

平成 28 年 5 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26870108

研究課題名(和文) 低温成長技術によるシリコン(111)上への窒化物系発光素子集積と光MEMS応用

研究課題名(英文) Integration of Si-based MEMS and GaN-based light emitting devices on Si(111) by low-temperature growth technique

研究代表者

太田 実雄 (Jitsuo, Ohta)

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号：60392924

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、窒化物系発光素子(LED)とシリコン(Si)系マイクロ電気機械システム(MEMS)を融合するために、Si(111)基板上への窒化物系LEDの低温作製技術の開発を行った。Si基板上へのGaN低温エピタキシャル成長において、AlN層の導入によってGaN/Si界面の反応抑制と、GaN薄膜の極性制御が可能であることを見出した。パターンドSi基板上においてもGaN低温エピタキシャル成長が可能であった。これらの低温プロセスを基に、PSD法を用いてSi基板上にLED構造を作製したところ、明瞭な電流注入発光が観測され、本手法がSi系MEMSとGaN発光素子の集積化に有望であることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：We have investigated the feasibility of integrating GaN-based light emitting devices and Si-based MEMS on Si(111) substrates. The use of AlN buffer layers led to suppression of GaN/Si interfacial reactions and allowed us to control the polarity of GaN films in the low-temperature pulsed sputtering deposition (PSD) process. It was also found that GaN epitaxial growth is possible on the patterned Si substrates. We fabricated GaN-based LEDs and confirmed their successful operation. These results indicate that the PSD low-temperature technique is quite promising as a future fabrication technique for the MEMS integrated with GaN-based optical devices.

研究分野：半導体結晶成長

キーワード：GaN MEMS Si

1. 研究開始当初の背景

半導体微細加工技術を用いたマイクロ電気機械システム(MEMS)は、マイクロセンサやマイクロアクチュエータ、信号処理回路などの集積により、小型で高精度・高機能なデバイス/システムとして著しい発展を遂げ、情報通信や医療、バイオ、環境分析、自動車など多岐に渡る分野において応用が進められている。しかしながら、間接遷移型半導体である Si では高輝度光源を作製できないため、Si 系 MEMS に光源を集積することは困難であった。このため、光源を必要とするような蛍光分析チップや照明、ディスプレイなどへの光応用では、MEMS の小型化や集積による高機能化が滞っていた。

一方、GaN 系 III 族窒化物半導体を用いた発光素子(LED)の開発はエピタキシャル成長技術の発展によって飛躍的に進展し、先端的な研究分野を創出するとともに次世代照明やディスプレイ等のバックライトなどへの応用を通して省エネルギー社会を支えるキーテクノロジーとして革新的な役割を果たしつつある。また、窒化物半導体では AlGaIn や InGaIn などの混晶を作製することでバンドギャップを 0.65~6.0eV まで変化させられることから、紫外から近赤外域までの幅広い波長域に対応する LED の作製が可能であり、次世代フルカラー固体光源として応用が期待されている。しかしながら窒化物系 LED はこれまで単体部品としてのみ利用されており、素子の応用範囲は極めて限られたものであった。

窒化物系 LED を Si 系 MEMS にモノリシック集積することが可能となれば、新構造の MEMS による光集積デバイスの発展が期待でき、LED の発光をアクチュエータ制御によって配光するスマート LED 照明や、蛍光分析の励起光に LED を用いたバイオセンサや環境成分モニタなどへの応用が期待できる。

2. 研究の目的

窒化物系 LED を Si 系デバイスと集積化するための検討は 1990 年代からおこなわれてきたものの、窒化物半導体の結晶成長手法として一般的な有機金属気相成長法(MOCVD 法)は成長温度が 1100°C 程度と高い。そのため、窒化物系 LED の製造プロセス中に Si 系素子が壊れてしまう、Si と GaN の熱膨張係数差に起因した熱応力により GaN 薄膜中にクラックが発生する、といった本質的な問題点を克服できず、研究は停滞していた。

そこで本研究では上記の問題を解決するために、Si(111)上への窒化物半導体の低温結晶成長技術の開発を行った。この手法を用いれば、Si ウェハを高温に晒すこと無く、GaIn 系 LED を作製でき、最先端の Si 系 MEMS に窒化物系 LED をモノリシックに混載することが可能になると期待できる。

3. 研究の方法

GaN などの窒化物半導体薄膜はパルススパッタ堆積(PSD)装置を用いて Si(111)基板上に成長した。パルススパッタ法では高エネルギー原料粒子の供給が可能であり、低温でも良質なエピタキシャル成長を実現できる。Si(111)基板は溶液処理後に真空中で加熱することにより、表面正常化を行った。成長した窒化物薄膜の評価には反射高速電子線回折(RHEED)、原子間力顕微鏡(AFM)、X線回折(XRD)、電子線後方散乱回折(EBSD)、X線反射率測定(GIXR)、フォトルミネッセンス測定(PL)などを用いた。

4. 研究成果

(1) スパッタ法による Si(111)基板上への GaN エピタキシャル成長

Si 基板上への GaN 薄膜成長では、メルトバックエッチングと呼ばれる Ga と Si の反応がおこることが知られており、一般的に界面バリア層として AlN が用いられる。本研究でも、GaN/Si 界面での反応を抑制するために、スパッタによって AlN 層を堆積し、界面バリア層として用いた。その結果、急峻なヘテロ界面を実現でき、Si(111)基板上への GaN エピタキシャル成長が実現した。

続いて、Si(111)上に成長した GaN 薄膜の極性制御に取り組んだ。ウルツ鉱型の III 族窒化物半導体は中心対称性を持たないため、<0001>方向に N 極性と Ga 極性が区別される。極性の混在は反転境界と呼ばれる欠陥を形成するため、高品質薄膜成長のためには単一極性となるように極性制御を行うことが不可欠である。そこで、PSD 法による Si(111)上 GaN 薄膜成長時の極性制御に取り組んだ。図 1(a)には Al-rich 条件

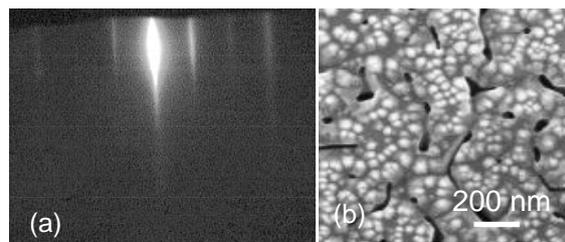


図 1 Al-rich 条件 AlN バッファ層上に成長した GaN 薄膜の(a)RHEED 像 (b) KOH エッチング後の表面 SEM 像。

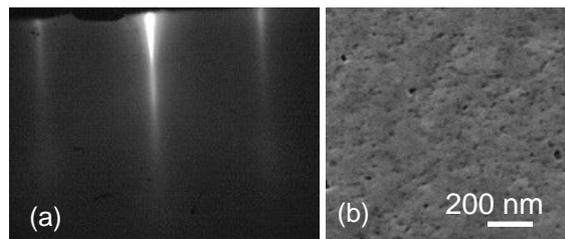


図 2 N-rich 条件 AlN バッファ層上に成長した GaN 薄膜の(a)RHEED 像 (b) KOH エッチング後の表面 SEM 像。

で成長した AlN バッファ層上の GaN 薄膜の RHEED 像を示す。この図には 3×3 の表面再構成パターンが見られる。また、KOH ウェットエッチングを行ったところ図 1(b)に示すように GaN 表面が粗くエッチングされることが分かった。これらは N 極性 GaN に見られる特徴である。次に Ga 極性 GaN を得るために、AlN バッファ層の成長条件を Al-rich から N-rich へと変更した。N-rich 条件で成長した AlN バッファ層上の GaN 薄膜の RHEED 像は図 2(a)に示すように“1×1”を示した。また、図 2(b)に示すように、KOH エッチング後も GaN 表面は平坦な形態を保っている。これらの結果から、AlN バッファ層成長時の条件をコントロールすることによって GaN 薄膜の極性を制御できることが明らかとなった。また、MEMS 応用を目指してパターンニング基板上への GaN 低温結晶成長を行い、同様の層構造を用いてエピタキシャル成長が可能であることを見出した。

界面バリア層として、AlN を用いれば良質な GaN 薄膜成長が可能であることが分かったが、AlN は電気抵抗が高いため、Si との導通が必要なデバイス構造の場合には導電性バリア層を用いる必要がある。そこで、導電性の HfN をバリア層に用いて GaN 薄膜成長を試みた。導電性 HfN は熱力学的に安定な材料であり、GaN との格子不整合が 0.35%と小さいことから、Si 基板上への高品質 GaN 薄膜の成長が期待できる。PSD 法で HfN 薄膜を 40nm 堆積した後に、X 線反射率測定によって HfN/Si ヘテロ界面の急峻性を調べたところ、図 3 に示すように反射率カーブは界面反応層を仮定しない 2 層モデルによるフィッティング結果と良い一致を示し、急峻な界面が形成されていることが明らかになった。これは、HfN バッファ層を導入する事で GaN 薄膜と Si 基板間の界面反応を抑制できることを示唆している。

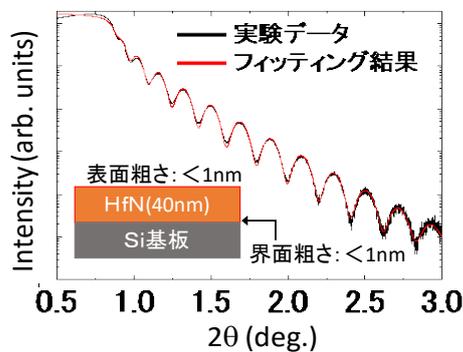


図 3 PSD 法を用いて作製した HfN/Si 構造の X 線反射率測定結果

HfN/Si (111) 上に GaN 薄膜を成長した試料について、XRD 測定を行った結果を図 4 に示すが、HfN 111 回折ピークとともに GaN0002 回折ピークが明瞭に観測された。

他の面方位の混入は見られず、また、RHEED 観察においては明瞭なストリークパターンが観測され、平坦な表面を持つ GaN 層が Si 基板上にエピタキシャル成長していることが明らかになった。これらの結果から、導電性 HfN バッファ層を導入した場合でも、AlN の場合と同様に GaN 薄膜の良質なエピタキシャル成長を実現できることが明らかになった。

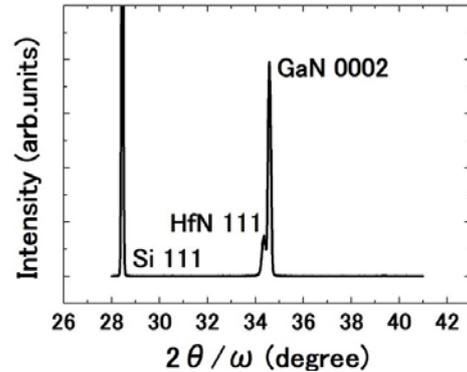


図 3 PSD 法を用いて作製した HfN/Si 構造の X 線反射率測定結果

(2) LED の作製

(1)で見出した低温結晶成長プロセスを基に、PSD 法を用いて Si 基板上に LED 構造を作製した。素子の構造は、GaN/AlN/Si の上に、n 型 GaN 層、[InGaN/GaN]を 5 周期積層した多重量子井戸構造 p 型 GaN 層で構成した。n 型、p 型のドーパントにはそれぞれ Si と Mg を用いた。フォトリソグラフィを用いてメサ構造を作製した後、p 型電極として Pd/Au、n 型電極として Al を真空蒸着法によって形成した。XRD 2θ スキャンを行ったところ、[InGaN/GaN]多重量子井戸構造に由来する明瞭なサテライトピークが観測され、MQW 構造が急峻な界面を有していることが分かった。また、フィッティングの結果から MQW の構造は [In_{0.24}Ga_{0.76}N(4.8 nm)/GaN(6.5 nm)]であり、設計値とほぼ同じであった。この試料に電流注入を行ったところ、図 3 に示すようにピーク波長 480 nm の強い発光が確認され

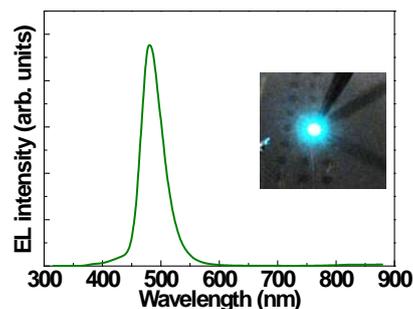


図 3 低温 PSD 法を用いて Si(111)上に試作した GaN-LED の電流注入発光スペクトルと発光中の写真

た。以上の結果から、Si 基板上に PSD 法を用いて LED 構造の作製が可能であることが明らかとなった。PSD 法においては Si 素子の耐熱限界温度以下で GaN の低温結晶成長ができるので、本技術を用いて Si 系 MEMS と GaN 発光素子の集積化が実現できると期待される。

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 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

1. 篠塚 正之, 太田 実雄, 綿引 康介, 金 惠蓮, 上野 耕平, 小林 篤, 藤岡 洋, 「GaN 薄膜成長における HfN バッファ層の検討」第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋国際会議場、2015 年 9 月
2. 篠塚 正之, 綿引 康介, 太田 実雄, 金 惠蓮, 上野 耕平, 小林 篤, 藤岡 洋, 「伝導性バッファ層を用いた Si 基板上への GaN 薄膜成長」、第 45 回結晶成長国内会議、19 p B04、北海道大学、2015 年 10 月

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

なし。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

太田実雄 (Jitsuo Ohta)

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号：60392924