

【助成 39-43】

神経情報の操作計測のためのフレキシブルマイクロ LED シートの開発

代表研究者 豊橋技術科学大学 大学院工学研究科 電気・電子情報工学系 准教授 関口 寛人
共同研究者 獨協医科大学 先端医科学統合研究施設 先端医科学研究線センター 助教 瀬戸川 将

〔研究の概要〕

生体の外部から光のみを当てることで神経細胞の活動を制御することが可能な光遺伝学的手法が注目されている。近年、複雑な神経ネットワークをもつ脳機能の解明に向けて、脳の広範囲の特定の神経細胞に光を当てる光照射デバイスが求められていた。本研究では、脳に密着して利用できるよう、薄さと軽さ、柔軟性をもつ LED シートの実現に向けて、マイクロ LED の中空構造の作製技術と熱剥離シートを用いた LED の一括転写技術の確立に取り組み、曲げても光を照射する性能が低下しない多点マイクロ LED シートの開発に成功した。

〔研究経過および成果〕

特定の色の光に反応する光感受性タンパク質を神経細胞に発現させることで神経活動を光で制御できる光遺伝学的手法は、時間分解能が高く、脳機能の理解に向けて活用されている。神経細胞が作る複雑な脳神経ネットワークの理解に向けて脳の広範囲に分布する特定の神経細胞を自在に制御する光照射技術が求められていた。これまでに光照射技術として用いられてきた光ファイバや顕微鏡を用いた手法では特定の部位や複数の部位を同時に光照射することは困難で、自由行動中の動物への利用も限られていた。そこで、生体に埋め込むことのできる LED デバイスの活用が期待されていたが、市販の LED は大きく厚いため、脳などの組織全体を覆うように取り付けるような応用には適していなかった。本研究では、厚さ数 μm の LED 層のみを、極薄の生体適合性フィルム上に高精度で配置する技術の確立に挑戦し、新たな生体埋込み型の光デバイスの開発を行った。

フレキシブルな LED シート実現に向けて、図1に示すように、(1)厚さ数 μm の LED 層のみを取り出した

めのマイクロ LED の中空構造を形成する技術と(2)フレキシブルシートに精度よく LED を配置するための一括転写技術の 2 つのプロセス技術開発に取り組んだ。本研究では Si 基板の上にエピタキシャル成長された青色発光する InGaN 系 LED ウェハを用意した。まず一般的なマイクロ LED の作製プロセスにて p 型, n 型の電極形成を行った後、それぞれのマイクロ LED 周囲の GaN 領域をドライエッチング法で除去して Si 基板面を露出させた。さらに、露出した Si 層を $1\mu\text{m}$ ほどドライエッチングした。水酸化カリウム溶液による異方性ウェットエッチング法を適用することで、

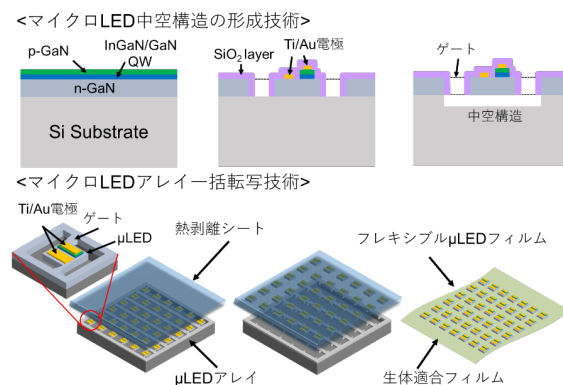


図1. マイクロ LED の中空構造の形成およびフィルム上への一括転写技術

LED 層下部の Si 基板を選択的に除去し、高密度に配置されたマイクロ LED の中空構造を形成することに成功した。

次に、生体適合性をもつパリレンフィルム上に正確かつ精度のよい配置を目標として、熱剥離シートによるマイクロ LED アレイの一括転写を試みた。熱剥離シートを、中空構造をもつマイクロ LED アレイに押し当てはがすことですべてのマイクロ LED が熱剥離シートへと転写された。続いて、熱剥離シートを Si 基板上に形成された厚さ 10 μm 程度のパリレンフィルム上におき、試料を 150 $^{\circ}\text{C}$ にて加熱することで熱剥離シートの粘着力が失われ、欠けることなくマイクロ LED がパリレンフィルム上へと一括配置された。また転写されたマイクロ LED は位置ずれ、回転等の問題は確認されなかった。最後に、Ti/Au 金属(50/400 nm)およびパリレンによる保護層を形成し、Si 基板上から完成したマイクロ LED アレイシートを剥がした。作製した LED シートは PCB 基盤へとフリップチップボンディングにより実装した。

作製したマイクロ LED は転写前後で特性劣化なく、立ち上がり電圧 3.2V 程度のきれいな整流特性が得られた。図2に完成したマイクロ LED シートの発光像を示す。マイクロ LED は独立駆動可能であり、任意の位置の LED を発光させることが可能である。異なる

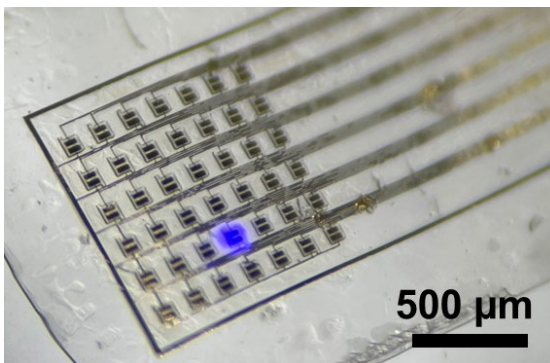


図2. フレキシブルマイクロ LED シートの発光像

円柱のブロックに巻き付けて順方向電圧の違いを観察したが、その変化は 1%未満であり、ほとんど影響を受けないことが明らかとなった。また作製したマイクロ LED シートをマウスの大脳皮質においたところ、合計厚さ 11 μm のシートは脳に十分密着して、光遺伝学実験に利用可能な明るい発光が得られることが実証された。

本研究で開発された脳の広範囲に適用可能な多点フレキシブルマイクロ LED シートは、光によって時間的に自在に複雑な脳活動の制御を実現するものである。別途開発を進める皮質脳波計測デバイスと組み合わせることで、因果関係に裏打ちされた脳活動と行動や疾患との包括的理解を目指す、新しい脳科学研究の発展に大きく寄与すると期待される。

[発表論文]

1. H. Sekiguchi, H. Matsuhira, R. Kanda, S. Tada, T. Kitade, M. Tsutsumi, A. Nishikawa, A. Loesing, I. Fukunaga, S. Setogawa and N. Ohkawa, “Adhesionable flexible GaN-based microLED array film to brain surface for in vivo optogenetic stimulation”, *Appl. Phys. Express*, 15, 046501 (2022).
2. S. Setogawa, R. Kanda, S. Tada, Y. Saitoh, M. Ishikawa, S. Nakada, F. Seki, K. Hikishima, H. Matsumoto, K. Mizuzeki, O. Fukayama, M. Osanai, H. Sekiguchi, N. Ohkawa, “A novel micro-ECoG recording method for recording multisensory neural activity from the parietal to temporal cortices in mice”, *bioRxiv* (2022).