หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

Electric Arc.

2.1 Physical Basic

วัตถุทั้งหลายประกอบขึ้นด้วย atoms ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กที่สุดประมาณ 10^{-8} cm. ถึงแม้ atom จะเล็กมากก็จริง เราก็ยังสามารถแบ่งออกได้อีกเป็น elementary particle เล็ก ๆ total mass ของ atom เกือบทั้งหมด ($H_2 = 1.6733 \times 10^{-24}$g, $U^{238} = 395.0324 \times 10^{-24}$g)[1] รวมอยู่ที่ central nucleus ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 10^{-12}cm นั่นคือเล็กกว่า atom 104 เท่า nucleus ซึ่งเล็กมากนี้ยังมีส่วนประกอบที่ซับซ้อนด้วย neutron และ proton ซึ่งทั้งสองอย่างมี mass เท่า ๆ กันประมาณ 1.675×10^{-24}g, และ 1.6723×10^{-24} g. neutron เป็น neutral ส่วน proton มีประจุไฟฟ้าบวก 1.632×10^{-19} coulomb neutron และ proton อยู่ติดกันที่ nucleus โดยแรงดึงของ nucleus ซึ่งปัจจุบันกำลังทำการค้นคว้ากันอยู่ atom nucleus ล้อมรอบด้วย electron ซึ่งเป็น quantum ของ electric charge ในธรรมชาติ ซึ่งมีจำนวนเท่ากับจำนวนของ proton แต่มีเครื่องหมายตรงข้าม ใน orbit ต่าง ๆ มี electron ซึ่งมีประจุไฟฟ้าลบ เท่ากับประจุไฟฟ้าบวกใน nucleus ของ atom ด้วยเหตุนี้ atom จึงเป็น neutral, electron หมุนรอบ nucleus เป็นรูป ellipse แต่ละ orbit รวมกันจะเป็น shell ล้อมรอบ nucleus ซึ่งอาจนับจากข้างในออกมาเป็นชั้น ๆ คือ K, L, M, N ซึ่งมี electron จำนวน 2, 8, 18 และ 32 ตามลำดับ

คุณสมบัติทางเคมีของธาตุต่าง ๆ จะขึ้นอยู่กับจำนวนของ electron ใน orbit นอกสุด ซึ่งพวก alkali metal, Lithium (Z = 3) Potasium (Z = 19) Rubidium (Z = 37)Casium(Z=35) มีคุณสมบัติทางเคมีคล้ายกัน เนื่องจากมี electron ใน orbit นอกสุด 1 ตัวเท่ากัน electron ซึ่งอยู่ใน orbit ต่าง ๆ จะอยู่ในสภาพของ equilibrium ซึ่งระหว่าง positive nucleus และ electron จะมี coulomb force เท่ากับ centrifucal force. coulomb force

1) Karl Breh, "Das Thermische Plasma Seine Technischen Anwendungen," Maschinenmarkt 68(1962)

ระหว่าง electric charge E 2 ตัว มีระยะห่างกัน r จะมีค่าเท่ากับ F

$$F = \frac{E.E}{r^2} \qquad (2.1)$$

แรงอันนี้จะลดลงเป็นปฏิภาคกลับกับระยะทางกำลังสอง และเนื่องจาก electron ซึ่งอยู่ใน shell ชั้นในกั้น electric field ของ positive nucleus บางส่วน ดังนั้น electron ที่อยู่ใน shell นอก ๆ จะมีแรงยึดน้อยกว่าข้างใน ถ้าเราให้ energy แบบใดแบบหนึ่งกับ electron, electron ที่อยู่ข้างในจะกระโดดออกมาอยู่ที่ shell นอก ๆ ซึ่งจะทำให้ atom มี total energy สูงขึ้นกว่าปรกติ atom ที่มี electron กระโดดออกมาอยู่ข้างนอกนี้เรียกว่า excited atom เนื่องจาก excited atom ส่วนมากไม่ stable ดังนั้น electron จะกลับเข้าไปยัง orbit ข้างใน ซึ่ง energy ที่มันได้รับไว้แต่ก่อน จะถูกปลอยออกมา excited atom แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

1. โดยการชนโดย free electron และ atom ได้รับ Kinetic energy เพิ่มขึ้น

2. โดยการ absorb light quantum Q

$$Q = hf \qquad (2.2)$$

h = Plank constant

Excited atom เมื่อกลับมีสภาพเดิม จะปล่อย energy ที่ได้รับไว้ออกไป 2 แบบ คือ

ก) excited atom คาย excited energy โดยการชนกับ free electron และให้ energy กับ electron ไป

ข) ปลอยเป็น Light quantum (hf) energy ที่ปลอยจะเท่ากับค่าแตกต่างระหว่าง energy ของ electron ที่ orbit สอง orbit

$$E_n - E_{n-1} = hf \qquad (2.3)$$

ซึ่ง E_n และ E_{n-1} เป็น total energy ของ electron ที่ orbit n และ n - 1 ตามลำดับ

เมื่อ atomหนึ่งได้รับ energy เข้าไว้ และ energy จำนวนนี้มากกว่า binding energy ของelectron ที่ orbit นั้น electronตัวนี้อาจหลุดออกไปจาก atom เป็น free electron ได้ ionized atom ที่เหลืออยู่จะไม่มีคุณสมบัติเป็นกลางทางไฟฟ้าอีกต่อไป มันจะมีประจุไฟฟ้าบวกเป็น single ionized atom ถ้า electron หลุดออกไป 2 ตัวเรียกว่า double ionized atom

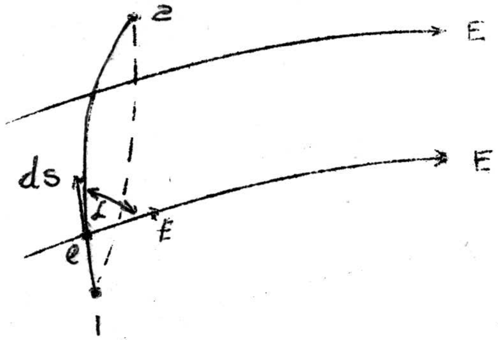
หน่วยของ energy เป็น electron volt(eV) ซึ่งในทาง atom และ nuclear physics เราอธิบายได้ ดังนี้ ใน elcetric field strength E จะมีแรงกระทำบน charge e = eE ทำให้ charge นี้เคลื่อนที่ไประหว่างจุด 1 และจุด 2 เกิด voltage = U

$$U = \int_1^2 E\, ds \qquad (2.4)$$

$$= \int_1^2 E\, ds.\cos\alpha \qquad (2.5)$$

ds เป็น vector ของระยะทาง

α เป็นมุมระหว่าง ds และ field vector



รูปที่ ๒.1 แรงกระทำบน charge e เคลื่อนที่ใน electric field strength E จากจุด 1 ถึงจุด 2

เนื่องจาก charge e ถูกแรงกระทำให้เคลื่อนที่จากจุด 1 ถึงจุด 2 มีค่าเท่ากับ eE มันจะได้รับ Kinetic energy เพิ่มขึ้น eU

$$eU = e\int_1^2 E ds \cos\alpha \qquad (2.6)$$

ถ้า charge carier มี mass = m ที่จุด 1 จะมี Kinetic energy ที่จุด 2

$$\frac{1}{2} mu^2 = eU \qquad (2.7)$$

u เป็นความเร็วของ charge carier ที่จุด 2

2.2 Kinetic Theory ของแกส

ในการที่จะบรรยายเกี่ยวกับขบวนการของ Thermal plasma จำเป็นต้องเข้าใจถึงกฎและ physical definitionบางอย่างเราทราบแล้ววาแกสประกอบด้วย atoms หรือ molecules เป็นจำนวนมากซึ่งเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา atoms หรือ molecules เหลานี้จะชนกันทำให้เกิดการถายเท momentum และ kinetic energy สำหรับการชนกันโดยไม่เกิด excitation, dissociation หรือ ionization ขึ้น เราเรียกการชนแบบนี้วา elastic collision แกส H_2, O_2, หรือ N_2 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะ dissociate ออกเป็น 2 atoms ซึ่งในกรณีของ Thermal plasma เป็นเรื่องสำคัญ เมื่ออุณหภูมิของแกสเพิ่มขึ้น สวนใหญ่ของ molecules จะ dissociate นั่นคือแตกตัวออกเป็น atom, energy ที่ทำให้แกสเกิด dissociationเรียกdissociation energy ใน Table 2.1 เป็น dissociation energy ของ 2 atomic gas บางชนิด และใน Table 2.2 คือ degree of dissociation α ของแกส oxygen และ hydrogen ที่อุณหภูมิและความดันตาง ๆ กัน

α = อัตราส่วนของจำนวน dissociated molecules ต่อจำนวน molecules ทั้งหมดเมื่อยังไม่เกิด dissociation

$\alpha = 0$ หมายความว่า ยังไม่เกิดการแตกตัวของ Molecules

$\alpha = 1$ หมายความว่า gas molecules แตกตัวเป็น atoms หมด

Molecule	dissociation energy (eV)
H_2	4.46
O_2	5.11
N_2	9.76
Cl_2	2.47
Br_2	1.96
I_2	1.53
$H_2O \rightleftharpoons H_2+O$	5.00

ตารางที่ 2.1[1] dissociation energy

$H_2 \rightleftharpoons 2H$			$O_2 \rightleftharpoons 2O$		
Temp.(K)	1 atm.	10 atm.	Temp.(K)	1 atm.	10 atm.
2000	8.8×10^{-4}	2.78×10^{-4}			
2200	3.02×10^{-3}	9.56×10^{-4}			
2400	8.5×10^{-3}	2.69×10^{-3}			
2600	2.04×10^{-2}	1.45×10^{-2}	2600	1.23×10^{-2}	3.90×10^{-3}
2800	4.33×10^{-2}		2800	2.86×10^{-2}	9.09×10^{-3}
3000	8.31×10^{-2}	2.64×10^{-2}	3000	5.92×10^{-2}	1.87×10^{-2}
3500	0.2957	9.74×10^{-2}	3500	0.249	8.08×10^{-2}
4000	0.6395	0.254	4000	0.478	0.236
5000	0.9580	0.762	5000	0.941	0.75

ตารางที่ 2.2[1] degree of dissociation α

---

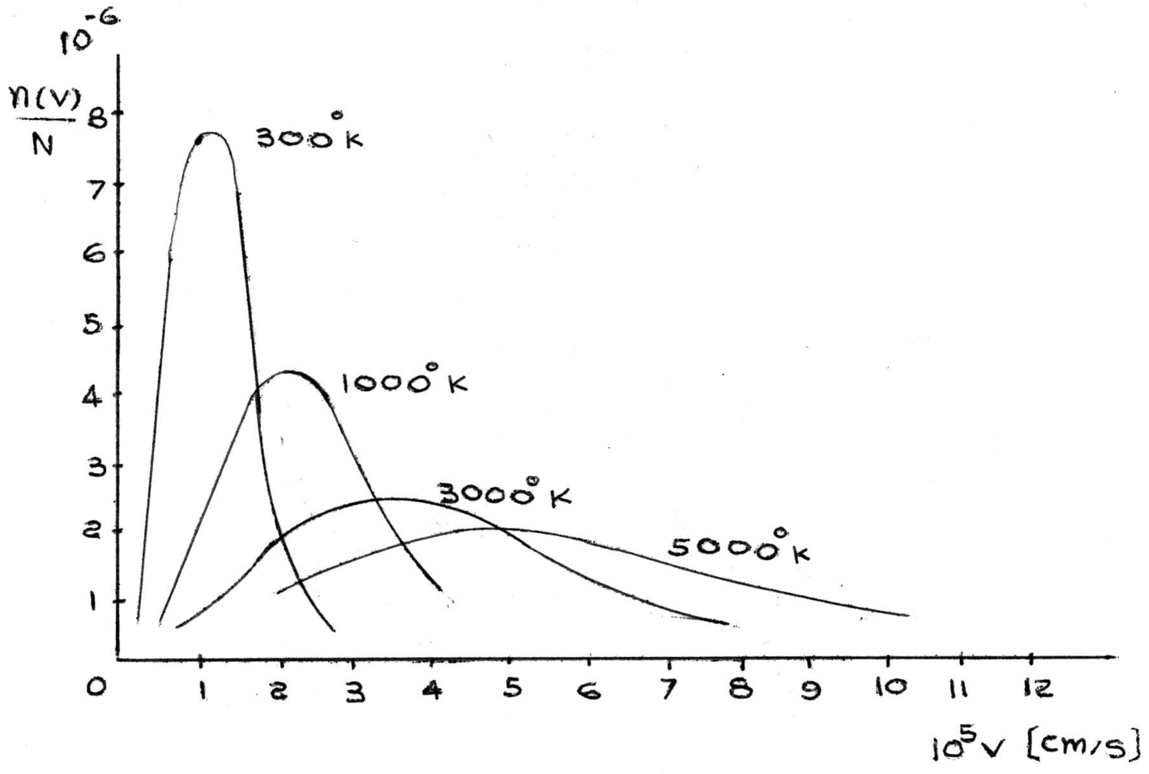
1) ประโมทย์ อุณห์ไวทยะ, "Engineering Electronics I," หนังสือประกอบคำบรรยายประจำปีการศึกษา 2507, แผนกไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย, p. 17 - 18.

ตามที่เรารู้แล้วว่า molecules นั้น เคลื่อนที่ปะปนกัน อย่างไม่เป็นระเบียบ molecules แต่ละตัวอาจเคลื่อนที่เป็นรูป zigzag ห่างออกไปจากที่อยู่เดิมมาก เราเรียกการเคลื่อนที่แบบนี้ว่า " Thermal agitation " gas molecules แต่ละตัวเคลื่อนที่ด้วยความเร็วแตกต่างกันมาก การเคลื่อนที่นี้มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของแกส เมื่ออุณหภูมิของแกสเพิ่มขึ้น ความเร็วของ molecules จะเพิ่มขึ้นด้วย

เมื่อพิจารณาถึงแกส 1 gram molecule (1 gram molecule มี 6.025×10^{23} molecules) ที่อุณหภูมิ T เช่นที่อุณหภูมิห้องสำหรับจำนวน molecule มาก ๆ เช่นนี้เราไม่สามารถทราบได้ว่า molecules แต่ละตัวเคลื่อนที่อย่างไร แต่เราอาจบอกค่าเฉลี่ยของมันได้ เมื่อมีคำถามว่าจะมีกี่ molecule ซึ่งมีความเร็วระหว่าง v และ v + dv ที่อุณหภูมิ T ถ้าให้จำนวนนี้เท่ากับ n (v) dv จะได้

$$n(v)\,dv = N \frac{4}{\pi^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2kT}{M} \right)^{\frac{3}{2}}} V^2 e^{\left(-\frac{Mv^2}{2kT} \right)} dv \qquad (2.8)$$

สมการนี้คือ Maxwelliam distribution function ของความเร็ว ตามรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 velocity distributions ของ

He - molecule

เมื่อ N เป็นจำนวน molecules ของแกส

T เป็น absolute temperature (°K)

M เป็น mass ของ molecule

k เป็น Boltzmann constant = 1.38×10^{-23} W.S. degree^{-1}

จาก maximum ของ curve เราจะได้ most probable velocity (Vp) ซึ่งเราจะหาได้ที่อุณหภูมิหนึ่งโดยการ differentiate สมการ (2.8) ให้ $\frac{d\,n\,(v)}{dv} = 0$ จะได้

$$Vp = \frac{(2\,kT)^{\frac{1}{2}}}{M} = \text{most probable velocity} \quad (2.9)$$

ต่างออกไปจาก most probable velocity ก็มี average velocity

เมื่อ gas จำนวนหนึ่งมี n_1 molecules ซึ่งมีความเร็ว V_1, n_2 molecules ซึ่งมีความเร็ว V_2 และต่อ ๆ ไป average velocity จะเป็น

$$\bar{V} = \frac{n_1 V_1 + n_2 V_2 + n_3 V_3 + - - -}{N} = \frac{\Sigma n_i V_i}{N} \quad (2.10)$$

สำหรับ continuous velocity distribution ตามกฎของ Maxwell จำนวนของ molecule ซึ่งมีความเร็วระหว่าง V และ V + dv เท่ากับ n (v) dv, average velocity จะเป็น

$$\bar{V} = \frac{1}{N} \int_0^\infty v.\, n\,(v)\, dv \quad (2.11)$$

แทนด้วยสมการ (2.8) จะได้

$$\bar{V} = \left(\frac{8\,kT}{\pi M}\right)^{\frac{1}{2}} = \text{average velocity} \quad (2.12)$$

นอกจากนี้ยังมี root - mean - square - velocity $\sqrt{\overline{V^2}}$ ค่านี้มีความสำคัญเกี่ยวกับ average kinetic energy $\overline{K.E.} = \frac{m\overline{v^2}}{2}$

สำหรับ continuous velocity distribution ตามกฎของ Maxwell จะได้

$$\overline{V^2} = \frac{1}{N} \int_0^\infty v^2 n\,(v)\, dv$$

$$\sqrt{\overline{V^2}} = \left(\frac{3\,kT}{M}\right)^{\frac{1}{2}} = \text{root - mean - square - velocity} \quad (2.13)$$

เราจะเห็นได้ว่าความเร็วทั้งสามอย่างนี้เป็นปฏิภาคโดยตรงกับ $T^{\frac{1}{2}}$ และเป็นปฏิภาคกลับกับ $M^{\frac{1}{2}}$ ดังนั้น จากค่า rms. velocity จะได้ average kinetic energy ของ 1 molecule เท่ากับ

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\overline{K.E} = \frac{M\overline{V^2}}{2} = \frac{3}{2}\ kT \qquad (2.14)$$

จะเห็นว่าค่า average kinetic energy ของ molecule นี้เป็นปฏิภาคโดยตรงกับ absolute temperature ดังนั้นเมื่อเราเพิ่มความร้อนให้กับแกส อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้น ซึ่งในทำนองเดียวกันก็หมายความว่า kinetic energy เพิ่มขึ้น molecule 2 ตัว ซึ่งมี kinetic energy สูงชนกัน เมื่อผลรวมของ energy สูงเท่ากับ dissociation energy, molecule นั้น อาจแตกตัวออกเป็น atom ได้ สำหรับอุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง ความเร็วของ molecule จะอยู่ภายใต้ velocity distribution curve สำหรับอุณหภูมินั้น ซึ่งความเร็วของมันพอที่จะไปทำให้มันเกิด dissociation กับ Molecule อื่น ๆ ได้ ดังนั้น dissociation จะไม่เกิดขึ้นทันทีทันใด แต่อาจเกิดขึ้นก่อนบ้างแล้ว ด้วยเหตุผลอันนี้ α ในตาราง ที่ 2.2 จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

Collision ionization ในแกสใดแกสหนึ่งที่มีอุณหภูมิสูงอาจมีการเกิด thermal ionization ขึ้นและพร้อม ๆ กัน ก็เกิด photo ionization ประกอบกันด้วย ion. (ionizing atom) และ electron สามารถรวมกันเป็น nutral gas atom ได้อีก ซึ่งก็เป็นทฤษฎีที่แน่นอนที่ชี้ให้เห็นว่าในแกสหนึ่ง ๆ ที่มีอุณหภูมิสูง ๆ จะเกิด ionization ของ atom และ molecule อยู่ตลอดเวลา fraction อันนี้ขึ้นอยู่กับ pressure และ temperature ตามสมการของ Eggert และ Saha

$$\frac{\alpha^2}{1-\alpha^2} = \left(\frac{2\pi m}{h^3}\right)^{\frac{3}{2}} (kT)^{\frac{5}{2}}\, e^{-\frac{Ei}{kT}} \qquad (2.15)$$

m = mass ของ gas atom

h = Plank constant

Ei = ionization energy

ionizing fraction **จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตาม Exponential function** ของอุณหภูมิ การเกิด thermal ionization จะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงเกิน 3000 °c ขึ้นไป

เกี่ยวกับ collision ionization, electron emission จากหน้าโลหะก็เกิดขึ้นได้จากการชนของ positive ion. ชนกับผิวหน้าของ cathode หรือเกิดขึ้นได้โดยการชนของ electron ที่มีความเร็วสูง energy ของ particle ที่มาชนจะต้องสูงเกิน surface work function ของโลหะนั้น ๆ จึงจะเกิด electron emission ได้

เมื่อผิวหน้าของโลหะถูกทำให้ร้อนจัด และมี electric field อยู่หน้าโลหะ electron ก็อาจหลุดออกมาได้ electron ที่หลุดออกมานี้จะเคลื่อนที่ออกไปจากหน้าโลหะ ซึ่ง saturating current density ของ electron ที่ออกจากผิวหน้าโลหะที่ร้อนจัดนี้เขียนแสดงได้ด้วย Richardson equation

$$j = AT^2 \epsilon^{-\frac{W}{RT}} \quad \text{Amp/cm}^2 \qquad (2.16)$$

W เป็น surface work function ของ electron

A เป็น material constant สำหรับโลหะทั่ว ๆ ไป ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 60 - 100 $A. cm^{-2}. degree^{-2}$

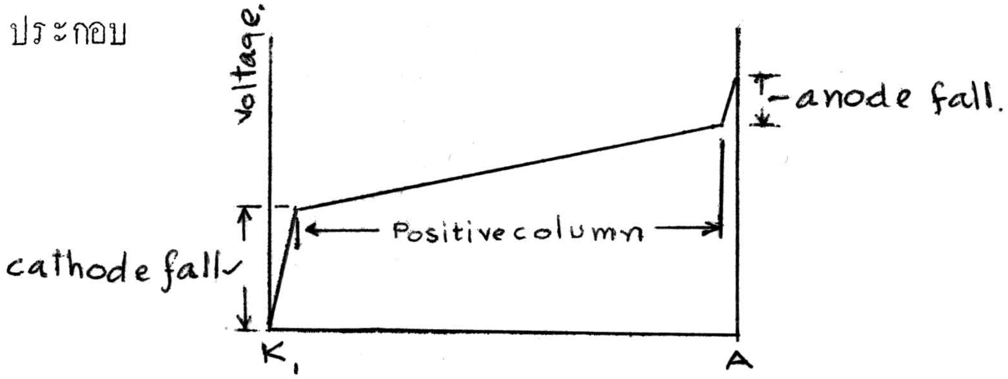
2.3 คุณสมบัติทั่ว ๆ ไปของ Arc

Electric arc เป็น self-sustained discharge ซึ่งมีกระแสไหลมาก (มากกว่า 1 A) และมี burning voltage ต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งมี cathode fall ต่ำ ดังนั้น arc จะแตกต่างจาก glow discharge ซึ่งมี current น้อย และ burning voltage สูงตรงที่มี cathode fall ต่ำ

arc ทุกชนิดจะมีค่า ๆ หนึ่งคือ electric resistance, R_B ซึ่งขึ้นอยู่กับ discharge parameters หลายอย่างเช่น ความดันของ gas, current และชนิดของแกสเป็นต้น เมื่อมีกระแสไหลเท่ากับ I จะมี voltage drop หรือ burning voltage เป็น

$$U_B = I R_B \qquad (2.17)$$

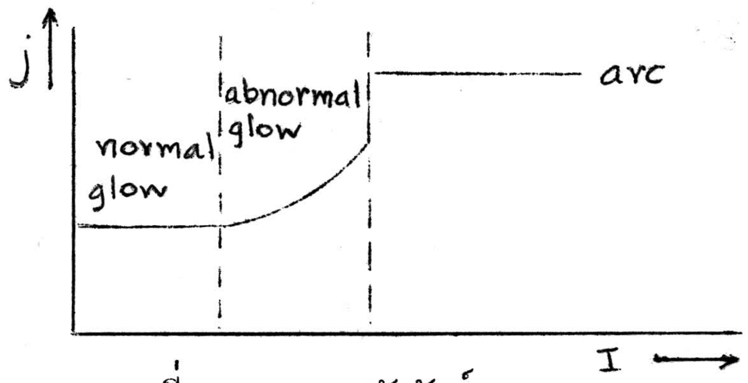
เนื่องจาก R_B ไม่เท่ากันตลอดทั้งความยาวของ arc แต่จะมีค่ามากที่บริเวณหน้า cathode และ anode และมีค่าน้อยใน positive column ดังนั้น electric field strength ที่บริเวณต่าง ๆ ใน arc จะมีค่าต่างกัน ดูรูปที่ 2.3 ประกอบ



รูปที่ 2.3 Potential distribution ของ electric arc

โดยทั่ว ๆ ไปแล้ว volt-ampere characteristic ของ arc จะมี negative slope นั่นคือ burning voltage ของ arc จะลดลงเมื่อกระแสเพิ่มขึ้น เพราะว่าเมื่อกระแสของ arc เพิ่มขึ้น พื้นที่หน้าตัดของ arc column และอุณหภูมิของ arc จะเพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้ conductivity ของ arc column เพิ่มขึ้น และ electric resistance ลดน้อยลง

arc เกิดขึ้นได้โดยการแยก contacts ออกจากกัน หรือเปลี่ยนจาก glow discharge เมื่อเราเพิ่มกระแสให้มากขึ้น arc เกิดขึ้นโดยเปลี่ยนสภาพมาจาก glow discharge (ที่ voltage สูง) ซึ่งจะสังเกตได้จากการเปลี่ยนค่าของ current density ดังรูปที่ 2.4 หลังจากเกิด arc แล้ว current density เกือบจะไม่เปลี่ยนแปลงเลยเมื่อกระแสเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ของกระแสและ current density

column ของ arc จะมีรูปร่างตามแบบของ discharge tube เมื่อความดันของแกสต่ำ tube ที่มีพื้นที่หน้าตัดเล็กทำให้ arc column ตีบลงและมีแสงสว่างมาก ความแตกต่างที่สำคัญที่สุดของ arc ที่ความดันต่ำและความดันสูงก็คืออุณหภูมิของ positive column อุณหภูมิของ arc column ที่ความดันสูงจะสูงมากประมาณ 5,000 °K ถึง 30,000 °K เมื่อความดันของแกสสูง electrons, positive ions และ gas atoms จะอยู่ในสภาพของ thermal equilibrium อุณหภูมิของแกสของ low pressure arc จะมีค่าประมาณ 400 – 600 °K เท่านั้น แต่อุณหภูมิของ electrons จะสูงถึง 40,000 °K [๑)]

burning voltage ของ arc จะเพิ่มขึ้น เมื่อความดันของแกสเพิ่มขึ้น เช่นใน Nitrogen arc burning voltage จะเพิ่มขึ้นจาก 50 V ถึง 80 V [๑)] เมื่อความดันของแกสเพิ่มขึ้นจาก 10 atm. เป็น 100 atm. นอกจากนั้นเมื่อความดันของแกสเพิ่มขึ้น อุณหภูมิของ arc จะเพิ่มขึ้นด้วย แต่พื้นที่หน้าตัดของ arc column จะลดลง.

005774

---

๑) ประโมทย์ อุณหไวทยะ, "Engineering Electronics 1", หนังสือประกอบคำบรรยายปีการศึกษา ๒๕๐๗, คณะวิศว ฯ จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย. p.61

i 1796152X

2.4 Cathode Phenomena

ที่อุณหภูมิสูง ๆ การใช้ Carbon และ Tungsten เป็น cathode ในการทำงานติดต่อกันเป็นเวลานาน ๆ cathodes จะกร่อนไปส่วนมากโดยการ vaporization ถ้าใช้ cathode ที่เป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ cathode ก็จะหลอมละลายทันที บางทีในการทำงานเพียงชั่วระยะเวลาอันสั้น บางส่วนของโลหะจะหลุดออก (blast) จาก cathode ทันที ถึงแม้จะมีการ cool cathode แล้วก็ตาม

ส่วนใหญ่ของการเกิด electron current ที่ cathode นั้น เนื่องมาจาก thermionic emission ที่อุณหภูมิสูง เมื่อใช้ Carbon และ Tungsten เป็น cathode current ส่วนมากที่เกิดขึ้นเนื่องมาจาก thermionic emission และ field emission ของ electron จาก cathode

จากการทดลองของ Ramberg[1] ชี้ให้เห็นว่า arc cathode ของ C, Ca, Mg และ W โดยธรรมชาติเป็น thermionic emission

Thomson[2] และ Loeb[3] เชื่อว่ากระแสของ arc เกือบทั้งหมดที่ได้รับเกิดขึ้นโดยวิธี thermionic emission และได้ให้เหตุผลว่า ถ้าใช้ทองแดงเป็น cathode จะเกิดมี current density ประมาณ 3000 Amp./cm.^{2} และถ้าในจำนวนนี้มี positive ion ปนอยู่ประมาณ 3.3 % นั่นคือ positive ion current density มีเป็นจำนวน 100 Amp./cm.^{2} ให้ voltage drop ที่ cathode เป็น 20 V ดังนั้น energy ที่ cathode จะได้รับจากการชนของ positive ion ต่อ 1 cm.^{2} ของผิวหน้าของ cathode จะเท่ากับ 2,000 Joules หรือประมาณ 480 Cal. กำหนดให้ความร้อนจำเพาะของทองแดงเท่ากับ 0.1 cal./g. °c ซึ่ง energy จำนวนนี้สามารถทำให้ทองแดงซึ่งหนัก 1 กรัมร้อนขึ้นถึง 4800 °c ภายในเวลาหนึ่งวินาที.

---

1) W.Ramberg, Ann.d.Physik,12,319,1932
2) J.J.Thomson and G.P.Thomson, "Conduction of Electricity Through Gases" Vol.2, p. 596
3) L.B.Loeb, "Fundamental Processes of Electrical Discharge in Gases" p. 631

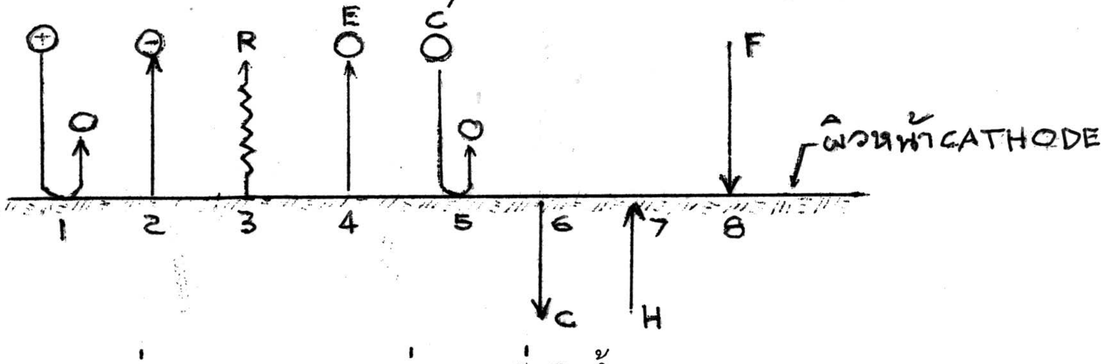
การไหลของความร้อนจากผิวหน้าของแท่งทองแดง สู่แท่งทองแดง เป็นไปช้ามาก ดังนั้นอุณหภูมิที่ผิวหน้าของ Copper cathode จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ที่ผิวหน้าของทองแดง 1 cm^2 และหนา 10^{-5} cm. จะมี atom ประมาณ 500 atoms รวมเป็นน้ำหนักเท่ากับ 9 (10^{-5}) กรัม ดังนั้น energy ที่ได้รับจากการชนของ positive ion บนผิวหน้าของ cathode จะทำให้ทองแดงจำนวนดังกล่าวมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นถึง 4,000 °c ภายในเวลา 7.5×10^{-5} วินาที ในการนี้ไม่คิด losses, heat of neutralization และความร้อนที่ถูกพาไปโดย neutralized atom Thomson เชื่อแนว่า อุณหภูมิขนาดนี้จะทำให้เกิด electron emission ขึ้นที่ผิวหน้าของ cathode และอุณหภูมิสูงเช่นนี้ก็สามารถอธิบายถึงการกร่อนและสึกหรอของผิวหน้าโลหะที่ใช้เป็น cathode ในอัตราสูงได้.

Compton[1] ได้ใช้ heat - balance method อธิบายถึง condition ต่าง ๆ ที่ cathode เมื่อเวลาเกิด arc ให้

f เป็นอัตราส่วนของกระแส ที่เกิดขึ้นโดย electron จาก cathode

$1 - f$ จะเป็นอัตราส่วนของกระแสที่ได้จาก positive ions

process ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นบน cathode แสดงไว้ในรูป 2.4



รูปที่ 2.4 process ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นบน cathode

- - - - - - -

1) Compton, K.T. Phys.Rev., 1931, p.1077

process ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นบน cathode มีดังนี้คือ

1. Positive ions. ชน cathode โดยผ่าน cathode potential drop (cathode fall) Vc และถ่ายเท energy ให้กับ cathode ในอัตราส่วน a และ energy ที่เหลือ 1 - a จะถูกพาไปโดย neutralized atom การชนของ positive ions นี้ ทำให้เกิด high speed particles ใน vapor arcs. อัตราส่วน a นี้เรียกว่า accomodation coefficient ความร้อนจาก neutralization ของ positive ions มีค่าเท่ากับ

$$\phi_+ = Vi - \phi_o + L \qquad (2.18)$$

Vi เป็น ionization potential ของ gas molecule

ϕ_o เป็น normal work function ของผิวหน้า cathode

L เป็น heat ของ condensation ของ neutral molecule บนผิวหน้า cathode

L จะเป็นศูนย์ถ้าไม่มี condensation ของ ion บนผิวหน้า cathode ความร้อนทั้งหมดที่ ผิวหน้า cathode ได้รับจากการชนของ positive ions เท่ากับ H_1

$$H_1 = (1-f)(a\ Vc + Vi - \phi_o) \qquad (2.19)$$

Vc เป็น voltage drop ที่ cathode fall

2) energy ที่ศูนย์เสียออกไปเนื่องจาก electron emission มีค่าเท่ากับ H_2

$$H_2 = -f\phi_- \qquad (2.20)$$

ϕ_- เป็น effective work function ของผิวหน้า cathode

3) energy ที่ศูนย์เสียออกไปเนื่องจากการ radiation มีค่าเท่ากับ H_3

$$H_3 = -R \qquad (2.21)$$

R เป็น energy ที่ radiate ออกไป ต่อ amp - second

4) การศูนย์เสียความร้อนเนื่องจากการกร่อนของ cathode มีค่าเท่ากับ H_4

$$H_4 = -E \qquad (2.22)$$

E เป็นผลคูณของmass ของ material ที่ศูนย์เสียไปโดยการ evaporation ต่อ amp - second กับ ความร้อนแฝงของการ evaporation

5) ความร้อนที่ศูนย์เสียไปโดย gascous conduction และ convection มีค่าเท่ากับ H_5

$$H_5 = -C' \qquad (2.23)$$

6) ความร้อนที่ศูนย์เสียไปโดย conduction ผ่าน cathode มีค่าเท่ากับ H_6

$$H_6 = -C \qquad (2.24$$

7) ความร้อนที่ cathode ได้รับจากการไหลของกระแสผ่านแท่ง cathode มีค่าเท่ากับ H_7

$$H_7 = H \qquad (2.25)$$

8) energy ที่ cathode ได้รับจาก unelectrified carriers ต่าง ๆ ซึ่งเกิดขึ้นในขณะที่ electron วิ่งผ่าน cathode fall space

$$H_8 = F \qquad (2.26)$$

๒.๕ คุณสมบัติของ Plasma

ได้กล่าวมาแล้วว่า plasma มีคุณสมบัติคล้าย ๆ กับภายในของ metal conductor plasma ประกอบด้วย gas particles, electrons และ positive ions

ซึ่งสองอันหลังนี้จะมีจำนวนประมาณเท่า ๆ กัน ion - electron concentration จะมากกว่า gas particle concentration ประมาณ 2 - 3 %. กระแสที่ไหลใน plasma เกิดขึ้นเนื่องจาก drift current ของ electrons ซึ่งเคลื่อนที่ เนื่องจาก electric field ส่วนกระแสที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของ ions นั้น เราไม่คิดเพราะว่า ions เคลื่อนที่ช้ามาก เมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ของ electrons

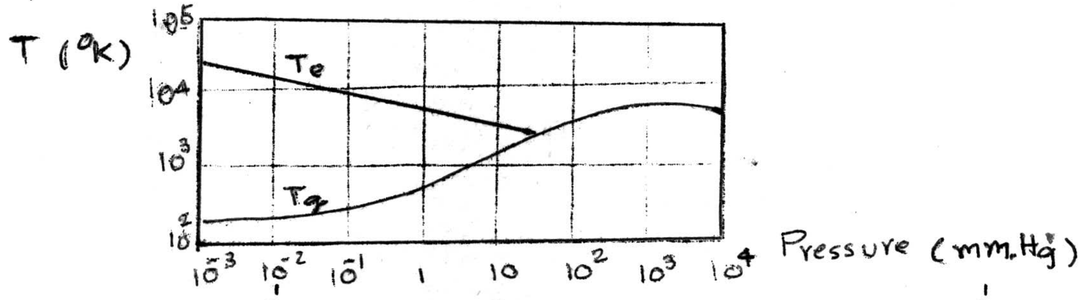
energy ที่เกิดขึ้นใน plasma เกิดขึ้นจากการไหลของ electron drift current —

—ใน electric field, energy ที่เกิดขึ้นในตอนแรกนี้ เป็น kinetic energy ของ electrons ที่วิ่งไปในทิศทางต่าง ๆ กัน และจำนวนมากน้อยต่างกัน (random directions and magnitudes) ซึ่ง energy จำนวนนี้จะทำให้ electron มีอุณหภูมิสูง scattering หรือ "randomizing" ของ electron energy นี้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมาก ซึ่งเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของ drift electron velocity ในทิศทางเดียวกับ electric field แล้ว มันจะช้ากว่า average random velocity มาก

โดยปรกติอุณหภูมิของ electron จะสูงกว่าอุณหภูมิของ gas และ ions มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ pressure ต่ำ ๆ อุณหภูมิของ electron จะสูงเกินกว่า 15,000° K เพราะว่า electron ได้รับความร้อนมาก เนื่องจากการเคลื่อนที่ของมันใน electric field ส่วน gas particles และ ions ได้รับน้อยกว่า ดังนั้น อุณหภูมิของ electron จึงสูงกว่า จึงมีการถ่ายเท energy จาก electrons ให้กับ gas particles และ ions ในส่วนของ plasma การถ่ายเท energy นี้เกิดขึ้นโดย inelastic collision ซึ่งผลของมันทำให้เกิด excitation และทำให้เกิด ionization ขึ้น

การถ่ายเท energy โดย elastic collision จะทำให้ gas particles และ ions ร้อนขึ้น elastic collisions ระหว่าง electrons กับ gas particles และ ions จะมากขึ้นเมื่อความดันของแกสเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้การถ่ายเทความร้อนมากขึ้น ดังนั้น จึงทราบได้ทันทีว่า ทำไมที่ความดันของแกสต่ำ ๆ

อุณหภูมิของ electrons จึงสูงแตกต่างจากอุณหภูมิของ gas particles และ ions มาก



รูปที่ 2.5 อุณหภูมิของ electron และของ gas เมื่อความดันของ gas แตกต่างกัน

2.6 Electron velocity distribution

ที่ความดันของแกสสูง ๆ เช่นใน open - air arc mean free path ของ electron จะสั้นมากพอที่จะทำให้เกิดการชนระหว่างelectrons และ gas particles จนทำให้ electron energy เปลี่ยนจาก directed form ไปเป็นrandom form ได้ อย่างไรก็ดี[1] Morse, Allis และ Lamar ได้ชี้ให้เห็นว่า velocity distribution electron ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจาก elastic collision จะไม่เป็นไปตาม Maxwellian equation

สมการที่ให้ไว้โดย Morse, Allis และ Lamar สำหรับ distribution ของ random velocities ของ electrons ใน plasma เมื่อเกิดการชนแบบ elastic collision

$$\frac{dN_v}{dR} = \frac{4N}{\Gamma(\frac{3}{4})} R^2 \epsilon^{-R^4} \qquad (2.27)$$

ในที่นี้

$$R = \frac{V}{\sqrt{\frac{2e\,E\,l_e}{\sqrt{3}\,m_e}}\sqrt{\frac{m_g}{m_e}}}$$

V = total electron velocity

l_e = electron mean free path

E = electric field strength ที่ทำให้ electron เคลื่อนที่

e = electronic charge

m_e = mass ของ electron

m_g — Mass ของ gas particle

N = electron concentration

d N_v = จำนวนของ electron ที่มีความเร็วอยู่ระหว่าง v และ $v + dv$ ต่อลูกบาศก์ - เซ็นติเมตร

\- - - - - - -

1) Morse, P.M. Allis and Lamar "Velocity distribution for Elastically Colliding Electrons" Phys.Rev., 48,412 (Sept.1935)

$\Gamma(\frac{3}{4})$ = Gamma function ของ $\frac{3}{4}$ = 1.2254

จากสมการ (2.27)

$$\text{average energy} = \frac{\Gamma(\frac{5}{4})}{\Gamma(\frac{3}{4})} \sqrt{\frac{m_g}{3\, m_e}} \, .Ele$$

$$= 0.427 \sqrt{\frac{m_g}{m_e}} \, .E.le \qquad (2.28)$$

แล้วนำไปหา drift velocity ของ electrons ได้ดังนี้

$$\text{drift velocity} = \frac{1}{\Gamma(\frac{3}{4})} \sqrt{\frac{2\pi\, e\, Ele}{\sqrt{3}\, m_e}} \sqrt{\frac{m_e}{m_g}}$$

$$= 3.78 \times 10^7 \sqrt{\frac{Ele}{\sqrt{m_g/m_e}}} \qquad (2.29)$$

2.7 <u>Ion and electron mobilities</u>

electron drift current density Je ใน plasma มีความสัมพันธ์กับ electron concentration, average electron drift velocity V_e และ electronic charge ดังนี้

$$Je = No.e.V_e \qquad (2.30)$$

$$V_e = Ge.E \qquad (2.31)$$

Ge = electron mobility cm/second/Volt/cm.

จาก Comptons mobility equation

$$G = \frac{8}{3\pi} \times \frac{e}{m} \times \frac{l}{\bar{v}} \sqrt{\frac{m+M}{M}} \qquad (2.32)$$

l เป็น mean free path

$\bar{v}$ เป็น average thermal velocity

m เป็น mass ของ charge particle

M เป็น mass ต่อ หนึ่ง molecule ของแกสเคลื่อนที่

สำหรับการเคลื่อนที่ของ ion ใน plasma m = M = m_g

$$G_i = \frac{8\sqrt{2}\, e\, l_g}{3\pi\, m_g\, \bar{V}_g} \qquad (2.33)$$

$$V_i = \frac{8\sqrt{2}\, e\, l_g}{3\pi\, m_g\, \bar{V}_g} E \qquad (2.34)$$

สำหรับการเคลื่อนที่ของ electrons ใน plasma, m $\ll$ M

$$G_e = \frac{8}{3\pi}\frac{e}{m_e}\frac{l_e}{\bar{V}_e} \qquad (2.35)$$

$$V_e = \frac{8}{3\pi}\frac{e}{m_e}\frac{l_e}{\bar{V}_e} \cdot E \qquad (2.36)$$

2.8 Plasma cross - section

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่า current density ของ arc จะไม่เปลี่ยนแปลง จะเปลี่ยนก็เพียงเล็กน้อย จึงถือว่า current density นี้ คงที่ ดังนั้น เมื่อเพิ่มกระแสของ plasma จะทำให้พื้นที่หน้าตัดของ plasma เพิ่มขึ้น การที่จะอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดของ plasma เราจะต้องมีความรู้เกี่ยวกับสภาพสมดุลย์ และ least energy requirements นอกจากนี้ magnetic force ก็เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้พื้นที่หน้าตัดของ plasma เปลี่ยนแปลง

ใน plasma จะต้องมี equilibrium requirements 2 อย่าง คือ.-

1. อัตราของการเกิดของ ions ใน plasma volume จะต้องเท่ากับอัตราการศูนย์เสีย ions ให้กับ boundary

2. Power input (I x V) จะต้องเท่ากับ Power loss ที่ boundary surfaces ซึ่ง energy loss เหล่านี้เกิดขึ้นในทางต่าง ๆ เช่นการแผ่รังสี การนำความร้อน และการศูนย์เสีย energy โดยการพาไปของ ions

ถ้าพื้นที่หน้าตัดของ plasma ใหญ่มาก ก็จะทำให้มี loss มากตามไปด้วย เพราะ boundary surface เพิ่มมากขึ้น ซึ่ง voltage gradient จะต้องเพิ่ม เพื่อให้ได้ energy มากขึ้นจะได้อยู่ในสภาพสมดุลย์ และถ้าพื้นที่หน้าตัดของ plasma น้อยไป ก็จะมีผลกับ energy loss ทั้งหมด เพราะว่า อุณหภูมิของ plasma และ charged-particle concentrations จะต้องสูงมากพอที่จะทำให้ energy loss ต่อ unit boundary area สูงพอ ทำให้อยู่ในสภาพสมดุลย์ได้ ดังนั้นที่พื้นที่หน้าตัดใดที่ทำให้ผลคูณของ พื้นที่รอบนอกของ plasma กับ energy loss ต่อหนึ่งหน่วยของพื้นที่มีค่าน้อยที่สุดแล้วพื้นที่หน้าตัดนี้จะเป็นพื้นที่หน้าตัดของ plasma ซึ่งในธรรมชาติ plasma จะจัดตัวของมันเองให้ได้พื้นที่หน้าตัดที่พอดีนี้โดยอัตโนมัติ.

เพราะว่าทั้งความร้อนและ ions ที่เกิดขึ้นภายในของ plasma จะถ่ายเทผ่านออกไปจาก boundary surface ของ plasma ได้ least energy shape ของพื้นที่หน้าตัดของ plasma ซึ่งมีอัตราส่วนของผิวหน้าต่อปริมาตรน้อยที่สุดนั้น จะเป็น อัตราส่วนของเส้นรอบวงต่อพื้นที่หน้าตัดของ plasma ดังนั้นโดยปรกติ plasma cross section จึงเป็นวงกลม.