

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420330

研究課題名(和文)窒化物半導体集積デバイスとSi-CMOS集積回路のウェハレベル融合とセンサ応用

研究課題名(英文) Wafer level integration of nitride semiconductor device and Si CMOS integrated circuit for sensor application

研究代表者

岡田 浩 (Okada, Hiroshi)

豊橋技術科学大学・エレクトロニクス先端融合研究所・准教授

研究者番号：30324495

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：窒化物半導体とシリコン集積回路を一体した新規デバイス及びシステムの実現に向け、新しい絶縁膜堆積技術やウェハ接合技術などの開発を行い、新しいセンサや電子デバイス応用に向けた検討、並びに窒化物半導体へのプロセスダメージの影響の検討を行った。一体化基板上に窒化物半導体マイクロLEDと、これを駆動するシリコントランジスタを隣接して形成し、同一基板上のシリコン回路によるLEDの発光制御に世界で初めて成功した。

研究成果の概要(英文)：To realize novel integrated sensors and systems consist of nitride semiconductor-based devices and Si-based integrated circuit, device fabrication processes, such as an wafer bonding technique a low damage insulator film deposition technique, and so on were developed. Effects of process induced damages in nitride semiconductors were also investigated. As a proof of proposed device fabrication technology, a circuit having GaN-based LED driven by Si transistor on the same wafer was fabricated, and its successful operation was achieved for the first time.

研究分野：半導体工学

キーワード：窒化物半導体 シリコン集積回路 一体化技術 デバイス作製技術 半導体欠陥評価 LED トランジスタ

### 1. 研究開始当初の背景

高度に進歩したシリコン集積回路と、高い感度を有する異種材料を組み合わせることで、シリコン技術のみでは実現困難なセンサーシステムを実現できる。例えば、窒化物半導体はソーラーブラインド、即ち、太陽光下でも炎が出す紫外光のみを検出できる特性を生かし、窒化物半導体で検出された紫外光信号を一体化したシリコン集積回路で直ちに増幅するため、火災の微弱な紫外光に基づく火災の高感度検知が可能である。この他、窒化物半導体のセンサ応用では、触媒金属を組み合わせたガスセンシングや、窒化物半導体をもつ化学的安定性を生かしたバイオセンサなど様々な応用が提案されている(図1)。

窒化物半導体とシリコン集積回路の一体化は、微弱信号検出や高度情報処理を可能にする革新的なコンセプトであるが、その実証は単体デバイスレベルという個別小規模に留まっており、ウェハレベル融合のような大規模集積型のシステム実現にはまだ到達していない。例えば、フリップチップボンディング技術では、完成したLSI集積回路上に完成したセンサチップの貼付けが可能であるが、以下のような問題がある。

- (1) 貼付けするチップ数が多くなるとスループットや歩留まり向上が困難。
- (2) 位置合わせのクリアランス確保のためには集積度が犠牲になる。

これら問題の解決には、フリップチップ方式のように最終工程に貼付けを行うのではなく、センサーの作製プロセスに先立ってウェハレベルの融合一体化を行う新しいプロセスの開発が必須であり、今日の進んだプレーナー集積化技術を応用できるプロセスが可能となれば、微細化、高集積化、量産化の問題も解消される革新的な技術となる、という発想に至った。

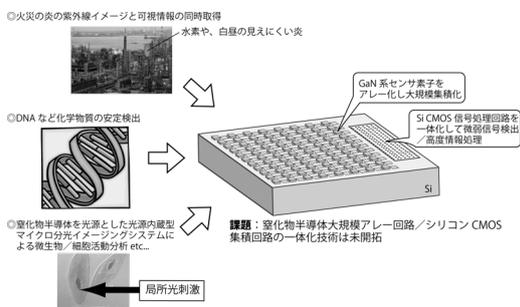


図1：窒化物半導体集積デバイスとシリコン CMOS 集積回路をウェハレベルで融合一体化したデバイスの概念図。

### 2. 研究の目的

本研究では、窒化物半導体集積デバイス/シリコン CMOS 集積回路のウェハレベル融合システムの実現にむけた検討を行う。窒化物半導体とシリコンという異種材料基板をウ

ェハレベルで融合するシステム実現の核となる技術を確認し、その有用性を具体的な融合センサーシステムの実現により検証することを目的とする。

### 3. 研究の方法

窒化物半導体とシリコン集積回路のウェハレベルの融合・一体化デバイスの実現に向け、以下のような技術課題の解決に取り組む。

(1)シリコン CMOS 集積回路への窒化物半導体ウェハの接合技術の開発を行う。GaN と Si のウェハレベルで十分な接合強度で融着し、かつ、シリコン CMOS 回路への熱損傷や、一体化後のプロセス中の接着材からのコンタミネーションを避けるプロセスの確立を目指す。本研究では、接合面に金属膜を堆積してウェハ融着を行う技術を中心として、シリコン酸化膜 (SiO<sub>2</sub>) やシリコン窒化膜 (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)などを介した接合や、ポリマーを介した接合などについて検討する。融着強度や、均一な密着の達成について検証し、プロセスの最終段階で GaN 層のドライエッチングによる貫通孔形成に耐えられる十分な融着が得られるか検証する。

(2) CMOS 集積回路へ影響しない低温での窒化物半導体へのオーミック電極形成技術の開発を行う。本課題ではオーミック電極形成を 500℃以下で達成する融合デバイス向けの低温オーミック形成法を検討する。

(3) 実際に窒化物半導体/シリコン集積回路の融合集積デバイスを作製し、一体化による干渉の影響などについて、評価データに基づいて提案手法の有用性を検証する。さらに、高機能なデバイス実現にむけた検討をする。

### 4. 研究成果

(1)窒化物半導体とシリコン集積回路の一体化にむけた要素技術の開発を中心に検討を行った。ウェハ接合に関する検討については、研究開始後に専用の接合装置が利用できる見通しがたったため、一体化の課題解決にむけた技術開発を進めた。表面活性化法による異種材料ウェハの接合技術により、シリコン基板と窒化物半導体を一体化する技術を検討した(図2)。ここでは融着前の表面の平坦性や加圧融着条件などを検討し、条件の確立を行うとともに一体化プロセスが基盤へ及ぼす影

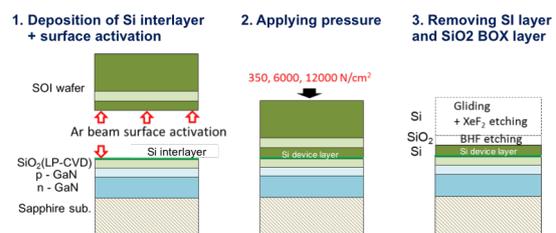


図2：表面活性化ボンディング法による窒化物半導体ウェハと Si ウェハ(SOI ウェハ)の接合。

響を調査し、ウェハレベル融合の基盤技術を立ち上げた。また、この技術により作製した一体化基板上にショットキー障壁ダイオードなどの素子を作製し、電子デバイスやセンサ応用に適用可能であることを予備的な実験から確認した。

(2) 窒化物半導体への低温オーミック接合形成について、イオン注入技術の導入について検討した。イオン注入時の基板温度加熱効果および、注入角度の依存性を評価し、注入ダメージの低減ならびにイオン注入プロファイルの新しい制御技術を開発した。また、これと平行して窒化物半導体デバイスのオーミック電極形成の熱処理が、シリコン集積回路に与える影響を評価・検討した結果、前述のウェハ一体化プロセスにより作成した窒化物半導体・シリコンの一体ウェハでは、プロセス工程などを工夫することで、窒化物半導体デバイスのオーミック電極形成の熱処理が回路全体の特性に悪影響を及ぼさないことも確認できた。

(3) 窒化物半導体とシリコン集積回路の一体化回路の実現には、窒化物半導体におけるダメージが及ぼす影響の理解が重要であるが、伝導型による特性の違い等、詳細は分かっていない。そこで高エネルギー陽子線照射を行って電気的特性を評価し、ここから p 型窒化物半導体は n 型よりも陽子線照射による劣化が生じ易く、抵抗値で 6 ケタ以上の差異が見出された。(図 3) これはシリコン回路との一体化の際に、p 型層へのプロセス

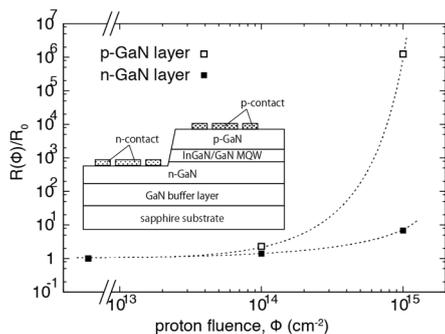


図 3: 陽子線照射による p 型及び n 型 GaN の損傷導入効果の比較検討

ダメージを回避することが重要であることを示唆している。この件に関して、p 型及び n 型の GaN の欠陥生成の差異に就て電子スピン共鳴法などを組み合わせた検討を国際共同研究により実施した。

(4) 半導体表面を保護し、デバイスの安定動作のためのパッシベーション技術として、表面波プラズマを応用した新しい化学気相堆積技術を開発した。従来、窒化物半導体の表面パッシベーションにはプラズマ励起化学気相堆積 (PECVD) 法が用いられているが、ここで考案した方法は、プラズマ中の高エネルギーのイオンなどを用いず、窒化物半導体へのプラズマダメージを回避できると期待される。

窒化物半導体上にシリコン窒化膜を形成する装置ならびにプロセスを開発し、AlGaIn/GaN のトランジスタ構造に適用して電気的特性を評価し、パッシベーション後の素子で電流値の 10%以上の増加、素子の不安定性を表すヒステリシス特性が大幅に現象するなど、表面パッシベーション技術としての有用性の端緒を掴むことができた (図 4)。

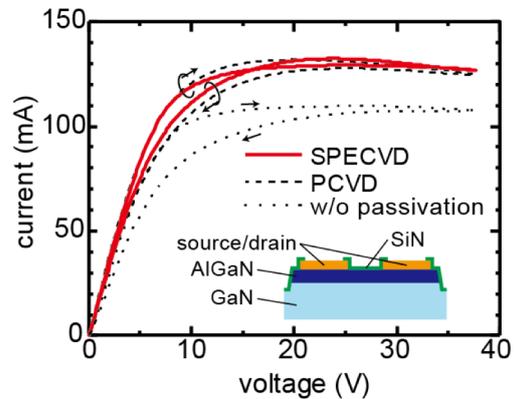


図 4: 表面波プラズマ励起化学気相堆積法による AlGaIn/GaN トランジスタの表面パッシベーションの効果の検証。

(5) 窒化物半導体とシリコンの一体化プロセスや、電子デバイスの安定動作に重要な独自の表面パッシベーション技術について、表面波プラズマを応用した独自のシリコン窒化膜、及びシリコン酸化膜の堆積に成功した。また、この独自開発技術を窒化物半導体表面に適用し、300° C の堆積ながら、6MV/cm 以上の高い絶縁破壊電圧が実現でき、また窒化物半導体に対して低い界面準位密度を有する絶縁体/半導体界面の形成が得られるなど、デバイス応用に有用であることを示すデータを得た。

(6) 窒化物半導体とシリコン集積回路の一体化プロセスで懸念されるダメージ効果を評価した。また、デバイスプロセスにおける窒化物半導体表面の乱れ層の形成と、その表面処理技術について、X 線光電子分光法などの表面分析や、電気的特性から評価し、乱れ層除

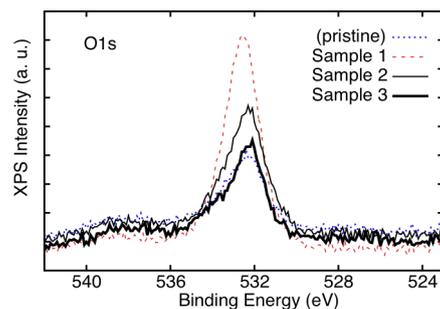


図 5: X 線光電子分光による沸騰塩酸を用いた窒化物半導体表面処理の検討。Sample 1 は熱処理後の GaN 表面、Sample 2 は常温希釈塩酸処理、Sample 3 が沸騰塩酸処理を施した表面の O1s スペクトル。

去に沸騰塩酸処理が有用であることを報告した(図5)。

(7)シリコン基盤と窒化物半導体を一体化する技術の検討を進め、表面活性化技術にもとづいた融着技術の開発を行った。エピタキシャル成長した窒化物半導体 LED 基板と、シリコン基板を一体化した異種接合基板を形成し、イオン注入プロセス、窒化物半導体層ならびにシリコン層に熱損傷などのプロセスダメージを導入しないシリコン CMOS プロセスに準拠する技術を開発した。実証実験として、一体化基板上に窒化物半導体マイクロ LED と、これを駆動するシリコントランジスタを隣接して形成し(図6)、トランジスタによる LED の発光制御に世界で初めて成功した(図7)。この結果は、異種接合基板上に異種材料デバイスが混載できることを実証したものである。ここでの検討では、CMOS 回路を用いたセンサ応用までは至らなかったが、シリコン n-MOS 回路と窒化物半導体デバイスが一体化可能であることを実証しており、基本的な課題がクリアされていることを示すことができた。

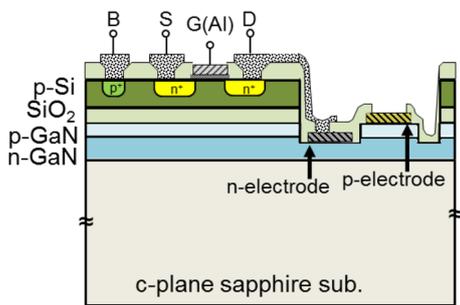


図6: 窒化物半導体/シリコン集積回路の一体化技術の検証に用いたデバイス構造の断面図。

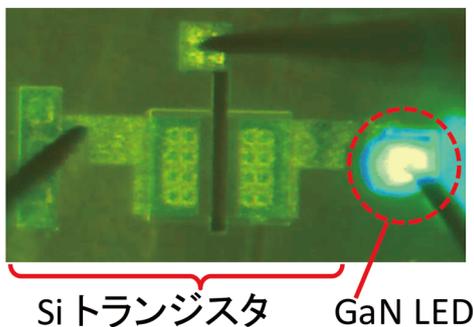


図7: 同一ウェハ上に形成した GaN LED と Si トランジスタの一体化デバイスの動作時の顕微鏡写真。GaN LED を点灯する電流は、同一ウェハ上の Si トランジスタを通じて供給・スイッチングされている。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9 件)

① H. Okada, Y. Okada, H. Sekiguchi, A. Wakahara, S. Sato, and T. Ohshima, 「Study of Proton Irradiation Effects on p- and n-Type GaN Based-on Two-terminal Resistance Dependence on 380 keV Proton Fluence」、IEICE Transaction on Electronics IEICE Transaction on Electronics, E97-C 巻、2014 年、409-412、DOI: 10.1587/transele.E97.C.409

② Hiroshi Okada, Masatohi Shinohara, Yutaka Kondo, Hiroto Sekiguchi, Keisuke Yamane and Akihiro Wakahara, 「Investigation of HCl-based surface treatment for GaN devices」、AIP Conference Proceedings、査読有、1709 巻、2016 年、020011-1-5、DOI: 10.1063/1.4941210

③ Kazuaki Tsuchiyama, Keisuke Yamane, Hiroto Sekiguchi, Hiroshi Okada, and Akihiro Wakahara, 「Fabrication of Si/SiO<sub>2</sub>/GaN structure by surface-activated bonding for monolithic integration of optoelectronic devices」、Japanese Journal of Applied Physics、査読有、55 巻、2016 年、05FL01-1-5、DOI: 10.7567/JJAP.55.05FL01

[学会発表] (計 20 件)

① Ousmane Barry, Hiroto Sekiguchi, Keisuke Yamane, Hiroshi Okada, Akihiro Wakahara, Hideto Miyake, Masakazu Hiramatsu, 「Solar-Blind Ultraviolet Detector Based on Al<sub>0.49</sub>Ga<sub>0.51</sub>N/AlN Back-Illuminated Schottky Barrier Diode」、ISPlasma 2015 / IC-PLANTS2015、2015 年 03 月 26 日～2015 年 03 月 31 日、名古屋大学(愛知県・名古屋市)

② Hiroshi Okada, Masatoshi Shinohara, Yutaka Kondo, Hiroto Sekiguchi, Keisuke Yamane, and Akihiro Wakahara, 「Investigation of surface treatment and passivation for GaN-based transistors」、The Irago Conference 2015、2015 年 10 月 22 日～2015 年 10 月 23 日、Irago Sea-Park and Spa (愛知県・田原市)

③ K. Tsuchiyama, K. Yamane, H. Sekiguchi, H. Okada, A. Wakahara, 「Fabrication of Si/SiO<sub>2</sub>/GaN-LED wafer using surface activated bonding」、The 6th International Symposium on Growth of III-Nitrides、2015 年 11 月 08 日～2015 年 11 月 13 日、Act City Hamamatsu, Hamamatsu (静岡県・浜松市)

④ 土山和晃、宇都宮脩、中川翔太、山根啓補、関口寛人、岡田浩、若原昭浩、「Si/SiO<sub>2</sub>/GaN-LED 構造を用いた Si-MOSFET および LED のモノリシック集積」、第 63 回応用物理学会春季学術講演会、2016 年 03 月 19 日～ 2016 年 03 月 22 日、東京工業大学（東京都・目黒区）

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://http://www.eiiris.tut.ac.jp>

[http:// http://www.int.ee.tut.ac.jp/oeg/](http://http://www.int.ee.tut.ac.jp/oeg/)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡田 浩 (OKADA, Hiroshi)

豊橋技術科学大学・エレクトロニクス先端

融合研究所・准教授

研究者番号：30324495

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：