



การแทรกโครงสร้างควอนตัมเวลล์ในชั้นพี
เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็น
Use of Quantum Well Embedded in a P-Type Layer
to Enhance the Efficiency of PN-Junction Solar Cells

สมพร ชื่นเงิน^{1*} สุริยา ชิมวงศ์² นาท เสาวดี¹ และ ธนุสิทธิ์ บุรินทร์ประโคน¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของการแทรกโครงสร้างควอนตัมเวลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพีต่ออัตราการรวมกันกลับระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลโดยการคำนวณฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนด้วยระเบียบวิธี shooting method จากนั้นทำการคำนวณอัตราการรวมกันกลับระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลซึ่งแปรผันตรงกับค่าการซ้อนทับกันของฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนกับโฮลยกกำลังสอง ผลการคำนวณจะมุ่งเน้นถึงการวิเคราะห์ผลของความกว้าง ความลึกเชิงพลังงานศักย์และสัดส่วนปริมาตรของควอนตัมเวลล์ต่อปริมาตรทั้งหมดของชั้นสารต่ออัตราการรวมกันกลับระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล จากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างที่แทรกด้วยควอนตัมเวลล์แบบสมมาตรสามารถลดอัตราการรวมกันกลับระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ได้แทรกด้วยควอนตัมเวลล์ สำหรับกรณีโครงสร้างที่แทรกด้วยควอนตัมเวลล์ด้วยสัดส่วนปริมาตรของควอนตัมเวลล์ที่แทรกเข้าไปมีน้อยกว่า 5% เมื่อเทียบกับปริมาตรทั้งหมดของชั้นสารพบว่าโครงสร้างที่แทรกด้วยควอนตัมเวลล์ที่กว้าง และมีความลึกเชิงพลังงานศักย์มากกว่าจะสามารถลดอัตราการรวมกันกลับระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลได้ดีกว่า นอกจากนี้ผลการคำนวณยังแสดงให้เห็นด้วยว่าโครงสร้างที่แทรกด้วยควอนตัมเวลล์ที่มีความกว้าง ความลึกเชิงพลังงานศักย์ และด้วยสัดส่วนปริมาตรที่เหมาะสม สามารถลดอัตราการรวมกันกลับระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลได้สูงสุดถึง 65%

¹ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40002

² สาขาวิชาวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร 47000

*Corresponding Author, E-mail: sompo_kh@kku.ac.th

ABSTRACT

Effect of structural parameters such as well-width, potential energy depth and volume fraction of quantum wells embedded in a p-type semiconductor on the recombination rates of electron and hole has been investigated. Electron wave functions are obtained by the shooting method. The overlap integral of electron and hole is calculated. The recombination rate is proportional to the square of the overlap integral of electron and hole. The results show that the recombination rate in the structure of symmetric quantum wells embedded in a p-type semiconductor decreases significantly. For the structure which has the volume fraction less than 5%, the recombination rate decreases while the well width and the potential energy depth increase. In addition, the results state that the structure with appropriate structural parameters of the quantum wells can reduce the recombination rate up to 65%.

คำสำคัญ: เซลล์แสงอาทิตย์ ควอนตัมเวลล์ การผันพลังงาน อัตราการรวมกันกลับ อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

Keywords: Solar cells, Quantum wells, Energy conversion, Recombination rates, Semiconductor devices

1. บทนำ

จากปัญหาความต้องการพลังงานที่เพิ่มสูงขึ้น (EIA, 2013) ประกอบกับปัญหาด้านมลภาวะจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล (fossil fuels) ทำให้เกิดความต้องการแหล่งพลังงานทดแทนที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานทางเลือกหนึ่งที่สำคัญ และแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานสะอาดที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้โดยอาศัยเซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) เซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นที่รู้จักกันมานานคือเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็น (pn-junction solar cell) ซึ่งมีการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็นเดี่ยว (single junction) สามารถให้ประสิทธิภาพสูงถึง 29 % (Green et al., 2014) ในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์แบบหลายรอยต่อ (multi-junction solar cell) (Yamaguchi et al., 2005) สามารถให้ประสิทธิภาพได้ถึง 44.4 % (Sharp corporation, 2013) สิ่งหนึ่งที่เป็นข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์คือการรวมกันกลับ (recombination) ของพาหะนำไฟฟ้าซึ่งก็คืออิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดจากการดูดกลืนแสง (Shockley and Queisser, 1961) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการรวมกันกลับระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลที่เกิดขึ้นในชั้นพีและชั้นเอ็นของเซลล์แสงอาทิตย์ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นจากกระบวนการดูดกลืนแสงในชั้นพีหรือชั้นเอ็นส่วนใหญ่จะอยู่ไกลจากรอยต่อพีเอ็น ดังนั้นโอกาสที่จะแพร่ไปถึงรอยต่อพีเอ็นและข้ามรอยต่อได้จึงมีน้อย ทำให้โอกาสการรวมกันกลับสูงกว่าอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดในบริเวณใกล้รอยต่อพีเอ็น การแทรกควอนตัมเวลล์ (quantum wells) ในชั้นพีของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแนวทางหนึ่งที่มีความเป็นไปได้ในการที่จะลดอัตราการรวมกันกลับระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล โดยควอนตัมเวลล์ที่แทรกเข้าไปนี้จะทำหน้าที่เป็นเส้นทางพิเศษสำหรับกักอิเล็กตรอนบางส่วนที่เกิดจากกระบวนการดูดกลืนแสงในขณะที่อิเล็กตรอนเหล่านี้กำลังถูก

เคลื่อนย้ายไปยังบริเวณรอยต่อพีเอ็น และมีผลทำให้สามารถลดโอกาสการกลับมารวมกันกลับระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลได้ ดังนั้นการแทรกควอนตัมเวลล์ในชั้นพีน่าจะมีผลทำให้อิเล็กตรอนมีโอกาสแพร่ไปถึงรอยต่อพีเอ็นได้สูงกว่าการแพร่ไปเนื้อวัสดุตามปกติ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการแทรกโครงสร้างควอนตัมเวลล์ในชั้นพีของเซลล์แสงอาทิตย์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็นโดยการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์ และมุ่งเน้นศึกษาผลของตัวแปรเชิงโครงสร้างของควอนตัมเวลล์ ได้แก่ ความกว้าง ความลึกเชิงพลังงานศักย์ และสัดส่วนโดยปริมาตรของควอนตัมเวลล์ที่แทรกเข้าไปในชั้นพีของเซลล์แสงอาทิตย์

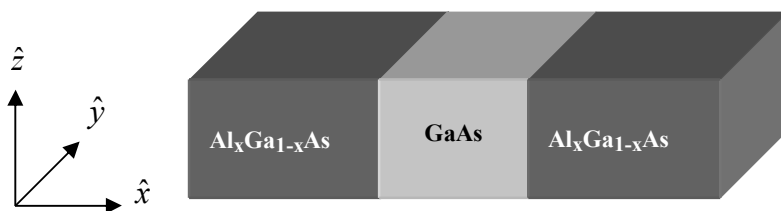
2. วิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 แบบจำลองของควอนตัมเวลล์ในชั้นพีของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็น

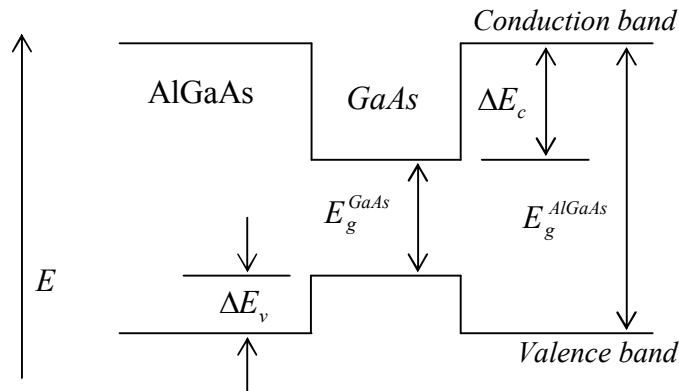
สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor) ที่ใช้ในศึกษาครั้งนี้คือ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งที่ยอมรับใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็นเนื่องจาก $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ มีช่องว่างพลังงานแบบตรง (direct band gap) เมื่อค่าสัดส่วนโมลของ Al น้อยกว่า 0.45 ($x < 0.45$) ค่าช่องว่างพลังงานของ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ จะขึ้นกับค่าสัดส่วนโมลของ Al โดยค่าช่องว่างพลังงานของ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ (eV) สามารถประมาณได้จากสมการ (1) (Basu, 1997)

$$E_g = 1.424 + 1.247x \quad (1)$$

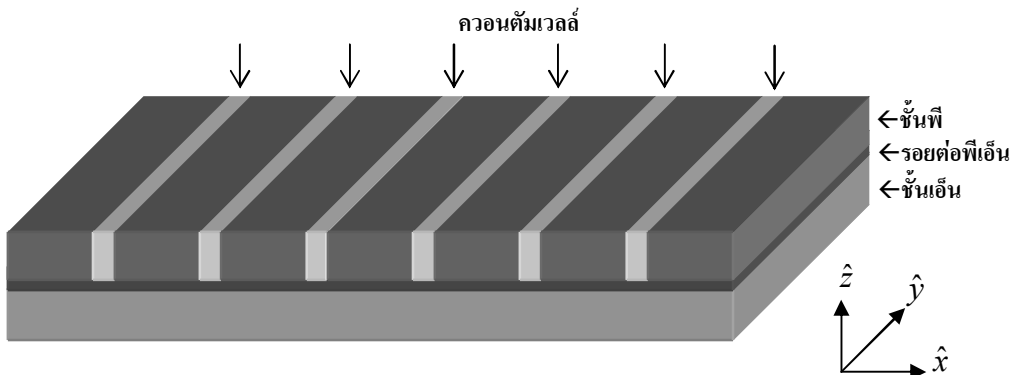
เมื่อแทรกชั้นของ GaAs เข้าไปใน $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ดังรูปที่ 1(ก) จะเกิดโครงสร้างของบ่อศักย์ขึ้นที่บริเวณของ GaAs เนื่องจาก GaAs มีช่องว่างพลังงาน E_g^{GaAs} น้อยกว่าช่องว่างพลังงาน E_g^{AlGaAs} ของ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ที่ประกอบอยู่ทั้งสองด้าน จากนั้นเมื่อทั้งสามส่วนนี้ประกบติดกันแถบการนำ (conduction band) ของ GaAs จะต่ำกว่าของ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ จึงทำให้เกิดเป็นควอนตัมเวลล์สำหรับอิเล็กตรอนซึ่งมีความลึกเชิงพลังงานศักย์ ΔE_C ในแถบการนำของ GaAs ดังรูปที่ 1(ข) ในทำนองเดียวกันแถบวาเลนซ์ (valence band) ของ GaAs จะสูงกว่าแถบวาเลนซ์ของ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ที่ประกอบอยู่จึงมีลักษณะเป็นควอนตัมเวลล์ที่มีความลึกเชิงพลังงานศักย์ ΔE_V สำหรับโฮลในแถบวาเลนซ์ของ GaAs อย่างไรก็ตามในที่นี้จะไม่กล่าวถึงวิธีการสังเคราะห์วัสดุเพื่อให้ได้โครงสร้างดังกล่าวซึ่งอยู่นอกเหนือขอบเขตของงานวิจัยนี้ ส่วนความหนาของชั้น GaAs จะอยู่ในระดับนาโนเมตรซึ่งเป็นความหนาที่เหมาะสมต่อการออกแบบโครงสร้างเพื่อควบคุมจำนวนสถานะในการกักอิเล็กตรอนหรือโฮลได้ สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็นชนิดรอยต่อเดียวที่มีการแทรกควอนตัมเวลล์หลายอันในชั้นพีมีลักษณะดังที่แสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 (ก) โครงสร้างควอนตัมเวลล์ของระบบวัสดุ GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$



รูปที่ 1 (ต่อ) (ข) โครงสร้างแถบพลังงานของควอนตัมเวลล์ของระบบวัสดุ GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

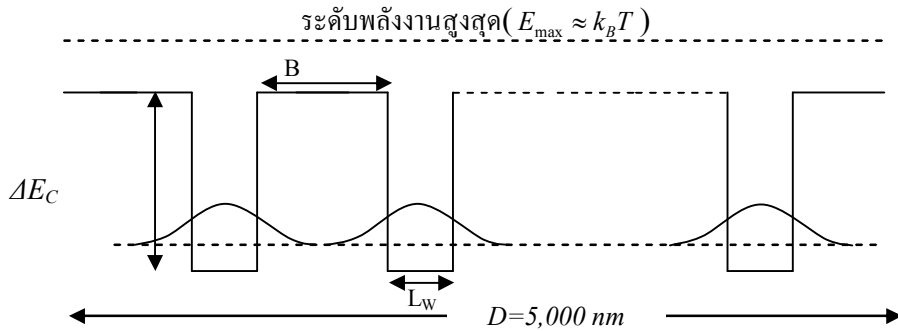


รูปที่ 2 การแทรกควอนตัมเวลล์ในชั้นพีของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็นชนิดรอยต่อเดี่ยว

2.2 ตัวแปรควบคุมในการจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาเฉพาะผลของการกักอิเล็กตรอนในควอนตัมเวลล์ในชั้นพี โดยถือว่าโฮลในชั้นพีไม่โดนกักและมีอิสระในการเคลื่อนที่ (นั่นคือ $\Delta E_v \approx 0$ eV) ระบบที่ใช้ในการศึกษาเป็นระบบควอนตัมเวลล์ที่ฝังใน $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ซึ่งมีความยาวตามแกนที่ตั้งฉากกับระนาบของควอนตัมเวลล์ (ตามแกน x ในรูปที่ 2) เป็น $D = 5000$ nm จำนวนของควอนตัมเวลล์ (n_w) ที่ฝังอยู่ใน $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ จะขึ้นกับความกว้างของควอนตัมเวลล์ (L_w) และระยะห่างระหว่างควอนตัมเวลล์ (B) ดังรูปที่ 3 นั่นคือ $n_w = D/(L_w + B)$ ในการศึกษานี้จะเปลี่ยนความกว้างของควอนตัมเวลล์สามค่าคือ 20 35 และ 50 Å และความลึกเชิงพลังงานศักย์ ΔE_c สามค่าคือ 300 450 และ 600 meV โดยถือว่าควอนตัมเวลล์ทุกอันมีความสมมาตรแบบสี่เหลี่ยม (symmetric square wells) ทั้งนี้เพื่อให้มีสถานะพลังงานในแต่ละควอนตัมเวลล์มีเพียงสถานะเดียว นอกจากนี้ระยะห่างระหว่างควอนตัมเวลล์ในที่นี่จะใช้ $B = 130$ Å เนื่องจากควอนตัมเวลล์ที่อยู่ใกล้กันจะมีผลต่อกันและทำให้เกิดการแยกของสถานะพลังงานในแต่ละควอนตัมเวลล์ จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าระยะห่างนี้ทำให้เกิดการแยกของระดับพลังงานสถานะพื้นน้อยกว่า 1 meV ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าพลังงานสถานะพื้น ดังนั้นจึงอาจถือได้ว่าแต่ละควอนตัมเวลล์ไม่ผลต่อกัน นอกจากนี้ในที่นี่จะถือว่าเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่อุณหภูมิ 300 K และจากฟังก์ชันการกระจายของเฟอร์มี-ดิแรก

(Fermi-Dirac distribution) ระดับพลังงานสูงสุด $E_{\max}$ (ดูรูปที่ 3) ของอิเล็กตรอนที่อุณหภูมิ 300 K จะสูงกว่าแถบการนำของ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ประมาณ 26 meV



รูปที่ 3 โครงสร้างแถบการนำในชั้นพีของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็นที่แทรกด้วยควอนตัมเวลล์

2.3 การคำนวณอัตราการรวมกันกลับ

ระบบที่แทรกด้วยควอนตัมเวลล์จำนวน n_w ควอนตัมเวลล์อิเล็กตรอนส่วนหนึ่งที่อยู่บนแถบการนำจะถูกกักในควอนตัมเวลล์และส่วนที่เหลือจะยังอยู่บนแถบการนำในสมดุลความร้อนที่ 300 K กำหนดให้จำนวนอิเล็กตรอนที่ถูกกักใน 1 ควอนตัมเวลล์คือ N^{2D} ดังนั้นจำนวนอิเล็กตรอนทั้งหมดที่ถูกกักใน n_w ควอนตัมเวลล์คือ $n_w N^{2D}$ และให้จำนวนอิเล็กตรอนทั้งหมดที่เหลืออยู่บนแถบการนำเป็น N^{3D} จะได้ว่าสัดส่วนของอิเล็กตรอนที่ถูกกักในควอนตัมเวลล์ n^{bound} และที่อยู่บนแถบการนำเป็น n^{free} ดังสมการ (2) และสมการ (3) ตามลำดับ

$$n^{bound} = \frac{n_w N^{2D}}{n_w N^{2D} + N^{3D}} \quad (2)$$

$$n^{free} = 1 - \frac{n_w N^{2D}}{n_w N^{2D} + N^{3D}} \quad (3)$$

โดยที่ $n^{bound} + n^{free} = 1$ จำนวนอิเล็กตรอน N^{2D} และ N^{3D} หาได้จากสมการ (4) และสมการ (5) ตามลำดับดังนี้

$$N^{2D} = A \int_{E_0}^{E_{\max}} g^{2D}(E) f(E) dE \quad (4)$$

$$N^{3D} = V \int_{E_C}^{E_{\max}} g^{3D}(E) f(E) dE \quad (5)$$

ในที่นี้ A คือพื้นที่ของควอนตัมเวลล์ซึ่งจะหักล้างหายไปเมื่อแทนค่า N^{2D} และ N^{3D} ในสมการ (2) และสมการ (3) $V = AD$ คือปริมาตรของชั้นพีของเซลล์แสงอาทิตย์ $g^{2D}(E)$ คือความหนาแน่นสถานะของอิเล็กตรอนในสองมิติ $g^{3D}(E)$ คือความหนาแน่นสถานะของอิเล็กตรอนในสามมิติ $f(E)$ คือการกระจายของเฟอร์มี-ดิแรก E_0 คือระดับพลังงานสถานะพื้นในควอนตัมเวลล์และ E_C คือค่าพลังงานขอบบนควอนตัมเวลล์ (ดูรูปที่ 3 ประกอบ)

เนื่องจากอัตราการรวมกันกลับของอิเล็กตรอนกับโฮล R_{e-h} จะแปรผันตรงกับกำลังสองของค่าการซ้อนทับกัน (overlap integral) ระหว่างฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอน ψ_e และฟังก์ชันคลื่นของโฮล ψ_h (Nardelli et al., 1997) ดังสมการ (6)

$$R_{e-h} \propto |M_{e-h}|^2 = \left| \int \psi_e \psi_h dx \right|^2 \quad (6)$$

เมื่อ M_{e-h} คือค่าการซ้อนทับกันของอิเล็กตรอนกับโฮลดังที่กล่าวมาแล้วในตอนต้นว่าสำหรับการศึกษานี้ถือว่าโฮลไม่ถูกกักและเคลื่อนที่ได้อิสระ ดังนั้นการซ้อนทับจึงมีได้สองกรณีคือ การซ้อนทับของอิเล็กตรอนอิสระ ($\psi_{e, free}$) ที่อยู่เหนือแถบการนำกับโฮล ($\psi_{h, free}$) และการซ้อนทับของอิเล็กตรอนที่ถูกกัก ($\psi_{e, bound}$) กับโฮล ($\psi_{h, free}$) ดังสมการ (7) และสมการ (8) ตามลำดับ

$$M_{e-h}^{free} = \int \psi_{h, free}^*(x) \psi_{e, free}(x) dx \quad (7)$$

$$M_{e-h}^{bound} = \int \psi_{h, free}^*(x) \psi_{e, bound}(x) dx \quad (8)$$

การคำนวณฟังก์ชันคลื่น $\psi_{e, bound}$ ของอิเล็กตรอนที่ถูกกักในควอนตัมเวลล์จะใช้วิธี shooting method (Harrison, 2001) ส่วนฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระจะใช้เป็นคลื่นระนาบเนื่องจากการศึกษานี้เป็นการศึกษาเชิงเปรียบเทียบของระบบที่แทรกด้วยความถี่ของควอนตัมเวลล์กับระบบที่ไม่ได้แทรกควอนตัมเวลล์ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงใช้ค่ากับกำลังสองของค่าการซ้อนทับกันแทนอัตราการรวมกันกลับของอิเล็กตรอนกับโฮลซึ่งจะทำให้ค่าอัตราการรวมกันกลับในที่นี้ไม่มีหน่วย (dimensionless) สำหรับระบบที่แทรกควอนตัมเวลล์จำนวน n_w ควอนตัมเวลล์จะได้อัตราการรวมกันกลับเป็น R_{QW} มีค่าเป็นดังนี้

$$R_{QW} = \left| n^{bound} M_{e-h}^{bound} + n^{free} M_{e-h}^{free} \right|^2 \quad (9)$$

ส่วนในระบบที่ไม่ได้แทรกควอนตัมเวลล์จะถือว่าอิเล็กตรอนกับโฮลเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังนั้นอิเล็กตรอนกับโฮลสามารถซ้อนทับกันได้ 100% และในที่นี้จะกำหนดให้อัตราการรวมกันกลับของอิเล็กตรอนกับโฮลในกรณีนี้เป็น R_{Bulk} และในที่นี้จะกำหนดให้ $R_{Bulk} = 1$

เพื่อพิจารณาผลของการแทรกควอนตัมเวลล์ในชั้นพีต่อการลดลงของอัตราการรวมกันกลับระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล จึงได้กำหนดค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของอัตราการรวมตัวกลับระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลในระบบที่แทรกด้วยควอนตัมเวลล์เทียบกับกรณีที่ไม่ได้แทรกด้วยควอนตัมเวลล์ ดังสมการ (10)

$$\% \text{ Reduction} = \left(\frac{R_{Bulk} - R_{QW}}{R_{Bulk}} \right) \times 100 \quad (10)$$

ในที่นี้ %Reduction คือค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของอัตราการรวมตัวกลับระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลในระบบที่แทรกด้วยควอนตัมเวลล์เทียบกับกรณีที่ไม่ได้แทรกด้วยควอนตัมเวลล์ ซึ่งเป็นค่าที่แสดงให้เห็นว่าการแทรกควอนตัมเข้าไปในชั้นพีมีผลต่อการลดลงของอัตราการรวมกันกลับระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลเป็นอย่างไรเมื่อเทียบ

กับกรณีที่ไม่ได้แทรกด้วยควอนตัมเวลล์ กล่าวคือถ้าค่า %Reduction มีค่ามากแสดงว่าโครงสร้างนั้นสามารถลดอัตราการรวมกันกลับระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลได้ดี

สำหรับสัดส่วนโดยปริมาตรของควอนตัมเวลล์ที่แทรกในชั้นพีของเซลล์แสงอาทิตย์คำนวณได้ดังสมการ (11)

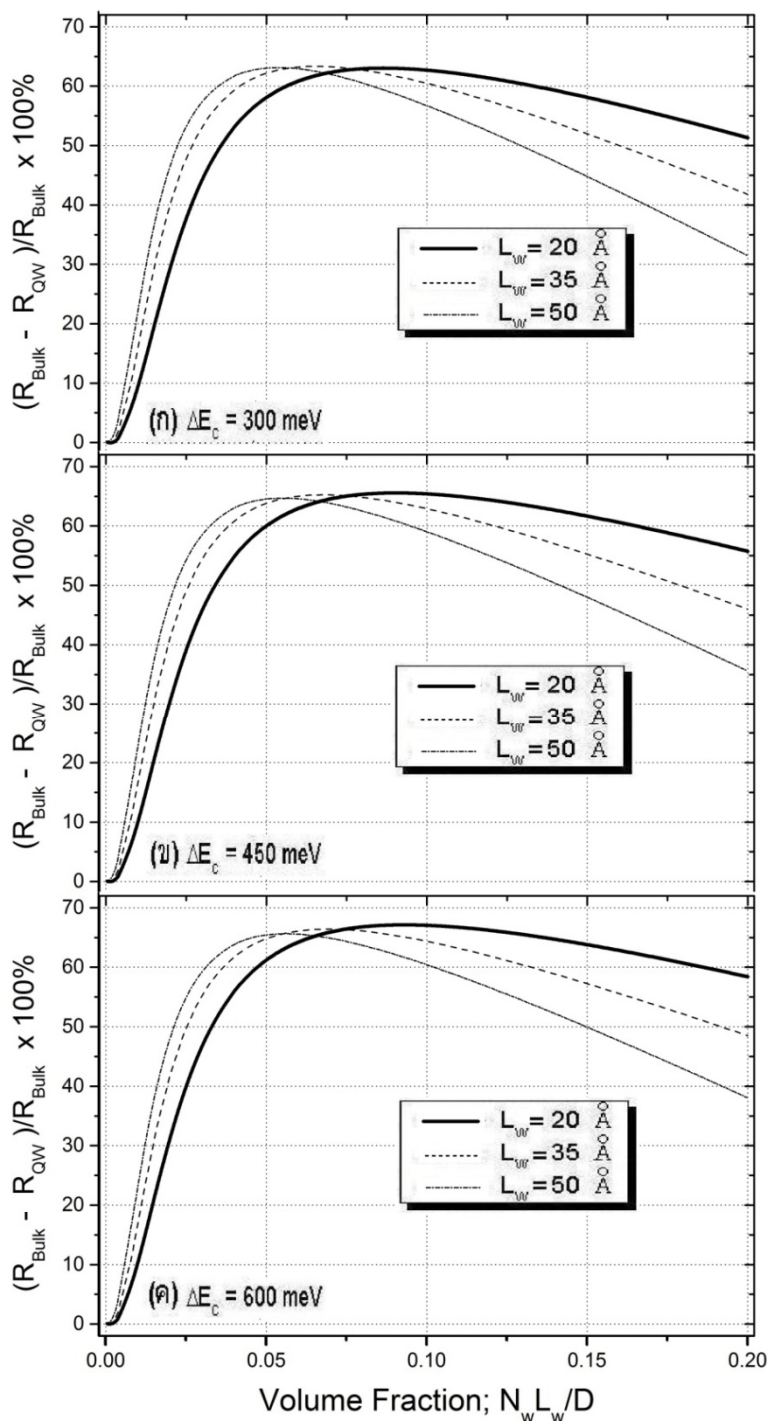
$$V_{fraction} = \frac{n_w L_w}{D} \quad (11)$$

เมื่อ $V_{fraction}$ คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของควอนตัมเวลล์ที่แทรกเข้าไปในชั้นพีต่อปริมาตรของทั้งหมดของชั้นพี และสำหรับ n_w , L_w และ D คือ จำนวนควอนตัมเวลล์ ความกว้างของควอนตัมเวลล์ และความกว้างของชั้นพีที่แทรกด้วยควอนตัมเวลล์ (ดูรูปที่ 3 ประกอบ)

3. ผลการคำนวณและการอภิปรายผล

3.1 ผลของความกว้างของควอนตัมเวลล์ต่ออัตราการรวมกันกลับระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล

ได้ทำการศึกษาผลของความกว้างของควอนตัมเวลล์ต่ออัตราการรวมกันกลับระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยพิจารณาโครงสร้างที่แทรกด้วยควอนตัมเวลล์ที่มีความกว้างเท่ากับ 20 35 และ 50 Å ที่มีความลึกเชิงพลังงานศักย์เท่ากับ 300 450 และ 600 meV เมื่อทำการคำนวณโดยอาศัยสมการ (10) ร่วมกับสมการ (2)–(9) และสมการ (11) จะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งพบว่าโครงสร้างที่แทรกด้วยควอนตัมเวลล์คิดเป็นสัดส่วนโดยปริมาตรประมาณ 5-10% ของปริมาตรทั้งหมด สามารถลดอัตราการรวมกันกลับระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลได้ดีเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ได้แทรกด้วยควอนตัมเวลล์ ซึ่งจะเห็นได้จากค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของอัตราการรวมกันกลับระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลมีค่าสูงถึงประมาณ 65% จากผลการคำนวณนี้ แสดงว่าการสร้างเส้นทางพิเศษให้กับอิเล็กตรอนโดยการแทรกควอนตัมเวลล์ในชั้นพีนี้จะเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็นได้



รูปที่ 4 ผลของความกว้าง (L_w) ของควอนตัมเวลล์ต่อเปอร์เซ็นต์การลดลงของอัตราการรวมกันกลับระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลในชั้นพีของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็นที่แทรกด้วยควอนตัมเวลล์แบบสมมาตรในชั้นพีเทียบกับในกรณีที่ไม่มีการแทรกด้วยควอนตัมเวลล์ในชั้นพี เมื่อความลึกเชิงพลังงานศักย์ (ΔE_c) ของควอนตัมเวลล์เท่ากับ (ก) 300 meV (ข) 450 meV และ (ค) 600 meV

นอกจากนี้ยังพบว่าโครงสร้างถูกแทรกด้วยควอนตัมเวลล์คิดเป็นสัดส่วนโดยปริมาตรน้อยกว่า 5% ของปริมาตรทั้งหมด มีค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของอัตราการรวมกันกลับระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มสัดส่วนโดยปริมาตรของควอนตัมเวลล์ที่แทรกเข้าไป โดยโครงสร้างที่แทรกด้วยควอนตัมเวลล์ที่กว้างกว่าสามารถลดอัตราการรวมกันกลับได้ดีกว่าอย่างเห็นได้ชัด และการแทรกควอนตัมเวลล์ด้วยสัดส่วนปริมาตรไม่ถึง 5% ของปริมาตรทั้งหมดน่าจะเป็นผลดีในการนำไปใช้งานจริง เนื่องจากไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสมบัติด้านอื่นของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็น ตัวอย่างเช่น สมบัติการดูดกลืนแสง เป็นต้น

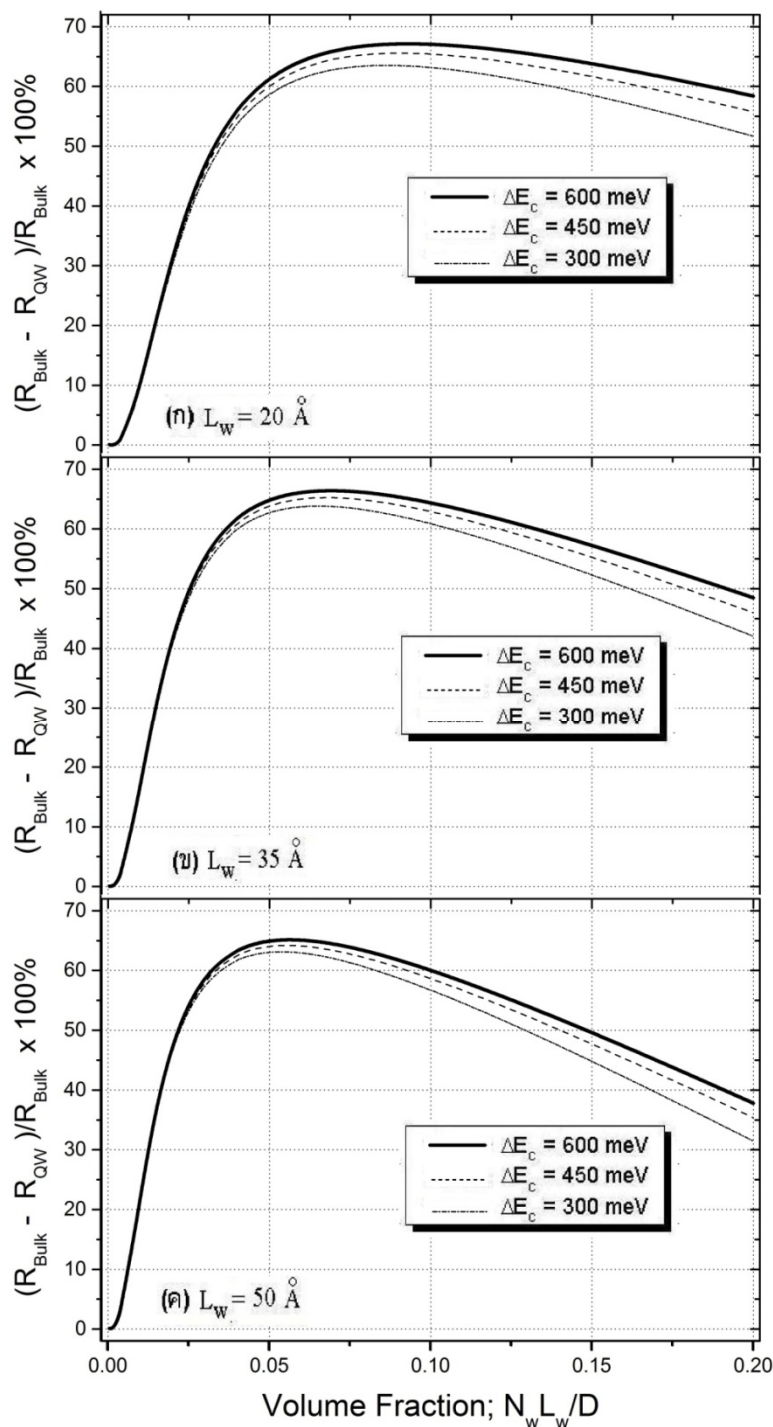
สำหรับโครงสร้างที่ถูกแทรกด้วยควอนตัมเวลล์ที่มีสัดส่วนโดยปริมาตรมีค่าอยู่ระหว่าง 5-10% พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของอัตราการรวมกันกลับระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลมีค่ามากกว่า 60% และมีค่าเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยเมื่อตัวแปรโครงสร้างของควอนตัมเวลล์เปลี่ยนไป นั่นแสดงว่า สัดส่วนโดยปริมาตรระหว่าง 5-10% จึงน่าจะเป็นค่าที่เหมาะสมในการนำไปใช้สำหรับการปรับปรุงโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็นเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น อย่างไรก็ตามก็มีความจำเป็นต้องตรวจสอบด้วยการแทรกควอนตัมเวลล์ด้วยสัดส่วนโดยปริมาตรดังกล่าวนี้มีผลต่อสมบัติอย่างอื่นของเซลล์แสงอาทิตย์หรือไม่

ส่วนกรณีโครงสร้างที่ถูกแทรกด้วยควอนตัมเวลล์เมื่อคิดเป็นสัดส่วนโดยปริมาตรมากกว่า 10% ของปริมาตรทั้งหมด พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของอัตราการรวมกันกลับระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของควอนตัมเวลล์ที่แทรกเข้าไปเพิ่มขึ้น และพบว่าโครงสร้างที่แทรกด้วยควอนตัมเวลล์ที่แคบกว่าสามารถลดอัตราการรวมกันกลับได้ดีกว่าอย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตามก็การแทรกควอนตัมเวลล์ด้วยสัดส่วนโดยปริมาตรที่มากไม่เหมาะต่อการนำไปใช้งาน เนื่องจากอาจมีผลกระทบต่อสมบัติทางด้านอื่นของเซลล์แสงอาทิตย์ได้

3.2 ผลของความลึกเชิงพลังงานศักย์ต่ออัตราการรวมกันกลับระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล

ในทำนองเดียวกันเมื่อทำการศึกษาผลของความลึกเชิงพลังงานศักย์ของควอนตัมเวลล์ต่ออัตราการรวมกันกลับระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยพิจารณาโครงสร้างที่แทรกด้วยควอนตัมเวลล์ที่มีความลึกเชิงพลังงานศักย์เท่ากับ 300 450 และ 600 meV และมีความกว้างเท่ากับ 20 35 และ 50 Å เมื่อทำการคำนวณโดยอาศัยสมการ (10) ร่วมกับสมการ (2)–(9) และสมการ (11) ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5

เมื่อพิจารณาโครงสร้างที่แทรกด้วยควอนตัมเวลล์ที่แคบ ตัวอย่างเช่นมีความกว้าง 20 Å ดังรูป 5 (ก) พบว่าโครงสร้างดังกล่าวจะสามารถลดอัตราการรวมกันกลับระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลได้ดีที่สุด เมื่อทำการแทรกควอนตัมเวลล์ด้วยสัดส่วนโดยปริมาตรประมาณ 10% ของปริมาตรทั้งหมด อย่างไรก็ตามก็การแทรกควอนตัมเวลล์ด้วยปริมาณมากเช่นนี้อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสมบัติด้านอื่นของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ดังนั้นการแทรกด้วยควอนตัมเวลล์ที่แคบน่าจะเหมาะสมต่อการนำไปใช้สำหรับการปรับปรุงโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็นเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น



รูปที่ 5 แสดงผลของความลึกของพลังงานศักย์ (ΔE_c) ของควอนตัมเวลล์ต่อเปอร์เซ็นต์การลดลงของอัตราการรวมกันกลับระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลในชั้นพีของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็นทีที่แทรกด้วยควอนตัมเวลล์แบบสมมาตรในชั้นพี เทียบกับในกรณีที่ไม่มีกรแทรกด้วยควอนตัมเวลล์ในชั้นพีเมื่อความกว้าง (L_w) ของควอนตัมเวลล์เท่ากับ: (ก) 20 Å, (ข) 35 Å และ (ค) 50 Å

นอกจากนี้ผลการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 5 ยังแสดงให้เห็นว่าความลึกเชิงพลังงานศักย์ของควอนตัมเวลล์ที่แทรกเข้าไปในชั้นพีมีผลต่ออัตราการรวมกันกลับระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลค่อนข้างน้อย และพบอีกว่าสำหรับโครงสร้างที่แทรกด้วยควอนตัมเวลล์ที่กว้าง 50 Å ด้วยสัดส่วนโดยปริมาตรเพียง 5% ของปริมาตรทั้งหมด สามารถลดอัตราการรวมกันกลับระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลได้ดีที่สุด คือมีค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของอัตราการรวมกันกลับสูงสุดถึงประมาณ 65% ดังที่แสดงในรูป 5(ค) นั้นแสดงว่าการแทรกควอนตัมเวลล์ที่มีความกว้างที่เหมาะสมในปริมาณที่พอดีสามารถลดค่าอัตราการรวมกันกลับระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลได้ดียิ่งขึ้น

4. สรุปและวิจารณ์

จากการศึกษาผลของการแทรกควอนตัมเวลล์ในชั้นพีของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็นต่ออัตราการรวมตัวกันกลับระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล โดยเน้นการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างควอนตัมเวลล์ ได้แก่ ความกว้าง ความลึกเชิงพลังงานศักย์ของควอนตัมเวลล์ และสัดส่วนปริมาตรของควอนตัมเวลล์ที่แทรกเข้าไปต่อปริมาตรทั้งหมด ต่ออัตราการรวมตัวกันกลับระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่แทรกด้วยโครงสร้างควอนตัมเวลล์ในชั้นพี สามารถลดอัตราการรวมตัวกันกลับระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลได้ดีกว่ากรณีที่ไม่ได้แทรกด้วยควอนตัมเวลล์อย่างมีนัยสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อพิจารณากรณีโครงสร้างที่แทรกด้วยควอนตัมเวลล์ที่กว้าง และมีความลึกเชิงพลังงานศักย์มาก ในสัดส่วนโดยปริมาตรของควอนตัมเวลล์ต่อปริมาตรทั้งหมดที่เหมาะสมจะสามารถลดอัตราการรวมกันได้ดีกว่า กรณีของโครงสร้างที่แทรกด้วยควอนตัมเวลล์ที่แคบกว่า และและมีความลึกเชิงพลังงานศักย์น้อยกว่า อย่างไรก็ตามเนื่องจากผลของความลึกเชิงพลังงานศักย์ต่ออัตราการรวมกันกลับระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลมีค่าไม่เด่นชัด ดังนั้นในการออกแบบโครงสร้างวัสดุเชิงวิศวกรรมจึงคำนึงถึงความกว้าง และสัดส่วนโดยปริมาตรของควอนตัมเวลล์ที่แทรกเข้าไปเป็นสำคัญนอกจากนี้ผลการคำนวณยังชี้ให้เห็นว่าโครงสร้างที่แทรกด้วยควอนตัมเวลล์สามารถลดอัตราการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลได้สูงสุดถึง 65% ซึ่งเป็นการยืนยันว่า การแทรกควอนตัมเวลล์ในชั้นพีเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่มีความเป็นไปได้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็น

เอกสารอ้างอิง

- Basu, P.K. (1997). Theory of optical processes in semiconductors bulk and microstructures. Oxford: Clarendon Press.
- EIA (2013). The International Energy Outlook 2013, แหล่งข้อมูล: [www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2013\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2013).pdf) ค้นเมื่อวันที่ 5 มีนาคม 2557.
- Green, M.A. Emery, K. Hishikawa, Y. Warta, W. and Dunlop, E.D. (2014). Solar cell efficiency tables (version 43). Progress in Photovoltaics: Research and Applications. Wiley Online Library. 22(1): 1–9.
- Harrison, P. (2001). Computational Methods in Physics, Chemistry and Biology An Introduction. New York: John Wiley & Sons: 16-38.

- Nardelli, M.B. Rapcewicz, K. and Bernholca, J. (1997). Polarization field effects on the electron-hole recombination dynamics in $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ multiple quantum wells. *Applied physics letters* 71(21): 3135-3137.
- Peyghambarian, N. (1993). *Introduction to Semiconductor Optics*. New Jersey: Englewood Cliffs.
- Sharp corporation (2013). Sharp Develops Concentrator Solar Cell with World's Highest Conversion Efficiency of 44.4%, แหล่งข้อมูล: <http://sharp-world.com/corporate/news/130614.html> ค้นเมื่อวันที่ 5 มีนาคม 2557.
- Shockley, W. and Queisser, H.J. (1961). Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells. *Journal of Applied Physics* 32: 510-519.
- Yariv, A. (1982). *An Introduction to Theory and Applications of Quantum Mechanics*. New York: Wiley & sons.

