

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博士論文審査報告書

論文題目

超薄型エレクトロニクスにおける薄膜界面・薄膜表面の高機能化

Research on the functionalization of interfaces and surfaces in ultra-thin electronics

申請者

高桑 聖仁

Masahito TAKAKUWA

総合機械工学専攻 マイクロ・ナノ工学研究

2023年2月

(1) 審査経緯

当該博士論文審査は、以下の通り実施された。

- ・ 2022 年 09 月 21 日 予備審査会
- ・ 2022 年 10 月 20 日 教室受理決定
- ・ 2022 年 11 月 17 日 創造理工学研究科運営委員会受理決定
- ・ 2023 年 01 月 17 日 公聴会
- ・ 2023 年 02 月 08 日 審査分科会
- ・ 2023 年 02 月 25 日 研究科運営委員会

(2) 論文背景・内容・評価

数 μm 厚の高分子ポリマー薄膜と有機半導体材料を組合わせて全体の厚みが $10\ \mu\text{m}$ 以下の極めて薄く、軽いフレキシブルエレクトロニクスが開発されている。フレキシブルエレクトロニクスは、極めて薄いため曲げ剛性が著しく低下し、ヤング率の大きな金属配線を有していても優れた柔軟性を有している。そのため、人の皮膚上や洋服などの変形する曲面に対しても密着して貼りつくことができるので、ノイズや着用者の装着違和感の低減を図り長期的な心拍、筋電、呼吸などの生体計測をおこなう次世代のウェアラブルエレクトロニクスとして実用化が期待されている。しかし、現在のフレキシブルエレクトロニクス研究は萌芽的な研究にとどまり、実用化製品化した研究は限りなく少ない。そのボトルネックの主たる 1 つに、薄膜化による素子の剛性の著しい低下に伴い生じている材料力学的な課題が挙げられる。その材料力学的な課題は二つに大別され、一つ目はフレキシブルエレクトロニクスの表面加工による機能拡張に関する研究が、低い剛性材料への加工難易度の高さから技術的に困難である点である。二つ目は、薄膜化アプローチゆえの素子や基板の剛性が著しく低下したことで、従来の剛性増加を伴う製造技術や製造設計が転用できず、柔軟性を損なわない新たな集積化技術や接合技術の開発が不可避である点である。本研究ではこれらのフレキシブルエレクトロニクスの実用化研究に向けた材料力学的な課題に対し、界面・表面に着目しながら機械工学的な立場より 3 つの具体的な研究をおこない直接的な解決を試みた。

一つ目の課題に対しては、ナノテクスチャによる光学的なさらなる機能の向上が見込めた超薄型有機太陽電池（超薄型 OPV）の表面加工による機能拡張研究を通し、フレキシブルエレクトロニクス全体における表面加工技術の有用性について検証した。表面加工によるナノテクスチャの代表的な例として、入射光の低反射機能を付与可能なモスアイ構造があり、この構造は光学特性の制御に貢献し $100\ \mu\text{m}$ 厚以上の太陽電池の高効率化に寄与することが報告されている。そこで、超薄型 OPV の薄膜基板上にもマイクロ・ナノテクスチャを作製することで、超薄型 OPV の光特性のさらなる向上を図れないかと考えた。そこで剛性の低い超薄型 OPV の基板表面加工をおこなうために、複雑

形状を二次加工なく作製するプラスチックの射出成型を参考にして、超薄膜基板とナノテクスチャの一体成型法を確立した。超薄膜基板を成膜する剥離層に事前にナノテクスチャの原型を作製することで、超薄膜基板表面に加工損傷なくナノテクスチャを作製した。この加工方法の利点として、剥離層の原型のパターンを変更するだけで任意のナノテクスチャを超薄膜基板に導入可能な点である。その結果、従来の厚い基板上のナノテクスチャ機能と同様に超薄膜基板上のナノテクスチャは、超薄型 OPV の光学的な機能を向上させることを実験的に確認した。よって超薄膜に対するナノテクスチャ導入は、フレキシブルエレクトロニクス新たな機能を創出することが実証された。また、材料力学的な課題の二つ目である、極めて低い剛性を維持したまま複数の素子をシステム化できる集積化技術や接合技術の開発が不可避であるという課題に対し、プラズマ工学の表面改質技術に着想を得た水蒸気プラズマ処理による直接接合技術を開発した。そのため素子同士を剛性変化なく柔軟に集積化・接合することが可能になった。さらにこの接合技術を用いて、接着層による接合部の局所的な剛性増加を回避し変形による応力集中が起こりにくい機械的な耐久性の高いフレキシブルエレクトロニクスシステムの構築に成功した。またこの直接接合技術を用いてセンサー構造を再設計したことで、従来構造のセンサーよりも 100 倍の厚み当たりのセンサー感度と薄膜化を両立した超薄型の静電式自己発電型圧力センサーの開発に成功した。この結果を通し、開発した直接接合技術が配線技術としてだけでなく、フレキシブルエレクトロニクス自体の製造技術としても有用であることを実証した。したがって、機械工学的アプローチに基づくフレキシブルエレクトロニクスに関する研究は、現状の実用化を阻害している材料力学的な課題に対してブレイクスルーをもたらす有効的な研究アプローチであり、今後も汎用的な製造技術や加工方法を開発することで、フレキシブルエレクトロニクスの実用的研究を加速させると期待できる。

以上要するに、本博士論文はフレキシブルエレクトロニクスの薄膜化に伴い弊害的に生じていた構造や加工方法などの材料力学的な課題に対して、機械工学分野の様々な製造加工方法を基にした研究アプローチの有用性、妥当性を複数の具体的な研究活動を通して、検証、実証したものである。超薄膜基板の表面加工によるフレキシブルエレクトロニクスの機能拡張は、化学的な材料開発アプローチによる性能向上を主としていた現状に、性能向上に向けた新たな研究アプローチを提案し、その実用性を示したものである。本博士論文では光学的な性能向上の言及に留まっているが、表面加工によるナノテクスチャは、超撥水機能や自己洗浄機能など付与可能な機能は多岐に渡るため、本加工方法はより広い用途での機能拡張に期待できる。金の直接接合技術は、配線の導電接合や構造作製プロセスに利用できるフレキシブルエレクトロニクスのための画期的な集積化、接合技術を報告したものである。この技術により剛性増加の影響を回避しつつ集積化可能なため、フレキシブルエレクトロニクス領域だけでなくソフトロボット領域や

医療分野のデバイス作製などでも使用できる汎用的な接合技術になると期待でき、大きな発展性を有している技術である。したがって、本博士論文は、博士（工学）早稲田大学の学位論文として価値のあるものであると認める。

2023年2月

審査員

（主査）早稲田大学 教授 博士（工学） 早稲田大学 梅津信二郎

（副査）早稲田大学 教授 博士（工学） 早稲田大学 上杉繁

（副査）早稲田大学 教授 博士（工学） 早稲田大学 草鹿仁

（副査）早稲田大学 教授 博士（工学） 早稲田大学 菅野重樹
