

識別番号 P10

2011 年度完了学内共同研究

研究課題 規則配列した半導体ナノコラム結晶の成長とその物性

研究代表者 関根智幸（理工学部機能創造理工学科）

共同研究者 菊池昭彦（理工学部機能創造理工学科）

Summary Crystal growths of semiconductor nanostructures, regularly arrayed GaN nanocolumns, nanowalls, and nanorings, have been established. Possibilities of the application to electrical and optical nanodevices have been shown in this study. Moreover, we have studied physical properties to clarify the electrical transport in the single nanocolumn and the phonon properties, in particular the surface phonons, in the nanostructures. The breakdown of the polarization selection rules in phonon Raman scattering was found in the single nanocolumn.

## 1. 目的

ナノコラム結晶の位置や形状を制御する結晶成長技術を完成させる。更に、多様な形状のナノ構造の結晶成長技術を開拓する。また、これらの基礎物性やデバイスへの応用を研究し、ナノ構造特有の優れた物性を解明することを目的とした。

## 2. 研究成果

### (a) 規則配列 GaN ナノコラム成長技術の確立

(0001)GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> テンプレート基板上に厚さ数 nm の Ti 薄膜を堆積し、ドライエッチング法で周期 400 nm - 4 μm、直径 100 - 550 nm の様々な開口パターンを形成して GaN を露出させた後、基板表面を MBE 装置内で窒化し、続けて GaN ナノコラムを成長すると、基板温度 900°C 近傍の狭い温度領域において極めて良好な GaN ナノ結晶を再現性良く選択成長できる条件を確立した。図 1 は、ナノホールパターン上に開口径を変えて成長した試料の鳥瞰 SEM 像であり、開口のみに GaN ナノコラムが成長している様子がわかる。

### (b) GaN ナノコラムの InGaN 発光層の発光色制御

結晶上部に InGaN 発光層を内在した規則配列 GaN ナノコラムを成長する際に、コラム径や配列周期を変化させることにより、発光色を制御可能であることを見出した。この現象は、隣接するコラムの遮蔽効果によってコラム側面に供給される Ga と In の分子線量が異なることと側面から上部へ移動する際に脱離速度が Ga と In で異なることを考慮したモデルを用いてよく説明できた。

### (c) 多様な形状の GaN ナノ結晶の選択成長

GaN テンプレート上に形成した Ti マスクにナノパターンを形成することにより、多様な形状の GaN ナノ結晶を成長できることを確認した。図 2 は成長したナノ結晶の例であり、(a)六角形リング共振器、(b)ストライプ状ナノウォール、(c)直径約 1 μm のリングアレイ、(d)ナノメッシュ構造等、ナノパターン上に垂直にナノ結晶が成長することから極めて自由

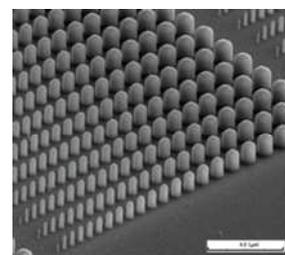


図 1. rf-MBE 法で選択成長した InGaN/ GaN ナノコラムの鳥瞰 SEM 像

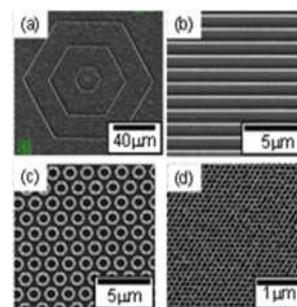


図 2. 様々な形状の GaN ナノウォール (a)六角形リング共振器、(b)ナノウォールアレイ、(c)ナノリング、(d) ナノメッシュ。

度の高いナノ結晶成長技術であることを示した。

#### (d) AlGaIn/GaN ナノウォール FET の作製と評価

AlGaIn/GaN ナノウォールをチャンネル領域に用いる電界効果トランジスタ (FET) 構造を試作し、初期特性を評価した。ゲート電圧によるドレイン電流の制御が観測され、電子デバイスへの応用が可能であることを示した。

#### (e) GaN ナノコラムの電気伝導

GaN ナノコラム結晶は一次元的性質等、新しい電気伝導現象を示す可能性があり、興味深い。我々はフォトリソグラフィを用いた方法より 1 本のナノコラムのオーミック電極の作成に成功し、電気伝導を研究した。高温では不純物による活性化タイプの伝導、低温では Mott 型の variable range hopping 伝導による温度変化や磁気抵抗効果を観測した。更に、図 3 に見られるように、ナノ構造による高電場印加のために発生するなだれ破壊効果の非線形伝導を観測した。

#### (f) 表面フォノンによるラマン散乱

固体と外界 (空気) の境の界面には局在する表面フォノンポラリトンが存在する。ナノ構造では表面フォノンが格子力学や伝導現象に重要な役割を果たす。図 4 に示すように、GaN ナノウォールや規則配列をした GaN ナノコラム、GaN ナノリングにおいても表面フォノンを観測した。GaN ナノウォールに比べて、表面フォノンの幅が広く、低周波数側にテールを引いている。ナノウォールのように板状の結晶を持つ場合には表面フォノンの観測される周波数は誘電関数  $\epsilon(\omega)=-1$  の時の値に決まるのに対し、円柱構造を持った結晶の時には動径方向の波数が量子化された表面フォノンになることが分かった。

#### (g) 1 本の GaN ナノコラムの顕微ラマン散乱

ラマン散乱により、ナノ結晶に現れるナノ構造特有のフォノン物性やラマン効果の光散乱過程を探究した。顕微ラマン散乱の測定系を構築し、1 本の GaN ナノコラムにおける顕微ラマン散乱測定を行った。GaN ナノコラムのコラム半径が試料内の入射波長に対して 2 倍程度になると、バルク結晶のフォノン・ラマンスペクトルの偏光選択則の破れが観測された。

### 3. まとめ

多様な形状の GaN ナノ構造の選択成長が確立され、光や電子デバイスにも応用可能であることを示した。また、GaN ナノコラムの電気伝導特性を解明し、ナノ構造の表面フォノンについてもラマン散乱より明らかにした。更に、GaN ナノコラムの光散乱では、コラムの半径が入射波長と 2 倍程度になるとバルク結晶の選択則も破れることを見出した。

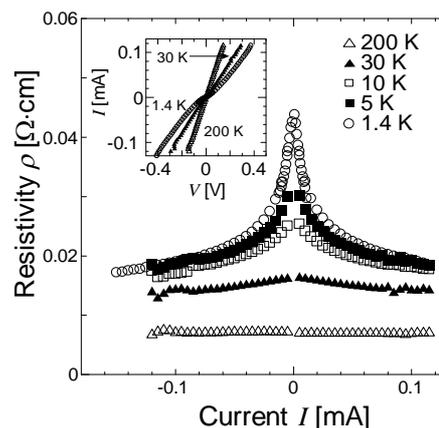


図 3. 1 本の GaN ナノコラム結晶の非線形伝導。

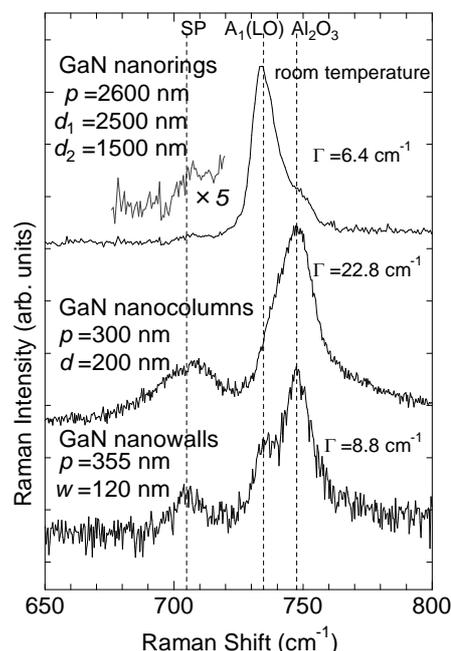


図 4. 規則配列をした GaN ナノコラム、GaN ナノリング、GaN ナノウォールの表面フォノン (SP) からのラマンスペクトル。