การสร้างโฟโตดีเทคเตอร์แกลเลียมอาเซไนด์ฟอสไฟด์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

Fabrication of Metal-Semiconductor-Metal GaAsP Photodetectors

อภิชาติ สังข์ทอง นิศาพร เกียรติไพศาลโสภณ และ จิติ หนูแก้ว
ห้องปฏิบัติการวิจัยควอนตัมและสารกึ่งตัวนำทางแสง ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ABSTRACT - We present the fabrication and characterization of metal-semiconductor-metal (MSM) GaAsP photodetector grown by Molecular Beam Epitaxy (MBE). Metal-Semiconductor-Metal structure is fabricated using lithography technique. A thermal evaporator is used for growing gold electrodes. The electrode width and gap spacing of this device are in the same value of 100 μm, and the active area is 2100 x 1300 μm^2. The calculated capacitance by conformal mapping technique is approximately 1 pF. At a bias voltage of 8 V, a dark current is in order of nanoampare. This experimental data can be purposed for a potential optical communication devices.

KEYWORDS - MSM Photodetector, GaAsP Semiconductor, and Lithography

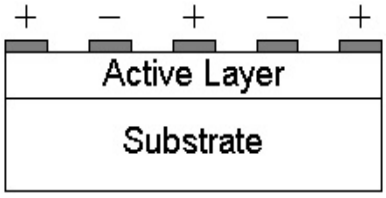
บทคัดย่อ - งานวิจัยนี้เป็นการสร้างโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะของสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ฟอสไฟด์ที่ได้จากการปลูกผลึกด้วยวิธีจัดเรียงผลึกด้วยลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy ; MBE) โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะสร้างโดยวิธีการลิโทกราฟฟีและสร้างขั้วโลหะทองโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ขนาดความกว้างของขั้วโลหะและช่องว่างระหว่างขั้วเท่ากับ 100 ไมครอน และมีขนาดพื้นที่เท่ากับ 2100 x 1300 ตารางไมครอน ใช้เทคนิคคอนฟอมอลแมบปิงคำนวณค่าความจุได้เท่ากับ 1 พิโกฟารัด จากการวัดกระแสที่แรงดันไบแอส 8 โวลต์ ได้ค่ากระแสมืดอยู่ในระดับนาโนแอมแปร์ จากผลการทดลองที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ด้านการสื่อสารทางแสงได้

1. บทนำ

สารกึ่งตัวนำโครงสร้าง MSM เริ่มมีประดิษฐ์ขึ้นในปี 1979 โดยอาศัยแนวคิดของโครงสร้างที่ที่มีกำแพงศักย์แบบชอตต์กีสองข้าง (two Schottky barrier) [1] เป็นโครงสร้างที่ง่ายต่อการประดิษฐ์และสามารถลดค่าเวลาเคลื่อนย้ายพาหะ (carrier transit time) และ ค่าคงที่ RC (RC constant) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดความสามารถของสารกึ่งตัวนำ [2] ปัจจุบันได้รับความสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้ในการทำโฟโตดีเทคเตอร์ในงานสื่อสารทางแสง โดยสารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้จะเป็นจำพวกสารประกอบกึ่งตัวนำ ได้แก่ แกลเลียมอาร์เซไนด์ซึ่งอยู่ในกลุ่ม III-V สารประกอบกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์มีค่าความคล่องตัว (mobility) สูงสามารถใช้ในงานการสื่อสารความเร็วสูงได้ดี ในปัจจุบันมีการปลูกผลึกที่มีส่วนประกอบของสารกึ่งตัวนำตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปอย่างแพร่หลาย เช่น AlGaAs, InGaAs, GaAsP เป็นต้น จุดประสงค์เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางแสงให้เหมาะสมกับการสื่อสารในปัจจุบัน

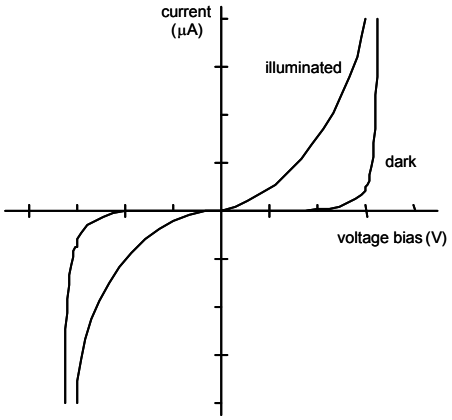
2. ทฤษฎีและหลักการ

ลักษณะทั่วไปของโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้าง MSM แสดงในรูปที่ 1 ประกอบด้วยแผ่นฐานรองที่เป็นสารกึ่งฉนวน (semi-insulating substrate) บนแผ่นรองเป็นชั้นของสารกึ่งตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นชั้นแอกทีฟ (active layer) ซึ่งได้จากการปลูกด้วยวิธีต่างๆ เช่น MBE, OMCVD หรือการระเหยสารด้วยความร้อน (thermal evaporator) เป็นต้น ด้านบนสุดเป็นขั้วโลหะที่มีโครงสร้างแบบอินเตอดิจิเตจ (interdigitated electrode) รอยต่อระหว่างขั้วโลหะกับชั้นแอกทีฟเกิดกำแพงศักย์แบบชอตต์กี (schottky barrier) ในลักษณะประกบด้านหลัง (back-to-back) พื้นที่รับแสงจะอยู่ระหว่างช่องว่างของขั้วโลหะ การสร้างขั้วโลหะจะใช้วิธีการ optical lithography ซึ่งสามารถทำขั้วให้มีขนาดเล็กระดับไมครอนได้



รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

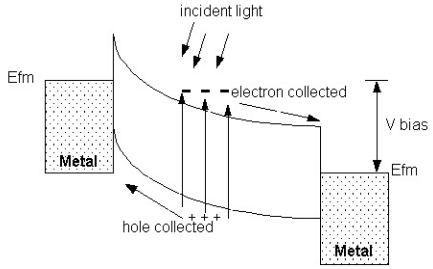
เนื่องจากโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้าง MSM นี้ กำแพงศักย์แบบชอตต์กีประกบกันแบบ back–to-back เมื่อทำการไบแอส ไม่ว่าจะเป็นกรณีไบแอสตรง (forward bias) หรือไบแอสกลับ (reverse bias) จะมีผลทำให้กำแพงศักย์ด้านหนึ่งมีทิศไปข้างหน้า (forward direction) และอีกด้านหนึ่งมีทิศย้อนกลับ (reverse direction) พิจารณาเป็นไดโอด 2 ต่อกลับด้านกันซึ่งได้กราฟคุณสมบัติทาง I-V ดังรูปที่ 2 สังเกตว่าไดโอดตัวหนึ่งจะต่อแบบไบแอสกลับเสมอ



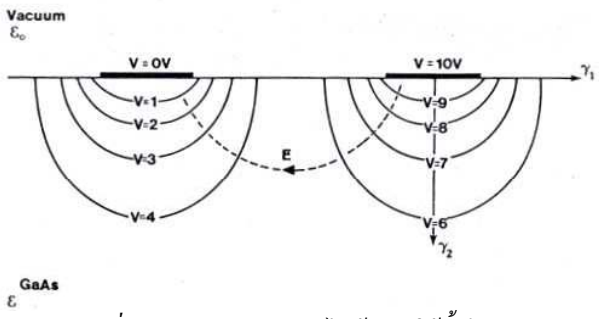
รูปที่ 2 แสดงสมบัติทางกระแส-แรงดันของโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

การศึกษาคุณสมบัติทาง I-V ของดีเทคเตอร์แบบ MSM จะพิจารณาทั้งในส่วนของกระแสมืด (dark current) และในส่วนของกระแสโฟโต (photo current) ในรูปที่ 3 แสดงคุณสมบัติของ MSM ดีเทคเตอร์ภายใต้ค่าความเข้มแสงค่าต่างๆ ในส่วนของกระแสมืดจะขึ้นอยู่กับกลไก 2 อย่าง อย่างแรกคือการสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮลแบบสุ่ม (spontaneous electron-hole pairs) ภายในบริเวณแอกทีฟ (active region) เนื่องจากพลังงานความร้อน (thermal Energy) อีกอย่างหนึ่งเกิดจากพาหะที่สามารถข้ามกำแพงชอตต์กีได้ ไดอะแกรมของแถบพลังงานของดีเทคเตอร์แบบ MSM ภายใต้การไบแอสแสดงในรูปที่ 4 ประกอบด้วยตำแหน่งระดับเฟอร์มิ (Fermi Level; E_f) ของโลหะ แถบวาเลนซ์ (valence band; E_v) และแถบนำ (conduction band; E_c) ของสารกึ่งตัวนำ

เมื่อแสงตกกระทบดีเทคเตอร์ เกิดการดูดกลืนแสงที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลภายในบริเวณแอกทีฟ ถ้าระหว่างขั้ว 2 ขั้ว ถูกไบแอสขั้วหนึ่งเป็นลบ (cathode) อีกขั้วเป็นบวก (anode) คู่อิเล็กตรอน-โฮลจะถูกแยกออกจากกันโดยโฮลจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วลบ ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวก (ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า) ในรูปที่ 4 แสดงเส้นสนามไฟฟ้า (electric field lines) ภายใต้ขั้วโลหะ เมื่อพาหะที่เกิดจากแสงเคลื่อนที่ไปถึงขั้ว เกิดการไหลของกระแสที่วงจรภายนอก กระแสโฟโตนี้จะเพิ่มตามความเข้มแสงที่ตกกระทบ



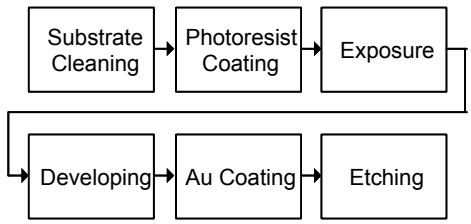
รูปที่ 3 แสดงไดอะแกรมแถบพลังงานของโฟโตดีเทคเตอร์ที่มีกำแพงศักย์แบบชอตต์กี



รูปที่ 4 แสดงการเกิดสนามไฟฟ้าภายใต้ขั้วโลหะ

3. การสร้าง

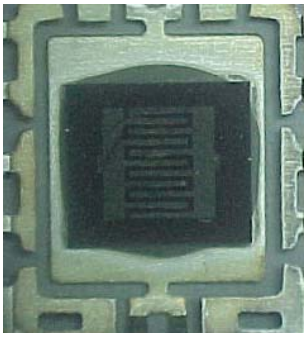
สารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการทำโฟโตดีเทคเตอร์เป็นแกลเลียมอาร์เซไนด์ฟอสไฟด์ที่ได้จากการปลูกผลึกบนแผ่นรองรับแกลเลียมอาร์เซไนด์ด้วยระบบ MBE กรรมวิธีการสร้างขั้วโลหะบนสารกึ่งตัวนำมีขั้นตอนดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงกรรมวิธีการสร้างขั้วโลหะ [3]

กรรมวิธีการสร้างขั้วโลหะประกอบด้วยขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นสารกึ่งตัวนำ (substrate cleaning) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการลดจุดบก

พร่องของรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำกับขั้วโลหะหลังจากนั้นเข้าสู่กระบวนการสร้างหน้ากากบนแผ่นสารกึ่งตัวนำโดยทำการเคลือบน้ำยาโฟโตรีซีส (photoresist coating) บนแผ่นสารกึ่งตัวนำ หมุนแผ่นสารกึ่งตัวนำที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาทีเพื่อให้โฟโตรีซีสกระจายอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นทำการฉายแสง (exposure) ตามลักษณะขั้วที่ออกแบบไว้ หลังจากผ่านขั้นตอนการฉายแสงทำการดึงโฟโตรีซีสส่วนที่ไม่ต้องการออก (developing) ซึ่งจะได้หน้ากากรูปขั้วโลหะตามที่ออกแบบไว้ หลังจากนั้นทำการปลูกขั้วโลหะทอง (Au coating) โดยใช้วิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ ความหนาของขั้วโลหะประมาณ 100 นาโนเมตร การปลูกขั้วโลหะให้บางๆ เพื่อให้แสงที่ตกกระทบสามารถผ่านชั้นของขั้วโลหะได้ จากนั้นกำจัดโฟโตรีซีสส่วนที่เหลือออก (etching) ซึ่งได้โครงสร้างขั้วโลหะบนสารกึ่งตัวนำมีขนาดความกว้างของขั้วและระยะระหว่างขั้วเท่ากับ 100 ไมครอน ขนาดพื้นที่เท่ากับ 2100×1300 ตารางไมครอน ลักษณะขั้วที่ได้แสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงลักษณะขั้วโลหะทองบนสารกึ่งตัวนำ

การหาค่าความจุของโฟโตดีเทคเตอร์แบบ MSM ใช้วิธีการคำนวณแบบ 2 มิติ ที่เรียกว่าคอนฟอมอลแมบปิง (conformal mapping) [4,5] เป็นวิธีการประมาณค่าความจุที่เกิดจากเขตปลอดพาหะโดยพิจารณาใน 2 มิติ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$C = \frac{K(k)}{K(k')} \varepsilon_0 (1 + \varepsilon_r) \frac{A}{\text{finger} \quad \text{period}}$$

เมื่อ A เป็นพื้นที่รับแสง

ε_o เป็นสภาพยอมในสุญญากาศ (8.854×10^{-34} F/m)

ε_r เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (ประมาณ 12 สำหรับแกลเลียมอาร์เซไนด์) ระยะคาบของขั้ว (finger period) คือระยะที่มีขั้วและไม่มีขั้วในหนึ่งคู่

และ K(k) และ K(k′) เป็นฟังก์ชันการอินทิกรัลเชิงวงรี (complete elliptic integral of the first kind)

ซึ่งหาได้จาก

$$K(k) \equiv \int_0^{\pi/2} \frac{d\phi}{\sqrt{(1 - k^2 \sin^2 \phi)}}$$

เมื่อ

$$k \equiv \tan^2 \frac{\pi}{4} \frac{L}{W + L}$$

และ

$$K(k') \equiv \int_0^{\pi/2} \frac{d\phi}{\sqrt{(1 - k'^2 \sin^2 \phi)}}$$

เมื่อ

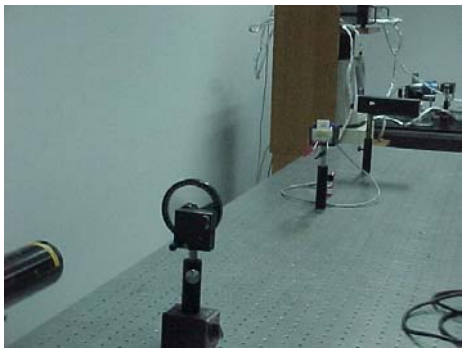
$$k' \equiv \sqrt{(1 - k^2)}$$

โดย W และ L เป็นความกว้างของขั้วโลหะและระยะระหว่างขั้วโลหะ ตามลำดับ

จากโครงสร้างที่ออกแบบไว้สามารถคำนวณค่าความจุได้ประมาณ 1 พิโกฟารัด

4. การทดลองและการอธิบาย

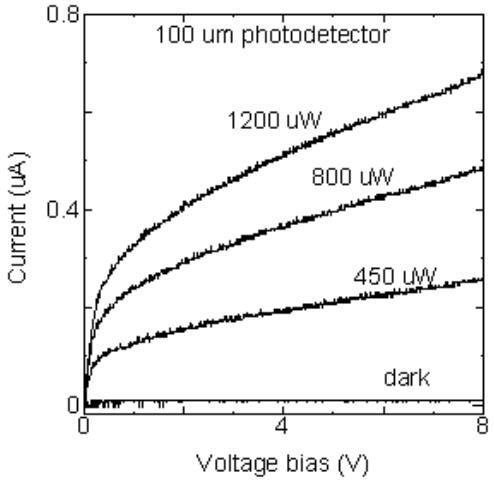
ทำการศึกษาสมบัติทางแสงของโตดีเทคเตอร์โดยจัดระบบดังรูปที่ 7 แสงความยาวคลื่น 632 นาโนเมตรจากฮีเลียมนีออนเลเซอร์ส่งผ่านอุปกรณ์ปรับความเข้มแสงก่อนเข้าโฟโตดีเทคเตอร์ ลอกอินแอมปลิไฟเออร์ใช้ในการวัดค่ากระแสโฟโตและควบคุมแรงดันไบแอสผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์



รูปที่ 7 แสดงระบบการวัดสมบัติกระแส-แรงดัน

จากการทดลองได้กราฟในรูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่ากระแสมืด (dark current) อยู่ในระดับที่ต่ำมากเนื่องจากกำแพงศักย์ของซอตต์กี และกระแสเพิ่มมากขึ้นตามค่าความเข้มแสงที่ตกกระทบ พิจารณาในแต่ละความเข้มแสงจะพบว่ากระแสเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบแอส ซึ่งสารถอธิบายได้ว่าพาหะที่เกิดจาก

แสงในชั้นแอกทีฟใช้เวลาในการเคลื่อนที่ไปยังขั้วไม่เท่ากัน กรณีที่แรงดันดันไบแอสน้อยๆ ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าไม่แรงพอที่จะทำให้พาหะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วอิ่มตัวซึ่งพาหะบางส่วนเกิดการรวมตัวกันก่อนที่จะไปถึงขั้ว แต่เมื่อเพิ่มแรงดันไบแอสมากขึ้นเกิดสนามไฟฟ้ามากขึ้นตามทำให้พาหะเคลื่อนที่ไปถึงขั้วก่อนที่จะมีการรวมตัวกัน นั่นคือทำให้เกิดกระแสมากขึ้นตามค่าแรงดันไบแอสซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี



รูปที่ 8 แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงของกระแสโฟโต ที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ

สรุป

จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าโครงสร้าง MSM เป็นโครงสร้างที่ประดิษฐ์ได้ง่าย ค่าความจุที่ได้มีค่าต่ำซึ่งส่งผลทำให้แบนด์วิดธ์สูงขึ้นเหมาะสำหรับการสื่อสารที่ต้องการความเร็วสูง รวมทั้งกระแสมืดที่ได้มีค่าต่ำ โดยโฟโตดีแทคเตอร์แกลเลียมอาร์เซไนด์ฟอสไฟด์สามารถนำไปใช้ในงานสื่อสารทางแสงในย่านสีแดงจนถึงอินฟาเรดโดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนวิจัยจากเนคเทครวมทั้งได้รับความร่วมมือเกี่ยวกับลิโทกราฟฟีจากห้องปฏิบัติการออปโตอิเล็กทรอนิกส์และศูนย์วิจัยไมโครอิเล็กทรอนิกส์เป็นอย่างดีในด้านเครื่องมือรวมทั้งอาจารย์นักศึกษาของห้องปฏิบัติการวิจัยควอนตัมและสารกึ่งตัวนำทางแสงที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ จึงขอขอบคุณทุกฝ่ายไว้ ณ ที่นี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

[1] Paul R. Berger, " MSM photodiodes", IEEE Potential, April / May 1996.

[2] Julian B., D. Soole and Hermann Schumacher, "Transit-Time Limited Frequency Response of InGaAs MSM Photodetectors", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 37, No. 11, November 1990, pp. 2285-2291.

[3] L.F. Thopson, C.G. Willson, and M.J.Bowden, "Introduction to Microlitho graphy", American Chemical Society, Washington, D.C., 1983, pp. 161-214.

[4] Sybil P.Parker, "McGraw-Hill Encyclo- pedia of Physics", Second Edition, McGraw-Hill, Inc., 1993, pp. 212-214.

[5] Murry R. Spiegel, "Theoretical Mechanics", McGraw-Hill book Company, 1989, pp 106.

อภิชาติ สังข์ทอง สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีทางวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม และปริญญาโทสาขาฟิสิกส์ประยุกต์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้รับทุนยกเว้นค่าเล่าเรียนตลอดการศึกษาระดับปริญญาตรี ทุนพัฒนาอาจารย์จากสถาบันราชภัฏราชนครินทร์ มีผลงานวิจัยเรื่อง wavelength division multiplexing ตีพิมพ์ในวารสาร IEEE

นิศาพร เกียรติไพศาลโสภณ จบการศึกษาปริญญาตรี (การศึกษาวิทยาศาสตร์-ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒสงขลา พ.ศ. 2533 จบปริญญาโท (ฟิสิกส์ประยุกต์) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2536 ทำงานในตำแหน่งนักวิจัย 1 งานวิจัยอิเล็กโทรออปติกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ในช่วง 2537-2544 ปัจจุบันศึกษาปริญญาเอก (ฟิสิกส์ประยุกต์/optoelectronics) ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

จิตติ หนูแก้ว จบการศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒสงขลา พ.ศ. 2526 จบการศึกษาระดับปริญญาโทสาขาฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ พ.ศ. 2532 และจบปริญญาเอกสาขา Material Sciences and Engineering จากมหาวิทยาลัยนาโกยา พ.ศ. 2541 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง หัวข้องานวิจัยที่สนใจได้แก่ Quantum Well Device, Semiconductor Physics และ Optical Instrumentation.