

令和 6 年 5 月 22 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04620

研究課題名（和文）微細LEDおよび受光素子の異種基板上常温接合と光バイオテクノロジー応用

研究課題名（英文）Room temperature binding technology of micro-LEDs and photodetectors on heterogeneous substrates and optical biotechnology applications

研究代表者

雨宮 嘉照（Amemiya, Yoshiteru）

広島大学・ナノデバイス研究所・特任助教

研究者番号：20448260

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：微細Light Emitting Diode（LED）と受光素子を混載させた光回路チップの実現を目標として、10-20マイクロメートルサイズのLEDおよび受光素子を石英基板上などに、常温かつ大気圧下で接合する技術を検討した。LED素子としては窒化ガリウム-LED層を用いて、LED素子を形成し石英基板上やレジスト上に接合した。受光素子としてはSilicon-on-insulator基板を用いて、素子形状を形成後に石英基板上に接合し、接合後にpn接合ダイオード受光素子を作製した。光バイオテクノロジー応用としては、接合したLED素子を用いて蛍光標識化されたタンパク質の蛍光観察を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

微細LEDと受光素子を同一チップに混載できる可能性を示すことができ、バイオセンシングやバイオモニタリングと微細化LEDの能動的な作用を同時・逐次的に行えるチップ・小型機器の実現への一歩につながると考えられる。さらにフレキシブルなディスプレイへの応用だけでなく、ウェアラブルデバイス分野へも応用可能だと考えられ、LEDを能動的に使用するような深紫外殺菌、光免疫療法、バイオジェネティクス、神経系インプラントなどについても、携帯可能なくらいの機器の小型化やウェアラブル化等の実現に波及するのではないかと期待される。

研究成果の概要（英文）：With the aim of realizing an optical circuit chip that integrates micro Light Emitting Diodes (LEDs) and a photodetectors, a binding technology of 10-20 micrometer size LEDs and photodetectors on quartz substrates at room temperature and atmospheric pressure is investigated. Gallium nitride LED layers were used as LED devices, and LED devices were fabricated and bonded on quartz substrates or on resist. Silicon-on-insulator substrates were used as photodetectors, and pn junction diode photodetectors were fabricated after forming the device shape and bonding it on a quartz substrate. For optical biotechnology applications, fluorescence observation of fluorescent-labeled proteins was performed using a bonded LED device.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：接合技術 光バイオテクノロジー

### 1. 研究開始当初の背景

液晶や有機 EL を用いてきたディスプレイ分野にて、高画質、低消費電力、高耐久性などの観点から、素子の大きさがマイクロサイズの微小な Light Emitting Diode (LED) を画素単位で配置して制御するディスプレイについて研究開発が行われている。一方、LED の応用としては、照明用途だけでなく、蛍光顕微鏡や酵素標識によるセンシングデバイス用の光源、深紫外殺菌、光免疫療法、バイオジェネティクス、神経系インプラントなど LED を能動的に用いるような医療用途を目的にした応用についても実用化や研究開発が行われている。さらにフレキシブルなディスプレイやウェアラブルデバイスのために、フレキシブル基板など様々な基板上に微小サイズの LED を実現しようとする研究が行われているが、素子サイズ、動作性能、作製方法などの点に問題があり、用途が限定されている段階である。

### 2. 研究の目的

ディスプレイ用途では、発光素子である LED のみを画素単位で集積化するだけで十分だが、バイオテクノロジーなどの用途では、発光素子のみでなく受光素子も集積化することにより、光源の役割から光のセンシングや観察までを一つのチップで行えることができ、様々な応用に広がると期待できる。そこで、図 1 のように微細 LED と受光素子を混載させた光回路チップの実現を目標とする。チップ上の各素子に抗体等を固定化しておけば、抗原抗体反応と蛍光標識を用いたセンシングが行える。他の応用としては、細胞などを直接チップ上に配置しておけば、細胞内観察と LED 光の細胞内への能動的な作用を同時に行えるチップが実現できる可能性がある。研究の目的としては、図 1 のような光回路チップの実現を視野に入れて、微小サイズ LED および受光素子を石英基板上などに、高性能な状態を維持しつつ常温かつ大気圧下で接合する技術の確立を目的とする。さらに、その技術を用いて、光バイオテクノロジー分野への応用実証も検討する。

### 3. 研究の方法

微細 LED および受光素子を異種基板上に常温かつ大気圧下で接合するための作製工程を図 2 に示す。微細 LED については、露光装置やエッチング装置などのシリコン微細加工技術用の装置を用いて、窒化ガリウム (GaN) -LED 層に LED 発光素子を形成して、異種基板上に常温かつ大気圧下にて接合を行う。受光素子については、Silicon-on-insulator (SOI) 基板を用いて素子形状を形成し、異種基板上への接合を行う。異種基板としては、石英基板およびフレキシブル基板なども視野に入れて石英基板上のレジストも検討した。光バイオテクノロジー応用としては、異種基板上に接合した LED 上に蛍光標識ストレプトアビジンを配置して蛍光観察を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 受光素子の形成及び異種基板上への接合

受光素子の異種基板上への接合としては、SOI 基板を用いて石英基板上やレジスト上へ接合を行った。最初に露光装置やエッチング装置を用いて SOI 基板のシリコン層にパターニングを行い、素子サイズ  $10\mu\text{m} \times 25\mu\text{m}$  の形状を形成した。形成した SOI 基板の素子について、buried oxide (BOX) 層をフッ酸溶液で除去することにより梁構造を形成し、酸素プラズマによって表面処理を行い、SOI 基板の上に石英基板を配置し荷重をかけて素子を石英基板上やレジスト上に接合した。石英上にはある程度の領域で均一に接合することができたが、レジスト上にはレジストのエッジ部分にしか接合することができなかった。これはレジスト膜厚の不均一性が一因だと考えられ

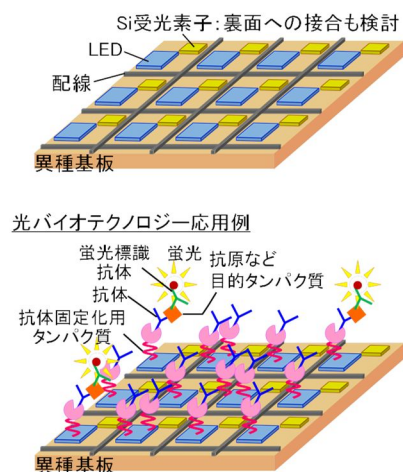


図 1 微細 LED と受光素子を混載させた光回路チップと応用例

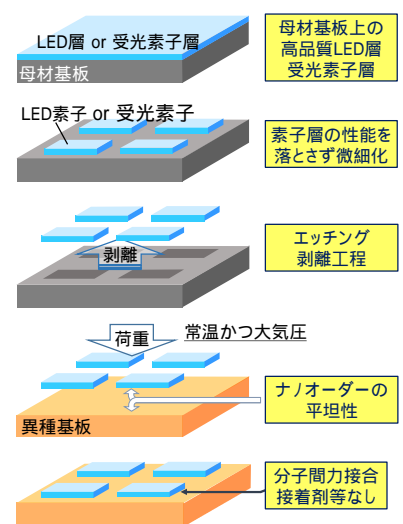


図 2 LED 層及び受光素子層の異種基板上への接合工程

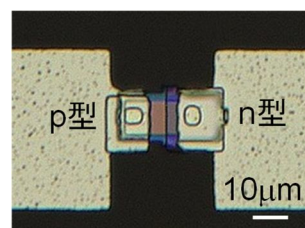


図 3 石英基板上に接合させて作製した pn 接合受光素子の光学顕微鏡像

る。石英上に接合した素子については、pn 接合ダイオード受光素子にするために、イオン注入による不純物導入と活性化のための熱処理を行い、pn 領域を形成した。電極となるアルミニウム堆積と露光装置による電極パターン形成後の光学顕微鏡像を図 3 に示す。所望の形状が形成できていることが確認できた。作製した pn 接合について電流電圧特性を測定した結果を図 4 に示す。整流特性を示しており、受光素子を常温大気圧下で接合することができる技術がある程度確立することができた。ただし、逆バイアスでの電流が大きい傾向があり、不純物導入などの作製工程の改善を行う必要があることが分かった。

### (2) 微細 LED の形成及び異種基板上への接合

微細 LED としては、GaN-LED 層を用いて素子サイズ  $10\mu\text{m} \times 25\mu\text{m}$  の形状を形成した。SOI 基板と GaN-LED 層で大きく異なる部分としては、材料の違いはもちろんのこと素子膜厚の差も大きく、LED 層の方が 5 倍以上厚くなっている。そのために素子のパターンニングを行うときには、レジストの膜厚を厚くすることや、酸化膜ハードマスクを用いる必要があった。GaN-LED 素子で良好な電気特性を得るためには電極材料にも注意しなければならず、選択エッチングの難しさからリフトオフプロセスで電極の形成を行った。作製した素子の scanning electron microscope (SEM) 像を図 5 に示す。作製した素子について、SOI と同様にエッチング工程を行い、石英基板上やレジスト上に常温及び大気圧下にて接合を行った。図 6 に示すように、作製した GaN-LED 素子がレジスト上に接合できていることが確認できた。微細化した LED 素子についても常温大気圧下で接合することができたが、所望の素子だけを歩留まり良く接合させるまでには至っていないので、プロセスの最適化の必要性があることが分かった。

### (3) 光バイオテクノロジー応用、さらなる微細化および新規化合物半導体の検討

光バイオテクノロジー応用としては、素子サイズが  $40\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$  と多少大きな素子だが、異種基板上に接合した GaN-LED 素子上に蛍光標識ストレプトアビジンを配置して GaN-LED からの発光を励起光として、蛍光を観察した。蛍光標識としては、peridinin-chlorophyll-protein (PerCP) (最大励起波長  $482\text{nm}$ 、最大蛍光波長  $676\text{nm}$ ) を用いた。作製した GaN-LED 素子の中心波長は  $459\text{nm}$  で PerCP について励起光となり、蛍光観察が可能となる。図 7(a) が GaN-LED 素子を発光させたとき、(b) が PerCP ストレプトアビジンを GaN-LED 上に配置し LED 素子を発光させたとき、(c) がロングパスフィルター ( $510\text{nm}$ ) を通したときの光学顕微鏡像を示す。図 7(c) から蛍光が観察でき、光バイオテクノロジー応用が可能なが示唆された。

素子サイズ  $10\text{-}20\mu\text{m}$  より微細な素子の実現については、電子線描画装置を用いて行った。図 8 に示すように、エッチング後の形状を SEM にて観察し、数  $\mu\text{m}$  サイズについて良好なパターンニングが可能なることを確認した。GaN-LED 層以外の化合物半導体についても接合工程の検討を行い、ガリウム砒素 (GaAs) 基板を用いて接合工程が可能なることを検証した。GaAs 素子の構造としては微細な LED の構造ではなく、ある程度大きなサイズの素子にて接合が可能なることを実証した段階だが、GaN-LED 層で微細構造の作製は可能であったので、GaAs 基板でも同様に素子の微細化を行えば、微細素子の接合が可能であると期待できる。

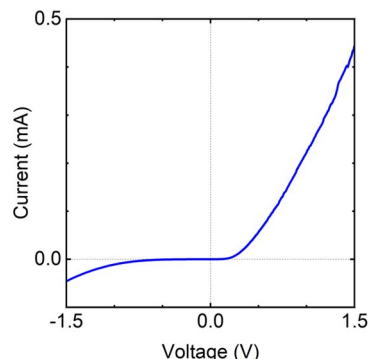


図 4 石英基板上に接合させて作製した pn 接合受光素子の電流電圧特性

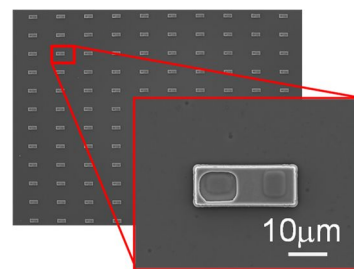


図 5 GaN-LED 素子の SEM 像

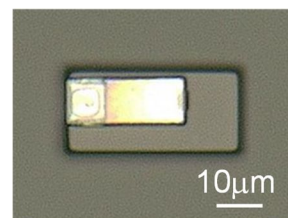


図 6 石英基板上のレジスト上に接合した GaN-LED の光学顕微鏡像

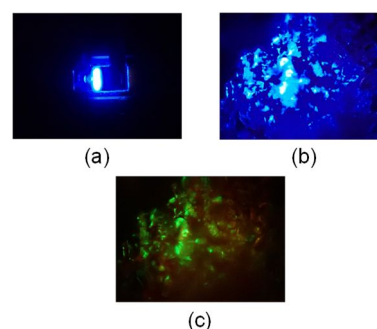


図 7 (a) GaN-LED 素子を発光させたとき、(b) PerCP ストレプトアビジンを GaN-LED 上に配置したとき、(c) ロングパスフィルターを通したときの光学顕微鏡像

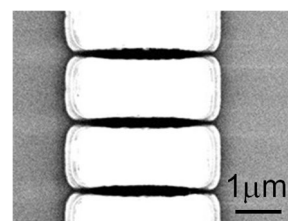


図 8 電子線描画装置を用いて形成した GaN-LED 形状の SEM 像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Mitsuhiro Ogihara, Yoshiteru Amemiya, Shin Yokoyama
2. 発表標題 Integration of GaN-LEDs with Heterogeneous Device Components by Epitaxial Film Bonding
3. 学会等名 2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------