บทที่ 4

การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนแข็ง

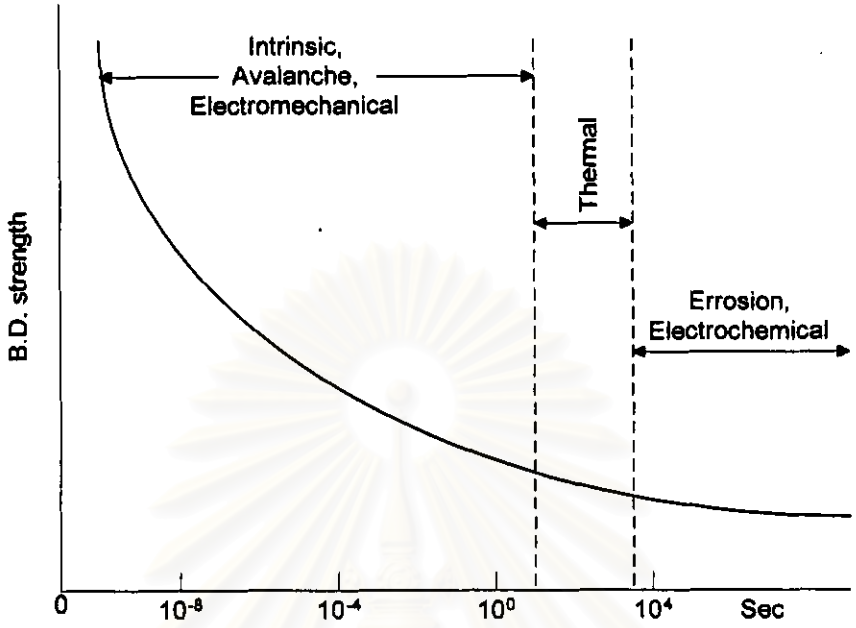
ฉนวนแข็งเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับงานฉนวนไฟฟ้าเพราะต้องใช้ฉนวนแข็งทำหน้าที่ยึดและรองรับแรงกลในขณะใช้งาน ฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่าฉนวนแข็งเป็นฉนวนที่สำคัญในระบบและอุปกรณ์ไฟฟ้า การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนแข็งจะต่างไปจากการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนกาซและฉนวนเหลว เนื่องจากฉนวนกาซสามารถกลับคืนสู่สภาพการฉนวนได้ดังเดิมภายในเวลาอันรวดเร็วหลังจากการเกิดเบรกดาวน์ ส่วนฉนวนเหลวก็เช่นเดียวกันกลับคืนสู่สภาพการฉนวนได้แต่อาจช้ากว่าฉนวนกาซ แต่ในฉนวนแข็งเมื่อเกิดเบรกดาวน์จะเสียสภาพการฉนวนอย่างถาวรนำกลับมาใช้งานอีกไม่ได้ การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนแข็งอาจจะแบ่งออกตามช่วงเวลาของแรงดันที่ป้อนและปรากฏการณ์ของการเกิดเบรกดาวน์ได้ดังนี้[10] คือ

1) เบรกดาวน์แบบบริสุทธิ์หรือแบบไอออนิค
2) เบรกดาวน์เนื่องจากแรงกลไฟฟ้า
3) เบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์
4) เบรกดาวน์แบบเทอร์มัล
5) เบรกดาวน์เนื่องจากผลทางเคมี
6) เบรกดาวน์เนื่องจากตีสชาร์จภายใน

กระบวนการเกิดเบรกดาวน์แบบต่าง ๆ จะเกิดในช่วงเวลาต่างกันดังรูปที่ 4.1 จะพบว่าการเกิดเบรกดาวน์แบบบริสุทธิ์หรือไอออนิค , แรงกลไฟฟ้าและสตรีมเมอร์ มีโอกาสเกิดโดยใช้เวลาในการเบรกดาวน์น้อยมากในหน่วยนาโนวินาที ซึ่งสอดคล้องกับช่วงเวลาการเกิดเจาะทะลุในลูกถ้วยฉนวนพอรซ์เลนที่ได้ทำการทดลอง ดังนั้นจึงขออธิบายเฉพาะการเกิดเบรกดาวน์ดังกล่าว

4.1 การเกิดเบรกดาวน์แบบบริสุทธิ์หรือแบบไอออนิค

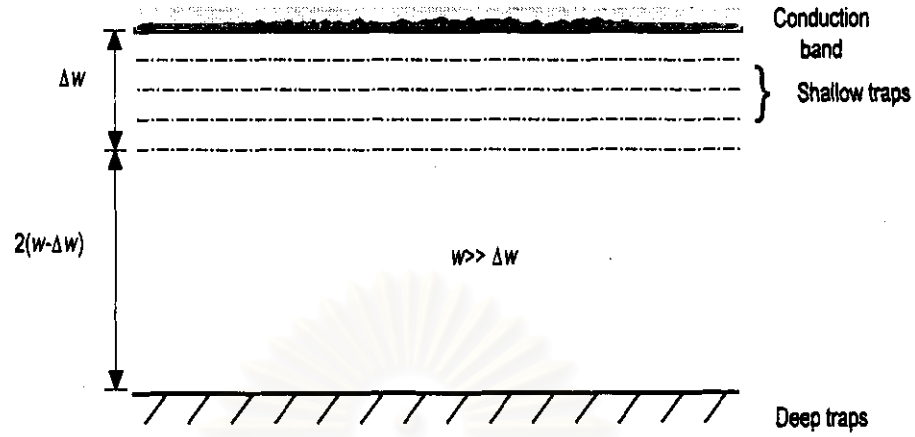
การเกิดเบรกดาวน์แบบบริสุทธิ์หมายถึงการเกิดเบรกดาวน์จากการป้อนแรงดันที่มีช่วงระยะเวลาสั้นมาก คือ ราว 0.01 ไมโครวินาที[10] และสนามไฟฟ้ามีค่าไม่ต่ำกว่า 10^6 V/cm[13] โดยที่เนื้อฉนวนมีความบริสุทธิ์ไม่มีสิ่งเจือปนและมีเนื้อเดียวสม่ำเสมอ (Homogenous)



รูปที่ 4.1 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนแข็งแปรตามช่วงเวลาป้อนแรงดัน[13]

การเกิดเบรกดาวน์แบบบริสุทธิ์ในฉนวนแข็งเป็นกระบวนการที่อิเล็กตรอนในฉนวนแข็งได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าที่มากเพียงพอที่ป้อนให้กับฉนวนแข็งทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานเพียงพอที่จะกระโดดข้ามช่องพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบนำไฟฟ้า ซึ่งเงื่อนไขหาได้จากสมการสมดุลย์พลังงานระหว่างอิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าที่ป้อนกับพลังงานที่สูญเสียให้กับแลตทิช แถบนำไฟฟ้าและแถบวาเลนซ์จะแยกห่างจากกันด้วยช่องว่างพลังงานแกป ที่อุณหภูมิห้องอิเล็กตรอนมีพลังงานไม่เพียงพอที่ผ่านแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบนำไฟฟ้าได้ จึงไม่มีความนำไฟฟ้าคือเป็นฉนวนอย่างสมบูรณ์ การเกิดเบรกดาวน์ลักษณะนี้จะต้องอาศัยการเพิ่มจำนวนของอิเลคตรอนอิสระแบบทวีคูณเท่านั้น[13]

โดยทั่วไปไม่มีฉนวนใดจะมีความบริสุทธิ์ไร้สิ่งเจือปน 100% ดังนั้นในฉนวนแข็งจะมีสิ่งเจือปนอยู่อาจจะอยู่ภายในโครงผลึกหรือภายในโครงผลึกเองมีความบกพร่องโดยขาดอะตอมบางจุดในโครงผลึก สิ่งเจือปนหรือความบกพร่องภายในโครงผลึกเหล่านี้เป็นตัวสร้างระดับพลังงานย่อยระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบนำไฟฟ้า ทำให้ระยะห่างระหว่างแถบวาเลนซ์ของสารเจือปนกับแถบนำไฟฟ้าห่างกันไม่มากนัก ดังรูปที่ 4.2 ดังนั้นอิเล็กตรอนได้รับพลังงานไม่มากนักก็สามารถขึ้นไปอยู่แถบนำไฟฟ้าได้ ส่งผลให้ฉนวนแข็งเริ่มนำกระแสไฟฟ้าตามมา ถ้าหากจำนวนอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำไฟฟ้ามีมากพอจะทำให้ฉนวนแข็งนำไฟฟ้าและเกิดเบรกดาวน์ขึ้น



รูปที่ 4.2 ภาพแถบวาเลนซ์และแถบนำไฟฟ้าของฉนวนโดยจะมีแถบของจุดบกพร่องแทรกอยู่[13]

สารประเภทที่มีโครงสร้างเป็นแบบผลึกจะเกิดเบรกดาวน์ตามแนวที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมน้อยที่สุดซึ่งมักจะสังเกตุเห็นว่าร่องรอยของการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนจะไม่เป็นเส้นตรง[10]

4.2 การเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากแรงกลไฟฟ้า

สนามไฟฟ้าที่ป้อนให้กับฉนวนแข็งนอกจากจะทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานเพิ่มขึ้นแล้วยังจะทำให้เกิดแรงอัดระหว่างด้านของผิวฉนวน เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากบริเวณผิวของฉนวนแข็งจะมีประจุอยู่ทั้งสนามไฟฟ้าเข้าและสนามไฟฟ้าออก จึงเกิดแรงดึงดูดขึ้นระหว่างประจุดังกล่าว ส่งผลให้เนื้อฉนวนแข็งได้รับแรงอัดตามมา ถ้าหากแรงกลไฟฟ้านี้เกินขีดจำกัดความคงทนต่อแรงอัดของฉนวนก็จะทำให้แตกสลายได้ โดยทั่วไปแรงอัดที่เกิดบนฉนวนแข็งจากสนามไฟฟ้ารวม1MV/cm จะมีค่าหลายกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร[10] สามารถคำนวณหาสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ทำให้เกิดแรงกลไฟฟ้าวิกฤตนี้ได้ดังต่อไปนี้

แรงอัดที่เกิดจากสนามไฟฟ้ายังอยู่ในสภาพสมดุลย์ได้ถ้า[10]

$$\varepsilon.E^2/2 = Y.\ln(d_o/d)$$

หรือ

$$U^2 = \frac{d^2.2.Y.\ln(d_o/d)}{\varepsilon} \qquad (4.1)$$

E คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า U/d (V/m) U คือ แรงดันที่ป้อน (V)

d คือ ความหนาของฉนวนขณะที่ได้รับแรงอัด (m) d_oคือ ความหนาเริ่มต้นของฉนวน (m)

ε คือ $\varepsilon_r\varepsilon_o$(F/m) Y คือ ยังโมดูลัสของฉนวน (N/m)

ความหนาของฉนวนจะลดลงเมื่อป้อนสนามไฟฟ้าหรือแรงดันเพิ่มขึ้น ดังนั้นหาค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าที่ยังคงทำให้เกิดความสมดุลย์โดยการดิฟเฟอเรนชิเอทสมการที่ (4.1) โดยเทียบกับ d จะได้

$$d_o / d = e^{0.5} = 1.67 \qquad (4.2)$$

ซึ่งหมายความว่ายังคงเกิดความสมดุลย์อยู่ถ้าหากอัตราส่วน d_o / d น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1.67 นำค่าจากสมการที่ (4.2) แทนกลับสมการที่ (4.1) จะได้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ยังคงทำให้เกิดความสมดุลย์โดยที่ฉนวนยังไม่แตกกระจาย [10]คือ

$$E_{max} = U/d_o = (1/1.67)(Y/\varepsilon)^{1/2} = 0.6(Y/\varepsilon)^{1/2} \qquad (4.3)$$

4.3 การเกิดเบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์[10]

ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอที่ได้จากอิเล็กโตรดฝังเข้าไปในเนื้อของฉนวนแข็ง เบรกดาวน์อาจเกิดขึ้นได้จากอะวาลานช์เดี่ยวของอิเล็กตรอนที่เป็นไปในลักษณะเดียวกับทฤษฎีสตรีมเมอร์ อิเล็กตรอนที่เข้าไปในแถบนำไฟฟ้าของฉนวนที่แคโทดจะเคลื่อนที่ไปหาแอโนดและได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าขณะเคลื่อนที่ไป ถ้าพลังงานที่ได้จากสนามไฟฟ้านี้เกินค่าพลังงานไอออไนเซชันของโครงสร้างผลึก(Lattice ionizing energy) จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมโครงสร้างผลึก โดยจำนวนอิเล็กตรอนอิสระจะทวีเพิ่มขึ้นเป็นอะวาลานช์และเบรกดาวน์จะเกิดขึ้นเมื่อจำนวนอิเล็กตรอนในอะวาลานช์มีจำนวนถึงค่าวิกฤต ในทางปฏิบัติการเกิดเบรกดาวน์มักจะไม่เกิดการดีสชาร์จเพียงครั้งเดียวหรือในแนวเส้นทางเดียวแต่จะมีลักษณะเป็นแบบหลายแนวเส้นทางจากการดีสชาร์จหลายครั้ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย