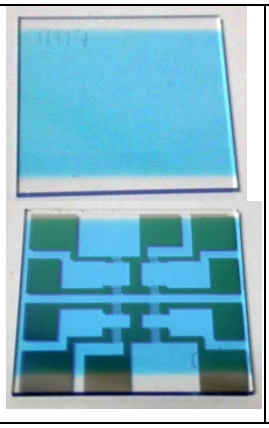
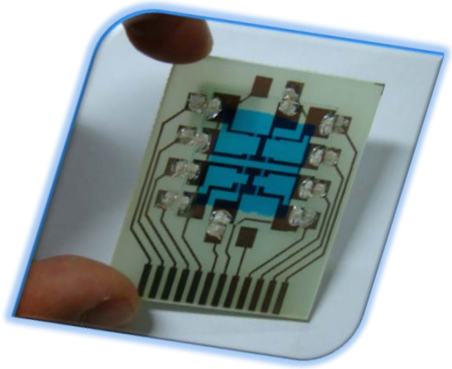
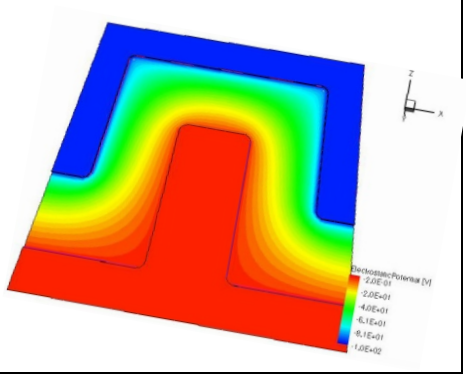
ทรานซิสเตอร์ฟิลด์เอฟเฟคสารอินทรีย์ (Organic Field Effect Transistor)

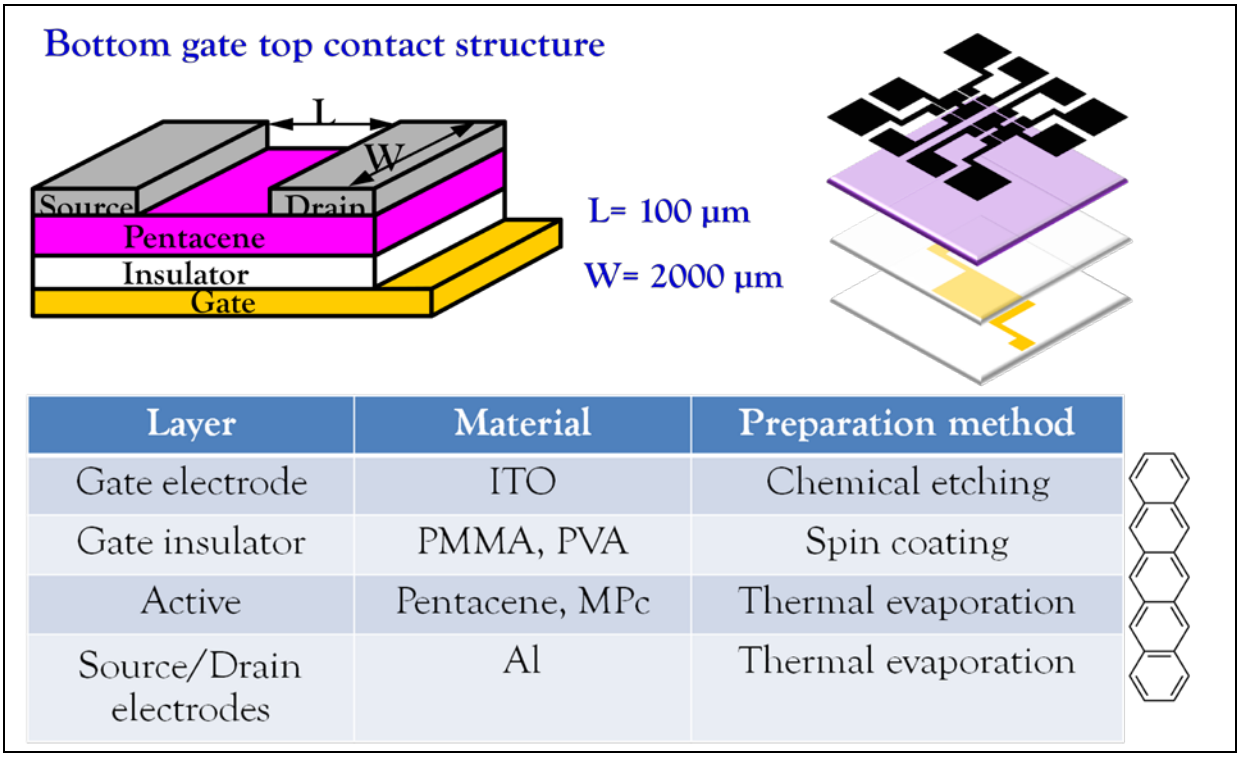
OFET เป็นสิ่งประดิษฐ์จากสารอินทรีย์ที่มีความซับซ้อนมากกว่าสิ่งประดิษฐ์จากสารอินทรีย์ชนิดอื่นๆ เช่น อุปกรณ์เปล่งแสงอินทรีย์ (OLED) เซลแสงอาทิตย์อินทรีย์ เนื่องจาก OFET จะประกอบด้วยขั้วต่อไฟฟ้าถึงสามขั้ว โดยอุปกรณ์อินทรีย์ทั่วไป จะมีขั้วไฟฟ้าเพียงสองขั้ว โครงสร้างนี้ประกอบด้วยชั้นสารที่มีสมบัติต่างกันสองชนิด คือ ชั้นหนึ่งจะมีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ และอีกชั้นหนึ่งจะเป็นชั้นชนวนไฟฟ้าที่มีไว้สำหรับควบคุมความเข้มของสนามไฟฟ้า

OFET สามารถมีโครงสร้างได้หลายแบบ ตามลำดับการประดิษฐ์ทรานซิสเตอร์เป็นโครงสร้างต่างๆ ได้แก่

1. Top gate top contact เป็นโครงสร้างทรานซิสเตอร์ที่มีชั้นสารกึ่งตัวนำอยู่ด้านล่างและมีชั้นฉนวนอยู่ด้านบน ขั้วเกทและขั้วซอร์ทและเดรนจะอยู่ทางด้านบนทั้งหมด
2. Top gate bottom contact เป็นโครงสร้างที่ชั้นสารกึ่งตัวนำติดกับขั้วซอร์ทและเดรนที่อยู่ด้านล่างและต่อเชื่อมกับชั้นฉนวนด้านบนและมีขั้วเกทต่ออยู่ด้านบน

3. Bottom gate top contact เป็นโครงสร้างที่มีขั้วเกทต่อกับชั้นฉนวนด้านล่างของชั้นสารกึ่งตัวนำ โดยจะมีขั้วซอร์ทและเดรนต่ออยู่ด้านบน
4. Bottom gate bottom contact เป็นโครงสร้างที่มีขั้วเกทต่อกับชั้นฉนวนด้านล่างของชั้นสารกึ่งตัวนำ โดยมีขั้วเกท ซอร์ท และเดรนต่ออยู่ด้านล่าง

กลุ่มวิจัยมีจุดมุ่งหมายที่จะพัฒนา OFET ให้เป็นทรานซิสเตอร์ที่สามารถนำไปใช้ตรวจวัดแก๊สดังนั้นโครงสร้าง OFET ที่เหมาะสมในการพัฒนาจึงเป็นแบบที่สาม ทั้งนี้เพื่อให้สารกึ่งตัวนำอินทรีย์สามารถสัมผัสกับแก๊สได้โดยตรง ซึ่งจำทำให้ OFET มีสมบัติทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเมื่อเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารอินทรีย์กับโมเลกุลแก๊ส

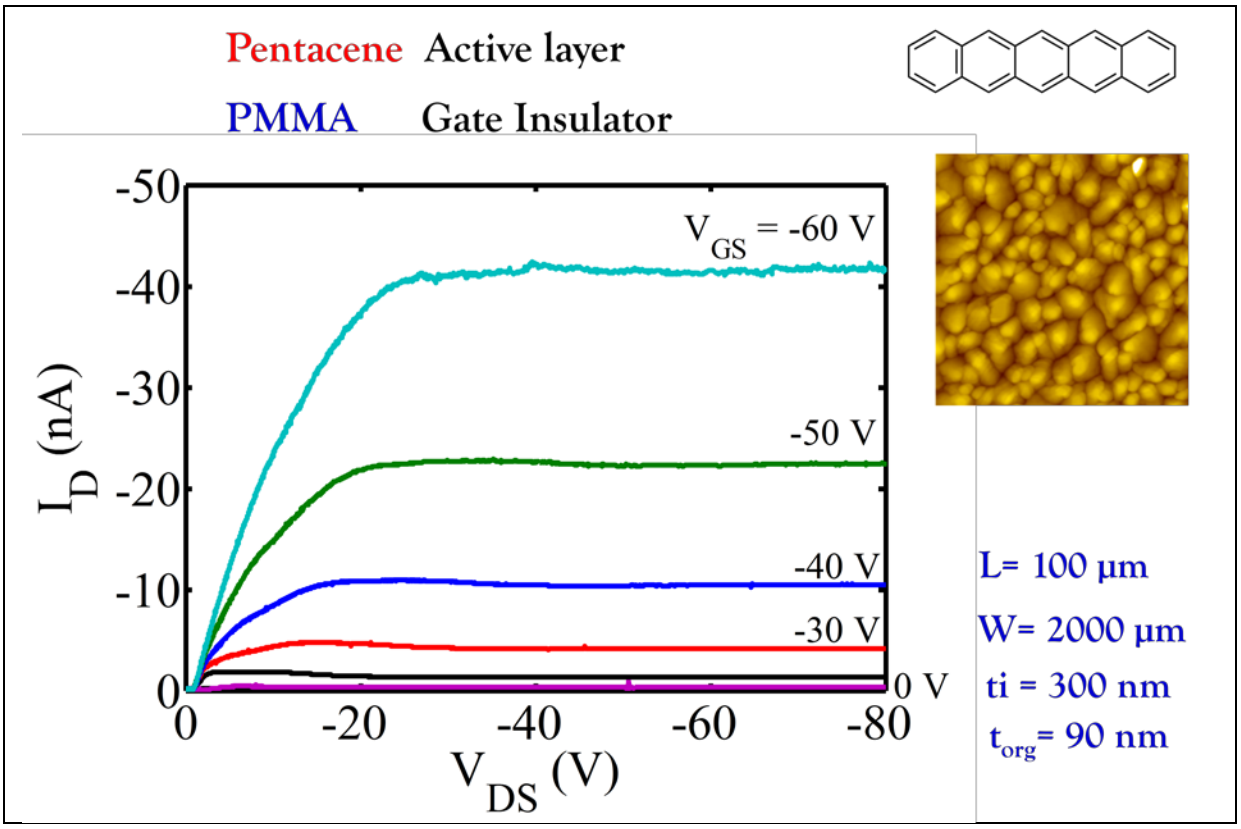


Layer	Material	Preparation method
Gate electrode	ITO	Chemical etching
Gate insulator	PMMA, PVA	Spin coating
Active	Pentacene, MPc	Thermal evaporation
Source/Drain electrodes	Al	Thermal evaporation

นอกจากนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจวัดแก๊สจึงได้มีการออกแบบลักษณะขั้วซอร์ทและเดรนให้มีแพทเทร์นอินเตอร์ดิจิเตทคือเป็นลักษณะฟันปลาสลับกัน โดยมีระยะทางระหว่างขั้ว 100 ไมโครเมตร และเพิ่มจำนวนขั้วที่ซ้อนกันที่จำนวนขั้วต่างๆเพื่อศึกษาที่ผลกระทบต่อลักษณะของขั้วนี้ด้วย

โครงสร้าง OFET ได้ถูกสร้างบนแผ่นกระจกที่เคลือบด้วย อินเดียมทินออกไซด์ (ITO) มีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีและซึ่งจะใช้เป็นขั้วเกท จากนั้นจะทำการเคลือบชั้นฉนวนซึ่งทำมาจากการปั่นเคลือบพอลิเมอร์ชนิด PMMA หรือ PVA ด้านบนของชั้นฉนวนนี้จะได้มีการปลูกชั้นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

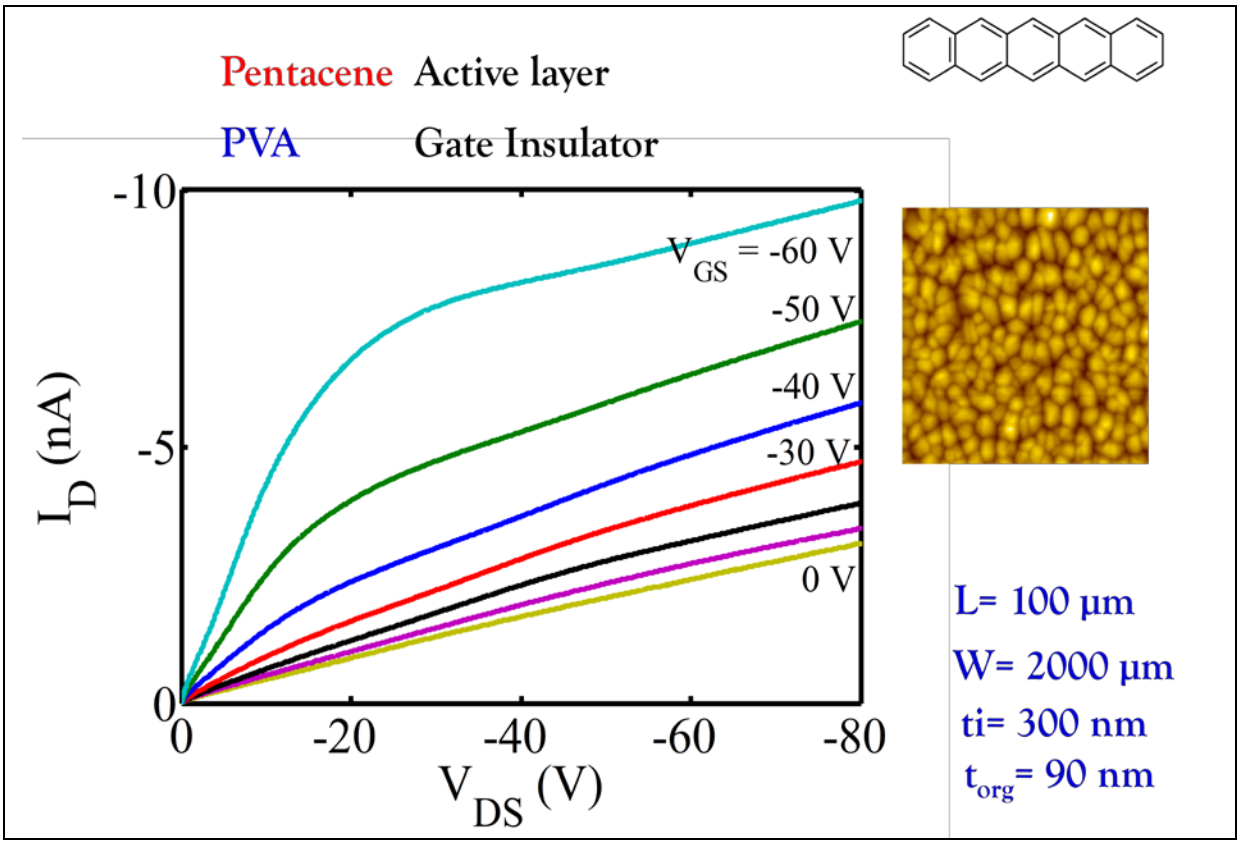
อินทรีย์ เช่น แพททาซินหรือโลหะแพททาโลไซยาไนน์ด้วยการระเหยสารในสุญญากาศต่อจากนั้นจึงทำการระเหยชั้นอลูมิเนียมเป็นแพทเทิร์นอินเตอร์ดิจิเตทเพื่อใช้เป็นขั้วซอร์ทและเดรนต่อไป



ในโครงสร้าง OFETที่สร้างขึ้นระยะห่างระหว่างขั้วอินเตอร์ดิจิเตทของขั้วซอร์ทและเดรนจะเป็นความยาวเชนเนล L ของโครงสร้าง OFET จึงมีค่าประมาณ 100 ไมโครเมตร ความยาวของแต่ละขั้วอินเตอร์ดิจิเตทคูณกับขั้วบวกอินเตอร์ดิจิเตทจะเป็นความกว้างของเชนเนลซึ่งมีค่าในช่วงประมาณ 2000 ไมโครเมตร ในขณะที่ความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำ (TORS) ได้ถูกควบคุมระหว่างการระเหยสารในสุญญากาศด้วยตัวตรวจวัดด้วยการสั่นของผลิตควอทซ์ มีค่าประมาณ 90 นาโนเมตร ส่วนความหนาของชั้นฉนวน (TI) ซึ่งเป็นค่าที่กำหนดความแรงของสนามไฟฟ้ามีค่าประมาณ 300 นาโนเมตร

เมื่อให้แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วเดรนและซอร์ทจะมีกระแสไหลจำนวนน้อยมาก แต่เมื่อให้แรงดันลบระหว่างขั้วเกทและซอร์ทด้วยจะทำให้มีกระแสเดรนไหลจำนวนมากขึ้น โดยค่ากระแสเดรนที่อิ่มตัวนี้จะแปรผันกับขนาดของแรงดันเกทที่ให้โดยกระแสเดรนอิ่มตัวจะเพิ่มเป็น 3,10,22 และ 42 นาโนแอมม์ เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ที่ขั้วเกทเป็น 30 , 40 , 50 และ 60 โวลท์ตามลำดับ

กระแสเดรนจะเพิ่มขึ้นประมาณเชิงเส้นเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ซอร์ทเดรนจนกระทั่งถึง 20 V จากนั้นกระแสเดรนจะอิ่มตัวและจะมีค่าคงที่ตลอดการเพิ่มค่าของความต่างศักย์เดรนซอร์ทไปจนถึง 80 V ดังแสดงในรูป

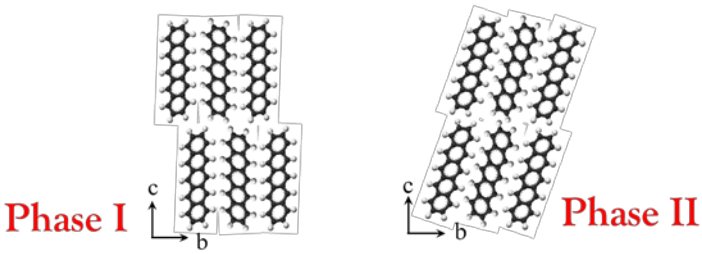


จากการศึกษาพบว่าในการใช้ชั้น PVA เป็นชั้นฉนวนแทนชั้น PMMA กราฟคุณลักษณะเฉพาะของกระแสแรงดันจะมีการเอียงเนื่องจากมีกระแสที่รั่วมาจากขั้วเกท ทั้งนี้อาจเกิดจากการที่ชั้น PVA แสดงสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าได้ไม่ดีเท่ากับ PMMA ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระแสในช่วงอิ่มตัวของโครงสร้าง OFET ที่ประกอบด้วยชั้น PVA เป็นชั้นฉนวนจะมีกระแสเดรนเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง และมีค่ากระแสประมาณ 3 นาโนแอมแปร์ที่ความต่างศักย์ซอร์ทเดรน 80 V ถึงแม้จะไม่มีการให้ความต่างศักย์ที่เกท (V_{GS} = 0) ความสัมพันธ์เชิงเส้นนี้ประมาณได้เสมือนมีกระแสไหลผ่านความต้านทาน 27 จิกกะโอห์ม

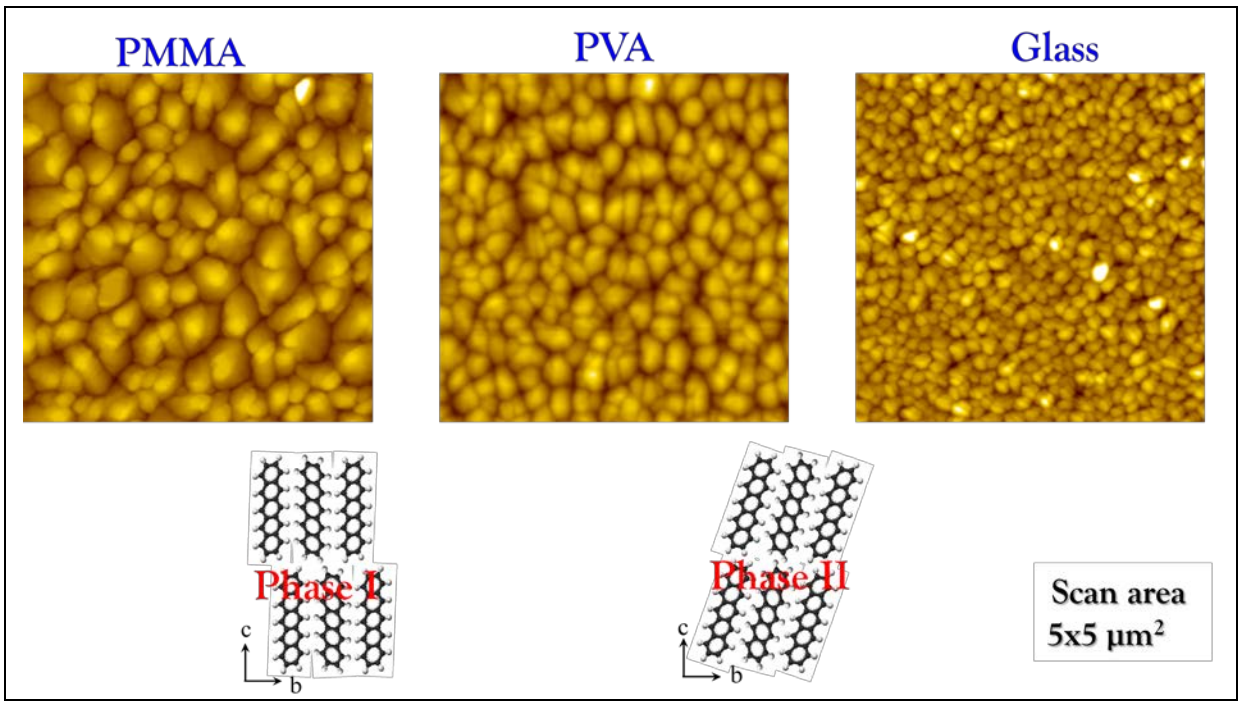
อย่างไรก็ตามเมื่อมีการให้ความต่างศักดิ์แก่ขั้วเกทซอร์ทเพิ่มขึ้นกระแสเดรนจะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงในช่วงที่ความต่างศักดิ์เดรนซอร์ทน้อยกว่า 20 โวลท์ และมีค่าอิ่มตัวแสดงได้โดยมีค่าเพิ่มขึ้นขนานกับแนวเส้นตรงของ V_{GS} = 0 เมื่อหักค่ากระแสจากแนว V_{GS} = 0 ออก จะพบว่ากระแสเดรนอิ่มตัวจะมีค่าประมาณ 1.8, 2.8, 4.5, และ 6.8 นาโนแอมแปร์ ที่ความต่างศักย์เกทซอร์ทเป็น 30 , 40 , 50 และ 60 โวลท์ ตามลำดับ ดังแสดงไว้ในรูป

จะเห็นได้ว่าการใช้ PVA เป็นชั้นฉนวน นอกจากจะทำให้มีกระแสรั่วออกจากขั้วเกทเข้ามาในกระแสเดรนแล้ว การนำไฟฟ้าของชั้นสารเพนทาซีนเองก็มีความแตกต่างกันด้วย ซึ่งสามารถแสดงได้โดยการเขียนกราฟระหว่างรากที่สองของกระกระแสเดรนอิ่มตัวกับค่าความต่างศักย์เกทซอร์ท ซึ่งจากความชันของกราฟเชิงเส้นตรงทำให้เราสามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ความคล่องตัวของพาหะเป็น 5.3 x 10^{-4} cm^2/ Vs และ 1.2 x 10^{-4} cm^2/ Vs ในกรณีของ OFET ที่ใช้ PMMA และ PVA เป็นชั้นฉนวนตามลำดับ

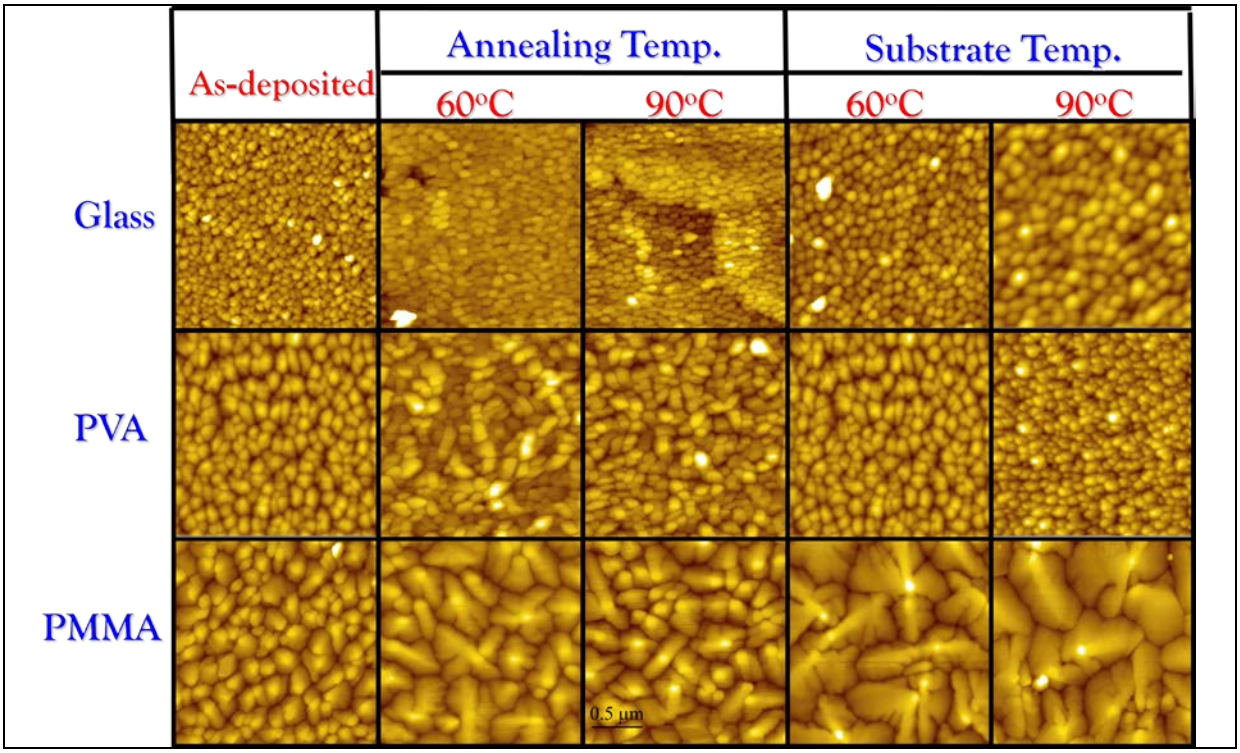
Insulator	Phase	μ_{FET} (cm^2/Vs)	V_T (V)
PVA	I/II	$1.2x10^{-4}$	-5
PMMA	I	$5.3x10^{-4}$	-13



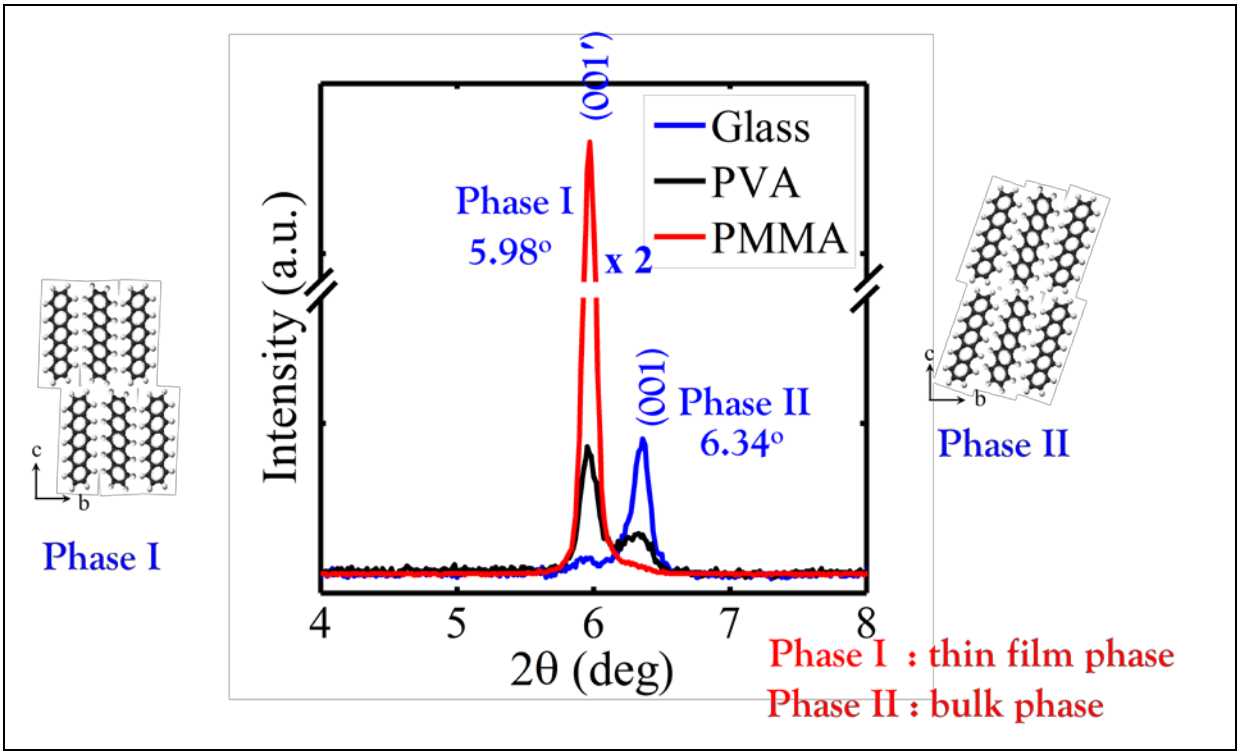
การเปลี่ยนแปลงค่าของความคล่องตัวของพาหะของฟิล์มบางเพนทาซีนนี้สามารถอธิบายได้ ด้วยการเปลี่ยนเฟสในฟิล์มเพนทาซีน ซึ่งพบว่าฟิล์มเพนทาซีนที่เตรียมได้บนชั้น PMMA จะเป็นเฟส I ในขณะที่ฟิล์มที่เตรียมบนชั้น PVA จะเป็นการผสมของเฟส I และเฟส II ซึ่งสามารถยืนยันการเปลี่ยนเฟสนี้ได้ด้วยการตรวจวัดพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม



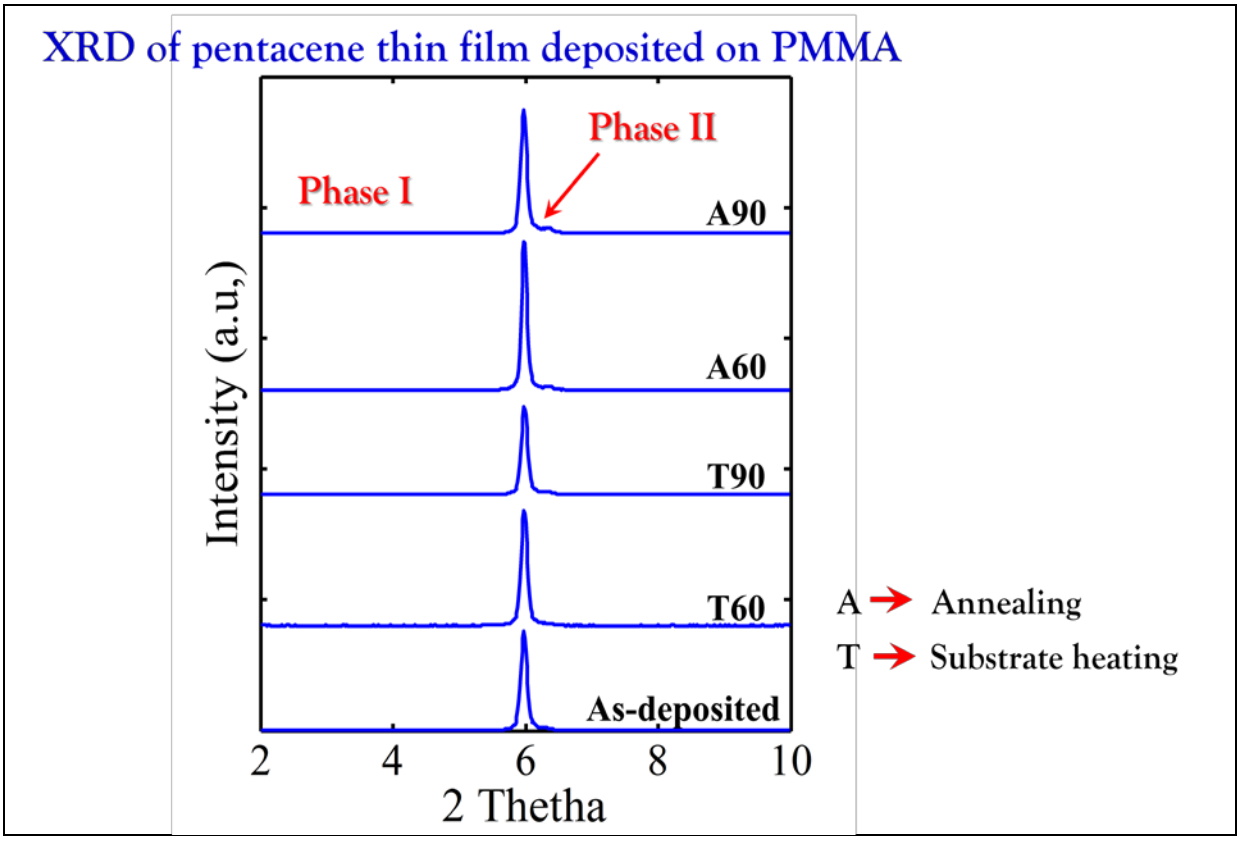
ภาพลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางเพนทาซีนที่ปลูกบนชั้น PMMA จะมีลักษณะเกรนที่มีขนาดใหญ่กว่าฟิล์มที่ปลูกบนชั้น PVA และเมื่อได้นำฟิล์มไปอบให้ความร้อนในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอนที่อุณหภูมิ 60 และ 90 องศาเซลเซียส พบว่าเดรนของชั้นเพนทาซีนบนชั้น PMMA จะมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีลักษณะนูนเป็นรูปแบบเฉพาะ ในขณะที่ฟิล์มบางเพนทาซีน ที่อบให้ความร้อนจะมีลักษณะเกรนขนาดเล็กคล้ายลักษณะเดิม นอกจากนี้ยังได้ศึกษาลักษณะฟิล์มบางเพนทาซีนที่ปลูกได้เมื่อมีการให้ความร้อนแก่แผ่นฐานรองในระหว่างการระเหยเคลือบ ซึ่งพบว่าลักษณะเฉพาะของเกรนเพนทาซีนที่ปลูกได้เมื่อให้ความร้อนแก่แผ่นฐานรองระหว่างการเคลือบจะมีลักษณะเฉพาะที่เด่นชัดมากและเกรนมีขนาดใหญ่มากกว่าฟิล์มเพนทาซีนที่ผ่านการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิเดียวกัน แสดงว่าการจัดระเบียบการเรียงตัวในชั้นฟิล์มทำได้ง่ายกว่าในระหว่างการระเหยเคลือบ



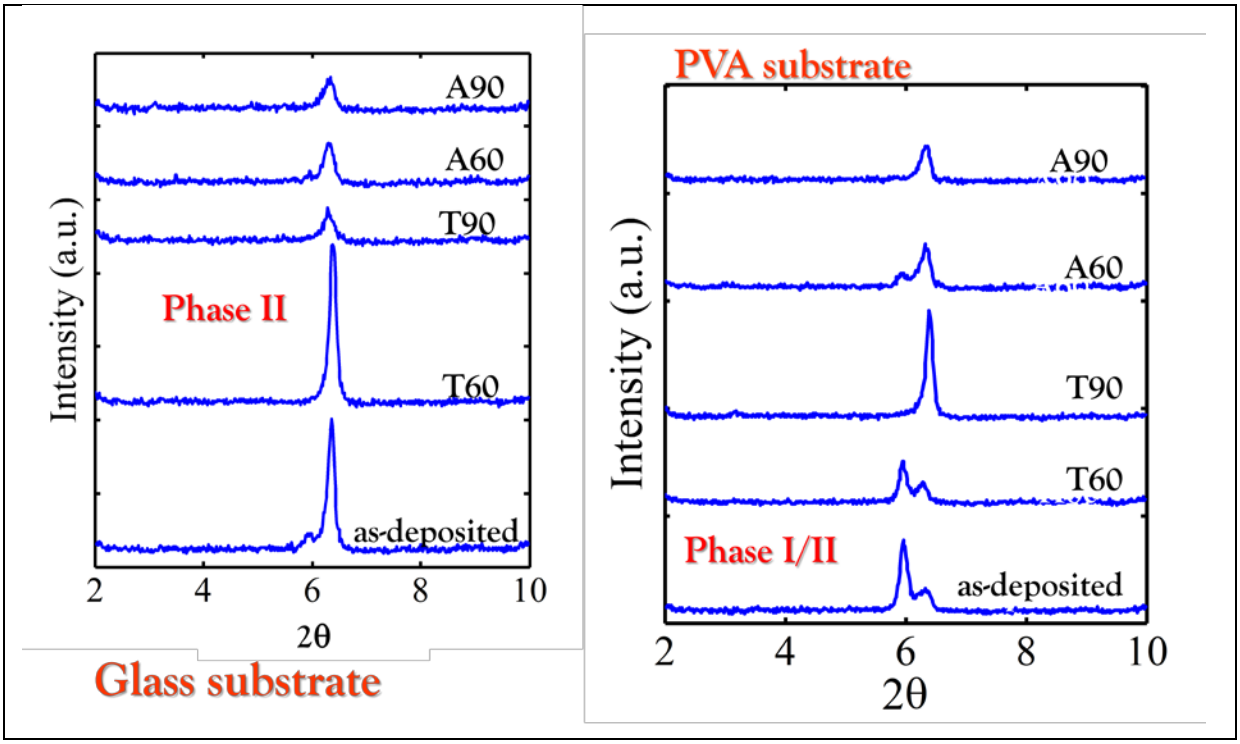
การตรวจสอบเฟสของฟิล์มบางเพนทาซีนได้ดำเนินการด้วยการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ซึ่งพบว่าชั้นเพนทาซีนที่ปลูกบนชั้น PMMA จะให้พีคการเลี้ยวเบนที่สูงมากที่มุม 5.98 องศา สอดคล้องกับการเลี้ยวเบนจากระนาบ (001') ในขณะที่ฟิล์มบางเพนทาซีนที่ปลูกบนชั้น PVA จะแสดงพีคการเลี้ยวเบนขนาดเล็กที่มุม 5.98 และ 6.34 องศา ซึ่งเป็นการเลี้ยวเบนจากระนาบ (001') และ (001) ของเพนทาซีนในเฟส I และ II ตามลำดับ



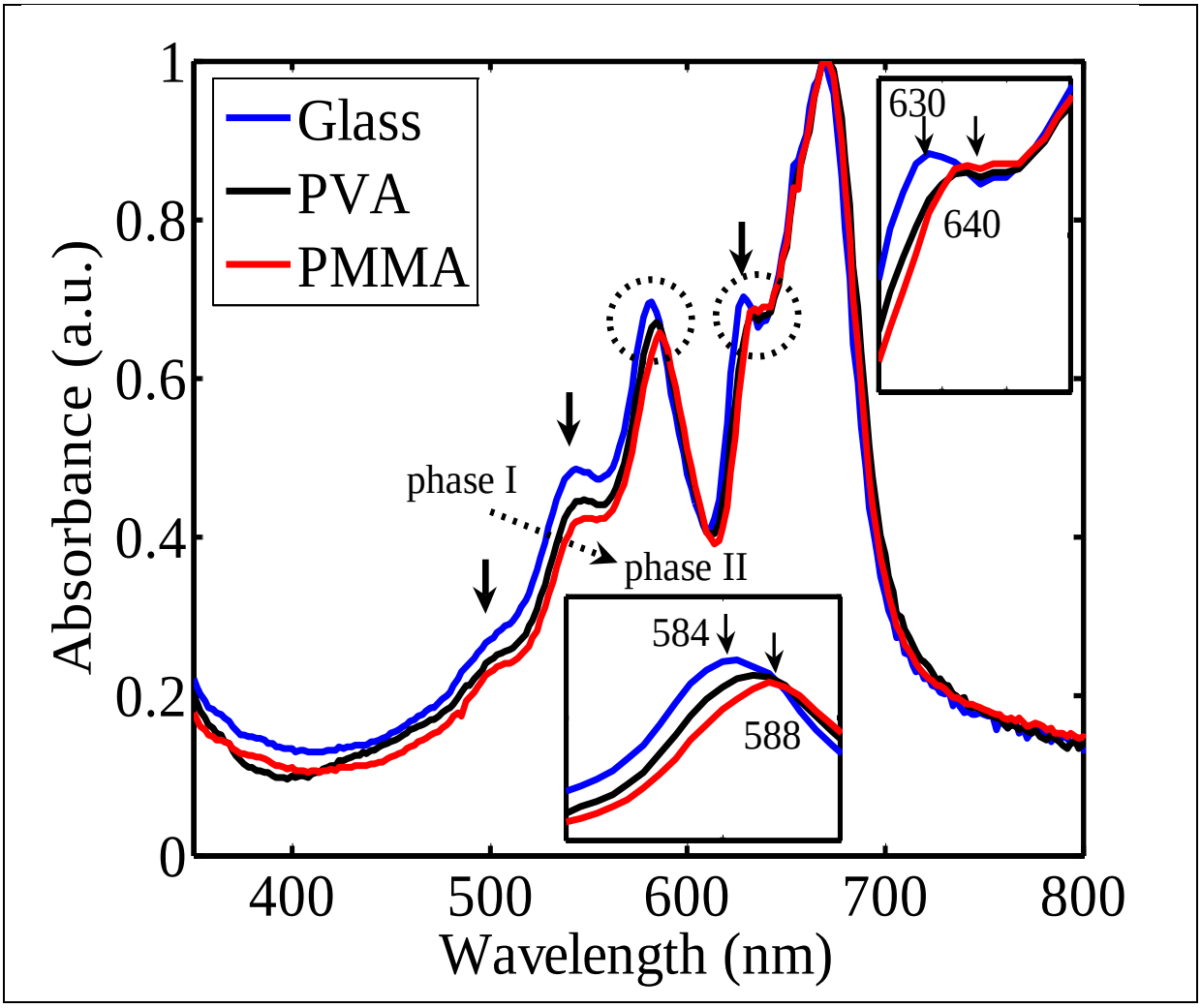
พีคการเลี้ยวเบนของเพนทาซีนที่ปลูกบนชั้น PMMA เมื่ออบให้ความร้อน และที่ให้ความร้อนแก่แผ่นฐานรองที่อุณหภูมิ 60 และ 90 องศาเซลเซียสจะมีความสูงมากขึ้นทำให้สามารถยืนยันการเป็นผลึกที่สมบูรณ์มากขึ้นหลังจากการให้ความร้อนเช่นเดียวกับภาพลักษณะพื้นผิวที่ตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

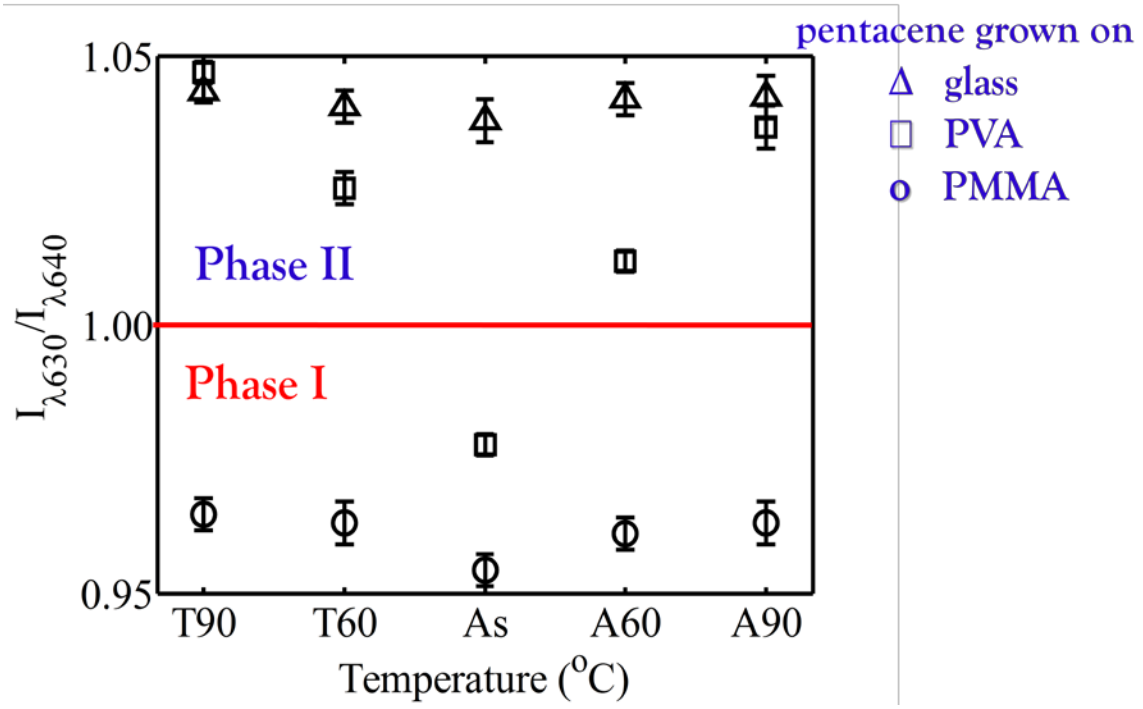


ในขณะที่พีคการเลี้ยวเบนของฟิล์มเบนตาซีนที่ปลูกบนชั้น PVA เมื่ออบให้ความร้อนและที่ให้ความร้อนแก่แผ่นฐานรองที่อุณหภูมิ 60 และ 90 องศาเซลเซียส ยังคงแสดงสองพีค อย่างไรก็ตามเมื่อมีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง พีคการเลี้ยวเบนที่มุม 5.98 องศา จะมีขนาดเล็กลงและพีคการเลี้ยวเบนที่ 6.34 องศา จะมีขนาดสูงขึ้น นั่นหมายความว่าการให้ความร้อนแก่ฟิล์มเพนตาซีนที่ปลูกบนชั้น PVA จะทำให้ฟิล์มกลายเป็นเฟส II มากขึ้น

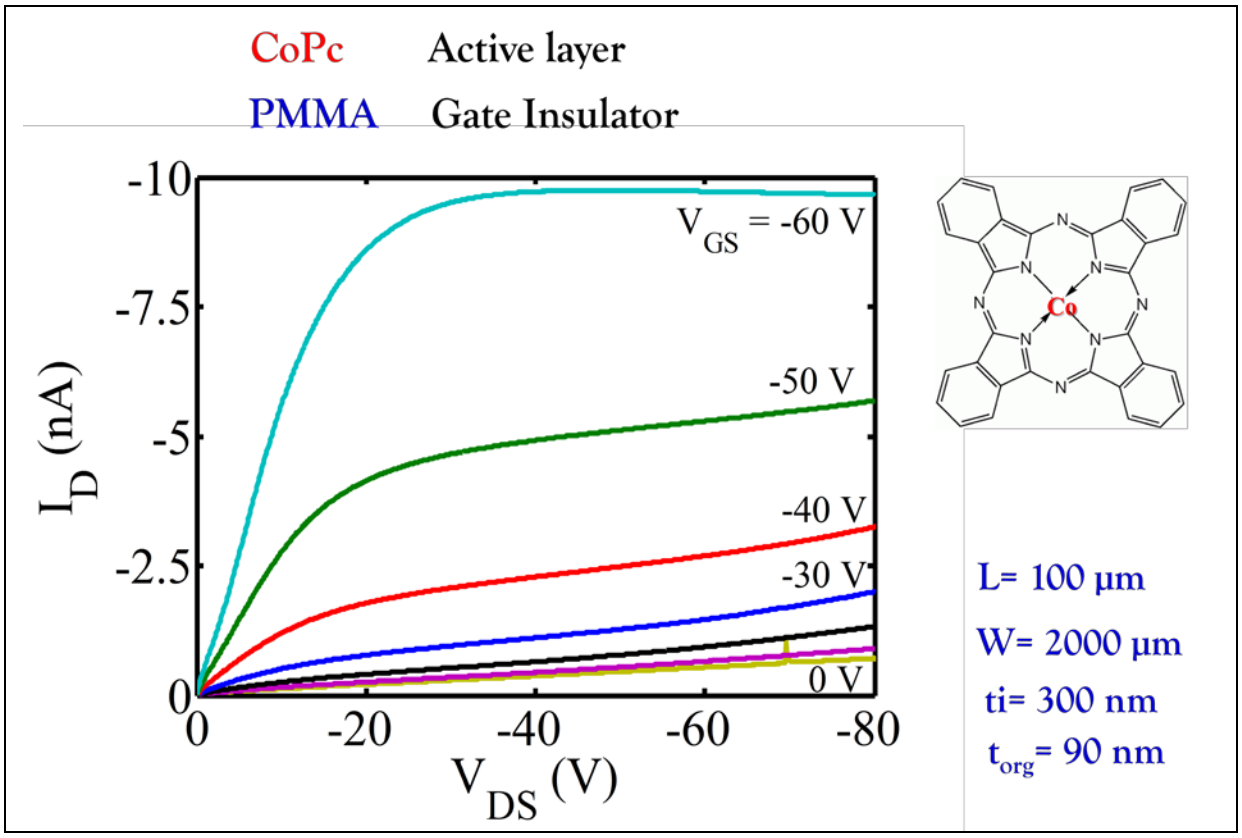


เพื่อให้การตรวจวัดเฟสของฟิล์มเพนตาซีนมีความสะดวกมากขึ้น ได้มีการศึกษาสเปคตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเพนทาซีนที่ปลูกบนชั้น PMMA และ PVA เปรียบเทียบกัน พบว่าถ้ากำหนดให้พีคการดูดกลืนแสงสูงสุดมีค่าเท่ากันจะเห็นการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นที่พีคการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 584 – 588 และ 630 – 640 นาโนเมตร ซึ่งเราได้เสนอใช้การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นเหล่านี้เป็นตัวตรวจวัดเฟสในฟิล์มเพนทาซีน โดยใช้อัตราส่วนระหว่างการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นแสง 630 นาโนเมตรและการดูดคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร แล้วพบว่าถ้าอัตราส่วนมีค่าน้อยกว่าหรือมากกว่า 1 จะแสดงว่าฟิล์มเพนทาซีนเป็นเฟส I หรือ เฟส II ตามลำดับ ดังแสดงในรูปกราฟแสดงการกระจายของข้อมูลของฟิล์มเพนทาซีนที่อบให้ความร้อนและให้ความร้อนแก่แผ่นฐานรองในระหว่างการเคลือบที่อุณหภูมิ 60 และ 90 องศาเซลเซียส


Glass
PVA
PMMA
Absorbance (a.u.)
Wavelength (nm)
phase I
phase II
584
588
630
640
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
400
500
600
700
800

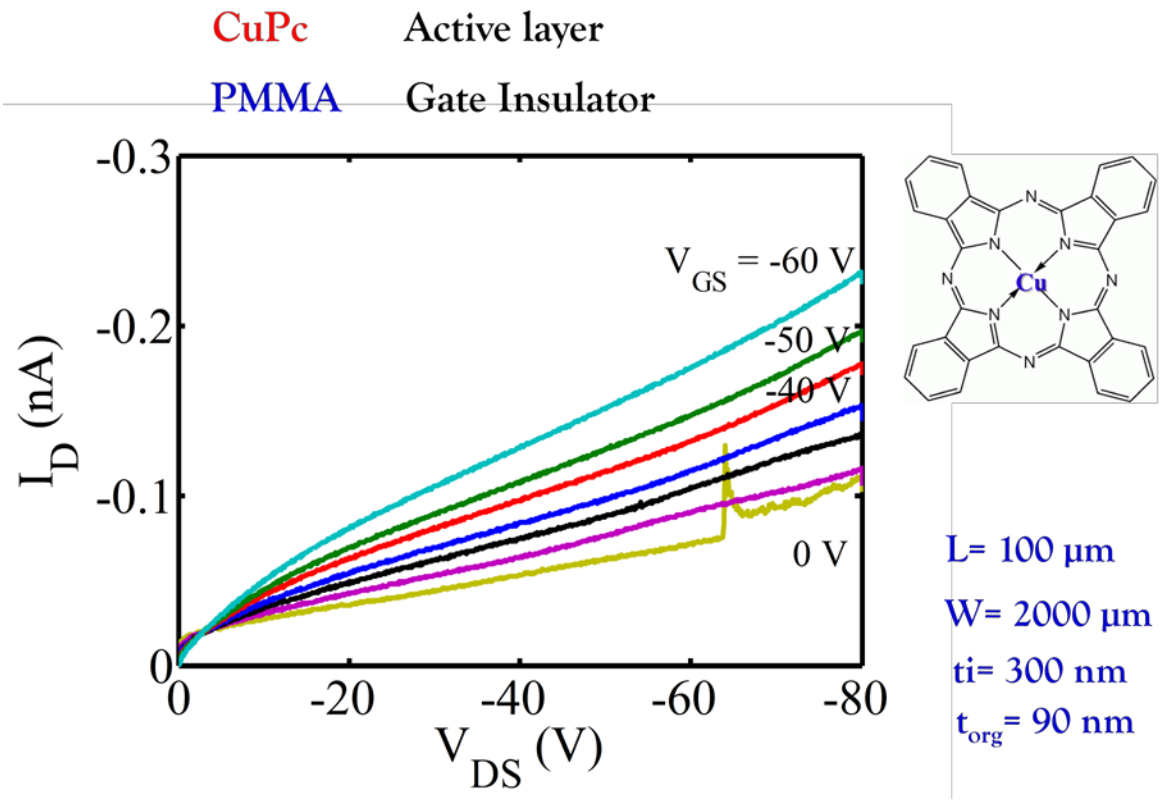

pentacene grown on
glass
PVA
PMMA
Phase II
Phase I
$I_{\lambda630}/I_{\lambda640}$
Temperature (^{o}C)
1.05
1.00
0.95
T90
T60
As
A60
A90

นอกจากจะได้นำสารกึ่งตัวนำอินทรีย์เพนทาซีนมาประดิษฐ์เป็น OFET แล้ว ทางกลุ่มวิจัยยังได้สนใจพัฒนานำสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ประเภทโลหะแพทโลไซยาไนน์มาประดิษฐ์เป็นทรานซิสเตอร์ด้วย โดยทางกลุ่มวิจัยได้ประสบความสำเร็จในการประดิษฐ์ OFET ด้วยโคบอลแพทโลไซยาไนน์ (CoPc) โดยได้ทำการเตรียมชั้นของ CoPc นี้บนชั้นฉนวน PMMA ด้วยการระเหยสารในสุญญากาศ และได้วัดความสัมพันธ์กระแสแรงดันของโครงสร้าง OFET ที่ประดิษฐ์ขึ้น ซึ่งแสดงถึงกระแสเดรนเมื่อไม่ได้ให้ความต่างศักย์เกท (V_{GS}=0) มีขนาดน้อย(< 0.5 นาโนแอมแปร์)เมื่อเทียบกับเมื่อมีการให้ความต่างศักย์ที่เกท โดยเมื่อให้ความต่างศักย์เกทซอร์ทเป็น 30 , 40 , 50 และ 60 โวลท์ พบว่ามีกระแสเดรนอิ่มตัวไหลในปริมาณ 2.3 , 3.2 , 5.6 และ 9.8 นาโนแอมแปร์ โดยกระแสเดรนอิ่มตัวนี้สามารถสังเกตเห็นได้เมื่อเพิ่มความต่างศักดิ์เดรนซอร์ทมากกว่า 25 โวลท์



กลุ่มวิจัยยังได้นำสารทองแดงแพทโลไซยาไนน์ (CuPc) มาประดิษฐ์เป็นทรานซิสเตอร์ด้วย โครงสร้าง OFET ที่ประดิษฐ์ขึ้นในลักษณะเช่นเดียวกับโครงสร้างของ CuPc โดยมีการเคลือบชั้น CuPc บนชั้น PMMA ด้วยการระเหยสารในสุญญากาศ กราฟลักษณะเฉพาะระหว่างกระแสและแรงดันแสดงการเพิ่มขึ้นของกระแสเดรนเมื่อมีการเพิ่มความต่างศักย์เกท แต่มีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและไม่มีลักษณะของกระแส

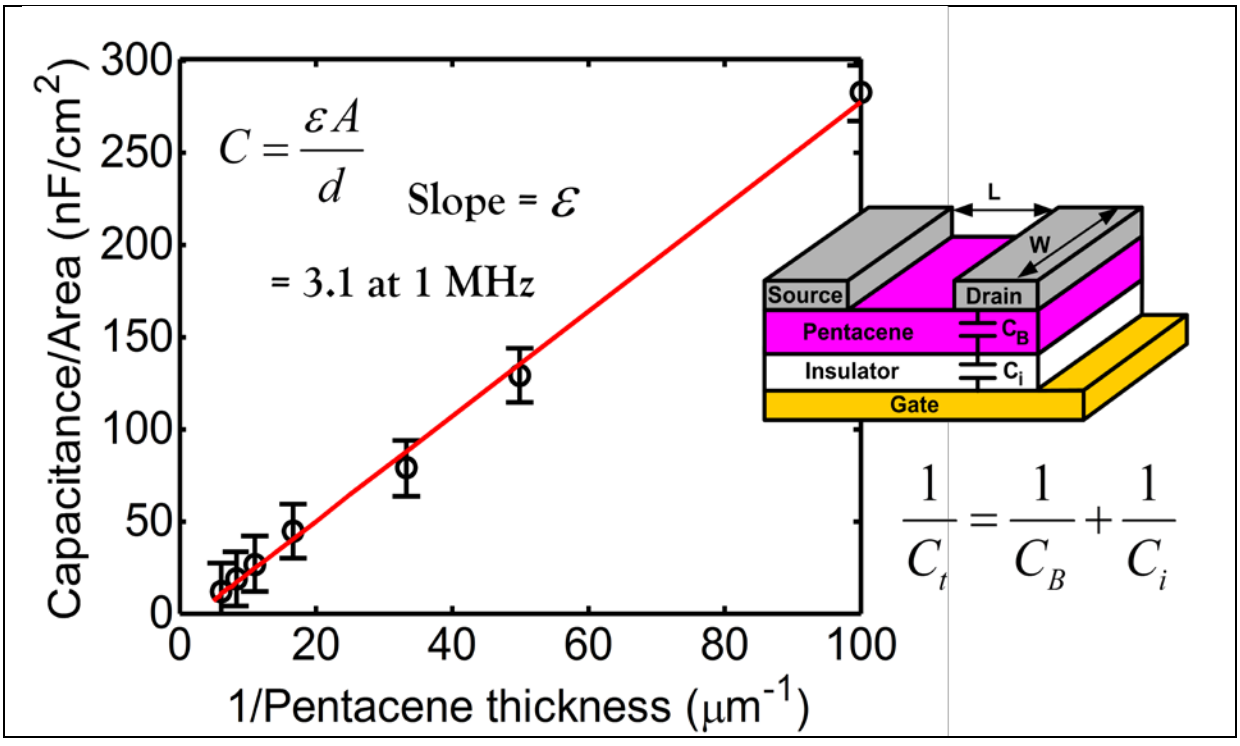
อิ่มตัว ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากฟิล์ม CuPc ที่เตรียมได้มีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ไม่ดีนัก ค่าประมาณสภาพความคล่องตัวของพาหะของฟิล์มบาง CoPc และ CuPc ในโครงสร้าง OFET ที่สร้างขึ้นได้ค่าประมาณ 1.1×10^{-4} และ 2.5×10^{-5} cm^2/Vs ซึ่งมีค่าน้อยกว่าโครงสร้าง OFET ที่เตรียมจากฟิล์มบางเพนทาซีน



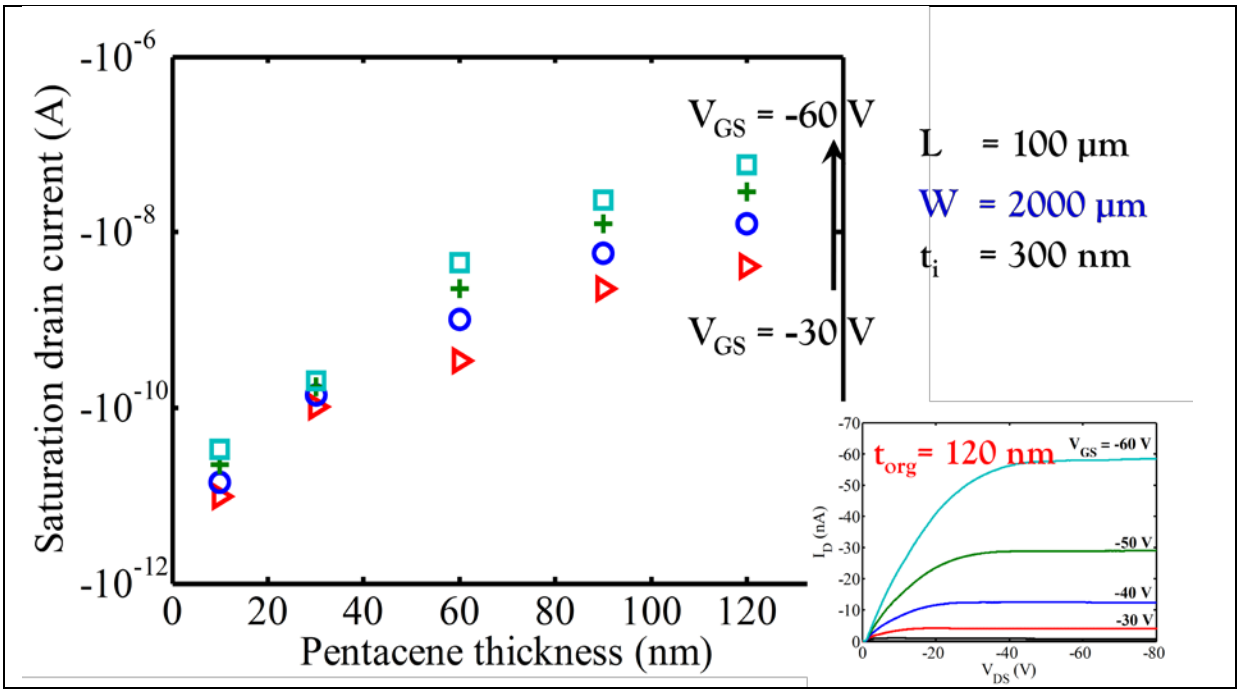
เพื่อให้มีความเข้าใจในกลไกการนำไฟฟ้าในโครงสร้าง OFET ที่มีขั้วเดรนและซอร์ทอยู่บนผิวฝั่งตรงข้ามกับเกท ซึ่งมีความแตกต่างจากลักษณะโดยทั่วไปของทรานซิสเตอร์ที่ขั้วเดรนและซอร์ทจะอยู่บนผิวฝั่งเดียวกันกับเกท กระแสไฟฟ้าจึงไหลผ่านบริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำเท่านั้น ปริมาณกระแสเดรนจึงไม่ขึ้นกับความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำ ในกรณีที่โครงสร้าง OFET มีขั้วเกทและขั้วเดรนซอร์ทอยู่ฝั่งตรงข้ามกันกระแสเดรนจะต้องไหลผ่านสารกึ่งตัวนำ และถูกควบคุมด้วยสนามไฟฟ้าจากเกทที่อยู่ฝั่งตรงข้าม ทำให้กลุ่มวิจันสนใจผลของความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำที่มีต่อการนำกระแสไฟฟ้า

Thin film	Insulator	μ_{FET} (cm^2/Vs)
Pentacene	PVA	$1.2x10^{-4}$
	PMMA	$5.3x10^{-4}$
CoPc	PMMA	$1.1x10^{-4}$
CuPc	PMMA	$2.5x10^{-5}$

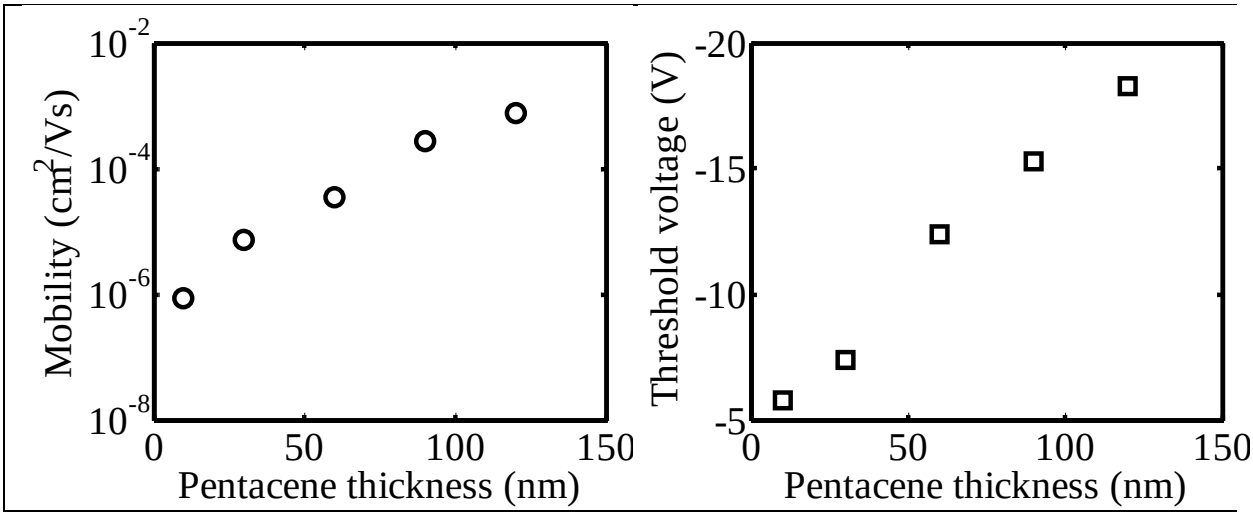
กลุ่มวิจัยจึงได้เตรียมโครงสร้าง OFET ด้วยฟิล์มบางเพนทาซีนที่มีความหนาแตกต่างกัน ซึ่งตรวจวัดด้วยความถี่ของผลึกควอทซ์ที่ติดตั้งไว้ในระหว่างการระเหยสารในสุญญากาศ อย่างไรก็ตามได้มีการตรวจสอบความหนาของฟิล์มเพนทาซีนที่เตรียมได้อีกวิธีหนึ่งด้วยการวัดค่าความจุไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ระหว่างขั้วเกทและซอร์ท ซึ่งค่าความจุที่วัดได้จะเป็นค่าความจุไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุที่เกิดจากชั้นฉนวนต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุที่เกิดจากชั้นฟิล์มเพนทาซีน จากค่าคงที่ไดอิเล็กทริคของชั้น PMMA ที่ประมาณให้เป็น 2.3 ที่ความถี่ 1 เมกกะเฮิรตซ์ ทำให้สามารถตัดผลของตัวเก็บประจุจากชั้นฉนวน PMMA เหลือแต่เพียงผลจากตัวเก็บประจุในชั้นเพนทาซีน ซึ่งค่าความจุของตัวเก็บประจุนี้จะแปรผกผันกับความหนาของชั้นเพนทาซีน ซึ่งจะได้กราฟของความจุประมาณเป็นเส้นตรงกับหนึ่งส่วนความหนา และจากความชันของกราฟสามารถประมาณค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของชั้นเพนทาซีนได้เป็น 3.1 ที่ความถี่ 1 เมกกะเฮิรทซ์



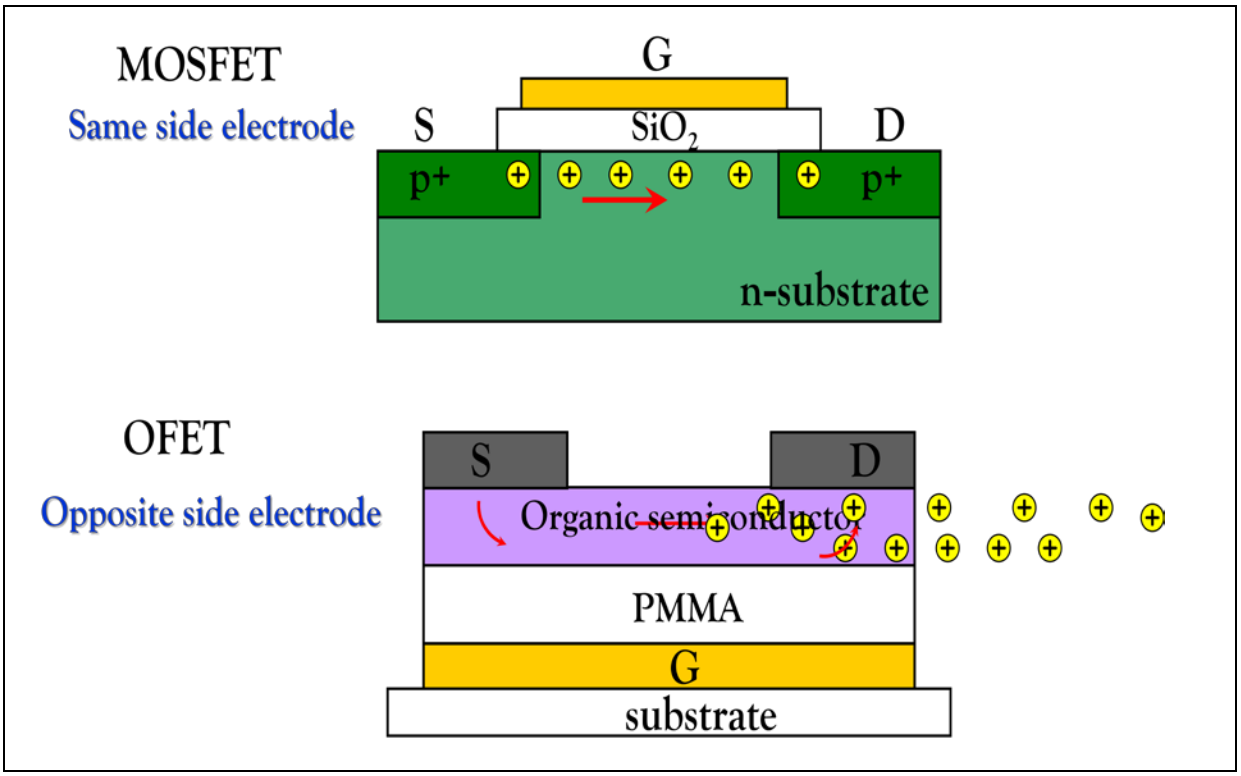
จากโครงสร้าง OFET ที่เตรียมด้วยฟิล์มเพนทาซีนที่ความหนา 8 ถึง 120 นาโนเมตร พบว่ากระแสเดรนอิ่มตัวมีความเพิ่มซึ่งจาก 10^{-11} เป็น 10^{-8} แอมแปร์ตามลำดับ ดังนั้นในโครงสร้าง OFET ที่ขั้วเกทและขั้วซอร์ทเดรนอยู่ฝั่งตรงข้ามกัน กระแสเดรนใน OFET ที่มีความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำระหว่าง 8 ถึง 120 นาโนเมตร จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปถึง 1000 เท่า ซึ่งถ้าใช้แบบจำลองเส้นตรงทั่วไปของทรานซิสเตอร์ซึ่งใช้อธิบายการนำไฟฟ้าในหนึ่งมิติมาอธิบายการเปลี่ยนแปลงของกระแสเดรนนี้จะต้องพิจารณาได้ว่าค่าสภาพความคล่องตัวของพาหะมีค่าเพิ่มขึ้นเพื่อเพิ่มความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำ

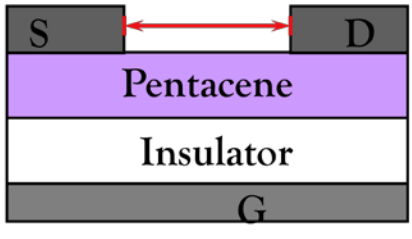


ในการอธิบายปรากฏการณ์การนำไฟฟ้าในโครงสร้างทรานซิสเตอร์ที่ขั้วเกทอยู่ฝั่งตรงข้ามให้ดีขึ้นจำเป็นต้องใช้แบบจำลองใน สอง-สาม มิติ เพื่ออธิบายผลการควบคุมของสนามไฟฟ้าจากฝั่งตรงข้ามในโครงสร้างที่มีขนาดบางมาก ในการคำนวณแบบจำลองได้ใช้โปรแกรม TCAD ของ Synopsys – Sentaurus ด้วย ค่าพารามิเตอร์ของวัสดุในตาราง



ผลการคำนวณแบบจำลองทรานซิสเตอร์ที่มีขั้วตรงข้ามในสองมิติที่มีชั้นสารกึ่งตัวนำหนา 200 นาโนเมตร พบว่ากราฟลักษณะเฉพาะกระแสแรงดันยังแสดงลักษณะคล้ายกับแบบจำลองหนึ่งมิติ แต่เมื่อทำการวิเคราะห์ประมาณค่าสภาพความคล่องตัวของพาหะจากความสัมพันธ์ที่คำนวณได้กลับมีค่าที่แตกต่างกันเป็น 0.15 cm^2/ Vs (ในแบบจำลองสองมิติใช้ค่า 0.2 cm^2/ Vs)





200 nm

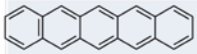
400 nm

W = 1 μm

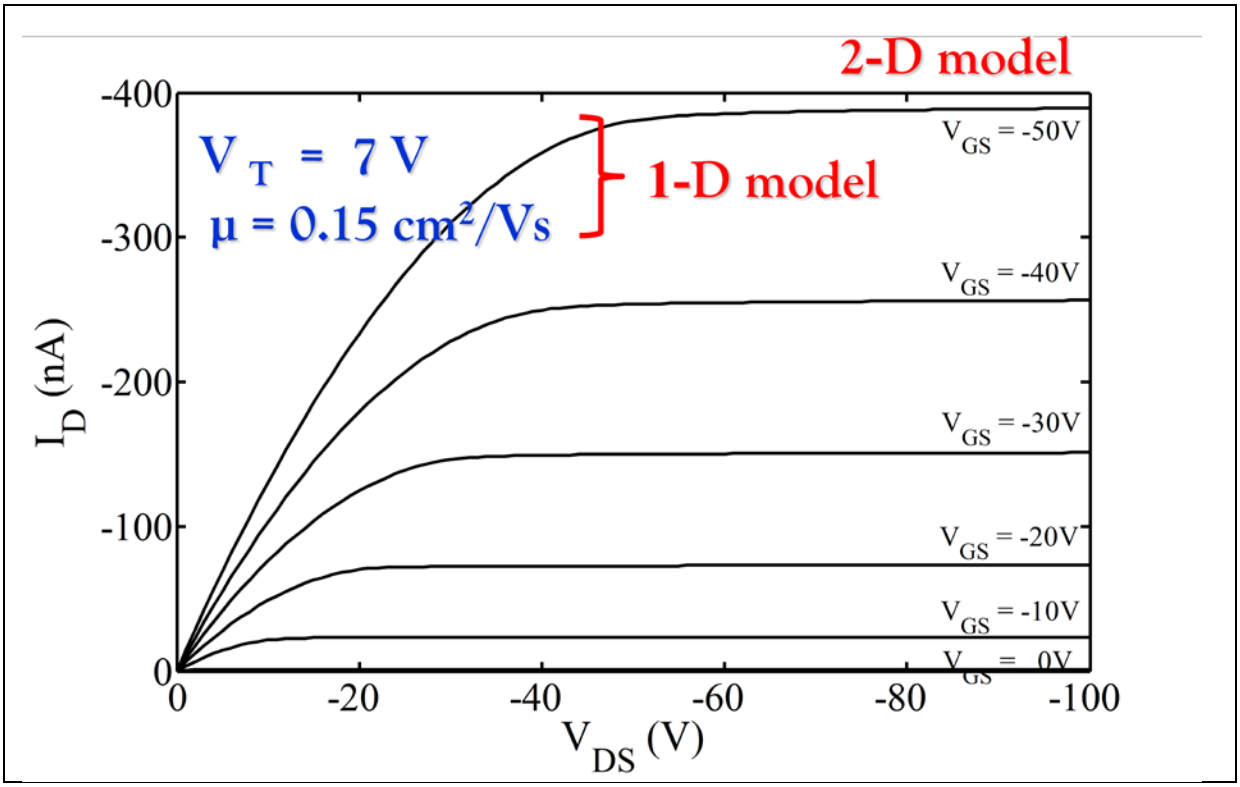
Simulation tool

TCAD

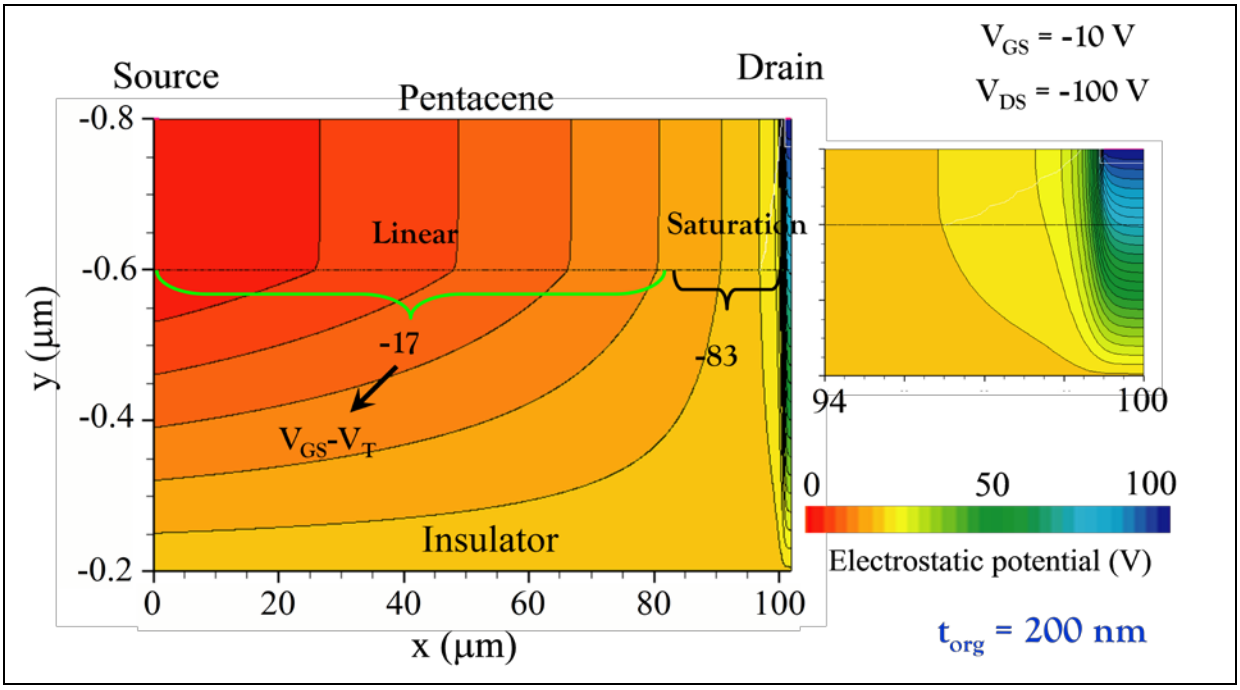
(Synopsys-Sentaurus)

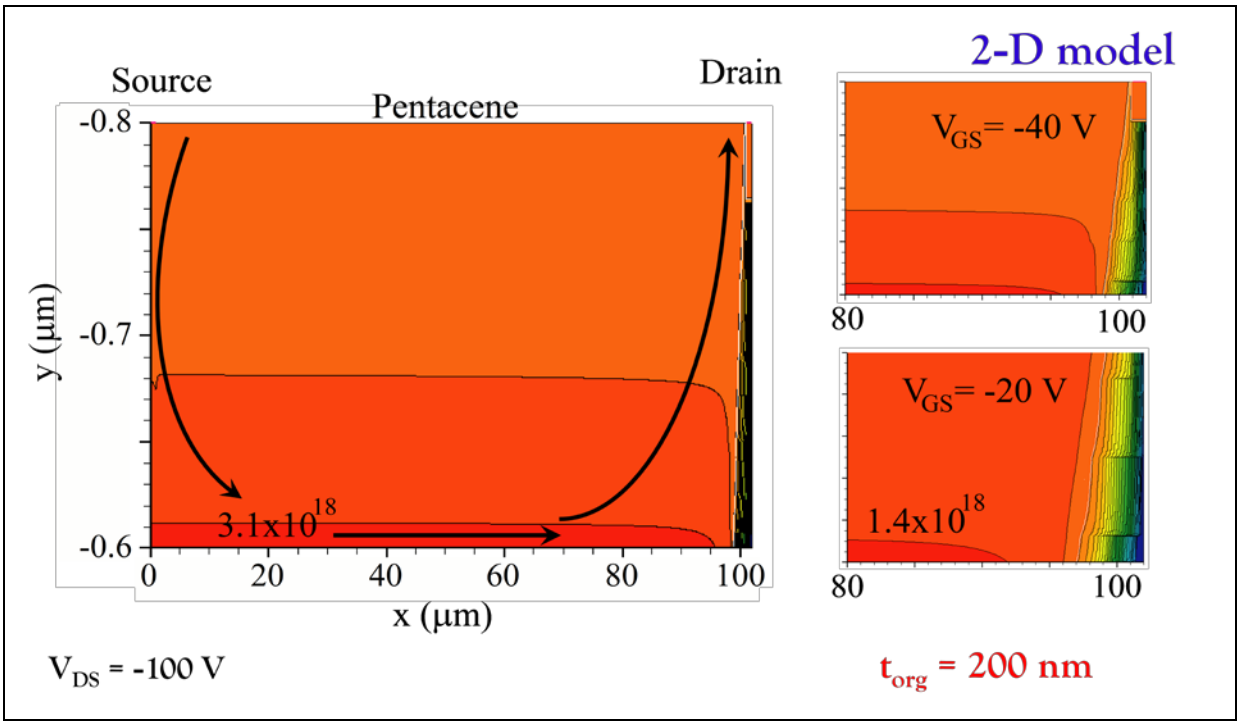
Material	Parameter	Symbol	Value	Unit
Pentacene	Mobility	μ	0.2	cm^2/Vs
	Band gap	E_g	1.97	eV
	Electron affinity	χ_e	2.8	eV
	Permitivity	ε_s	4	
	Dopand density	N_a	$1x10^{16}$	cm^{-3}
Aluminium	Work function	φ_{Al}	4.3	eV

จากภาพการกระจายค่าของความต่างศักย์และการไหลของกระแสผ่านภาคตัดขวางสองมิติของโครงสร้างทรานซิสเตอร์ จะเห็นได้ว่าสนามไฟฟ้าจากเกทด้านตรงข้ามจะลดผลกระทบต่อการนำไฟฟ้าในเชนเนลสารกึ่งตัวนำ เป็นผลเสมือนกับชั้นสารกึ่งตัวนำมีค่าสภาพความคล่องตัวของพาหะลดลง ได้เปรียบเทียบกระแสเดรนอิ่มตัวของโครงสร้างทรานซิสเตอร์ที่มีการเปลี่ยนความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำจากช่วง 10 นาโนเมตร ถึง 1000 นาโนเมตร พบว่าโครงสร้างทรานซิสเตอร์ช่วงประมาณความหนา 200 นาโนเมตร จะมีค่ากระแสเดรนใกล้เคียงกับค่าประมาณในแบบจำลองหนึ่งมิติ ซึ่งกระแสเดรนจะมีค่าน้อยกว่าเมื่อความหนาน้อยและมีค่ามากขึ้นเมื่อมีความหนามากกว่า 200 นาโนเมตร

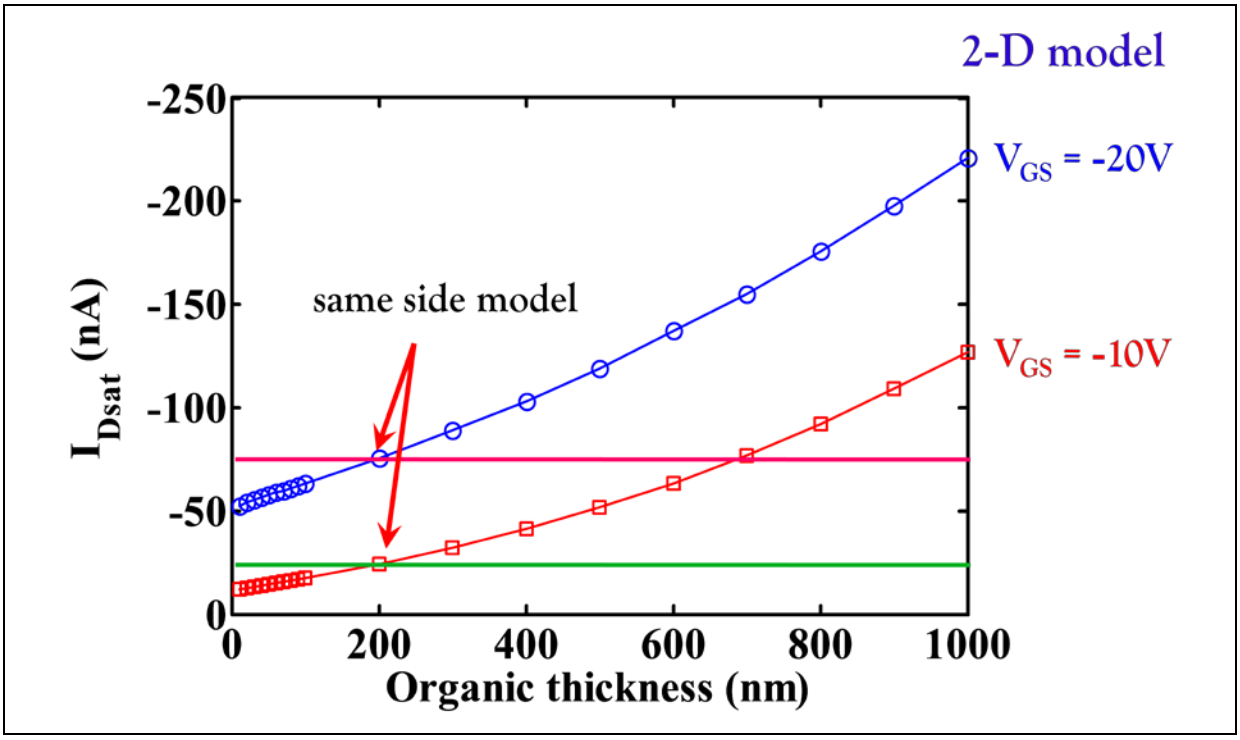


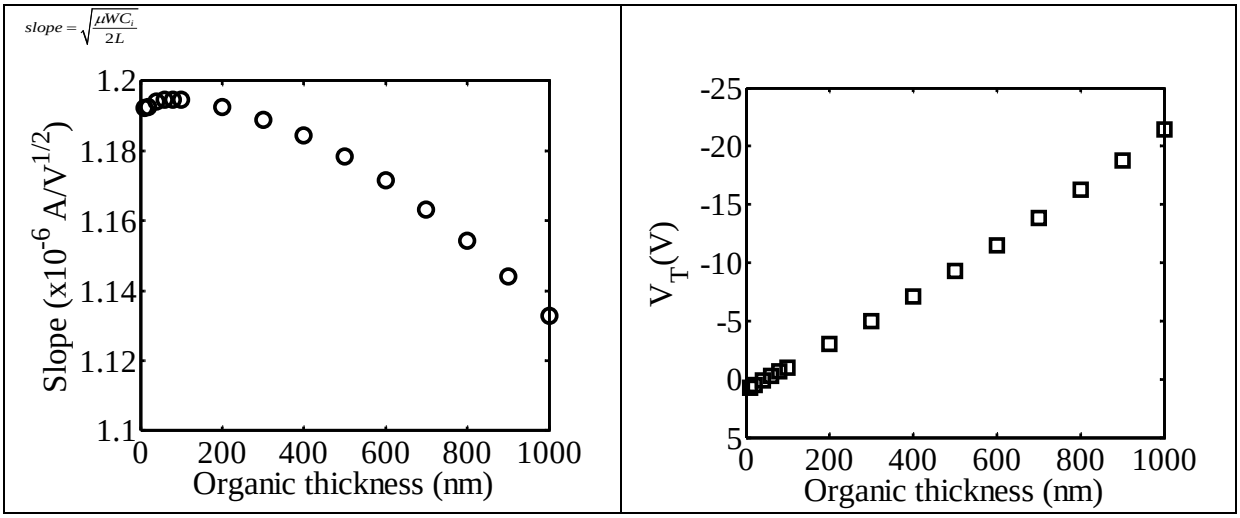
เมื่อประมาณค่าสภาพความคล่องตัวของพาหะ พบว่าค่าที่ประมาณจากแบบจำลองหนึ่งมิติของผลการคำนวณจากแบบจำลองสองมิติ มีค่าสภาพความคล่องตัวที่เปลี่ยนแปลงตามความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำ ผลการคำนวณนี้สอดคล้องกับผลการวัดของโครงสร้าง OFET ที่สร้างขึ้น ซึ่งจะมีค่าสภาพความคล่องตัวของพาหะเพิ่มขึ้นในช่วงความหนาน้อยกว่า 200 นาโนเมตร





จากการคำนวณแสดงให้เห็นว่า หากมีการเพิ่มความหนาให้มากขึ้นกว่า 200 นาโนเมตร ค่าสภาพความคล่องตัวของพาหะจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความหนาของชั้นฟิล์มสารกึ่งตัวนำ





ในทำนองเดียวกันค่าความต่างศักย์ขีดเริ่ม (V_T) ของโครงสร้างทรานซิสเตอร์ที่มีความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำทั้งจากการวัดในโครงสร้าง OFET ที่ประดิษฐ์ขึ้นและจากการคำนวณแบบจำลองสองมิติพบว่าจะมีค่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของชั้นฉนวนเพิ่มขึ้นด้วย