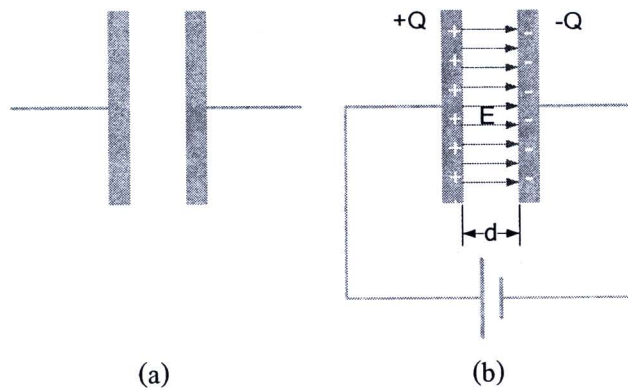


บทที่ 6

ความจุไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิกิตอล

6.1 ทฤษฎีและหลักพื้นฐานการเก็บประจุไฟฟ้า

เมื่อเรานำแผ่นตัวนำสองแผ่นวางขนานกันในสุญญากาศ แล้วป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับแผ่นตัวนำทั้งสอง ผลที่เกิดขึ้นคือ เกิดการสะสมประจุไฟฟ้าที่แตกต่างกันบนแผ่นตัวนำแต่ละแผ่น ดังแสดงในรูปที่ 6-1(ข)



รูปที่ 6-1 การเก็บประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน

จำนวนประจุไฟฟ้าที่สะสมบนแผ่นตัวนำแต่ละแผ่นจะมีความสัมพันธ์กับค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) และแรงดันไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำ (ΔV) ดังสมการที่ (6-1)

$$Q = C\Delta V \quad (6-1)$$

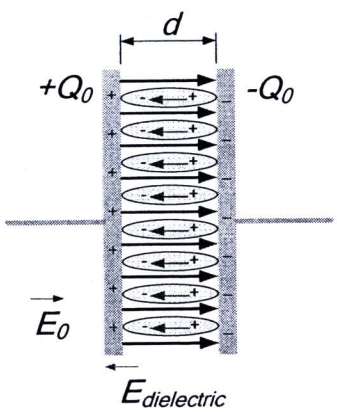
ในสุญญากาศ ค่าความจุไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของตัวเก็บประจุ (capacitor) เปรียบเสมือนการสร้างภาชนะสำหรับบรรจุปริมาตรหนึ่ง กรณีที่เป็นตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน (parallel plate capacitor) ค่าความจุไฟฟ้า (C) จะมีความสัมพันธ์กับค่าสภาพยอมให้เกิดประจุไฟฟ้าของสุญญากาศ (permittivity of free space) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.85 (pF/m) , พื้นที่ผิวของแผ่นตัวนำ (A) และ ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ (d) ดังสมการที่ (6-2)

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \tag{6-2}$$

ตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนานที่มีประจุไฟฟ้าต่างกัน จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำที่มีทิศทางออกจากแผ่นที่มีประจุบวกไปหาแผ่นที่มีประจุลบ โดยมีความสัมพันธ์กับ จำนวนประจุไฟฟ้า (Q) ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ (d) และค่าความจุไฟฟ้า (C) ดังสมการที่ (6-3)

$$\vec{E} = \frac{Q}{Cd} \tag{6-3}$$

ที่กล่าวมา เป็นการพิจารณาเฉพาะกรณีที่แรงสนามไฟฟ้าของตัวเก็บประจุตัดผ่านสุญญากาศเท่านั้น ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จึงขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของตัวเก็บประจุเป็นหลัก แต่หากเราเปลี่ยนจากสุญญากาศไปเป็นวัสดุอื่นที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า หรือที่เรียกว่า “วัสดุไดอิเล็กตริก” จะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นจากเดิม เนื่องจากแรงของสนามไฟฟ้าที่ตัดผ่านวัสดุไดอิเล็กตริก จะพยายามแยกอิเล็กตรอนและโปรตอนของวัสดุไดอิเล็กตริกออกจากกัน ในขณะที่อิเล็กตรอนและโปรตอนก็พยายามดึงตัวเองกลับสู่สภาวะเดิมเช่นกัน ความพยายามดังกล่าวทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในอะตอมของวัสดุไดอิเล็กตริก ($E_{\text{dielectric}}$) เรียกว่า”สนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำ” ดังแสดงในรูปที่ 6-2



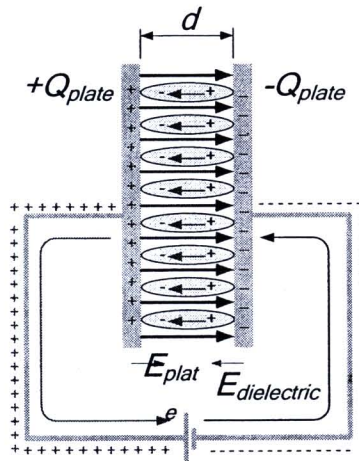
รูปที่ 6-2 สนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่มีทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าเดิม

หากตัวเก็บประจุดังกล่าวไม่ได้ต่อกับแหล่งจ่ายไฟ จำนวนประจุไฟฟ้าบนแผ่นตัวนำจะมีเท่าเดิม สนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำก็จะมีจำนวนเท่าเดิมตามไปด้วย (E_0) ดังนั้นผลรวมของสนามไฟฟ้าทั้งสองจะลดลง (เนื่องจากมีทิศทางที่ตรงข้ามกัน) สนามไฟฟ้ารวมที่ลดลงทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของ

ตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้น โดยค่าความจุไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น จะมีความสัมพันธ์กับจำนวนประจุไฟฟ้าเดิม (Q_0) ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ (d) และผลรวมของสนามไฟฟ้า ($\vec{E}_0 + \vec{E}_{dielectric}$) ดังสมการที่ (6-4)

$$C_{dielectric} = \frac{Q_0}{(\vec{E}_0 + \vec{E}_{dielectric})d} \quad (6-4)$$

ในกรณีที่ตัวเก็บประจุต่อกับแหล่งจ่ายไฟ สนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะทำให้จำนวนประจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยการดึงประจุไฟฟ้าเพิ่มเติมจากแหล่งจ่าย เพื่อรักษาสถาณภาพไฟฟ้ารวมให้มีค่าเท่าเดิม ($\vec{E}_{total} = \vec{E}_0$) ดังแสดงในรูปที่ 6-3



รูปที่ 6-3 ประจุไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากวัสดุไดอิเล็กตริก ส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

ค่าความจุไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นมีความสัมพันธ์กับผลรวมของจำนวนประจุไฟฟ้าใหม่ ($Q_0 + Q_{dielectric}$) ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ (d) และค่าสนามไฟฟ้าเดิม ($\vec{E}_0$) ดังสมการที่ (6-5)

$$C_{dielectric} = \frac{Q_0 + Q_{dielectric}}{\vec{E}_0 d} \quad (6-5)$$

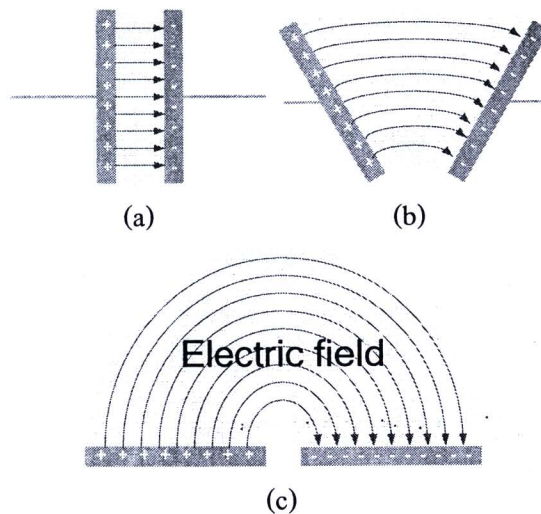
เมื่อพิจารณาเฉพาะกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน ค่าความจุไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากวัสดุไดอิเล็กตริก จะมีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) กับค่าความจุไฟฟ้าในสุญญากาศ (C_0) ดังสมการที่ (6-6)

$$C_{dielectric} = \epsilon_r C_0 \quad (6-6)$$



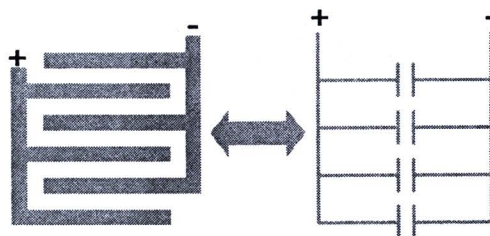
จากสมการที่ (6-6) จะสังเกตได้ว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุใดๆ (ϵ_r) จะไม่มีหน่วย แต่ใช้การเปรียบเทียบกับค่าสภาพยอมให้เกิดประจุไฟฟ้าของสุญญากาศ (ϵ_0) ซึ่งมีเท่ากับ 8.85 (pF/m) ดังนั้น ในกรณีที่ไดอิเล็กตริกเป็นสุญญากาศ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) จะมีค่าเท่ากับ 1

จากหลักการพื้นฐานของตัวเก็บประจุตั้งที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อเรานำตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนานที่มีประจุไฟฟ้าต่างกัน มาแยกออกจากกันในแนวระนาบ สิ่งที่เกิดขึ้นคือ ยังคงเกิดการสะสมประจุไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำ แต่จะมีค่าความจุไฟฟ้าลดตามระยะห่างที่เพิ่มขึ้น ผลจากการแยกแผ่นตัวนำออกจากกัน ทำให้สามารถวางวัสดุไดอิเล็กตริกได้หลากหลายขนาด โดยไม่ต้องเปลี่ยนโครงสร้างของตัวเก็บประจุใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 6-4(ค)



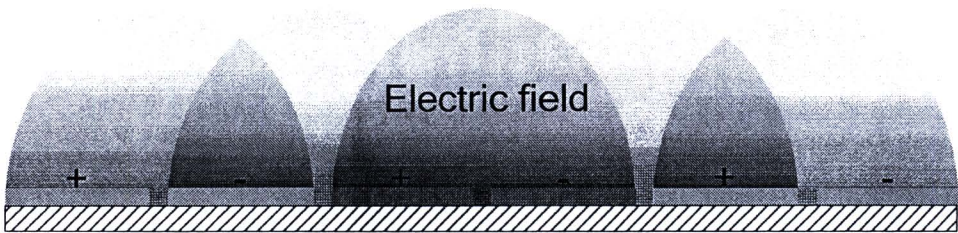
รูปที่ 6-4 สนามไฟฟ้าที่เกิดจากการแยกแผ่นตัวนำออกในแนวระนาบ

เมื่อเรานำแผ่นตัวนำที่ถูกแยกออกจากกันในแนวระนาบ มาต่อสลับไปมาระหว่างขั้วบวกและลบ ผลที่เกิดขึ้นคือ จะได้ค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นตามสัดส่วน เหมือนการนำตัวเก็บประจุมาต่อขนานกัน เรียกแบบนี้ว่า “อิเล็กโตรดแบบอินเตอร์ดิจิตอล” (Interdigital Electrode) ดังรูปที่ 6-5



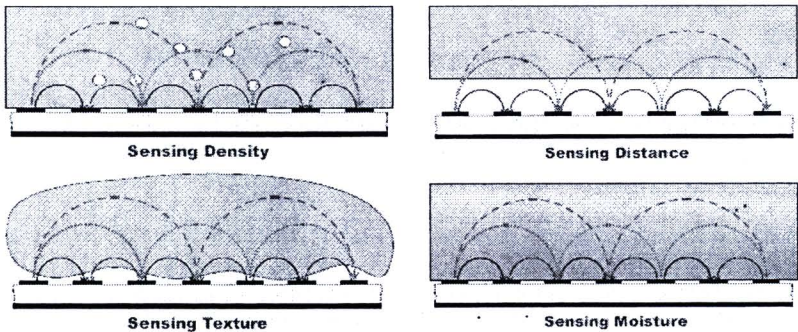
รูปที่ 6-5 โครงสร้างอิเล็กโตรดแบบอินเตอร์ดิจิตอล เหมือนการนำตัวเก็บประจุมาต่อขนานกัน

ผลของการสะสมประจุบนอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิตอล ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วตลอดความยาวของอิเล็กโทรด ดังแสดงในรูปที่ 6-6



รูปที่ 6-6 สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อมีการสะสมประจุ

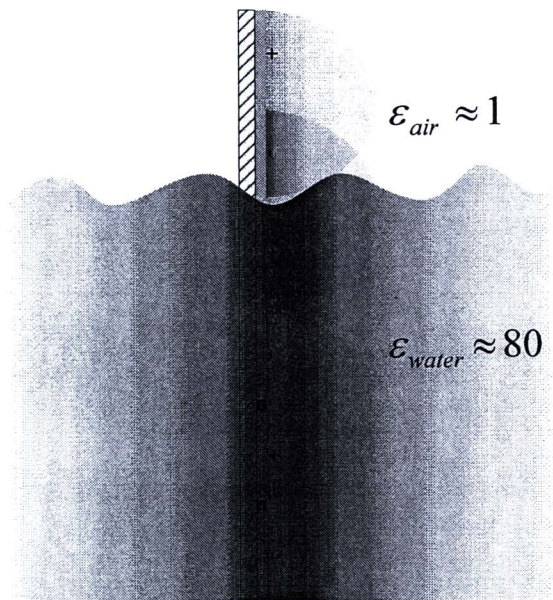
เมื่อเรานำวัสดุไดอิเล็กตริกวางบนอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิตอล สนามไฟฟ้าจากอิเล็กโทรดที่ตัดผ่านวัสดุไดอิเล็กตริก จะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเปลี่ยนแปลงไปตามคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ จากหลักการนี้ เราจึงสามารถนำอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิตอลมาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดค่าต่างๆ โดยอาศัยคุณสมบัติที่แตกต่างกันของวัสดุ เช่น การวัดความหนาแน่นของวัสดุ การวัดระยะห่างของวัสดุ การทดสอบความราบเรียบของวัสดุ และการวัดความชื้นในวัสดุ ดังตัวอย่างในรูปที่ 6-7



รูปที่ 6-7 การประยุกต์ใช้อิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิตอล สำหรับการตรวจวัดวัสดุแบบต่างๆ [24]

ด้วยความแตกต่างกันของน้ำและอากาศซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ต่างกันมาก (น้ำมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประมาณ 80 อากาศมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประมาณ 1) งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิตอลมาประยุกต์ใช้วัดระดับน้ำดังแสดงในรูปที่ 6-8 ภายได้สมมุติฐานที่ว่า เมื่อระดับน้ำเปลี่ยนแปลงไป จะส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเปลี่ยนแปลงตามระดับน้ำด้วย ซึ่งหากความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับค่าความจุไฟฟ้าเป็นไปใน

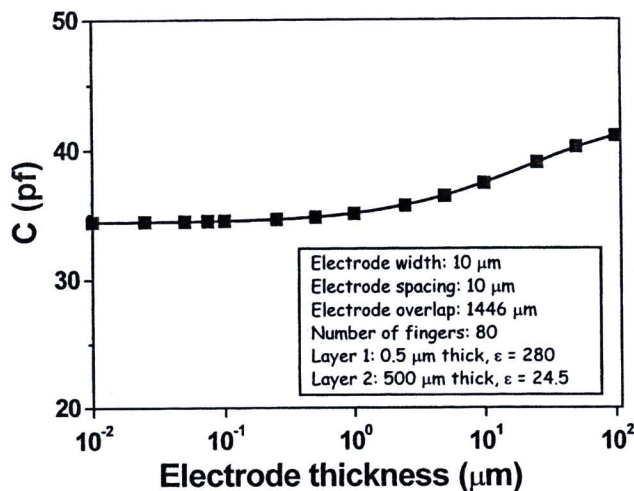
ลักษณะที่มีนัยสำคัญ ก็จะนำไปสู่การพัฒนาเซนเซอร์วัดระดับน้ำอีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งแตกต่างจากที่เคยมีการใช้งานทั่วไป



รูปที่ 6-8 การใช้อิเล็กโตรดแบบอินเตอร์ดิจิตอลวัดระดับน้ำ โดยใช้คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำที่มากกว่าอากาศ

จากการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมา การประยุกต์ใช้อิเล็กโตรดแบบอินเตอร์ดิจิตอลสำหรับนำมาทำเป็นเซนเซอร์ จะเน้นไปที่การวัดค่าคุณสมบัติเพื่อจำแนกชนิดหรือส่วนประกอบของวัสดุที่ทำการศึกษา เช่น การตรวจวัดสารพิษในอาหาร [24] , การตรวจวัดความชื้นของคอนกรีต [25] , การตรวจวัดความชื้นในอากาศ [26] , การตรวจวัดความแข็งแรงของกาวในอุตสาหกรรม [27] เป็นต้น การออกแบบอิเล็กโตรดเพื่อนำมาใช้งาน จำเป็นต้องศึกษาลักษณะโครงสร้าง รวมถึงวัสดุ ให้มีความเหมาะสมกับงานแต่ละประเภท แม้ที่ผ่านมายังไม่มีผลการศึกษาการนำอิเล็กโตรดไปประยุกต์ใช้วัดระดับน้ำ(ปี 2553) แต่ก็มีงานวิจัยที่นำอิเล็กโตรดแบบอินเตอร์ดิจิตอลไปประยุกต์ใช้ในงานด้านอื่นๆ ซึ่งได้ให้รายละเอียดเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของขนาด และวัสดุ ที่จะส่งผลต่อเอาต์พุตที่เป็นค่าความจุไฟฟ้า อันมีส่วนสำคัญสำหรับเป็นแนวทางในการออกแบบเพื่อนำไปประยุกต์ใช้วัดระดับน้ำ มีผลการศึกษาเบื้องต้นดังนี้

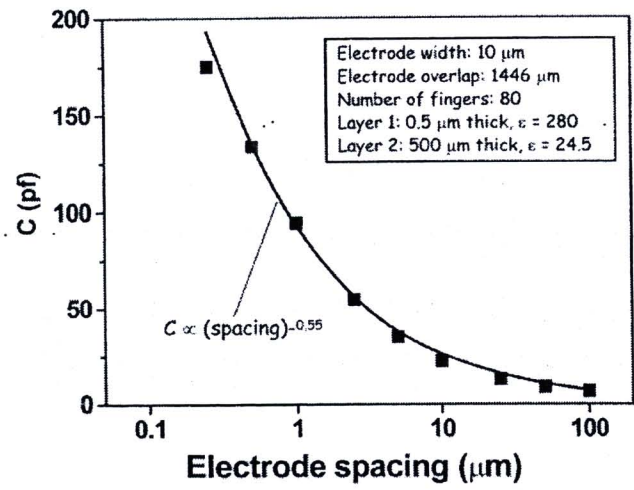
Y. Wang et al. [28] ได้ทำการศึกษาระยะห่าง ความกว้าง ความหนาของอิเล็กโตรด และความหนาของฉนวนเคลือบ โดยที่ความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้ากับความหนาของอิเล็กโตรดดังแสดงในรูปที่ 6-9



รูปที่ 6-9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิตอล และความหนาของอิเล็กโทรด [28]

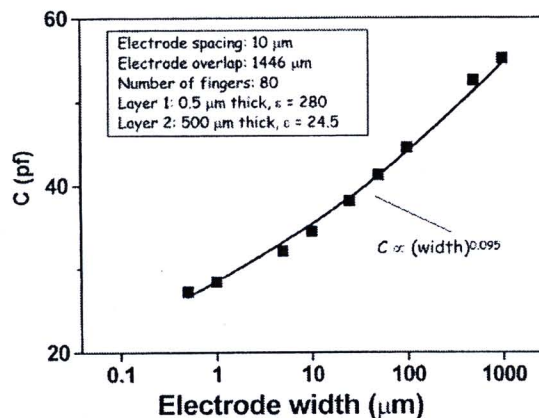
จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อความหนาของอิเล็กโทรดอยู่ระหว่าง 10 nm ถึง 1 μm ความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปมาก และเมื่อความหนาของอิเล็กโทรดมีค่ามากกว่า 1 μm ค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 20% เมื่อความหนาอิเล็กโทรดมีค่าเป็น 100 μm

ในส่วนความสัมพันธ์ของระยะห่างของอิเล็กโทรด และความจุไฟฟ้างแสดงในรูปที่ 6-10 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระยะห่างของอิเล็กโทรดส่งผลต่อความจุไฟฟ้ามาก โดยความจุไฟฟ้ามีค่าแปรผันไปตาม (ระยะห่าง)^α โดยที่ α < 1



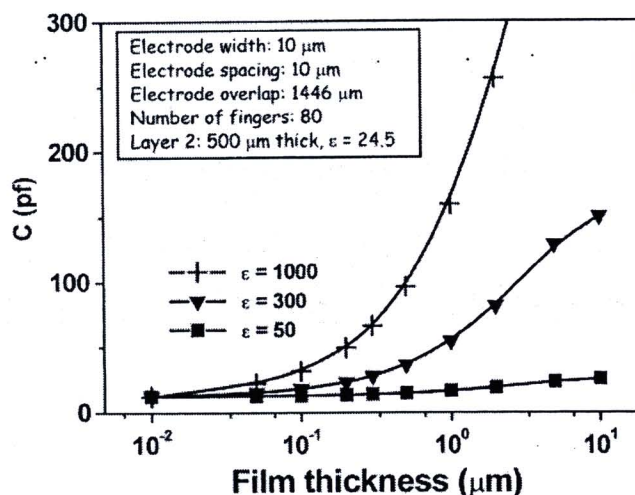
รูปที่ 6-10 ความสัมพันธ์ของระยะห่างของอิเล็กโทรด และค่าความจุไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตอล[28]

สำหรับความสัมพันธ์ของความกว้างของอิเล็กโทรด และค่าความจุไฟฟ้าดังแสดง
 ในรูปที่ 6-11 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อความกว้างของอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อค่าความจุไฟฟ้า
 เพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่น้อยลงมาก โดยค่าความจุไฟฟ้ามีค่าแปรผันไปตาม (ความกว้าง) ^{β} โดยที่
 $\beta \ll 1$ โดยในที่นี้ $\beta \approx 0.095$



รูปที่ 6-11 ความสัมพันธ์ของความกว้างของอิเล็กโทรด และค่าความจุไฟฟ้า[28]

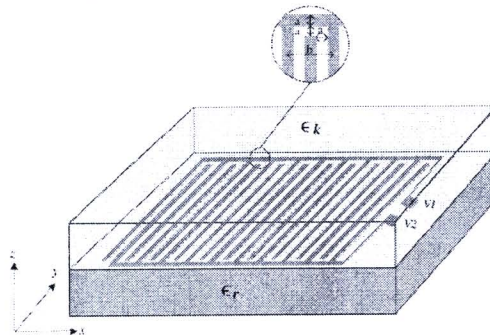
ความสัมพันธ์ของความหนาสารเคลือบผิวของอิเล็กโทรดที่มีค่าไดอิเล็กตริกต่างๆ
 กับค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดแสดงได้ดังแสดงในรูปที่ 6-12 ซึ่งเห็นว่าอิทธิพลของความหนา
 ในสารที่เคลือบผิวอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิตอลจะแปรไปตามคุณสมบัติของสารเคลือบผิว ถ้าค่า
 ไดอิเล็กตริกมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับวัสดุฐานรอง ค่าความจุไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามความหนาอย่าง
 เป็นเชิงเส้น เมื่อค่าไดอิเล็กตริกมีขนาดที่ใหญ่เทียบกับวัสดุฐานรอง ความจุไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่าง
 ยี่งวดเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น



รูปที่ 6-12 ความสัมพันธ์ของความหนาสารเคลือบผิวของอิเล็กโทรด
 ที่มีค่าไดอิเล็กตริกต่างๆกับค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรด[28]

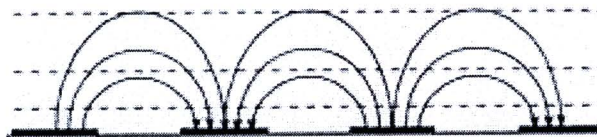
$$C_{PUc} = \epsilon_0 \frac{(\epsilon_m + \epsilon_s)}{2} \frac{K \left[\sqrt{1 - (a/b)^2} \right]}{K[a/b]} + \epsilon_0 \epsilon_a \frac{h}{a} \quad (6-7)$$

โดยที่ ϵ_0 ϵ_m ϵ_s และ ϵ_a เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของอากาศว่าง วัสดุทดสอบ วัสดุฐานรอง และอากาศตามลำดับ a เป็นขนาดความกว้างของลายซี่ b เป็นขนาดช่องห่างระหว่างซี่ และ h เป็นขนาดความหนาของซี่ตามแสดงในรูปที่ 6-14



รูปที่ 6-14 ลักษณะทางกายภาพของอิเล็กทรอนิกส์แบบอินเทอร์ดิจิตอล [25]

สำหรับ $K[a/b]$ เป็นปริพันธ์เชิงวงรีของมอดุลัส (elliptic integrals of modulus) เพื่อใช้หาค่าความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าเนื่องจากแนวของสนามไฟฟ้ามีลักษณะคล้ายวงรีดังรูปที่ 6-15



รูปที่ 6-15 รูปแบบของสนามไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์แบบอินเทอร์ดิจิตอลที่มีลักษณะคล้ายวงรี[30]

โดยปริพันธ์เชิงวงรีของมอดุลัสมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (6-8)

$$K(k) = \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{(1-v^2)(1-k^2v^2)}} dv \quad (6-8)$$

ค่าความจุไฟฟ้ารวมทั้งหมดของอิเล็กทรอนิกส์ $C_{electrode}$ หาได้จากสมการที่ (6-9)

$$C_{electride} = NLC_{PUc} \quad (6-9)$$

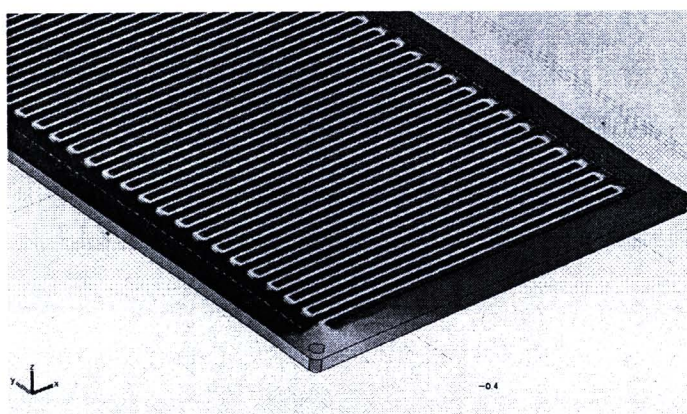
โดย L เป็นความยาวของลายซี่และ N เป็นจำนวนซี่ทั้งหมดของอิเล็กทรอนิกส์แบบอินเทอร์ดิจิตอล

6.3 การจำลองการทำงานของอินเตอร์ดิจิตอลเล็กโตรดด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics

หลังจากหาขนาดอิเล็กทรอนิกส์แบบอินเตอร์ดิจิตอลด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์จนได้ขนาดอิเล็กทรอนิกส์ตามค่าความจุไฟฟ้าตามที่ต้องการแล้ว การสร้างแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ (Simulation) เพื่อทดสอบและหาข้อผิดพลาดเบื้องต้นก่อนการสร้างต้นแบบจริง (Prototype) โดยในที่นี้เลือกใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics ในการจำลองการทำงาน ซึ่งจะใช้หลักการของ Finite element ในการพิจารณาแต่ละส่วนย่อย (Mesh) เพื่อหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในเคลื่อนย้ายประจุ จากนั้นนำค่าพลังงานที่ได้ไปคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าจากสมการที่ (6-10)

$$C = \frac{Q^2}{2W_e} = \frac{C^2 \Delta V^2}{2W_e} \Rightarrow C = \frac{2W_e}{\Delta V^2} \quad (6-10)$$

ΔV คือแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายประจุที่ถูกกำหนดภายในโปรแกรมโดยผู้ใช้ ซึ่งการจำลองการทำงานจะต้องทำการเขียนแบบของอิเล็กทรอนิกส์ตามขนาดจริง และต้องกำหนดชนิดของวัสดุ และคุณสมบัติให้ใกล้เคียงกับวัสดุที่ใช้จริงมากที่สุด แต่เนื่องโปรแกรม COMSOL ต้องใช้ทรัพยากรจากคอมพิวเตอร์ในการประมวลแต่ละครั้งสูงมาก และใช้เวลานาน ในการจำลองการทำงานครั้งนี้ จึงลดขนาดของอิเล็กทรอนิกส์ให้เหลือเพียง 10 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 6-16 เพื่อให้เหมาะสมกับประสิทธิภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่นำมาใช้งาน เมื่อผลที่ได้จากการจำลองการทำงานเป็นไปตามคุณสมบัติที่ต้องการแล้ว ก็จะเข้าสู่ขั้นตอนการจัดทำต้นแบบต่อไป



รูปที่ 6-16 การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม COMSOL เพื่อหาค่าความจุไฟฟ้าของอินเตอร์ดิจิตอลเล็กโตรดขนาด 10 เซนติเมตร