「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」 平成 17 年度採択研究代表者

岸野 克巳

上智大学理工学部 教授

ナノコラム結晶による窒化物半導体レーザの新展開

### 1. 研究実施の概要

GaN ナノコラム中に内在した InGaN 量子ディスクの発光特性の向上や位置・形状の制御はナノコラム光デバイス応用に必須の技術であり、本年度は分子線エピタキシー (MBE) 法による GaN ナノコラムの選択成長法の開拓と規則配列化を結晶成長における主たるテーマとした。デバイス応用に向けては、ナノコラム効果による窒化物半導体の波長領域拡大の可能性を検証するために、短波長域では紫外ナノコラム LED の試作、長波長域では橙色 InGaN 量子ディスクナノコラムの発光特性評価を行った。さらにナノコラム共振器の作製を開始した。ナノコラム結晶効果の解明に向けて、単一、集団ナノコラムについて、光物性、フォノン物性、ランダム物性について研究した。

選択成長法としては、それぞれ AI ナノパターンあるいは Ti マスクを用いる二つの有効な手法の開拓に成功した。選択成長条件の最適化を進め、(111)面 Si 基板、あるいは(0001)面 GaN テンプレート上に、InGaN / GaN ナノコラムを形状制御しつつ規則的に配列させることに成功した。一方、この選択成長法の新たな展開として、Ti マスクにストライプ状開口部を設けて GaN を選択成長させることで板状ナノ結晶 (ナノウォール)を作製することに成功した。さらに、GaN テンプレートに存在する貫通転位のナノウォール内部への伝播が抑制されることを見出した。

今後は、新たに開拓した規則配列ナノコラム、およびナノウォール技術を基礎にして、ナノ発光 デバイスの作製と高性能化を推進する。ナノコラム結晶効果の解明では、寸法、組成を制御した 規則配列ナノコラムによってナノ物性の評価を行うことで、より系統的な検討を行う。

### 2. 研究実施内容

(文中にある参照番号は4.(1)に対応する)

### [ナノコラム結晶の高品質化] 1)

### (1) 橙色発光 InGaN/GaN ナノコラムの光学特性評価

前年度までの研究において、緑色域 InGaN/GaN 量子ディスク(QD)ナノコラムでは、低温における 発光再結合寿命時間が通常の薄膜量子井戸に比べ て短く、励起キャリア密度増加による発光ピークの 短波長シフトが見られないことから、ピエゾ電界が 抑制され、ナノコラムでは発光遷移確率が高いこと が示された。本年度は、さらに高 In 組成域である 橙色発光 InGaN-QD ナノコラム結晶を RF-MBE 法で (0001)サファイア基板上に成長し、発光特性評価に よって長波長域におけるナノコラム結晶の優位性 について検討した。図1は、発光ピーク波長 596nm の InGaN/GaN 単一量子ディスク (SQD) ナノコラム のフォトルミネッセンス(PL)積分強度のアレニウ スプロットと PL スペクトルの温度依存性である。 低温と室温でのPL積分強度の比は15~28%となっ た。通常、この値は内部量子効率に対応すると考え られており、室温においても高い発光効率を示すこ とが確認された。一方、図2は低温(4K)での発光減 衰特性であるが二重指数関数でフィッティングし たところ、発光寿命時間 τ<sub>1</sub>=0.95ns、τ<sub>2</sub>=8.95ns を

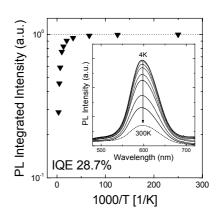


図1. InGaN/GaN SQD ナノコラムの PL 積分 強度のアレニウスプロット及び PL スペクトル の温度特性

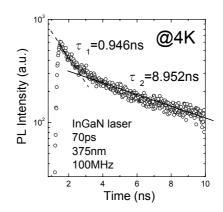


図2. 橙色発光(室温ピーク波長 596nm) InGaN/GaN SQD の低温発光減衰特性

得た。この値は連続膜 InGaN/GaN 量子井戸に比べ 2 桁程度は速い。一般に InGaN/GaN 量子井戸では、In 組成揺らぎの増大、結晶欠陥の増加、さらにピエゾ電界による遷移確率の減少によって、長波長域(緑~赤)では発光効率が劇的に低下する。これに比べて InGaN-QDナノコラム結晶では、波長 596nm(橙色)でも、高い内部量子効率、高い発光遷移確率が実験的に観測された。

#### [ナノコラム LED の高性能化]

### (2) Be ドーピングの LED 表面層平坦化効果<sup>2)</sup>

GaN 系材料のp型ドーパントにはMg が用いられる。Be は、Mg よりも浅いアクセプタ準位をもつと期待されているが、これまでにBe ドープでは再現性のある良好なp型導電性 GaN 膜は実現されていない。本研究ではGaNナノコラムのBe ドーピング効果について検討した。

RF-MBE によって n型(111)Si 基板上に InGaN/GaN ナノコラム LED 結晶を成長しながら、GaN 上部クラッドに Be ドーピングを行い、Be セル温度を 820、870、920、975℃と変化させて、4種類のサンプルを作製した。図 3 に Be ドープ・ナノコラム LED 結晶の鳥瞰 SEM 写真を示す。Be ドーピング量が少ない領域(セル温度 820~870℃)では、表面にグレイン構造に起因する凹凸が観察されたが、Be ドーピング量の増加とともに表面平坦性が向上した $^{2}$ )。今のところ p型結晶は得られていないものの、Be ドーピングにはナノコラムの横方向成長促進による表面平坦化効果があることが分った。

## (3) 波長域拡大:紫外発光ナノコラム LED 試作<sup>3,4)</sup>

GaN 系ナノコラム結晶は転位や結晶品質の影響を受けやすい紫外域における発光デバイス応用にも適していると期待される。本年度はGaN/A1GaN 量子井戸紫外ナノコラム LED の作製に成功し、LED の特性評価を行った<sup>3,4)</sup>。

ナノコラム LED 構造は n 型(111)Si 基板上に RF-MBE 法を用いて成長した。図 4 は GaN/A1GaN ナノコラム LED の構造図である。p-GaN クラッド 層で横方向成長を促進し、表面で連続膜とした。立ち上がり電圧 4.0V、直列抵抗  $18\Omega$  を得た。図 5 にはマクロ領域( $\phi$ ~500  $\mu$ m)とミクロ領域( $\phi$ ~50  $\mu$ m)で測定した 5mA 時の発光スペクトルを示す。ピーク波長は 354nm で、紫外発光のナノコラム LED 試作に成功した。マクロ領域では GaN 量子ディスクの直径や厚さが素子面内で不均一なため半値幅が 29.3nm と広いが、ミクロ領域測定では面内不均一の影響が少なく、半値全幅は 12.0nm (FWHM: 119meV)と狭い値となった。このことからナノコラム規則配列による量子ディスク形状の均一化によって発光特性の向上が期待される。

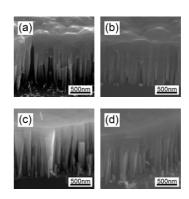


図3. 上部を Be ドープした GaN ナノコラム LED 構造の鳥瞰 SEM 像、(a)820℃、(b)870℃、(c)920℃、(d)975℃

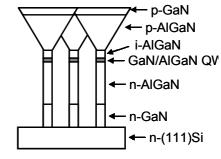


図4. 紫外発光 GaN/AlGaN ナノコラム LED の構造図.

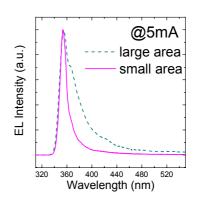


図5. 紫外域ナノコラム LED 発光スペクトル

### [ナノコラム結晶効果の解明]

### (4) 単一 InGaN/GaN ナノコラムの顕微分光

サファイア基板 (0001) 面上に成長させた InGaN/GaN ナノコラム結晶から、機械的にナノコラムを分離し、純水中に分散させ、番地化した Si マイクロミラーアレイ上に単一ナノコラムを散布した。ナノコラム試料は、直径 40nm から 120nm、ノンドープとした GaN 層  $(1.1~\mu m)$ 、InGaN 活性層 (3nm)、GaN キャップ層 (55nm) からなり、発光ピーク波長は 513~nm (@ 13K) である。図 6 は緑色発光単一 InGaN/GaN ナノコラムの 4. 2K における発光スペクトルである。低光励起キャリア密度  $(1.11 \times 10^{16}~cm^{-3})$  では発光スペクトルに 10 本

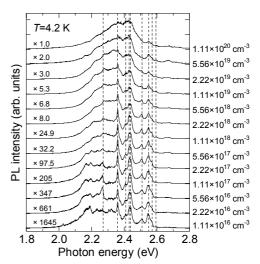


図 6. 緑色単一 InGaN/GaN ナノコラムの 4.2 K における顕微発光スペクトル

程度のスパイク状の発光線スペクトルがみられ、ナノコラムの内に複数の微小な発光中心があることを示唆している。これらの発光スペクトルは光励起キャリア密度を増加させると広がり、10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup>以上では同じエネルギー域の 2.3 から 2.4eV 付近で急激に発光強度が増加した。ナノコラムでは内部電界が低減されていると考えられ、強光励起キャリア密度における発光スペクトルのブロード化は局在準位のフィリングによって非局在準位からの発光が観測されたことを示している。次に、光励起キャリア密度の変化が再結合過程にどのように影響するのかを調べた。光励起キャリア密度 1.11×10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup> で発光スペクトルの時間変化と各スパイク状発光位置における発光減衰曲線を調べたところ、発光の立ち上がり直後はブロードな発光スペクトルを示し、ブロードな発光成分はすぐに減衰した。このことから遅い発光寿命成分は局在準位に起因したスパイク状の発光スペクトルに対応している。

### (5) ナノピラー加工 InGaN/GaN 量子井戸の顕微光学特性

反応性ガス支援イオンビームエッチング(CAIBE)法を用いて加工したナノピラー上のInGaN/GaN 量子井戸について、顕微発光測定、顕微時間分解発光測定を行い、加工前後による光学特性の変化を評価した。加工をすることによって、発光スペクトルのブルーシフト、発光強度の増大、輻射再結合寿命の高速化が観測された。これは表面歪みが緩和されることによって、内部電界が遮蔽され、輻射再結合が起こりやすくなったと考えられ、加工した構造においても"ナノコラム効果"が検証された。

### (6) 集団 GaN ナノコラムの励起子物性

昨年度の実験によれば、GaN ナノコラムにおける励起子分子発光の束縛エネルギーは、バルク値(5.7meV)よりも大きな値となり、平均コラム径が約150~nm の試料では11~meV、約120~nm の試料では20~meV で、100nm 以下の平均コラム径をもつ試料では励起子分子発光そのものが観測されなかった5)。励起子束縛エネルギーはバルクと同じ値であったので、この実験は励起子分子にのみ閉じ込め効果が生じていることを示唆している。そこでGaN ナノコラムにおける励

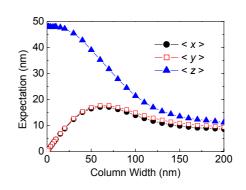


図 7. 励起子分子の電子間距離の期待値

起子および励起子分子束縛エネルギーの比を計算したところコラム径 100nm 付近からそれ以下で増加が見られた。図 7 は励起子分子における電子間の距離の期待値を x, y, z それぞれの方向で計算した結果である。これより励起子分子はコラム径 100-150nm 付近から閉じ込めの影響を受けることが明らかとなり、励起子分子束縛エネルギーの実験的な変化を定性的に説明できることが分った。このことは電子と正孔が 1 次元とみなせるような強い閉じこめを受けていない系でも、励起子分子という 4 体問題となると、コラム形状によって大きな影響を受けることを意味している。

#### (7) 集団 InGaN/GaN ナノコラムの発光機構

本年度は InGaN 量子ディスクを GaN ナノコラムに埋め込んだ InGaN/GaN 単一量子ディスク (SQD)ナノコラムと InGaN だけを成長させた InGaN ナノコラムの発光機構の違いを調べた。図8、9は、それぞれ InGaN ナノコラム、InGaN/GaN SQD ナノコラムの PL スペクトルと励起スペクトル (PLE: Photoluminescence Excitation)である。PL スペクトルは320nm 励起で測定した。PLE スペクトルは、ある特定のエネルギーの PL 発光強度に着目して、その強度が励起波長を変化させたとき、どのように変わるかを示すスペクトルである。

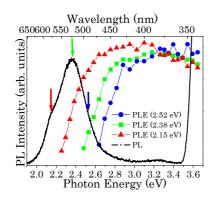


図8. InGaNナノコラムのPLとPLE

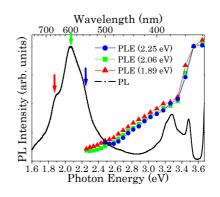


図9. InGaN/GaN SQD ナノコラムの PL と PLE

本実験ではPLピークエネルギー位置、その両側の発光強度が半分となるエネルギー位置の三箇所に対してPLEスペクトルを測定し、それぞれ四角、三角、円の点でプロットした。これを図8、9でみると、InGaNナノコラムと InGaN/GaN SQDナノコラムでは全く振る舞いが異なる。前者は図8にみるように通常の連続膜 InGaN 量子井戸と類似しており、エネルギー軸上の連続した局在準位があることが示唆され、厚さ 100nm の InGaN ナノコラム軸方向でランダムな In 組成揺らぎが存在していると考えられる。一方、InGaN-SQD では図9から分るように、モニター位置による PLE スペクトル変化が見られない。これは発光スペクトルが励起波長によらないことを示しており、InGaN-SQD内の局在状態は、InGaNナノコラムや InGaN 量子薄膜とは異なることを表わしている。これを説明すべく考察すると、ひとつの InGaN-SQD には1つの局在準位が存在し、それが発光に寄与するが、多数個存在する各々の SQD 間では局在エネルギーに分布があるため、集団ナノコラムでみると、それらの局在準位が足し合わされ、スペクトルが広がる。また、このモデルはひとつの InGaN-SQDの発光スペクトルは狭いことを示唆しているが、これは(4)の実験結果とは必ずしも整合しない。サンプル作製の時期が大きく離れているためか、今後の検討が必要である。

#### (8) 集団 GaN ナノコラムのフォノン物性と伝導機構

昨年度に引き続いて $^{6)}$  GaN ナノコラムのラマン散乱について研究した。プラズモンと縦光学(L0)フォノンのプラズモン-L0 フォノン結合 (L0PC) モードをみたところ、実験的では  $A_1$  (L0) フォノンとの結合モードである上分岐  $L^+$ 結合モードだけが観測された。これをバルク結晶での誘電関数から求められるプラズモン-L0 フォノンモードの理論曲線でフィッティングすることで、 $A_1$  (L0) フォノンの半値幅を求め緩和定数( $\Gamma$ )を算出した。図 1 0 に GaN ナノコラムの  $A_1$  (L0) フォノン緩和定数のキャリア密度依存性を黒丸で示した。GaN

ナノコラムにおける緩和定数は、薄膜 GaN の緩和定数の報告値 (黒四角) より大きいが、これはナノコラム結晶では電子-格子相互作用が強いことを示唆している。さらに、GaN ナノコラム結晶の電気伝導度を研究した。ナノコラム結晶表面に直径 $\phi=500~\mu$ m の円電極をつけ、高濃度ドープ Si 基板の裏側電極間の二端子法で測定した。一つの電極の下には約  $10^7$ 本のナノコラムがある。Si ドープ GaN ナノコラムでは、キャリヤ密度が多くなるにも関わらず電気抵抗が増加した。試料寸法はそれほど変化しないので Si ドープにより移動度が悪くなったと考えられる。つまり、ラマン散乱で示唆されたようにナノコラム

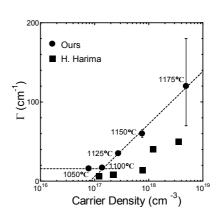


図 10.  $A_1(L0)$  フォノンの緩和定数  $(\Gamma)$  のキャリヤ濃度依存性

結晶では電子-格子相互作用が強く、電子の寿命が短くなることを支持している。さらに 1.4 K で磁場を 12 T まで掃引して磁気抵抗を測定したところ、アンドープ試料では電流に 依存する負の磁気抵抗効果を観測した。電流が低いほど抵抗の減少は大きくなり、電流値 7

×10<sup>-5</sup> mA で、サイクロトロン半径がナノコラム半径と同程度となる磁場 3 T 付近で最大となり、およそ 7 %の抵抗の変化が観測された。Si ドープした試料ではこの負の磁気抵抗は消失したが、ナノコラム結晶内の強い電子ー格子相互作用のため電子の寿命が短くなり、サイズ効果が消失するためと考えている。

### (9) ナノコラム・ランダム物性

非一様媒質における光の伝搬は、多重散乱による干 渉効果によって非常に興味深い物性を示すが、自己形 成ナノコラム系はこのようなランダム物性を研究する 上で、理想的な候補である。本年度は、ナノコラムの ランダム配列系の光伝搬を有限差分時間領域法 (FDTD) により計算し、さらにナノコラム結晶の発光空間分布 を走査型近接場顕微鏡 (SNOM) によって測定して統計 的に解析した。図11にシミュレーションの結果を示し、 図12にはSNOMで測定したPL発光空間分布を示したが、 これらからランダムな光強度分布が見て取れる。こう した系での光拡散を自己相関関数の計算から議論し、 ランダム媒質では光は広い波長領域にわたって閉じ こめられることが分った。SNOM による測定結果を統 計的に解析したところ、ランダムな干渉効果特有のポ アッソン分布を得た。これは干渉効果がない場合に期 待されるガウス分布と際だった違いを示している。こ のような光散乱を微視的な視点から解釈するために コラム一本一本の光散乱の様子を調べる必要がある。 単一コラムによる散乱を解析して後方散乱強度の波 長依存性を調べたところ、実験的に得られるナノコラ ムの半径および GaN の誘電率は、光の強い局在を得る のに適していることが示された。

# [多層膜反射鏡(DBR)とナノコラム共振器] (10) ナノコラム共振器の作製

図 13 に示すように、サファイヤ基板上のナノコラム結晶に AlN/GaN 多層膜反射鏡(DBR)を内在化したのちに、ナノコラムを維持したまま InGaN/GaN 多重量子ディスク(MQD)を成長させ、ナノコラム共振器の下部構造を作った。サファイヤ基板側から AlN/GaN-DBR

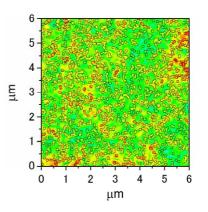


図 11 ランダム配列 GaN ナノコラ ム内の光伝搬シミュレーション

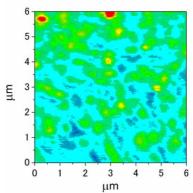


図12. 自己形成 InGaN/GaN ナノコラムにおける発光強度の空間分布の SNOM 測定

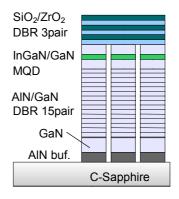


図13 ナノコラム共振器の構造図

反射器の反射測定を行うと、ピーク波長は 560nm、半値幅は 33nm となった。反射器の半値幅が狭いが、この範囲に InGaN 発光波長を整合させる必要がある。 InGaN/GaN-MQD の PL 発光波長は 550nm で、10nm のずれが見られた。表面に 3 ペアの  $SiO_2/ZrO_2$  誘電体多層膜反射鏡を電子ビーム蒸着によって成膜させ、図 13 の共振器構造を作った。

図 14 はこの共振器の反射スペクトルと PL 発光スペクトルである。波長 557nm において共振ピークが見られたが、発光ピークと反射ピーク波長間のずれのため Q 値は 43 と低く今後の改善が必要である。

GaN/A1N 超短周期の超格子構造を作り、サブバンド間遷移現象によって、ヘテロ界面の急峻性を評価した $^{7)}$ 。GaN/A1N-DBR は大きな結晶ひずみが内在するので格子整合系となる GaN と InA1N で DBR を作る必要があり、InA1N ナノコラムを検討した $^{8,9)}$ 。

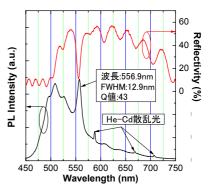


図 14 ナノコラム共振器の反射スペクトルと PL スペクトルの比較

#### [ナノコラム規則配列化の探索]

### (11) Al ナノパターンによる GaN ナノコラム選択成長 10-12)

GaNナノコラムは直径 100nm 程度の微細柱状結晶で、貫通転位を含まないため優れた発光特性を有する。これまでに可視域全域で発光する InGaN/GaN 量子ディスクナノコラム LED の報告してきたが、個々のナノコラム間で発光波長が異なるため、その発光スペクトル半値幅が広くなりやすい傾向があった。ナノコラム LED の発光特性の向上やナノコラムレーザの実現のためにはナノコラムの位置と形状制御が必須である。

n-Si (111) 基板上に電子線露光を用いて周期 300 nm で三角格子状に配列された A1 ナノドットからなる A1 ナノパターンを形成した  $^{10,11)}$ 。 ひとつの A1 ドットは、直径 85nm、膜厚は 20 nm で、図 15 (a) は典型的な A1 ナノパターン SEM 写真である。 これを RF-MBE 装置に基板を搬入し、表面初期窒化を行って A1N を形成した後に、 $941\sim970$  °C で GaN ナノコラムを成長した。図 15 (b)  $\sim$  (d) に成長後のナノコラムの表面 SEM 像を示したが、A1 ナノドットの位置にナノコラムが選択的に成長している様子がわかる。図 15 (d) は、(b) の四角領域の拡大像であり、GaN ナノコラムが A1 ディスク端に沿って成長し、ナノチューブ状となっている。このような明瞭

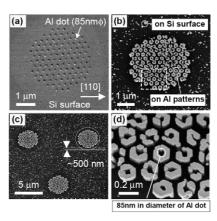


図 15. Al ナノパターン及び GaN ナノコラムの表面 SEM 像. (a): Al ナノパターン、(b)(c): ナノパターン上に成長したGaNナノコラム、(d): (b)の拡大像

な選択性が得られた理由は、高温条件下における GaN 成長核の形成確率がシリコン基板上、A1N上、シリコン/A1N 境界部の順番で高くなっているためであると考えられる。図 16(a)

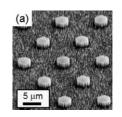
および(b) はそれぞれ GaN を 961℃、966℃で成長した場合の鳥瞰 SEM 像である。成長温度が低い場合(a) にはシリコン表面にも GaN ナノコラムが成長するが、わずかに高温(b) にすることで Si 上の GaN ナノコラム形成を完全に抑制できる <sup>11-12)</sup>。本手法はシリコン基板上へのナノコラムの規則配列や形状制御に有効であると考えられる。

### (12) Ti マスクを用いた GaN ナノコラム選択成長

本研究では集束イオンビーム(FIB)を用いて Ti のナノパターンを形成した GaN テンプレート 基板を用いて、GaN ナノコラムの位置・形状制 御を試みた。GaN テンプレート基板上に Ti 薄膜 (8nm)を堆積後、20μmx20μm の領域に FIB により 周期 400nm で直径 150nm のホールパターンを作 製した。この基板上に RF-MBE 法により 950℃で GaNを2μm成長後、8ペアのInGaN/GaN (2nm/3nm) MQW を成長した。図 17 にナノパターン上に成長 した InGaN/GaN ナノコラムの模式図を示す。 図 18 は FIB 加工を行った領域に成長した GaN ナノ コラムの表面 SEM 像である。正方格子状に直径 300nm のナノコラムが周期 400nm で規則配列し、 形状も均一に制御されて成長しており、Ti マス クは GaN ナノコラム選択成長に有効であること が確認された。規則配列したナノコラムでこれま でに作製した高発光効率の自己形成 InGaN/GaN ナノコラムと遜色の無い強い発光が得られ、規則 配列したナノコラムの結晶性が非常に高い可能 性を示唆する結果が得られた。

#### (13) GaN ナノウォール結晶の成長

Ti マスクを用いた選択成長技術を利用し、ナノコラムとは異なり板状形状を有する新しい GaN 系ナノ結晶(ナノウォール)の成長を提案した。図19に GaN ナノウォールの模式図を示す。実験では、GaN テンプレートを基板として、表面に Ti 薄膜(6



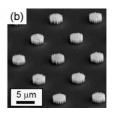


図 16. Al ナノパターンを配置した(111)シリコン基板上に異なる温度で成長した GaNナノコラムの鳥瞰 SEM 像. (a):961 $^{\circ}$ C、(b):966 $^{\circ}$ C

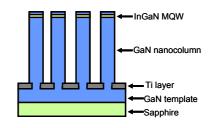


図 17. Ti マスクを用いた GaN テンプレート上 GaN ナノコラムの選択成長の模式図.

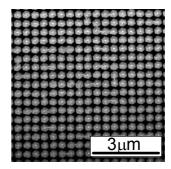


図 18. FIB で周期的にエッチング加 工した Ti コート GaN テンプレート上 に成長した規則配列 GaN ナノコラム の表面 SEM 像.

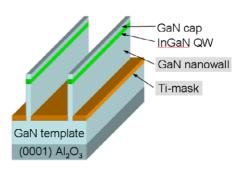


図 19. GaN テンプレート上に Ti マスク 選択成長技術で成長した InGaN/GaN ナ ノウォールの模式図.

~18nm) を堆積した後、電子ビーム描画とドライエッチングにより幅約 200nm、長さ 160μm のストライプ状に Ti を除去して GaN 表面を露出させた。この基板上に RF-MBE 法で基板温度約 850~900℃の窒素過剰条件において GaN を成長し、さらに InGaN量子井戸構造を成長した。図 20 に成長した GaNナノウォール結晶の表面 (a) および鳥瞰 (b) SEM 像を示す。幅約 230nm、高さ約 500nm、長さ 160μm のGaN 板状ナノ結晶が Ti マスクの開口部にのみ成長し、RF-MBE 法による優れた選択成長が確認された。

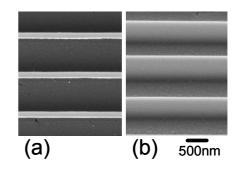


図 20. Ti マスク選択成長技術を用いて、 GaN テンプレート上に成長した GaN ナノウ オールの表面(a)および鳥瞰(b)SEM 像.

GaN テンプレートの[IĪ00]と[I120]方向に沿って形成したナノウォールの側面は基板面に垂直かつ極めて平坦であり、それぞれ(I120)面と(IĪ00)面が形成されていると考えられる。ナノウォールは、Ti マスクの開口形状で自由に形状を制御できるため、リング共振器や分岐構造等自由に形状制御が可能であり、様々な応用が期待される。初期的実験では、放射状ナノウォールの中心部を光励起すると InGaN 活性層からの発光がナノウォールを導波して端部で放射することが確認された。また、ナノウォールには貫通転位の伝播抑制の効果があることも TEM 観察によって確認している。

### 3. 研究実施体制

- (1)「岸野」グループ
  - ①研究分担グループ長:岸野 克巳(上智大学、教授)
  - ②研究項目
    - (a) ナノコラム結晶の高品質化とナノコラム LED の高性能化
    - (b) 集団ナノコラムの光・フォノン・電気物性の評価
    - (c) 多層膜反射鏡(DBR)とナノコラム共振器
    - (d) ナノコラム選択成長法の開拓と規則配列化
    - (e) ナノコラムのランダム物性と光伝搬

#### (2)「川上」グループ

- ①研究分担グループ長:川上 義一(京都大学、教授)
- ②研究項目
  - (a) InGaN/GaN 量子ディスク・単一ナノコラムのマイクロミラーアレイ (MMA) 上への 分散と顕微分光
  - (b) ナノピラー加工 InGaN/GaN 量子井戸の顕微光学特性

### 4. 研究成果の発表等

#### (1) 論文発表(原著論文)

- H. Sekiguchi, T. Nakazato, A. Kikuchi and K. Kishino, "Structural and optical properties of GaN nanocolumns grown on (0001) sapphire substrates by rf-plasma-assisted molecular-beam epitaxy", Journal of Crystal Growth, 300 (2007) pp.259-262.
- H. Sekiguchi, K. Kato, A. Kikuchi and K. Kishino, "Be-doping effect on InGaN nanocolumn LED structures by rf-assisted molecular beam epitaxy", physica status solidi, to be published.
- 3) H. Sekiguchi, K. Kishino and A. Kikuchi, "GaN/AlGaN nanocolumn ultraviolet light-emitting diodes grown on n-(111) Si by RF-plasma-assisted molecular beam epitaxy", Electronics Letters, 44, 2 (2008) pp. 151-152.
- 4) H. Sekiguchi, K. Kato, J. Tanaka, A. Kikuchi and K. Kishino, "Evaluation of ultraviolet GaN-based nanocolumn LEDs", physica status solidi (a), to be published.
- K. Kouyama, M. Inoue, Y. Inose, N. Suzuki, H. Sekiguchi, H. Kunugita, K. Ema, A. Kikuchi, K. Kishino, "Photoluminescence of exciton and biexciton in GaN nanocolumns", Journal of Luminescence, 128, 5, (2008) p.969-971.
- 6) T. Sekine, S. Suzuki, M. Tada, T. Nakazato, A. Kikuchi, and K. Kishino, "Raman Scattering in GaN/AlN Multiple Quantum Disk Nanocolumns" Proceedings of 28th International Conference on the Physics of Semiconductors, 898 (2007) 867-868.
- 7) K. Tanaka, K. Ikuno, Y. Kasai, K. Fukunaga, H. Kunugita, K. Ema, A. Kikuchi, K. Kishino, "Ultrafast intersubband relaxation dynamics at 1.55μm in GaN/AlN multiple quantum disk nanocolumns", Journal of Luminescence, 128, 5 (2008) p.1084-1086.
- J. Kamimura, T. Kouno, S. Ishizawa, A. Kikuchi and K. Kishino, "Growth of high-In-content InAlN nanocolumns on Si (111) by RF-plasma-assisted molecular-beam epitaxy", Journal of Crystal Growth, Vol.300, (2007) pp.160-163.
- 9) K. Kishino, J. Kamimura, A. Kikuchi and P. Holmström "InN/InAIN Multiple Quantum Well Nanocolumns Grown on (111)Si substrates by RF-Plasma Assisted Molecular Beam Epitaxy", State-of-the-Art Program on Composed Semiconductors 46 (SOTAPOCS46) -and- Processes at the Semiconductor/Solution Interface 2, The Electrochemical Society, ecstransactions, 6, 2 (2007) pp.205-210.
- 10) S. Ishizawa, H. Sekiguchi, A. Kikuchi and K. Kishino, "Selective growth of GaN nanocolumns by Al thin layer on substrate", physica stat solidi (b) 244, 6 (2007) pp.1815-1819.
- 11) S. Ishizawa, K. Kishino and A. Kikuchi, "Selective-Area Growth GaN Nanocolumns on Si (111) Substrates Using Nitrided Al Nanopatterns by RF-Plasma-Assisted Molecular-Beam Epitaxy", Applied physics Express, 1, 1 (2008) 015006.

12) S. Ishizawa, A. Kikuchi and K. Kishino, "Selective growth of GaN nanocolumns with pre-deposited Al patterns by rf-plasma-assisted molecular beam epitaxy", physica status solidi (c), to be published.

### (2) 特許出願

平成 19 年度 国内特許出願件数:2 件(CREST 研究期間累積件数:6 件)