絶縁液体中の微分ショットキー電流

正 員 谷 藤 七 郎 (芝浦工大)

正 員 野 末 鉄 有 (芝浦工大)

Incremental Shottoky Current and Associated Negative Ion Current
in Dielectric Liquid

Shichiro Tanifuji, Member, Tetsuuri Nozue, Member (Shibaura Institute of Technology)

キーワード：絶縁液体，微分ショットキー電流，高電界過渡伝導電流，プリストレス

著者らは以前から液体中の直流高電界伝導現象について研究⁽¹⁾⁽²⁾を行っており，その伝導特性はショットキー放出の式に従っていることを示してきた⁽³⁾が，パルス電圧印加時の過渡伝導電流の測定は吸収電流が大きすぎて不可能であった。本報告では，この過渡伝導電流特性を解明する手法として，新しく導入した概念である微分ショットキー電流とその測定法について述べる。実験で検出される電流は次の量である。

$$j = \sigma E + \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial t}$$

高電界をプリストレスしておくことで分極 P を飽和させておき，更に電界 E の時間微分の項はシェーリングブリッジを用いて除去すれば，第1項の伝導電流の項のみを測定できる。この第1項の電流をショットキー放出電子によるものとみるのである。

(1) 微分ショットキー電流   ショットキー電流は次式で与えられる。

$$I = I_D \exp(\beta_s \sqrt{E}) \dots\dots\dots (1)$$

$$\beta_s = \begin{cases} \sqrt{\frac{e^3}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}} / kT & : \text{LePage-DeBridge}^{(4)} \\ \dots\dots\dots (2) \\ \sqrt{\frac{e^3\varepsilon_r}{4\pi\varepsilon_0}} / kT & : \text{Baker-Boltz}^{(5)} \\ \dots\dots\dots (3) \end{cases}$$

ここに， I_D ： $E=0$ のときの I の値 (Dushman の式)， E ：陰極面の電界， e ：電子電荷， ε_r ：比誘電率， k ：ボルツマン定数， T ：絶対温度

β_s についての (2) 式の値は，液体と陰極が理想的な接触をしている場合であり，(3) 式の値は境界に気体層を挟んだような境界層をもつ場合の値である。実験

結果では (3) 式の値をもつことが示され⁽¹⁾⁽⁶⁾，境界層が (2) 式で期待する簡単なものではなく，複雑なものになっている⁽⁶⁾ことをうかがわせる。

陰極面電界 E として，一定電界 E_0 に微少パルス電界 ΔE を重畳させた場合を考える。この電界 ΔE によるショットキー電流の増分を微分ショットキー電流と呼ぶことにする。ここで，実験条件を

$$\Delta E \ll E_0, \quad \beta_s \Delta E / 2\sqrt{E_0} \ll 1 \dots\dots\dots (4)$$

に設定すると

$$I = I_D \exp(\beta_s \sqrt{E}) = I_D \exp(\beta_s \sqrt{E_0 + \Delta E}) \dots (5a)$$

$$\simeq I_D \exp(\beta_s \sqrt{E_0}) \left(1 + \frac{\beta_s}{2\sqrt{E_0}} \Delta E \right) \dots\dots\dots (5b)$$

となり，微分ショットキー電流は ΔE に比例する。陰極表面から放出された電子は，液体分子や不純物に捕捉されるまでは電子性キャリアとして振舞い，捕足されてはじめてイオン性キャリアとなる。

(2) 電子電流とイオン電流の波形   上述のようにして，液体中に放出された微分ショットキー電子群の伝導モデルを次のように考える。図1はその説明図である。

プリストレス E_0 の状態で放出電流とバルク電流との間で保たれていた平衡が，じょう乱パルス ΔE の印加により破られて微分ショットキー電子群が放出され，初期ピーク電流 I_{e0} (a 点) を形成する。後続の電子群は先発の電子群によるポテンシャルの山などにより放出を抑制される⁽⁶⁾。この状態で，定常漏れ電流と呼ばれる微少電流になるまで， $E_0 + \Delta E$ の電界下での新しい平衡の成立が図られる方向で現象が推移する。この過程は電子的キャリアの移動現象として行われる。ゆえに近似的に最初の電子群のみが δ 関数的

図 1 微分ショットキー電流と負イオン電流
Fig. 1. Electron current and ion current.

に液中に放出されると考え得る。この電子群は負イオンを形成しつつ陽極に向かい走行する。その電子捕捉過程(a→b→c)の緩和時間を τ_c とする。この過程の途中で電子が全部電極間けきを渡り終る(b点)と、その時刻 T_e 以後は電子電流 I_e は消失する。一方、この時刻には電極間けき d 内で形成されたイオン総数は最大になっており、負イオン電流は最大(e点)である。イオンの移動速度 u_n は電子のそれ u_e の約 10^{-4} 倍であるから、イオンのトランジット時間 T_n (d点)は電子のそれ T_e の約 10^4 倍となる。

このようなモデルにより電子電流 I_e と負イオン電流 I_n の波形を数式で表すと次式のようになる⁽⁷⁾。

$$I_e = \begin{cases} \frac{en_0u_e}{d} e^{-\eta u_e t} & : 0 < t < T_e \quad \cdots (6a) \\ 0 & : T_e < t \quad \cdots \cdots (6b) \end{cases}$$

$$I_n = \begin{cases} \frac{en_0u_n}{d} (1 - e^{-\eta u_n t}) & : 0 < t < T_e \quad \cdots (7a) \\ \frac{en_0u_n}{d} (1 - e^{-\eta(d - u_n t)}) & : T_e < t < T_n \quad \cdots (7b) \\ 0 & : T_n < t \quad \cdots \cdots (7c) \end{cases}$$

ここで、 n_0 :初期注入電子数、 u_e, u_n :それぞれ電子およびイオンの移動速度、 e :電子電荷、 T_e, T_n :それぞれ電子およびイオンの電極間走行時間

実験的にこれらの波形を観測することにより次の諸量を測定できる。

$I_{e0} = en_0/T_e$: 微分ショットキー電流初期値(a点)

$\tau_c = 1/\eta u_e$: (f点), $\tau_n = 1/\eta u_n$

$T_e = d/u_e$: (b点), $T_n = d/u_n$: (d点)

これらの測定値から初期注入電子数 n_0 、電子とイオンの移動度 μ_e と μ_n 、電子付着係数 η 、電子が陰極から放出されて負イオン化するまでの平均移動行程 λ_e とイオンの平均自由行程 λ_n を計算し得る。

(3) 微分ショットキー電流波形の例 図2は前

電極間けき長: $d=2\text{mm}$
印加電圧:
 $V + V_p = (E_0 + \Delta E)d$
 $= -(4,000\text{V}) + (-200\text{V})$

図 2 微分ショットキー電流波形の測定例
Fig. 2. An oscillogram of electron current.

述したシェーリングブリッジを用いて変圧器油中で観測した微分ショットキー電流波形の一例である。このことから、本手法を導入すれば高電界過渡伝導電流を高精度で測定できることが明らかになった。

今後は、微分ショットキー電流波形を観測して n_0 、 τ_c 、 T_e などの諸物理量を求め、電子電流、イオン電流のモデル波形を算出し、液体中の高電界伝導現象、界面現象などの解明を進めていく予定である。

なお、この研究には(財)吉田育英会の援助を得たことを付記して謝意を表する。

(平成2年9月3日受付)

文 献

- (1) 例えば、谷藤・岳田・岩竹:「液体中の導電(III)破壊近くの導電特性」, 昭33電気四学会連大, No. 96
- (2) 谷藤・野末:「絶縁油の電子性微分吸収電流」, 電気学会放電研資, ED-86-149 (昭61)
- (3) 谷藤・野末:「液体中の高電界伝導(ショットキー型電子放出の検討)」, 昭56電気学会全大, No. 154
- (4) W. R. LePage & L. A. DeBridge: "Electron Emission into Dielectric Liquids", *Phys. Rev.*, 58, 61 (1940)
- (5) E. B. Baker & H. A. Boltz: "The thermionic Emission into Dielectric Liquids", *ibid.*, 51, 275 (1937)
- (6) 例えば、中村・酒井・金子・沢田・田頭:「極低温混合液体中の光電子注入」, 電気学会放電研資, ED-87-52 (昭62)
- (7) 谷藤:「電子付着機構のみの場合の電子伝導」, 未発表

谷 藤 七 郎 (正員)

昭和5年3月11日生。30年3月東北大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月芝浦工業大学電気工学科助手、現在、同助教。

野 末 鉄 有 (正員)

昭和16年12月16日生。42年3月芝浦工業大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月、同大学同学科助手、現在、同講師。