

ストレッチャブル配線の形成技術の開発

電子デバイス技術課 横山義之*1、坂井雄一

1. 緒言

IoT/AI/ビッグデータ解析等を基盤とするDXの進展には、あらゆる対象物からの情報を収集・共有するために、手軽に任意の表面(人体・機械・乗り物・構造物・ロボットの複雑な曲面や伸縮・屈曲する部位)への貼付けを可能とするストレッチャブルな電子デバイス(各種のセンサやアンテナ、ディスプレイ等)が求められている。さらに、近年注目を集めている「肌や目に直接張り付けるスキンエレクトロニクス」においては、ストレッチャブルな電子デバイスが透明であることも、人に身に着けていることを意識させない重要な要素となっている。

これまでに、産技研独自の感光性ナノファイバーを駆使することで、金属(AI、アルミニウム)ナノネットワークからなるフレキシブルな透明配線・回路をPET(ポリエチレンテレフタレート)フィルム上に作製している^{1,2)}。この配線は、金属ナノネットワークの網目を伝って電気が流れ、同時に、網目の隙間を光が通り抜けることで、透明に見える(網目の線幅が可視光の波長程度に細いため、ほとんど視認されない)。

我々は、このフレキシブルな透明配線の形成技術をさらに発展させ、衣服や皮膚に貼り付けても違和感のない柔らかい電子デバイスの実現に向けた大きな伸び・ねじりにも追従できる“ストレッチャブル”な透明配線・回路の形成技術の開発に取り組んでいる。本報告では、従来のPETフィルムの代わりに、より大きな伸縮性を示すシリコン素材の上に金属ナノネットワークからなる透明配線を形成する技術について検討した。また、配線を伸縮させた際に生じる金属ナノネットワークの網目の変形や歪に、AIよりも追従できる新たな金属素材の探索も行っている。ここでは、室温で液体として振る舞う特殊な金属「液体金属」について、基礎的な特性に関する調査を行い、ストレッチャブル配線の素材としての可能性を検討した。

2. 実験方法

2.1 PETフィルム上での透明配線の形成プロセス

感光性ナノファイバーを用いて、金属ナノネットワークからなる透明配線パターンをPETフィルム上に形成するプロセスを図1に示す。はじめに、PETフィルム上に蒸着したAI薄膜上に、エレクトロスピンニング法を用いて、産技研で開発した溶解阻害型の感光性ナノファイバーを均一に堆積した。次に、フォトマスクを介して紫外線を照

射し、任意の配線形状にナノファイバーを光パターンニングした後、これをエッチングマスクとして、AI薄膜をエッチングした。最後に、ナノファイバーのみを溶解除去し、AIの細かい網目状ナノネットワーク構造からなる透明配線パターンを露出させた。

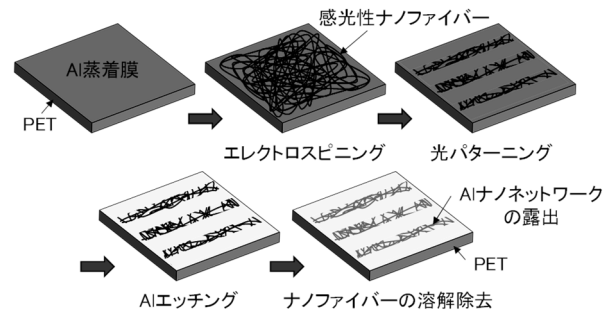


図1 PETフィルム上での透明配線の形成プロセス

2.2 シリコン素材上での透明配線の形成プロセス

金属ナノネットワークからなる透明配線パターンをシリコン素材上に形成するプロセスを図2に示す。はじめに、2.1の手法により形成したPETフィルム上の透明配線パターンの上に、液状のシリコン樹脂(ダウコーニング製 Silpot 184)を滴下し室温硬化させることで透明配線を含むPETフィルム全面をシリコン樹脂の塗膜で覆った。次に、全体をフッ素系の有機溶剤 HFIP(Hexafluoro-2-propanol)に浸漬し、PETフィルムのみを溶解除去することで、シリコン素材の上にAIナノネットワークからなる透明配線パターンを露出させた。

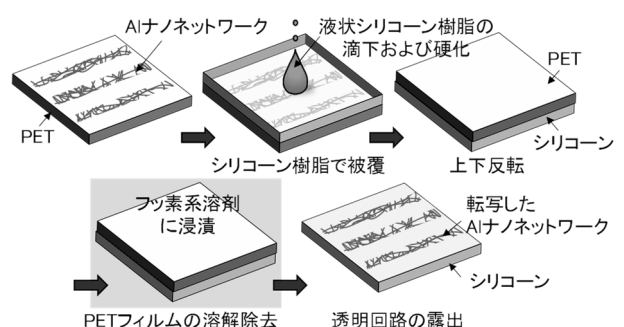


図2 シリコン素材上での透明配線の形成プロセス

2.3 液体金属の特性調査方法

液体金属として、それぞれ一定の比率で合金化したGa-In(ガリウム・インジウム)合金とGa-In-Sn(ガリウム・インジウム・スズ)合金について、示差走査熱量計(SII ナノテクノロジー(株)、DSC7020)を用いて熱特性を調査した。アルミナ容器にサンプルを入れ、窒素雰囲気下、-60°C付近まで一旦冷却した後、昇温速度10°C/minで100°Cまで測

*1 現 生活工学研究所

定し、続けて、降温速度-10°C/min で-60°C まで測定した。

また、液体金属が濡れ拡がりやすいように特殊な表面処理を施した Si 基板上に、室温下、液状の Ga-In 合金を滴下し塗膜を形成した。-60°C 付近まで一旦冷却した後、室温まで昇温し、基板上での塗膜の変化を観察した。

3. 結果と考察

3.1 シリコン素材上での透明配線の形成

はじめに、PET フィルムをシリコン樹脂フィルムに変える以外は 2.1 と同様のプロセスを用いて、シリコン素材上での透明配線の形成を試みた。しかし、伸縮性のあるシリコン上に Al 蒸着膜を均一に形成することは困難であった。そこで、2.1 の手法により形成した PET フィルム上の透明配線を、2.2 の手法でシリコン素材上へ転写することを試みた。その結果、Al ナノネットワークからなる透明配線を破壊することなく、伸縮性のあるシリコン素材上に良好に転写できることがわかった(図 3)。

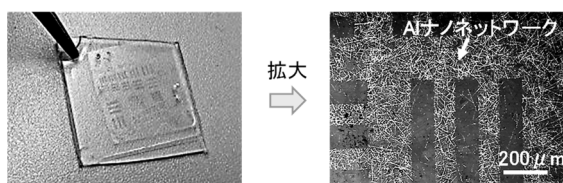


図 3 シリコン素材上に転写した透明配線

3.2 液体金属の熱特性

図 4 に、Ga-In 合金、Ga-In-Sn 合金の示差走査熱量測定の結果を示す。昇温時の吸熱ピークから、Ga-In 合金の融点は 20°C 付近、Ga-In-Sn 合金の融点は 15°C 付近に存在することがわかった。また、降温時の凝固による発熱ピークは、どちらの金属も過冷却によって融点よりかなり低い温度領域(Ga-In 合金 : -31°C 付近、Ga-In-Sn 合金 : -48°C 付近) にあらわれた。この結果から、液体金属を融点以上

に一旦昇温した後は、融点のある程度下回ってもそのまま液体として扱える可能性があることがわかった。

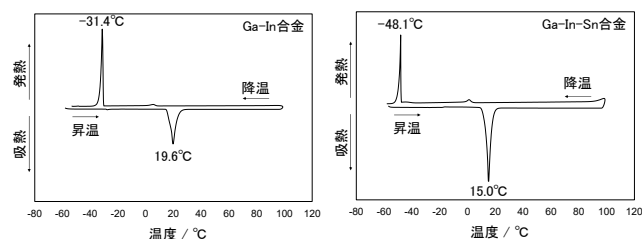


図 4 液体金属の示差走査熱量測定

また、Si 基板上に塗布した Ga-In 合金の塗膜を-60°C 付近まで一旦冷却し、4°C および 23°C における塗膜の様子を観察した(図 5)。4°C では固体の膜として存在し、23°C では液体の膜として存在した。温度制御によって、基板やフィルム上の液体金属の塗膜を固体⇄液体それぞれの状態に切り替えながら扱えることがわかった。

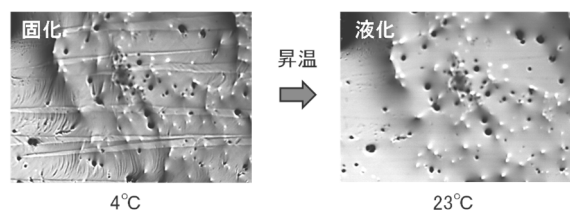


図 5 Si 基板上での液体金属の塗膜表面

4. 結言

Al ナノネットワークからなる透明配線を伸縮性のあるシリコン素材上に形成できた。また、液体金属の熱的な特性を調査し、ストレッチャブル配線の素材としての可能性を検討した。

参考文献

- 1) PCT/JP2020/001296, 感光性繊維形成組成物及び繊維パターンの形成方法
- 2) 特開 2023-73785 号公報, 積層体及び積層体の製造方法

キーワード：感光性ナノファイバー、エレクトロスピンニング、ストレッチャブル、透明回路、液体金属

Development of Fabrication Technology for Stretchable Circuits

Electronics and Device Technology Section; Yoshiyuki YOKOYAMA*¹ and Yuichi SAKAI

We have been developing a method to form “flexible” transparent conductive wiring patterns to replace conventional ITO wiring patterns. In this method, a photosensitive nanofiber consisting of a mesh-like nanonetwork structure is first fabricated by electrospinning, and then photo-patterned into the desired wiring shape. Next, using the resulting wiring pattern as an etching mask, the metal thin film on the plastic film is etched in the form of a nano-network. Finally, the nanofibers are dissolved and removed to form a conductive, transparent wiring pattern. In this study, we further developed this technology to develop “stretchable” conductive wiring patterns using stretchable silicone sheets and liquid metals.