

M₁-P-M₂型 接觸으로 因하여 生기는 短絡電流

논문
25~1~2

Short-Circuit Currents arising at a M₁-P-M₂ Contacts

李 德 出*

(D. C. Lee)

Abstract

The main purpose of this paper is to study on the transient current due to the change of environmental temperature under no external field in the arrangement of M₁(metal)-P(polymer)-M₂(metal). The specimen of polymeric insulator sandwiched by two metal electrodes composes a parallel-plate condenser represented by Maxwell-model. The behaviors of short circuit current flowing in M-P-M arrangement are very complex and the analysis of its conduction mechanism appears to be much complicated. In this paper we can suggest that a contact potential difference as an energetic state exists in the thin film specimen both sides of which are contacted by two different metals having different work functions. Furthermore the contact potential difference appears to be constant through the course of temperature change, however, the dielectric constant and capacitance of the specimen must be temperature dependent. Accordingly the charge difference induced on both sides of electrodes may be a cause for the short circuited transient current flowing through the external circuit. It is also suggestive that the results of the observation must be considered in cases of insulation design of electrical machines and D.C. cable for high voltage use.

1. 序 論

從來, 金屬(M)-半導體(S)接觸時의 界面狀態¹⁾²⁾가 半導體의 電氣의 等性에 變化를 일으킨다는 사실이 인정되어, 실험적으로나 또는 理論적으로 폭넓은 研究가 이루어져서 M-S接觸에 對한 界面狀態는 어느 정도 究明되어진 셈이다. 그러나 金屬과 絶緣物과의 接觸, 특히 電氣의 等性이 우수하여 近來에는 工業적으로 많이 利用되고 있는 高分子絶緣體(以下 高分子(P)로 약함)에 對한 界面現象의 研究는 거의 없는 실정이다. Davies^{3) 4)}氏는 여러 종류의 高分子를 일함수가 다른 金屬에 接觸시킨 후의 帶電량을 測定하고, 金屬의 일함수와 帶電량과의 관계로부터 高分子의 일함수를 計算하였다. 矢作⁵⁾氏는 高分子의 傳導特性變化에 電極效果를 豫測하였고, 家田⁶⁾氏는 高分子의 光電流로부터 電極效果를 報告하였다.

筆者는 코로나帶電高分子의 放電電流等性^{7) 8)}을 研究 하던중 高分子와 金屬間의 接觸狀態가 放電電流等性에

영향이 크게 미친다는 것을 확인한바 있다. M-P接觸 아니라, 高電壓化高信賴, 化的 電氣絶緣設計에 있어서 考慮하여야 할 問題點이며, 나아가서는 物理的 shock, 火災 및 폭발의 原因등에도 影響이 있기 때문에 이에 對한 現象을 究明하는 것은 工業적으로 重要한 과제이기도 하다.

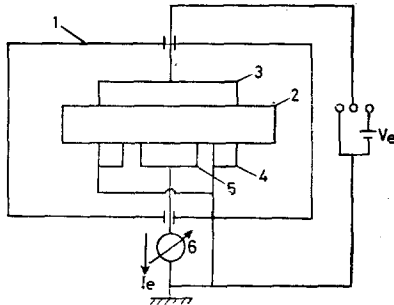
本 研究에서는 일함수(work-function)가 다른 異極 金屬을 高分子의 兩面에 단지 接觸한 狀態의 M₁-P-M₂ 構造를 形成하고, M₁, M₂을 短絡한채 glass轉移點(Tg)以下の 溫度範圍에서 加熱-冷却만으로써(溫度變化만으로써) 短絡電流가 흐른다는 重要한 사실과 또 그 電流의 方向은 規則性이 存在한다는 異常現象을 探知 하고, 이들에 對한 實驗結果와 그 特性에 對하여 考察 하겠다.

2. 試料 및 實驗方法

高分子試料은 film 狀 폴리에틸렌·테레프타레이트(polyethylene terephthalate, PET)로 두께 25μm(三菱 油化製)이며, 金屬은 純度 99.999%(三津和社製)인 Cu, Ag, Au를 사용하여 電極으로 하였다. 電極의 구조 및 測定장치의 부록도를 그림 1에 표시하였으며,

* 正會員 · 檀國大工大助教授
現在名古屋大學大學院研究科에서 誘電體物性專攻
接受日字: 75年 11月 22日

5×10^{-5} Torr 程度의 眞空中에서, 高分子의 兩面에 金屬을 蒸着하여, M_1 -P- M_2 구조인 Sandwich 狀 試料를 만 들었다.



- 1) 恒溫槽 4) guard 極電
- 2) 高分子絶緣體 5) 主電極(下部電極)
- 3) 上部電極 6) 振動容量電位計(VRE)

그림 1. 短絡電流測定回路圖

Fig. 1. Schematic diagram for measuring the short-circuit current

이들 試料는 detector 속에 보관하고, 測定時 10^{-3} Torr 眞空中에서 30分眞空처리 한후 恒溫槽에 넣어 65°C 까지 電流連續制御장치로서 均一한 昇溫速度 $\beta = 0.4^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 로서 昇溫시켰다. 65°C 에서 부터 40°C 까지 降溫시킬 때는 自然冷却法을 이용하였으나, 이 溫度범위에서는 昇溫과 降溫速度는 0.5倍 정도이고, 降溫시간이 길었을뿐 別差가 없었다. 試料의 溫度差를 없애기 위해 恒溫槽는 heater 下部로부터 fan을 돌려서 뜨거운 空氣를 恒溫槽内部에 넣어, 上下部の 電極이 함께 加熱되도록 시도하였고, 實驗值의 再現性을 確認하기 위하여 實驗結果는 2회씩 반복하였으며, 昇溫 1회에서는 實驗值에 誤差가 많으나 3회째 부터는 誤差가 거의 없는 安定된 實驗值를 얻을 수 있었기 때문에 實驗結果는 주로 3회째 昇溫할 때부터의 값을 취한다. 사용한 측정기는 정밀振動容量形電位計(VRE)이며, guard電極이 있는 主電極에 VRE電流計를 直結하여 短絡電流를 측정하고, 電流의 方向은 VRE電流計의 方向이 正일때를 正(즉 M_1 으로부터 M_2 를 향하여 電流가 흐를때)으로 하고, 그의 反對를 負方向으로 정하였다.

3. 實驗結果

a) M_1 -P- M_2 系 短絡時的 電流(I_e)-溫度(T)特性

5×10^{-5} Torr의 眞空中에서 film 狀 高分子 PET의 兩面에 M_1 을 Au로, M_2 을 Cu로 한 Au-PET-Cu系의 試料를 恒溫槽内部에 넣고, 昇溫速度 $\beta = 0.4^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 로서 65°C 까지 昇溫한 후 40°C 까지 降溫과정을 반복할 때의

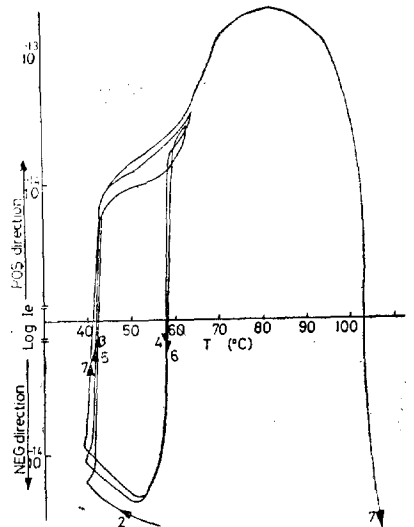


그림 2. Au-PET-Cu系의 短絡電流와 溫度와의 關係

Fig. 2. Short-circuit current for Au-PET-Cu system as a function of temperature

短絡電流等性을 그림 2에 圖示하였다. 그림에서 數字中 기수번호는 昇溫, 우수번호는 降溫하는 回數를 나타낸다. 최후의 昇溫인 7번 곡선은 PET의 glass轉移點 이상까지 昇溫하였다.

電流 I_e 의 方向이 溫度上昇과 더불어 負→正→負의 方向으로 逆轉함을 볼 수 있다. 降溫時的 I_e 方向은 昇溫時的 電流方向이 正方向이었다면, 降溫을 시작함에 따라 正→負로 方向이 逆轉되나, 昇溫時 I_e 가 負方向에

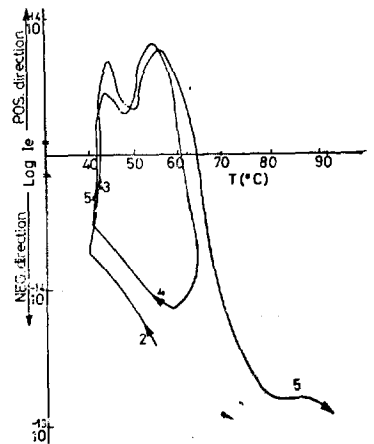


그림 3. Au-PET-Ag系의 短絡電流와 溫度와의 關係

Fig. Short-circuit current for Au-PET-Ag system as a function of temperature

있으면 降溫時에도 負→負로, I_e의 方向은 逆轉되지 않았다. 이와 같이 異種金屬을 高分子의 兩面에 接觸한 상태에서 溫度變化만으로서 短絡電流 I_e가 흐르고, I_e의 方向도 定해짐을 알았다.

이 異常現象을 再確認하기 위해서 Au-PET-Cu系의 再實驗은 물론, M₁은 Au로 一定하게 하고, M₂極단을 Cu와 일합수 ϕ가 거의 같은 金屬 Ag를 택한 Au-PET-Ag系에 대하여 同一方法으로 實驗한 결과 그 特性은 그림 3과 같이 되어, I_e의 크기에만 조금 차이가 있을 뿐 現象에는 變함이 없었다.

b) M-P-M系의 I_e-T特性

高分子의 兩面에 同一金屬 Au를 眞空증착한 Au-PET-Au系의 兩極에 0.45kV/cm의 電界를 印加한채 昇溫速度 β=0.4°C/min로 昇溫後 降溫과정을 되풀이할 때의 I_e-T特性을 측정하여 그림 4에 圖示하였다.

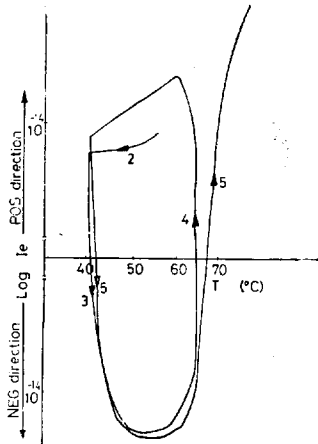


그림 4. 電壓印加한 Au-PET-Au系의 電流-溫度特性
Fig. 4. Current vs temperature characteristics for Au-PET-Au system, Applying the external voltage

어떤 試料이든 電壓을 印加하면 회로에 흐르는 電流는 印加電壓의 極性과 同一方向으로 흐르는 것이 定常이지만, 本實驗에서는 그림 4에서와 같이 溫度上昇에 따라 電流의 方向은, 低溫側에서는 印加電壓의 極性과 反對方向이나 高溫側으로 되면 同一極性의 方向으로 흐르고 있다. 즉 I_e의 方向은 正→負→正임으로 印加電壓의 極性을 바꾼다면 負→正→負로 되므로 이 實驗의 결과는 異種金屬間에 插入한 試料의 短絡時의 現象인 그림 2, 그림 3의 特性과 同一함을 알 수 있다.

또한 同一金屬系인 Au-PET-Au系 및 Al-PET-

Al系의 兩極을 短絡할 때 溫度變化에 따라 흐르는 電流는 無視할 수 있을 정도로 微小電流이고, 方向도 一定치 않으므로 Au-PET-Cu系에서 短絡時에 흐르는 電流는 蒸着時의 熱의 영향 및 高分子 제작時의 靜電氣에 의한 것이라고는 생각할 수 없겠다.

c) M-P-M系 I_e-T特性的 β依存性

絶緣體의 양단간에 電壓을 印加할 때 흐르는 電流는 印加電壓의 極性과 同一方向으로 흐르는 것이 定常임은 널리 알고 있는 사실이다. 本實驗에서는 低溫側에서 電流의 方向이 定常이 아니었으므로 이를 理論적으로 검토하기 위하여, 昇溫速度 β (= dT/dt)를 變경하여 實驗하였다. β를 0.4°C/min에서 0.8°C/min로 2배한 경우의 I_e-T特性을 그림 5에 圖示하였다. β가 變하여도 現象은 같고, 低溫側에서 電流의 크기도 거의 2배를 나타내고 있음으로, 昇溫速度가 커짐에 따라 印加電壓極性과 反對方向의 電流成分이 增加함을 알았다.

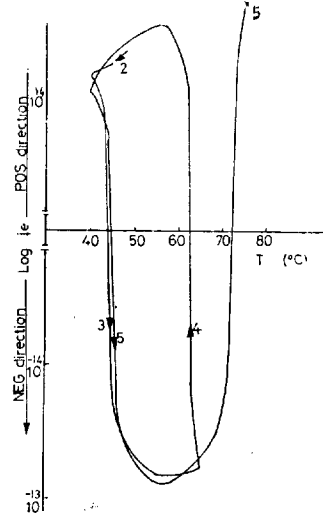


그림 5. Au-PET-Au系電流의 昇溫速度 β依存性
Fig.5. The dependence of current for Au-PET-Au system on a heating rate β

d) M₁-P-M₂系에 外部電壓 V_e印加時의 I_e-T特性

Au-PET-Cu系의 短絡時의 溫度變化에 따라 흐르는 短絡電流 및 方向變化에 對하여는 Au-PET-Au系에 外部電壓을 印加 및 短絡時의 溫度變化에 따라 흐르는 電流特性으로 부터 現象論적으로는 어느정도 확인되

었다. 다시 Au-PET-Cu系의 短絡電流에 대한 機構를 Band구조의 형성을 導入하여 더욱 상세히 검토하기 위하여 Au-PET-Cu系의 兩端에 外部電壓을 印加하여, 溫度變化에 따른 電流特性을 추정하였다. Au-PET-Cu系에 0.45kV/cm를 印加했을 때의 特性과 크기와 現象이 거의 같았으나, 0.45kV/cm보다 微小한 $\ominus 65\text{V/cm}$ 를 印加할 때의 I_e-T 特性은 그림 6에 圖示한 바와 같이 低溫에서는 無視할 수 있을 정도로 적고,

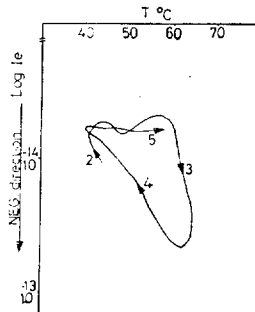


그림 6. 正極性電壓印加한 Au-PET-Cu系의 電流-溫度特性

Fig. 6. Current vs temperature characteristic for Au-PET-Cu system, Applying the external voltage with positive polarity

昇溫-降溫에 따라 一定한 電流의 方向性도 없다. 그러나 $\ominus 65\text{V/cm}$ 를 印加할 때의 I_e-T 特性은 그림 7에 圖示하였다. 이 그림으로부터 Au-PET-Cu系에 \ominus

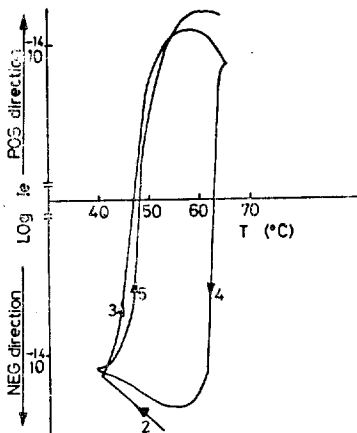


그림 7. 負極性電壓印加한 Au-PET-Cu系의 電流-溫度特性

Fig. 7. Current vs temperature characteristic for Au-PET-Cu system, Applying the external voltage with negative polarity

65V/cm 를 印加할 때는 短絡時의 特性과 同一함을 알았다.

4. 實驗結果의 考察

앞 절에서의 實驗結果로부터 異種金屬으로 Sandwich된 Au-PET-Cu系에 溫度를 變化시킴에 따라 方向性이 있는 短絡電流가 흐르는 것을 알았다. 異種金屬 구조인 Au-PET-Cu系의 短絡電流特性이 同一金屬 구조인 Au-PET-Au系에 外部電壓을 印加할 때의 電流特性과 同一現象이므로 異種金屬間에 놓인 高分子 絕緣體內에 接觸電位差가 나타남을 實驗의 現象으로부터 間接적으로 알 수 있다. 이를 特性論적으로 다시 검토하기 위하여, 金屬과 絕緣體內에 접속 前後의 energy diagram을 그림 8과 9에 圖示하였다. Au-PET-Au系의 접속후의 Band구조는 그림 8-(b)이고, 여기에

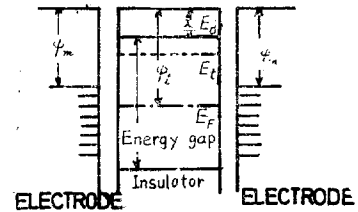


그림 8-(a) 接觸前

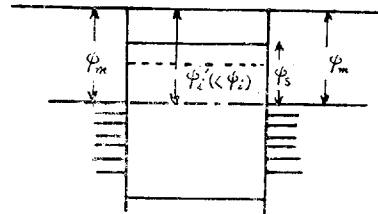


그림 8-(b) 接觸後

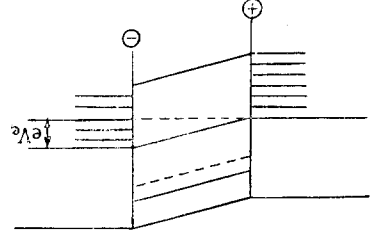


그림 8-(c) 電壓印加後

그림 8. M-P-M系의 에너지 다이어그램(空間電荷密度가 적을 경우)

Fig. 8. Energy diagram for a M-P-M system (in which the space charge density is small)

外部電壓을 印加하면 그림 8-(c)와 같은 band 구조를 형성하고 있음을 가정할 수 있다. 그러므로 外部에 印

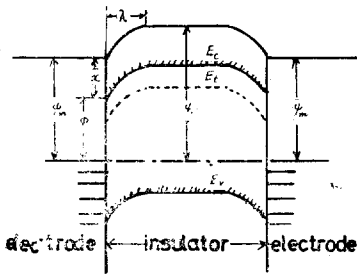


그림 9-(a) Ohmic 接觸

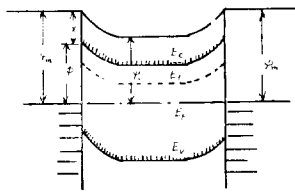


그림 9-(b) Blocking 接觸

E_c : Conduction band E_v : Valence band
 E_t : trap level x : Electron affinity
 E_F : Fermi level λ : penetration depth
 그림 9. M-P-M系의 에너지 다이어그램(空間密度가 充分히 많을 경우)

Fig. 9. Energy diagram for a system(in which the space charge density is sufficient)

加하는 電壓의 極性에 따라 그림 8-(c)의 band구조를 그림 8-(b)와 같이 바꿀 수 있었기 때문에 Au-PET-Cu系의 内部에 그림 8-(c)와 같은 接觸電位差가 발생하고 있는 가를 理論적으로 확인할 수 있겠다.

Au-PET-Cu系의 兩端間에 $\ominus 65V/cm$ 의 電壓을 印加하여 그림 8-(b)와 같은 band구조가 되도록 하였을 때 特性 그림 6은 그림 2에서와 같은 特性을 표시하지 않고 $40^{\circ}C \sim 55^{\circ}C$ 범위내에서 무시할 수 있을 정도로 微小電流가 흐른다는 點과 band구조의 경사가 더욱 크게 되도록 $\oplus 65V/cm$ 의 電壓을 印加했을 때의 特性 그림은 電流의 크기에는 문제가 있었으나, 그림 7에서와 같은 特性을 나타내고 있는 點으로 보아 異種金屬間에 놓인 高分子內에 接觸電位差가 生기고 있을 을 알 수 있다.

이 接觸電位差는 室溫에서 電池와 같은 役割을 하는 것이 아니고, 室溫에서는 接속의 순간, 두 物體間에 일어나는 不平衡狀態에서 熱平衡狀態로 도달하는 過渡過程(즉 dielectric relaxatoin current의 과정)에서는 短絡電流가 흐를 수 있으나, 일단 熱平衡狀態에 도달하고 나면, 短絡電流는 흐르지 않는다. 그러나 異種

金屬의 일함수의 差에 해당하는 接觸電位差가 高分子의 bulk內에 energetic state로 存在하고, 이 energy 상태는 溫度變化에 一定하나, 試料의 誘電率이나, 電極間의 靜電容量이 溫度에 따라 變化하므로 兩極表面에 電荷의 差가 生겨서 熱平衡狀態로 趨이하는 과정에서 단락전류가 흐르는것 같다. 그리고 短絡電流의 方向이 低溫과 高溫에서 逆轉現象을 보이는 것은 전체의 短絡電流成分이 두 成分 즉 同一方向成分과 反對方向成分으로 이루어진 것으로 알 수 있다. M-P-M系의 試料에 대한 Maxwell model을 사용하여 外部에 一定한 電壓을 印加한채 均一昇溫速度로 昇溫할 때의 電流는 다음 (1)式으로 유도할 수 있다.

$$I(T) = K\sigma(T)Ve + [(-)Ve \frac{dc}{dT} \cdot \beta] \dots\dots\dots(1)$$

로(1)式的 右邊 제 1項은 Ve極性과 同一成分으로, $\sigma(T)$ 가 Ve와 T의 變化에 따라 線形 혹은 非線形的으로 變化하는 가에 따라 그 영향이 크게 미칠 것이다. (1)式的 右邊 제 2項은 印加電壓의 極性과 반대方向의 成分으로 形成되는 것으로 간주 된다. 그것은 I_e-T 特性의 β 依存性의 實驗결과로 부터 β 를 2倍로 할때 低溫側에서 Ve極性과 反對方向의 成分이 거의 2倍로 된 사실에 의하여 확신된다.

이와같이 Au-PET-Cu系에 外部電壓을 印加함이 없이 다만 溫度變化에 따라 흐르는 短絡電流에 대한 機構와 短絡電流의 方向變化에 대한 解析이 부분적으로 可能하나 ① 그림 9에 표시한 接觸상태가 界面에 形成될때, ② 高分子 表面의 surface state, ③ 측정시의 분위기의 影響, ④ 高分子內의 trap level(shallow, deep)를 고려할 때 등 여러가지 문제점이 있기 때문에 結合적으로 해석하기 위하여는 이들에 대한 相關研究가 남아 있겠다. 이를 重點적으로 금후 研究하여 명확히 밝혀지는 대로 보고하기로 하겠다.

5. 結 論

- 實驗結果와 考察에서 얻어진 결과를 정리해 보면
- ① 高分子 兩面에 異種金屬으로 眞空蒸着한 M₁-P-M₂系에서는 異種金屬에 일함수 差에 해당하는 接속 전위차가 高分子의 bulk內 energetic state로 存在하며, 이로 말미암아 溫度變化에 의하여 短絡電流의 source가 된다.
 - ② 同一金屬인 M-P-M系의 兩極에 微小電壓을 印加할 때에 흐르는 電流의 方向은 低溫側에서는 靜電容量과 昇溫速度의 要因이 電壓極性의 반대방향으로 흐르게 하는 成分을 形成하고, 高溫側에서는 도전율 $\sigma(T)$ 가 高溫에서 非線形的變化 때문에 電壓極性과 同一方

向으로 흐르게 하는 成分이 되어, 電流의 方向이 逆轉 된다.

③ 異種金屬의 M_1-P-M_2 語의 band구조는 同一金屬의 $M-P-M$ 系의 電壓을 印加할 때의 band구조와 同一形態를 형성하고, M_1-P-M_2 系의 短縮電流의 方向이 $M-P-M$ 系의 印加電壓時의 電流方向과 同一機構로서 變化한다.

本 研究에서 언어진 金屬-高分子의 接觸에서 일어나는 현상은 지금까지 觀測되어 왔으나, 금후 高電壓化, 電氣機器의 絕緣設計 및 直流高壓 cable 등 實用的 人用面에서 고려하여야 할 문제인 줄로 믿는다. 그러나 本 研究와 關連한 接觸現象에 대하여는 여러가지 복잡한 문제점이 아직 많이 남아 있기에, 더욱 많은 研究가 必要할 것으로 尙호되어 선배 諸位의 좋은 지도 편달을 바랍과 아울러 계속 연구하여 추후 발표하기로 하겠다.

끝으로 本 研究에 始終 積極的으로 指導하여 주신 指導教授 家田正之博士와 검토에 여러가지 助言을 아끼지 않은 助教授 澤 五郎博士 및 精密測定에 협력하여 주신 講師 森田博士에게 심심한 사의를 표한다.

참 고 문 헌

1) N.F. Mott & R.W. Gurney : Electronic

Processes in Ionic crystal. p.p. 174~182, 2nd Ed. Oxford Univ. (1948)

2) Jagguest. Pankove : Optical Processes in Semiconductors. pp. 170~190, Prentice-Hall, Inc. (1971)

3) Davies : 1967, Static Electricfication Conf. pp. 26-36 (1967)

4) Davies : Brit. J. Phys. (J. Phys. D.) No.2 (1969)

5) 矢作 : 日本電氣學會誌 90-4, 45-39 (1970)

6) Y. Takai, M. Ieda, et al : Japan. J.A.P.14. No.4 p.473. (1975)

7) 李, 澤, 家田 : 日本電氣學會 全國講演論文集 2-208 (1975)

8) G. Sawa, D.C. Lee, & M. Ieda : Japan J.A.P. 14. No.5 p.643 (1975)

9) M. Hirose, T. Arizumi. : Japan. J.A.P. 9. No.3 p.260 (1970)

10) 李, 澤, 家田 : 日本電氣學會 東海講演論文集 p.54 (1975)

11) 李, 澤, 家田 : 日本電氣學會 關西講演論文集 G5-6 (1975)