

การແຫทແທ้ชและดีແທ้ชของอีเล็คตรอนในอ็อกซิเจน

นิพนธ์ สุขุม* และประจักษ์ รื่นรมย์**

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

การวัดค่าของ α และ n ใหม่ได้ทำโดยวิธีของ Townsend ในอ็อกซิเจน เพื่อจะศึกษากระบวนการ δ สามารถสรุปได้ว่า การดีແທ้ชของอีเล็คตรอน จากไอออนลบ ของอ็อกซิเจนเกิดขึ้นน้อยมากสำหรับความดันมากกว่า 50 torr และ E/p (สนามไฟฟ้า/ความดัน) $< 45 \text{ v cm}^{-1} \text{ torr}^{-1}$ (ที่ 20° C) อย่างไรก็ตามวิธีของ Townsend แสดงให้เห็นว่า การวัดค่าของ δ สามารถทำได้อย่างแม่นยำ โดยเฉพาะที่ความดันต่ำ

* รองศาสตราจารย์

** นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

Electron Attachment and Detachment in Oxygen

Nipon Sukhum* and Prajak Raruenrom**

Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

New measurements have been made, by the Townsend method, of the a and n coefficients in oxygen in order to study the effect of electron detachment (δ) from negative oxygen ions. It is concluded that δ is negligible cf. η for pressures higher than about 50 torr and for E/p (electric field strength/pressure) $< 45 \text{ v cm}^{-1} \text{ torr}^{-1} (20^\circ \text{C})$. However, The Townsend method is capable of demonstrating and giving accurate values of δ , particularly at lower pressures.

* Associate Professor

** Graduate Student

บทนำ

นักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการแอทแท็ชที่ค่า E/p ต่ำๆ ในอ็อกซิเจน ($E/p < 25 \text{ v cm}^{-1} \text{ torr}^{-1}$ ที่ 20°C) ที่ความดันต่ำ ($p \sim 10 \text{ torr}$) โดยใช้วิธีอิเล็กตรอนฟิลเตอร์ และวิธีอิเล็กตรอนดิฟฟิวชั่น คำจำกัดความของ η ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์ของการแอทแท็ช นั้นหมายถึงจำนวนของการแอทแท็ชต่ออิเล็กตรอนต่อ ซม.ของการล่อง (drift) ผลของการศึกษาแสดงว่า ถึงจะมีการเข้ากันได้ ในค่าของ η/p แต่ สำหรับ $E/p \sim 8$ เนื่องจากค่านี้ไปมีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัด ในค่าของ η/p และรูปร่าง ของเคฟ

การทดลองต่อไปที่ค่า E/p สูงๆ (> 25) โดย Harrison และ Geballe [1] Prasad และ Craggs [2] และ Freely และ Fisher [3] ชี้ว่า η/p เป็นฟังก์ชันที่แปรอย่างช้าๆ กับ E/p และยืนยันผลของ Huxley และคณะ [4] การวัดที่ค่าสูงๆ ของ Dutton และคณะ [5] ให้ค่าที่ต่ำกว่าค่าของ Prasad และ Craggs 2 เท่า นอกจากนี้ เมื่อเร็วๆ นี้ Frommhold [6] ได้วัด η/p โดยวิธีอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ และได้ค่าที่ต่ำกว่าค่าการทดลองแบบ Steady State ยกเว้นค่าของ Dutton และคณะ การวัดของ Frommhold ชี้ให้เห็นว่ามีการดีแท็ชของอิเล็กตรอนมากสำหรับช่วงของความดันจาก 1-50 torr เมื่อเร็วๆ นี้ Prasad และ Craggs [7] ได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลของเขาใหม่ที่ความดันสูง ($p > 60 \text{ torr}$) และพบว่าแทบจะไม่พบการดีแท็ชของอิเล็กตรอนเลย ขณะที่การวิเคราะห์ข้อมูลของ Harrison และ Geballe [1] ให้สัมประสิทธิ์ของการดีแท็ชเกือบ เท่ากับสัมประสิทธิ์ของการแอทแท็ช คำจำกัดความของสัมประสิทธิ์ของการดีแท็ช δ คือ จำนวนของการดีแท็ชต่อไอออน ต่อ ซม. ของการล่อง

วิธีที่ใช้ในการหาค่าของ α/p , η/p , วิธีของ Townsend โดยนักวิจัยรุ่นหลังในที่นี้ α เป็นสัมประสิทธิ์อันแรกของ Townsend นั่นคือเป็นจำนวนของการไอโอไนซ์ต่ออิเล็กตรอนต่อ ซม.ของการล่อง การเพิ่มขึ้นของกระแสเริ่มแรกที่กะโถด ที่เกิดจากการฉายแสงซึ่งแทนด้วย I_0 (ธรรมดา $10^{-12} - 10^{-11} \text{ A}$) ถูกวัดเป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด d (ซม.) ในกรณีของก๊าซที่ไม่มีการแอทแท็ชเช่น ไฮโดรเจน การเพิ่มของกระแสภายใต้สภาพเช่นนี้ สำหรับค่าใดค่าหนึ่ง สามารถแทนด้วยสมการของ Townsend :

$$\frac{I}{I_0} = \frac{e^{(\alpha d)}}{1 - \gamma(e^{(\alpha d)} - 1)} \quad (1)$$

การพล็อตแบบ Semi-log ของกระแส I กับระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด จะให้ค่าของ α และซึ่งปริมาณอันหลังเป็นสัมประสิทธิ์อันดับที่สองของ Townsend อย่างไรก็ตาม ถ้าการ แอทแท็ชและดีแท็ชของอิเล็กตรอนเกิดขึ้นด้วยในก๊าซที่เราพิจารณา สมการข้างบนจะต้องถูกขยายเพื่อครอบคลุมปรากฏการณ์เหล่านี้ด้วย [8] ดังนั้น ถ้าเราไม่คำนึงถึง γ

$$\frac{I}{I_0} = R = \frac{I}{X_1 - X_2} \{ (X_1 + \eta + \delta)e^{(x_1 d)} - (X_2 + \eta + \delta)e^{(x_2 d)} \} \quad (2)$$

เมื่อ

$$X_1, X_2 = \frac{I}{2} \left[(\alpha + \eta + \delta) \pm \{(\alpha - \eta - \delta)^2 + 4\alpha\delta\} \right] \quad (3)$$

ดังนั้น

$$\frac{I}{I_0} = R = C_1 e^{(X_1 d)} - C_2 e^{(X_2 d)} \quad (4)$$

เมื่อ

$$C_{1,2} = \frac{X_{1,2} + \eta + \delta}{X_1 - X_2} \quad (5)$$

α และ η มีความหมายเหมือนเดิม ขณะที่ δ เป็นจำนวนของการตีแท็ชต่อไอออนต่อ ซม. ในทิศทางของการล่อง

วิธีการหาค่า α/p , η/p และ δ/p คือหาค่าของ X_2 ในสมการ (4) ก่อน คำนี้นทำได้จากความชัน (Slope) ของส่วนที่เป็นเส้นตรงของเคฟ $\ln I$ กับ d จากนั้น ส่วนที่เป็นเส้นตรงของเคฟจะถูกต่อกลับไปยังแกน $\ln I$ เพื่อหาค่า C_1 ซึ่งจะเท่ากับ I ที่จุดตัดหารด้วย I_0

สมการ (4) สามารถเขียนได้ในรูป

$$C_1 e^{X_1 d} - \frac{I}{I_0} = C_2 e^{X_2 d} \quad (6)$$

หรือ

$$C_1 e^{X_1 d} - R = C_2 e^{X_2 d} \quad (7)$$

R หาได้จากการวัดโดยตรงของ I และ I_0 (ดูหัวข้อที่ 3)

จากความสัมพันธ์นี้ จะเห็นว่าความชันของเคฟ ของ $\ln (C_1 e^{X_1 d} - R)$ กับ d จะให้ X_2 เมื่อทราบ X_1 , X_2 และ C_2 จะสามารถคำนวณ $(\eta + \delta)$ จากสมการ (5) ต่อไป

$$X_1 + X_2 = \alpha - (\eta + \delta) \quad (8)$$

ดังนั้น จะสามารถหา α และ δ ได้

$$X_1 - X_2 = \{(\alpha - \eta - \delta)^2 + 4\alpha\delta\}^{1/2}$$

ดังจะแสดงภายหลังว่าถ้า V เป็นโวลเตจที่ใช้การการใช้ความสัมพันธ์ $\ln I, V$ จะช่วยลดความไม่แม่นยำของ I_0 และดังนั้นจึงจะแสดงวิธีหา α, η และ Δ โดยใช้ความสัมพันธ์ $\ln I, V$

หากให้คำจำกัดความของประสิทธิภาพการไอโอไนซ์ว่า เป็นจำนวนของการไอโอไนซ์ต่อโวลต์ของความต่างศักย์ที่เดินทางผ่านโดยอิเล็กตรอน η' เป็นจำนวนของการแอทแท็ชต่อโวลต์ของความต่างศักย์ และ δ เป็นจำนวนของการดีแอทแท็ชต่อโวลต์ของความต่างศักย์ ที่เดินทางโดยอิเล็กตรอนและไอออนลบตามลำดับ จะได้ $\alpha = \alpha'E$ ฯลฯ สามารถแสดงให้เห็น E/p ค่าหนึ่ง และในกรณีที่ไม่มีขบวนการทุติยภูมิ (γ) ค่าหนึ่ง

$$\frac{I}{I_0} = R = \frac{1}{X'_1 - X'_2} \{ (X'_1 + \eta' + \delta') e^{(X'_1 V)} - (X'_2 + \eta' + \delta') e^{(X'_2 V)} \} \quad (9)$$

สมการที่ (9) สามารถเขียนได้เป็น

$$R = C'_1 e^{(X'_1 V)} - C'_2 e^{(X'_2 V)} \quad (\text{ดูสมการ (7) ข้างบน}) \quad (10)$$

$$X'_1 > X'_2 = \frac{1}{2} \left[(\alpha' + \eta' + \delta') + \{ (\alpha' - \eta' - \delta')^2 + 4\alpha'\delta' \}^{1/2} \right] \quad (11)$$

$$C'_1 = (X'_1 + \eta + \delta') (X'_1 - X'_2)^{-1} \quad (12)$$

และ

$$C'_2 = (X'_2 + \eta + \delta') (X'_1 - X'_2)^{-1} \quad (13)$$

ดังนั้นการพล็อต $\ln I$ กับ V ที่ค่า E/p และ d คงที่ จะให้เคฟที่ คล้ายกับเคฟที่ได้จากการพล็อต $\ln I$ กับ d ที่ค่า E/p และ p คงที่ พารามิเตอร์ที่ได้ จากเคฟในกรณีนี้ จะเป็น $X'_1, X'_2, \alpha', \eta'$ และ δ' จากค่าเหล่านี้ X_1, X_2, α, η และ δ จะสามารถหาได้

2. การทดลอง

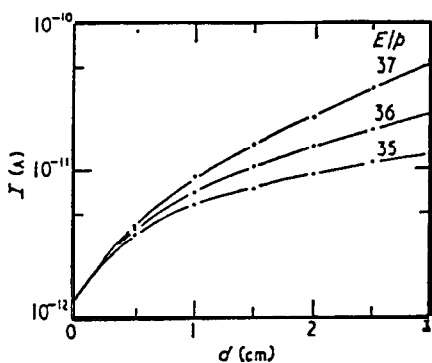
วิธีการหาค่าของ α, η และ δ ในการวิจัยนี้คือ วิธี Townseed Steady State การเพิ่มขึ้นของกระแส (กระแส Photoelectric) เริ่มแรก ≈ 1 pa ใน dark discharge ระหว่างอิเล็กโตรดที่ขนานกัน 2 อัน ถูกวัดขณะที่ระยะห่างถูกแปรอิเล็กโตรดถูกทำให้มีรูปร่าง เพื่อที่จะให้สนามระหว่างอิเล็กโตรดสม่ำเสมอมากที่สุดเท่าที่จะทำได้

3. เสถียรภาพ และวิธีหาค่าประมาณค่า I_0 และการวัดกระแสก่อนเบรคดาวน

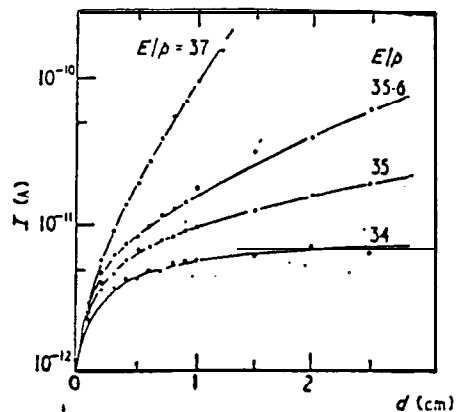
เนื่องจากเสถียรภาพของ I_0 มีความสำคัญอย่างยิ่งในการวัดกระแสก่อน เบรคดาวน ดังนั้น จึงจะทำการวัดซ้ำค่าของกระแส และพบว่าคาโอดทั้งสองจะปลดปล่อยอิเล็กตรอน และ

เมื่อทำการทดลองซ้ำ จะให้ค่ากระแสต่างจากเดิมเพียง 3% ถึง 5% ถ้าเราปล่อยให้หลอดอัลตราไวโอเล็ตวอร์มอัพ (Warm up) เป็นเวลาประมาณหนึ่งชั่วโมง และทำให้เสถียรภาพของการปลดปล่อยของคาโอดดีขึ้น โดยฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตลงไปยังคาโอดเป็นเวลาประมาณ 30-45 นาที ภายใต้สนามไฟฟ้าที่ต่ำ (20 ~ 30 โวลต์ ถึง 2-3 กิโลโวลต์ ขึ้นกับความดันของก๊าซ) การเปิดสปาร์คหรือการผ่านกระแสสูงๆ ($I < 10^{-8} \text{ A}$) ถูกหลีกเลี่ยงอย่างไรก็ตามเราพบว่า I_0 ที่ความดันต่างๆ กัน โดยใช้วิธีของ Prasad และ Craggs [2] ที่ $E/p = 5$ ค่าของ I_0 ที่ได้โดยวิธีนี้สามารถยืนยันได้อย่างหยาบๆ โดยการวัดกระแสก่อนเบรคดาวน์ ซึ่งจะได้ ค่าของ I_0 ได้ โดยการต่อเคฟ (Extrapolation) ออกไปยังแกน $\ln I$ โดยใช้เคฟสามเคฟ (จะให้รายละเอียดข้างล่าง) จากการพล็อตเคฟเช่นนี้ พบว่า 10 คาโอดที่เป็นแพลตตินัม I_0 ลดลงจาก $1.02 \times 10^{-12} \text{ A}$ ที่ $P = 2.0 \text{ torr}$ เป็น $7.5 \times 10^{-13} \text{ A}$ ที่ $P = 300 \text{ torr}$ ในกรณีของคาโอดที่เป็นของ I_0 ลดลงจาก $3.3 \times 10^{-12} \text{ A}$ ที่ 10 torr เป็น $2.1 \times 10^{-12} \text{ A}$ ที่ 75 torr และพบว่าหลังจากการทำความสะอาดคาโอดใหม่ๆ การปลดปล่อยลดลงเมื่อปล่อยทิ้งไว้ปรากฏการณ์ทั้งสองข้างบน ดูเหมือนจะยืนยันข้อเสนอของ Prasad และ Craggs ที่ว่าเกิดจากชั้นของออกไซด์บนคาโอดตั้งนั้น โดยการปล่อยให้คาโอดเสถียร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และการวัดกระแสครั้งหนึ่งใช้ เวลาเพียง 2-3 วินาที สามารถวัดกระแสซ้ำได้โดยมีความคลาดเคลื่อน 3-5 %

ต่อไปมาพิจารณาวิธีการหาค่า I_0 ในการทดลองนี้ วิธีนี้ดัดแปลงมา จากวิธีที่ใช้โดยการ Bibetto และ Fisher [9] และ Moruggi [10] ซึ่งการต่อเคฟของพล็อต (I, d) ที่เป็นเส้นตรงที่ $(E/p)_{lim}$ ให้กระแสไฟโตอิเล็กตริก I_0 Gebble และ Reeves [11] ได้แสดงว่าขณะที่ pd เพิ่มขึ้น ค่าของ E/p ที่เบรคดาวน์ (E/p) จะลดลงจนถึงค่าต่ำสุดค่าหนึ่งเรียกว่า $(E/p)_{lim}$ ซึ่งค่า $A = n$ ในการหาค่า I_0 ในงานเราพล็อต I vs d ที่ $(E/p)_{lim}$ และอีก 2 ค่าของ E/p ที่มากกว่าและน้อยกว่า $(E/p)_{lim}$ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากมีความไม่แน่นอนในค่าของ $(E/p)_{lim}$ เมื่อโวลเตจซ์พลาสมาไม่สูงพอ ดังนั้นการพล็อต $\ln I$ vs d ถูกกระทำที่ $E/p \sim (E/p)_{lim}$ และอีกสองค่าของ E/p มากกว่า และน้อยกว่า $(E/p)_{lim}$ อย่างไรก็ตามเป็นการง่ายที่จะหา I_0 อย่างแม่นยำโดยวิธีนี้



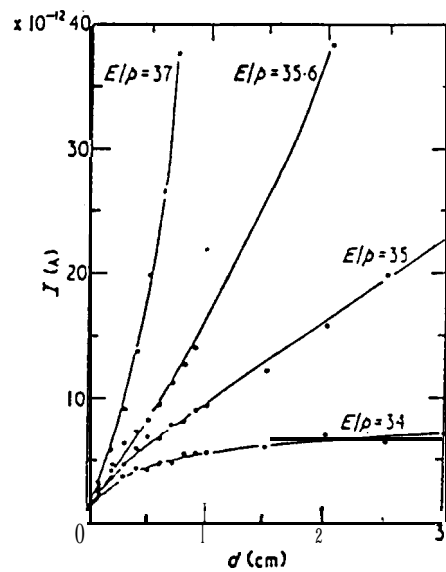
รูปที่ 1 กระแสเบรคดาวน์
ที่ $p = 50 \text{ torr}$



รูปที่ 2 กระแสเบรคดาวน์
ออกซิเจนที่ $p = 300$

การพล็อต (In I,d) ที่ P = 10, 20, 50, 75, 100, 150, และ 300 torr (ดูรูป 1 และ 2 สำหรับความดันต่ำและสูง) และการหา I_0 ถูกกระทำโดยวิธีพล็อต I vs d ที่ $3E/p$ ดังกล่าว ความแม่นยำโดยวิธีนี้จะประมาณ 5 % ที่ความดันต่ำ (<75 torr)

เนื่องจากในกรณีเหล่านี้ พล็อตของ I vs d มีความโค้งน้อย ขณะที่ความดันสูง (> 100 torr) สามารถกะประมาณค่า I_0 แม่นยำเพียง 10 % เนื่องจากความโค้งของพล็อต I vs d โดยเฉพาะที่ E/p ต่ำๆ (=34) และในช่วงต่ำของ d (0.01 - 1 ซม. ดูรูปที่ 3) มาก เพื่อให้ได้ความแม่นยำที่ดีของ I_0 ที่ $p = 300$ torr จึงจำเป็นที่จะต้องวัด I ต่ำลงจนถึง 0.1 ซม. จาก 1 ซม.

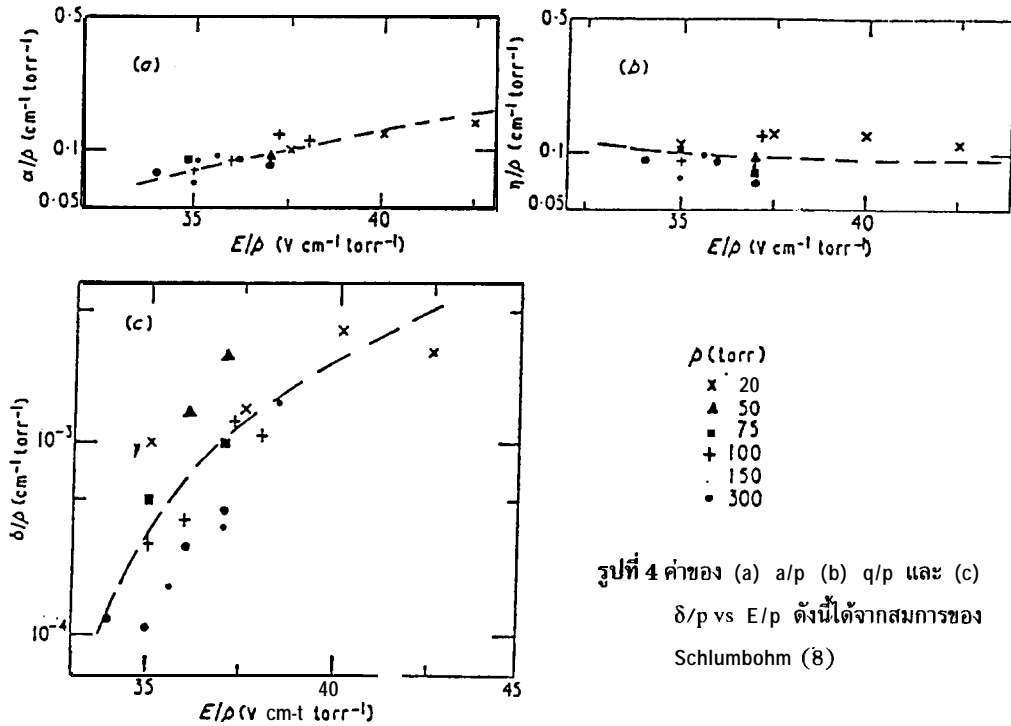


รูปที่ 3 การหาค่าของ I_0 ในอาร์กซิเจนที่ 300 torr

ระยะทาง d ที่ $p = 20$ torr ใช้จาก 0 ถึง 4 ซม. เนื่องจากการพิจารณา สมการที่ (4) แสดงว่าสามารถละทิ้งเทอมที่สองได้ต่อเมื่อ ระยะทาง d มากพอ

จะเห็นได้จากการวัดกระแสก่อนเบรคดาวนเหล่านี้ว่า พล็อตของ In, d แสดงความโค้งที่ d ต่ำๆ และสำหรับ p สูง และ d สูง เคฟจะเป็นเส้นตรงซึ่งเป็นไปตามสมการ (4) (X_1 เป็นบวก และ X_2 เป็นลบเสมอ)

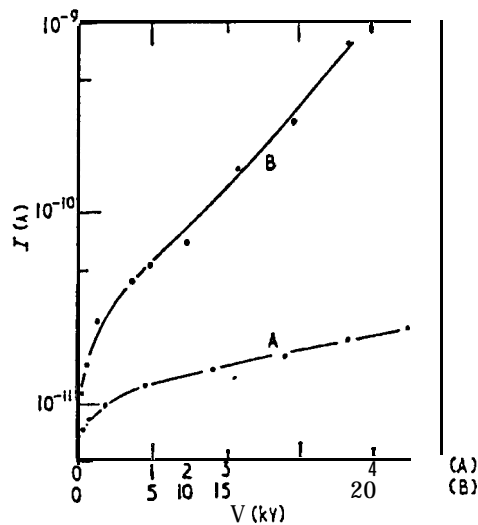
ผลของการวิเคราะห์กระแสก่อนเบรคดาวนที่ p อยู่ระหว่าง 20 และ 300 torr โดยใช้สมการ (4) ถูกแสดง ในรูปที่ 4 สำหรับ α , η และ δ



เนื่องจากความยุ่งยากที่เกิดขึ้นในการหา I_0 อย่างแม่นยำ และเพื่อจะได้สัมประสิทธิ์ของการไอไอไนซ์, แอทแท็ช และดีแท็ช ในอ็อกซิเจนที่แม่นยำมากกว่านี้ จึงตัดสินใจที่จะวัดกระแสก่อนเบรคดาวน์โดยวิธีใหม่ คือ ให้ E/P และ d คงที่ และแปรค่าความดัน (ดูสมการที่ 5)

4. การทดลองและผลการทดลอง

การวัดกระแสก่อนการเบรคดาวน์ถูกกระทำโดยใช้แพลตตินัม คาโธด พลีตของ In, v สำหรับวิเคราะห์ดูปลายหัวข้อที่ 1 สมการ (9) ที่ $E/p = 37$ และ $d = 0.5$ และ 2.0 ซม. สำหรับความดันแปรจาก 5 ถึง 300 torr ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 เคิฟ ($\ln I v$) ในอ็อกซิเจนที่ความดันจาก 5 ถึง 300 torr $E/p = 37 \text{ vcm}^{-1} \text{ torr}^{-1}$

เคิฟ A, $d=0.5$ ซม. : B, $d = 2.0$ ซม.

เคิฟ B ในรูปนี้ที่ประมาณ 10 kv นั่นคือ $p \approx 100$ torr (ที่ $E/p = 37$ $\text{vcm}^{-1} \text{ torr}^{-1}$) การดีแทซ์เริ่มเกิดขึ้นดังที่เป็นการ Inflex ขึ้นข้างบน

5. การวิจารณ์

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ดังแสดงในรูป 4(c) สำหรับ δ/p ซึ่งสำหรับ $E/p = 34-40$ $\text{vcm}^{-1} \text{ torr}^{-1}$ ที่ 20°C $\delta \ll \eta$ และสำหรับค่าที่สูงกว่าของ E/p (เช่น 47). ก็ยังน้อยกว่า $\eta/10$ ซึ่งอยู่ภายในความผิดพลาดเนื่องจากการทดลองสำหรับ η (ดูตารางข้างล่างด้วย) ที่ค่าสูงกว่าของ E/p และโดยเฉพาะที่ความดันต่ำๆ น้อยกว่า 50 torr δ จะตัดทิ้งไม่ได้ การแปรของ δ กับความดันที่ E/p คงที่แสดงในรูป 4(c) ความแตกต่างระหว่างข้อมูลของ Frommhold [6] กับของเราจึงเกิดขึ้น และเราสามารถจะอธิบายได้ดังต่อไปนี้

ที่ความดันต่ำ O^- ion (ความน่าจะเป็นของการดีแทซ์ มากพอสมควร) มีจำนวนมากกว่า ขณะที่ความดันสูงกว่า O_2^- และ O_3^- ion (ความน่าจะเป็นของการดีแทซ์น้อยกว่า) มีจำนวนมากกว่า ดังนั้นในการศึกษาของ Townsend ซึ่งกระทำที่ความดันสูง การดีแทซ์จึงไม่มีความสำคัญในความดันต่ำกว่า ของ Frommhold (ความดัน 10-50 torr) ปฏิกริยาเกี่ยวกับ ion ต่างๆ ที่ทำให้เกิดการแอทแทซ์ ดีแทซ์ และการเคลื่อนย้ายประจุได้ถูกพิจารณาอย่างย่อๆ ที่อื่น [12,13,14] ภายหลังการวิจัยโดย Burch และ Gealle [15] และคนอื่นๆ จึงไม่จำเป็นต้องกล่าวซ้ำอีก การวัดของ Bailey [16] ค่าของพื้นที่หน้าตัดของการดีแทซ์และการเคลื่อนย้ายประจุที่เกี่ยวข้องกับ O^- และ O_2^- ให้หลักฐานที่สำคัญ สำหรับความจริงที่ว่า O^- ดีแทซ์ง่ายกว่า O_2^- ข้อมูลสำหรับ ion ที่หนักกว่า เช่น O_3^- ยังต้องการอยู่อีกแต่ความต้องการพลังงานที่สูง ห้ามการดีแทซ์ของ O_3^- (พลังงานต่ำสุดที่ต้องการเป็น 7.5 ev ใการชนกับ O_2) นอกจากนี้ โดยการใช้ทฤษฎีความคล่องตัวของ Wannier (ดู [6] ค่า δ/p ที่คำนวณได้สำหรับ O^- ที่ $E/p = 30, 40$ และ 50 เป็น $3 \times 10^{-5}, 5 \times 10^{-3}$ และ 1.3×10^{-1} ซึ่งเข้ากันได้กับข้อมูลในตารางที่ 1 และรูปที่ 4 (c) นั่นคือมันเข้ากันได้กับข้อมูลอันหลังภายในความผิดพลาดทางการทดลองของข้อมูลอันหลัง

ตารางที่ 1

E/p	(vcm ⁻¹ torr ⁻¹)	p(torr)				ค่าเฉลี่ย ($\delta=0$)	ค่าเฉลี่ยของ Frommhold ($2 < p < 32$ torr)
		11.2	60	100	200		
35	α/p	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	-
	η/p	0.01	0.01	0.08	0.075	0.07	-
	δ/p	0.01	0.0009	0.00035	0.0029	-	-
42.5	α/p	0.13	0.14	-	-	0.13	0.05
	η/p	0.085	0.09	-	-	0.07	0.025
	δ/p	0.02	0.003	-	-	-	0.45

ค่าของ α/p , η/p และ δ/p ที่ความดันต่างๆ ซึ่งคำนวณได้จากข้อมูลของ Prasad และ Craggs [2] โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 1

Frommhold พบว่าสัมประสิทธิ์ δ/p ที่ใหญ่ของเขาไม่ขึ้นกับความดันสำหรับช่วง $2 < p < 32$ torr แต่การศึกษาครั้งนี้คาดหวังว่าการขึ้นกับความดันของ δ/p ในรูป 4 (c) และในตารางจะเกิดขึ้นถ้าอัตราส่วนของ $[O_2^- / O^-]$ เพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น

สุดท้าย ถ้าสมมติอย่างหยาบๆ ว่า O_2^- เท่านั้น เกิดขึ้นที่ $p > 100$ torr (ตัวอย่างของความดัน) โดยการชนกันกับอิเล็กตรอน ดังสมการข้างล่าง

$O_2 + \text{อิเล็กตรอน} \rightarrow O_2^- + \text{เทอมที่เกี่ยวข้องกับพลังงาน}$ ดังนั้น O^- จึงไม่เกิดขึ้นในความดันสูง ส่วนในความดันต่ำ O^- จะเกิดขึ้นดังนี้ $O_2^- \rightarrow O^- + O + \text{เทอมที่เกี่ยวข้องกับพลังงาน}$

เอกสารอ้างอิง

1. Harrison, M.A. and Geballe, R., *Phys. Rev.* **91**:1-7(1953.)
2. Prasad, A.N. and Craggs, J.D., *Proc. Phys. Soc* **71**:385-98(1961).
3. Freely, J.B. and Fisher, L.H., *Phys Rev.* **133**:A304-10(1964).
4. Huxley, L.G.H. Crompton, R.W. and Bagot, C.M., *Austr. J. phys.* **12**:303-8(1959).
5. Dutton, L. Elewlyn Jones, Fand Morgan, G.B., *Nature, Lond.* **198**:680-1(1963).
6. Frommhold, L., *Fortschr. Phys.* **12**:597-642(1964).
7. Prasad, A.N. and Craggs, J.D., *Electron. Letters.* **1**:118-9 (1965).
8. Schlumbohm, H., *Z. Naturf.* **16a**:510-2(1961).
9. De. Bilto, D.J. and Fisher, L.H., *Phys. Rev.* **111**:390-4(1958).
10. Moruzzi, J.L., *Brit. J. Appl. Phys.* **14**:929-30(1963)
11. Geballe, R. and Reeves, M.L., *Phys. Rev.* **92**:867-8(1953).
12. Prasad, A.N. and Craggs, J.D., *Electron. Letters.* **1**:188-9(1965).
13. Prasad, A.N. and Craggs, J.D., *Int. J. Electron.* **19**:69-74 (1965).
14. Prasad, A.N. 1966, *7th Int. Conf. on Phenomena in Ioniz Gases, Belgrade., 1965*, Vol. I (Belgrade : Gradevinska-Knjijiga) pp. 79-82
15. Burch, D.S. and Geballe, R., *Phys. Rev.* **106**:183-7(1957).
16. Bailey, T.D., 1962, Proc. 2nd Int. Conf. on Physics of Electronic and Ionic Collisions, Boulder U.S.A., 1961 (New York : Benjamin) pp54-8