



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

หัวตรวจจับก๊าซประสิทธิภาพสูงที่อุณหภูมิต่ำที่มีฐานเป็น
ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบสองขั้ว
เมื่อถูกกระตุ้นด้วยการส่องสว่างของแสง

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ วงศ์ราษฎร์

ธันวาคม 2563

(ทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่)

สัญญาเลขที่ MRG6280132

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

หัตถ์ตรวจจับก๊าซประสิทธิภาพสูงที่อุณหภูมิต่ำที่มีฐานเป็น
ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบสองขั้ว
เมื่อถูกกระตุ้นด้วยการส่องสว่างของแสง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ วงศ์ราษฎร์
มหาวิทยาลัยพะเยา

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยและ
สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย
สกว. และ สกอ. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

Abstract

The FETs with asymmetry device will be architected using ZnO nanostructures (n-type) as active channel via current heating process. These devices were tested toward ammonia vapor at various concentrations. The results show that the threshold voltage (V_{TH}) of field effect transistors devices with ZnO channel has a value of 0.3 V. After these devices were tested with ammonia, the threshold voltage changes to be -1.4 V, -1.3 V, -2.5 V at concentrations of 100 ppm, 500 ppm, 1000 ppm respectively. Moreover, the conductometric ammonia sensor based on ZnO nanostructures decorated with graphene quantum dots (GQDs) also have been investigated. It can be seen that the ammonia sensing characteristics ZnO:GQDs sensors at room temperature have optimum sensor responses at an ammonia concentration of 1000 ppm with a value of 6047. The ammonia sensing properties of ZnO:GQDs sensors are due to the GQDs' carboxyl and hydroxyl groups, which produce more oxygen-containing groups leading to a high H^+ molecule density. This further contributes to their highly responsive and selective performance for sensing ammonia at room temperature.

บทคัดย่อ

ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าถูกสร้างโดยใช้โครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่ถูกสังเคราะห์โดยกระบวนการให้ความร้อนด้วยไฟฟ้าเป็นช่องนำกระแส จากนั้นนำไปทดสอบการตอบสนองต่อก๊าซแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ผลการทดสอบพบว่าทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่า threshold voltage (V_{TH}) เปลี่ยนจาก 0.3 โวลต์ เป็น -1.4 โวลต์, -1.3 โวลต์ และ -2.5 โวลต์ ที่ความเข้มข้นของแอมโมเนีย 100 ppm, 500 ppm และ 1000 ppm ตามลำดับ ยิ่งไปกว่านั้น เซนเซอร์ชนิดวัดการนำไฟฟ้าของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่ถูกเติมด้วยหมุดควอนตัมกราฟีนมีค่าสภาพไวสูงที่ 6047 ที่ความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ 1000 ppm สมบัติการตรวจจับก๊าซแอมโมเนียของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่ถูกเติมด้วยหมุดควอนตัมกราฟีนเกิดขึ้นเนื่องมาจากกลุ่มของ carboxyl และ hydroxyl ที่สร้างความหนาแน่นของโมเลกุล H^+ ขึ้น ดังนั้น เซนเซอร์นี้จึงเป็นเซนเซอร์ที่มีค่าสภาพไวและค่าจำเพาะสูงสำหรับการตอบสนองต่อก๊าซแอมโมเนียที่อุณหภูมิห้อง

Keywords : FETs, Ammonia sensor, ZnO, GQDs

Project Code : MRG6280132

(รหัสโครงการ)

Project Title : High performance gas sensor at low operating temperature based on Ambipolar Organic Field Effect Transistors (AOFETs) activated with light illumination.

(ชื่อโครงการ)

Investigator : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ วงศ์ราษฎร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

(ชื่อนักวิจัย)

E-mail Address : ekasiddhwongrat@gmail.com

Project Period : 2 ปี

(ระยะเวลาโครงการ)

สารบัญ

	หน้า
บทนำ	
- ที่มาและความสำคัญ	1
- วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
- ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์	3
- กลไกการตอบสนองต่อก๊าซของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์	5
- ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบสองขั้ว	7
- สารกึ่งตัวนำ PCDTBT	8
- หมุดควอนตัมกราฟีน	9
วิธีดำเนินการวิจัย	
- เตรียมทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าโดยใช้ซิงก์ออกไซด์เป็นช่องนำกระแส	11
- เตรียมทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่มีฐานเป็น PCDTBT และ F ₁₆ CuPc	13
- การทดสอบประสิทธิภาพของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์	15
- การทดสอบประสิทธิภาพของหัวตรวจจับก๊าซที่มีฐานเป็นซิงก์ออกไซด์ที่ถูกเติมด้วยหมุดควอนตัมกราฟีน	17
ผลการวิจัย	
- ผลการตรวจจับก๊าซของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าโดยใช้ซิงก์ออกไซด์เป็นช่องนำกระแส	18
- ผลการทดสอบทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ที่มี P3HT เป็นช่องนำกระแส	24
- ผลการทดสอบทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ที่มี P3HT:N-rGO เป็นช่องนำกระแส	26
- ผลการทดสอบทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบสองขั้ว (AOFETs) ที่มี PCDTBT และ F ₁₆ CuPc เป็นช่องนำกระแส	28
- ผลการทดสอบทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบสองขั้ว (AOFETs) ที่มี P3HT และ F ₁₆ CuPc เป็นช่องนำกระแส	29
- เปรียบเทียบผลการทดสอบทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบสองขั้ว (AOFETs)	31
- ผลการทดสอบการตอบสนองต่อก๊าซแอมโมเนีย เอทานอล และก๊าซอะซิโตน ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ที่มี PCDTBT เป็นช่องนำกระแส	33
- ผลการทดสอบการตอบสนองต่อก๊าซแอมโมเนียของเซนเซอร์นาโนซิงก์ออกไซด์ที่ถูกเติมด้วยหมุดควอนตัมกราฟีน	40

หน้า

สรุปผลการวิจัย	47
เอกสารอ้างอิง	51
Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.	53

บทนำ

ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันสังคมผู้สูงอายุเป็นสังคมที่ต้องเฝ้าระวังเพราะว่าคนไทยยังขาดความรู้ความเข้าใจในผู้สูงอายุโดยเฉพาะการดูแลสุขภาพ การเฝ้าระวัง การแจ้งเตือน ก่อนที่จะเกิดเหตุร้ายที่ไม่คาดฝัน ประเทศไทยยังคงเป็นประเทศเกษตรกรรมและผู้สูงอายุส่วนใหญ่อยู่ในชนบทเนื่องจากลูกหลานจำนวนมากได้หลังไหลเข้าไปหางานทำในเมือง เหตุนี้ทำให้ผู้สูงอายุที่กระจายอยู่ตามสังคมชนบทมักจะอยู่เพียงลำพังหรืออยู่กับญาติที่ขาดความรู้ ความเข้าใจในการดูแลสุขภาพผู้สูงอายุ การเฝ้าระวังด้วยตัวเองจึงเป็นสิ่งที่ผู้สูงอายุสามารถทำได้แม้ไม่ได้รับการช่วยเหลือจากบุคคลใกล้เคียง ผู้วิจัยจึงคาดหวังว่าการสร้างหัตถรวจจับก๊าซที่สามารถบอกสิ่งผิดปกติหรือบอกโรคที่อาจเกิดขึ้นต่อร่างกายของผู้สูงอายุจะเป็นสิ่งที่สร้างความแตกต่าง

โดยปกติในร่างกายมนุษย์จะมีก๊าซชนิดต่างๆ ที่ออกมาจากลมหายใจของมนุษย์เสมอๆ เมื่อใดก็ตามที่ร่างกายมีความผิดปกติหรือมีภาวะที่อันตรายเฉียบพลันจะได้พาคนไข้โดยเฉพาะผู้สูงอายุไปพบแพทย์ได้อย่างทันท่วงที ก๊าซชนิดต่างๆ ที่ออกมาจากลมหายใจมีหลายชนิด เช่น ในภาวะคนไข้ที่เป็นโรคเบาหวานจะมีก๊าซอะซิโตนออกมาจากลมหายใจที่มากกว่าปกติ โดยมีถึงระดับ 2 ppm หรือในภาวะที่คนไข้ป่วยเป็นโรคไตจะมีก๊าซแอมโมเนียออกมาจากลมหายใจที่มากกว่าปกติ ด้วยเหตุนี้การตรวจจับก๊าซด้วยตัวเองจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่คนไข้โดยเฉพาะผู้สูงอายุจะสามารถตรวจโรคด้วยตัวเองเบื้องต้นก่อนที่จะเกิดอันตรายถึงชีวิต

อนาคตการตรวจวินิจฉัยโรคแบบวัดปริมาณก๊าซจากลมหายใจจะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่คนไข้ทุกคนพอใจโดยเฉพาะผู้สูงอายุ เนื่องจากคนไข้บางคนกลัวเข็มทำให้เป็นกังวลในการเจาะเลือดไปตรวจวินิจฉัยโรค องค์ประกอบหลักของหัตถรวจจับก๊าซคือชิ้นการตอบสนองซึ่งโดยส่วนใหญ่เป็นสารที่สร้างมาจากสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีย์โดยเฉพาะดีบุกออกไซด์ ต่อมาสารซิงก์ออกไซด์ก็ได้มีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย แต่ไม่ว่าจะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดใดแล้วแต่มีข้อเสียอยู่อย่างหนึ่งคือ มีค่าความจำเพาะต่อก๊าซที่ต่ำ แม้ว่าสารเหล่านั้นจะมีค่าสภาพไวสูงก็ตาม ที่สำคัญสารกึ่งตัวนำเหล่านั้นทำงานได้ดีที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 300 องศาเซลเซียส เป็นต้นไป เนื่องจากที่อุณหภูมินี้การเกิดปฏิกิริยาการดูดซับออกซิเจนและปฏิกิริยาการดูดซับก๊าซจะเกิดได้ดี ดังนั้นทางเลือกหนึ่งที่ผู้วิจัยสนใจศึกษาได้แก่การใช้ชิ้นการตอบสนองต่อก๊าซเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีย์ที่มีความจำเพาะเจาะจงต่อก๊าซดีกว่า และอีกอย่างหนึ่งคือการเตรียมโครงสร้างของเซนเซอร์ที่มีฐานเป็นทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าจะสามารถเหนี่ยวนำให้หัตถรวจจับก๊าซมีการตอบสนองได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนั้นการเติมหมวดควอนตัมกราฟีนลงไปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทางด้านเพิ่มความจำเพาะและเพิ่มสภาพไวที่อุณหภูมิต่ำจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง [1-6]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะเน้นไปที่การทดสอบการตอบสนองต่อก๊าซแอมโมเนียเป็นหลัก เนื่องจากก๊าซแอมโมเนียเป็นก๊าซที่ปล่อยออกมาจากลมหายใจของผู้ป่วยที่มีปัญหาจากการทำงานที่ผิดปกติของไตโดยเฉพาะผู้ป่วยสูงอายุ ผู้วิจัยคิดว่างานวิจัยที่เกี่ยวกับผู้สูงอายุจะช่วยประเทศในแง่ลดการนำเข้าของเทคโนโลยีที่มีราคาแพงได้

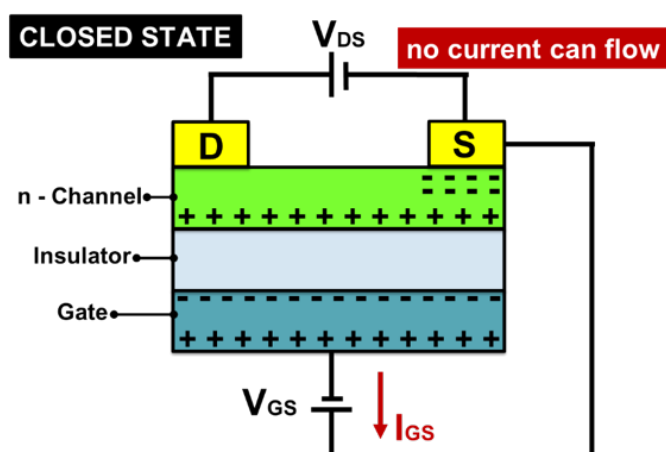
วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อสร้างทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า
2. เพื่อนำทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้เป็นหัวตรวจจับก๊าซแอมโมเนียที่อุณหภูมิห้อง
3. เพื่อเพิ่มค่าสภาพไวและความจำเพาะต่อก๊าซแอมโมเนียที่อุณหภูมิห้องโดยการใช้หมุดควอนตัมกราฟีน

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

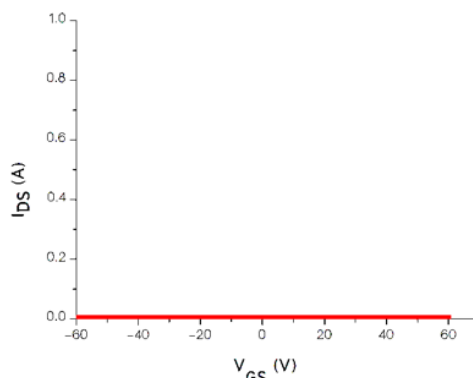
ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ (Organic Field-Effect Transistors, OFETs)

ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์มีองค์ประกอบหลักอยู่ 3 ส่วน ได้แก่ ขั้วเกต, ชั้นไดอิเล็กทริก และช่องนำกระแส การวัดลักษณะการเปลี่ยนแปลงเฉพาะของทรานซิสเตอร์จะต้องวัด 3 ขั้ว ประกอบไปด้วยขั้วเกต เทรนและซอส เพื่อใช้ขั้วเกตและซอสเป็นส่วนเหนี่ยวนำให้เกิดพาหะที่เคลื่อนที่ได้ในช่องนำกระแส องค์ประกอบพื้นฐานแสดงในรูปที่ 1



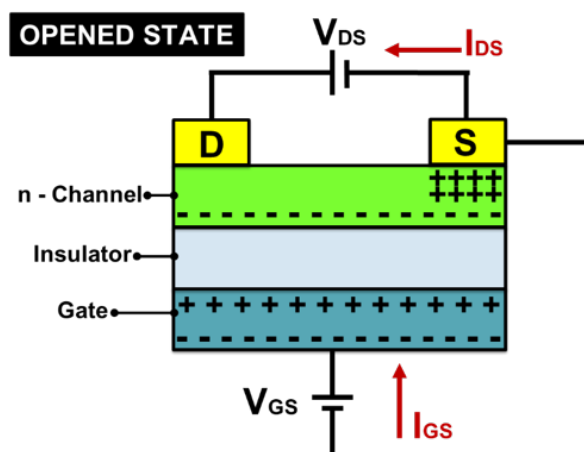
รูปที่ 1 โครงสร้างของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์

กลไกการทำงานของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่มีช่องนำกระแสเป็นชนิดเอ็นพิจารณาจากรูปที่ 1 พบว่าเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าลบให้กับขั้วเกตซึ่งอยู่ด้านล่างของ substrate และจ่ายแรงดันไฟฟ้าบวกให้กับขั้วเทรน และจ่ายแรงดันไฟฟ้าลบให้กับขั้วซอส จะเกิดการเรียงตัวของประจุลบบริเวณด้านบนของชั้นเกต และเกิดการเหนี่ยวนำประจุบวกที่มีการเรียงตัวอยู่บริเวณชั้นล่างของชั้นสารอินทรีย์ชนิดเอ็น ส่งผลให้ประจุลบของชั้นสารอินทรีย์ชนิดเอ็นรวมตัวกันอยู่ที่ขั้วซอส ทำให้ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านระหว่างขั้วเทรนกับขั้วซอส จึงเรียกการทำงานของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ในลักษณะนี้ว่า Closed state กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเทรน ซอส (I_{ds}) กับความต่างศักย์เกต ซอส (V_{gs}) แสดงในรูปที่ 2

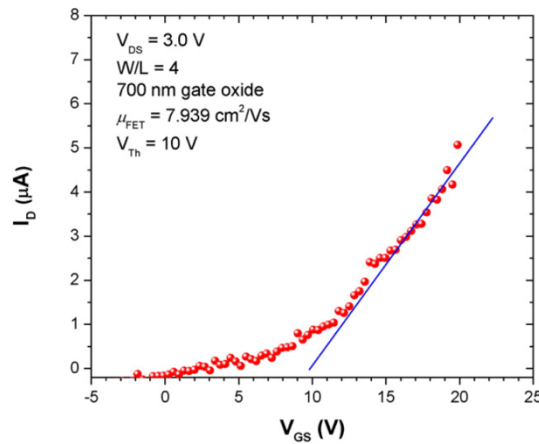


รูปที่ 2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} และ V_{GS} ในการทำงานของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบ Closed state

จากรูปที่ 3 เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าบวกให้กับขั้วเกตซึ่งอยู่ด้านล่างของ substrate ขณะที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าบวกให้กับขั้วเดรน และจ่ายแรงดันไฟฟ้าลบให้กับขั้วซอร์ส จะเกิดการเรียงตัวของประจุบวกบริเวณด้านบนของชั้นเกต ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำประจุลบเรียงตัวอยู่บริเวณด้านล่างของชั้นสารอินทรีย์ชนิดเอ็น ส่งผลให้ประจุบวกของชั้นสารอินทรีย์รวมตัวกันอยู่ที่ขั้วซอร์ส จึงทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านระหว่างขั้วเดรนกับขั้วซอร์ส จึงเรียกการทำงานของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ในลักษณะนี้ว่า Opened state กระแสไฟฟ้าจะเริ่มไหลเมื่อมีค่าแรงดันไฟฟ้าค่าหนึ่งที่เรียกว่า แรงดันไฟฟ้าขีดเริ่ม (Threshold voltage, V_{TH}) ซึ่งสามารถหาได้จากการลากเส้นแนวโน้มให้ตัดกับแกน X ที่เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วเกตกับขั้วซอร์ส (V_{GS}) จุดตัดบนแกน x คือค่าแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่ม (V_{TH}) ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 3 การทำงานของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบ Opened state



รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} และ V_{GS} ในการทำงานของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบ Opened state [7]

กลไกการตอบสนองต่อก๊าซของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์

กลไกการเปลี่ยนแปลงของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์เมื่อมีการปล่อยก๊าซเข้าสู่ระบบพบว่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงต่อความหนาแน่นของพาหะในช่องนำกระแสโดยจะเป็นลักษณะให้หรือรับอิเล็กตรอนขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซและชนิดของช่องนำกระแส ในกรณีการทำงานของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบ Opened state ที่ใช้สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีย์แบบเอ็น เมื่อปล่อยก๊าซที่มีคุณสมบัติให้อิเล็กตรอนจะทำให้อิเล็กตรอนบนชั้นสารอินทรีย์ชนิดเอ็นเพิ่มจำนวนขึ้น จึงทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลระหว่างขั้วเดรนกับขั้วซอสเพิ่มมากขึ้นด้วยในทางตรงกันข้าม ถ้าปล่อยก๊าซที่มีคุณสมบัติรับอิเล็กตรอน ส่งผลให้อิเล็กตรอนบนชั้นสารอินทรีย์ชนิดเอ็นลดลง จึงทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลระหว่างขั้วเดรนกับขั้วซอสลดลงเช่นกัน

กระแสที่ไหลผ่านขั้วเดรนกับขั้วซอสจะขึ้นอยู่กับสมการที่ (1) ดังนี้ [7]

$$I_{DS} = \frac{W}{L} \mu_{FET} C_i \left(V_{GS} - V_{TH} - \frac{V_{DS}}{2} \right) V_{DS} \quad (1)$$

โดยที่

W และ L คือ ความกว้างและความยาวของช่องนำกระแส (Channel)

μ_{FET} คือ ค่าสภาพไวของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าอินทรีย์

C_i คือ ค่าความจุไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของชั้นไดอิเล็กทริก, $C_i = \frac{\epsilon_0 \epsilon}{d_{Oxide}}$

(ϵ_0 คือ ค่าแรงต้านสนามไฟฟ้าในสุญญากาศ, ϵ คือ ค่าแรงต้านสนามไฟฟ้า

และ d_{Oxide} คือ ความหนาของชั้นไดอิเล็กทริก)

V_{GS} คือ แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วเกตกับขั้วซอส

V_{DS} คือ แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วเดรนกับขั้วซอส

V_{TH} คือ แรงดันไฟฟ้าขีดเริ่ม (Threshold voltage)

พารามิเตอร์ที่สำคัญของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าอินทรีย์

อัตราส่วนเปิด/ปิดกระแสไฟฟ้า (On/off Ratio)

อัตราส่วนเปิด/ปิดกระแสไฟฟ้า ปัจจุบันเป็นพารามิเตอร์ FET ที่สำคัญอย่างหนึ่งที่สามารถได้มาจากลักษณะการถ่ายโอนกระแสไฟฟ้าเดรน-ซอสเทียบกับความต่างศักย์ไฟฟ้าเกต-ซอส (I_{ds} vs V_{gs}) อัตราส่วนเปิด/ปิดกระแสไฟฟ้า (On/off Ratio) คืออัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าเดรน-ซอส ในสถานะเปิด (I_{on}) กับกระแสไฟฟ้าเดรน-ซอส ในสถานะปิด (I_{off}) เพื่อประสิทธิภาพในการทำงานที่ดีที่สุดของทรานซิสเตอร์ ค่านี้ควรมีขนาดมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ หากไม่สนใจผลกระทบของความต้านทานในการฉีดเข้าไฟฟ้าเดรน-ซอส กระแสไฟฟ้าเดรน-ซอสในสถานะเปิด (I_{on}) ส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับค่าความคล่องตัว (mobility) ของสารกึ่งตัวนำและค่าความจุไฟฟ้าของขั้วเกต ส่วนกระแสไฟฟ้าเดรน-ซอส ในสถานะปิด (I_{off}) จะขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าเกตที่รั่ว [8]

อัตราส่วนเปิด/ปิดกระแสไฟฟ้า (On/Off Ratio) หาได้จากสมการ

$$\text{On/Off Ratio} = \frac{I_{on}}{I_{off}} \dots\dots\dots (2)$$

On/Off Ratio คือ อัตราส่วนเปิด/ปิดกระแสไฟฟ้า

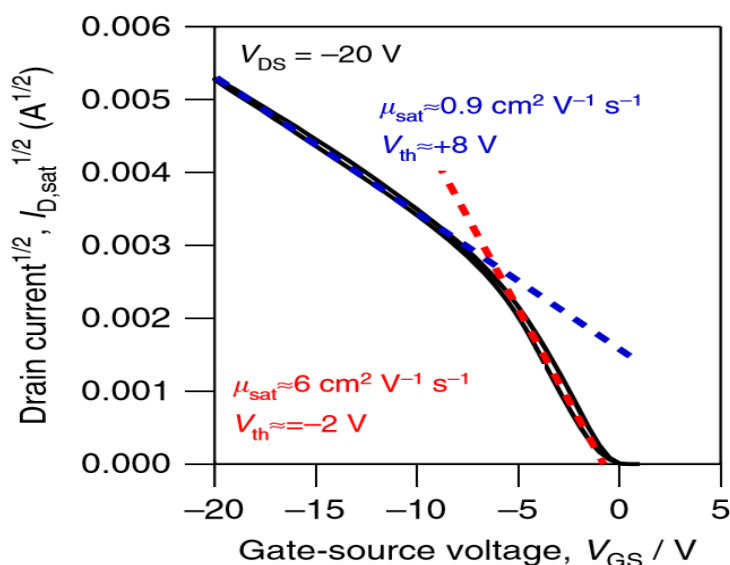
I_{on} คือ กระแสไฟฟ้าเดรน-ซอส ในสถานะเปิด

I_{off} คือ กระแสไฟฟ้าเดรน-ซอส ในสถานะปิด

ความต่างศักย์ไฟฟ้าขีดเริ่ม (Threshold Voltage, V_{th})

ความต่างศักย์ไฟฟ้าขีดเริ่ม เกิดขึ้นจากผลกระทบหลายอย่างและขึ้นอยู่กับสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีย์และฉนวนไฟฟ้าที่ใช้เป็นอย่างมาก โดยทั่วไปแล้วความต่างศักย์ไฟฟ้าขีดเริ่มสามารถถูกรบกวนจากสาเหตุของลักษณะของพื้นผิว การดักจับประจุไฟฟ้า การเกิดสิ่งสกปรก และสามารถลดลงได้จากความจุไฟฟ้าที่ขั้วเกตที่เพิ่มขึ้นซึ่งจะเหนี่ยวนำประจุที่ความต่างศักย์ต่ำๆ และเป็นสาเหตุให้ศักย์ไฟฟ้าขีดเริ่มมีค่าไม่คงที่ ในหลายกรณีความต่างศักย์ไฟฟ้าขีดเริ่มจะไม่คงที่ โดยความต่างศักย์ไฟฟ้าขีดเริ่ม (V_{th}) มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อทรานซิสเตอร์อินทรีย์ถูกใช้เป็นเวลายาวนาน สิ่งนี้เรียกว่า **bias stress behavior** และมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการใช้งานของทรานซิสเตอร์อินทรีย์ในวงจรไฟฟ้าและการใช้งานจริง [8]

ความต่างศักย์ไฟฟ้าขีดเริ่มนี้หาได้จากการลากเส้นตรงผ่านความชันเชิงเส้นของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของกระแสไฟฟ้าเดรน-ซอส กับความต่างศักย์ไฟฟ้าเกต ($I_{ds}^{1/2}$ versus V_{gs}) ซึ่งจะตัดกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเกตในแกน x และค่าความต่างศักย์เกตที่เส้นตรงตัดผ่านจะเป็นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าขีดเริ่ม (V_{th}) ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 5 ตัวอย่างการหาความต่างศักย์ไฟฟ้าขีดเริ่มแบบไม่อยู่ในอุดมคติ [9]

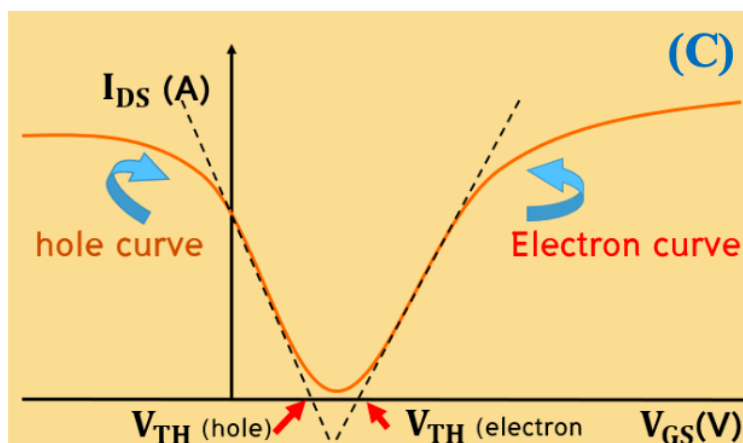
มีตัวอย่างงานวิจัยหนึ่งที่ใช้สารกึ่งตัวนำอินทรีย์ชื่อ รูบรีน (rubrene) เป็นสารกึ่งตัวนำประเภท p-type ในการสร้างทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ โดยผลการวิจัยมีการหาความต่างศักย์ไฟฟ้าขีดเริ่ม (V_{th}) แบบไม่อยู่ในอุดมคติ ผู้วิจัยได้อธิบายถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของกระแสไฟฟ้าเดรน-ซอส กับความต่างศักย์ไฟฟ้าเกต ($I_{ds}^{1/2}$ versus V_{gs}) จะมีการเปลี่ยนแปลงความชันมากในช่วงบริเวณเชิงเส้น (Linear Region) ($|V_{ds}| < |V_{gs} - V_{th}|$) ไปเป็นความชันน้อยในช่วงบริเวณอิ่มตัว (Saturation Region) ($|V_{ds}| > |V_{gs} - V_{th}|$) โดยทั้ง 2 ช่วงสามารถลากเส้นตรงผ่านความชันของกราฟแล้วหาจุดตัดความต่างศักย์ไฟฟ้าเกตในแกน x เพื่อหาความต่างศักย์ไฟฟ้าขีดเริ่มได้ทั้งคู่ ดังแสดงในรูปที่ 5 [9]

ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบสองขั้ว (Ambipolar Organic Field-Effect Transistor, AOFETs)

AOFETs มีข้อดีอย่างหนึ่งที่ดีกว่า OFETs แบบขั้วเดียวตรงที่สามารถลดกระแสกลับขั้วอย่างรุนแรงซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดความเสียหายต่อชั้นไดอิเล็กทริก โดยพารามิเตอร์ที่สำคัญในกระแสไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์คือการเคลื่อนที่ของพาหะบนช่องการนำกระแสซึ่งส่วนหนึ่งจะขึ้นอยู่กับกรอกแบบลายวงจรบนทรานซิสเตอร์และทำให้เกิดกระแสไหลได้สองทาง หรืออาจกล่าวได้ว่าขณะที่ AOFETs ที่ถูกเตรียมแบบ bulk heterojunction หรือเตรียมเป็นชั้นแบบ p-n ก็ไม่จำเป็นต้องทำลายวงจรก็ยังสามารถทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานได้ทั้งสองทาง สำหรับสารอินทรีย์ที่นำไฟฟ้าได้ดีประกอบไปด้วย PCDTBT และ P3HT ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำแบบ p-type และมีพาหะโฮลเป็นตัวเคลื่อนที่ที่สร้างกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นในช่องนำกระแส

โครงสร้างพื้นฐานในการประกอบ AOFETs ก็คล้ายกับ OFETs คือประกอบไปด้วยชั้นของ SiO_2/Si และชั้นของช่องนำกระแสที่ใช้สารกึ่งตัวนำทั้งชนิด n และชนิด p พิจารณาหลักของ AOFETs ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจะถูกจ่ายด้วยการปรับค่าโดยอัตโนมัติ จากนั้น

สนามไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟก็จะเหนี่ยวนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพาหะบนชั้นของช่องนำกระแส โดยพาหะทั้งอิเล็กตรอนและโฮลสามารถเคลื่อนที่ได้ไม่ว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจะเป็นค่าบวกหรือลบ จึงเกิดกระแสไฟฟ้าที่ผ่านตรงกับขอสทั้งสองด้าน ดังนั้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าเดรนขอสและความต่างศักย์จะแสดงได้เป็น ดังรูปที่ 6



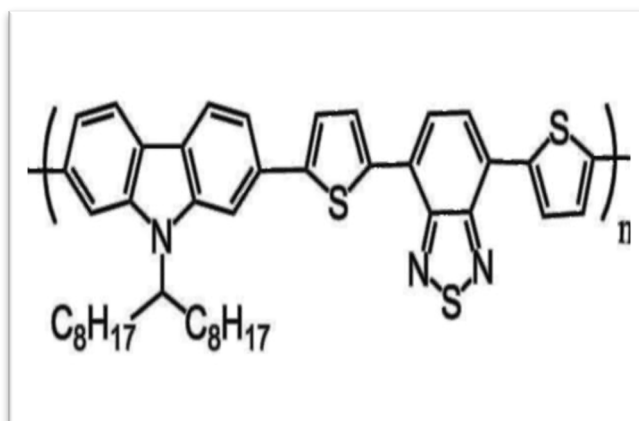
รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าเดรนขอสและความต่างศักย์ไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแบบสองขั้ว

สารกึ่งตัวนำ PCDTBT

ข้อมูลทั่วไปของสารกึ่งตัวนำ PCDTBT

PCDTBT หรือชื่อเต็มคือ (Poly[N-9'-heptadecanyl-2,7-carbazole-alt-5,5-(4',7'-di-2-thienyl-2',1',3'-benzothiadiazole)]) เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีย์ที่ให้โฮลอิเล็กตรอนหรือเป็นสารกึ่งตัวนำ P-type ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นสำหรับใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและอายุการใช้งานที่ดีขึ้น คุณสมบัติที่สำคัญของ PCDTBT เป็นผลมาจากระดับ HOMO/LUMO ที่ต่ำกว่าซึ่งเป็นข้อได้เปรียบกว่าวัสดุเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์อื่น ๆ ทำให้สามารถเพิ่มแรงดันไฟฟ้า และมีการดูดซับความยาวคลื่นที่ยาวและมีเสถียรภาพขึ้นภายใต้สภาพแวดล้อม

PCDTBT มีระดับ HOMO และ LUMO คือ -5.4 eV และ -3.6 eV ตามลำดับ มีสูตรโมเลกุล คือ $(C_{43}H_{47}N_3S_3)_n$ ดังแสดงในรูปที่ 7 [10]



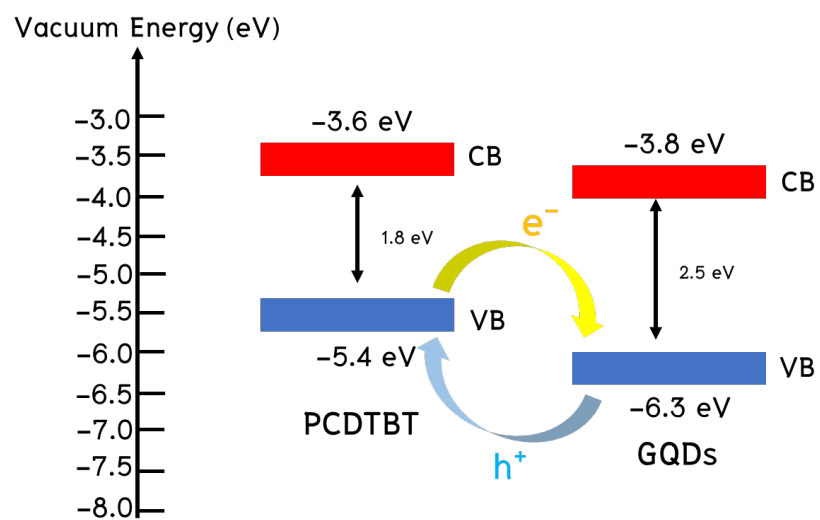
รูปที่ 7 โครงสร้างโมเลกุลของ PCDTBT [10]

หมุดควอนตัมกราฟีน (Graphene quantum dots, GQDs)

หมุดควอนตัมกราฟีนเป็นหนึ่งในตระกูลของคาร์บอน เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีขนาดระดับนาโนเมตร ถือว่ามีความเป็นมิติแบบศูนย์มิติ เป็นส่วนที่เกิดจากกราฟีนขนาดเล็กที่เป็นเลเยอร์เชิงเดี่ยวโดยอยู่ในระดับ 3-10 nm และเป็นสารที่มีผลของขนาดระดับควอนตัม หมุดควอนตัมกราฟีนมีคุณสมบัติทางแสงที่ดี สามารถดูดกลืนแสงได้ ข้อดีอื่นๆ ของหมุดควอนตัมกราฟีนคือมีสมบัติของการกักเก็บอิเล็กตรอนเดี่ยว (quantum confinement effects) นอกจากนี้คุณสมบัติทางแสงจะขึ้นอยู่กับการขนาดเป็นอย่างมาก ดังนั้นช่องว่างของแถบพลังงาน (Band gap) ของหมุดควอนตัมกราฟีนจึงสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามขนาด [11] ความหนาของโครงสร้างหมุดควอนตัมกราฟีนนั้นใกล้เคียงกับอะตอมเดี่ยวมาก ดังนั้นจึงแสดงคุณสมบัติพิเศษที่ได้รับจากการครอบครองสถานะควอนตัม เช่น คุณสมบัติการเรืองแสง การนำไฟฟ้าที่สูง การต้านทานการเกิดปฏิกิริยาเคมี มีเสถียรภาพ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้หมุดควอนตัมกราฟีนที่มีขนาดในระดับนาโนนั้นยังสามารถกระจายตัวได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์อีกด้วย [12]

การเพิ่มพาหะโฮลของ PCDTBT โดยหมุดควอนตัมกราฟีน (GQDs)

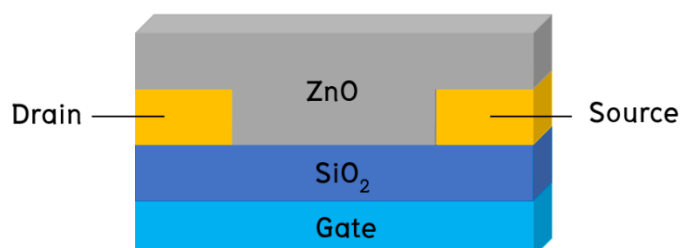
เนื่องจากสารทั้งสองชนิดนี้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p-type ซึ่งจะมีพาหะอิเล็กตรอนอิสระ (e^-) จำนวนน้อยที่อยู่ในแถบนำไฟฟ้า (CB) แต่จะมีพาหะโฮลอิสระจำนวนมากอยู่ในแถบวาเลนซ์ (VB) ซึ่ง PCDTBT มีระดับพลังงาน HOMO / LUMO ที่ต่ำกว่าสารอินทรีย์อื่น โดยมีระดับพลังงาน HOMO และ LUMO อยู่ที่ -5.4 eV และ -3.6 eV ตามลำดับ [10] และหมุดควอนตัมกราฟีน (GQDs) มีระดับพลังงานในแถบวาเลนซ์ (VB) อยู่ที่ -6.3 eV และมีระดับพลังงานในแถบนำ (Conduction Band, CB) อยู่ที่ -3.8 eV [13] ซึ่งแถบวาเลนซ์ของ PCDTBT มีพลังงานสูงกว่าแถบวาเลนซ์ของหมุดควอนตัมกราฟีน (GQDs) ทำให้ e^- ในระดับเฟอร์มิของ PCDTBT สามารถเคลื่อนย้ายไประดับเฟอร์มิของหมุดควอนตัมกราฟีนได้ ทำให้พาหะโฮลอิสระในแถบวาเลนซ์ของ PCDTBT เพิ่มขึ้น ส่งผลให้สามารถเพิ่มพาหะโฮลของ PCDTBT โดยใช้หมุดควอนตัมกราฟีนได้ ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 การเคลื่อนย้ายพาหะและแถบพลังงานของ PCDTBT กับ GQDs

วิธีดำเนินการวิจัย

1. เตรียมทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าโดยใช้ซิงก์ออกไซด์เป็นช่องนำกระแสโดยมีวิธีการวิจัยตามลำดับขั้นตอน ดังต่อไปนี้



รูปที่ 9 แสดงภาพจำลององค์ประกอบต่าง ๆ ในการสร้างทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า

1.1 ขั้นตอนการทำความสะอาดกระจก SiO_2

1. นำกระจก SiO_2 ใส่บีกเกอร์ และใส่น้ำอะซิโตนจนท่วมกระจก SiO_2
2. นำบีกเกอร์ในข้อ 1. ทำความสะอาดด้วยอัลตราโซนิคความถี่สูงเป็นเวลา 15 นาที
3. ทำซ้ำข้อ 1 และ 2 แต่เปลี่ยนจากอะซิโตนเป็นเอทิลแอลกอฮอล์ และน้ำปราศจากไอออนตามลำดับ

1.2 ขั้นตอนการเตรียมชั้นสารกึ่งตัวนำ

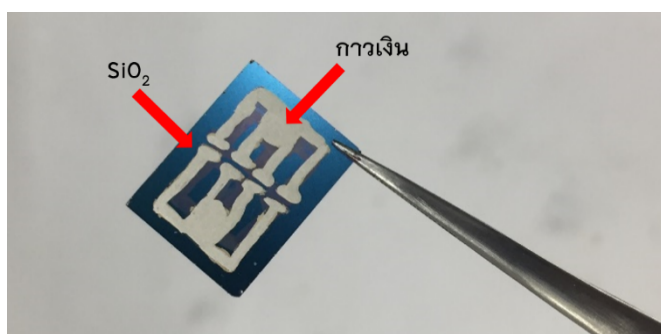
1. ละลาย PVA 10 กรัม ในน้ำปราศจากไอออน 50 มิลลิลิตร ด้วยเครื่องคนสารละลายด้วยแม่เหล็กที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส จน PVA ละลายจนหมด
2. นำ Zn Powder มาบดให้ละเอียด
3. นำสารละลาย PVA ที่เตรียมในข้อ 1. มาผสมกับ Zn Powder ที่บดละเอียดในข้อ 2. มาผสมเพื่ออัดเป็นแท่ง
4. ตัดแท่ง Zn Powder ที่ผสมกับ PVA ให้มีขนาดประมาณ 1 เซนติเมตร
5. นำแท่ง Zn Powder ไปเผาด้วยเตาเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



รูปที่ 10 แสดงแท่ง Zn ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

1.3 ขั้นตอนการเตรียมทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า

1. นำ SiO_2 ขนาด 2×1.5 เซนติเมตร ที่ทำความสะอาดเสร็จเรียบร้อยแล้วมาทากาวเงิน เพื่อที่จะทำเป็นขั้วเดรนและขั้วซอส จากนั้นทำขั้วเกตอีกด้านของ SiO_2
2. นำกระจก SiO_2 ที่ทำขั้วทั้ง 3 เสร็จเรียบร้อยแล้วมารองรับ ZnO จากเครื่องให้อุณหภูมิร้อน
3. นำ SiO_2 ที่ถูกเคลือบด้วย ZnO จากเครื่องให้อุณหภูมิร้อน ไปเผาที่เครื่องเผาด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. นำทรานซิสเตอร์ที่เตรียมเสร็จแล้วไปทดสอบ



รูปที่ 11 แสดง SiO_2 ที่ทา กาวเงินเพื่อที่จะทำเป็นขั้วเดรนและขั้วซอส



รูปที่ 12 แสดง SiO_2 ที่ถูกเคลือบด้วย ZnO โดยด้านซ้ายยังไม่ได้ผ่านการเผา และด้านขวาผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 13 แสดง SiO_2 ที่ติดขั้วโดยด้านซ้ายคือ ขั้วเดรนและขั้วซอร์ส และด้านขวาคือขั้วเกต

2. เตรียมทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่มีฐานเป็น PCDTBT และ F_{16}CuPc

2.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย

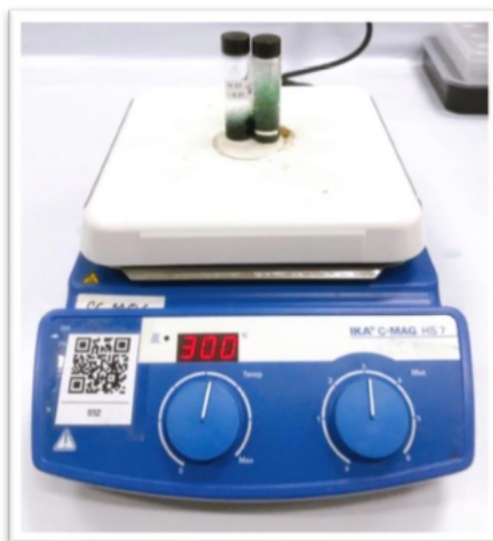
1. เตรียมสารละลาย PCDTBT ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม ละลายในสารละลาย 1,2-ไดคลอโรเบนซีน 1 มิลลิลิตร ละลายโดยใช้เครื่องคนสารด้วยแม่เหล็ก ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

2. เตรียมสารละลาย F_{16}CuPc ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม ละลายในสารละลาย 1,2-ไดคลอโรเบนซีน 1 มิลลิลิตร ละลายโดยใช้เครื่องคนสารด้วยแม่เหล็ก ที่อุณหภูมิห้อง (300°C) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 30 นาที

3. เตรียมสารละลาย P3HT ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม ละลายในสารละลาย 1,2-ไดคลอโรเบนซีน 1 มิลลิลิตร ละลายโดยใช้เครื่องคนสารด้วยแม่เหล็ก ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

4. เตรียมสารละลาย Si/N-rGO ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม ละลายในสารละลาย 1,2-ไดคลอโรเบนซีน 1 มิลลิลิตร ละลายโดยใช้เครื่องคนสารด้วยแม่เหล็ก ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

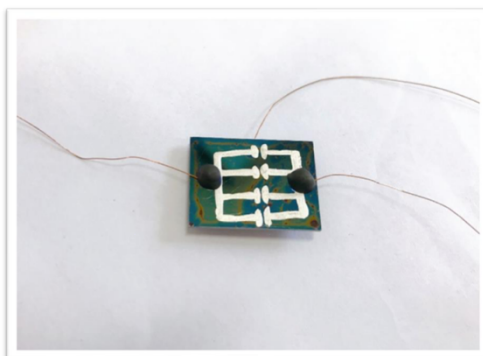
5. เตรียมสารละลายผสมระหว่างสารละลาย P3HT ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร กับสารละลายละลาย Si/NrGO ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อ มิลลิลิตร ในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร ผสมโดยใช้เครื่องคนสารด้วยแม่เหล็ก ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



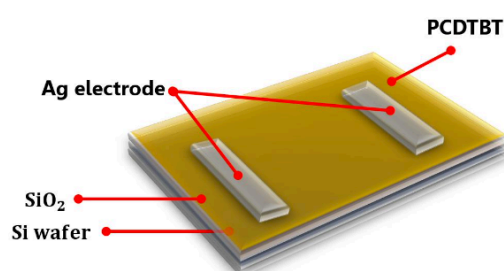
รูปที่ 14 ขั้นตอนเตรียมสารละลาย $F_{16}CuPc$ โดยใช้เครื่องคนสารด้วยแม่เหล็ก

1.2 ขั้นตอนการเคลือบแบบหมุนของ OFETs

1. นำแผ่น sample ไป Surface treatment ด้วยรังสียูวีเป็นเวลา 15 นาที
2. ใช้ไมโครปิเปตดูดสารละลาย P3HT/PCDTBT ปริมาณ 30 ไมโครลิตร หยดลงบนแผ่น sample ที่อบไว้ จากนั้นเคลือบแบบหมุนด้วยความถี่ 1500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 วินาที
3. นำแผ่น sample ที่เคลือบหมุนด้วยสารละลายผสม P3HT/PCDTBT ไป Surface treatment ด้วยรังสียูวีเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที
4. ทำความสะอาดขอบแผ่น sample ด้วย 1,2-ไดคลอโรเบนซีน เพื่อไม่ให้เกิดการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่าง ขั้วเกิดกับขั้วเดรน หรือ ขั้ว เกิดกับขั้วซอส
5. ใช้กาวยีนทาบนชั้นนำกระแสเพื่อทำขั้วเดรนและซอส ดังรูปที่ 15
6. นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้กาวยีนแห้ง
7. ต่อสายทองแดงยึดติดกับขั้วเกิด ขั้วเดรน และขั้วซอส ด้วย Conductive Paint จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้ Conductive Paint แห้ง



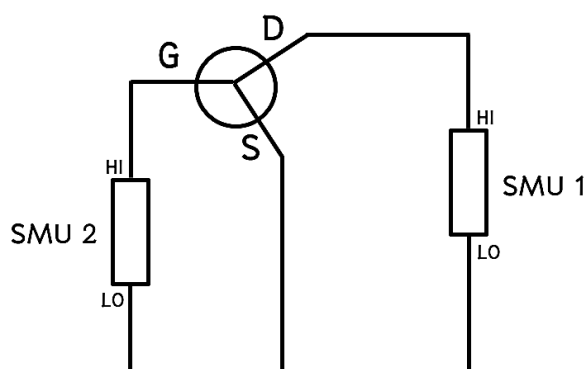
รูปที่ 15 ทรานซิสเตอร์ที่ช่องนำกระแสเป็นสารอินทรีย์



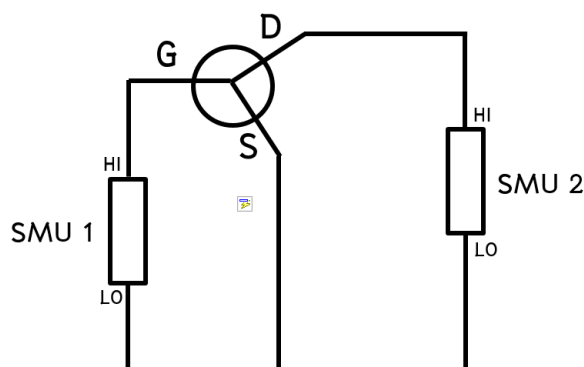
รูปที่ 16 รูปจำลองแสดงการเตรียมทรานซิสเตอร์ชนิดอินทรีย์

3. การทดสอบประสิทธิภาพของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ (กรณีไม่ทดสอบก๊าซ)

นำตัวอย่างทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์มาต่อวงจร เพื่อดูกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} กับ V_{GS} ดังรูปที่ 17 และความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} กับ V_{DS} ดังรูปที่ 13 ผ่านโปรแกรม KickStart ด้วย Keithley SMU รุ่น 2612B



รูปที่ 17 การต่อวงจรเพื่อดูกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} กับ V_{GS}



รูปที่ 18 การต่อวงจรเพื่อดูกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} กับ V_{DS}

4. การทดสอบประสิทธิภาพของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ (กรณีทดสอบก๊าซ)

1. การทดสอบก๊าซเอทานอล

- เตรียมสารละลายเอทานอลความเข้มข้น 100 ppm ในสัดส่วนเอทานอล 0.47 กรัม ละลายในน้ำ DI 1,000 กรัม และ เอทานอลความเข้มข้น 1,000 ppm ในสัดส่วนเอทานอล 4.70 กรัม ละลายในน้ำ DI 1000 กรัม

- ปลอ่ยก๊าซเอทานอลความเข้มข้น 100 ppm และ 1,000 ppm ตามลำดับ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} กับ V_{GS} และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} กับ V_{DS} ในแต่ละความเข้มข้น

2. การทดสอบก๊าซแอมโมเนีย

- เตรียมสารละลายแอมโมเนียความเข้มข้น 100 ppm ในสัดส่วนแอมโมเนีย 0.4237 กรัม ละลายในน้ำ DI 1,000 กรัม และแอมโมเนียความเข้มข้น 1,000 ppm ในสัดส่วนแอมโมเนีย 4.237 กรัม ละลายในน้ำ DI 1,000 กรัม

- ปลอ่ยก๊าซแอมโมเนียความเข้มข้น 100 ppm และ 1,000 ppm ตามลำดับ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} กับ V_{GS} และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} กับ V_{DS} ในแต่ละความเข้มข้น

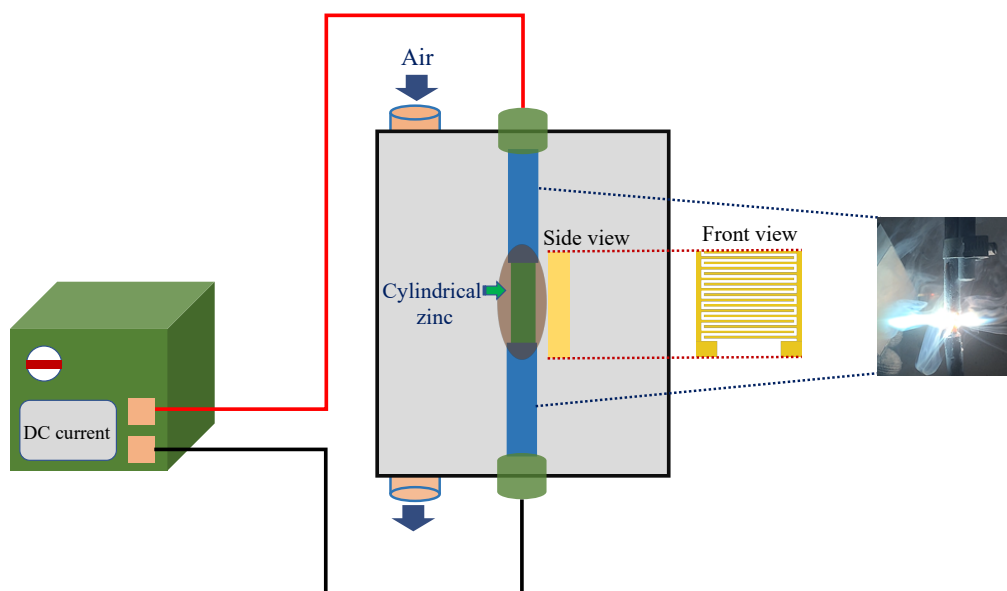
3. การทดสอบก๊าซอะซิโตน

- เตรียมสารละลายอะซิโตนความเข้มข้น 100 ppm ในสัดส่วนอะซิโตน 0.0395 กรัม ละลายในน้ำ DI 1,000 กรัม และอะซิโตนความเข้มข้น 1,000 ppm ในสัดส่วนอะซิโตน 0.395 กรัม ละลายในน้ำ DI 1,000 กรัม

- ปลอ่ยก๊าซอะซิโตนความเข้มข้น 100 ppm และ 1,000 ppm ตามลำดับ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} กับ V_{GS} และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} กับ V_{DS} ในแต่ละความเข้มข้น

4. การทดสอบประสิทธิภาพของหัวตรวจจับก๊าซที่มีฐานเป็นซิงก์ออกไซด์ที่ถูกเติมด้วย หมดควอนตัมกราฟีน

หัวตรวจจับก๊าซแบบตรวจวัดความต้านทานถูกเตรียมขึ้นมาเพื่อศึกษาประสิทธิภาพเพิ่มเติมโดยใช้ซิงก์ออกไซด์ที่ถูกเติมด้วยหมดควอนตัมกราฟีนเป็นฐาน ในกระบวนการเตรียมจะเตรียมโครงสร้างผลสมนาโนซิงก์ออกไซด์แบบนาโนเตตระพอดและแบบอนุภาคนาโนซึ่งถูกเตรียมโดยกระบวนการให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่ใช้จะอยู่ที่ 50 แอมแปร์ จากนั้น เซนเซอร์ที่ถูกเตรียมได้จะนำไปทดสอบกับก๊าซแอมโมเนีย และเปรียบเทียบสภาพไวกับก๊าซชนิดต่างๆ เพื่อที่จะประเมินความจำเพาะเจาะจงของหัวตรวจจับก๊าซที่สร้างขึ้นมา ระบบการวัดจะแสดงในรูปที่ 19



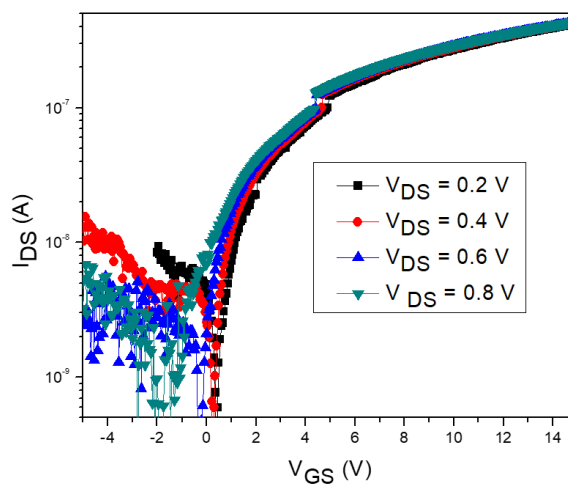
รูปที่ 19 ไดอะแกรมแสดงระบบตรวจจับก๊าซแอมโมเนียโดยใช้โครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่ถูกเติมด้วยหมดควอนตัมกราฟีนเป็นฐาน

ผลการวิจัย

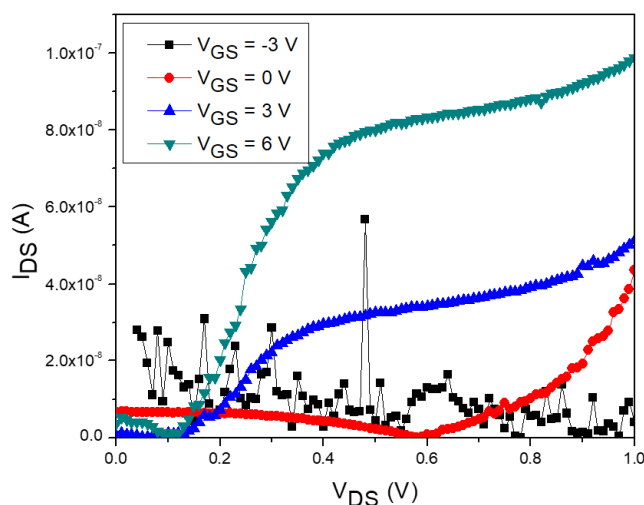
1. ผลการตรวจจับก๊าซของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าโดยใช้ซิงก์ออกไซด์เป็นช่องนำกระแส

ผลการทดสอบประสิทธิภาพทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่มี ZnO nanoparticles เป็นช่องนำกระแส

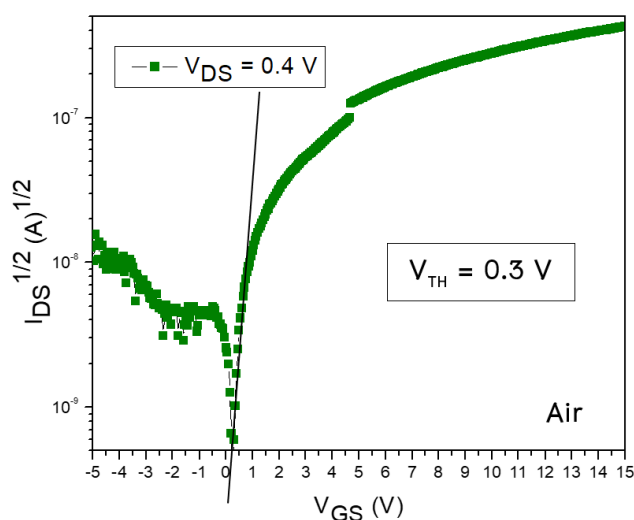
ผลการทดสอบประสิทธิภาพของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่มี ZnO nanoparticles เป็นช่องนำกระแสพบว่าค่ากระแสเดรนซอสเป็นฟังก์ชันกับความต่างศักย์เกตซอส และพบช่วงกระแสอิ่มตัวเมื่อความต่างศักย์เกตซอสมากกว่า 6 โวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 20



รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{GS} กับ I_{DS} ของการทดสอบประสิทธิภาพทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่มี ZnO nanoparticles เป็นช่องนำกระแส



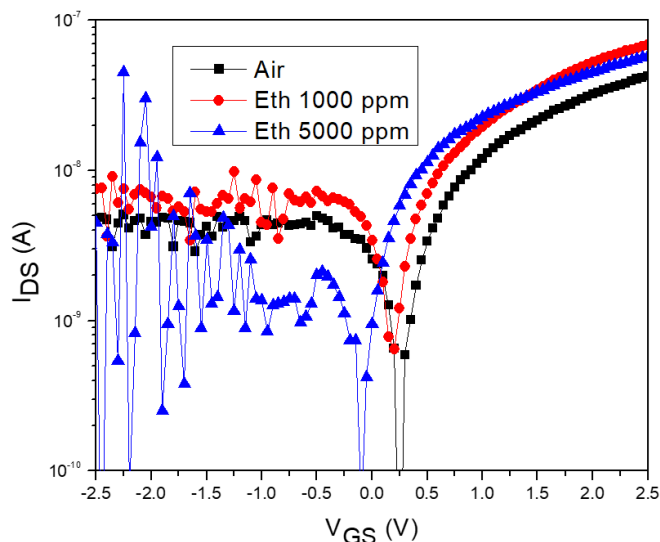
รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{DS} กับ I_{DS} ของการทดสอบประสิทธิภาพทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่มี ZnO nanoparticles เป็นช่องนำกระแส



รูปที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{GS} กับค่ารากที่สองของ I_{DS} ของการทดสอบประสิทธิภาพทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่มี ZnO nanoparticles เป็นช่องนำกระแส ที่ $V_{DS} = 0.4$ V

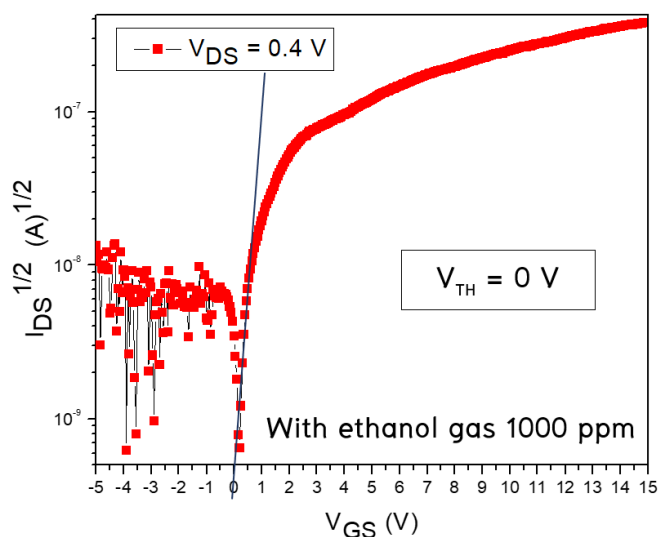
จากรูปที่ 21 และ 22 แสดงให้เห็นว่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V_{GS} กับ I_{DS} ของการทดสอบประสิทธิภาพทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่มี ZnO nanoparticles เป็นช่องนำกระแส เมื่อพิจารณา $V_{DS} = 0.4$ V มีค่าอัตราส่วนของกระแสเปิดต่อกระแสปิด (On-Off ratio) = 719.82 และเมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V_{GS} กับค่ารากที่สองของ I_{DS} ที่ $V_{DS} = 0.4$ V มีค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_{TH}) = 0.3 V และมีกระแสไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 0.427 μ A การใช้ค่ารากที่สองของ I_{DS} ที่ความต่างศักย์เดรนซอสคงที่ เป็นการหาค่าความต่างศักย์ Threshold V_{TH} ที่ได้รับความนิยมในระยะหลังและเป็นเทคนิคที่ค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงที่สุดสำหรับกราฟที่มีลักษณะเป็น S curve

ผลการทดสอบการตอบสนองต่อก๊าซเอทานอลของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่มี ZnO nanoparticles เป็นช่องนำกระแส

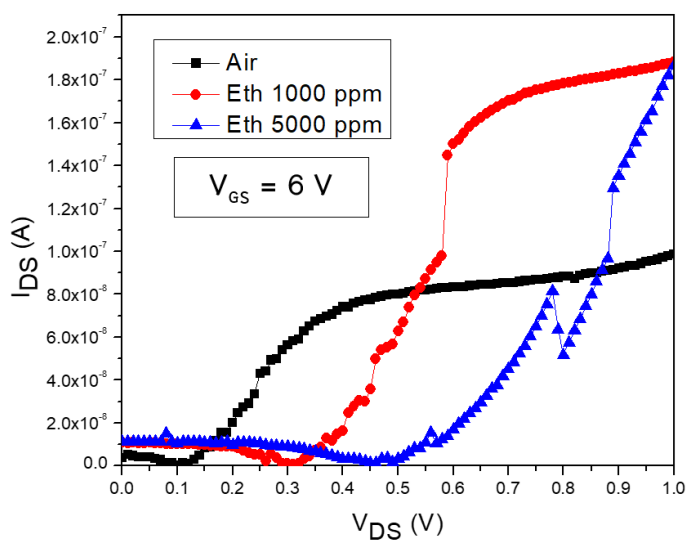


รูปที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{GS} กับ I_{DS} ของการทดสอบประสิทธิภาพทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่มี ZnO nanoparticles เป็นช่องนำกระแส เมื่อได้รับก๊าซเอทานอลที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน

จากรูปที่ 23 แสดงให้เห็นว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V_{GS} กับ I_{DS} ของการทดสอบประสิทธิภาพทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่มี ZnO nanoparticles เป็นช่องนำกระแส เมื่อได้รับก๊าซเอทานอลที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน กระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วเดรนและขั้วซอร์สมีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสถานะที่ยังไม่ได้รับก๊าซ เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V_{GS} กับ I_{DS} ของการทดสอบประสิทธิภาพทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่มี ZnO nanoparticles เป็นช่องนำกระแส เมื่อได้รับก๊าซเอทานอลที่มีความเข้มข้น 1000 ppm และพิจารณาที่ $V_{DS} = 0.4$ V มีค่าอัตราส่วนของกระแสเปิดต่อกระแสปิด (On-Off ratio) = 591.98 และเมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V_{GS} กับค่ากราฟที่สองของ I_{DS} ที่ $V_{DS} = 0.4$ V พบว่ามีค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_{TH}) = 0 V และมีกระแสไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 0.381 μ A ดังแสดงในรูปที่ 24



รูปที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{GS} กับค่ารากที่สองของ I_{DS} ของการทดสอบประสิทธิภาพทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่มี ZnO nanoparticles เป็นช่องนำกระแสที่ $V_{DS} = 0.4$ V เมื่อได้รับก๊าซเอทานอลที่มีความเข้มข้น 1000 ppm

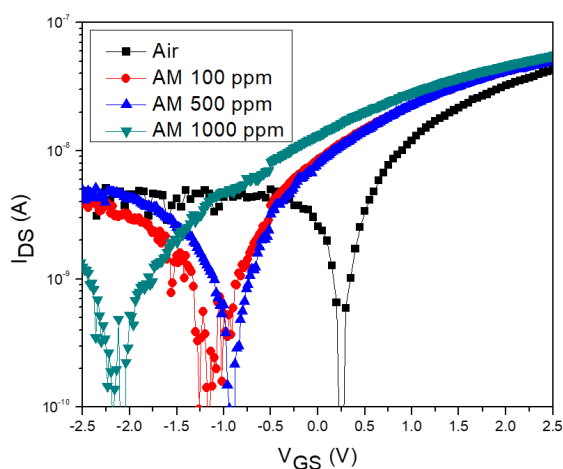


รูปที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{DS} กับ I_{DS} ของการทดสอบประสิทธิภาพของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่มี ZnO nanoparticles เป็นช่องนำกระแส เมื่อได้รับก๊าซเอทานอลที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน

จากการวิเคราะห์ข้างต้นหากพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง V_{GS} กับ I_{DS} ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่มี ZnO nanoparticles เป็นช่องนำกระแส เมื่อไม่ได้รับก๊าซและได้รับก๊าซเอทานอลที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน พิจารณาที่ $V_{DS} = 0.4$ V สามารถสรุปค่าอัตราส่วนของกระแสเปิดต่อกระแสปิด (On-Off ratio) และค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_{TH}) ดังตารางที่ 1 ตารางที่ 1 แสดงค่าแรงดันขีดเริ่มและอัตราส่วนของกระแสเปิดต่อกระแสปิด เมื่อได้รับก๊าซเอทานอลที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน ที่ $V_{DS} = 0.4$ V

ก๊าซที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน	ค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_{TH}) (V)	$ \Delta V_{TH} $ (V)	อัตราส่วนของกระแสเปิดต่อกระแสปิด
ไม่ได้รับก๊าซ	0.3	-	719.82
ก๊าซเอทานอล ความเข้มข้น 1000 ppm	0	0.3	591.98
ก๊าซเอทานอล ความเข้มข้น 5000 ppm	-0.3	0.6	875.47

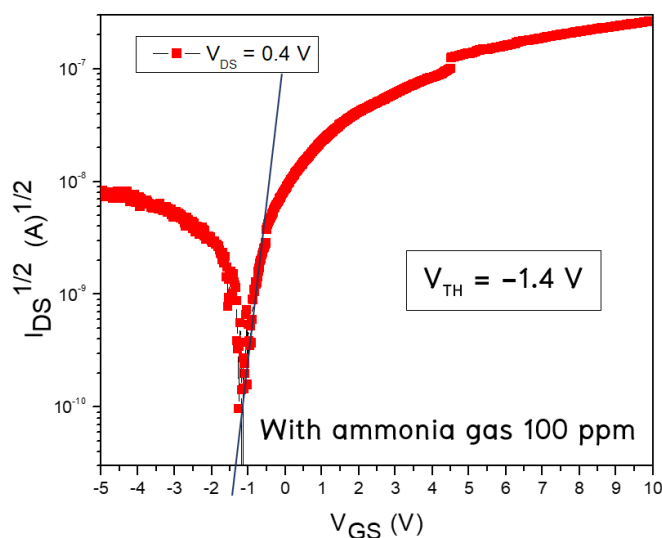
ผลการทดสอบประสิทธิภาพทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่มี ZnO nanoparticles เป็นช่องนำกระแส เมื่อปล่อยก๊าซแอมโมเนียมีความเข้มข้นแตกต่างกัน



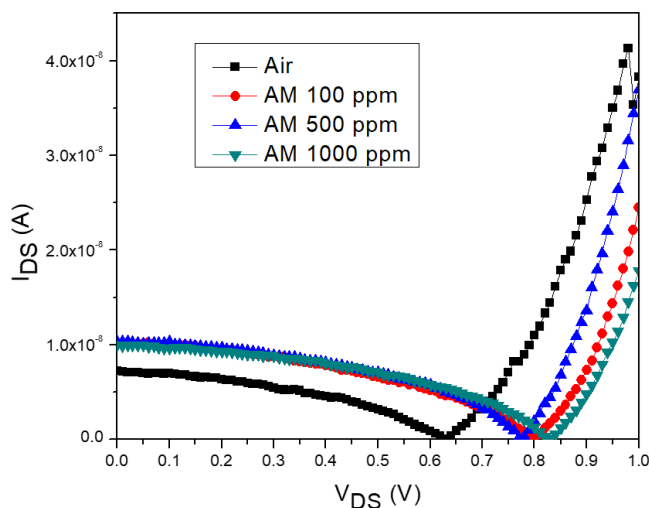
รูปที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{GS} กับ I_{DS} ของการทดสอบประสิทธิภาพทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่มี ZnO nanoparticles เป็นช่องนำกระแส เมื่อได้รับก๊าซแอมโมเนียที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน

จากรูปที่ 26 แสดงให้เห็นว่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V_{GS} กับ I_{DS} ของการทดสอบประสิทธิภาพทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่มี ZnO nanoparticles เป็นช่องนำกระแส เมื่อได้รับก๊าซแอมโมเนียที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน กระแสไฟระหว่างชั้นเดรนและซอร์ส มีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับยังไม่ได้รับก๊าซ เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V_{GS} กับ I_{DS} ของการทดสอบประสิทธิภาพทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่มี ZnO nanoparticles เป็นช่องนำกระแส เมื่อได้รับก๊าซแอมโมเนียที่มีความเข้มข้น 100 ppm และพิจารณาที่ $V_{DS} = 0.4$ V มีค่าอัตราส่วนของ

กระแสเปิดต่อกระแสปิด (On-Off ratio) = 1,871.07 และเมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V_{GS} กับค่ารากที่สองของ I_{DS} ที่ $V_{DS} = 0.4$ V มีค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_{TH}) = -1.4 V และมีกระแสไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 0.253 μA ดังรูปที่ 27



รูปที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{GS} กับค่ารากที่สองของ I_{DS} ของการทดสอบประสิทธิภาพทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่มี ZnO nanoparticles เป็นช่องนำกระแสที่ $V_{DS} = 0.4$ V เมื่อได้รับก๊าซแอมโมเนียที่มีความเข้มข้น 100 ppm



รูปที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{DS} กับ I_{DS} ของการทดสอบประสิทธิภาพของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่มี ZnO nanoparticles เป็นช่องนำกระแส เมื่อได้รับก๊าซแอมโมเนียที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน

จากการวิเคราะห์ข้างต้นหากพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง V_{GS} กับ I_{DS} ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่มี ZnO nanoparticles เป็นช่องนำกระแส เมื่อไม่ได้รับก๊าซและได้รับก๊าซแอมโมเนียที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน พิจารณาที่ $V_{DS} = 0.4$ V สามารถสรุปค่าอัตราส่วนของกระแสเปิดต่อกระแสปิด (On-Off ratio) และค่าแรงดันขีตเริ่ม (V_{TH}) ดังตารางที่ 2

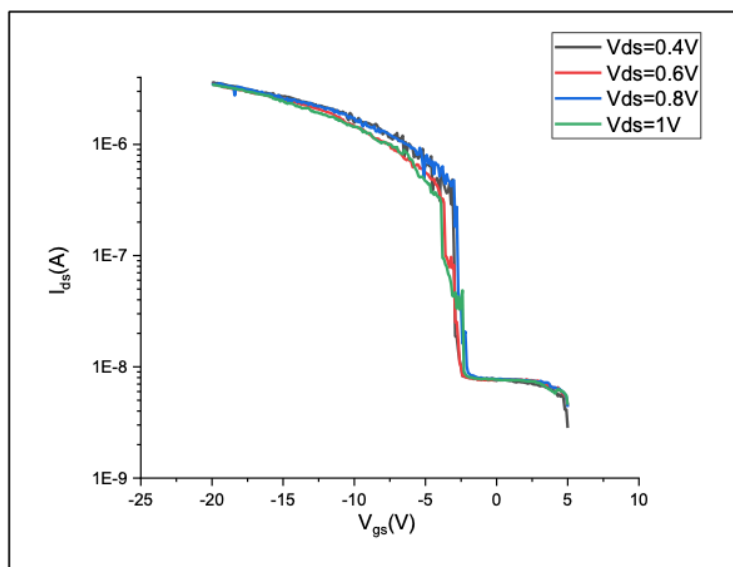
ตารางที่ 2 ค่าแรงดันขีตเริ่มและอัตราส่วนของกระแสเปิดต่อปิด เมื่อได้รับก๊าซแอมโมเนียที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน ที่ $V_{DS} = 0.4$ V

ก๊าซที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน	ค่าแรงดันขีตเริ่ม (V_{TH}) (V)	$ \Delta V_{TH} $ (V)	อัตราส่วนของกระแสเปิด - กระแสปิด
ไม่ได้รับก๊าซ	0.3	-	719.82
ก๊าซแอมโมเนีย ความเข้มข้น 100 ppm	-1.4	1.7	1,871.07
ก๊าซแอมโมเนีย ความเข้มข้น 500 ppm	-1.3	1.6	1,245.55
ก๊าซแอมโมเนีย ความเข้มข้น 1000 ppm	-2.5	2.8	1,703.14

2. ผลการทดสอบทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ที่มี P3HT เป็นช่องนำกระแส

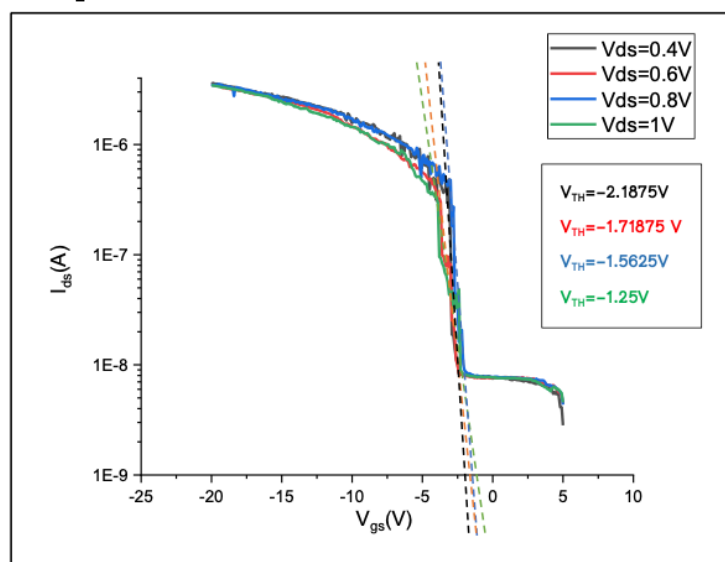
ลักษณะเฉพาะของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ที่มี P3HT เป็นช่องนำกระแส

จากการพล็อตความสัมพันธ์ระหว่าง I กับ V ของผลการทดสอบประสิทธิภาพของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ กรณีใช้ P3HT (Spin Coating 1 รอบ) เป็นช่องนำกระแส ที่ความต่างศักย์ระหว่างขั้วเดรน-ซอร์ส(V) เท่ากับ 0.4 V, 0.6V, 0.8V, 1V พบว่ามีอัตราส่วนกระแสเปิดต่อกระแสปิด (on/off ratio) มีค่าเท่ากับ 1278.8, 785.8, 815.7, 759.3 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 29



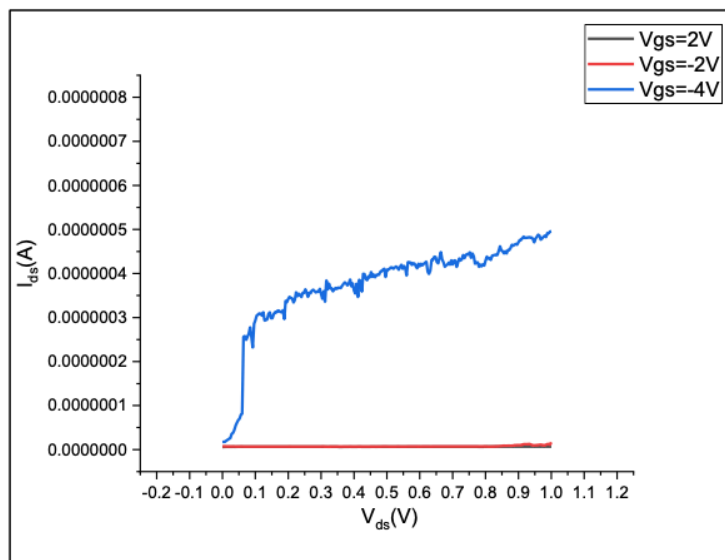
รูปที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{ds} กับ V_{gs} เมื่อใช้ความต่างศักย์เดรน-ซอส 0.4-1 โวลต์ กรณีใช้ P3HT เป็นช่องนำกระแส

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I กับ V ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ที่มี P3HT (Spin Coating 1 รอบ) เป็นช่องนำกระแส สามารถหาค่าของแรงดัน ขีดเริ่มได้ โดยการลากเส้นตรงผ่านความชันช่วงที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น (Linear Region) โดยตัดผ่านความต่างศักย์ระหว่างขั้วเกต-ซอส (V) ซึ่งพบว่าแรงดันขีดเริ่มที่ความต่างศักย์ V_{gs} ระหว่างขั้วเดรน-ซอส เท่ากับ 0.4 V, 0.6 V, 0.8 V, 1 V มีค่าเท่ากับ -2.1875 V, -1.71875 V, -1.5625 V, -1.25 V ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 30



รูปที่ 30 การหาค่าแรงดันขีดเริ่มจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I กับ V เมื่อใช้ความต่างศักย์เดรน-ซอส 0.4-1 โวลต์ กรณีใช้ P3HT เป็นช่องนำกระแส

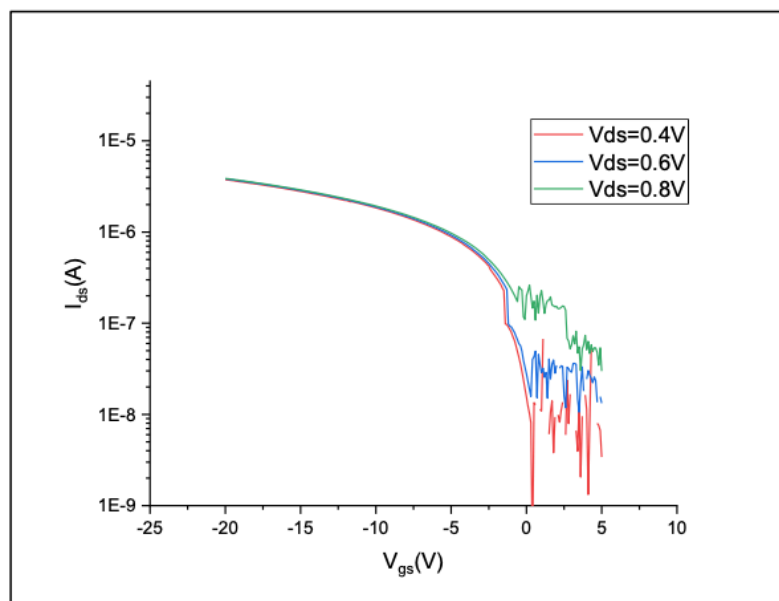
ส่วนความสัมพันธ์ระหว่าง I_{ds} กับ V_{ds} ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ที่ใช้ P3HT เป็นช่องนำกระแสแสดงในรูปที่ 31 ซึ่งใช้ V_{gs} ที่ 2, -2 และ -4 โวลต์ จากกราฟพบว่า OFETs เป็นสถานะ closed state เมื่อให้ความต่างศักย์ระหว่างขั้วเกต-ซอส ที่ 2 V และ -2 V แต่จะเป็นสถานะ opened state เมื่อให้ความต่างศักย์ระหว่างขั้วเกต-ซอส ที่ -4 โวลต์



รูปที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{ds} กับ V_{ds} เมื่อใช้ความต่างศักย์เกต-ซอส ที่ 2, -2 และ -4 โวลต์ กรณีใช้ P3HT เป็นช่องนำกระแส

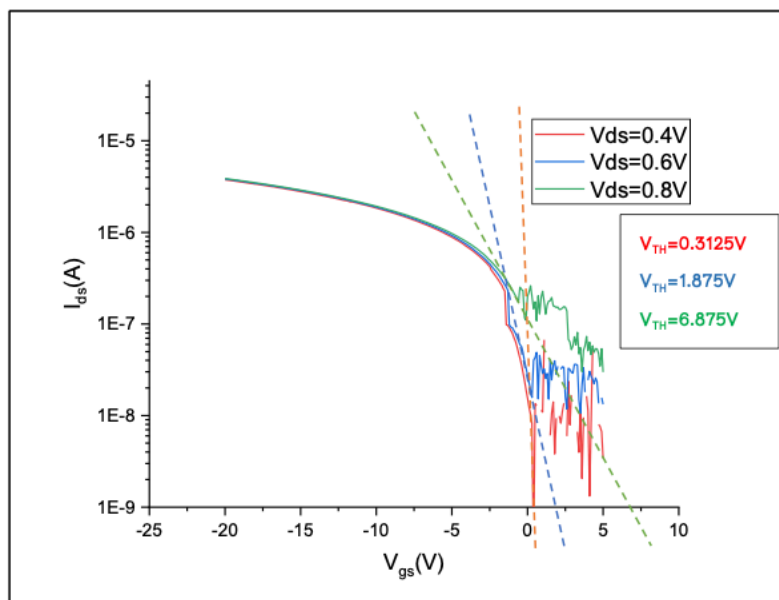
3. ผลการทดสอบทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ที่มี P3HT:N-rGO เป็นช่องนำกระแส

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{ds} กับ V_{gs} ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ที่ใช้ช่องนำกระแสเป็น P3HT:N-rGO เป็นช่องนำกระแส แสดงในรูปที่ 32 โดยใช้ความต่างศักย์ระหว่างขั้วเดรน-ซอส เท่ากับ 0.4 V, 0.6 V, 0.8 V พบว่ามีอัตราส่วนกระแสเปิดต่อกระแสปิด เท่ากับ 11993, 362, 130 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{ds} กับ V_{gs} ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์เมื่อใช้ P3HT:N-rGO เป็นช่องนำกระแส

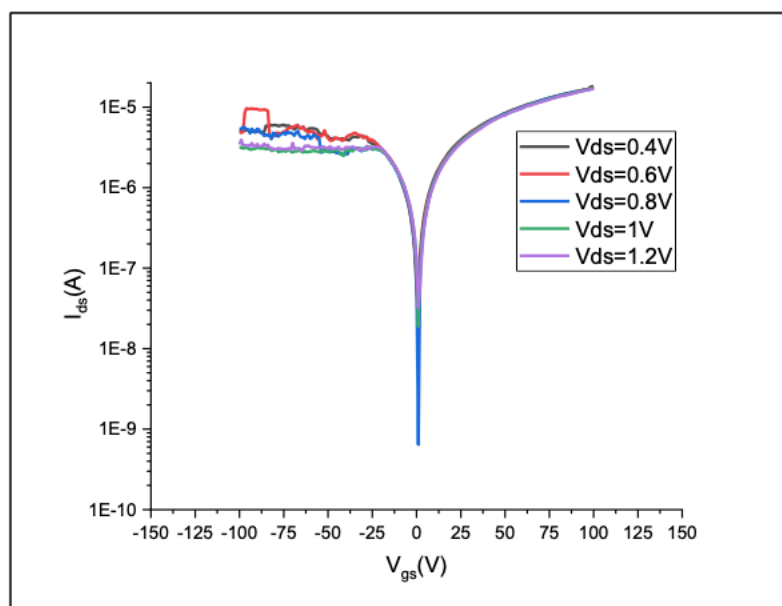
จากรูปที่ 33 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I กับ V ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ที่มี P3HT:N-rGO เป็นช่องนำกระแส พบว่าแรงดันขีดเริ่มมีค่าเป็น 0.3125 V, 1.875 V, 6.875 V ที่ความต่างศักย์ระหว่างขั้วเดรน-ซอส เป็น 0.4V, 0.6V, 0.8V ตามลำดับ



รูปที่ 33 การหาค่าแรงดันขีดเริ่มจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I กับ V ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ เมื่อใช้ P3HT:N-rGO เป็นช่องนำกระแส

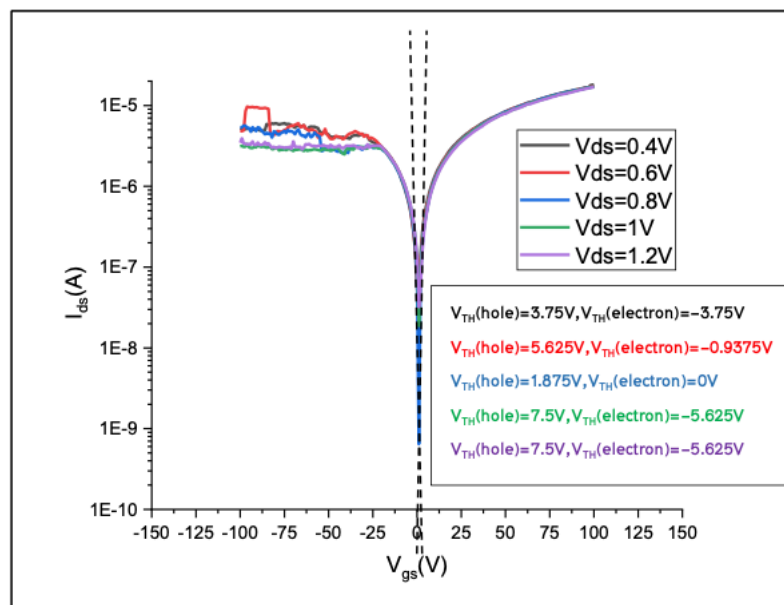
4. ผลการทดสอบทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบสองขั้ว (AOFETs) ที่มี PCDTBT และ F₁₆ CuPc เป็นช่องนำกระแส

สำหรับผลการทดสอบทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบสองขั้ว (AOFETs) ที่มี PCDTBT และ F₁₆ CuPc เป็นช่องนำกระแส ถูกแสดงในรูปที่ 34 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{ds} กับ V_{gs} ที่ความต่างศักย์ระหว่างขั้วเดรน-ซอส เท่ากับ 0.4 V, 0.6 V, 0.8 V, 1 V และ 1.2 V เมื่อวิเคราะห์อัตราส่วนของกระแสเปิดต่อกระแสปิดพบว่ามีค่าเป็น 548, 1377, 26535, 914, 529 ที่ความต่างศักย์ระหว่างขั้วเดรน-ซอส เท่ากับ 0.4 V, 0.6 V, 0.8 V, 1 V และ 1.2 V ตามลำดับ



รูปที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{ds} กับ V_{gs} ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบสองขั้วเมื่อใช้ PCDTBT และ F₁₆ CuPc เป็นช่องนำกระแส

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I กับ V ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบสองขั้วที่มี PCDTBT และ F₁₆CuPc เป็นช่องนำกระแสถูกแสดงในรูปที่ 35 พบว่าการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าเดรน-ซอส กับความต่างศักย์เกต-ซอส มีลักษณะแบบตัววีซึ่งเป็นลักษณะการนำไฟฟ้าแบบสองขั้ว โดยแรงดันขั้วเริ่มของอิเล็กตรอนและโฮลมีค่าเป็น 3.75 V, -0.937 V, 0 V, -5.625 V, -5.625 V และ 3.75 V, 5.625 V, 1.875 V, 7.5 V, 7.5 V ตามลำดับ เมื่อใช้ความต่างศักย์เดรน-ซอส ที่ 0.4 V, 0.6 V, 0.8 V, 1 V, 1.2 V



รูปที่ 35 การหาค่าแรงดันขีดเริ่มจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I กับ V ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบสองขั้ว เมื่อใช้ PCDTBT และ F16 CuPc เป็นช่องนำกระแส

เมื่อหาค่า Sub-Threshold Swing จะได้ค่าเป็น -2.05 V/decade และ 2.06 V/decade สำหรับพาหะโฮลและอิเล็กตรอน ตามลำดับ โดยใช้ความต่างศักย์เดรน-ซอส เป็น 0.8 V

สรุปผลการทดสอบทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบสองขั้วที่มี PCDTBT และ F16CuPc เป็นช่องนำกระแส ที่ความต่างศักย์ระหว่างขั้วเดรน-ซอส เป็น 0.4 V, 0.6 V, 0.8 V, 1 V และ 1.2 V ถูกแสดงในตารางที่ 3

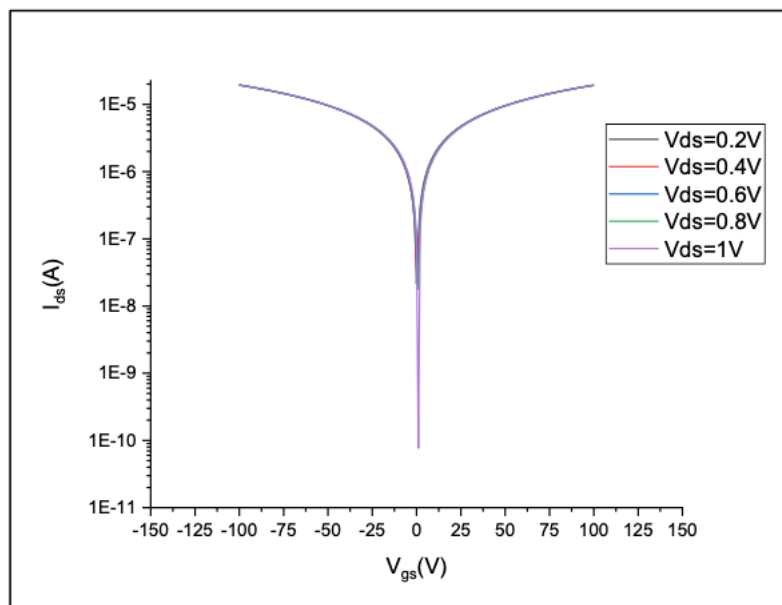
ตารางที่ 3 แสดงค่าอัตราส่วนกระแสเปิด/กระแสปิด (On/Off ratio) และค่าแรงดันขีดเริ่มของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบสองขั้วที่มี PCDTBT และ F16CuPc เป็นช่องนำกระแส

V_{ds}	I_{on}/I_{off}	แรงดันขีดเริ่ม (V_{th})	
0.4	547.8	3.75	-3.75
0.6	1377.1	5.625	-0.9375
0.8	26535.0	1.875	0
1	914.5	7.5	-5.625
1.2	528.9	7.5	-5.625

5. ผลการทดสอบทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบสองขั้ว (AOFETs) ที่มี P3HT และ F16 CuPc เป็นช่องนำกระแส

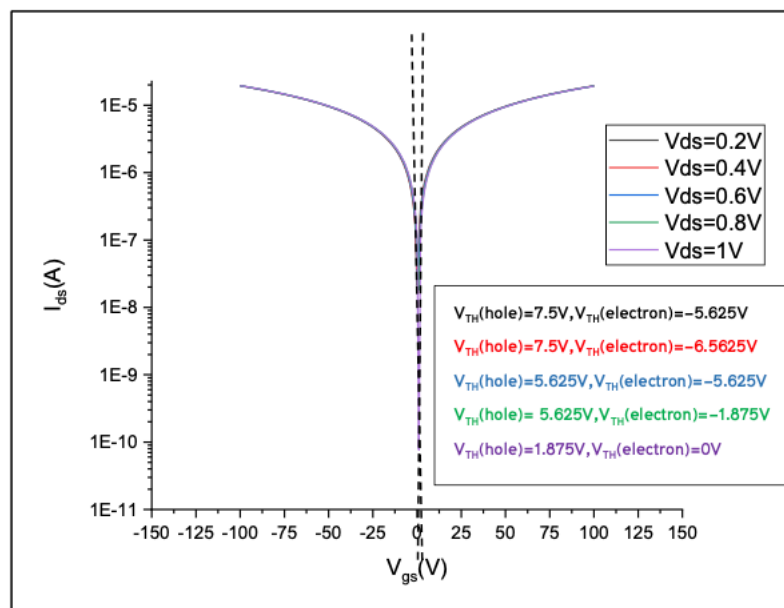
สำหรับผลการทดสอบทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบสองขั้ว (AOFETs) ที่มี P3HT และ F16 CuPc เป็นช่องนำกระแส ถูกแสดงในรูปที่ 36 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{ds} กับ V_{gs} ที่ความต่างศักย์ระหว่างขั้วเดรน-ซอส เท่ากับ 0.4 V, 0.6 V, 0.8 V, 1 V

และ 1.2 V เมื่อวิเคราะห์อัตราส่วนของกระแสเปิดต่อกระแสปิดพบว่ามีค่าเป็น 905.7, 518.7, 453.8, 1077.9 และ 254488.2 ตามลำดับ ที่ความต่างศักย์ระหว่างขั้วเดรน-ซอส เท่ากับ 0.4 V, 0.6 V, 0.8 V, 1 V และ 1.2 V ตามลำดับ



รูปที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{ds} กับ V_{gs} ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบสองขั้วเมื่อใช้ P3HT และ F₁₆ CuPc เป็นช่องนำกระแส

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I กับ V ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบสองขั้วที่มี P3HT และ F₁₆CuPc เป็นช่องนำกระแสถูกแสดงในรูปที่ 37 พบว่าการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าเดรน-ซอส กับความต่างศักย์เกต-ซอส มีลักษณะแบบตัววีซึ่งเป็นลักษณะการนำไฟฟ้าแบบสองขั้ว โดยแรงดันขั้วเริ่มของอิเล็กตรอนและโฮลมีค่าเป็น -5.625 V, -6.5625 V, -5.625 V, -1.875 V, 0 V และ 7.5 V, 7.5 V, 5.625 V, 5.625 V, 1.875 V ตามลำดับ เมื่อใช้ความต่างศักย์เดรน-ซอส ที่ 0.4 V, 0.6 V, 0.8 V, 1 V, 1.2 V



รูปที่ 37 การหาค่าแรงดันขีดเริ่มจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I กับ V ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบสองขั้ว เมื่อใช้ P3HT และ F₁₆ CuPc เป็นช่องนำกระแส

เมื่อหาค่า Sub-Threshold Swing จะได้ค่าเป็น -3.17 V/decade และ 3.30 V/decade สำหรับพาหะโฮลและอิเล็กตรอน ตามลำดับ โดยใช้ความต่างศักย์เดรน-ซอส เป็น 0.8 V

สรุปผลการทดสอบทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบสองขั้วที่มี P3HT และ F₁₆CuPc เป็นช่องนำกระแส ที่ความต่างศักย์ระหว่างขั้วเดรน-ซอส เป็น 0.4 V, 0.6 V, 0.8 V, 1 V และ 1.2 V ถูกแสดงในตารางที่ 4

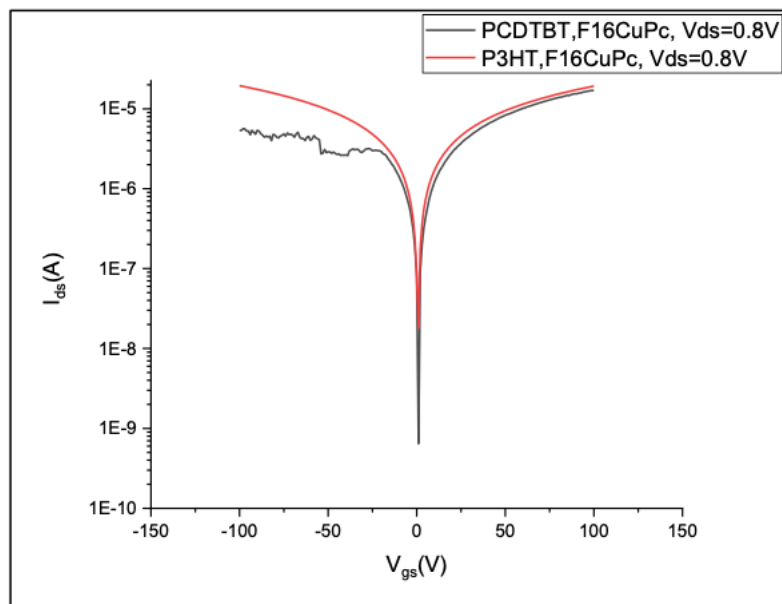
ตารางที่ 4 แสดงค่าอัตราส่วนกระแสเปิด/กระแสปิด (On/Off ratio) และค่าแรงดันขีดเริ่มของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบสองขั้วที่มี P3HT และ F₁₆CuPc เป็นช่องนำกระแส

V_{ds}	I_{on}/I_{off}	แรงดันขีดเริ่ม (V_{th})	
0.4	905.7	7.5	-5.625
0.6	518.7	7.5	-6.5625
0.8	453.8	5.625	-5.625
1	1077.9	5.625	-1.875
1.2	254488.2	1.875	0

6. เปรียบเทียบผลการทดสอบทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบสองขั้ว (AOFETs)

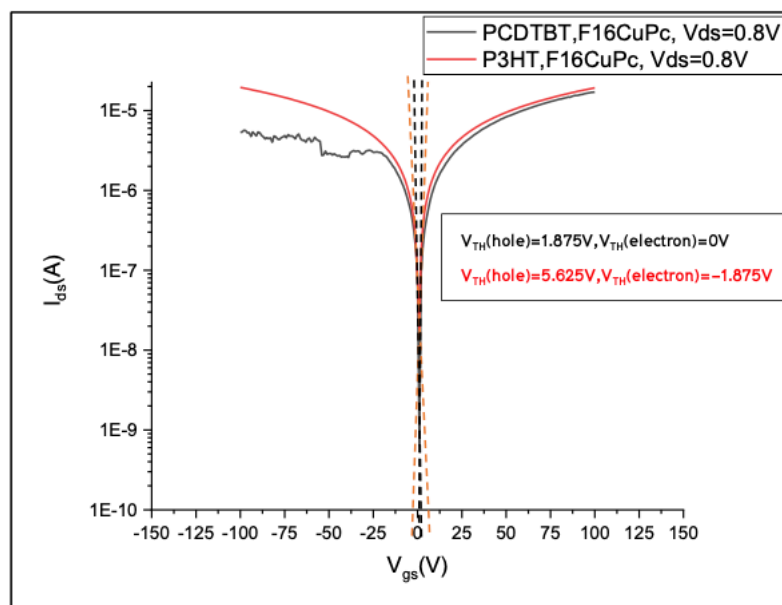
กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง I กับ V ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบสองขั้วที่มี PCDTBT/F₁₆CuPc และ P3HT/F₁₆CuPc เป็นช่องนำกระแส โดยใช้ความต่างศักย์ระหว่างขั้วเดรน-ซอส เท่ากับ 0.8 V ถูกแสดงในรูปที่ 38 พบว่ากระแสเดรน-ซอส

ของทรานซิสเตอร์ที่ใช้ P3HT/F₁₆CuPc เป็นช่องนำกระแส มีค่าสูงกว่าทรานซิสเตอร์ที่ใช้ PCDTBT/F₁₆CuPc เป็นช่องนำกระแส



รูปที่ 38 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง I กับ V ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบสองขั้วที่มี PCDTBT/F₁₆CuPc และ P3HT/F₁₆CuPc เป็นช่องนำกระแส

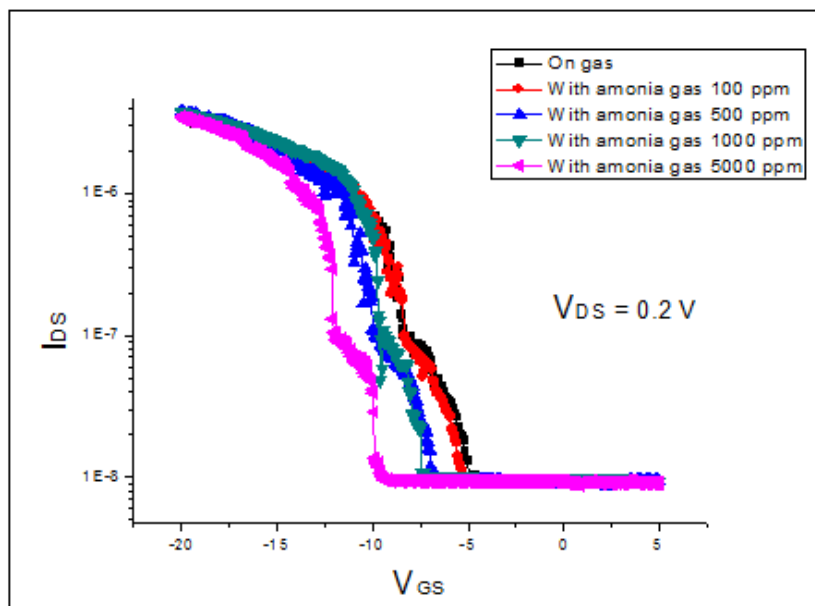
ส่วนกราฟการหาค่าแรงดันขีดเริ่มของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบสองขั้วที่มี PCDTBT/F₁₆CuPc และ P3HT/F₁₆CuPc เป็นช่องนำกระแส ถูกแสดงในรูปที่ 39 จากผลการทดลองพบว่าลักษณะการถ่ายโอนกระแสไฟฟ้ามีลักษณะใกล้เคียงกัน และมีลักษณะการถ่ายโอนประจุเป็นแบบรูปตัววีที่ความต่างศักย์ระหว่างขั้วเดรน-ซอร์ส เท่ากับ 0.8 V เมื่อวิเคราะห์ค่าแรงดันขีดเริ่มของทรานซิสเตอร์พบว่าทรานซิสเตอร์ที่ใช้ PCDTBT/F₁₆CuPc เป็นช่องนำกระแส มีค่าแรงดันขีดเริ่มของพาหะโฮลเท่ากับ 1.875 V และมีค่าแรงดันขีดเริ่มของพาหะอิเล็กตรอนเท่ากับ 0 V ขณะที่ทรานซิสเตอร์ที่ใช้ P3HT/F₁₆CuPc เป็นช่องนำกระแส มีค่าแรงดันขีดเริ่มของพาหะโฮลเท่ากับ 5.625 V และมีค่าแรงดันขีดเริ่มของพาหะอิเล็กตรอนเท่ากับ -1.875 V



รูปที่ 39 เปรียบเทียบค่าแรงดันขีดเริ่มของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบสองขั้วที่มี PCDTBT/F₁₆CuPc และ P3HT/F₁₆CuPc เป็นช่องนำกระแส

7. ผลการทดสอบการตอบสนองต่อก๊าซแอมโมเนีย เอทานอลและก๊าซอะซิโตน ของ ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ที่มี PCDTBT เป็นช่องนำกระแส

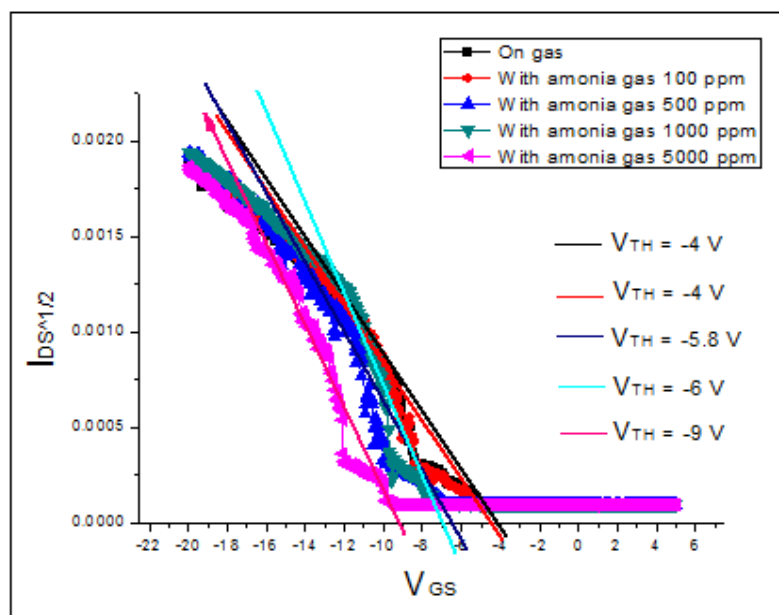
กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} และ V_{GS} ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ที่มี PCDTBT เป็นช่องนำกระแส ภายใต้บรรยากาศปกติและบรรยากาศของก๊าซแอมโมเนีย ถูกแสดงในรูปที่ 40 ซึ่งจ่ายความต่างศักย์เดรน-ซอส ที่ $V_{DS} = 0.2 V$ (ความชื้น 4-5%) ความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ใช้ประกอบไปด้วย 100 ppm, 500 ppm, 1000 ppm และ 5000 ppm ผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนกระแสเปิดต่อกระแสปิด (on-off ratio) ของอากาศมีค่าเท่ากับ 440.86 และอัตราส่วนกระแสเปิดต่อกระแสปิด (on-off ratio) เมื่อปล่อยก๊าซแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 100 ppm, 500 ppm, 1000 ppm และ 5000 ppm มีค่าเท่ากับ 415.49, 401.07, 409.79 และ 386.66 ตามลำดับ และเมื่อก๊าซแอมโมเนียมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นพบว่าทรานซิสเตอร์เข้าสู่สถานะ opened state ช้าลง เนื่องจากกราฟมีลักษณะเลื่อนไปทางซ้าย



รูปที่ 40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} กับ V_{GS} ของผลการทดสอบประสิทธิภาพของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ กรณียใช้ PCDTBT เป็นช่องนำกระแส เมื่อปล่อยก๊าซแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างกัน โดยใช้ $V_{DS} = 0.2$ V

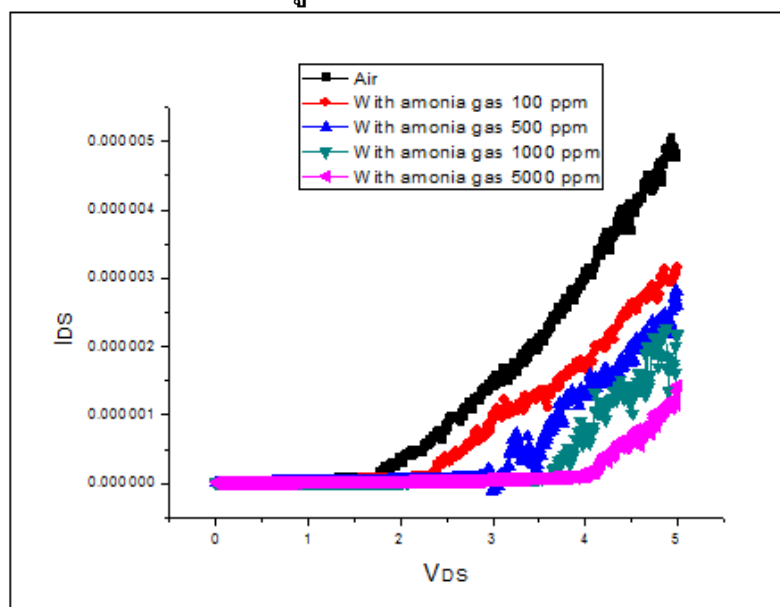
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} และ V_{GS} ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ที่มี PCDTBT เป็นช่องนำกระแส เมื่อพิจารณาที่ $V_{DS} = 0.2$ V ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 4-5% เมื่อปล่อยก๊าซแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 100 ppm, 500 ppm, 1000 ppm และ 5000 ppm เปรียบเทียบกับอากาศ พบว่าอัตราส่วนกระแสเปิดต่อกระแสปิด (on-off ratio) ของอากาศมีค่าเท่ากับ 440.86 และอัตราส่วนกระแสเปิดต่อกระแสปิด (on-off ratio) เมื่อปล่อยแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 100 ppm, 500 ppm, 1000 ppm, 5000 ppm มีค่าเท่ากับ 415.49, 401.07, 409.79, 386.66 ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นของแอมโมเนียเพิ่มขึ้น พบว่า OFET เข้าสู่สถานะ opened stale ซ้ำลง เนื่องจากกราฟมีลักษณะเลื่อนไปทางซ้าย

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(I_{DS})^{1/2}$ และ V_{GS} ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ที่มี PCDTBT เป็นช่องนำกระแส ดังแสดงในรูปที่ 41 สามารถหาค่าของแรงดันขีดเริ่มได้โดยการลากเส้นตรงผ่านความชันช่วงเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นตัดผ่านความต่างศักย์ระหว่างขั้วเกตของ (V_{GS}) เมื่อพิจารณาที่ $V_{DS} = 0.8$ V ที่ความชื้น 4-5% พบว่าในอากาศแรงดันขีดเริ่มมีค่าเท่ากับ -4 V เมื่อปล่อยก๊าซแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 100 ppm, 500 ppm, 1000 ppm และ 5000 ppm พบว่าแรงดันขีดเริ่มมีค่าเท่ากับ -4 V, -5 V, -6.8 V, -9 V ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแรงดันขีดเริ่มของ OFET ในอากาศ จึงทำให้กราฟมีลักษณะเลื่อนไปทางซ้าย



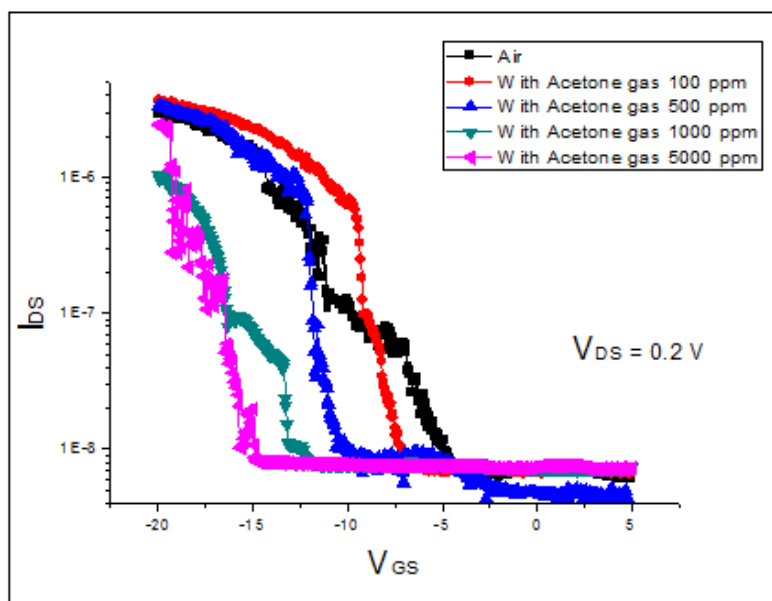
รูปที่ 41 แสดงการหาค่าแรงดันขีดเริ่มโดยวิเคราะห์จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(I_{DS})^{1/2}$ กับ V_{GS} ของผลการทดสอบประสิทธิภาพของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์เมื่อ กรณีใช้ PCDTBT เป็นช่องนำกระแสเมื่อปล่อยก๊าซแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างกัน ที่ $V_{DS} = 0.2$ V

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} และ V_{DS} ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ที่มี PCDTBT เป็นช่องนำกระแสเมื่อปล่อยก๊าซแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างกัน ที่ $V_{GS} = -8$ V (ความชื้น 4-5%) พบว่ากระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วเดรน-ซอส (I_{DS}) ลดลงเมื่อความเข้มข้นของก๊าซแอมโมเนียเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 42



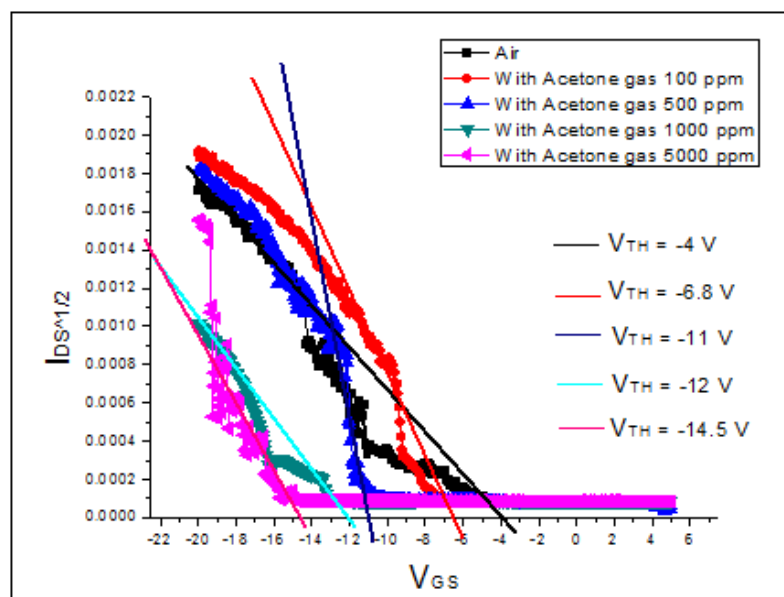
รูปที่ 42 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} กับ V_{DS} ของผลการทดสอบประสิทธิภาพของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ กรณีใช้ PCDTBT เป็นช่องนำกระแส ภายใต้การปล่อยแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างกัน ที่ $V_{GS} = -8$ V

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} และ V_{GS} ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ที่มี PCDTBT เป็นช่องนำกระแสเมื่อพิจารณาที่ $V_{DS} = 0.2$ V ที่ความชื้น 4-5% เมื่อปล่อยก๊าซอะซิโตนที่ความเข้มข้น 100 ppm, 500 ppm, 1000 ppm และ 5000 ppm เปรียบเทียบกับอากาศ พบว่าอัตราส่วนกระแสเปิดต่อกระแสปิด (on-off ratio) ในบรรยากาศปกติ มีค่าเท่ากับ 440.86 และอัตราส่วนกระแสเปิดต่อกระแสปิด (on-off ratio) เมื่อปล่อยก๊าซอะซิโตนที่ความเข้มข้น 100 ppm, 500 ppm, 1000 ppm และ 5000 ppm มีค่าเท่ากับ 543.80, 742.66, 145.60 และ 338.91 ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นของอะซิโตนที่เพิ่มขึ้น พบว่าทรานซิสเตอร์เข้าสู่สถานะ opened state ช้าลง เนื่องจากกราฟมีลักษณะเลื่อนไปทางซ้าย ดังแสดงในรูปที่ 43



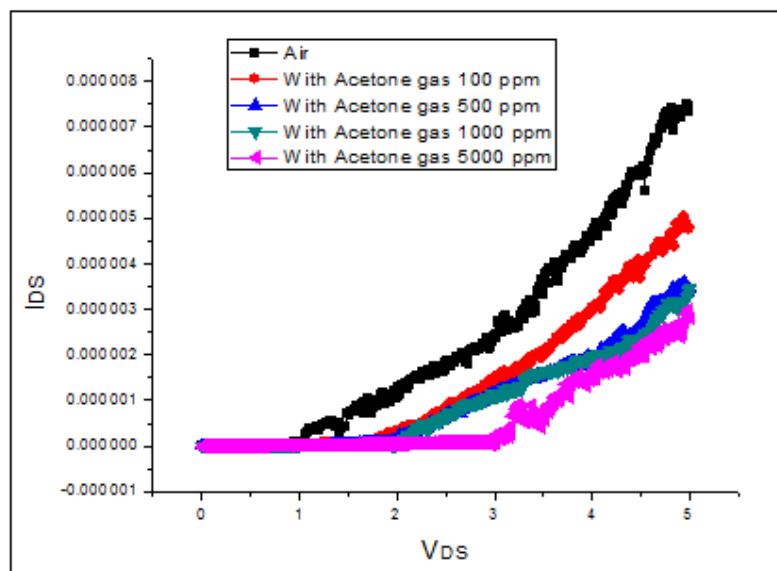
รูปที่ 43 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} กับ V_{GS} ของผลการทดสอบประสิทธิภาพของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ กรณิใช้ PCDTBT เมื่อปล่อยก๊าซอะซิโตนที่ความเข้มข้นต่างกัน ที่ $V_{DS} = 0.2$ V

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(I_{DS})^{1/2}$ และ V_{GS} ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ที่มี PCDTBT เป็นช่องนำกระแส สามารถหาค่าของแรงดันขีดเริ่มได้โดยการลากเส้นตรงผ่านความชันช่วงเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นตัดผ่านความต่างศักย์ระหว่างขั้วเกต-ซอส (V_{GS}) เมื่อพิจารณาที่ $V_{DS} = 0.2$ V ที่ความชื้น 4-5% พบว่าแรงดันขีดเริ่มของทรานซิสเตอร์ภายใต้บรรยากาศปกติมีค่าเท่ากับเมื่อปล่อยก๊าซอะซิโตนที่ความเข้มข้น 100 ppm, 500 ppm, 1000 ppm และ 5000 ppm แรงดันขีดเริ่มมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าแรงดันขีดเริ่มในบรรยากาศปกติ โดยค่าแรงดันขีดเริ่มในบรรยากาศปกติมีค่าเท่ากับ -4 V เมื่อปล่อยก๊าซอะซิโตนที่ความเข้มข้น 100 ppm, 500 ppm, 1000 ppm และ 5000 ppm แรงดันขีดเริ่มมีค่ากับ -6.8 V, -11 V, -12 V และ 14.5 V ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 44



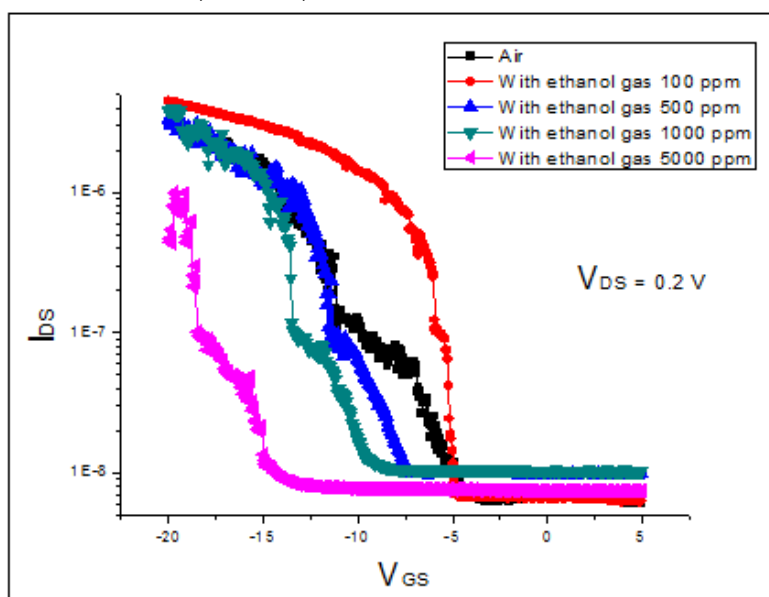
รูปที่ 44 แสดงการหาค่าแรงดันขีดเริ่มโดยวิเคราะห์จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(I_{DS})^{1/2}$ กับ V_{GS} ของผลการทดสอบประสิทธิภาพของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์เมื่อใช้ PCDTBT เป็นช่องนำกระแส ภายใต้การปล่อยก๊าซอะซิโตนที่มีความเข้มข้นต่างกัน ที่ $V_{DS} = 0.8$ V

ส่วนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} และ V_{DS} ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ที่มี PCDTBT เป็นช่องนำกระแส เมื่อปล่อยก๊าซอะซิโตนที่มีความเข้มข้นต่างกัน ที่ $V_{GS} = -8$ V (ความชื้น 4-5%) พบว่ากระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วเดรน-ซอร์ส ลดลง เมื่อความเข้มข้นของก๊าซอะซิโตนเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 45



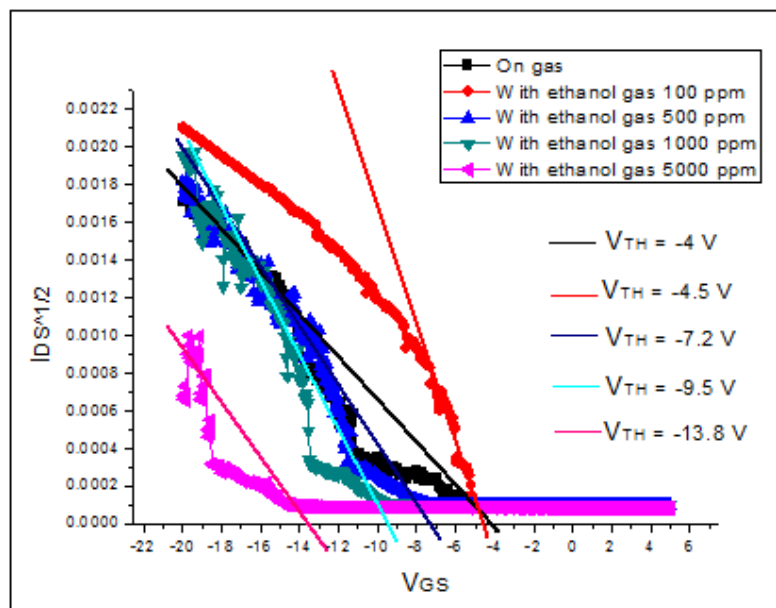
รูปที่ 45 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} กับ V_{DS} ของผลการทดสอบประสิทธิภาพของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ กรณีใช้ PCDTBT เป็นช่องนำกระแส เมื่อปล่อยก๊าซอะซิโตนที่มีความเข้มข้นต่างกัน ที่ $V_{GS} = -8$ V

สำหรับการตอบสนองต่อก๊าซเอทานอลของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ที่มี PCDTBT เป็นช่องนำกระแสถูกแสดงในรูปที่ 46 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} และ V_{GS} เมื่อปล่อยก๊าซเอทานอลที่ความเข้มข้น 100 ppm, 500 ppm, 1000 ppm และ 5000 ppm ที่ความชื้น 4-5% เมื่อพิจารณาที่ $V_{DS} = 0.2$ V พบว่ากราฟมีลักษณะเลื่อนไปทางซ้าย นั่นหมายความว่าทรานซิสเตอร์เข้าสู่สถานะ opened state ได้ช้าลง อัตราส่วนกระแสเปิดต่อกระแสปิด (on-off ratio) ภายใต้บรรยากาศปกติมีค่าเท่ากับ 440.86 และอัตราส่วนกระแสเปิดต่อกระแสปิด (on-off ratio) เมื่อปล่อยก๊าซเอทานอลที่ความเข้มข้น 100 ppm, 500 ppm, 1000 ppm และ 5000 ppm มีค่าเท่ากับ 711.29, 338.11, 370 และ 63.1 ตามลำดับ



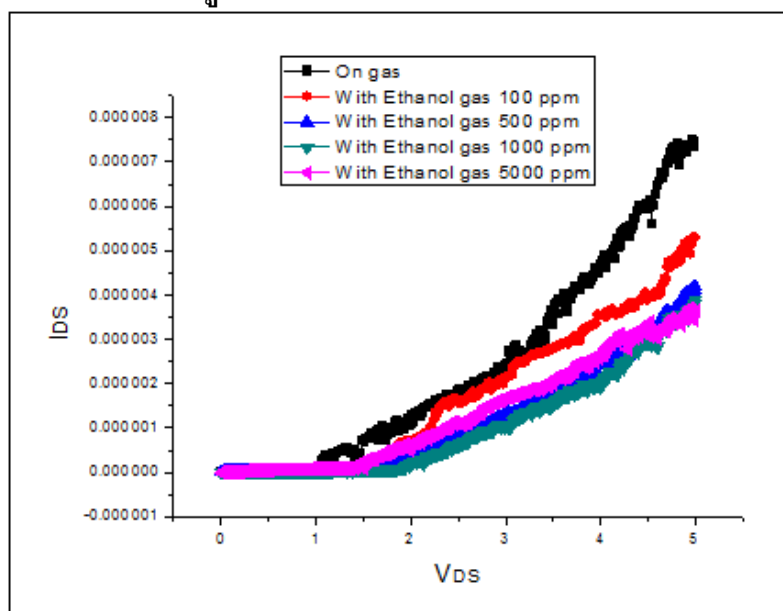
รูปที่ 46 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} กับ V_{GS} ของผลการทดสอบประสิทธิภาพของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ กรณีใช้ PCDTBT เมื่อปล่อยก๊าซเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างกัน โดยที่ $V_{DS} = 0.2$ V

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(I_{DS})^{1/2}$ และ V_{GS} ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ที่มี PCDTBT เป็นช่องนำกระแส สามารถหาค่าของแรงดันขีดเริ่มได้โดยการลากเส้นตรงผ่านความชันช่วงเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นตัดผ่านความต่างศักย์ระหว่างขั้วเกต-ซอส (V_{GS}) เมื่อพิจารณาที่ $V_{DS} = 0.2$ V (ความชื้น 4-5%) พบว่าแรงดันขีดเริ่มมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าแรงดันขีดเริ่มภายใต้บรรยากาศปกติ โดยค่าแรงดันขีดเริ่มภายใต้บรรยากาศปกติมีค่าเท่ากับ -4 V เมื่อปล่อยก๊าซเอทานอลที่ความเข้มข้น 100 ppm, 500 ppm, 1000 ppm และ 5000 ppm ทำให้แรงดันขีดเริ่มมีค่ากับ -4.5 V, -7.2 V, -9.5 V และ 13.8 V ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 47



รูปที่ 47 แสดงการหาค่าแรงดันขีดเริ่มโดยวิเคราะห์จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(I_{DS})^{1/2}$ กับ V_{GS} ของผลการทดสอบประสิทธิภาพของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ กรณีใช้ PCDTBT เป็นช่องนำกระแส เมื่อปล่อยก๊าซเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างกัน โดยที่ $V_{DS} = 0.2$ V

สุดท้ายจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} และ V_{DS} ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ที่มี PCDTBT เป็นช่องนำกระแสเมื่อปล่อยก๊าซเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างกัน ที่ $V_{GS} = -8$ V (ความชื้น 4-5%) พบว่ากระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วเดรนซอสลดลง เมื่อความเข้มข้นของก๊าซเอทานอลเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 48



รูปที่ 48 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} กับ V_{DS} ของผลการทดสอบประสิทธิภาพของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ กรณีใช้ PCDTBT เป็นช่องนำกระแส เมื่อปล่อยเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างกัน โดยที่ $V_{GS} = -8$ V

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ที่มี PCDTBT เป็นช่องนำกระแสที่ความต่างศักย์ระหว่างขั้วเดรน-ซอส (V_{DS}) เท่ากับ 0.2 V หลังจากปล่อยก๊าซแอมโมเนีย อะซิโตนและเอทานอล ที่ความเข้มข้น 100 ppm, 500 ppm, 1000 ppm และ 5000 ppm เข้าสู่ระบบ สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ดังตารางที่ 5

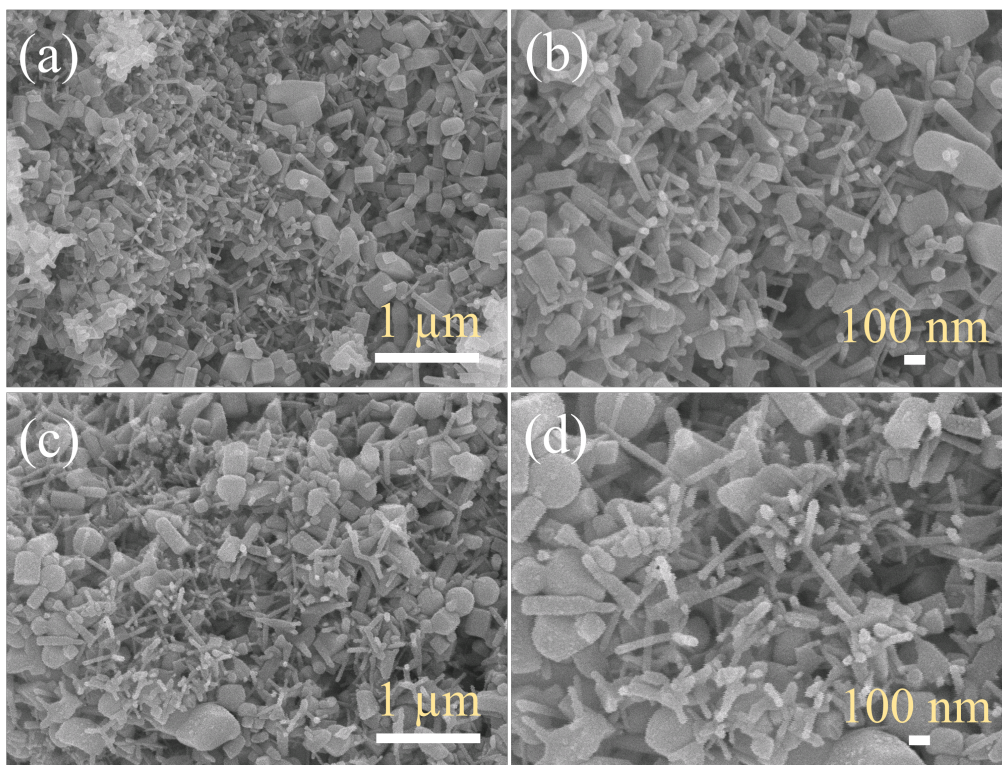
ตารางที่ 5 แสดงค่าอัตราส่วนของกระแสเปิดต่อกระแสปิด (On-Off ratio) และค่าแรงดันขีดเริ่มที่ $V_{DS} = 0.2$ V เมื่อปล่อยก๊าซแอมโมเนีย อะซิโตนและเอทานอล ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของ แก๊ส	อัตราส่วนของกระแสเปิด ต่อกระแสปิด (On-Off ratio)			แรงดันขีดเริ่ม (V_{TH}) (V)			$ V_{TH(air)} - V_{TH} $		
	แอมโม เนีย	อะซิโตน	เอทานอล	แอมโม เนีย	อะซิโตน	เอทานอล	แอมโม เนีย	อะซิ โตน	เอ ทานอล
ในอากาศ	440.86	440.86	440.86	-4	-4	-4	0	0	0
100 ppm	415.49	543.80	711.29	-4	-6.8	-4.5	0	2.8	0.5
500 ppm	401.07	742.66	338.11	-5.8	-11	-7.2	1.8	7	3.2
1000 ppm	409.79	145.60	370	-6	-12	-9.5	2	8	5.5
5000 ppm	386.66	338.91	63.1	-9	-14.5	-13.8	5	10.5	9.8

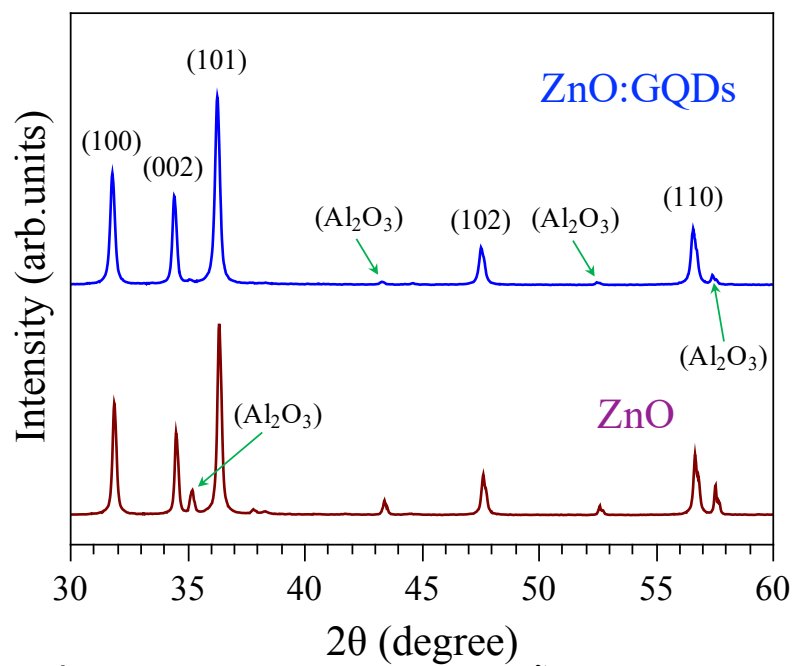
8. ผลการทดสอบการตอบสนองต่อก๊าซแอมโมเนียของเซนเซอร์นาโนซิงก์ออกไซด์ที่ถูกเติมด้วยหมุดควอนตัมกราฟีน

ในงานวิจัยส่วนนี้ผู้วิจัยได้สังเคราะห์โครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบผสมระหว่างนาโนเตตระพอดกับอนุภาคนาโนด้วยกระบวนการให้ความร้อนด้วยไฟฟ้า จากรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นขนาดอยู่ระหว่าง 100-500 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 49 (a)-(b) หลังจากเติมด้วยหมุดควอนตัมกราฟีนพบว่าโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ไม่เปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 49 (c)-(d)

เมื่อทดสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์พบว่ามิซิงก์ออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลแต่ไม่ปรากฏฟิสิกกราฟีนทั้งนี้เกิดจากการเติมด้วยปริมาณที่น้อยมาก ดังแสดงในรูปที่ 50

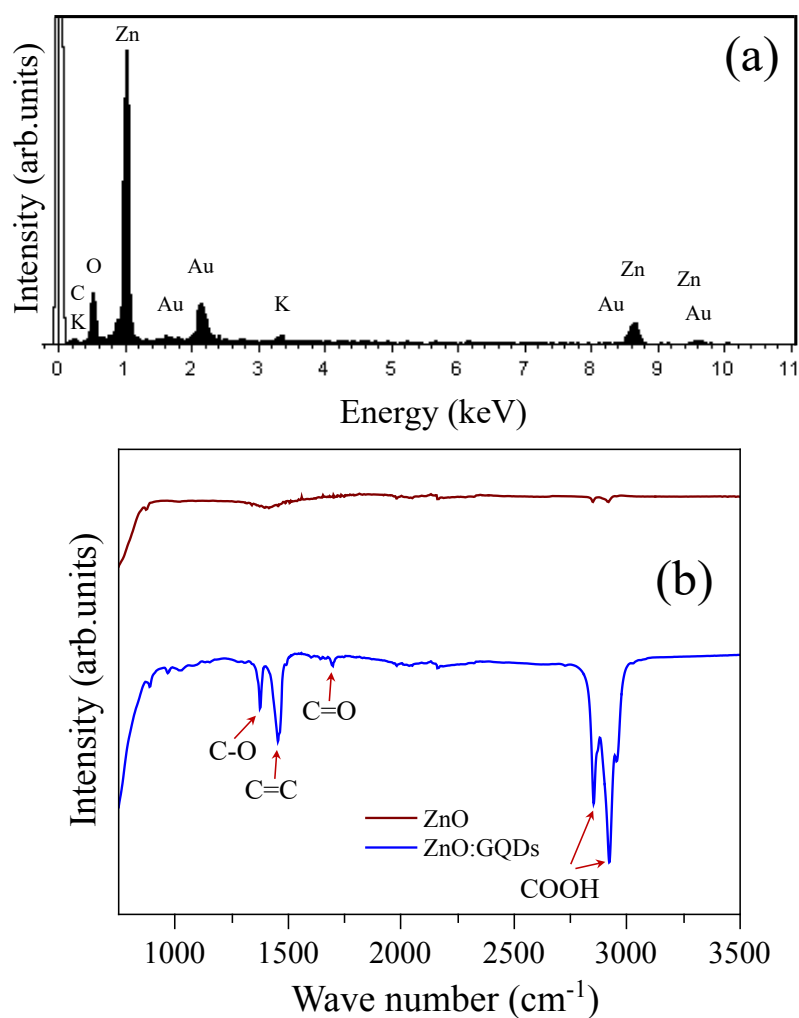


รูปที่ 49 (a)-(b) รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่แสดงถึงลักษณะรูปร่างของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่ถูกสังเคราะห์โดยกระบวนการให้ความร้อนด้วยไฟฟ้า (c)-(d) รูปถ่ายโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่ถูกเคลือบด้วยหมุดควอนตัมกราฟีน



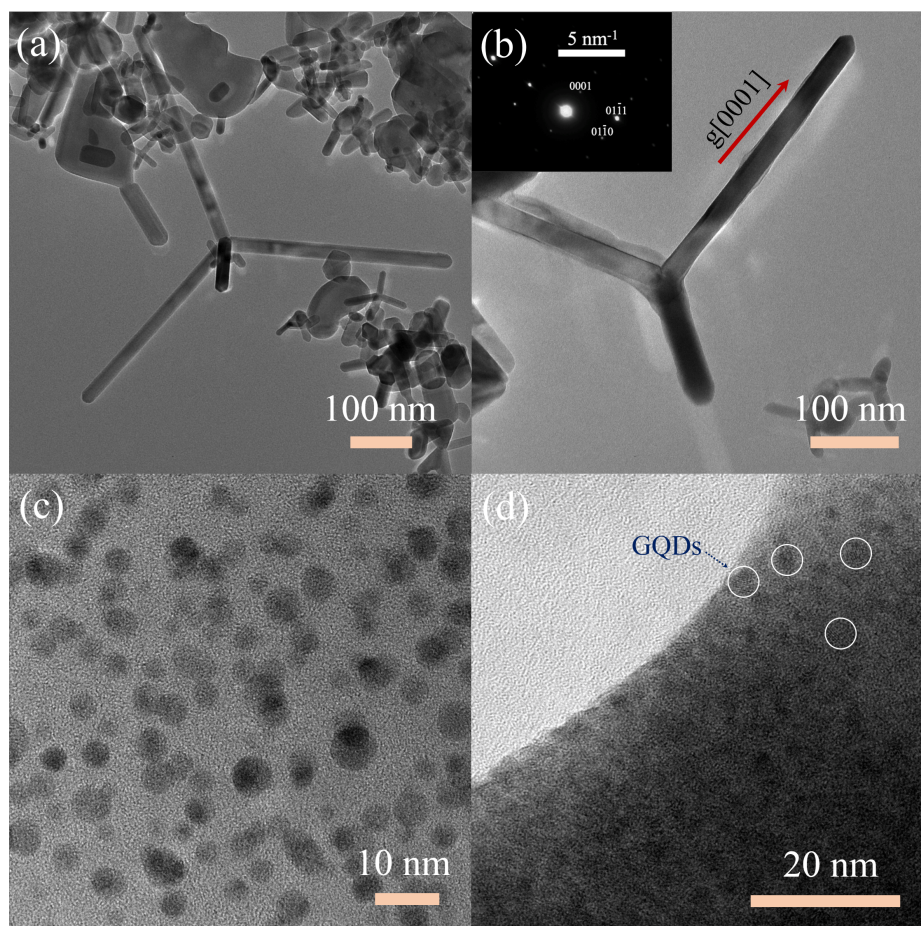
รูปที่ 50 ผลจากการทดสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์

หลังจากทดสอบด้วยสเปกโตรสโคปีพลังงานกระจายพบว่ามีฟีดของคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบหลักของกราฟีน ดังแสดงในรูปที่ 51 (a) ส่วนการทดสอบด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีแสดงในรูปที่ 51 (b) พบว่าฟีดของซิงก์ออกไซด์ที่เติมด้วยหมุดควอนตัมกราฟีนแตกต่างจากฟีดของซิงก์ออกไซด์ โดยพบฟีดที่ $1,380\text{ cm}^{-1}$ เป็นฟีดที่แสดงถึงพันธะ C-O, ฟีดที่ $1,480\text{ cm}^{-1}$ เป็นฟีดที่แสดงถึงพันธะ C=C ซึ่งเป็นฟีดที่แข็งแกร่งมากที่มาจากลักษณะเฉพาะของกราฟีน, ฟีดที่ 1700 cm^{-1} เป็นฟีดที่แสดงถึงพันธะ C=O และฟีดที่ $2,850\text{ cm}^{-1}$ และ $2,920\text{ cm}^{-1}$ เป็นสองฟีดที่แสดงถึงพันธะ COOH ฟีดทั้งหมดที่แตกต่างจากฟีดของซิงก์ออกไซด์เกี่ยวข้องกับการเกิดขึ้นของกลุ่ม carboxyl และ hydroxyl ซึ่งมาจากการเกิดขึ้นของออกซิเจนในหมุดควอนตัมกราฟีน



รูปที่ 51 ผลของ (a) สเปกโตรสโคปีพลังงานกระจาย (b) ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี

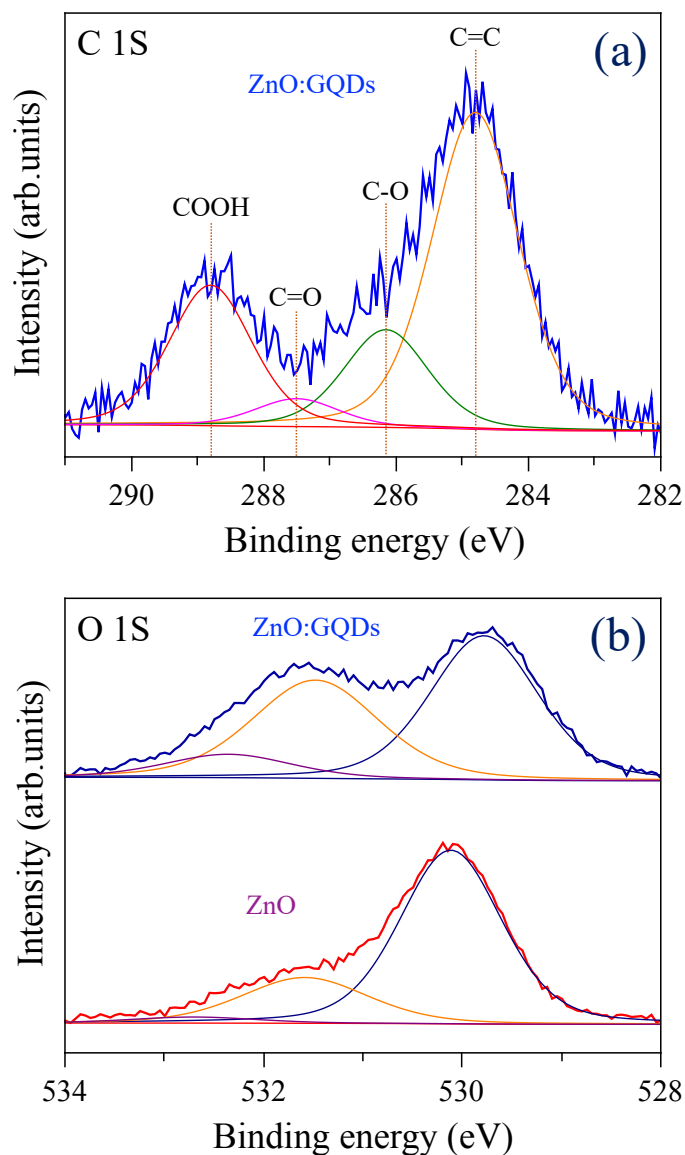
ส่วนรูปที่ 52 (a)-(d) เป็นรูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านที่แสดงให้เห็นถึงหมุดควอนตัมกราฟีนที่เกาะลงบนพื้นผิวของซิงก์ออกไซด์ และหมุดควอนตัมกราฟีนมีขนาดเฉลี่ยอยู่ที่ 2.6 นาโนเมตร



รูปที่ 52 (a)-(d) เป็นรูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

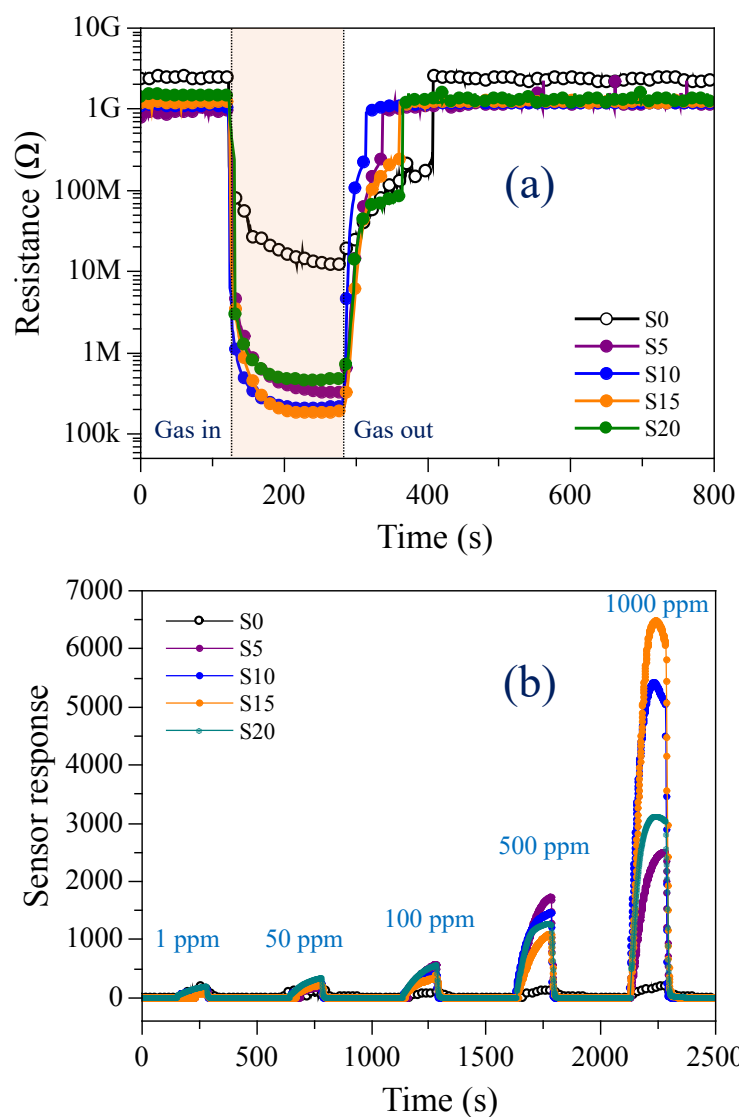
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอ็กซ์ในย่าน C1s และ O1s ของซิงก์ออกไซด์และซิงก์ออกไซด์ที่ถูกเติมด้วยหมุดควอนตัมกราฟีนถูกแสดงในรูปที่ 53 (a) และ (b) พีค C1s ของซิงก์ออกไซด์ที่ถูกเติมด้วยหมุดควอนตัมกราฟีนถูกฟิตที่พลังงานยึดเหนี่ยว 4 ค่า ได้แก่ ที่พลังงาน 284.8 eV เกี่ยวข้องกับพันธะ C=C ของกราฟไฟต์ ที่พลังงาน 286.1 eV, 287.5 eV และ 288.8 eV เกี่ยวข้องกับพันธะ C-O, C=O และ COOH ตามลำดับ สำหรับพันธะของ COOH เกิดขึ้นจากออกซิเจนของซิงก์ออกไซด์และ O-H stretching ของคาร์บอนที่ขอบของหมุดควอนตัมกราฟีน ผลเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงการสร้างโครงสร้างแบบเฮเทอโรระหว่างซิงก์ออกไซด์และหมุดควอนตัมกราฟีน

สำหรับพีค O1s ถูกฟิตที่พลังงาน 530.1 eV และ 531.8 eV ซึ่งพีคทั้งหมดเกี่ยวข้องกับการสร้าง O-C ระหว่างออกซิเจนในซิงก์ออกไซด์กับคาร์บอนของหมุดควอนตัมกราฟีน นอกจากนี้พีคของ 532.7 eV เกี่ยวข้องกับการสร้างพันธะ O=C อีกด้วย



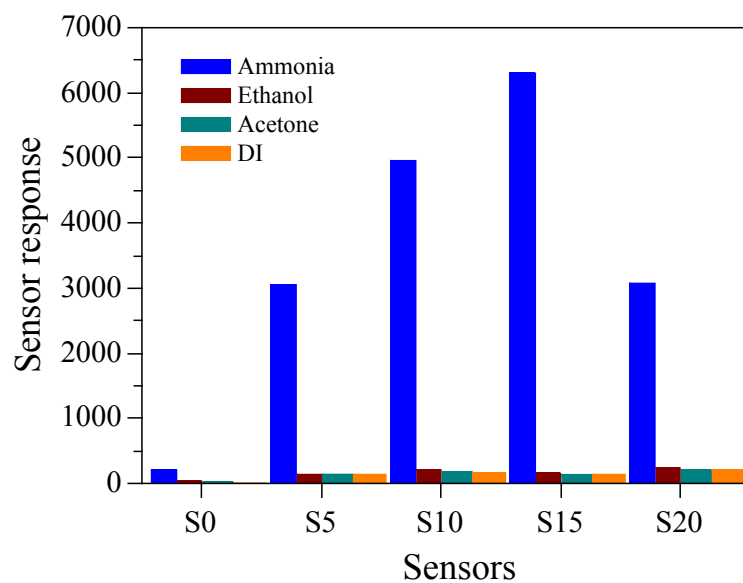
รูปที่ 53 (a) และ (b) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอกซ์ในย่าน C1s และ O1s ของซิงก์ออกไซด์และซิงก์ออกไซด์ที่ถูกเติมด้วยหมุดควอนตัมกราฟีน

ผลการทดสอบก๊าซแอมโมเนียของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่ถูกเติมด้วยหมุดควอนตัมกราฟีนถูกแสดงในรูปที่ 54 (a) และ (b) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของเซนเซอร์ที่ถูกเติมด้วยหมุดควอนตัมกราฟีนที่ปริมาณ 5 mL, 10 mL, 15 mL และ 20 mL และถูกนำไปทดสอบกับก๊าซแอมโมเนีย (ความชื้น 65% RH) ดังแสดงในรูปที่ 54 (a) ผลการตอบสนองพบว่าเซนเซอร์มีความต้านทานลดลงเมื่อปล่อยก๊าซแอมโมเนียเข้าสู่ระบบและความต้านทานเพิ่มขึ้นเมื่อก๊าซถูกนำออกจากระบบ แสดงให้เห็นสมบัติของการตอบสนองต่อก๊าซ reducing ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซแอมโมเนียพบว่าค่าสภาพไวมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดที่ 6047 เท่า ที่ความเข้มข้น 1000 ppm ซึ่งเป็นค่าสภาพไวที่มาจากเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่ถูกเติมด้วยหมุดควอนตัมกราฟีนที่ปริมาณ 15 mL ดังแสดงในรูปที่ 54 (b)



รูปที่ 54 (a) การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่ถูกเติมด้วยหมวดควอนตัมกราฟีนภายใต้บรรยากาศปกติกับบรรยากาศของก๊าซแอมโมเนีย (b) ค่าสภาพไวที่สัมพันธ์กับความเข้มข้น

นอกจากนี้เซนเซอร์เหล่านี้มีความจำเพาะต่อก๊าซแอมโมเนียเมื่อเทียบกับก๊าซเอทานอลและอะซิโตน ดังแสดงในรูปที่ 55



รูปที่ 55 กราฟแท่งแสดงความจำเพาะต่อก๊าซแอมโมเนียของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่ถูกเติมด้วย
หมุดควอนตัมกราฟีน

สรุปผลการวิจัย

1. สรุปผลการทดสอบประสิทธิภาพทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่มี ZnO nanoparticles เป็นช่องนำกระแส

จากการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V_{GS} กับ I_{DS} ของการทดสอบประสิทธิภาพทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่มี ZnO nanoparticles เป็นช่องนำกระแส เมื่อพิจารณา $V_{DS} = 0.4$ V มีค่าอัตราส่วนของกระแสเปิดต่อกระแสปิด (On-Off ratio) = 719.82 และเมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V_{GS} กับค่ารากที่สองของ I_{DS} ที่ $V_{DS} = 0.4$ V มีค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_{TH}) = 0.3 V และมีกระแสไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 0.427 μA

จากการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V_{GS} กับ I_{DS} ของการทดสอบประสิทธิภาพทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่มี ZnO nanoparticles เป็นช่องนำกระแส เมื่อได้รับก๊าซเอทานอลที่มีความเข้มข้น 1000 ppm ทรานซิสเตอร์มีความสามารถในการทดสอบกับก๊าซเอทานอลได้ เมื่อพิจารณาที่ $V_{DS} = 0.4$ V มีค่าอัตราส่วนของกระแสเปิดต่อกระแสปิด (On-Off ratio) = 591.98 และเมื่อพิจารณาของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V_{GS} กับค่ารากที่สองของ I_{DS} ที่ $V_{DS} = 0.4$ V มีค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_{TH}) = 0 V และมีกระแสไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 0.381 μA ซึ่งค่าอัตราส่วนของกระแสเปิดต่อกระแสปิด (On-Off ratio) และกระแสไฟฟ้าสูงสุดมีค่ามากกว่าเมื่อยังไม่ได้รับก๊าซ แต่ค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_{TH}) มีค่าน้อยกว่าเมื่อยังไม่ได้รับก๊าซ

ขณะที่การวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V_{GS} กับ I_{DS} ของการทดสอบประสิทธิภาพทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่มี ZnO nanoparticles เป็นช่องนำกระแส เมื่อได้รับก๊าซแอมโมเนียที่มีความเข้มข้น 100 ppm ยังมีความสามารถในการเป็นทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าและอยู่ในสถานะ Open State เมื่อพิจารณาที่ $V_{DS} = 0.4$ V มีค่าอัตราส่วนของกระแสเปิดต่อกระแสปิด (On-Off ratio) = 1,871.07 และเมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V_{GS} กับค่ารากที่สองของ I_{DS} ที่ $V_{DS} = 0.4$ V มีค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_{TH}) = -1.4 V และมีกระแสไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 0.266 μA ซึ่งค่าอัตราส่วนของกระแสเปิดต่อกระแสปิด (On-Off ratio) และกระแสไฟฟ้าสูงสุดมีค่ามากกว่าเมื่อยังไม่ได้รับก๊าซ แต่ค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_{TH}) มีค่าน้อยกว่าเมื่อยังไม่ได้รับก๊าซ

2. ลักษณะเฉพาะของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ที่มี P3HT เป็นช่องนำกระแส

ทรานซิสเตอร์ที่เตรียมได้มีอัตราส่วนกระแสเปิดต่อกระแสปิด (on/off ratio) เท่ากับ 1278.8, 785.8, 815.7 และ 759.3 ที่ความต่างศักย์เดรน-ซอร์ส เป็น 0.4 V, 0.6 V, 0.8 V และ 1 V ตามลำดับ ส่วนแรงดันขีดเริ่มที่ความต่างศักย์ V_{GS} ระหว่างขั้วเดรน-ซอร์ส เท่ากับ 0.4 V, 0.6 V, 0.8 V, 1 V มีค่าเท่ากับ -2.1875 V, -1.71875 V, -1.5625 V, -1.25 V ตามลำดับ

3. ผลการทดสอบทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ที่มี P3HT:N-rGO เป็นช่องนำกระแส

ทรานซิสเตอร์มีอัตราส่วนกระแสเปิดต่อกระแสปิดเท่ากับ 11993, 362 และ 130 เท่า ที่ความต่างศักย์เดรน-ซอร์ส เป็น 0.4 V, 0.6 V และ 0.8 V ตามลำดับ ส่วนแรงดันขีดเริ่มของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ที่มี P3HT:N-rGO เป็นช่องนำกระแส มีค่าเป็น 0.3125 V,

1.875 V และ 6.875 V ที่ความต่างศักย์ระหว่างขั้วเดรน-ซอส เป็น 0.4 V, 0.6 V และ 0.8 V ตามลำดับ

4. ผลการทดสอบทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบสองขั้ว (AOFETs) ที่มี PCDTBT และ F₁₆ CuPc เป็นช่องนำกระแส

ผลการทดสอบทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบสองขั้ว (AOFETs) ที่มี PCDTBT และ F₁₆ CuPc เป็นช่องนำกระแสพบว่า มีอัตราส่วนของกระแสเปิดต่อกระแสปิดเป็น 548, 1377, 26535, 914 และ 529 ที่ความต่างศักย์ระหว่างขั้วเดรน-ซอส เท่ากับ 0.4 V, 0.6 V, 0.8 V, 1 V และ 1.2 V ตามลำดับ และการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าเดรน-ซอส กับความต่างศักย์เกต-ซอส มีลักษณะแบบตัววีซึ่งเป็นลักษณะการนำไฟฟ้าแบบสองขั้ว โดยแรงดันขีดเริ่มของอิเล็กตรอนและโฮลมีค่าเป็น 3.75 V, -0.937 V, 0 V, -5.625 V, -5.625 V และ 3.75 V, 5.625 V, 1.875 V, 7.5 V, 7.5 V ตามลำดับ เมื่อใช้ความต่างศักย์เดรน-ซอส ที่ 0.4 V, 0.6 V, 0.8 V, 1 V, 1.2 V ส่วนค่า Sub-Threshold Swing จะมีค่าเป็น -2.05 V/decade และ 2.06 V/decade สำหรับพาหะโฮลและอิเล็กตรอน ตามลำดับ โดยใช้ความต่างศักย์เดรน-ซอส เป็น 0.8 V

5. ผลการทดสอบทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบสองขั้ว (AOFETs) ที่มี P3HT และ F₁₆ CuPc เป็นช่องนำกระแส

ผลการทดสอบทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบสองขั้ว (AOFETs) ที่มี P3HT และ F₁₆ CuPc เป็นช่องนำกระแส มีอัตราส่วนของกระแสเปิดต่อกระแสปิดเป็น 905.7, 518.7, 453.8, 1077.9 และ 254488.2 ที่ความต่างศักย์ระหว่างขั้วเดรน-ซอส เท่ากับ 0.4 V, 0.6 V, 0.8 V, 1 V และ 1.2 V เมื่อหาค่า Sub-Threshold Swing จะได้ค่าเป็น -3.17 V/decade และ 3.30 V/decade สำหรับพาหะโฮลและอิเล็กตรอน ตามลำดับ โดยใช้ความต่างศักย์เดรน-ซอส เป็น 0.8 V กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I กับ V ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบสองขั้วที่มี PCDTBT และ F₁₆CuPc เป็นช่องนำกระแสมีการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าเดรน-ซอส กับความต่างศักย์เกต-ซอส มีลักษณะแบบตัววีซึ่งเป็นลักษณะการนำไฟฟ้าแบบสองขั้ว โดยแรงดันขีดเริ่มของอิเล็กตรอนและโฮลมีค่าเป็น 3.75 V, -0.937 V, 0 V, -5.625 V, -5.625 V และ 3.75 V, 5.625 V, 1.875 V, 7.5 V, 7.5 V ตามลำดับ เมื่อใช้ความต่างศักย์เดรน-ซอส ที่ 0.4 V, 0.6 V, 0.8 V, 1 V และ 1.2 V

6. เปรียบเทียบผลการทดสอบทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์แบบสองขั้ว (AOFETs)

กระแสเดรน-ซอส ของทรานซิสเตอร์ที่ใช้ P3HT/F₁₆CuPc เป็นช่องนำกระแส มีค่าสูงกว่าทรานซิสเตอร์ที่ใช้ PCDTBT/F₁₆CuPc เป็นช่องนำกระแส ส่วนลักษณะการถ่ายโอนกระแสไฟฟ้ามักจะใกล้เคียงกัน และมีลักษณะการถ่ายโอนประจุเป็นแบบรูปตัววีที่ความต่างศักย์ระหว่างขั้วเดรน-ซอส เท่ากับ 0.8 V เมื่อวิเคราะห์ค่าแรงดันขีดเริ่มของทรานซิสเตอร์พบว่า ทรานซิสเตอร์ที่ใช้ PCDTBT/F₁₆CuPc เป็นช่องนำกระแสมีค่าแรงดันขีดเริ่มของพาหะโฮล เท่ากับ 1.875 V และมีค่าแรงดันขีดเริ่มของพาหะอิเล็กตรอนเท่ากับ 0 V ขณะที่ทรานซิสเตอร์ที่

ใช้ P3HT/F₁₆CuPc เป็นช่องนำกระแส มีค่าแรงดันขั้วเริ่มของพาหะโฮลเท่ากับ 5.625 V และมีค่าแรงดันขั้วเริ่มของพาหะอิเล็กตรอนเท่ากับ -1.875 V

7. ผลการทดสอบการตอบสนองต่อก๊าซแอมโมเนีย เอทานอลและก๊าซอะซิโตน ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ที่มี PCDTBT เป็นช่องนำกระแส

ความต่างศักย์ระหว่างขั้วเดรน-ซอร์ส (V_{DS}) เท่ากับ 0.2 V, 0.4 V, 0.6 V, 0.8 V และมีอัตราส่วนกระแสเปิดต่อกระแสปิด (on-off ratio) เท่ากับ 391.3, 419.71, 437.69, 415.4 ตามลำดับ ส่วนแรงดันขั้วเริ่ม (V_{TH}) มีค่าเท่ากับ -4 V, -3.5 V, -2.6 V, -2.3 V ตามลำดับ ซึ่งแรงดันขั้วเริ่ม (V_{TH}) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ระหว่างขั้วเดรน-ซอร์ส (V_{DS}) ให้กับ OFET และจากการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} กับ V_{DS} ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดอินทรีย์ที่มี PCDTBT เป็นช่องนำกระแส ที่ความต่างศักย์ระหว่างขั้วเกต-ซอร์ส (V_{GS}) เท่ากับ 2 V, 0 V, -2 V OFET จะเข้าสู่สถานะ closed state ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าแรงดันขั้วเริ่ม และเข้าสู่สถานะ opened state ที่ความต่างศักย์ระหว่างขั้วเกตซอร์ส (V_{GS}) เท่ากับ -4 V, -6 V, -8 V ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าแรงดันขั้วเริ่ม

เมื่อปล่อยก๊าซแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างกันที่ $V_{DS} = 0.8$ V อัตราส่วนกระแสเปิดต่อกระแสปิด (on-off ratio) ในอากาศค่าเท่ากับ 440.86 เมื่อปล่อยก๊าซแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 100 ppm, 500 ppm, 1000 ppm และ 5000 ppm มีค่าเท่ากับ 443.18, 437.36, 451.08 และ 417.38 ตามลำดับ แรงดันขั้วเริ่มในอากาศมีค่าเท่ากับ -2.3 V เมื่อปล่อยก๊าซแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 100 ppm, 500 ppm, 1000 ppm และ 5000 ppm มีค่าเท่ากับ -4 V, -5 V, -6.2 V และ -7.1 V ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าแรงดันขั้วเริ่มในอากาศ ส่วนการวิเคราะห์กระแสเดรน-ซอร์สกับความต่างศักย์เดรน-ซอร์ส พบว่าค่ากระแสมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของก๊าซแอมโมเนียมีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อปล่อยก๊าซอะซิโตนที่ความเข้มข้นต่างกันที่ $V_{DS} = 0.2$ V อัตราส่วนกระแสเปิดต่อกระแสปิด (on-off ratio) ในอากาศค่าเท่ากับ 483.33 เมื่อปล่อยก๊าซอะซิโตนที่ความเข้มข้น 100 ppm, 500 ppm, 1000 ppm และ 5000 ppm มีค่าเท่ากับ 543.80, 742.66, 145.60 และ 338.91 ตามลำดับ แรงดันขั้วเริ่มในอากาศมีค่าเท่ากับ -4 V เมื่อปล่อยก๊าซอะซิโตนที่ความเข้มข้น 100 ppm, 500 ppm, 1000 ppm และ 5000 ppm มีค่าเท่ากับ -6.8 V, -11 V, -12 V และ 14.5 V ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าแรงดันขั้วเริ่มในอากาศ

เมื่อปล่อยก๊าซเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างกันที่ $V_{DS} = 0.2$ V อัตราส่วนกระแสเปิดต่อกระแสปิด (on-off ratio) ในอากาศค่าเท่ากับ 483.33 เมื่อปล่อยก๊าซเอทานอลที่ความเข้มข้น 100 ppm, 500 ppm, 1000 ppm และ 5000 ppm มีค่าเท่ากับ 711.29, 338.11, 370 และ 63.1 ตามลำดับ แรงดันขั้วเริ่มในอากาศมีค่าเท่ากับ -4 V เมื่อปล่อยก๊าซเอทานอลที่ความเข้มข้น 100 ppm, 500 ppm, 1000 ppm และ 5000 ppm มีค่าเท่ากับ -4.5 V, -7.2 V, -9.5 V และ 13.8 V ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าแรงดันขั้วเริ่มในอากาศ

8. ผลการทดสอบการตอบสนองต่อก๊าซแอมโมเนียของเซนเซอร์นาโนซิงก์ออกไซด์ที่ถูกเติมด้วยหมุดควอนตัมกราฟีน

หมุดควอนตัมกราฟีนถูกนำไปตกแต่งบนพื้นผิวของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์เพื่อสร้างเป็นโครงสร้างแบบเฮเทอโรสำหรับการนำไปตอบสนองต่อก๊าซแอมโมเนีย ปริมาณของหมุดควอนตัมกราฟีนที่ดีที่สุดในการนำไปตกแต่งบนพื้นผิวของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์คือที่ 15 มิลลิลิตร ซึ่งสามารถตอบสนองต่อก๊าซแอมโมเนียได้ดีที่สุดรวมถึงให้ค่าจำเพาะต่อก๊าซแอมโมเนียสูง กลไกการปรับปรุงค่าสภาพไวของเซนเซอร์เกิดขึ้นเนื่องมาจากกลุ่มของ carboxyl และ hydroxyl ในหมุดควอนตัมกราฟีนซึ่งจะทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของออกซิเจน กลไกนี้เป็นการเพิ่มโมเลกุลของน้ำบนพื้นผิวของเซนเซอร์ได้ จากนั้นโมเลกุลของน้ำดังกล่าวจะเป็นสิ่งที่จะนำไปสร้าง H^+ ที่จะทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียได้ที่อุณหภูมิห้องซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มค่าสภาพไวและค่าความจำเพาะต่อก๊าซแอมโมเนีย

เอกสารอ้างอิง

1. Chen, W., et al., Room temperature pH-dependent ammonia gas sensors using graphene quantum dots. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016. 222: p. 763-768.
2. Chu, X., et al., The acetone sensing properties of ZnFe₂O₄-graphene quantum dots (GQDs) nanocomposites at room temperature. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2019. 106: p. 326-333.
3. Hu, T., et al., Trimethylamine sensing properties of graphene quantum Dots/ α -Fe₂O₃ composites. *Journal of Solid State Chemistry*, 2016. 237: p. 284-291.
4. Li, B., et al., Graphene quantum dots decorated ZnO-ZnFe₂O₄ nanocages and their visible light photocatalytic activity. *Applied Surface Science*, 2019. 478: p. 991-997.
5. Min, S., et al., Facile one-step hydrothermal synthesis toward strongly coupled TiO₂/graphene quantum dots photocatalysts for efficient hydrogen evolution. *Applied Surface Science*, 2017. 396: p. 1375-1382.
6. Rahimi, K. and A. Yazdani, Ethanol-sensitive nearly aligned ZnO nanorod thin films covered by graphene quantum dots. *Materials Letters*, 2018. 228: p. 65-67.
7. Ponhan, W., S. Phadungdhitidhada, and S. Choopun, Fabrication of ethanol sensors based on ZnO thin film field-effect transistor prepared by thermal evaporation deposition. *Materials Today: Proceedings*, 2017. 4(5, Part 2): p. 6342-6348.
8. Chang, J., et al. *Organic Field-Effect Transistor: Device Physics, Materials, and Process*. 2017.
9. Tyona, M.D., A theoretical study on spin coating technique. *Advances in materials Research*, 2013. 2(4): p. 195-208.
10. Ossila. PCDTBT. 2020; Available from: <https://www.ossila.com/products/pcdtbt>.
11. Zhao, X., et al., 20 - Graphene quantum dots in biomedical applications: recent advances and future challenges, in *Handbook of Nanomaterials in Analytical Chemistry*, C. Mustansar Hussain, Editor. 2020, Elsevier. p. 493-505.
12. Zhang, S., et al., High-Performance Supercapacitor of Graphene Quantum Dots with Uniform Sizes. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018. 10(15): p. 12983-12991.
13. Zamiri, G. and S. Bagheri, Fabrication of green dye-sensitized solar cell based on ZnO nanoparticles as a photoanode and graphene quantum

dots as a photo-sensitizer. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2018, 511: p. 318-324.

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

Wongrat E., Nuengnit T., Panyathip R., Chanlek N., Hongsith N. and Choopun S., Highly selective room temperature ammonia sensors based on ZnO nanostructures decorated with graphene quantum dots (GQDs), *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2021, 326: 128983. 1-10. ตีพิมพ์ online เมื่อวันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2563

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128983>

(เป็นผู้ดำเนินการหลักและมีส่วนร่วมร้อยละ 70)

เป็นวารสารระดับนานาชาติซึ่งอยู่ในฐานข้อมูล ISI Web of Science

เป็นวารสารที่ได้รับการจัดอยู่ในควอไทล์ที่ 1 ในการจัดอันดับวารสาร SJR SCIMAGO

เลข ISSN: 0925-4005, มีค่า H Index=184

มีค่า **Impact factor 7.290 (2 ปี), Citation=0**



Contents lists available at ScienceDirect

Sensors and Actuators: B. Chemical

journal homepage: www.elsevier.com/locate/snb

Highly selective room temperature ammonia sensors based on ZnO nanostructures decorated with graphene quantum dots (GQDs)

Ekasiddh Wongrat^{a,b,*}, Thiranuch Nuengnit^a, Rangsan Panyathip^c, Narong Chanlek^d, Niyom Hongstith^{a,b}, Supab Chooapun^c

^a School of Science, University of Phayao, Phayao, 56000, Thailand

^b Unit of Excellence on Sensors Technology, University of Phayao, Phayao, 56000, Thailand

^c Department of Physics and Materials Science, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200 and ThEP Center, CMF, Bangkok, 10400, Thailand

^d Synchrotron Light Research Institute, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

ARTICLE INFO

Keywords:

Ammonia sensor
ZnO
GQDs
p-n heterojunction
Room temperature

ABSTRACT

This paper presents a highly selective ammonia sensor based on ZnO nanostructures combined with graphene quantum dots (GQDs). Novel graphene quantum dots (GQDs) have an average lateral size distribution of 2.6 nm. Various amounts of GQDs were combined with the ZnO nanostructure surfaces. Prior to the ZnO:GQDs investigation, field emission scanning electron microscopy (FE-SEM), energy-dispersive spectroscopy (EDS), Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy, transmission electron microscopy (TEM), and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) were used to intensively characterize the surface morphologies, existence of functional groups, and chemical compositions. ZnO:GQD heterojunctions are crucial candidate materials due to their highly selective response to ammonia (NH₃) vapor. The ammonia sensing characteristics of bare ZnO and ZnO:GQDs sensors at room temperature were systematically investigated via exposure to acetone and ethanol vapor. The ammonia sensing results show that ZnO:GQDs sensors with a volume of 15 μ L have optimum sensor responses at an ammonia concentration of 1000 ppm with a value of 6047. The ammonia sensing properties of ZnO:GQDs sensors are due to the GQDs' carboxyl and hydroxyl groups, which produce more oxygen-containing groups leading to a high H⁺ molecule density. This further contributes to their highly responsive and selective performance for sensing ammonia at room temperature.

1. Introduction

Ammonia (NH₃) volatile organic compounds (VOCs) in the surrounding atmosphere have become a major concern due to their indirect contribution to global warming. Ammonia is widely emitted from livestock, the agricultural sector, and chemical plants [1–3]. It is also emitted from industrial factory leakage, vehicles, catalytic reactions, and gas combustion of wastes [1–3]. Ammonia is a colorless toxic gas that is harmful to humans. It inhibits cell growth, destroys the immune system, causes cancer, interrupts breathing, and irritates the skin, nose, and eyes [4–6]. Typically, the ammonia concentration limit causing serious human risks is 25 ppm at an exposure time of 8 h and 35 ppm at an exposure time of 15 min [5]. The detection of ammonia in human breath can be used as a biomarker to diagnose diseases and explore physical disorders of various organs such as the kidneys, liver, stomach, and mouth [7,8]. Various effective methods are used to monitor

ammonia vapor concentrations, including mass spectrometry, rotational spectroscopy, infrared spectroscopy, and gas chromatography [5,9]. However, these techniques are difficult to use and require experts for data evaluation. Therefore, resistive gas sensors are well-known methods of precisely detecting ammonia vapor concentrations at room temperature. Interestingly, they are basically utilized to produce active layer in the prototype of monolithically integrated chip for tuning sensor response and selectivity which indicate versatility potential such as low cost, low power consumption, ease of use and preparation, rapid diagnostics and high mass production [10–15].

Resistive gas sensors measure changes in electrical resistance under a chemical reaction between adsorbed oxygen molecules and the target analyte gas [10]. The resistive materials used are commonly based on metal-oxide semiconductors such as WO₃ [16,17], SnO₂ [18,19], Co₃O₄ [20], CuO [21], and ZnO [22,23]. Among those metal-oxide semiconductors, ZnO is a well-known smart material that provides a highly

* Corresponding author at: School of Science, University of Phayao, Phayao, 56000, Thailand.

E-mail address: ekasiddhwongrat@gmail.com (E. Wongrat).

<https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128983>

Received 23 June 2020; Received in revised form 24 September 2020; Accepted 27 September 2020

Available online 30 September 2020

0925-4005/© 2020 Elsevier B.V. All rights reserved.

tailored sensor response. Its electrical properties change when it is exposed to different types of analyte gas, especially ammonia vapor [24–26]. Moreover, ZnO has high chemical stability [27], easy preparation using various nanolevel morphologies, high electron mobility, and cost-effective preparation [2]. For use as ZnO ammonia sensors, the sensor response, selectivity, and signal characteristics must be improved. However, most ammonia sensors based on pure ZnO exhibit high sensor responses only at high working temperatures. They also consume a considerable amount of power, necessitating frequent battery replacement. Typically, at high working temperatures, more conduction electrons easily react to oxygen molecules in the air and form large numbers of adsorbed oxygen molecules [26]. These return more electrons to ZnO's conduction band after they react to the analyte gas, leading to a high sensor response. Fewer thermally stable adsorbed oxygen molecules are found on ZnO's surface at low room temperatures, which are difficult to extract from the surface [24]. This leads to a low sensor response to analyte gas at room temperature.

To overcome these obstacles, a variety of techniques are available to improve ammonia sensing performance at room temperature, including inorganic conjugated polymer materials, carbon-based materials, the addition of noble metals, UV activation, and p-n junction formation [3, 16, 18, 26, 28–30]. Carbon-based materials such as graphene oxide and carbon nanotubes (CNTs) can respond to ammonia vapor at room temperature as previously reported [31–34]. The combination of MOS/carbon-based materials is a new approach to significantly improve ammonia sensing. Nanoscale engineering of p-n heterojunctions with carbon-based materials and ZnO is an effective method of improving sensor response and has been tested on ammonia at room temperature. Graphene quantum dots (GQDs) are carbon-based materials used to produce p-n heterojunctions with ZnO. GQDs are generally the first few layers of graphene with a separately dispersed lateral proportion of less than 10 nm [35, 36]. Their superior physical properties provide quantum confinement [35], light emission with size adjustment [37], high conductivity, a high surface-to-volume ratio [37], and superior electron transport [38]. Additionally, GQDs' numerous carboxyl groups make them preferable to other carbon-based materials [37, 39, 40]. Combining GQDs with ZnO improves the sensor response and selectivity toward ammonia at room temperature. The carboxylic group is a carbonyl and hydroxyl group that produces oxygen-rich content in their lattices [35]. Many highly active sites toward ammonia vapor are created on the sensor surface, leading to a high sensor response at room temperature.

Previously, there are some reports on low temperatures gas sensor based on ZnO wire-like structures [24–26]. Although, the sensor response can be improved at low operating temperatures. But the lower sensor response and selective detection with level of 100 ppm are still major concern that need more investigation. In this work, the nice novelty is first time to produce the mixing morphologies ZnO with nanotetrapods and spherical shape via current heating approach which is cheap, rapid and high mass production. The GQDs are focused to combine with ZnO nanostructures for ammonia detection at a level of 1 ppm. Moreover, the gas sensing mechanism is proposed with H^+ ions creation from COOH group and adsorbed water molecules which dominates the number of O_2^- ions due to proton hopping. This mechanism is an important understanding in enhancing ultrahigh sensor response and highly selective response toward ammonia concentration at room temperature.

Therefore, in present work, GQDs materials are decorated onto a ZnO surface to form p-n heterojunctions leading to a surface chemical reaction change around the junction of symmetrically connected materials. The amount of GQDs vary according to the volume of colloidal GQDs on the ZnO surface. The selective and responsive results toward various ammonia concentrations are investigated and the response mechanism is determined.

2. Materials and methods

2.1. ZnO nanostructure synthesis

An analytical reagent grade of 99.99 % pure zinc powder was formed into a cylindrical shape via compression molding. The cylindrical zinc had a uniform height and diameter of 1 cm and 6 mm, respectively. External heat was generated from a DC electrical current to transform the cylindrical zinc into ZnO under an air atmosphere. A high-voltage DC electrical current was applied through cylindrical zinc to produce plasma via ionized gas as shown in Fig. 1. After the switch was turned on, the electrical current was constantly maintained at 50 A. The rapid thermal oxidation of zinc spontaneously occurred under an air atmosphere. Alumina substrates with interdigitated patterns were directly exposed to the plasma to produce ZnO at a distance of 1 cm, 2 cm and 3 cm from cylindrical zinc as shown in Fig. 2 (a)–(c).

2.2. Graphene quantum dot (GQD) synthesis

GQDs were prepared via an electrochemical method using graphite rods as the source material. Two graphite rod electrodes 3 mm in diameter and 5 cm long were cleaned in an acetone and ethanol solution via sonification for 10 min. Next, the electrolyte was prepared by mixing 1.00 M of citric acid and 0.45 M of KCl in 50 mL of deionized water (DI). In the electrochemical method, a direct electrical current from an Agilent E3633A was operated at 8 V for 15 min to bias both graphite electrodes. They were then diluted with ethanol and DI water (pH=5).

2.3. Characterization

The morphologies were investigated via field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) and transmission electron microscopy (TEM) (JEOL JEM-2010). The chemical composition was analyzed via energy-dispersive spectroscopy (EDS). The phase transformation was confirmed by X-ray diffraction (XRD) with monochromatic Cu K α radiation (2θ ranging from 30° – 70°), demonstrating the oxidation reaction of Zn to ZnO. The X-ray photoelectron spectroscopy (XPS, PHI5000 Versa Probe II, ULVAC-PHI, Japan) used a monochromatic AlK α X-ray source (1486.6 eV) to assess the chemical states and composition. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy was used to confirm the presence of the bare ZnO and ZnO:GQD functional groups.

2.4. Ammonia sensing investigation

To uniformly prepare the sensors based on the bare ZnO nanostructures, the products were titrated with 20 μ L of liquid ethanol. They were then heated at 80°C for 10 min. The samples were annealed in a ceramic furnace at 400°C for 4 h. The temperature was then reduced to room temperature and they were maintained in the chamber under 1 torr for 12 h. To compare the gas sensing performance of the bare ZnO and ZnO:GQDs sensors, graphene quantum dots (GQDs) were dropped onto the bare ZnO nanostructure sensors at 5 μ L, 10 μ L, 15 μ L, and 20 μ L. The sensors were called S5, S10, S15, and S20, respectively. The bare ZnO nanostructure sensor was called S0.

To produce ammonia sensing systems, the sensor samples were mounted onto a quartz tube. A valve was used to control the constant flow of reference air into the tube at an adjusted flow rate of 1 L/min. The required ammonia level was prepared from aqueous ammonia ($\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$) which was injected into Duran bottle container. Then the air as carrier gas was flowed through the headspace of a bottle chamber to take the individual gas entering into the gas testing system. The individual gas concentration was controlled by valve to attain the required gas level in gas sensing system. Specific ammonia concentrations were adjusted in a range of 1–1000 ppm to record the gas response data at room temperature (27°C) at a relative humidity of 65 % RH. The ammonia sensing response under a relative humidity of 90 % RH was

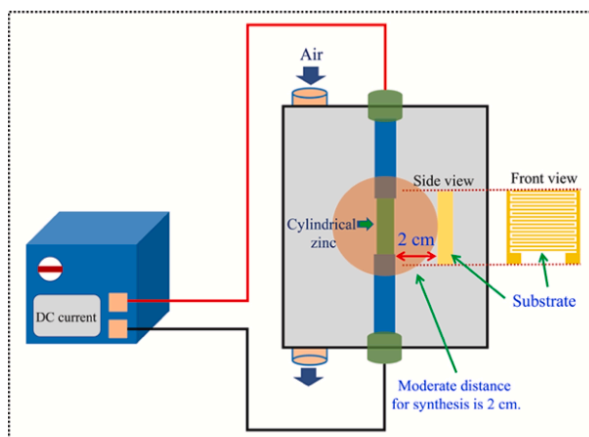


Fig. 1. Schematic diagram of the sensor fabrication heating process.

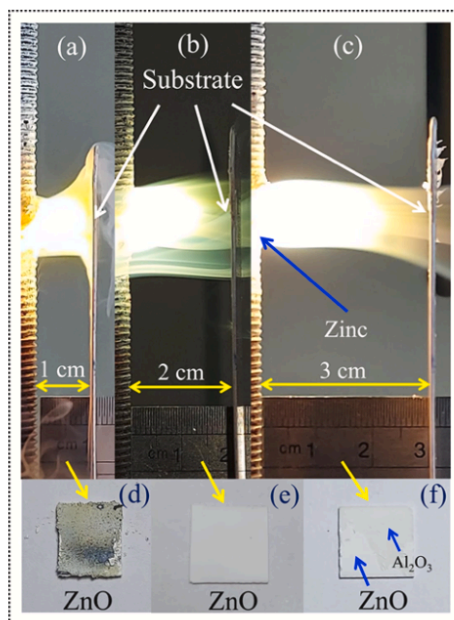


Fig. 2. Photograph of ZnO synthesis via heating process and ZnO products at substrate distance of (a), (d) 1 cm, (b), (e) 2 cm, and (c), (f) 3 cm.

also assessed. To control the relative humidity level, the ultrasonic humidifier was used to continuously generate the saturated water stream that was passed into the testing system by inlet valve. The actual relative humidity level is monitored via hygrometer. To measure the ammonia sensing characteristics, a constant DC electrical voltage of

10 V was applied through the sensors and the electrical current was recorded using a Keithley 6485 picoammeter. The sensor resistance was calculated as the ratio of electrical voltage and current and used to investigate the sensor performance. The sensor response was defined as the ratio of the resistance in an air atmosphere (R_a) to a gas atmosphere (R_g), which was used to improve the sensor response. Increasingly, the sensor impedance characteristics were investigated by LCR meter with frequencies ranging of 150 Hz – 100 kHz under AC input signal. The selectivity of the ammonia sensors to ethanol and acetone was compared.

3. Results and discussion

3.1. Structural, morphological, and compositional characterization

The products prepared on the alumina substrates were white. This confirmed that the metallic zinc transformed into ZnO via an oxidation reaction. Fig. 2 (d)–(f) shows a visually disclosed physical property by putting 3 cases of linear substrate distances (1 cm, 2 cm and 3 cm) from cylindrical zinc. It can be seen that the top view of synthesized sample pictures depicts the evolving surface of ZnO layer. The uniformly synthesized ZnO material on alumina substrate is found from moderate distance of 2 cm as shown in Fig. 2 (e). However, the ZnO product exhibits a surface cracking network along a layer at a small distance of 1 cm as shown in Fig. 2 (d). This is due to the residual stress creation from larger temperature gradients. Consequently, the rapid solidification of ZnO nuclei affects to crack mechanism [41,42]. Finally, the ZnO layer is rarely performed onto the alumina substrate at a large distance of 3 cm due to injection distance limit as visually expressed in Fig. 2 (f). Therefore, in this work the moderate distance from cylindrical zinc source for uniform ZnO synthesis is clearly obtained from 2 cm and it is utilized to further investigate the understanding of room temperature ammonia sensing. The ZnO produced on the alumina substrates was approximately 40 microns thick.

The X-ray diffraction (XRD) patterns shown in Fig. 3 confirmed the formation of crystalline ZnO. XRD at 2θ ranging from 30° – 70° had sharp peaks at the (100), (002), (101), (102), and (110) planes corresponding to lattice constants of $a = b = 0.325$ nm and $c = 0.520$ nm. This demonstrates that the cylindrical zinc transformed into hexagonal wurtzite ZnO via external thermal energy excitation. The Al_2O_3 substrate peaks were also obtained using the diffraction patterns. However, the XRD

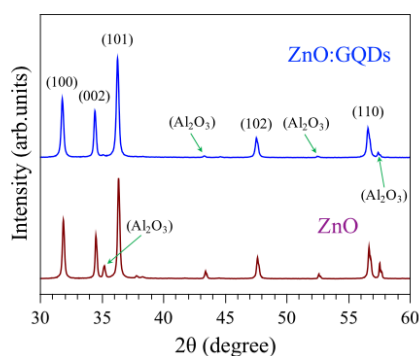


Fig. 3. XRD patterns of the bare ZnO and ZnO:GQDs.

patterns of the ZnO decorated with the GQDs (15 μ L) did not indicate the presence of strong or broad GQD peaks due to the relatively low amount and small size.

Morphological images of the ZnO were depicted via field emission scanning electron microscopy (FE-SEM). FE-SEM micrographs of the bare ZnO and ZnO:GQDs are presented in Fig. 4 (a)–(d). The ZnO exhibited nanotetrapod and spherical ZnO structures. The average diameter of the nanotetrapod ZnO legs was 30 nm and their lengths were several hundred nanometers as displayed in Fig. 4 (a)–(b). The spherical ZnO particles had diameters of 100–500 nm as shown in Fig. 4 (a)–(b). The representative morphologies of the ZnO:GQDs (15 μ L) are illustrated in Fig. 4 (c)–(d). Their morphologies had identical structures.

The chemical compositions of the ZnO:GQD sample with a GQD volume of 15 μ L are shown in Fig. 5 (a), confirming the presence of C, Zn, O, Au, and K. The potassium (K) element was produced by the

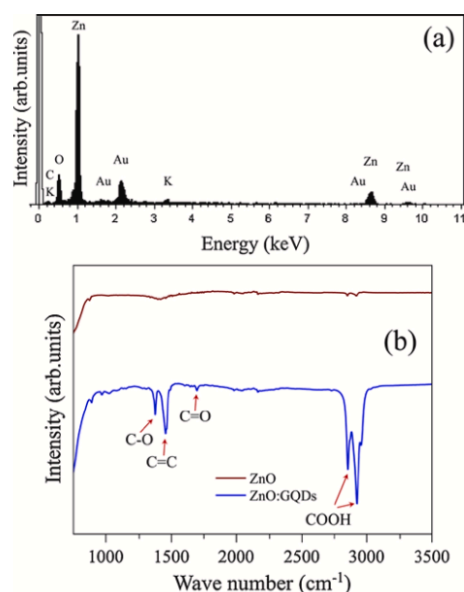


Fig. 5. (a) EDS spectra and (b) FTIR spectra of the bare ZnO and ZnO:GQDs.

electrolyte solution in the GQD synthesis process. The Au peak was due to the ultra-thin sputter coating of gold during FE-SEM. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy was used to evaluate the molecular

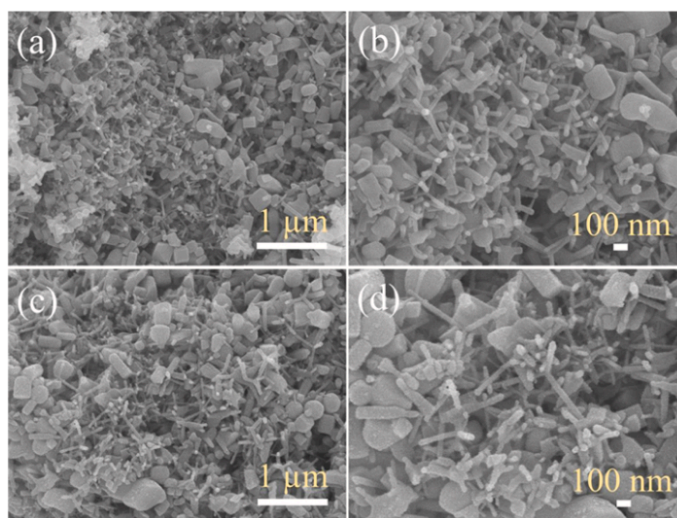


Fig. 4. FE-SEM micrographs of the bare ZnO at magnifications of (a) 25,000 and (b) 50,000, and the ZnO:GQDs (15 μ L) at magnifications of (c) 25,000 and (d) 50,000.

vibration of the lattice structure expressing functional groups in the GQDs. The FTIR spectra of the bare ZnO and ZnO:GQDs is shown in Fig. 5 (b). Interestingly, additional peaks in the ZnO:GQD spectra occurred in a wavelength range of $1000\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$. The peak at approximately 1380 cm^{-1} was due to C—O bonding, which exhibited stretching vibrations [43–45]. The vibrational peak at approximately 1480 cm^{-1} was caused by the strong C=C vibrational mode resulting from the formation of graphite [39,40,43,46,47]. The peak at approximately 1700 cm^{-1} was related to the C=O functional group [37,45,46,48]. The peaks at approximately 2850 cm^{-1} and 2920 cm^{-1} indicated the COOH functional group [48]. The strong peaks in the FTIR results were due to the carboxyl and hydroxyl groups, which exhibited oxygen-containing groups in the ZnO:GQDs [49].

TEM analysis was used to confirm the nanotetrapod and spherical ZnO morphologies as displayed in the TEM bright field image in Fig. 6 (a), which correspond to the FE-SEM micrographs shown in Fig. 4 (a)–(b). In the nanotetrapod ZnO, the Zn tetrahedral core was produced by the nucleation mechanisms of the Zn blend [50–52]. ZnO formed due to the rapid thermal oxidation reaction of Zn tetrahedral seeding heated from thermal plasma during the growth process. The ZnO 3-D structures abruptly formed in the low surface energy direction. The nanotetrapod ZnO grew preferentially along the [0001] direction as demonstrated via the selected area diffraction patterns (SADPs) shown in the inset in Fig. 6 (b). The GQDs were also characterized via TEM analysis as presented in Fig. 6 (c). The GQDs were relatively dispersed without agglomeration. The average particle size distribution was 2.6 nm. The GQDs contributed a volume of $15\text{ }\mu\text{L}$ to the ZnO nanostructures. The GQD particles were

spread uniformly on the ZnO surface as shown in Fig. 6 (d).

High-resolution XPS spectra in the C1s and O1s regions of the ZnO and ZnO:GQDs samples are illustrated in Fig. 7 (a) and (b). The C1s peak of the ZnO:GQD sample fit into four characteristic binding energy peaks as shown in Fig. 7 (a). The strongest peaks at the binding energy of 284.8 eV were due to C=C bonding in the graphite-based GQDs [39,45,46], while the three peaks at the binding energies of 286.1 eV, 287.5 eV, and 288.8 eV were caused by the oxygen incorporated into the C—O (hydroxyl and epoxy carbon), C=O (carbonyl group), and COOH (carboxylic group) functional groups, respectively [39,46]. The COOH functional group was mainly due to the bonding between the oxygen in the ZnO and the O—H stretching of the carbon atoms (C—O—H) at the edge of the GQDs [53]. This result confirms the creation of heterojunctions between the ZnO and GQDs, which generated more oxygen-containing groups [46]. Furthermore, the O1s spectra of ZnO:GQDs sample fit into three peaks at binding energies of 530.1 eV, 531.8 eV, and 532.7 eV, suggesting the occurrence of oxygen species in the Zn—O bonds [54,55] as shown in Fig. 7 (b). The strong peak at approximately 530.1 eV demonstrates the oxygen ion in the crystal lattice. The peak at the binding energy of approximately 531.8 eV in the ZnO:GQDs sample was attributed to the strong O—C bond between the oxygen in the ZnO and the carbon in the GQDs in the ZnO-GQD heterojunction [26,56,57]. The peak at the binding energy of 532.7 eV was caused by the O=C bond. These results demonstrate the electronic interactions due to the heterojunctions between the ZnO and GQDs, which show the adsorbed oxygen species established on their surface [46,54,58].

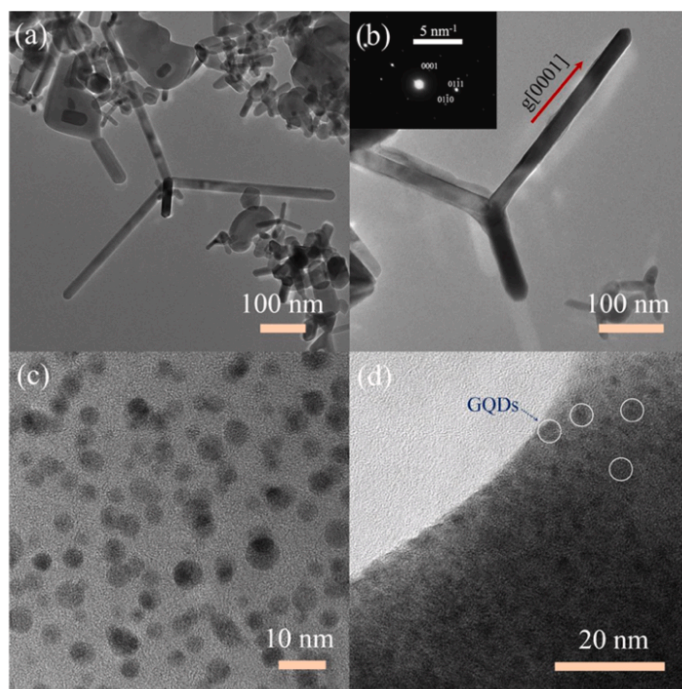


Fig. 6. TEM bright field image of (a) nanotetrapod and spherical ZnO, (b) individual nanotetrapod ZnO growing along the [0001] direction with an inset of the selected area diffraction patterns (SADPs), (c) GQDs, and (d) GQDs spread uniformly on the ZnO surface.

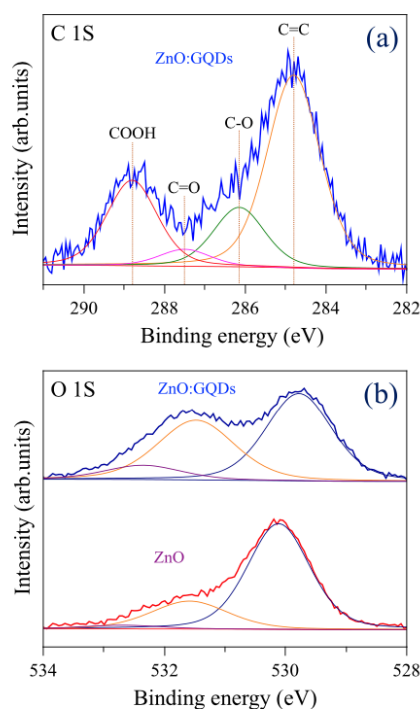


Fig. 7. High-resolution XPS spectra of the (a) C1s peak of the ZnO:GQD heterojunction and (b) high-resolution XPS spectra of the O1s peak of the ZnO and ZnO:GQD heterojunctions.

3.2. Ammonia sensing properties

The dynamic resistance response vs the time dependence of the of bare ZnO S0 sensor and S5, S10, S15, and S20 ZnO:GQD sensors are illustrated in Fig. 8 (a). The characteristic signals were systematically recorded at room temperature in an air atmosphere with a relative humidity of 65 % RH and exposure to an ammonia concentration of 1000 ppm. The sensors' resistances decreased sharply under an ammonia atmosphere. The resistance rapidly increased to nearly the original value after the ammonia vapor was removed from the system. The n-type semiconducting characteristics have potential applications in sensors. The dynamic sensor response vs the time dependence at various ammonia concentrations ranging from 1 to 1000 ppm is shown in Fig. 8 (b). The response of the sensors based on bare ZnO and ZnO:GQDs increased as the ammonia concentration increased. Their response demonstrated an especially attractive repeatability in the presence of ammonia vapor. All of the ZnO:GQDs sensors had better responses than the bare ZnO sensor and the S15 sensor had the maximum sensor response to exposure to 1000 ppm ammonia concentration.

The sensor response vs ammonia concentration of the S0, S5, S10, S15, and S20 sensors is shown in Fig. 9 demonstrating the corresponding response to ammonia concentrations ranging from 1–1000 ppm at room temperature at a relative humidity of 65 % RH. The S5–S20 ZnO:GQD sensors had the best response to various concentrations of ammonia vapor. The bare S0 ZnO sensor had the least response to various

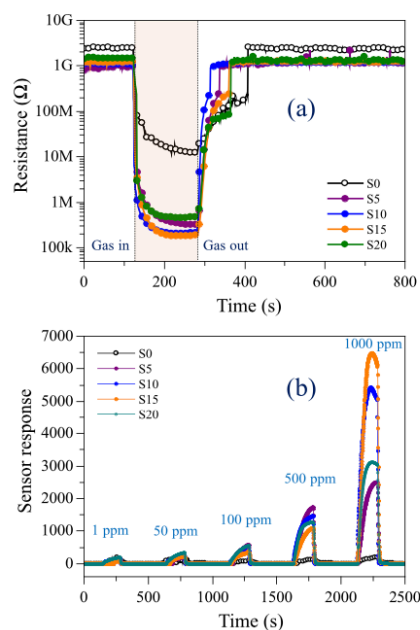


Fig. 8. (a) Resistance response of the bare ZnO and ZnO:GQDs sensors to 1000 ppm of ammonia at room temperature. (b) Dynamic sensor response vs the time dependence to various ammonia concentrations ranging from 1 to 1000 ppm at room temperature.

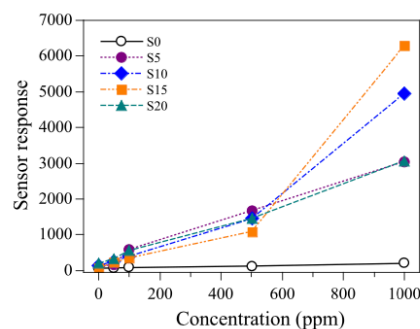


Fig. 9. Response of the S0-S20 sensors to ammonia vapor concentrations ranging from 1-1000 ppm.

concentrations of ammonia vapor.

The effect of humidity on the sensor response to ammonia of the S15 ZnO:GQDs sensor is illustrated in Fig. 10. The resistance response curve of the ZnO:GQDs sensor to a 100 ppm concentration of ammonia at a relative humidity of 90 % RH was lower than at a relative humidity of 65 % RH. The sensor response at a higher relative humidity was better due to the aggressive adsorption between ammonia and water molecules.

Selectivity is a crucial requirement for improving gas sensing

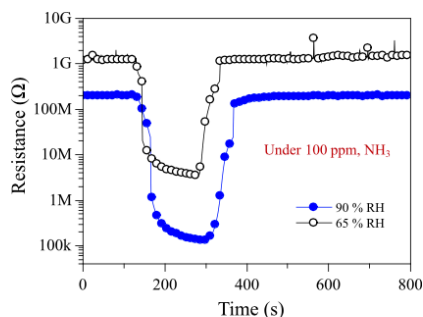


Fig. 10. Resistance response curve of the S15 ZnO:GQDs sensor to exposure to a 100 ppm concentration of ammonia at a relative humidity of 65 % RH and 90 % RH.

performance. The responses of the ZnO and ZnO:GQDs sensors were systematically recorded during exposure to ammonia, ethanol, acetone, and water to determine their selectivity. The best selectivity to ammonia vapor was found in the sensors based on ZnO:GQDs as shown in Fig. 11. The S15 sensor had the best response to a 1000 ppm concentration of ammonia vapor. The sensor response during exposure to ammonia at room temperature was also compared with previously reported sensor results as shown in Table 1. The ZnO:GQDs sensors had the best selectivity during exposure to ammonia vapor at room temperature.

3.3. Ammonia sensing mechanisms

The ammonia sensing properties demonstrated that the relative humidity is related to the sensor response at room temperature. The sensor response toward ambient ammonia increased significantly as the relative humidity increased, especially at a relative humidity higher than 65 %. Gas sensors are not typically used in dry air environments. The effect of relative humidity on ammonia gas sensors used to detect ammonia in human breath must be thoroughly assessed. In this study, the ZnO:GQDs sensors had the best response and selectivity to ammonia vapor at a high relative humidity. Over 65 % RH, water molecules continuously covered the sensor surface. When a strong electrostatic field was constantly applied to the sensors, it dissociated the physisorbed water molecules into hydronium and hydroxide ions. This is expressed by the following chemical reaction [19,59–61] and is shown in Fig. 12 (a) and (b):

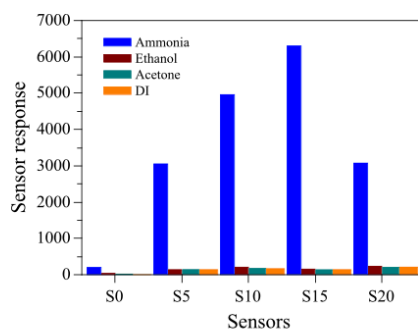


Fig. 11. Selective response of the ZnO and ZnO:GQDs sensors at room temperature.

Table 1

Sensor response during exposure to ammonia at room temperature in the current study compared with previously reported sensor results.

Materials	Relative humidity (% RH)	Concentrations	Sensor response	References
PANI-rGO	90	15	13.7%	[3]
PANI-WO ₃	40	100	121%	[16]
PANI-SnO ₂	40	100	29.8	[18]
GQDs	35–80	400	~44.5 %	[38]
PANI-flower-like WO ₃	25	100	20.1	[17]
Co ₃ O ₄	–	100	9.5	[20]
ZnO:Cu	–	100	~11	[23]
ZnO:Mn	–	100	4.2%	[22]
Al-ZnO:CuO	–	100	131.1	[21]
Meat toluic acid:GO	–	100	12.2%	[4]
ZnO:GQDs	65	1000	6047	This work
		100	760	This work



The electrostatic field broke the strongly attached OH^- ion movement on the surface due to the creation of chemically bonded Zn^{2+} and O-H , which is difficult to prevent [19,60]. The hydronium ions (H_3O^+) had dominant charges and moved freely along the sensor surface. They also dehydrated to create a Grotthuss chain reaction as illustrated in [19, 59]:



The hydronium ions (H_3O^+) then significantly decomposed to form conductive H^+ ions with high diffusion coefficients. These rapidly migrated on the surface as shown by the following chemical reaction [59,62]:



The highly adsorbed water molecule concentration covered the entire sensor surface, exhibiting liquid-like behavior. The H^+ ions freely moved in the hydrogen bonding network in water and jumped from one position to adjacent H^+ ions, which is called proton hopping [50,59,60] as shown in Fig. 12 (a) and (b). This reduced the sensors' resistance in relative humidity. The ZnO structures exhibited various morphologies including spherical nanoparticles and nanotetrapods, which created grain boundaries and structures connected between adjacent wires/particles. However, the proton hopping from the H^+ movement continuously covered the entire sensor surface due to its liquid-like behavior. This causes H^+ to move over barriers of nanotetrapods or grain boundaries of spherical nanoparticles. To further understand the effect of ZnO:GQDs on sensors in relative humidity, GQDs have more oxygen-containing groups due to their carboxyl and hydroxyl groups than bare ZnO sensors. Therefore, strong hydrogen bonds between oxygen-rich GQDs and water molecules is created on their surfaces. This bond is stronger than van der Waals force and holds throughout GQDs, giving ZnO:GQDs a higher density of adsorbed water molecules than pure ZnO sensors as demonstrated in Fig. 12 (b) [49,63]. Consequently, this promotes proton hopping in ZnO:GQDs sensors and their resistance is considerably lower under relative humidity than pure ZnO sensors as shown in Fig. 8 (a). ZnO:GQDs sensors have more carboxylic COOH functional groups as confirmed via FTIR and XPS as shown in Fig. 5 (b) and Fig. 7 (a). These compounds can be slightly ionized in water to form COO^- and H^+ . Also, high H^+ density plays a crucial role in decreasing sensor resistance in humid environments. When ammonia vapor systematically flows into a gas chamber, it reacts spontaneously to H^+ ions to form NH_4^+ ions, decreasing sensor resistance in an ammonia atmosphere as expressed in the following chemical reaction [1,22,27,28,38, 64,65]:

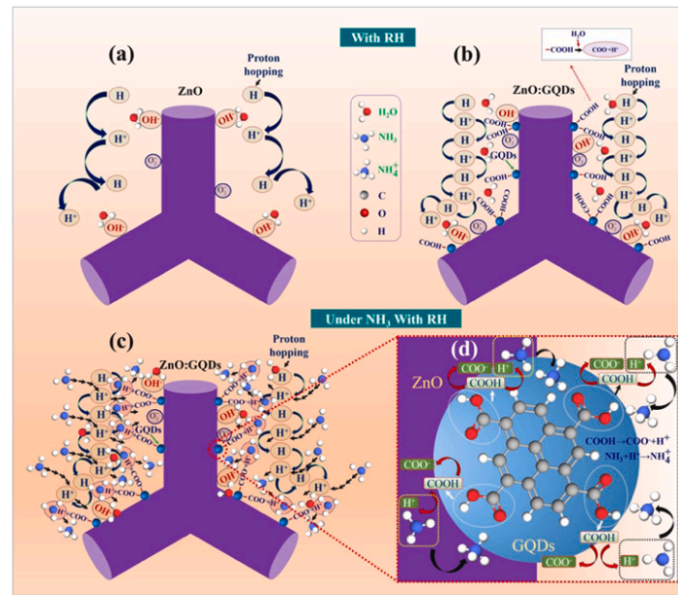


Fig. 12. Schematic diagram of the mechanism under relative humidity of the (a) ZnO and (b) ZnO:GQDs. (c) Schematic diagram of the ZnO:GQDs under NH₃ with a certain relative humidity. (d) Close-up view of the ZnO:GQDs.



Typically, oxygen molecules (O₂) in air react to the conduction electrons of n-type ZnO nanostructures and produce adsorbed O₂ molecular oxygen ions as shown in the following chemical reaction [24–26, 61,66–68]:



The chemical reaction between adsorbed molecular oxygen ions of ZnO-based sensors and ammonia is partially expressed by:



The adsorbed molecular oxygen ions (O₂⁻) are less dense and exhibit

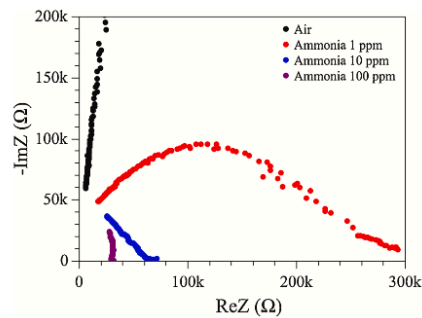


Fig. 13. AC complex impedance spectroscopy (CIS) of ZnO:GQDs.

thermal stability at room temperature. Therefore, the chemical reaction as shown in Eq. (6) demonstrates that it is difficult to remove the O₂⁻ and return the electrons to the sensor surface [26]. Under high relative humidity (RH over 65 %), liquid-like behavior is created throughout the sensor's surface. The number of H⁺ ions dominates the number of O₂⁻ ions due to proton hopping throughout the sensor's surface. The chemical reaction expressed in Eq. (4) generates more NH₄⁺ ions than Eq. (6). This gives sensors a high response and selectivity to ammonia at room temperature.

The ZnO:GQDs' increased sensor response to ammonia vapor at a relative humidity of 65 % RH is clearly explained by the highly active H⁺ ion migration due to proton hopping that produces a high number of H⁺ than pure ZnO sensors. The increased number of H⁺ ions increases the number of NH₄⁺ ions. As a result, more NH₄⁺ ions fully occupy ZnO:GQDs sensors and freely migrate throughout their surfaces under ammonia as illustrated in Fig. 12 (c) and (d) [69]. Moreover, the effect of ammonia concentration flowed into the system is also explained from the change of NH₄⁺ ions concentration. The higher settled ammonia molecules cover through sensor surface and it leads to an increasing of NH₄⁺ ions as written in Eq. (4). A basic property of NH₄⁺ ions is the conductive protons that increase the surface conductivity of sensors [65]. This increases sensor response and lowers sensor resistance in ammonia. This is why the ZnO:GQDs' sensor resistance in ammonia was lower than that of the ZnO sensors as shown in Fig. 8 (a). Additionally, the AC complex impedance spectroscopy (CIS) of ZnO:GQDs under air (with a relative humidity of 65 % RH) and ammonia surrounding is investigated at frequency range of 150 Hz–100 kHz to further confirm the increasing of sensor response toward ammonia at room temperature as indicated in Fig. 13. Under air atmosphere, the CIS show the semi-circle characteristics with large impedance because it is intrinsic polarization interference effect of ZnO:GQDs. Whereas under ammonia atmosphere, the CIS

characteristics clearly decrease closing the straight line with an increasing of ammonia concentrations as known Warburg impedance (Z_w). This is due to high H^+ density from proton hopping which also generates more NH_4^+ ions fully occupy through ZnO:GQDs sensor [70]. These results show the significant potential of ZnO:GQDs sensors for advanced utilization suggesting as a functional layer integrated with silicon-based waveguides for high accurate and selectivity in biosensing application [71].

4. Conclusions

Graphene quantum dots (GQDs) were successfully decorated onto ZnO nanostructure surfaces for heterojunction formation. They play a crucial role in improving ammonia sensors at room temperature. The experimental results showed that the sensor based on ZnO with GQDs of 15 μ L had the optimum sensor response and excellent selectivity during exposure to ammonia. The improved ammonia sensing of the ZnO:GQDs sensors was due the GQDs' carboxyl and hydroxyl groups, which produced more oxygen-containing groups. This gave the sensors a high density of adsorbed water molecules. The adsorbed water molecules were important for the creation of H^+ molecules to capture ammonia molecules in the air under relative humidity, which improved the sensor response. ZnO:GQDs sensors demonstrate a superior response and selectivity for ammonia sensing at room temperature.

Declaration of Competing Interest

The authors report no declarations of interest.

Acknowledgments

This study was fully supported by the Thailand Research Fund with grant number MRG6280132) and partially supported by Unit of Excellence on Sensors Technology Grant No. UoE62006, School of Science, University of Phayao. In addition, this work was partially supported by Chiang Mai University. We thank the SUT-NANOTEC-SLRI joint facility, Synchrotron Light Research Institute, Nakorn Ratchasima, Thailand, for the XPS facility.

References

- X. Li, X. Li, Z. Li, J. Wang, J. Zhang, WS₂ nanoflakes based selective ammonia sensors at room temperature, *Sens. Actuator B Chem.* 240 (2017) 273–277.
- G.N. Dar, A. Umar, S.A. Zaidi, S. Baskoutas, S.W. Hwang, M. Abaker, A. Al-Hajry, S. A. Al-Sayari, Ultra-high sensitive ammonia chemical sensor based on ZnO nanopencils, *Talanta* 89 (2012) 155–161.
- C.-T. Lee, Y.-S. Wang, High-performance room temperature NH₃ gas sensors based on polyaniline-reduced graphene oxide nanocomposite sensitive membrane, *J. Alloys. Compd.* 789 (2019) 693–696.
- R. Kumar, A. Kumar, R. Singh, R. Kashyap, R. Kumar, D. Kumar, S.K. Sharma, M. Kumar, Room temperature ammonia gas sensor using Meta Toluic acid functionalized graphene oxide, *Mater. Chem. Phys.* 240 (2020), 121922.
- D. Lv, W. Chen, W. Shen, M. Peng, X. Zhang, R. Wang, L. Xu, W. Xu, W. Song, R. Tan, Enhanced flexible room temperature ammonia sensor based on PEDOT: PSS thin film with FeCl₃ additives prepared by inkjet printing, *Sens. Actuator B Chem.* 298 (2019), 126890.
- D. Ponnusamy, S. Madanagurusamy, Nanostructured ZnO films for room temperature Ammonia Sensing, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.* 43 (2014) 3211–3216.
- N.T. Brannelly, J.P. Hamilton-Shield, A.J. Killard, The measurement of Ammonia in human breath and its potential in clinical diagnostics, *Crit. Rev. Anal. Chem.* 46 (2016) 490–501.
- M. Gafare, J.O. Dennis, M.H.M. Khir, Detection of ammonia in exhaled breath for clinical diagnosis—a review, *AIP Conference Proceedings* 1621 (2014) 303–309.
- K. Mistewicz, M. Nowak, D. Stróż, A. Guiseppe-Elie, Ferroelectric SbSI nanowires for ammonia detection at a low temperature, *Talanta* 189 (2018) 225–232.
- M. Righettoni, A. Amann, S.E. Pratsinis, Breath analysis by nanostructured metal oxides as chemo-resistive gas sensors, *Mater. Today* 18 (2015) 163–171.
- G. Eranna, B.C. Joshi, D.P. Runthala, R.P. Gupta, Oxide materials for development of integrated gas sensors—a comprehensive review, *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.* 29 (2004) 111–188.
- G. Korotcenkov, Gas response control through structural and chemical modification of metal oxide films: state of the art and approaches, *Sens. Actuator B Chem.* 107 (2005) 209–232.
- K. Xu, Integrated silicon directly modulated light source using p-well in standard CMOS technology, *IEEE Sens. J.* 16 (2016) 6184–6191.
- S. Hwang, H. Kwon, S. Chahjed, J.W. Byon, J.M. Baik, J. Im, S.H. Oh, H.W. Jang, S. J. Yoon, J.K. Kim, A near single crystalline TiO₂ nanohelix array: enhanced gas sensing performance and its application as a monolithically integrated electronic nose, *Analyst* 138 (2013) 443–450.
- S.Y. Park, Y. Kim, T. Kim, T.H. Eom, S.Y. Kim, H.W. Jang, Chemoresistive materials for electronic nose: progress, perspectives, and challenges, *InfoMat* 1 (2019) 289–316.
- S.B. Kulkarni, Y.H. Navale, S.T. Navale, F.J. Stadler, N.S. Ramgir, V.B. Patil, Hybrid polyaniline-WO₃ flexible sensor: a room temperature competence towards NH₃ gas, *Sens. Actuator B Chem.* 288 (2019) 279–288.
- S. Li, P. Lin, L. Zhao, C. Wang, D. Liu, F. Liu, P. Sun, X. Liang, F. Liu, X. Yan, Y. Gao, G. Lu, The room temperature gas sensor based on Polyaniline@flower-like WO₃ nanocomposites and flexible PET substrate for NH₃ detection, *Sens. Actuator B Chem.* 259 (2018) 505–513.
- S. Li, A. Liu, Z. Yang, J. He, J. Wang, F. Liu, H. Lu, X. Yan, P. Sun, X. Liang, Y. Gao, G. Lu, Room temperature gas sensor based on tin dioxide@ polyaniline nanocomposite assembled on flexible substrate: ppb-level detection of NH₃, *Sens. Actuator B Chem.* 299 (2019), 126970.
- Y. Zhao, B. Yang, J. Liu, Effect of interdigital electrode gap on the performance of SnO₂-modified MoS₂ capacitive humidity sensor, *Sens. Actuator B Chem.* 271 (2018) 256–263.
- Z. Li, Z. Lin, N. Wang, J. Wang, W. Liu, K. Sun, Y.Q. Fu, Z. Wang, High precision NH₃ sensing using network nano-sheet Co₃O₄ arrays based sensor at room temperature, *Sens. Actuator B Chem.* 235 (2016) 222–231.
- M. Poloju, N. Jayababu, M.V. Ramana Reddy, Improved gas sensing performance of Al doped ZnO/CuO nanocomposite based ammonia gas sensor, *Mat. Sci. Eng. B – Solid* 227 (2018) 61–67.
- R. Sankar Ganesh, E. Durgadevi, M. Navaneethan, V.L. Patil, S. Ponnusamy, C. Muthamizhchelvan, S. Kawasaki, P.S. Patil, Y. Hayakawa, Low temperature ammonia gas sensor based on Mn-doped ZnO nanoparticle decorated microspheres, *J. Alloys. Compd.* 721 (2017) 182–190.
- N.A.A. A. R.K. Kampara, R. P.K. J. B.G. Gold functionalized ZnO nanowires as a fast response/recovery ammonia sensor, *Appl. Surf. Sci.* 449 (2018) 244–249.
- E. Wongrat, P. Ponhan, S. Chooipun, Room temperature ethanol sensing properties of FET sensors based on ZnO nanostructures, *Ceram. Int.* 43 (2017) S520–S524.
- E. Wongrat, N. Chanlek, C. Chueaiarom, W. Thupthimchun, B. Samransuksamer, S. Chooipun, Acetone gas sensors based on ZnO nanostructures decorated with Pt and Nb, *Ceram. Int.* 43 (2017) S557–S566.
- E. Wongrat, N. Chanlek, C. Chueaiarom, B. Samransuksamer, N. Hongsih, S. Chooipun, Low temperature ethanol response enhancement of ZnO nanostructures sensor decorated with gold nanoparticles exposed to UV illumination, *Sens. Actuators A Phys.* 251 (2016) 188–197.
- N. Jayababu, M. Poloju, J. Shruthi, M.V.R. Reddy, Synthesis of ZnO/NiO nanocomposites for the rapid detection of ammonia at room temperature, *Mater. Sci. Semicond. Process.* 102 (2019), 104591.
- S.G. R. N. M. V.L. Patil, P. S. M. C. S. Kawasaki, P.S. Patil, Y. Hayakawa, Sensitivity enhancement of ammonia gas sensor based on Ag/ZnO flower and nanoellipsoids at low temperature, *Sens. Actuator B Chem.* 255 (2018) 672–683.
- M. Asad, M.H. Sheikh, M. Pourfath, M. Moradi, High sensitive and selective flexible H₂S gas sensors based on Cu nanoparticle decorated SWCNTs, *Sens. Actuator B Chem.* 210 (2015) 1–8.
- A. Singh, J. Jayaram, M. Madou, S. Akbar, Pyrolysis of negative photoresists to fabricate carbon structures for microelectromechanical systems and electrochemical applications, *J. Electrochem. Soc.* 149 (2002) E78–E83.
- X. Huang, N. Hu, L. Zhang, L. Wei, H. Wei, Y. Zhang, The NH₃ sensing properties of gas sensors based on aniline reduced graphene oxide, *Synth. Met.* 185–186 (2013) 25–30.
- Q.T. Tran, H.T.M. Hoa, D.-H. Yoo, T.V. Cuong, S.H. Hur, J.S. Chung, E.J. Kim, P. A. Kohl, Reduced graphene oxide as an over-coating layer on silver nanostructures for detecting NH₃ gas at room temperature, *Sens. Actuator B Chem.* 194 (2014) 45–50.
- J.-W. Han, B. Kim, J. Li, M. Meyyappan, A carbon nanotube based ammonia sensor on cellulose paper, *RSC Adv.* 4 (2014) 549–553.
- L.R. Shobin, S. Manivannan, Optically transparent, electrically conducting single walled carbon nanotubes random networks for room temperature ammonia vapor sensing, *Mater. Sci. Semicond. Process.* 40 (2015) 931–938.
- T. Hu, X. Chu, F. Gao, Y. Dong, W. Sun, L. Bai, Trimethylamine sensing properties of graphene quantum Dots/ α -Fe₂O₃ composites, *J. Solid State Chem.* 237 (2016) 284–291.
- A. Margineanu, Chapter 14 - biological applications of nanoparticles in optical microscopy, in: C. Vasile (Ed.), *Polymeric Nanomaterials in Nanotherapeutics*, Elsevier, 2019, pp. 469–495.
- B. Hatamiyui, Z. Es'haghi, Electrochemical biosensing platform based on molecularly imprinted polymer reinforced by ZnO-graphene capped quantum dots for 6-mercaptopurine detection, *Electrochim. Acta* 283 (2018) 1170–1177.
- W. Chen, F. Li, P.C. Ooi, Y. Ye, T.W. Kim, T. Guo, Room temperature pH-dependent ammonia gas sensors using graphene quantum dots, *Sens. Actuator B Chem.* 222 (2016) 763–768.
- S. Min, J. Hou, Y. Lei, X. Ma, G. Lu, Facile one-step hydrothermal synthesis toward strongly coupled TiO₂/graphene quantum dots photocatalysts for efficient hydrogen evolution, *Appl. Surf. Sci.* 396 (2017) 1375–1382.

E. Wongrat et al.

[http://refhub.elsevier.com/S0925-4005\(20\)31330-7/sbref0205](http://refhub.elsevier.com/S0925-4005(20)31330-7/sbref0205)

- and graphene ZnO₂ Sens.
- [41] C. Batista, A. Portinha, R.M. Ribeiro, V. Teixeira, M.F. Costa, C.R. Oliveira, Surface laser-glazing of plasma-sprayed thermal barrier coatings, *Appl. Surf. Sci.* 247 (2005) 313–319.
 - [42] J. Qiu, W. Yu, X. Gao, X. Li, Sol-gel assisted ZnO nanorod array template to synthesize TiO₂ nanotube arrays, *Nanotechnology* 17 (2006) 4695–4698.
 - [43] K. Rahimi, A. Yazdani, M. Ahmadi, Facile preparation of zinc oxide nanorods surrounded by graphene quantum dots both synthesized via separate pyrolysis procedures for photocatalyst application, *Mater. Res. Bull.* 98 (2018) 148–154.
 - [44] K. Rahimi, A. Yazdani, Ethanol-sensitive nearly aligned ZnO nanorod thin films covered by graphene quantum dots, *Mater. Lett.* 228 (2018) 65–67.
 - [45] X. Chu, P. Dai, S. Liang, A. Bhattacharya, Y. Dong, M. Epifani, The acetone sensing properties of ZnFe₂O₄-graphene quantum dots (GQDs) nanocomposites at room temperature, *Physica E* 106 (2019) 326–333.
 - [46] S. Kumar, A. Dhiman, P. Sudhagar, V. Krishnan, ZnO-graphene quantum dots heterojunctions for natural sunlight-driven photocatalytic environmental remediation, *Appl. Surf. Sci.* 447 (2018) 802–815.
 - [47] G. Xu, L. Zhao, C.T. Yang, Derivation and verification of minimum energy dissipation rate principle of fluid based on minimum entropy production rate principle, *Int. J. Sediment Res.* 31 (2016) 16–24.
 - [48] G. Zamiri, S. Bagheri, Fabrication of green dye-sensitized solar cell based on ZnO nanoparticles as a photoanode and graphene quantum dots as a photo-sensitizer, *J. Colloid Interface Sci.* 511 (2018) 318–324.
 - [49] X. Zhang, H. Ming, R. Liu, X. Han, Z. Kang, Y. Liu, Y. Zhang, Highly sensitive humidity sensing properties of carbon quantum dots films, *Mater. Res. Bull.* 48 (2013) 790–794.
 - [50] W.D. Yu, X.M. Li, X.D. Gao, Homogeneous-catalytic synthesis of tetrapodlike ZnO nanocrystals and their photoluminescence properties, *Chem. Phys. Lett.* 390 (2004) 296–300.
 - [51] M.C. Newton, P.A. Warburton, ZnO tetrapod nanocrystals, *Mater. Today* 10 (2007) 50–54.
 - [52] C. Ronning, N.G. Shang, I. Gerhards, H. Hofäss, M. Seibt, Nucleation mechanism of the seed of tetrapod ZnO nanostructures, *J. Appl. Phys.* 98 (2005), 034307.
 - [53] M. Zubair, M. Mustafa, A. Ali, Y.H. Doh, K.H. Choi, Improvement of solution based conjugate polymer organic light emitting diode by ZnO-graphene quantum dots, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 26 (2015) 3344–3351.
 - [54] B. Li, X. Yu, X. Yu, R. Du, L. Liu, Y. Zhang, Graphene quantum dots decorated ZnO-ZnFe₂O₄ nanocages and their visible light photocatalytic activity, *Appl. Surf. Sci.* 478 (2019) 991–997.
 - [55] D. Zhang, Z. Wu, X. Zong, Metal-organic frameworks-derived zinc oxide nanopolyhedra/S, N: graphene quantum dots/polyaniline ternary nanohybrid for high-performance acetone sensing, *Sens. Actuator B Chem.* 288 (2019) 232–242.
 - [56] J. Zhang, X. Liu, S. Wu, B. Cao, S. Zheng, One-pot synthesis of Au-supported ZnO nanoplates with enhanced gas sensor performance, *Sens. Actuator B Chem.* 169 (2012) 61–66.
 - [57] D.V. Ponnuruvelu, B. Pullithadathil, A.K. Prasad, S. Dhara, A. Ashok, K. Mohamed, A. K. Tyagi, B. Raj, Rapid synthesis and characterization of hybrid ZnO@Au core-shell nanorods for high performance, low temperature NO₂ gas sensor applications, *Appl. Surf. Sci.* 355 (2015) 726–735.
 - [58] S. Kumar, N.L. Reddy, H.S. Kushwaha, A. Kumar, M.V. Shankar, K. Bhattacharyya, A. Halder, V. Krishnan, Efficient electron transfer across a ZnO-MoS₂-Reduced graphene oxide heterojunction for enhanced sunlight-driven photocatalytic hydrogen evolution, *ChemSusChem* 10 (2017) 3588–3603.
 - [59] K. Sahoo, B. Mohanty, A. Biswas, J. Nayak, Role of hexamethylenetetramine in ZnO-cellulose nanocomposite enabled UV and humidity sensor, *Mater. Sci. Semicond. Process.* 105 (2020), 104699.
 - [60] P. Chaudhary, D.K. Maurya, S. Sikarwar, B.C. Yadav, G.I. Dzhardimalieva, R. Prakash, Development of nanostructured nickel reinforced polyacrylamide via frontal polymerization for a reliable room temperature humidity sensor, *Eur. Polym. J.* 112 (2019) 161–169.
 - [61] C. Lai, X. Wang, Y. Zhao, H. Fong, Z. Zhu, Effects of humidity on the ultraviolet nanosensors of aligned electrospun ZnO nanofibers, *RSC Adv.* 3 (2013) 6640–6645.

Sensors and Actuators: B. Chemical 326 (2021) 128983

- [62] S.P. Gupta, A.S. Pawbake, B.R. Sathe, D.J. Late, P.S. Walke, Superior humidity sensor and photodetector of mesoporous ZnO nanosheets at room temperature, *Sens. Actuator B Chem.* 293 (2019) 83–92.
- [63] L. Guo, H.-B. Jiang, R.-Q. Shao, Y.-L. Zhang, S.-Y. Xie, J.-N. Wang, X.-B. Li, F. Jiang, Q.-D. Chen, T. Zhang, H.-B. Sun, Two-beam-laser interference mediated reduction, patterning and nanostructuring of graphene oxide for the production of a flexible humidity sensing device, *Carbon* 50 (2012) 1667–1673.
- [64] P. Srinivasan, J.B.B. Rayappan, Growth of Eshelby twisted ZnO nanowires through nanoflakes & nanoflowers: a room temperature ammonia sensor, *Sens. Actuator B Chem.* 277 (2018) 129–143.
- [65] S.-Y. Wang, J.-Y. Ma, Z.-J. Li, H.Q. Su, N.R. Alkurd, W.-L. Zhou, L. Wang, B. Du, Y.-L. Tang, D.-Y. Ao, S.-C. Zhang, Q.K. Yu, X.-T. Zu, Surface acoustic wave ammonia sensor based on ZnO/SiO₂ composite film, *J. Hazard. Mater.* 285 (2015) 368–374.
- [66] E. Wongrat, N. Hongsith, D. Wongrataphisan, A. Gardchareon, S. Choopun, Control of depletion layer width via amount of AuNPs for sensor response enhancement in ZnO nanostructure sensor, *Sens. Actuator B Chem.* 171–172 (2012) 230–237.
- [67] N. Hongsith, E. Wongrat, T. Kerdchareon, S. Choopun, Sensor response formula for sensor based on ZnO nanostructures, *Sens. Actuator B Chem.* 144 (2010) 67–72.
- [68] C.-L. Hsu, L.L. Su, T.-J. Hsueh, Tunable Schottky contact humidity sensor based on S-doped ZnO nanowires on flexible PET substrate with piezotronic effect, *J. Alloys. Compd.* 705 (2017) 722–733.
- [69] S. Fairoze, S. Ernest, Nanostructured ZnO sensor fabricated by successive ionic layer adsorption and reaction method for ammonia sensing application, *Physica B* 557 (2019) 63–73.
- [70] B. Li, Q. Tian, H.X. Su, X.W. Wang, T.N. Wang, D.Z. Zhang, High sensitivity portable capacitive humidity sensor based on In₂O₃ nanocubes-decorated GO nanosheets and its wearable application in respiration detection, *Sens. Actuator B Chem.* 299 (2019), 126973.
- [71] K. Xu, Y. Chen, T.A. Okhai, L.W. Snyman, Micro optical sensors based on avalanche silicon light-emitting devices monolithically integrated on chips, *Opt. Mater. Express* 9 (2019) 3985–3997.

Ekasiddh Wongrat received a PhD in physics from Chiang Mai University in 2012. He is a lecturer at the School of Science, University of Phayao, Phayao, Thailand. His research interests include metal-oxide semiconductor applications such as gas sensors, solar cells, and nanomaterial fabrication.

Thiranuch Nuengnit is currently pursuing a bachelor's degree in physics at the School of Science, University of Phayao. Her research interests include chemiresistive gas sensors, conductive polymer synthesis, and OFET-based gas sensors.

Rangsarn Panyathip is currently a PhD candidate in materials science at Chiang Mai University. He received an MS degree in material sciences in 2016 from Chiang Mai University. His research interests include graphene quantum dot synthesis and their applications in gas sensing and optical devices.

Narong Chanlek received a PhD in physics from the University of Manchester, UK, in 2012. He is currently a beamline scientist at the Synchrotron Light Research Institute, Thailand. His research interests include material characterizations and applications of synchrotron radiation.

Niyom Hongsith received a BSc in physics in 2003 and an MSc in applied physics in 2006 from Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand. He received a PhD in physics from Chiang Mai University in 2009. His current research interests are in the field of metal-oxide semi-conductor nanostructures including the synthesis, fabrication, and application of ZnO nanostructures for gas sensors and dye-sensitized solar cells.

Supab Choopun received a PhD in chemical physics from the University of Maryland, College Park, in 2002. He is an assistant professor at the Department of Physics, Faculty of Science, Chiang Mai University, Thailand. His research interests are in the field of metal-oxide semiconductor nanostructures such as ZnO for gas sensors and dye-sensitized solar cell applications.