



ผลึกแสงและโลหะผสม GeSiSn Photonic Crystal and GeSiSn Alloy

ไพโรจน์ มุลตระกูล¹

บทคัดย่อ

ผลึกแสง (photonic crystal) เป็นโครงสร้างในระดับนาโนของวัสดุที่มีการจัดเรียงกันสารที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่แตกต่างกัน อย่างเป็นระเบียบ และมีลักษณะความเป็นคาบ มีโครงสร้างแถบ (photonic band structure) ของผลึกแสง หรือเทียบเคียงได้กับโครงสร้างแถบพลังงาน (energy band structure) ของของผลึกทั่วไป มีช่องว่างแถบ (photonic band gap) ที่สามารถบังคับไม่ให้แสงบางช่วงความถี่สามารถแผ่ออกไปได้ในทิศทางที่ต้องการ และการทำผลึกแสงที่ทำมาจากซิลิคอน (silicon photonics) ซึ่งมีมากในธรรมชาติและไม่เป็นพิษ หรือโลหะผสมของธาตุหมู่ 4 อันประกอบด้วย Si Ge และ Sn จึงเป็นการนำพื้นฐานความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับการใช้ซิลิคอนในทางด้านอิเล็กทรอนิกส์มาพัฒนาเป็นอุปกรณ์ทางแสงเพื่อที่จะสามารถทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านั้นมาทำงานร่วมกัน เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการคำนวณและส่งข้อมูลได้เร็วขึ้น

ABSTRACT

Photonic crystals are periodic optical nanostructures which their dielectric are periodically arranged or designed to affect the motion of photons. Therefore, they have photonic band structures and photonic band gap which can be analogized to the energy band structures and energy band gap of semiconductors. The photonic band gap can control some photon frequencies to only propagate in some direction. Silicon photonics are photonic crystals which are made of silicon (the second most abundant element on the earth and non toxic) or alloys of Si, Ge and Sn. Therefore, optoelectronic devices which are made of silicon photonics is a new interesting idea by taking advantage of using knowledge about silicon technology to improve an efficiency of a calculation and information transferring.

¹ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

E-mail: mpairo@kku.ac.th

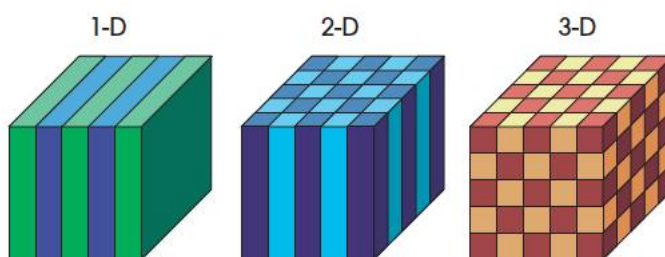
คำสำคัญ: ผลึกแสง โลหะผสม GeSiSn

Keywords: Photonic crystal, GeSiSn alloy

บทนำ

จากการค้นพบวัสดุประเภทผลึกแสง (photonic crystal) และการประยุกต์ใช้เพื่อที่จะควบคุมการแผ่ (propagate) ของแสงจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งนั้นถือว่าเป็นการพัฒนาองค์ความรู้ใหม่ที่มีคุณค่า และมีอิทธิพล ต่อวงการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอย่างมหาศาล ซึ่งสามารถประยุกต์เพื่อใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน เช่น ด้าน วิทยาศาสตร์วัสดุ วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ แสง และทางด้านฟิสิกส์ (Qiu et al, 1999) ดังที่ได้กล่าวไว้ในวารสาร วิทยาศาสตร์ “Science” ว่า “new light on photonics is one of the top ten breakthroughs of the year 1999” (Science, 1999) ซึ่งอธิบายไว้ว่าครั้งหนึ่งในอุตสาหกรรมการสื่อสารและคอมพิวเตอร์ได้เกิดการ วิวัฒนาการครั้งใหญ่ขึ้นเมื่อมีการนำเอาเทคโนโลยีของสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ที่มีขนาดเล็กและใช้ อิเล็กตรอนในการนำสัญญาณและข้อมูลเข้ามาแทนที่หลอดสุญญากาศในสมัยนั้นที่ทั้งใหญ่และซับซ้อนในการนำส่ง ข้อมูล แต่ในอุตสาหกรรมนี้จะมีการวิวัฒนาการขึ้นอีกครั้งโดยวัสดุที่เรียกว่าผลึกแสง เพราะความที่มีโครงสร้าง ลักษณะคล้ายโครงสร้างผลึก และมีความสามารถที่จะควบคุมโฟตอนที่มีความเร็วในการเคลื่อนที่เท่ากับความเร็ว แสง เหมือนอย่างที่เราสารกึ่งตัวนำทำการควบคุมอิเล็กตรอนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ผลึกแสงเป็นวัสดุที่มีการจัดเรียงกันสารที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่แตกต่างกัน อย่างเป็นระเบียบ และมี ลักษณะความเป็นคาบดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงผลึกแสงแบบ 1 2 และ 3 มิติตามลำดับ โดยสีที่แตกต่างกันเปรียบเสมือนวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ที่แตกต่างกัน (Joannopoulos et al., 2008)

ดังนั้นพอที่จะเปรียบเทียบความคล้ายคลึงได้กับผลึกของของแข็ง ที่อิเล็กตรอนที่มีประจุลบเคลื่อนที่ใน ผลึกของของแข็งที่เกิดจากพลังงานศักย์ไฟฟ้าอันเนื่องมาจากประจุบวกในนิวเคลียสของอะตอมซึ่งจัดเรียงกันอยู่ อย่างเป็นระเบียบและมีลักษณะความเป็นคาบเช่นกัน ในบางวัสดุอย่าง เช่นสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนจะไม่สามารถ เคลื่อนที่ในผลึกทั่วไปด้วยค่าพลังงานที่อยู่ช่วงของพลังงานต้องห้าม (forbidden energy) ได้ จึงเกิดเป็นช่องว่าง แถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำขึ้น และลักษณะทำนองเดียวกันสำหรับผลึกแสง ผลึกแสงจะสามารถควบคุมการแผ่ ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือโฟตอน ในผลึกแสงได้ เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ในผลึกนั้น โดยใช้ความสัมพันธ์ ระหว่างเวกเตอร์คลื่นและความถี่ของคลื่น (dispersion relation) ซึ่งความสัมพันธ์จะนำไปสู่โครงสร้างแถบ (band

structure) ของผลึกแสง หรือเทียบเคียงได้กับโครงสร้างแถบพลังงาน (energy band structure) ของของผลึกทั่วไป จากโครงสร้างแถบของผลึกแสงนี้อาจจะมีช่วงความถี่ช่วงหนึ่งที่แสงไม่สามารถเคลื่อนผ่านไปในผลึกแสงได้ถ้าความถี่นั้นตรงกับช่องว่างแถบพลังงานของผลึกแสง (photonic band gap) ดังนั้นจะเห็นว่าเราสามารถสร้างและออกแบบผลึกแสงที่มีช่องว่างแถบพลังงานที่สามารถป้องกันไม่ให้แสงบางช่วงความถี่สามารถแผ่ออกไปได้ในทิศทางที่ต้องการ

การคำนวณโครงสร้างแถบของผลึกแสง

เนื่องจากแสงหรือโฟตอนซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่แผ่ไปในผลึกแสง ดังนั้นสมการที่จะอธิบายการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นก็คือสมการของแมกเวลล์ (Maxwell equations) ซึ่งมี 4 สมการดังนี้

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 & \nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho & \nabla \times \mathbf{H} - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} &= \mathbf{J}\end{aligned}\quad (1)$$

เมื่อ $\mathbf{E}$ และ $\mathbf{H}$ ค่าสนามไฟฟ้า (electric fields) และสนามแม่เหล็ก (magnetic fields) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามลำดับ $\mathbf{D}$ และ $\mathbf{B}$ ค่าการกระจัดทางไฟฟ้า (electric displacement) และ สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ (magnetic induction fields) ตามลำดับ ρ และ $\mathbf{J}$ คือประจุอิสระและความหนาแน่นกระแสตามลำดับ ซึ่งในผลึกแสงจะมีค่าเป็นศูนย์เพราะไม่มีประจุอิสระและกระแสอิสระในนั้น เพื่อความง่ายต่อการคำนวณจึงทำการประมาณโดยกำหนดให้ $\mathbf{D}(\mathbf{r}) = \epsilon_0 \epsilon(\mathbf{r}) \mathbf{E}(\mathbf{r})$ และ $\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \mu_0 \mu(\mathbf{r}) \mathbf{H}(\mathbf{r})$ ซึ่งค่า μ ของวัสดุส่วนใหญ่ในผลึกแสงจะมีค่าเข้าใกล้หนึ่งเพราะว่าไม่ใช่สารที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็ก และค่า ϵ ก็จะมีค่าขึ้นกับชนิดของสารแต่ละตัวที่นำมาทำเป็นผลึกแสง ดังนั้นจะได้สมการแมกเวลล์เป็นดังนี้

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) &= 0 & \nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) + \mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} &= 0 \\ \nabla \cdot \epsilon(\mathbf{r}) \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) &= 0 & \nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) - \epsilon_0 \epsilon(\mathbf{r}) \frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} &= 0\end{aligned}\quad (2)$$

และเขียนทั้งสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าให้อยู่ในรูปแบบของฮาร์โมนิก (Harmonic modes) ได้ดังสมการ

$$\begin{aligned}\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) &= \tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{r}) e^{-i\omega t} \\ \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) &= \tilde{\mathbf{H}}(\mathbf{r}) e^{-i\omega t}\end{aligned}\quad (3)$$

เมื่อแทนกลับลงในสมการที่ 2 จะได้ระบบสมการอนุพันธ์ดังนี้

$$\begin{aligned}-\frac{i}{\omega} \nabla \times \tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{r}) &= \tilde{\mathbf{H}}(\mathbf{r}) \\ \frac{i}{\omega \epsilon(\mathbf{r})} \nabla \times \tilde{\mathbf{H}}(\mathbf{r}) &= \tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{r})\end{aligned}\quad (4)$$

ซึ่งสามารถแก้สมการเพื่อหาสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กก่อนก็ได้ ซึ่งถ้าต้องการแก้สมการหาสนามแม่เหล็กก่อนจะได้ว่า

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\epsilon(\mathbf{r})} \nabla \times \tilde{\mathbf{H}}(\mathbf{r}) \right] = \omega^2 \tilde{\mathbf{H}}(\mathbf{r})$$

$$\nabla \cdot \tilde{\mathbf{H}}(\mathbf{r}) = 0 \quad (5)$$

แล้วค่อยหาสนามไฟฟ้าจากความสัมพันธ์ในสมการที่ 4 ในทำนองเดียวกันถ้าจะคำนวณหาสนามไฟฟ้าก่อนก็สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\frac{1}{\epsilon(\mathbf{r})} \nabla \times [\nabla \times \tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{r})] = \omega^2 \tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{r})$$

$$\nabla \cdot \epsilon(\mathbf{r}) \tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{r}) = 0 \quad (6)$$

แล้วค่อยหาสนามแม่เหล็กจากความสัมพันธ์ในสมการที่ 4 เช่นเดียวกัน ซึ่งเรียกสมการที่ (5) และ (6) ว่าสมการมาสเตอร์ (master equation) แต่เมื่อพิจารณาความยากง่ายในการแก้สมการโดยใช้ระเบียบวิธีทางคอมพิวเตอร์แล้ว การแก้สมการอนุพันธ์เพื่อหาค่าสนามแม่เหล็กก่อนนั้นจะง่ายกว่า เพราะว่าเมื่อพิจารณาสมการแล้วจะเป็นการแก้สมการค่าเฉพาะ (Eigen value equation) ที่มีตัวดำเนินการ (operator) เป็นเฮอร์มิเชียน (hermitian) ซึ่งสามารถแก้สมการได้ง่ายกว่า และใช้หลักการในการสมการคล้ายกับการแก้สมการโซรติงเจอร์ของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในผลึกทั่วไป ดังนั้นจะเห็นถึงความคล้ายคลึงของผลึกทั่วไปและผลึกแสงที่สามารถเทียบเคียงได้ดังนี้

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบคุณลักษณะของผลึกของของแข็งและผลึกแสง

	ผลึกของของแข็ง (Solid crystal)	ผลึกแสง (Photonic crystal)
ลักษณะทั่วไป	อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในโครงที่เป็นระเบียบและมีลักษณะเป็นคาบๆ ของพลังงาน ศักย์ไฟฟ้าอันเนื่องมาจากนิวเคลียสภายในอะตอมที่เรียงตัวอยู่ภายในผลึกของแข็ง	แสงหรือโฟตอนเคลื่อนที่ภายในโครงสร้างที่เป็นระเบียบและมีลักษณะเป็นคาบๆ ของสารที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่แตกต่างกันและเรียงตัวอยู่ภายในผลึกแสง
ช่องว่างแถบ	ในบางโครงสร้างอย่างเช่นในสารประเภทสารกึ่งตัวนำและฉนวน อิเล็กตรอนที่อยู่ภายในผลึกไม่สามารถเคลื่อนที่ด้วยพลังงานในบางช่วง เกิดเป็นช่องว่างแถบพลังงานขึ้น	ในบางลักษณะของโครงสร้างในผลึกแสง แสงไม่สามารถเคลื่อนที่แผ่ไปในโครงสร้างด้วยค่าความถี่บางช่วง เกิดเป็นช่องว่างแถบความถี่ขึ้น
สมการที่อธิบาย	แก้สมการโซรติงเจอร์เพื่อหาฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในผลึกทั่วไป $\psi(\mathbf{r}, t) = \tilde{\psi}(\mathbf{r})e^{-i(\epsilon/\hbar)t}$	แก้สมการมาสเตอร์เพื่อหาสนามแม่เหล็กของโฟตอนหรือแสงที่เคลื่อนที่ภายในผลึกแสง $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \tilde{\mathbf{H}}(\mathbf{r})e^{-i\omega t}$
สนาม (field)	พลังงานศักย์เนื่องจากนิวเคลียส $V(\mathbf{r})$	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก $\epsilon(\mathbf{r})$
สมการค่าเฉพาะ	$\hat{H}\tilde{\psi}(\mathbf{r}) = E\tilde{\psi}(\mathbf{r})$	$\hat{\Theta}\tilde{\mathbf{H}}(\mathbf{r}) = \omega^2\tilde{\mathbf{H}}(\mathbf{r})$
ตัวดำเนินการเฮอร์มิเชียน	$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V(\mathbf{r})$	$\hat{\Theta} = \nabla \times \frac{1}{\epsilon(\mathbf{r})} \nabla \times$

เนื่องจากผลึกแสงมีลักษณะคล้ายคลึงกับผลึกทั่วไป และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก, $\epsilon(r)$, มีลักษณะเป็นคาบ (periodic) ดังนั้นจึงสามารถใช้ทฤษฎีของบลอค (Bloch's theorem) มาประยุกต์ใช้แก้สมการมาสเตอร์ในผลึกแสงได้ โดยการกระจายสนามแม่เหล็กให้อยู่ในรูปผลบวกเชิงเส้นของคลื่นระนาบ (plan wave) สถานะของสนามแม่เหล็กในโครงสร้างที่เป็นผลึกแสงจะอธิบายด้วยสถานะด้วยเวกเตอร์คลื่น (wave vector) $\mathbf{k}$ ในโซนบลูวอน (Brillouin zone) และแถบที่ n (band n) ดังสมการ

$$\tilde{H}_{n,\mathbf{k}}(\mathbf{r}) = \sum_{\mathbf{G}} \sum_{\lambda=1}^2 C_{n,\mathbf{k},\mathbf{G},\lambda} \hat{e}_{\lambda} e^{i(\mathbf{k}+\mathbf{G})\cdot\mathbf{r}} \quad (6)$$

เมื่อ $\mathbf{G}$ คือเวกเตอร์หน่วยพื้นฐานส่วนกลับ (Primitive reciprocal lattice vector) และ C คือสัมประสิทธิ์การกระจายของสนามแม่เหล็กไปบนฟังก์ชันคลื่นระนาบ และ $\hat{e}_1, \hat{e}_2$ คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับ $\mathbf{k}+\mathbf{G}$ และทำนองเดียวกันก็กระจายส่วนกลับของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกให้อยู่ในรูปผลบวกเชิงเส้นของคลื่นระนาบเช่นกัน ซึ่งจะได้

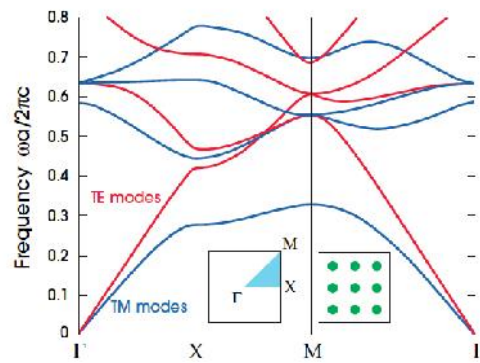
$$\frac{1}{\epsilon(\mathbf{r})} = \sum_{\mathbf{G}} D_{\mathbf{G}} e^{i(\mathbf{G})\cdot\mathbf{r}} \quad (7)$$

โดยที่ D คือสัมประสิทธิ์การกระจายของสนามของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกไปบนฟังก์ชันคลื่นระนาบเมื่อแทนกลับลงในสมการมาสเตอร์จะได้สมการเมทริกซ์ดังสมการ

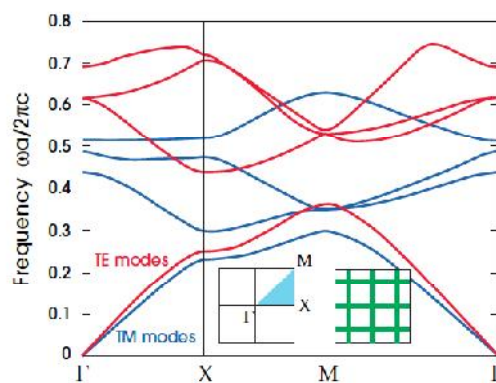
$$\sum_{\mathbf{G}',\lambda'} |\mathbf{k} + \mathbf{G}| |\mathbf{k} + \mathbf{G}'| D_{\mathbf{G}-\mathbf{G}'} \begin{bmatrix} \hat{e}_2 \cdot \hat{e}'_2 & -\hat{e}_2 \cdot \hat{e}'_1 \\ -\hat{e}_1 \cdot \hat{e}'_2 & \hat{e}_1 \cdot \hat{e}'_1 \end{bmatrix} C_{\mathbf{G}',\lambda'} = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 C_{\mathbf{G},\lambda}$$

ซึ่งสมการเมทริกซ์นี้สามารถหาผลเฉลยได้โดยใช้วิธีการทแยง (diagonalization method) ของแต่ละค่าเวกเตอร์คลื่น $\mathbf{k}$ ซึ่งจะได้เซตของค่าความถี่เฉพาะ (Eigen-frequency) หรือ ค่า ω ซึ่งจะหมายถึงความถี่ที่เวกเตอร์คลื่น $\mathbf{k}$ และในแต่ละแถบ n นั้นเอง ดังเช่นตัวอย่างโครงสร้างแถบของผลึกแสงที่ประกอบด้วยสารไดอิเล็กทริกที่มีลักษณะเป็นแท่ง มีรัศมีของแท่ง $R=0.31a$ เมื่อ a คือค่าคงที่แลตทิซ (lattice constant) และมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ ϵ วางอย่างเป็นระเบียบในอากาศดังรูปที่ 2 ซึ่งจะเห็นว่าผลึกแสงแบบนี้มีแถบช่องว่างในโพลาไรเซชันของสนามไฟฟ้า (E polarization) หรือ TM Mode (transverse magnetic mode) ที่ความถี่ตั้งแต่ $0.3\left(\frac{\omega a}{2\pi c}\right)$ ถึง $0.43\left(\frac{\omega a}{2\pi c}\right)$ แต่จะไม่มีแถบช่องว่างในโพลาไรเซชันของสนามแม่เหล็ก (H polarization) แต่ถ้าต้องการให้มีช่องว่างแถบขึ้นในทิศทางที่มีโพลาไรเซชันของสนามแม่เหล็กนั้นหรือสนามไฟฟ้าในช่วงความถี่ที่แตกต่างกันนั้น โครงสร้างผลึกแสงควรมีลักษณะดังรูปที่ 3 คือเป็นโครงสร้างที่มีการเชื่อมกันระหว่างบริเวณที่สารที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงกว่าซึ่งจะมีช่องว่างแถบในทิศทางที่มีโพลาไรเซชันของสนามแม่เหล็กหรือ TE Mode (transverse electric mode) ที่รอบรอบความถี่ตั้งแต่ $0.35\left(\frac{\omega a}{2\pi c}\right)$ ถึง $0.45\left(\frac{\omega a}{2\pi c}\right)$ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับอีกหนึ่งตัวอย่างซึ่งเป็นผลึกแสงที่เกิดจากการนำเอาสารไดอิเล็กทริกที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ ϵ มาเจาะเป็นรูที่มีรัศมี R และรูเหล่านี้มีการจัดเรียงอย่างเป็นระเบียบเป็นรูปหกเหลี่ยม ดังรูปที่ 4 ซึ่งจะเห็นว่าเกิดช่องว่างแถบขึ้นรอบความถี่ตั้งแต่ $0.43\left(\frac{\omega a}{2\pi c}\right)$ ถึง $0.52\left(\frac{\omega a}{2\pi c}\right)$ ทั้งในทิศทางที่มีโพลาไรเซชันของสนามแม่เหล็กนั้นหรือสนามไฟฟ้า นั้นแสดงว่าโฟตอนหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ในช่วงนั้นไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในผลึกแสงนี้

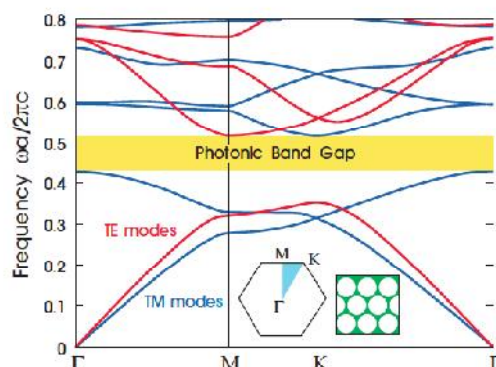
ได้ดังแสดงในรูปที่ 5 ดังนั้นโครงสร้างสามารถถูกออกแบบให้เป็นทางเดินทางของแสงที่มีความยาวคลื่นที่ต้องการได้ (photonic wave guide)



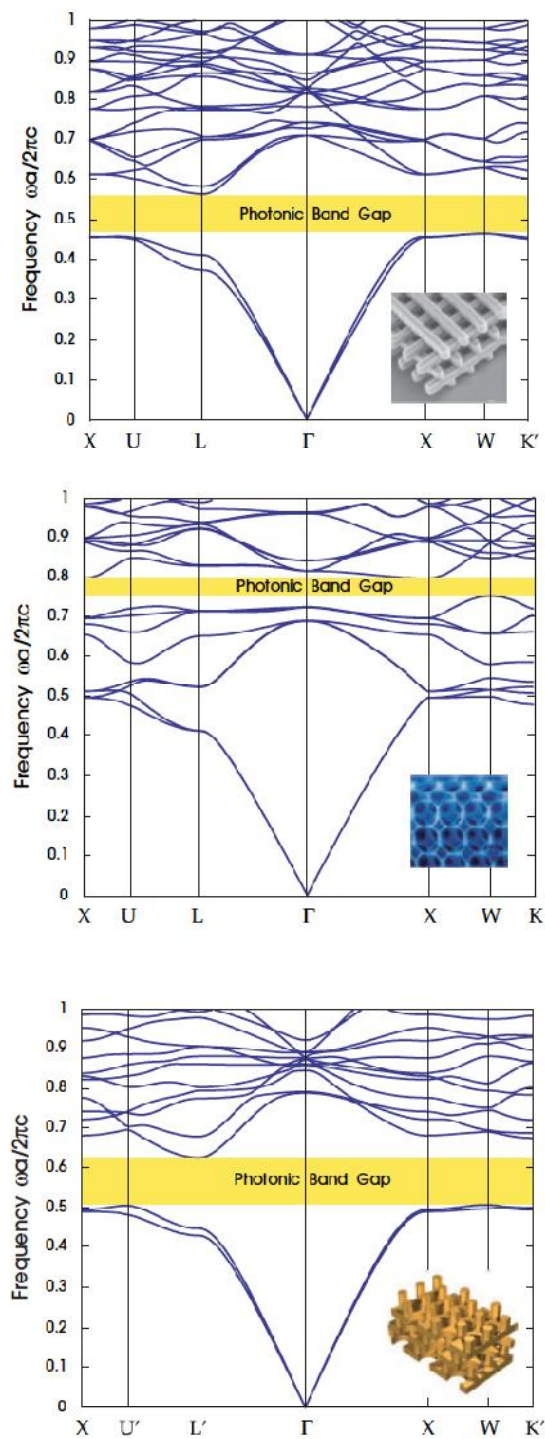
รูปที่ 2 โครงสร้างแถบของผลึกแสงที่ประกอบด้วยสารไดอิเล็กทริกที่มีลักษณะเป็นแท่ง มีรัศมีของแท่ง R และมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ϵ วางอย่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Joannopoulos et al., 2008)



รูปที่ 3 โครงสร้างแถบของผลึกแสงที่ประกอบด้วยสารไดอิเล็กทริกที่มีลักษณะเป็นแท่ง มีรัศมีของแท่ง R และมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ϵ วางอย่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Joannopoulos et al., 2008)



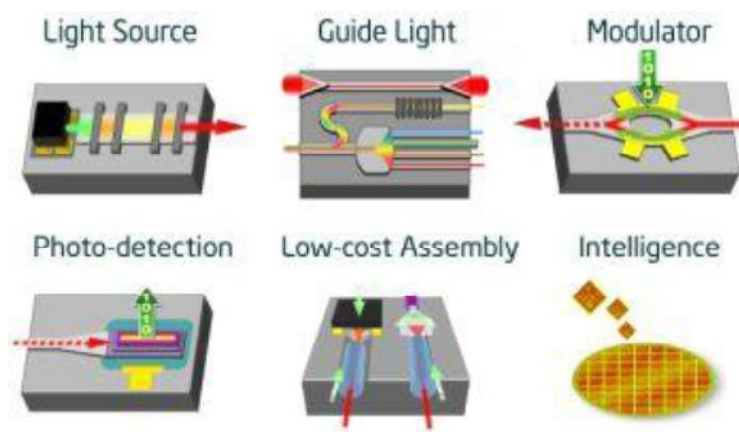
รูปที่ 4 โครงสร้างแถบของผลึกแสงที่ประกอบด้วยรูของอากาศที่มีรัศมีของรู R อยู่ในสารไดอิเล็กทริกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ϵ โดยที่รูของอากาศมีการเรียงตัวรูปทรงหกเหลี่ยม (Joannopoulos et al., 2008)



รูปที่ 5 โครงสร้างแถบของผลึกแสงในสามมิติ (Joannopoulos et al., 2008)

จากสมบัติที่น่าสนใจของผลึกแสงดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะทำผลึกแสงที่ทำมาจากซิลิคอน (silicon photonics) และทำการศึกษาและพัฒนาเพื่อที่ประยุกต์ใช้ซิลิคอนเป็นตัวกลางทางแสง (optical medium) ใน

ระบบของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง (optoelectronic devices) เนื่องจากในช่วงสองทศวรรษหลังนี้จะเห็นว่า นักวิจัยมีความพยายามอย่างมากที่จะเพิ่มความเร็วของเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และขยายขอบเขตในการสื่อสารให้สามารถมีการส่งข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบดั้งเดิมนั้นส่วนใหญ่ใช้อิเล็กทรอนิกส์เป็นหลักในการนำข้อมูล หรือสัญญาณจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ซึ่งการเคลื่อนที่ในลักษณะนี้นั้นอิเล็กตรอนจะมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อน และมีความเร็วในการส่งข้อมูลนั้นจำกัด จึงเกิดแนวคิดที่จะผสมผสานระหว่างระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสงซึ่งใช้แสงเป็นตัวนำสัญญาณหรือข้อมูลและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบดั้งเดิมที่ใช้อิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวนำสัญญาณหรือข้อมูล เข้าด้วยกันเพื่อที่จะเพิ่มความเร็วของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ส่วนเหตุผลที่ใช้ซิลิกอนนั้นเป็นเพราะว่าซิลิกอนมีสมบัติที่น่าสนใจหลายอย่าง เช่น เป็นธาตุที่มีอยู่เยอะ ราคาไม่แพง ไม่เป็นพิษเหมือนกับธาตุบางชนิด อย่างเช่น GaAs Pb และเหตุผลที่สำคัญคือพื้นฐานความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับการใช้ซิลิกอนในทางด้านอิเล็กทรอนิกส์นั้นมีการพัฒนามายาวนาน ดังนั้นการพัฒนาต่อยอดทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ทางแสงจึงเป็นสิ่งที่ไม่ยาก ดังนั้นในองค์กรหรือบริษัทใหญ่ อย่างเช่น บริษัทอินเทล (Intel corporation) และ IBM ต่างๆจึงมุ่งเน้นวิจัยทั้งทางด้านทฤษฎีและการทดลองเพื่อจะนำแนวความคิดนี้ไปสู่ความสำเร็จ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง บริษัทอินเทลในฐานะของผู้นำการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้าน silicon photonics ได้มีการพัฒนาหลายด้านเพื่อที่จะรวมเอาความรู้เพื่อที่จะนำเสนออุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูง และสามารถแก้ปัญหาให้แก่ผู้บริโภค เพื่อที่จะให้แนวคิดนี้เป็นไปได้ นั่น ต้องมีการแบ่งการวิจัยและพัฒนาออกเป็น 6 ส่วนด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 6 คือ



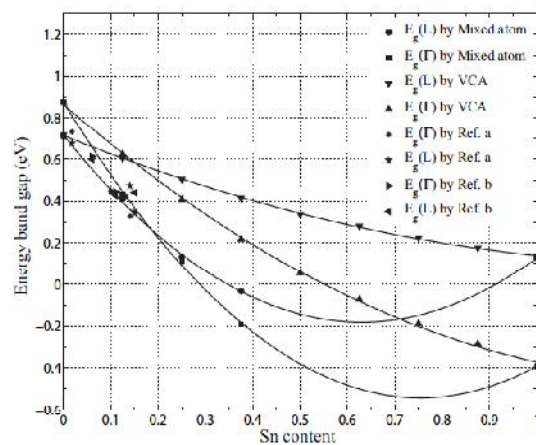
รูปที่ 6 แนวทางการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีฟลักแสงที่ทำจากซิลิกอน 1) แหล่งกำเนิดแสง (light source) 2) การนำทางแสง (guide light) 3) ตัวกล้ำสัญญาณแสง (light modulator) 4) การตรวจจับแสง (light detector) 5) การประกอบแต่ละส่วนด้วยกัน (Assembly) 6) การควบคุมให้ในแต่ละส่วนทำงานด้วยกัน (intelligently controlling)

ซึ่งบทความนี้จะกล่าวถึงบทบาทของสารกึ่งตัวนำประเภทอัลลอยของธาตุหมู่ 4 เช่น ซิลิคอน (Si) เจอร์เมเนียม (Ge) และ ดีบุก (α -Sn) ในบทบาทที่จะเป็นสารที่จะใช้ในการพัฒนาเป็นอุปกรณ์ประเภทเหล่านี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุปกรณ์ประเภทเป็นแหล่งกำเนิดแสงและตัวตรวจจับแสง เป็นตัวนำแสง ตัวกัณแสง

แหล่งกำเนิดแสงและตัวตรวจจับแสง (light source and detector)

เพราะว่าการสร้างแหล่งกำเนิดแสงที่สามารถบรรจุลงในวงอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กได้ ซึ่งเทคโนโลยีนี้ยังคงต้องพึ่งพาสารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานแบบตรง (direct bandgap) เพราะจะให้ประสิทธิภาพของการกำเนิดแสงสูงกว่า ซึ่งได้แก่ GaAs เป็นต้น แต่เนื่องจากสารกึ่งตัวนำชนิดนี้ยังมีราคาที่สูงและที่สำคัญคือเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมเพราะเป็นสารที่เป็นพิษ ดังนั้นจึงเกิดแนวคิดที่จะค้นหาสารกึ่งตัวนำชนิดใหม่ แนวคิดที่เป็นไปได้ก็คือ อัลลอยของธาตุหมู่ 4 ได้แก่ Si, Ge, และ Sn (รวมไปถึง binary $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ และ $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$) ซึ่งราคาไม่แพง ไม่เป็นพิษ เข้ากันได้กับเทคโนโลยีของซิลิคอนในปัจจุบัน และจากผลการคำนวณทางทฤษฎีและผลการทดลองได้ยืนยันว่าโลหะผสมนี้สามารถเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานแบบตรงได้เมื่อปรับปรับปริมาณองค์ประกอบในอัลลอยอย่างเหมาะสม (Moontragoon et al., 2007) เช่นเช่นการปลูกโลหะผสมของ $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ โดยปริมาณของ ดีบุก (x) มากกว่า 15% โลหะผสมจะเปลี่ยนจากสารกึ่งตัวนำแบบแถบพลังงานไม่ตรงมาเป็นแบบแถบพลังงานตรง (He et al., 1997) และค่าช่องว่างแถบพลังงานนั้นสารปรับเปลี่ยนได้ตั้งแต่ประมาณ 0.3-0.0 eV ดังแสดงในรูปที่

7

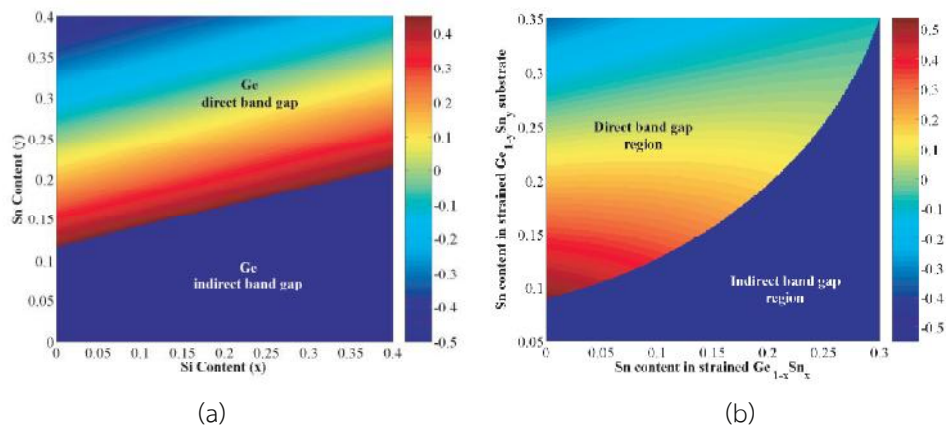


รูปที่ 7 ช่องว่างแถบพลังงานของตำแหน่ง Γ และ L ของโลหะผสม $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ตามปริมาณของ Sn จากผลการทดลองและการคำนวณโดยใช้แบบจำลองโลหะผสมแบบ virtual crystal approximation (VCA) และ Mixed atom (Moontragoon et al., 2007)

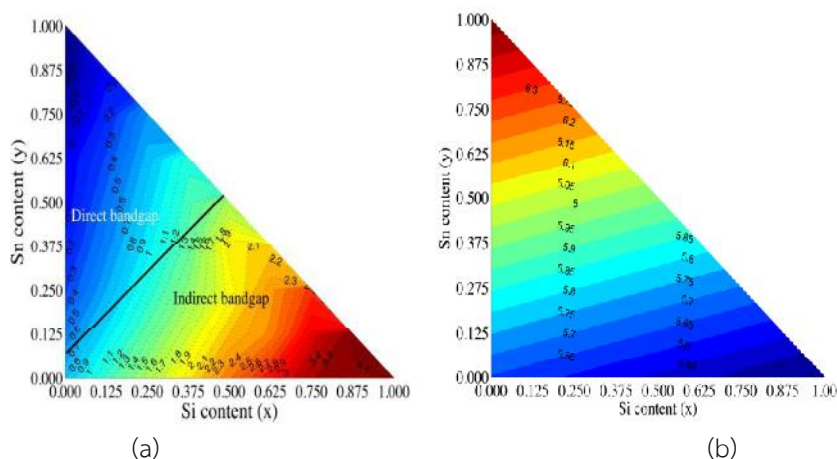
เราสามารถหาบริเวณที่แสดงสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำแบบแถบพลังงานตรงซึ่งอาศัยการปลูกผลึกลงบนชั้นสเตรตที่มีค่าคงที่แลตทิซใหญ่กว่าหรือเล็กกว่าเพื่อที่จะให้เกิดความเครียดบนฟิล์ม เช่นในกรณีของการปลูก Ge ลงบนชั้นสเตรต $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$ โดยเลือกปริมาณของ x และ y ที่ทำให้ชั้นสเตรตมีค่าคงที่แลตทิซที่มากกว่า Ge จะทำ

ให้ Ge เปลี่ยนจากสารกึ่งตัวนำแบบแถบพลังงานไม่ตรงมาเป็นแบบแถบพลังงานตรง ดังรูปที่ 8(a) และทำนองเดียวกันกับการปลูกโลหะผสม $\text{Ge}_{1-y}\text{Sn}_y$ บน $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ชั้นสเตรต ดังแสดงในรูป 8(b)

นอกจากนี้ยังสามารถทำได้โดยการปลูกผลึกอัลลอยของสารกึ่งตัวนำของ $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$ ไปบนซิลิคอนชั้นสเตรตโดยมี Ge เป็นตัวกลางหรือบัฟเฟอร์ ทำให้เราสามารถที่จะปลูกผลึกของ $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$ โดยไม่มีปัญหาเรื่องของความเค้น (stress) หรือความเครียด (strain) ที่จะเกิดฟิล์มเนื่องจากความไม่เท่ากันของค่าคงที่แลตทิซระหว่างชั้นสเตรตกับฟิล์ม เพราะว่าค่าคงที่แลตทิซอัลลอยของ $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$ สามารถปรับให้เท่าค่าคงที่แลตทิซของชั้นสเตรตหรือบัฟเฟอร์ได้ขึ้นกับปริมาณของในองค์ประกอบของอัลลอยดังแสดงในรูปที่ 9(a) และช่วงของค่าแถบพลังงานของอัลลอยชนิดนี้ยังสามารถปรับได้ ขึ้นกับปริมาณของสารองค์ประกอบในอัลลอยเช่นเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 9(b) นั้นแสดงให้เห็นว่าอัลลอยของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้นั้นยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้าน เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ และ เลเซอร์ ได้เช่นกัน



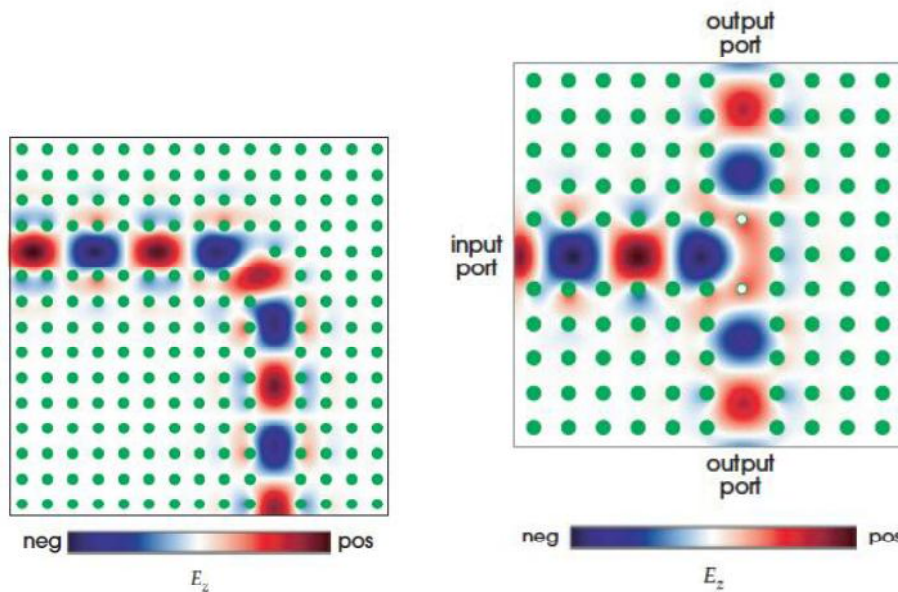
รูปที่ 8 ช่องว่างแถบพลังงานแบบพลังงานตรงและแบบไม่ตรงของ (a) Ge ที่ทำการปลูกบน $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$ ชั้นสเตรต และ (b) โลหะผสม $\text{Ge}_{1-y}\text{Sn}_y$ ที่ทำการปลูกบน $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ ชั้นสเตรต (Moontragoon et al., 2007)



รูปที่ 8 (a) ค่าคงที่แลตทิซของโลหะผสม $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$ และ (b) ช่องว่างแถบพลังงานแบบพลังงานตรงและแบบไม่ตรงของ $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$ (Pengpit et al., 2011)

การนำแสง (guide light)

คือ การออกแบบและสร้างท่อนำคลื่นของแสงโดยใช้ซิลิคอนเป็นวัสดุพื้นฐาน เพื่อที่จะใช้เป็นเส้นทางหรือท่อเพื่อให้แสงเดินทางจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ซึ่งต้องอาศัยการออกแบบนั้นจำเป็นต้องใช้ความรู้เกี่ยวกับการเดินทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางซึ่งในที่นี้ก็คือซิลิคอนที่มีออกแบบให้มีรูปทรงผลึกที่เหมาะสมกับความยาวคลื่นของแสงเพื่อลดการสูญเสียพลังงานของแสงระหว่างการเดินทาง ดังแสดงในรูปที่ 9

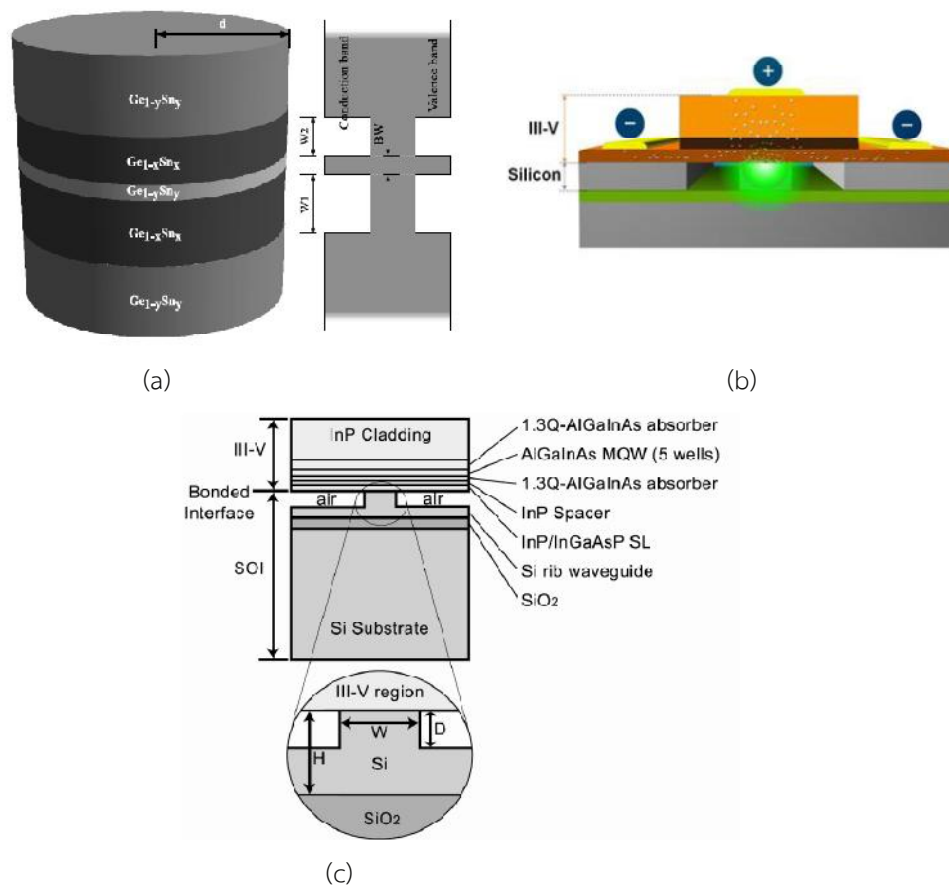


รูปที่ 9 การเคลื่อนที่ของแสงตามท่อนำคลื่นของแสงในลักษณะเส้นทางที่มีความโค้งหักมุมโดยอาศัยสมบัติของผลึกแสง (Joannopoulos et al., 2008)

ตัวกล้ำสัญญาณแสง (light modulator)

เป็นหน่วยที่จะทำหน้าที่เข้ารหัส (encode) และถอดรหัส (decode) ข้อมูลที่ถูกส่งมากับลำของแสง (beam of light) ซึ่งอาจจะเคลื่อนที่มาตามท่อนำคลื่นของแสง (optical wave guide) หรือ เส้นใยนำแสง (fiber optic) ก็ได้ วิธีที่นิยมก็คือการกล้ำสัญญาณโดยการโดยใช้แอมพลิจูด หรือที่เรียกว่าแอมพลิจูดมอดูเลเตอร์ (amplitude modulator) สำหรับการกล้ำสัญญาณทางแสงนั้นจะสามารถแบ่งออกเป็นสองอย่างคือ การกล้ำสัญญาณโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของดูดกลืนแสงของตัวกลาง หรือที่เรียกว่า absorptive modulator ซึ่งสามารถควบคุมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของสารที่นำมาทำเป็นอุปกรณ์กล้ำสัญญาณโดยอาศัยหลักการจากปรากฏการณ์ดังเช่น quantum confined stark effect หรือแม้กระทั่ง การเปลี่ยนแปลงจำนวนของพาหะ (free carrier concentration) เป็นต้น สำหรับการกล้ำสัญญาณอย่างที่สองนั้นจะอาศัยการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเหของสารนำมาทำเป็นอุปกรณ์กล้ำสัญญาณ หรือที่เรียกว่า refractive modulator ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะใช้สนามไฟฟ้าเป็นตัวทำให้เกิดการเปลี่ยนดัชนีหักเหของสาร (electro-optic effect) หรือไม่บางที่อาจจะใช้คลื่นเสียง หรือสนามแม่เหล็กแทน ซึ่งก็จะเรียกว่า acousto-optic effect หรือ magneto-optic effect ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะนำออลลอย $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$ มาออกแบบเป็นโครงสร้างในระดับนาโน โดยใช้เป็นส่วนของ barrier layers

ใน strain-free GeSn/SiGeSn quantum well (QW) electro-optic (EO) modulators ซึ่ง modulator ประเภทนี้จะมีขนาดเล็กและมีประสิทธิภาพมากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 10(a) โดยการเพิ่มปริมาณของ Sn ในอัลลอย GeSn จะทำให้ในส่วนของ direct bandgap ลดลงซึ่งในส่วนนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยีในช่วงความยาวคลื่นสูง (long wavelength silicon) ซึ่งใช้เป็นเครื่องตรวจจับสารเคมี สารชีวภาพ แก๊ส รวมไปถึงเครื่องตรวจจับคลื่นอินฟราเรด



รูปที่ 10 (a) โครงสร้างของ strain-free GeSn/SiGeSn double quantum well (QW) electro-optic (EO) modulators (Moontragoon et al., 2010) และ (b) และ (c) โครงสร้างของไฮบริดซิลิคอนเลเซอร์ (Hybrid silicon laser)

และยังมีอีกแนวคิดหนึ่งที่จะสร้างแหล่งกำเนิดแสงหรือโฟตอน คือการบรรจุสารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานแบบตรงและเหมาะที่จะทำเลเซอร์ อย่างเช่น InP AlGa InAs ลงในซิลิคอนเวเฟอร์ ชื่อว่า ไฮบริดซิลิคอนเลเซอร์ (hybrid silicon laser) ซึ่งเป็นการนำเอาสองชิ้นส่วนมาประกอบเข้าด้วยกันโดยใช้ชั้นของออกไซด์ที่มีความหนาประมาณ 25 อะตอมเป็นตัวยึดระหว่างสองชิ้นส่วน โดยส่วนที่หนึ่งจะเป็นส่วนของการกำเนิดและขยายแสง (generation and amplification) ซึ่งทำมาจากสารกึ่งตัวนำประเภท InP ใช้เป็นส่วนในการกำเนิดแสงซึ่งถูกยึดติดกับท่อนำคลื่นซิลิคอน (silicon waveguide) ที่ทำหน้าที่เป็นโพรงเลเซอร์ (laser cavity) และส่วนที่สองจะเป็น

ส่วนของซิลิคอนเวเฟอร์ดังแสดงในรูปที่ 10(b) ดังนั้นจึงสามารถที่จะบรรจุไฮบริดซิลิคอนเลเซอร์หลายๆอันลงไปชิพ (chip) เพื่อที่จะทำเป็นอุปกรณ์ต่างๆได้

สรุป

จะเห็นได้ว่าเทคโนโลยีของผลึกแสงที่ใช้ซิลิคอน (silicon photonics) นั้นเป็นความพยายามที่จะปฏิวัติรูปแบบของคอมพิวเตอร์โดยการสร้างอุปกรณ์การสื่อสารทางแสงจากซิลิคอนซึ่งมีมากในธรรมชาติ ไม่เป็นพิษ และเรามีความรู้และเข้าใจเกี่ยวกับการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากสารกึ่งตัวนำชนิดนี้มายาวนาน แล้วนำอุปกรณ์ทางแสงเหล่านั้นมาทำงานร่วมกัน เพื่อให้มีการส่งข้อมูลได้เร็วขึ้น สูญเสียพลังงานในรูปความร้อนน้อยลง ดังนั้นการนำเทคโนโลยีการสื่อสารทางแสงไปสู่อุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์นั้นจะเป็นการเปลี่ยนแปลงการทำงานของคอมพิวเตอร์จาก electronic computing ไปเป็น photonic computing เพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพและคุณภาพการทำงานของคอมพิวเตอร์ให้ดียิ่งขึ้นไป

เอกสารอ้างอิง

- He, G. and Atwater, H A (1997). Interband Transitions in $\text{Sn}_x\text{Ge}_{1-x}$ Alloys. *Phys. Rev. Lett.* 79: 1937.
- Joannopoulos, J. D., Johnson, S., Mead, R. D. and Winn, J. N. (2008). *Photonic Crystals Molding the flow of light*. Princeton University Press.
- Moontragoon, P., Ikoncic, Z. and Harrison, P. (2007). Band structure calculation of SiGeSn alloy: achieving direct band gap materials. *Semicond. Sci Technol.* 22: 742.
- Moontragoon, P., Vukmirovic, N., Ikoncic, Z. and Harrison, P. (2010). SnGe Asymmetric Quantum Well Electroabsorption Modulators for Long-Wave Silicon Photonics. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics.* 16: 100.
- Park, H., Fang, A. W., Kodama, S. and Bowers, J. E. (2005). Hybrid silicon evanescent laser fabricated with a silicon waveguide and III-V offset quantum wells. *Opt. Express.* 13: 9460.
- Pongpit, P., Moontragoon, P. and Maensiri, S. (2011). Band Structure Calculation of $\text{Ge}_{(1-x-y)}\text{Si}_x\text{Sn}_y$ Ternary Alloy. *KKU. Res. J.* 16: 786.
- Qui, M. and He, S.(1999). Large complete band gap in two-dimensional photonic crystals with elliptic air hole. *Phys. Rev. B.* 60: 10610.
- Science (1999). Breakthrough of the year. *Science.* 286: 2238.

