

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเป็นยุคทุนนิยมทำให้มีการแข่งขันเชิงเศรษฐกิจในระดับสูง ทำให้ภาคอุตสาหกรรม การผลิตต่างๆ พยายามคิดหาวิธีการในการลดต้นทุนการผลิต เช่น การใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด ให้เกิดประโยชน์สูงสุด หรือแม้กระทั่งการลดทรัพยากรในการผลิตให้ต่ำลง เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ ทำให้นักวิจัยเกิดแนวคิดที่จะพัฒนาผลิตภัณฑ์ต่างๆ ให้มีขนาดเล็กลง แต่มีประสิทธิภาพในการทำงานที่สูงขึ้น โดยแนวทางใหม่ที่คาดว่าจะสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ คือ นาโนเทคโนโลยี ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับวัสดุที่มีขนาดใกล้เคียงระดับอะตอม (ทั้งอินทรีย์และอนินทรีย์) มาใช้ประโยชน์ เนื่องจากมีการค้นพบว่าเมื่อวัสดุมีขนาดเล็กลงจนกระทั่งถึงระดับนาโน (นาโน เป็นมาตรฐานทางวิทยาศาสตร์ที่เล็กมาก คือ 10^{-9} เมตร (นาโนเมตร; nm)) แล้ววัสดุจะแสดงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่แตกต่างไปจากเดิม (คำว่า “นาโน” มาจากรากศัพท์ภาษากรีกว่า “Nanos” แปลว่า “คนแคระ” หรือมีขนาดเป็น 1 ส่วนในพันล้านส่วนของเมตร) ด้วยเหตุนี้ นาโนเทคโนโลยีจึงเป็นเทคโนโลยีที่พยายามเอาสมบัติเด่นของสิ่งที่มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตรมาใช้ประโยชน์ ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์โดยเฉพาะนักฟิสิกส์และนักวัสดุศาสตร์ กำลังมุ่งมั่นพัฒนาวัสดุนาโนที่มีสมบัติดีเยี่ยมตามต้องการ เช่น แข็งแรง น้ำหนักเบา มีสมบัติที่ดีในด้านแสงและการนำไฟฟ้า เป็นต้น เพื่อทดแทนเทคโนโลยีเดิมที่มีอยู่ ซึ่งราคาแพง มีขั้นตอนการผลิตหรือใช้งานยุ่งยาก⁽¹⁻³⁾

ปัจจุบันนี้ นาโนเทคโนโลยีเข้ามามีบทบาทในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมด้านการสื่อสาร โทรคมนาคม ไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ และอุตสาหกรรมยานยนต์ โดยมีการพัฒนาอุปกรณ์ขนาดเล็กประเภทนาโนอิเล็กทรอนิกส์ (nanoelectronic) และนาโนอุปกรณ์ (nanodevice) ซึ่งมีศักยภาพในการทำงานได้ดียิ่งขึ้น ดังจะเห็นได้ว่าอุปกรณ์สมัยใหม่สามารถที่จะเก็บข้อมูลได้มากขึ้น ตอบสนองต่อการสั่งงานได้รวดเร็วยิ่งขึ้น อีกทั้งยังมีใช้พลังงานเพียงเล็กน้อยในการทำงานอีกด้วย เนื่องจากอุปกรณ์ต่างๆ เหล่านี้มีขนาดเล็ก ทำให้ระยะทางในการส่งผ่านข้อมูลทางไฟฟ้าหรืออิเล็กทรอนิกส์สั้นลง ทำให้มีอัตราการสูญเสียพลังงานที่ต่ำ ส่งผลให้ใช้

พลังงานเพียงเล็กน้อยในการกระตุ้นในการตอบสนองต่อคำสั่ง หรือสิ่งแวดล้อมที่ต้องการจะตรวจวัด⁽¹⁾ สำหรับเทคนิคในการนำมาสร้างสิ่งเล็กๆที่น่าสนใจเหล่านี้ มีดังต่อไปนี้

เทคนิคการสร้างวงจรมีกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (photolithography) เป็นเทคนิคที่ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการสร้างวงจรรวมในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดยเทคนิคนี้จะเป็นกระบวนการถ่ายโอนลายวงจรจากแผ่นต้นแบบไปสู่แผ่นฐานที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มไวแสงไว้แล้ว เทคนิคนี้จะเริ่มด้วยการเคลือบฟิล์มไวแสงบนแผ่นฐานแล้วทำการฉายแสงผ่านต้นแบบไปบนแผ่นฐานด้วยเงื่อนไขที่เหมาะสมทำให้คุณสมบัติของฟิล์มไวแสงเกิดการเปลี่ยนแปลงไป โดยกระบวนการถ่ายโอนลายวงจรจะถูกกระทำซ้ำหลายรอบ ขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของวงจร ซึ่งมักต้องกระทำโดยใช้กระบวนการต่างๆ มากมายและขั้นตอนที่ต้องการความแม่นยำในระดับสูงมาก นอกจากนี้ยังต้องกระทำในสิ่งแวดล้อมที่สะอาดมากในที่ซึ่งมีการควบคุมอย่างระมัดระวังในด้านความชื้นอากาศ อุณหภูมิ และบางครั้งรวมถึงปริมาณแสงสว่างที่ใช้ในกระบวนการด้วย ยิ่งไปกว่านั้น สารเคมีและวัสดุที่ใช้ต้องมีความบริสุทธิ์สูงมาก เพื่อป้องกันการเกิดสิ่งปนเปื้อนซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ และวัสดุรองรับส่วนใหญ่ก็จะใช้เป็นซิลิกอน เพราะซิลิกอนเทคโนโลยีได้รับการพัฒนามานานและมีความเชื่อถือได้สูง ซึ่งขนาดของเส้นลวดลายวงจรต่างๆ ที่ต้องการนั้นต้องอาศัยในช่วงความยาวคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ต ในช่วงประมาณ 200-300 นาโนเมตร⁽¹⁻³⁾ จะเห็นได้ว่าถ้าจะนำเทคนิคโฟโตลิโทกราฟี มาสร้างขั้วไฟฟ้าระดับนาโนเมตรจะมีข้อจำกัดที่ถูกกำหนดด้วยความยาวคลื่นแสง และถึงแม้ว่าเทคนิคโฟโตลิโทกราฟี ในปัจจุบันนั้นไปปรับการพัฒนาจนสามารถสร้างวงจรมีขนาดในระดับนาโนได้ เช่น เทคนิคลิโทกราฟีลำอิเล็กตรอน ลิโทกราฟีรังสีเอ็กซ์ เทคนิคลิโทกราฟีลำไอออน เป็นต้น^(1,4) แต่วิธีการเหล่านี้จำเป็นต้องอาศัยเทคโนโลยีที่สูงขึ้นไปอีกและบางเทคนิคยังอยู่ในระดับการทดลอง นอกจากนี้เทคนิคเหล่านี้ส่วนใหญ่อยู่ในกระบวนการผลิตทางอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งต้องผลิตในจำนวนมากๆ จะคุ้มต่อการลงทุน สำหรับงานวิจัยที่ต้องการพัฒนาและเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในระดับการทดลอง หรือรูปแบบของลวดลายขั้วไฟฟ้าแบบต่างๆไปตามเงื่อนไขของการวิจัย และมีงบประมาณน้อย ดังนั้นการนำเทคนิคโฟโตลิโทกราฟีจึงไม่สอดคล้องในการนำมาใช้ในงานวิจัย แต่ยังมีอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ ซึ่งมีขั้นตอนการสร้างที่น้อยกว่า ไม่มีข้อจำกัดเรื่องชนิดของวัสดุรองรับ สามารถเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขรูปแบบของการเตรียมขั้วไฟฟ้า และสามารถ

สร้างลวดลายของเส้นต่างๆที่มีขนาดในช่วง ที่น้อยกว่า 100 นาโนเมตรได้นั้นคือเทคโนโลยีโฟกัสไอออนบีม

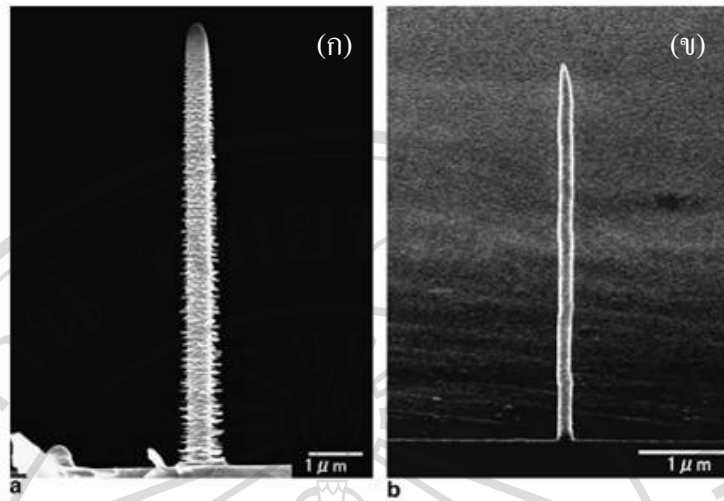
เครื่องโฟกัสไอออนบีม (Focused ion beam ,FIB) มีองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน คือ SEM และ Focused ion beam ทำให้เครื่อง FIB นี้เป็นเครื่องมือที่มีความสามารถในการมองเห็นภาพในระดับนาโนโดยการใช้ SEM (scanning electron microscope) และในขณะเดียวกันก็สามารถที่จะตัด เจาะ ใสชิ้นงานได้ด้วยลำไอออน ด้วยความสามารถดังกล่าวนี้ จึงทำให้เครื่อง FIB เปรียบได้กับโรงงานกลในระดับไมโครเมตร-นาโนเมตร ที่มีศักยภาพที่สูงอีกเครื่องหนึ่งในวงการวิทยาศาสตร์ในปัจจุบัน สามารถสร้างชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ต่างๆทางนาโนเทคโนโลยีได้ เช่น นาโนอุปกรณ์ (nanodevice) ได้ด้วยขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยาก และรวดเร็ว (5-7)

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างเส้นฟิล์มบางของทองคำขาวระดับนาโนด้วยโฟกัสไอออนบีม แล้วนำไปเป็นแนวทางสร้างขั้วไฟฟ้าทองคำขาวระดับนาโน และประยุกต์ใช้ขั้วไฟฟ้า เหล่านี้เพื่อเป็นเซ็นเซอร์ โดยได้ทดลองสร้างเซ็นเซอร์ทางชีวภาพ แบบแอมป์เปอร์โรเมตริก และเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซ และจากการศึกษาพบว่าเซ็นเซอร์ขนาดเล็กเหล่านี้สามารถใช้งานได้ดีพอสมควร ดังรายละเอียดที่จะได้นำเสนอในบทต่อไป

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การสร้างขั้วไฟฟ้า ด้วยเทคนิคโฟโตลิโทกราฟี และเทคนิค Focused Ion Beam Chemical Vapor Deposit (FIB-CVD) เพื่อประยุกต์ใช้ในการศึกษาสมบัติต่างๆ เช่นเซ็นเซอร์ชีวภาพ และเซ็นเซอร์ก๊าซเป็นต้น ที่หลากหลายแตกต่างกัน โดยตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปคร่าวๆ ได้ดังนี้

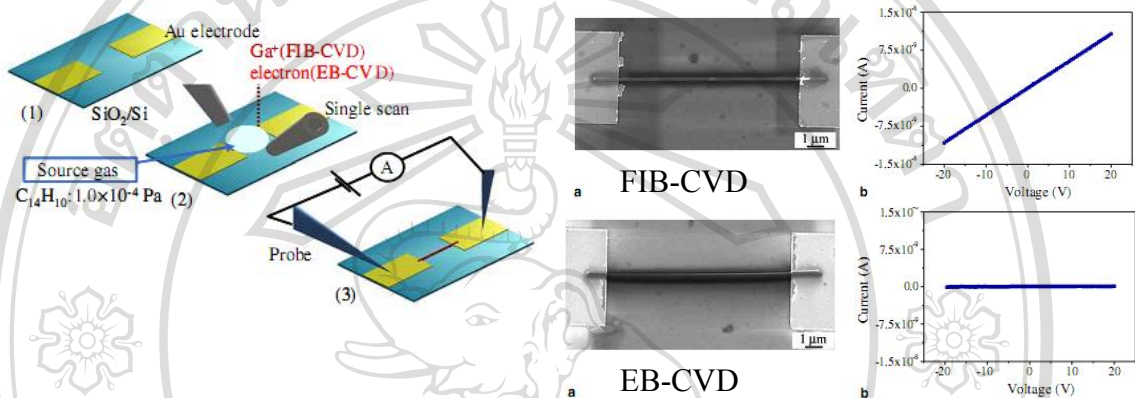
ในปี ค.ศ. 2006 Jun-ya Igaki และคณะ⁽⁸⁾ ได้รายงานการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของการงอกของ เทคนิค FIB-CVD กับ เทคนิค EB-CVD ภายใต้สภาวะแวดล้อมเดียวกัน โดยใช้พลังงานของลำไอออนที่ 5-30 kV แล้วค่ากระแสในช่วง 0.4-1 pA ของเทคนิค FIB-CVD และใช้พลังงานของลำไอออนที่ 5 kV แล้วค่ากระแสในช่วง 160 pA-2 nA ของเทคนิค EB-CVD



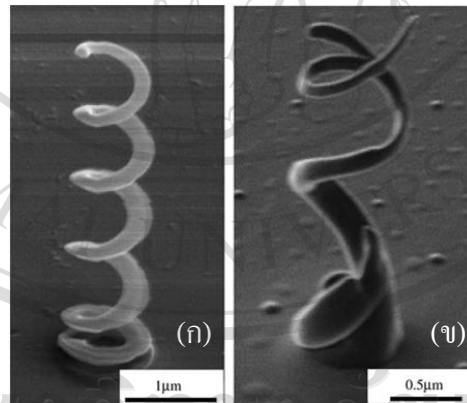
รูป 1.1 (ก) การสร้างรูปเข็ม โดยเทคนิค FIB-CVD และเทคนิค (ข) EB-CVD (8)

เพื่อการสร้างรูปเข็ม โดยเทคนิค EB-CVD มีขนาด 160 nm ยาว 4.15 μm มีลักษณะผิวเรียบ และเทคนิค FIB-CVD มีขนาด 290 nm ยาว 7.96 μm มีลักษณะผิวขรุขระมีโครงสร้างเหมือนเข็มเล็กๆ พอกบนแท่งแข็งเนื่องจากเกิดการพอกซ้ำ (re-deposition) ของพลังงานต่ำ ซึ่งเทคนิค EB-CVD จะไม่มีปรากฏการพอกซ้ำ

ในงานวิจัยของ Igaki นี้ได้ทำการพอกเส้นนาโนคาร์บอนระหว่างขั้วไฟฟ้าทองคำที่ซึ่งเตรียมด้วยเทคนิค EB-lithography หนา 200 nm บนแผ่นรองรับซิลิกอน ลำดับต่อมาได้สร้างเส้นนาโนคาร์บอนเชื่อมระหว่างขั้วไฟฟ้าทองคำที่ได้เตรียมไว้ สุดท้ายทำการวัดค่า I-V ระหว่างสองขั้วไฟฟ้าทองคำ ผลการวัดค่า I-V ดังรูป 1.2 สำหรับเส้นต้นฐานของคาร์บอน โดยเทคนิค FIB-CVD และ EB-CVD ที่ 5 kV ค่ากระแส 1 pA ความยาวของเส้น 11.7 μm และความกว้างเป็น 380 nm สามารถวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเส้นที่ทำด้วยเทคนิค FIB-CVD เท่ากับ 380 Ωcm เท่ากับค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ 1.9 G Ω สำหรับเส้นที่ทำด้วยเทคนิค EB-CVD ใช้ค่า 5 kV ค่ากระแส 160 pA ความยาวของเส้น 11.7 μm และความกว้างเป็น 310 nm เพื่อวัดค่าการนำไฟฟ้า ผลที่ได้บ่งบอกถึงเส้นคาร์บอนที่ถูกรสร้างโดย FIB-CVD มีสมบัตินำไฟฟ้าแต่เส้นที่ถูกรสร้างโดย EB-CVD มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า อัตราส่วนของอะตอมซึ่งวิเคราะห์ด้วย SEM และ EDX พบว่าเส้นของ FIB-CVD ประกอบด้วย C 97% และ Ga 3% แต่เส้น EB-CVD ประกอบด้วย C เพียงอย่างเดียว จากการวิเคราะห์ด้วย SEM และ EDX พบว่าความแตกต่างการนำไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ Ga ที่มีอยู่ในองค์ประกอบ



รูป 1.2 เส้นนาโนคาร์บอนเชื่อมระหว่างขั้วไฟฟ้าทองคำโดยเทคนิค FIB-CVD และ EB-CVD (8)



รูป 1.3 แสดงโครงสร้างสามมิติรูปสปริงนาโนที่สร้างโดย (ก) เทคนิค FIB-CVD

และ (ข) เทคนิค EB-CVD (8)

การสร้างโครงสร้างสามมิติรูปสปริง เป็นการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบการสร้างโครงสร้างสามมิติในรูปสปริงนาโนโดยใช้เทคนิค FIB-CVD ที่ 5 kV ค่ากระแส 0.4 pA และ เทคนิค EB-CVD ที่ 5 kV ค่ากระแส 160 pA จากผลการทดลองพบว่าด้วยเทคนิค FIB-CVD สามารถสร้างโครงสร้างสามมิติของสปริงนาโน ได้ดีกว่าเทคนิค EB-CVD เพราะ ที่พลังงานของอนุภาคเท่ากันนั้น อนุภาคไอออนจะมีความเร็วต่ำกว่าอิเล็กตรอนประมาณ 370 เท่า ดังนั้น การทะลุผ่านของ

อนุภาคไอออนจาก FIB จึงมีค่าต่ำกว่า โดยอยู่ที่ความลึกประมาณ 10 nm หรือน้อยกว่า ในขณะที่ การทะลุผ่านของอิเล็กตรอนจาก EB จะมีค่ามากกว่า 10 μm

ในปี ค.ศ. 2001 **J. Melngailis**⁽⁹⁾ ได้รายงานการศึกษาแหล่งไอออนสำหรับการประดิษฐ์ ระดับนาโนเมตรและความแยกชัดที่สูงสำหรับ Lithography ซึ่งได้เปรียบเทียบแหล่งของไอออน แบบต่างๆ สำหรับ ระบบโฟกัสไอออนบีมได้แก่ ระบบแบบ Liquid metal ion sources (MLIS), Gas field ion source และ Volume plasma sources พบว่าระบบ Gas field ion source มีความพิเศษที่ใช้พลังงานในการ spread น้อยที่สุดประมาณ 1 eV และมีขนาดของ virtual source size 0.5 nm

ในปี ค.ศ. 2002 **Y.V. Kervennic และคณะ**⁽¹⁰⁾ ได้รายงานการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของ ขั้วไฟฟ้าสองขั้วมีพื้นที่ห่างกันระยะต่างๆในระดับนาโนเมตร โดยได้ประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าทองคำขาว บนแผ่นรองรับ SiO_2 ที่มีพื้นที่ห่างกันของสองขั้ว 20 nm ด้วยเทคนิค EB lithography ก่อน แล้ว ใช้วิธีการพอกด้วยไฟฟ้าเคมี ของสารละลาย K_2PtCl_4 0.1 mol กับ H_2SO_4 0.5 mol ช่วง แรงดันไฟฟ้า -1.8-+0.7 V จะได้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าขนาด 20, 10, 5 และ 3.5 nm ตามลำดับ แล้วทำการวัดสมบัติทางไฟฟ้า IV ของขั้วไฟฟ้าระยะห่างกันขนาด 3.5 nm ได้ค่าความต้านทาน ไฟฟ้าในช่วง 100 M Ω -10 G Ω ที่อุณหภูมิห้อง และค่า The theory of coulomb blockade $2E_c=580$ meV

ในปี ค.ศ.2006 **K.Shigeto และคณะ**⁽¹¹⁾ ได้ศึกษาการสร้างแบบจำลองของขั้วไฟฟ้าสองขั้ว ห่างกันระดับนาโนเมตรสำหรับวัดโมเลกุลเดี่ยว โดยใช้เทคนิค FIB-CVD และตรวจจับการส่งผ่าน ของกระแสไฟฟ้า โดยพอกขั้วไฟฟ้าชนิดทั้งสองสแตนด์ระหว่างช่องว่างสองขั้วขนาด 1-2 μm ใช้เทคนิค FIB-CVD ของระบบเครื่อง SMI2050 SII พอกให้สองขั้วเข้าหากันในอัตราการใช้ที่เท่ากัน ซึ่งได้ ขั้วไฟฟ้าที่เข้าใกล้กันน้อยกว่า 2 nm บนแผ่นรองรับบางๆของซิลิกอนไนไตรด์บนซิลิกอน ได้วัด คุณสมบัติทางไฟฟ้า IV-Curve ได้ค่าความต้านทานไฟฟ้าน้อยกว่า 10 G Ω ค่าพลังงานที่ได้จาก ขั้วไฟฟ้าระยะ 2.7 nm เท่ากับ 0.28 eV และ ระยะ 1.8 nm เท่ากับ 0.38 eV ตามลำดับ

ในปี ค.ศ. 2005 **K. Ueno** และคณะ⁽¹²⁾ ได้ประดิษฐ์และศึกษาสมบัติไฟฟ้าเคมีของขั้วไฟฟ้านาโน แบบแถว Interdigital โดยการสร้างขั้วไฟฟ้าแบบแถว Interdigital ที่มีระยะขั้วไฟฟ้าทองคำห่างกันตั้งแต่ 30 nm – 1 μ m บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจก ด้วยเทคนิค EB lithography จำนวน 20 เส้น ขนาดกว้าง 50-100 nm แต่ละเส้นห่างกัน 30-500 nm ซึ่งถูกนำไปวัดขนาดความหนาด้วยเทคนิค Atomic Force Microscope (AFM) ขั้วไฟฟ้างี้มีความหนาประมาณ 140 nm จากนั้นนำไปศึกษาสมบัติไฟฟ้าเคมีเพื่อจะนำไปประยุกต์ใช้สัคย์ไฟฟ้าเคมีในระดับเซลล์ได้

ในปี ค.ศ. 1999 **A.F. Morpurgo** และคณะ⁽¹³⁾ ได้รายงานการควบคุมการประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าโลหะระดับอะตอม ได้สร้างขั้วไฟฟ้าสองขั้วด้วยโลหะ Ti/Au ขนาด 15 nm/35 nm ตามลำดับ ด้วยเทคนิค EB lithographic ได้ระยะห่างระหว่างสองขั้วไฟฟ้า ในช่วง 50-400 nm บนแผ่นรองรับของซิลิกอน และการพอกด้วยไฟฟ้าเคมี ของสารละลาย $\text{KAu}(\text{CN})_2$ 0.01 mol กับ KHCO_3 0.2 mol ช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.5- 0.6 V กระแส 2-3 μ A จะได้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าขนาดประมาณ 5 nm ถึง 20 nm ค่าความต้านทานไฟฟ้าถูกวัดแบบไฟฟ้ากระแสสลับ ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ 5 nm เท่ากับ 30 G Ω

ในปี ค.ศ. 2002 **J. Park** และคณะ⁽¹⁴⁾ ได้รายงานการหาสมบัติของไฟฟ้าโมเลกุลบนขั้วไฟฟ้าทองคำนาโนซึ่งสร้างขึ้นด้วยเทคนิค EB lithography ขนาดกว้างน้อยกว่า 200 nm ยาว 200-400 nm และหนา 10-15 nm บนแผ่นรองรับ ซิลิกอน แล้วทำการพอกด้วยไฟฟ้าเคมีได้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า ประมาณ 1-2 nm แล้วศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า IV-Curve

สำหรับการพัฒนาเซ็นเซอร์ชีวภาพ

ในปี ค.ศ. 2005 **Glaudia Menozzi** และคณะ⁽¹⁵⁾ ได้รายงานว่าใช้เครื่องโฟกัสไอออน빔สร้างปลายเข็มระดับนาโนขึ้นเพื่อนำไปใช้ใน Electric Force Microscopy โดยได้ปรับปรุงกระบวนการด้วยวิธีการเซาะและพอกโลหะ Pt ซึ่งอาศัยระบบ GIS (gas injection system) จากแหล่งสารประกอบโลหะ $(\text{CH}_3\text{CH}_5)(\text{CH}_3)_3\text{Pt}$ (methylcyclopentadienyl-tyumethyl-platinum) เป็นโมเลกุลของสารประกอบ metal-organic ด้วยโฟกัสไอออน빔 ใช้พลังงานที่ 30 keV เพื่อที่จะทำปลายเข็มที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรขึ้น สำหรับทำเป็นเซ็นเซอร์ชีวภาพ

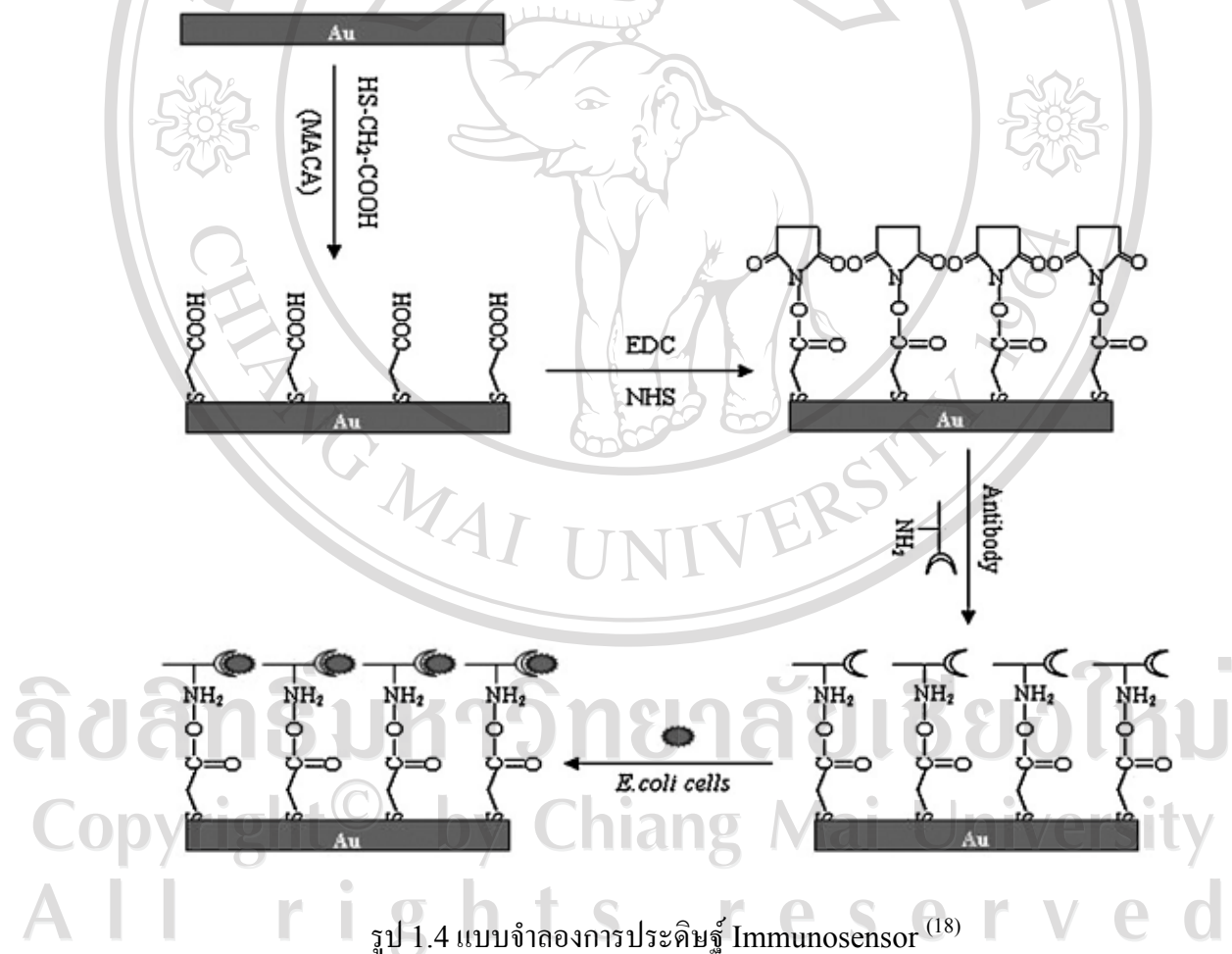
ในปี ค.ศ. 2005 Boris Lakard และคณะ⁽¹⁶⁾ ได้รายงานที่สามารถเตรียมเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่มีขนาดเล็กเพื่อมาประยุกต์ใช้ทางด้านชีววิทยา และทางเคมี ขั้วไฟฟ้าถูกสร้างขึ้น บนแผ่นรองรับโพลีเมอร์ ด้วยเทคนิคโฟโตลิโธกราฟี (photolithography) และ โฟกัสไอออนบีม (focused ion beam) เพื่อสามารถประยุกต์เป็นเซ็นเซอร์ชีวภาพต่อไป

ในปี ค.ศ. 2006 R. J. Faschig และคณะ⁽¹⁷⁾ ได้สร้างเข็มสำหรับวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าเคมี ของเซลล์จำนวน 1 เซลล์ โดยใช้เทคนิคโฟกัสไอออนบีมเจาะปลายเข็มให้เล็กในระดับ 50 nm เพื่อนำไปทดสอบวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของผนังเซลล์และความถี่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ และวัดความจุไฟฟ้าของเซลล์ เพื่อจะสร้างความเข้าใจทางด้านชีววิทยา

ในปี ค.ศ. 2008 Ping Geng และคณะ⁽¹⁸⁾ ได้รายงานว่าได้พัฒนาหัววัดเซ็นเซอร์ *E-coli* ด้วยความถี่ ไฟฟ้าเคมี แบบ Immunosensor ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

วิธีการทดลองของพวกเขาได้ทำหัววัดเซ็นเซอร์เป็นขั้วไฟฟ้าทองคำเป็นแผ่นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm โดยเริ่มจากการล้างผิวของขั้วไฟฟ้าด้วยสารละลาย Piranha (1:3 , ผสม 30% ของ H_2O_2/H_2SO_4 เข้มข้น 5 นาที ล้างด้วยเอทานอล น้ำ DI และ ทำให้แห้งด้วยไนโตรเจน แล้วทำ Immunosensor โดยจุ่ม ขั้วไฟฟ้า ในสารละลายเอทานอล 24 ชั่วโมง เพื่อจะให้ เป็น ขั้วทองคำแบบประกอบตัวเอง ชั้นเดี่ยว (SAMs) จากนั้นทำขั้นตอน Mercaptoacetic acid (MACA) โดยขั้วไฟฟ้าทองคำ ถูกเก็บไว้ใน 0.4 M 1-ethyl-3-(3-dimethylaminopropyl) (EDC) กับ 0.1 M N-hydroxysuccinimide (NHS) 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นล้างกับน้ำและตากให้แห้งลำดับต่อมาเคลือบ แอนติบอดี *E-coli* ปริมาณ 10 μ l ลงบนผิวของขั้วไฟฟ้าทองคำ และเก็บไว้ในที่อุณหภูมิ 4 °C ตลอดทั้งคืน เพื่อไม่ให้แอนติบอดีหลุดออกจากผิวขั้วไฟฟ้าจะการจุ่มเซ็นเซอร์ลงใน PBS buffer (pH 7.4) จำนวน 3 ครั้ง หลังจากนั้นแอนติบอดีบนขั้วไฟฟ้าจะถูกรักษาไว้ใน 1% BSA-PBS 1 ชั่วโมง เพื่อที่จะป้องกันการไม่ตอบสนอง และการไม่จำเพาะ สุดท้าย ขั้วไฟฟ้าจะถูกล้างด้วยน้ำ DI และทำให้แห้งด้วยไนโตรเจน ดังรูป 1.4 สำหรับการวัดไฟฟ้าเคมี ใน สารละลาย 10 ml ประกอบด้วย PBS 1 M (pH 7.0) $Fe(CN)_6^{3-}/Fe(CN)_6^{4-}$ 2.5 mM (1:1) วัดด้วย Cyclic Voltammetry (CV) ในช่วงค่า -0.2-0.8 V ในช่วงการสแกน 100 mVs^{-1} ที่อุณหภูมิห้อง การ

ตรวจวัด *E-coli* โดยกลุ่ม Immunosensor ลงใน *E-coli* ที่มีจำนวนต่างกัน 20 μL 3 ครั้ง และอุณหภูมิที่ 37°C 1 ชั่วโมง เพื่อจะให้ไม่จำเพาะต่อพันธะของโปรตีน และ เซลล์ แล้วเซ็นเซอร์ถูกจุ่มใน PBS(pH 7.4) 3 นาที 3 ครั้ง จากนั้น เซ็นเซอร์ ตรวจวัดกับ *E-coli* ใน สารละลาย 10ml ประกอบด้วย PBS 1 M (pH 7.0) $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}/\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ 2.5 mM (1:1) ใช้ความถี่ในการวัดในช่วง 10^1 - 10^5 Hz และศักย์ไฟฟ้า 220 mV และแรงดันไฟฟ้าอื่นที่ 0.5 mV สำหรับการนับจำนวน *E-coli* โดยการเลี้ยง *E-coli* บนอาหารเลี้ยงเชื้อ แล้วทำละลายลงจนถึง 10^7 cfu/ml แล้วหยดสารละลายตัวอย่างบนจานเลี้ยง 0.1 ml วางไว้ในอุณหภูมิ 37°C 48 ชั่วโมง สำหรับนับจำนวนในลำดับต่อไป

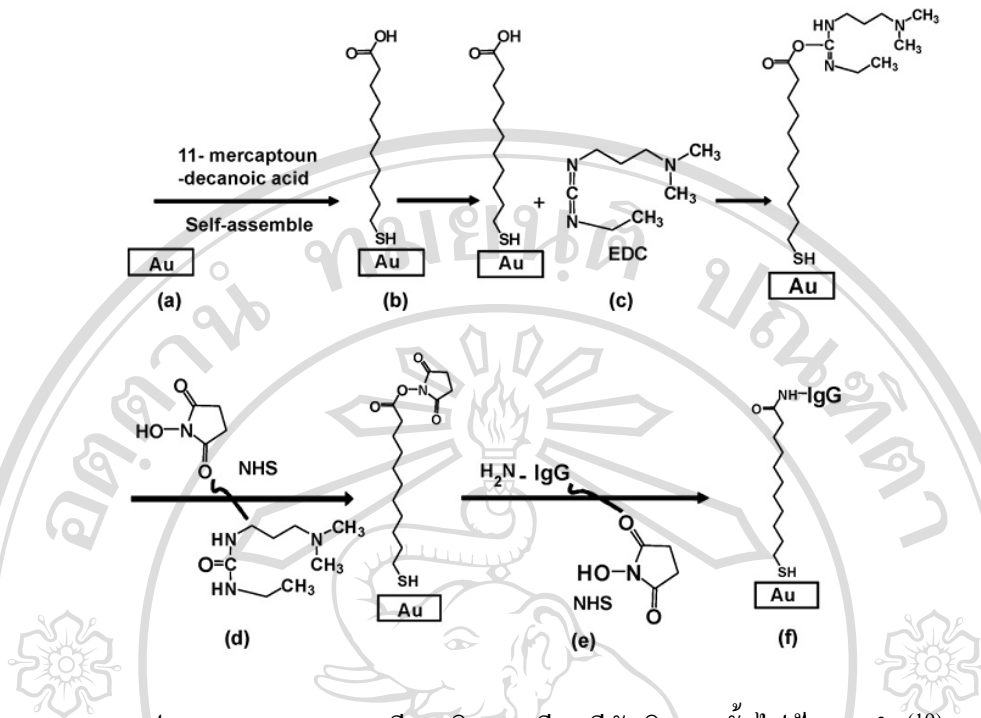


สรุปผลคือ หัววัดเซ็นเซอร์ *E-coli* ด้วยความถี่ ไฟฟ้าเคมี แบบ Immunosensor ถูกพัฒนาโดยติดแอนติบอดีของ *E-coli* บน ขั้วไฟฟ้าทองคำ ร่วมกับ EDC และ NHS เพื่อที่จะพัฒนาให้ได้การตอบสนองที่สูง และความแม่นยำที่ดีของเซ็นเซอร์ หัววัดเซ็นเซอร์ ถูกใช้ตรวจหาความเข้มข้น

ของ *E-coli* ใน $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}/\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ ซึ่งได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้ากับจำนวนของ *E-coli* สเกลแบบล็อกกาลีทิม ในช่วง $3 \times 10^3 - 3 \times 10^7$ CFU/ml ซึ่งแสดงให้เห็นขอบเขตการตรวจวัดอยู่ที่ 10^3 CFU/ml

ในปี ค.ศ. 2008 Lu, Y.C และคณะ⁽¹⁹⁾ ได้รายงานว่ สามารถตรวจวัดแบคทีเรียโดยใช้การนำไฟฟ้า ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

วิธีการทดลองของพวกเขานั้นได้ทำหัววัดเซ็นเซอร์เป็น ขั้วไฟฟ้าทองคำ แบบ interdigital อยู่เรียงกัน 200 เส้น แต่ละเส้นมีขนาดกว้าง $4 \mu\text{m}$ แล้ววางห่างกัน $2 \mu\text{m}$ ในพื้นที่ ประมาณ 1.2 mm^2 ซึ่งทำขั้วไฟฟ้าทองคำโดยใช้วิธีการทางแสง spin-coating photo resist (PR) ในการทำเป็นช่องและขั้วไฟฟ้าแบบ interdigital สำหรับขั้วไฟฟ้าทองคำนั้นใช้วิธีการ sputter ลงบนแผ่นรองรับเป็น SiO_2 แล้วนำขั้วไฟฟ้าทองคำที่เตรียมได้ไปเคลือบด้วย แอนติบอดีที่จำเพาะต่อ *E-coli* ด้วยกระบวนการทางเคมี ดังนี้คือ ชั้นแรกนำขั้วไฟฟ้าทองคำ ที่ถูกทำความสะอาดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ (organic) ได้แก่ acetone, ethanol และ สารละลาย Piranha ประกอบด้วยส่วนผสมของ H_2O_2 ผสมกับ H_2SO_4 1 นาที ล้างด้วย ethanol และทำให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน ชั้นที่สองเอาขั้วไฟฟ้าที่ได้จากชั้นแรกมาจุ่มลงใน ethanol 1 mM – กรด 11-mercaptoundecnoic 12 ชั่วโมง เพื่อให้มันสร้างชั้น Monolayer ขึ้นมา ชั้นที่สามนำขั้วไฟฟ้ามาทำต่อโดยล้างขั้วไฟฟ้าด้วย ethanol แล้วนำไปทำปฏิกิริยากับ N-hydroxysuccinimide (NHS) ชั้นที่สี่ล้างขั้วไฟฟ้าด้วยน้ำ DI และตากให้แห้งแล้วใส่ anti-rabbit IgG บนผิวของขั้วไฟฟ้าที่ 37°C 1 h จะได้ขั้วไฟฟ้าที่ติดกับแอนติบอดี ชั้นสุดท้ายนำไปทำปฏิกิริยากับ bovine serum albumin (BSA) 0.1% 35 นาที แล้วล้างเก็บไว้ใน phosphate buffer (PBS) ก่อนใช้ล้างด้วยน้ำ DI แล้วทำให้แห้งพร้อมที่จะวัด ดังรูป 1.5



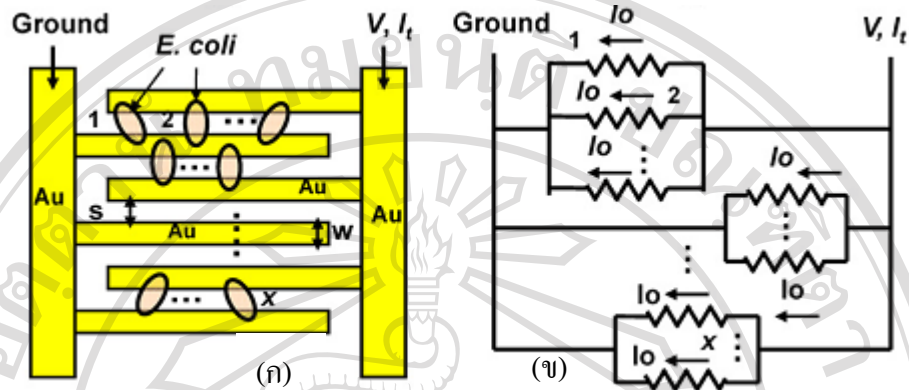
รูป 1.5 กระบวนการเคมีการติดแอนติบอดีกับผิวของขั้วไฟฟ้าทองคำ (19)

จากนั้นได้นำหัววัดไปวิเคราะห์พื้นผิวของขั้วไฟฟ้าทองคำด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) สำหรับหัววัดเซ็นเซอร์ ที่มี *E-coli* ติดอยู่บนช่องขั้วไฟฟ้าทองคำแบบ interdigital ถูกนำไปสังเกตด้วย กล้องจุลทรรศน์แบบแสง และยืนยันผลการนับจำนวนด้วย เครื่อง Atomic Force Microscopy (AFM) ตามลำดับ

การวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ลักษณะเป็น I-V Curves ของหัววัดเซ็นเซอร์ ในช่วงของแรงดันไฟฟ้า 0.1 V ถึง 1 V ที่มี *E-coli* ติดอยู่บนช่องขั้วไฟฟ้าทองคำแบบ interdigital โดยมีจำนวน *E-coli* ติดอยู่จำนวน 4 เซลล์ และ จำนวน 31 เซลล์ หัววัดเซ็นเซอร์ได้วัด I-V Curves กับ น้ำ DI และ กับแอนติบอดี ซึ่งการวัดค่าของ I-V Curves ได้แบ่งลักษณะการทำความสะอาดหัววัดเป็นสองอย่าง คือ แบบแรกคือหัววัดเซ็นเซอร์ถูกทำความสะอาดด้วย น้ำ DI 30 วินาที แล้วถูกอุ่นที่ 50 °C ในอากาศ แบบที่สองคือตากอากาศแห้ง 60 นาที

ผลการทดลอง ดังนี้ ลักษณะของพื้นผิวบนขั้วไฟฟ้าทองคำ มีความแตกต่างจากพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าทองคำที่ถูกเคลือบด้วยแอนติบอดีแล้ว และจากหัววัดเซ็นเซอร์ ที่มี *E-coli* ติดอยู่บนช่อง

ขั้วไฟฟ้าทองคำแบบ interdigital โดยมีจำนวน *E-coli* ติดอยู่ จะสังเกตเห็นว่า *E-coli* ติดอยู่ระหว่างช่องของเส้นบนขั้วไฟฟ้าทองคำ ซึ่งสามารถอธิบายได้ตาม รูป 1.6



รูป 1.6 (ก) การจำลองการกระจายเชื้อแบคทีเรีย *E-coli* และ (ข) วงจรไฟฟ้าของเซลล์ *E-coli* ที่ติดอยู่บนช่องขั้วไฟฟ้าทองคำแบบ interdigital ⁽¹⁹⁾

จากรูป 1.6 (ข) สมมุติให้ *E-coli* แต่ละตัวเป็นตัวต้านทานไฟฟ้า แล้วต่อขนานกัน มีจำนวนทั้งหมดเป็น x กระแสที่ไหลผ่าน *E-coli* เป็น I_0 ผลต่างของกระแส I_t จะได้ความสัมพันธ์คือ ผลต่างของกระแสจะเท่ากับผลคูณของจำนวนของ *E-coli* กับกระแสที่ไหลผ่าน *E-coli* ซึ่งจะมาจาก ผลต่างของกระแสที่วัดได้จากแอนติบอดีกับ *E-coli* บนขั้วไฟฟ้า กับกระแสที่วัดได้จากแอนติบอดีบนขั้วไฟฟ้าที่ยังไม่ได้ติด *E-coli* ลงไป ได้ตามสมการนี้

$$I_t = I_{\text{Antibody}+E\text{-coli}} - I_{\text{Antibody-Only}} = xI_0$$

จากการคำนวณหาค่าความชันจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้าคงที่ 0.5 V กับจำนวนของ *E-coli* 4 เซลล์ ในรูปแบบการทำความสะอาดหัววัดเซ็นเซอร์แบบอ่อน 1 นาที ได้ค่ากระแสของ *E-coli* ประมาณ 1.31 pA ต่อ 1 เซลล์ และในรูปแบบการทำความสะอาดหัววัดเซ็นเซอร์แบบอากาศแห้ง 60 นาที ประมาณ 1.22 pA ต่อ 1 เซลล์ แล้ว

ดังนั้นการนำไฟฟ้าของ *E-coli* สามารถวัดได้โดยการเพิ่มของกระแส จะบอกถึงจำนวนของ อิ-คอลลี ที่ติดอยู่ได้ เท่ากับ 1.26 pA ต่อ *E-coli* 1 เซลล์ ที่แรงดันไฟฟ้า 0.5 V ที่เป็นจุดสำคัญคือมีกระแสเริ่มต้นที่ต่ำ 0.7 pA หรือน้อยกว่าจาก น้ำ DI และแอนติบอดี ในกระบวนการวัดที่ อุณหภูมิหัววัดเซ็นเซอร์ที่ 50 °C ในอากาศ 1 นาที และมีความเสถียรของหัววัดเซ็นเซอร์มากกว่า 1 เดือน

หัววัดเซ็นเซอร์ก๊าซไฟฟ้าทองคำนี้ มีราคาถูก ขนาดเล็ก ให้ผลตามเวลาตรวจวัดจริงน้อยกว่า 3 นาที มีความจำเพาะ และตรวจวัดแบคทีเรียปริมาณน้อยได้

*หน่วยของจำนวนแบคทีเรีย เรียกว่า Colony forming unit (CFU) 1 CFU = 1 cell

สำหรับการพัฒนาเซ็นเซอร์ก๊าซ

ในปี ค.ศ. 2007 **Albert Romano Rodriguez** และคณะ⁽²⁰⁾ ได้รายงานที่สามารถสร้างเครื่องมือในระดับไมโครเมตรและนาโนเมตร สำหรับประยุกต์ใช้งานทางด้านต่างๆ ได้แก่ micro-inductor จากโลหะทองแดง และติดขั้วไฟฟ้าระดับนาโนเมตรสำหรับเซ็นเซอร์ก๊าซ สำหรับเส้นนาโนของ SnO₂ ในลักษณะเป็น 4 เส้นบนขั้วหัวท้ายของเส้นนาโน SnO₂ ด้วยเทคนิคการกัดเซาะและพอกผิวด้วยเครื่องฟอกสไอออนบีม ซึ่งได้ค่าความต้านทานไฟฟ้าวัดระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 จุดเท่ากับ 12.5 MΩ ค่าความต้านทานไฟฟ้าวัดระหว่างขั้วไฟฟ้า 4 จุดเท่ากับ 1.9 MΩ

ในปี ค.ศ. 2006 **F. Hernandez-Ramirez** และคณะ⁽²¹⁾ ได้รายงานที่สามารถเตรียมเซ็นเซอร์ก๊าซของ เส้นนาโน SnO₂ สำหรับวัดก๊าซ CO และความชื้น โดยใช้เทคนิคการพอกผิวด้วยเครื่องฟอกสไอออนบีม ในลักษณะเป็น 4 เส้นบนขั้วหัว-ท้ายของเส้นนาโน SnO₂ ซึ่งสามารถตรวจจับก๊าซ CO ได้ความเข้มข้นน้อยถึง 5 ppm

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาหาข้อจำกัดและเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างข้าวไฟฟ้าทองคำในระดับนาโนด้วยโฟกัสไอออน빔
2. เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมข้าวไฟฟ้า
3. เพื่อประยุกต์ใช้ข้าวไฟฟ้าทองคำขาวเป็นเซ็นเซอร์

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าเอกสารที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบและเตรียมสารเคมีและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง
3. ทำการหาเงื่อนไขของการสร้างข้าวไฟฟ้าทองคำขาวนาโนด้วยเครื่องโฟกัสไอออน빔
4. ศึกษาลักษณะของเส้นฟิล์มบางของทองคำขาวที่เตรียมได้ในเงื่อนไขต่างๆ
5. ทดสอบสมบัติการตรวจจับแบคทีเรียของเซ็นเซอร์ชีวภาพ
6. ทดสอบสมบัติการตรวจจับเซ็นเซอร์ก๊าซ กับก๊าซเอทานอล
7. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

1.5 ผลที่ได้จากการวิจัย

1. ได้ข้อจำกัดและเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างข้าวไฟฟ้าทองคำในระดับนาโนด้วยโฟกัสไอออน빔
2. สามารถนำเงื่อนไขที่เหมาะสมไปเตรียมข้าวไฟฟ้าได้
3. สามารถประยุกต์ใช้ข้าวไฟฟ้าทองคำขาวเป็นเซ็นเซอร์ *E-Coli* และเซ็นเซอร์ก๊าซเอทานอลได้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved