

「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

InGa_N/Ga_N ナノコラムの潜在能力の発現にはナノコラム形状の均一化と位置の精密制御が必須である。本年度は、Ga_N ナノコラム選択成長法を用いて、同一基板上においてナノコラム径と周期を系統的に変化させながら、規則配列 InGa_N MQW ナノコラムを作製し、低密度と高密度の光励起下でその発光特性を調べ、さらにナノ結晶効果による新物性現象の発現を探索した。また規則配列ナノコラム発光デバイスの作製を進めるとともに、新たにナノウォールの検討を開始した。

ここではInGa_N ナノコラムからの発光色がコラム径によって変化することを実験的に見出して、その発光色制御の成長メカニズムを明らかにした。この新しい現象は発光色の異なるLEDの同一基板上への集積化への道を拓く。また規則配列LEDを作製し、初期的ながら青色域電流注入発光を得た。さらに、ナノコラム周期構造にもとづく分布帰還(DFB)機構の発現を確認し、ブラック波長における強い光増強効果を観測して、強励起下において最初のナノコラムレーザ発振を得た。波長は471nmの青色域であったが、コラムの周期と径を微調すれば緑色域で同じ効果が得られよう。一方、微小電極(径1.2μm)自己形成ナノコラムLEDでは、青緑色域(波長507nm)での発光スペクトル半値全幅が13nmと非常に狭く、過去の報告値(~33nm)の半分以下であって、微小領域で色純度の高い均一な発光特性を有するナノコラム集団の存在を示唆する結果を得た。

さらに、ナノコラム結晶効果の解明に向けて、コラムの径と位置が制御された単一、集団ナノコラムについて、光物性、フォノン物性、ランダム物性の研究を行った。新物性発現では周期配列Ga_N ナノウォールで入射光とのフォトニック相互作用に基づく第二高調波発生の増強が得られた。人工ランダム配置 Ga_N ナノコラムでは、ランダムレージングが達成され、系統的なランダム物性研究への道が拓かれた。

これらの進展をもとに今後は、窒化物半導体ナノコラム、ナノウォールを用いて、緑色半導体レーザと三原色LEDの基盤技術を確立し、また学術的にナノコラム結晶効果を解明する。

§ 2. 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 克己(上智大学、教授)

② 研究項目

- (a) 規則配列ナノコラムの形状均一化と InGaN 発光層の In 組成揺らぎ制御
- (b) InGaN ナノコラム結晶の高品質化と LED 構造作製プロセスの確立
- (c) 面発光型 InGaN ナノコラムレーザの作製
- (d) InGaN 量子井戸ナノウォール・レーザ構造の探索
- (e) ナノリング構造など、選択成長によるナノコラム新展開
- (f) ナノコラムの光物性、フォノン物性、電気伝導機構、ランダム物性
- (g) ナノウォールによる新物性発現

(2)「川上」グループ

① 研究分担グループ長:川上 養一(京都大学大学院、教授)

② 研究項目

- (a) 顕微分光による単一 InGaN ナノコラム励起子再結合過程の解明
- (b) ナノコラム構造の有限要素法による歪解析
- (c) トップダウン型ナノ構造の作製とその光物性評価.

§ 3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(4-1)に対応する)

[ナノコラム規則配列化と In 組成制御]

(1) InGaN ナノコラムの発光色制御メカニズム¹⁶⁾

H20 年度には、図1にフォトルミネッセンス(PL) 発光写真を示すように、コラム径によって InGaN ナノコラムからの発光色が変化する実験結果が得られ、コラム径(対辺間距離)を137nmから270nmへ増大させるに従って、発光波長は513nmから632nmまで長波長化した¹⁶⁾。コラム径が143nm以下の試料では発光スペクトルがダブルピークとなるが、高光励起下では短波長側の480nm付近の発光が支配的となり、図1のような青色発光が得られた。この現象を活用すると、同一基板の上にコラム径の異なるナノコラム領域を作ることによって発光色が制御でき、三原色 LED のモノリシック集積化などへの応用が期待される。

この実験結果を受けて、本年度は「コラム径による発光色制御」のメカニズムを検討した。ナノコラム内に形成された InGaN 量子井戸(QW)を実験的に調べたところ、InGaN 層はピラミッド状のナノコラム上部を覆うように形成され、半極性面となっていて、また EDX 分析によれば、太いナノコラムでは、大きな In 組成比となることが分かった。そこで、PL ピーク波長から In 組成比を見積もったところ(ボーイングパラメータ:2.6eV)、図2に示すように In 組成比はコラム径の増加とともに0.20から0.32へと単調に増加した¹⁶⁾。

ここではコラム径で In 組成比が制御されるメカニズムを提案する。すなわち、InGaN 成長時、林立する規則配列ナノコラムに一樣に Ga と In 分子ビームが降り注ぐ。コラムトップでは In と Ga がある割合で結晶中に取り込まれるが、同時にコラム側面からは、Ga と In が表面拡散によってコラムトップに流れ込み、この二つの経路による原子供給によって In 組成比が決まる。In はコラム側面からの離脱が大きく拡散長が短く、Ga は長いため、Ga が優先的にコラムトップに流れ込み、その拡散量の大きさが In 組成比を変化させる。ナノコラムを互いに接近させて配置すると、周囲のナノコラムによって分子ビームが遮蔽され、遮蔽効果はコラム径とともに増加し、側面への Ga 供給量が減少する。結果的にコラムトップへの Ga 拡散量が減少し、In 組成比が増加する。このようなモデルで拡散方程式を解き、Ga と In の拡散長(λ_{Ga} , λ_{In})、In 離脱量(P_{des})をフィッティングパラメータとして In 組成比のコラム径依存性を計算すると、図 2(a)の実線が得られ、実験結果がよく説明できることが分かった¹⁶⁾。このモデルが正しければナノコラム周期の増大に伴って短波シフトが起こるはずであるが、実験的に異なるサンプル(コラム径 210nm)では、周期の 400nm から 1000nm への増大とともに、発光波長が 508nm から 480nm へ短波シフトし、図 2(b)のように計算曲線とのよいフィッティングが得られた。

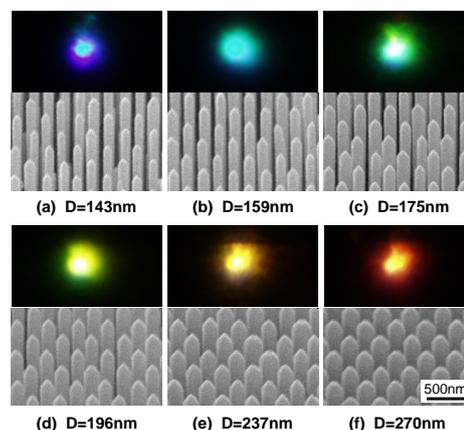


図1 コラム径による発光色制御

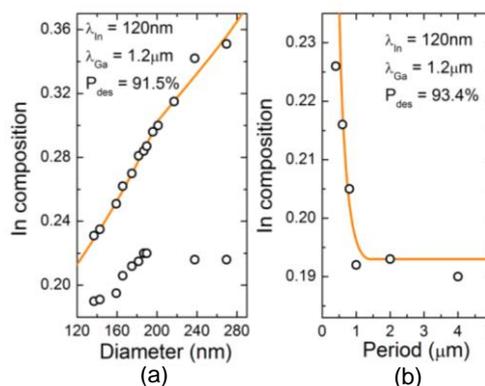


図2 PL 発光波長から見積もった In 組成比のコラム径依存性(a)とコラム周期依存性(b)、実線はナノコラムによるビーム遮蔽効果を考慮した計算値

[自己形成ナノコラム LED 高性能化]

(2) 微小電極を用いた InGaN/GaN ナノコラム LED¹⁹⁾

自己形成ナノコラム LED では、自己形成プロセスに伴う面内ばらつきのため⁵⁾、ナノコラム本来の特性がマスクされ、発光スペクトルはブロードで多色発光となることが多い。そこで本年度は数 μm 以下までの微小電極 LED をつくり、LED 特性を評価した。ここでは p-GaN 層表面に厚さ $50\ \mu\text{m}$ の金をメッキした後に Si 基板を除去し、露出した n-GaN ナノコラム間に SOG を充填して、直径 $1.2\ \mu\text{m}$ の微小開口を開け、ITO 透明電極を形成した。図3は顕微分光で評価した電流注入時の発光特性で開口部からは青緑色の単一発光スポットが観測され、発光ピーク波長は 507nm で、発光半値全幅 (FWHM) 13nm の非常に狭い単峰性の発光スペクトルが得られた。順方向電圧を 3.0V から 4.0V に増加させるとともに光ピーク強度は線形的に増加した¹⁹⁾。

図4は FWHM の波長依存性で、ここでは c 面、半極性面、m面上の InGaN-LED の文献値と微小電極ナノコラム LED の FWHM を比較した。これを見るとナノコラム LED の発光半値全幅は非常に狭い。これは微小電極内に均一に揃ったナノコラム集団が存在し、色純度の非常に高い発光特性が得られたことを示唆している。

(3) 規則配列ナノコラム LED の試作

Ti マスク選択成長法を用いて、MOCVD-GaN テンプレート上に高さ 840nm の n-GaN ナノコラムを成長し、続けて InGaN/GaN 量子井戸を 3 ペア形成した後、MBE 装置からサンプルを取り出し、SEM で形状を観察した後、p-GaN(500nm)を再成長した。n-GaN のナノコラム直径は 250nm であった。この試料の全面をスピノングラス(SOG)で被覆し、ナノコラム LED の p 層上部と n 電極部の SOG を除去し、p 及び n 電極を形成した。p 側には直径 $80\ \mu\text{m}$ の ITO 透明円電極を用いた。室温において直流駆動した際の発光写真とスペクトルを図5および6に示した。ピーク波長 479nm 、半値幅 29nm の単峰性青色発光が得られた。円形発光領域の直径は $50\ \mu\text{m}$ であった。

初期的な結果ではあるが、規則配列したナノコラム結晶への電流注入プロセスが開発されたこ

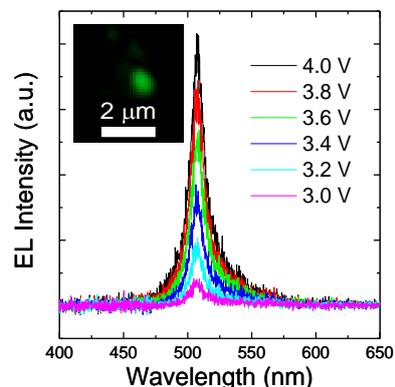


図3 微小電極ナノコラム LED の発光スペクトル

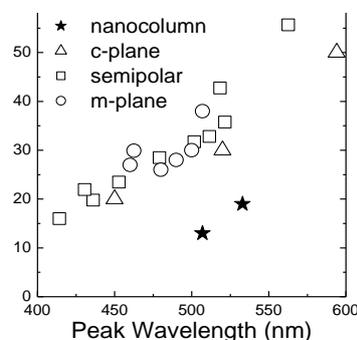


図4 InGaN-LED の発光半値全幅の発光波長依存性



図5 規則配列 InGaN/GaN ナノコラムの発光像

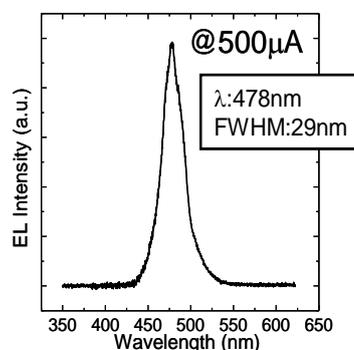


図6 規則配列 InGaN/GaN ナノコラムの発光スペクトル

とから、ナノコラムを用いた新しい発光デバイスの検証実験に向けて、研究の加速が期待される。

[ナノコラム共振器とナノレーザ構造の形成]

(4) 周期構造 InGaN ナノコラムの光励起誘導放出

ナノ構造に光を閉じ込めると高 Q 値共振器得られる。H21 年度は、周期配列ナノリングをつくり、ウィスパーリングギャラリーモード(Whispering gallery: WGM)モードを観測した^{1,4)}。WGM モードを活用すれば消費電力の小さな低しきい値半導体レーザが実現される可能性が高い。

一方、規則配列 GaN ナノコラムでは、周期構造によって二次元的に光回折が生じ、ある特定波長(ブラッグ波長)で強い二次元光閉じ込め作用が発現する。コラム周期を L 、コラム系の等価屈折率を n_{eq} 、回折次数を s とすると、一次元方向の回折条件は、

$$\lambda_s = 2n_{eq}L/s \quad (1)$$

与えられる。

2次回折におけるブラッグ波長は $n_{eq}L$ となる。青～緑色域のおおよその等価屈折率は、 $n_{eq} \approx 2$ で、コラム周期の約 2 倍の波長で、光は周期構造と強く相互作用し、分布帰還(DBF))によって光強度が増強される。図7(a)のナノコラムのトップ領域には InGaN/GaN 多重量子井戸(MQW:8QW)が内在化され、格子定数 $L_h = 230\text{nm}$ 、 $L_v = 245\text{nm}$ の長方形格子状にナノコラムが配列されている。平均した格子定数は 237.5nm なので、2次光回折のブラッグ波長は 475nm である。図7(b)のフォトルミネッセンス(PL)スペクトルをみると、InGaN/GaN-MQW の発光スペクトル(ピーク波長: 526.8nm)の短波長側の裾でシャープな光強度増強がみられ、波長 471.4nm で単峰性スペクトルが観測された³⁾。これは 2 次光回折による現象と考えられる。青色の一点鎖線は、2D-FDTD で計算した規則配列ナノコラムの光応答スペクトルで、白色光で励振したとき、光局在効果のために波長 465.2nm の光が選択的に構造内に強く閉じ込められる³⁾。

このナノコラムサンプルを、波長 355nm の Nd: YAG レーザ(パルス幅: 5ns 、繰り返し: 20Hz)で高励起したところ、波長 471nm で2D-DFBによる誘導放出現象が観測された。図8に光強度と励起光密度との関係を示した。非線形に光強度が立ち上がることを、しきい値励起密度と定義すると、 320kW/cm^2 が得られた。単一励起パルスに対する発光スペクトルには、半値幅が 2meV の先鋭なスペクトルが含まれ、青色域ナノレーザのレーザ発振を示唆する発振特性が得られた³⁾。

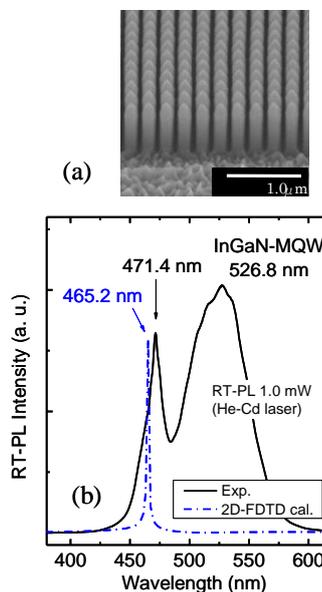


図7 (a)長方形格子アレイ InGaN ナノコラムと (b)PL 発光スペクトルと2D-FDTD 光応答スペクトル

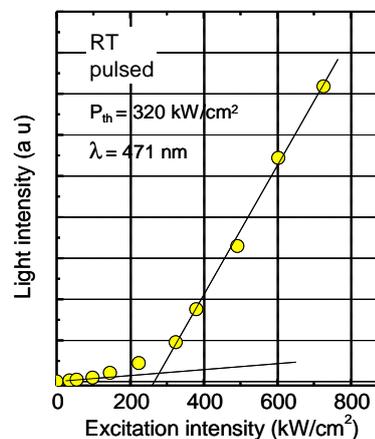


図8 光ピーク強度と光励起密度

[ナノコラム結晶効果の解明]

(5) 規則配列 InGaN/GaN ナノコラムからの発光顕微分光

サファイア(0001)基板上的の GaN テンプレートに、分子線エピタキシーによる Ti マスク選択成長法で InGaN/GaN ナノコラムを成長させた。周期 $3\mu\text{m}$ として開けられた径 100、150、200、250nm の Ti ナノホールをマスクとして、コラムの位置と径を制御した。約 $1.5\mu\text{m}$ の GaN ナノコラム上部に InGaN 単一量子井戸(設計:3nm)を作りこんだ。Ti:サファイアレーザ(波長 400nm)で InGaN 量子井戸を選択励起し、顕微分光法で低温(10K)フォトルミネッセンス(PL)発光を調べた。顕微分光の分解能($<1\mu\text{m}$)はコラムの間隔($3\mu\text{m}$)より小さいので、単一ナノコラムの PL 特性が得られる。これを見ると、図9(a)のように単一ナノコラムから複数の4本のピーク(P1~P4)が観察された。図9(b)はこれらのピークの偏光特性で、P1 から P3 の偏光度 $[(I_{\text{max}}-I_{\text{min}})/(I_{\text{max}}+I_{\text{min}})]$ は、それぞれ 98%, 91%, 84%, P4の偏光度は36%であった。昨年度に得られた自己形成ナノコラムの偏光度は30~60%であり⁶⁾、選択成長ナノコラムにはより強く直線偏光した発光成分が混在することが示唆された。この原因の同定は今後の課題であるが、選択成長による形状の均一化に伴い、例えば、コラム先端のファセット構造が偏光特性に強く反映されるようになった可能性があると考えている。

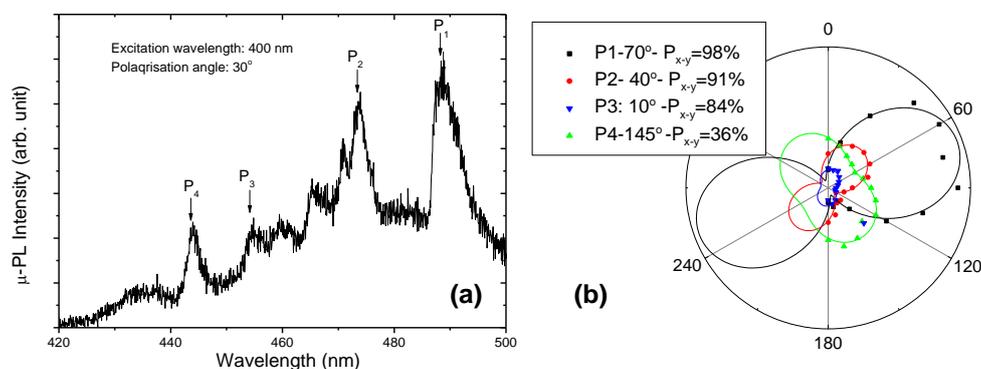


図9 (a)単一の選択成長ナノコラムの 10 K での顕微 PL スペクトル、
(b)P1 から P4 の各ピークの偏光特性

(6) ナノコラムにおける歪の解析¹⁵⁾

ナノコラムによる InGaN 量子井戸層の歪低減効果は、実験的に予測されていたが、有限要素法(FED)による歪解析を行った。ここでは GaN ナノコラム内に作りつけられた膜厚 3nm、In 組成 25%の InGaN 量子井戸構造の面内歪のコラム径依存性を計算し図10に示した。コラム径は 50、100、200、500 nm と変化させた。コラム径に係わらず面内歪は、中央よりもコラムの端(side wall)で小さく、ナノコラムの構造効果を示している。また、コラム径が 200nm 以下の領域で、とくに 150nm 付近から径が小さくなるとともに急速に歪みの開放が進む。すなわち、コラム径 150nm 付近以下の細いナノコラムで、ナノコラム効果が顕著に発現されることが示唆された。

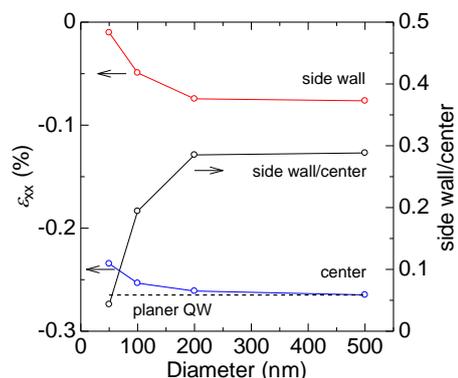


図10 In 組成 25%、ナノピラー直径 50、100、200、500 nm 時の歪みの変化

(7) InGaN-MQW 構造のナノ加工による歪制御^{15, 17)}

ドライエッチングによって InGaN/GaN-MQW 構造にナノ加工を施し量子井戸の歪緩和効果を系統的に検討した。発光波長 510nm の平坦膜量子井戸を深さ 570nm だけエッチングして、図11のように3種類のトップダウン・ナノ構造(ナノストライプ、ナノホール、ナノピラー)を形成した。ナノピラーではピラー径を 50nm から 300nm まで変化させた。これらの構造の光学特性を評価し、歪緩和効果を調べた¹⁷⁾。図12には、このトップダウン・ナノピラー構造の PL 発光スペクトルのピラー径依存性を示した。ピラー径を 130nm まで細くするとともに発光波長は短波長側にシフトし、130nm でブルーシフトは最大値 51nm となった。しかし、それ以上にピラー径を小さくしてもピーク波長は変化しなかった。一方、PL 積分強度の温度変化から見積もった内部量子効率、平坦膜の34%に比べてナノピラー構造では 60%まで増加し、発光再結合時間も 20ns から 4.2ns まで短くなった。これらの現象は、ポストエッチングによって量子井戸内の格子歪が軽減され、ピエゾ効果にもとづく振動子強度低下が改善された¹⁵⁾と考えられ、前項の歪解析と符合する結果である。

また、PL 減衰緩和時間のピラー径依存性から表面再結合速度 $5.8 \times 10^2 \text{ cm/s}$ が見積もられ、エッチングナノ側面は非発光再結合が少なく、光学的に非活性な面となっていることが示唆された。

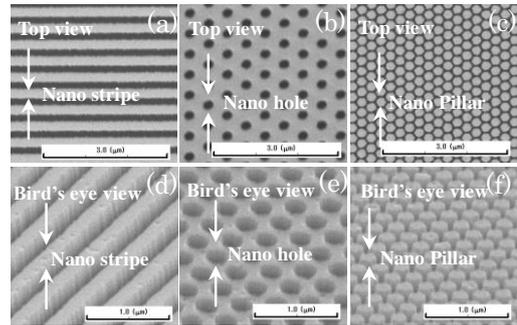


図11 ドライエッチングで作製したナノストライプ (L=400nm,W=210nm), ナノホール (L=500nm,Φ=200nm),ナノピラー(L=250nm,Φ=200nm)の SEM 写真

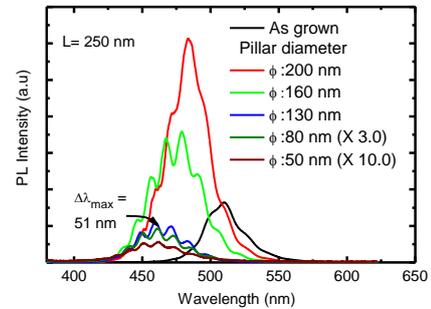


図12 トップダウン・ナノピラー構造の PL 発光スペクトルのピラー径依存性

(8) InN 新物性現象^{2, 10-12)}

InN 薄膜および InN ナノコラムの光励起キャリア緩和の解明を進めた。ナノコラムの検討に先立って、本年度は InN 薄膜の緩和特性に着目し、吸収端以上のエネルギーに対して、ポンプ・プローブ法によって過渡透過特性を測定した。InN 薄膜の過渡透過信号にはフォノン散乱による速い成分(数 100 フェムト秒)とキャリア再結合の遅い成分(数 100 ピコ秒～ナノ秒)が存在するが、プローブ光子エネルギーによってその振る舞いが大きく異なる。ここでは適当な条件では遅い成分が消失することを明らかにした²⁾。

図13は残留キャリア濃度 $1.4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の InN 薄膜の室温測定結果の一例である。縦軸は透過光の増加分、吸収飽和には速い成分と遅い成分が見られる。プローブ光子エネルギーの大きさによって、遅い緩和成分が正側に現れる場合(赤色:0.827eV)と負側に現れる場合(青色:0.918eV)がある。前者は、フェルミ端上昇による吸収飽和効果、後者はバンドギャップ再規格化による誘導吸収効果である。プローブ光子エネルギーが0.886 eVでは、これらの効果が打ち消しあって(緑色)、遅い緩和成分

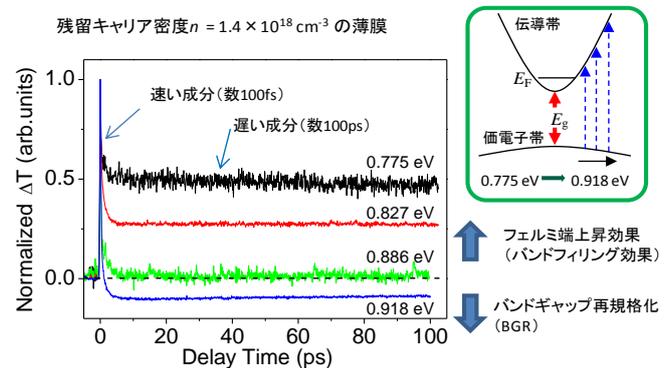


図13 InN 薄膜のポンプ・プローブ信号

が消失する。この現象は InN のような縮退半導体固有の効果と考えられる。このことから速い成分だけが残る波長域を使えば、キャリア再結合時間に邪魔されずにピコ秒以下の応答が可能になり、超高速のスイッチングデバイスへの応用が期待される。

本年度で薄膜の緩和特性が解明されたので、H22年度は InN ナノコラム緩和特性を調べる。

(9) GaN ナノウォールによる新物性の発現¹⁴⁾

周期配列ナノウォールの上面から角度 θ で基本波を入射させ(図14)、基本波とSHGを1次元フォトニックモードに合致させると第2高調波発生(SHG)の増強が期待される。図15はナノウォールのフォトニックモードの分散曲線で、青が基本波のs偏光、赤がSHGのp偏光に対するモードである。緑の直線は $\theta = 23.4^\circ$ に対する真空の分散直線で、フォトニックモードとの交差点でSHG増強効果があり、2.92 eV でSHGだけの共鳴(NR-R共鳴)、2.79 eVでは基本波とSHGの二重共鳴(R-R共鳴)が起きる。図の右は測定されたSHG強度スペクトルで、二つの共鳴点で増大がみられ、二重共鳴点では非共鳴点に比べ約52倍の増強が確認された。数値計算により期待されるSHG増強度に比べると観測された値は小さいものの規則配列ナノウォールには、SHGの増強効果があることが示された¹⁴⁾。

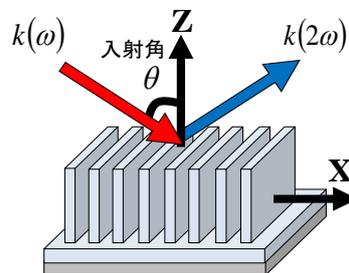


図14 規則配列ナノウォールを用いた反射型SHG増強の測定配置

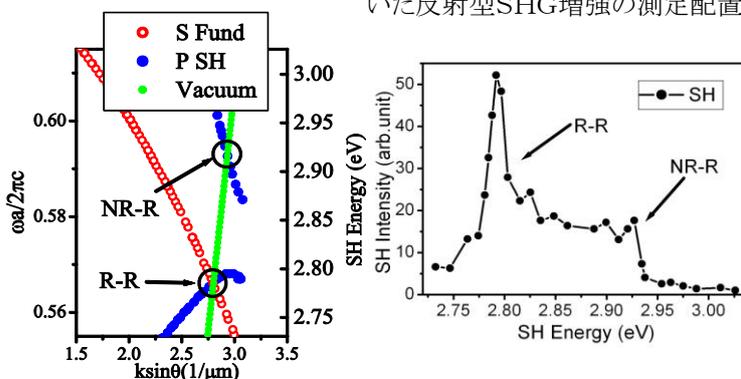


図15 フォトニックモードの分散曲線(左)と観測されたSHG強度スペクトル(右)

(10)フォノン物性と伝導特性

ラマン散乱より GaN ナノウォール、三角格子・規則配列ナノコラム結晶の表面フォノン調べた。図16に示すようにナノウォール結晶では 708 cm^{-1} に表面フォノンのピークが観測された。これは GaN バルクの誘電関数 $\epsilon(\omega) = -1$ から求められる表面フォノンの周波数 706 cm^{-1} に近い。この表面フォノンは、三角格子・規則配列ナノコラム結晶では二つに分裂した。

一方、フォトリソグラフィを用いて1本の GaN ナノコラム結晶に電極を取り付け、初めて電気伝導の測定に成功した。アンドープ試料の比抵抗は、室温で $1 \times 10^2 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ でバルク試料の値に近いことが分かった。活性型の温度変化から不純物準位は約 51 meV と見積もられた。

(11) 人工ランダム配置 GaN ナノコラムにおけるランダムレージング

光の散乱体がランダムに分布したランダム系では、光のアンダーソン局在などの局在現象が生じ¹³⁾、利得を有する場合、局在光が増幅されランダムレージングが生じる。昨年度に報告したように、自己形成 GaN ナノコラムで GaN として初めてランダムレージングに成功した。ランダムレージング発生は、ナノコラム充填率に依存し、シミュレーションによって光局在の強さとランダムレージ

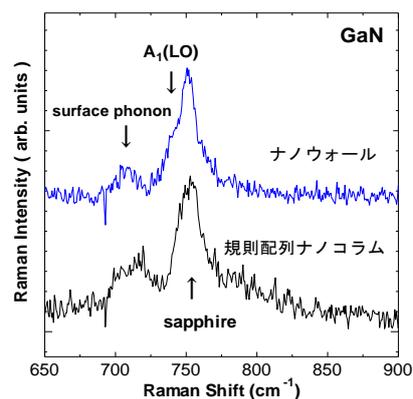


図16 ラマンスペクトル

グ発生に強い相関があることを示した。しかし、自己形成ナノコラムでは、コラムの径と密度の自在な制御ができないため、ランダム系の光局在研究には限界があった。

本年度は、選択成長法を用いて人工ランダム配置された GaN ナノコラムを成長し、コラム径や充填率を制御しながら光局在を調べる新しい研究手法を提案した。図 17 にナノコラムを $6\ \mu\text{m}$ 角の正方形領域に配置したときの人工ランダム配置 GaN ナノコラムの設計パターンと SEM 写真を示す。隣り同士で結合してしまったコラムがあるものの (図 17(b))、ほぼ設計通りの配置でナノコラムが得られた。 $6\ \mu\text{m}$ 角、 $10\ \mu\text{m}$ 角、 $20\ \mu\text{m}$ 角の領域サイズの異なる人工ランダム配置 GaN ナノコラムに対して、図 18 のように光励起ランダムレーザ発振スペクトルを調べた。領域サイズが小さくなるほど発振ピークの数が増えた。ランダムレーザ発振は、領域内に形成された複数の微小共振器からの発振の重ね合わせで、領域サイズの微小化とともに発振ピークの数が増えると予想されたが、これまでに実験的に示した報告例は無く、それを初めて実証した。

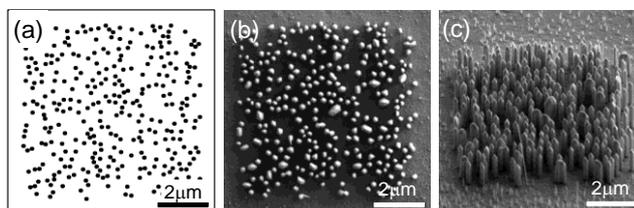


図 17 人工ランダム配置 GaN ナノコラムの(a)設計パターン、(b)正面 SEM 像、(c)鳥瞰 SEM 像

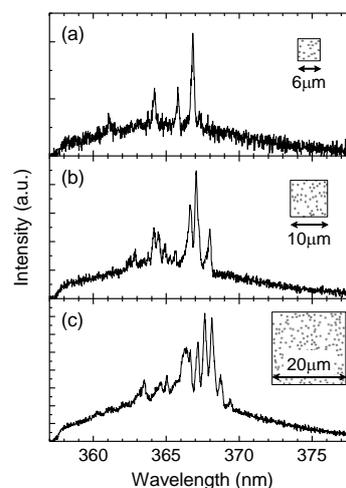


図 18 領域サイズが(a) $6\ \mu\text{m}$ 角、(b) $10\ \mu\text{m}$ 角、(c) $20\ \mu\text{m}$ 角、の時の発振スペクトル

§ 4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

● 論文詳細情報

1. T. Kouno, K. Kishino, and Akihiko Kikuchi, "Whispering gallery mode in periodic InGaN-based hexagonal nanoring arrays grown by rf-MBE using Ti-mask selective-area growth", *phys. stat. sol. (a)* **207** (2010) pp. 37-40, 10.1002/pssa.200982639.
2. Y. Kawakami, A. Kaneta, L. Su, Y. Zhu, K. Okamoto, M. Funato, A. Kikuchi, and K. Kishino, "Optical properties of InGaN/GaN nanopillars fabricated by postgrowth chemically assisted ion beam etching", *J. Appl. Phys.* **107**, 023522 (2010), 10.1063/1.3280032.
3. K. Fukunaga, M. Hashimoto, H. Kunugita, J. Kamimura, A. Kikuchi, K. Kishino and K. Ema, "Energy- and desity-dependent dynamics of photoexcited carriers in InN films", *Appl. Phys. Lett.* **95** (2009) 232114, 10.1063/1.3272916.
4. T. Kouno, K. Kishino, K. Yamano and A. Kikuchi, "Two-dimensional light confinement in

- periodic InGaN/GaN nanocolumn arrays and optically pumped blue stimulated emission", *Optics Express* **17** (2009) pp. 20440-20447.
5. T. Kouno, K. Kishino, H. Sekiguchi, and A. Kikuchi, "Ti-mask selective-area growth of GaN nanorings by RF-plasma molecular beam epitaxy", *phys. stat. sol. (c)* **6** (2009) pp. S607-S610, 10.1002/pssc.200880988.
 6. K. Kato, K. Kishino, H. Sekiguchi and A. Kikuchi, "Overgrowth of GaN on Be-doped coalesced GaN nanocolumn layer by rf-plasma-assisted molecular-beam epitaxy-Formation of high-quality GaN microcolumns", *J. Cryst. Growth* **311** (2009) pp. 2956-2961, 10.1016/j.jcrysgro.2009.01.057.
 7. R. Bardoux, A. Kaneta, M. Funato, Y. Kawakami, A. Kikuchi, and K. Kishino, "Positive binding energy of a biexciton confined in a localization center formed in a single In_xGa_{1-x}N/GaN quantum disk", *Phys. Rev.* **B79** (2009) 155307, 10.1103/PhysRevB.79.155307.
 8. K. Slevin, T. Ohtsuki, "Critical exponent for the quantum Hall transition", *Phys. Rev.* **B80** (2009) 041304 (R) 1-4.
 9. K. Kobayashi, T. Ohtsuki, K. Slevin, "Point-Contact Conductance in Asymmetric Chalker-Coddington Network Model", *J. Phys. Soc. Jpn.* **78** (2009) 084708 1-4.
 10. K. Kobayashi, K. Hirose, H. Obuse, T. Ohtsuki, K. Slevin, "Transport properties in network models with perfectly conducting channels", *J. Phys.: Conference Series* **150** (2009) 022041 1-4.
 11. K. Fukunaga, K. Kouyama, M. Hashimoto, J. Kamimura, H. Kunugita, K. Ema, A. Kikuchi and K. Kishino, "Evaluation of bandgap energy and carrier density of InN nanocolumns," *J. Lumi.* **129** (2009) pp. 1735-1738.
 12. M. Hashimoto, K. Fukunaga, K. Kouyama, J. Kamimura, H. Kunugita, K. Ema, A. Kikuchi and K. Kishino, "Photo-excited carrier relaxation dynamics in InN films," *J. Phys.: Conf. Ser.* **193** (2009) 012053.
 13. M. Hashimoto, J. Kamimura, H. Kunugita, K. Ema, A. Kikuchi and K. Kishino, "Optical properties of In_xAl_{1-x}N film and nanocolumns," *J. Phys.: Conf. Ser.* **193** (2009) 012054.
 14. Y. Inose, T. Ohtsuki, H. Kunugita, K. Ema, M. Sakai, A. Kikuchi and K. Kishino, "Anderson localization of light in a random configuration of nanocolumns," *J. Phys.: Conf. Ser.* **193** (2009) 012055.
 15. T. Soya, Y. Inose, H. Kunugita, K. Ema, K. Yamano, A. Kikuchi and K. Kishino, "Second harmonic generation from photonic structured GaN nanowalls," *J. Phys.: Conf. Ser.* **193** (2009) 012056.
 16. H. Sekiguchi, K. Kishino, and A. Kikuchi, "Emission color control from blue to red with nanocolumn diameter of InGaN/GaN nanocolumn arrays grown on same substrate", *Appl. Phys.*

Lett. (in press).

17. R. Vadivelu, A. Kikuchi, K. Kishino, M. Funato, and Y. Kawakami, “Strain relaxation effect by nanotexturing InGaN/GaN multiple quantum well”, J. Appl. Phys. (in press).
18. T. Kouno, K. Kishino, M. Sakai, Y. Inose, A. Kikuchi and K. Ema, “Observation of two-dimensional distributed feedback (2D-DFB) laser action in triangular GaN nanocolumn arrays”, Electron. Lett. (in press).

(4-2) 特許出願

CREST 研究期間累積件数(国内 6 件)