

加工シリコン基板上への窒化物半導体の 選択再成長法によるナノヘテロ構造の創製

Selective epitaxial growth of nitride nano-hetero
structures on patterned silicon substrate

澤木 宣彦 (Nobuhiko SAWAKI)
名古屋大学・大学院工学研究科・教授



研究の概要

Si 基板上に(111)ファセット面を作製し、その上への選択 MOVPE 法により、(0001)、(1-101)、(11-22)ならびに(11-20)面を有する AlGa_{0.2}N/GaN、Ga_{0.2}N/InGa_{0.2}N 微細ヘテロ構造を作製した。自然形成原理に従って形成される試料は、表面平坦性、結晶性、不純物ドーピング特性に優れ、光集積デバイス作製のためのナノヘテロエピタキシの有効性を実証した。

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用物性・結晶工学

キーワード：Ga_{0.2}N、ナノヘテロ構造、MOVPE、選択成長、不純物ドーピング

1. 研究開始当初の背景

GaN は主として(0001)サファイア基板上に作製されていたが、光デバイスの高度化のため、欠陥の低減、p 形不純物の高濃度化、Si 等異種基板上への半極性、無極性面を有する窒化物ヘテロ構造の作製法の開発が望まれていた。他方、窒化物結晶の微細加工技術は未踏の分野であった。

2. 研究の目的

加工を施したシリコン基板上への選択成長法により、Ga_{0.2}N 微細単結晶(多面体)を自然形成原理に従って成長させ、これを用いた窒化物半導体ナノヘテロ構造による高温でも量子効果が発現する新規光・電子デバイスのシリコン基板上での実現を目標とし、(1)ファセット面上での窒化物系ヘテロ構造の形成過程の理解とその制御手法の確立、(2)窒化物結晶ファセット面上における欠陥生成と不純物ドーピング機構の理解、(3)窒化物微細ヘテロ・量子井戸構造の作製法の提案とナノ情報デバイスへの適用性の明示、を具体的な研究課題とした。

3. 研究の方法

窒化物結晶はファセット面により成長条件が大きく異なる。減圧 MOVPE 装置を購入し、成長温度、成長圧力、V/III 比等を精密に制御しながらファセット特有の成長条件、不純物導入条件を精査すると共に、Ga_{0.2}N/Si 成長に最適な緩衝層の役割と欠陥(転位、積層欠陥)の低減効果を、TEM、REM、CL、XRD 法により評価した。

4. 研究の主な成果

(1)ファセット面上での窒化物系ヘテロ構造の形成過程の理解とその制御手法の確立

(a)Ga_{0.2}N/Si 界面における AlN 緩衝層はマイクロピラミッドを形成し欠陥低減に寄与していること、Ga と Si との反応抑制に AlInN が有効であることを明らかにし、HVPE 成長で 200 μ m を越える厚膜の成長を達成した。

(b)ファセット面上での成長条件を精査することによりファセット固有の成長条件を見出し、傾斜(001)Si 基板上への(1-101)Ga_{0.2}N、(113)Si 上への(11-22)Ga_{0.2}N、(110)Si 上への(11-20)Ga_{0.2}N の選択成長法を確立した。

(c)マイクロファセット面上への AlGa_{0.2}N、InGa_{0.2}N 混晶の成長を行い、気相拡散によるリッジ成長(膜厚不均一)と表面拡散による組成不均一を精査し、Ga の拡散現象が支配的決定要因であること、減圧成長により拡散長が著しく長くなることを見出した。

(d)ファセット面上への Ga_{0.2}N 成長において、1%を超えない Al を混入すると格子歪みが著しく低減されることを見出した。

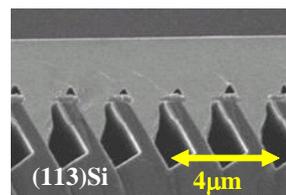


図 1. (113)Si 基板上に作製した(11-22)Ga_{0.2}N の断面 SEM 像

[4. 研究の主な成果 (続き)]

(2) ファセット面上への不純物ドーピング機構の理解

(a) 最表面が窒素で終端された(1-101)面 GaN の成長では、炭素が窒素を置換し、浅いアクセプタとして活性化し高濃度の p 形層が得られることを明らかにした。

(b) 同上(1-101)GaN 成長において Si は Ga を置換し浅いドナー準位を形成することを明らかにした。

(c) Mg は(1-101)GaN において Ga を置換し浅いアクセプタ準位を形成すること、自己補償効果が小さく(0001)GaN に比べて一桁高い正孔濃度が得られることを明らかにした。また、表面偏析現象は(0001)面に比べて弱いことを明らかにした。

(d) Mg ドープ p 形試料のフェムト秒分光で不純物帯の存在が示唆され、数 ps の短い緩和時間が見出された。

(3) 窒化物微細ヘテロ・量子井戸構造の作製法の提案

(a) MOVPE 成長における化学種の拡散長と同程度のサイズを有するファセット面上にヘテロ構造を作製すると、サイズにより組成、膜厚の制御が可能であることを明らかにした。また、Si 基板上に作製するトレンチを浅くすることで GaN 量子細線が作製できることを実証した。

(b) Si 基板上で GaN の c 軸を傾けることにより、熱膨張係数差に起因する歪みが低減されクラックフリーで低欠陥の試料が得られることを実証した。

(c) (1-101)GaN 上の GaN/AlGa_N、GaN/InGa_N ヘテロ多層構造では混晶組成の不均一性が小さく、急峻なバンド端吸収特性を示すことが明らかになった。同構造を有するストライプ上に作製した導波路は優れた光学利得を示し、光励起による誘導放出が得られた。

(d) 半極性(1-101)GaN 並びに半極性(11-22)GaN 面上に InGa_N/Ga_N 量子井戸構造を作製し、これを活性層とする LED を試作した。p 形層としては、Mg ドープ層の他、炭素ドーピング層を用いた。両試料共にレッドシフトの小さな良好な発光特性を示した。

5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

次世代の光電子集積デバイス、Si ホトニクス等の分野で Si 基板上への光デバイス作製技術の高度化が渴望されている。本研究成果は、Si 基板上の任意の位置に任意の大きさの光デバイスを作製する技術を提供

するものであるが、特に、Si 基板上で半極性(1-101)、(11-22)GaN と無極性(11-20)GaN の成長を実証した点で、世界の窒化物関係研究者に大きなインパクトを与えた。

6. 主な発表論文

(研究代表者は太字、研究分担者は二重下線、連携研究者は一重下線)

(1) "Growth and properties of semi-polar GaN on a patterned silicon substrate," **N.Sawaki**, T.Hikosaka, N.Koide, Y.Honda, M.Yamaguchi and T.Tanaka, J. Crystal Growth, Online 14 Jan. doi.10.1016 (1-8pp) (2009)

(2) "Growth of non-polar (11-20)GaN on a patterned (110)Si substrate by selective MOVPE," T.Tanikawa, D.Rudolph, T.Hikosaka, Y.Honda, M.Yamaguchi, and **N.Sawaki**, J. Crystal Growth, 310, 4999-5002 (2008)

(3) "Fabrication and properties of semi-polar (1-101) and (11-22)InGa_N/Ga_N MQW light emitting diode on patterned Si substrates," T.Hikosaka, T.Tanikawa, Y.Honda, M.Yamaguchi and **N.Sawaki**, phys. sta. sol.(c) 5, 2234-2237 (2008)

(4) "Al doping in (1-101)GaN films grown on patterned (001)Si substrate," T.Hikosaka, Y.Honda, M.Yamaguchi, and **N.Sawaki**, J. Appl. Phys. 101, 103513 (1-5pp) (2007)

(5) "Mg doping in (1-101)GaN grown on a 7-degree-off oriented (001)Si substrate by selective MOVPE," T.Hikosaka, N.Koide, Y.Honda, M.Yamaguchi, and **N.Sawaki**, J. Crystal Growth 298, 207-210 (2007).

(6) "p-type conduction in a C-doped (1-101)GaN grown on a 7-degree-off oriented(001)Si substrate by selective MOVPE," T.Hikosaka, N.Koide, Y.Honda, M.Yamaguchi, and **N.Sawaki**, phys. stat. sol. (c) 3, 1425-1428 (2006).

(7) "Optical and electrical properties of (1-101)GaN grown on a 7°off-axis (001)Si substrate," T.Hikosaka, T.Narita, Y.Honda, M.Yamaguchi, and **N.Sawaki**, Appl. Phys. Lett. 84,4717-4719 (2004).

(8) "Growth and optical properties of InGa_N/Ga_N quantum well on a (1-101) facet," T.Narita, Y.Honda, M.Yamaguchi, and **N.Sawaki**, phys. stat. sol. 2, 2349-2352 (2005).

ホームページ等

<http://semidcond.nuee.nagoya-u.ac.jp>