

実環境を模擬した光電子放出電流測定及び 光電子放出物理モデルの考察

矢部 謙治* 津田 祐介 三宅 弘晃 田中 康寛 (東京都市大学)
大平 正道 奥村 哲平 川北 史朗 高橋 真人 (宇宙航空研究開発機構)

Measurement of the Photoelectron Emission Current in Simulated Real Condition and Discussion of Photoelectron Emission Physical Model

Kenji Yabe* Yusuke Tsuda Hiroaki Miyake Yasuhiro Tanaka (Tokyo City University)
Masamichi Ohira Teppei Okumura Shiro Kawakita Masato Takahashi (JAXA)

1. はじめに

近年、通信や地球観測などの用途で数多くの人工衛星が宇宙空間で運用されている。しかし、これらの衛星は社会基盤に必要不可欠なシステムであるにもかかわらず、帯放電による誤作動・事故による被害が生じている⁽¹⁾。よって宇宙機的设计段階から帯放電現象を把握し、帯放電を考慮した材料選定を実施する必要がある。軌道上での衛星帯電の主要因として、放射線帯に捕捉されている電子や陽子、太陽光があげられる。この中でも、日照中における帯電は太陽光による光電子放出が支配的になるため、宇宙機の表面帯電量を見積もるうえでも、光電子放出を定量評価可能な量子効率重要な物性値となる。これまで真空紫外分光を用いた宇宙機用絶縁材料の光電子放出電流測定装置の開発し、宇宙機材料の量子効率を明らかにしてきた。さらに、数値計算を実施する上で、実験に即した光電子放出特性のモデル化が必要となってくる。しかしながら、実験に即した光電子放出物理モデルは存在しないため、現在当研究グループでは光電子放出過程の物性検討を行っている。そこで本論文では、光電子の放出過程から考えた光電子放出物理モデルの考察、さらに電子線照射された材料における光電子放出電流測定も行った為その結果を報告する。

2. 光電子放出過程の考察

光が照射された際の光電子の放出原理を図1に示す。光電子放出は①光の吸収割合 $A(h\nu)$ 、②材料内の量子効率 q_e 、③励起された電子の表面到達確率 P_L 、④表面脱出確率 P_S の4つのパラメータの積算であり、量子効率 $q(h\nu)$ は(1)式で表す事ができる。

$$q(h\nu) = A(h\nu) \times q_e \times P_L \times P_S \quad (1)$$

まず①光の吸収割合では、材料に照射された光子が材料に吸収される割合とし(1)式の右辺第1項で示す。次に②材料内の量子効率は、1個の光子で

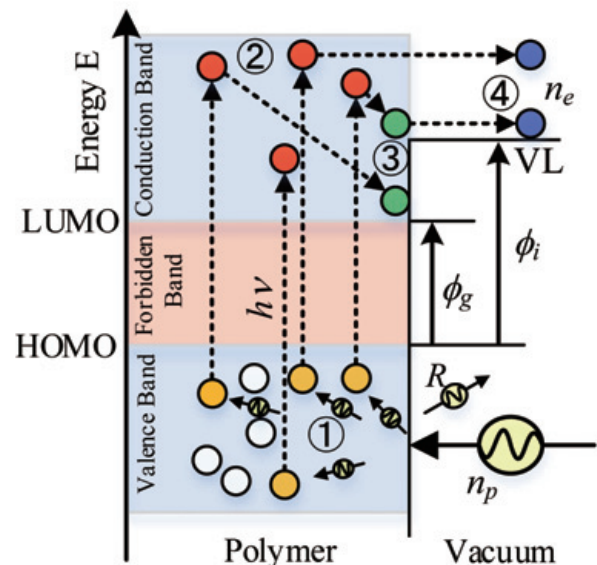


図1 光電子放出の放出原理

真空順位 (VL) 以上に励起する光電子数とし(1)式の右辺第2項で示す。次に③励起された電子の表面到達確率は、VL 以上に励起した光電子が試料表面まで到達する際の減衰割合とし(1)式の右辺第3項で示す。最後に④表面脱出確率は、電子が試料表面から真空へ放出される確率とし(1)式の右辺第4項で示す。ここで各過程においての詳細な説明を以下に示す。

2.1 光の吸収割合

光が試料に照射された際、光の反射率 R 、透過率 $T(h\nu)$ 、吸収率 $A(h\nu)$ の関係は(2)式で表す事ができる。

$$A(h\nu) = 1 - R - T(h\nu) \quad (2)$$

ここで、光を材料に入射すると材料中の光は吸収係数 $\alpha(h\nu)$ の割合で自然対数的に吸収されるため、試料中距離 z における透過率 $T(h\nu)$ は(3)式で表す事ができる。

$$T(h\nu) = e^{-\alpha(h\nu)z} \quad (3)$$

このとき試料内の光の吸収は試料厚 L まで生じる ($z=L$)。また吸収係数 $\alpha(h\nu)$ は、(4)式の Tauc プロットの式より算出する。(2)

$$\alpha(h\nu) = \frac{k\sqrt{h\nu - \phi_g}}{h\nu} \quad (4)$$

ここで、 k は材料ごとの比例定数である。

2.2 材料内の量子効率

材料内の量子効率 q_e は(5)式で表す事ができる。

$$q_e = \frac{n}{n_{ph}} \quad (5)$$

n は伝導電子密度 [個/m³]、 n_{ph} は光子の一粒子密度 [個/m³] である。図2に(a)電子の状態密度、(b)電子の占有確率、(c)電子分布の図を示す(3)。

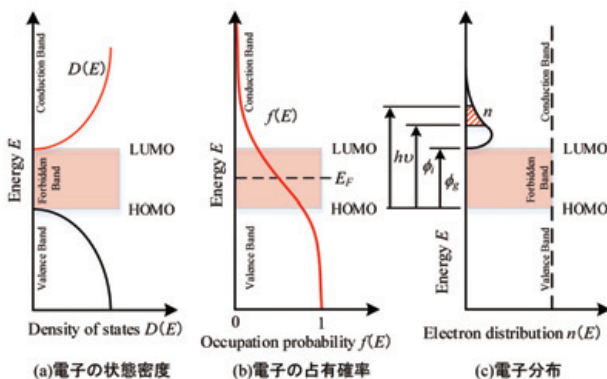


図2 絶縁体の伝導電子分布

同図より伝導電子密度 n は(a)電子の状態密度 $D(E)$ と(b)電子の占有確率 $f(E)$ を掛け合わせて照射光子エネルギー $h\nu$ まで積分したものとなり、(6)式で表す事ができる。

$$n = \int_{\phi_i}^{h\nu} n(E) dE = \int_{\phi_i}^{h\nu} D(E) f(E) dE \quad (6)$$

ここで、

$$D(E) = 4\pi \left(\frac{2m_e}{h^2} \right)^{3/2} \sqrt{E - \phi_g} \quad (7)$$

$$f(E) = e^{-\frac{(E - E_F)}{kT}} \quad (8)$$

である(3)。 m_e は電子の有効質量[kg]、 h はプランク定数[eVs]、 ϕ_g はエネルギーバンドギャップ[eV]、 E_F はフェルミ準位エネルギー[eV]を示している。図2及び(6)式より今回はVL以上の励起を考えているため積分区間はイオン化エネルギー ϕ_i から照射光子エネルギー $h\nu$ までとなっている。また、(8)式より占有確率 $f(E)$ は温度 T (熱エネルギー) に依存することがわかる。その為今回は、照射光子エネルギー $h\nu$ が全て励起エネルギー (熱エネルギー) に変換されると仮定して占有確率 $f(E)$ を算出した ($h\nu = kT$ ※単位は eV に統一)。ここで、(5)式の一粒子密度 n_{ph} は回帰係数により示す。

2.3 励起電子の表面到達確率及び表面脱出確率

今回は上記で示した光子の一粒子密度 n_{ph} 及び、励起された電子の表面到達確率 P_L 、表面脱出確率 P_S を光子エネルギー $h\nu$ の EXP 関数として考え以下のように示した。

$$(n_{ph})^{-1} \times P_L \times P_S = F_1 \times e^{-(h\nu \times F_2)} \quad (9)$$

その際、 F_1 、 F_2 は光電子放出測定によって算出された量子効率に即する様、回帰係数によって求めた。(4)

以上のことから、量子効率 $q(h\nu)$ は(10)式より得られる。

$$q(h\nu) = (1 - R - e^{-\alpha(h\nu)}) \times \int_{\phi_i}^{h\nu} D(E) f(E) dE \times F_1 e^{-(h\nu \times F_2)} \quad (10)$$

3. 光電子放出物理モデルによる回帰計算

図 3,4 に(10)式より導き出した Kapton 及び FEP における量子効率の理論値と実験値の比較を示す⁽⁴⁾。このとき理論値導出の際は反射率 $R=0$ とした。同図より、理論値と実験値の傾向は概ね一致しているが、 ϕ_i の値に大きな差異が確認できる。これは測定における測定限界の値を ϕ_i と設定している為である。また、今回の計算では一部パラメータに実験値による回帰係数を用いており、现阶段では物理的な意味を持たないため、今後は計算条件や各パラメータの見直し及び取得を行って行く。

4. 実環境を模擬した光電子放出電流測定

現在我々は、測定により BOL (Beginning of Life) 時の光電子放出特性を取得しているのが現状である。しかしながら、実際の宇宙機は常に放射線環境に曝されており、宇宙機用絶縁材料の電気的特性は変化することが考えられる。そこで我々は電子線照射された材料における光電子放出電流の測定を行った。

4.1 測定試料及び電子線照射条件

測定試料はポリイミド系材料である Kapton、Upilex、Black Kapton 及び、ガラスを母材とした材料である CMG 100、CMX 100 さらに、ガラス母材に AR コーティングが施された CMG 100 AR 及び CMX 100 AR である。光電子放出測定及び材料の劣化には当研究室で開発した複合物理計測チャンバを用いた⁽⁴⁾。また、電子線を照射する際は、宇宙機を GEO (Geostationary Earth Orbit) 上で一年間運用した際に宇宙機に曝される電子の量 (10^{15} 個/cm²) を照射し、照射前後における光電子放出電流の変化を調査した。電子線の照射エネルギー 50 keV、照射電流密度 45 nA/cm² (Kapton、Upilex のみ 121 nA/cm²)、照射時間 60 min (Kapton、Upilex のみ 22 min) で照射を行った。

4.2 ポリイミド系材料の光電子放出特性

図 5 に 50 keV 電子線照射前後におけるポリイミド系材料の量子効率の比較を示す。また表 1 に、電子線照射前後のイオン化エネルギー ϕ_i の値を示

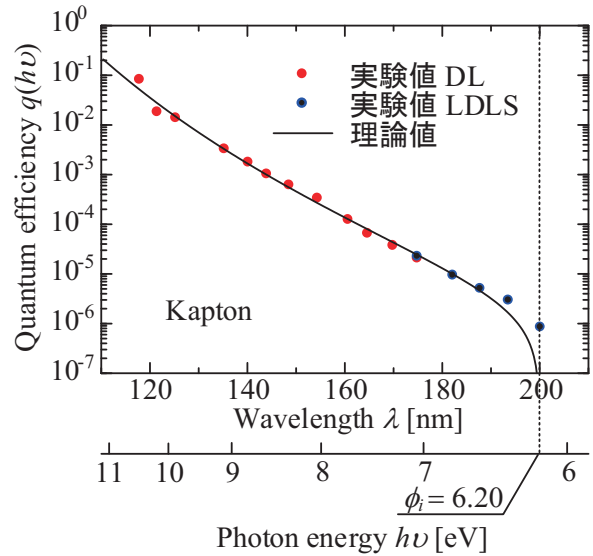


図 3 Kapton における実験値と理論値の比較

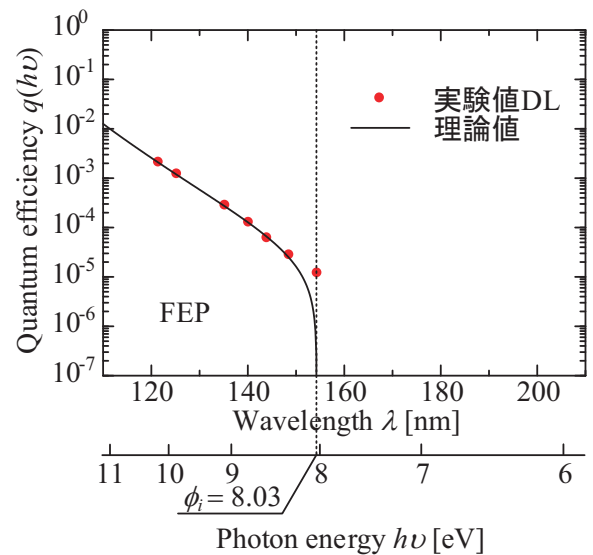


図 4 FEP における実験値と理論値の比較

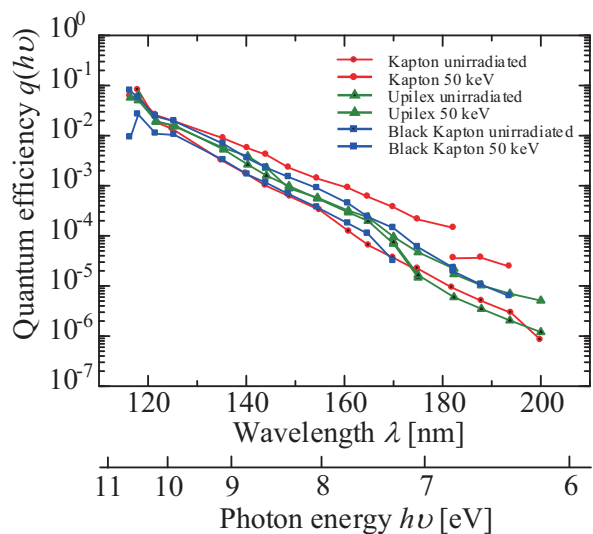


図 5 50 keV 電子線照射前後におけるポリイミド系材料の量子効率比較

す。同図より、すべての材料において量子効率が上昇していることが確認できる。また、同じポリイミド系材料でも電子線の影響は材料ごとに異なることがわかった。本測定では2種類の光源を用いているが Kapton については電子線照射後の結果($\lambda = 182.3 \text{ nm}$)において異なる光源の結果に差異が観測できる為この原因について調査していく必要がある⁽⁴⁾。また、試料ごとに照射条件を揃える為 Kapton、Upilex においては再度測定を行う必要がある。

4.3. ガラスを母材とした材料の光電子放出特性

図6, 7に、50 keV 電子線照射前後における CMG 100 及び CMX 100 を母材とした材料の量子効率の比較をそれぞれ示す。両図より、母材となるガラス材料の違いや AR コーティングの有無にかかわらず、電子線照射により量子効率が上昇していることが確認できる。ここで表1より、ほとんどの材料において ϕ_i の変化が確認できた為、エネルギーバンド構造が微小変化したことが考えられる。

5. まとめと今後の課題

今回考案した光電子放出物理モデルより算出した Kapton 及び FEP における量子効率の理論値と実際の測定により得られた実験値の比較を行い概ね一致していることを確認した。しかし、今回のフィッティングは回帰係数を用いており、現段階では物理的な意味を持たないため、今後は、計算条件や各パラメータの見直し及び取得を行って行く。また実環境を模擬するため、50 keV の電子線を照射した材料における光電子放出電流測定を行い、全ての材料において照射後に量子効率の上昇が確認できた。今後はこのような結果が得られた原因を解明するために、本測定システムを用いた吸光度測定を行うことで材料内の光吸収量の変化から考察を行って行く。

文 献

- (1) H. C. Koons et al: "The impact of the space environment on space systems", Proceedings of the 6th Spacecraft Charging Technology Conference, Air Force Research Laboratory, AFRL-VS-TR-20001578, pp.7-11, (1998)
- (2) 工藤 恵栄:「光物性基礎」,オーム社, pp.171-190,(1996)
- (3) 酒井 祐之:「誘電体現象論」,社団法人 電気学会, pp.220-242,(1973)
- (4) K. Nomura et al: "Analysis of the physical properties of the

polymeric material for spacecraft charging by measuring the photoelectron emission current", Proceedings of 29th International Symposium on Space Technology and Science, pp.1-4, (2013)

表1 電子線照射前後のイオン化エネルギー ϕ_i

| Sample | unirradiated | 50 keV |
|--------------|---------------|---------------|
| | ϕ_i [eV] | ϕ_i [eV] |
| Kapton | 6.20 | 6.40 |
| Upilex | 6.20 | 6.20 |
| Black Kapton | 7.29 | 6.40 |
| CMG 100 | 7.09 | 4.96 |
| CMG 100 AR | 6.60 | 5.20 |
| CMX 100 | 7.09 | 4.96 |
| CMX 100 AR | 7.52 | 4.96 |

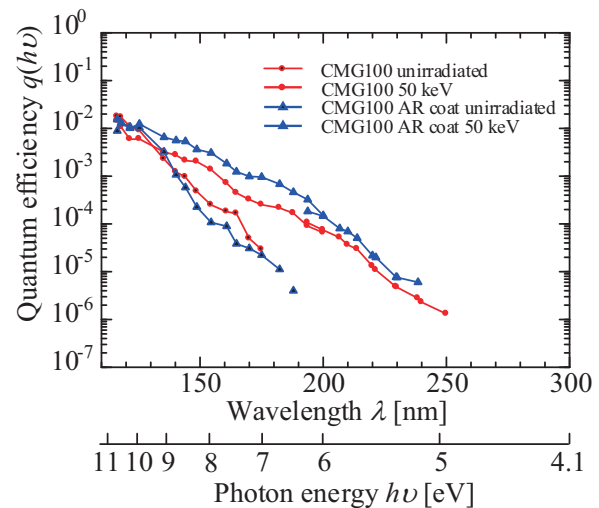


図6 50 keV 電子線照射前後における CMG 100 を母材とした材料の量子効率比較

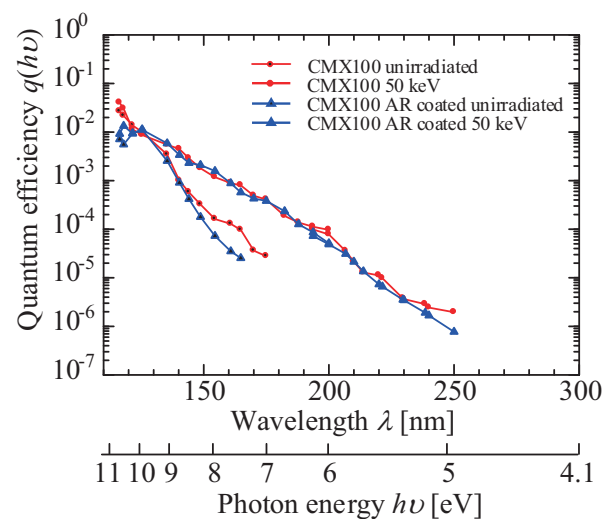


図7 50 keV 電子線照射前後における CMX 100 を母材とした材料の量子効率比較