



การศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนส์ของสารประกอบกึ่งตัวนำ แกเลียมอาร์เซไนด์

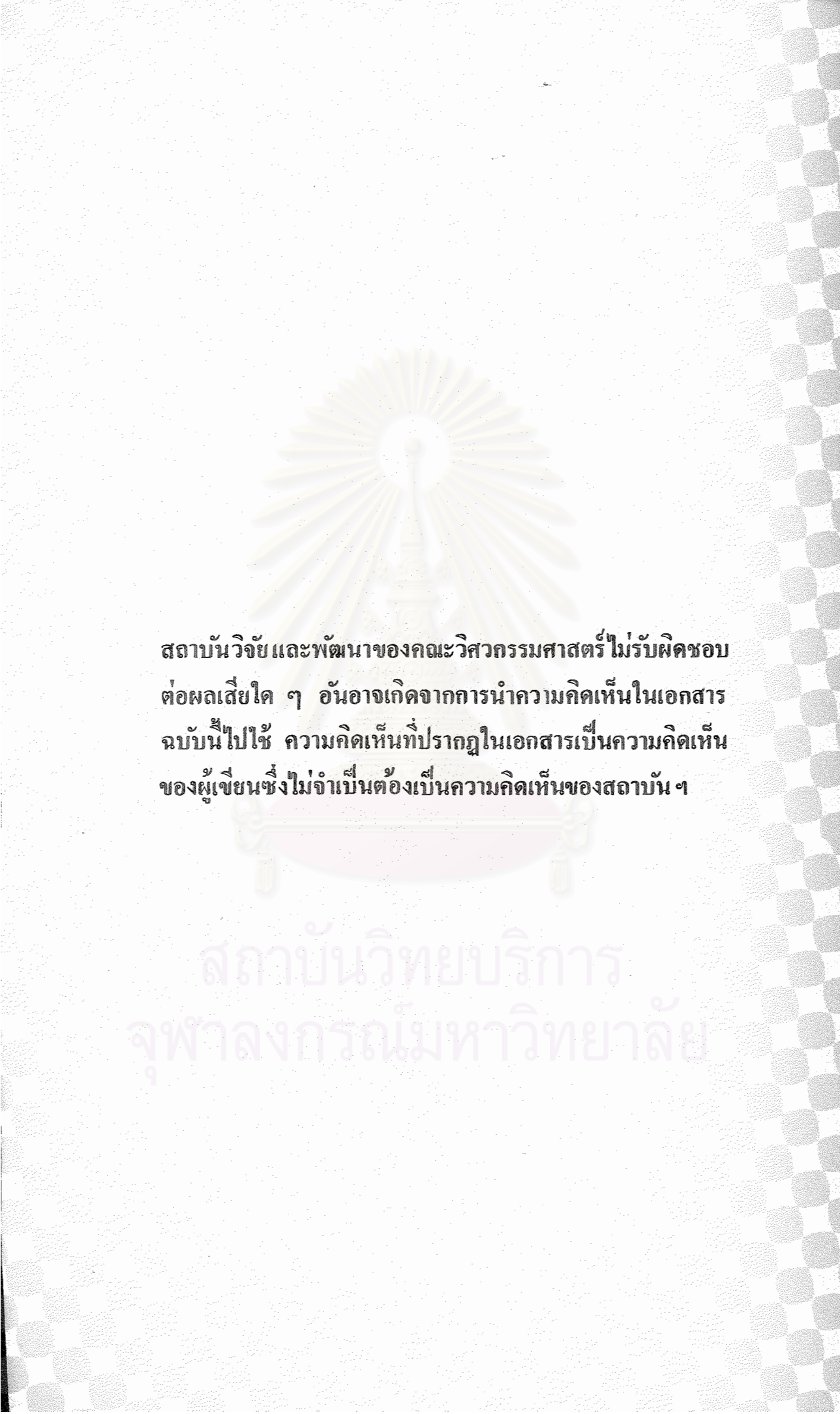
โดย

ดร. สมศักดิ์ บัญญาแก้ว
ดร. มนต์ร์ สวัสดิ์สูงขจร
ดร. บรรจง ไทประเสริฐวงศ์
ดร. เกรียงศักดิ์ เถлимศิริระกูล
ดร. ชุมพล อัครเสนา

โครงการวิจัย เลขที่ 29G-EE-2530
ทุนส่งเสริมการวิจัยงบประมาณแผ่นดิน ปี 2530

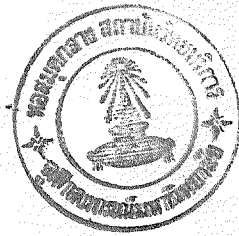
สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
กรุงเทพฯ ๑
กุมภาพันธ์ ๒๕๓๑

จท
วศ 15
004575



สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์ไม่รับผิดชอบ
ต่อผลเสียใด ๆ อันอาจเกิดจากการนำความคิดเห็นในเอกสาร
ฉบับนี้ไปใช้ ความคิดเห็นที่ปรากฏในเอกสารเป็นความคิดเห็น
ของผู้เขียนซึ่งไม่จำเป็นต้องเป็นความคิดเห็นของสถาบันฯ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



โครงการวิจัยการศึกษาไฟโตลูมิเนสเซนซ์ของสารประกอบกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์

โดย

ศ. ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว

(วุฒิ) B.E., M.E., and Ph.D (Osaka University)

รศ. ดร. มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร

(วุฒิ) วศ.บ. (ไฟฟ้า) เกียรตินิยม จุฬาฯ, วศ.ม. (ไฟฟ้า) จุฬาฯ
D.E.A. and Dr. Ing, 1' ENSEEIHT, Toulouse, France

รศ.ดร. บรรยง โตประเสริฐพงศ์

(วุฒิ) วศ.บ. (ไฟฟ้า) เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง จุฬาฯ
D.E.A. and Dr. Ing, University of Paul Sabatier, Toulouse,
France

ดร. เกรียงศักดิ์ เฉลิมศิริกุล

(วุฒิ) B.E. (E.E.) Auckland, M.S.E.E. and Ph.D. (Notre-Dame)

ผศ. ดร. ชุมพล อันตรเสน

(วุฒิ) วศ.บ., วศ.ม. (ไฟฟ้า) จุฬาฯ
Dr. Ing. INSA TOULOUSE FRANCE

โครงการวิจัยเลขที่ 29G-BE-2530

ทุนส่งเสริมการวิจัยงบประมาณแผ่นดินปี 2530

สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพฯ

กุมภาพันธ์ 2531

รายงานฉบับสมบูรณ์ของโครงการวิจัย



เรื่อง

"การศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของสารประกอบกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์"

(Study on Photoluminescence of Gallium Arsenide)

ผู้ทำวิจัย : ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว
ดร. มนตรี สวัสดิ์คฤงฆาร
ดร. บรรยง ไทประเสริฐวงศ์
ดร. เกียรติศักดิ์ เฉลิมติระกุล
ดร. ชุมพล อันตรเสน

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทุนวิจัย : ทุนวิจัยงบประมาณแผ่นดิน ปีงบประมาณ 2530 เป็นเงิน 200,000 บาท

ระยะเวลาทำวิจัยที่กำหนดให้ : พฤศจิกายน 2529 - ตุลาคม 2530

รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 1 : ส่งเมื่อ วันที่ 2 มิถุนายน 2530

รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 2 : ส่งเมื่อ วันที่ 24 กรกฎาคม 2530

รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 3 : ส่งเมื่อ วันที่ 2 พฤศจิกายน 2530

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ : ส่งเมื่อ วันที่ 25 มกราคม 2531



"การศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของสารประกอบกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซनाйд"

บทคัดย่อ

แสงเลเซอร์อาร์กอนถูกใช้กระตุ้นให้เกิดการเรืองแสงในสารแกลเลียมอาร์เซนาйд ซึ่งเป็นผลึกที่ทดลองปลูกขึ้นโดยเทคนิคเอพิแทกซีแบบเฟสของเหลว การเรืองแสงที่เกิดขึ้นที่ 77°K นี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับความสามารถในการเรืองแสงของสิ่งประดิษฐ์ที่ทำจากผลึกแกลเลียมอาร์เซนาйдนี้ซึ่งมีค่าความยาวคลื่น 8400 \AA สเปกตรัมของแสงจะเคลื่อนไปมีค่าสั้นลง และอยู่ในช่วงตามองเห็นได้เป็นสีแดง (6400 \AA) เมื่อมีการเติมอลูมิเนียมในผลึกผสมแกลเลียมอลูมิเนียมอาร์เซนาйд รายละเอียดของสเปกตรัมของโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่ได้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับคุณภาพผลึก ชนิดและปริมาณเชิงเปรียบเทียบของสารเจือปนที่ใช้ด้วย

Abstract

Argon laser was used to excite the luminescence from Gallium Arsenide crystals which were experimentally grown by Liquid Phase Epitaxy technique. The luminescence intensity at 77°K will give technical data of Gallium Arsenide when it was fabricated into emitting devices with wavelength of 8400 \AA . The spectrum will be shifted to shorter wavelength with visible red color (6400 \AA) when Aluminum was used in the mixed crystal of Gallium Aluminum Arsenide. The detail of photoluminescence spectra will also provide informations about crystallography, impurity and its content.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	iii
Abstract.....	iii
1. บทนำ.....	1
2. ทฤษฎี.....	3
2.1 ลูมิเนสเซนซ์.....	4
2.2 ไฟโตลูมิเนสเซนซ์.....	6
3. การทดลอง.....	7
3.1 ตัวอย่างสาร.....	7
3.2 เครื่องมือทดลอง.....	10
4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	12
4.1 ไฟโตลูมิเนสเซนซ์ของแกเลเลียมอาร์เซนายด์.....	12
4.2 ไฟโตลูมิเนสเซนซ์ของแกเลเลียมอลูมิเนียมอาร์เซนายด์.....	16
5. สรุปผล.....	19
6. กิจกรรมประกาศ.....	19
7. เอกสารอ้างอิง.....	20

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เลขหมู่	๐๙
เลขทะเบียน	๐๙ 15 004575
วัน.เดือน.ปี	๑๘ มี.๖ 31



1. บทนำ

แกลเลียมอาร์เซไนด์ เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำที่มีบทบาทสูงทางด้านออปโตอิเล็กทรอนิกส์ จึงถูกพัฒนามาทำเป็นสิ่งประดิษฐ์ทางแสงมากมาย⁽¹⁾ การพัฒนาโครงสร้างแบบดับเบิลเฮเทอโรโรของ GaAs/GaAlAs ทำให้สามารถสร้างเลเซอร์สารกึ่งตัวนำที่ใช้งานได้ที่อุณหภูมิห้อง⁽²⁾ และเป็นหัวใจสำคัญในการประยุกต์ระบบสื่อสารด้วยแสงผ่านเส้นใยแสง ประเด็นสำคัญในการวิจัยและพัฒนาวัสดุชนิดนี้ได้แก่การเตรียมสาร GaAs ที่มีคุณภาพดี เพื่อใช้สร้างเลเซอร์หรือไดโอดเปล่งแสงที่มีกำลังสูง มีเสถียรภาพดี ใช้งานได้นานหลายหมื่นชั่วโมง ปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์ที่ทำจาก GaAs นี้ใช้งานอย่างกว้างขวางในเชิงการค้าอยู่ในระบบสื่อสารด้วยเส้นใยแสง⁽³⁾ เพื่อใช้ติดต่อข้อมูลและข่าวสารระหว่างเมืองที่มีระยะทางไกลได้แล้ว นอกจากนี้ยังมีการนำเอาระบบเหล่านี้ไปใช้กับด้านการควบคุมกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมใช้ในระบอบอาวุธทางการทหาร ใช้ในระบบคอมพิวเตอร์

การประยุกต์ใช้งานของสิ่งประดิษฐ์ที่ทำจาก GaAs ล่าสุดได้แก่ เครื่องคอมพิวเตอร์ดีสค์และเลเซอร์ปริ้นเตอร์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีตลาดขนาดใหญ่โตมาก ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านแกลเลียมอาร์เซไนด์จึงเป็นวิทยาการที่ต้องติดตาม เพื่อการสร้างความก้าวหน้า และรากฐานของอุตสาหกรรมออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่จะเกิดขึ้นในอนาคตอันใกล้

แกลเลียมอาร์เซไนด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานแบบตรง (Direct Bandgap) ดังนั้นการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอน-โฮลข้ามแถบพลังงานจะยังผลให้เกิดการเปล่งแสงหรือปลดปล่อยโฟตอนที่มีประสิทธิภาพ และมีพลังงานโฟตอนใกล้เคียงกับค่าแถบพลังงานของสารนั้น ค่าความยาวคลื่นของโฟตอนจึงกำหนดได้จาก $\lambda = hc/E_g$ โดยที่ h เป็นค่าคงที่ของพลังค์ และ c เป็นความเร็วแสงในสุญญากาศ ความยาวคลื่นของโฟตอนที่ปลดปล่อยจากสารแกลเลียมอาร์เซไนด์มีค่าประมาณ 9000 Å ที่อุณหภูมิ 300°K ความกว้างเชิงสเปกตรัมของการเปล่งแสงจะกำหนดได้จากฟังก์ชันของความหนาแน่นของสถานะพลังงาน (density of states function) ความเป็นไปได้ของการเปลี่ยนสถานะ (transition probabilities) และอุณหภูมิ

การรวมตัวของคู่อิเล็กตรอน-โฮลนั้น สามารถกระทำให้เกิดได้โดยการฉีดพาหะ (อิเล็กตรอน หรือ โฮล) ผ่านหัวต่อพีเอ็นที่ทำจากสารแกลเลียมอาร์เซไนด์ด้วยการไบแอสตามกลไกนี้คือการทำงานของไดโอดเปล่งแสงนั่นเอง และในการเพิ่มประสิทธิภาพของไดโอดเปล่งแสง หรือชักนำให้เกิดกลไกของเลเซอร์นั้นยังจำเป็นต้องพัฒนาหัวต่อพีเอ็นที่ใช้สารผสมแกลเลียมอาลูมิเนียมอาร์เซไนด์ด้วย $Ga_{1-x}Al_xAs$ เรียกว่าหัวต่อแบบเฮเทอโร

ในโครงสร้างแบบดับเบิลเฮเทอโรโร การฉีดอิเล็กตรอนหรือโฮลนั้น จะกระทำจากสารที่มีแถบพลังงานโต (GaAlAs ที่มีปริมาณ Al สูง) เข้าไปยังสารที่มีแถบพลังงานแคบกว่า ซึ่งเป็นชั้น Active ของสิ่งประดิษฐ์ ซึ่งอาจเป็นชั้นสาร GaAs ที่มีคุณภาพดี พาหะที่ฉีดนี้จะเป็นอิเล็กตรอนหรือโฮล ก็แล้วแต่ว่าชั้นสารนั้นมีการ doping อย่างไรไว้ เช่น ถ้า

เป็นชั้นสารที่โด๊ปเป็นแบบพีไอว่ พาหะที่ฉีดจะเป็นอิเล็กตรอน ชั้นสารที่มีแถบพลังงานกว้างยังช่วยให้เกิดการ confinement ของพาหะทำให้การรวมตัวของพาหะที่เกิดขึ้นในชั้นสารที่มีแถบพลังงานแคบมีประสิทธิภาพดี กำแพง โปเต้นเซียลที่บริเวณรอยต่อของชั้นสารที่มีแถบพลังงานแตกต่างกันี่จะมีขนาดเป็นหลายเท่าของ kT ในทางปฏิบัติกำแพง โปเต้นเซียลที่มีขนาด $0.2-0.3$ eV จะให้ผลของ confinement ที่ดีแม้ที่อุณหภูมิห้องขนาดความยาวคลื่นของแสงที่เปล่งมาจะมีค่าสั้นลง หากมีการเติม Al เข้าไปในเนื้อสาร GaAlAs มากขึ้นด้วย

โครงสร้างแบบดับเบิลเฮเทอโรโรนั้นยังมีข้อดีในด้านการเป็นท่อแสง (Waveguide) ซึ่งจะบีบแสงให้วิ่งอยู่ในระนาบของหน้าต่อพีเอ็นด้วย ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่จำเป็นของการเป็นเลเซอร์ไดโอด การเติม Al ลงในสาร GaAlAs ช่วยลดค่าดัชนีหักเหลง ทำให้ผลการเป็นท่อแสงเด่นชัดขึ้น

นอกจากการ confinement ของพาหะและแสงที่เกิดขึ้นภายในเนื้อสารแกลเลียมอาร์เซไนด์แล้ว การเปล่งแสงจะดีได้หากคุณภาพของผลึกสารประกอบกึ่งตัวนำที่ใช้ทำหน้าต่อแบบดับเบิลเฮเทอโรโรนี้ดีและปราศจากจากจุดบกพร่องทางผลึก ซึ่งในทางปฏิบัติมักเกิดขึ้นจาก Lattice mismatch ของสาร GaAs และ AlAs ซึ่งมีน้อยมาก

คุณสมบัติต่าง ๆ ของผลึกแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่ทดลองปลูกขึ้นเพื่อใช้ทำสิ่งประดิษฐ์ต่าง ๆ โดยเฉพาะสิ่งประดิษฐ์ทางแสง เช่น ไดโอดเปล่งแสง เลเซอร์ไดโอด จะสามารถตรวจสอบและวิเคราะห์ได้จากการเรืองแสง (Luminescence) ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากการกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence) ⁽⁴⁾ ข้อมูลที่ได้จากโฟโตลูมิเนสเซนซ์นี้จะบอกถึงคุณภาพของผลึกชนิดของสารเจือปน ปริมาณสารเจือปน ประสิทธิภาพในการเปล่งแสง สเปกตรัมของแสงที่เปล่งออกมา ปริมาณ Al ในผลึกผสม GaAlAs ฯลฯ

การทดลองโฟโตลูมิเนสเซนซ์นี้จะใช้แสงเลเซอร์เป็นตัวกระตุ้น เพราะแสงเลเซอร์มีความเข้มสูงและสามารถยิงได้เฉพาะจุดที่ต้องการศึกษา พลังงานโฟตอนของแสงเลเซอร์ที่ใช้งานควรมีค่าสูง จึงต้องเลือกแสงที่มีความยาวคลื่นสั้น เช่น เลเซอร์อาร์กอนในการศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของแกลเลียมอาร์เซไนด์ ค่าความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์อาร์กอนคือ 4880 \AA ซึ่งจะกระตุ้นให้เกิดการเรืองแสงที่ประมาณ 8300 \AA จากตัวอย่างแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่อุณหภูมิ 77 K ค่าความยาวคลื่นของแสงที่เรืองนี้จะสั้นลงเมื่อมีการเติมอลูมิเนียมลงในผลึกผสมแกลเลียมอลูมิเนียมอาร์เซไนด์ เพราะสารประกอบกึ่งตัวนำที่เติมอลูมิเนียมนี้จะมีแถบพลังงานที่โตขึ้นตามสัดส่วนของสารผสม ⁽⁵⁾

การเติมอลูมิเนียมในผลึกผสมแกลเลียมอลูมิเนียมอาร์เซไนด์จะทำให้ได้สารประกอบกึ่งตัวนำที่จะนำไปประยุกต์ใช้สร้างเลเซอร์ไดโอดที่เปล่งแสงในช่วงตามมองเห็น (Visible Laser Diode) เช่น สีแดง (6500 \AA) ซึ่งจะมาทดแทนการใช้งานของ He-Ne Laser ซึ่งมีขนาดโต กินไฟ และราคาแพงกว่าด้วย ตลาดของเลเซอร์ไดโอดที่เปล่ง

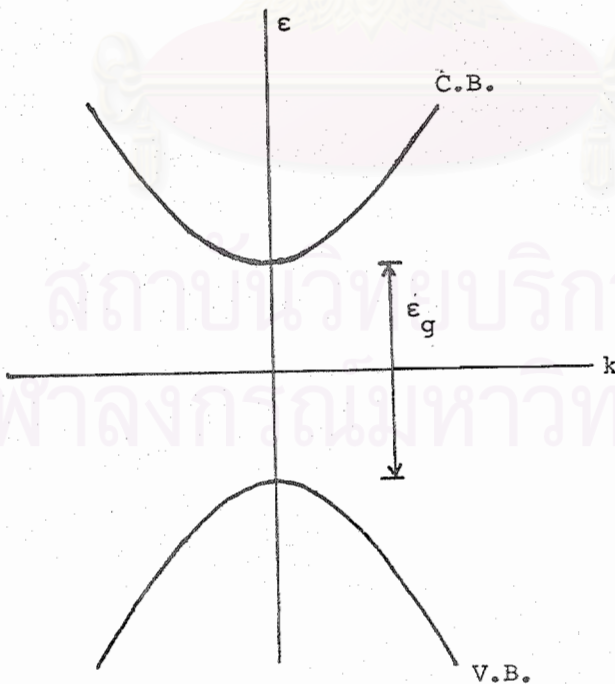
แสงในช่วงคลื่นนี้มีมากเพราะเป็นที่ต้องการสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้ากับบ้าน และสำนักงาน เช่น คอมพิวเตอร์ และเลเซอร์ปริ้นเตอร์

การศึกษาโฟโตนิกส์ของสารกึ่งตัวนำ III-V เช่น GaAs เป็นพื้นฐานและขั้นตอนที่สำคัญในการพัฒนาคุณภาพของสารประกอบกึ่งตัวนำที่ใช้งานในการผลิตสิ่งประดิษฐ์ทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่นับวันจะมีบทบาทสูงในเชิงการค้า และใช้งานอย่างกว้างขวางในชีวิตประจำวันของเรา

ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีเอพิแทกซีเฟสของเหลว เพื่อใช้ปลูกผลึก GaAs เช่นายต์มาตั้งแต่ปี 2526^(๑) โดยติดตั้งเตาเอพิแทกซีแบบแนวนอน ชั้นผลึกที่ปลูกได้นี้จะนำไปใช้สร้างสิ่งประดิษฐ์ที่เรืองแสงได้ต่อไป การศึกษาโฟโตนิกส์ของสารกึ่งตัวนำ III-V จะเป็นขั้นตอนสำคัญของการพัฒนาคุณภาพของผลึก และให้ข้อมูลป้อนกลับเพื่อควบคุมกระบวนการผลิตสิ่งประดิษฐ์ที่จะทดลองทำขึ้นต่อไป

2. ทฤษฎี

สารประกอบกึ่งตัวนำ เช่น GaAs เช่นายต์มีแถบพลังงานเป็นแบบตรง (Direct Bandgap) กล่าวคือค่าต่ำสุดของคอนดักชันแบนด์และค่าสูงสุดของวาเลนซ์แบนด์มีค่า k ตรงกัน ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แถบพลังงานแบบตรงของ GaAs เช่นายต์

จากคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่สำคัญนี้จึงทำให้แกเลียมอาร์เซไนด์มีคุณสมบัติทางแสงที่เด่นชัด เช่น มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงค่าสูง และคมชัดเมื่อคลื่นแสงที่พลังงานเข้าใกล้ค่าแถบพลังงานต้องห้าม ($E_g = 1.43 \text{ eV}$ ที่ 77°K) นอกจากนี้ลักษณะของแถบพลังงานแบบตรงนี้ยังเปิดโอกาสให้กลไกการรวมตัวของพาหะส่วนเกิน (Excess carrier) เกิดขึ้นได้ง่าย ทำให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานในรูปของโฟตอนออกมา จึงเกิดการเรืองแสงได้ คุณสมบัติเช่นนี้จะไม่เกิดกับสารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานแบบแฉก (Indirect Bandgap) เช่น ซิลิกอน หรือ เจอเมเนียม

กลไกการรวมตัวของพาหะและเปล่งแสงได้นี้อาจกระตุ้นให้เกิดได้หลายวิธีแล้วแต่วิธีการฉีดพาหะเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ เช่น ใช้ความร้อน (Thermo luminescence) ใช้ไฟฟ้า (Electroluminescence) ใช้ลำอิเล็กตรอน (Cathodoluminescence) และใช้แสง (Photoluminescence)

โฟโตลูมิเนสเซนส์จำเป็นวิธีการที่เราเลือกใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เพราะตัวอย่างที่ใช้ศึกษาจะไม่ถูกทำลาย และสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตได้ต่อไปหลังจากการศึกษา ดูโฟโตลูมิเนสเซนส์แล้ว

2.1 ลูมิเนสเซนส์ (Luminescence)

การที่พาหะส่วนเกิน (excess carrier) เกิดการรวมตัวแล้วปล่อยพลังงานในรูปของโฟตอนนั้น เราเรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า การเรืองแสง (Luminescence) ปรกติแล้วการรวมตัวของพาหะที่เรืองแสงได้นี้จะมีความเกี่ยวข้องในเชิงแข่งขันกัน กับปรากฏการณ์การรวมตัวของพาหะแบบไม่เรืองแสงด้วยการปลดปล่อยโฟนอนแทน หรือผ่านกระบวนการแบบออร์เจอร์ (Auger) ถ้ากำหนดให้ค่าเวลาชีวิตเฉลี่ยของกลไกการรวมตัวของพาหะแบบเรืองแสงเป็น τ_r (radiative life time) และค่าเวลาชีวิตเฉลี่ยของกลไกการรวมตัวของพาหะแบบไม่เรืองแสงเป็น τ_{nr} (non-radiative life time) ค่าของประสิทธิภาพเชิงควันตัม (Quantum efficiency) ของการเรืองแสงที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำจะกำหนดได้จาก

$$\begin{aligned} \eta_{int} &= \frac{1/\tau_r}{(1/\tau_r) + (1/\tau_{nr})} \\ &= \frac{\tau_{nr}}{\tau_r + \tau_{nr}} \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

แต่ถ้าจะคิดถึงปริมาณโฟตอนที่เปล่งออกไปจากสารกึ่งตัวนำจริง ๆ จะต้องหักลบปริมาณโฟตอนที่ถูกดูดกลืนกลับเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำนั้น และโฟตอนส่วนที่สะท้อนกลับที่ผิวด้วย

เมื่อมีเวกเตอร์ไปเต็นเชี่ยล A_g ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเข้ามาบรรจบกัน



(Perturbation) จะเกิด Direct Transition ขึ้นจากสถานะ $|u\rangle$ ไปยังสถานะ $|l\rangle$ ทั้งในรูปการดูดกลืนแสงและการปล่อยแสงแบบถูกเร่ง ความเป็นไปได้ของการปล่อยแสง เนื่องจากการเปลี่ยนสถานะจาก $|u\rangle$ มายัง $|l\rangle$ นั้นจะเขียนได้ดังนี้

$$P_{em} = -\frac{2\pi}{h} \frac{e^2}{m^2} \sum_{\lambda} |A_{o\lambda}|^2 \sum_{u,l} |H_{ul}|^2 \delta(\epsilon_u - \epsilon_l - h\omega) \dots (2)$$

โดยที่

$$|H_{ul}|^2 = |\langle l | \exp(-i\mathbf{k}_\lambda \cdot \mathbf{r}) \mathbf{e}_\lambda \cdot \mathbf{p} | u \rangle|^2 \dots (3)$$

และ $A = \frac{\Sigma}{\lambda} [A_{o\lambda} \mathbf{e}_\lambda \exp\{i(\mathbf{k}_\lambda \cdot \mathbf{r} - \omega t)\} + c.c.]$ ส่วน ϵ_u, ϵ_l เป็นพลังงานของสถานะ $|u\rangle$ และ $|l\rangle$

ความเป็นไปได้ในการเกิด Spontaneous emission จะเป็นไปตามสูตร

$$R_{sp}(h\omega) = -P_{em} f_u (1 - f_l) \dots (4)$$

โดยที่ f_u, f_l เป็นความเป็นไปได้ในการพบอิเล็กตรอนที่สถานะ $|u\rangle$ และ $|l\rangle$ ตามลำดับ ฉะนั้น

$$R_{sp}(h\omega) = \frac{2\pi}{h} \sum_{u,l} |H_{ul}^{em}|^2 G(h\omega) d(h\omega) f_u (1 - f_l) \delta(\epsilon_u - \epsilon_l - h\omega) (5)$$

$G(h\omega)$ เป็น state density ของโฟตอน และ $|H_{ul}^{em}|^2 = \frac{2\pi}{\epsilon_\lambda m^2 \omega} |\langle l | \exp(-i\mathbf{k}_\lambda \cdot \mathbf{r}) \mathbf{e}_\lambda \cdot \mathbf{p} | u \rangle|^2$ สถานะ $|u\rangle$ และ $|l\rangle$ นั้นจะมีเงื่อนไขที่แตกต่างกันออกไปแล้วแต่ว่าจะเกิดขึ้นแบบใด เช่น เป็นการปล่อยโฟตอนแบบ spontaneous ที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นของแถบพลังงานกับชั้น localized state หรือเกิดแบบ Interband Transition ก็ได้

(ก) Transition ระหว่างชั้นพลังงานคอนดักชันกับแอกเซปเตอร์

ถ้ากำหนดให้ state density ของชั้นพลังงานคอนดักชันมีค่าเป็น $g_c(\epsilon)$ และความเข้มข้นของสารเจือปนที่เป็นแอกเซปเตอร์มีค่า N_A โดยมี degeneracy เท่ากับ ξ_A แล้ว

$$\sum_{u,l} f_u (1 - f_l) = g_c(\epsilon) f_u \xi_A N_A (1 - f_l) \dots (6)$$

ถ้าหากคอนดักชันแบนด์เป็น parabolic จะได้ว่า $g_c(\epsilon)$ มีค่า

$$(2\pi)^{-2} (2m_e^* \hbar^2)^{3/2} (\epsilon - \epsilon_g)^{1/2} \text{ และถ้า } f_u \propto \exp \{-(\epsilon - \epsilon_g)/k_B T\}$$

$$R_{sp}(h\nu) \propto \{h\nu - (\epsilon_g - \Delta\epsilon_A)\}^{1/2} \exp \left[-\{h\nu - (\epsilon_g - \Delta\epsilon_A)\}/k_B T \right] \dots (7)$$

โดยที่ $\Delta\epsilon_A$ เป็นพลังงานของเอคเซปเตอร์

การเรืองแสงที่เกิดขึ้นจะมี Spectral peak อยู่ที่ค่าประมาณ $\epsilon_g - \Delta\epsilon_A$

(ข) Interband Transition

ทำนองเดียวกัน Transition probability ระหว่างคอนดักชันแบนด์และวาเลนซ์แบนด์จะมีค่า

$$R_{sp}(h\nu) \propto (h\nu - \epsilon_g)^{1/2} \exp \left\{ -(h\nu - \epsilon_g)/k_B T \right\} \dots (8)$$

การเรืองแสงจะมี Peak ตรงกับโฟตอนที่มพลังงานเท่ากับ ϵ_g นั้นเอง

จากทฤษฎีของลูมิเนสเซนซ์นี้จะเห็นว่าข้อมูลที่ได้อาจบอกถึงระดับชั้นพลังงานของสารเจือปน และปริมาณของสารเจือปนในเชิงเปรียบเทียบได้หาก Transition ที่เกิดขึ้นนั้นมีต้นกำเนิดมาจากชั้นพลังงานของสารเจือปน เช่น กรณีของเอคเซปเตอร์ในสูตรที่ (6) และ (7) และบอกค่าแถบพลังงานต้องห้ามของสารกึ่งตัวนำได้ หาก Transition นั้นเป็น Interband เช่น Transition Probability จะมีค่าสูงสุดเมื่อ $h\nu$ เท่ากับ ϵ_g ดังสูตรที่ (8)

2.2 โฟโตลูมิเนสเซนซ์

โฟโตลูมิเนสเซนซ์เป็นปรากฏการณ์การเรืองแสงจากสารเมื่อสารนั้นถูกกระตุ้นด้วยการฉายแสงที่มีความเข้มสูง โดยมีกระบวนการ 3 ขั้นตอน คือ 1) ดูดกลืนแสงที่มากกระตุ้นเพื่อสร้างคู่อิเล็กตรอน - โฮล 2) คู่อิเล็กตรอน - โฮลจะรวมตัวกันเพื่อคายพลังงานแสง 3) พลังงานแสงจะปล่อยออกจากตัวอย่าง เนื่องจากการกระตุ้นด้วยแสง เพื่อสร้างคู่อิเล็กตรอน - โฮลนี้จะเกิดมากที่ผิว ดังนั้นโฟโตลูมิเนสเซนซ์จึงมีใช้คุณสมบัติของเนื้อภายในของสารอย่างแท้จริง แต่จะเป็นข้อมูลที่บริเวณผิวและลึกเข้าไปในเนื้อสารเท่าที่สารนั้นจะสามารถดูดกลืนแสงที่มากกระตุ้นนั้นได้ (หรือเท่ากับค่าความยาวในการแพร่ซึมของพาหะที่บริเวณผิวที่ถูกฉายแสง) การเตรียมตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นฟิล์มบางจึงเหมาะสมกับงานทดลองโฟโตลูมิเนสเซนซ์นี้

แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้กระตุ้นให้เกิดโฟโตลูมิเนสเซนซ์นี้ได้แก่ เลเซอร์อาร์กอนซึ่งมีสีน้ำเงิน ($\lambda = 4880 \text{ \AA}$) พลังงานโฟตอนจึงมีขนาดโตพอที่จะใช้กระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอนโฮล

ในสารเกล็ดเยี่ยมอาร์เซนายด์ หรือ เกล็ดเยี่ยมอาลูมิเนียมอาร์เซนายด์ เนื่องจากแสงเลเซอร์มีโคฮีเรนซี (coherency) ดี ดังนั้นการวิเคราะห์แสงที่เรืองออกมาจึงกระทำได้ง่ายเพราะสเปกตรัมของแสงมีความเด่นชัด ขนาดของสัญญาณก็มีค่าสูง เพราะแสงที่มากระตุ้นมีความเข้มสูง นอกจากนี้แสงเลเซอร์มีลักษณะเป็นลำสามารถบีบลำแสงให้เป็นจุดเล็ก ๆ ได้ตามต้องการ การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์จึงสามารถกระทำได้ในบริเวณที่เป็นจุดเล็ก ๆ (Localized) ทำให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะการกระจายตลอดจนความสม่ำเสมอของโฟโตลูมิเนสเซนซ์ได้ด้วย

โฟโตลูมิเนสเซนซ์จึงเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสารกึ่งตัวนำ เพื่อศึกษาปริมาณสารเจือปนหรือจุดบกพร่องต่าง ๆ โดยสามารถตรวจสอบได้ต่ำถึง $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ โดยที่ไม่ต้องทำลายตัวอย่าง (Non-destructive Test) และไม่จำเป็นต้องใช้ตัวอย่างที่มีผิวเรียบเสมอไป จากค่า Half width ของเส้นสเปกตรัมที่ได้จะสามารถวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นตลอดจนชนิดของสารเจือปนที่มีอยู่ในเนื้อสารได้โดยการเปรียบเทียบกับค่าที่ทราบไว้ก่อนแล้ว⁽⁷⁾ จากลักษณะของ Line-shapes และ Half-width ที่เปลี่ยนกับอุณหภูมิยังสามารถนำไปวิเคราะห์ได้ว่าเซนเตอร์ต่าง ๆ นั้นเป็นแบบ Simple หรือ Complex และวิเคราะห์ได้ว่าเป็นของชั้นโคเนอร์ หรือชั้นเอกเซนเตอร์ ถ้าอิเล็กตรอนและโฮลมีมวลประสิทธิผล (effective mass) ต่างกัน เพราะถ้าเป็นชั้นโคเนอร์หรือชั้นเอกเซนเตอร์ที่มีลักษณะเป็นแบบ Simple Centers ขนาดของ line-shape จะมีค่าตามที่คำนวณได้จากทฤษฎีมวลประสิทธิผลของไฮโดรเจน ถ้าเป็น Complex Centers โมเดลของไฮโดรเจนจะใช้ไม่ได้ค่า Activation energy และ line width จะมีขนาดโตกว่า ข้อมูลเกี่ยวกับการดูดกลืนแสงและลูมิเนสเซนซ์ยังสามารถนำไปคำนวณหาค่าอายุชีวิต และค่าความยาวในการแพร่ซึมของพาหะข้างน้อยได้ด้วย⁽⁸⁾

3. การทดลอง

3.1 ตัวอย่างสาร

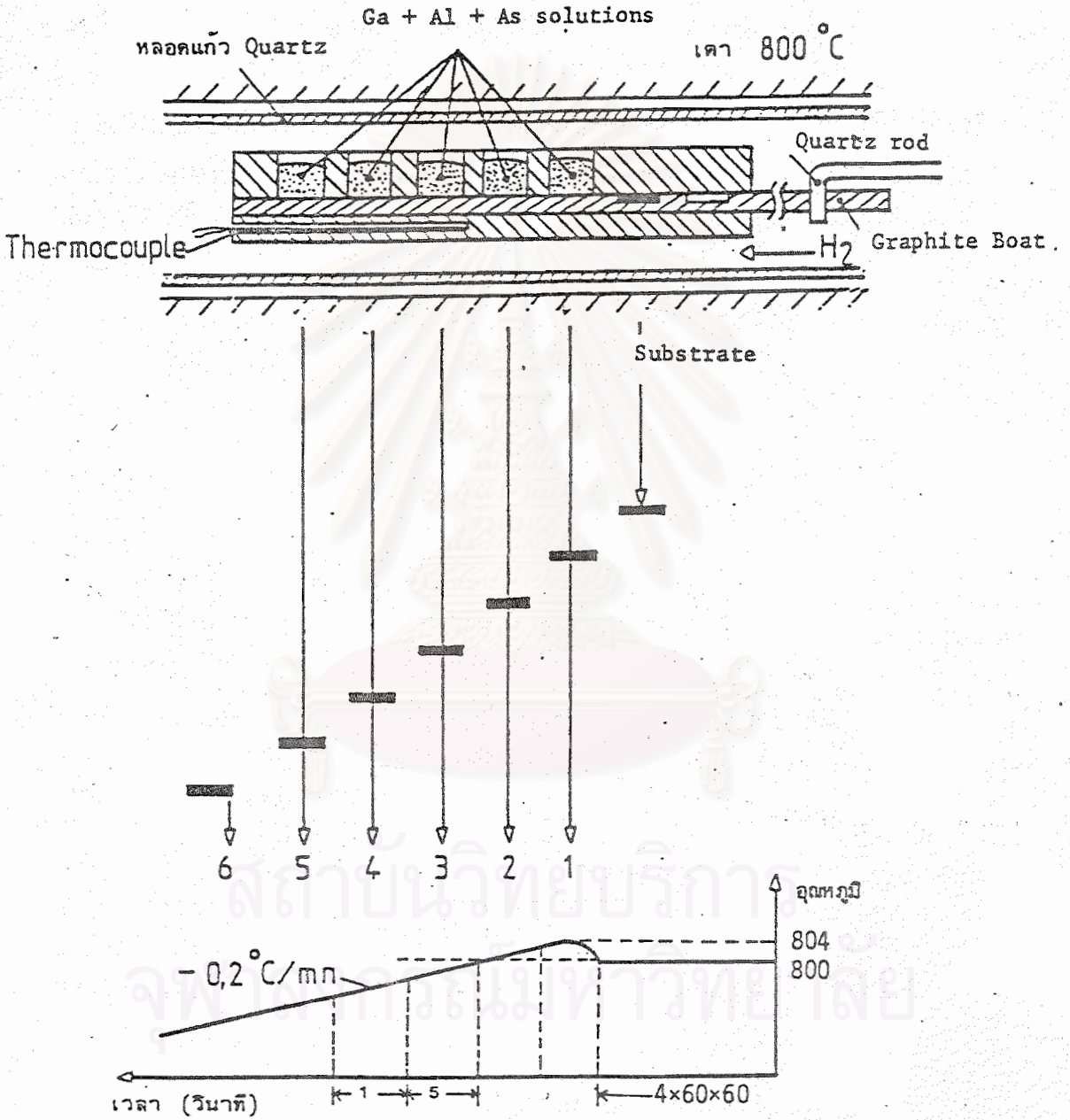
สารกึ่งตัวนำที่ใช้ในงานทดลองได้แก่ ชั้นผลึกเกล็ดเยี่ยมอาร์เซนายด์ และเกล็ดเยี่ยมอาลูมิเนียมอาร์เซนายด์ที่ทดลองปลูกโดยวิธี Liquid Phase Epitaxy (LPE) ซึ่งเป็นวิธีการมาตรฐานที่ใช้ในการปลูกชั้นผลึกเพื่อนำไปสร้างทำเป็นสิ่งประดิษฐ์ เช่น ไดโอดเปล่งแสง เลเซอร์ไดโอด ฯลฯ รูปที่ 2 เป็นภาพแสดงเตาปลูกผลึกเอพิแทกซีแบบแนวนอนซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 800°C ภายในแก๊สของเตาจะมี Graphite boat ซึ่งออกแบบมาให้สามารถยึดผลิตภัณฑ์ (Substrates) และเลื่อนผ่านเข้าไปในช่องสารละลายเกล็ดเยี่ยมอาร์เซนายด์ เมื่อมีการลดอุณหภูมิลงอย่างเหมาะสม ($0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$) จะเกิดชั้นผลึกบาง ๆ ขึ้นบนผลิตภัณฑ์นั้น ถ้าเลื่อนผลิตภัณฑ์ให้ผ่านเข้าไปในช่องต่าง ๆ ที่มีสารละลายต่างชนิดกัน ก็



รูปที่ 2 ภาพถ่ายของเตาเอพิแทกซ์แบบแนวอนที่ใช้ปลูกผลึกแกลเลียมอาร์เซไนด์ และแกลเลียมอาลูมิเนียมอาร์เซไนด์

ได้ชั้นผลึกที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ กัน ซ้อนกันอยู่ในรูปของ Multilayer - Structure รายละเอียดของ Graphite boat พร้อม Temperature profile ซึ่งควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์มีแสดงดังรูปที่ 3

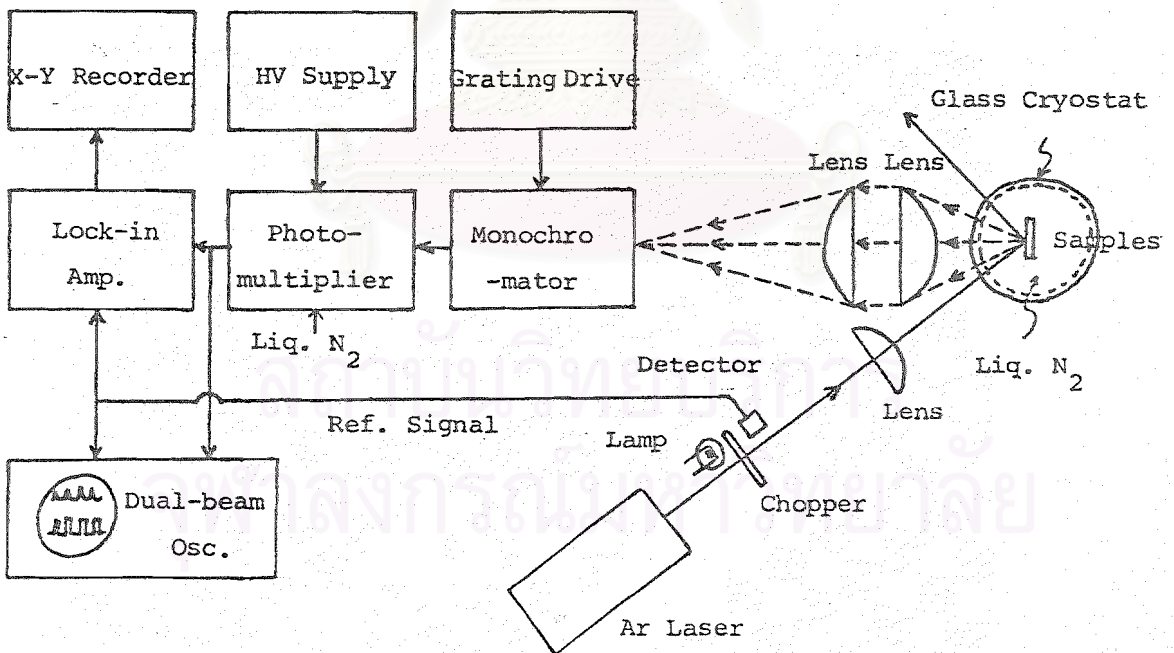
ผลึกแกลเลียมอาร์เซไนด์หรือแกลเลียมอาลูมิเนียมอาร์เซไนด์ที่ได้จะมีความหนาเพียง 0.1 ~ 1 ไมครอน อยู่บนผลึกฐานซึ่งหนา 300 ไมครอน และมีขนาดกว้างยาว 5×5 มม.² ชั้นผลึกที่จะนำมาใช้ในงานทดลองอาจจะมีขนาดเล็กโดยตัดมาจากชั้นใหญ่ก็ได้ เช่น มีพื้นที่เพียง 1 ตร.มม. ก็เพียงพอ เพราะสามารถบีบลำแสงเลเซอร์ให้มีขนาดเล็กกว่าพื้นที่ของตัวอย่างได้



รูปที่ 3 รายละเอียดของ Graphite boat และ Temperature profile ที่ใช้ในการปลูกผลึก

3.2 เครื่องมือทดลอง

เครื่องมือทดลองมีแสดงดังรูปที่ 4 แหล่งกำเนิดแสงได้แก่ เลเซอร์อาร์กอนที่มีแสงสีน้ำเงิน ($\lambda = 4880 \text{ \AA}$) ซึ่งมีกำลัง 50 มิลลิวัตต์ แสงนี้จะถูก chopped เป็นพัลส์ และผ่านเลนส์เพื่อบีบลำแสงให้เล็กลง จุดโฟกัสจะตกลงบนตัวอย่างสาร ณ จุดที่ต้องการจะศึกษา ที่ Chopper จะมีตัวตรวจจับแสง และหลอดไฟเพื่อสร้างสัญญาณอ้างอิงสำหรับส่งไปเข้าเครื่อง Lock-in Amplifier ตัวอย่างสารเกลือลิเทียมอาร์เซนายด์จะอยู่ใน Cryostat ที่เติมไนโตรเจนเหลวไว้ ดังนั้นอุณหภูมิของตัวอย่างจึงเท่ากับ 77 K แสงที่เรืองจากตัวอย่างจะถูกเก็บรวบรวมด้วยระบบเลนส์ที่มีขนาดโตและจุดโฟกัสสั้น แล้วส่งเข้าไปวิเคราะห์หาสเปกตรัมในเครื่อง Monochromator ซึ่งใช้ระบบ Grating สัญญาณแสงที่แยกสเปกตรัมแล้วจะถูกวัดความเข้มด้วยหลอด Photomultiplier ซึ่งหล่อเย็นด้วยไนโตรเจนเหลวเช่นเดียวกัน เพื่อลดสัญญาณรบกวน สัญญาณที่ได้จะถูกนำไปขยายให้มีขนาดโตด้วย Lock-in Amplifier โดยสล็อตให้มีเฟสตรงกับสัญญาณอ้างอิง จากนั้นจึงนำไปเข้าเครื่องบันทึก X-Y หรือดูด้วยเครื่อง Dual Beam Oscilloscope

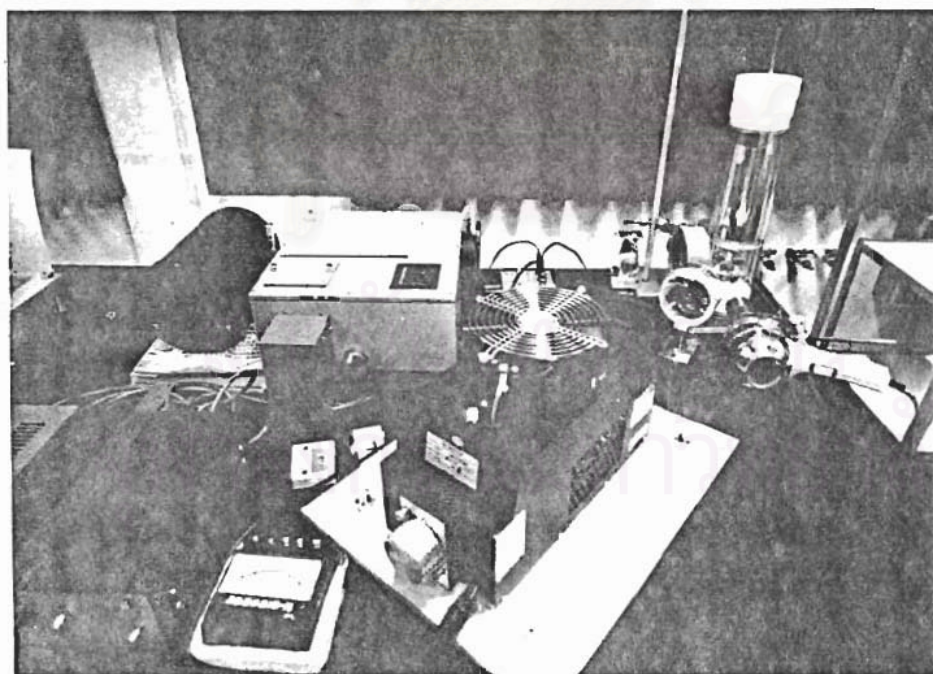


รูปที่ 4 การจัดเตรียมอุปกรณ์เครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้ในงานทดลองโฟโตลูมิเนสเซนซ์

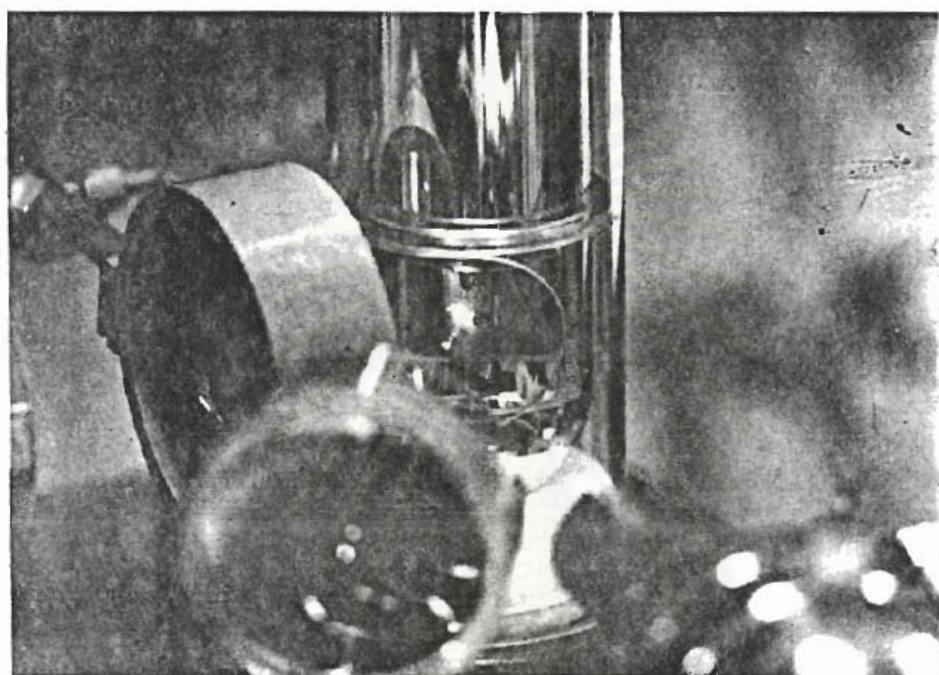
ในการจัด Alignment ทางแสงนั้นจะมีส่วนสำคัญในการทดลองที่มีประสิทธิภาพ เพราะสัญญาณโฟโตลูมิเนสเซนซ์จะมีขนาดต่ำ จึงต้องพยายามรวบรวมสัญญาณให้เข้าเครื่อง Monochromator มากที่สุด และใช้แรงดันไฟกับหลอด Photomultiplier อย่างเหมาะสม เพื่อเพิ่ม Sensitivity ในขณะที่เดียวกันมีสัญญาณรบกวนน้อยด้วย เมื่อเทียบกับสัญญาณของ โฟโตลูมิเนสเซนซ์

การนำเอาเครื่อง Data logger เข้ามาผนวกการระบบการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ยังทำให้การวิเคราะห์ข้อมูลต่าง ๆ ส่งผ่านไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อการคำนวณหาของแถบพลังงานของสาร และปริมาณ Al Content ในสารประกอบแกลเลียมอาลูมิเนียมอาร์เซनाйд์ได้ด้วย

สำหรับสารตัวอย่างที่เป็นแกลเลียมอาร์เซนาйд์นั้นจะให้การเรืองแสงในช่วงอินฟราเรด (8400 \AA) ตามองไม่เห็น แต่ถ้าเป็นแกลเลียมอาลูมิเนียมอาร์เซนาйд์จะเรืองเป็นสีแดง (6500 \AA) ทำให้การจัด Optical Alignment ง่ายขึ้น รูปที่ 5 เป็นภาพถ่ายของเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและ รูปที่ 6 เป็นตัวอย่างการเรืองแสงสีแดงจากแกลเลียมอาลูมิเนียมอาร์เซนาйд์ที่แช่อยู่ในไนโตรเจนเหลว เมื่อฉายด้วยแสงเลเซอร์ที่มีสีน้ำเงิน



รูปที่ 5 ภาพถ่ายของเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง



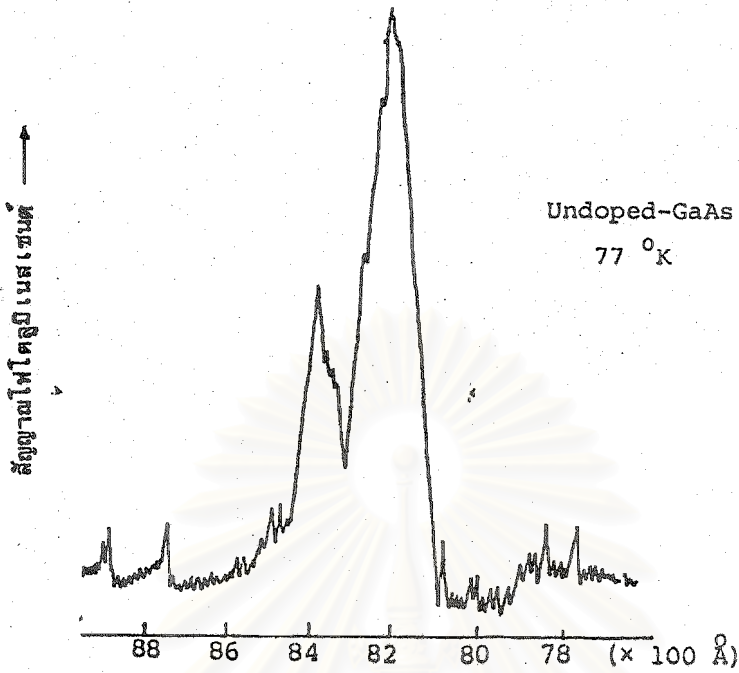
รูปที่ 6 การเรืองแสงสีแดงจากแกเลียมอาร์เซไนด์

4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

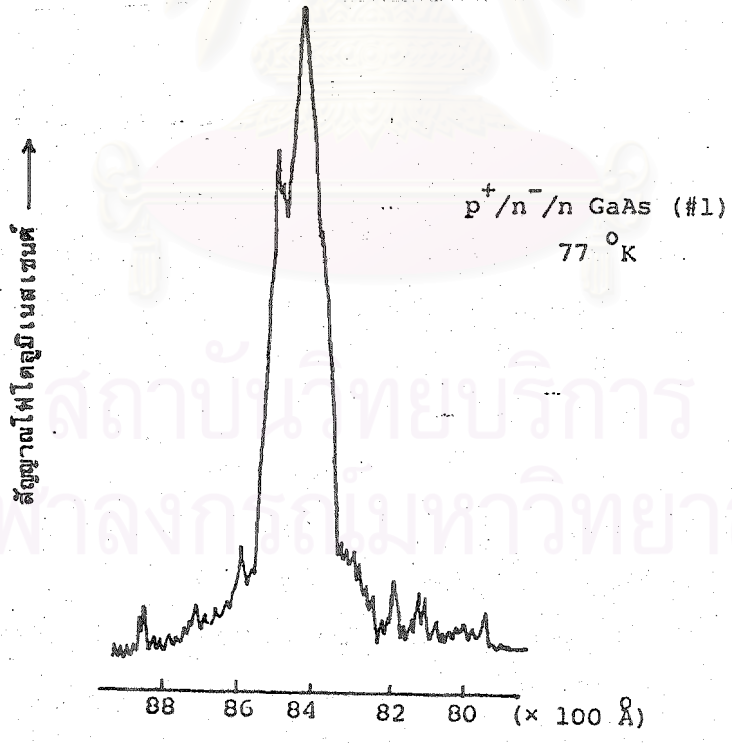
4.1 โฟโตลูมิเนสเซนซ์ของแกเลียมอาร์เซไนด์

ตัวอย่างผลึกแกเลียมอาร์เซไนด์ที่ใช้ทดลองมีทั้ง Undoped - GaAs และ p^+ - GaAs (Ge - doped) ซึ่งเตรียมขึ้นด้วยเทคนิค LPE ในห้องปฏิบัติการวิจัยฯ

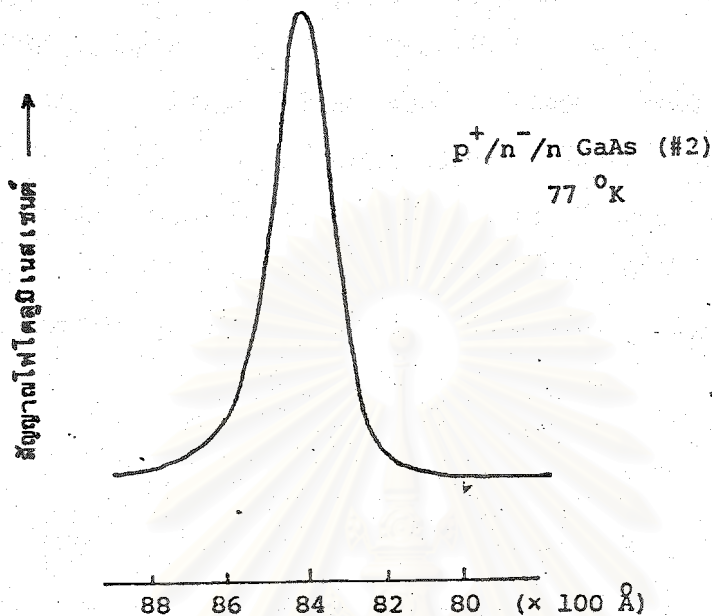
สเปกตรัมของโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่วัดได้จาก ชั้นผลึก Undoped - GaAs มียอดอยู่ที่ 8200 Å และ 8400 Å ตามลำดับดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 7 เมื่อชั้นผลึกเป็น p^+ - GaAs ยอดสเปกตรัมที่ 8200 Å จะหายไป เหลือแต่ยอด 8400 Å ซึ่งจะมีค่าสูงและเด่นชัดขึ้นเมื่อปริมาณสารเจือปนมีค่าความเข้มข้นสูง และชั้นผลึกมีคุณภาพดี ดังแสดงในรูปที่ 8 และ 9 ตามลำดับ



รูปที่ 7 ยอดสเปกตรัมของโฟโตลูมิเนสเซนซ์สองยอดใน Undoped GaAs วัดที่ 77 °K



รูปที่ 8 ยอดสเปกตรัมของโฟโตลูมิเนสเซนซ์ยอดเดียวใน p⁺/n⁻/n GaAs (#1) วัดที่ 77 °K



รูปที่ 9 ยอดสเปกตรัมของโฟโตลูมิเนสเซนซ์ยอดเดียวที่คมชัด และแสงใน $p^+/n^-/n$ GaAs (#2) วัดที่ 77°K

ตัวอย่างที่เป็น Undoped - GaAs นั้นเตรียมได้โดยวิธี Vertical Liquid Phase Epitaxy และชั้นผลึกมีความหนา 10 ไมครอน ถึงแม้จะเป็น Undoped แต่สภาพของชั้นผลึกจะเป็นแบบ n-type ยอดสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์สองยอดที่วัดได้ในรูปที่ 7 จึงสะท้อนให้เห็นโครงสร้างแถบพลังงานและชั้นพลังงานของสารเจือปนในชั้นสารชั้นนี้ กล่าวคือ ยอด 8200 \AA (คิดเป็นพลังงานได้ 1.512 eV) คือการเรืองแสงที่เกิดจากการรวมตัวของพาหะผ่าน Bandgap (ตรงกับค่า E_g ของ GaAs ที่ 77°K ซึ่งมีค่าประมาณ $1.512 \text{ eV}^{(10)}$) ส่วนยอด 8400 \AA (คิดเป็นพลังงานได้ 1.476 eV) คือการเรืองแสงที่เกิดจากการรวมตัวของพาหะผ่านชั้นพลังงานของสารเจือปน ซึ่งอยู่ต่ำกว่า Band Edge (หรือค่า Optical Activation Energy ของ Impurity levels) มีค่าประมาณ 0.036 eV การที่เราสามารถสังเกตเห็นโครงสร้างชั้นพลังงานทั้งสองแบบพร้อมกันเพราะไม่มีการตั้งใจเติมสารเจือปนแต่อย่างใด แต่เมื่อสร้างชั้น p^+ ขึ้นโดยเติม Ge เป็น Dopant ซึ่งทำหน้าที่เป็น Acceptor กล่าวคืออะตอมของ Ge จะเข้าแทนที่อะตอมของ As ในชั้นผลึก GaAs ยอดสเปกตรัมจะลดเหลือเพียงยอด 8400 \AA เพียงยอดเดียว (คิดเป็น Optical Activation Energy ได้ 0.036 eV เมื่อวัดจากขอบของวาเลนซ์แบนด์ และเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองของผู้อื่น (10, 11, 12) ชั้นผลึก p^+ เหล่านี้สร้างชั้นบน n^-/n



substrates ด้วยเทคนิค Horizontal Liquid Phase Epitaxy ชั้นผลึก p^+ ของ ตัวอย่าง #1 หนา 2 ไมครอน และของตัวอย่าง #2 หนา 0.5 ไมครอนตามลำดับ ผลการ วัดโฟโตลูมิเนสเซนส์ที่แสดงในรูป 8 และ 9 ซึ่งให้เห็นว่าชั้นพลังงานของสารเจือปนเกิดสถานะ ดีเจนเนอเรซี (Degeneracy) ขึ้นเนื่องจาก Heavily Doping ทำให้คั้งค่าแถบพลังงาน ที่แท้จริง ย่อ 8200 Å จึงหดหายไปหมด เหลือแต่ย่อ 8400 Å ซึ่งมีความคมชัดสูงสำหรับ ตัวอย่าง #2 เมื่อเทียบกับตัวอย่าง #1 แสดงว่าคุณภาพของผลึกทั้งสองไม่เหมือนกันแม้จะปลูก จากสารละลายในหลุมกราฟไฟท์เดียวกัน ตัวอย่าง #2 ซึ่งปลูกทีหลังมีคุณภาพผลึกดีกว่า ตัวอย่าง #1 มาก จึงสามารถคาดการณ์ได้ว่าจะเป็นวัสดุที่ใช้ทำไดโอดเปล่งแสงที่มีประสิทธิภาพ ดีกว่า ผลการทดลองในรูปที่ 7, 8, 9 สามารถนำมาสรุปเป็นตารางเปรียบเทียบได้ดัง ตารางที่ 1

ตารางที่ 1

ตัวอย่าง	ยอดโฟโตลูมิเนสเซนส์	สารเจือปน	แถบพลังงาน	หมายเหตุ
Undoped GaAs	8200, 8400 Å	-	1.512 eV	-
p^+ GaAs (#1)	8400 Å	Ge	1.476 eV	Degeneracy
p^+ GaAs (#2)	8400 Å	Ge	1.476 eV	Degeneracy

และค่า Optical Activation Energy ของ Ge ซึ่งทำหน้าที่เป็น acceptor ใน p^+ GaAs จะวัดได้เท่ากับ 0.036 eV ผลการวิเคราะห์จากสัญญาณโฟโตลูมิเนสเซนส์นี้จะให้ ค่าที่เชื่อถือได้ เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่วัดจากผู้อื่นและวิธีอื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2

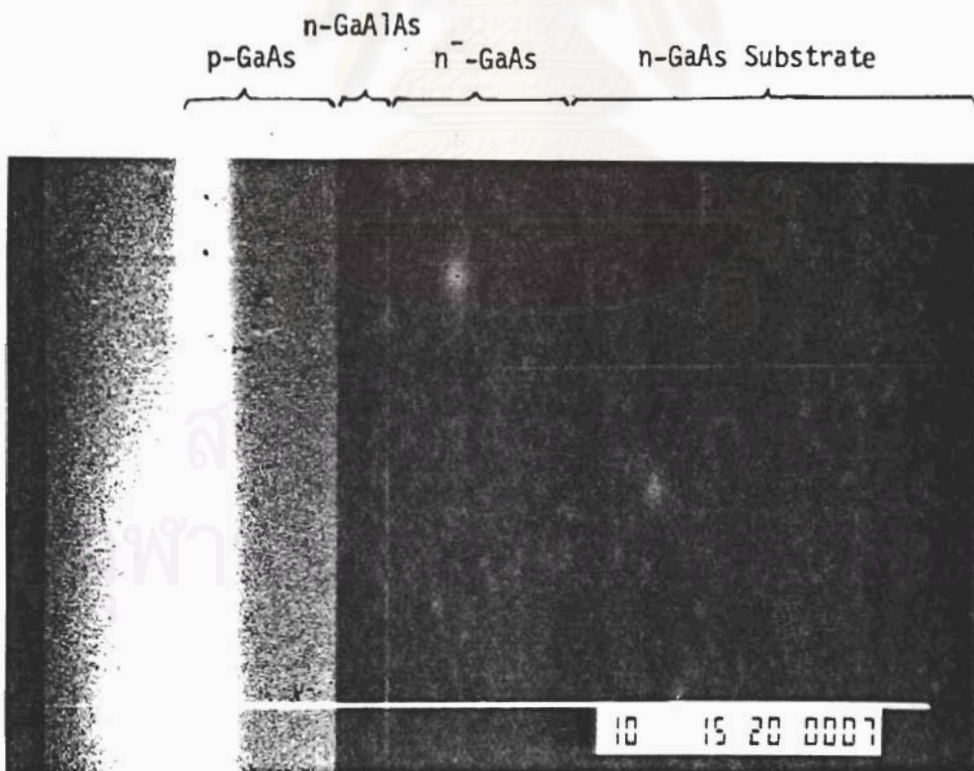
ชนิดตัวอย่าง	สารเจือปน	Activation Energy	หมายเหตุ
p^+ GaAs (#1)	Ge	0.036 eV	present experiment
p^+ GaAs (#2)	Ge	0.036 eV	present experiment
p-GaAs	Ge	0.042 eV	Schairer and Graman ⁽¹⁰⁾
p-GaAs	Ge	0.030 eV	Kressel et. al ⁽¹¹⁾
p-GaAs	Ge	0.038 eV	Rosytoczy et. al ⁽¹²⁾

4.2 โฟโตลูมิเนสเซนซ์จากแกเลียมอาลูมิเนียมอาร์เซनाйд

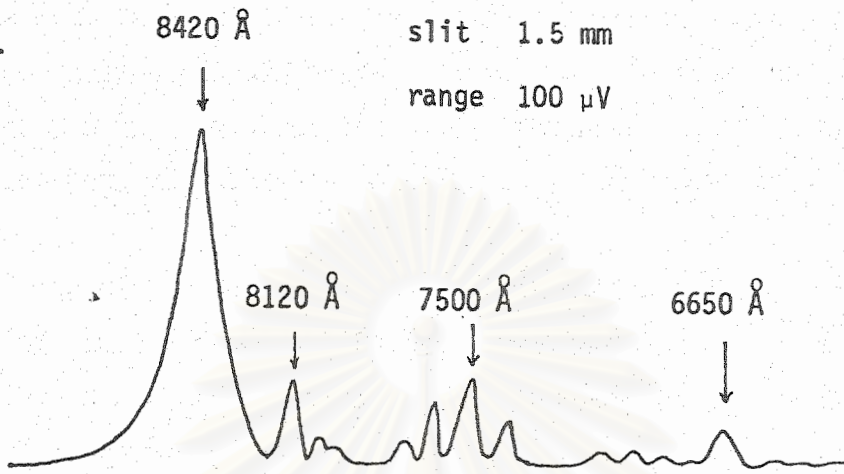
โฟโตลูมิเนสเซนซ์ยังเป็นเครื่องมือในการศึกษาปริมาณ Al Content ในผลึกผสมแกเลียมอาลูมิเนียมอาร์เซนาйд (GaAlAs) ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ทำ Heterojunction Devices ความเข้มของแสงที่เรืองจะเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับคาดการณ์ว่าประสิทธิภาพในการเรืองแสงแบบ Electroluminescence ซึ่งเป็นกลไกหลักของไดโอดเปล่งแสง และเลเซอร์ไดโอดจะดีเพียงใด

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองนี้จะมีชั้น GaAlAs อยู่ในโครงสร้างด้วย โดยทดลองปลูกด้วยเทคนิค LPE เมื่อได้ตัวอย่างมาแล้วจะนำเข้าเครื่อง Scanning Electron Microscope เพื่อตรวจสอบดูชั้น GaAlAs ว่ามีความหนาสม่ำเสมอดีเพียงใด และมีความหนาของชั้นผลึกเท่าใด ดังจะเห็นได้จากรูปตัวอย่างอันหนึ่งในรูปที่ 10

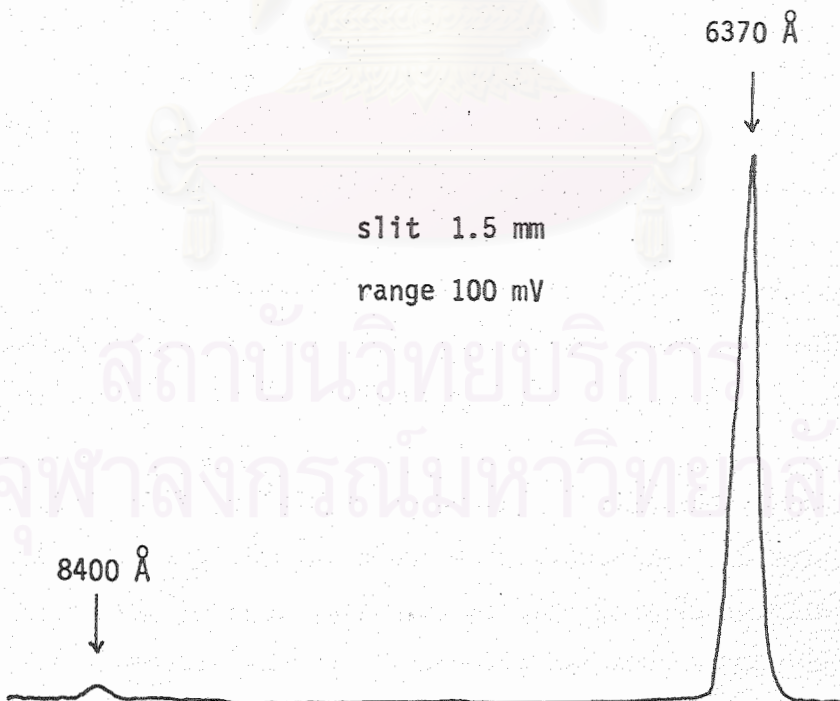
ลักษณะโครงสร้างของตัวอย่างมี 2 แบบ คือ p-GaAs/n-GaAlAs/n⁻-GaAs/Substrate ซึ่งเป็นหัวต่อแบบเฮเทอโรโร และ n-GaAlAs/n⁻-GaAs/Sub-strate เมื่อนำเอาตัวอย่าง 2 แบบนี้ไปตรวจสอบดู Photoluminescence ปรากฏว่าได้ผลการทดลองดังรูปที่ 11 และ 12 ตามลำดับ



รูปที่ 10 ภาพถ่ายของชั้น GaAlAs ที่อยู่ในโครงสร้างของตัวอย่างด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope กำลังขยาย 10,000 เท่า



รูปที่ 11 สเปกตรัมของโฟโตลูมิเนสเซนซ์จากตัวอย่างที่มีโครงสร้าง p-GaAs/n-GaAlAs/n⁻GaAs/Substrate ที่ 77 K



รูปที่ 12 สเปกตรัมของโฟโตลูมิเนสเซนซ์จากตัวอย่างที่มีโครงสร้าง n-GaAlAs/n⁻GaAs/Substrate ที่ 77 K

จากรูปที่ 11 พบว่ายอดสเปคตรัมที่ 8420 \AA ซึ่งเป็นแสงที่เรืองจากชั้น p-GaAs ที่อยู่บนสุด ส่วนยอดสเปคตรัมย่อย ๆ หลายอันซึ่งมีค่าสูงสุดที่ 7500 \AA นั้นเกิดจากการเรืองแสงจาก Interface ที่บริเวณหัวต่อ ซึ่งมีค่าแถบพลังงานที่ค่อย ๆ เปลี่ยนไป และมีลักษณะเป็น Thin Film Structure ถึงเกิดการสะท้อนแสงแบบ Multiple reflection ทำให้แสงเกิดการสอดแทรก (Interference) ขึ้นได้ ส่วนยอดสเปคตรัมเล็กที่ 6650 \AA นั้น คาดว่าเป็นของชั้น GaAlAs ซึ่งมีแถบพลังงานต่ำกว่า แต่เนื่องจากเป็นชั้นที่สอดแทรกอยู่ในโครงสร้างมิได้อยู่บนชั้นผิวบนสุด จึงให้สัญญาณโฟโตลูมิเนสเซนส์ที่ต่ำมาก

จากรูปที่ 12 ซึ่งเป็นกรณีของตัวอย่างที่มีชั้น GaAlAs อยู่บนสุด ดังนั้นจึงพบว่ายอดสเปคตรัมที่ 6370 \AA มีค่าสูงมาก เมื่อเทียบกับยอดสเปคตรัม 8400 \AA ซึ่งหดหายไปเกือบหมด รวมทั้งยอดเล็กยอดน้อยที่บริเวณ 7500 \AA ยอดสเปคตรัมที่ 6370 \AA ที่มีค่าสูงนี้จึงยืนยันให้เห็นว่าเกิดจากชั้น GaAlAs ที่มีคุณภาพดีมาก จากข้อมูลของโฟโตลูมิเนสเซนส์ดังกล่าวสามารถที่จะวิเคราะห์ค่าแถบพลังงาน ปริมาณ Al content ได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3

ชั้นผลึก	ยอดสเปคตรัม	แถบพลังงาน	Al content
p-GaAs	8400 \AA	1.476 eV	-
p-GaAlAs	6370 \AA	1.94 eV	0.37

เนื่องจากการเรืองแสงที่ 6400 \AA ของตัวอย่างที่มีชั้น GaAlAs อยู่บนสุดนั้นมีประสิทธิภาพสูงมาก เมื่อฉายลำแสงเลเซอร์อาร์กอนที่มีสีเขียว (4880 \AA) ลงบนตัวอย่างที่แช่อยู่ในไนโตรเจนเหลว (77 K) จะสังเกตเห็นแสงสีแดง (6400 \AA) เรืองออกมาอย่างชัดเจน

เมื่อนำเอาตัวอย่างที่มีโครงสร้างแบบเฮเทอโรจังก์ชันไปต่อขั้วโลหะ ได้แก่ Au: Zn และ Au: Sn/Ni ก็จะได้เป็นสิ่งประดิษฐ์ประเภทไดโอด เมื่อทดลองไบอัสตาม (forward bias) เพื่อฉีดกระแสผ่านหัวต่อพีเอ็น ตรวจพบว่าการเรืองแสงที่สีแดงออกมาได้ จึงนับเป็นความสำเร็จครั้งแรกในการทำ Electroluminescence จากผลึก GaAlAs ซึ่งผลิตขึ้นโดยห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ หากมีการปรับปรุงโครงสร้างให้เหมาะสมต่อไปก็จะสามารถสร้างเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ (Laser Diode) ที่ให้แสงที่มองเห็นด้วยตาเปล่าได้ต่อไป

5. สรุปผล

ไฟโตลูมิเนสเซนซ์เป็นขั้นตอนทดลองที่สำคัญในการวิเคราะห์คุณภาพของฟลิคแกล-เลียมอาร์เซนายด์และแกลเลียมอลูมิเนียมอาร์เซนายด์ โดยเฉพาะคุณสมบัติในการเรืองแสงตลอดจนสเปกตรัมของแสงที่เรือง ข้อมูลของการทดลองจึงมีประโยชน์ในการบอกลับเพื่อควบคุมกระบวนการปลูกฟลิคแกลเลียมอาร์เซนายด์ให้มีคุณภาพตามต้องการ และเลือกหาส่วนผสมที่ถูกต้องในการเรืองแสงที่มีค่าความยาวคลื่นตามที่ตั้งใจไว้

การพัฒนาเทคนิคไฟโตลูมิเนสเซนซ์จึงมีประโยชน์ในระยะยาวต่อการพัฒนาเทคโนโลยีแกลเลียมอาร์เซนายด์ ซึ่งเป็นวัสดุที่จำเป็นในด้านออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ปัจจุบันเครื่องมือดังกล่าวยังถูกใช้งานอย่างสม่ำเสมอ และจัดเป็นอุปกรณ์วิจัยมาตรฐานที่มีประโยชน์มากด้วย

ข้อมูลของไฟโตลูมิเนสเซนซ์สามารถนำไปวิเคราะห์เพื่อหา

- 1) คุณภาพของฟลิค (ความสม่ำเสมอ และจำนวนจุดบกพร่อง)
- 2) ชนิดและปริมาณเชิงเปรียบเทียบของสารเจือปน
- 3) ความสามารถในการเกิดลูมิเนสเซนซ์
- 4) สเปกตรัมของแสงที่เรือง
- 5) ขนาดแถบพลังงานสารที่เรืองแสง
- 6) ปริมาณ Al Content ในผลิตภัณฑ์แกลเลียมอลูมิเนียมอาร์เซนายด์

6. กิจกรรมประกาศ

เครื่องมือทดลองส่วนใหญ่ได้รับมอบจากรัฐบาลญี่ปุ่นในโครงการความช่วยเหลือด้านวัฒนธรรมและเทคโนโลยี ประจำปี 2527 และได้รับงบประมาณแผ่นดินประจำปี 2530 เพื่อศึกษาโครงการวิจัยชิ้นนี้อีกเป็นงบประมาณ 200,000 บาท

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



7. เอกสารอ้างอิง

- (1) "GaAs Optoelectronic Devices", D.H. Newman, in "Gallium Arsenide", Chapter 11, edited by M.J. Howes and D.V. Morgan, John Wiley & Sons, pp. 429 - 451, 1985.
- (2) "Heterostructure Lasers", H.C. Casey and M.B. Panish, Academic Press, 1978.
- (3) "Optical Source devices", R.C. Goodfellow and R. Davis, in "Optical Fibre Communications", edited by M.J. Howes and D.V. Morgan, Chichester, Wiley, pp. 27-106, 1980.
- (4) "Photoluminescence II : Gallium Arsenide", E.W. Williams and H. Barry Bebb, Semiconductors and Semimetals, Vol.8, chapter 5, edited by R.K. Willardson and Albert C. Beer, Academic Press, pp. 321 - 392, 1972.
- (5) M.B. Panish, J. Appl. Phys., Vol. 44, no. 6, p. 2667, 1973.
- (6) รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ เรื่อง "การปลูกชั้นผลึกแกเลียมอาร์เซไนด์โดยวิธี Liquid Phase Epitaxy" เสนอต่อฝ่ายวิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี 2530 (โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนเพิ่มพูนประสิทธิภาพทางวิชาการฯ ของจุฬาฯ ประจำปี 2528 และ 2529)
- (7) "Photoluminescence Half Width versus Carrier Concentration for InP compared with GaAs.", B.D. Joyce and E.W. William, Int. Symp. 3rd, on GaAs and Related Compounds, Aachen, Germany, p. 57, 1970.
- (8) C.J. Hwang, J. Appl. Phys. 40, p. 3731, 1969.
- (9) E.W. William and H.B. Bebb, J. Phys. Chem. Solids, 30, p. 1289, 1969.
- (10) W. Schairer and W. Gaman, J. Phys. Chem. Solids, 30, p. 2225, 1969.
- (11) H. Kressel, F.Z. Hawrylo, and P. Le Fur, J. Appl. Phys., 29 P. 4059, 1968.
- (12) F.E. Rosytoczy, F. Ermanis, I. Hayashi and B. Schwartz, J. F.E. Rosytoczy, F. Ermanis, I. Hayashi and B. Schwartz, J. Appl. Phys. 41, p. 264, 1970.

