大気圧プラズマジェット照射による銅ワイヤー絶縁被膜の局所剥離*

吉木 宏之*¹, 星川 陽祐*¹

Localized Removal of an Insulator Film Coated on a Copper Wire by Atmospheric-Pressure Plasma Jet Irradiation

Hiroyuki YOSHIKI*¹ and Yousuke HOSHIKAWA*¹^{*1}Department of Electrical Engineering, Tsuruoka National College of Technology, 104 Inooka Sawada, Tsuruoka, Yamagata 997-8511

(Received November 15, 2007, Accepted February 9, 2008)

The localized removal of a polyamid-imide (PAI) insulator films (thickness of 10 μm) coated on a copper winding wire of 90 μm diameter using an atmospheric-pressure microplasma jet (AP μ PJ) was investigated. The AP μ PJs of Ar and Ar/O₂ gases were generated from the tip of a stainless steel surgical needle having outer/inner diameters of 0.4/0.2 mm by a RF excitation of 13.56 MHz. The insulator films around the copper wire were completely removed by the plasma irradiation from a certain direction without fusing the wire. The removal time decreased with increasing rf power and/or by O₂ addition (5%). The removal mechanism of the PAI films was attributed to chemical etching by atomic oxygen radicals. The removal time was only 3 s at an Ar flow rate of 200 ml/min and a RF power of 4 W. Fluorescence microscopy and scanning electron microscopy images revealed that good selectivity of the insulator film to the copper was achieved.

1. はじめに

電子機器に搭載されるノイズカット用インダクターコイルは小型・軽量化され、それに伴い銅ワイヤー径も数百 μm と微細化されている。その上、銅ワイヤーの絶縁被膜には高耐熱性のポリイミドが用いられている。現在、コイル終端の絶縁被膜の剥離は機械的切削またはレーザー照射で行なわれているが、ワイヤー径の微細化に伴い下地の銅芯線の削り細り、熱による断線など製品の信頼性に関わる問題が発生しつつある。そこで新たな剥離手段として、大気圧非平衡プラズマを用いた絶縁被膜の選択的エッチング技術の試みも報告されている¹⁾。大気圧非平衡プラズマは、真空装置が不要である為に操作性に優れ、またイオンやラジカル密度が高く、しかも熱的ダメージが無いのが特徴である。

本研究では、注射針にガスを流すと共に針に高周波電力を印加することで生成する大気圧非平衡マイクロプラズマジェット²⁾を銅ワイヤーに局所的に照射し、反応性プラズマによりポリイミドを分解、気化することで、下地の銅芯線を損傷すること無く絶縁被膜を選択的にエッチングする手法について調べたので報告する。

2. 実験方法

大気圧マイクロプラズマジェット (AP μ PJ) を用いた銅ワイヤー絶縁被膜の局所剥離の実験装置の概略図を Fig. 1 に示す。外径/内径が0.4/0.2 mm、長さ12 mm のステンレススチール製注射針 (TERUMO) に流量計を介して Ar および Ar/O₂ (95/5%) ガスを導入すると共に、13.56 MHz 高周波 (RF) 電力を整合回路を介して注射針に印加する。注射針に対向して接地電極としてアルミニウム板を設ける。RF 電力が数 W ～ 十数 W でプラズマジェットが大気中に噴

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus of an atmospheric-pressure microplasma jet.

射される。Fig. 1 に示す様に、注射針の電圧波形を高電圧プローブで測定したところ、RF 電力数 W ～ 十数 W の範囲でピーク-ピーク電圧 V_{pp} は約 1.5 kV であった。この高電圧で加速された電子による気体原子・分子の電離、励起でグロー放電プラズマが生成する。Ar や He ガスの場合、注射針-接地電極間距離を増加させてもグロー放電状態が維持された。他方、電極間隔を 1 ～ 2 mm とし、RF 電力を数十 W と増加させると、輝度の強いプラズマ発光となり注射針先端が溶融するアーク放電となった。本研究では、ミニ CNC フライス盤に注射針を取り付けることで、PC 制御により注射針は上下および左右方向に、接地電極は前後方向に移動可能な「走査型 AP μ PJ 装置」を試作した。走査型 Ar プラズマジェット生成の様子を Fig. 2 に示す。

注射針-設置電極間距離を 2 mm として、その間に銅ワイヤーを挿入してプラズマ照射して絶縁被膜の局所剥離をおこなう。実験に用いる銅ワイヤーは $\phi 0.09$ mm、絶縁被膜の材

* 平成19年11月15日 第48回真空に関する連合講演会で発表

^{*1} 鶴岡工業高等専門学校電気工学科 (〒997-8511 山形県鶴岡市井岡字沢田104)

Fig. 2 A side view of the scanning microplasma jet.

質はポリアミドイミド (PAI) で膜厚は約 $10\text{ }\mu\text{m}$ である。注射針およびステージは PC 制御で連続的に移動可能である。RF 電力、プラズマ照射時間をパラメータとして銅ワイヤー絶縁被膜の剥離状態を調べた。銅ワイヤーの剥離状態は、蛍光顕微鏡 (Olympus BX-50) および走査電子顕微鏡 (SEM Topcon ABT-32) で評価した。また、プラズマからの発光はマルチチャンネル分光器 (浜松ホトニクス PMA-11) を用いて観測した。

3. 実験結果および考察

PAI が蛍光を発する波長 $515\text{--}560\text{ nm}$ の IG 励起フィルターを用いて、Ar プラズマジェット照射後の銅ワイヤー表面を観測した蛍光顕微鏡画像を Fig. 3 に示す。プラズマジェット処理条件は Ar 流量 200 ml/min , RF 電力 2.5 W , プラズマ照射時間 5 s である。プラズマ照射部は PAI 被膜が残らず剥離されており、下地の銅表面が表れていることが判る。また、剥離部の SEM 画像を Fig. 4 に示す。下地の銅芯線はプラズマ照射で融けておらず、PAI 被膜のみ選択的にエッチングされていることが判る。また、銅の融点は 1085°C であることを考えると、プラズマガス温度が 5000 K 以上となる熱プラズマでは銅芯線は溶けるはずである。この結果からも、本実験で用いた AP μ PJ は非平衡プラズマであるといえる。

プラズマ照射部の基板温度は、 $\phi 1.0\text{ mm}$ のクロメル-アニメル熱電対 (IK-700) の先端にプラズマジェットを照射することで測定した。その結果、基板温度は約 180°C と PAI の耐熱温度 $200\text{--}220^\circ\text{C}$ よりも低いことが判った。また、注射針先端の V_{pp} 値は約 1.5 kV であり、PAI の絶縁破壊電圧 $9.0\text{--}11.0\text{ kV}$ よりも低い³⁾。他方、プラズマジェットの発光スペクトルは、 $300\text{--}400\text{ nm}$ に N_2 分子のバンドスペクトル、 $700\text{--}850\text{ nm}$ に複数の Ar I ピーク線、 309 nm に OH ピーク線を含んでおり、さらに 777 nm , 845 nm に OI ピーク線が確認された。これは空気中の O_2 がプラズマの電子、イオン、ラジカルで解離励起され、原子状酸素ラジカル O^* が生成されたことを示している。この O^* が PAI を酸化、分解することで絶縁被膜の化学的エッチングが進むと考えられる。

Fig. 3 Fluorescent microscopy image of the surface of a copper wire irradiated by the Ar AP μ PJ.

Fig. 4 SEM image of the removed area of the insulator film on a copper wire.

次に、銅ワイヤーに Ar および Ar/ O_2 プラズマジェットを一方から照射した時、プラズマ照射面の裏面まで完全に剥離が起こる確率、すなわち“全周剥離確率” P_{cr} を(1)式で定義して、 P_{cr} のプラズマ照射時間および RF 電力依存性を調べた。

$$P_{cr} = (\text{全周剥離したサンプル数}) / (\text{全サンプル数}) \quad (1)$$

ここで、全サンプル数は $10\text{--}15$ 個とした。Ar (100%) プラズマジェットで RF 電力 $2.0\text{--}4.0\text{ W}$ の結果を Fig. 5 に、Ar/ O_2 (95/5%) プラズマジェットで RF 電力 $3.0\text{--}3.5\text{ W}$ の結果を Fig. 6 にそれぞれ示す。Ar および Ar/ O_2 プラズマ共に総ガス流量は 200 ml/min とした。Fig. 5 から RF 電力の増加と共に全周剥離に要するプラズマ照射時間が減少していることが判る。RF 電力 4.0 W の時、 $P_{cr}=1$ となる照射時間は僅か 3.0 s であった。さらに、プラズマ照射時間と共に P_{cr} は(2)式に示すように指数関数的に増加していることが判る。

$$P_{cr} = 1 - \exp \{ -(t - t_{th}) / \tau \}, \quad (t \geq t_{th}) \quad (2)$$

ここで、 t_{th} は全周剥離が起こり始める閾値時間、 τ は絶縁被

Fig. 5 Complete removal probability P_{cr} of the insulator film as a function of plasma irradiation time for the Ar (100%) APμPJ at various RF powers.

Fig. 6 Complete removal probability P_{cr} of the insulator film as a function of plasma irradiation time for the Ar/O₂ (95/5%) APμPJ at the RF powers of 3.0 and 3.5 W.

膜の完全剥離の時定数である。図より t_{th} , τ は RF 電力の増加や O₂ 添加 (5%) により減少していることが判る。また、プラズマ照射により絶縁被膜の全周剥離が起こる理由は、銅ワイヤーを取り囲むようにイオンシースが形成される為と考えられる。この点からも、銅ワイヤーの絶縁被膜剥離にプラズマを利用する優位性が示唆される。

プラズマ照射面と裏面では、ラジカル密度およびイオン衝撃効果に差があると考えられ、PAI 被膜の剥離速度はプラズマ照射面側が裏面よりも速くなる。この為、全周剥離にはある閾値時間 t_{th} が存在する。さらに、プラズマ照射時間の増加と共に P_{cr} は 1 に近づくが、その時定数 τ はプラズマ中の酸素ラジカル量やイオンエネルギーの増加と共に減少する。以上が、 t_{th} および τ が RF 電力の増加や O₂ 添加により減少する理由である。

4. ま と め

外径/内径が 0.4/0.2 mm、長さ 12 mm のステンレススチール製注射針に Ar, Ar/O₂ (95/5%) を導入し、針に RF 電力を印加することで生成する APμPJ を、銅ワイヤーに照射することで PAI 絶縁被膜の局所剥離を行った。蛍光顕微鏡および SEM 観察から、プラズマ照射部の銅ワイヤーはその全周に亘り絶縁被膜が剥離されていることが判った。Ar プラズマ照射では、ガス流量 200 ml/min、RF 電力 4.0 W で全周剥離に要する時間は 3.0 s であった。

謝辞

本研究における蛍光顕微鏡観察は、宮城県産業技術総合センターの設備を利用して行われた。また、本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究 C，課題番号 17560645）の援助を受けて行われた。

〔文 献〕

- 1) T. Okumura, M. Saitoh, K. Nishikawa, A. Furusawa and K. Suetsugu: Mater. Trans., **47** (2006) 941.
- 2) H. Yoshiki, K. Taniguchi and Y. Horiike: Jpn. J. Appl. Phys., **41** (2002) 2581.
- 3) For example, <http://www.hitachi-cable.co.jp/catalog/M-103.pdf>.