บทที่ 6
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาผลตอบสนองทางแสง โดยเฉพาะในส่วนที่เกี่ยวข้องกับกระแสแพร่ซึมของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิด GaAlAs/GaAs โดยการออกแบบโครงสร้างมีจุดประสงค์เพื่อช่วยลดกระแสแพร่ซึมของพาหะที่เกิดภายในระยะแพร่ซึมนับจากขอบของชั้นทำงาน อันเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณเอาท์พุตของโฟโตไดโอดในเชิงเวลา และทำให้ค่าความเร็วในการตอบสนองของโฟโตไดโอดลดลง โฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดที่ทำการออกแบบ มีด้วยกันทั้งสิ้น 4 โครงสร้าง ได้แก่

1) Pin Photodiode เป็นโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดที่มีโครงสร้างซับซ้อนน้อยที่สุด อันประกอบด้วย ชั้นหน้าต่างหลัก (MWL) P^+ -$Ga_{0.8}Al_{0.2}As$ ชั้นทำงาน n^- -GaAs และแผ่นฐาน n^+ -GaAs ทั้งนี้เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับผลตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้างอื่นๆ

2) PPin Photodiode เป็นโครงสร้างที่มีชั้นรับแสงสองชั้น ประกอบด้วยชั้นหน้าต่างหลัก P^+ -$Ga_{0.8}Al_{0.2}As$ และชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้น (SWWL) P^+ -$Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ ที่ทำหน้าที่กั้นพาหะส่วนที่ทำให้เกิดกระแสแพร่ซึมทางด้านความยาวคลื่นสั้นให้ออกห่างจากหัวต่อ และภายในชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้นก็มีอัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลต่ำมาก

3) PPiNn Photodiode เพื่อขจัดกระแสแพร่ซึมจากแผ่นฐานจึงออกแบบให้มีการแทรกชั้นสารที่มีค่าช่องว่างพลังงานกว้าง เช่น N^+ -$Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ ระหว่างชั้นทำงานและแผ่นฐาน เรียกว่าชั้นหน้าต่างแสงคลื่นยาว (LWWL) โดยในโครงสร้างนี้กำหนดให้ชั้นหน้าต่างแสงคลื่นยาวเติมสารเจือ Te-doped 10^{18} cm^{-3} ซึ่งมีความเข้มข้นของการเติมสารเจือเท่ากับแผ่นฐาน

4) PPiIn Photodiode กำหนดให้ชั้นหน้าต่างแสงคลื่นยาวเป็น N^- -$Ga_{0.6}Al_{0.4}As$, Sn-doped 10^{15} cm^{-3} ซึ่งมีความเข้มข้นของการเติมสารเจือเท่ากับชั้นทำงาน ในกรณีนี้ชั้นทำงานของโฟโตไดโอดจะครอบคลุมทั้งของ n^- -GaAs และ N^- -$Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ จึงทำให้ชั้นทำงานของโครงสร้างนี้กว้างกว่าโครงสร้างอื่นๆ เพื่อให้ค่าความจุไฟฟ้ามีค่าน้อยลง จึงน่าจะส่งผลให้ความเร็วในการตอบสนองของโฟโตไดโอดโครงสร้างนี้ดียิ่งขึ้น

การคำนวณผลตอบสนองทางแสง แบ่งพิจารณาเป็นสองกรณีคือ

บทบาทของชั้นทำงาน การออกแบบความหนาชั้นทำงานให้เหมาะสมก็เป็นปัจจัยสำคัญต่อค่าความเร็วในการตอบสนองของโฟโตไดโอด ดังนั้นจึงทำการเพิ่มหรือลดความหนาของชั้นทำงาน

3 ค่า ที่ 0.5, 1 และ 1.5 μm แนวโน้มโดยรวมพบว่าการเพิ่มความหนาชั้นทำงานจะไม่มีผลต่อปริมาณกระแสแพร่ซึมจากชั้นหน้าต่างด้านบน แต่จะส่งผลให้กระแสแพร่ซึมจากแผ่นฐานหรือชั้นหน้าต่างใกล้แผ่นฐานลดลง ในขณะที่กระแสพัดพาในชั้นทำงานและกระแสสุทธิเพิ่มขึ้น จะเห็นว่าโครงสร้างที่มีชั้นทำงานบางๆจะได้รับผลกระทบจากกระแสแพร่ซึมจากแผ่นฐานมากกว่าโครงสร้างที่มีชั้นทำงานหนาๆ สังเกตได้จากความแตกต่างของค่ากระแสพัดพาและกระแสสุทธิ

ในแง่ของการวิเคราะห์หาโครงสร้างที่ดีที่สุดที่จะช่วยขจัดกระแสแพร่ซึมที่ขอบทั้งสองด้านของชั้นทำงาน พบว่าโครงสร้างที่มีชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้นอาทิ PPin, PPiNn และ PPiIn Photodiode จะสามารถขจัดกระแสแพร่ซึมจากชั้นรับแสงได้ เนื่องจากชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้นมีช่องว่างแถบพลังงานสูงกว่าชั้นหน้าต่างหลัก จึงมีกำแพงพลังงานที่สามารถปิดกั้นการแพร่ซึมของพาหะส่วนที่เกิดในชั้นหน้าต่างหลักได้ นอกจากนี้จากการคำนวณอัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลพบว่าแทบไม่มีพาหะไฟฟ้าเกิดขึ้นเลยในชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้น จึงไม่มีพาหะจากชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้นดังกล่าวแพร่ซึมไปยังย่านทำงานได้ ส่วนกรณีกระแสแพร่ซึมจากแผ่นฐานหรือชั้นหน้าต่างแสงคลื่นยาวใกล้แผ่นฐาน พบว่าโครงสร้าง PPiNn Photodiode จะมีกระแสส่วนนี้น้อยที่สุด เนื่องจากสนามไฟฟ้าของชั้นทำงานอยู่ห่างจากแผ่นฐานเป็นระยะเท่ากับความหนาของชั้นหน้าต่างแสงคลื่นยาว และในชั้นหน้าต่างแสงคลื่นยาวก็มีอัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลต่ำมากๆ จนถือได้ว่าไม่มีพาหะจากชั้นหน้าต่างนี้แพร่ซึมไปยังชั้นทำงาน สำหรับโครงสร้าง PPiIn Photodiode ชั้นทำงานจะเข้ามาประชิดแผ่นฐานจึงป้องกันกระแสแพร่ซึมส่วนนี้ไม่ได้

โดยสรุปแล้วโครงสร้าง PPiNn Photodiode เป็นโครงสร้างที่ดีที่สุดในแง่ช่วยปรับปรุงความเร็วในการตอบสนองของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิด ด้วยการขจัดกระแสแพร่ซึมที่ขอบทั้งสองด้านของชั้นทำงาน อันเป็นที่มาของผลตอบสนองทางแสงที่ขอบด้านความยาวคลื่นสั้นและความยาวคลื่นยาว

บทบาทของชั้นหน้าต่างหลัก อาศัยหลักการที่ว่าการเพิ่มความหนาให้กับชั้นหน้าต่างหลักให้พอเหมาะ จะช่วยขจัดผลตอบสนองทางแสงที่ขอบด้านความยาวคลื่นสั้นอันเกิดเพราะกระแสแพร่ซึมจากชั้นรับแสงได้มากขึ้น สรุปจากการคำนวณผลตอบสนองทางแสงพบว่าโครงสร้างที่มีชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้น (PPin Photodiode) โดยที่ให้ชั้นหน้าต่างหลักหนามากขึ้นจะช่วยขจัดกระแสแพร่ซึมจากชั้นรับแสงได้ดีขึ้นด้วย ดังนั้นจึงมีผลตอบสนองทางแสงที่ขอบด้านความยาวคลื่นสั้นน้อยที่สุด

ในส่วนของการทดลองจะเน้นศึกษาบทบาทของชั้นหน้าต่างหลัก โดยทำการผลิตโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดด้วยเทคนิคเอพิแทกซีสถานะของเหลวทั้งหมด 3 โครงสร้าง ซึ่งมีชั้นทำงาน n^--GaAs และแผ่นฐาน n^+-GaAs เหมือนกัน

1) โครงสร้างที่ 1 คือ Pin Photodiode มีชั้นหน้าต่างหลักเป็น P^+ -$Ga_{0.8}Al_{0.2}As$ หนา 1 μm
2) โครงสร้างที่ 2 คือ PPin Photodiode ภาพตัดขวางจริงของโครงสร้างถ่ายจาก SEM พบว่ามีชั้นหน้าต่างหลักเป็น P^+ -$Ga_{0.8}Al_{0.2}As$ หนา 0.5 μm และชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้น P^+ -$Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ หนา 0.5 μm
3) โครงสร้างที่ 3 คือ PPin Photodiode ภาพตัดขวางถ่ายจาก SEM พบว่ามีชั้นหน้าต่างหลักเป็น P^+ -$Ga_{0.8}Al_{0.2}As$ หนา 0.8 μm และชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้น P^+ -$Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ หนา 0.2 μm

ผลตอบสนองทางแสงของทั้งสามโครงสร้างมีค่าสูงในช่วงความยาวคลื่นใกล้เคียงกัน คือ ประมาณ 743-875 nm แต่จะเห็นว่าผลการทดลองที่ได้มีความแตกต่างกับผลการคำนวณอยู่บ้าง สาเหตุหลักเป็นผลจากประสิทธิภาพเชิงควอนตัมจริงมีค่าต่ำกว่า 1 ในช่วงความยาวคลื่นสั้น ประสิทธิภาพเชิงควอนตัมมีค่าต่ำเนื่องจากศูนย์รวมตัวใกล้รอยต่อพี-เอ็น และในช่วงความยาวคลื่นยาวประสิทธิภาพเชิงควอนตัมมีค่าต่ำเนื่องจากสนามไฟฟ้าตกคร่อมไม่เต็มย่านทำงานตามโครงสร้าง อย่างไรก็ดีเมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองพบว่าโครงสร้างที่ 3 มีผลตอบสนองทางแสงในย่านความยาวคลื่นสั้นต่ำที่สุด ถึงแม้ว่าชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้นจะมีความหนาน้อยกว่าความยาวแพร่ซึมของอิเล็กตรอนก็ตาม เนื่องจากอิทธิพลของกำแพงพลังงานระหว่างชั้นหน้าต่างหลักและชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้นจะสามารถกั้นพาหะที่เกิดในชั้นหน้าต่างหลักมิให้แพร่ซึมเข้ามายังชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้นได้ อีกทั้งอัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอนโฮลในชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้นเองยังมีค่าต่ำมากอีกด้วย จึงถือว่าไม่มีพาหะจากชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้นแพร่ซึมมายังย่านทำงาน

สรุปได้ว่าแนวโน้มที่ได้จากผลการทดลองมีความสอดคล้องกับแนวคิดในการออกแบบโครงสร้าง นั่นคือการใช้โครงสร้างโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดที่มีชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้นจะสามารถช่วยขจัดกระแสแพร่ซึม อันเป็นผลต่อผลตอบสนองทางแสงที่ขอบด้านความยาวคลื่นสั้นได้ และหากเพิ่มความหนาของชั้นหน้าต่างหลักอย่างเหมาะสม จะทำให้ชั้นหน้าต่างหลักดูดกลืนแสงที่มีพลังงานสูงได้มากขึ้น แสงที่มีพลังงานสูงดังกล่าวก็จะทะลุไปยังชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้นได้น้อยลง ทำให้ผลตอบสนองทางแสงที่ขอบด้านความยาวคลื่นสั้นมีค่าน้อยที่สุด

6.2 ข้อเสนอแนะ

1) สามารถนำหลักการในการออกแบบโครงสร้างโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิด GaAlAs/GaAs ที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ ไปใช้ออกแบบโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดที่ผลิตจากสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นได้ด้วย

2) เพื่อศึกษาผลของกระแสแพร่ซึมที่มีต่อความเร็วในการตอบสนองของโฟโตไดโอดให้ชัดเจนยิ่งขึ้น จึงอาจเพิ่มการคำนวณผลตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดในโครงสร้างต่างๆที่ทำการออกแบบด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย