有機単電子トンネル素子の電流電圧特性における 界面空間電荷の影響

非会員 野 口 裕 (東京工業大学)
正 員 真 島 豊 (東京工業大学)
正 員 岩 本 光 正 (東京工業大学)

Analysis of Space Charge Effect on the Organic Single Electron Tunneling Junction

Yutaka Noguchi, Non-member, Yutaka Majima, Member, Mitsumasa Iwamoto, Member (Tokyo Institute of Technology)

The step structure observed in the I-V characteristics of single electron tunneling devices depends on the capacitance formed between electrode and quantum dot. Thus the capacitance was analyzed taking account of the presence of space charge layer and the orientational ordering of dipoles at the metal/organic film interface. It was concluded that the shift of step voltage was expressed by the difference in the surface potentials built at the two electrode/film interfaces. This analysis was well supported by the existing experiments on Au/PI/Rhodamine-dendrimer/polyimide(PI)/Au and Au/PI/Rhodamine-dendrimer/PI/Al junctions.

キーワード：空間電荷、界面現象、ダイポールモーメント、オーダーパラメータ、クーロンブロッケイド、単電子トンネル素子

1. ま え が き

近年、トンネル電流を利用した有機電子素子が注目され、有機分子の電子性準位を介した伝導に関する研究が盛んに行われている。例えば、Aviram と Ratner による単分子整流素子⁽¹⁾や、Fischer らによる最高被占分子軌道 (highest occupied molecular orbital, HOMO)、最低空分子軌道 (lowest unoccupied molecular orbital, LUMO) を介したトンネル伝導による整流特性⁽²⁾などが報告されている。我々も今までに、ポリイミドトンネル絶縁層に挟まれたポルフィリン分子の電子準位を介したトンネル伝導を検出している⁽³⁾。また、最近になって、導電性の核を絶縁性の外殻で覆った構造を持つ分子ローダミンデンドリマー (Rh-G2) を用いて、金属/ポリイミド (PI)/Rh-G2/PI/金属構造素子を作製し、30K 程度の低温において、その電流電圧特性に単電子トンネル素子⁽⁴⁾に特徴的な電圧ステップが現れる事を確認している。そして、Rh-G2 を含まない金属/PI/金属素子においては、電圧ステップが現れない事から、Rh-G2 分子は単電子トンネル素子の微小ドットとして機能していると推定した⁽⁵⁾。これらの例に見られるように、有機超薄膜を用いる事により様々な興味深い電気特性が報告されるようになってきている。しかし、こうした電子素子の特性は、超薄膜化とともに電極金属と有機膜の接触界面で発生する電気現象の影響を顕著に受けていると考えられる⁽⁶⁾。

また、有機 EL などの発光素子の分野では、素子特性向上のため、電極/有機膜界面のエネルギーバンド構造を調べる事が重要な課題となっている⁽⁷⁾。

我々はこれまでに、金属/有機膜界面の接触帯電現象を表面電位法によって調べ、界面のナノメートルの厚さ領域における空間電荷分布を明らかにしてきた。そして、有機膜内の空間電荷が形成する電位、すなわち表面電位の大きさは数百 mV にも達することを示した。同様に、ダイポールモーメントの大きさが 1 D 程度の分子が金属電極上に配向していれば、数百 mV 程度の表面電位を形成すると予想され、素子のエネルギーバンド構造は大きく変化してしまうと見られる⁽⁸⁾⁽⁹⁾。したがって、有機膜素子の動作機構を理解するためには、界面の電子状態に関する知見が極めて重要になる。

そこで本論文では、界面空間電荷や有機分子のダイポールモーメントによって形成される表面電位が、前述の Rh-G2 分子を用いた素子における微小ドットと金属電極の間に形成される容量をどのように変化させるかを見積もり、素子の電流電圧特性に及ぼす影響を解析する事にした⁽¹⁰⁾。

2. 実験および測定結果

絶縁層として Kapton 型ポリイミド (PI)(図 2(a))、微小ドット用の分子としてローダミンデンドリマー (Rh-G2)(図 2(b)) を使い、Au/PI (25)/PI:Rh-G2=50:1 (1)/PI

図1 (a)Kapton 型ポリイミドの分子構造
(b) ローダミンデンドリマー (Rh-G2) の分子構造
Fig.1. (a)A chemical structure of Kapton-type polyimide. (b)A chemical structure of rhodamine-dendrimer(Rh-G2).

(30)/Au 構造素子 (図 2(a)) 及び Au/PI (25)/PI:Rh-G2=500:1 (1)/PI (30)/Al 構造素子 (図 2(b)) を作製した。膜は LB 法によって累積され、電極の作製には真空蒸着を用いた (真空度 $\sim 10^{-6}$ Torr)⁽⁵⁾。括弧内の数字は累積層数を示している。また、比はモル比を示し、PI と Rh-G2 の混合膜が累積された事を表している。Rh-G2 は、導電性の核を絶縁性の外殻で覆った構造をしており、分子間の相互作用が弱く、各々の分子は空間的に孤立しやすいという特徴を持つため⁽¹¹⁾、単電子トンネル素子の微小ドットとして利用できると考えられる。上部電極に金を用いる場合は、下部電極との導通を防ぐ目的でアルミ酸化膜を保護層として蒸着した。電極面積は、金電極で 0.1 mm^2 、アルミ電極で 0.25 mm^2 である。50:1(500:1) 混合膜の 1 分子あたりの占有面積が $95.2 (92.6) \text{ \AA}^2$ であるから⁽⁵⁾、一つの電極中に $2.1 \times 10^9 (5.4 \times 10^8)$ 個の Au/PI/Rh-G2/PI/Au(Al) 素子が並列に並ぶ事になる。このようにして作製した素子の電流電圧特性を下部電極側を基準とし、上部電極側にバイアスかける事によって、30 K 程度の低温で測定した。

図 3(a),(b) は、Au/PI/Rh-G2/PI/Au 及び Au/PI/Rh-G2/PI/Al 素子の 30 K における電流電圧特性を示している。それぞれ、0.08 V、-0.05 V 及び 0.3 V、-0.25 V に電圧ステップが現れている事がわかる。

図2 (a) Au/PI/Rh-G2/PI/Au 構造素子 (b) Au/PI/Rh-G2/PI/Al 構造素子

Fig.2. (a) Au/PI/Rh-G2/PI/Au junction. (b) Au/PI/Rh-G2/PI/Al junction.

3. 解 析

クーロンブロッケイドの理論によれば⁽⁴⁾、単電子トンネル素子の電流電圧特性におけるステップの現れる電圧は、微小ドットと金属電極との間の容量のみに依存する。しかしながら、図 3 では、上部電極の金属によって電圧ステップの位置が変化していることが分かる。そこで、微小ドットと金属電極との間に形成される容量を電極/有機膜界面に形成される空間電荷層を考慮に入れて解析を試みる (図 4)。

〈3・1〉 球-平板コンデンサの容量 球-平板電極間に空間電荷層が存在しない場合、そこに形成される容量は電気映像法によって求めることができる⁽¹³⁾。すなわち、球と平板電極における境界条件を満たすように球電極内に点電荷 $q(i)$ を位置 $A(i) (i = 1, 2, \dots)$ に配置していく。すると、点電荷 $q(i)$ 及びその位置 $A(i)$ は、次のように求められる。

$$q(i) = \frac{\sinh y}{\sinh(i+1)y} q(0), \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (1)$$

$$A(i) = \frac{\sinh iy}{\sinh(i+1)y} r, \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (2)$$

ただし、

$$q(0) = 4\pi\epsilon_0 r V \quad (3)$$

$$y = \ln(s + \sqrt{s^2 - 1}), \quad s = \frac{z_h}{r} + 1 \quad (4)$$

である。 V は球に加えた電圧、 r は球の半径、 z_h は球と平板間の距離である。したがって、球-平板コンデンサに形成される容量 $C_0 (= Q/V)$ は、

$$C_0 = \frac{Q}{V} = \frac{\sum_{i=0}^{\infty} q(i)}{V} = 4\pi\epsilon_0 r F(y) \quad (5)$$

となる。ただし、

図3 (a)Au/PI/Rh-G2/PI/Auの電流電圧特性 (29.8 K) (b)Au/PI/Rh-G2/PI/Alの電流電圧特性 (32.8 K)

Fig. 3. (a) A typical I-V characteristic of Au/PI/Rh-G2/PI/Au junction (29.8 K). (b) A typical I-V characteristic of Au/PI/Rh-G2/PI/Al junction (32.8 K).

$$F(y) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\sinh y}{\sinh(i+1)y} \dots\dots\dots (6)$$

である。 $4\pi\epsilon_0 r$ は真空中に置かれた球 (半径 r) の持つ容量であるから、 $F(y)$ は、この球が導体に近づく事による鏡像の効果を表している。

次に、電極/有機膜界面に空間電荷層またはダイポールモーメントが存在する場合の球-平板コンデンサの容量を考えてみる。まず、図4に示したように、電極/有機膜界面点 $p(r_p, z_p)$ の位置に点電荷 $q(i) (i = 1, 2, \dots)$ がつく電位 V_p を求めると、

$$V_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=0}^{\infty} \left(\frac{q(i)}{R_i^+} - \frac{q(i)}{R_i^-} \right) \dots\dots\dots (7)$$

となる。ただし、

図4 球-平板系コンデンサの容量

Fig. 4. The schematic illustration for sphere-plane electrode system.

$$R_i^+ = \sqrt{r_p^2 + (r + z_h - A_i - h_p)^2},$$

$$R_i^- = \sqrt{r_p^2 + (r + z_h - A_i + h_p)^2} \dots\dots\dots (8)$$

である。したがって、点 p の位置に点電荷 q_p を置いたときに球電極に誘起される電荷量 ΔQ_p は、Green の相反定理⁽¹⁴⁾ と式 (7)、(8) から、

$$\Delta Q_p = -\frac{V_p}{V_a} q_p$$

$$= -\sum_{i=0}^{\infty} \left[\frac{\sinh y}{\sinh(i+1)y} \cdot \frac{2q_p h_p}{r} \cos \theta_i^p \times \frac{r^2}{d_g^2} \cdot \cos^2 \theta_p^i \right] \dots\dots (9)$$

と求められる。ただし、 $2h_p d_g \ll r_p^2 + d_g^2$ と仮定した。また、 V_a は球-平板間にかかる電圧、 $\cos \theta_i^p = \frac{d_g}{R_i^+}$ 、 $d_g = r + z_h - A_i$ である。ここで、 $q_p h_p \cos \theta_i^p$ は、点 p に置かれたダイポールモーメント $\mu_p (= q_p h_p)$ の A_i 方向成分と等価である⁽¹⁵⁾。

この結果を踏まえ、点電荷 q_p が面密度 $\rho(z)$ で導体球の中心直下位置を中心として、半径 R の領域内に分布している場合を考えてみる。すると、球-平板間に形成される容量は、

$$C = C_M - \frac{1}{V_a} \int_0^D \left[\sum_{i=0}^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^R 2z \rho(z) \frac{\sinh y}{\sinh(i+1)y} \times \frac{r_a}{d_g^2} \cos^3 \theta_i^p dr_a d\varphi \right] dz$$

図5 金属/PI/Rh-G2/PI/金属の等価回路図

Fig. 5. The schematic illustration and equivalent circuit of metal/PI/Rh-G2/PI/metal junction.

$$= C_M - \frac{4\pi r}{V_a} \int_0^D \left[\sum_{i=0}^{\infty} z \rho(z) \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + (R/d_g)^2}} \right) \times \frac{\sinh y}{\sinh(i+1)y} \right] dz \quad (10)$$

となる。ただし、 D は平板電極/有機膜界面からの空間電荷層の深さ、 C_M は比誘電率 ϵ 中の球-平板コンデンサの容量($=\epsilon C_0$)である。同様に、電極/有機膜界面にダイポールモーメント μ をもつ分子が面内に分布して存在する場合には、容量 C は z 軸方向に対する分子の平均の配向角をあらわすオーダーパラメータ $S(<\cos\theta>)$ と分子面密度 n_μ を用いて、

$$C = C_M - \frac{4\pi r \mu S n_\mu}{V_a} \times \sum_{i=0}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + (R/d_g)^2}} \right) \frac{\sinh y}{\sinh(i+1)y} \quad (11)$$

とあらわす事ができる。したがって、式(10)及び(11)より、 $R \rightarrow \infty$ では、

$$C = C_M \left(1 - \frac{V_s}{V_a} \right) \quad (12)$$

ただし、

$$V_s = \frac{1}{\epsilon \epsilon_0} \int_0^D z \rho(z) dz, \text{ または、 } V_s = \frac{\mu S n_\mu}{\epsilon \epsilon_0} \quad (13)$$

である。なお、 V_s は、ケルビンプローブ法を用いて測定できる電極/有機膜界面の空間電荷層またはダイポールモーメントが作る電位と一致する⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

〈3・2〉単電子トンネル特性におけるステップ電圧 電極/有機膜界面に空間電荷およびダイポールモーメントが存在する場合の球-平板系コンデンサの容量は式(13)によって求められる。図5に示したように単電子トンネル素子の構造は、二つの容量 C_1 、 C_2 の直列接続と考える事ができるので、各容量は

$$C_1 = C_{M1} \left(1 - \frac{V_{s1}}{V_{a1}} \right), \quad C_2 = C_{M2} \left(1 + \frac{V_{s2}}{V_{a2}} \right) \quad (14)$$

となる。 V_{s1} 、 V_{s2} は、それぞれ各電極/有機膜界面に形成される表面電位を示し、その大きさは式(15)で与えられる。また、各容量にかかる電圧 V_{a1} 、 V_{a2} は、素子全体に加える電圧を V とすれば、

$$V_{a1} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \cdot \frac{V}{C_1}, \quad V_{a2} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \cdot \frac{V}{C_2} \quad (15)$$

となる。したがって、電極1を基準として電極2に正バイアスを印加したとき、一番目のステップが現れる電圧 V_{c1} は、クーロンブロッケイドの条件 $e/2C$ より、

$$V_{a1} = \frac{e}{2C_1} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \cdot \frac{V_{c1}}{C_1} \quad (16)$$

となる。式(14)~(16)を連立方程式として解くと、

$$V_{c1} = \frac{e(C_{M1} + C_{M2})}{2C_{M1}C_{M2}} + (V_{s1} - V_{s2}) = V_{c1}^0 + (V_{s1} - V_{s2}) \quad (17)$$

と求められる。ここで、式(17)の第一項は表面電位を考慮しない場合、すなわち界面に空間電荷がないとした場合の一番目のステップが現れる電圧である。つまり、両電極界面に形成される表面電位の差の分(式(17)の第二項)だけステップの電圧がシフトする事を示している。

同様の方法で、 n 番目のステップが現れる電圧 V_{cn} を計算すると、

$$V_{cn} = V_{cn}^0 \cdot G(V_c) + V_{c(n-1)}^0 \cdot \frac{2C_{M1}}{C_{M1} + C_{M2}} \left(1 - \frac{V_{s2}}{V_{a2}} \right) \quad (18)$$

となる。ただし、

$$V_{cn}^0 = \frac{n e (C_{M1} + C_{M2})}{2C_{M1}C_{M2}} \\ G(V_c) = \frac{\left(1 - \frac{C_{M1}}{C_{M1} + C_{M2}} \cdot \frac{V_{s1}}{V_{a1}} + \frac{C_{M2}}{C_{M1} + C_{M2}} \cdot \frac{V_{s2}}{V_{a2}} \right)}{\left(1 - \frac{V_{s1}}{V_{a1}} \right) \cdot \left(1 + \frac{V_{s2}}{V_{a2}} \right)}$$

である。したがって、 n 番目のステップの現れる電圧も電極と膜の間に形成された空間電荷によって発生した表面電位によってシフトする事が分かる。

4. 検 討

次に、Au/PI/Rh-G2/PI/Au及びAu/PI/Rh-G2/PI/Al素子の電流電圧特性に現れたステップについて検討する。こ

これらの素子の一番目の電圧ステップは、図3よりそれぞれ、0.08 V、-0.05 V 及び 0.3 V、-0.25 V に現れている。ここで、素子のサイズから見積もられる電圧ステップの位置をクーロンブロッケイドの理論に従って求めてみる。作製した素子は、Au/PI 25 層/Rh-G2 1 層/PI 30 層/Au(Al) 構造なので、PI1 層辺りの膜厚 0.4 nm、比誘電率 3.0、ローダミンを半径 0.7 nm の導体球と仮定すると、式 (5) より、 $C_1 = 2.42 \times 10^{-19}$ [F]、 $C_2 = 2.40 \times 10^{-19}$ [F] と求められる。したがって、一番目のステップ電圧の位置は、 ± 0.66 V と求まる。この値は実験値より見積もられる値よりも 2 倍から 10 倍程度も大きい事が分かる。また、この値は、素子の構造のみに依存するので電極金属に関係なく一定である。これらの点で、実験値と大きく異なっている事がわかる。

実験値に見られるステップ電圧の電極金属依存性及び、ステップ電圧の減少の原因は大きく分けて二つあると考えられる。一つは、電極を蒸着する際に膜が損傷する事による膜減りに伴う容量の増加が挙げられる。金はアルミよりも高い温度で蒸着するため、膜に対する熱的な損傷がアルミよりも大きい。また、金はスパイク状に突き刺さるように累積されるため、膜を傷つけやすいことが知られている。これらの要因により、PI 絶縁層の実効的な膜厚が減少し、静電容量が増加する。そのため、Au/PI/Rh-G2/PI/Au 素子では、Au/PI/Rh-G2/PI/Al 素子よりもステップの電圧が小さくなっていると考えられる。

もう一つの原因としては、前節で述べたような界面空間電荷の影響が考えられる。我々が今までに明らかにしたところによると、PI/Au、PI/Al 界面に空間電荷によって形成される表面電位は数百 mV のオーダーである⁽⁸⁾。これらの値は電極金属の仕事関数に依存し、その大きさは PI/Al 界面で大きい。そのため、ステップ電圧が電極依存性を持つと説明できる。また、上下電極に同種の金属を用いた場合でも、バイアス電圧を加えることによって、電極 1 側から電子が注入し、電極 2 側から電子が排出され、 V_{s1} が負に、 V_{s2} が正にシフトし、ステップ電圧を減少させることが考えられる。したがって、両電極間において電荷のやり取りのしやすさが違えば、正負でのステップの位置がずれることも予想される。実際に、上部電極と下部電極では厚さや凹凸の様子なども異なるため、その可能性は十分に考えられる。以上述べてきたように、電極と平板間に形成される容量は膜の損傷や界面電荷の存在により変化すると見られる。ところで筆者らは、Au/PI/Rh-G2/PI/Al 素子特性に現れるステップ電圧が温度依存性を示す実験結果を得ており、そのことから後者の影響が最も主要と考えている⁽¹⁰⁾。なお、30 K という極低温において表面電位が測定された例は無く、界面電位によってどの程度のシフトが起きるのかは、今後の課題である。

また、式 (17)、(18) によれば、ステップ電圧のシフトは両電極界面に形成される界面電位の差によって生じる。そのため、素子の片面への光照射やダイポールモーメントを持つ分子を累積する事によって界面電位の差を作り、シフ

ト量を変化させることが可能と見られる。また、ダイポールモーメントが形成する表面電位はその分子の配向に強く依存する。したがって、分子の配向変化させることにより、ステップ電圧の制御が可能であると考えられる。

5. 結 論

界面空間電荷が有機単電子トンネル素子の電流電圧特性に与える影響をクーロンブロッケイドの理論に基づいて、微小ドットと金属電極間に形成される実効的な容量を見積もることにより解析した。その結果、金属電極/有機膜界面に形成される空間電荷層、またはそこに存在するダイポールモーメントが作る表面電位の両電極間における差が単電子トンネル素子の表面電位がステップ電圧をシフトさせることを示した。

謝辞

本研究を進めるにあたり、ローダミン分子の合成ならびに素子作製等に御議論頂いた郵政省通信総合研究所関西支所、ナノ機構研究室 (室長 益子信郎 博士) の関係各位に感謝いたします。

(平成 12 年 9 月 20 日受付)

文 献

- (1) A. Aviram and M. A. Ratner, "Molecular Rectifiers", *Chem. Phys. Lett.*, 29, 277 (1974).
- (2) C. M. Fischer, M. Burghard, S. Roth and K. v. Klitzing, "Organic Quantum Wells: Molecular Rectification and Single-Electron Tunneling", *Europhys. Lett.* 28, 129 (1994).
- (3) M. Wada, T. Kubota and M. Iwamoto, "Investigation of Electron Transport Properties of Polyimide Langmuir-Blodgett Films Containing Porphyrin by $d^2V/dI^2 - V$ measurement", *Jpn. J. Appl. Phys.* 32, 3868 (1993).
- (4) S. Carrara, "Nano-particles and Nanostructured Films", ed. J. H. Fendl, (Wiley-VCH, Weinheim, 1998, Chap. 15).
- (5) Y. Noguchi, Y. Majima, M. Iwamoto, T. Kubota, T. Nakahama, S. Yokoyama and S. Mashiko, "Current-Voltage Characteristics with a Step Structure of Metal/Polyimide/Rhodamine dendrimer/Polyimide/Metal Junction", *IEICE Trans. E83-C*, 1076 (2000).
- (6) E. Itoh, H. Kokubo, M. Iwamoto, M. Burghard, S. Roth and M. Hanack, "Electrostatic Phenomena in π -conjugated Langmuir-Blodgett Films on Metal Electrodes" *Jpn. J. Appl. Phys.* 37, 577 (1998).
- (7) V.-E. Choong, M. G. Mason, C. W. Tang and Y. Gao, "Investigation of the interface formation between calcium and tris-(8-hydroxy quinoline) aluminum", *Appl. Phys. Lett.* 72, 2689 (1998).
- (8) M. Iwamoto, A. Fukuda and E. Itoh, "Spatial Distribution of Charges in Ultrathin Polyimide Langmuir-Blodgett films", *J. Appl. Phys.* 75, 1607 (1994).
- (9) E. Itoh, H. Kokubo, S. Shouriki and M. Iwamoto, "Surface Potential of Phthalocyanine Langmuir-Blodgett Films on Metal Electrode", *J. Appl. Phys.* 83, 372 (1998).
- (10) Y. Noguchi, Y. Majima and M. Iwamoto, "Analysis of Space Charge Effect on the Current-Voltage Characteristic with a Step Structure in metal/polyimide/rhodamine-dendrimer/polyimide/metal Junction", submitted to *J. Appl. Phys.*
- (11) M. Iwamoto and M. Kakimoto, "Polyimide as Langmuir-Blodgett Films", in *Polyimides, Fundamentals and Applications*, ed. Malay K. Ghosh and K. L. Mittal, Marcel Dekker,

- Inc., New York, 1996, Chap. 25.
- (12) 柿本 雅明, “デンドリティック高分子”, 高分子, 47 巻, 11 月号 (1998).
- (13) Y. Oyama, Y. Majima and M. Iwamoto, “Analysis of scanning probe used for simultaneous measurement of tunnelling current and surface potential” J. Appl. Phys., 86, 7087(1999).
- (14) P. M. Morse and H. Feshbach, *Methods of Theoretical Physics*, McGraw-Hill, New York, (1953)
- (15) J. D. Jackson, “*Classical Electrodynamics*”, John Wiley & Sons, Inc. Chap. 4(1962).

野 口 裕 (非会員) 1976 年 10 月 14 日生。99 年 3 月東京工業大学工学部電気・電子工学科卒業。同年 4 月、同大学理工学研究科修士課程入学。有機分子素子の界面物性に関する研究に従事。平成 12 年度猪瀬学術奨励賞受賞。応用物理学会会員。現在、東京工業大学大学院理工学研究科電子物理工学専攻博士課程在学中。

真 島 豊 (正員) 1964 年 12 月 18 日生。92 年 3 月東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了。92 年から 96 年まで株式会社東芝研究開発センターに勤務。現在、東京工業大学大学院理工学研究科助教授。工学博士。主として有機エレクトロニクスに関する研究に従事。91 年応用物理学会賞(論文賞)、99 年電気学会論文発表賞受賞。電気学会、応用物理学会、電子情報通信学会、日本化学会、Material Research Society 会員

岩 本 光 正 (正員) 1952 年 1 月 21 日生。81 年東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了。現在、同大学大学院理工学研究科教授。工学博士。主として、有機超薄膜の電子物性に関する研究に従事。85 年電気学会論文賞、90、94 年素材物性学会山崎賞、91 年応用物理学会賞受賞。IEEE、電気学会、電子情報通信学会、応用物理学会、表面科学会、日本素材物性学会、高分子学会会員。