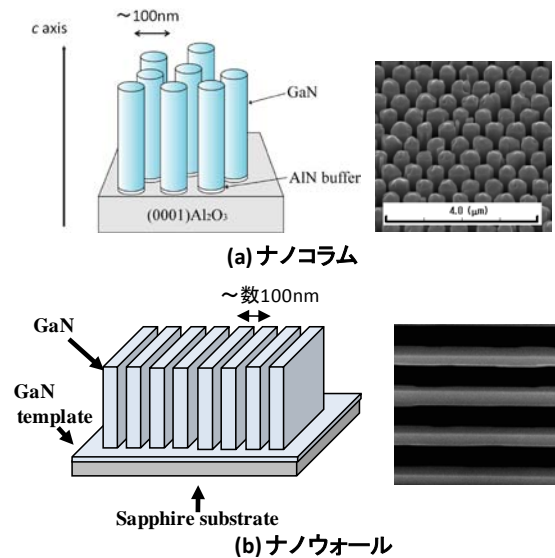


窒化物半導体ナノ構造の動的電子相関とダイナミクス

江馬 一弘 (上智大学理工学部)

1. 研究目的

本研究では、窒化物半導体 GaN と InN のナノ構造における動的電子相関効果とダイナミクスに着目する。ここで言うナノ構造とは、図に示すようなナノコラム、ナノウォールなどの特徴的な構造であり、サイズは 100 nm~1 μm 程度である。すなわち、電子が量子閉じこめ効果を受けるほど小さいナノサイズではなく、キャリアの動的特性が制限されるようなサイズである。このような中間的サイズ、および、特徴的な形状に起因する動的電子相関効果を明らかにし、それがもたらす特異な光現象・光機能を引き出すことを目的とする。また、このようなナノ構造体が多数配列したときのマクロな光学応答にも注目する。ナノ構造体の配列と言え、規則配列（フォトニック構造）の研究が盛んであるが、ここではフォトニック構造に限らずランダム配列した集合体についても研究を進める。



2. GaN と InN

窒化物半導体では三元混晶である $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ の研究が活発であるが、三元混晶では In 組成ゆらぎや欠陥・転位の増大などにより、ナノ構造独自の効果を見極めるのが難しい。本研究では、ナノ構造による効果を確実に抽出したいために、良質な結晶が得られる GaN を用いる。我々の GaN ナノコラム・ナノウォールは、無転位と無歪みであることがわかっているため、本質的な特性を確実に抽出し、特徴的な形状が及ぼすナノ構造の光物理を解明できる。InN ナノコラムでは、残留キャリアと光励起されたキャリアの相互作用についての理解を深めるとともに、通信波長帯に吸収端があることを生かし、強い動的電子相関に起因する非線形効果を利用した超高速光スイッチングの応用も検討する。

3. GaN ナノコラムに関してのこれまでの研究と研究計画

平均コラム径の異なる試料の系統的な測定と数値計算より、以下のことが判明している。

- GaN ナノコラム中の励起子ポラリトンは、コラムという特徴的な形状の効果が光学特性に影響を与えている[1]。ナノコラムが良く光るのは、側面からのポラリトン発光が顕著になるからである。
- ナノコラム中の励起子束縛エネルギーはバルクと同じだが、励起子分子の束縛エネルギーはバルクに比べて大きい[2]。
- 電子正孔プラズマ (EHP) 状態でのバンドギャップ再規格化の程度がバルクに比べて大きい。

今後は、コラム径を制御した試料に対して顕微分光を行い、集団平均でのバラツキを抑え、形状効果のより精密な理解を得る。

4. GaN ナノウォールに関するこれまでの研究と研究計画

GaN ナノウォールを規則的に配列させると、1次元のフォトニック構造ができる。このフォトニック効果を利用して、反射型の第2高調波発生 (SHG) の増強を試みた。ナノウォールの上面から角度をつけて入射光を照射したとき、入射光と SHG 光の両方がフォトニックバンドに合致すると反射光に含まれる SHG 強度が数 10 倍に増強された。この増強度は理論的に期待される値よりは小さいが、本研究で扱うナノウォールもフォトニック効果を生じることがわかった。今後は、SHG 増強だけでなく、フォトニック効果を利用したレーザー発振などにも進展させる予定である。

5. InN に関するこれまでの研究と研究計画

InN は、意図的にキャリアドーピングしない状況においても高い残留キャリア濃度 ($10^{18} \sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) を有する。そのため、多体効果であるバンドギャップ再規格化や吸収端が高エネルギー側にずれる Burstein-Moss シフトが、光励起しない状況でも存在する。本研究では、光励起キャリアの緩和過程を詳細に調べて、以下のことが判明した。

- ・ 緩和過程は二つの成分が存在するが、適当な条件のもとで遅い成分を消すことができる。それは、バンドフィリング効果とバンドギャップ再規格化効果の打ち消し合いである [3]。この条件は残留キャリア濃度と励起波長で決定されるので、通信波長帯に最適化することで、超高速のスイッチングデバイスへ発展する可能性を持っている。

以上のことは、InN 薄膜での結果である。本研究では、ナノ構造の特徴を知るのが目的ではあるが、InN に関しては、バルクや薄膜での物性も完全に解明されていないため、まず、薄膜での詳細な研究を行い、その後 InN ナノコラム [4] の研究に進む予定である。

6. ランダム配列ナノコラムでのランダムレージングに関する研究

コラム径数 100nm のナノコラムは可視光領域に対してミー散乱共鳴を起こす。したがって、ランダムに配列したナノコラムでは、光のアンダーソン局在が起き、ランダムレーザーとして発振する可能性がある。実際にいくつかの試料で強く光励起すると、ランダムレージングが観測された。ランダム配置の詳細な数値計算を行い、光局在の解析を行った結果、充填率の高い試料における光局在は、フォトニック効果の助けを借りていることが判明した。今後は、フォトニック構造とランダム配置の中間状態 (現実の系は必ずこうなるので) の詳細な研究を行い、ナノ構造が多数配列したときのマクロな光学応答の理解を深めていく。

[1] K. Kouyama, *et al.*, *J. Lumin.*, **128**, 969 (2008)

[2] K. Kouyama, *et al.*, *Phys. Stat. Sol. (c)* **6**, 141-143 (2009)

[3] K. Fukunaga, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* in press (2009).

[4] K. Fukunaga, *et al.*, *J. Lumin.*, **129**, 1735 (2009).