บทที่ 3
การออกแบบโครงสร้างของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิด

จากที่กล่าวในบทที่ผ่านมาแล้วว่า กระแสแพร่ซึมของพาหะที่เกิดภายในระยะแพร่ซึมนับจากขอบของชั้นทำงาน เป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณเอาท์พุตของโฟโตไดโอดในเชิงเวลา และทำให้ค่าความเร็วในการตอบสนองของโฟโตไดโอดลดลง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงจะนำเสนอการออกแบบโครงสร้างของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิด ที่มีจุดประสงค์เพื่อลดกระแสแพร่ซึม ทั้งที่เกิดจากชั้นรับแสงและเกิดจากแผ่นฐานของโฟโตไดโอด โดยจะแสดงโครงสร้างทั้งหมดที่ทำการออกแบบ แบบจำลองแผนผังแถบพลังงาน (Anderson's model) ของหัวต่อต่างชนิด อัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล และการคำนวณผลตอบสนองทางแสงตามลำดับ ผลการคำนวณ อาทิ กระแสแพร่ซึม กระแสพัดพา และกระแสสุทธิ จะถูกนำไปสู่การวิเคราะห์ข้อดีและข้อด้อยของโฟโตไดโอดแต่ละโครงสร้าง

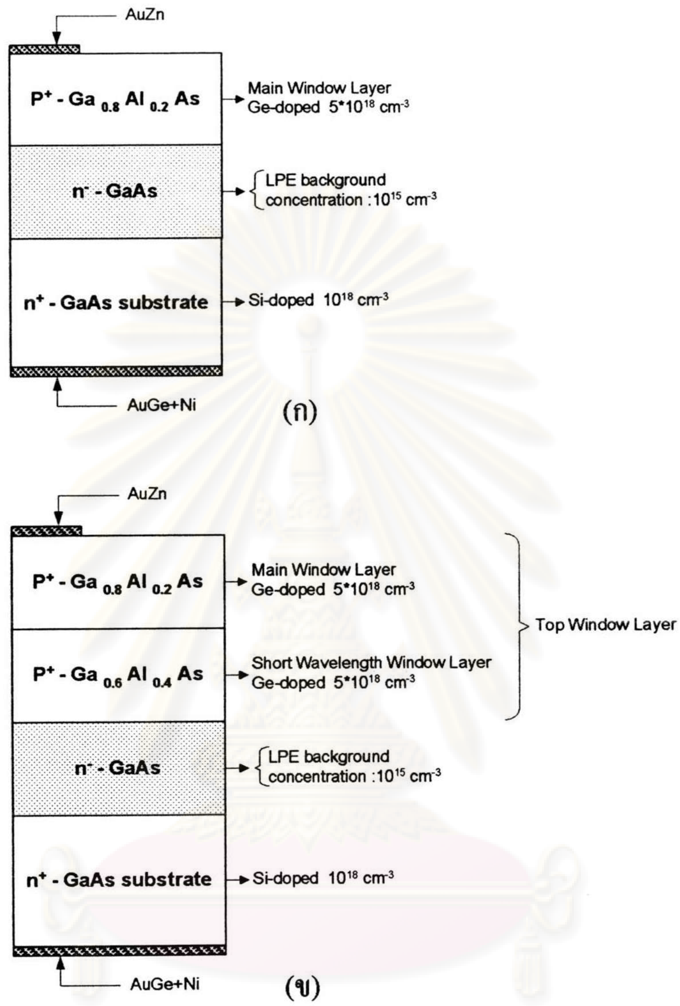
3.1 การออกแบบโครงสร้างของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิด

โดยพื้นฐานเป็นที่เข้าใจกันว่าโฟโตไดโอดที่ดีควรมีชั้นรับแสงบางที่สุด เพื่อให้แสงสามารถทะลุสู่ชั้นทำงานข้างล่างมากที่สุด เงื่อนไขนี้สามารถแก้ปัญหาได้โดยใช้หัวต่อต่างชนิด โดยให้ชั้นรับแสงมีช่องว่างแถบพลังงานกว้างกว่าของชั้นทำงาน เป็นผลให้เกิดปรากฏการณ์หน้าต่างแสง ดังโครงสร้าง Pin Photodiode ที่แสดงในรูปที่ 3.1 (ก)

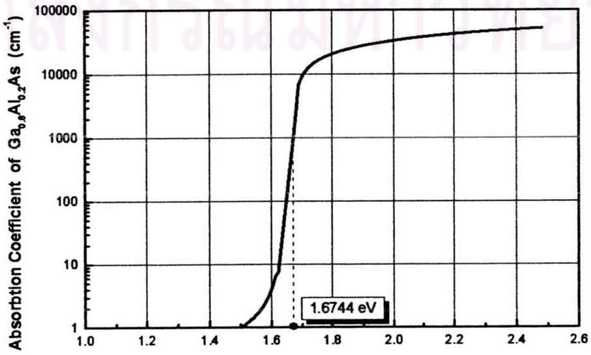
อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์หน้าต่างแสงจะมีประสิทธิผลเต็มที่ก็ต่อเมื่อชั้นรับแสงมีความหนามากกว่าส่วนกลับของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของชั้นรับแสง แต่เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของชั้นรับแสงที่ค่าพลังงานแสงใกล้เคียงกับค่าช่องว่างแถบพลังงานของชั้นรับแสงมีค่าต่ำมาก โดยพิจารณาจากรูปที่ 3.2 ปรากฏการณ์หน้าต่างแสงที่ค่าพลังงานแสงค่านี้จึงไม่มีประสิทธิภาพ ส่งผลให้แสงที่มีค่าประมาณค่าช่องว่างแถบพลังงานแสงจะถูกดูดกลืนห่างจากผิวผลึกลึกถึงบริเวณหัวต่อ และทะลุสู่ชั้นทำงานได้ จึงเกิดผลตอบสนองทางแสงทางด้านความยาวคลื่นสั้นขึ้น

ยกตัวอย่างโดยพิจารณาโครงสร้างในรูปที่ 3.1 (ก) ซึ่งมีแบบจำลองโครงสร้างแถบพลังงานเมื่อถูกไบแอสกลับทางในขณะที่ถูกฉายแสงเป็นดังรูปที่ 3.3 เมื่อโฟตอนที่มีพลังงานมากกว่าค่าช่องว่างพลังงานของ $Ga_{0.8}Al_{0.2}As$ (>1.6744 eV) ตกกระทบโฟโตไดโอด ก็จะถูกชั้น P^+ - $Ga_{0.8}Al_{0.2}As$ ดูดกลืน เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น แต่เฉพาะพาหะที่เกิดห่างจากรอยต่อพีเอ็นไม่เกินระยะแพร่ซึม (Le) เท่านั้นที่จะมีโอกาสถูกสนามไฟฟ้าพัดพา ทำให้เกิดมีผลตอบสนองค่าน้อยๆ

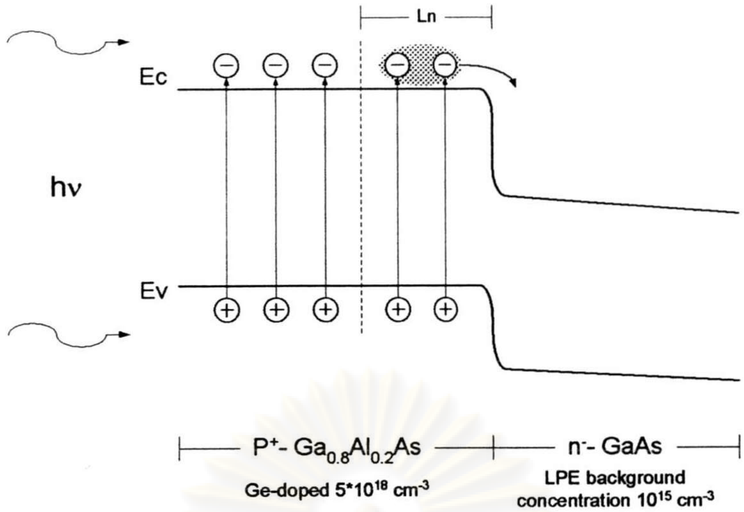
ในช่วงความยาวคลื่นสั้นขึ้น พาหะนอกนั้นจะเกิดการรวมตัว นอกจากนั้นกำลังแสงส่วนที่เหลือจะไปกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลในชั้นทำงาน ทำให้เกิดกระแสพัดพาอีกส่วนหนึ่ง



รูปที่ 3.1 (ก) Pin Photodiode (ข) PPin Photodiode

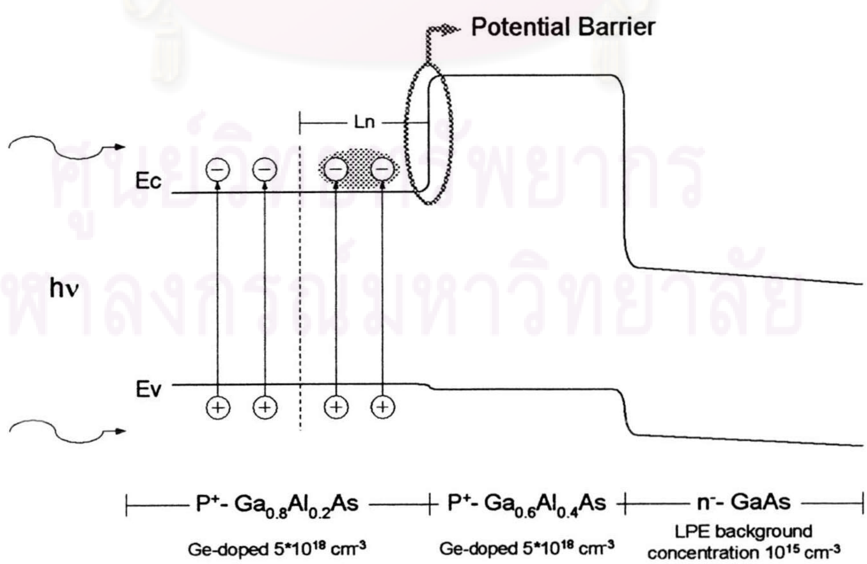


รูปที่ 3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ $Ga_{0.8}Al_{0.2}As$



รูปที่ 3.3 แผนผังแถบพลังงานที่หัวต่อต่างชนิดของ Pin Photodiode

ดังนั้นเพื่อขจัดกระแสแพร่ซึมที่เกิดจากแสงในช่วงพลังงานสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงานของชั้นรับแสง จึงได้เสนอโครงสร้างของตัวตรวจจับสัญญาณแสงที่มีชั้นรับแสงสองชั้นซึ่งประกอบด้วยชั้นหน้าต่างเดิม เรียกชื่อใหม่ว่า ชั้นหน้าต่างหลัก (Main Window Layer, MWL) และชั้นรับแสงที่ทำหน้าที่กันพาหะส่วนที่ทำให้เกิดกระแสแพร่ซึมให้ออกห่างจากหัวต่อ เรียกว่า ชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้น (Short Wavelength Window Layer, SWWL) โดยโครงสร้างของโฟโตไดโอดที่ทำการออกแบบแสดงในรูปที่ 3.1 (ข) และเรียกชื่อว่าโฟโตไดโอดโครงสร้าง PPin



รูปที่ 3.4 แผนผังแถบพลังงานแสดงกำแพงพลังงานระหว่างชั้นหน้าต่างหลัก
และชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้น ในPPin Photodiode

เมื่อโฟตอนแสงพลังงานมากกว่า 1.6744 eV เช่นเคย ตกกระทบชั้นรับแสงของโฟโตไดโอดที่มีชั้นรับแสงสองชั้น ดังแสดงด้วยภาพแผนผังแถบพลังงานในรูปที่ 3.4 โฟตอนส่วนนี้ก็ยังคงถูกดูดกลืนในชั้นหน้าต่างหลักด้านบนเช่นเดิม เพียงแต่พาหะทั้งหมดที่เกิดขึ้นจะอยู่ห่างจากหัวต่อเท่ากับความหนาของชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้นที่อยู่ประชิดกับชั้นทำงาน และเนื่องจากชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้นมีช่องว่างแถบพลังงานสูงกว่าชั้นหน้าต่างหลัก จึงมีกำแพงพลังงาน (Potential Barrier) ที่สามารถปิดกั้นการแพร่ซึมของพาหะส่วนนี้ได้ นอกจากนั้นโฟตอนของแสงที่มีพลังงานสูงกว่าชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้นจะถูกดูดกลืนเกือบทั้งหมดที่ชั้นหน้าต่างหลักบนสุด เนื่องจากชั้นหน้าต่างหลักจะมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงมากๆที่ค่าพลังงานนี้ จึงถือได้ว่าแทบจะไม่มีพาหะไฟฟ้าเกิดขึ้นเลยในชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้น

นอกจากนี้พบว่า หากเราเพิ่มความหนาให้กับชั้น P^+ - $Ga_{1-x}Al_xAs$ ของชั้นหน้าต่างหลักให้พอเหมาะ จะทำให้ชั้นหน้าต่างหลักนี้ดูดกลืนแสงได้มากขึ้น แสงในช่วงพลังงานสูงสามารถทะลุผ่านได้น้อยลง ตามสมการที่ 3.1

$$P_{inc} = Pe^{-\alpha d} \tag{3.1}$$

เมื่อ P_{inc} คือ กำลังของแสงที่สามารถทะลุผ่าน (watt)

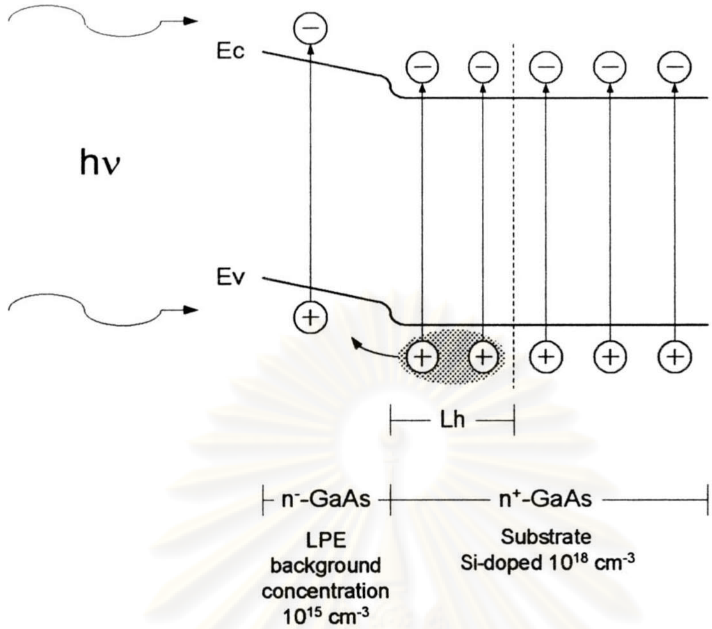
P คือ กำลังของแสงที่เข้ามาตกกระทบ (watt)

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (cm^{-1})

d คือ ความหนาของชั้นผิวบน (cm)

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การใช้โครงสร้าง PPin Photodiode และการเพิ่มความหนาให้กับชั้นหน้าต่างหลักให้พอเหมาะ จะช่วยขจัดผลตอบสนองทางแสงที่ขอบด้านความยาวคลื่นสั้น อันเกิดเพราะกระแสแพร่ซึมจากชั้นรับแสงได้

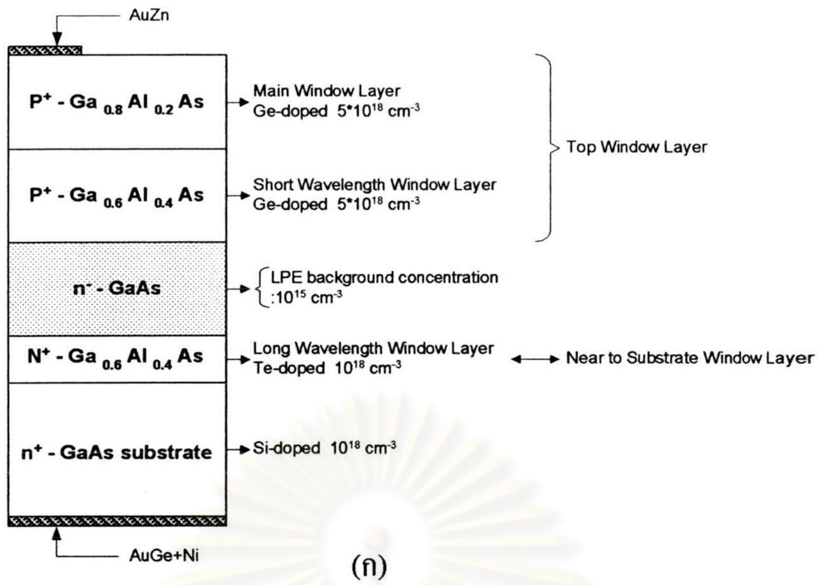
สำหรับแสงที่มีพลังงานอยู่ระหว่างค่าช่องว่างพลังงานของชั้นหน้าต่างหลักและชั้นทำงานส่วนใหญ่จะถูกดูดกลืนที่ชั้นทำงาน และกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น ส่วนพลังงานแสงที่ดูดกลืนไม่หมดจะตกกระทบแผ่นฐานเกิดเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮลเช่นกัน แต่เฉพาะพาหะที่เกิดห่างจากขอบชั้นทำงานด้านล่างไม่เกินระยะแพร่ซึม (Lh) เท่านั้นที่มีโอกาสแพร่ซึมเข้าสู่ชั้นทำงานและมีผลต่อผลตอบสนอง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสัญญาณเอาท์พุตในเชิงเวลา เช่นเดียวกับกระแสแพร่ซึมจากขอบด้านบนของชั้นทำงานดังที่ได้กล่าวถึงมาแล้ว แผนผังแถบพลังงานที่รอยต่อระหว่างชั้นทำงานและแผ่นฐานแสดงได้ดังรูปที่ 3.5



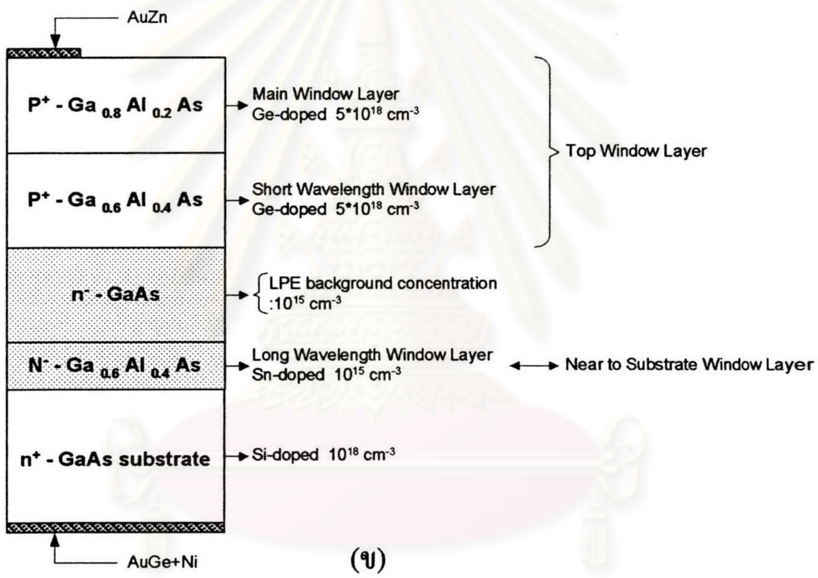
รูปที่ 3.5 แผนผังแถบพลังงานที่รอยต่อระหว่างชั้นทำงานและแผ่นฐาน

ดังนั้นเพื่อขจัดกระแสแพร่ซึมจากแผ่นฐานจึงออกแบบให้มีการแทรกชั้นสารที่มีค่าช่องว่างพลังงานกว้าง เช่น $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ ระหว่างชั้นทำงานและแผ่นฐาน เรียกว่าชั้นหน้าต่างแสงคลื่นยาว (Long Wavelength Window Layer, LWWL) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (ก) และ (ข) เพื่อช่วยกันพาหะในแผ่นฐานส่วนที่ทำให้เกิดกระแสแพร่ซึมให้ออกห่างจากชั้นทำงาน นอกจากนี้สารกึ่งตัวนำ $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ ยังมีค่าสัมประสิทธิการดูดกลืนแสงต่ำมากๆที่แสงความยาวคลื่นยาว จึงทำให้ถือได้ว่าแทบไม่มีพาหะเกิดขึ้นเลยในชั้น $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ ที่แทรกระหว่างชั้นทำงานและแผ่นฐานนี้

นอกจากนี้ยังได้กำหนดให้ระดับสารเจือในชั้นหน้าต่างแสงคลื่นยาวมี 2 ค่าคือ 10^{18} cm^{-3} เท่ากับของแผ่นฐาน n^{+} -GaAs เรียกว่าโครงสร้าง PPiNn และ 10^{15} cm^{-3} เท่ากับของชั้นทำงาน n^{-} -GaAs เรียกว่าโครงสร้าง PPiln ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ก) และ (ข) ตามลำดับ ในกรณีหลังชั้นทำงานของโฟโตไดโอดจะครอบคลุมทั้งของ n^{-} -GaAs และ N^{-} -$Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ จึงทำให้ชั้นทำงานของโครงสร้างนี้กว้างกว่าโครงสร้างอื่นๆ ทั้งนี้เพื่อให้ค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) มีค่าน้อยลง จึงน่าจะส่งผลให้ความเร็วในการตอบสนองของโฟโตไดโอดโครงสร้างนี้ดียิ่งขึ้น สุดท้ายทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นทำงานเพื่อศึกษาผลที่มีต่อผลตอบสนองทางแสงด้วย ตารางที่ 3.1-3.4 แสดงผลสรุปโครงสร้างทั้งสี่พร้อมรายละเอียดความหนาชั้นผลึกต่างๆที่ใช้ในการออกแบบ



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.6 (ก) PPiNn Photodiode (ข) PPiIn Photodiode

ตารางที่ 3.1 โครงสร้าง Pin Photodiode

โครงสร้าง Pin Photodiode		
สาร	การเติมสารเจือ	ความหนา
P^+-$Ga_{0.8}Al_{0.2}As$	Ge-doped $5*10^{18}$ cm^{-3}	1 μm
n^--GaAs	LPE background concentration 10^{15} cm^{-3}	0.5 , 1 , 1.5 μm
n^+-GaAs (Substrate)	Si-doped 10^{18} cm^{-3}	300 μm

ตารางที่ 3.2 โครงสร้าง PPin Photodiode

โครงสร้าง PPin Photodiode		
สาร	การเติมสารเจือ	ความหนา
P^{+}-$Ga_{0.8}Al_{0.2}As$	Ge-doped $5*10^{18}$ cm^{-3}	1, 1.5, 2 μm
P^{+}-$Ga_{0.6}Al_{0.4}As$	Ge-doped $5*10^{18}$ cm^{-3}	1 μm
n^{-}-GaAs	LPE background concentration 10^{15} cm^{-3}	0.5 , 1 , 1.5 μm
n^{+}-GaAs (Substrate)	Si-doped 10^{18} cm^{-3}	300 μm

ตารางที่ 3.3 โครงสร้าง PPiNn Photodiode

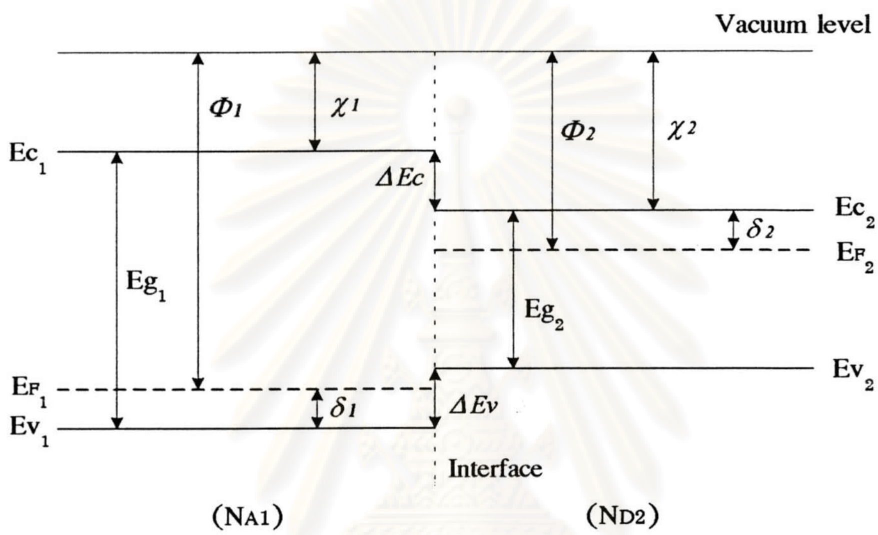
โครงสร้าง PPiNn Photodiode		
สาร	การเติมสารเจือ	ความหนา
P^{+}-$Ga_{0.8}Al_{0.2}As$	Ge-doped $5*10^{18}$ cm^{-3}	1, 1.5, 2 μm
P^{+}-$Ga_{0.6}Al_{0.4}As$	Ge-doped $5*10^{18}$ cm^{-3}	1 μm
n^{-}-GaAs	LPE background concentration 10^{15} cm^{-3}	0.5 , 1 , 1.5 μm
N^{+}-$Ga_{0.6}Al_{0.4}As$	Te-doped 10^{18} cm^{-3}	0.5 μm
n^{+}-GaAs (Substrate)	Si-doped 10^{18} cm^{-3}	300 μm

ตารางที่ 3.4 โครงสร้าง PPiIn Photodiode

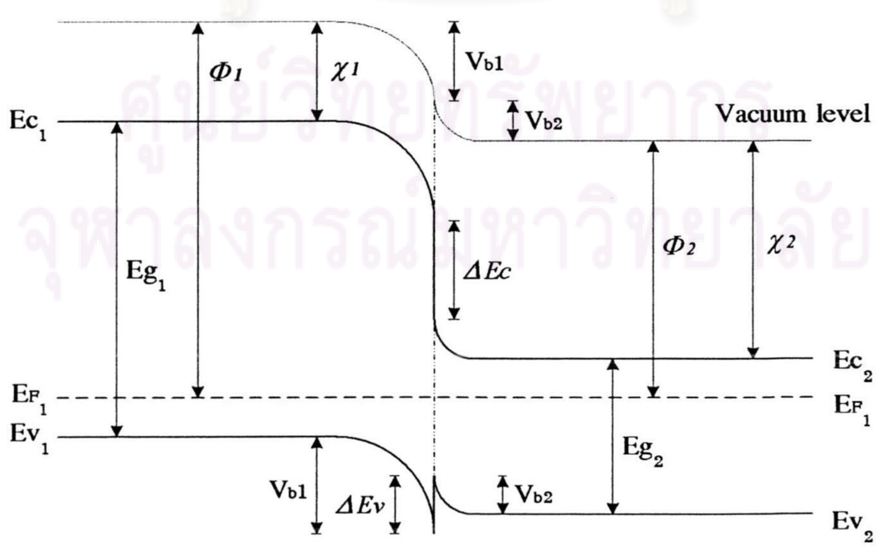
โครงสร้าง PPiIn Photodiode		
สาร	การเติมสารเจือ	ความหนา
P^{+}-$Ga_{0.8}Al_{0.2}As$	Ge-doped $5*10^{18}$ cm^{-3}	1, 1.5, 2 μm
P^{+}-$Ga_{0.6}Al_{0.4}As$	Ge-doped $5*10^{18}$ cm^{-3}	1 μm
n^{-}-GaAs	LPE background concentration 10^{15} cm^{-3}	0.5 , 1 , 1.5 μm
n^{-}-$Ga_{0.6}Al_{0.4}As$	Sn-doped 10^{15} cm^{-3}	0.5 μm
n^{+}-GaAs (Substrate)	Si-doped 10^{18} cm^{-3}	300 μm

3.2 แผนผังแถบพลังงานที่แสดงด้วยแบบจำลองของแอนเดอร์สัน (Anderson's model)

แผนผังแถบพลังงานของหัวต่อต่างชนิดจะมีความซับซ้อนมากกว่าแผนผังแถบพลังงานของหัวต่อชนิดเดียว เนื่องจากเป็นหัวต่อที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำสองชนิดที่มีค่าช่องว่างพลังงานไม่เท่ากัน รูปที่ 3.7 แสดงแผนผังแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำสองชนิดก่อนนำมาสร้างเป็นหัวต่อ ที่มีค่าช่องว่างพลังงาน (E_g) ฟังก์ชั่นงาน (Work function, ϕ_s) Dielectric permittivity ($\in_s$) และ Electron affinity (χ_e) แตกต่างกัน



รูปที่ 3.7 แผนผังแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำสองชนิดก่อนนำมาสร้างเป็นหัวต่อ



รูปที่ 3.8 แผนผังแถบพลังงานของหัวต่อต่างชนิดพี-เอ็นที่สภาวะสมดุลอุณหภูมิ

ฟังก์ชั่นงานของสารกึ่งตัวนำนิยามเป็นพลังงานที่ใช้ในการทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากระดับพลังงานเฟอร์มิ (Fermi level) ไปสู่ระดับสุญญากาศ (Vacuum level) ภายนอกสารกึ่งตัวนำนั้น ดังนั้นฟังก์ชั่นงานจึงขึ้นอยู่กับระดับพลังงานเฟอร์มิซึ่งมีค่าเป็นฟังก์ชั่นกับความเข้มข้นของการเติมสารเจือ

Electron affinity นิยามเป็นพลังงานเพื่อใช้ในการทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากแถบคอนดักชั่น (Conduction band, E_c) ไปยังระดับสุญญากาศ ซึ่งโดยทั่วไปถือเป็นค่าคงที่ ความแตกต่างระหว่างค่าพลังงานที่ขอบของแถบคอนดักชั่นและแถบวาเลนซ์ (Conduction and Valence band edge) เขียนแทนด้วย ΔE_c และ ΔE_v ตามลำดับ

ในการวาดแผนผังแถบพลังงานสำหรับหัวต่อต่างชนิดจะต้องยึดหลัก 2 ประการดังนี้

1) ในสภาวะสมดุลอุณหภูมิ ระดับพลังงานเฟอร์มิในหัวต่อต่างชนิดจะต้องอยู่ระดับเดียวกันทั้งหมด

2) ระดับสุญญากาศจะต้องต่อเนื่องและขนานไปกับขอบของแผนผังแถบพลังงาน

รูปที่ 3.8 แสดงแผนผังแถบพลังงานของหัวต่อต่างชนิดพี-เอ็นที่สภาวะสมดุลอุณหภูมิ และด้วยหลักการข้างต้นทำให้เกิดการโค้งงอของแถบพลังงานที่บริเวณรอยต่อ เรียกว่าปรากฏการณ์ Band bending ซึ่งแทนด้วย V_{b1} และ V_{b2} จากรูปที่ 3.8 การเคลื่อนตัวของระดับพลังงานเฟอร์มิ (Fermi displacement, E_{F1}-E_{F2}) มีค่าเท่ากับ

$$
\begin{aligned}
E_{F1} - E_{F2} &= (\chi_1 + E_{g1} - \delta_1) - (\chi_2 + \delta_2) \\
&= V_{b1} + V_{b2}
\end{aligned}
\tag{3.2}
$$

ซึ่ง $V_{b1} + V_{b2}$ คือ Total band bending จากรูปจะได้ว่า Conduction band offset (ΔE_c) และ Valence band offset (ΔE_v) มีค่าเป็น

$$\Delta E_c = \chi_1 - \chi_2 \tag{3.3}$$

$$
\begin{aligned}
\Delta E_v &= (\chi_1 + E_{g1}) - (\chi_2 + E_{g2}) \\
&= \Delta E_g - \Delta \chi
\end{aligned}
\tag{3.4}
$$

เพราะฉะนั้น

$$\Delta E_g = \Delta E_c + \Delta E_v \tag{3.5}$$

การวาดแผนผังแถบพลังงานที่ถูกต้องจะต้องคำนึงถึง Band bending ที่รอยต่อด้วย ซึ่งต้องอาศัยการแก้สมการของพัวซอง (Poisson's equation) ย่านแปรเปลี่ยน (Transition region) ซึ่งครอบคลุมระยะ x_n และ x_p แสดงได้โดย [7]

$$\frac{x_n}{x_p} = \frac{N_A}{N_D} \tag{3.6}$$

จากกฎการอนุรักษ์ประจุ (Charge conservation) และสมการของพัวซอง จะได้ว่า

$$V_{b1} = \frac{N_D x_n^2}{2\in_1} \tag{3.7}$$

$$V_{b2} = \frac{N_A x_p^2}{2\in_2} \tag{3.8}$$

$$\frac{V_{b1}}{V_{b2}} = \frac{N_A \in_1}{N_D \in_2} \tag{3.9}$$

ในหัวข้อย่อยถัดไปจะแสดงแผนผังแถบพลังงานด้วยแบบจำลองของแอนเดอร์สันของโครงสร้างต่างๆที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อ 3.1 โดยไม่ได้แสดงรายละเอียดการคำนวณ ตัวแปรสำคัญที่ใช้ได้แก่ ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) Static dielectric constant ($\in_s$) และ Electron affinity (χ_e) เนื่องจากคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ $Ga_{1-x}Al_xAs$ ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของอะลูมิเนียม (x) ดังนั้นตัวแปรทั้งสามนี้จึงเขียนเป็นฟังก์ชั่นกับ x ได้ดังสมการ [8]

$$\in_s = 13.18 - 3.12x \tag{3.10}$$

$$\chi_e = 4.07 - 1.1x \qquad when\ \ x < 0.45 \tag{3.11}$$

$$E_g = 1.425 + 1.247x \qquad when\ \ x < 0.45 \tag{3.12}$$

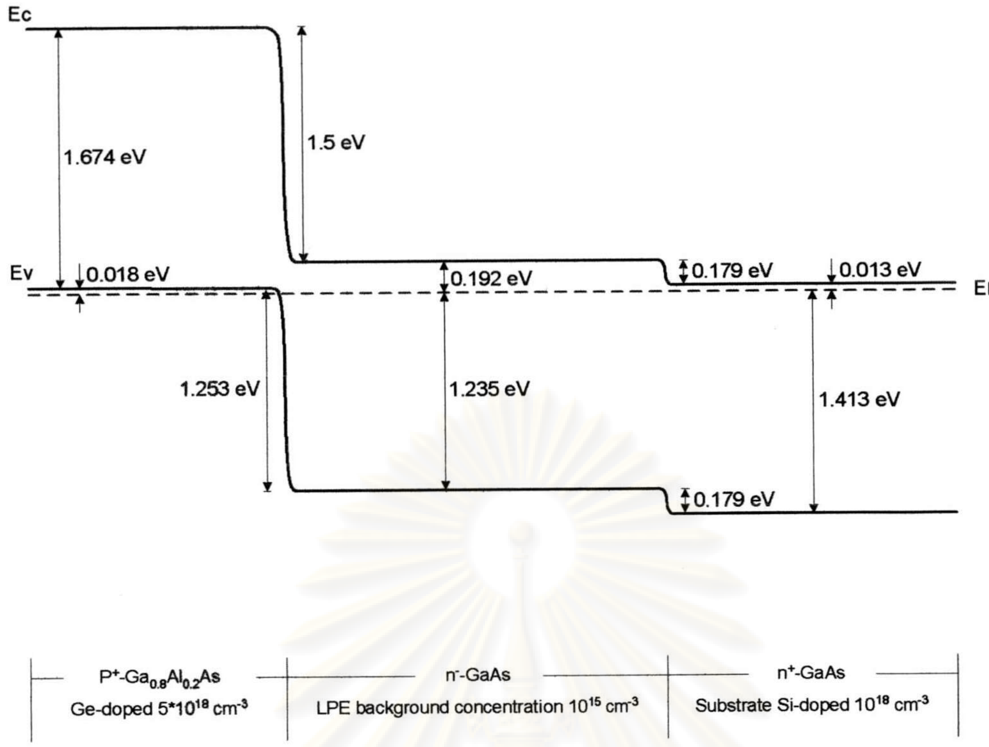
คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแผนผังแถบพลังงาน แสดงผลคำนวณไว้ในตารางที่ 3.5 โดยรูปแผนผังแถบพลังงานทั้งหมดจะละการแสดงระดับสุญญากาศ รูปที่ 3.9 คือแผนผังแถบพลังงานของโครงสร้าง P^+-$Ga_{0.8}Al_{0.2}As$ / n^--GaAs / n^+-GaAs Pin Photodiode โดยกำหนดให้ชั้นหน้าต่างหลัก P^+-$Ga_{0.8}Al_{0.2}As$ นี้มีความเข้มข้นของการเติมสารเจือคงที่เท่ากับ $5*10^{18}$ cm^{-3} ในทุกโครงสร้าง

รูปที่ 3.10, 3.11 และ 3.12 แสดงแผนผังแถบพลังงานของโครงสร้าง PPin Photodiode ที่ชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้นมีความเข้มข้นของการเติมสารเจือเท่ากับ $5*10^{17}$, 10^{18}, $5*10^{18}$ cm^{-3} ตามลำดับ เพื่อศึกษาผลที่มีต่อกำแพงศักย์ระหว่างชั้นหน้าต่างบนทั้งสอง ทั้งนี้โดยสรุปจะเลือกให้ชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้นมีความเข้มข้นของการเติมสารเจือเท่ากับ $5*10^{18}$ cm^{-3} ซึ่งทำให้มีค่ากำแพงศักย์ดังกล่าวสูงที่สุด

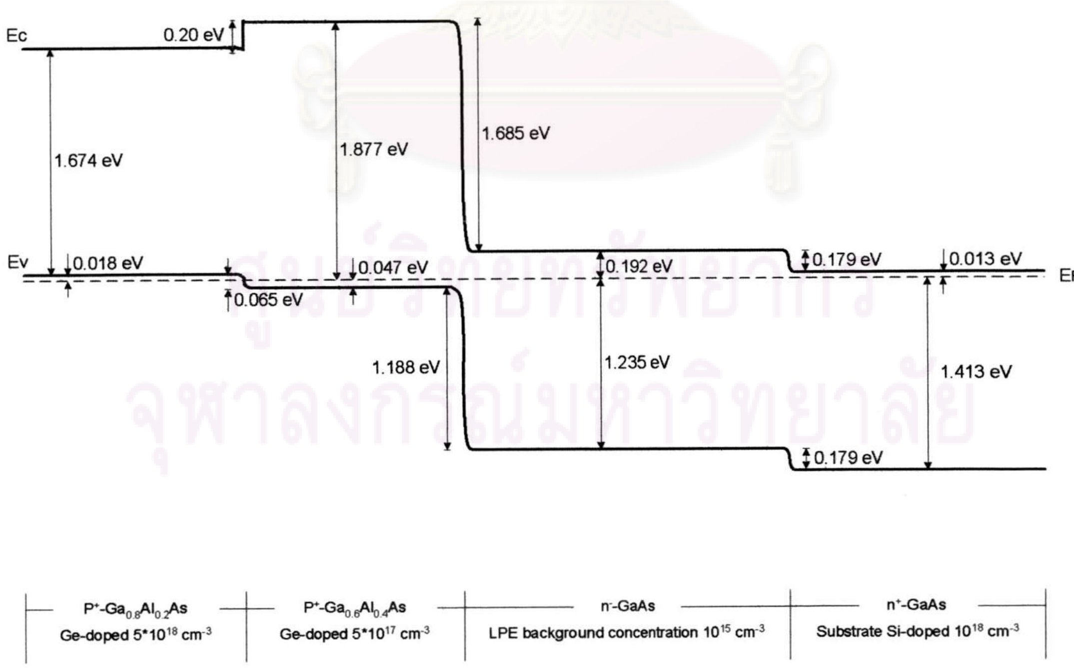
รูปที่ 3.13 และ 3.14 แสดงแผนผังแถบพลังงานของโครงสร้าง PPiNn Photodiode และ PPiIn Photodiode ตามลำดับ จะเห็นว่าแถบนำบริเวณขอบทั้งสองด้านของชั้นหน้าต่างแสงคลื่นยาวเกิดเป็น Spike ขึ้น แต่เนื่องจาก Spike ดังกล่าวบางมาก ประมาณ $5.7*10^{-5}$ μm จึงถือว่าอิเล็กตรอนสามารถ Tunneling ผ่านไปได้

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการสร้างแผนผังแถบพลังงาน
ของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิด [2], [9]

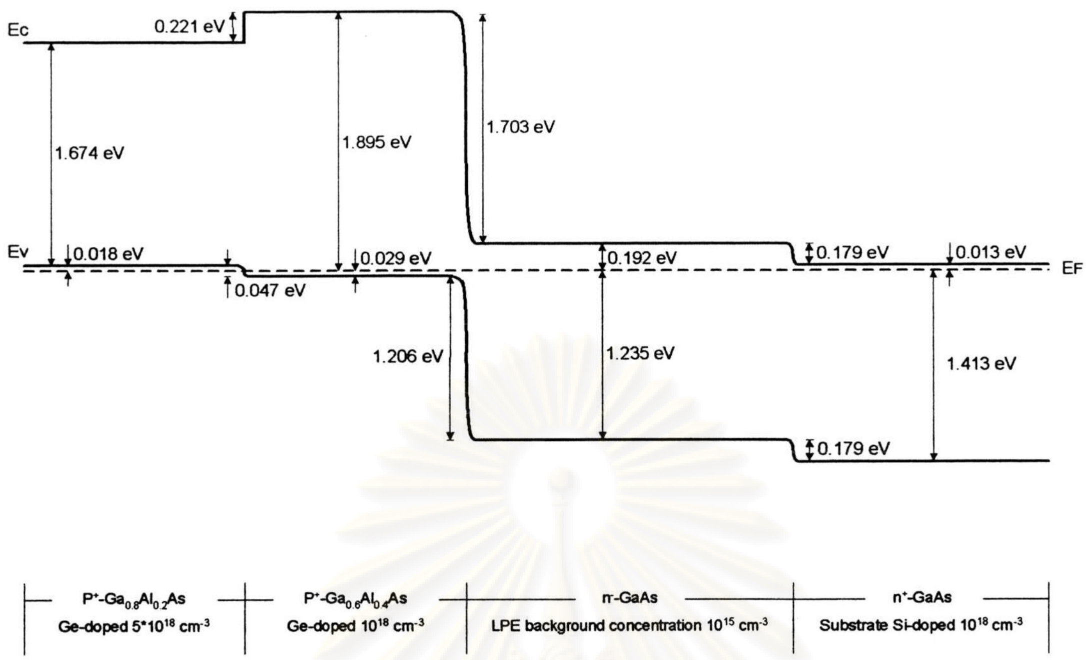
Property of material	E_g (eV)	χ_e (eV)	$\in_s$	n_i (cm^{-3})	Doping conc. (cm^{-3})	$\lvert E_c-E_F\rvert$ (eV)	$\lvert E_F-E_v\rvert$ (eV)
P^+-$Ga_{0.8}Al_{0.2}As$	1.6744	3.85	12.556	$2.26*10^4$	$5*10^{18}$	1.692	0.018
P^+-$Ga_{0.6}Al_{0.4}As$	1.9238	3.63	11.932	$2.26*10^2$	$5*10^7$	1.877	0.047
					10^{18}	1.895	0.029
					$5*10^{18}$	1.937	0.013
n^--GaAs (Active layer)	1.425	4.07	13.18	$1.84*10^6$	10^{15}	0.192	1.235
N^--$Ga_{0.6}Al_{0.4}As$	1.9238	3.63	11.932	$2.26*10^2$	10^{15}	0.208	1.716
N^+-$Ga_{0.6}Al_{0.4}As$	1.9238	3.63	11.932	$2.26*10^2$	10^{18}	0.029	1.895
n^+-GaAs (Substrate)	1.425	4.07	13.18	$1.84*10^6$	10^{18}	0.013	1.413



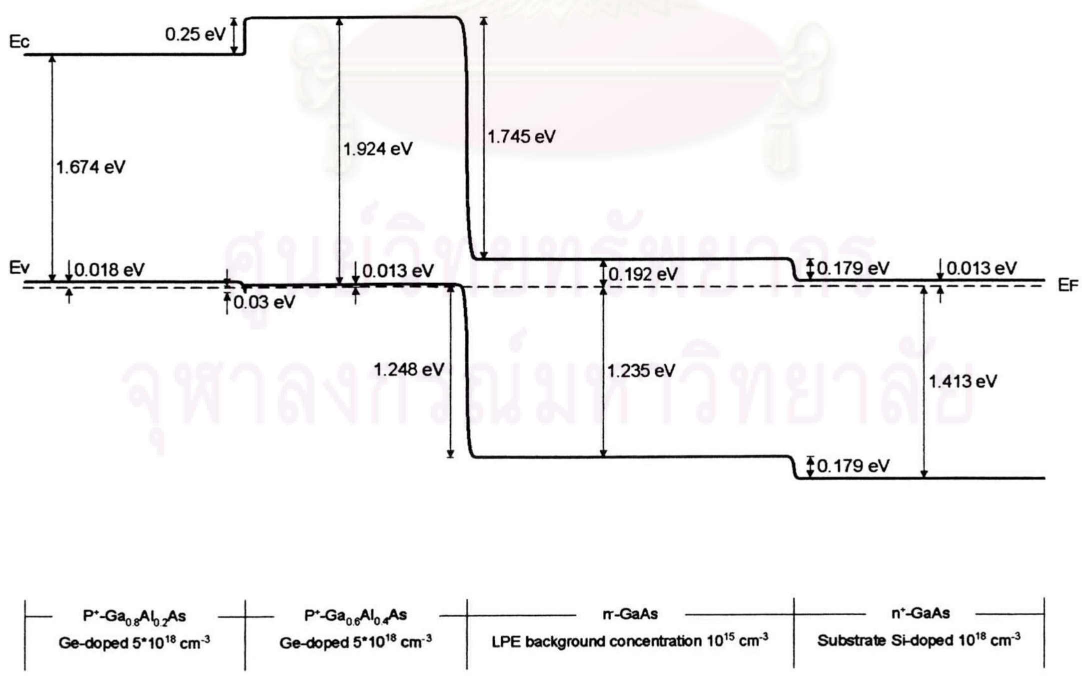
รูปที่ 3.9 แผนผังแถบพลังงานของ Pin Photodiode ที่สภาวะสมดุลอุณหภูมิ



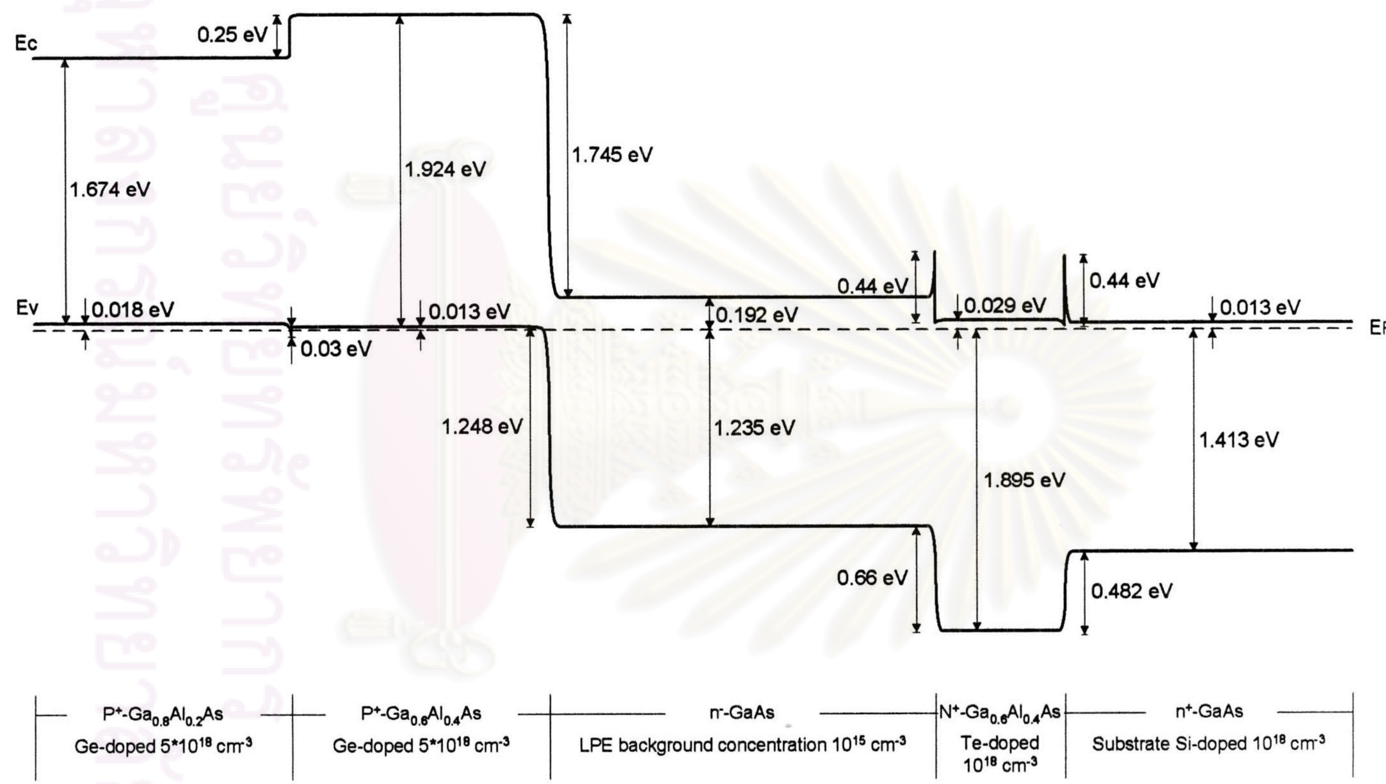
รูปที่ 3.10 แผนผังแถบพลังงานของ PPin Photodiode ที่สภาวะสมดุลอุณหภูมิ
ซึ่งมีชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้นเป็น P^+-$Ga_{0.6}Al_{0.4}As$, Ge-doped $5*10^{17}$ cm^{-3}



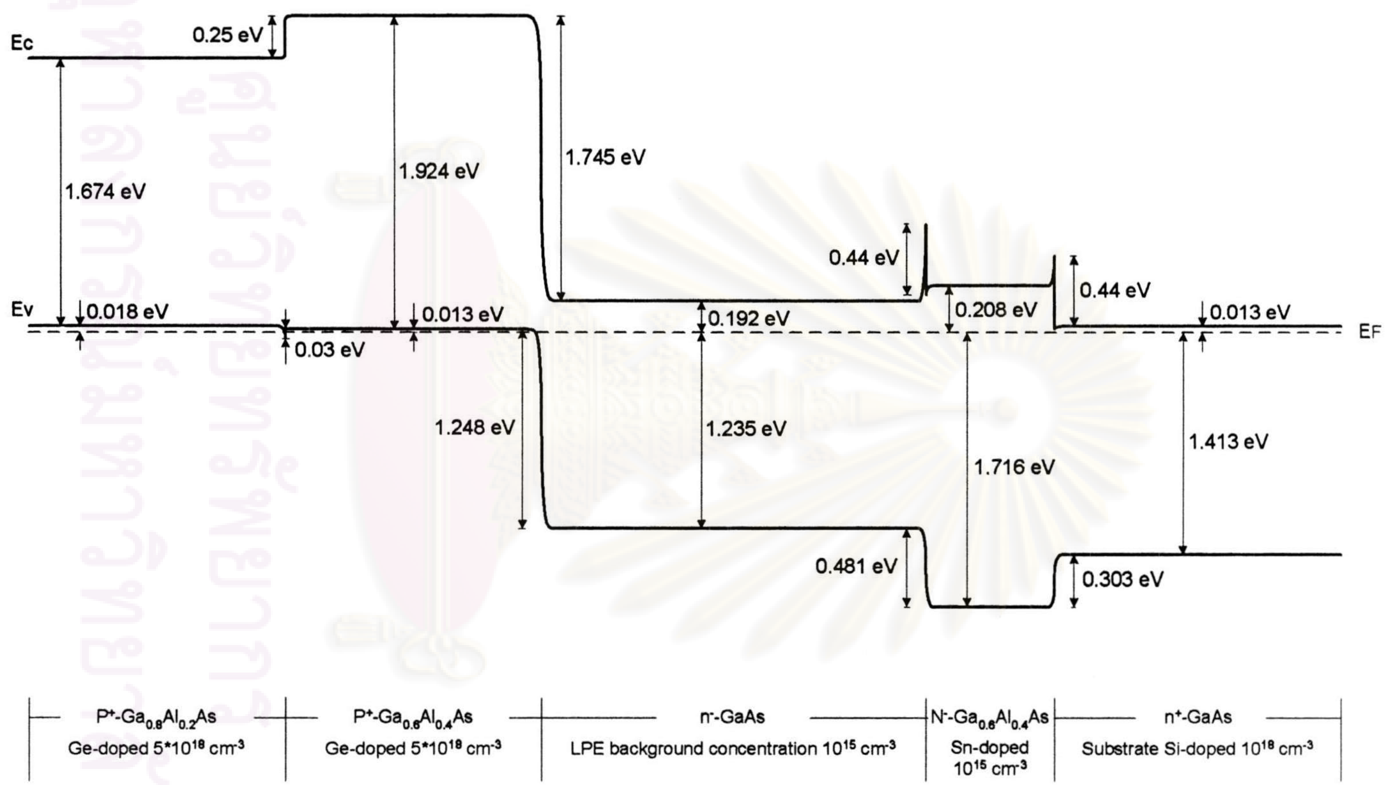
รูปที่ 3.11 แผนผังแถบพลังงานของ PPin Photodiode ที่สภาวะสมดุลอุณหภูมิ ซึ่งมีชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้นเป็น P^+-$Ga_{0.6}Al_{0.4}As$, Ge-doped 10^{18} cm^{-3}



รูปที่ 3.12 แผนผังแถบพลังงานของ PPin Photodiode ที่สภาวะสมดุลอุณหภูมิ ซึ่งมีชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้นเป็น P^+-$Ga_{0.6}Al_{0.4}As$, Ge-doped $5*10^{18}$ cm^{-3}



รูปที่ 3.13 แผนผังแถบพลังงานของ PPiNn Photodiode ที่สภาวะสมดุลอุณหภูมิ
ซึ่งมีชั้นหน้าต่างแสงคลื่นยาวเป็น N^+ -$Ga_{0.6}Al_{0.4}As$, Te-doped $5*10^{18}$ cm^{-3}



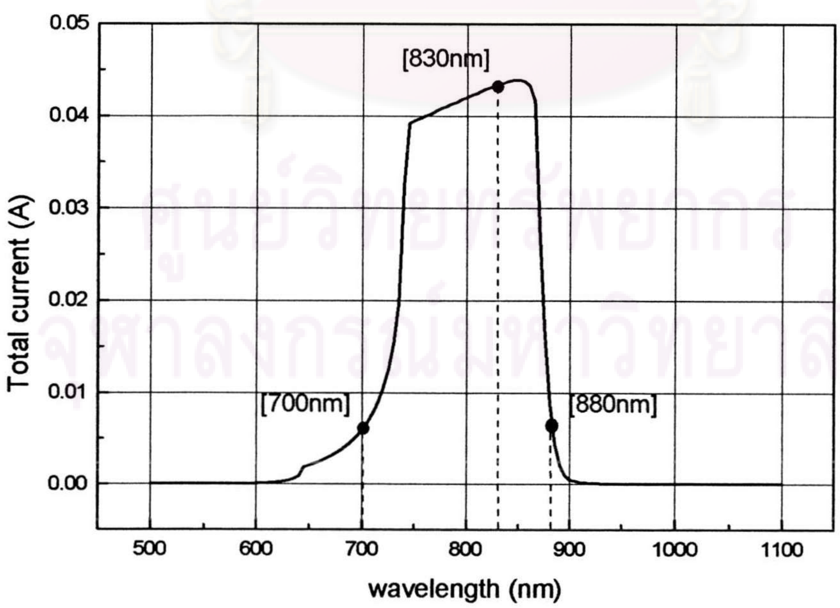
รูปที่ 3.14 แผนผังแถบพลังงานของ PPiIn Photodiode ที่สภาวะสมดุลอุณหภูมิ ซึ่งมีชั้นหน้าต่างแสงคลื่นยาวเป็น N^- -$Ga_{0.6}Al_{0.4}As$, Sn-doped 10^{15} cm^{-3}

3.3 อัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (The electron-hole pair generation rate)

เพื่อศึกษาหลักการทำงานและยืนยันแนวคิดในการออกแบบโครงสร้างโฟโตไดโอดที่มีชั้นหน้าต่างคู่ด้านบนและที่มีชั้นหน้าต่างใกล้แผ่นฐาน สามารถช่วยลดกระแสแพร่ซึมจากขอบของชั้นทำงานในแต่ละกรณีได้ จึงทำการการคำนวณอัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลของโฟโตไดโอดเป็นฟังก์ชั่นกับความลึกนับจากผิวบนสุดของชั้นรับแสง โดยมีหน่วยเป็นโฟตอนต่อวินาทีต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (ดังสมการที่ 2.4) ที่ค่าความยาวคลื่นที่เลือกมา 3 ค่า ได้แก่ 700, 830, 880 nm ซึ่งพิจารณาเลือกจากแสงที่ทำให้เกิดผลตอบสนองที่ขอบด้านความยาวคลื่นสั้น ความยาวคลื่นแสงย่านใช้งานของโฟโตไดโอด และแสงที่ทำให้เกิดผลตอบสนองที่ขอบด้านความยาวคลื่นยาวตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ทั้งนี้กำหนดให้กำลังแสงตกกระทบผิวด้านบนสุดมีค่าเท่ากับ $3.5*10^{-5}$ วัตต์

รูปที่ 3.16 - 3.19 คือตัวอย่างผลการคำนวณอัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลของโครงสร้างที่ได้ออกแบบไว้ อันได้แก่ Pin Photodiode, PPin Photodiode, PPiNn Photodiode, PPiIn Photodiode ตามลำดับ เฉพาะกรณีที่มีความหนาชั้นหน้าต่างหลักและชั้นทำงานเท่ากับ 1 และ 1.5 μm ตามลำดับ ส่วนชั้นหน้าต่างคลื่นสั้นและชั้นหน้าต่างใกล้แผ่นฐานกำหนดไว้ที่ 1 และ 0.5 μm ตามลำดับ

เนื่องจากการคำนวณอัตราการเกิดพาหะนี้ขึ้นกับค่าสัมประสิทธิการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำเป็นอย่างมาก จึงแสดงค่าสัมประสิทธิการดูดกลืนแสงของ $Ga_{0.8}Al_{0.2}As$, $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ และ GaAs ที่ความยาวคลื่นที่เลือกมาคำนวณ ไว้ในตารางที่ 3.6-3.8 ตามลำดับ



รูปที่ 3.15 ค่าความยาวคลื่นที่เลือกมาคำนวณอัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล

ตารางที่ 3.6 ค่าสัมประสิทธิการดูดกลืนแสงของ $Ga_{0.8}Al_{0.2}As$

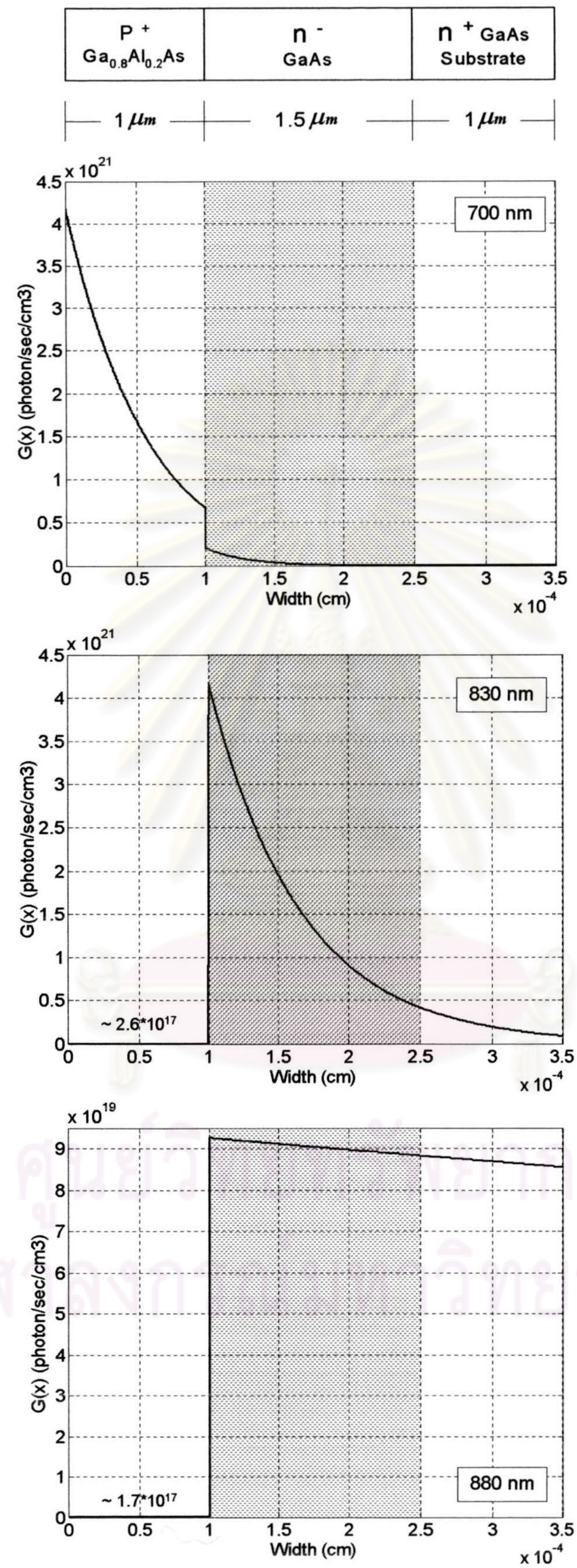
ค่าสัมประสิทธิการดูดกลืนแสงของ $Ga_{0.8}Al_{0.2}As$		
ความยาวคลื่น	ค่าพลังงานโฟตอน	α (cm^{-1})
700 nm	1.700 eV	$1.816*10^{4}$
830 nm	1.495 eV	0.948
880 nm	1.410 eV	0.586

ตารางที่ 3.7 ค่าสัมประสิทธิการดูดกลืนแสงของ $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$

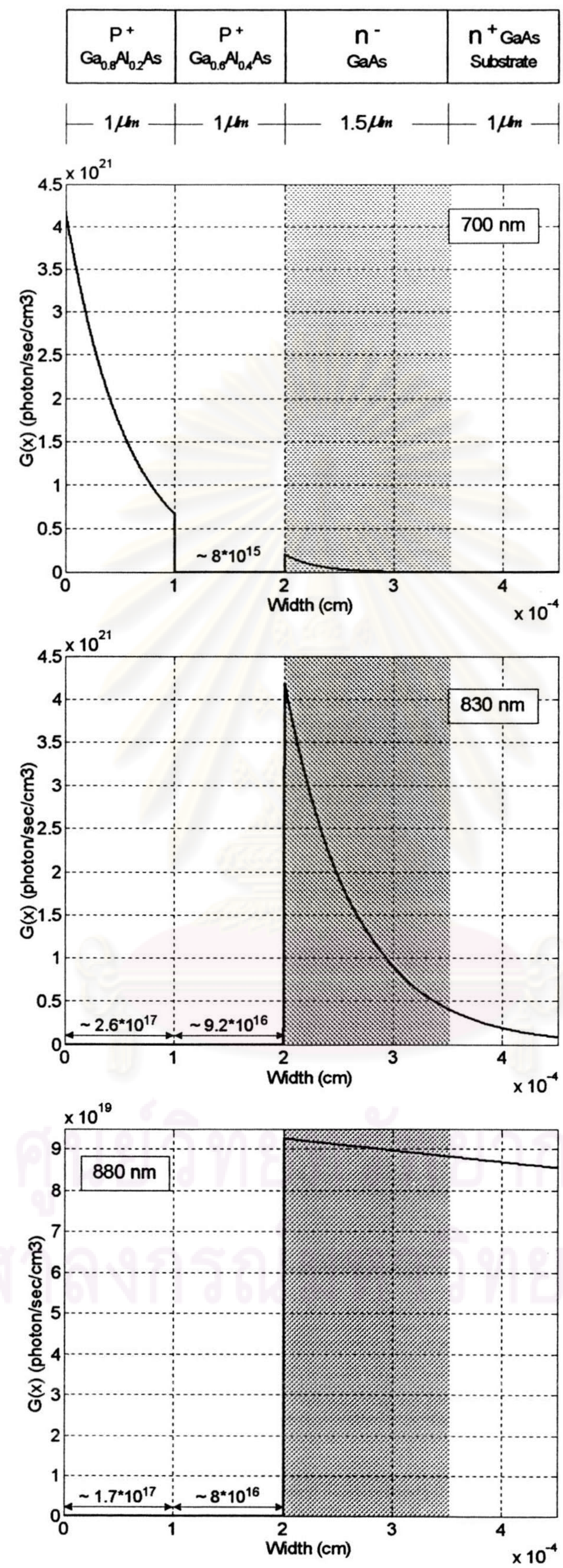
ค่าสัมประสิทธิการดูดกลืนแสงของ $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$		
ความยาวคลื่น	ค่าพลังงานโฟตอน	α (cm^{-1})
700 nm	1.700 eV	1.194
830 nm	1.495 eV	0.336
880 nm	1.410 eV	0.276

ตารางที่ 3.8 ค่าสัมประสิทธิการดูดกลืนแสงของ GaAs

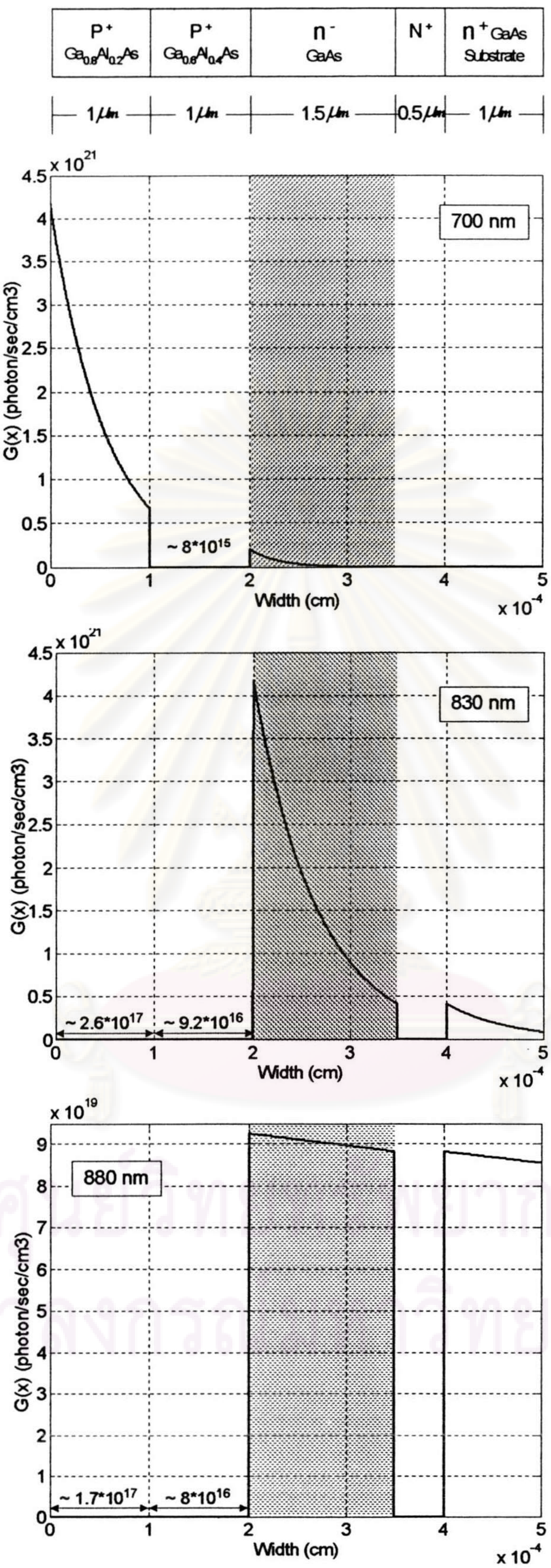
ค่าสัมประสิทธิการดูดกลืนแสงของ GaAs		
ความยาวคลื่น	ค่าพลังงานโฟตอน	α (cm^{-1})
700 nm	1.700 eV	$3.419*10^{4}$
830 nm	1.495 eV	$1.532*10^{4}$
880 nm	1.410 eV	144.341



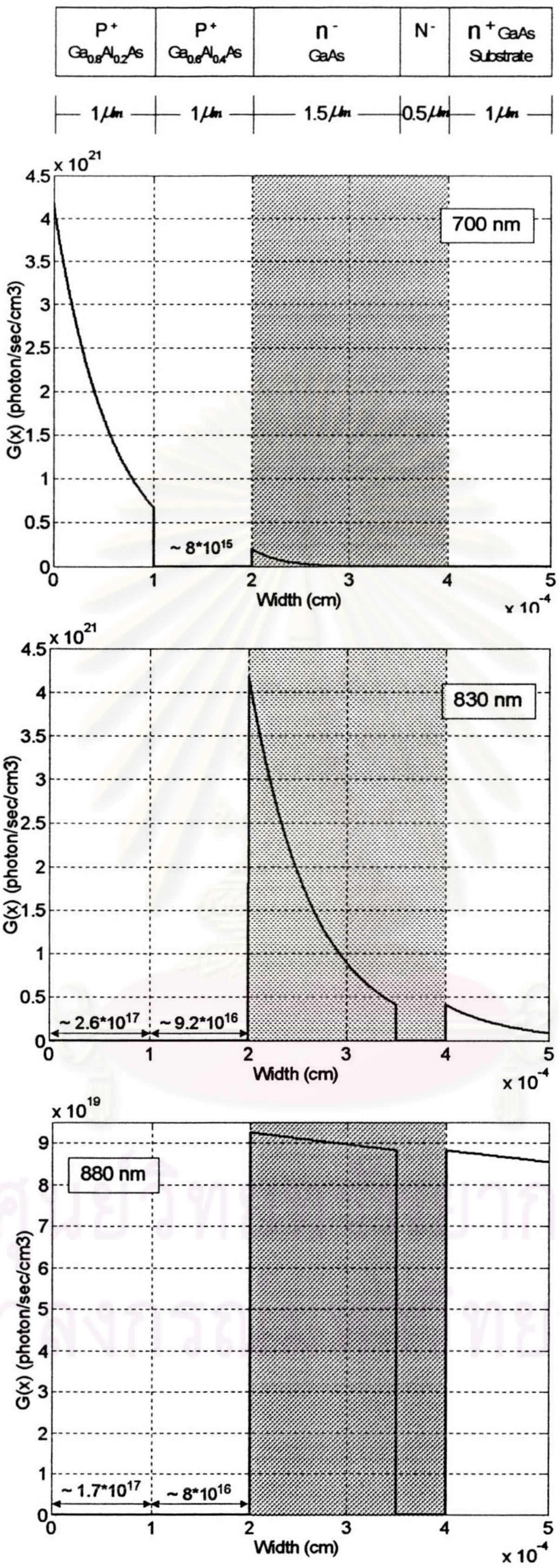
รูปที่ 3.16 ผลการคำนวณอัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลของ Pin Photodiode



รูปที่ 3.17 ผลการคำนวณอัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลของ PPin Photodiode



รูปที่ 3.18 ผลการคำนวณอัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลของ PPiNn Photodiode โดยที่ชั้น N^+ คือ N^+- $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$



รูปที่ 3.19 ผลการคำนวณอัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลของ PPiIn Photodiode โดยที่ชั้น I คือ N^-- $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$

รูปที่ 3.16 เป็นผลการคำนวณอัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลของ Pin Photodiode จะเห็นว่าแสงพลังงานสูงกว่าช่องว่างพลังงานของชั้นหน้าต่างหลัก เช่น แสงที่ความยาวคลื่น 700 nm จะถูกดูดกลืนอย่างมากในชั้นหน้าต่างหลักที่ค่า G(x) เริ่มต้นประมาณ $4.181*10^{21}$ photon/sec/cm^3 แล้วมีค่าลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล ส่วนที่ถูกดูดกลืนไม่หมดจะทะลุเข้าไปกระตุ้นให้เกิดพาหะในชั้นทำงานเล็กน้อย สำหรับแสงที่มีพลังงานอยู่ระหว่างค่าช่องว่างพลังงานของชั้นหน้าต่างหลักและชั้นทำงาน เช่น 830 nm จะถูกดูดกลืนไปบ้างเล็กน้อยในชั้นหน้าต่างหลักเนื่องจากกำลังแสงยังมีค่าสูงอยู่ ประกอบกับการมีอยู่ของค่าสัมประสิทธิการดูดกลืนแสง และถูกดูดกลืนอย่างมากในชั้นทำงาน ส่วนแสงที่มีความยาวคลื่นยาว เช่น 880 nm จะถูกลดทอนในชั้นหน้าต่างหลักใกล้เคียงกับกรณีของแสง 830 nm แต่กระตุ้นให้เกิดพาหะในชั้นทำงานและแผ่นฐาน ในสัดส่วนที่น้อยกว่ากรณีของ 830 nm มาก ($\sim 4*10^{21}$ ต่อ $9*10^{19}$)

รูปที่ 3.17 เป็นผลการคำนวณการเกิดพาหะที่ความลึกค่าต่างๆใน PPin Photodiode ผลการคำนวณจะเหมือนกับกรณีของ Pin Photodiode ยกเว้นแต่คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่ 700 nm ในชั้นหน้าต่างหลักถูกกันออกห่างจากขอบของชั้นทำงานเท่ากับความหนาของ SWWL และในชั้น SWWL มีค่า G(x) น้อยมากทุกค่าความยาวคลื่น กระแสแพร่ซึมที่ความยาวคลื่นสั้นน่าจะมีค่าลดลงอย่างมาก ซึ่งจะแสดงผลการคำนวณในหัวข้อถัดไป

รูปที่ 3.18 และ 3.19 คือผลคำนวณอัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลของ PPiNn Photodiode และ PPiIn Photodiode ตามลำดับ การเกิดพาหะในชั้นหน้าต่างหลัก ชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้น และชั้นทำงานส่วนที่เป็น n^--GaAs อธิบายได้ในทำนองเดียวกันกับของโครงสร้าง PPin Photodiode ความต่างจะเริ่มที่ชั้นหน้าต่างแสงคลื่นยาวซึ่งคือ N^+- $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ หรือ N^-- $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ จะเห็นว่ามีพาหะเกิดในชั้นดังกล่าวน้อยมาก เนื่องจากเป็นสารที่มีค่าช่องว่างพลังงานกว้างและมีค่าสัมประสิทธิการดูดกลืนแสงต่ำ จึงทำให้คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดในแผ่นฐาน โดยเฉพาะที่ 830 nm และ 880 nm ถูกกันออกห่างจากขอบล่างของชั้นทำงาน n^--GaAs เท่ากับความหนาของ LWWL อย่างไรก็ตามในกรณีของ PPiIn ชั้นทำงานจะแผ่ขยายจนประชิดขอบแผ่นฐาน คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นในแผ่นฐานระยะไม่เกินความยาวแพรซึมของโฮล ก็คงยังมีผลให้เกิดกระแสแพร่ซึม ซึ่งจะแสดงผลคำนวณในหัวข้อถัดไป

3.4 การคำนวณผลตอบสนองทางแสง (Spectral response)

การคำนวณผลตอบสนองทางแสงก่อนทำการผลิตโฟโตไดโอดจะช่วยให้สามารถออกแบบโครงสร้างของโฟโตไดโอดได้อย่างเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน และสามารถนำผลการคำนวณไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองในภายหลัง วิธีคำนวณผลตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดจะใช้สมการต่างๆตามทฤษฎีซึ่งได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 โดยกำหนดให้แสงที่ตกกระทบไดโอดมีกำลังงานคงที่เท่ากับ $3.5*10^{-5}$ วัตต์ ทำการคำนวณอัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลในชั้นต่างๆของโครงสร้าง

จากนั้นจึงคำนวณค่ากระแสแพร่ซึมจากชั้นหน้าต่างบน กระแสพัดพาในชั้นทำงาน และกระแสแพร่ซึมจากชั้นถัดจากชั้นทำงานตามลำดับ และเพื่อให้สามารถแยกแยะบทบาทของชั้นหน้าต่างหลัก บทบาทของชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้น บทบาทของชั้นทำงาน และบทบาทของชั้นหน้าต่างแสงคลื่นยาว ทั้งกรณี N^+ และ I ออกจากกันได้อย่างชัดเจน จึงเสนอผลการคำนวณผลตอบสนองทางแสงของทุกโครงสร้าง โดยเบื้องต้นจะแปรค่าความหนาของชั้นทำงานโดยคงค่าชั้นอื่นๆไว้ จากนั้นจะแปรค่าความหนาของชั้นหน้าต่างแสงหลัก โดยคงค่าความหนาของชั้นทำงาน สำหรับความหนาของชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้นของ $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ (P^+) และความหนาของชั้นหน้าต่างแสงคลื่นยาวของ $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ (N^+ หรือ I) คงไว้ที่ 1 และ 0.5 μm ตามลำดับ เพื่อให้สอดคล้องกับความยาวแพร่ซึมของอิเล็กตรอน (L_e = 0.5 μm [10]) และความยาวแพร่ซึมของโฮล (L_h = 0.3 μm [10]) ตามลำดับ

3.4.1 บทบาทของชั้นทำงาน

ดังที่กล่าวในบทที่ 2 แล้วว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเร็วในการตอบสนองของโฟโตไดโอดมีด้วยกัน 3 ประการได้แก่ การแพร่ซึมของพาหะที่เกิดภายในระยะแพร่ซึมนับจากขอบของย่านทำงาน เวลาการพัดพาพาหะข้ามหัวต่อ และค่าความจุไฟฟ้าบริเวณหัวต่อ การออกแบบโครงสร้างของโฟโตไดโอดที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้มีจุดมุ่งหมายหลักที่จะกำจัดกระแสแพร่ซึมของพาหะทั้งที่ขอบด้านความยาวคลื่นสั้นและขอบด้านความยาวคลื่นยาว โดยจะทำการเพิ่มหรือลดความหนาของชั้นทำงาน 3 ค่าที่ 0.5, 1 และ 1.5 μm ดังแสดงในรูปที่ 3.20 เพื่อศึกษาผลที่มีต่อผลตอบสนองทางแสง ทั้งนี้เพราะการออกแบบความหนาชั้นทำงานให้เหมาะสมก็เป็นปัจจัยสำคัญต่อค่าความเร็วในการตอบสนองของโฟโตไดโอด หากชั้นทำงานหนาเกินไปก็จะทำให้เวลาในการพัดพาพาหะข้ามหัวต่อมาก แต่ถ้าหากชั้นทำงานบางเกินไปค่าความจุไฟฟ้าบริเวณหัวต่อก็จะสูงส่งผลให้ลดค่าความเร็วในการตอบสนอง

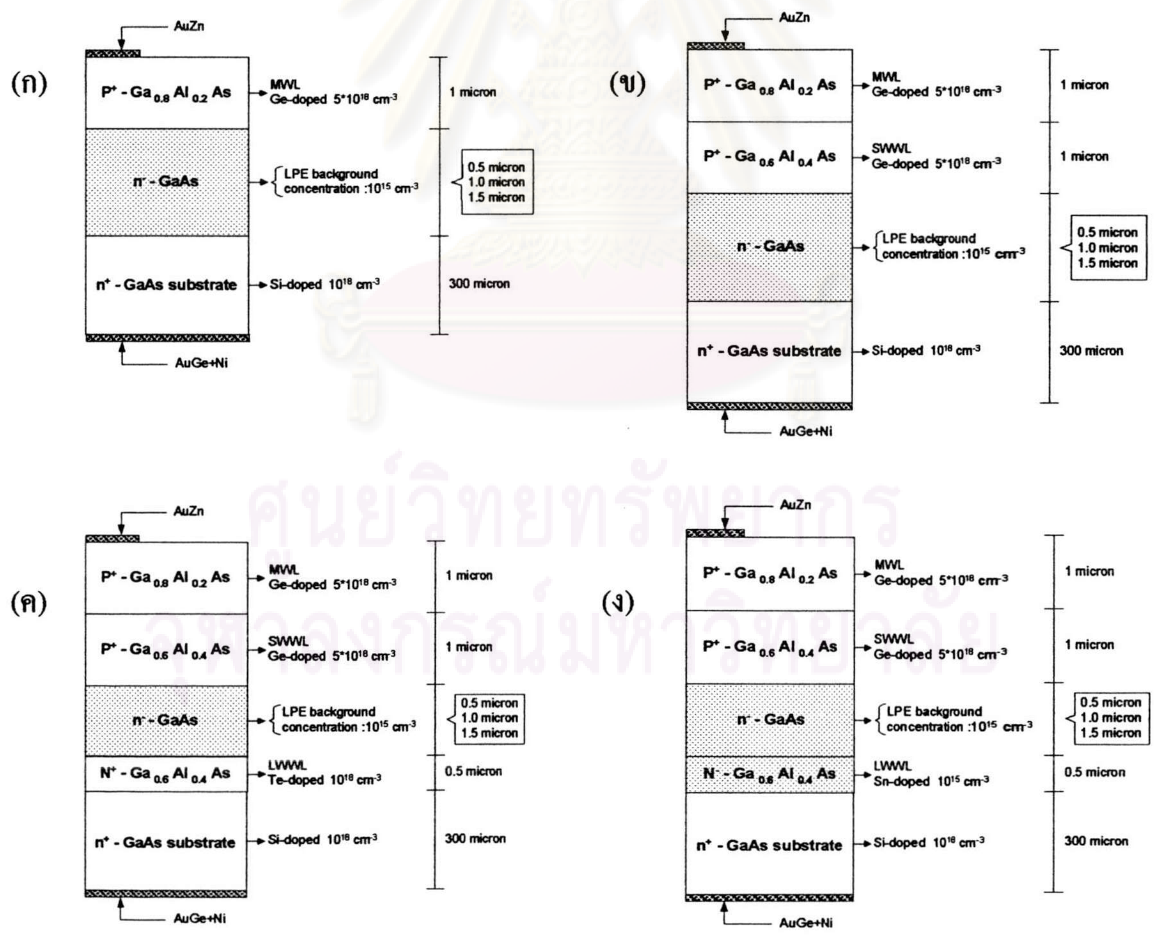
รูปที่ 3.21-3.23 เป็นผลการคำนวณผลตอบสนองทางแสงของโครงสร้าง Pin Photodiode เมื่อชั้นทำงานหนา 0.5, 1, 1.5 μm ตามลำดับ และทำการแยกเปรียบเทียบค่ากระแสแพร่ซึมจากด้านบน กระแสแพร่ซึมจากแผ่นฐาน กระแสพัดพาในชั้นทำงาน และกระแสสุทธิ เมื่อเพิ่มหรือลดความหนาของชั้นทำงาน ไว้ในรูปที่ 3.24-3.27 ตามลำดับ เพื่อให้เห็นผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาชั้นทำงานที่มีต่อแต่ละพจน์ของผลตอบสนองทางแสงใน Pin Photodiode ได้อย่างชัดเจน

ในทำนองเดียวกัน รูปที่ 3.28-3.30 คือผลตอบสนองทางแสงของโครงสร้าง PPin Photodiode เมื่อชั้นทำงานหนา 0.5, 1, 1.5 μm ตามลำดับ รูปที่ 3.31-3.34 แสดงการเปรียบเทียบแต่ละพจน์ของกระแสใน PPin Photodiode เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาชั้นทำงาน

PPiNn Photodiode มีผลตอบสนองทางแสงเป็นดังรูปที่ 3.35-3.37 เมื่อชั้นทำงานซึ่งเป็นชั้นสารกึ่งตัวนำ n^-- GaAs หนา 0.5, 1, 1.5 μm ตามลำดับ และชั้น N^+- $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ ที่แทรกหน้าแผ่น

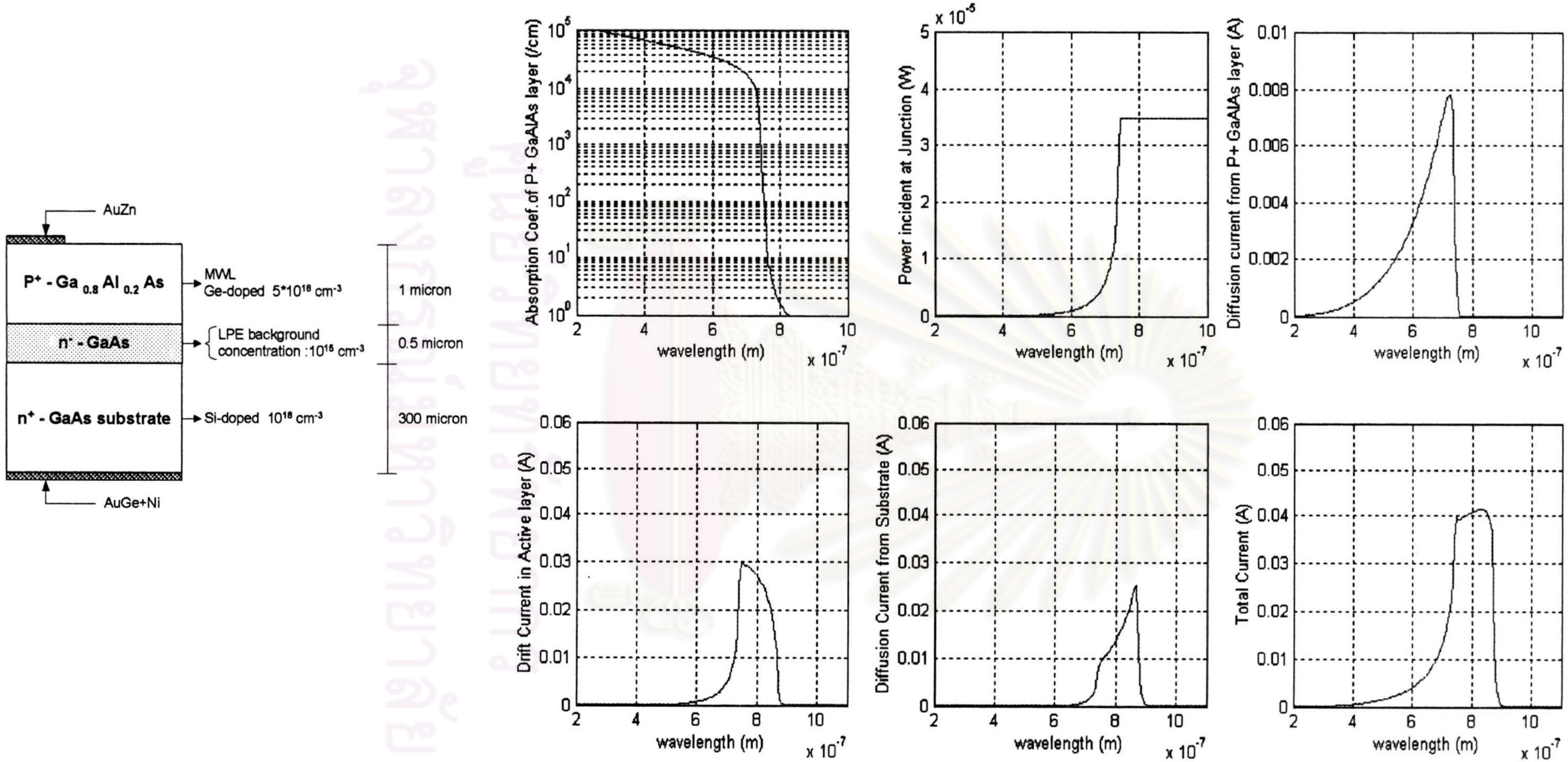
ฐานหนา 0.5 μm คงที่ โดยที่กระแสแพร่ซึมด้านความยาวคลื่นสั้นเกิดจากชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้น $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ เช่นเดียวกับในโครงสร้าง PPin Photodiode แต่กระแสแพร่ซึมด้านความยาวคลื่นยาวจะเกิดจากชั้นหน้าต่างแสงคลื่นยาว N^{+}- $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ ที่อยู่ใกล้แผ่นฐาน n^{+}- GaAs ส่วนชั้นทำงานอันเป็นที่มาของกระแสพัดพาหมายถึงเฉพาะชั้น n^{-}- GaAs เท่านั้น แสดงการเปรียบเทียบแต่ละพจน์กระแสที่ความหนาชั้นทำงานค่าต่างๆดังรูปที่ 3.38-3.41

สำหรับ PPiIn Photodiode กระแสแพร่ซึมด้านความยาวคลื่นสั้นเกิดจากชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้น P^{+}- $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ เช่นเดียวกับในโครงสร้าง Pin และ PPin Photodiode ส่วนกระแสแพร่ซึมด้านความยาวคลื่นยาวจะเกิดจากแผ่นฐาน n^{+}- GaAs กระแสพัดพาในชั้นทำงานจะมี 2 ส่วนคือส่วนที่เกิดในชั้น n^{-}- GaAs และ N^{-}- $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ ซึ่งรวมเป็นกระแสพัดพาสุทธิ ผลคำนวณผลตอบสนองทางแสงเป็นดังรูปที่ 3.42-3.43 โดยชั้น n^{-}- GaAs หนา 0.5, 1, 1.5 μm ตามลำดับ และชั้นหน้าต่างแสงคลื่นยาวใกล้แผ่นฐาน N^{-}- $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ หนา 0.5 μm คงที่ การเปรียบเทียบค่ากระแสแพร่ซึมจากชั้นหน้าต่างแสงด้านบน กระแสแพร่ซึมจากแผ่นฐานด้านล่าง กระแสพัดพาในชั้นทำงาน และกระแสสุทธิ แสดงไว้ในรูปที่ 3.45-3.48 ตามลำดับ เมื่อให้ความหนาชั้นทำงานแตกต่างกัน

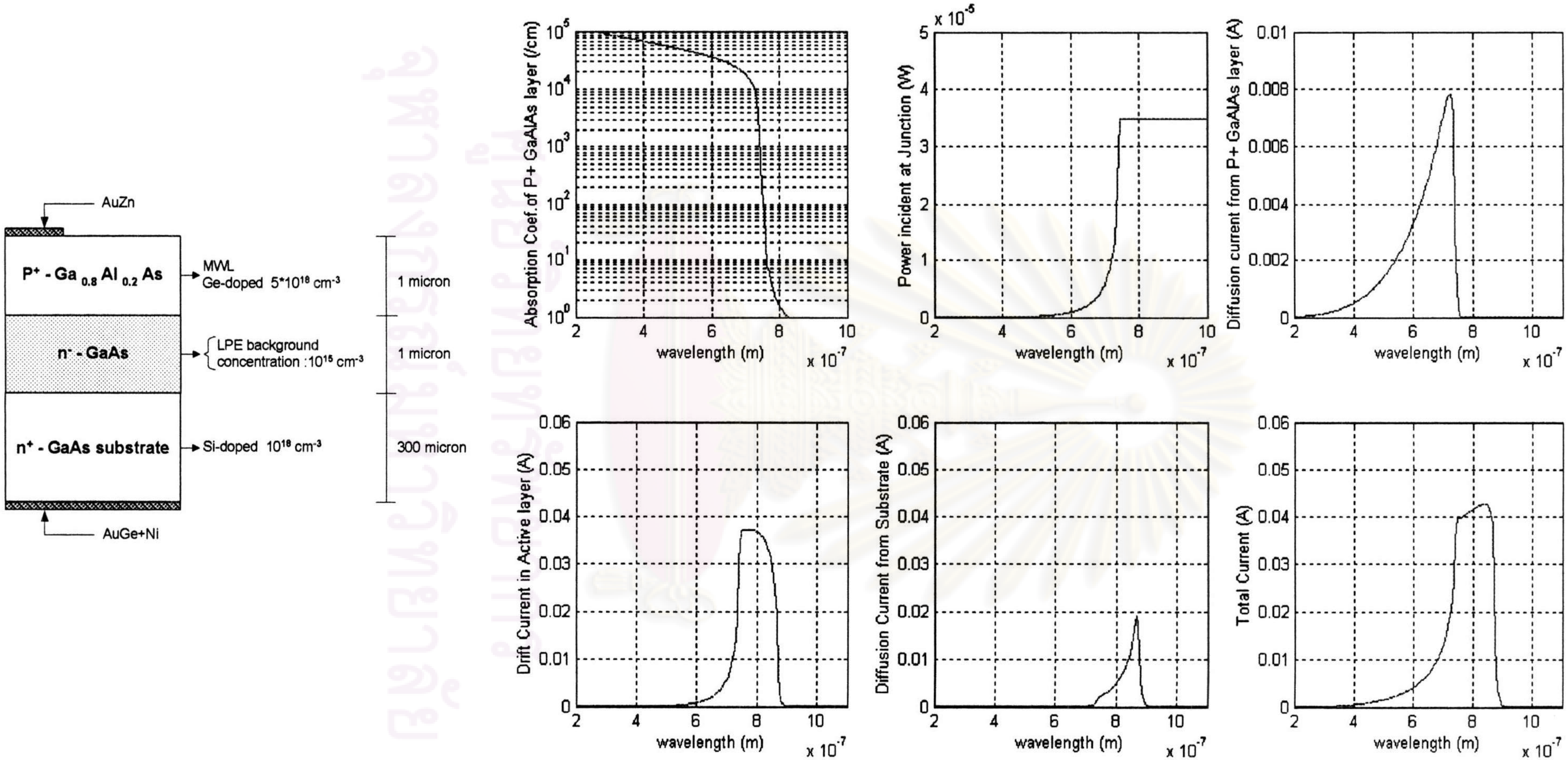


รูปที่ 3.20 โครงสร้างที่นำมาคำนวณผลตอบสนองทางแสง

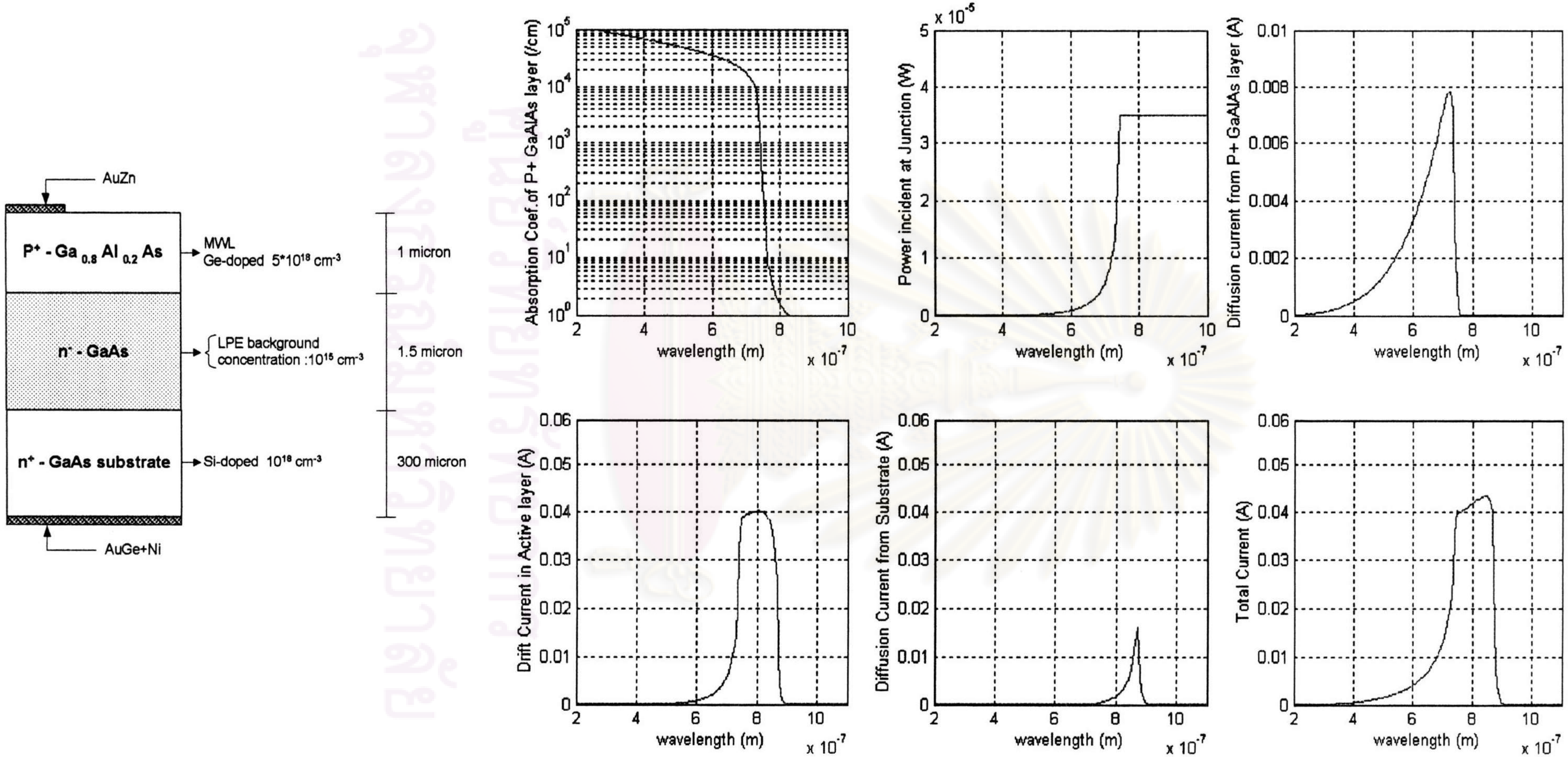
(ก) Pin Photodiode (ข) PPin Photodiode (ค) PPiNn Photodiode (ง) PPiIn Photodiode



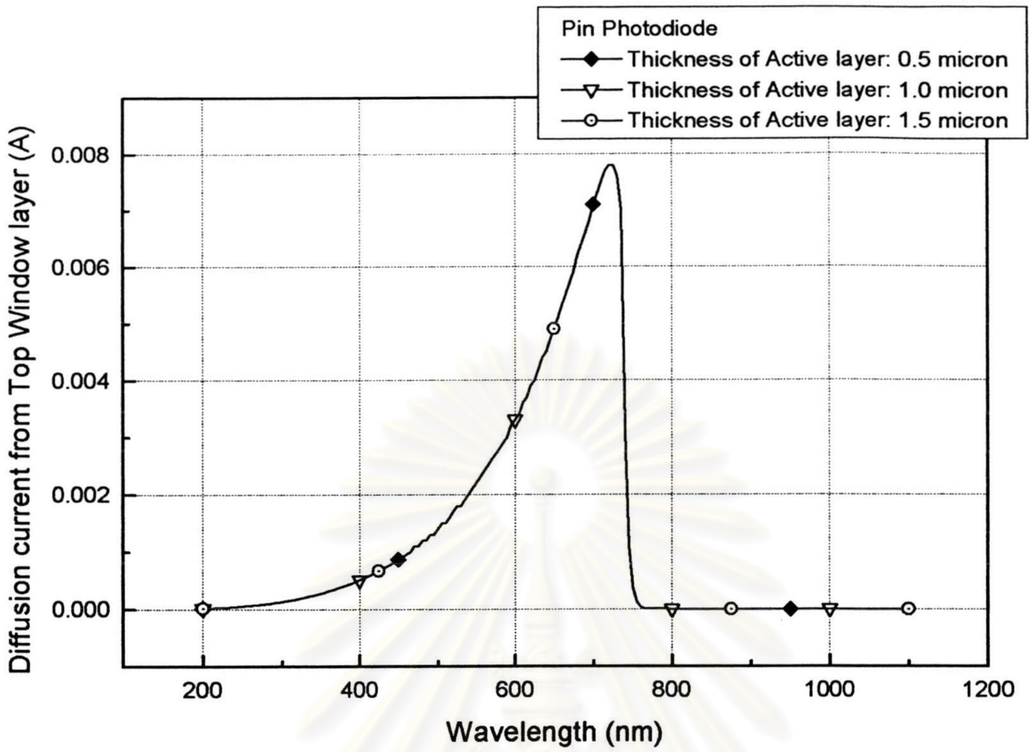
รูปที่ 3.21 ผลตอบสนองทางแสงของโครงสร้าง Pin Photodiode เมื่อชั้นทำงานหนา 0.5 μm



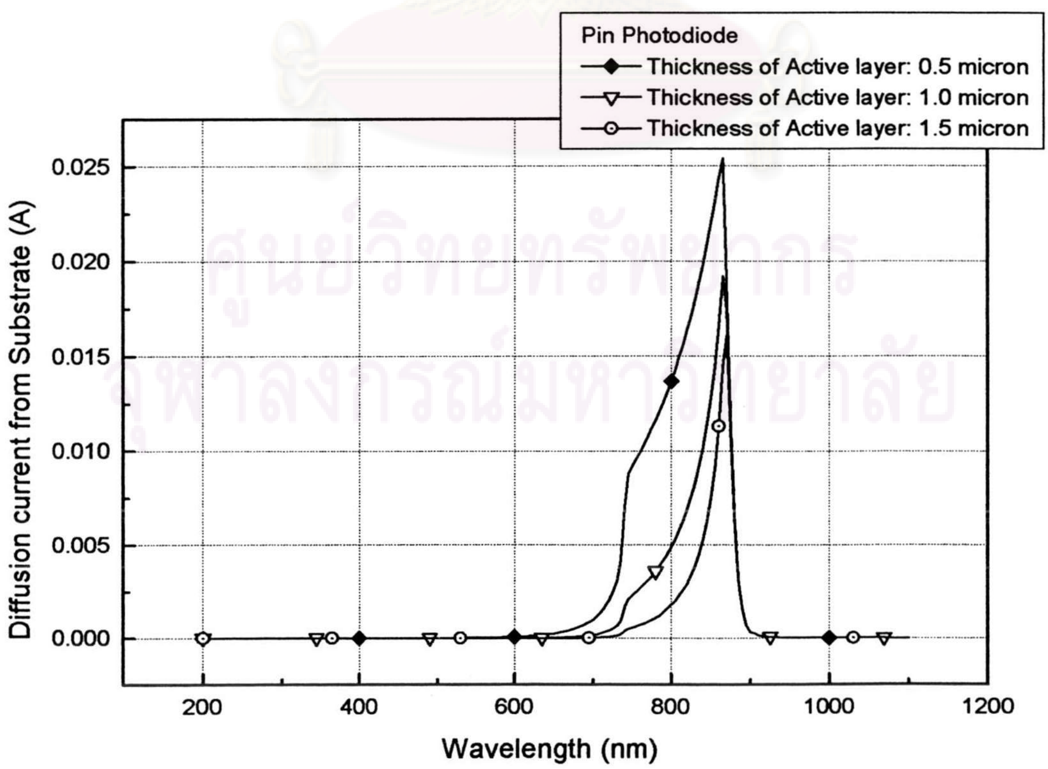
รูปที่ 3.22 ผลตอบสนองทางแสงของโครงสร้าง Pin Photodiode เมื่อชั้นทำงานหนา 1 μm



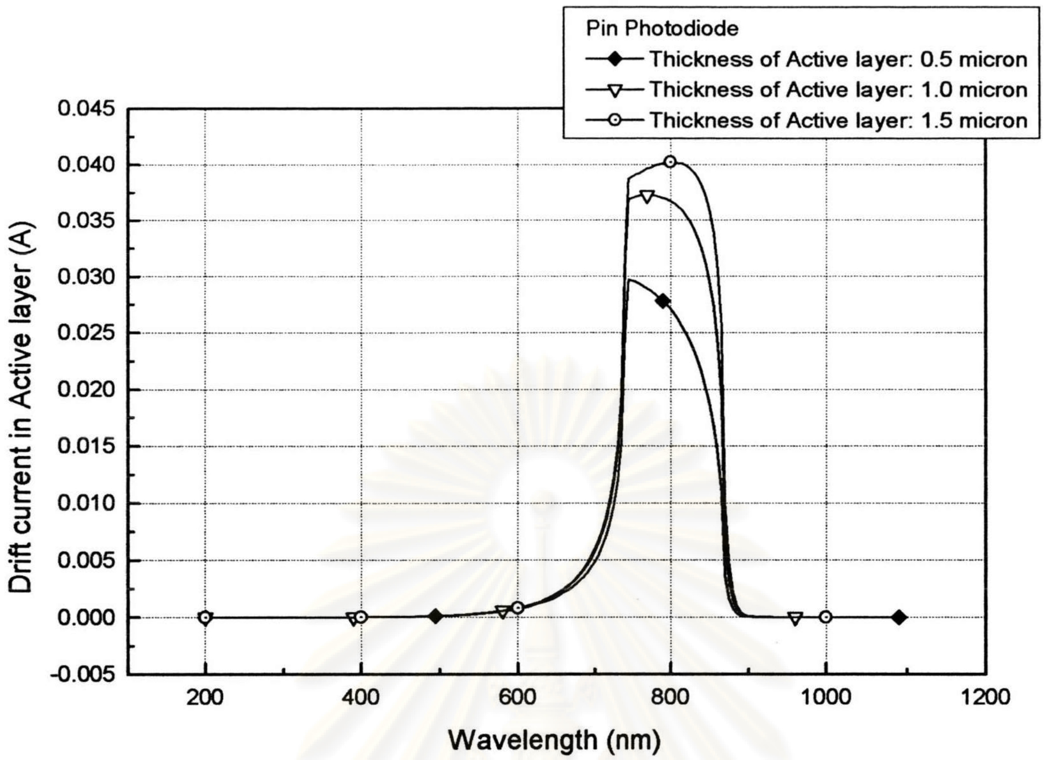
รูปที่ 3.23 ผลตอบสนองทางแสงของโครงสร้าง Pin Photodiode เมื่อชั้นทำงานหนา 1.5 μm



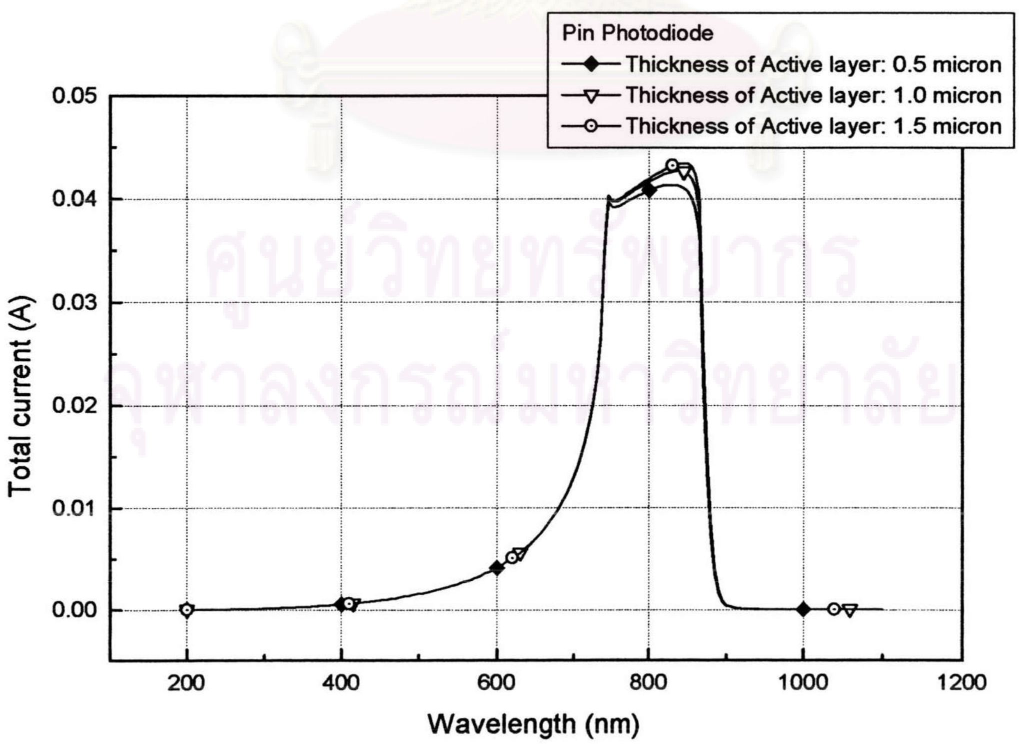
รูปที่ 3.24 กระแสแพร่ซึมจากชั้นหน้าต่างบนของ Pin Photodiode เมื่อความหนาชั้นทำงานต่างกัน



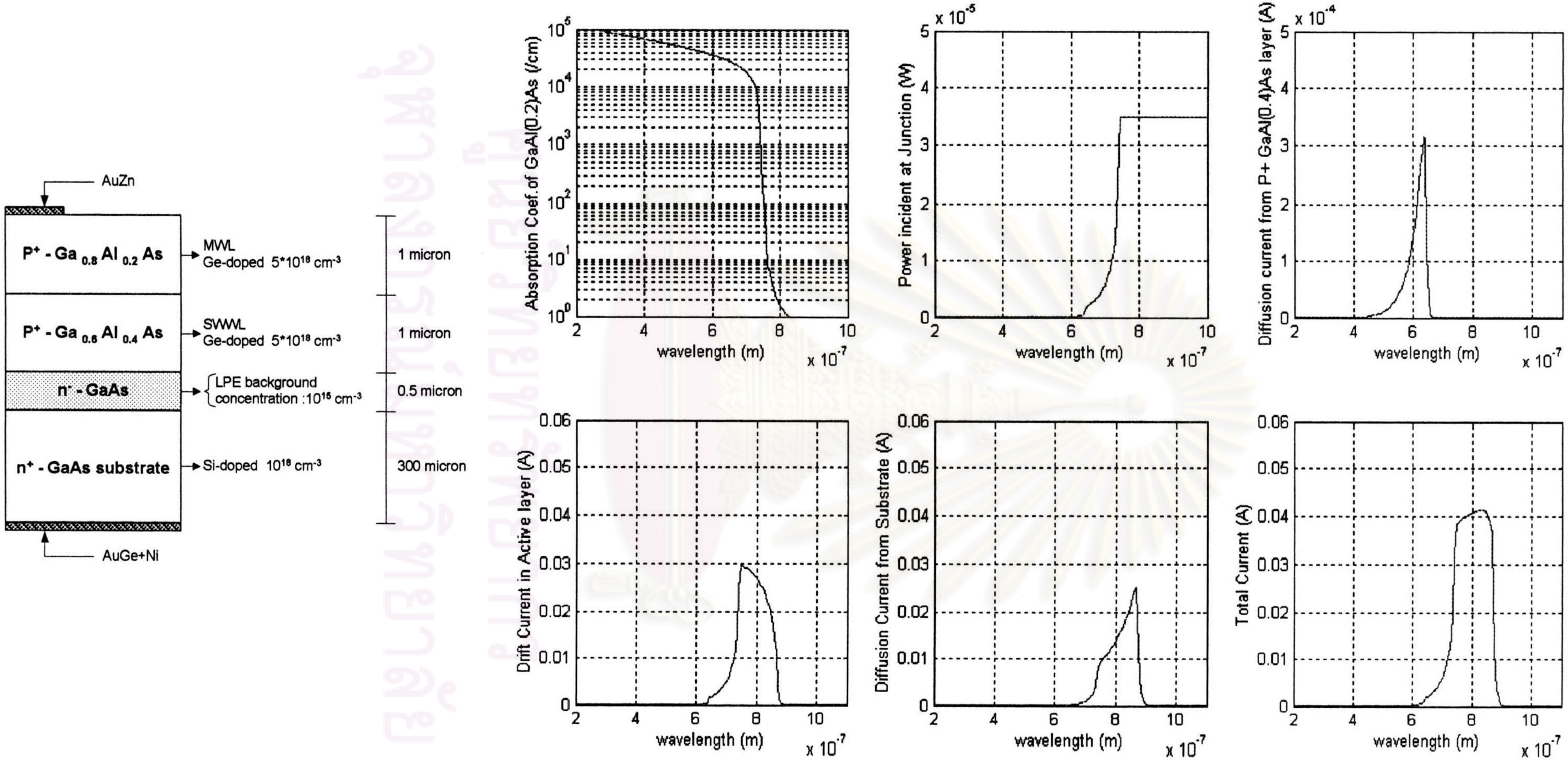
รูปที่ 3.25 กระแสแพร่ซึมจากแผ่นฐานของ Pin Photodiode เมื่อความหนาชั้นทำงานต่างกัน



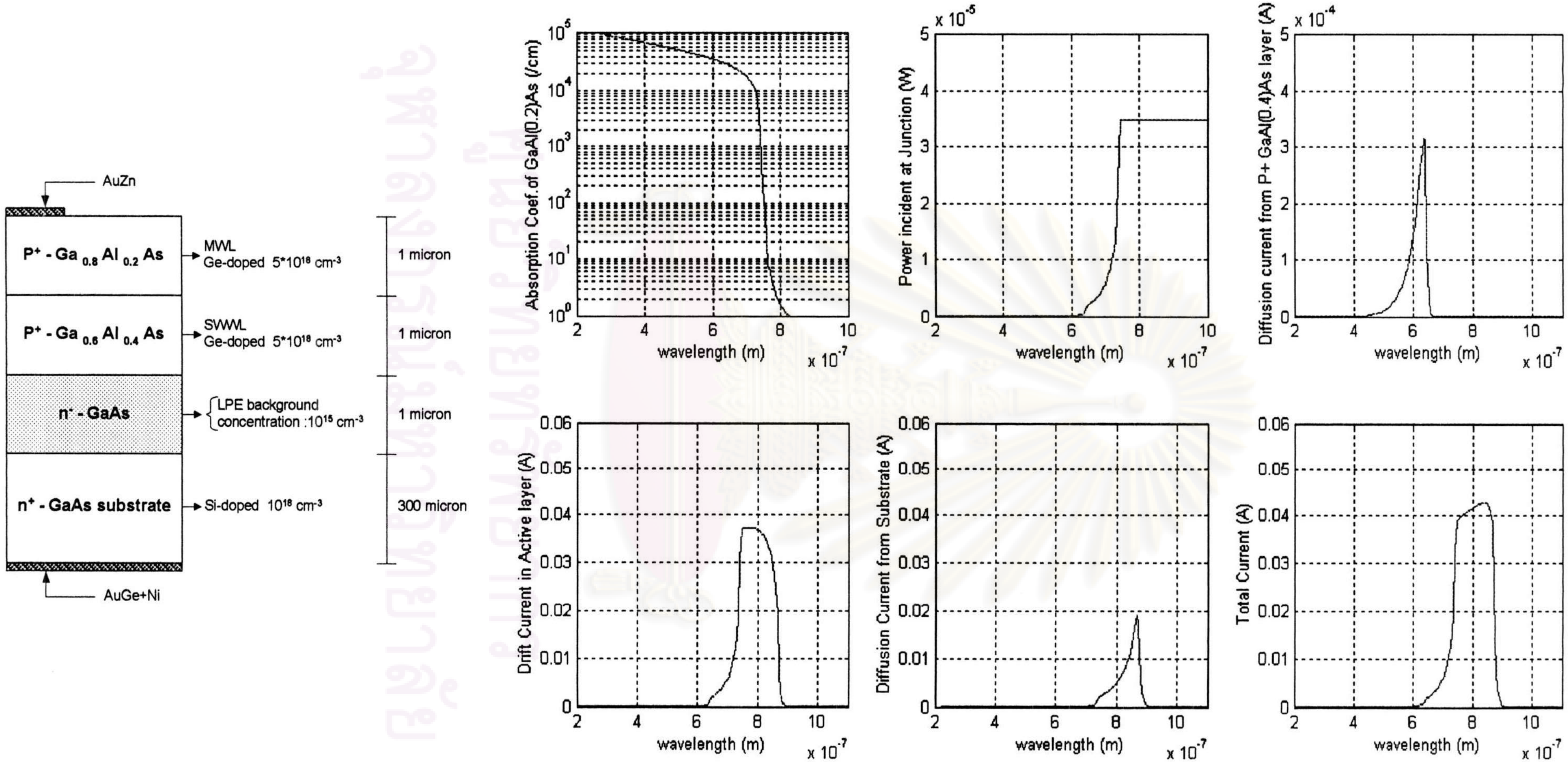
รูปที่ 3.26 กระแสพัดพาในชั้นทำงานของ Pin Photodiode เมื่อความหนาชั้นทำงานต่างกัน



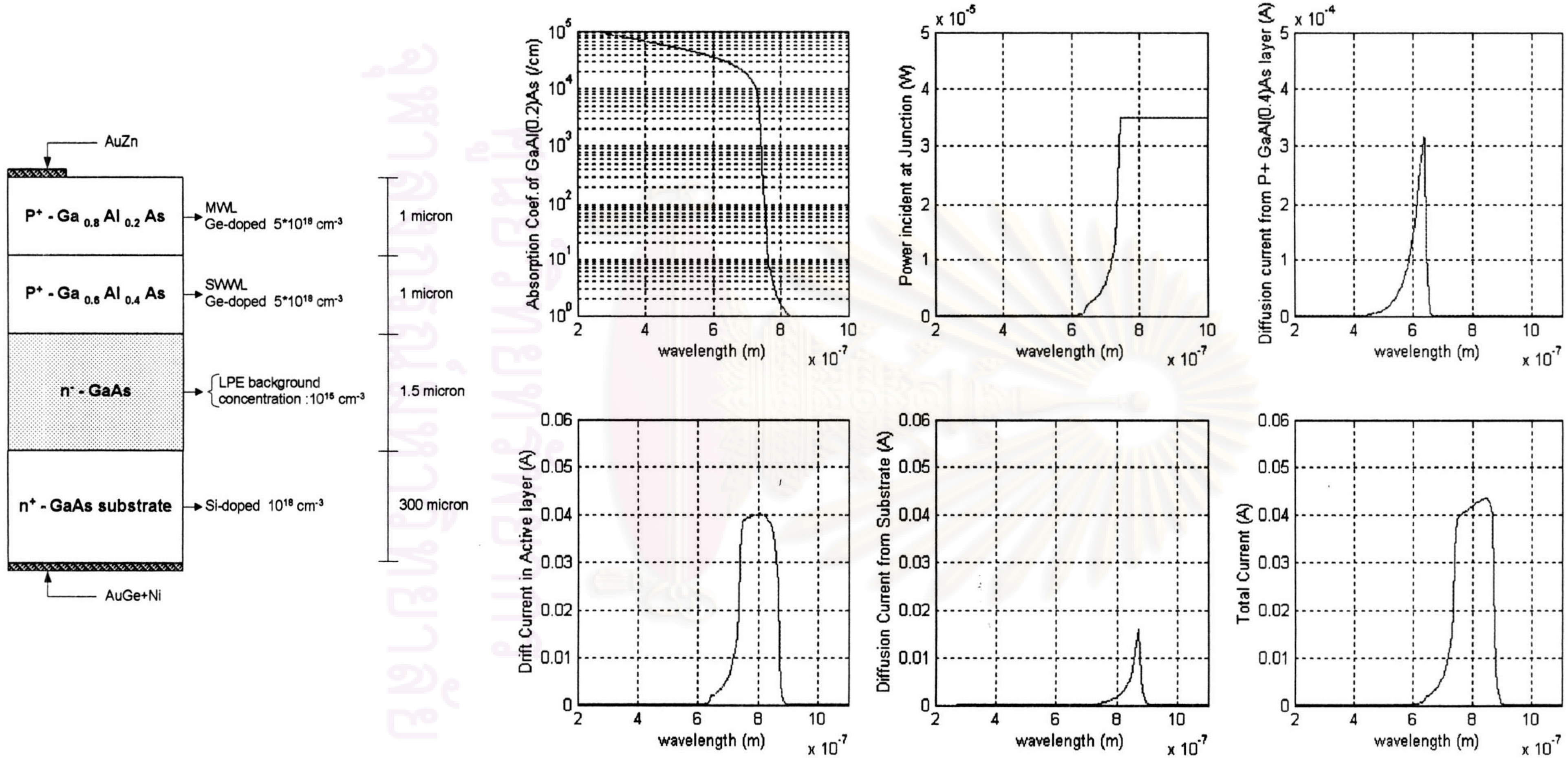
รูปที่ 3.27 กระแสสุทธิของ Pin Photodiode เมื่อความหนาชั้นทำงานต่างกัน



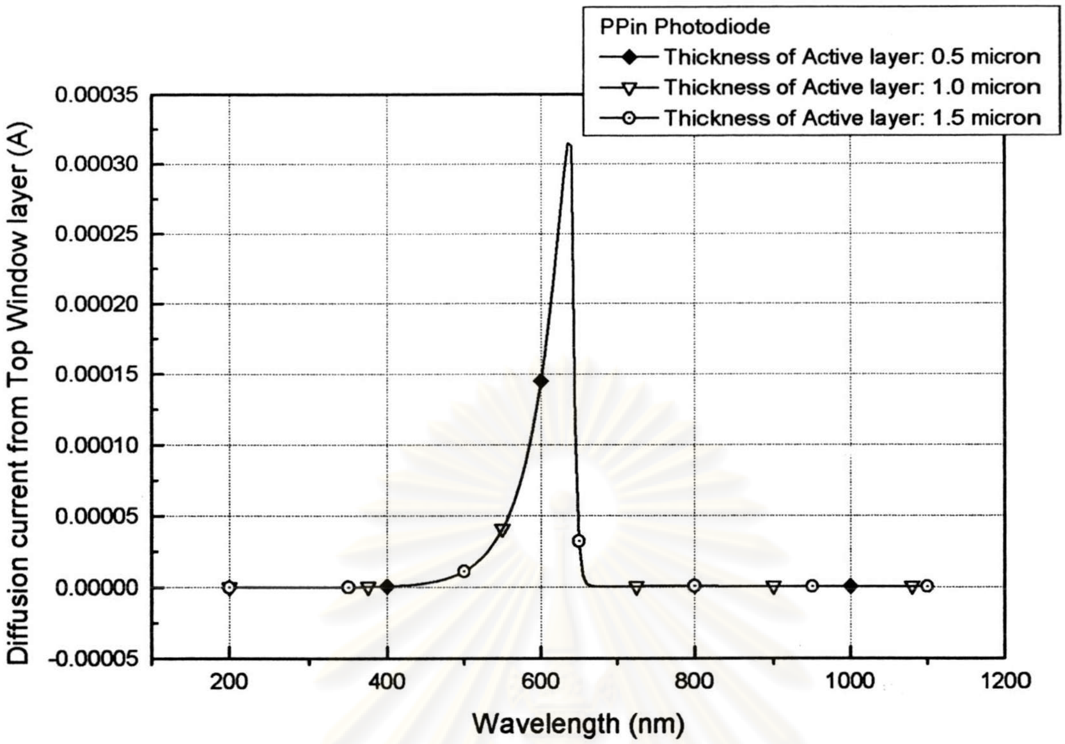
รูปที่ 3.28 ผลตอบสนองทางแสงของโครงสร้าง PPin Photodiode เมื่อชั้นทำงานหนา 0.5 μm



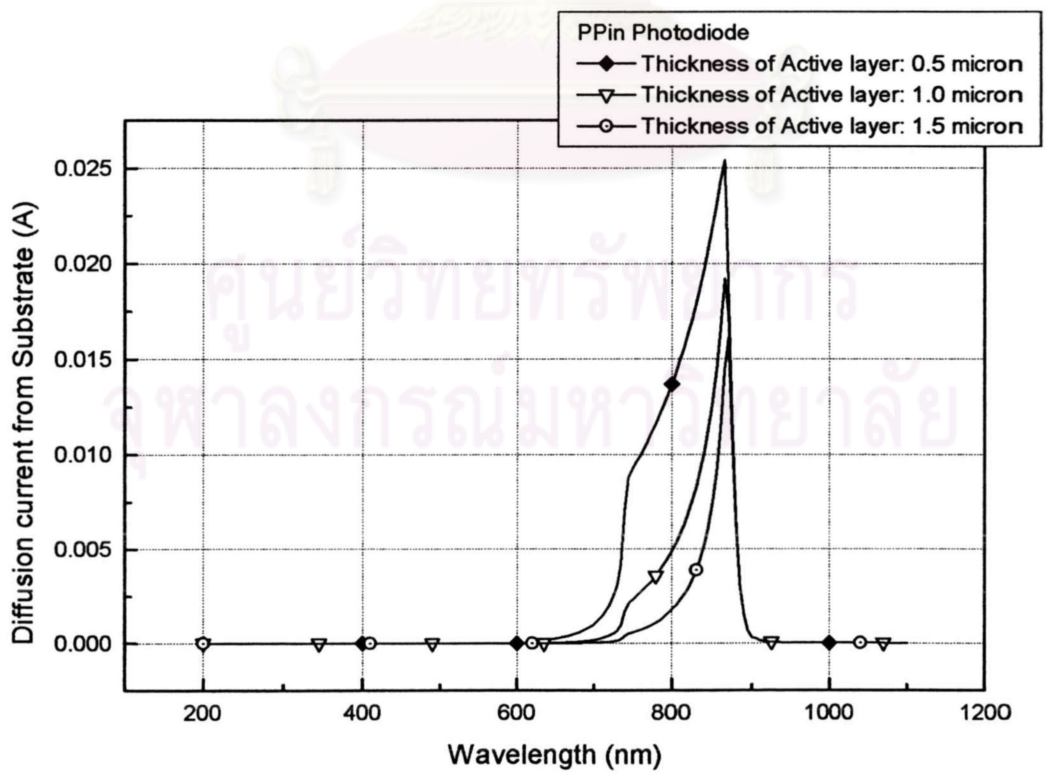
รูปที่ 3.29 ผลตอบสนองทางแสงของโครงสร้าง PPin Photodiode เมื่อชั้นทำงานหนา 1 μm



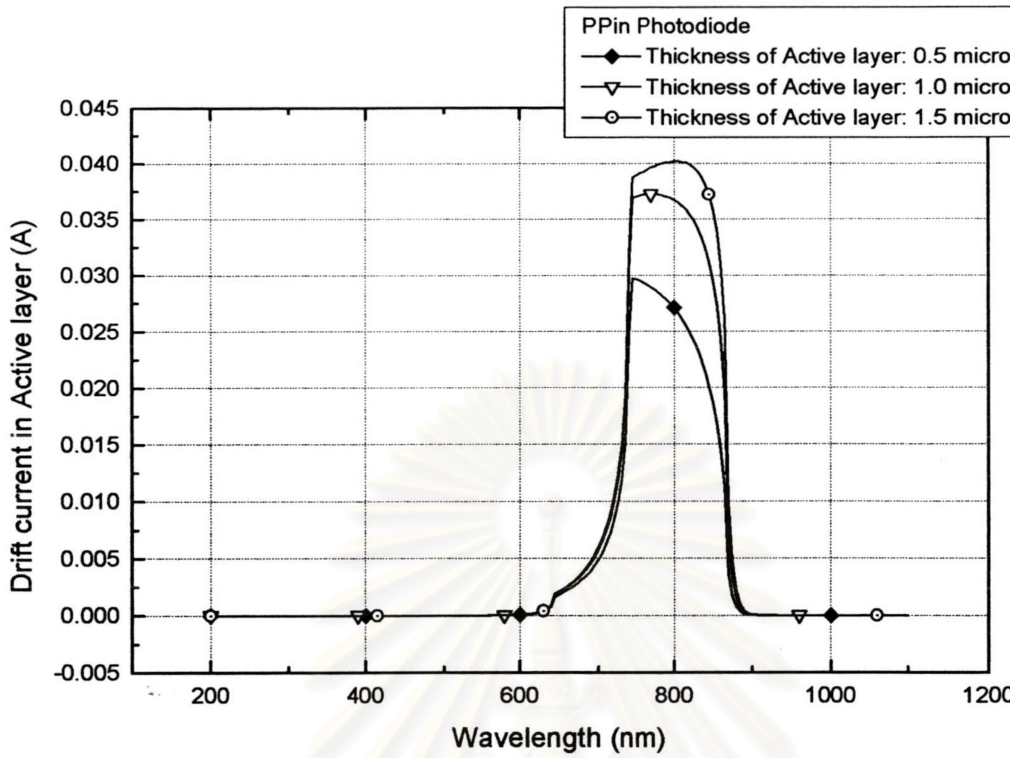
รูปที่ 3.30 ผลตอบสนองทางแสงของโครงสร้าง PPin Photodiode เมื่อชั้นทำงานหนา 1.5 μm



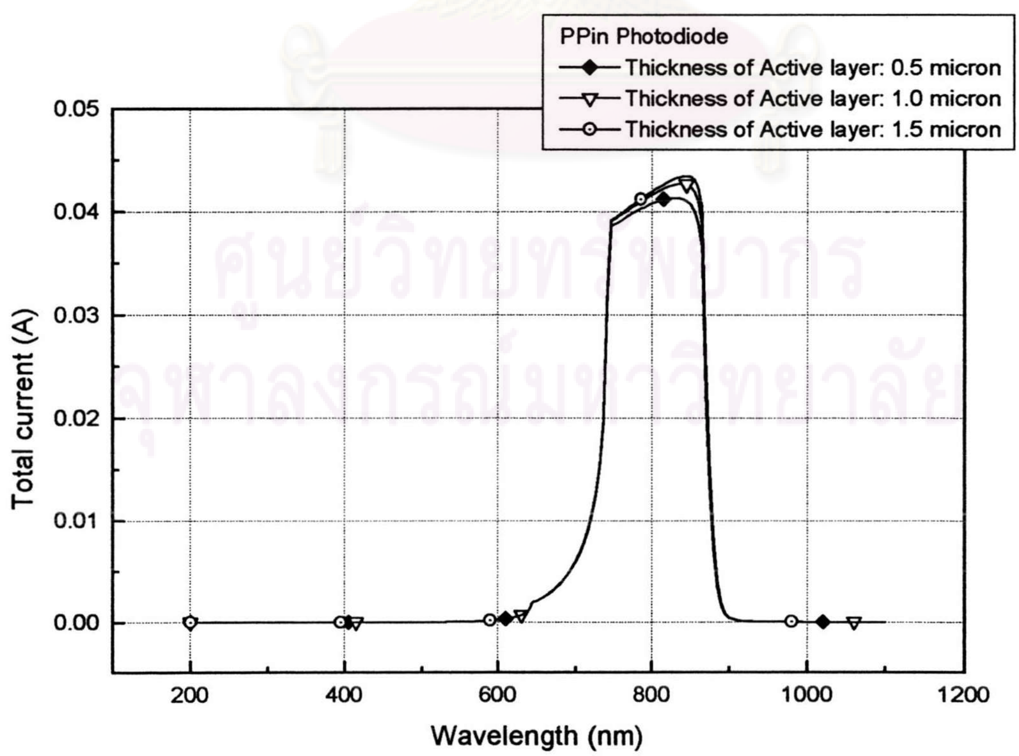
รูปที่ 3.31 กระแสแพร่ซึมจากชั้นหน้าต่างบนของ PPin Photodiode เมื่อความหนาชั้นทำงานต่างกัน



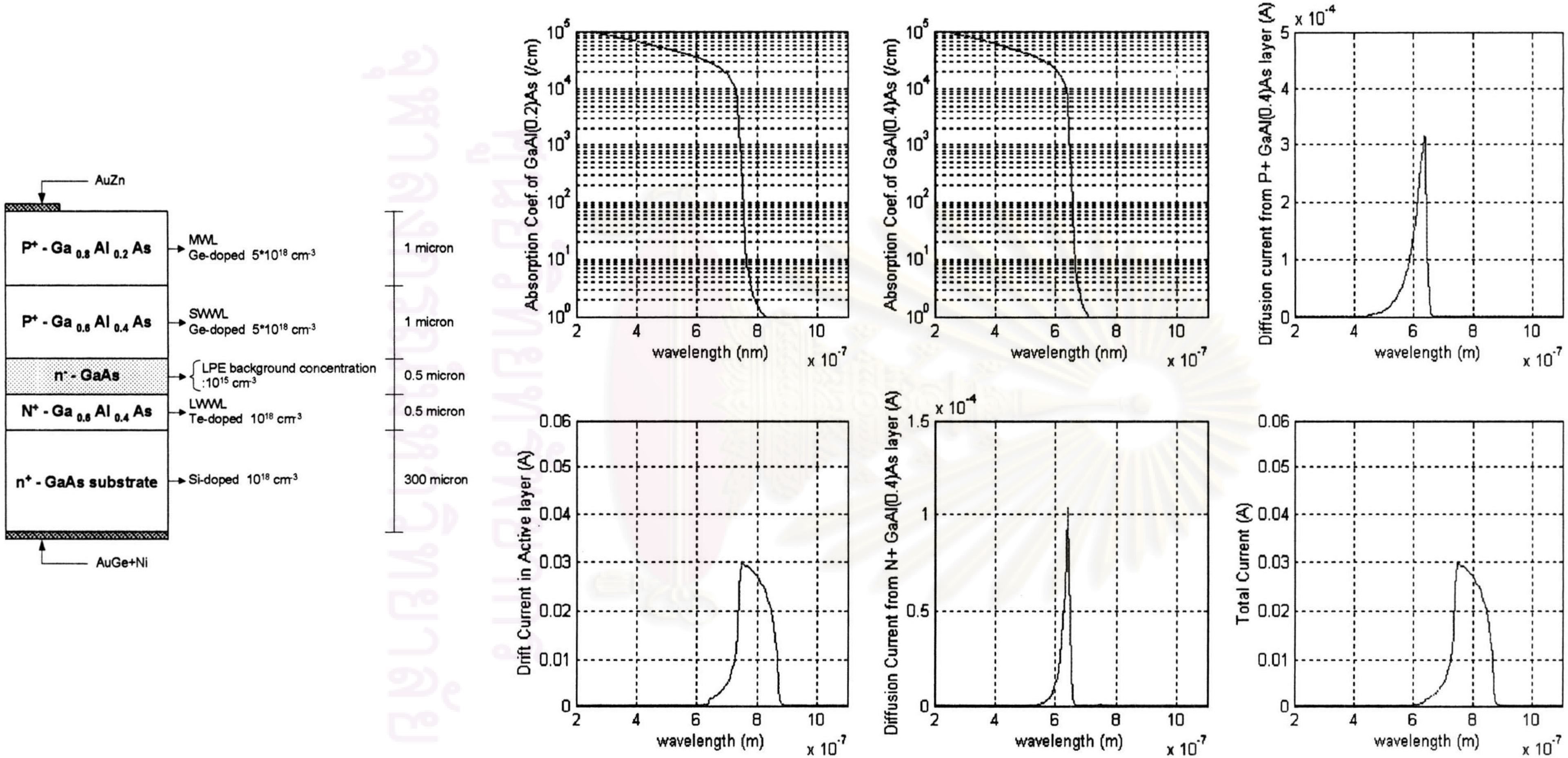
รูปที่ 3.32 กระแสแพร่ซึมจากแผ่นฐานของ PPin Photodiode เมื่อความหนาชั้นทำงานต่างกัน



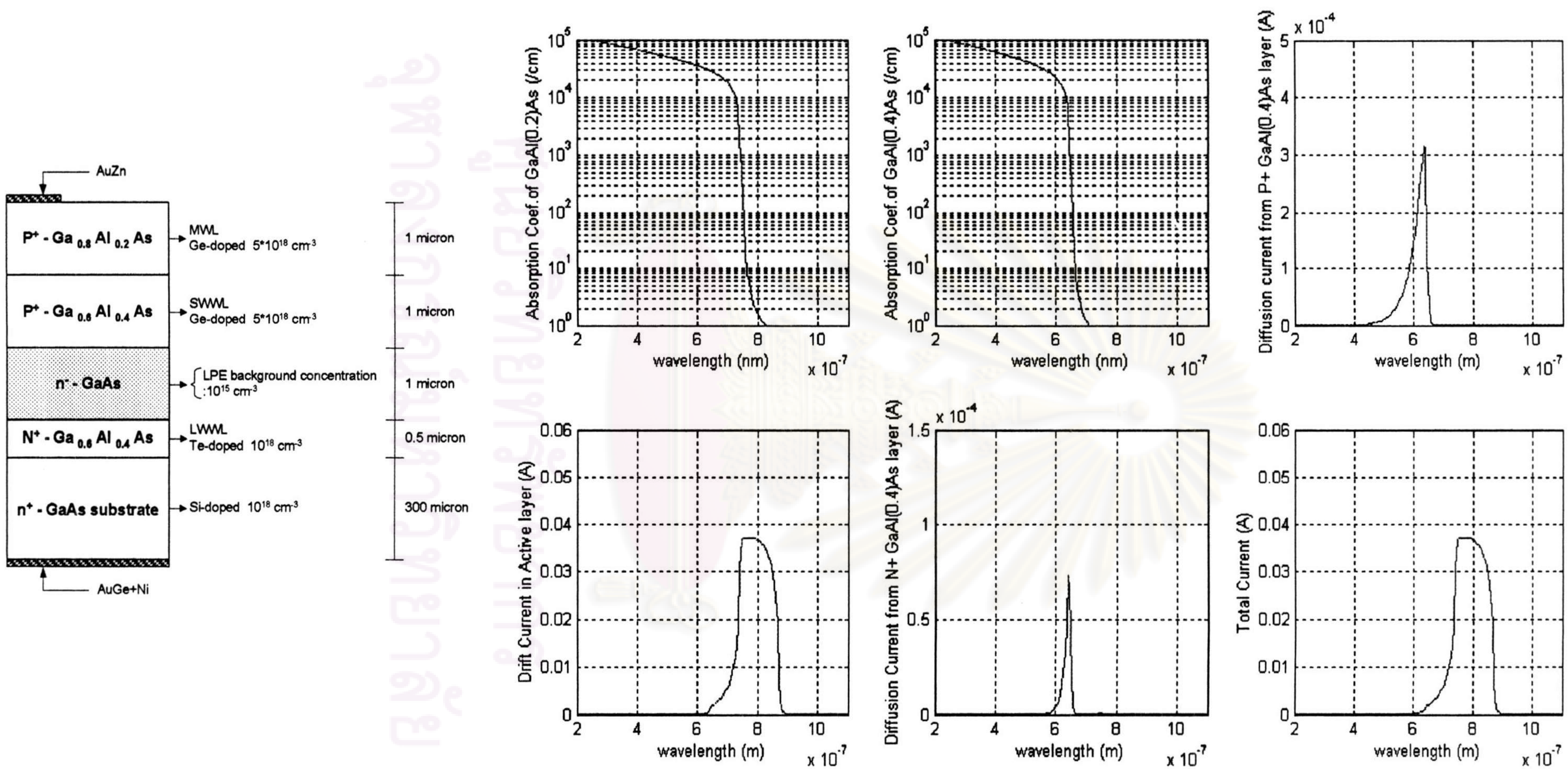
รูปที่ 3.33 กระแสพัดพาในชั้นทำงานของ PPin Photodiode เมื่อความหนาชั้นทำงานต่างกัน



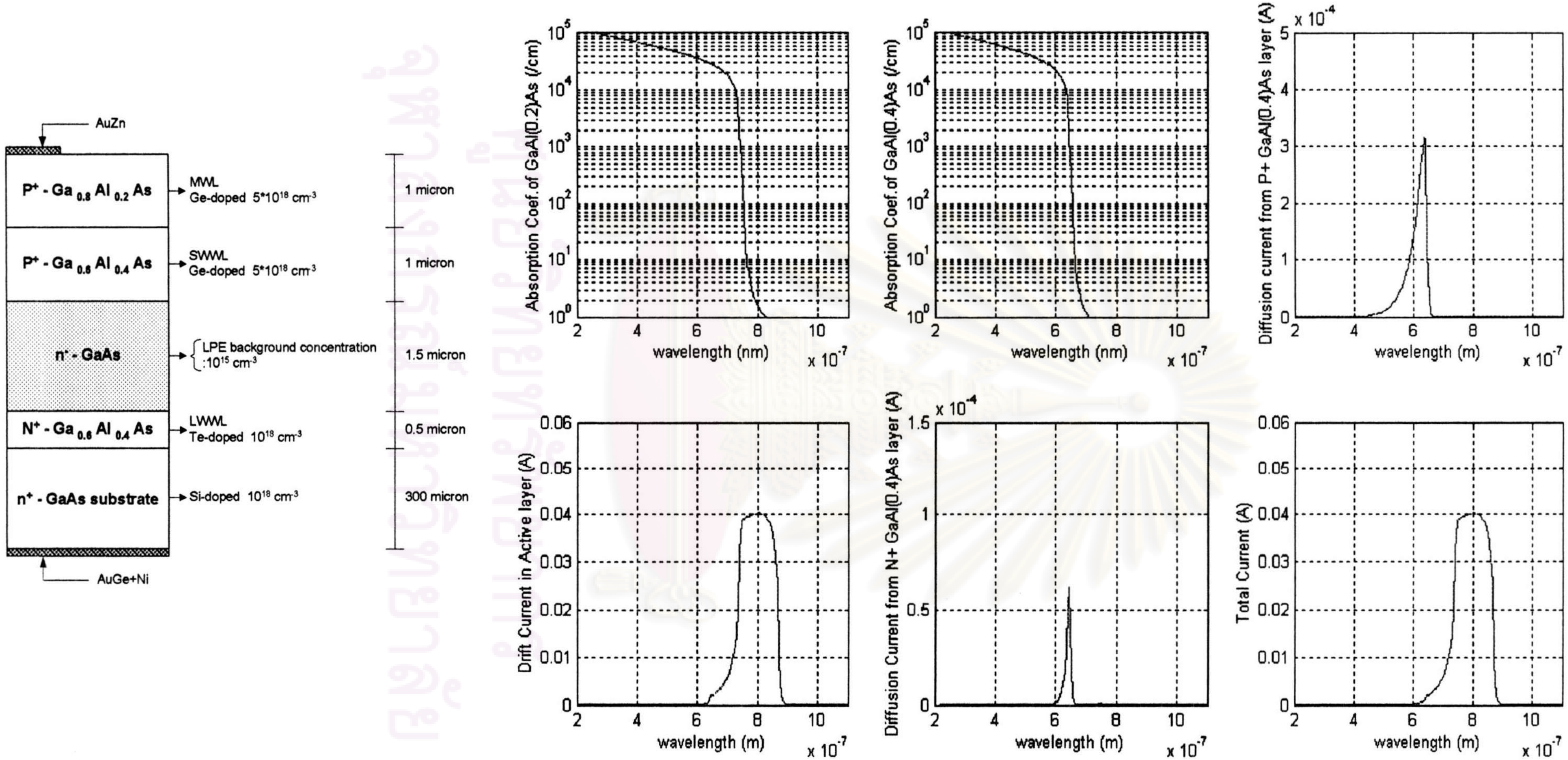
รูปที่ 3.34 กระแสสุทธิของ PPin Photodiode เมื่อความหนาชั้นทำงานต่างกัน



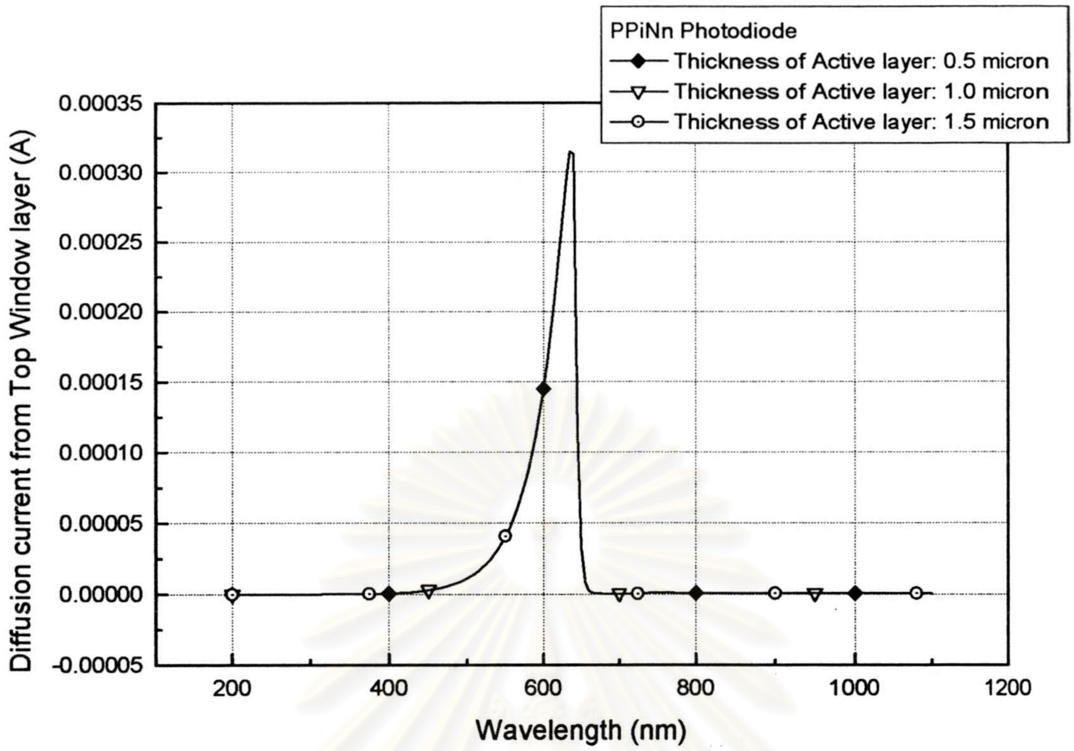
รูปที่ 3.35 ผลตอบสนองทางแสงของโครงสร้าง PPiNn Photodiode เมื่อชั้นทำงานหนา 0.5 μm



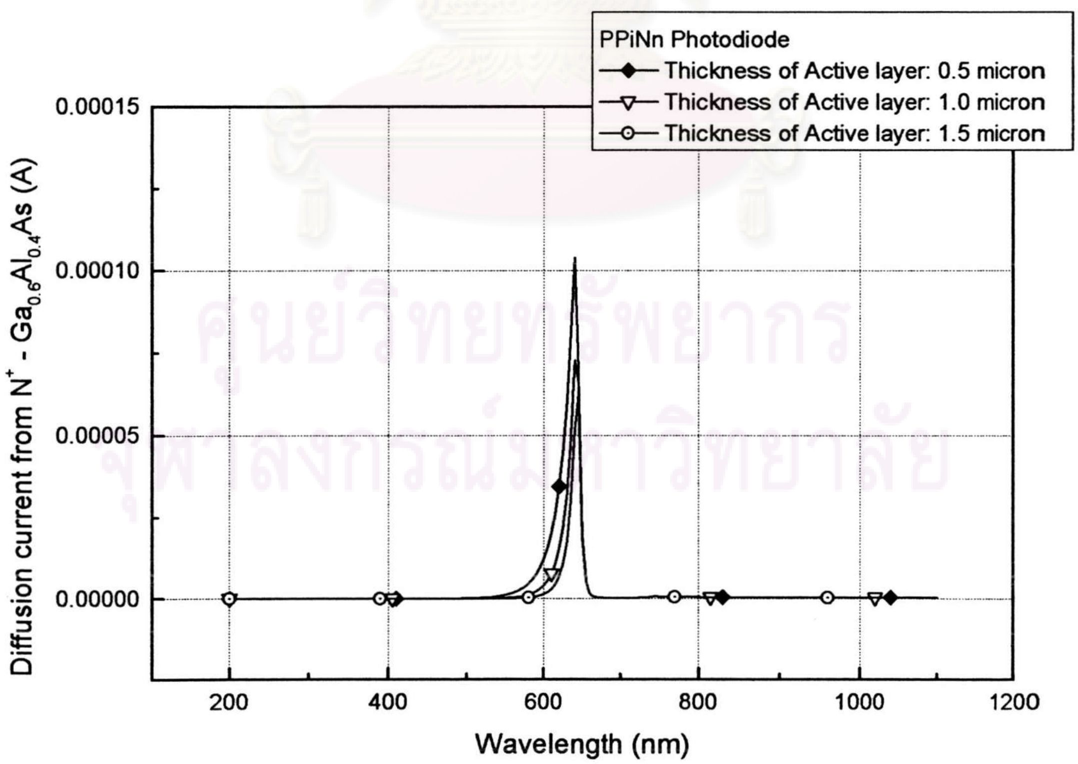
รูปที่ 3.36 ผลตอบสนองทางแสงของโครงสร้าง PPiNn Photodiode เมื่อชั้นทำงานหนา 1 μm



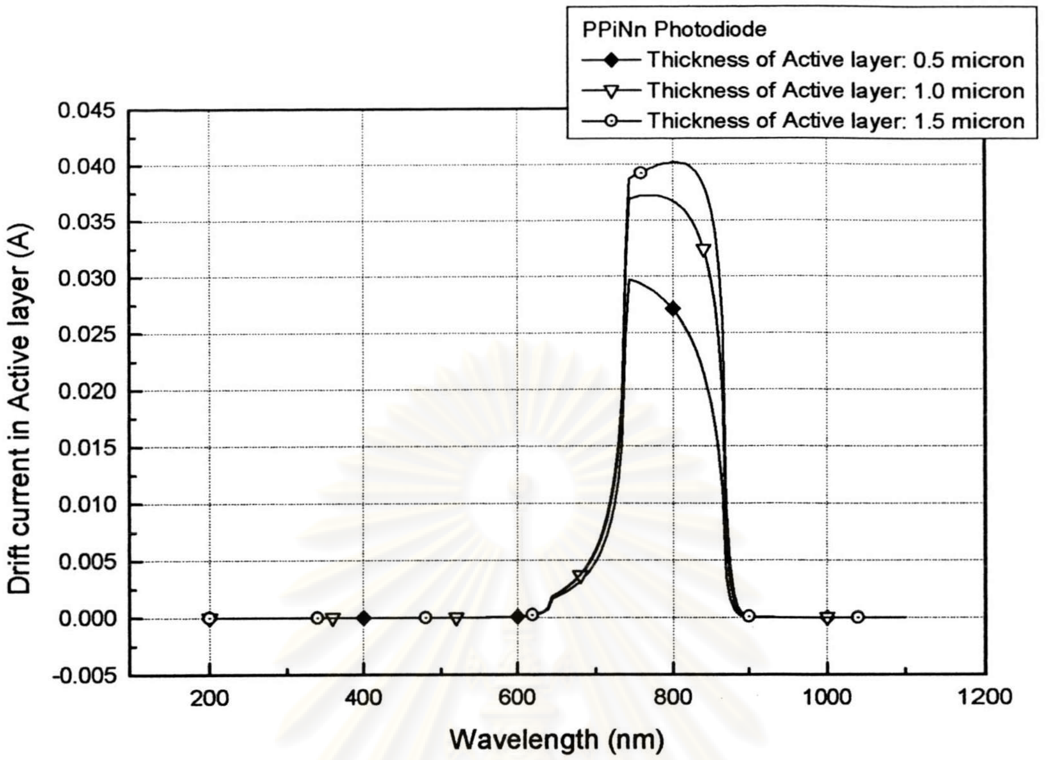
รูปที่ 3.37 ผลตอบสนองทางแสงของโครงสร้าง PPiNn Photodiode เมื่อชั้นทำงานหนา 1.5 μm



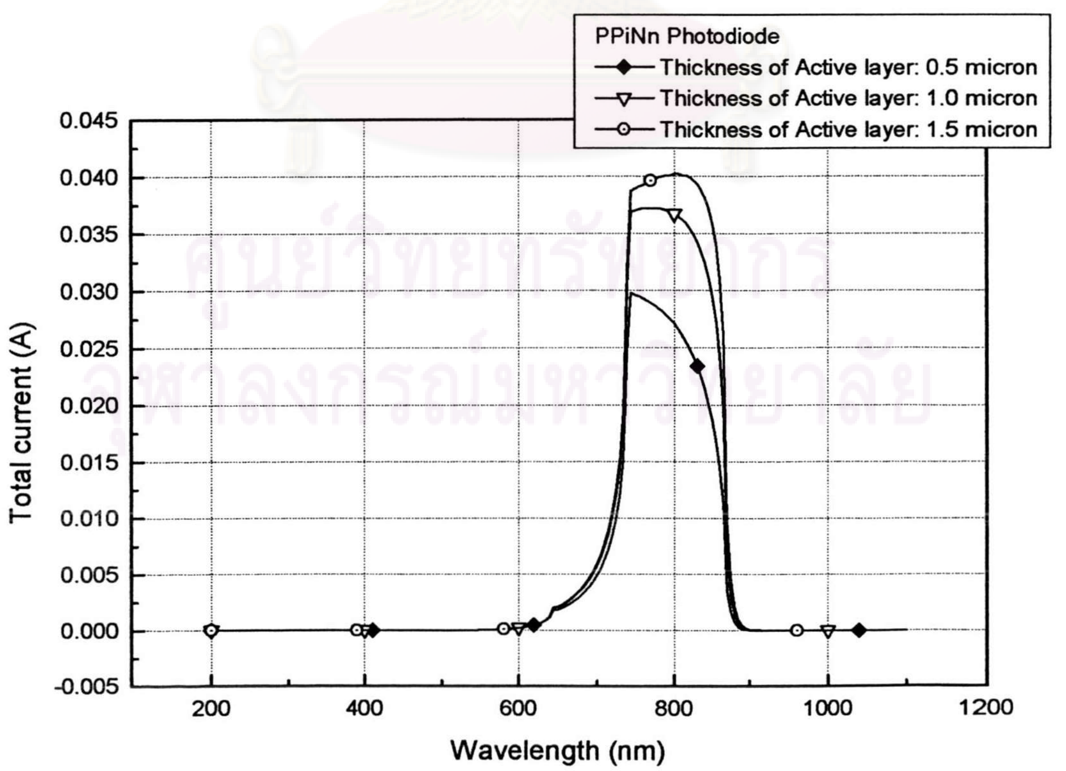
รูปที่ 3.38 กระแสแพร่ซึมจากชั้นหน้าต่างบนของ PPiNn Photodiode เมื่อความหนาชั้นทำงานต่างกัน



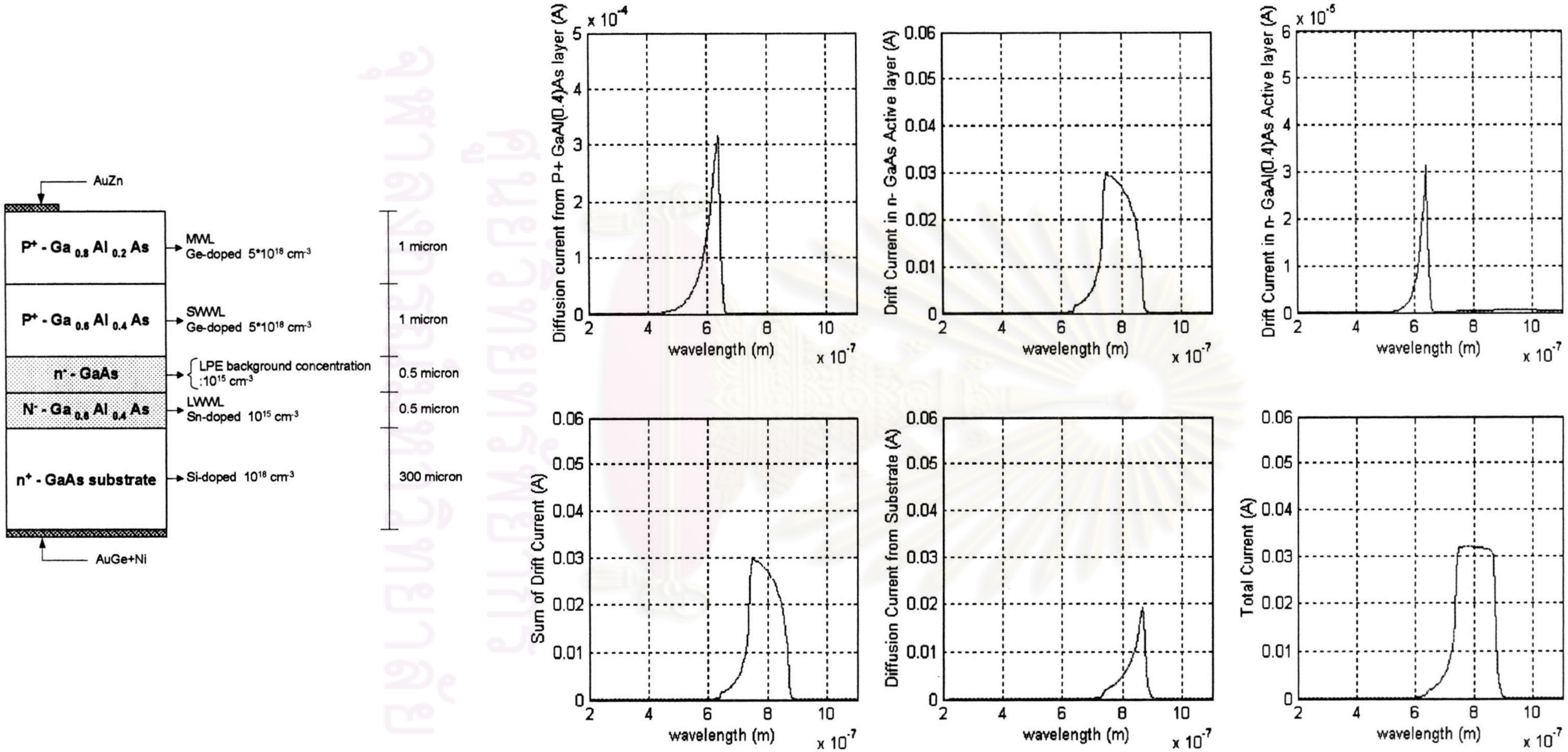
รูปที่ 3.39 กระแสแพร่ซึมจากชั้น N^{+}- $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ ของ PPiNn Photodiode เมื่อความหนาชั้นทำงานต่างกัน



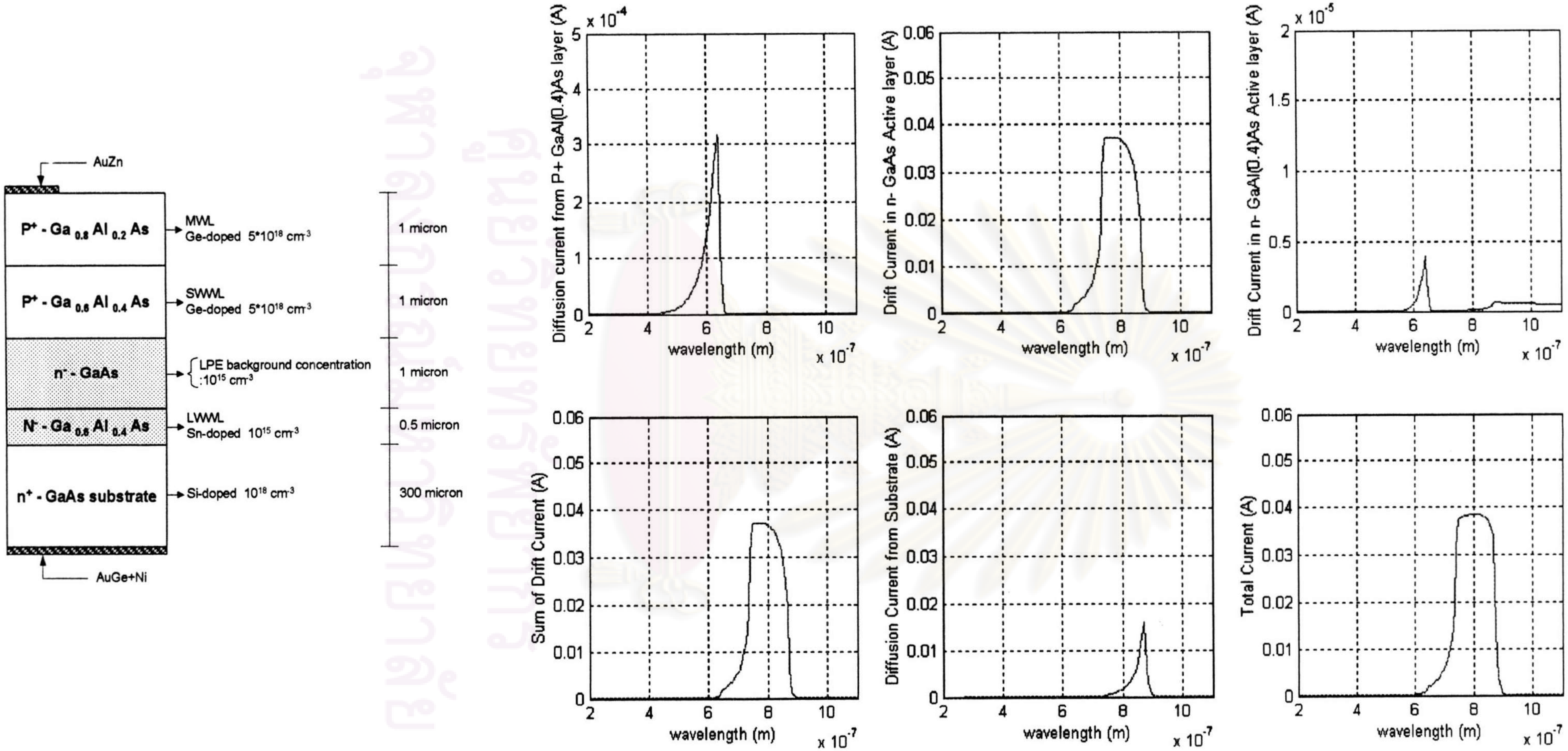
รูปที่ 3.40 กระแสพัดพาในชั้นทำงานของ PPiNn Photodiode เมื่อความหนาชั้นทำงานต่างกัน



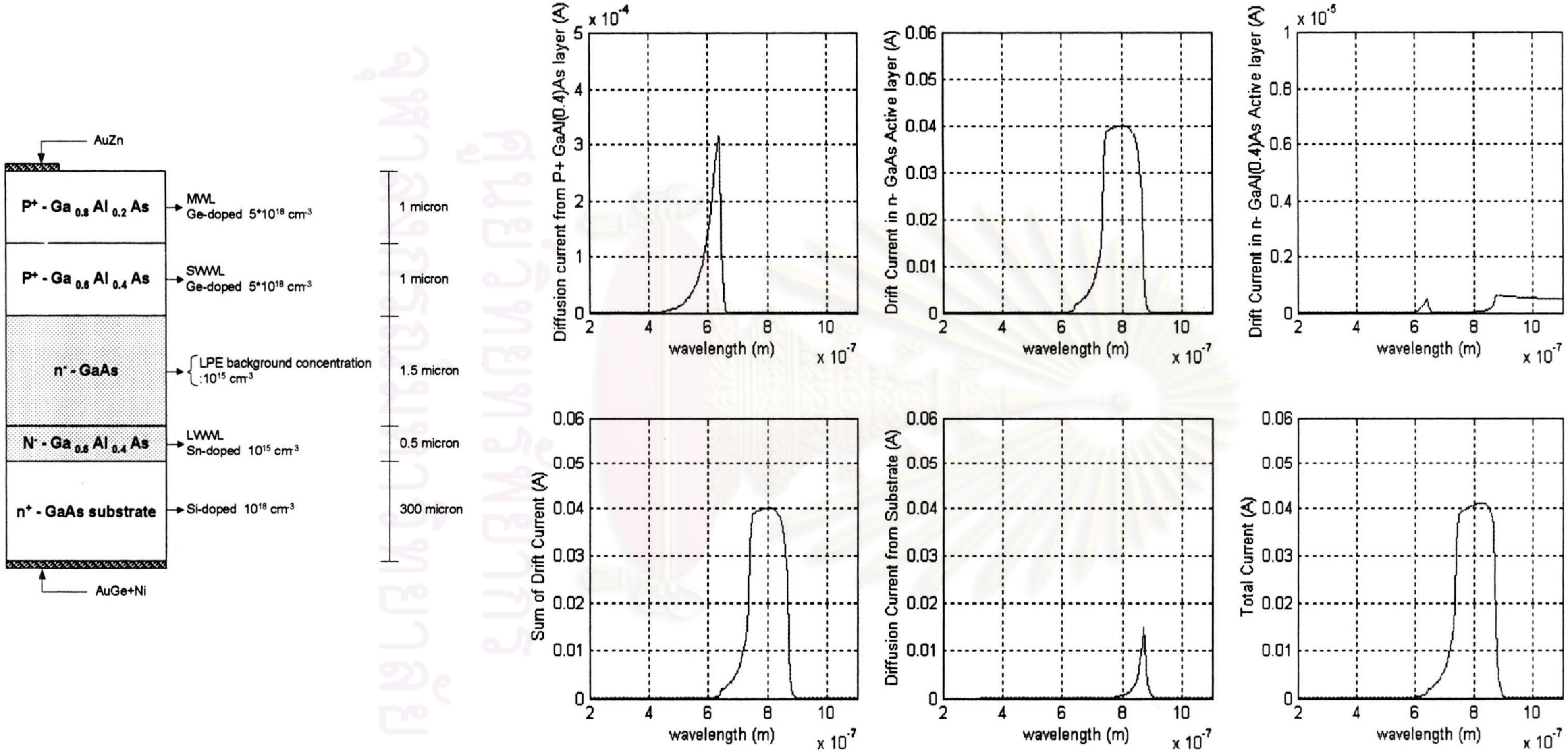
รูปที่ 3.41 กระแสสุทธิของ PPiNn Photodiode เมื่อความหนาชั้นทำงานต่างกัน



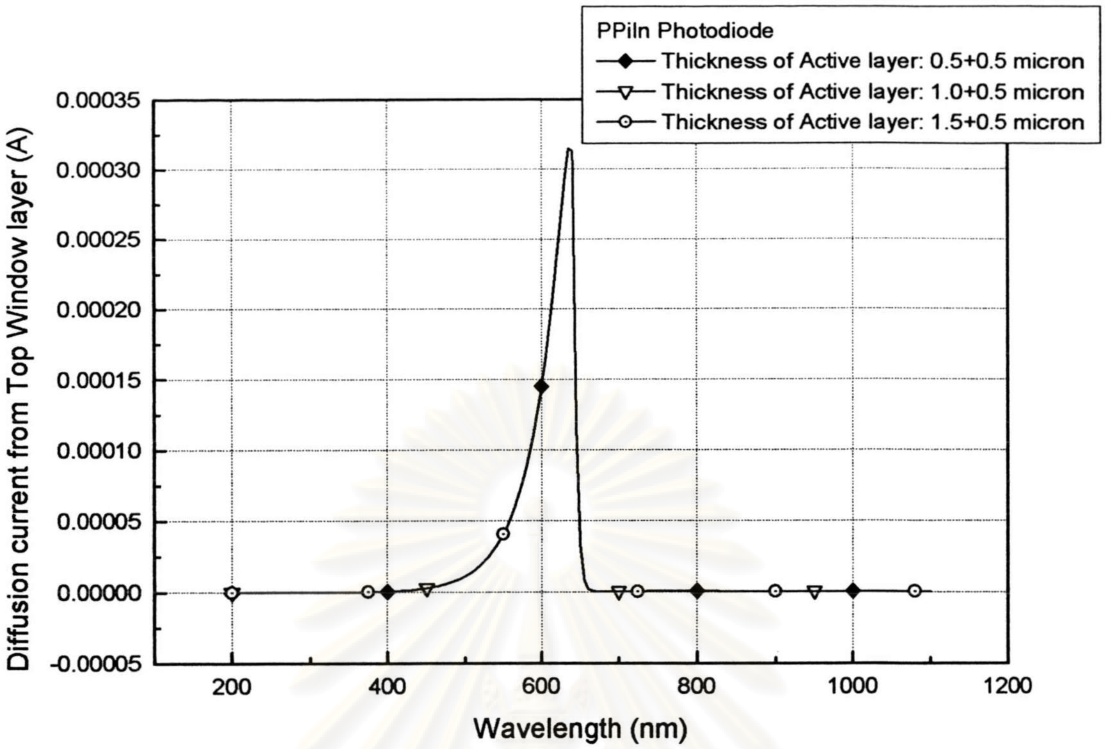
รูปที่ 3.42 ผลตอบสนองทางแสงของโครงสร้าง PPiIn Photodiode เมื่อชั้นทำงาน GaAs (n^-) หนา 0.5 μm บวก $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ (N^-) หนา 0.5 μm



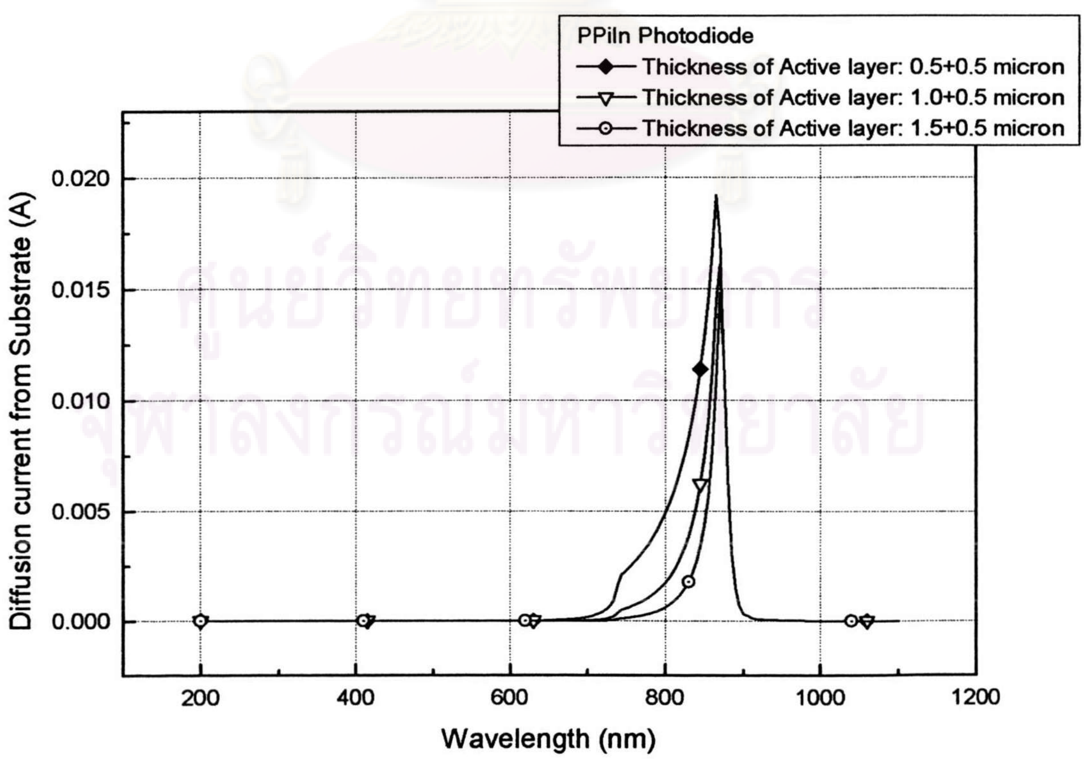
รูปที่ 3.43 ผลตอบสนองทางแสงของโครงสร้าง PPiIn Photodiode เมื่อชั้นทำงาน GaAs (n^-) หนา 1 μm บวก $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ (N^-) หนา 0.5 μm



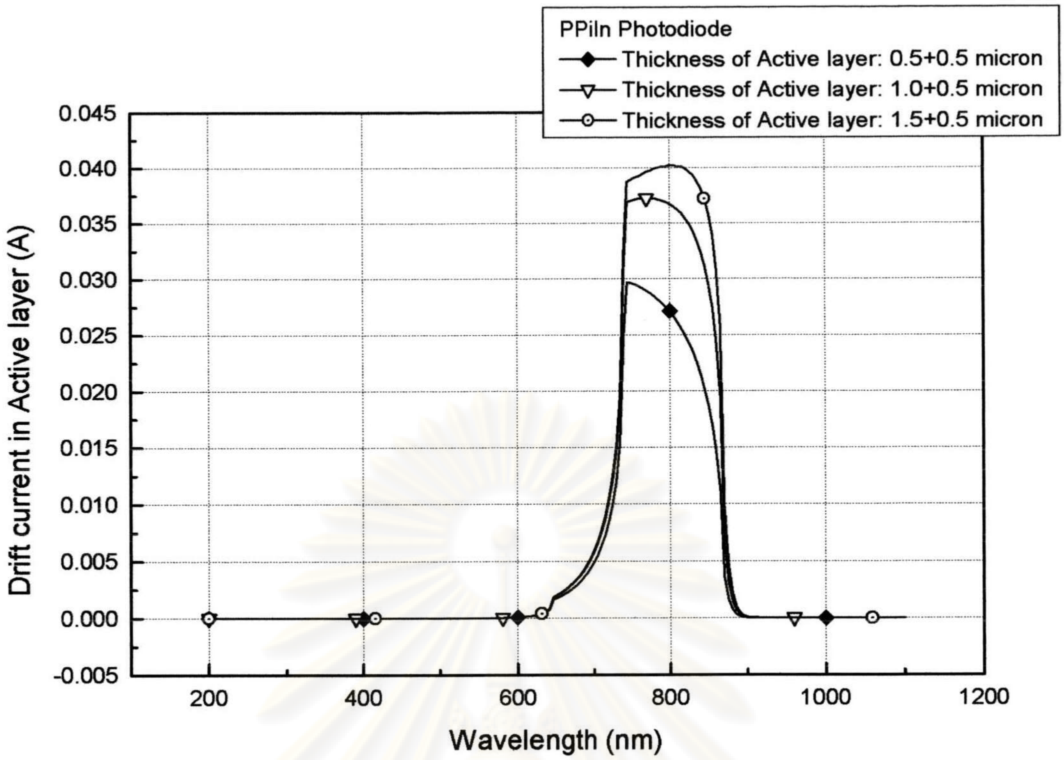
รูปที่ 3.44 ผลตอบสนองทางแสงของโครงสร้าง PPiIn Photodiode เมื่อชั้นทำงาน GaAs (n^-) หนา 1.5 μm บวก $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ (N^-) หนา 0.5 μm



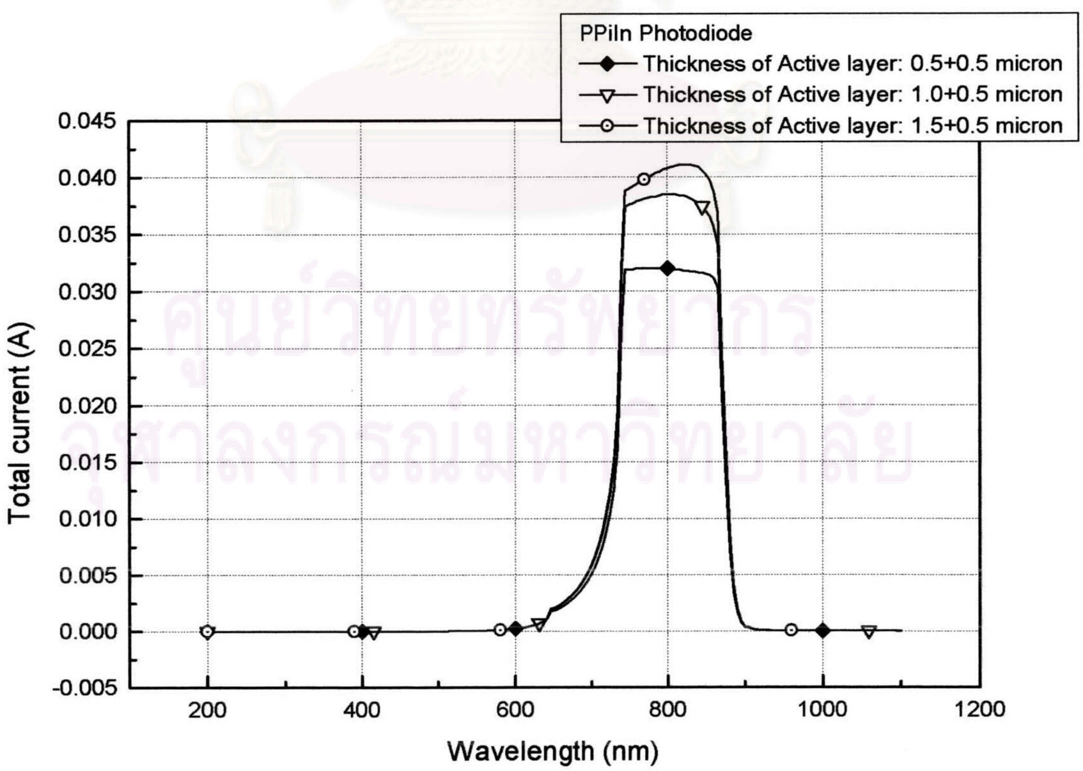
รูปที่ 3.45 กระแสแพร่ซึมจากชั้นหน้าต่างบนของ PPiIn Photodiode เมื่อความหนาชั้นทำงานต่างกัน



รูปที่ 3.46 กระแสแพร่ซึมจากแผ่นฐานของ PPiIn Photodiode เมื่อความหนาชั้นทำงานต่างกัน



รูปที่ 3.47 กระแสพัดพาในชั้นทำงานของ PPiIn Photodiode เมื่อความหนาชั้นทำงานต่างกัน



รูปที่ 3.48 กระแสสุทธิของ PPiIn Photodiode เมื่อความหนาชั้นทำงานต่างกัน

แนวโน้มโดยรวมพบว่าการเพิ่มความหนาชั้นทำงานจะไม่มีผลต่อปริมาณกระแสแพร่ซึมจากชั้นหน้าต่างด้านบน แต่จะส่งผลให้กระแสแพร่ซึมจากแผ่นฐานหรือชั้นหน้าต่างใกล้แผ่นฐานลดลง ในขณะที่กระแสพัดพาในชั้นทำงานและกระแสสุทธิเพิ่มขึ้น จะเห็นว่าโครงสร้างที่มีชั้นทำงานบางๆจะได้รับผลกระทบจากกระแสแพร่ซึมจากแผ่นฐานมากกว่าโครงสร้างที่มีชั้นทำงานหนาๆ สังเกตได้จากความแตกต่างของค่ากระแสพัดพาและกระแสสุทธิ หากกระแสพัดพาและกระแสสุทธิมีขนาดต่างกันมากอย่างเห็นได้ชัด จะหมายถึงกระแสแพร่ซึมมีปริมาณสูงและส่งผลกระทบต่อโฟโตไดโอดอย่างชัดเจน การออกแบบโครงสร้างต่อโฟโตไดโอดเพื่อช่วยขจัดกระแสแพร่ซึมก็จะมีประโยชน์มากต่อโครงสร้างที่มีผลตอบสนองทางแสงในลักษณะดังกล่าว

จากนั้นทำการวิเคราะห์หาโครงสร้างที่ดีที่สุดในแง่ช่วยขจัดกระแสแพร่ซึม ทั้งที่เป็นผลตอบสนองทางแสงที่ขอบด้านความยาวคลื่นสั้นและความยาวคลื่นยาว โดยจะเปรียบเทียบระหว่าง 4 โครงสร้าง แยกพิจารณาทีละพจน์กระแส อันได้แก่ กระแสแพร่ซึมจากชั้นหน้าต่างด้านบน กระแสแพร่ซึมจากแผ่นฐานหรือชั้นหน้าต่างใกล้แผ่นฐาน กระแสพัดพาในชั้นทำงาน และกระแสสุทธิ ตามลำดับ โดยจะจัดกลุ่มเปรียบเทียบเป็น 3 กรณีตามความหนาของชั้นทำงาน ดังแสดงรายละเอียดความหนาของชั้นต่างๆของแต่ละกรณีไว้ในตารางที่ 3.9, 3.10 และ 3.11

รูปที่ 3.49-3.52 แสดงเปรียบเทียบผลตอบสนองทางแสงแยกแต่ละพจน์กระแสในกรณีที่ 1

รูปที่ 3.53-3.56 แสดงเปรียบเทียบผลตอบสนองทางแสงแยกแต่ละพจน์กระแสในกรณีที่ 2

รูปที่ 3.57-3.60 แสดงเปรียบเทียบผลตอบสนองทางแสงแยกแต่ละพจน์กระแสในกรณีที่ 3

ตารางที่ 3.9 ค่าความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำในโฟโตไดโอดที่นำมาเปรียบเทียบเป็นกรณีที่ 1

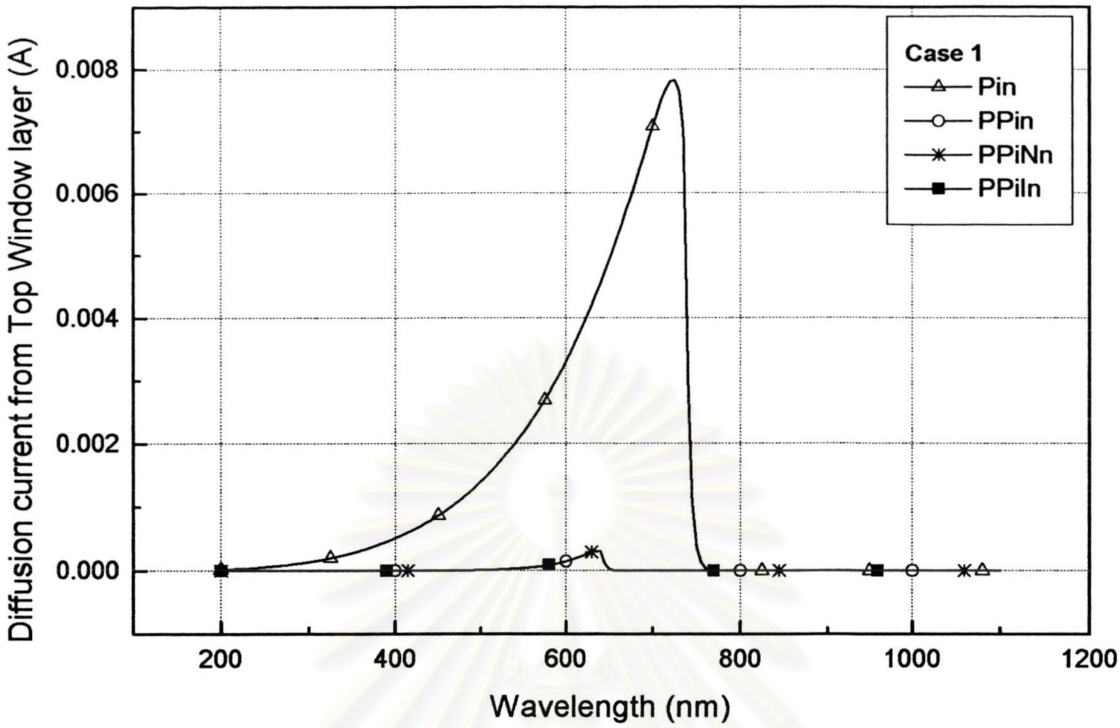
กรณีที่ 1						
ชนิด (โฟโตไดโอด)	P^+ $Ga_{0.8}Al_{0.2}As$	P^+ $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$	n^- GaAs	N^+ $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$	N^- $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$	n^+- GaAs Substrate
Pin	1 μm	-	0.5 μm	-	-	300 μm
PPin	1 μm	1 μm	0.5 μm	-	-	300 μm
PPiNn	1 μm	1 μm	0.5 μm	0.5 μm	-	300 μm
PPiIn	1 μm	1 μm	0.5 μm	-	0.5 μm	300 μm

ตารางที่ 3.10 ค่าความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำในโฟโตไดโอดที่นำมาเปรียบเทียบเป็นกรณีที่ 2

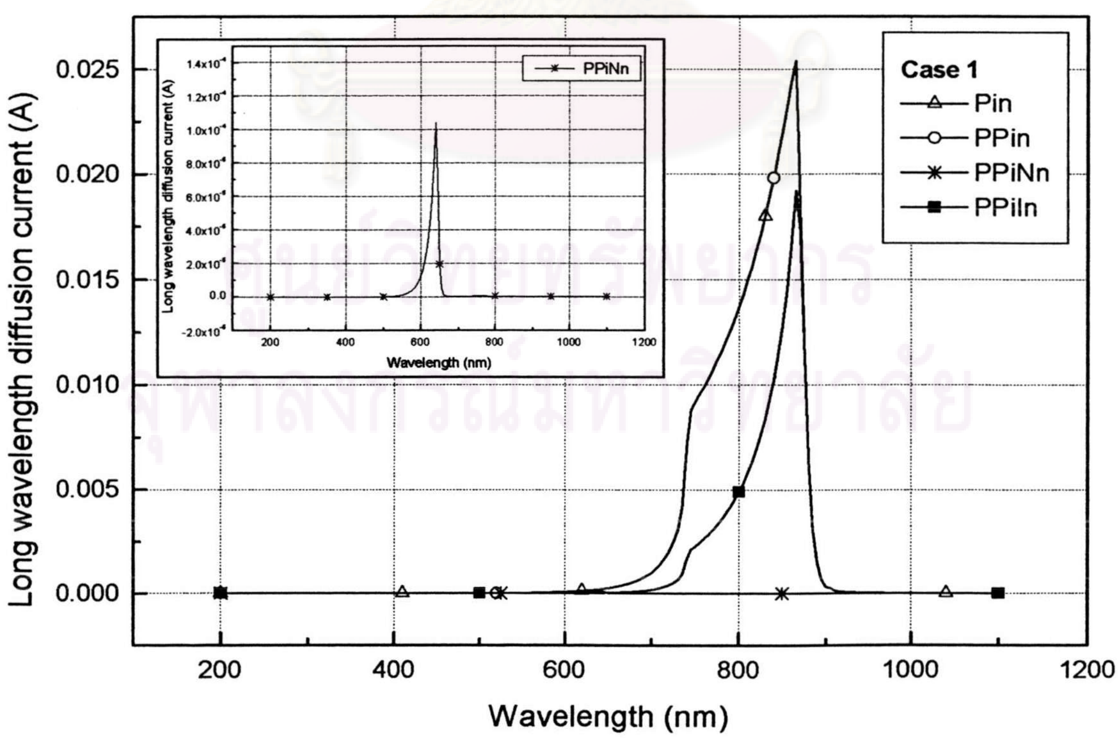
กรณีที่ 2						
ชนิด (โฟโตไดโอด)	P^+ $Ga_{0.8}Al_{0.2}As$	P^+ $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$	n^- GaAs	N^+ $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$	N^- $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$	n^+- GaAs Substrate
Pin	1 µm	-	1 µm	-	-	300 µm
PPin	1 µm	1 µm	1 µm	-	-	300 µm
PPiNn	1 µm	1 µm	1 µm	0.5 µm	-	300 µm
PPiIn	1 µm	1 µm	1 µm	-	0.5 µm	300 µm

ตารางที่ 3.11 ค่าความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำในโฟโตไดโอดที่นำมาเปรียบเทียบเป็นกรณีที่ 3

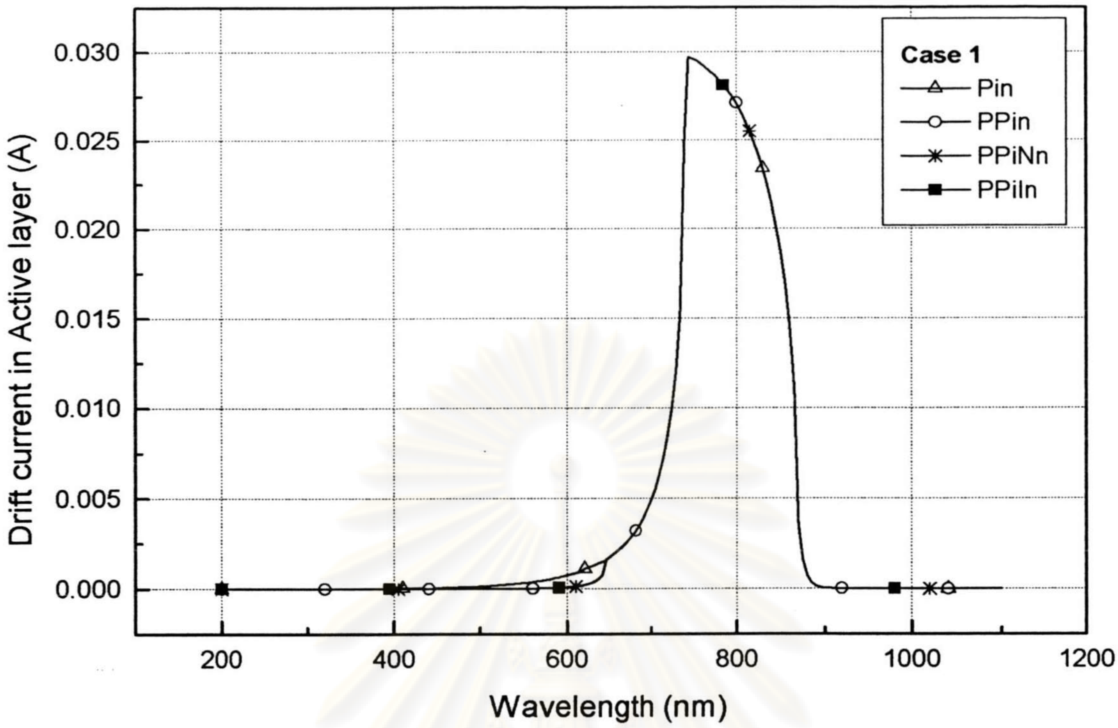
กรณีที่ 3						
ชนิด (โฟโตไดโอด)	P^+ $Ga_{0.8}Al_{0.2}As$	P^+ $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$	n^- GaAs	N^+ $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$	N^- $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$	n^+- GaAs Substrate
Pin	1 µm	-	1.5 µm	-	-	300 µm
PPin	1 µm	1 µm	1.5 µm	-	-	300 µm
PPiNn	1 µm	1 µm	1.5 µm	0.5 µm	-	300 µm
PPiIn	1 µm	1 µm	1.5 µm	-	0.5 µm	300 µm



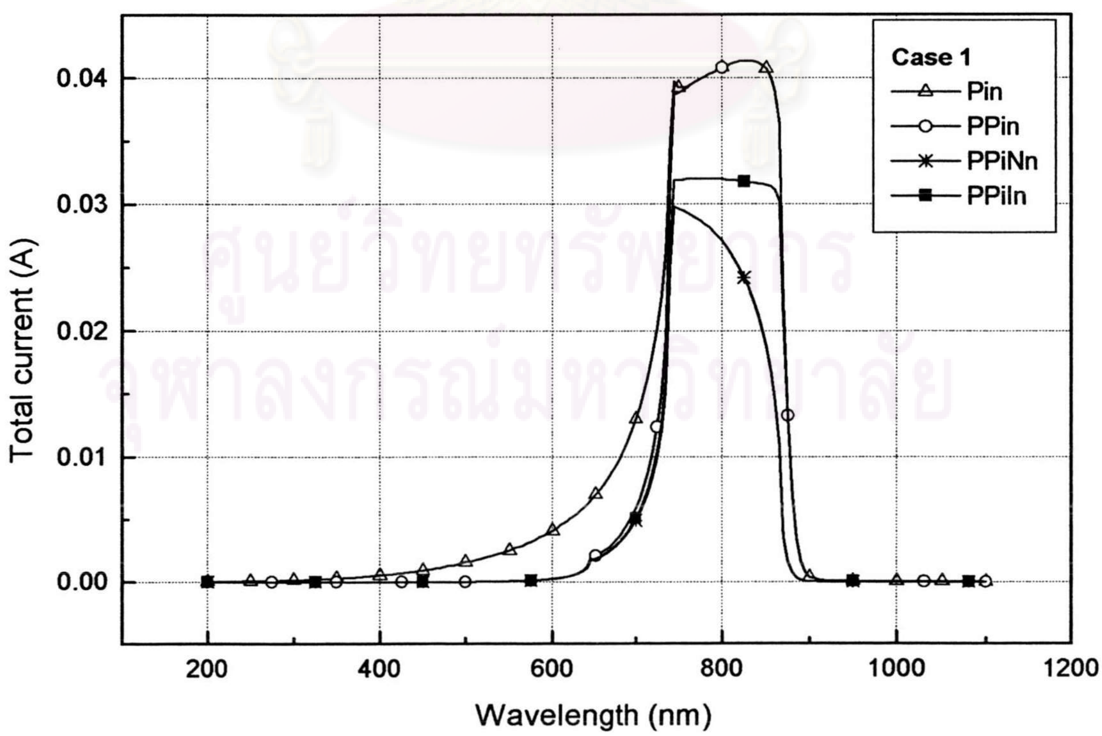
รูปที่ 3.49 เปรียบเทียบกระแสแพร่ซึมจากชั้นหน้าต่างบน ของโครงสร้างในกรณีที่ 1



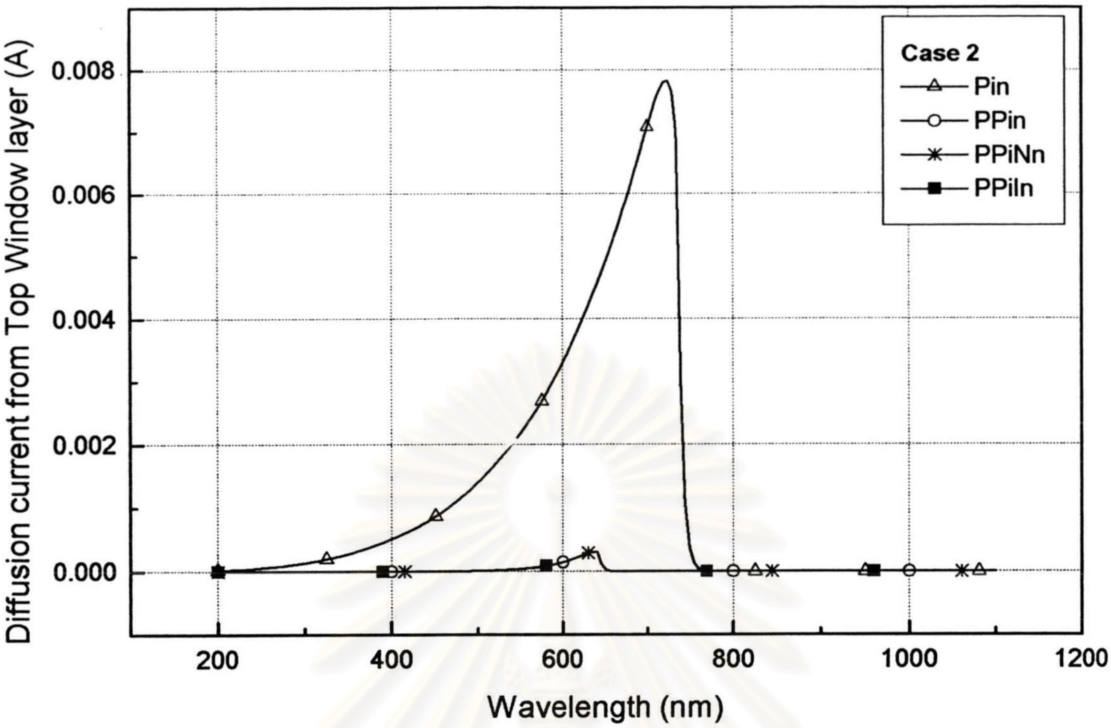
รูปที่ 3.50 เปรียบเทียบกระแสแพร่ซึมซึ่งเกิดในย่านความยาวคลื่นยาว ของโครงสร้างในกรณีที่ 1



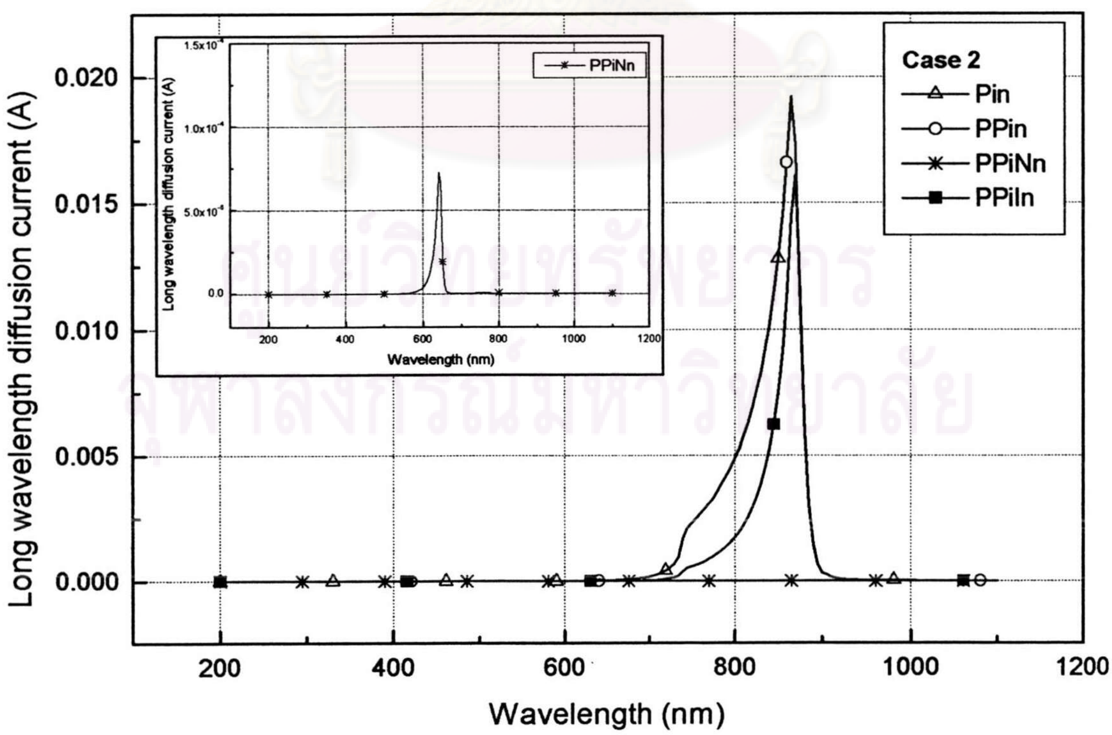
รูปที่ 3.51 เปรียบเทียบกระแสพัดพาในชั้นทำงาน ของโครงสร้างในกรณีที่ 1



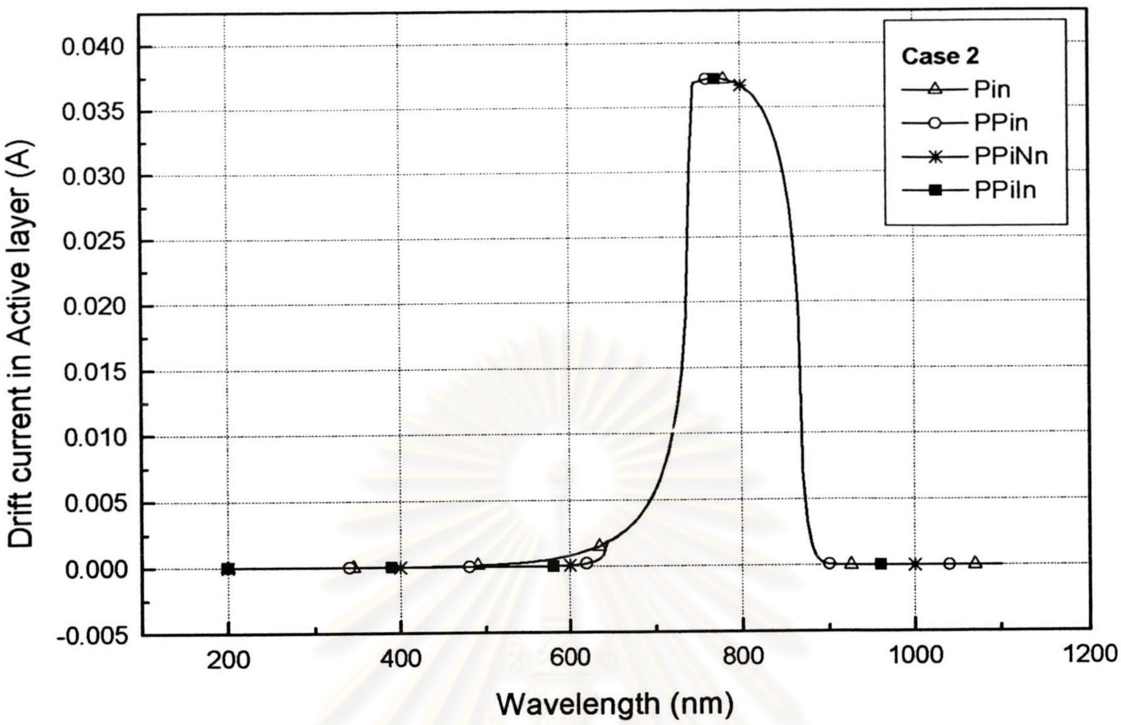
รูปที่ 3.52 เปรียบเทียบกระแสสุทธิ ของโครงสร้างในกรณีที่ 1



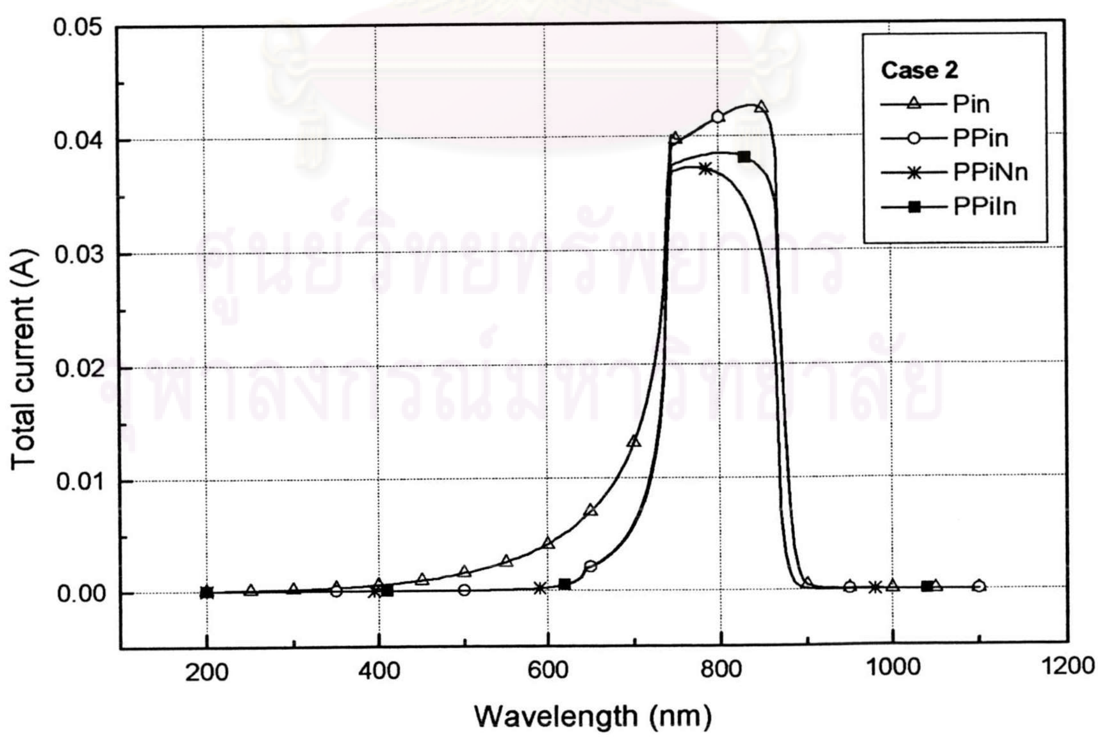
รูปที่ 3.53 เปรียบเทียบกระแสแพร่ซึมจากชั้นหน้าต่างบน ของโครงสร้างในกรณีที่ 2



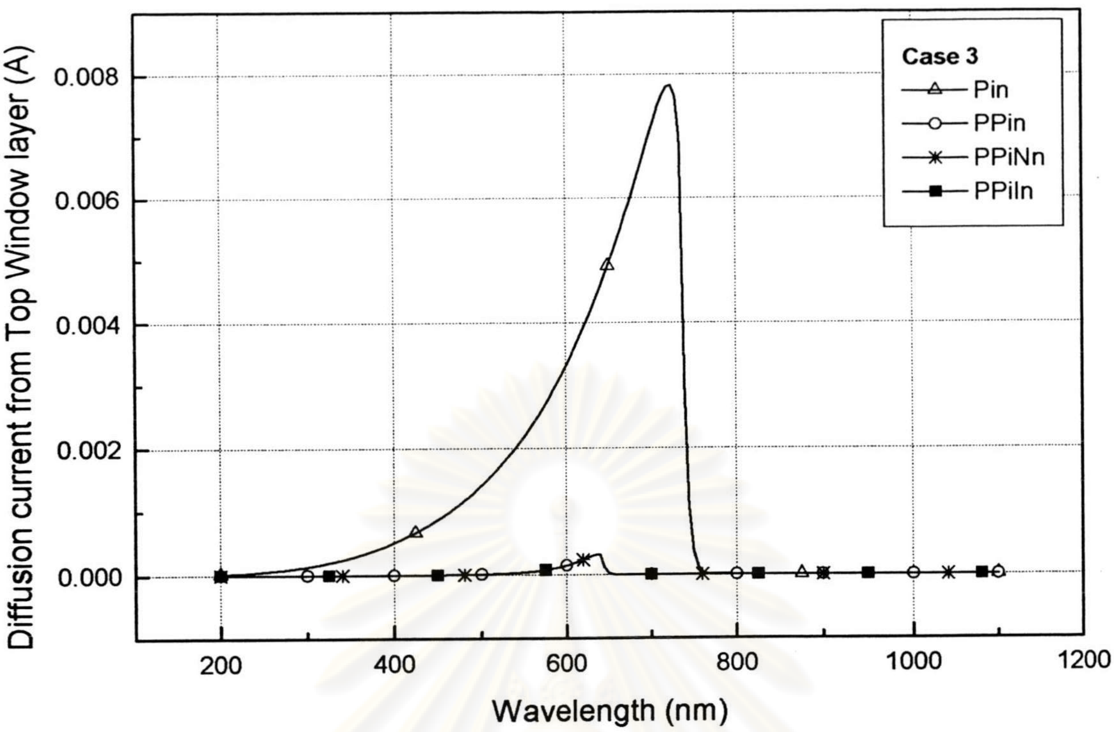
รูปที่ 3.54 เปรียบเทียบกระแสแพร่ซึมซึ่งเกิดในย่านความยาวคลื่นยาว ของโครงสร้างในกรณีที่ 2



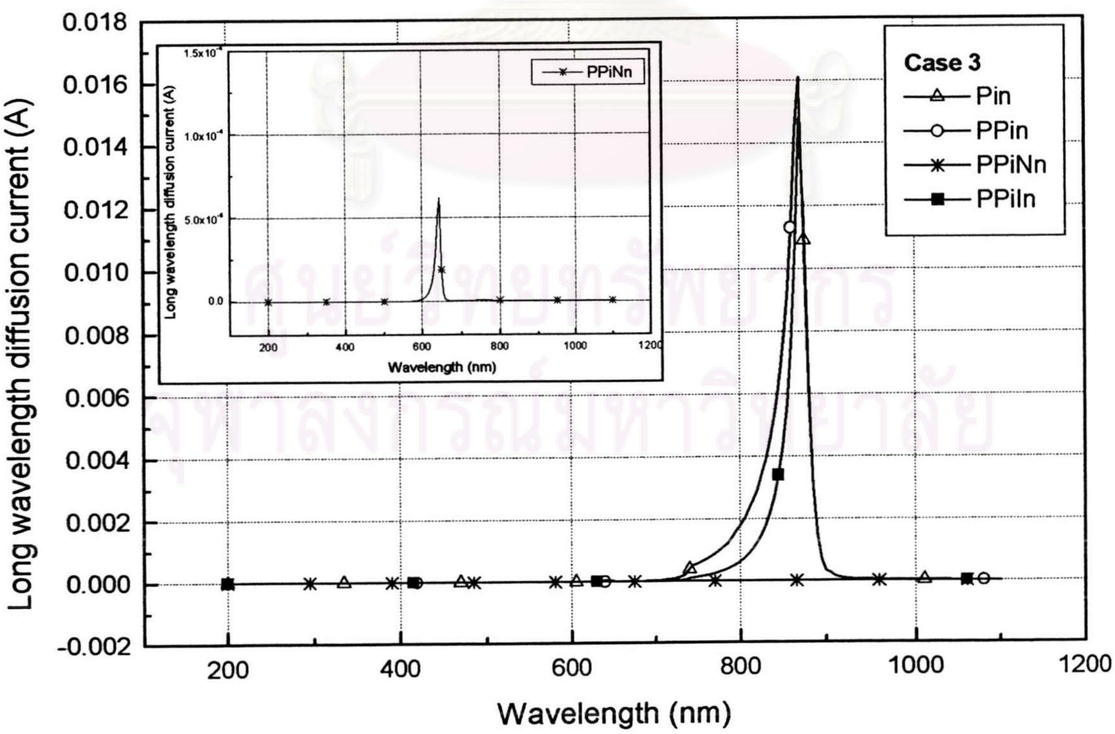
รูปที่ 3.55 เปรียบเทียบกระแสพัดพาในชั้นทำงาน ของโครงสร้างในกรณีที่ 2



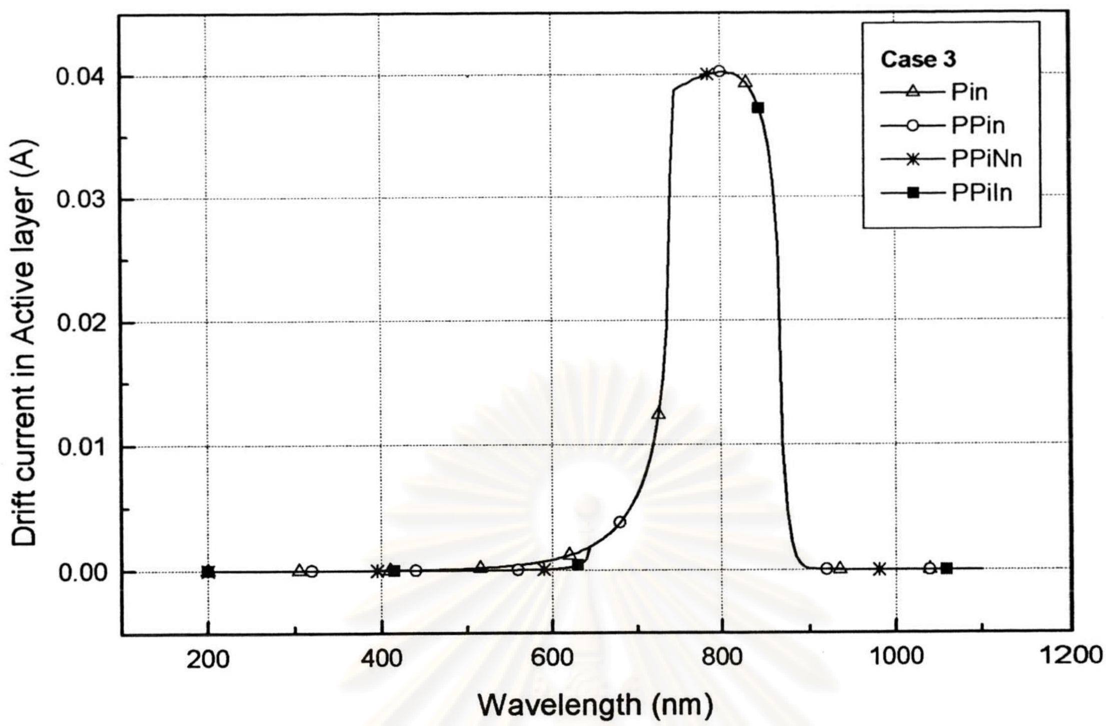
รูปที่ 3.56 เปรียบเทียบกระแสสุทธิ ของโครงสร้างในกรณีที่ 2



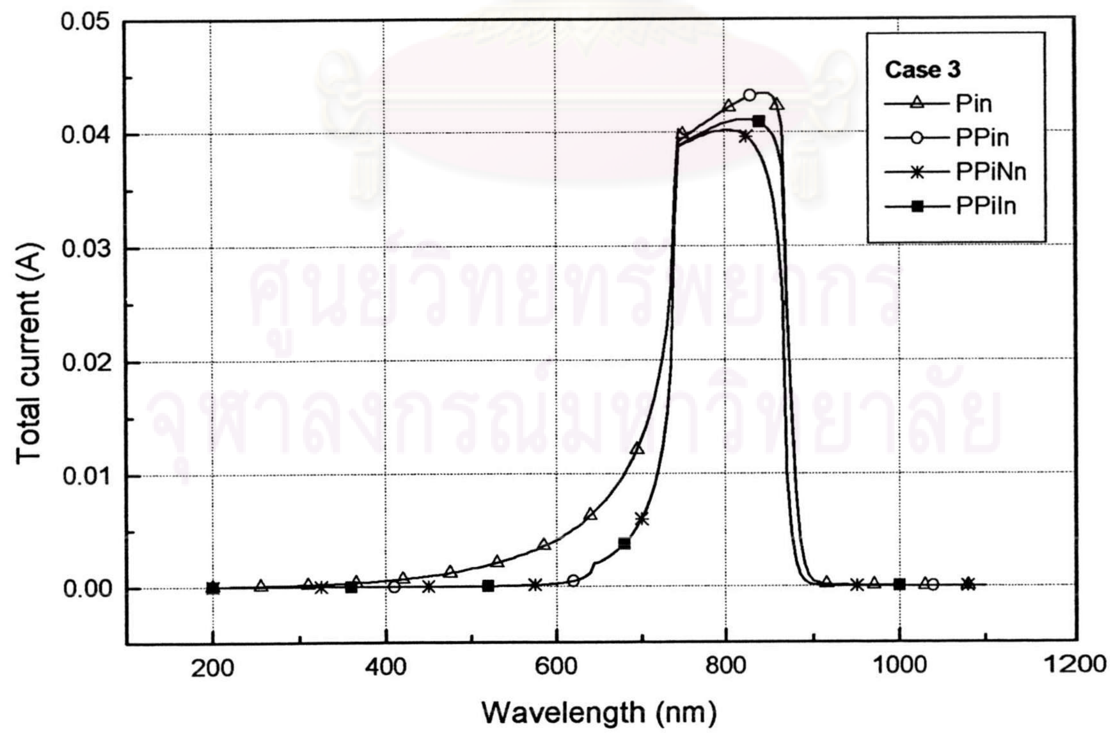
รูปที่ 3.57 เปรียบเทียบกระแสแพร่ซึมจากชั้นหน้าต่างบน ของโครงสร้างในกรณีที่ 3



รูปที่ 3.58 เปรียบเทียบกระแสแพร่ซึมซึ่งเกิดในย่านความยาวคลื่นยาว ของโครงสร้างในกรณีที่ 3



รูปที่ 3.59 เปรียบเทียบกระแสพัดพาในชั้นทำงาน ของโครงสร้างในกรณีที่ 3



รูปที่ 3.60 เปรียบเทียบกระแสสุทธิ ของโครงสร้างในกรณีที่ 3

จากการเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างทั้ง 4 คือ Pin, PPin, PPiNn และ PPiIn Photodiode ที่มีความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำสอดคล้องกันเป็นดังกรณีที่ 1-3 ตามตารางที่ 3.9-3.11 ตามลำดับ โดยพิจารณาแยกแต่ละพจน์กระแส สามารถสรุปแนวโน้มโดยรวมของผลการออกแบบโครงสร้างโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดได้ดังนี้

กรณีกระแสแพร่ซึมจากชั้นรับแสงด้านบน โครงสร้างที่มีชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้นอาทิ PPin, PPiNn และ PPiIn Photodiode จะสามารถขจัดกระแสแพร่ซึมจากชั้นรับแสงได้ ดังผลการคำนวณในรูปที่ 3.49, 3.53 และ 3.57 เนื่องจากชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้นมีช่องว่างแถบพลังงานสูงกว่าชั้นหน้าต่างหลัก จึงมีกำแพงพลังงานที่สามารถปิดกั้นการแพร่ซึมของพาหะส่วนที่เกิดในชั้นหน้าต่างหลักได้ นอกจากนี้จากการคำนวณอัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลพบว่าแทบจะไม่มีพาหะไฟฟ้าเกิดขึ้นเลยในชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้น จึงไม่มีพาหะจากชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้นดังกล่าวแพร่ซึมไปยังย่านทำงานได้

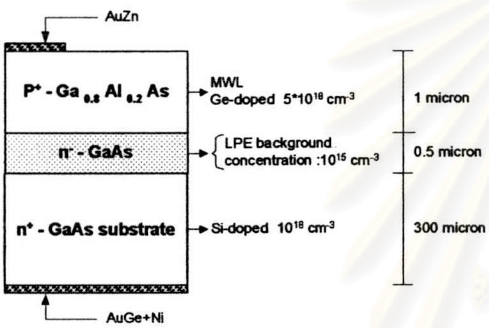
กรณีกระแสแพร่ซึมจากแผ่นฐานหรือชั้นหน้าต่างแสงคลื่นยาวใกล้แผ่นฐาน พบว่าโครงสร้าง PPiNn Photodiode จะมีกระแสส่วนนี้น้อยที่สุด เนื่องจากสนามไฟฟ้าของชั้นทำงานอยู่ห่างจากแผ่นฐานเป็นระยะเท่ากับความหนาของชั้นหน้าต่างใกล้แผ่นฐาน N^+ -$Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ และในชั้นหน้าต่างใกล้แผ่นฐานก็มีอัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลต่ำมากๆจนถือได้ว่าไม่มีพาหะจากชั้นหน้าต่างนี้แพร่ซึมไปยังชั้นทำงาน สำหรับโครงสร้าง PPiIn Photodiode จะมีกระแสแพร่ซึมจากแผ่นฐานน้อยกว่าใน Pin และ PPin Photodiode อยู่เพียงเล็กน้อยเนื่องจากการเพิ่มชั้น N^- - $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ ทำให้ชั้นทำงานเข้ามาประชิดแผ่นฐานจึงป้องกันกระแสแพร่ซึมส่วนนี้ไม่ได้ ถึงแม้ว่าการมีชั้นทำงานที่หนามากขึ้นจะช่วยให้ค่าความจุไฟฟ้ามีค่าน้อยลง ดังนั้นโครงสร้าง PPiIn Photodiode จะไม่ช่วยปรับปรุงความเร็วในการตอบสนองของโฟโตไดโอดในแง่การขจัดกระแสแพร่ซึมที่เกิดในย่านความยาวคลื่นยาว อีกทั้งยังทำให้เวลาการพัดพาพาหะข้ามหัวต่อมีค่ามากขึ้นด้วย

กรณีกระแสพัดพาและกระแสสุทธิ จะเห็นว่าเนื่องจากโครงสร้าง PPiNn Photodiode สามารถช่วยขจัดกระแสแพร่ซึมทั้งที่เกิดในย่านความยาวคลื่นสั้นและความยาวคลื่นยาวได้ดีที่สุด กระแสพัดพาและกระแสสุทธิของ PPiNn Photodiode จึงมีขนาดไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนดังกรณีที่ 1 ในรูปที่ 3.51 และ 3.52

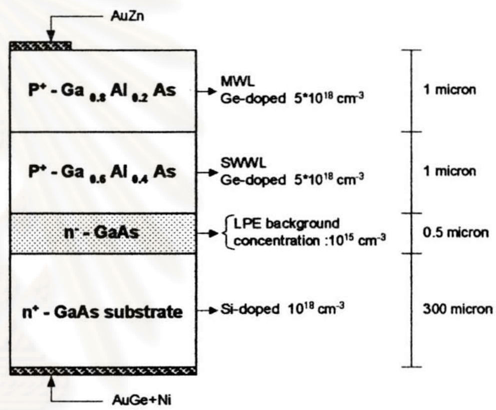
โดยสรุปแล้วโครงสร้าง PPiNn Photodiode เป็นโครงสร้างที่ดีที่สุดในแง่ช่วยปรับปรุงความเร็วในการตอบสนองของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิด ด้วยการขจัดกระแสแพร่ซึมที่ขอบทั้งสองด้านของชั้นทำงาน อันเป็นที่มาของผลตอบสนองทางแสงที่ขอบด้านความยาวคลื่นสั้นและความยาวคลื่นยาว

3.4.2 บทบาทของชั้นหน้าต่างหลัก

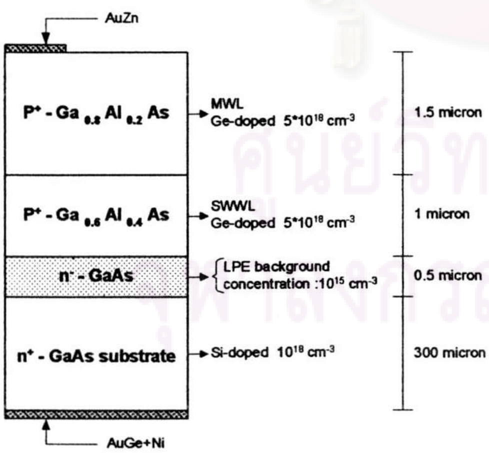
โดยอาศัยหลักการที่ว่าการเพิ่มความหนาให้กับชั้นหน้าต่างหลักให้พอเหมาะ จะช่วยขจัดผลตอบสนองทางแสงที่ขอบด้านความยาวคลื่นสั้นอันเกิดเพราะกระแสแพร่ซึมจากชั้นรับแสงได้มากขึ้นตามสมการที่ 3.1 ดังนั้นต่อไปนี้จะแสดงผลการคำนวณผลตอบสนองทางแสงเพื่อยืนยันแนวคิดดังกล่าวและจะนำแนวโน้มที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองต่อไป โดยออกแบบให้โครงสร้าง Pin Photodiode มีชั้นหน้าต่างหลัก (Main Window Layer) หนา 1 μm ชั้นทำงานหนา 0.5 μm เปรียบเทียบกับโครงสร้าง PPin Photodiode ที่มีชั้นหน้าต่างหลักหนา 1, 1.5 และ 2 μm ตามลำดับ และให้ชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้นหนาคงที่ที่ 1 μm ชั้นทำงานหนาคงที่ที่ 0.5 μm โครงสร้างที่ออกแบบและทำการเปรียบเทียบจึงเป็นไปตามรูปที่ 3.61



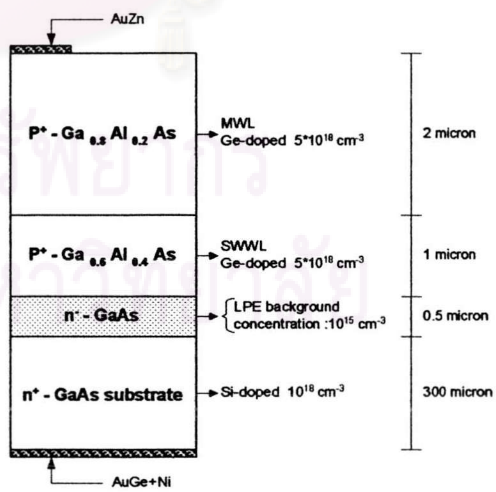
(ก)



(ข)

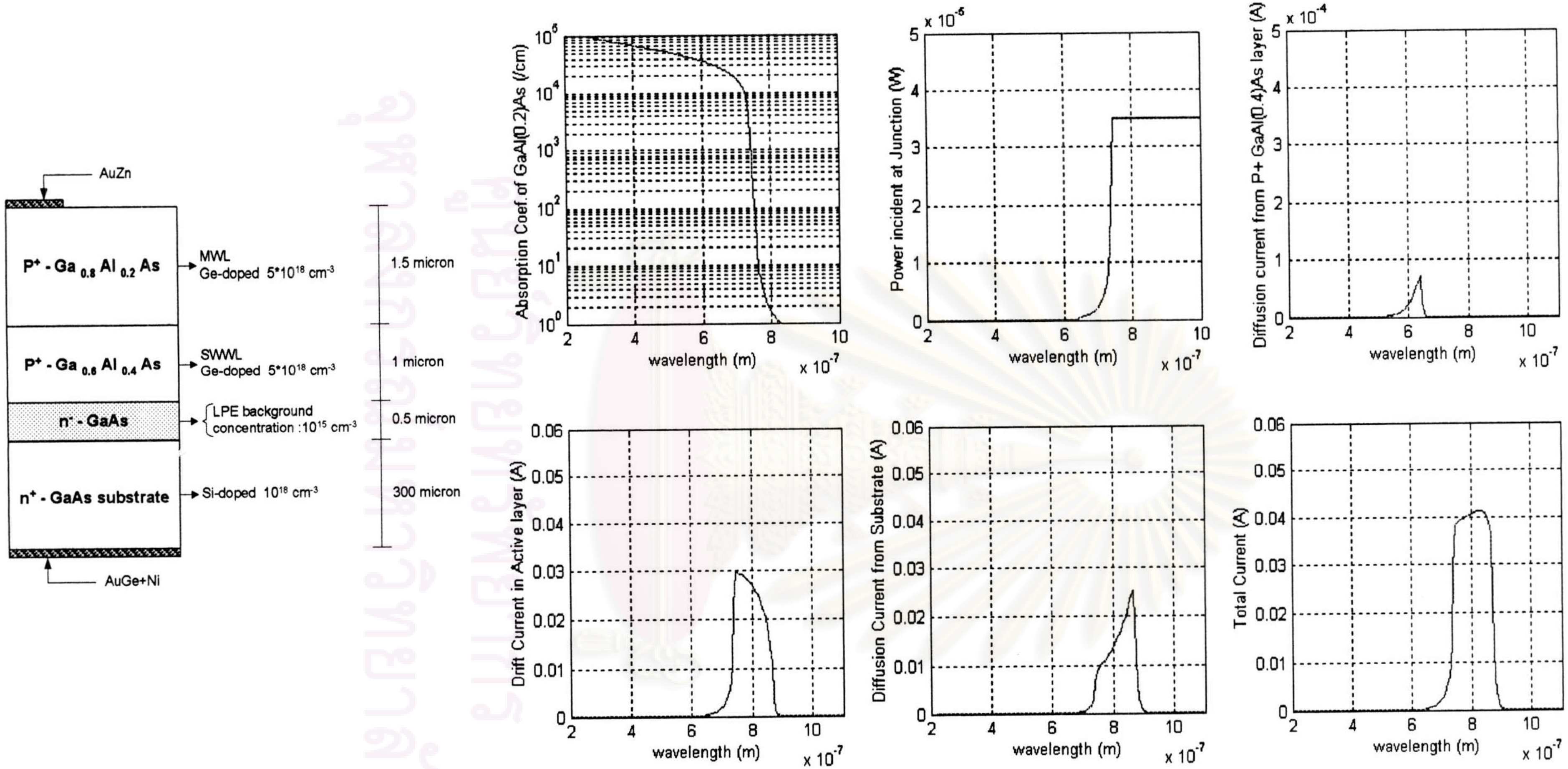


(ค)

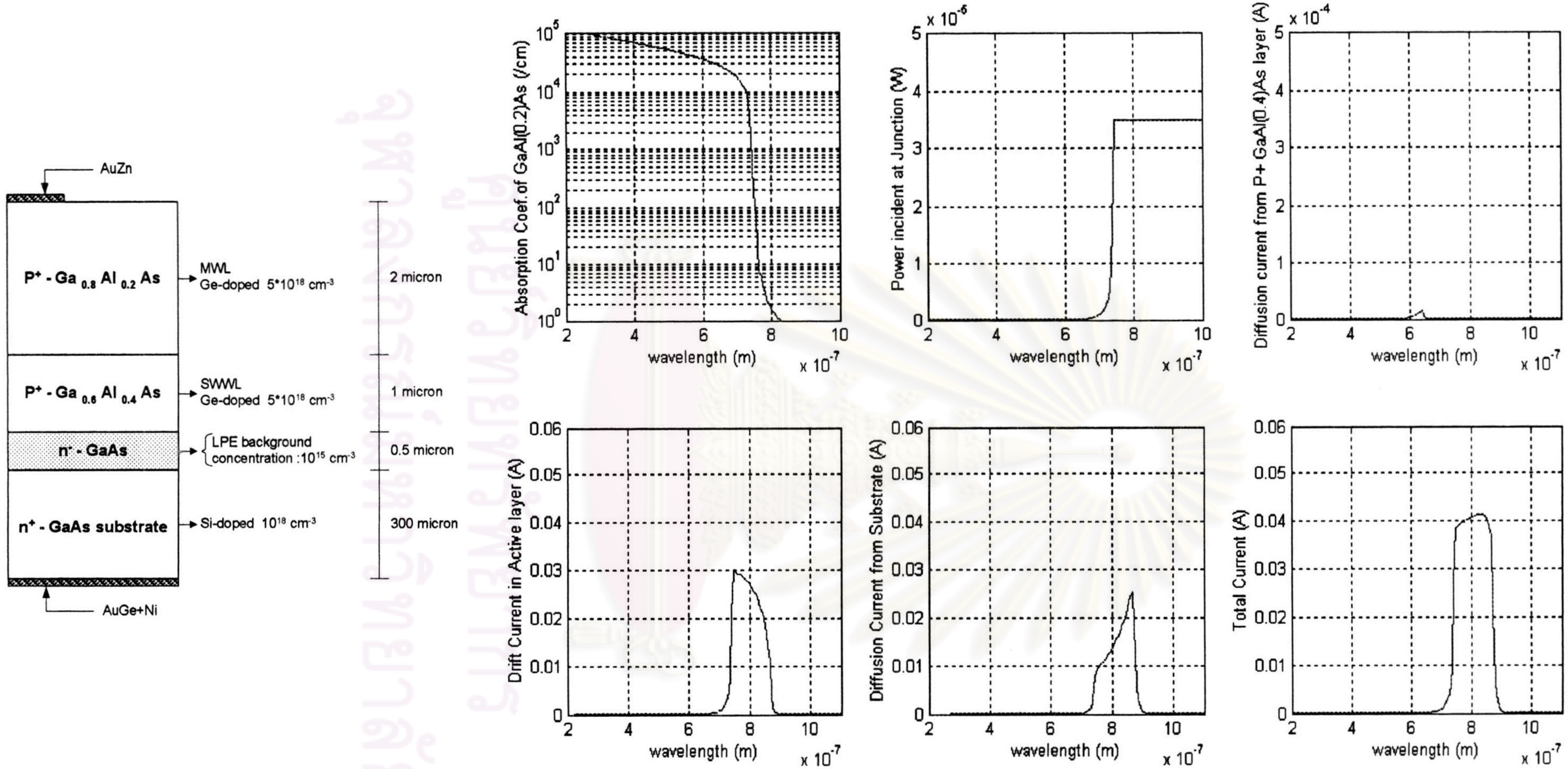


(ง)

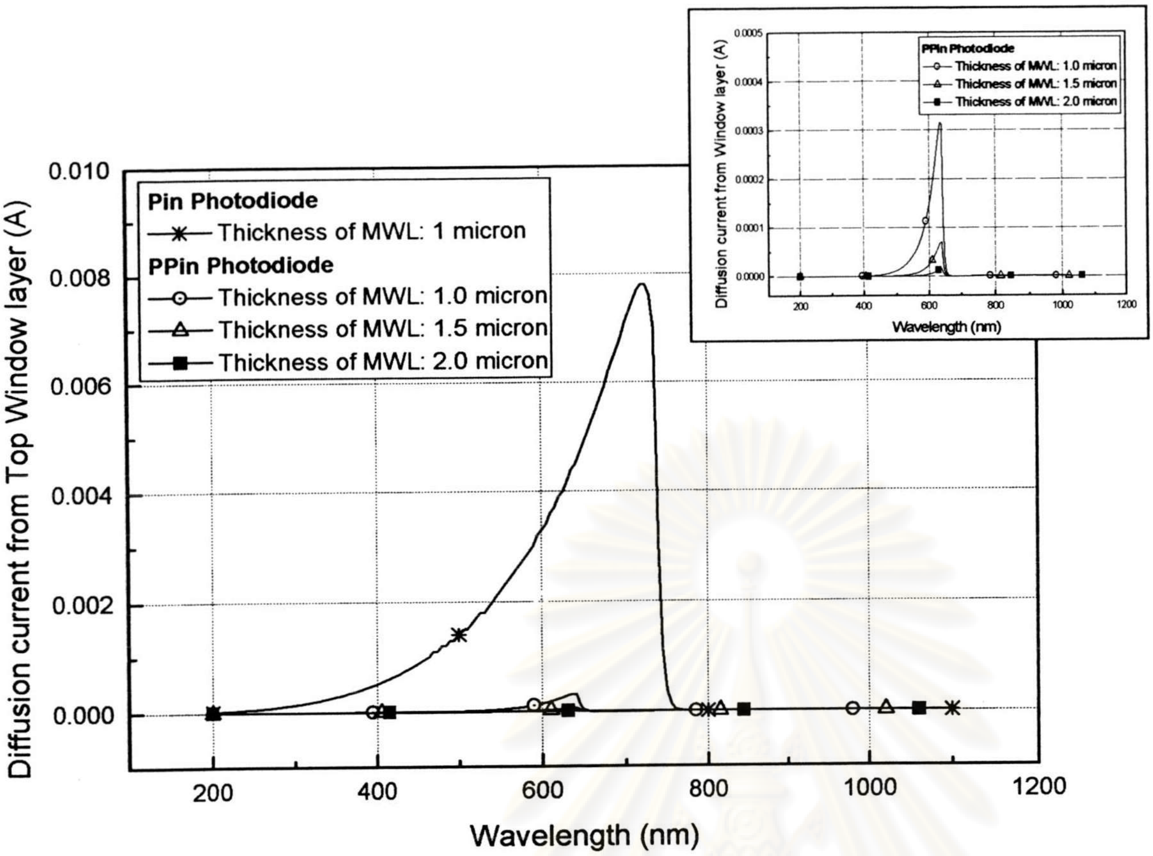
รูปที่ 3.61 โครงสร้างที่นำมาเปรียบเทียบเพื่อศึกษาผลของการเพิ่มความหนาให้กับชั้นหน้าต่างหลักให้พอเหมาะ ที่มีต่อการช่วยขจัดกระแสแพร่ซึมจากชั้นรับแสงบน



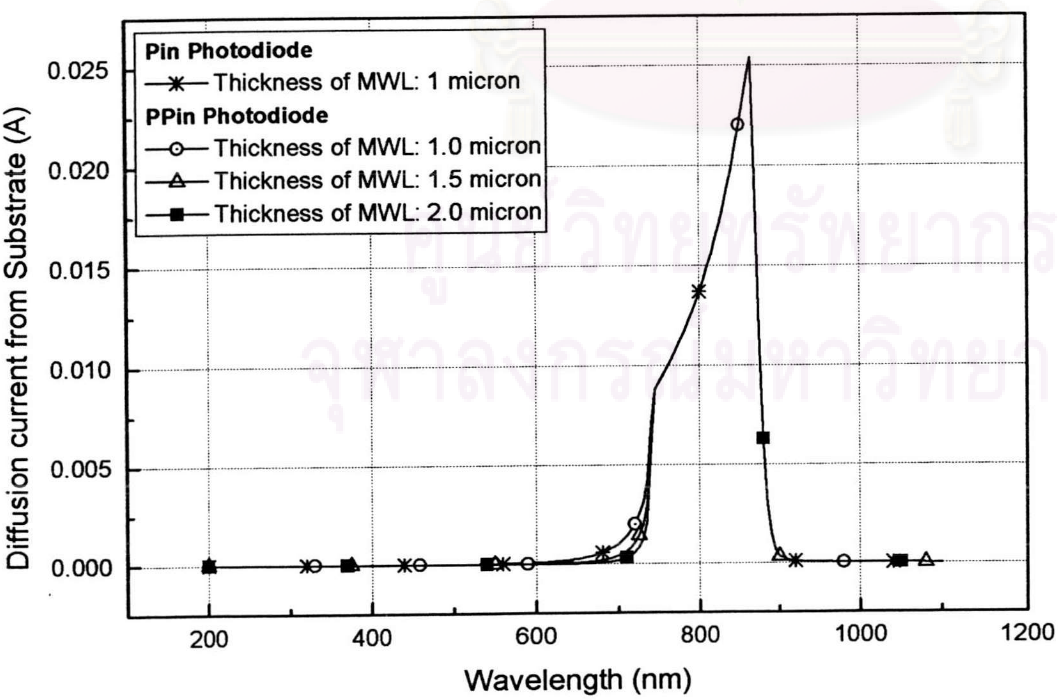
รูปที่ 3.62 ผลตอบสนองทางแสงของโครงสร้าง PPin Photodiode เมื่อชั้นหน้าต่างหลักหนา 1.5 μm



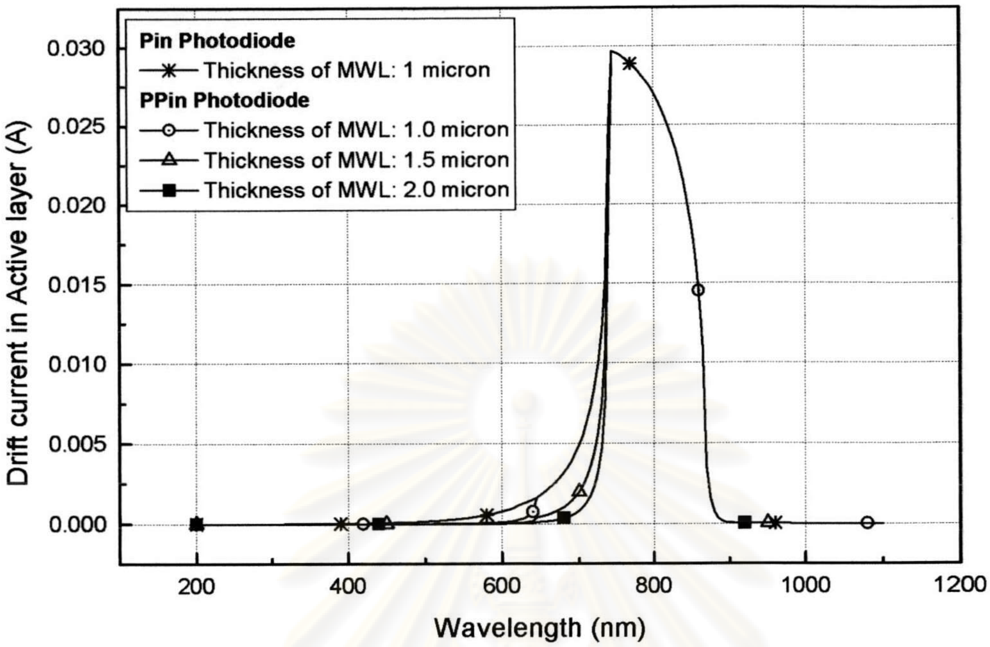
รูปที่ 3.63 ผลตอบสนองทางแสงของโครงสร้าง PPin Photodiode เมื่อชั้นหน้าต่างหลักหนา 2 μm



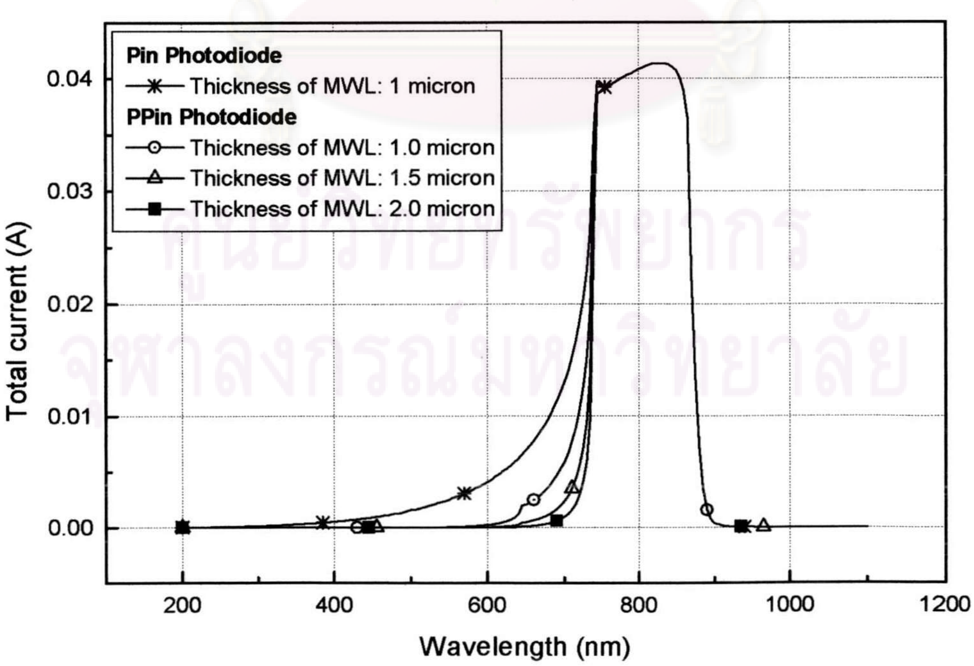
รูปที่ 3.64 เปรียบเทียบกระแสแพร่ซึมจากชั้นหน้าต่างบนระหว่างโครงสร้างตามรูปที่ 3.61



รูปที่ 3.65 เปรียบเทียบกระแสแพร่ซึมจากแผ่นฐานระหว่างโครงสร้างตามรูปที่ 3.61



รูปที่ 3.66 เปรียบเทียบกระแสพัดพาในชั้นทำงานระหว่างโครงสร้างตามรูปที่ 3.61



รูปที่ 3.67 เปรียบเทียบกระแสสุทธิระหว่างโครงสร้างตามรูปที่ 3.61

ผลตอบสนองทางแสงของโครงสร้างในรูปที่ 3.61 (ก) และ (ข) ได้แสดงไว้แล้วในรูปที่ 3.21 และ 3.28 ตามลำดับ ส่วนผลตอบสนองทางแสงของโครงสร้างในรูปที่ 3.61 (ค) และ (ง) เป็นไปตามรูปที่ 3.62 และ 3.63 ตามลำดับ โดยการเปรียบเทียบผลการคำนวณผลตอบสนองทางแสงแยกแต่ละพจน์กระแส อันได้แก่ กระแสแพร่ซึมจากชั้นรับแสงด้านบน กระแสแพร่ซึมจากแผ่นฐาน กระแสพัดพาในชั้นทำงาน และกระแสสุทธิ เป็นดังรูปที่ 3.64-3.67 ตามลำดับ

จากการเปรียบเทียบผลการคำนวณกระแสแพร่ซึมจากชั้นรับแสงและกระแสสุทธิระหว่างโครงสร้างที่ไม่มีชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้น (Pin Photodiode) และโครงสร้างที่มี (PPin Photodiode) โดยที่ปรับเพิ่มความหนาของชั้นหน้าต่างหลักเป็น 1, 1.5 และ 2 μm ตามลำดับ พบว่าจะสามารถขจัดผลตอบสนองทางแสงที่ขอบด้านความยาวคลื่นสั้นของโฟโตไดโอดได้ด้วยการสร้าง Double window layer และจะเห็นได้ว่าโครงสร้าง PPin Photodiode ที่มีชั้นหน้าต่างหลักหนามากขึ้นจะช่วยขจัดกระแสแพร่ซึมจากชั้นรับแสงได้ดีขึ้นด้วย ทำให้โฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดมีผลตอบสนองทางแสงที่ขอบด้านความยาวคลื่นสั้นน้อยที่สุด ซึ่งจะแสดงผลการทดลองอันสอดคล้องกับแนวโน้มที่ได้จากผลการคำนวณดังกล่าวในบทที่ 5