไฟฟ้าได้ก็ต่อเมื่ออิเล็กตรอนกระโดดขึ้นไปแล้วมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนตัม โดยการมีอันตรกิริยากับโครงร่างผลึก ทำให้มีการรับหรือถ่ายเทโมเมนตัมกับโครงร่างผลึกที่กำลังสั่นอยู่นั่นเอง ในปรากฏการณ์นี้ค่าโมเมนตัมของระบบจะยังคงถูกรักษาให้คงที่ไว้ จึงทำให้การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรงเกิดขึ้นได้ ดังนั้นสารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรงจึงมีคุณสมบัติทางแสงไม่ค่อยดี เช่น การเปล่งแสงไม่ดี หรือดูดกลืนแสงได้น้อย จึงไม่เหมาะสมที่จะนำสารกึ่งตัวนำชนิดนี้มาผลิตเป็นไดโอดเปล่งแสงหรือเลเซอร์ไดโอด แต่ในกรณีของตัวตรวจวัดแสงหรือเซลล์แสงอาทิตย์นิยมใช้สารกึ่งตัวนำชนิดนี้กันมาก เพราะว่ามีราคาถูกและวัสดุมีจำนวนมาก โดยเฉพาะกับซิลิคอน

2.2 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ

2.2.1 กลไกการดูดกลืนแสงและเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล

การทำงานของอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์เกือบทุกชนิดอยู่บนพื้นฐานของการเกิดขึ้น หรือหายไปของคู่อิเล็กตรอน-โฮล กลไกการเกิดคู่อิเล็กตรอนจะนำไปสู่กระบวนการให้พลังงานแก่อิเล็กตรอนที่แถบ

เวเลนซ์แล้ว ทำให้อิเล็กตรอนจากแถบเวเลนซ์กระโดดไปสู่แถบนำไฟฟ้า ในขณะเดียวกันจะทิ้งโฮลไว้ในแถบเวเลนซ์ วิธีการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่ง่ายที่สุด คือ การแผ่รังสีให้แก่สารกึ่งตัวนำ ดังเช่น แสงหรือโฟตอนที่มีพลังงานมากพอ เมื่อตกกระทบสารกึ่งตัวนำแล้วจะถูกดูดกลืนเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ จากนั้นถ่ายเทพลังงานให้แก่อิเล็กตรอนจนสามารถกระโดดไปยังแถบนำไฟฟ้าได้ กระบวนการนี้จึงถูกเรียกว่ากระบวนการดูดกลืนแสง (absorption process) ในทางกลับกันถ้าอิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าเกิดการสูญเสียพลังงานไป แล้วตกกลับมาที่แถบเวเลนซ์ ทำให้อิเล็กตรอน-โฮลหายไป เรียกกระบวนการเช่นนี้ว่ากระบวนการรวมตัวใหม่ (recombination process)

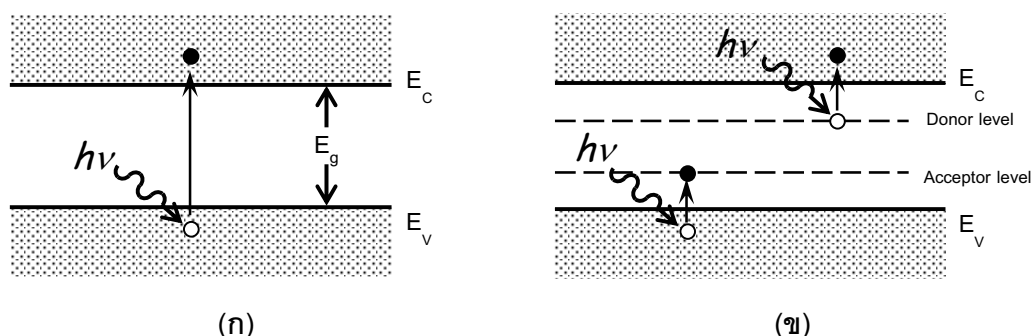
การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำมีอยู่หลายชนิด ซึ่งในที่นี้จะขอกล่าวเพียง 2 ชนิดหลักๆ ที่พบเห็นกันโดยทั่วไป คือ (1) การดูดกลืนแบบอินทรินซิกจากแถบถึงแถบ (intrinsic band to band absorption) และ (2) การดูดกลืนแบบแถบและระดับสารเจือ (band and impurity absorption) ดังมีรายละเอียดดังนี้

(1) การดูดกลืนแสงแบบอินทรินซิกจากแถบถึงแถบ ที่แสดงในรูปที่ 2.2(ก) เกิดขึ้นเมื่อพลังงานแสงมีค่ามากกว่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy band gap : E_g) ของสารกึ่งตัวนำ และแสงนี้สามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากแถบเวเลนซ์กระโดดไปยังแถบนำไฟฟ้า การดูดกลืนแสงแบบนี้จะพบเห็นกันมากในตัวตรวจวัดแสงเกือบทุกชนิด เนื่องจากพลังงานของโฟตอน $E = h\nu$ (ν คือ ความถี่ของแสง) ต้องมีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ซึ่งสามารถหาได้ในเทอมของ $h\nu \geq E_g$ หรือ $hc/\lambda \geq E_g$ และถ้าจัดให้อยู่ในรูปของความยาวคลื่นสูงสุด ($\lambda_{\max}$) ที่สามารถทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล จะได้เป็น

$$\lambda_{\max} = \frac{hc}{E_g} \quad (2.1)$$

โดยที่ h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (J.s)

c คือ ความเร็วแสง (m/s)



รูปที่ 2.2 กลไกการเกิดพาหะจากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ

(ก) การดูดกลืนแสงแบบอินทรีนซิคจากแถบถึงแถบ

(ข) การดูดกลืนแสงแบบแถบและระดับสารเจือ

ในกรณีของซิลิคอนแสงจะต้องมีพลังงานอย่างน้อยเท่ากับ 1.12 eV ดังนั้นจากสมการที่ (2.1) ความยาวคลื่นของแสงจะต้องมีค่าน้อยกว่า 1110 nm ดังในตารางที่ 2.1 และที่ความยาวคลื่นสูงสุดที่ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เรียกว่า ความยาวคลื่นคัทออฟ (long wavelength cutoff : $\lambda_{\max}$)

ตารางที่ 2.1 ความยาวคลื่นสูงสุดของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ

วัสดุ	ช่องว่างแถบพลังงาน (eV)	ความยาวคลื่นคัทออฟ (nm)	ความยาวคลื่นที่ใช้โดยทั่วไป (nm)
Si	1.12	1110	500 - 900
Ge	0.67	1850	900 - 1300
GaAs	1.43	870	750 - 850

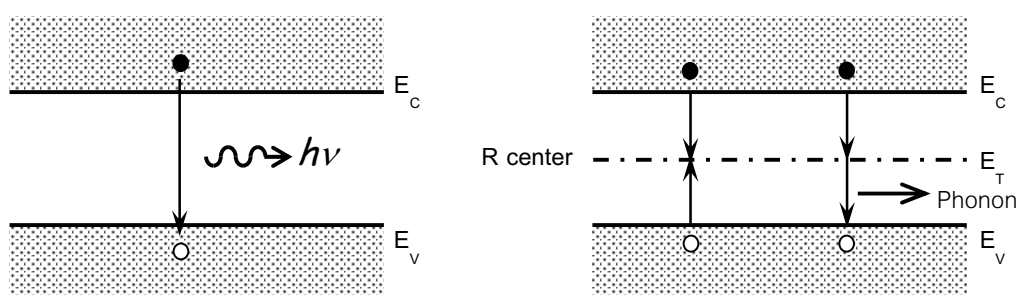
(2) การดูดกลืนแสงแบบแถบและระดับสารเจือ เกิดเนื่องจากมีระดับพลังงานอะตอมสารเจือเกิดขึ้นในช่องว่างแถบพลังงานอาจเกิดจากความบกพร่องของผลึก ที่เรียกว่า ระดับโลคไลส์เตต (localized state level) หรือตั้งใจแพร่สารเจือเข้าไป ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ข) จึงทำให้แสงที่ตกกระทบที่มีพลังงานน้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงาน แต่สามารถทำให้เกิดพาหะขึ้นได้ โดยพาหะที่เกิดขึ้นอาจเป็นอิเล็กตรอนจากชั้นระดับสารเจือผู้ให้ (donor level) ไปยังแถบนำไฟฟ้า หรือเกิดอิเล็กตรอนจากแถบเวเลนซ์ไปยังชั้นระดับสารเจือผู้รับ (acceptor level)

2.2.2 การรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล

เมื่อให้แสงตกกระทบที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ จะมีพาหะอิสระหรือคู่อิเล็กตรอน-โฮลเกิดขึ้น เนื่องจากกระบวนการดูดกลืนแสง ดังที่กล่าวมาแล้วนั้น ในเวลาเดียวกันกับที่เกิดพาหะอิสระขึ้นนั้นก็มี ปรากฏการณ์การรวมตัวใหม่ (Recombination) [39] ของอิเล็กตรอนกับโฮลเกิดขึ้นด้วย กล่าวคือ จะมีอิเล็กตรอนบางส่วนจากแถบนำไฟฟ้าลดระดับกลับลงไปรวมตัวกับโฮลที่แถบเวเลนซ์ ทำให้อิเล็กตรอนและโฮลมีจำนวนลดลง พลังงานของอิเล็กตรอนที่ลดลงหรือหายไป คือ พลังงานที่สูญเสียไป เนื่องจากการชนกับโครงร่างผลึก แต่ก็ยังเกิดพาหะส่วนเกิน (excess carriers : Δn และ Δp) ขึ้นด้วย และถ้าไม่แหล่งจ่ายแสงออกไป พาหะส่วนเกินจะรวมตัวกันจนหมดคงเหลือเฉพาะความเข้มข้นพาหะที่สภาวะสมดุลของอิเล็กตรอนและโฮลมีค่าเป็น n_0 และ p_0 [10] ตามลำดับ

ในหัวข้อนี้จะแนะนำกระบวนการรวมตัวใหม่ของพาหะส่วนเกินเพียง 2 กระบวนการหลัก คือ (1) กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยตรง (direct recombination process) หรือแบบแถบถึงแถบ (band to band recombination process) และ (2) กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยอ้อม (indirect recombination process) หรือแบบไม่เปล่งแสง (nonradiative recombination process) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

(1) กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยตรง คือ กระบวนการรวมตัวใหม่ที่เกิดขึ้นกับสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบตรง ซึ่งทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสงหรือโฟตอนได้ง่าย ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ก) อิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าจะลดระดับกลับลงไปรวมตัวกับโฮลในแถบเวเลนซ์โดยตรง



รูปที่ 2.3 กระบวนการรวมตัวใหม่ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำ

(ก) แบบโดยตรง (ข) แบบโดยอ้อม

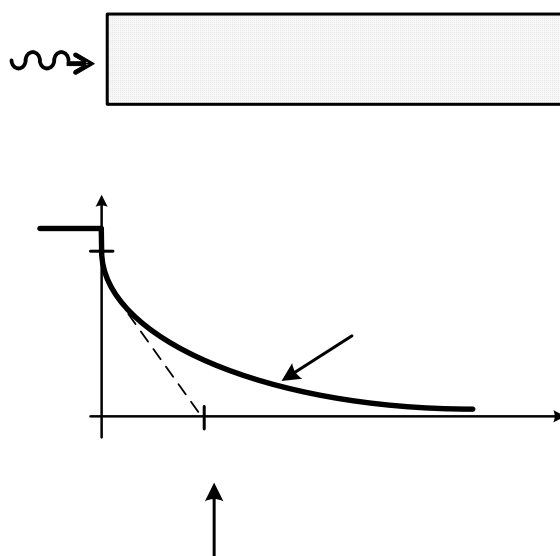
(2) กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยอ้อม คือ กระบวนการรวมตัวใหม่ที่เกิดขึ้นกับสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบไม่ตรง โดยอิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าลดระดับลงมายังระดับพลังงานหนึ่งที่อยู่ในช่องว่างแถบ พลังงานก่อนที่จะตกลงมายังแถบเวเลนซ์ในที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ข) ระดับพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานเป็นสถานะพลังงานที่สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงไม่สามารถมีได้ ดังนั้น

สถานะพลังงานเหล่านี้จึงเกิดขึ้นจากอะตอมสารเจือหรืออะตอมแปลกปลอมอื่นๆ หรืออาจเกิดจากความเสียหายของโครงร่างผลึก จึงเรียกรวมตัวใหม่แบบนี้เป็น ศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ของพาหะ ซึ่งในกระบวนการรวมตัวใหม่โดยอ้อมนี้จะมีการปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมาและมีผลทำให้เกิดการสั่นตัวของโครงร่างผลึกขึ้น และการสั่นตัวนี้จะปลดปล่อยพลังงานที่เรียกว่า โฟนอน (phonon) ออกมาในที่สุด

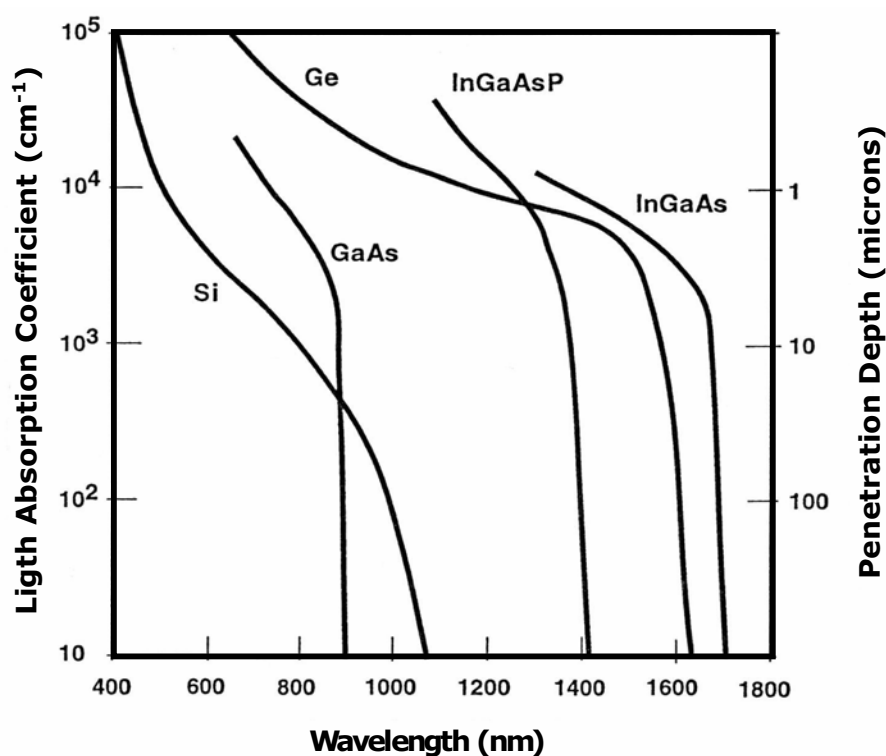
โดยทั่วไปแล้วสถานะพลังงานที่ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ (Recombination center : R-center) มักจะปรากฏอยู่ที่ระดับใกล้เคียงกับบริเวณกึ่งกลางของช่องว่างแถบพลังงาน ทั้งนี้เนื่องจากโอกาสของการรวมตัวใหม่จะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของช่องว่างพลังงานพอดี ซึ่งจะเห็นว่าแตกต่างจากระดับสารเจือผู้ให้และสารเจือผู้รับ โดยในทางปฏิบัติจะมีการเติมอะตอมของธาตุบางชนิดลงไปในสารกึ่งตัวนำ

2.2.3 ปรากฏการณ์การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ

เมื่อพิจารณาการดูดกลืนแสงจากผิวหน้าเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำ ถ้าพลังงานแสงตกกระทบมีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดพาหะขึ้น และพลังงานแสงนี้จะลดลงอย่างต่อเนื่องกับโครงร่างผลึกของสารกึ่งตัวนำในลักษณะของสนามแสง (optical field) ซึ่งเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งสนามนี้จะลดลงในลักษณะของเอกโปเนนเชียลในรูปของพลังงานที่ถูกส่งผ่านไปยังสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นการดูดกลืนของแสงที่ถูกส่งผ่านในเนื้อสารกึ่งตัวนำจะมีค่าลดลงกับระยะทาง ตามความสัมพันธ์ของสมการที่ (2.2) [11] คือ



รูปที่ 2.4 การดูดกลืนแสงภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.5 สเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ ที่ใช้สร้างเป็นตัวตรวจวัดแสง

$$P_{\text{abs}}(x) = P_{\text{inc}}(1 - R)(1 - e^{-\alpha x}) \quad (2.2)$$

โดยที่ $P_{\text{abs}}(x)$ คือ กำลังการดูดกลืนของแสงที่ขึ้นกับระยะทาง (x) ของสารกึ่งตัวนำ (W)

P_{inc} คือ กำลังของแสงตกกระทบ (W)

R คือ สภาพการสะท้อนแสงของสารกึ่งตัวนำ (reflectivity of semiconductor)

α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (light absorption coefficient) (cm^{-1})

สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของซิลิคอน เยอรมันเนียม และสารประกอบกลุ่ม III-V เช่น GaAs และ InGaAs เป็นต้น แสดงดังในรูปที่ 2.5 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงนี้เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่ง ในการพิจารณาเลือกวัสดุสารกึ่งตัวนำของตัวตรวจวัดแสง

2.3 คุณสมบัติสำคัญของตัวตรวจวัดแสง

เนื่องจากการนำเอาตัวตรวจวัดแสงหลายชนิดมาประยุกต์ใช้งาน ซึ่งตัวตรวจวัดแสงแต่ละแบบจะมีขีดความสามารถที่แตกต่างกันไป ขึ้นกับโครงสร้างและวัสดุที่นำมาใช้สร้างเป็นตัวตรวจวัดแสง อย่างไรก็ตามถ้าพิจารณาถึงคุณสมบัติหลักๆ ทัวไปของตัวตรวจวัดแสง เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง เปรียบเทียบหรือตัดสินใจนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างเหมาะสม คุณสมบัติหลักเหล่านี้ คือ

2.3.1 ประสิทธิภาพควอนตัม

ประสิทธิภาพควอนตัม (quantum efficiency : η) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างจำนวนของพาหะอิสระที่เกิดขึ้น (คู่อิเล็กตรอน-โฮล) และทำให้เกิดเป็นกระแสแสง¹ (I_p) กับจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ [10], [11], [40] นั่นคือ

$$\eta = \frac{I_p / q}{P_{inc} / h\nu} = \frac{I_p}{q} \cdot \frac{h\nu}{P_{inc}} \quad (2.3)$$

โดยที่ P_{inc} คือ กำลังงานของแสงที่ตกกระทบ (W)

q คือ ประจุอิเล็กตรอน (C)

ค่าของ η มีค่าระหว่าง $0 \leq \eta \leq 1$ สำหรับสมการที่ (2.3) ได้ถูกนิยามว่าเป็นประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก (external quantum efficiency : η_{ext}) ซึ่งประสิทธิภาพควอนตัมภายนอกจะขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ และความหนาของส่วนดูดกลืนแสง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และเป็นไปตามสมการที่ (2.4) คือ

$$\eta_{ext} = (1 - R)(1 - e^{-\alpha x}) \quad (2.4)$$

จากสมการที่ (2.4) แสดงให้เห็นว่า ถ้าประสิทธิภาพควอนตัมภายนอกมีค่าสูง การเกิดพาหะแสงจะมาก ซึ่งทำให้ตัวตรวจวัดแสงมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น โดยปกติแล้วจะมีค่าประมาณ 0.7-0.8 (หรือ $\approx 70-80\%$) เพราะว่าแสงส่วนหนึ่งจะถูกสะท้อนออกไป ส่วนประสิทธิภาพควอนตัมภายใน (internal quantum efficiency : η_{int}) คือ อัตราส่วนระหว่างจำนวนพาหะที่เกิดขึ้นกับจำนวนโฟตอนที่ถูกดูดกลืนภายในสารกึ่งตัวนำ โดยปกติจะมีค่าสูงมากจนอาจใกล้เคียงหนึ่ง

¹ กระแสแสง หมายถึง กระแสรวมที่วัดจากตัวตรวจวัดแสงลบด้วยกระแสมืด ($I_p = I - I_{dark}$)

2.3.2 สภาพการตอบสนอง

สภาพการตอบสนอง (responsivity ; $\mathfrak{R}$) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างกระแสแสงที่เกิดขึ้นกับกำลังของแสงที่ตกกระทบ [9], [10] นั่นคือ

$$\mathfrak{R} = \frac{I_p}{P_{inc}} = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta\lambda}{hc} \quad (2.5)$$

จากสมการที่ (2.5) พบว่า ค่าสภาพการตอบสนองจะแปรแบบเชิงเส้นกับความยาวคลื่นในช่วงการใช้งาน ซึ่งจะเป็นคุณสมบัติที่ดีของตัวตรวจวัดแสง

2.3.3 ความเร็วในการตอบสนอง

ความเร็วในการตอบสนอง หมายถึง ความเร็วในการทำงานของตัวตรวจวัดแสง ซึ่งเป็นเวลาที่นับตั้ง แต่การเกิดพาหะด้วยแสงจนกระทั่งมีกระแสไฟฟ้าเอาท์พุทไหลออกสู่วงจรภายนอก ตามปกตินิยมแสดงด้วยค่าช่วงเวลาขาขึ้น (t_r) และช่วงเวลาขาลง (t_f)

ช่วงเวลาขาขึ้นและช่วงเวลาขาลงจะมีค่ามาก หรือน้อยขึ้นกับแฟคเตอร์ของ

- (1) เวลาส่งผ่าน (transit time) ที่พาหะใช้ในการวิ่งผ่านชั้นบริเวณปลอดพาหะ
- (2) เวลาการแพร่ (diffusion time) ของพาหะที่เกิดขึ้นภายนอกบริเวณปลอดพาหะ
- (3) ค่าคงที่ของเวลา (time constant) เป็นผลคูณของค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดกับค่าโหลดความต้านทานภายนอก

ดังนั้นถ้าต้องการให้โฟโตไดโอดตอบสนองความถี่ที่ความเร็วสูงๆ จะต้องพิจารณาถึงแฟคเตอร์ทั้งสามประการนี้ด้วย ดังเช่น ควรออกแบบให้มีพื้นที่ขนาดเล็กๆ เพื่อลดผลของค่าความจุไฟฟ้า เป็นต้น

2.3.4 สัญญาณรบกวนแบบช็อต

ตัวตรวจวัดแสงจะมีความสามารถในการวัดแสงที่มีความเข้มต่ำมากๆ หรือมีความไว (sensitivity) สูงเพียงไรจะขึ้นกับขนาดของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น และสัญญาณรบกวนแบบช็อต (shot noise) ก็เป็นสัญญาณรบกวนชนิดหนึ่งที่มีผลอย่างมากกับตัวตรวจวัดแสง ซึ่งเกิดขึ้นจากกระแสมีดและกระแสแสง ในกรณีของโฟโตไดโอดที่ไม่มีอัตราขยายภายใน ค่าเฉลี่ยกำลังสองของกระแสของสัญญาณรบกวนแบบช็อตนี้ จะเป็นไปตามสมการที่ (2.6) คือ

$$\langle i_n^2 \rangle = 2q\bar{I}B = 2q(I_p + I_{dark})B \quad (2.6)$$

โดยที่ ϵ คือ ค่าเฉลี่ยของกระแสเอาท์พุท (A)

I_p คือ ค่าเฉลี่ยของกระแสแสง (A)

I_{dark} คือ ค่าเฉลี่ยของกระแสมืด (A)

B คือ แบนด์วิดท์ทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง (Hz)

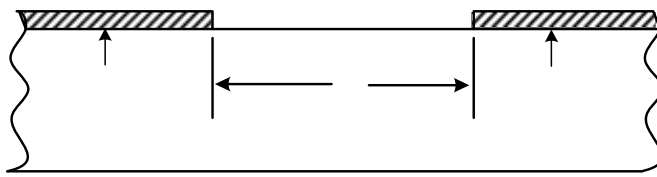
ดังนั้นตัวตรวจวัดแสงที่ดีควรมีสัญญาณรบกวนแบบช็อตให้ต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ นั่นคือ ควรจะสร้างตัวตรวจวัดแสงให้มีกระแสมืดต่ำๆ

2.4 ตัวตรวจวัดแสงแบบโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ หรือโครงสร้าง MSM เป็นอุปกรณ์ที่จัดอยู่ในกลุ่มของโลหะ-สารกึ่งตัวนำ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำมาใช้เป็นตัวตรวจวัดแสง ดังนั้นในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงโครงสร้างหลักการทำงาน และความสัมพันธ์ทางแสงที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้าง MSM ซึ่งสามารถนำทฤษฎีของช็อตกีแบร์เรียมาประยุกต์ใช้อธิบายกับโครงสร้าง MSM ได้ ดังมี รายละเอียดดังต่อไปนี้

2.4.1 โครงสร้างและหลักการทำงาน

ภาพภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM แบบพลาแนร์ ซึ่งมีขั้วไฟฟ้าอยู่ในระนาบเดียวกัน ที่แสดงในรูปที่ 2.6 (ก) ประกอบด้วยขั้วโลหะ 2 ขั้ว ที่สร้างขึ้นบนสารกึ่งตัวนำชนิด n และแยกออกจากกันด้วยระยะห่างขั้วไฟฟ้า (D) รอยสัมผัสของโลหะ-สารกึ่งตัวนำที่เกิดขึ้นจะแสดงคุณสมบัติของช็อตกีแบร์เรีย และเมื่อพิจารณาจากรอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำทั้งสองแล้ว จึงอาจกล่าวได้ว่า โครงสร้าง MSM เสมือนกับรอยสัมผัสแบบช็อตกีแบร์เรีย 2 รอยสัมผัส เชื่อมต่อแบบหันหลังชนกันและนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นตัวตรวจวัดแสงแล้ว ระยะห่าง D จะถูกกำหนดให้เป็นพื้นที่รับแสง ซึ่งไม่จำเป็นที่จะต้องสร้างขั้วโลหะให้มีความบางมากๆ เหมือนกับโลหะ-สารกึ่งตัวนำโฟโตไดโอด ส่วนในรูปที่ 2.6 (ข) เป็นสัญลักษณ์ทางวงจรที่ใช้แทนโครงสร้าง MSM



(ก)



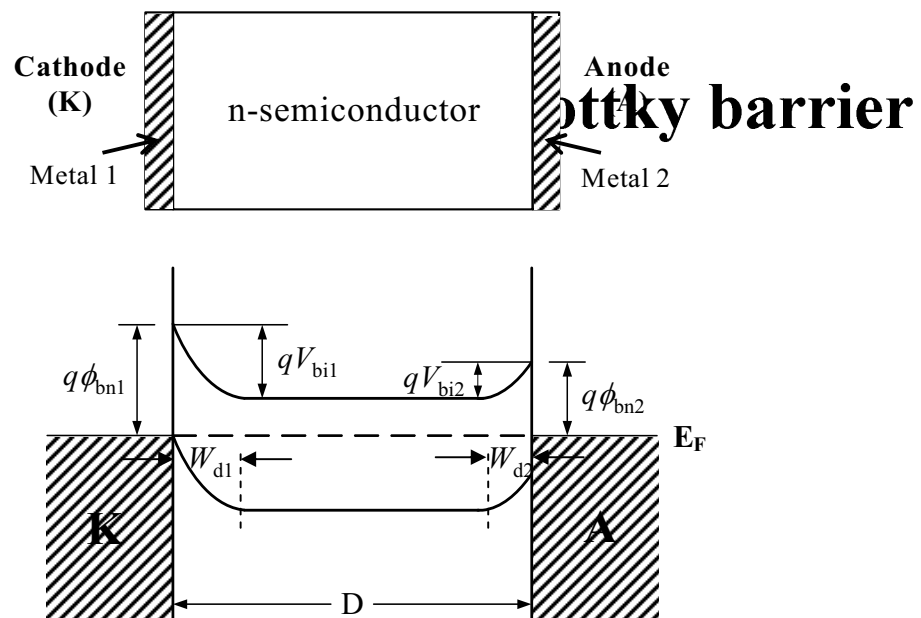
(ข)

รูปที่ 2.6 (ก) ภาพภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM ที่มีโครงสร้างเป็นลักษณะพลานาร์ ซึ่งมีความเหมาะสมที่นำมาประยุกต์ใช้สร้างร่วมกับวงจรรวมทางด้านออปโตอิเล็กทรอนิกส์

(ข) สัญลักษณ์ทางวงจรไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM

2.4.2 โครงสร้าง MSM ในภาวะสมดุล

ในรูปที่ 2.7 แสดงแผนภาพของโครงสร้าง MSM ในภาวะสมดุล โดยรูปที่ 2.7 (ก) เป็นรอยสัมผัสของข้อต่อกึ่งตัวนำ โดยรอยสัมผัสทางด้านซ้ายมือกำหนดให้เป็นขั้วคาโทด และรอยสัมผัสทางด้านขวามือให้เป็นขั้วแอโนด การแสดงโครงสร้าง MSM ในลักษณะนี้ เพื่อให้ง่ายในการอธิบายแผนภาพแถบพลังงาน ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.7 (ข)



รูปที่ 2.7 (ก) โครงสร้าง MSM ในภาวะสมดุล

(ข) แผนภาพแถบพลังงานในภาวะสมดุล เมื่อ ϕ_{bn1} และ ϕ_{bn2} คือ ความสูงของกำแพงศักย์ และ V_{bi1} และ V_{bi2} คือ แรงดันภายใน สำหรับรอยสัมผัสด้านคาโทด และด้านแอโนด ตามลำดับ

จากแผนภาพแถบพลังงานในภาวะสมดุล ที่แสดงในรูปที่ 2.7 (ข) เป็นกรณีที่ขั้วคาโทดและแอนโนดสร้างจากโลหะต่างชนิดกัน ซึ่งทำให้ $\phi_{bn1} \neq \phi_{bn2}$ และ $V_{bi1} \neq V_{bi2}$ แต่โดยทั่วไปแล้ว เพื่อลดจำนวนต้นแบบและขั้นตอนการสร้างลง ดังนั้นขั้วคาโทดและแอนโนดจะสร้างจากโลหะชนิดเดียวกัน จึงทำให้ $\phi_{bn1} = \phi_{bn2} = \phi_{bn}$ และ $V_{bi1} = V_{bi2} = V_{bi}$ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า โครงสร้าง MSM ที่สร้างจากโลหะชนิดเดียวกันนี้จะมีลักษณะเป็นแบบสมมาตร

ความกว้างบริเวณปลอดพาหะของขั้วคาโทด และแอนโนดในภาวะสมดุลจะมีขนาดเท่ากับ W_{d1} และ W_{d2} ตามลำดับ เมื่อให้ $V_A = 0$ และถ้าเป็นโลหะชนิดเดียวกันแล้ว $W_{d1} = W_{d2} = W_d$

2.4.3 โครงสร้าง MSM ในขณะที่ได้รับแรงดันไบแอส

โดยทั่วไปแล้วโครงสร้าง MSM มักจะสร้างให้ระยะห่าง D มีขนาดสั้นมากๆ เพื่อให้อุปกรณ์สามารถทำงานด้วยความเร็วสูง ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว อีกทั้งโครงสร้างยังมีลักษณะเป็นซ็อกเก็ตแบริเออร์ที่เชื่อมต่อแบบหันหลังชนกัน เมื่อให้แรงดันไบแอสแก่อุปกรณ์รอยสัมผัสด้านหนึ่งจะแสดงคุณสมบัติของการไบแอสตรงและรอยสัมผัสที่เหลือจะแสดงคุณสมบัติของไบแอสย้อนกลับ ในที่นี้จะให้แรงดันไบแอสบวกเข้าที่ขั้วแอนโนด และแรงดันไบแอสลบเข้าที่ขั้วคาโทด ดังนั้นที่ขั้วแอนโนดจะถูกต่อในลักษณะของไบแอสตรง ส่วนที่ขั้วคาโทดจะเป็นไบแอสย้อนกลับ ซึ่งสามารถแบ่งลักษณะการทำงานได้เป็น 3 ช่วง

ช่วงที่ 1 เป็นช่วงแรงดันต่ำ ($V \leq V_{RT}$) โดยให้แรงดันไบแอสมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ผลรวมของความกว้างบริเวณปลอดพาหะทั้งสองมีค่ากว้างขึ้น จนในที่สุดมาถึงที่แรงดันรีช-ทวร์ช (reach-through voltage : V_{RT}) บริเวณปลอดพาหะทั้งสองข้างจะสัมผัสซึ่งกันและกัน และผลรวมของความกว้างบริเวณปลอดพาหะจะมีค่าเท่ากับระยะห่าง D ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ก)

ช่วงที่ 2 เป็นช่วงแรงดันระหว่างแรงดันรีช-ทวร์ชถึงแรงดันแฟลต-แบนด์ ($V_{RT} < V \leq V_{FB}$) โดยให้แรงดันไบแอสเพิ่มขึ้นอีกจนทำให้สนามไฟฟ้า $x = D$ มีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งทำให้แถบพลังงานที่ $x = D$ แบนราบที่จุดนี้ คือ เงื่อนไขของแฟลต-แบนด์ ซึ่งสอดคล้องกับแรงดันแฟลต-แบนด์ (flat-band voltage : V_{FB}) แสดงในรูปที่ 2.8 (ข)

ช่วงที่ 3 เป็นช่วงแรงดันที่มากกว่า V_{FB} ($V > V_{FB}$) เมื่อให้แรงดันไบแอสมากกว่าแรงดันแฟลต-แบนด์พบว่า แถบพลังงานจะโค้งงอมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.8(ค)

2.4.4 การนำกระแสไฟฟ้าในโครงสร้าง MSM ในขณะที่ได้รับแรงดันไบแอส

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโครงสร้าง MSM จะถูกหาได้จากทฤษฎีของเทอร์โมอิเล็กทริคิมิสชันเหนือความสูงกำแพงศักย์ โดยถ้าแรงดันไบแอสมีค่าน้อยๆ พบว่ากระแสอิเล็กตรอนที่รอยสัมผัสที่ถูกไบแอสย้อนกลับ (ขั้วคาโทด) จะเป็นกลไกที่เด่นในการนำกระแสไฟฟ้า เมื่อให้แรงดันไบแอสมีค่ามากขึ้นกระแส

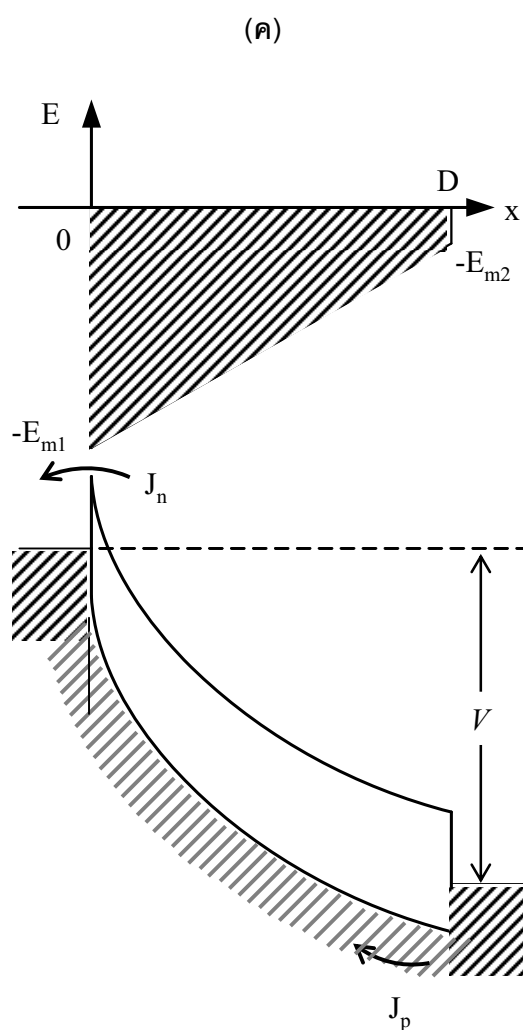
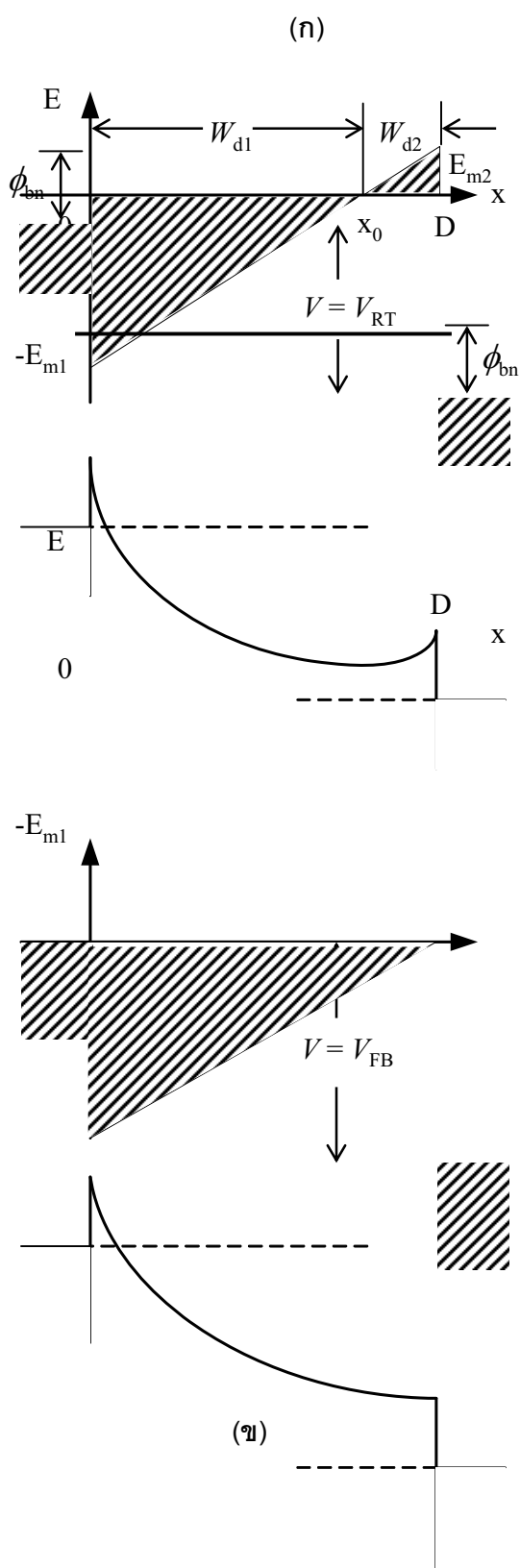
โพลีเมอร์จากรอยสัมผัสที่ถูกไบแอสตรง (ขั้วแอโนด) จะเริ่มนำกระแสได้มากขึ้น และเมื่อให้แรงดันไบแอสจนทำให้บริเวณปลอดพาหะทั้งสองด้านมาพบกัน ความหนาแน่นกระแสจะเกิดขึ้นจากกระแสอิเล็กตรอน (J_n) และกระแสโพลี (J_p) รวมกัน ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของสมการที่ (2.7) คือ

$$J = J_n + J_p = A_n^* T^2 e^{-q(\phi_{bn} - \Delta\phi_{bn})/k_B T} + A_p^* T^2 e^{-q(\phi_{bp} - \Delta\phi_{bp})/k_B T} \quad (3.9)$$

โดยที่ A_n^* และ A_p^* คือ ค่าคงที่รีดชาร์ดสันของอิเล็กตรอนและโพลีอิสระในซิลิคอนตามลำดับ [$A/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}^2)$]

ϕ_{bp} คือ ความสูงกำแพงศักย์ของโพลี โดยที่ $q\phi_{bp} = E_g - q\phi_{bn}$

$\Delta\phi_{bn}$ และ $\Delta\phi_{bp}$ คือ ซ็อตตีแบร์ริเออร์โลว์ริง (Schottky barrier lowering) ของความสูงกำแพงศักย์อิเล็กตรอนและโพลี ตามลำดับ เนื่องจากผลกระทบของแรงอิมเมจ (image force effect)



รูปที่ 2.8 (ก) เจ็อนไขของริช-ทูลูธิ์ ซึ่งบริเวณปลอดพาหะทั้งสงสัผัสซึ่งกันและกันและสอคล้องกับแรงดัน V_{RT} ที่เรียกว่าแรงดันริช-ทูลูธิ์

(ข) เจ็อนไขของแฟลต-แบนด์ ซึ่งแถบพลังงานที่ $x = D$ กลายเป็นแบนราบ และสอคล้องกับแรงดันแฟลต-แบนด์

(ค) เจ็อนไขที่ให้แรงดันมากกว่า V_{FB}

2.4.5 ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ ในขณะที่ได้รับแรงดันไบแอส

เมื่อให้แรงดันไบแอส ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะรวม (W_T) มีค่าเท่ากับความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่ขั้วคาโทด (W_{d1}) รวมกับความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่ขั้วแอโนด (W_{d2}) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 (ก) นั่นคือ

$$W_T = W_{d1} + W_{d2} \quad (2.8)$$

$$W_{d1} = \left[\frac{2\epsilon_s (V_{bi} - V_1)}{qN_d} \right]^{1/2} \quad (2.9)$$

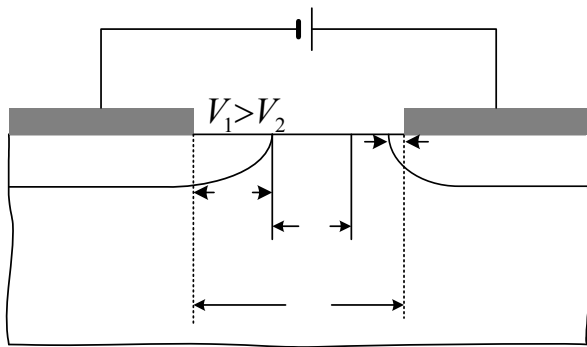
และ

$$W_{d2} = \left[\frac{2\epsilon_s (V_{bi} + V_2)}{qN_d} \right]^{1/2} \quad (2.10)$$

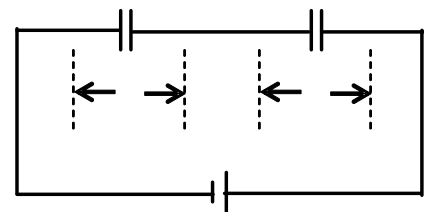
โดยที่ V_1 และ V_2 คือ แรงดันที่ตกคร่อมที่รอยสัมผัสของขั้วคาโทดและแอโนด ตามลำดับ (V)

2.4.6 ความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM ในขณะที่ได้รับแรงดันไบแอส

ความจุไฟฟ้าภายในโครงสร้าง MSM ในขณะที่ได้รับแรงดันไบแอสแสดงในรูปที่ 2.9 (ข) พบว่า จะมีตัวเก็บประจุไฟฟ้าแฝงในโครงสร้างสองตัวที่ต่ออนุกรมกัน ดังนั้นความจุไฟฟ้าแฝงรวม (C_T) จะมีค่าเป็น



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.9 (ก) โครงสร้าง MSM เมื่อให้แรงดันไบแอส V_A แล้วเกิดบริเวณปลอดพาหะ W_{d1} และ W_{d2}

(ข) บริเวณปลอดพาหะ W_{d1} และ W_{d2} แทนด้วยความจุไฟฟ้าแฝง C_{d1} และ C_{d2}

$$C_T = \frac{C_{d1} C_{d2}}{C_{d1} + C_{d2}} \quad (2.11)$$

โดยที่ C_{d1} คือ ความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสที่ขั้วคาโทด (F)

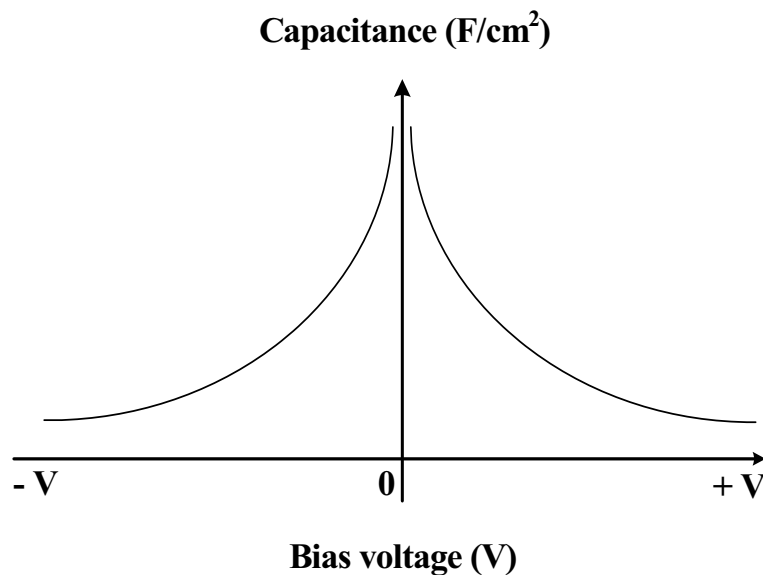
C_{d2} คือ ความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสที่ขั้วแอโนด (F)

$$C_{d1} = \sqrt{\frac{q \epsilon_s N_d}{2(V_{bi} - V_1)}} \quad \text{และ} \quad C_{d2} = \sqrt{\frac{q \epsilon_s N_d}{2(V_{bi} + V_2)}} \quad (2.12)$$

แทนค่า C_{d1} และ C_{d2} ลงในสมการที่ (3.13) ดังนั้นความจุไฟฟ้ารวม เท่ากับ

$$C_T = \sqrt{\left(\frac{q \epsilon_s N_d}{2}\right)} \left[\frac{1}{\sqrt{(V_{bi} - V_1)} + \sqrt{(V_{bi} + V_2)}} \right] \quad (2.13)$$

ในรูปที่ 2.10 เป็นลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดันของโครงสร้าง MSM ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความจุไฟฟ้าที่สมมาตรกันและมีค่าลดลง เมื่อให้แรงดันมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 2.10 ลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดันของโครงสร้าง MSM

2.4.7 โครงสร้าง MSM ภายใต้เงื่อนไขการให้แสงตกกระทบบ

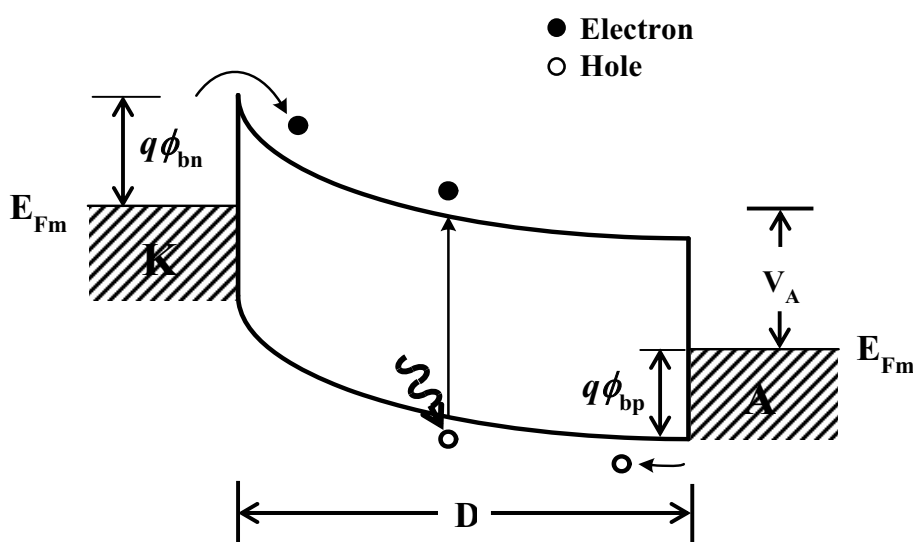
โครงสร้าง MSM สามารถนำมาใช้เป็นตัวตรวจวัดแสงได้เป็นอย่างดี ในทำนองเดียวกับ p-i-n โฟโตไดโอดหรือโฟโตไดโอดทั่วๆ ไป ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติทางแสงของโครงสร้าง MSM

จากรูปที่ 2.11 (ก) เมื่อโครงสร้าง MSM ได้รับแสงตกกระทบบ บริเวณที่รับแสงของอุปกรณ์จะอยู่ตรงพื้นที่ของระยะห่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง สำหรับในรูปที่ 2.11 แสดงแถบพลังงานของโครงสร้าง MSM ภายใต้การให้แรงดันไบแอส เมื่อให้แสงตกกระทบบจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น โดยที่อิเล็กตรอนจะมีทิศทาง การเคลื่อนที่จากขั้วคาโทดไปยังขั้วแอโนด ส่วนโฮลจะมีทิศทางการเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดไปยังขั้วคาโทด เนื่องจากผลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากแสงตกกระทบบ หรือ กระแสแสง (I_p) ของโครงสร้าง MSM จึงมีค่าเท่ากับ

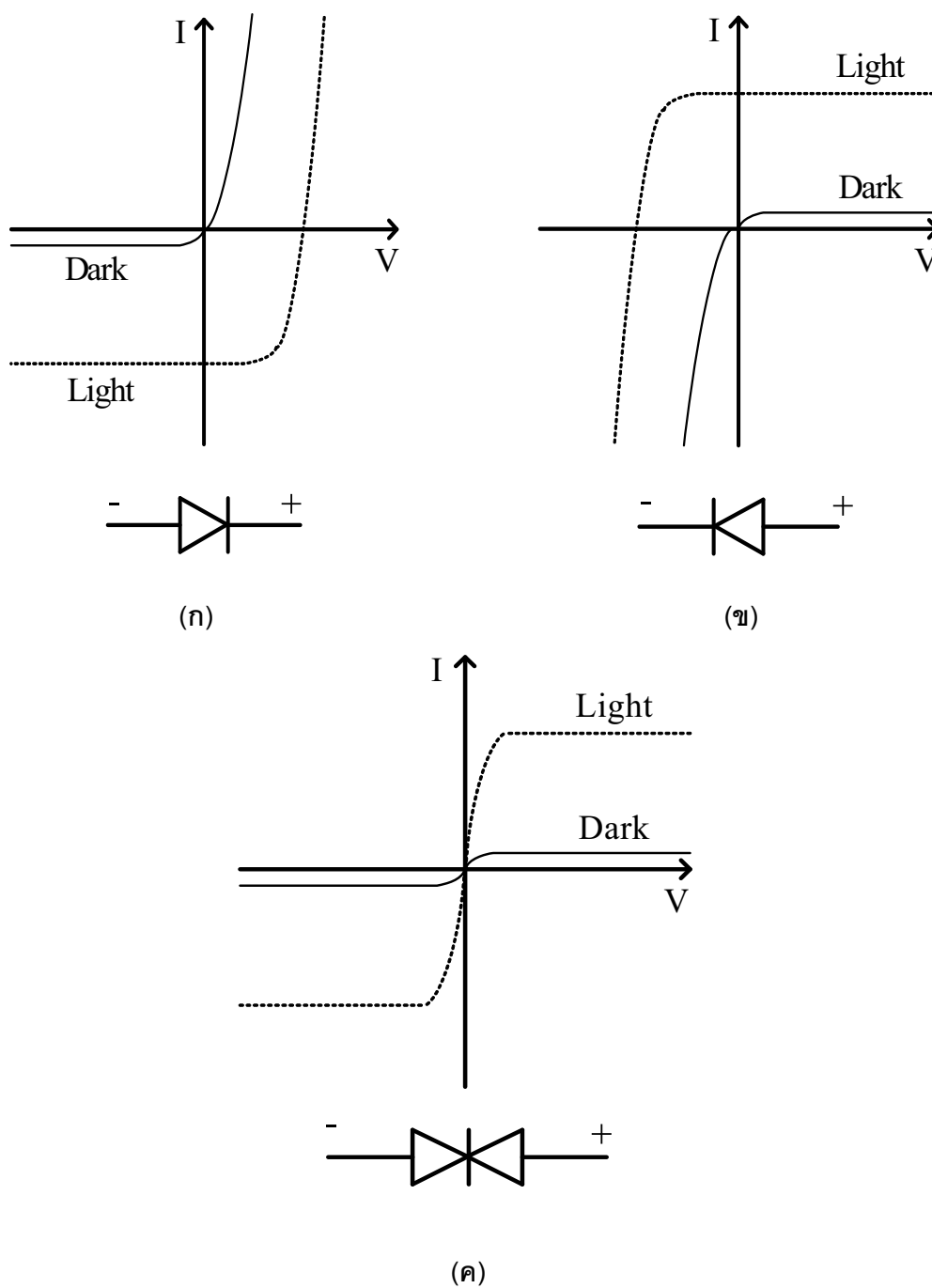
$$I_p = I - I_{\text{dark}} \quad (2.14)$$

โดยที่ I คือ กระแสไฟฟ้าที่วัดได้ทั้งหมด (A)

I_{dark} คือ กระแสมืด (A) มีค่าเท่ากับความหนาแน่นกระแสจากสมการที่ (3.9) คูณกับพื้นที่รอยสัมผัส



รูปที่ 2.11 แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM ที่ได้รับแรงดันไบแอสแล้วจะเกิดบริเวณปลอดพาหะคลุ่มตลอดระยะห่าง D และเมื่อให้แสงตกกระทบบแล้วจะเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ทำให้เกิดเป็นกระแสแสงไหลออกไปภายนอกตัวอุปกรณ์



รูปที่ 2.12 ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน เมื่อไม่ให้แสง และให้แสงตกกระทบบนของโครงสร้าง

(ก) โครงสร้างเหมือนโลหะ-สารกึ่งตัวนำโฟโตไดโอดตัวที่ 1

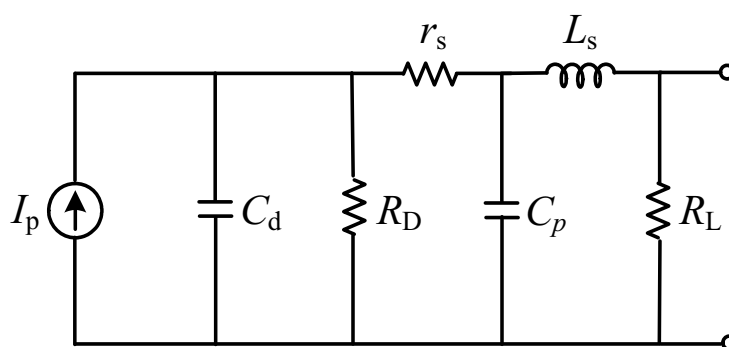
(ข) โครงสร้างเหมือนโลหะ-สารกึ่งตัวนำโฟโตไดโอดตัวที่ 2

(ค) โครงสร้าง MSM ที่รอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำทั้งสองเชื่อมต่อแบบหันหลังชนกัน

ในรูปที่ 2.12 แสดงลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันของโครงสร้าง MSM เมื่ออุปกรณ์ได้รับแสงแล้ว ทำให้ได้รับกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น รูปที่ 2.12 (ก) และ (ข) แสดงลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันของโลหะ-สารกึ่งตัวนำในแต่ละขั้วไฟฟ้าที่แยกออกจากกัน ซึ่งลักษณะเฉพาะที่แสดงเหมือนกับลักษณะเฉพาะของโฟโตไดโอดทั่วไปและเมื่อนำรอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำทั้งสองมาเชื่อมต่อแบบหันหลังชนกันในลักษณะของโครงสร้าง MSM จะได้ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันที่สมมาตรกันทั้งแรงดันไบแอสด้านบวก และลบ ดังในรูปที่ 2.12 (ค) ทำให้ง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน โดยเฉพาะเมื่อนำไปสร้างเป็นวงจรรวม

2.5 แบบจำลองทางแสงของโครงสร้าง MSM

การตอบสนองทางความถี่ และแบนด์วิธของตัวตรวจวัดแสงแบบโครงสร้าง MSM หาได้จากเวลาส่งผ่านของพาหะที่เกิดขึ้น เนื่องจากแสงและเวลาการเก็บประจุของตัวไดโอด วงจรสมมูลของตัวตรวจวัดแสงแบบโครงสร้าง MSM แสดงดังในรูปที่ 3.14



รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลของตัวตรวจวัดแสงแบบโครงสร้าง MSM ภายใต้การให้แสงตกกระทบบ

จากรูปที่ 2.13 C_d คือ ความจุไฟฟ้าของบริเวณปลอดพาหะ ในกรณีนี้ระยะห่าง D จะมีขนาดแคบๆ ทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายคลุมระยะห่าง D ทั้งหมด ทำให้ C_d จะมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง สำหรับ C_p คือ ความจุไฟฟ้าของแผ่นเชื่อมต่อขา โดยทั่วไปทั้ง C_d และ C_p มักจะมีค่าน้อยกว่า 0.1 pF ส่วน r_s , R_D , R_L และ L_s คือ ความต้านทานอนุกรม, ความต้านทานไดโอด, โหลดความต้านทาน และ ความเหนี่ยวนำของลวดเชื่อมต่อขา ตามลำดับ เมื่อใช้วงจรสมมูลนี้ หาค่าแบนด์วิธของตัวตรวจวัดแสงแบบโครงสร้าง MSM ที่มีลวดลายแบบอินเตอร์ดิจิตัล ซึ่งมีระยะห่างของขั้วไฟฟ้าน้อยกว่า 1 μm พบว่าแบนด์วิธจะมีค่าประมาณ 20-50 GHz [10]

บทที่ 3

ตัวตรวจวัดแสงแบบใหม่โครงสร้างเชิงราบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

ในการศึกษางานวิจัยครั้งนี้เพื่อนำเสนอผลของกระแสแสงจากภายในตัวรับรู้ทางแสงที่มีรอยต่อแบบข้อต่อคีย์ ในบริเวณรอยต่อของเขตปลอดพาหะอันเนื่องมาจากแรงดันย้อนกลับ โดยการใช้ ตัวตรวจจับทางแสงที่เป็นโครงสร้างอย่างง่ายเชิงราบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ของโครงสร้าง Mo/n-Si/Mo ที่มีความกว้างระหว่างขั้วไฟฟ้าแคบมากที่อยู่ในระดับ 2-2000 ไมโครเมตร โดยมีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) อยู่ภายใต้ความเข้มแสงการพิจารณาถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากกระแสแสง แบบกระแสตรง (DC photocurrent) ที่ภายใต้แรงดันก่อนการพังทลายจะพบว่าบริเวณปลอดพาหะนั้นได้ขยายออกจากขั้วไฟฟ้าด้านคาโทดจนถึงขั้วไฟฟ้าด้านแอโนดซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากสองกลไกด้วยกันคือ การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ที่บริเวณปลอดพาหะ และผลอันเนื่องจากการที่ประจุพาหะข้ามกำแพงศักย์ข้อต่อคีย์ได้อย่างรวดเร็ว

3.1 หลักพื้นฐานการทำงานของตัวตรวจจับทางแสงโครงสร้างเชิงราบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

โครงสร้างเชิงราบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ มักจะสร้างให้ระยะห่างระหว่างโลหะ D มีขนาดสั้นมากเพื่อให้สามารถทำงานด้วยความเร็วสูง โดยที่ขั้วโลหะที่ได้รับแรงดันไบแอสตรง (Forward) เข้าที่ขั้วแอโนด และแรงดันไบแอสย้อนกลับ (Reverse) เข้าที่ขั้วคาโทด ดังนั้นจะเกิดบริเวณปลอดพาหะ (depletion region) และบริเวณเนื้อสารชนิดอน (neutral region) เมื่อมีแสงตกกระทบบนที่บริเวณรับแสง (active area) จะเกิดกระแสสองส่วนประกอบกัน คือกระแสกระแสแสงจากส่วนของบริเวณปลอดพาหะ (depletion region) ซึ่งเหมือนกับกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบโฟโตไดโอดทั่วไป โดยมีสนามไฟฟ้าช่วยในการเคลื่อนที่ของพาหะแสง (photocarriers) เรียกกระแสแสงนี้ว่า กระแสแสงโฟโตไดโอด และกระแสแสงส่วนที่เกิดในบริเวณเนื้อสารชนิดอน (neutral region) ซึ่งอยู่นอกสนามไฟฟ้ามีการเคลื่อนที่คล้ายคลึงกับกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบโฟโตคอนดักเตอร์โดยเกิดไม่ไกลจากขอบของส่วนปลอดพาหะมากนัก ซึ่งจะอยู่ในระยะการแพร่ (diffusion length) ของประจุพาหะ โฮล (Hole) ส่วนประจุพาหะโฮลที่เกิดนอกระยะการแพร่จะเกิดการรวมตัวจนหมด (recombination) และไม่มีผลต่อกระแสแสงรวมดังนั้นกระแสแสงที่อยู่ในระยะการแพร่นี้เรียกว่ากระแสแสงโฟโตคอนดักเตอร์ ดังนั้นกระแสแสงรวมของตัวตรวจวัดประกอบด้วยกระแสสองส่วนคือ กระแสโฟโตไดโอด (I_d) และกระแสแสงโฟโตคอนดักเตอร์ (I_p) ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

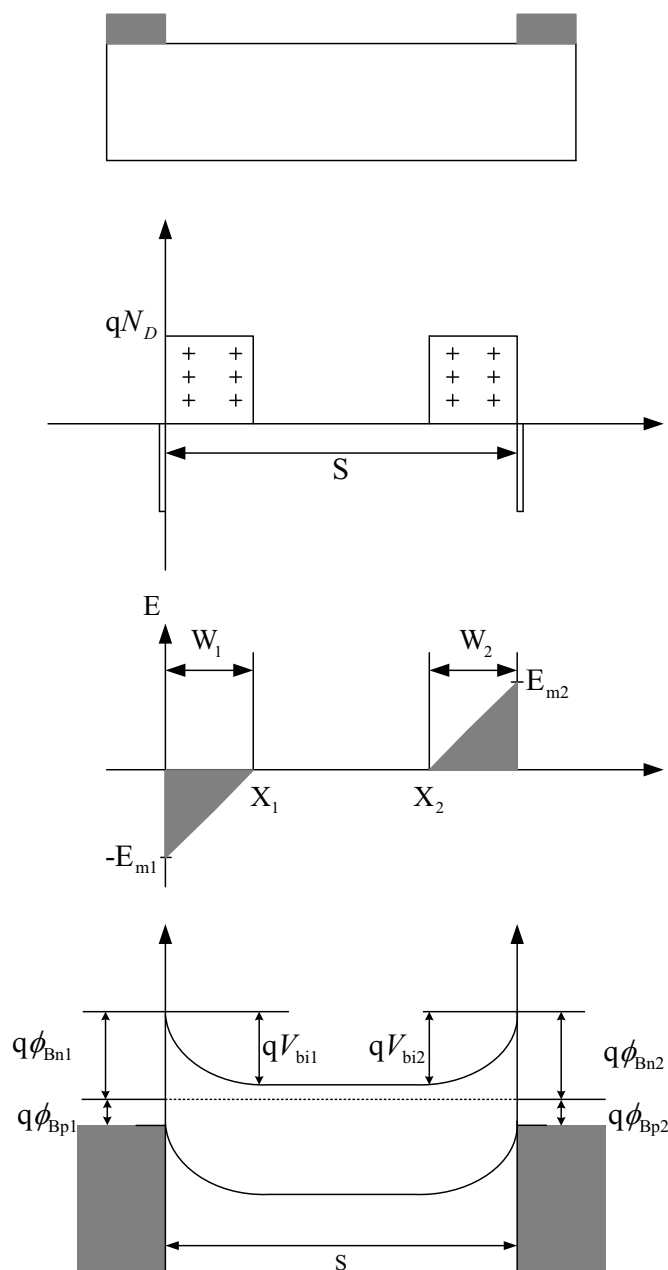
$$I_p = I_d + I_c \quad (3.1)$$

ดังนั้นการพิจารณากระแสสองส่วนนี้จะเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งต่อการควบคุมปริมาณกระแสแสง และการตอบสนองสัญญาณทางไฟฟ้าจากตัวตรวจวัดที่สร้างขึ้นมาต่อการวิจัยครั้งนี้

นอกจากนี้แล้วการกระจายของประจุที่สถานะสมดุลย์ของโครงสร้าง MSM นี้ที่มีฐานรองเป็นซิลิคอนแบบ n-type จะมีความหนาแน่นประจุพาหะ N_D ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า นั่นคือความสูงของกำแพงศักย์อิเล็กตรอน ϕ_{Bn1} , ϕ_{Bn2} และความสูงกำแพงศักย์ของโฮล ϕ_{Bp1} , ϕ_{Bp2} และวงดันขีดเริ่ม V_{bi1} , V_{bi2} ที่รอยต่อระหว่างขั้วไฟฟ้ากับซิลิคอน ดังนั้นจึงเกิดระยะของบริเวณชั้นปลอดพาหะ depletion layer $W_{1,2}$ ดังสมการความสัมพันธ์นี้

$$W_{1,2} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s V_{bi1}, V_{bi2}}{qN_D}} \quad (3.2)$$

โดยที่ $\epsilon_s = \epsilon_r \epsilon_0$ คือค่าไดอิเล็กตริกของซิลิคอน โดยในสภาวะสมดุลย์โครงสร้าง MSM-PD นั้นจะมีค่า $\phi_{Bn1} = \phi_{Bn2} = \phi_{Bn}$ และ $q(\phi_{Bn1} + \phi_{Bn2}) = E_g$ โดยที่ E_g นั้นเป็นค่าของแถบพลังงานของซิลิคอน



รูปที่ 4.1 (ก) แสดงโครงสร้างเชิงราบของ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

(ข) ความหนาแน่นประจุ(ค) สนามไฟฟ้า (ง)แสดงแถบพลังงานที่สภาวะสมดุล

3.2 สนามไฟฟ้า และความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่ได้รับแรงดันไบแอส

จากรูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นถึงการกระจายของประจุไฟฟ้า สนามไฟฟ้า และแถบพลังงานในโครงสร้างของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก MSM ที่ได้รับแรงดันไบแอส โดยที่ตรงรอยสัมผัสที่ 1 นั้นได้รับแรงดันไบแอสย้อนกลับซึ่งเรียกว่าขั้วคาโทด และที่รอยสัมผัสที่ 2 นั้นจะได้รับแรงดันไบแอสตรง โดยที่มี

พลังงานศักย์ qV_1 และ qV_2 ซึ่งทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มินั้นมีความแตกต่างกันที่รอยสัมผัสที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้ทำให้แรงดันไบแอส $V = V_1 + V_2$ นั้นได้ถูกแบ่งอยู่ระหว่างรอยสัมผัสทั้งสองเป็นแรงดันไบแอส V_1 และ V_2 ที่เป็นแรงดันไบแอสย้อนกลับ และแรงดันไบแอสตรง ดังนั้นสนามไฟฟ้าจึงปรากฏที่ระหว่างรอยสัมผัสด้านคาโทด E_m ซึ่งสามารถกำหนดได้โดย

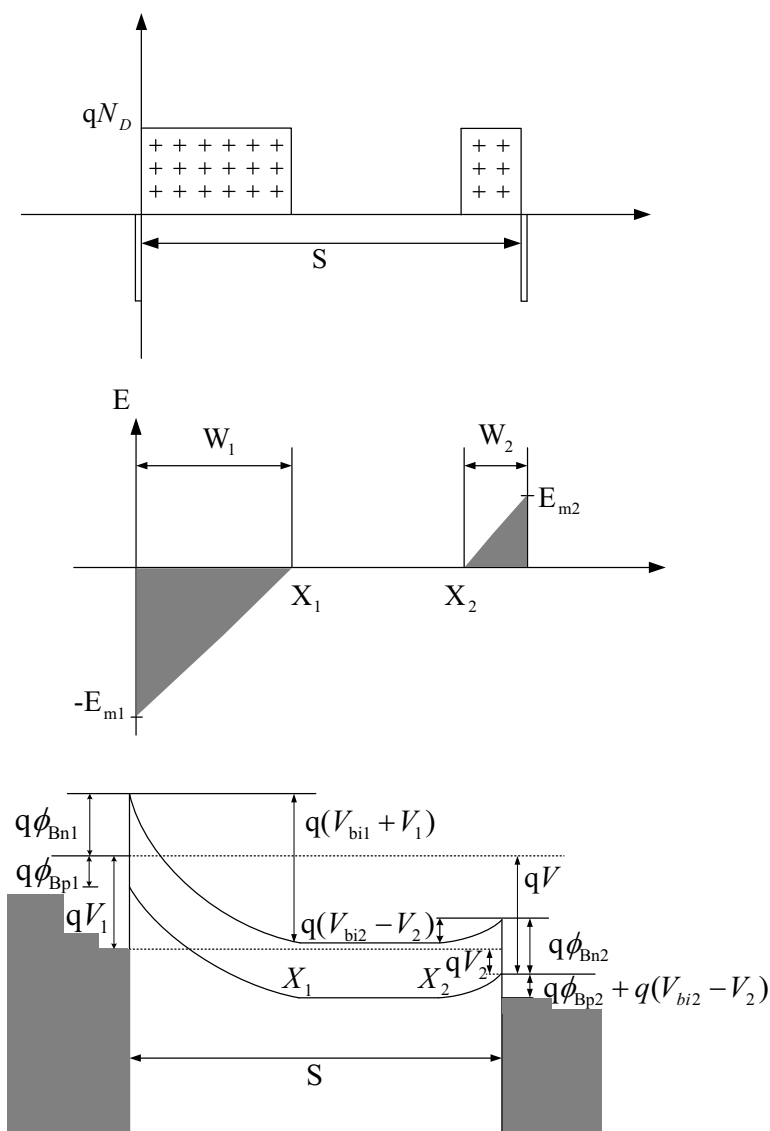
$$E_m = \sqrt{\frac{2qN_D}{\epsilon_s}(V_{bi} + V)} \quad (3.3)$$

ในรูปที่ 3.3 (b) จะพบว่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ W_1 และ W_2 เป็นความกว้างที่ด้านคาโทด และ อาโนด ดังนั้นในลักษณะของโครงสร้างเชิงราบตัวตรวจจับทางแสง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ จะมีแรงดันขีดเริ่มที่เท่าเทียมกัน $V_{bi1} = V_{bi2} = V_{bi}$, แสดงได้ด้วยความสัมพันธ์นี้

$$W_1 = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D}(V_{bi} + V_1)} \quad : \text{ cathode side} \quad (3.4)$$

$$W_2 = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D}(V_{bi} - V_2)} \quad : \text{ anode side} \quad (3.5)$$

ที่ขั้วอาโนดนั้นได้รับแรงดันตรงดังนั้นความสูงของกำแพงศักย์ซื้อตคียจะลดลงจาก V_{bi2} ไปยัง $V_{bi2} - V_2$ ดังนั้นอิเล็กตรอนที่ขึ้นการนำนั้นสามารถก่อให้เกิดการศักย์พลังงานที่ต่ำมาก จากผลของการให้แรงดันไบแอสย้อนกลับจะพบว่าความสูงกำแพงศักย์จะเพิ่มขึ้นเป็น $V_{bi1} + V_1$ และอิเล็กตรอนก็จะไหลจากทางด้านโลหะไปยังส่วนของสารกึ่งตัวนำอันเนื่องจากผลของการโค้งงอของแถบพลังงานที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.2 แสดงโครงสร้างเชิงราบของ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะภายใต้แรงดันไฟฟ้า

(ก) ความหนาแน่นประจุ (ข) สนามไฟฟ้า (ค) แสดงแถบพลังงานที่สภาวะแรงดันย้อนกลับที่ขั้วไฟฟ้าที่ 1 และแรงดันตรงที่ขั้วไฟฟ้าที่ 2

โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับการไบแอสดังรูปที่ 4.2 จะพบว่าบริเวณปลอดพาหะของรอยสัมผัสแบบซีดตีย์แบริเออร์ทางด้านคาโทด $W_1(V)$ มีขนาดกว้างขึ้น ในขณะที่บริเวณปลอดพาหะด้านแอโนด $W_2(V)$ มีขนาดลดลง ซึ่งรอยสัมผัสด้านไบแอสย้อนกลับนี้จะมีค่ากำแพงศักย์เพิ่มขึ้นเท่ากับ $V_{bi} + V_1$ ดังนั้นอิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำจะไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะได้ จะมีเพียงอิเล็กตรอนทางด้านโลหะที่เคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ $[I_{sm}]$ ส่วนทางด้านที่ได้รับการไบแอสตรงจะมีค่ากำแพงศักย์ลดลง

เท่ากับ $V_{bi} - V_1$ ดังนั้นอิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำจึงเคลื่อนที่ข้าม[4] รอยสัมผัสไปด้านโลหะได้ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลจากโลหะไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ $[I_{ms}]$ กระแสไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสทางด้านคาโทดนี้จะเป็นกระแสรั่วหรือกระแสมืด (Dark current)

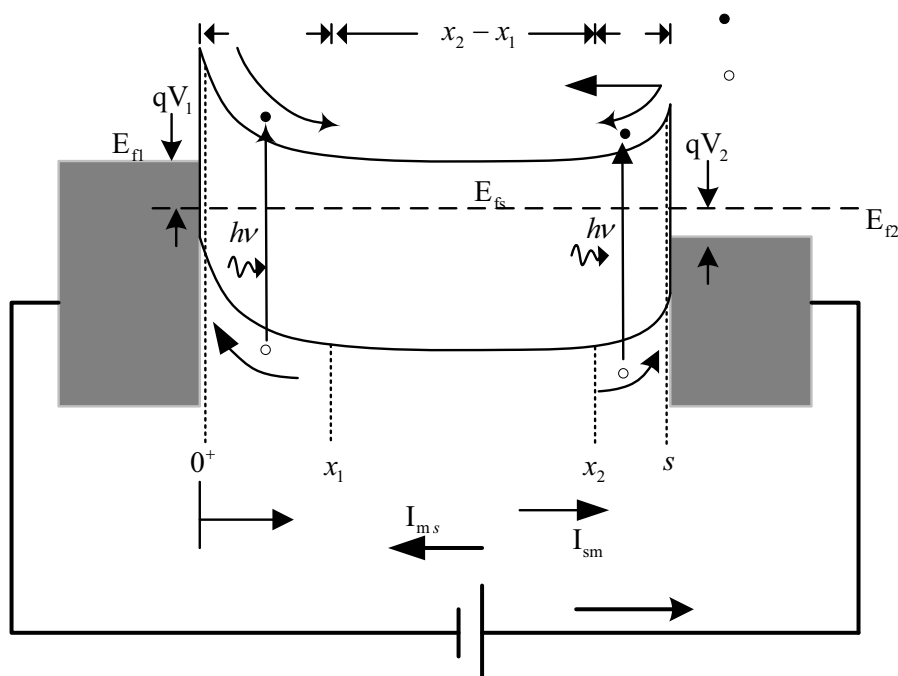
3.3 โครงสร้างเชิงราบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะภายใต้แสงตกกระทบ

เมื่อโครงสร้าง MSM ได้รับแสงตกกระทบทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล โดยที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าไปยังด้านแอนโนด ส่วนโฮลจะเคลื่อนที่ไหลในทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้าไปยังด้านคาโทดดังในรูปที่ 3.3 ส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลออกไปภายนอกเป็นกระแสแสง $[I_p]$ แสดงได้ดังสมการ [3]

$$I_p = I_{Light} - I_{dark} \quad (3.6)$$

โดยที่ I_{Light} คือกระแสที่แสงตกกระทบพื้นที่ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง

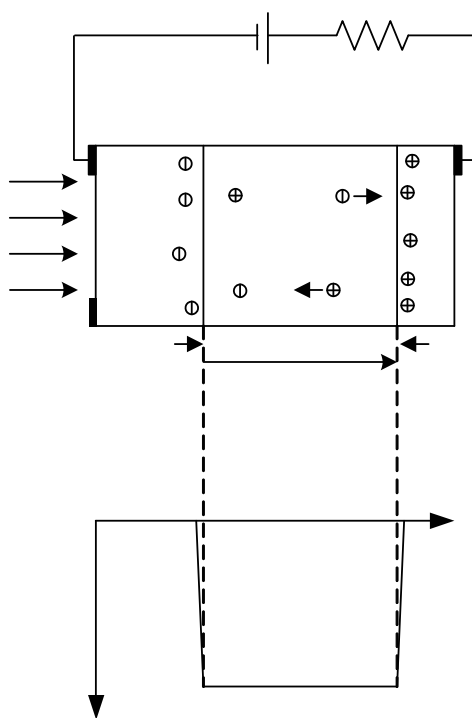
และ I_{dark} คือกระแสรั่ว หรือกระแสมืดของ MSM



รูปที่ 3.3 โครงสร้างและแถบพลังงานของ MSM photodiodes ที่มีความกว้างของขั้วไฟฟ้าแคบมากภายใต้แรงดันไบแอส และความเข้มแสง

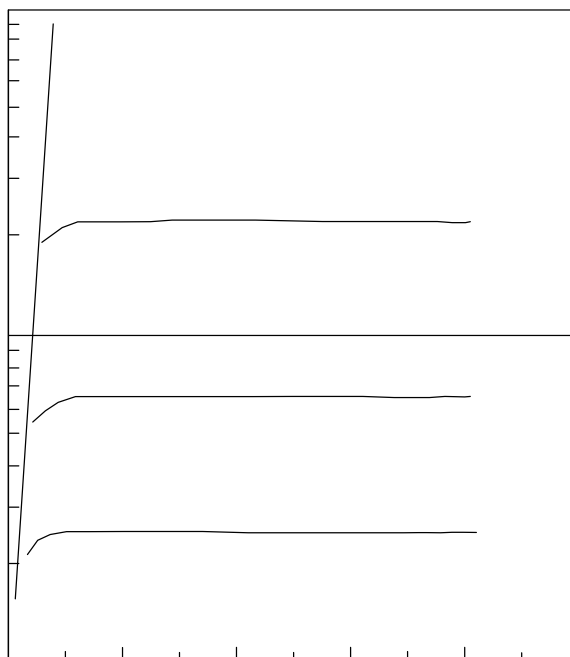
3.4 โครงสร้างเชิงราบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะที่มีความกว้างระหว่างขั้วไฟฟ้ากว้างมาก

จากการพิจารณาถึงตัวตรวจจับทางแสงแบบสารกึ่งตัวนำ สามารถที่จะทำการตรวจจับแลกเปลี่ยนแปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าทั้งกระแสตรง และกระแสสลับ โดยที่กระบวนการแปรเปลี่ยนสัญญาณนั้นจะเกิดจากภายในส่วนของ Space-Charge-Region (SCR) ดังรูปที่ 3.3 เมื่อได้รับการให้แรงดันไบแอสย้อนกลับตัวตรวจจับนี้จะพบว่ากระแสแสงจะเพิ่มขึ้นกับความเข้มแสงที่ตกกระทบบนพื้นที่รับแสงของตัวตรวจจับเท่านั้นตัวอย่างเช่นตัวตรวจจับแบบ pin โดยเมื่อตัวตรวจจับทางแสงโดยทั่วไปจะมีโครงสร้างแนวตั้งดังในรูปที่ 3.4 เมื่อได้รับการไบแอสย้อนกลับส่วนของ บริเวณปลอดพาหะ จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงกับแรงดันที่จ่ายให้ และสนามไฟฟ้าภายในบริเวณปลอดพาหะก็ยังคงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.4 (a) แสดงโครงสร้างของตัวตรวจจับทางแสงของ pin photodiode (b) การกระจายของสนามไฟฟ้า

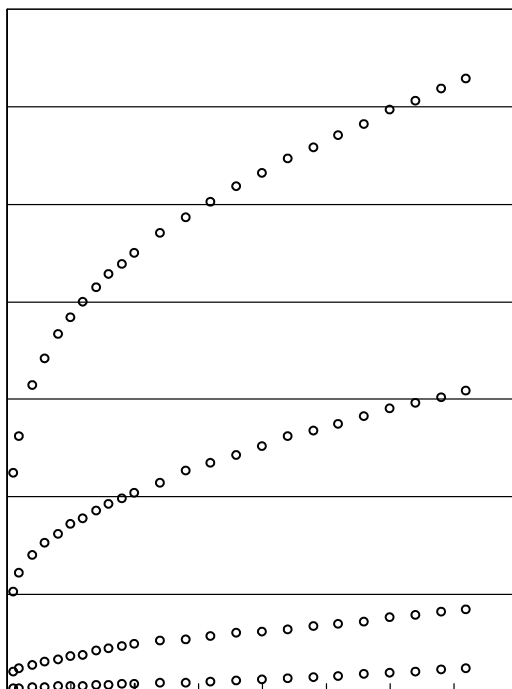
เมื่อพิจารณาจากสมบัติกระแสกับแรงดันของตัวตรวจจับทางแสงที่มีอยู่ทั่วไป พบว่าภายใต้การให้แรงดันย้อนกลับกระแสที่เพิ่มขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับความเข้มแสงเท่านั้น และไม่สามารถควบคุมด้วยแรงดันไบแอสเนื่องจากการที่ตัวตรวจจับประเภทนี้มีคุณสมบัติการอิ่มตัว ในทางกลับกันการให้แรงดันด้านตรงนั้นจะทำให้กระแสมีการเปลี่ยนแปลงกับแรงดันไบแอสดังในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 สมบัติกระแสกับแรงดันของตัวตรวจจับทางแสงภายใต้ด้านที่บดแสง และที่ความเข้มแสงต่างๆ

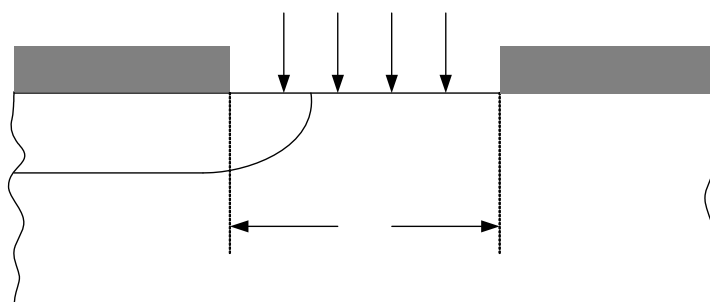
เพื่อต้องการให้กระแสให้ได้รับปริมาณกระแสแสงอย่างมีประสิทธิภาพในโครงสร้างเชิงราบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ นั้นจำเป็นที่จะต้องออกแบบให้มีพื้นที่รับแสงมากและถ้าต้องการให้มีการตอบสนองต่อสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องออกแบบให้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้านั้นแคบมาก เพื่อให้จะให้บริเวณปลอดพาหะ นั้นขยายออกไปจนถึงขั้วอิเล็กโทรดอีกด้านเพื่อเป็นการลดระยะเวลาของการเคลื่อนที่ของประจุพาหะ ดังนั้นระยะห่างของ SCR จึงเป็นส่วนสำคัญในการควบคุมปริมาณกระแสแสงอีกทั้งยังสามารถเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของแรงดันไบแอสและการเพิ่มขึ้นของความเข้มแสงดังในรูปที่ 3.6

Current [Arb.unit]



รูปที่ 3.6 สมบัติของกระแส กับแรงดันภายใต้ความเข้มแสงต่างๆที่มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด $100\ \mu\text{m}$

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างได้ง่ายโดยเป็นการสร้างฟิล์มโลหะเพียงชั้นเดียวเท่านั้นบนสารกึ่งตัวนำดังแสดงดังรูปที่ 3.7 ซึ่งแสดงโครงสร้างภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM โดยที่ผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับ สารกึ่งตัวนำทั้งสองข้างจะแสดงคุณสมบัติของข้อต่อคิย์แบร์ริเออร์ (Schottky barrier) 2 รอยสัมผัส โดยที่มีระยะห่างระหว่างขั้วโลหะ D ซึ่งเป็นพื้นที่รับแสง ในการประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดแสง ซึ่งเมื่อการสร้างขั้วโลหะสามารถที่จะสร้างให้มีความหนาแน่นมากได้ ซึ่งต่างกับโลหะ-สารกึ่งตัวนำ โฟโตไดโอด (Schottky photodiode) ที่ต้องสร้างให้มีความบางมากๆ



รูปที่ 3.7 ภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM ที่มีโครงสร้างเป็นแบบเชิงราบ (planar)

Current [μA]

3.5 การเตรียมชิ้นงานและการทดลอง

โครงสร้าง MSM แบบพลาสมาสามารถสร้างได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อเด่นประการหนึ่ง ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว โดยใช้กระจกต้นแบบเพียง 1-2 แผ่นเท่านั้น ลวดลายต้นแบบที่ใช้อาจเป็นแบบช่องเดี่ยว (single slit) ซึ่งเป็นแบบที่ง่ายที่สุด หรือแบบอินเตอร์ดิจิต (interdigitated) ที่นิยมใช้สร้างกันอย่างแพร่หลาย นอกจากนี้กระบวนการสร้างไม่ยุ่งยากซับซ้อนและสอดคล้องกับกระบวนการสร้างเฟท จึงได้รับความสนใจนำไปสร้างเป็นวงจรรวมที่ใช้ง่ายและขยายสัญญาณแสง

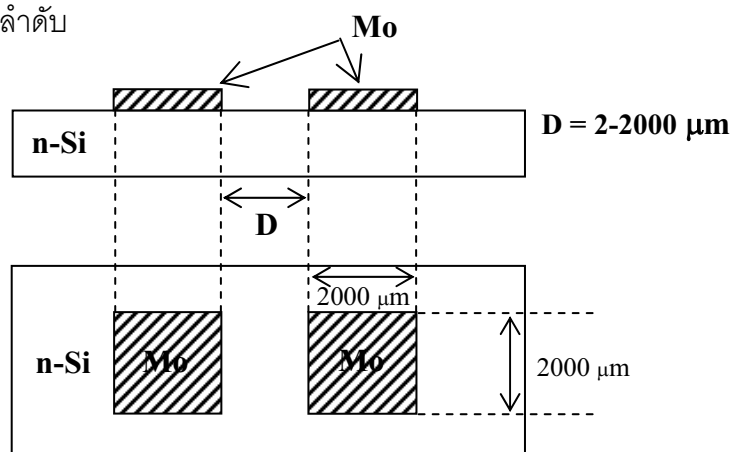
ในบทนี้จะกล่าวถึงลักษณะและขนาดของลวดลายต้นแบบ จากต้นแบบนี้นำไปสร้างโครงสร้าง MSM ซึ่งขั้วไฟฟ้าทั้งสองของชิ้นงานสร้างจากโลหะโมลิบดีนัม (Mo) ส่วนสารกึ่งตัวนำเป็นซิลิคอนชนิด n ดังนั้นจึงได้โครงสร้าง MSM ที่สร้างขึ้นเป็นชนิด Mo/n-Si/Mo จากนั้นกล่าวถึงการทดลองต่างๆ เพื่อใช้ทดสอบอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ทางฟิสิกส์ ทางไฟฟ้าและทางแสง

3.6 ลวดลายสำหรับการสร้างชิ้นงาน

กระจกต้นแบบที่ใช้สร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้เพียงลวดลายละ 1 แผ่น ซึ่งมีลวดลายเป็นแบบช่องเดี่ยวและอินเตอร์ดิจิต เพื่อสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าบนแผ่นซิลิคอน มีรายละเอียด คือ

3.6.1 ลวดลายแบบช่องเดี่ยว

รูปที่ 3.8 เป็นลวดลายแบบช่องเดี่ยว โดยออกแบบให้มีขนาดของขั้วไฟฟ้าทั้งสองเป็น $2 \times 2 \text{ mm}^2$ ($2000 \mu\text{m} \times 2000 \mu\text{m}$) ส่วนระยะห่างขั้วไฟฟ้า (D) มีค่าเป็น $2 \mu\text{m}$, $3 \mu\text{m}$, $5 \mu\text{m}$, $10 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$ และ $2000 \mu\text{m}$ ตามลำดับ



รูปที่ 3.8 ลวดลายต้นแบบที่มีลักษณะเป็นช่องเดี่ยว เพื่อสร้างเป็นตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Mo/n-Si/Mo

3.6.2 กระบวนการสร้าง

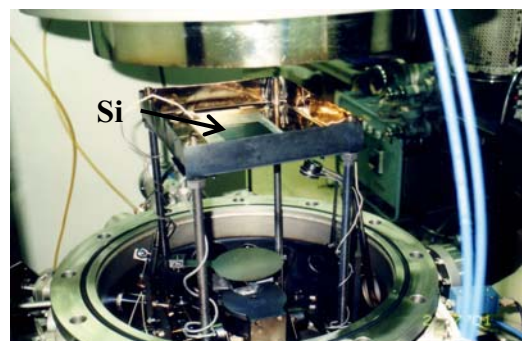
กระบวนการสร้างโครงสร้าง MSM ชนิด Mo/n-Si/Mo นี้ จะใช้เทคโนโลยีของซิลิคอนเป็นหลัก ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการสร้างวงจรรวมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดในปัจจุบันนี้ การสร้างลวดลายของขั้วไฟฟ้าจะใช้เทคนิคของโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography) แบบมาตรฐานที่ใช้กันโดยทั่วไปในการสร้างวงจรรวม เตรียมจากแผ่นซิลิคอน ชนิดเอ็น (n-type) ที่มีสภาพความต้านทาน $10\ \Omega\text{-cm}$ ทำความสะอาดแผ่น กำจัดไขมัน และ ซิลิคอนไดออกไซด์ จากนั้นนำแผ่นซิลิคอนมาเคลือบฟิล์มโลหะโมลิบดีนัม ด้วยเครื่องระเหยโลหะในสุญญากาศแบบใช้ลำอิเล็กตรอน (Electron beam evaporator) โดยให้ความหนาของฟิล์มประมาณ $2000\ \text{\AA}$ ที่ระดับความดัน $3 \times 10^{-4}\text{ Pa}$ จากนั้นนำแผ่นซิลิคอนที่เคลือบฟิล์มโลหะโมลิบดีนัม มาสร้างขั้วไฟฟ้าด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี หลังจากได้ลวดลายของขั้วไฟฟ้าแล้วนำมากัดโลหะโมลิบดีนัมในส่วนที่ไม่ต้องการออกไป รูปที่ 3.11 แสดงถึงภาพตัดขวางอุปกรณ์ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์ ซึ่งจะพบว่าโลหะโมลิบดีนัมอยู่ในรูปของรอยต่อแบบซอติก โดยที่ขั้วไฟฟ้านี้จะมีขนาดพื้นที่ $2 \times 2\text{ mm}^2$ เป็นแบบสองขั้วไฟฟ้า โดยกำแพงศักย์ที่ได้ระหว่าง Mo และ Si มีค่าประมาณ 0.58-0.68 eV โดยส่วนของซิลิคอนที่ทำหน้าที่ในการตรวจวัดแสง (Active area) อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ซึ่งมีระยะห่าง(D) เท่ากับ 2-2000 μm

หลังจากได้กระเจกต้นแบบแล้ว ขั้นตอนต่อมาเลือกแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดผลึกเชิงเดี่ยว ระบาย (100) ที่มีค่าสภาพต้านทาน (resistivity) 9-12 $\Omega\text{-cm}$ และแผ่นผลึกซิลิคอนมีความหนาประมาณ 400 μm นำมาสร้างเป็นโครงสร้าง MSM ชนิด Mo/n-Si/Mo มีขั้นตอนการสร้างดังต่อไปนี้

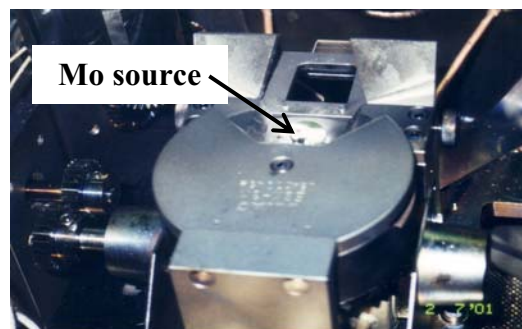
1. ทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิคอน เพื่อกำจัดสิ่งสกปรก และไขมัน
2. กำจัดซิลิคอนไดออกไซด์บางที่เกิดขึ้นบนแผ่นผลึกซิลิคอน
3. นำแผ่นผลึกซิลิคอนมาเคลือบฟิล์มโลหะโมลิบดีนัม ด้วยเครื่องระเหยโลหะในสุญญากาศแบบใช้ลำอิเล็กตรอน (electron beam evaporator) ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ด้วยอัตราการเกิดฟิล์มโลหะโมลิบดีนัมประมาณ $1.6\ \text{\AA/s}$ โดยให้ความหนาของฟิล์มประมาณ 1000 - 1200 $\text{\AA}$
4. นำแผ่นผลึกซิลิคอนที่เคลือบฟิล์มโลหะโมลิบดีนัมแล้ว มาสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าด้วยกระบวนการ โฟโตลิโทกราฟี ด้วยน้ำยาไวแสงชนิดบวก เบอร์ AZ P1350
5. หลังจากได้ลวดลายของขั้วไฟฟ้าแล้ว จึงนำมากัดโลหะโมลิบดีนัมในส่วนที่ไม่ต้องการออกไป ด้วย น้ำยา $\text{HNO}_3 : \text{H}_3\text{PO}_4 : \text{DI}$ ในอัตราส่วน 1 : 5 : 4 จึงเสร็จสิ้นกระบวนการสร้าง



(ก)



(ข)



(ค)

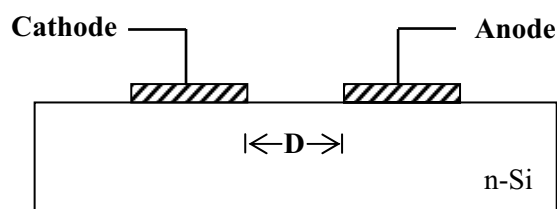
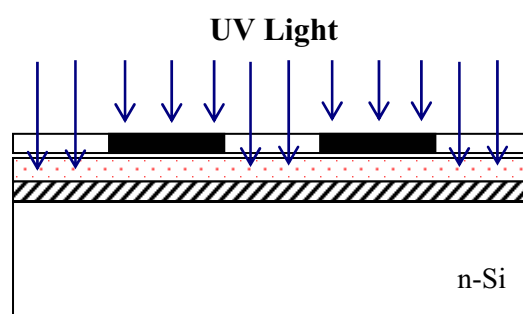
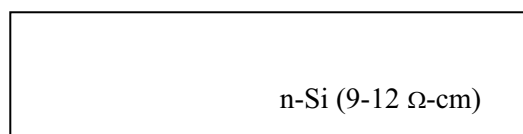
รูปที่ 4.9 (ก) เครื่องระเหยโลหะในสุญญากาศแบบใช้ลำอิเล็กตรอน

(ข) การวางแผ่นผลึกซิลิคอนในเครื่องระเหยโลหะในสุญญากาศแบบใช้ลำอิเล็กตรอน

(ค) โลหะโมลิบดีนัม (Mo) ที่ใช้สร้างเป็นขั้วไฟฟ้า

ในรูปที่ 3.10 แสดงภาพวาดภาคตัดขวางของกระบวนการสร้างโครงสร้าง MSM ชนิด Mo/n-Si/Mo และในรูปที่ 3.11 (ก) และ (ข) เป็นภาพถ่ายด้านบนของชิ้นงานที่สร้างเสร็จแล้ว ส่วนรูปที่ 3.6 (ค) เป็นชิ้นงานที่เชื่อมต่อขาดด้วยกาวเงิน เพื่อทำการทดสอบต่อไป

แผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มต้นชนิดเอ็น มีสภาพต้านทาน 9-12 Ω -cm

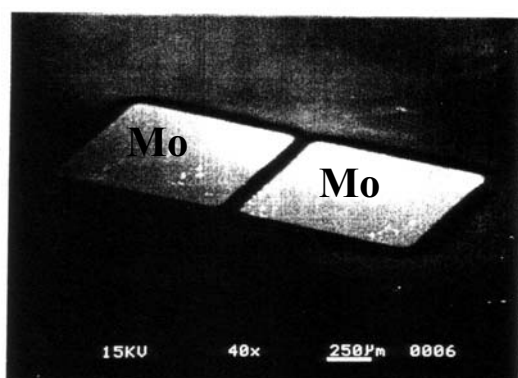


1. เคลือบฟิล์มโมลิบดีนัมจากเครื่องระเหยโลหะในสุญญากาศด้วยลำอิเล็กตรอน ความหนาของฟิล์ม $\approx 1000 - 1200 \text{ \AA}$

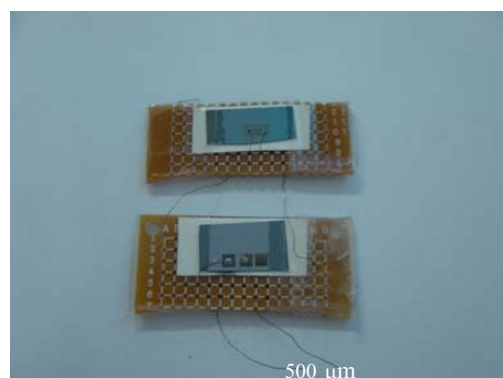
2. เปิดหลอดฉายโลหะ เพื่อสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิคโฟโตลิโกราฟี

3. หลังจากกัดโลหะโมลิบดีนัมแล้ว จะได้ขั้วไฟฟ้าเป็นคาโทด และแอโนด ส่วนระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า D มีค่าตั้งแต่ 20-2000 μm

รูปที่ 3.10 กระบวนการสร้างของโครงสร้าง MSM ชนิด Mo/n-Si/Mo แบบพลาแนรี



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.11 ภาพถ่ายอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo แบบพลาแนรีที่สร้างเสร็จแล้ว

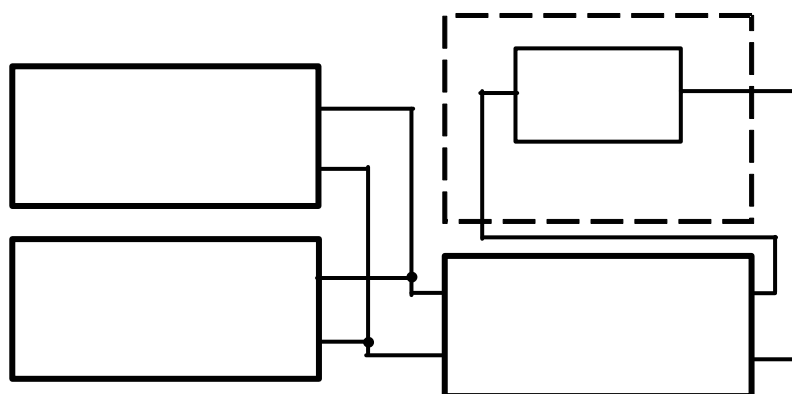
(ก) แบบช่องเดี่ยว (ข) ภาพถ่ายชิ้นงานหลังจากการเชื่อมต่อสายด้วยกาวเงิน

3.7 การทดลอง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทดลองต่างๆ ของตัวตรวจวัดแสง Mo/n-Si/Mo กระบวนการสร้างโครงสร้าง MSM ชนิด Mo/n-Si/Mo เตรียมจากแผ่นซิลิคอน ชนิดเอ็น (n-type) ที่มีสภาพความต้านทาน $9-12\ \Omega\text{-cm}$ ทำความสะอาดแผ่น กำจัดไขมันและ ซิลิคอนไดออกไซด์ จากนั้นนำแผ่นซิลิคอนมาเคลือบฟิล์มโลหะโมลิบดีนัม ด้วยเครื่องระเหยโลหะในสุญญากาศแบบใช้ลำอิเล็กตรอน (Electron beam evaporator) โดยให้ความหนาของฟิล์มประมาณ $2000\ \text{\AA}$ ที่ระดับความดัน $3 \times 10^{-4}\text{ Pa}$ จากนั้นนำแผ่นซิลิคอนที่เคลือบฟิล์มโลหะโมลิบดีนัม มาสร้างขั้วไฟฟ้าด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี หลังจากได้ลวดลายของขั้วไฟฟ้าแล้ว นำมากัดโลหะโมลิบดีนัมในส่วนที่ไม่ต้องการออกไป รูปที่ 3.7 แสดงถึงภาพตัดขวางอุปกรณ์ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์ ซึ่งจะพบว่าโลหะโมลิบดีนัมอยู่ในรูปของรอยต่อแบบข้อต่อกัน โดยที่ขั้วไฟฟ้านี้จะมีขนาดพื้นที่ $2 \times 2\text{ mm}^2$ เป็นแบบสองขั้วไฟฟ้า โดยกำแพงศักย์ที่ได้ระหว่าง Mo และ Si มีค่าประมาณ $0.58-0.68\text{ eV}$ โดยส่วนของซิลิคอนที่ทำหน้าที่ในการตรวจวัดแสง (Active area) อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ซึ่งมีระยะห่าง(d) เท่ากับ $2-2000\ \mu\text{m}$

3.7.1 การหาลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดัน

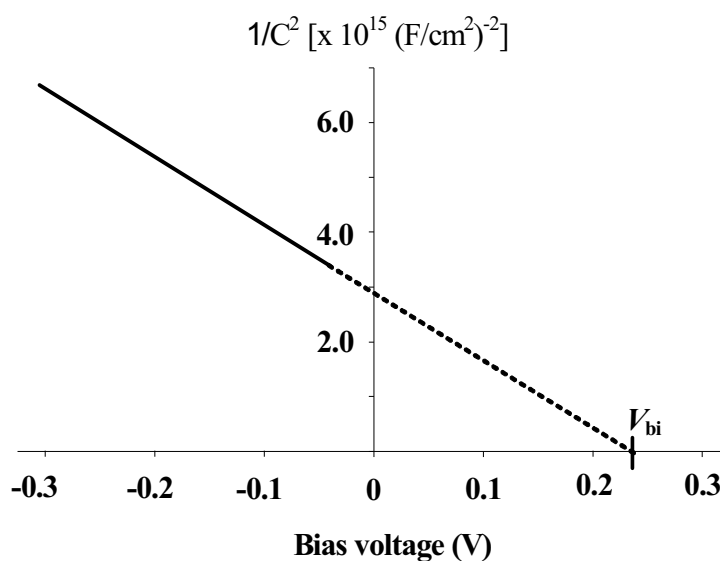
นำชิ้นงานที่สร้างเสร็จแล้ว มาทำการทดลองวัดลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดัน ในรูปที่ 3.7 เป็นบล็อกไดอะแกรม แสดงการวัดหาลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดันที่เงื่อนไขไม่ให้แสงแก่ตัวตรวจวัดแสง (dark condition)



รูปที่ 3.7 บล็อกไดอะแกรมของการหาลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดัน

จากนั้นนำค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ทางด้านแรงดันไปแอสบวก หรือลบก็ได้ (เนื่องจากกราฟความจุไฟฟ้า-แรงดันสมมาตรซึ่งกัน และกัน) มาหาความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดัน ดังแสดงในรูปที่ 3.8 เมื่อลากเส้นกราฟที่เป็นเส้นตรงไปจนตัดแกนแรงดัน ณ ตำแหน่งที่ตัดแกนแรงดันนั้น จะได้ค่าแรงดันภายใน

ของรอยสัมผัส และจากค่าแรงดันภายในนี้ สามารถนำไปหาคำนวนหาค่าความหนาแน่นอะตอมสารเจือผู้ให้ต่อไป

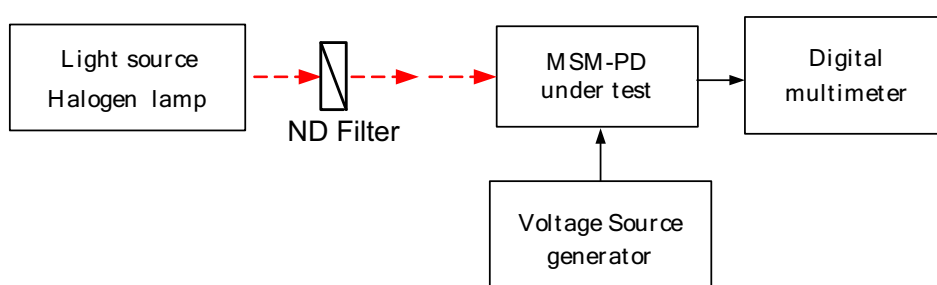


รูปที่ 4.8 การหาค่าแรงดันภายในจากลักษณะเฉพาะระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันไบแอส

3.7.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันของ Mo/n-Si/Mo ในลักษณะสัญญาณแสง

แบบกระแสตรง

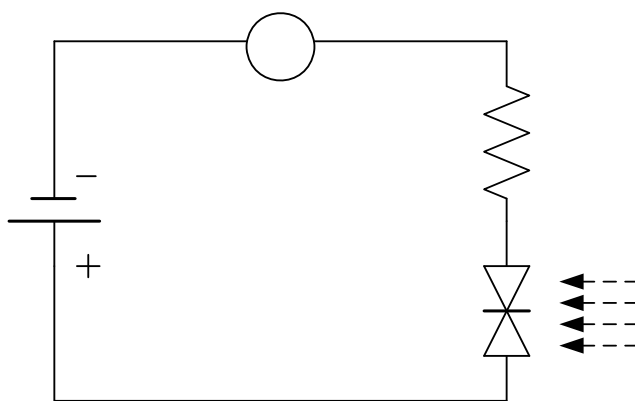
นำเอาชิ้นงานที่สร้างเสร็จแล้ว มาทำการทดลองวัดการตอบสนองทางแสงในลักษณะของสัญญาณแบบกระแสตรง (dc) ตามบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.9



รูปที่ 4.9 บล็อกไดอะแกรมของการวัดสัญญาณทางแสงในลักษณะสัญญาณแบบกระแสตรง

แหล่งจ่ายแสง (light source) ที่ให้แก่ตัวตรวจวัดแสง Mo/n-Si/Mo สามารถใช้แสงฮาโลเจนหรือ แสงเลเซอร์ชนิดฮีเลียม-นีออน (He-Ne Laser) ที่มีความยาวคลื่น 633 nm จากนั้นนำความสัมพันธ์ของกระแสที่วัดได้ไปเขียนเป็นลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันต่อไป

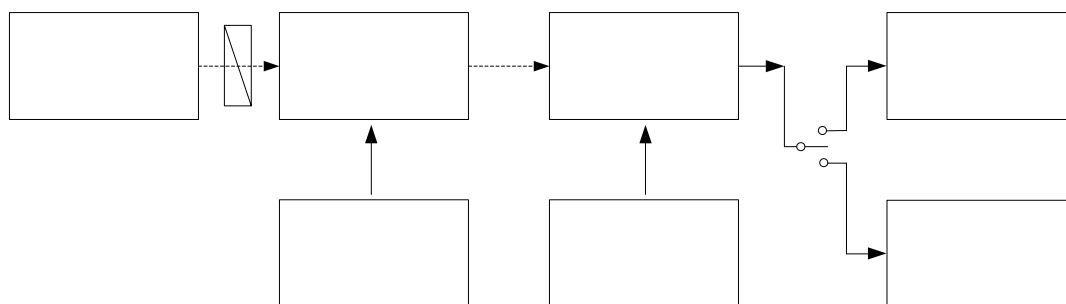
การวัดผลการตอบสนองทางแสงทางด้านกระแสตรง ของตัวตรวจจับทางแสงแบบโครงสร้างเชิงราบ MSM ด้วยวงจรในรูปที่ 3.10 โดยใช้ตัวอย่างชิ้นงานสิ่งประดิษฐ์โครงสร้างเชิงราบ Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแคบมากระหว่าง $2\text{-}10\text{ }\mu\text{m}$ ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจนกระแสตรงโดยที่กระแสมีค่านั้นมีค่าต่ำกว่าระดับไมโครแอมป์ที่แรงดัน 10 โวลต์ และที่ภายใต้เงื่อนไขของแสงที่ตกกระทบพบว่ากระแสมีค่าเพิ่มมากขึ้นจนเข้าสู่สภาวะกระแสอิ่มตัว Saturation current ที่ทุกระดับความเข้มแสง จากการที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้านั้นแคบมาก เมื่อให้แรงดันไบอัสเพิ่มขึ้นทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายจนถึงบริเวณขั้วไฟฟ้าด้านแอนโนด Full depletion width อันเนื่องจากการเกิดคูพาหะอิเล็กตรอน-โฮลที่มากขึ้น ณ บริเวณปลอดพาหะนี้ ตามการเพิ่มขึ้นของแรงดันไบอัส



รูปที่ 3.10 วงจรที่ใช้ในการทดลองวัดคุณสมบัติของกระแสกับแรงดัน

3.7.3 การศึกษาลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันของ Mo/n-Si/Mo ในลักษณะสัญญาณแสงแบบกระแสสลับ

นำเอาตัวตรวจจับแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Mo/n-Si/Mo จากหัวข้อการวัดที่ผ่านมา นำมาทำการทดลองวัดการตอบสนองทางแสงในลักษณะของสัญญาณแบบกระแสสลับ (ac) ตามบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 บล็อกไดอะแกรมของการวัดสัญญาณทางแสงในลักษณะสัญญาณแบบกระแสสลับ

ในที่นี้แหล่งจ่ายแสงที่ให้แก่วัสดุวัดแสง Mo/n-Si/Mo จะใช้ He-Ne เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 633 nm และมีอวลสัญญาณคลื่นรูปไซน์ที่มีขนาดประมาณ 200-400 mV_{p-p} เข้ากับแสง He-Ne เลเซอร์ โดยผ่านอะคูสโตออปติกมอดูเลเตอร์ (Acousto Optic Modulator : AOM) และความถี่ของคลื่นรูปไซน์จะเปลี่ยนแปลงในช่วงประมาณ 100 Hz-1 MHz จากนั้นนำความสัมพันธ์ของกระแสที่วัดได้ไปเขียนลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันต่อไป ในการทดลองนี้นอกจากเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณรูปไซน์แล้ว ยังมีการเปลี่ยนแปลงโหลดความต้านทานเป็น 100 Ω , 2 k Ω , 20 k Ω และ 200 k Ω ตามลำดับ

บทที่ 4

สมบัติทางไฟฟ้าด้านกระแสตรง และกระแสสลับ

จากโครงสร้าง MSM แบบพลาแนรี ชนิด Mo/n-Si/Mo ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง โดยผลการทดลองจะนำเสนอการวัดคุณสมบัติพื้นฐานของอุปกรณ์ การศึกษาความจุไฟฟ้ากับแรงดัน การวัดคุณสมบัติทางแสงแบบกระแสตรง (dc) การวัดคุณสมบัติทางแสงแบบกระแสสลับ (ac) ด้วยการมอดูเลตสัญญาณคลื่นรูปไซน์ ความถี่ต่ำ (จากความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz) การศึกษากระแสแสงกับการเปลี่ยนแปลงโหนดความต้านทานด้านแรงดันไบแอส และการเพิ่มปริมาณกระแสแสง

การทดลองทั้งหมดในบทนี้ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง ส่วนอุปกรณ์ที่นำมาทำการทดลองนั้นในการทดลอง จะใช้อุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่มีลวดลายแบบช่องเดี่ยวและ เป็นลวดลายแบบอินเตอร์ดิจิตัล เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการรับสัญญาณแสง การทดลองทั้งหมดมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

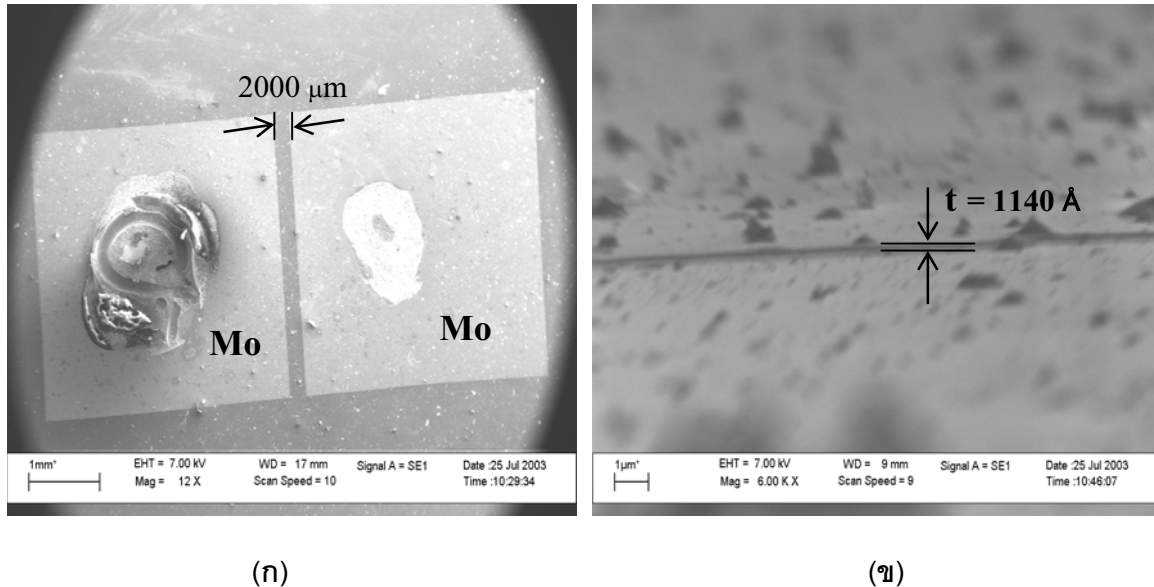
4.1 การหาความหนาของฟิล์มโลหะโมลิบดีนัมจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

แบบกวาด

การทดลองในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อต้องการทราบความหนาของฟิล์มโลหะโมลิบดีนัมของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญของโครงสร้าง MSM

จากกระบวนการสร้างอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ดังที่กล่าวในบทที่ 4 แล้วนั้น โลหะโมลิบดีนัมได้ถูกเลือกเป็นขั้วไฟฟ้า เนื่องจากเป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูง ดังนั้นฟิล์มโลหะโมลิบดีนัมจึงมีความแข็งแรงมากและมีความเชื่อถือในการทำงานสูง นอกจากนี้ยังสามารถยึดเกาะผิวซิลิคอนได้เป็นอย่างดีถึงแม้จะไม่ผ่านกระบวนการซินเทอริง (sintering) ซึ่งต่างจากกรณีรอยสัมผัสของอลูมิเนียมกับซิลิคอนจะ ต้องใช้กระบวนการซินเทอริงเสมอ ส่วนความหนาของฟิล์มโลหะโมลิบดีนัมได้ถูกกำหนดให้มีความหนาประมาณ 1000 - 1200 Å และหลังจากสร้างชิ้นงานเสร็จแล้ว จึงนำชิ้นงานไปหาความหนาของฟิล์มโลหะโมลิบดีนัมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาด (Scanning Electron Microscopy : SEM) ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.1 โดยรูปที่ 4.1 (ก) เป็นภาพถ่ายด้านบนของอุปกรณ์ ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า (D) เท่ากับ 2000 μm ส่วนความหนาของฟิล์มโลหะโมลิบดีนัม แสดงดังในรูปที่ 4.1 (ข) จากภาพถ่าย SEM ความหนา (t) มีค่าประมาณ 1140 Å ซึ่งความหนาของโลหะโมลิบดีนัมนี้มีความเหมาะสมที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ได้เป็นอย่างดี เพราะเป็นความหนาที่นิยมใช้

สร้างตัวตรวจวัดแสงทั่วๆ ไป ซึ่งจะมีค่าประมาณ 1000-2000 Å [48] และเมื่อนำอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ไปทดสอบด้วยแสงฮาโลเจน โดยสร้างส่วนหน้ากากป้องกันแสงไม่ให้กระทบกับผิวซิลิคอน



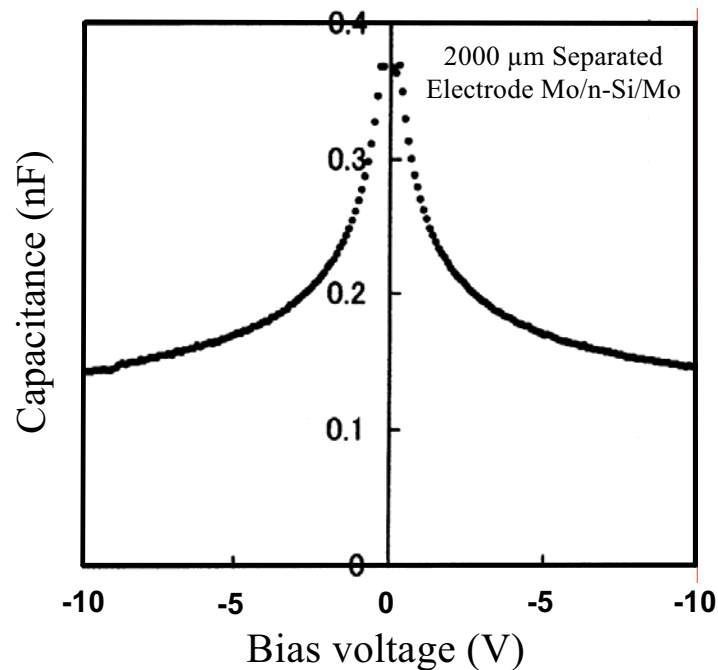
รูปที่ 4.1 (ก) ภาพถ่ายด้านบนของโครงสร้าง Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะ $D = 2000 \mu\text{m}$ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาด
(ข) ความหนาของฟิล์มโลหะโมลิบดีนัมประมาณ 1140 Å

แต่ให้แสงฮาโลเจนตกกระทบเฉพาะที่บริเวณของขั้วโลหะโมลิบดีนัมเท่านั้น แล้วทำการวัดลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน พบว่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าเท่ากับกระแสมืด หมายความว่าความหนาของขั้วโลหะโมลิบดีนัมที่สร้างขึ้นนี้มีความหนาเพียงพอที่จะไม่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาการเกิดกระแสไฟฟ้าภายใต้ขั้วไฟฟ้า ซึ่งอาจจะส่งผลการอธิบายผลการทดลองในหัวข้อถัดไปได้ โดยทั่วไปแล้วจะเรียกโครงสร้างลักษณะนี้ว่า “โครงสร้าง MSM ที่ตอบสนองสัญญาณแสงที่ผิวซิลิคอน ซึ่งอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้า (blocking MSM structure)”

4.2 การหาลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดันของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง

การทดลองในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อต้องการทราบความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการเปลี่ยนแรงดันไบแอส ที่สภาวะมืด (dark condition) เมื่อไม่มีแสงตกกระทบตัวอุปกรณ์

นำเอาอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะ $D = 2000 \mu\text{m}$ มาทำการทดลอง เพื่อหาความจุไฟฟ้าแฝง (จากบริเวณปลอดพาหะ) ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดันของโครงสร้าง Mo/n-Si/Mo แสดงให้เห็นถึงความสมมาตรกัน และความจุไฟฟ้าจะแปรผกผันกับแรงดันไบแอส

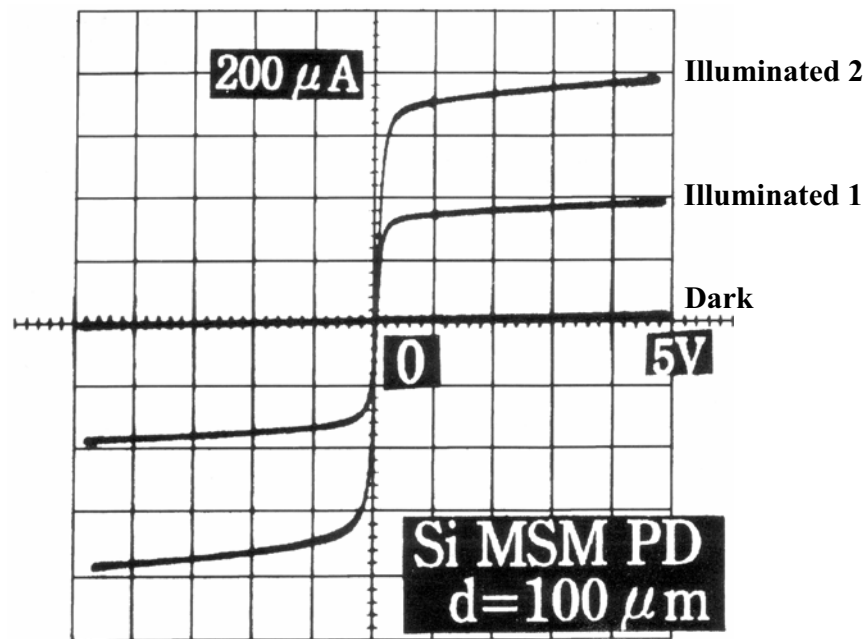
จากรูปที่ 4.2 แสดงว่าลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดันมีความสมมาตรกัน ความจุไฟฟ้าที่วัดได้จะแปรผกผันกับแรงดันไบแอส ซึ่งลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดันนี้มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวัดโดย Sze et al. ความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง เมื่อให้แรงดันไบแอสมีค่ามากขึ้นเป็นไปตามความสัมพันธ์ของสมการที่ (2.12) และ (2.13) และจากกราฟในรูปที่ 4.2 ที่แรงดันไบแอสประมาณ 10 V ซึ่งเป็นแรงดันที่ป้อนให้แก่อุปกรณ์ ในระหว่างที่นำไปทำการทดลอง ความจุไฟฟ้ามีค่าประมาณ 140 pF

4.3 การวัดสัญญาณแสงของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ในลักษณะสัญญาณแบบกระแสตรง (dc)

วัตถุประสงค์ของการทดลองในหัวข้อนี้ เพื่อทราบถึงเทคนิคการตรวจวัดแสงในลักษณะสัญญาณแบบ dc ซึ่งทำให้ทราบถึงขีดความสามารถในการตรวจวัดความเข้มแสงอย่างง่าย ๆ เมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงที่แตกต่างกันสองชนิด คือ (1) หลอดฮาโลเจน และ (2) He-Ne เลเซอร์

4.3.1 การหาลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันด้วยเครื่องวัดคุณสมบัติทรานซิสเตอร์

นำตัวตรวจวัดแสงชนิด Mo/n-Si/Mo ที่สร้างเสร็จแล้วมาทำการทดสอบ เพื่อวัดความเข้มแสงค่าต่างๆ โดยใช้หลอดฮาโลเจนเป็นแหล่งจ่ายแสง และใช้เครื่องวัดคุณสมบัติทรานซิสเตอร์เป็นเครื่องแสดงผลการทดลอง ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน แสดงในรูปที่ 4.3

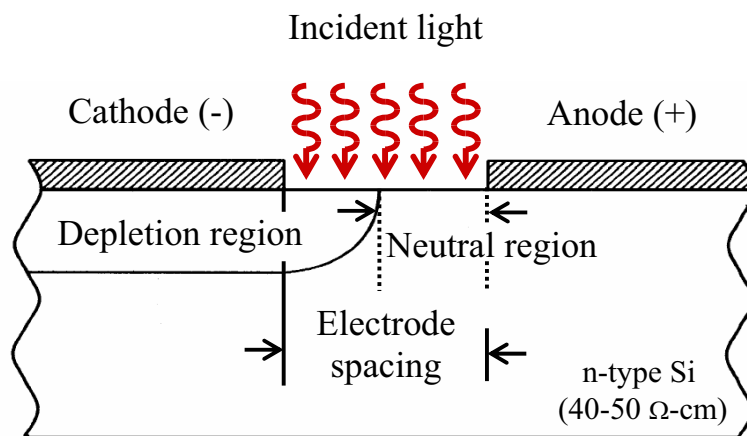


รูปที่ 4.3 ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงชนิด Mo/n-Si/Mo ซึ่งได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติทรานซิสเตอร์ภายใต้เงื่อนไขการให้แสงตกกระทบบนด้วยความเข้มแสงที่แตกต่างกัน

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.3 เป็นอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า $100\ \mu\text{m}$ พบว่า ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันเป็นแบบสมมาตร ซึ่งเป็นมาผลจากโครงสร้างของขั้วตึกแบริเออร์สองตัวที่เชื่อมต่อกันในลักษณะหันหลังชนกันและเป็นข้อดีข้อหนึ่งของโครงสร้าง MSM ที่ไม่ต้องกังวลเกี่ยวกับขั้วของแรงดันไบแอส กระแสมีค่าต่ำอยู่ในระดับ 1 - 2 ไมโครแอมแปร์ ความสูงของกำแพงศักย์ของขั้วตึกแบริเออร์ (Mo/n-Si) จะมีค่าระหว่าง 0.65 - 0.68 eV และเมื่อฉายแสงฮาโลเจนตกกระทบบนตัว Mo/n-Si/Mo อุปกรณ์สามารถเปลี่ยนความเข้มแสงของ Illuminated I ให้เป็นกระแสไฟฟ้าได้ประมาณ $100\ \mu\text{A}$ ($V_{\text{bias}} \approx 5\text{V}$) และเมื่อเพิ่มความเข้มแสงเป็น Illuminated II จะได้กระแสไฟฟ้าประมาณ $200\ \mu\text{A}$ ($V_{\text{bias}} \approx 5\text{V}$) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถนำโครงสร้าง MSM ชนิด Mo/n-Si/Mo มาใช้เป็นตัวตรวจวัดแสงได้

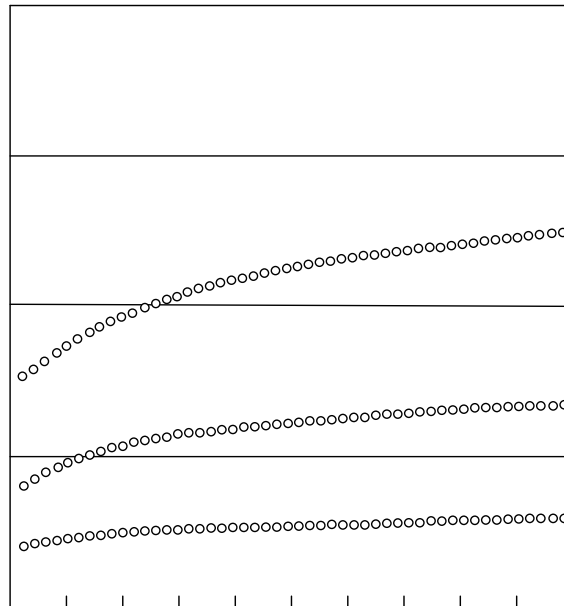
4.3.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง

อุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าขนาดกว้าง หมายถึงโครงสร้าง MSM เมื่อให้แรงดันไบแอสแล้วบริเวณปลอดพาหะที่เกิดขึ้นไม่ขยายไปครอบคลุมระยะห่างขั้วไฟฟ้าทั้งหมด และยังมีส่วนของบริเวณนิวทรัลเหลืออยู่ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งจะต่างกับโครงสร้าง MSM โดยทั่วไปที่ต้องการสร้างให้ระยะห่างขั้วไฟฟ้าแคบมากๆ และเมื่อให้แรงดันไบแอสแล้วจะมีส่วนของบริเวณปลอดพาหะครอบคลุมระยะห่างขั้วไฟฟ้าไว้ทั้งหมด (fully depleted between electrodes)



รูปที่ 4.4 โครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง หลังจากให้แรงดันไบแอสที่ขั้วคาโทดเป็นลบ และขั้วแอโนดเป็นบวก และยังมีส่วนของบริเวณนิวทรัลเหลืออยู่

นำอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า $2000\ \mu\text{m}$ มาทำการทดลองโดยใช้ He-Ne เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ป้อนให้แก่อุปกรณ์ และเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงค่าต่างๆ ด้วยกระจก ND ฟิลเตอร์ (ND filter mirror) ซึ่งวางไว้ระหว่าง He-Ne เลเซอร์กับกล่องป้องกันแสง (dark box) สำหรับลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันของความเข้มแสงค่าต่างๆ แสดงดังในรูปที่ 5.5



20

รูปที่ 4.5 ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันไบแอส เมื่อให้ความเข้มแสงที่แตกต่างกันตกกระทบบน
อุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 2000 μm

กราฟลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันที่แสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าเมื่อให้ความเข้มแสงมากขึ้นจะได้รับกระแสไฟฟ้ามากขึ้น และถ้าให้แรงดันไบแอสเพิ่มขึ้นในขณะที่ความเข้มแสงมีค่าคงที่กระแสไฟฟ้าที่ได้รับจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ในการทดลองนี้ พบว่าถึงแม้ว่าจะใช้แสงตกกระทบบนจาก He-Ne เลเซอร์ (0.6 mW) ซึ่งมีกำลังงานต่ำกว่าแสงจากฮาโลเจนมาก (ระดับหลายสิบลวัตต์ และเครื่องสามารถจ่ายกำลังได้สูงสุดถึง 150 W) แต่ยังสามารถตรวจวัดความเข้มแสงได้ดี ซึ่งคาดได้ว่าถ้าให้สัญญาณ ac มอดูเลตเข้ากับแสงของ He-Ne เลเซอร์แล้ว ตัวตรวจวัดแสง Mo/n-Si/Mo น่าจะทำงานตรวจวัดสัญญาณ ac นี้ได้เป็นอย่างดีด้วย สำหรับข้อมูลที่ได้จากกราฟในรูปที่ 5.5 จะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลต่อไป

การวิเคราะห์ผลกระทบบนของกระแสแสงกับแรงดันไบแอสของตัวตรวจวัดแสง Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง

ในการวิเคราะห์นี้ เพื่อแสดงถึงความสามารถในการควบคุมปริมาณของกระแสแสง ด้วยการเปลี่ยนแปลงแรงดันไบแอส ในขณะที่ความเข้มแสงมีค่าคงที่ เป็นลักษณะเด่นอีกประการหนึ่งของโครงสร้าง MSM

Current [uA]

10

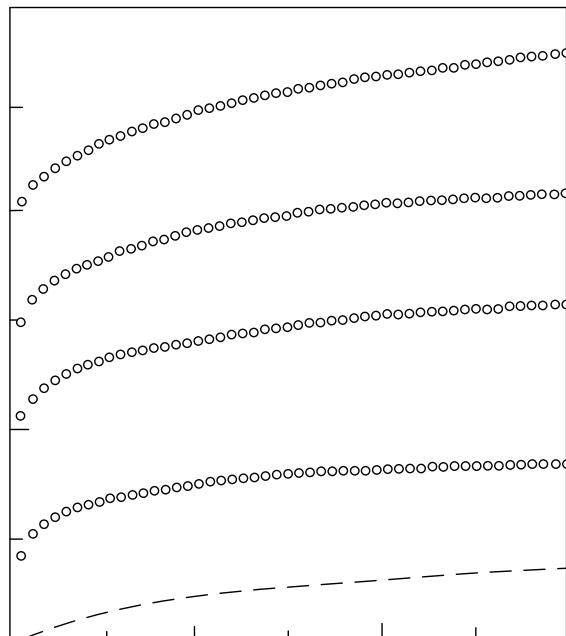
5

E

และยังช่วยยืนยันถึงความถูกต้องของแนวความคิดของกระแสโฟโตไดโอดและโฟโตคอนดักเตอร์อีกด้วยในรูปที่ 4.6

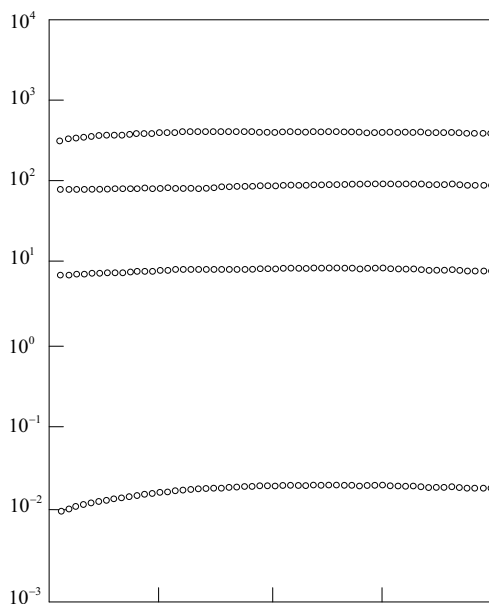
ผลกระทบของกระแสแสงกับแรงดันไบแอสของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo

ในการวิเคราะห์นี้ แสดงให้เห็นถึงจุดเด่นของอุปกรณ์ที่แตกต่างจากตัวตรวจวัดแสงทั่วๆ ไป คือการควบคุมปริมาณกระแสด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไบแอส ในรูปที่ 5.6 แสดงลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดทั่วไป (conventional photodiode) ที่มีโครงสร้างแบบแนวดิ่ง ซึ่งอาจเป็น p-n โฟโตไดโอด หรือ p-i-n โฟโตไดโอดก็ได้ และลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันของโครงสร้าง MSM ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างกัน คือ (1) กรณียของโฟโตไดโอดทั่วไป แสดงลักษณะเฉพาะของกระแสได้ทั้งไบแอสตรง (forward direction : FWD) และไบแอสย้อนกลับ (backward direction : BWD) แต่ในขณะที่ใช้งานเป็นตัวตรวจจับแสงจะถูกใช้ในช่วงการไบแอสย้อนกลับเท่านั้น

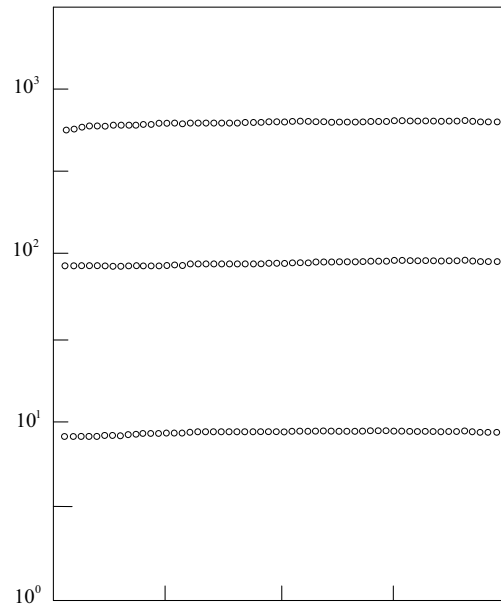


รูปที่ 4.6 ลักษณะกระแสแสง กับแรงดัน ($I_p - V$) อุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ $1000 \mu\text{m}$ ภายใต้ระดับความเข้มแสงต่างๆ เส้นประในกราฟแสดงถึงค่า $\sqrt{(V + V_{bi})}$ (arb.) ที่แรงดันเริ่มต้น built-in voltage (V_{bi}) = 0.23V.

ซึ่งต้องใช้ความระมัดระวังในการให้แรงดันไบแอสแก่อุปกรณ์ แต่สำหรับโครงสร้าง MSM จะมีแต่การไบแอสย้อนกลับเท่านั้น (2) เมื่อให้แสงตกกระทบบนที่ค่าหนึ่ง ในกรณีของโฟโตไดโอดทั่วไป กระแสแสงจะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงกับแรงดัน ไบแอส (กราฟเส้นทึบ ที่ให้แรงดันไบแอสแบบ BWD ในขณะที่โครงสร้าง MSM กระแสแสงจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่าแรงดันไบแอสที่เพิ่มขึ้น (กราฟเส้นประ) นั้นแสดงให้เห็นว่าโครงสร้าง MSM มีความสามารถในการควบคุมกระแสแสงด้วยแรงดันไบแอส สำหรับเหตุผลของการเปลี่ยนแปลงกระแสแสงนี้จะได้อธิบายต่อไป จากนั้นนำผลการทดลองรูปที่ 4.7 มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับความกว้างบริเวณปลอดพาหะ (W_d) โดยแกนตั้งเป็นกระแสแสง และให้แกนนอนเป็นความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ ซึ่งความกว้างบริเวณปลอดพาหะคำนวณได้จากสมการที่ (3.4) ผลการคำนวณแสดง ดังในรูปที่ 5.8



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.7 (ก) สมบัติ กระแส-แรงดัน และ (ข) กระแสแสง ของ pin photodiode

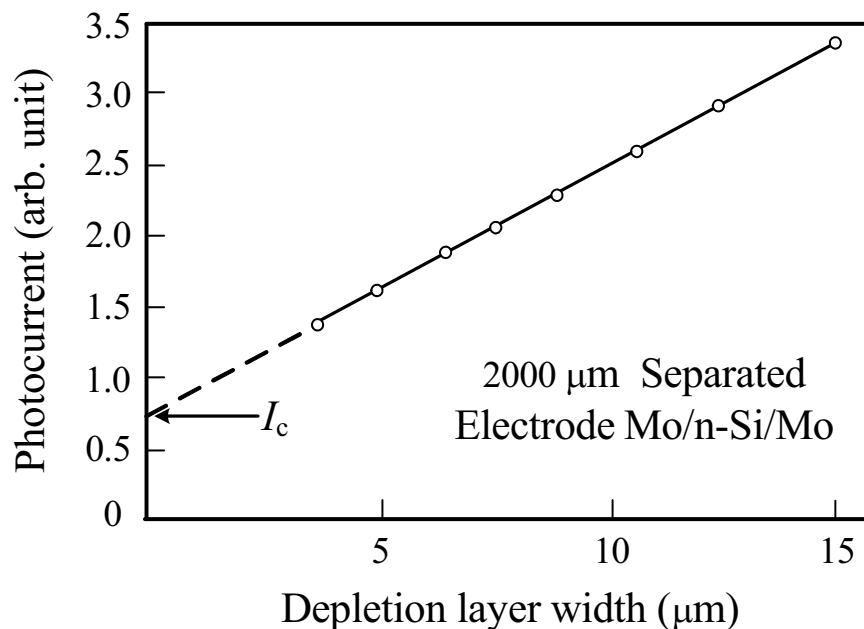
จากกราฟในรูปที่ 4.6 กระแสแสง(photocurrent) มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความกว้างบริเวณปลอดพาหะมีขนาดกว้างขึ้น แต่เนื่องจากความกว้างของปลอดพาหะจะขึ้นกับแรงดันไบแอส ดังในสมการที่ (3.4) จึงอาจกล่าวได้ว่า กระแสแสงมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อให้แรงดันไบแอสมีค่าสูงขึ้น มีความเป็นไปได้ว่าบริเวณปลอดพาหะจะมีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสมากกว่าส่วนนิวทรัล เนื่องจากชั้นงานนี้มีระยะห่างขั้วไฟฟ้ามากกว่าผลรวมของความกว้างบริเวณปลอดพาหะและความยาวการแพร่ของพาหะ ซึ่งทั้งสองส่วนนี้ได้รับแสงตกกระทบบนอย่างสมบูรณ์ ดังนั้นกระแสจากบริเวณปลอดพาหะที่มีความกว้างมากขึ้น (เมื่อได้รับแรงดันไบแอสสูงขึ้น) มีค่า

เพิ่มขึ้น ในขณะที่กระแสที่เกิดจากบริเวณนิวทรัลไม่เปลี่ยนแปลง จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับความกว้างบริเวณปลอดพาหะของชิ้นงานในรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้นระหว่างกระแสแสงกับความกว้างบริเวณปลอดพาหะ อย่างไรก็ตามจะต้องพิจารณาถึงผลกระทบของความลึกของบริเวณปลอดพาหะ ซึ่งมีผลต่อกระแสแสงด้วย ในขณะที่ให้แรงดันไบแอสเพิ่มขึ้นบริเวณปลอดพาหะจะขยายตัวออกไปทั้งทางข้างและทางด้านใต้ด้วย และเพื่อให้ง่ายเราจะสรุปว่าบริเวณปลอดพาหะที่อยู่ถัดจากขอบโลหะจะมีรูปร่างเป็นส่วนโค้งของวงกลม ทำให้ความสัมพันธ์ของกระแสแสงกับความกว้างของปลอดพาหะที่แปรผันอย่างเชิงเส้น

เมื่อพิจารณาถึงผลของแสงที่ตกกระทบบนบริเวณระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองนั้นคือกระแสในส่วนของบริเวณปลอดพาหะ และ กระแสในส่วนนิวทรัลซึ่งเป็นส่วนที่เกิดจากกระบวนการแพร่ ซึ่งจากผลการคำนวณจากการทดลองสามารถแสดงได้ด้วยสมการกระแสแสง (Photocurrent: I_p) ดังนี้

$$\begin{aligned} I_p &= \eta[\alpha W(V) + L] \\ &= \eta[\alpha \sqrt{\beta(V + V_0)} + L] \end{aligned} \quad (4.1)$$

โดยที่ η คือแฟคเตอร์ของการแปรผันตรงที่รวมส่วนของความยาวของแถบโลหะและผลกระทบที่ส่วนปลายแถบพลังงาน และแฟคเตอร์อื่นที่เกี่ยวข้อง อาทิเช่น ประสิทธิภาพควอนตัม เป็นต้น เพื่อทราบค่ากระแสแสงที่ขึ้นกับแรงดันไบแอส



รูปที่ 4.8 กระแสแสงที่ขึ้นกับความกว้างบริเวณปลอดพาหะที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 2000 μm

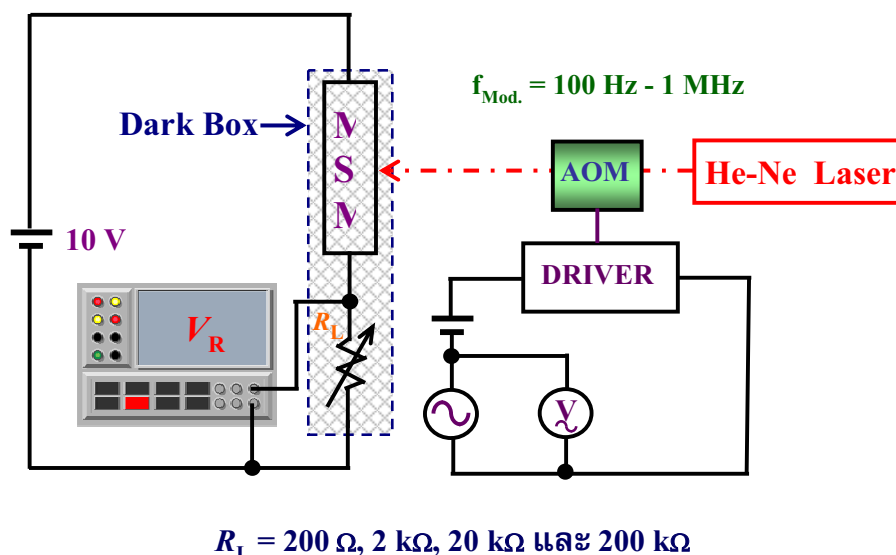
ค่า η สามารถหาได้จากการฟิตกราฟ (Fit curve) จากสมการที่ (4.1) ในส่วนของค่าตัวแปร α เป็นค่าอัตราส่วนประสิทธิผล effectiveness ratio ของกระแสแสงที่เกิดในบริเวณปลดพาหะ (space-charge-region: SCR) กับกระแสอันเนื่องมาจากพาหะที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ไม่ขยายตัว จากบริเวณนิวทรัลจะถูกพิจารณาโดยใช้ระยะการแพร่ของพาหะ (L) เนื่องจาก L คือ ระยะการแพร่ของพาหะส่วนน้อยในบริเวณที่ไม่ขยายตัว ดังนั้นจากสมการที่ 3.5 นี้แสดงให้เห็นว่าค่าอัตราส่วน $\alpha\sqrt{\beta}$ กับ ค่า L ควรที่จะเป็นค่าคงที่

4.4 การวัดสัญญาณแสงของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ในลักษณะสัญญาณแบบกระแสสลับ (ac)

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบถึงเทคนิคการตรวจวัดแสงในลักษณะสัญญาณแบบ ac โดยการมอดูเลตสัญญาณคลื่นรูปไซน์ (sinusoidally waveform) เข้ากับแสงของ He-Ne เลเซอร์ แล้วนำไปทดสอบกับอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่สร้างขึ้นมา ซึ่งได้ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปกับความถี่ของคลื่นรูปไซน์

การตอบสนองสัญญาณแสงความถี่ต่ำของ Mo/n-Si/Mo ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง

นำอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo มาทำการทดลองสัญญาณแสงในลักษณะสัญญาณแบบ ac โดยต่อชุดทดลองตามบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.9 เพื่อหาการตอบสนองสัญญาณแสงของ He-Ne เลเซอร์ที่มีการมอดูเลตสัญญาณคลื่นรูปไซน์ โดยผ่านอะคูสโตออปติกมอดูเลเตอร์ (AOM) สำหรับความถี่ของคลื่นรูปไซน์จะเปลี่ยนแปลงในช่วงประมาณ 100 Hz-1 MHz ดังแผนภาพในรูปที่ 4.9

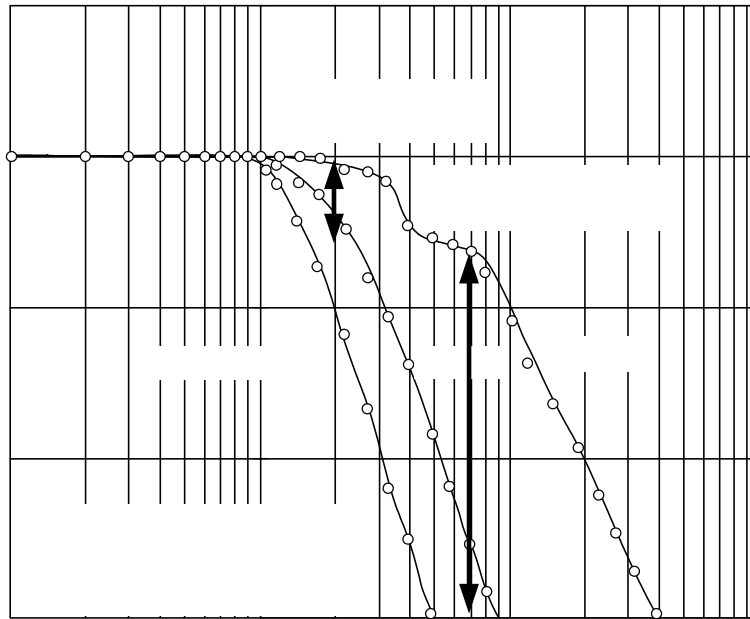


รูปที่ 4.9 แผนภาพชุดเครื่องมือทดลอง เพื่อหาการตอบสนองสัญญาณทางแสงความถี่ต่ำของ Mo/n-Si/Mo

จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4.10 แสดงการตอบสนองทางแสง สำหรับชิ้นงานที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 1000 μm และนำโหนดความต้านทานมาต่อเชื่อมกับอุปกรณ์แบบอนุกรม โดยให้โหนดความต้านทานเป็นตัวพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงจาก 200 Ω ถึง 200 $\text{k}\Omega$ โดยให้แกนตั้งของกราฟเป็นสัญญาณการตอบสนองของโหนดความต้านทานที่ถูกระบุโดย (normalized) เนื่องจากสัญญาณแสง ส่วนแกนนอนเป็นแกนของความถี่ ตั้งแต่ 100 Hz-1 MHz ในรูปที่ 5.10 นี้เส้นกราฟของโหนดความต้านทานที่มีค่าน้อยความถี่เทิร์นโอเวอร์ (turn-over frequency)¹ จะมี 2 ค่า กล่าวคือ ในกรณีของเส้นกราฟที่มีโหนดความต้านทานเป็น 200 Ω ความถี่เทิร์นโอเวอร์อยู่ที่ประมาณ 10 และ 200 kHz โดยความถี่เทิร์นโอเวอร์ที่มีค่าน้อยจะถูกระบุว่า ความถี่เทิร์นโอเวอร์ค่าต่ำ (Lower Turn-over Frequency : LTF) ในที่นี้มีค่าประมาณ 10 kHz ในส่วนความถี่เทิร์นโอเวอร์ที่มีความถี่จะเรียกว่า ความถี่เทิร์นโอเวอร์ค่าสูง (Higher Turn-over Frequency : HTF) และมีค่าประมาณ 200 kHz ส่วนกราฟของโหนดความต้านทาน 2 $\text{k}\Omega$ จะพบความถี่ LTF อยู่ที่ประมาณ 10 kHz และความถี่ HTF มีค่าประมาณ 100 kHz

ผลการทดลองที่อธิบายไว้ข้างต้นทำให้ทราบว่า ในกรณีความถี่ LTF จะมีค่าเท่าเดิมไม่เปลี่ยนแปลง ถึงแม้ว่าโหนดความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงไปจาก 200 Ω เป็น 2 $\text{k}\Omega$ ก็ตาม จะแตกต่างกับกรณีของความถี่ HTF โดยมีค่าเปลี่ยนแปลงลดลงจาก 200 kHz เป็น 100 kHz เมื่อโหนดความต้านทานมีค่าเป็น 200 Ω และ 2 $\text{k}\Omega$ ตามลำดับ แต่ถ้าให้โหนดความต้านทานมีค่ามากขึ้นเป็น 20 $\text{k}\Omega$ และ 200 $\text{k}\Omega$ พบว่าสัญญาณการตอบสนองทางแสงที่ได้จะแตกต่างออกไป จะมีความถี่เทิร์นโอเวอร์เพียงค่าเดียวเท่านั้น และขนาดสัญญาณที่ได้จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ถ้าให้โหนดความต้านทานมีค่าสูงมากๆ

¹ ความถี่เทิร์นโอเวอร์ หมายถึง ความถี่ที่ทำให้สัญญาณการตอบสนองทางแสง (กระแสแสง หรือแรงดัน) มีการเปลี่ยนแปลงลดลงจนสามารถสังเกตได้



1.2

รูปที่ 4.10 การตอบสนองสัญญาณแสงของตัวตรวจวัดแสง Mo/n-Si/Mo ที่มีขนาดของระยะห่างขั้วไฟฟ้า 1000 μm และมีการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดความต้านทาน (R_L) ระหว่าง 200 Ω , 2 k Ω , 20 k Ω และ 200 k Ω

4.5 การวัดสัญญาณแสงของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่มีลวดลายแบบอินเตอร์ดิจิต

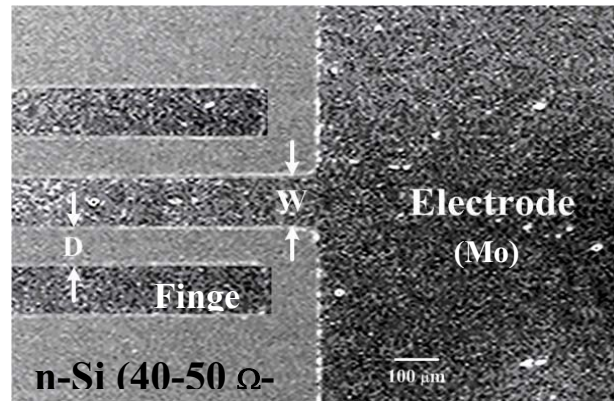
1.0

การทดลองในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการรับสัญญาณแสง ทำให้ได้รับกระแสแสงเพิ่มขึ้น โดยการสร้างตัวตรวจวัดแสง Mo/n-Si/Mo ให้มีลักษณะลวดลายเป็นแบบอินเตอร์- ดิจิต ในกรณีนี้จะมีปริมาณของพื้นที่รับแสงมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ซึ่งเป็นภาพถ่ายที่แสดงให้เห็นส่วนของพื้นที่รับแสง (D) มีความกว้าง 100 μm และส่วนระยะความกว้าง (W) ของแถบฟิล์มโลหะมีขนาด 100 μm หรืออาจเรียกว่า ฟิงเกอร์ (finger) มีความกว้าง 100 μm เท่ากัน และในภาพนี้แสดงให้เห็นแถบฟิล์มโลหะมีจำนวน 3 แถบ

0.8

normalized photocurrent response

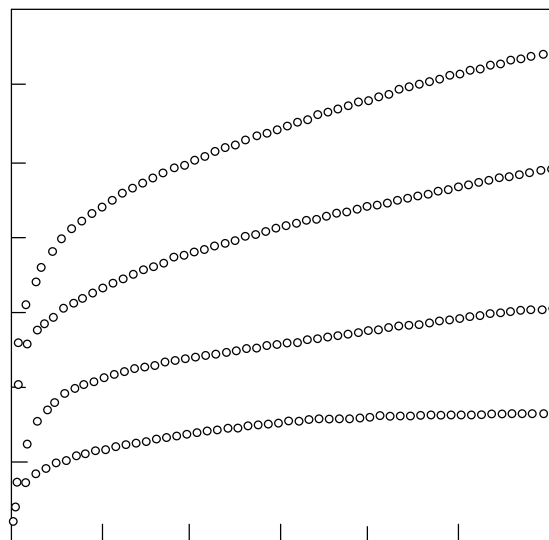
0.6



รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายด้านบนของชิ้นงานที่มีลวดลายแบบอินเตอร์ดิจิตัลแบบ 3 แถบ (หรือ 3 ฟิงเกอร์)

4.5.1 ลักษณะเฉพาะแบบกระแสดตรง

นำอุปกรณ์มาทำการทดลองตามบล็อกไดอะแกรมของรูปที่ 4.12 ซึ่งเป็นการทดลองแบบ dc เนื่องจากส่วนรับแสงของตัวอุปกรณ์มีขนาดใหญ่กว่าแบบช่องเดี่ยว ดังนั้นจึงเพิ่มเติมส่วนของ ND ฟิลเตอร์ (Neutral Density filter : ND filter) เพื่อเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มของแสง และเลนส์ขยาย (expander len) เพื่อให้แสงตกกระทบคลุมบริเวณพื้นที่รับแสงทั้งหมด

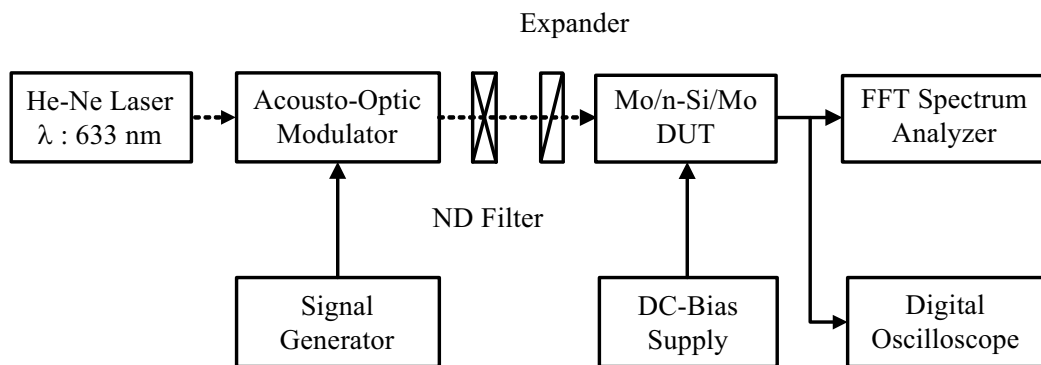


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง-แรงดันของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo แบบอินเตอร์ดิจิตัลที่มี 3 แถบ ภายใต้การฉายแสงด้วยความเข้มแสงที่แตกต่างกัน 4 ระดับ

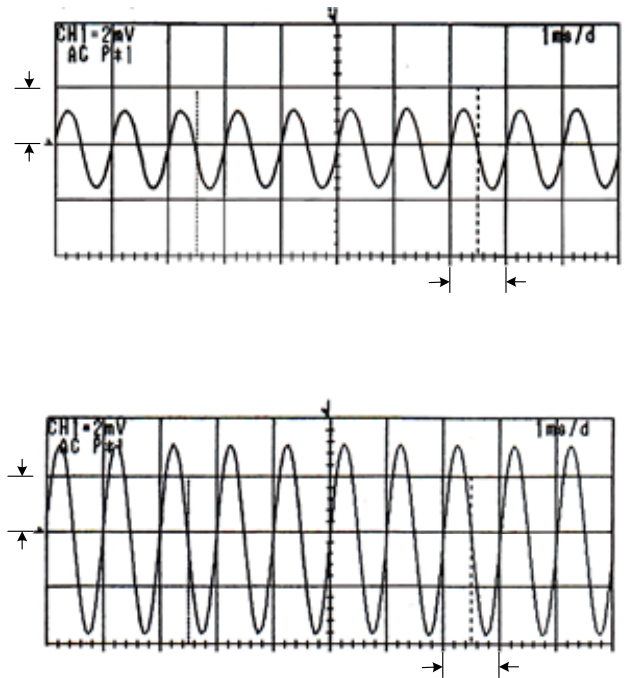
ผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4.12 เป็นลักษณะเฉพาะของกระแสแสง-แรงดันของอุปกรณ์แบบอินเตอร์ดิคทีฟที่มี 3 แถบ ภายใต้การฉายแสงด้วยความเข้มแสงที่แตกต่างกัน 4 ระดับ ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันในรูปนี้มีลักษณะในทำนองเดียวกันกับลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันของลวดลายแบบช่องเดี่ยวที่แสดงในรูปที่ 4.5 อย่างไรก็ตามกระแสแสงที่แสดงในรูปที่ 4.12 จะมีค่ามากกว่า เพราะว่ามีส่วนของพื้นที่รับแสงมากกว่านั่นเอง และเพื่อให้เข้าใจในรายละเอียดของผลการทดลองให้มากยิ่งขึ้น

4.5.2 ลักษณะเฉพาะแบบกระแสสลับ

นำอุปกรณ์มาทำการทดลองคล้ายกับบล็อกไดอะแกรมของรูปที่ 4.11 ซึ่งเป็นการทดลองแบบ ac แต่เพิ่มเติมส่วนของ ND ฟิลเตอร์ (Neutral Density filter : ND filter) และเลนส์ขยาย (expander len) ดังแสดงด้วยบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.13 ส่วนการวิเคราะห์ผลจะใช้ฮอสซิลโลสโคปแบบดิจิทัล และเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมด้วยการเปลี่ยนแปลงแบบ FFT (FFT spectrum analyzer) สำหรับช่วงความถี่ที่ใช้ในการทดลองอยู่ระหว่าง 1-20 kHz



รูปที่ 4.13 บล็อกไดอะแกรมของการทดลองการตอบสนองความถี่ต่ำที่อยู่ระหว่าง 1-20 kHz ของ Mo/n-Si/Mo ที่มีลวดลายแบบอินเตอร์ดิคทีฟ



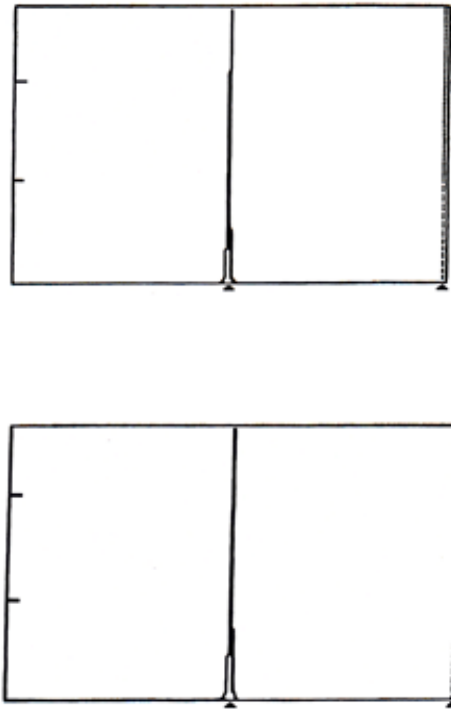
รูปที่ 4.14 เส้นกราฟจากออสซิลโลสโคปของการดีมอดูเลทของสัญญาณรูปคลื่นที่ 1 kHz ในโดเมนเวลาของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่มีแถบโลหะ 3 แถบ ที่แรงดันไบแอส (a) 1 V และ (b) 20 V

2mV

ในรูปที่ 4.14 (ก) และ (ข) แสดงสัญญาณที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป (ที่ความถี่: 1 kHz) ของอุปกรณ์ที่มีแถบโลหะ 3 แถบ และให้แรงดันไบแอส 2 ค่า คือ 1 V และ 20 V ตามลำดับ ในรูปที่ 4.14 ขนาดของสัญญาณดีมอดูเลท (demodulate) เพิ่มขึ้นจาก $2.88 \text{ mV}_{\text{p-p}}$ ที่แรงดันไบแอส $V = 1 \text{ V}$ เป็น $6.80 \text{ mV}_{\text{p-p}}$ ที่แรงดันไบแอส $V = 20 \text{ V}$ เป็นผลกระทบในลักษณะของไอริส (iris effect)

เพื่อทดลองถึงผลกระทบของสปูเรียส¹ (spurious effect) ของกระบวนการดีมอดูเลท เราจะสังเกตจากการกระจายความถี่ของสัญญาณของรูปคลื่นของเริ่มต้น และสัญญาณจากการดีมอดูเลท โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแบบ FFT ผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4.15 (ก) และ (ข) เป็นเส้นสเปกตรัมจากอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่มีแถบโลหะ 3 แถบ สำหรับแรงดันไบแอส 1 V และ 20 V ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเปลี่ยนแปลงเฉพาะขนาดจากข้อมูลที่ได้เสนอนี้ไม่พบผลกระทบของสปูเรียส

¹ ผลกระทบของสปูเรียส หรือสปูเรียสมอดูเลชัน (spurious modulation) หมายถึง การมอดูเลตที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในวงจรออสซิลเลเตอร์ เช่น การมอดูเลตแบบความถี่ที่มีสาเหตุจากการสั่นทางกล



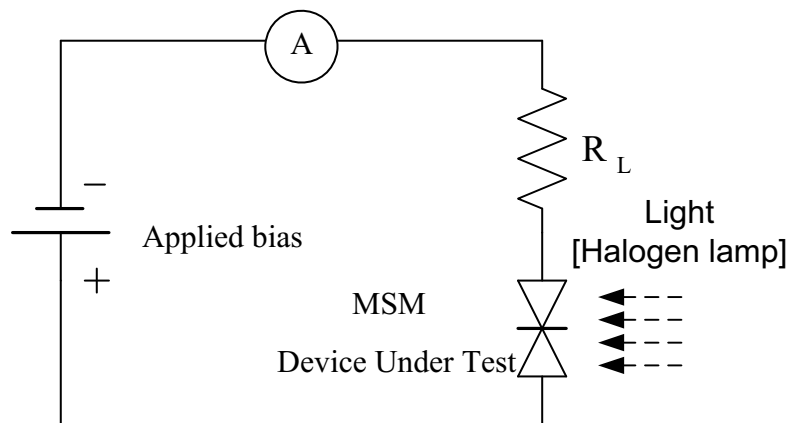
รูปที่ 4.15 เส้นสเปกตรัมของสัญญาณเดิมอคูเลทที่แรงดันไบแอส (ก) $V = 1 \text{ V}$ และ (ข) $V = 20 \text{ V}$ ที่ความถี่ 1 kHz ของอุปกรณ์ตัวเดียวกันกับที่แสดงผลในรูปที่ 4.11 ในโดเมนความถี่ ซึ่งวัดจากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแบบ FFT

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันไบแอส จึงอาจกล่าวได้ว่า เส้นสเปกตรัมที่ได้ไม่มีผลกระทบของสปีเรียสจากกระบวนการการเดิมอคูเลทของสัญญาณมอดูเลทคลื่นรูปไซน์ จากการสังเกตทั้งโดเมนเวลาและความถี่

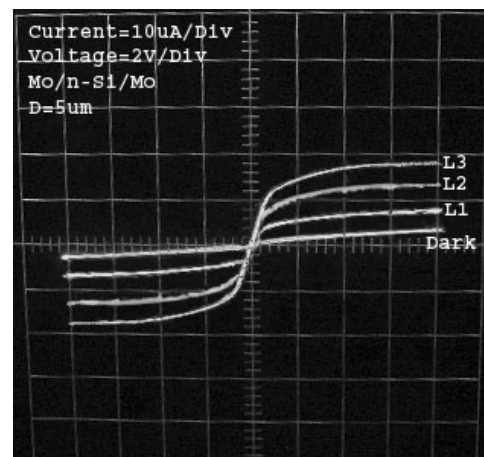
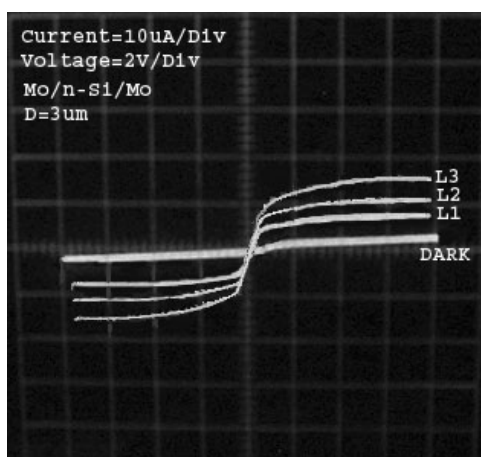
จากผลการทดลองในหัวข้อนี้ ทำให้เราเข้าใจถึงการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ด้วยการเพิ่มกระแสแสงจากหลอดลายแบบอินเตอร์ดิเจต อย่างไรก็ดีตามจากการสร้างหลอดลายแบบนี้จะทำให้อุปกรณ์มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อบางอย่างเกิดขึ้น ดังเช่น ในการทดลองต้องใช้เลนส์ขยายช่วย เพื่อให้แสงตกกระทบบนตัวอุปกรณ์อย่างสม่ำเสมอ เป็นต้น และจากผลการทดลองยังช่วยยืนยันถึงผลกระทบของคุณสมบัติอิเล็กทรอนิกส์โอไรส ถึงแม้ว่าจะออกแบบให้มีโครงสร้างแบบอินเตอร์ดิเจตก็ตาม นอกจากนี้จากการทดลองยังไม่พบผลกระทบของความผิดเพี้ยนของสัญญาณจากการบวกรเดิมอคูเลท เมื่อให้แรงดันไบแอสมีค่ามากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติที่ดีเยี่ยมของการเดิมอคูเลทของอุปกรณ์ที่ถูกทดสอบ

4.6 การศึกษาลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีความกว้างแคบมาก

การวัดผลการตอบสนองทางแสงด้านกระแสตรง ของตัวตรวจจับทางแสงแบบโครงสร้างเชิงราบ MSM ด้วยวงจรในรูปที่ 4.16 โดยใช้ตัวอย่างชิ้นงานสิ่งประดิษฐ์โครงสร้างเชิงราบ Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแคบมากระหว่าง $2\text{-}10\text{ }\mu\text{m}$ ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจนกระแสตรงโดยที่กระแสมีด้นนั้นมีค่าต่ำกว่าระดับไมโครแอมป์ที่แรงดัน 10 โวลท์ และที่ภายใต้เงื่อนไขของแสงที่ตกกระทบพบว่ากระแสมีค่าเพิ่มมากขึ้นจนเข้าสู่สภาวะกระแสอิ่มตัว Saturation current ที่ทุกระดับความเข้มแสงดังแสดงในรูปที่ 4.17 อันเนื่องจากการที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้านั้นแคบมาก เมื่อให้แรงดันไบแอสเพิ่มขึ้น ทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายจนถึงบริเวณขั้วไฟฟ้าด้านแอโนด Full depletion width อันเนื่องจากการเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮลที่มากขึ้น ณ บริเวณปลอดพาหะนี้ ตามการเพิ่มขึ้นของแรงดันไบแอส

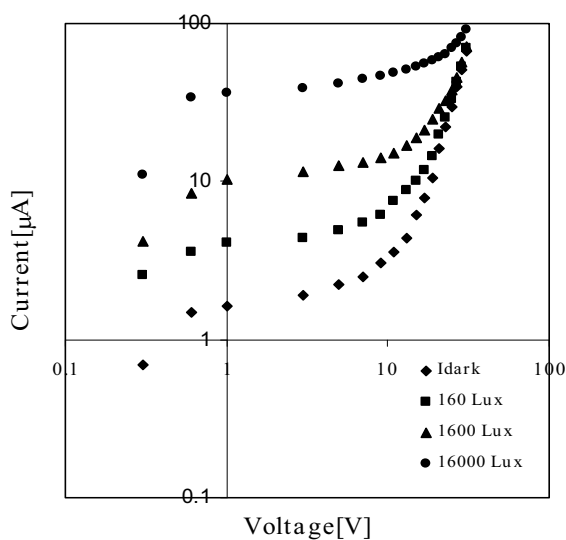


รูปที่ 5.16 วงจรที่ใช้ในการทดลองวัดคุณสมบัติของกระแสกับแรงดัน

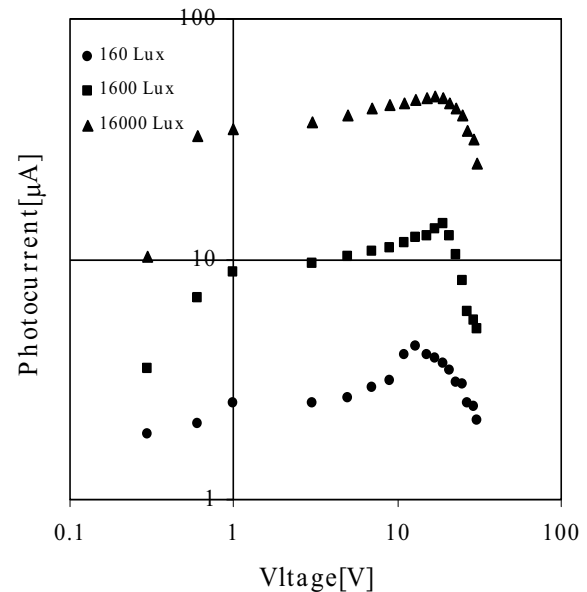


รูปที่ 4.17 ลักษณะกระแส กับแรงดันทดสอบด้วย Curve-Tracer ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า $3\text{ }\mu\text{m}$ และ $5\text{ }\mu\text{m}$ ที่ความเข้มแสง L_1, L_2 และ L_3

เพื่อเปรียบเทียบผลของบริเวณปลอดพาหะที่แผ่ขยายไปจากขั้วคาโทดจนถึงขั้วแอโนด จะพิจารณาภายใต้เงื่อนไขที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน พบว่ากระแสมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามลักษณะกระแสอิ่มตัวก่อนที่จะถึงช่วงแรงดันพังทลายซึ่งกระแสจะมีการเพิ่มขึ้นตามผลการทวีคูณอย่างอวาลันซ์ (Avalanche multiplication) ดังในรูปที่ 4.18 โดยที่ความเข้มแสงต่ำๆ และที่แรงดันไบแอสก่อนการพังทลายนั้นกระแสแสงจะเพิ่มขึ้นน้อยมากเมื่อแรงดันไบแอสเพิ่มขึ้น และในขณะที่มีความเข้มแสงสูงมาก จะทำให้กระแสแสงเพิ่มสูงมากในลักษณะที่ขึ้นกับแรงดันไบแอสนั้นเนื่องจากส่วนรับแสง ระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เป็นส่วนของเนื้อซิลิคอนซึ่งเป็นบริเวณปลอดพาหะ ได้ดูดกลืนแสงอย่างมากก่อให้เกิดคู่ของอิเล็กตรอน-โฮลสูงมากจากกระบวนการดริฟท์ (Drift processed) จะทำให้อิเล็กตรอน และโฮลวิ่งในทิศทางตรงกันข้ามได้อย่างรวดเร็ว



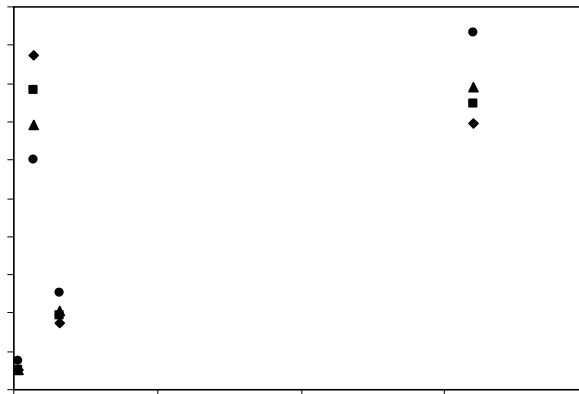
(ก)



(ข)

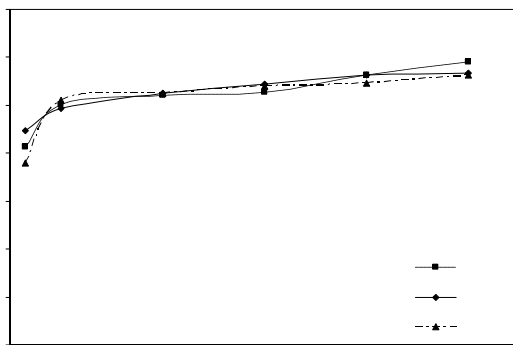
รูปที่ 4.18 (ก) ความสัมพันธ์ของ Current-Voltage และ (ข) Photocurrent-Voltage ของ Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า $2\ \mu\text{m}$ ที่ความเข้มแสง ต่างๆ

เมื่อพิจารณาผลของความเข้มแสงที่มีต่อโฟโตไดโอดโครงสร้างเชิงราบ ที่มีขั้วไฟฟ้าแคบมากนี้จะพบว่ากระแสแสงนี้ยังคงเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสง แต่ที่แรงดันในช่วง 1-5 โวลต์ ก่อนการพังทลายจะพบว่ากระแสแสงจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่ที่แรงดันเข้าสู่แรงดันพังทลายที่แรงดันไบแอส 15 โวลต์ จะพบว่ากระแสแสงมีค่าสูงมาก ดังในรูปที่ 4.19

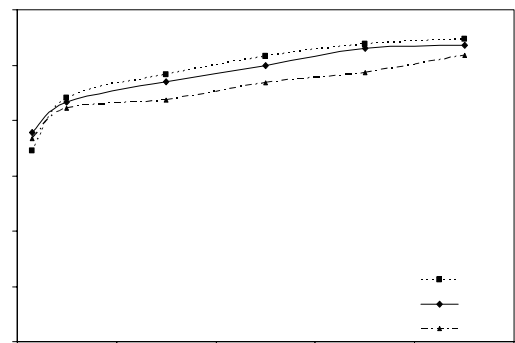


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความเข้มแสงที่แรงดันไบแอส 1, 3, 5 และ 15 โวลต์

จากการพิจารณาความสัมพันธ์ของกระแสแสงกับแรงดันในการทดสอบดังในรูปที่ 4.20 ซึ่งมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าต่างกันที่ 2, 5 และ 10 μm ที่ความเข้มแสง 160 และ 1600 ลักซ์ จะพบว่ากระแสแสงนั้นจะไม่เพิ่มขึ้นตามระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น



(ก) ความเข้มแสง 160 ลักซ์



(ข) ความเข้มแสง 1600 ลักซ์

รูปที่ 4.20 ลักษณะ Photocurrent-Voltage ของ MSM-PDs ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2, 5 และ 10 μm ที่ความเข้มแสง 160 และ 1600 ลักซ์

จากรอยสัมผัสขั้วต่อที่ระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ของโฟโตไดโอดโครงสร้างเชิงราบของ Mo/n-Si/Mo ซึ่งพบว่าบริเวณปลอดพาหะนั้นจะมีการขยายเพิ่มมากขึ้นกับแรงดัน จากการคำนวณหาความกว้างบริเวณปลอดพาหะ Depletion region Width: $W(V)$ ที่แผ่ขยายออกทางด้านข้างโดยการพิจารณาแบบหนึ่งมิติ 1-dimensional model ที่ขั้วไฟฟ้าด้านคาโทดตั้งสมการที่ (4.2) ด้วยค่าตัวแปรดังในตารางที่ 1 ในการคำนวณจะ

ใช้วิธีการของ SOR (Successive Over Relaxation)-Newton method ซึ่งเป็นวิธีการที่เหมาะสม โดยเริ่มต้น จะใช้สมการความต่อเนื่องของพาหะ carrier continuity equation

$$\text{div}(J_n + J_p) + q \frac{d}{dt}(p - n) = 0 \quad (t : \text{time}) \quad (4.2)$$

โดยที่ J_n และ J_p เป็นความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอน(n) และโฮล (p) และความเข้มข้นของอิเล็กตรอน กับโฮลที่ขึ้นกับคาบเวลา ซึ่งประจุพาหะที่เกิดขึ้นมานี้จะสมมุติให้ไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของเวลา ดังนั้น การเกิดขึ้นของกระแสอันเนื่องจากอิเล็กตรอน และกระแสอันเนื่องจากโฮล จะมีทั้งการเสริมกัน (source) และหักล้างกัน (sink) ดังความสัมพันธ์นี้

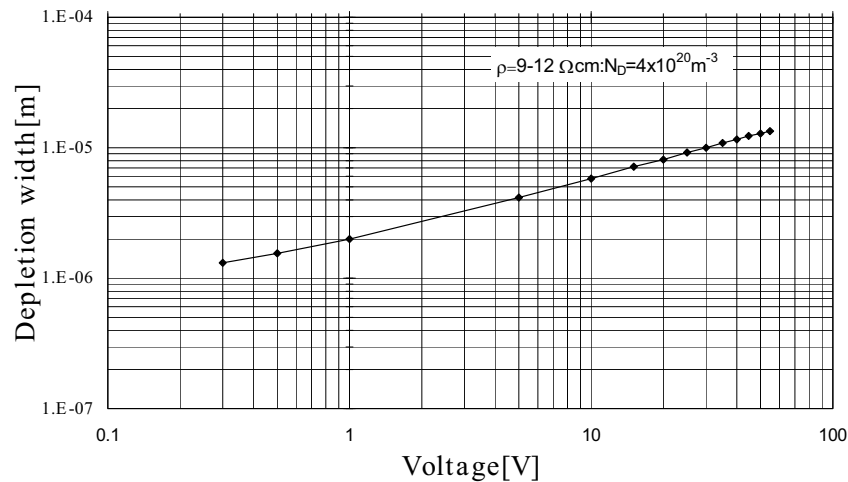
$$\text{div}J_n - q \frac{dn}{dt} = qR \quad (4.3)$$

$$\text{div}J_p + q \frac{dp}{dt} = -qR \quad (4.4)$$

โดยที่ R เป็นอัตราการเกิดขึ้น (generation) และ/หรือการรวมตัวกัน (recombination) ดังนั้นภายใต้ ภาวะวนการนี้ได้ใช้เงื่อนไขสถานะคงตัว (steady-state condition) โดยกำหนดให้ generation rate และ recombination rate มีค่าเท่ากัน ในส่วนสมการที่สองที่ถูกนำมาใช้นั้นจะเป็นสมการ Poisson's equation ดังมี รายละเอียดดังนี้

$$\text{div} \cdot \text{grad}\psi = \frac{q}{\epsilon_s}(n - p - N_D + N_A) \quad (4.5)$$

โดยที่ ψ นั้นคือ ค่าพลังงานศักย์ที่เกิดขึ้นตกคร่อมบนรอยสัมผัสในโครงสร้างของโฟโตไดโอด ส่วน N_D และ N_A เป็นความเข้มข้นของอะตอมผู้ให้ (donor) กับอะตอมผู้รับ (acceptor)



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างบริเวณปลอดพาหะกับแรงดันไบแอสที่ซิลิคอนมีสภาพความต้านทาน $\rho=10 \Omega\text{-cm}$

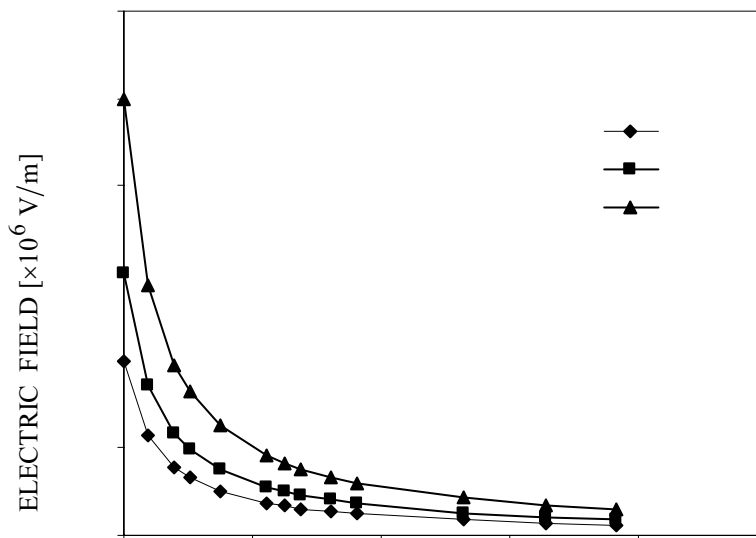
จากการคำนวณพบว่าบริเวณปลอดพาหะได้แผ่ขยายเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นกับแรงดันไบแอส จากผลการคำนวณพบว่าสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโฟโตไดโอดที่ใช้ฐานรองซิลิคอนที่มีสภาพความต้านทาน $\rho = 10 \Omega\text{-cm}$ ที่มีความเข้มข้นอะตอม $N_D = 4 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ $10 \mu\text{m}$ ดังในรูปที่ 4.21 นี้เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของกระแส กับแรงดันไบแอสนั้นจะพบว่าเมื่อบริเวณปลอดพาหะได้แผ่ขยายจากด้านคาโทดไปจนถึงด้านแอโนดนั้นจะพบว่ากระแสแสงนั้นจะไม่เพิ่มขึ้นมากในช่วงแรงดันที่ทำให้บริเวณปลอดพาหะแผ่ขยายไปถึงขั้วแอโนด

ตารางที่ 1 : สัญลักษณ์และ ค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ

Symbol	Value
V : applied bias	1-10V
V_{bi} : built-in voltage of the Mo/n-Si	0.23 eV
$W(V)$: depletion region width	$\sqrt{[\beta(V_{bi} + V)]}$
$\beta = 2\varepsilon_s / qN_D$	$16.5 \mu\text{m}^2/\text{V}$
ε_s : permittivity of semiconductor	$1.054 \times 10^{-10} \text{ F/m}$
q : elementary charge	$1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$
N_D : donor concentration	$4 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$

ในการคำนวณนี้จะกำหนดให้ความกว้างของขั้วไฟฟ้าทั้งสองห่างกัน $2\ \mu\text{m}$ และสมมุติให้อัตราการเกิดขึ้น (generation) และ/หรือการรวมตัวกัน(recombination): R ที่สภาวะด้านที่บัสแสงมีค่าเท่ากับ $2.9 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}\text{sec}^{-1}$ ดังนั้นจากผลการคำนวณเมื่อทำการให้แรงดันไบแอสค่าต่างๆ จะสามารถแสดงผลของศักย์ตาไฟฟ้าที่ปรากฏขึ้นเมื่อบริเวณส่วนของบริเวณปลอดพาหะ Space-Charge-Region: SCR ที่แผ่ขยายออกตามแนวราบบนผิวหน้าของพื้นที่รับแสงระหว่างขั้วไฟฟ้า ซึ่งจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามแรงดันไบแอสที่ได้จากการคำนวณนี้จะพบว่า บริเวณปลอดพาหะจะขยายออกไป $5\ \mu\text{m}$ ที่แรงดันไบแอส 2 โวลต์ จากการคำนวณนี้เป็นการยืนยันได้ว่าส่วนของบริเวณปลอดพาหะ นั้นได้แผ่ขยายออกตามค่าของแรงดันไบแอสที่ให้กับสิ่งประดิษฐ์โครงสร้างเชิงราบแบบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

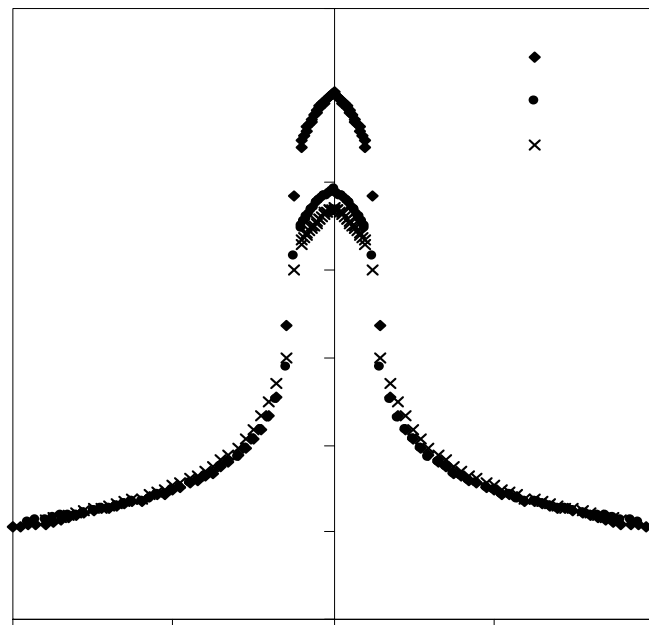
จากโครงสร้าง MSM ที่ออกแบบสร้างขึ้นมามีขนาดของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแคบมากเมื่อขั้วคาโทดได้รับการไบแอส จะทำให้บริเวณปลอดพาหะนั้นขยายออกไปจนถึงขั้วไฟฟ้าด้านแอโนด ดังนั้นกระแสที่ได้จะเป็นกระแสของไดโอดเพียงอย่างเดียว และปริมาณของกระแสที่เพิ่มขึ้นจากกระบวนการดริฟท์ drift process ด้วยคู่ของ อิเล็กตรอน และโฮลวิ่งในทิศทางตรงกันข้ามภายใต้สนามไฟฟ้าที่บริเวณปลอดพาหะนี้ ซึ่งผลจากการคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณขอบของขั้วคาโทดที่เป็นรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ Mo/n-Si มีค่าสูงมากและจะค่อยๆ ลดต่ำลงที่ระยะของบริเวณปลอดพาหะเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.22 และค่าของสนามไฟฟ้านี้จะเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบแอสที่ 2V, 3V และ 5V



รูปที่ 4.22 ผลการจำลองการคำนวณแบบ หนึ่งมิติ quasi-1D model หาสนามไฟฟ้าที่ขั้วคาโทดของรอยสัมผัสชนิดคีย์

4.7 ลักษณะสมบัติของความจุไฟฟ้ากับแรงดัน ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดแคบมาก

การทดสอบลักษณะสมบัติของความจุไฟฟ้ากับแรงดัน เพื่อต้องการทราบความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการเปลี่ยนแรงดันไบแอส ที่สภาวะมืด (dark condition) ภายใต้การไบแอสย้อนกลับจากรูปที่ 4.23 แสดงว่าลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดันมีความสมมาตรกัน ความจุไฟฟ้าที่วัดได้จะแปรผกผันกับแรงดันไบแอส ซึ่งลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดันนี้มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวัดโดย Sze et al. ความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง เมื่อให้แรงดันไบแอสมีค่ามากขึ้น จากการที่กระแสเพิ่มขึ้นจากการจ่ายแรงดันไบแอสซึ่งมีความสัมพันธ์กับการแผ่ขยายออกของบริเวณปลอดพาหะที่บริเวณพื้นที่รับแสงระหว่างขั้วไฟฟ้า ซึ่งบริเวณขอบเขตนี้ประกอบด้วยบริเวณ 2 ส่วนด้วยกันคือขอบบริเวณปลอดพาหะ (depletion region) และบริเวณที่เป็นเนื้อของซิลิคอน (neutral region) โดยบริเวณปลอดพาหะจะแผ่ขยายเพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของแรงดันไบแอสและในขณะเดียวกันเนื้อของซิลิคอนก็จะลดต่ำลง จากลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดัน โดยในที่นี้เป็นผลจากการที่รอยสัมผัสโลหะ กับสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบขอตกียน์จะมีการแผ่ขยายตัวออกเมื่อได้รับการไบแอส ทำให้เกิดเป็นตัวเก็บประจุ ที่ต่ออนุกรมกันอยู่ดังนั้นความจุไฟฟ้ารวมสามารถแสดงได้ดังนี้



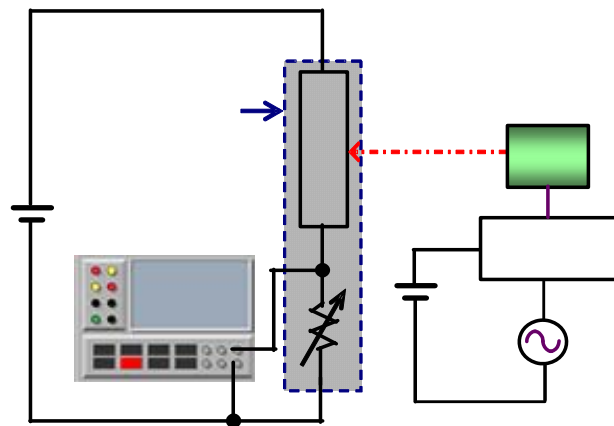
รูปที่ 4.23 ความจุไฟฟ้า-แรงดันของโครงสร้าง Mo/n-Si/Mo ที่มีความสมมาตรกันโดยที่ความจุไฟฟ้าจะแปรผกผันกับแรงดันไบแอส

4.7.1 การวัดสัญญาณแสงของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ในลักษณะสัญญาณแบบกระแสสลับ (ac) ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดแคบ

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อให้ทราบถึงเทคนิคการตรวจวัดแสงในลักษณะสัญญาณแบบ ac โดยการมอดูเลตสัญญาณคลื่นรูปไซน์ (Sinusoidally waveform) เข้ากับวงจรมอดูเลตกับเลเซอร์ไดโอดเลเซอร์ (Modulation circuit amplifier) แล้วนำไปทดสอบกับอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่สร้างขึ้นมา ซึ่งได้ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปกับความถี่ของคลื่นรูปไซน์

การตอบสนองสัญญาณแสงความถี่ต่ำของ Mo/n-Si/Mo ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดแคบ

นำอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo มาทำการทดลองสัญญาณแสงในลักษณะสัญญาณแบบ ac เพื่อหาการตอบสนองสัญญาณแสงของ เลเซอร์ที่มีการมอดูเลตสัญญาณคลื่นรูปไซน์ โดยการผสมสัญญาณความถี่ของคลื่นรูปไซน์จะเปลี่ยนแปลงในช่วงประมาณ 100 Hz-1 MHz เข้ากับวงจรขยายสัญญาณให้กับเลเซอร์ไดโอด



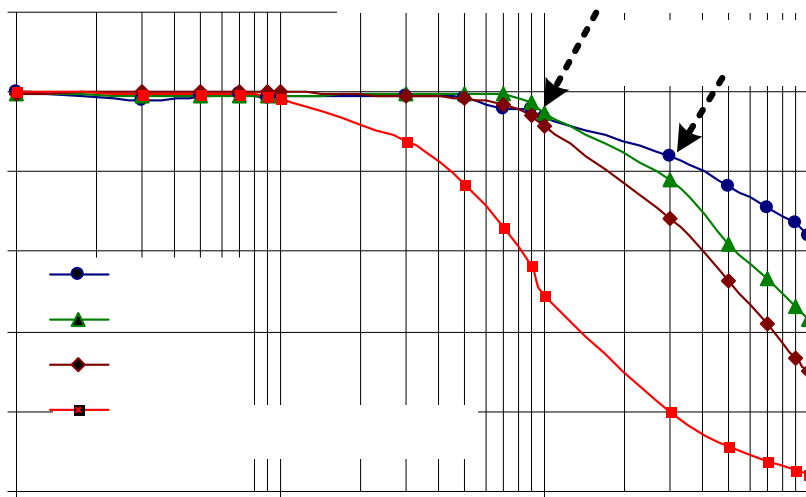
รูปที่ 4.24 แผนภาพชุดเครื่องมือทดลอง เพื่อหาการตอบสนองสัญญาณทางแสงความถี่ต่ำของ Mo/n-Si/Mo

จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4.24 แสดงการตอบสนองทางแสงสำหรับชิ้นงานที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 10 μm และนำโหนดความต้านทานมาต่อเชื่อมกับอุปกรณ์แบบอนุกรม โดยให้โหนดความต้านทานเป็นตัวพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงจาก 100 Ω ถึง 10 k Ω โดยให้แกนตั้งของกราฟเป็นสัญญาณการตอบสนองของโหนดความต้านทานที่ถูกนอร์มอลไรซ์ (normalized) เนื่องจากสัญญาณแสง ส่วนแกนนอนเป็นแกนของความถี่ตั้งแต่ 100 Hz-1 MHz ในรูปที่ 4.25 นี้เส้นกราฟของโหนดความต้านทานที่มีค่าน้อยความถี่เทิร์นโอเวอร์ (turn-over frequency)¹ จะมี 2 ค่า กล่าวคือ ในกรณีของเส้นกราฟที่มีโหนดความต้านทานเป็น 100 Ω ความถี่เทิร์นโอเวอร์อยู่ที่ประมาณ 100 และ 300 kHz โดยความถี่เทิร์นโอเวอร์ที่มีค่า

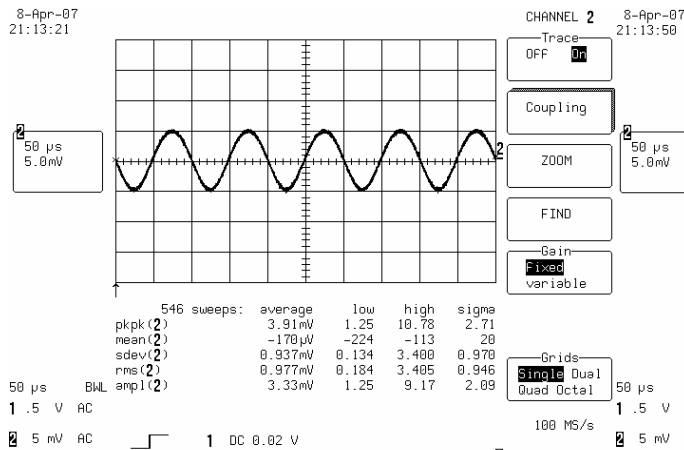
¹ ความถี่เทิร์นโอเวอร์ หมายถึง ความถี่ที่ทำให้สัญญาณการตอบสนองทางแสง (กระแสแสง หรือแรงดัน) มีการเปลี่ยนแปลงลดลงจนสามารถสังเกตได้

น้อยจะถูกเรียกว่า ความถี่เทิร์นโอเวอร์ค่าต่ำ (Lower Turn-over Frequency : LTF) ในที่นี้มีค่าประมาณ 100 kHz ในส่วนความถี่เทิร์นโอเวอร์ที่มีค่ามากจะเรียกว่า ความถี่เทิร์นโอเวอร์ค่าสูง (Higher Turn-over Frequency : HTF) และมีค่าประมาณ 300 kHz ส่วนกราฟของโหนดความต้านทาน $10\text{ k}\Omega$ จะพบความถี่ LTF อยู่ที่ประมาณ 10 kHz และความถี่ HTF มีค่าประมาณ 300 kHz

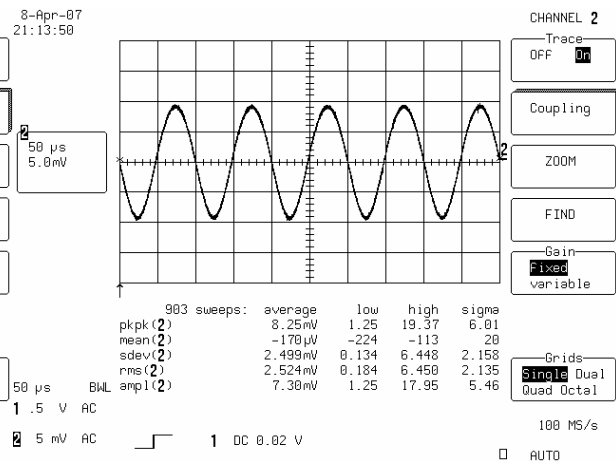
ผลการทดลองที่อธิบายไว้ข้างต้นทำให้ทราบว่า ในกรณีความถี่ LTF จะมีค่าเท่าเดิมไม่เปลี่ยนแปลง ถึงแม้ว่าโหนดความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงไปจาก $100\text{ }\Omega$ เป็น $1\text{ k}\Omega$ ก็ตามจะแตกต่างกับกรณีของความถี่ HTF โดยมีความถี่เปลี่ยนแปลงลดลงจาก 300 kHz เป็น 100 kHz เมื่อโหนดความต้านทานมีค่าเป็น $100\text{ }\Omega$ และ $10\text{ k}\Omega$ ตามลำดับ แต่ถ้าให้โหนดความต้านทานมีค่ามากขึ้นเป็น $20\text{ k}\Omega$ และ $200\text{ k}\Omega$ พบว่าสัญญาณการตอบสนองทางแสงที่ได้จะแตกต่างออกไป จะมีความถี่เทิร์นโอเวอร์เพียงค่าเดียวเท่านั้น และขนาดสัญญาณที่ได้จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ถ้าให้โหนดความต้านทานมีค่าสูงมากๆ



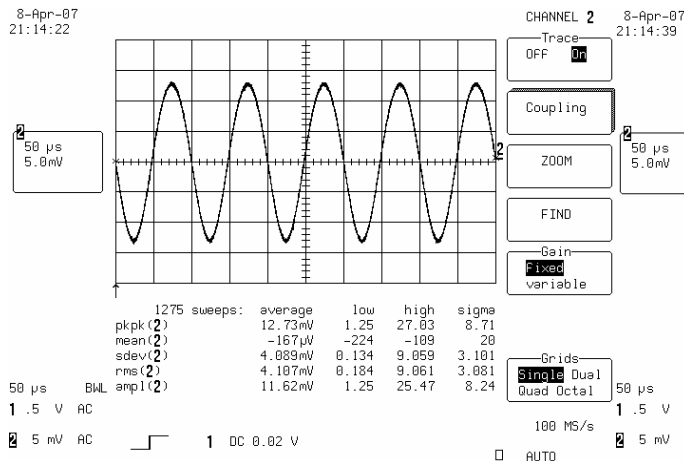
รูปที่ 4.25 การตอบสนองสัญญาณแสงของตัวตรวจจับแสง Mo/n-Si/Mo ที่มีขนาดของระยะห่างขั้วไฟฟ้า $10\text{ }\mu\text{m}$ และค่าโหนดความต้านทาน (R_L) ระหว่าง $100\text{ }\Omega$, $500\text{ }\Omega$, $1\text{ k}\Omega$ และ $10\text{ k}\Omega$ ที่แรงดันไบแอส 5V



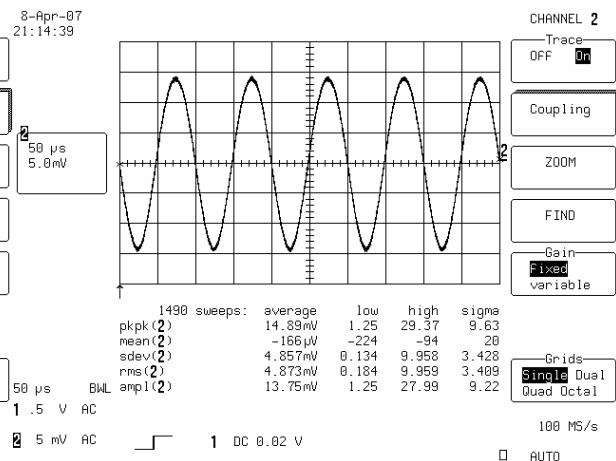
(ก) ที่แรงดันไบแอส 1V



(ข) ที่แรงดันไบแอส 3V



(ค) ที่แรงดันไบแอส 5V



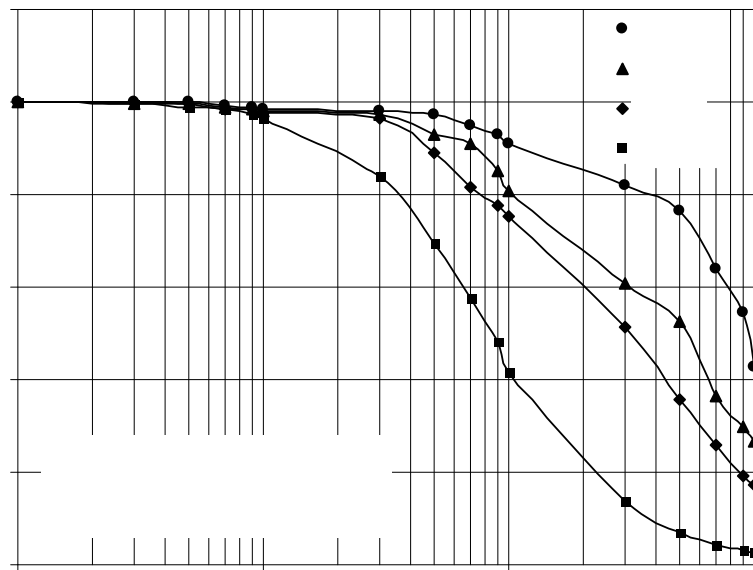
(ง) ที่แรงดันไบแอส 7V

รูปที่ 4.26 การตอบสนองสัญญาณด้วยออสซิลโลสโคปของการติมอดูเลทสัญญาณรูปคลื่นที่มีความถี่ 10 kHz โดยมีภาระความต้านทาน (R_L) 1 k Ω ในโดเมนเวลาที่แรงดันไบแอส (ก) 1 V, (ข) 3 V, (ค) 5V และ (ง) 7V

จากการทดลองด้วยการตอบสนองแสงของตัวตรวจวัดแสง Mo/n-Si/Mo ที่มีขนาดของระยะห่างขั้วไฟฟ้า 10 μ m ผลการตอบสนองสัญญาณด้วยออสซิลโลสโคปของการติมอดูเลทสัญญาณรูปคลื่นที่มีความถี่ 10 kHz โดยมีภาระความต้านทาน (R_L) 1 k Ω ที่ค่าแรงดันไบแอสจากช่วงแรงดัน 1-7V จะพบว่าเมื่อให้แรงดันเอ้าท์พุทนั้นได้ขยายเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบแอสที่ให้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขนาดของสัญญาณเอ้าท์พุทที่เพิ่มขึ้นนั้นจะเป็นผลของบริเวณหลอดพาหะที่ขยายตัวเพิ่มมากขึ้น ที่ในช่วงแรงดันไบแอสก่อนการพังทลายซึ่งในช่วงของแรงดันไบแอสดังกล่าวนี้เป็นช่วงที่มีกระแสแสงอิมิต ดังนั้นกระแสเอ้าท์พุทที่เป็นกระแสแสงจะไม่เพิ่มขึ้นมากนักนั้นก็แสดงให้เห็นว่าบริเวณหลอดพาหะนั้นได้ขยายออกไปจนสุดถึงขั้วไฟฟ้าอีกด้านหนึ่งตามผลการคำนวณในรูปที่ 4.26

จากผลการทดลองกับโฟโตไดโอดโครงสร้างเชิงราบ MSM เมื่อให้แรงดันไบอัสเพิ่มขึ้นจะทำให้บริเวณหลอดพาหะได้ขยายออกไปในแนวราบที่บริเวณผิวหน้าของพื้นที่รับแสงระหว่างขั้วคาโทดและแอโนด โดยบริเวณหลอดพาหะนี้จะขยายออกไปจนเต็มพื้นที่รับแสง(Full depleted region) และเมื่อมีความเข้มแสงตกกระทบกับบริเวณหลอดพาหะจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกับโฮลเกิดการเคลื่อน โดยโฮลจะเกิดการดริฟท์(Drift)ตรงไปยังด้านแคโทดภายใต้การกระทำของสนามไฟฟ้าที่สูงมากและอิเล็กตรอนก็จะเคลื่อนที่ไปยังด้านแอโนด ทำให้เกิดกระแสไหลสว่างจรวดนอกด้วยกระแสแสงและกระแสมืด จากการทดสอบด้วยผลการตอบสนองสัญญาณกระแสลับ แสดงให้ทราบว่าสัญญาณเอาต์พุตมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยที่แรงดันไบอัสเพิ่มขึ้นจนบริเวณหลอดพาหะได้ขยายจนถึงขั้วไฟฟ้าอีกด้านหนึ่งจะพบว่า สัญญาณกระแสเอาต์พุตมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในช่วงกระแสอิ่มตัวดังนั้นอิเล็กตรอนกับโฮลจะเคลื่อนที่ได้โดยตรงที่บริเวณหลอดพาหะนี้ การตอบสนองสัญญาณแสงความถี่ต่ำของ Mo/n-Si/Mo ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดแคบ

การทดสอบการตอบสนองสัญญาณกระแสลับที่ความถี่ต่ำด้วยการมอดูเลตสัญญาณคลื่นรูปไซน์(Sinusoidal waveform) ในช่วง 1kHz ถึง 1 MHz เข้ากับวงจรผสมสัญญาณเข้ากับเลเซอร์ไดโอด(Modulation circuit amplifier)



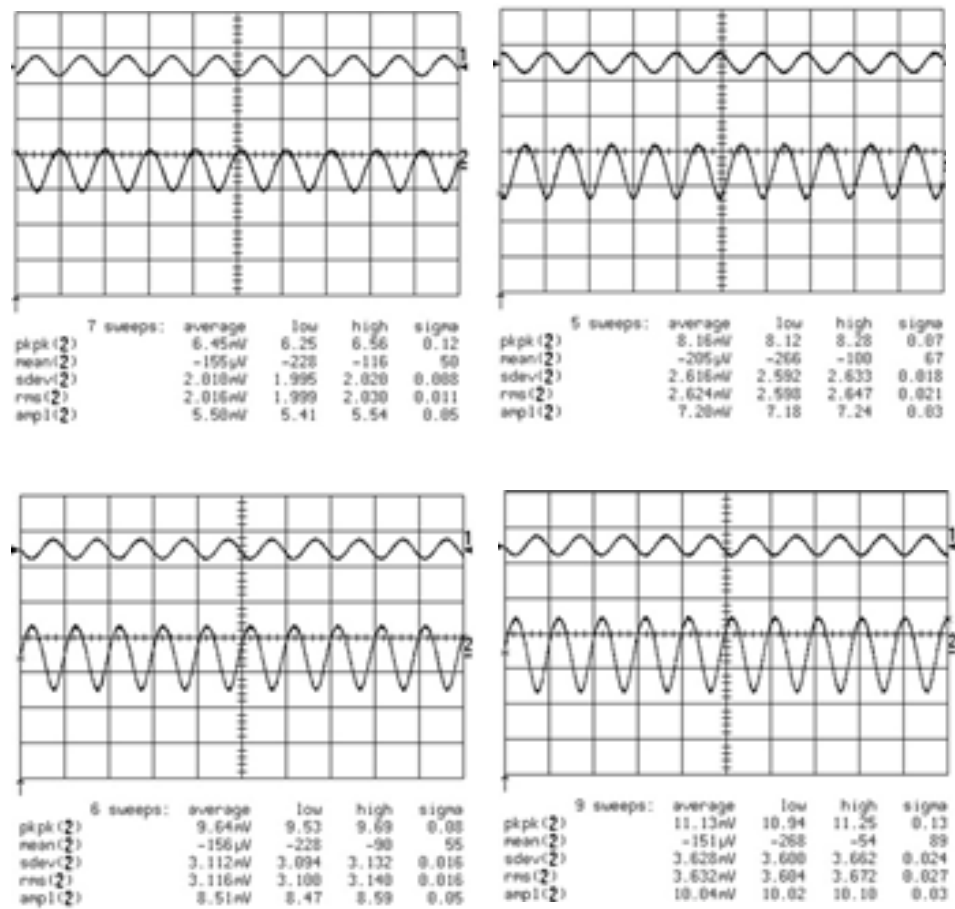
รูปที่ 4.27 การตอบสนองสัญญาณแสงที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า $3 \mu\text{m}$ และโหลดความต้านทาน (R_L) 100Ω , 500Ω , $1 \text{ k}\Omega$ และ $10 \text{ k}\Omega$

การตอบสนองทางแสงที่โหลดความต้านทานที่ต่อแบบอนุกรม โดยให้โหลดความต้านทานเป็นตัวพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงจาก 100Ω ถึง $10 \text{ k}\Omega$ โดยให้สัญญาณการตอบสนองของโหลดความต้านทานที่ถูกนอร์มอลไรซ์ (normalized) เนื่องจากสัญญาณแสง กับความถี่ตั้งแต่ 100 Hz - 1 MHz ในรูปที่ 4.27 นี้

เส้นกราฟของโหลดความต้านทานที่มีค่าน้อยความถี่เทิร์นโอเวอร์ (turn-over frequency)¹ จะมี 2 ค่า คือ ในกรณีที่โหลดความต้านทานเป็น $100\ \Omega$ ความถี่เทิร์นโอเวอร์อยู่ที่ประมาณ 100 และ 300 kHz โดยความถี่เทิร์นโอเวอร์ที่มีค่าน้อยจะถูกเรียกว่า ความถี่เทิร์นโอเวอร์ค่าต่ำ (Lower Turn-over Frequency : LTF) ในที่นี้มีค่าประมาณ 100 kHz ในส่วนความถี่เทิร์นโอเวอร์ที่มีค่ามากจะเรียกว่า ความถี่เทิร์นโอเวอร์ค่าสูง (Higher Turn-over Frequency : HTF) และมีค่าประมาณ 300 kHz ส่วนกราฟของโหลดความต้านทาน $10\ k\Omega$ จะพบความถี่ LTF อยู่ที่ประมาณ 10 kHz และความถี่ HTF มีค่าประมาณ 300 kHz

ผลการตอบสนองสัญญาณด้วยออสซิลโลสโคปของการติมอดูเลทสัญญาณรูปคลื่นที่มีความถี่ 10 kHz โดยมีภาระความต้านทาน (R_L) $1\ k\Omega$ ที่ค่าแรงดันไบแอส $V = 3, 5, 7, 10\text{V}$ มีแรงดันเอาต์พุตที่ตกคร่อมความต้านทาน $V_0 = 6.45, 8.12, 9.64, 10.94\text{ mV}$ ดังแสดงในรูปที่ 5.28 แสดงว่าขนาดของสัญญาณเอาต์พุตที่เพิ่มขึ้นนั้นเป็นผลของกระบวนการดริฟท์ drift process ที่บริเวณปลดพาหะในช่วงแรงดันไบแอสก่อนการพังทลายซึ่งในช่วงของแรงดันไบแอสดังกล่าวนั้นเป็นช่วงที่มีกระแสแสงอิมิต์ ดังนั้นกระแสเอาต์พุตที่เป็นกระแสแสงจะไม่เพิ่มขึ้นมากนักนั้นก็แสดงให้ทราบได้ว่าบริเวณปลดพาหะนั้นได้ขยายออกไปจนถึงขั้วไฟฟ้าอีกด้านหนึ่ง ตามผลการคำนวณในรูปที่ 4.21 โดยในการตอบสนองที่ความถี่ต่ำนั้นจะเหมือนการตอบสนองทางด้านกระแสตรงที่เป็นการตอบสนองกระแสจากการแพร่ diffusion current

¹ ความถี่เทิร์นโอเวอร์ หมายถึง ความถี่ที่ทำให้สัญญาณการตอบสนองทางแสง (กระแสแสง หรือแรงดัน) มีการเปลี่ยนแปลงลดลงจนสามารถสังเกตได้



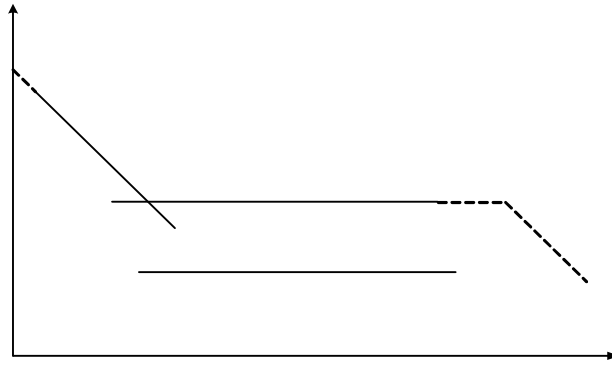
รูปที่ 4.28 การตอบสนองสัญญาณด้วยสัญญาณรูปคลื่นที่ความถี่ 10 kHz โดยมีภาระความต้านทาน (R_L) 1 k Ω ในโดเมนเวลาที่มีแรงดันไบแอส (ก) 3 V ,(ข) 5 V ,(ค)7V และ (ง)10V [input CH1:200mV,output CH2:5mV]

บทที่ 5

สมบัติสัญญาณรบกวนของตัวรับรู้ทางแสงโครงสร้างเชิงราบแบบ MSM ที่มีความกว้างระหว่างขั้วไฟฟ้ากว้างมาก

หลักการทำงานของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้างเชิงราบแบบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ MSM มีความสามารถในการตรวจจับปริมาณของแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังตัวตรวจจับชนิดนี้จึงได้รับการนำเข้าไปประกอบกับส่วนการรับสัญญาณทางแสงในลำดับแรก ดังนั้นด้วยเหตุที่สิ่งประดิษฐ์ชนิดนี้เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่เป็นชนิดคล็อกไดโอด โครงสร้างเชิงราบที่เป็นแบบสองขั้วไฟฟ้า ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในอันจะต้องมีการศึกษาผลกระทบต่างๆในตัวอุปกรณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่เกี่ยวกับสัญญาณรบกวน noise signal โดยปกติแล้วสัญญาณรบกวนที่ประกอบอยู่ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ มีอยู่ด้วยกันสามชนิด คือ Shot noise, $1/f$ noise หรือ Flicker noise และ Thermal noise หรือ Johnson noise

ช่วงของความถี่ที่สัญญาณรบกวน Shot noise จะปรากฏนั้นโดยส่วนใหญ่แล้วจะเป็นในช่วงที่มีการปฏิบัติในเวลานั้น กระนั้นก็ตามพาหะต่างที่เกิดขึ้นตรงบริเวณหลอดพาหะนั้นจะเกิดข้อจำกัดของการเคลื่อนที่พาหะ transit-time-limited ซึ่งจะเกิดขึ้นที่ความถี่สูงในย่าน GHz หรือ THz ดังนั้นสัญญาณรบกวนแบบ shot noise หรือ white noise เป็นช่วงที่ไม่ขึ้นกับความถี่ อีกทั้งยังขึ้นกับประมาณของกระแสที่กำเนิดจากตัวอุปกรณ์ ส่วนสัญญาณรบกวนแบบ Flicker noise นั้นจะขึ้นกับความถี่ที่เป็นส่วนกลับกับความถี่ บางครั้งเรียกว่า $1/f$ noise ดังนั้นสัญญาณรบกวนแบบ shot นี้จะปรากฏที่ความถี่ต่ำ อีกทั้งกระแสที่ไหลผ่านตัวอุปกรณ์ ส่วนในกรณีของ Thermal noise หรือ Johnson noise นั้นจะเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่แบบสุ่ม ซึ่งประจุพาหะนั้นมีการถูกกระตุ้นด้วยความร้อน ขนาดของสัญญาณรบกวนทั้งสามชนิดนี้สามารถแสดงดังรูป ที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงขนาดของสัญญาณรบกวนแบบ shot noise, Flicker noise และ Thermal noise

5.1 สัญญาณรบกวนแบบ Shot ของตัวรับรู้ทางแสงโครงสร้างเชิงราบแบบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ โลหะ

สมบัติของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบสองขั้วไฟฟ้า สามารถกำเนิดกระแสตรงเฉลี่ย เรียกว่า Shot noise ซึ่งขนาดของกระแสรบกวน $S(\omega)$ (Noise current) ที่ความถี่ต่ำเป็นผลเนื่องจากกระแสเฉลี่ย (Average current) I ที่ความถี่เชิงมุมค่าหนึ่ง (ω) สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$S(\omega) = 2qI \quad (A^2 / \text{Hz}) \quad (5.1)$$

โดยที่ q นั้นคือประจุมูลฐาน ในกรณีของทางปฏิบัติทั่ว ๆ ไปจะเรียกว่าระดับของ Full shot noise อย่างไรก็ตามจากสมการที่ (11) ในบางครั้งสามารถที่จะปรับให้เข้ากับสภาวะบางอย่างได้ดังนี้

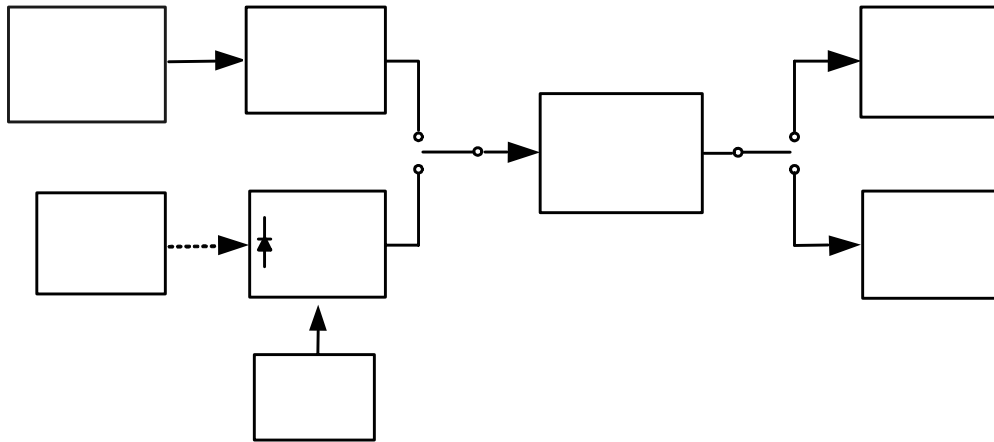
$$S(\omega) = 2qI\Gamma^2 \quad (A^2 / \text{Hz}) \quad (5.2)$$

โดยที่ Γ^2 คือ Noise ratio หรือ Noise factor ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงอัตราส่วนของสัญญาณรบกวนจนถึงระดับ Full shot noise

5.2 การวัดสัญญาณรบกวน

การวัดสัญญาณรบกวน (Noise) จะทดสอบในช่วง 3-100 kHz โดยมีขั้นตอนการวัดสัญญาณรบกวนแสดงดังรูปที่ 5.2 ซึ่งสัญญาณรบกวนจะถูกตรวจจับได้โดยผ่านความต้านทาน $2k\Omega$ ที่ต่ออยู่อย่างอนุกรมกับอุปกรณ์โดยที่แรงดันที่ตกคร่อมอยู่ที่ความต้านทานจะถูกนำเข้าสู่ภาคขยายสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ (Ithaco 1201) จากนั้นสัญญาณที่ผ่านการขยายจะถูกนำเข้าสู่ Lock-in voltmeter (NF 5560) โดยในระบบการวัดสัญญาณรบกวนจะทดสอบความถูกต้องของ

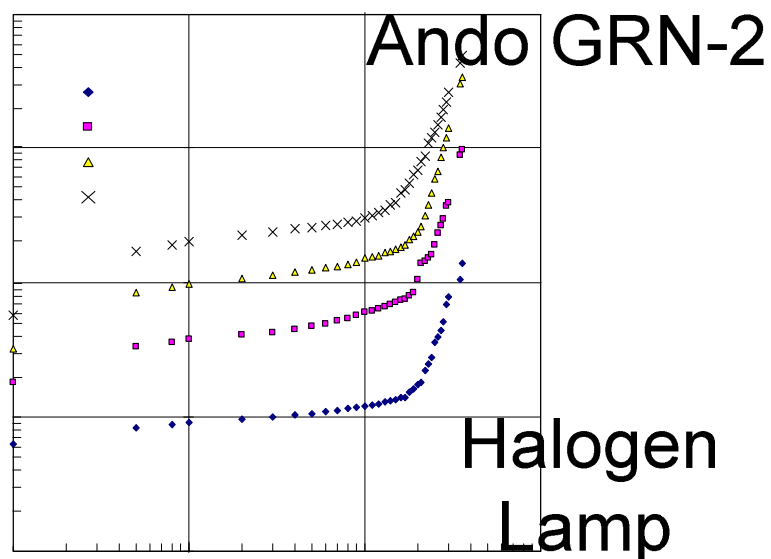
ระบบด้วย White noise generator (Ando GRN-2) ในที่นี่จะใช้แหล่งกำเนิดแสงกระแสตรงจากหลอดฮาโลเจนเพื่อให้แสงสว่างกับตัวการวัดทดสอบทั้งหมดกระทำที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 5.2. ภาพการวัดสัญญาณรบกวนการปรับเทียบระบบการวัดและการตรวจวัดตามคาบเวลาถูกควบคุมโดยสวิตช์ตัวที่ 1 และ 2

5.3 ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

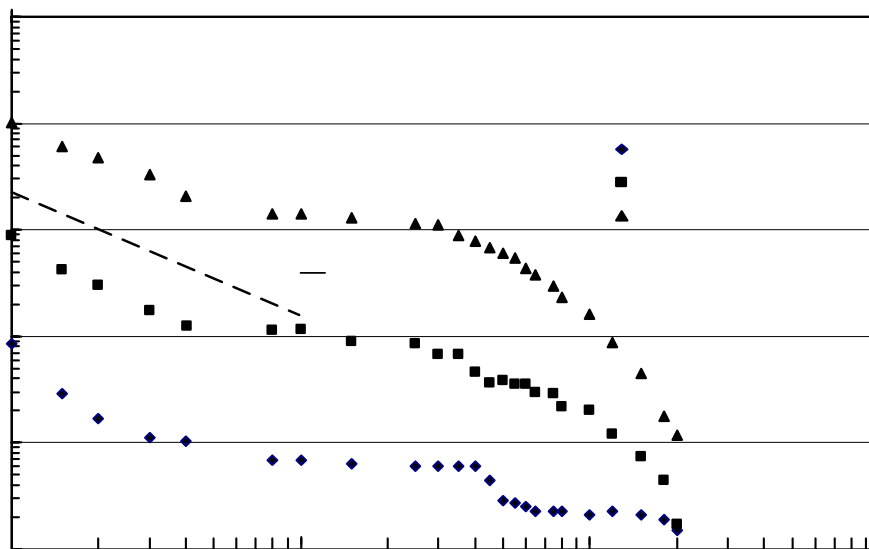
จากสมบัติความสัมพันธ์ใน Photocurrent-voltage (I_p -V) ภายใต้ระดับความเข้มแสงต่าง ๆ ดังในรูปที่ 5.3 ตัวอย่างชิ้นงานที่ทำการทดสอบมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ากับ 20 μm และที่ทุก ๆ ระดับความเข้มแสง พบว่ากระแสแสง จะเพิ่มขึ้นตามการขยายแผ่กว้างออกไปของบริเวณปลอดพาหะ (Depletion region) ที่บริเวณผิวหน้ารับแสงภายใต้แรงดันไบเอส



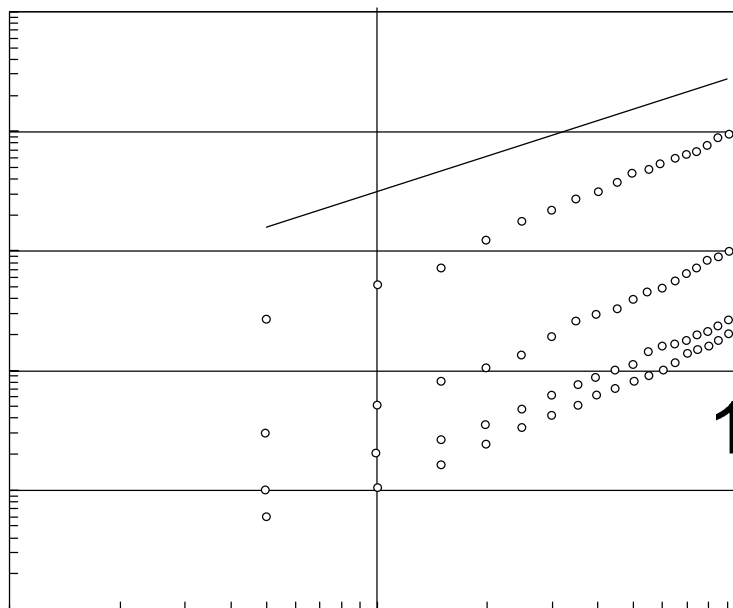
รูปที่ 5.3 สมบัติ Photocurrent-voltage ของ Mo/n-Si/Mo ที่มีความกว้างของอิเล็กโตรด 20 μm

5.3.1 ผลของสัญญาณรบกวนที่ขึ้นกับกระแสแสง

ในการวัดสัญญาณรบกวนที่ความถี่ต่ำในช่วง 10-100kHz พบว่าขนาดของสัญญาณรบกวน (Noise spectral density) ไม่ขึ้นกับกับความถี่ ส่วน Flicker noise จะปรากฏชัดที่ความถี่ต่ำกว่า 10kHz ดังแสดงในรูปที่ 5.4 ที่ซึ่งเส้นประนั้นจะแสดงถึงความชันของ Flicker noise และระดับ Full shot noise จากรูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง Noise-photocurrent ที่แรงดันไบแอส 0.5, 1, 3 และ 5 volt ที่ความถี่ 10 kHz จากการวัดสัญญาณรบกวนจะพบว่ากำลังงานสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนนั้นเป็นเส้นตรง ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 1 และ 2 เมื่อแรงดันไบแอสเพิ่มสูงขึ้นระดับสัญญาณรบกวนยังคงเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นเข้าใกล้ระดับ Full shot noise ตามสมการที่ 5.1 ดังนั้น อัตราส่วนของสัญญาณรบกวน (Noise ratio) ตามสมการที่ 5.2 นั้นจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบแอส เมื่อให้แรงดันไบแอส ที่ 0.5 V อัตราส่วนขนาดของ noise ratio นั้นมีขนาดต่ำกว่าระดับ Full shot noise ถึงสองอันดับ การที่อัตราส่วนของ noise ratio น้อยมากนั้นไม่สามารถอธิบายได้จากพาหะที่เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองในโครงสร้างแนวราบของ MSM



รูปที่ 5.4 ขนาดของสัญญาณรบกวนภายใต้แรงดันไบแอส 1,2 และ 3 V ที่ระดับกระแส 9.9 μA



รูปที่ 5.5 ขนาดสเปกตรัมของสัญญาณรบกวน กับกระแสแสงในโครง สร้างของ Mo/Si/Mo ที่ความถี่ 10 kHz ที่แรงดันไบแอสต่างๆ

สำหรับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำจะใช้ Autocorrelation function (Correlation function) $c(s)$ ซึ่งแสดงถึงจำนวนของพาหะที่เปลี่ยนแปลงตามคาบเวลา รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของกระแส I ตามคาบเวลา $(t+s)$ ในสารกึ่งตัวนำ โดยที่พาหะไม่เพียงแต่จะไหลเวียนมาถึงขั้วไฟฟ้าอีกด้านหนึ่งเท่านั้น แต่ยังคงมีการรวมตัวกันใหม่และกระจายตัวภายในเนื้อสารตามผลที่เกิดขึ้นดังนี้

$$c(s) = (1 - s/\tau_2) \exp(-s/\tau_1) \quad \text{for} \quad s < \tau_2 \quad (5.3)$$

และ

$$c(s) = 0 \quad \text{for} \quad s > \tau_2 \quad (5.4)$$

ซึ่ง τ_1 คือ เวลาเฉลี่ยอิสระ (Average free time) ของพาหะที่เกิดขึ้นเนื่องจากแสงที่ตกกระทบและเกิดการรวมตัวกันใหม่ ส่วน τ_2 คือ เวลาเฉลี่ยของพาหะ จากการดริฟต์ หรือ diffusion ซึ่งพบว่าการลดลงของ autocorrelation function เป็นตามฟังก์ชัน $c(s) = (1 - s/\tau_2) \exp(-s/\tau_1)$ if $\tau_2 \ll \tau_1$ โดยพาหะ

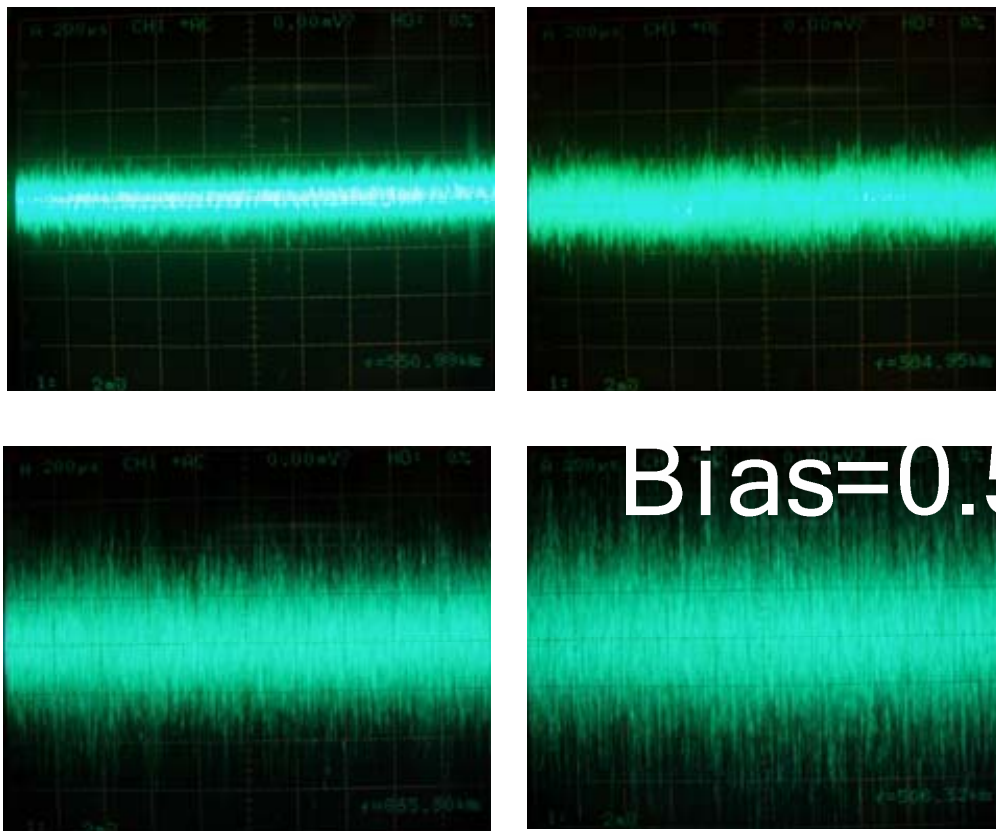
ทั้งหมดจะเข้าไปยังส่วนพื้นที่รับแสง (active area) ที่ขั้วไฟฟ้าด้านหนึ่งและออกจากขั้วไฟฟ้าอีกด้านหนึ่ง ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 5.2 ถ้าพื้นที่รับแสงที่แคบมาก ๆ

ภายใต้สนามไฟฟ้า E พาหะจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วครีฟ จากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำนั้นจะเป็นผลให้เกิดปรากฏการณ์ shot effect โดยที่กระแสจะมีการสั่นไหวเนื่องจากการชนกันของอิเล็กตรอน ซึ่งหลังจากการชนกันอิเล็กตรอนก็ยังเคลื่อนที่ด้วยการครีฟต่อไป ในทิศทางเดิม จนกระทั่งอิเล็กตรอนถูกจับโดยประจุบวก หรือ เกิดการรวมตัวกัน จากเงื่อนไขดังกล่าว หมายความว่าอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ภายในสารกึ่งตัวนำนั้นจะถูกจับอีกครั้งก่อนที่จะมาถึงที่ขั้วบวก ภายใต้เงื่อนไขนี้ $\tau_1 \ll \tau_2$ ทำให้เกิดการลดลงของ Autocorrelation function ดังสมการนี้

$$c(s) = \exp(-s/\tau_1) \quad (5.5)$$

ซึ่งจะมีพาหะเพียงบางส่วนเท่านั้นที่เข้าไปสู่พื้นที่ด้านหนึ่ง หรือ ออกจากอีกด้านหนึ่ง โดยพาหะส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นที่ภายในพื้นที่รับแสงและถูกจับอีกครั้ง ซึ่งในกรณีนี้ ความเข้มของสัญญาณรบกวนจะน้อยกว่าความเข้มของสัญญาณรบกวนที่ Full shot noise : $2qI$ จากรูปที่ 5.5 เมื่อพิจารณาในกรณีที่อุปกรณ์ได้รับแรงดันไบแอส 5V นั้น ซึ่งมีสนามไฟฟ้าภายในนั้นมีค่าสูงมากกว่าที่แรงดันไบแอสต่ำ ๆ ที่ภายใต้เงื่อนไขของค่าสหสัมพันธ์เดียวกัน (Autocorrelation function) พาหะที่ได้รับการกระตุ้นทางแสง ที่ตรงบริเวณปลอดพาหะ จะเกิดขึ้นอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับค่าอัตราสหสัมพันธ์เดียวกันพาหะที่เกิดขึ้นในบริเวณที่เป็นกลาง (Undepleted region) นั้นมีค่าต่ำมาก ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่อัตราส่วนของ noise ratio มีค่าสูงมาก ที่แรงดันไบแอส 5V ในการอธิบายอัตราส่วนของ noise ratio ที่มีค่าต่ำ ๆ นี้ ซึ่งเชื่อว่าเกิดจากความเกี่ยวพันของค่าอัตราสหสัมพันธ์อันเดียวกันของกระแสที่แรงดันไบแอสต่ำ ๆ เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 5.5 สำหรับโครงสร้างนี้ จะพบว่าค่า autocorrelation function $c(s)$ ซึ่งคาดว่ามิสนามไฟฟ้าที่ภายในบริเวณปลอดพาหะมีขนาดต่ำอย่างเพียงพอ ในการตอบสนองต่อค่าเวลาเฉลี่ยที่ $\tau_1 \ll \tau_2$ ดังนั้นเราจะพบว่าค่าของ autocorrelation function สำหรับกระแสครีฟ จะมีค่าต่ำมาก ๆ ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์อัตราสหสัมพันธ์ autocorrelation coefficient สำหรับกระแสจากการแพร่ยังคงไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ระดับต่ำ ๆ

ภาพถ่ายในรูปที่ 5.6 (ก-ง) จากออสซิลโลสโคป แสดงให้เห็นถึงลักษณะของสัญญาณรบกวนที่เปลี่ยนแปลงตามคาบเวลาที่กระแสแสงเดียวกัน ที่ระดับแรงดันไบแอสต่างกัน พบว่าระดับของสัญญาณรบกวนนั้นแปรเปลี่ยนกับแรงดันที่จ่ายให้ภายใต้ระดับกระแสเดียวกัน

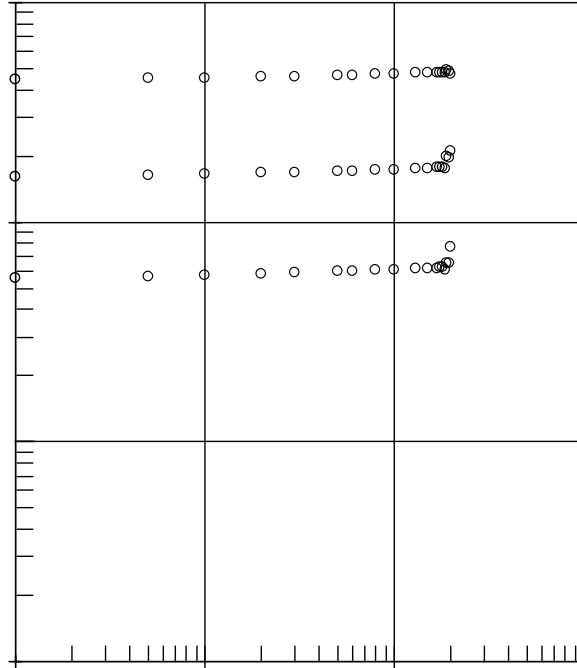


รูปที่ 5.6 รูปคลื่นของสัญญาณรบกวนจากออสซิลโลสโคปภายใต้แรงดันไบแอสต่างๆที่ระดับกระแส $20\mu\text{A}$, Ver.: 2mV/div. , Hor.: $200\mu\text{s/div.}$

สัญญาณรบกวน shot noise ที่ความถี่ต่ำจากสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำแบบสองขั้วไฟฟ้า ซึ่งทราบได้ด้วยการทดลอง และจากทฤษฎีพบว่ามีความอยู่ในระดับของ sub-shot noise ซึ่งมีอัตราส่วนของ noise ratio ต่ำกว่าหนึ่ง โดย Scott และ Strutt ได้ทำการตรวจวัดสัญญาณรบกวนจากไดโอดแบบรอยต่อ p-n ภายใต้แรงดันไบแอสย้อนกลับส่วน Shockley-Read-Hall (SRH) แสดงให้เห็นถึงพาหะที่เกิดขึ้นในบริเวณปลอดพาหะ ภายใต้แรงดันไบแอสย้อนกลับรวมถึงกระแสอิ่มตัวที่สัมพันธ์กันกับสัญญาณรบกวน ภายใต้เงื่อนไขนี้ สัญญาณรบกวนจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ $2/3$ ของระดับ Full shot noise จากการพิจารณาถึงสัญญาณรบกวนที่ระดับแรงดัน 0.5 V ตามรูปที่ 5.4 พบว่าอัตราส่วนของ Noise ratio มีขนาดที่ต่ำกว่าระดับ Full shot noise ถึงสองอันดับ นั่นคือมีการลดทอนอยู่ที่ประมาณ -20 dB ระดับของสัญญาณรบกวนที่ค่อนข้างต่ำนี้ สามารถอธิบายได้โดยอาศัยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณรบกวน

เพื่อสนับสนุนพฤติกรรมของสัญญาณรบกวนขนาดต่ำๆ ของโครงสร้างเชิงราบ MSM ของโลหะ (Mo) โดยการวัดสัญญาณรบกวน ด้วย pin photodetector ที่ใช้ทางการค้า ซึ่งโครงสร้างของ

pin photodiode นี้ประกอบด้วยส่วนของ intrinsic region ที่อยู่ระหว่างชั้น p และ n โดยการให้แรงดันย้อนกลับ ส่วนของบริเวณ intrinsic region จะขยายจนเต็มในส่วน of บริเวณปลอดพาหะ ส่วนบริเวณชั้นของ p และ n ไม่เปลี่ยนแปลง ตามรูปที่ 5.7 นี้เป็นสมบัติกระแสแสงกับแรงดันของ pin photodiode ภายได้แรงดันไบแอสพบว่ากระแสแสงจะขึ้นกับความเข้มแสงแต่จะไม่ขึ้นกับแรงดันไบแอส



รูปที่ 5.7 สมบัติ photocurrent-voltage ของ pin photodiode

รูปที่ 5.8 แสดงขนาดสัญญาณรบกวนที่กระแสแสง $30\mu\text{A}$ ของ pin photodiode ที่แรงดันไบแอสต่าง ๆ เมื่อเทียบกับผลที่ได้จากรูปที่ 5.9 พบว่าสัญญาณรบกวนจะขึ้นกับกระแสแสง จากผลการทดลองดังรูปที่ 5.9 นี้พบว่าอัตราส่วนของ noise ratio: Γ^2 มีค่าประมาณ 0.84-0.86 จากผลการทดลองพบว่า สัญญาณรบกวนจะขึ้นกับกระแสแสงขณะที่ให้แรงดันไบแอสจนถึงการพังทลายของไดโอด ขนาดสัญญาณรบกวนจะเพิ่มขึ้นถึง $9\text{E}^{-21} \text{ A}^2/\text{Hz}$ ที่แรงดัน 195 V ดังรูปที่ 5.8 ภายได้เงื่อนไขการพังทลายจะเกิดขึ้นเมื่อให้แรงดันย้อนกลับเพิ่มสูงขึ้นจนถึงค่าหนึ่งกระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

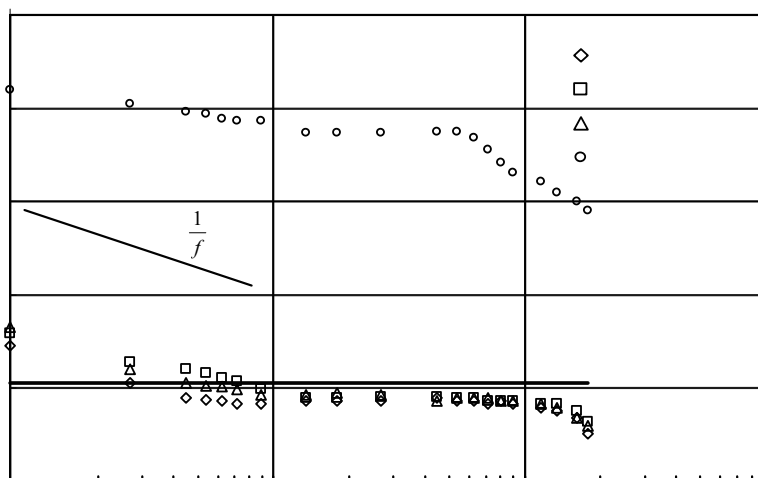
สนามไฟฟ้าที่บริเวณปลอดพาหะจะสูงขึ้นทำให้พาหะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงจนมีพลังงานจลน์สูงพอที่จะทำให้เกิด impact ionization อย่างต่อเนื่อง กระแสที่ไหลเข้าสู่บริเวณปลอดพาหะ เกี่ยวข้องกับแฟกเตอร์ของการทวีคูณ (Multiplication factor: M) รูปที่ 5.8 และ 5.9 สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีของ McIntyre's theory จะพบว่าการเพิ่มขึ้นของกระแส และสัญญาณรบกวนที่

1000

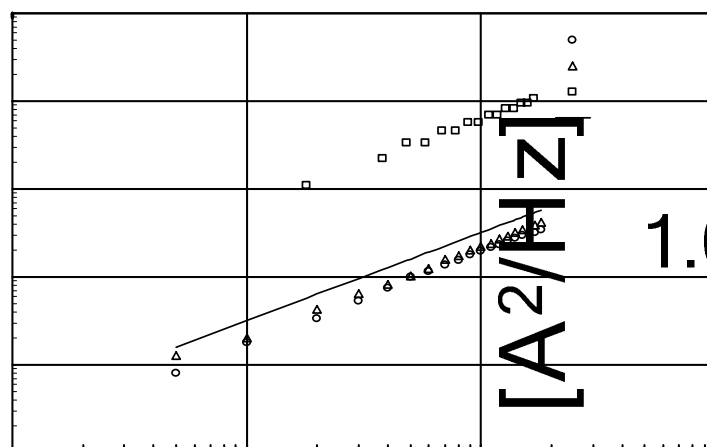
nt[μA]

100

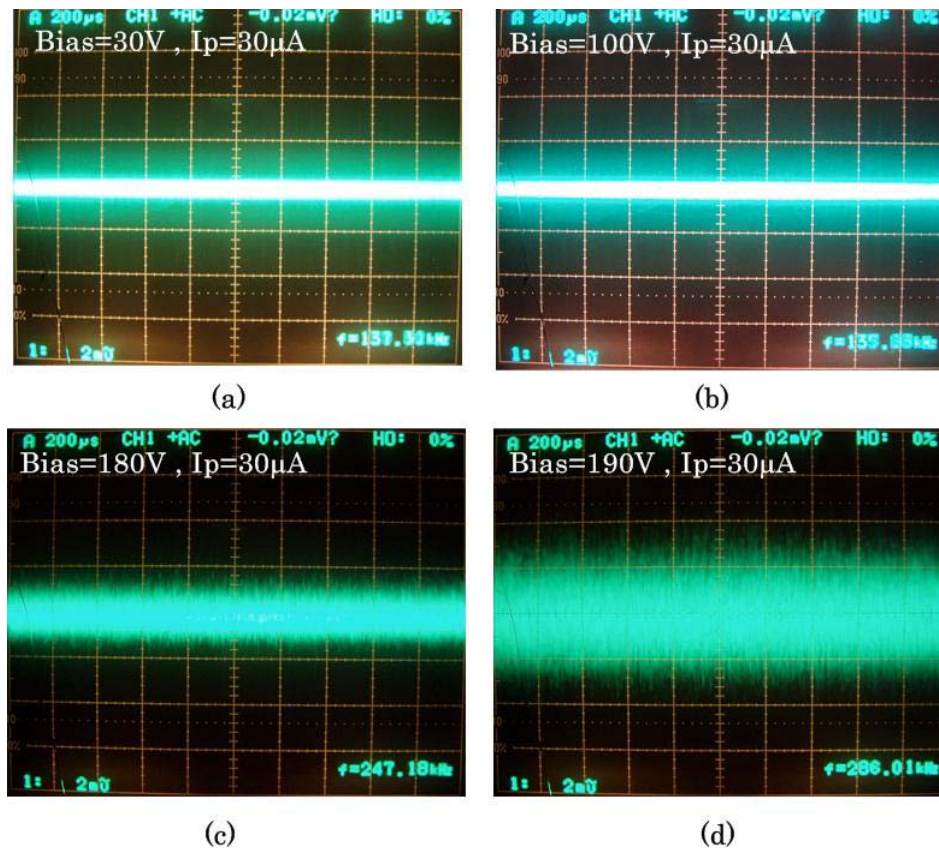
ใกล้กับแรงดันพังทลายนั้นเป็นผลจากการไอออไนซ์จากการทวีคูณ (Ionization multiplication) ในรอยต่อที่ได้รับแรงดันย้อนกลับ



รูปที่ 5.8 ขนาดของสัญญาณรบกวนของ pin photodiode ภายใต้แรงดันไบแอส 30V, 100V, 180V และ 195 V ที่กระแส 30 μ A



รูปที่ 5.9 ขนาดของสัญญาณรบกวน กับกระแสแสงของ pin photodiode ที่ความถี่ 10 kHz ที่แรงดันไบแอสต่างๆ



รูปที่ 5.10 รูปคลื่นของสัญญาณรบกวนจากออสซิลโลสโคปภายใต้แรงดันไบแอสต่างๆที่ระดับกระแส $30\mu A$

Ver.:2mV/div., Hor.:200 μs /div.

จากการพิจารณาข้างต้นนั้นการวัดสัญญาณรบกวนของ Shot noise ที่เป็นฟังก์ชันกับความเข้มแสง และแรงดันไบแอส สามารถแสดงสัญญาณรบกวนบนออสซิลโลสโคปที่กระแสแสงเดียวกัน แต่ให้แรงดันต่างกัน จะพบว่าขนาดของสัญญาณรบกวนนั้นไม่เพิ่มขึ้นตามแรงดันไบแอสก่อนที่จะถึงแรงดันพังทลายโดยกำหนดให้กระแสแสงคงที่ที่ระดับ $30\mu A$ ดังในรูปที่ 5.10

5.4 สรุปผลการทดลอง

สัญญาณรบกวน Shot noise ที่ความถี่ต่ำในช่วง (10-100kHz) เนื่องจากกระแสแสง พบว่าสัญญาณรบกวนนี้ไม่ขึ้นกับความถี่ ในโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงที่เป็นแบบเชิงราบของ Mo/n-Si/Mo ซึ่งขนาดของสัญญาณกระแสรบกวนนี้ไม่เพียงจะขึ้นอยู่กับกระแส แต่ยังคงขึ้นอยู่กับแรงดันไบแอส โดยอัตราส่วนของ noise ratio นี้มีขนาดต่ำมากถึงสองอันดับซึ่งยังคงขึ้นอยู่กับแรงดันไบแอส พฤติกรรมของปริมาณสัญญาณรบกวนที่มีขนาดต่ำสามารถที่จะอธิบายได้ดังนี้ (1) ไม่มีความสัมพันธ์ของตัวแปรที่แตกต่างกันระหว่างกระแสรีเฟรค drift current อันเนื่องจากพาหะที่

เกิดขึ้นจากบริเวณหลอดพาทะ และกระแสดจากการแพร่ เนื่องจากผลของระยะการแพร่ที่อยู่ภายในบริเวณหลอดพาทะ (2) การเกิดขึ้นของพาทะจะเกิดอย่างสม่ำเสมอที่บริเวณหลอดพาทะ และบริเวณที่เป็นกลาง (3) ขนาดของกระแสดจากกระแสดริฟต์และกระแสดการแพร่ เป็นผลจากสนามไฟฟ้าต่ำๆ ซึ่งสอดคล้องกับที่แรงดันไบแอสต่ำๆ จากผลข้างต้นกล่าวได้ว่าสัญญาณรบกวน shot noise เป็นจุดสำคัญในระดับสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน(signal-to-noise: S/N ratio) ที่จะนำมาใช้ในการพิจารณาถึงเอาท์พุทจากตัวตรวจจับทางแสง ของระบบการสื่อสารทางแสงในการเปลี่ยนสัญญาณทางแสง ไปสู่สัญญาณทางไฟฟ้า

บทที่ 7

สรุป

จากผลการทดลองกับโฟโตไดโอดโครงสร้างเชิงราบ MSM เมื่อให้แรงดันไบอัสเพิ่มขึ้นจะทำให้บริเวณปลอดพาหะ ได้ขยายออกไปในแนวราบที่บริเวณผิวหน้าของพื้นที่รับแสงระหว่างขั้วคาโทด และแอโนด โดยบริเวณปลอดพาหะนี้จะขยายออกทางด้านข้าง โดยโครงสร้างของโฟโตไดโอดโครงสร้างเชิงราบที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ากว้างมาก บริเวณปลอดพาหะนี้จะแพร่ขยายออกไปไม่คลุมพื้นที่รับแสงทั้งหมด ซึ่งจะแยกออกเป็นสองส่วนคือส่วนที่เป็นบริเวณปลอดพาหะและบริเวณที่เป็นเนื้อสารนิวทรัล ในขณะที่โครงสร้างเชิงราบที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแคบมาก จะทำให้บริเวณปลอดพาหะนี้แพร่ขยายออกจนเต็มพื้นที่รับแสง(Full depleted region) ที่ภายใต้การให้แรงดันไบอัส และเมื่อความเข้มแสงที่ตกกระทบกับบริเวณปลอดพาหะจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกับโฮลเกิดการเคลื่อน โดยโฮล นั้นจะเกิดการครีฟท์(Drift)ตรงไปยังด้านแคโทดภายใต้การกระทำของสนามไฟฟ้าที่สูงมากและอิเล็กตรอนก็จะเคลื่อนที่ไปยังด้านแอโนดทำให้เกิดกระแสไหลสู่วงจรภายนอกด้วยกระแสแสงและกระแสมืด ยิ่งไปกว่านั้นจากการคำนวณแบบหนึ่งมิติ(1D-model)สามารถยืนยันได้ว่า สนามไฟฟ้าที่แรงดันไบอัสต่างๆได้จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อแรงดันไบอัสเพิ่มขึ้น และสนามไฟฟ้านี้จะค่อยๆลดลงตามระยะของบริเวณปลอดพาหะที่เพิ่มมากขึ้นจากทางด้านคาโทดไปยังแอโนด

สัญญาณรบกวน Shot noise ที่ความถี่ต่ำในช่วง (10-100kHz) เนื่องจากกระแสแสง พบว่าสัญญาณรบกวนนี้ไม่ขึ้นกับความถี่ ในโครงสร้างของตัวตรวจจับแสงที่เป็นแบบเชิงราบของ Mo/n-Si/Mo ซึ่งขนาดของสัญญาณกระแสรบกวนนี้ไม่เพียงจะขึ้นอยู่กับกระแส แต่ยังคงขึ้นอยู่กับแรงดันไบอัส โดยอัตราส่วนของ noise ratio นี้มีขนาดต่ำมากถึงสองอันดับซึ่งยังคงขึ้นอยู่กับแรงดันไบอัส พฤติกรรมของปริมาณสัญญาณรบกวนที่มีขนาดต่ำสามารถที่จะอธิบายได้ดังนี้ (1) ไม่มีความสัมพันธ์ของตัวแปรที่แตกต่างกันระหว่างกระแส ครีฟท์ อันเนื่องมาจากพาหะที่เกิดขึ้นจากบริเวณปลอดพาหะ และกระแสจากการแพร่ เนื่องจากผลของระยะการแพร่ที่อยู่ภายใต้บริเวณปลอดพาหะ (2) การเกิดขึ้นของพาหะจะเกิดอย่างสม่ำเสมอที่บริเวณปลอดพาหะ และบริเวณที่เป็นกลาง (3) ขนาดของกระแสจากกระแสครีฟท์และกระแสการแพร่ เป็นผลจากสนามไฟฟ้าต่ำๆ ซึ่งสอดคล้องกับที่แรงดันไบอัสต่ำๆ จากผลข้างต้นกล่าวได้ว่าสัญญาณรบกวน shot noise เป็นจุดสำคัญในระดับสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน(signal-to-noise: S/N ratio) ที่จะนำมาใช้ในการพิจารณาถึงเอาท์พุทจากตัวตรวจจับทางแสงของระบบการสื่อสารทางแสงในการเปลี่ยนสัญญาณทางแสง ไปสู่สัญญาณทางไฟฟ้า

เอกสารอ้างอิง

ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ

- [1] S.Khunkhao, S. Niemcharoen, M. Duangsang, K.Sato, "Photoinduced on laterally spreading of space-charge-region in planar metal-semiconductor-metal structures" Proceeding of the 2006 Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology(ECTI) International Conference, May 10-13, 2006, Ubonburi Hotel, Ubon Ratchathani, pp.356-359, THAILAND.
- [2] S.Khunkhao, S. Niemcharoen, K.Sato, "Optical-beam profiling by bias-controlled metal-semiconductor-metal structures" Asia-Pacific Conference on Semiconducting Silicides (APAC-SILICIDE 2006), JULY 29-31, 2006, pp.138-139, The clock Tower Centennial International Hall, Kyoto University, Kyoto, Japan.
- [3] S. Khunkhao, S. Niemcharoen, "Shot noise due to carrier generation in planar metal-semiconductor-metal optical sensors structures" Laos Journal on Applied Science, 1 st International Conference On Applied Science(ICAS 2006), Nov.5-7, 2006, pp.636-643.
- [4] S.Khunkhao, S. Niemcharoen, M. Duangsang, K.Sato, "Currents Photoinduced on Laterally Spreading of Space-Charge-Region in Planar Metal-Semiconductor-Metal Structures" Transactions on Electrical Eng., Electronics, and Communications, Vol.5 No.1, Feb.2007.
- [5] S.Khunkhao, A.Thaworn, S.Sodetsakun, S.Nualoy, S.Korchareon, S. Niemcharoen, "Optical profiling on lateral spreading of space-charge-region metal-semiconductor-metal structures" Proceeding of the 2007 Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology(ECTI) International Conference, May 9-11, 2006, Mae Fah Luang University, Chiang Rai, pp.489-492, THAILAND.
- [6] Sanya Khunkhao, N. Yoothanom, S. Niemcharoen, K. Sato, "Bias-control of photocurrent in planar metal-semiconductor-metal structures with undepleted region, MALAYSIA-JAPAN INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCED TECHNOLOGY 2007, MJISAT 2007, 12-15th November Kuala Lumpur, Malaysia. c/o Malaysia Japan University Center(MJUC) MJISAT-22.
- [7] S. Khunkhao, N. Yoothanom, S. Niemcharoen, K. Sato, "Low frequency Shot Noise in silicon-based planar metal-semiconductor-metal structures" MALAYSIA-JAPAN INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCED TECHNOLOGY 2007, MJISAT 2007, 12-15th November Kuala Lumpur, Malaysia. c/o Malaysia Japan University Center(MJUC) MJISAT-23.
- [8] S.Khunkhao, P.Nanthivatana, S.Niemcharoen, W. Titiroongruang and K.Sato, A.Ruangphanit, N.Phongphanchanthra "White Noise in silicon-based planar metal-semiconductor-metal photodiodes" Transactions on Electrical Eng., Electronics, and Communications, Vol.5 No.1, May.2008.

ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการในประเทศ

- [1] S. Khunkhao, S. Niemcharoen, “Photocurrent enhancement in silicon-based planar metal-semiconductor-metal” , 29 th Electrical Engineering Conference, Nov.9-10,2006.pp.901-904.
Ambassador city Hotel, Jomtien pataya, Chonburi.
- [2] S.Khunkhao, W.noiyprecha,S.Nualoy,S.Sodetsakul, A.Thaworn, S. Niemcharoen, “Photocurrent on Space-Charge-Region in planar Metal-Semiconductor-Metal Structures with Full depleted region” 30 th Electrical Engineering Conference,Oct.25-26,2007pp.565-567,Kanchanaburi Riverkwai.
- [3] S. Khunkhao, S. Niemcharoen,K.Sato “Photosensing properties of Mo/n-Si/Mo photodiodes of short electrode gap” 31 th Electrical Engineering Conference,Oct.26-28,2008pp.1221-1224,Nakornnayok.

ภาคผนวก

Asia-Pacific Conference on Semiconducting Silicides (APAC-SILICIDE 2006)



Program and

July 29-31, 2006
The Clock Tower
Centennial International Hall
Kyoto University,
Kyoto, Japan

Sponsored by

Professional Group on Semiconducting Silicides and Related Materials of
The Japan Society of Applied Physics

In cooperation with

21st Century COE Programs at
Graduate School of Energy Science and
Graduate School of Engineering, Kyoto University
The Surface Science Society of Japan
The Japan Institute of Metals
Thin Film and Surface Physics Division, JSAP
Silicon Technology Division, JSAP
151st Committee on Frontier Nano-Device Technology,
The Japan Society for the Promotion of Science

P-37	Synthesize of SiO _x Nano-Fibers using FeSi and β -FeSi ₂ Substrates with Ga Droplets T. Inaba, Y. Saito, H. Kominami, Y. Nakanishi, K. Murakami, T. Matsuyama and H. Tatsuoka (Shizuoka University, Pulstec Industrial Co., Ltd.)	127
P-38	Synthesis and Characterization of TiO ₂ films supported on AZ31 Mg alloy J. Hu, S. Guan, C. Ren, C. Wen (Zhengzhou University)	129
P-39	Amorphous Carbon Thin Films Synthesis using CH ₄ and C ₂ H ₂ as Plasma Source H. R. Aryal, S. Adhikari, S. Adhikary, H. Uchida, M. Umeno (Chubu University, Tribhuvan University)	131
P-40	Thin Film deposition of Amorphous Carbon Nitrided by Surface-wave Mode Microwave Plasma CVD S. Adhikari, H. R. Aryal, D. C. Ghimire, S. Adhikary, H. Uchida, M. Umeno (Chubu University, Tribhuvan University)	132
P-41	Structural evolution of thermally evaporated silicon on a Cu(111) surface A.B. Yang, J.S. Tsay, C.N. Wu, and F.S. Shiu (Tunghai University, National Taiwan Normal University)	134
P-42	The behavior of Co atoms on Si(111)-7 $\times$ 7 surfaces at low temperatures T.Y. Fu, C.Y. Kuo and S.L. Tsay (National Taiwan Normal University)	136
P-43	Optical-beam profiling by bias-controlled metal-semiconductor-metal structures S. Khunkhao, S. Niemcharoen, K. Kitagawa, K. Sato (Sripatum University, King Mongkut's Institute of Technology, Tokai University)	138
P-44	Fabrication of photonic crystals in several kinds semiconductor materials by using focus-ion-beam method X. Xu, Z. Xiong, A. Jin, C. Gu, H. Chen, D. Zhang (Chinese Academy of Sciences)	140

Optical-beam profiling by bias-controlled metal-semiconductor-metal structures

S.Khunkhao^{*1}, S. Niemcharoen², K.Kitagawa³, K.Sato³

¹ Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Sripatum University
 61 Phahonyothin Road, Jatujak, Bangkhane, Bangkok, 10900 Thailand. Email:sanya@spu.ac.th

² Electronics Research Center, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
 Charongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok, 10520 Thailand. Email: knsurasa@kmitl.ac.th

³ Department of Electronics, School of Information Technology and Electronics, Tokai University
 Kitakaname 1117, Hiratsuka, Kanagawa, 259-1292 Japan. Email:kznrsato@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp

1. Introduction

Recently we have shown experimentally that a planar metal-semiconductor-metal(MSM) structure having a wide separation between the two metal electrodes exhibits not only the function of a basic optical sensor but also optical sensitivity field-controllable by the bias applied [1]. In this study, we present the experimental results of one-dimensional (1D) optical-beam profiling properties of an MSM structure as its application. To our knowledge, no study has appeared on such an application of planar MSM structures.

2. Model of operation

The essential cross-section of the structure we treat in this study is illustrated schematically in figure 1. The separation between the electrodes located at both ends is wide enough to leave the undepleted neutral region under the bias we examined. When a bias voltage is applied between the electrodes, one Schottky-junction is reverse-biased and the other junction is forward-biased. Such a structure is expected to show lateral spreading of its space-charge-region (SCR) of the Schottky-junction reverse-biased towards the other electrode is expressed semi-empirically[1].

$$W(V_a) = \sqrt{\beta(V + V_a)} \quad (1)$$

where $w(V_a)$ is the width of lateral spreading of the SCR along the surface of the active area at an applied bias V_a , $\beta = 2\epsilon_s/qN_D$, ϵ_s is the permittivity of the semiconductor employed, q is the elementary charge, N_D is the impurity concentration and V_0 is the built-in voltage of the Schottky-barrier, respectively. The barrier on the other side is forward-biased and assumed here to be nearly flattened. The photoinduced current $I_p(V_a)$ is approximately formulated as [1,2]

$$I_p(V_a) = \eta[kW(V_a) + L] \quad (2)$$

where L is the diffusion length of the mobile carriers and k means that the SCR is k -times more effective to generating

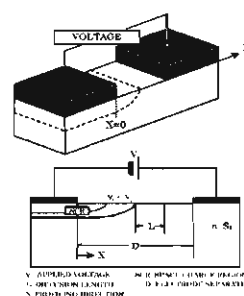


Fig 1. Schematic illustration of an MSM structure, leaving an undepleted region even under a bias.

the photocurrent than the residual undepleted region (presumably, larger than unity, and η is the proportionality factor including the effect of quantum efficiency and intensity level of irradiation. As a result, $I_p(V_a)$ is would be an increasing function of applying bias V_a with the dependence on $\sqrt{V_0 + V_a}$. This means that the device structure under consideration is to furnish the field-controllable iris.

3. Experimental

To make the electrodes of $3 \times 3 \text{ mm}^2$, molybdenum film working also as barrier metal was deposited onto an n -type silicon wafer by an electron-beam evaporator and was subsequently processed by photolithography lift-off technique. The electrode separation is mainly $2000 \mu\text{m}$. The resistivity of the wafer used was $(40-50)\Omega\text{cm}$. This resistivity would provide corresponding donor concentration of some $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. The height of the Schottky-barrier on both sides was estimated to be $(0.55-0.65) \text{ eV}$ from the forward current-voltage characteristic[3]. Furthermore, from this value of the barrier-height, the built-in voltage V_0 is deduced to be approximately 0.23 eV .

We carrier out of profiling of the light-beam from a He-Ne laser having a wavelength of 633 nm . The optical beam was scanned by every $15 \mu\text{m}$ in the perpendicular orientation of the tilting plane of the beam. Spatial intensity distribution of the beam to be detected was assumed to be Gaussian

distribution with the radius (2σ) of $480\ \mu\text{m}$ defined at the point of $1/e^2$ its maximum just at the aperture of the light source quoted by the manufacturer. The dispersion angle of the beam from the source is approximately $0.23\ \text{mrad}$. To control the light intensity incident onto the sample, a neutral density (ND) filter was utilized.

4. Result and discussion

First, we observed the x-direction 1-D spatial distribution of detected photocurrent over the whole region between the electrodes. The typical plot for a $2000\ \mu\text{m}$ separated electrode sample is shown in figure 2. The photocurrent was obtained by subtracting the dark current from the current as measured at the same bias. Each peak in the figure 2(a) and (b) corresponds to the profile when the polarity of bias is reversed. From the figure (a) and (b), the separation of the two peaks is estimated to be about $1920\ \mu\text{m}$, which is a little smaller than the electrode separation. It is apparent from these figures that only the SCR of the junction reverse-biased generating photocurrent.

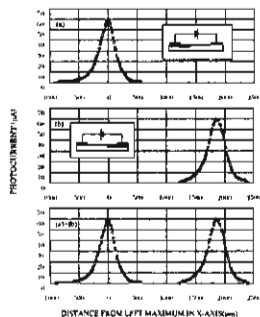


Fig. 2. Spatial distribution of the photocurrent under a constant optical illumination level versus the lateral position of every $15\ \mu\text{m}$ step. Electrode separation is $2000\ \mu\text{m}$.

On the contrary, the current from the barrier forward-biased barrier is extremely small and can substantially be ignored. As described the photocurrent vs. position relationship for the sample appeared in figure 2 under a fix bias of 16V were observed under three different illumination intensity levels. The plot normalized at each maximum are shown in figure 3, where the solid line represents the Gaussian curve calculated using the parameters given by the manufacturer of the light source.

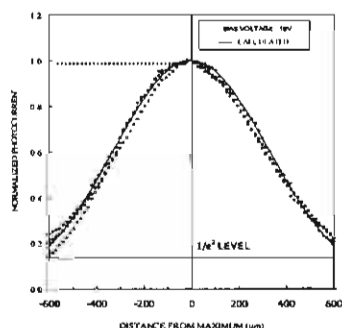


Fig. 3. Normalized plot of the spatial current distribution from the data in figure 2. Solid line represents the calculated Gaussian distribution for reference, taking $2\sigma = 480\ \mu\text{m}$.

We also carried out profiling by changing the bias voltage. Figure 4 shows the experimental plots for $V_g = 2\text{V}$, 4V and 16V biases. These results show that with increase in bias the observed output photocurrent also increases. In the present experiments, the silicon wafer of the resistivity of $(40\text{--}50)\ \Omega\text{cm}$ for preparing samples. From equation (1), this resistivity expects the change in the width of the SCR, $W(V_a)$, from $6\ \mu\text{m}$ to $16\ \mu\text{m}$ at most between 2V and 16V . As a result, it can be concluded that the planar MSM structure examined can be used as a simple intensity profiler of an optical-beam of this size. As described earlier, the profiling was carried out changing the relative position by every $15\ \mu\text{m}$ step, which is still larger or approximately equal comparing to the width of the SCR. Therefore, it can be mentioned that the beam profiling would still be effective. We repeated the similar measurements on the structure having $20\ \mu\text{m}$ electrode separation. This result might be attributed that the SCR is several times more efficient than the same area within the diffusion length in generating photocurrent. Therefore, one can mention that the structure examined in this study is usable as a pixel for 1D optical-beam profiling, having the field-controllable sensitivity.

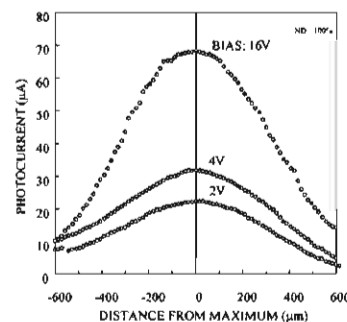


Fig. 4. Bias dependence of experimental spatial intensity distribution for $V_g = 2\text{V}$, 4V and 16V .

5. Conclusion

As a novel application, a planar MSM structure has been applied to profiling of the spatial intensity distribution of an optical beam in visible range. The Gaussian intensity distribution of the beam from a He-Ne laser was confirmed experimentally. The MSM structure proposed in this study also exhibits field-controllable sensitivity making use of lateral spreading of the SCR at the active surface.

Acknowledgements

The authors wish to thank Assoc. Dr. W. Titiroongruang of King Mongkut's Institute of Technology for valuable discussions and comments throughout this work. This work was supported in part by The Thailand Research Fund.

References

- [1] S. Khunkhao, Y. Yasumura, K. Kitagawa, T. Masui, and K. Sato, *On laterally spreading of space-charge-region in planar metal-semiconductor-metal structures*, Solid-State Electronics, 47, 1811-1816, 2003.
- [2] T. Masui, S. Khunkhao, K. Kobayashi, S. Niemcharoen, S. Supadech and K. Sato, *Photosensing properties of interdigitated metal-semiconductor-metal structures with undepleted region*, Solid-State Electronics, 47, 1385-1390, 2003.
- [3] K. Sato, and Y. Yasumura, *Study of forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance*, Journal of Applied Physics, 58, 1985, 3655-3657.



SPECIAL ISSUE

Vol.1 No.1 November 2006

Laos Journal on Applied Science



ISSN 1905-6702

WELCOME TO ICAS 2006

Dear ICAS 2006 Attendees:

I am very pleased to inform you of ICAS 2006, the first International Conference on Applied Science Conference, which will be held from November 5 to November 7, 2006 at Donchun Hotel, Vientiane, Lao PDR. This conference will provide the international forum for scientists and engineers to present and discuss significant progresses in science and applied science.

This year we have a total of almost 100 papers in both oral and poster sessions, which will stimulate active discussions among the participants. In the Plenary Session, we will have two illuminating talks: the first by Prof. Dr. David R. Brooks, Drexel University, USA, on "Inexpensive Sun Photometers for Monitoring the Atmosphere", the second by Dr. K. Kaku, National Institute of Livestock and Grassland Science, Japan, on "Heading for Clean Development Mechanism on Reductions of Greenhouse Gas Emission in Japanese Domestic Livestock Industry". The conference will also offer the Special Session (tutorial session) on "The Atmosphere Monitoring Based on Inexpensive Sun Photometers" by Prof. Brooks. I sincerely hope that this conference will be informative and enjoyable to you.

On behalf of the Organizing Committee, I would like to extend a heartily welcome to all of you who are planning to attend ICAS 2006. I look forward to seeing you at the conference in Vientiane.



Preecha Yupapin

General Chair, ICAS 2006

Conference Organizing Committee

Advisory and Steering Committee

Associate Prof. Dr. Theerawat
Associate Prof. Dr. Sakda
Associate Prof. Pakkinee
Associate Prof. Dr. Somkiat
Associate Prof. Dr. Saykhong
Dr. Somchanh
Prof. Dr. Makoto
Prof. Dr. Tanaka
Prof. Dr. Choo Hiap
Mongkolauassavarat
Traisak
Chitsakul
Phasy
Saynastine
Bounphanmy
Doi
Minoru
Oh

General Chair

Associate Prof. Dr. Preecha
Yupapin

General Co-Chair

Associate Prof. Dr. Somkiat
Phasy

Technical Program Chair

Dr. Nuaisawat
Hiransakolwong

Technical Program Co-Chair

Dr. Somchanh
Bounphanmy

Technical Program Committee

Prof. Dr. David R.
Prof. Dr. Makoto
Prof. Dr. Choo
Prof. Dr. Choo Hiap
Prof. Dr. K.T.V.
Prof. Dr. Kien A.
Associate Prof. Dr. Sheau-Dong
Prof. Dr. Patrick
Prof. Dr. Elixabete
Brooks
Doi
Hiap
Cheng
Grattan
Hua
Lang
Saint-Dizier
Murguia
Drexel, USA
Tokai, Japan
NUS, Singapore
Rensselaer, USA
City, UK
UCF, USA
UCF, USA
IRIT-CNRS, France
IRIT-CNRS, France

SHOT NOISE DUE TO CARRIER GENERATION IN PLANAR METAL-SEMICONDUCTOR-METAL OPTICAL SENSOR STRUCTURES

S. Khunkhao^a, S. Niemcharoen^b

^a Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Sripatum

University, 61 Phahonyothin Road, Jatujak, Bangkok 10900, Thailand

^b Electronics Research Center, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

ABSTRACT

Low frequency 3-100 kHz shot noise (white noise) emerging from photoinduced current in Mo/n-Si/Mo structures leaving undepleted region has been observed under different bias and optical intensity conditions. The measurements revealed that the current noise observed depends not only on the illumination intensity levels but also on bias voltage. The current noise observed is expressed as $S(\omega) = 2qI/f^2$ and analyzed, where I and f^2 is the average current and noise factor, respectively. The measurements reveal that f^2 has strong bias dependence, lying $f^2 \sim 0.01$ to about unity corresponding to simple shot noise. Such experimental results are explained, stating that the reduction of crosscorrelation between drift and diffusion currents and autocorrelation of drift current component determining the level of noise occurs with decrease in SCR width bias-dependent. To explain the behavior of observed noise more properly, we propose, in addition to the mechanisms above, that the reduction in autocorrelation effect of each current component plays an important role to decrease the relevant noise to such extremely low levels.

KEYWORDS: Metal-semiconductor-metal structure; Shot noise; Noise ratio; Low-frequency noise; Photocurrent

1. INTRODUCTION

The planar MSM structures and their operation principle for detecting optical quantities to be processed have been described. Since an MSM structure is treated as a photodetector, such structure is expected to be put at the front stage of the system concerned. Therefore, reminding us of the idea of Friis [1-2], the noise property of the MSM photodetector would be an important problem, resulting in the influence on the whole of the system. The noise in an electronic device is categorized mainly into three. They are shot noise, $1/f$ noise or Flicker noise and thermal noise or Johnson noise [3-4].

The frequency range where shot noise appears is most frequency region used for device operation but the region where carriers are transit-time-limited in the active region of the device [4-5]. The region transit-time-limited is usually situated at much higher frequencies such as GHz or THz order. Except for the transit-time-limited region, the spectrum distribution of shot noise is in general frequency independent or white and is proportional to the average current of the devices [6-8]. Flicker noise has the frequency dependence of the reciprocal of frequency, thus sometimes called $1/f$ noise. Therefore, the noise of this kind would be dominant at low frequencies, depending also upon the current flowing in the device. Thermal noise or Johnson noise is due to statistically random motion [12] of carriers thermally agitated in the device. The spectra of these three noises are illustrated in Fig. 1 schematically.

*Corresponding Author. Tel +66-2-579-1111 Ext. 2273 Email:sanya100@hotmail.com, knursasa@kmitl.ac.th

$$S(\omega) = 4 \int_0^{\infty} \langle i^2(t) \rangle \cos(\omega s) ds \quad (4)$$

angular frequency ω is expressed as

From Wiener-Khinchine theorem [1-3], the current noise spectral density $S(\omega)$ at an the electrodes where carrier generation or carrier injection is taking place at either electrode. limiting case [2]. $r^2 = 1.0$ represents the noise ratio exhibited by carriers traversing between to the noise due to spatially uniform carrier generation in the midst of the active area as a carrier generation in the semiconductor materials and devices. The case $r^2 = 0.5$ corresponds so far [9, 11], each noise ratio is expected to lie between 0.5 and 1.0 for the noise due to charge where r^2 is the noise ratio defined for the corresponding n -th current, I_n [3]. As is discussed

$$S(\omega) = 2q \sum_{n=1}^{\infty} r_n^2 I_n = 2q (r_1^2 I_1 + r_2^2 I_2 + \dots + r_n^2 I_n) \quad (3)$$

low frequencies is given as

components uncorrelated between any two current components, the resultant noise $S(\omega)$ at When a device is carrying an average current I and this current consists of n current photoconductors [13-14]. accepted in existing theories for two-terminal semiconductor devices such as photodiodes and the noise measure of the device under consideration. The relation $r^2 = 1$ has generally been would be the function of frequency [1, 5]. Thus, the noise ratio would be regarded as a kind of noise [2-3]. In case that the noise is affected by the transit-time of carriers, the noise ratio where r^2 is the noise ratio or the noise factor representing the ratio of the noise to full shot

$$S(\omega) = 2q I r^2 (A^2 / \text{Hz}) \quad (2)$$

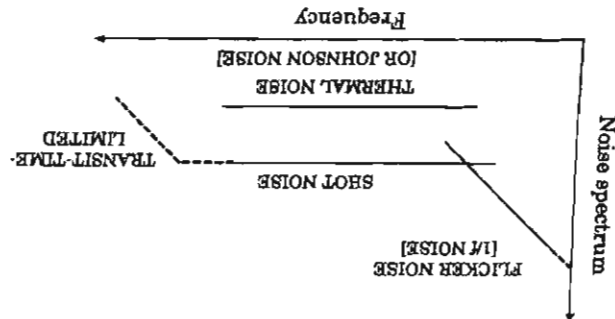
sometimes modified to fit the noise observed as

which is called the full (or simple) shot noise. In case of practical devices, however, Eq.(1) is

$$S(\omega) = 2q I (A^2 / \text{Hz}) \quad (1)$$

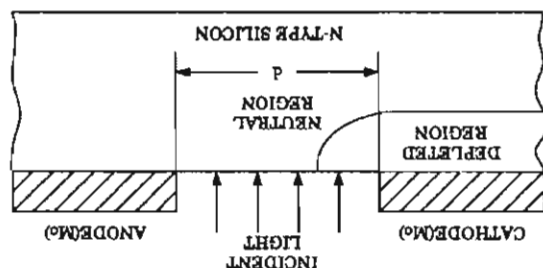
When a two terminal semiconductor device is carrying an average (dc) current, the device inevitably exhibits so-called shot noise (white noise). At low frequencies where the noise is independent of the frequencies, the current noise spectral density associated with the average current I is usually formulated as already given in Eq.(1).

Fig. 1 Schematic of spectra of shot noise, Flicker noise and thermal noise.



The noise measurements were performed using the system pictured in Fig. 3. The frequency range of the noise measurements is from 3 kHz to 100 kHz. The noise to be detected was introduced into a 2 k Ω load resistor series-connected with the device under test, the

Fig. 2. Crosssectional view of a planar MSM structure



Experimental samples have the following feature. Molybdenum (Mo) was e-beam-evaporated onto an n-type silicon wafer, whose resistivity is mainly 8–12 Ω cm, and using photolithography and lift-off technique [11], the electrodes were completed. The thickness of the evaporated Mo film is approximately $(1-1.2) \times 10^3$ Å. The cross-sectional view of the sample is shown in Fig. 2. Metalized molybdenum film forms a Schottky barrier on silicon and acts as an electrode as well [8]. The shape of the electrode is a simple square of size 3×3 μm^2 as shown below. The barrier height of independent Schottky barriers lies between 0.57 eV and 0.67 eV and coincides with those reported earlier [6-11]. The electrode separation is 20 μm . When a bias voltage is applied between the anode and cathode, a part of the region between both electrodes nearer to the cathode (negatively biased electrode) would be depleted further corresponding to the magnitude of the applied bias. The finger separation is larger than the sum of the depleted region width within the voltage examined and the diffusion length of minority carriers optically generated in the undepleted region. This condition is essential for the present devices to furnish the voltage controllability of photocurrent as mentioned before.

2. EXPERIMENTAL

where τ is the average lifetime, one can estimate roughly the ratio of the correlation time to the average diffusion time as follows.

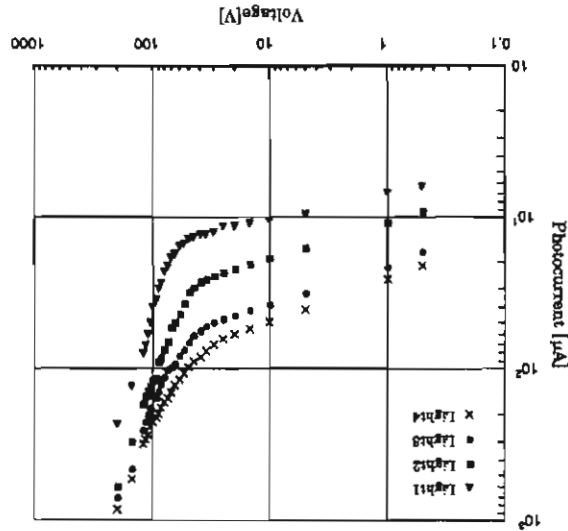
$$c(x) = \exp(-x/\tau) \quad (6)$$

Here, $i(t)$ (time) is the instantaneous current component due to a single diffusing carrier, $\langle i^2(t) \rangle$ is the average of $i^2(t)$, and $c(x)$ is the normalized autocorrelation function which will be introduced later in this chapter. If there is no noise reduction due to decay of the autocorrelation, the above equation reduces to full shot noise. Moreover, supposing that the correlation function is given by [2]

$$S(\omega) \approx S(0) = 4 \int_0^\infty \langle i^2(t) \rangle c(x) dx \quad (5)$$

Thus, at low frequencies where $\cos(\omega x)$ is approximated to be unity and the noise spectrum is independent of frequencies, $S(\omega)$ reduces to the following relation,

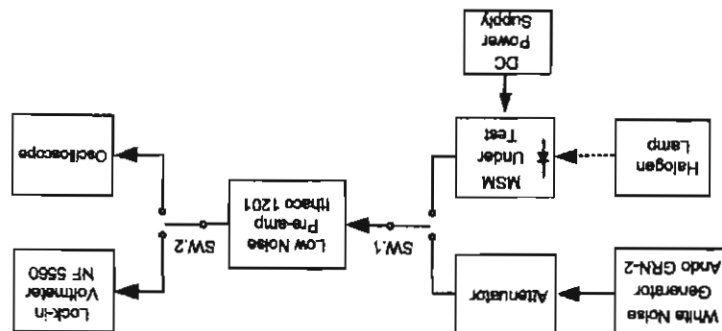
Fig. 4. Photocurrent-voltage characteristics of a Mo/n-Si/Mo structure having 20 μm electrode separation



In Fig. 4, the typical photocurrent I_p versus applied voltage V plots by solid lines for a sample having 20 μm -separated electrodes are shown at various levels of optical illumination in log-log scale. With increasing the bias voltage, the width of depleted region is an increasing function of the lateral spreading at the front surface. The width of the depleted region within the bias range examined is to be larger than the penetration length of the visible light which is given by the reciprocal of the absorption coefficient.

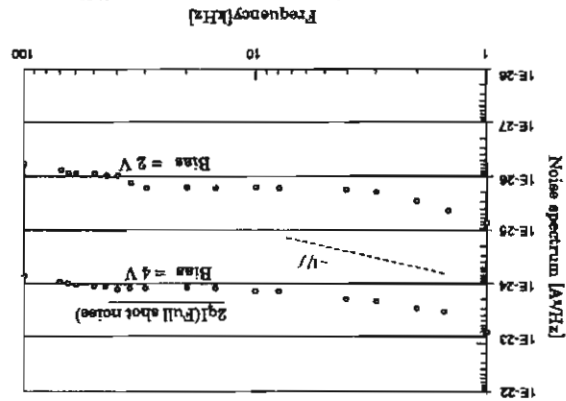
3. RESULTS AND DISCUSSION

Fig. 3. Block diagram of noise measurement system. For calibration of the system and noise observation in time domain, sw.1 and sw.2 are switched, respectively.



voltage drop across the load was then introduced to a low-noise preamplifier (Ithaco 1201) and finally detected by a lock-in voltmeter (NF 5560). To check the system characteristic, a white noise generator (Ando GRN-2) was used. To irradiate the device, a xenon lamp dc-operated was used as a light source, the intensity of which was controlled by an ND filter.

Fig. 6 Noise spectra of a 20 μm separated electrode sample at two different bias of 2V and 4V at a current of 6-7 μA . At lower frequencies, flicker noise is dominant.



When the bias voltage increases, the corresponding noise is also elevated, and asymptotically approach full shot noise given by the solid line calculated from Eq.(1). That is, the noise ratio defined in Eq.(2) is an increasing function of bias voltage, whilst the relation expressed by Eq.(2) is maintained within these plots. When the bias is at 0.5V, the corresponding noise ratio lies around two orders of magnitude lower than that of full shot noise. This extremely small noise ratio is not completely explained by the consideration of the planar metal-semiconductor-metal (MSM) structure, where spatially uniform carrier generation is taking place [2,11].

Fig.5 Shot noise spectra versus photocurrent of a Mo/n-Si/Mo structure at 10kHz, taking the bias voltage as a parameter.

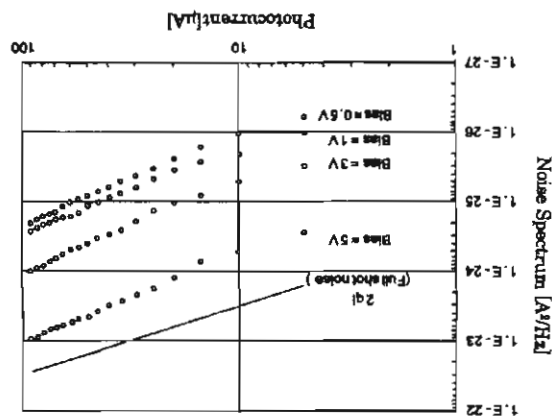


Figure 5 shows the noise-photocurrent relationship in log-log scale at 10kHz for a sample, taking bias voltage as a parameter. Here, the noise and the photocurrent were obtained by subtracting the noise in the dark from the noise as measured and by subtracting the corresponding dark current at the same bias from the device current as measured, respectively. From these noise measurements, one finds that the plots are straight, resulting in coincidence with the relationship predicted from Eqs.(1) and (2). The measurements revealed that the current noise observed depends not only on the illumination intensity levels but also on bias voltage [15-16].

Therefore, an extremely small autocorrelation function for the drift current can occur, while the autocorrelation coefficient for the diffusion current remains unchanged at low level.

the depleted region is low enough to satisfy the relation $\tau_1 \gg \tau_2$.

autocorrelation function $c(s)$ for the structure would be expected since the internal field in function of the currents at lower biases [8,9,11]. That is, making use of Eq. 9), very small small noise ratio as observed, such a noise is attributed to the small relevant autocorrelation ratio lies at higher levels at a bias of 4V for the present structure. In order to explain such carriers generated in the undepleted region is small. This could be the reason why the noise depleted region is relatively large, although the autocorrelation function coefficient for the Under this condition, the autocorrelation function for the photogenerated carriers in the field becomes higher than under the lower biases as the numerical simulation predicts [3-5]. relatively high such as 4V in Fig. 6. It can presumably be assumed that the internal electric less than the full shot noise intensity, $2qI$. Let us consider the case that the applied bias is them are created inside the area and captured again. In this case, the noise intensity is much Few carriers then enter the area at one side or leave it at other side; instead, most of

$$c(s) = \exp(-s/\tau_1) \quad (9)$$

electrode. Under such condition, $\tau_1 \gg \tau_2$ and thus the autocorrelation function reduces to are liberated inside the semiconductor and are captured again before they arrive at the positive ions or recombination. This condition means that most electrons taking part in the conduction collision the electrons drift again in similar way until the electrons are captured by positive electrodes. This current fluctuation is due to the drift of the electron in the field and even after motion of electrons; this gives rise to shot effect within semiconducting material between the If the electric field E is applied, a drift velocity is superimposed on the random narrow.

the full shot noise formula (1) should be expected; this case applies if the active area is very area at electrode on one side and leave the electrode on the other side of the area. Therefore, autocorrelation function reduces to $c(s) = (1 - s/\tau_1)$ if $\tau_1 \gg \tau_2$; all carriers then enter the active subsequent recombination; τ_2 is the average drift or diffusion time of the carriers. The Here τ_1 is the average free time of the carriers between their generation by incident light and

$$c(s) = 0 \quad \text{for } s > \tau_1 \quad (8)$$

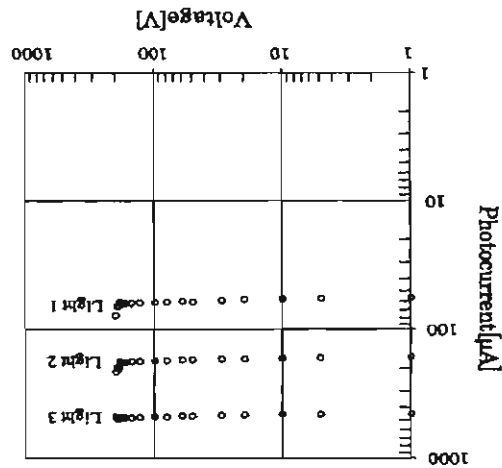
and

$$c(s) = (1 - s/\tau_1) \exp(-s/\tau_1) \quad \text{for } s > \tau_1 \quad (7)$$

on one-side, but also by recombination or trapping inside the material. Consequently, semiconductor, carriers may be taken out of circulation not only by arriving at the electrode instant t that still contribute to the current fluctuation I at the instant $(t+s)$. In a materials [1-3], the correlation function $c(s)$ represents the number of carriers present at the According to the existing theory of the autocorrelation function for semiconductor solid line shows full shot noise respectively to guide the eye. for 20 μ m-separated electrode sample, where broken line shows the slope of flicker noise and frequency. In lower frequency region than 10kHz, flicker noise is dominant as shown in Fig. 6 examined is from 10kHz to 100kHz, where the noise spectral density is independent of the Measurements for noise spectra at low frequencies were performed. The frequency range

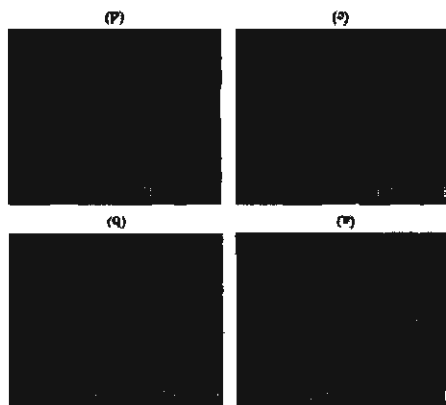
For comparison, the measurements revealed that the current noise depends not only on the illumination intensity levels as ordinal (not planar but vertical) photodetectors but also on bias

Fig. 8 Photocurrent-voltage (I_p - V) characteristics of a pin photodetector.



As mentioned in a two-terminal semiconductor device carrying an average (dc) current, the associated noise would be of full shot noise type. The qualitative explanation for these experimental results giving rise to such low levels of noise is as follows. Accordingly, the change of depletion width cannot give rise to the reduction of autocorrelation of carriers than expected in Mo-Si systems. This explanation is also consistent with the I_p - V characteristics given in Fig. 8. In this figure, the increase in bias voltage does not contribute the increase in the photocurrent. This is the reason why the present sample show smaller bias dependence of the noise observed.

Fig. 7 Oscilloscope traces of instantaneous noise under different biases at the same current of 60 μ A. Ver.: 2 mV/div, Hor.: 200 μ sec/div.



The photographs in Fig. 7 (a)-(d) show the instantaneous noise on an oscilloscope at the same photocurrent but different biases for a sample under test. It is apparent that the noise varies rapidly with applying bias even under the same current level.

Fig. 10 Noise spectral density at 10 kHz versus photocurrent of the commercial pin photodiode, taking the bias voltage as a parameter.

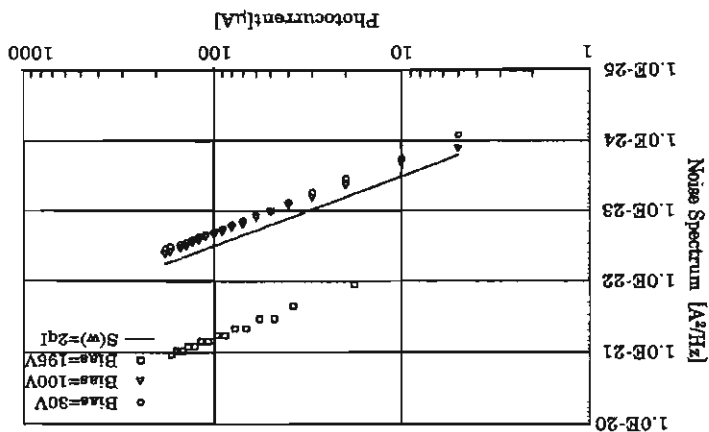
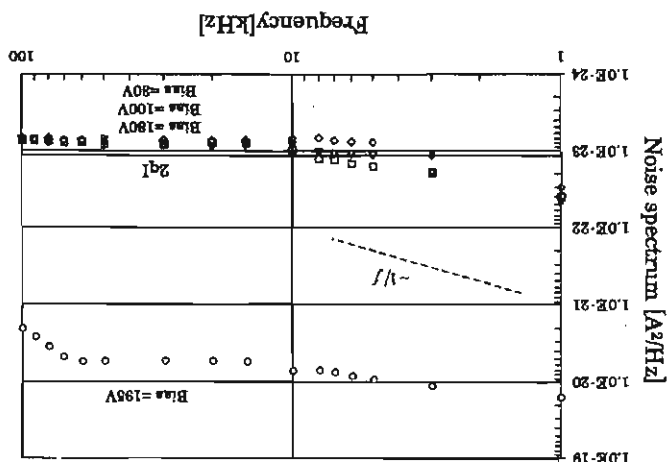


Figure 9, shows the measured noise spectra at photocurrent 30 μ A of the pin photodetector treated in Figs. when the applied bias is taken as a parameter. To compare the results, the typical photocurrent dependence of the noise for the pin photodiode is given in Fig. 10. The experimental results give rise to the noise ratio r^2 approximately between 0.84-0.86 as shown in Fig. 9. One also finds from the figure that the linear photocurrent dependence of noise is seen to increase with bias towards the 'avalanche breakdown' of the diode [14,16]. The magnitude of the corresponding noise increases steeply, to reach $9E^{-21} A^2/Hz$ at 195V.

Fig. 9 Noise spectra of a commercial pin photodetector under different bias of 30V, 100V, 180V and 195V at the current 30 μ A. At lower frequencies, flicker noise is dominant.

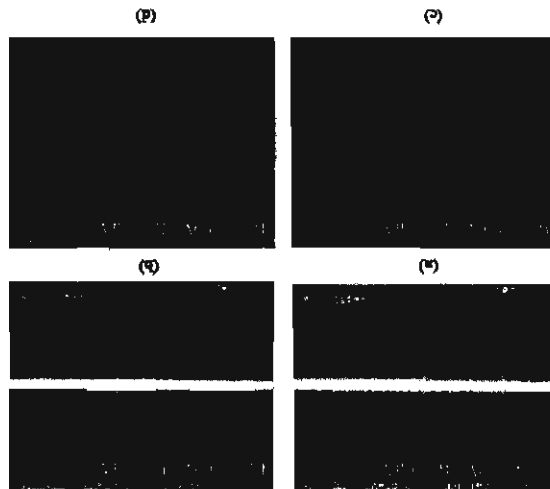


volages. The pin photodiode examined here, which consists of a lightly-doped or intrinsic region sandwiched between p and n regions, represents a better alternative to the simple $p-n$ photodiode. This is because, at relatively low reverse biases, the intrinsic region is fully depleted and the total depletion region width including those from the p and n regions remains almost constant when the peak electric field inside the depletion region is increased [16-17].

The noise characteristics at low-frequency region ranging 10kHz-100 kHz, where the noise is frequency-independent, were measured of planar Mo/n-Si/Mo optical sensor structures under optical illumination. The current noise spectral density was found to be not only current-dependent but also bias-dependent. The noise ratio for these structures was lower than simple shot noise by two orders of magnitude under some cases, depending on the bias applied. These low-noise behaviors have been qualitatively explained and attributed to three mechanisms: (1) No crosscorrelation between the drift current due to carriers emerging from the depleted region and the diffusion current due to carriers emerging within the diffusion length from the boundary with the depleted region. (2) Spatially uniform carrier generation in both depleted and undepleted regions. (3) Small autocorrelation coefficient of the drift- and diffusion-currents coming from low internal field in accordance with small applying bias.

4. CONCLUSION

Fig. 11 Oscilloscope traces of instantaneous noise of the pin photodetector treated in Figs. 8-10 under different biases at the same current of 30 μ A. Ver.: 2mV/Div., Hor.: 200 μ s/Div.



For reference, about the same sample appeared in Figs. 9 and 10, Figs. 11(a)-(d) show the instantaneous noise in time domain on an oscilloscope at the same photocurrent but different biases, which are observed through the low-noise preamplifier. It is apparent that the magnitude of the noise does not increase with the increase in bias before breakdown starts despite of making the photocurrent fixed at about 30 μ A.

In spite that the bias voltage increase to 180V, the noise spectra remains substantially in the level of noise for 195V bias jumps to much higher level. This must be attributed to the onset of avalanche breakdown which is inherently noisy process [15-17]. Under breakdown condition, the reverse current increases very sharply, and relatively large currents can flow with a little further increase in voltage [4,16]. Because of the carrier multiplication due to impact ionization, the current entering the depletion layer is multiplied by a factor, M , known as the multiplication factor, as it crosses the layer. Figure 9 and 10 strongly suggest that, according to McIntyre's theory [16], the step increase in current and noise up to much higher level than near the breakdown voltage is due to impact ionization multiplication in the junction reverse-biased [17].

- [1] Wieslaw AL, Ziel AV, Eugene RC. Investigation of the transition from tunneling to impact ionization multiplication in silicon p-n junctions. *Solid-State Electron* 1976;19:57.
- [2] A. (Aldert) van de Ziel. *Noise in Solid State Devices and Circuits*. New York: John-Wiley; 1986.
- [3] A. (Aldert) van de Ziel. Fluctuation phenomena in semiconductor diodes. London: Butterworths Scientific; 1959.
- [4] A. (Aldert) van de Ziel. Shot noise in back biased P-N silicon diodes. *Solid-State Electron* 1975;18:969.
- [5] Y. Sato, H. Miyagi, S. Takano, T. Taguchi, T. Matsumoto, K. Sato. Transit-time limited shot noise due to carrier generation in semiconductor diodes: A new approach. *Solid-State Electron* 1998;42:660.
- [6] S. Khunkhao, T. Masui, K. Sato. Matrix representation of shot noise due to carrier generation in planar double Schottky-barrier structures. *Solid-State Electron* 2003;47:913.
- [7] K. Sasaki, K. Sato. Shot noise in back-biased step junctions with exponential carrier generation rate. *Jpn J Appl Phys* 1991;30.
- [8] K. Sato, T. Matsumoto, S. Niemcharen. Current fluctuations due to locally distributed charge generation in semiconductor junctions: A theoretical study. *Solid-State Electron* 1993;31:1362.
- [9] S. Khunkhao, S. Niemcharen, S. Supadech, K. Sato. White noise due to photocurrents in planar MSM structures on low-resistivity Si. *Solid-State Electron* 2003;47:1869.
- [10] S. Khunkhao, Y. Yasumura, K. Kitagawa, T. Masui, K. Sato. On laterally spreading of space-charge-region in planar metal-semiconductor-metal structures. *Solid-State Electron* 2003;47:1811.
- [11] S. Khunkhao, T. Aoki, T. Masui, K. Sato. Low-noise behavior of planar Mo/n-Si/Mo optical sensor structures. *Solid-State Electron* 2004;48:149.
- [12] P.O. Lauitzen. Noise due to generation and recombination of carriers in p-n junction transition regions. *IEEE, ED-15:770* 1968;ED-15:770.
- [13] T. Igo and K. Sato. "Noise Characteristics in Silicon Photodiodes", *Jpn J Appl. Phys.* Dec. 1969, No. 12, Vol. 8, pp. 1481-1491.
- [14] A. Goetzberger, B. McDonald, R. H. Haliz, and R. M. Scarlett. "Avalanche Effects in Silicon p-n Junctions. II. Structurally Perfect Junctions", *J Appl. Phys.* 34, 1963, pp. 1581.
- [15] C. S. Harder, B. J. Van Zegbroeck, M. P. Kesler, H. P. Meier, P. Vettiger, D. J. Webb, P. Wolf. "High-speed GaAs/AlGaAs optoelectronic devices for computer applications", *IBM J. Res. Develop, High-speed semiconductor devices*, Vol. 34, 1990, pp. 568-584.
- [16] R.J. McIntyre. Multiplication noise in uniform avalanche diodes. *IEEE Trans Electron Dev* 1966;ED-13:164.
- [17] L. Scott, M.L.O. Strutt. Spontaneous fluctuations in the leakage current due to charge generation and recombination in semiconductor diodes. *Solid-State Electron* 1966;9:1067.

REFERENCES

The authors are thankful to Dr. W. Titmoonprang of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for fruitful discussion. Continuous encouragement of Dr. R.P. Phukkamarn of Sripatum University is deeply appreciated. This work was supported in part by The Thailand Research Fund and Commission on Higher Education.

5. ACKNOWLEDGMENTS

It can be mentioned that such low photoinduced shot noise of optical sensing structures is of much interest from the view point of the signal-to-noise (S/N) ratio of optical sensing structures.

ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM แบบสลิตเดี่ยวที่มี ระยะห่างขั้วไฟฟ้าขนาดเล็ก ชนิด Al/n-Si/Al

Electrical Characteristics of Al/n-Si/Al Photodiode with Short Electrode Gap, Single Slit, MSM Structure

สุรศักดิ์ เนียมเจริญ¹ วรเทพ น้อยปรีชา¹ สันญา คุณขาว²

¹ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ และภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 3 หมู่ 2 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทร. (66)-2739-0643 E-mail : knsurasa@kmitl.ac.th

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้เสนอผลของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM สลิตเดี่ยวที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าขนาดเล็ก ชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์ ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาด 2 μm , 3 μm , 5 μm , 7 μm และมีขนาดขั้วไฟฟ้า 1x1 mm² และ 2 x 2 mm² ผลการทดลองพบว่า การเกิดกระแสแสง เมื่ออุปกรณ์ได้รับแรงดันไบแอสทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะขยายตัว เนื่องจากขนาดขั้วไฟฟ้าที่ออกแบบมีขนาดเล็กทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายจนเต็มระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งหมดและสนามไฟฟ้าที่ให้กับจะครอบคลุมบริเวณปลอดพาหะทั้งหมด จะเห็นว่าไม่มีบริเวณนิวทรัล อยู่เลยส่งผลให้กระแสแสงทั้งหมดนั้นเกิดมาจาก บริเวณปลอดพาหะ

คำสำคัญ : โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ, ตัวตรวจวัดแสง, รอยสัมผัส肖ตกี

Abstract

This paper presents the evaluation results of a single-slit MSM-structured photodiode with small planar Al/n-Si/Al electrode gap. The size of the electrode gap in the test is set at 2 μm , 3 μm , 5 μm , and 7 μm , together with 1x1 mm² and 2x2 mm² electrode sizes. The experimental results indicate that the photocurrent occurs when the device is applied with a bias voltage, causing the depletion region to expand. Due to the small size of the designed electrode gap, the depletion region would fill up the gap and the applied electric field completely covers the whole region. Consequently there is no neutral area and all the photocurrent would then occur only from within the depletion region.

Keywords : Metal-Semiconductor-Metal, Photodetector, Schottky contact

1. บทนำ

โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM (Metal-Semiconductor-Metal) เป็นโฟโตไดโอดชนิดหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจ ด้วยคุณสมบัติเด่นในด้านความเร็วในการตอบสนองสูง มีโครงสร้างแบบพลาแนร์ซึ่ง สร้างได้ง่าย สามารถสร้างร่วมกับ FET เป็นวงจรรวมด้านออปโต-อิเล็กทรอนิกส์ได้ ข้อดีอีกประการของ MSM โฟโตไดโอดคือมีค่าความจุไฟฟ้าต่อขนาดพื้นที่ต่ำจึงสามารถสร้างให้พื้นที่รับแสงมีขนาดใหญ่เพื่อ ช่วยให้การเชื่อมต่อกับเส้นใยแก้วนำแสงทำได้ง่ายขึ้น [1,2]

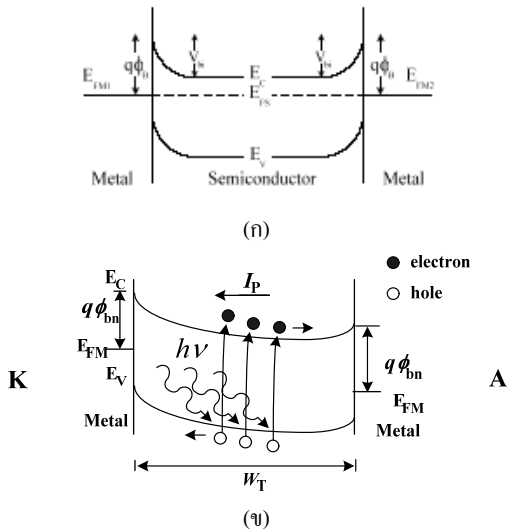
ในรายงานฉบับนี้ได้เสนอผลของการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ขนาดของขั้วไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง และค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM สลิตเดี่ยวที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าขนาดเล็ก ชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์

2. โครงสร้าง MSM

MSM โฟโตไดโอด เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยรอยสัมผัสแบบ肖ตกี 2 รอยสัมผัส เมื่อขั้วไฟฟ้าทั้งสองต่อกันแบบอนุกรม ทำให้มีลักษณะของ肖ตกีไดโอดสองตัวต่อกันแบบหันหลังชนกัน โดยระหว่างรอยสัมผัสแบบ肖ตกีทั้งสองจะเป็นบริเวณพื้นที่รับแสง แถบพลังงานในภาวะสมดุลความร้อนแสดงดังรูปที่ 1 (ก)

เมื่อให้แรงดันไบแอส V_A แก่ขั้วโลหะทั้งสอง โดยขั้วหนึ่งเป็นแอโนด (Anode) และอีกขั้วเป็นแคโทด (Cathode) จะทำให้ด้านแอโนดเกิดไบแอสตรง ที่ขั้วโลหะแอโนดจะมีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำซึ่งจะทำให้กำแพงศักย์ที่รอยสัมผัสมีค่าลดลงเป็น $(V_{bi} - V_A)$ ทำให้อิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปที่ขั้วโลหะได้ เกิดกระแสไฟฟ้า (I_{MS}) ไหลจากด้านโลหะผ่านรอยสัมผัสไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ส่วนที่ด้านแคโทดเกิดไบแอสย้อนกลับโดยที่ขั้วแคโทดมีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำ

กำแพงศักย์มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $(V_{bi} + V_A)$ และความกว้างบริเวณปลอดพาหะขยายเพิ่มขึ้นสนามไฟฟ้าที่รอยสัมผัสมีค่าสูงขึ้น ดังนั้น อิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางขั้วโลหะได้ แต่จะมีอิเล็กตรอนในโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์เข้าไปในด้านสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดกระแส (I_{SM}) ไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปยังขั้วแคโทดเกิดเป็นกระแสมืด (Dark current) ของโฟโตไดโอด ดังในรูปที่ 1 (ข) [6]



รูปที่ 1 (ก) แถบพลังงานในสภาวะสมดุลความร้อน
(ข) แถบพลังงานเมื่อได้รับแสงอินฟราเรด

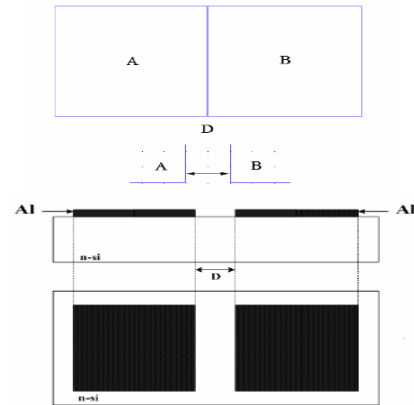
เมื่อโฟตอนตกกระทบบนผิวของสารกึ่งตัวนำจะถูกดูดกลืนและทำให้เกิดอิเล็กตรอน-โฮลขึ้นบริเวณปลอดพาหะ (Depletion region) อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นบริเวณปลอดพาหะจะเคลื่อนที่ด้วยสนามไฟฟ้าไปยังอิเล็กโทรด โดยโฮลจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแคโทด อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแอโนดเพราะเมื่อให้แรงดันไบอัส จะทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายตัวออก ในขณะที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้าที่มีค่าน้อย ดังนั้นพื้นที่รับแสงระหว่างขั้วแคโทดและแอโนดจะมีเฉพาะบริเวณปลอดพาหะเนื่องจากขนาดของระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดเล็กกว่าค่าบริเวณปลอดพาหะทำให้มีแต่บริเวณปลอดพาหะเท่านั้นไม่มีบริเวณนิวทรัลแล้วกระแสแสงทั้งหมดเกิดจากบริเวณปลอดพาหะเท่านั้น

3. การสร้างชิ้นงาน

เริ่มจากนำแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น สภาพต้านทาน $7-21 \Omega\cdot\text{cm}$ ทำการสร้างชั้น SiO_2 (Thermal Oxidation) ความหนา $5,000 \text{ \AA}$ จากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการโฟโตลิโกราฟีครั้งที่ 1 เพื่อสกัด SiO_2 ออกในส่วนที่ต้องการให้เป็นพื้นที่รับแสง แล้วจึงทำการเคลือบด้วยโลหะอลูมิเนียม (Vacuum Evaporator) จากนั้นจึงทำการกระบวนการ

โฟโตลิโกราฟีครั้งที่ 2 เพื่อสร้างลวดลายอิเล็กโทรดบนชั้นอลูมิเนียม แล้วจึงนำชิ้นงานไปทำการขึ้นเตอรริงที่อุณหภูมิ 500°C ในบรรยากาศของ แก๊สไนโตรเจน เพื่อให้เกิดรอยสัมผัสที่ดีที่สมบูรณ์ทำให้เกิดกระแสรั่วไหลต่ำ [3]

โฟโตไดโอด Al/n-Si/Al ที่สร้างขึ้นแสดงในรูปที่ 2 โดยระยะห่างขั้วไฟฟ้า (D) มีขนาด $2 \mu\text{m}$, $3 \mu\text{m}$, $5 \mu\text{m}$, $7 \mu\text{m}$ และมีขนาดขั้วไฟฟ้า $1 \times 1 \text{ mm}^2$ และ $2 \times 2 \text{ mm}^2$



รูปที่ 2 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al

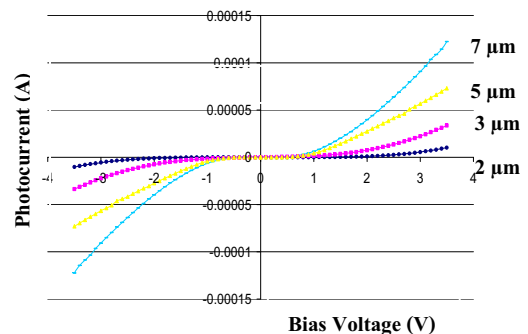
4. การทดลองและผลการทดลอง

4.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน

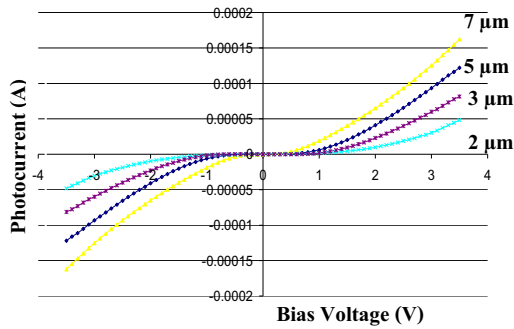
ทำการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์กระแส-แรงดันโดยแสงที่ตกกระทบบนผิวของแผ่นซิลิคอนซึ่งสามารถปรับความเข้มแสงได้ โดยวัดกระแสและกระแสรวมด้วยเครื่องวัดลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ HP 4061A ค่ากระแสแสงหาได้จากกระแสรวมที่ได้จากการวัดลบด้วยกระแสมืด ดังสมการ ที่ 1

$$I_{\text{Photo}} = I_{\text{Total}} - I_{\text{Dark}} \quad (1)$$

4.1.1 ผลของระยะห่างขั้วไฟฟ้า (D) ต่อกระแสแสง-แรงดัน

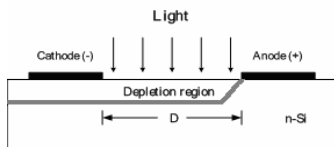


รูปที่ 3 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ขนาดขั้วไฟฟ้า $1 \times 1 \text{ mm}^2$
ความเข้มแสง 25000 lux



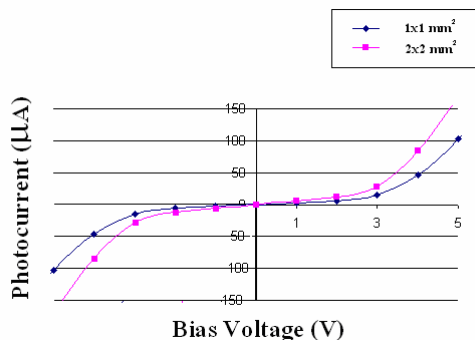
รูปที่ 4 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน ที่ขนาดขั้วไฟฟ้า $2 \times 2 \text{ mm}^2$ ความเข้มแสง 25000 lux

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไบอัสและความกว้างบริเวณปลอดพาหะ พบว่าเมื่อให้แรงดันไบอัสจะทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายตัวออก ในขณะที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้าที่มีค่าน้อย ดังนั้นพื้นที่รับแสงระหว่างขั้วแคโทดและแอโนดจะมีเฉพาะบริเวณปลอดพาหะ เนื่องจากขนาดของระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดเล็กกว่าค่าบริเวณปลอดพาหะ ดังนั้นค่าของกระแสแสงจะมีแต่บริเวณปลอดพาหะเท่านั้น ไม่มีในส่วนของบริเวณนิวทรัลแสดงกระแสแสงทั้งหมดเกิดจากบริเวณปลอดพาหะเท่านั้น ซึ่งแสดงว่าแรงดันทั้งหมดจะตกคร่อมที่บริเวณปลอดพาหะดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 โครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้า (D) มีขนาดเล็ก

4.1.2 ผลของความหนาของขั้วไฟฟ้าต่อกระแสแสง-แรงดัน

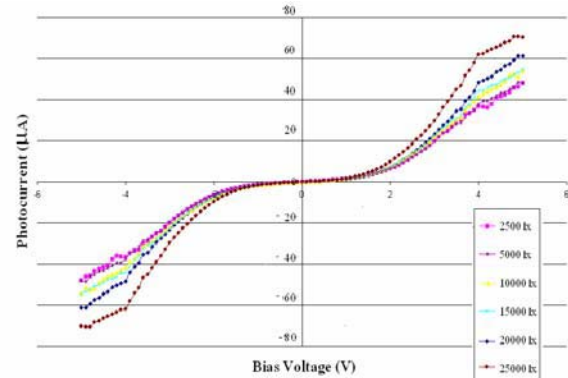


รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงขนาดของขั้วไฟฟ้าที่มีขนาด $1 \times 1 \text{ mm}^2$ และ $2 \times 2 \text{ mm}^2$ ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 5 μm ความเข้มแสง 20000 lux

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของขั้วไฟฟ้าที่แรงดันไบอัสคงที่ค่าหนึ่งพบว่าโฟโตไดโอดที่มีขนาดของขั้วไฟฟ้า $1 \times 1 \text{ mm}^2$ ให้

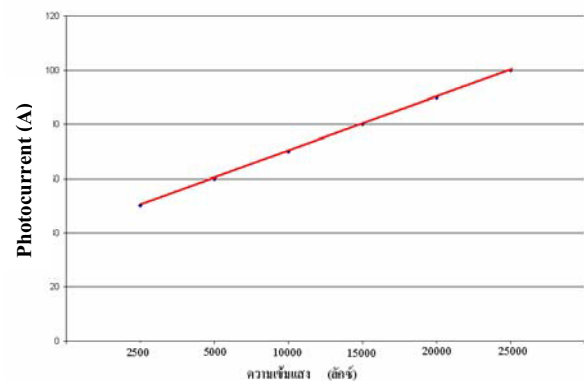
กระแสแสงต่ำกว่าขนาดของขั้วไฟฟ้า $2 \times 2 \text{ mm}^2$ เนื่องจากการเพิ่มขนาดของขั้วไฟฟ้าเป็นการเพิ่มพื้นที่รับแสงให้มากขึ้น ดังนั้นบริเวณปลอดพาหะซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดกระแสแสงของโฟโตไดโอดมีพื้นที่เพิ่มมากขึ้น กระแสแสงของโฟโตไดโอดจึงมีค่าสูงขึ้น

4.1.3 ผลของความเข้มแสงต่อกระแสแสง-แรงดัน



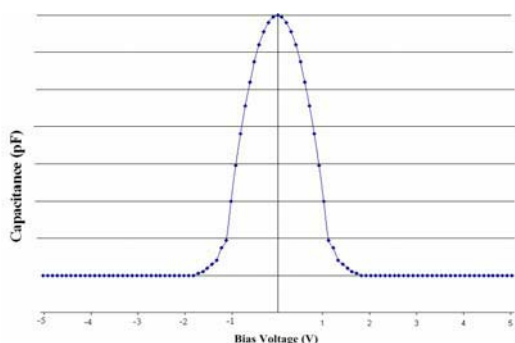
รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง ในช่วง 2,500 – 25,000 ลักซ์ ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 5 μm ขนาดขั้วไฟฟ้า $1 \times 1 \text{ mm}^2$

จากลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของโฟโตไดโอดในรูปที่ 7 เป็นลักษณะของซีดคัททียไดโอดเมื่อได้รับไบอัสย้อนกลับ และมีความสมมาตรกันทั้งด้านบวกและลบ เนื่องจากในโครงสร้าง MSM เป็นรอยสัมผัสแบบซีดคัททีย 2 รอยสัมผัสต่อแบบหันหลังชนกัน เมื่อมีความเข้มแสงตกกระทบบนโฟโตไดโอดเป็น 2500 ลักซ์ให้กระแสแสงน้อยที่สุด เมื่อเพิ่มความเข้มแสงที่ตกกระทบบนโฟโตไดโอดเป็น 5000, 10000, 15000, 20000 และ 25000 ลักซ์ ทำให้โฟโตไดโอดมีกระแสแสงสูงมากขึ้นจากการนำข้อมูลสมบัติกระแสแสง-แรงดันมาแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความเข้มแสงที่แรงดันไบอัส 5 V ในรูปที่ 8 พบว่าการเพิ่มขึ้นของกระแสแสงต่อการเพิ่มความเข้มแสงเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นทำให้ใช้เป็นตัวตรวจวัดความเข้มแสงได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 8 กราฟกระแสแสงกับความเข้มแสง ในช่วง 2,500 – 25,000 ลักซ์ ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 5 μm ขนาดขั้วไฟฟ้า $1 \times 1 \text{ mm}^2$

4.1.4 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน



รูปที่ 9 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ Al/n-Si/Al

ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ Al/n-Si/Al ที่ขนาดขั้วไฟฟ้า $2 \times 2 \text{ mm}^2$ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า $5 \text{ }\mu\text{m}$ มีค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ 25 pF ที่ไบอัส 1.5 V ความจุไฟฟ้ามีค่าคงที่เมื่อเพิ่มไบอัสเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากบริเวณปลอดพาหะขยายจนเต็มระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

5. สรุป

การเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทำให้ค่าของกระแสแสงมีค่าเพิ่มขึ้นเพราะเนื่องจากโครงสร้างแบบสลิคเตียว ขนาดเล็ก (Short electrode) เมื่อบริเวณปลอดพาหะขยายจนเต็มระยะห่างขั้วไฟฟ้า (D) ทำให้เกิดกระแสเพิ่มขึ้น

การเพิ่มขนาดของขั้วไฟฟ้าเป็นการเพิ่มพื้นที่รับแสงให้มีค่ามากขึ้น ดังนั้นขนาดบริเวณปลอดพาหะซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดกระแสแสงของโฟโตไดโอดมีพื้นที่เพิ่มมากขึ้น กระแสแสงของโฟโตไดโอดจึงมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากการเพิ่มพื้นที่รับแสงให้มีค่ามากขึ้น ดังนั้นขนาดบริเวณปลอดพาหะมากขึ้น ส่งผลให้มีบริเวณรับแสงมากขึ้น ดังนั้นกระแสแสงเพิ่มขึ้นเช่นกัน

การเพิ่มความเข้มแสงที่ตกกระทบบนโฟโตไดโอด ทำให้โฟโตไดโอดมีกระแสแสงสูงมากขึ้น โดยการที่กระแสแสงของโฟโตไดโอดมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มแสง เนื่องมาจากปริมาณโฟตอนที่ตกกระทบบนโฟโตไดโอดมีมากขึ้น

ความจุไฟฟ้า-แรงดันของ Al/n-Si/Al ที่ขนาดขั้วไฟฟ้า $2 \times 2 \text{ mm}^2$ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า $5 \text{ }\mu\text{m}$ มีค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ 25 pF ที่ไบอัส 1.5 V

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่านที่ให้ความรู้ รวมถึงคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยของคุณ คุณสุชาติ เมืองอ่ำ ที่ให้ความช่วยเหลือและมีส่วนร่วมในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. R. Berger, "MSM Photodiodes," IEEE Potentials, Vol. 15, No 2, pp. 25-29, 1996
- [2] S.V. Averine, Y.C. Chan, Y.L. Lam, "Optimization of high-speed MSM-photodiode structures," IEEE CNF, pp. 515-518, 2000
- [3] ธนศ โชะเหม, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, สราวุธ วิศวแสงสุข, "ผลกระทบของอุณหภูมิซินเดอริงที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์," วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 21, ฉบับที่ 3, กันยายน, หน้า 14-19, 2547.
- [4] ธนศ โชะเหม, มานิตา ดั่งแสง, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, "การเกิดกระแสแสงของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง," รออการตีพิมพ์ในวิศวกรรมลาดกระบัง
- [5] T. Masui, S. Khunkhao, K. Kobayashi, S. Niemcharoen, S. Supadech, "Photosensing properties of interdigitated metal-semiconductor-metal structures with undepleted region," Solid-state Electronic, Vol. 47, pp. 1385-1390, 2003
- [6] รศ.ดร.สมเกียรติ สุกเดช, "สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ" คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ.2540



สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ค็อกเตอร์
ปัจจุบันอาจารย์ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



วรเทพ น้อยปรีชา

ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ปัจจุบันกำลังศึกษาปริญญาโท สาขา
วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



สัตยญา คูนขาว

จบการศึกษาระดับปริญญาเอกจาก
มหาวิทยาลัยโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น
ปัจจุบันอาจารย์มหาวิทยาลัยศรีปทุม