

# 光学顕微鏡とCCDカメラを用いた励起されたInGaN/GaN半導体の観察

コース 基盤科学コース  
学籍番号 100428  
氏名 堤 俊章  
指導教員 ミケレット・ルジェエロ

In the effort of studying the fundamental process of InGaN blinking phenomena, we analyzed the photo-luminescence of a custom-build single quantum well device obtained from a collaboration with Kyoto University. The sample luminescence was measured with a CCD camera and a video recorded for more than one hour continuously. The blinking phenomena and optical memory effect were observed and their variation analyzed. We determined for the first time an experimental relation between the optical memory effect and the blinking. An original phenomenological model was developed.

## 1. 背景・概要

近年、InGaNとGaNはワイドギャップ半導体として、青色発光ダイオードなど様々なものに利用されている。しかし、InGaN/GaN半導体の物性には明らかでない部分が多い。それは、構造欠陥が原因とされる現象が深く解明されていないからである。これらには、試料表面の蛍光測定において、数μm程度の領域で、光の強度が変化する不安定点滅現象や、励起光を照射した半導体試料が光をため込む、光メモリ効果がある。今まで、不安定点滅現象と光メモリ効果は別々の現象として研究されていた。

本研究では、光学顕微鏡とCCDカメラを用いて、励起光を照射されているInGaN/GaN半導体表面の、不安定点滅現象と光メモリ効果の様子を、1時間の録画、観察を行った。その結果、数十分単位での、輝点が増加する現象を発見した。このことにより、複数の不安定点滅点どうしや、不安定点滅と光メモリ効果に関係性があることがわかった。この結果によって考えられる、量子井戸のモデルを提案する。

## 2. 実験方法

本研究では、540nmを発光中心とする、(0001)方向に成長させた単一量子井戸構造のInGaN/GaN試料を用いた。今回は、図2のような選択励起光学顕微鏡で観察を行った。ランプの光は、励起波長(365nm)のみが干渉フィルターを通過し、InGaN/GaN試料に当たる。そして、試料の蛍光測定(PL)による光のみがローパスフィルター(510nm~)を通過し、CCDカメラで録画される。このような装置を用いて、1日暗室に放置した試料に1時間のあいだ励起光を照射し、試料表面のPLの様子を観察した(図1)。

## 3. 結果

観測結果から、InGaN/GaN試料の巨視的なメカニズムは次のようなループ構造になることが分かった(図3)。まず、励起光を試料に照射することで、いくつかの輝点が出現する。次に、光強度の小さな輝点が不安定点滅をしながら光強度を増すこと、光強度が強すぎた輝点は徐々に弱くなって安定すること、そして光強度の小さな輝点が新たに生まれることがループする。輝点の数が最大になったところでループから抜け、その状態で安定する。

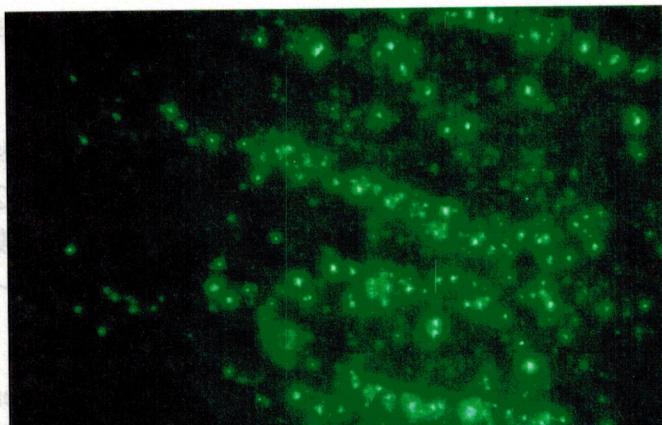


図1 PL測定中のInGaN/GaN試料の表面

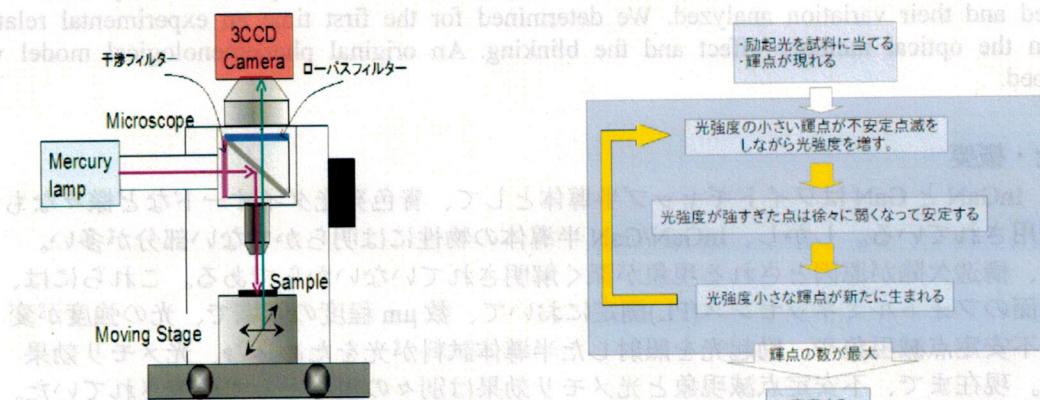


図2 選択励起蛍光顕微鏡

図3 励起光を照射しているInGaN/GaN試料の発光のメカニズム

#### 4. 考察

結果から、この現象の量子井戸のメカニズムを提案をする。まず、InGaN/GaN試料表面に励起光が照射されることにより、キャリアが生成される。キャリアは、発光準位には捕まらず、多量の構造欠陥によって作られた深い準位に捕まる。ここで、キャリアが深い準位に捕まる速さに比べ、非発光再結合をする速さが遅い(非発光再結合寿命が長い)とすると、徐々に深い準位に捕まっているキャリアの数が増えていく。このことから、深い準位に捕まることのできるキャリアの数と欠陥量は相関があると考えられる。そして、深い準位に入っているキャリアの数が最大になったところで、あふれるようにInGaNの発光準位に流れ込み、試料表面に輝点が出現する。それぞれ輝点の出現する時間が一定でないことは、結晶構造の不均一性により、それぞれ輝点周辺の欠陥構造が異なり、深い準位に捕まるキャリアの数、深い準位に捕まる速度、または非発光再結合をする速度が変化するためであると考えられる。

ただし、輝点の発光強度はある時間に急激に上昇するわけではなく、徐々に光の強度を増していく。このため、深い準位に捕まっているキャリアの数が増えるにつれて、キャリアが発光準位に入りこむ確率は上がっていくと考えられる。

また、同様の考え方で光メモリ効果についても説明できる。深い準位に入ることができるキャリアの数と、欠陥の量には相関があると考えると、GaAsやGaPに比べ、InGaNは1万～10万倍の欠陥構造があるためにキャリアが深い準位にたまっていくのに時間がかかる。そのため、キャリアが発光準位に入りこむ確率が上がっていくのに時間がかかり、数分～数時間かけ徐々に光の強度が増すことが考えられる。

<卒業論文>

光学顕微鏡と CCD カメラを用いた励起された InGaN/GaN 半導体の観察

横浜市立大学 国際総合科学部 国際総合科学科 基盤科学コース

ルジエロ・ミケレット研究室

提 俊章

# 目次

## 第1章 序論

1.1 はじめに	1
1.2 研究背景	
1.2.1 InGaN の構造欠陥と光物性	2
1.2.3 不安定点滅現象	4
1.2.4 光メモリ効果	5
1.3 研究目的	6

## 第2章 方法

2.1 InGaN/GaN 試料	7
2.2 実験装置	8
2.3 実験方法	9

## 第3章 結果

3.1 励起光を照射した試料表面の時間変化	10
3.2 輝点上のピクセルにおける光強度の時間変化	12
3.3 測定が終了した後の発光の様子	14

## 第4章 考察

4.1 観察結果から得られた発光メカニズム	15
4.2 輝点増加の量子井戸モデル	16
4.3 今後の課題	18

## 参考文献

19

## 謝辞

20

# 第1章 序論

## 1.1 はじめに

近年、窒化物半導体を用いた青色発光ダイオード(Fig.1-1)の高輝度化により、その実用性は大きく広がった。例えば、光の3原色(RGB)を発光ダイオード(LED)のみで表現することが可能になったことにより、LEDディスプレイの市販化が進んでいる。また、窒化物半導体が放つ、紫外～青色光を励起光とした白色蛍光塗料を用いた発光強度の優れたLED照明も実用化されている。LEDは発光時にほとんど熱を放出せず、蛍光灯や白熱灯に比べ安全かつ省エネルギーな光源として期待されている。さらに、光記録ディスクの記録・読み取り用のLEDレーザーとしても利用されている。青色光は波長が短いため、赤色光に比べ細かな記録が可能であり、光記録ディスクの大容量化に大きく貢献している。

このように近年、窒化物半導体は様々なものに利用されているが、InGaNの物性については明らかでない部分が多い。それは、結晶構造の欠陥が原因となる現象があるからである。結晶構造の欠陥は、サファイア基板とInGaN、GaN結晶の格子定数の違いによる、結晶同士のずれに起因する。InGaNを用いた半導体は、欠陥量が大きいにもかかわらず発光効率が高い。

今回、時間分解蛍光測定により、単一量子井戸構造をしたInGaN/GaN試料の構造欠陥が原因だとされている現象である、不安定点滅現象と光メモリ効果のふるまいを結び付ける現象の観測に成功した。観測結果をもとに、深い順位を含んだ量子井戸のふるまいのモデルを提案することを目的とした。

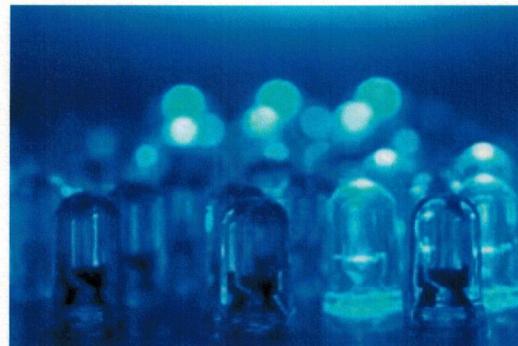


Fig.1-1 青色発光ダイオード

## 1.2 研究背景

### 1.2.1 InGaN の構造欠陥と光物性

現在、InGaN の結晶構造の欠陥による様々な効果が、その光物性に影響を与えていると考えられている。InGaN は、GaN と InN の混晶であるが、それらの結合長は 11%異なる。このような結合長差が大きな混晶では、全組成領域の原子の配置が均一にならないことが知られている。このため、局所的に In 組成が大きく、その周辺よりもポテンシャルが低い領域ができる。このような領域では、キャリアがトラップされやすい。また、GaN 系半導体では、ピエゾ分極と自発分極により、大きな内部電解が生じる。ピエゾ電解は、InGaN と GaN の格子定数の違いによって結晶構造が歪むことで発生する。また、自発分極は、アニオンである N 原子と、カチオンである Ga, In 原子のイオン性の違いによって、結晶中で電荷の偏り生じて発生する。

このように、InGaN の単一量子井戸構造には、格子定数の違いによる多量の構造欠陥があり、深い準位(Fig.1-2)が生じる。そうすると、電子と正孔のペアは深い準位に捕まってしまい、再結合の際のエネルギーを熱として放出してしまう。ところが、InGaN を量子井戸の発光部分に用いた発光ダイオードは、結晶構造に多量の欠陥があるにも関わらず高輝度な発光をする。S.Chichibu(2006,[1])らは、その理由を InGaN の発光再結合寿命の短さにあるとした。In を含む窒化物半導体は正孔が In と N が局在化している部分に効果的に捉えられ、エネルギーが熱に変換されずに、効率的に発光が行われるという。一般的に、半導体の発光効率は、正孔と電子のペアが発光にかかる「発光再結合寿命」と、欠陥による深い準位に捕まつて熱になるにかかる「非発光再結合寿命」のバランスで決まる。GaAs や GaP などを材料とした発光デバイスは、欠陥の量が 1cm<sup>3</sup>当たり 1 万～10 万個になるとほとんど発光しなくなる。一方、InGaN の場合、1 億～10 億個の欠陥があっても高い発光効率を示す。In の局在化により「発光再結合寿命」が極端に短く、深い順位の「非発光再結合寿命」がそれよりも長いために、発光効率が高くなるからであると考えられている。

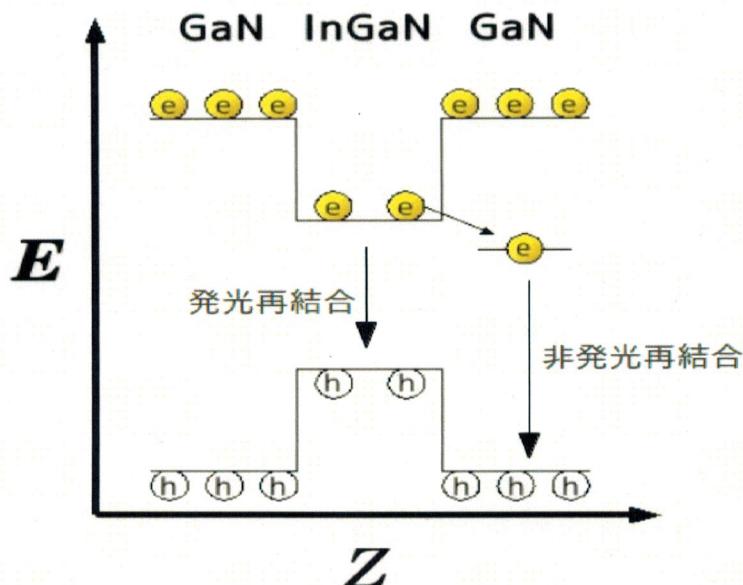


Fig.1-2 深い順位の量子井戸モデル

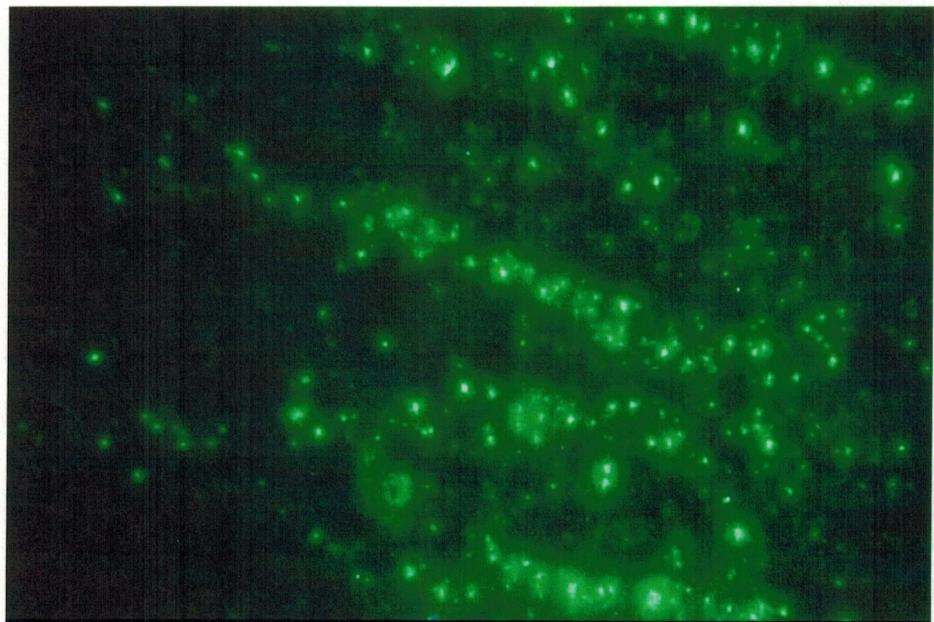


Fig.1-3 PL測定中のInGaN/GaN試料の発光

## 1.2.2 不安定点滅現象

InGaN/GaN 試料の不安定点滅現象は、R.Micheletto(2006,[2])らによって発見された。不安定点滅現象とは、フォトルミネッセンス(PL)測定において、In が局在化している数  $\mu\text{m}$  程度の領域において、光の強度が変化する現象である(Fig.1-4)。また、R.Micheletto(2013,[3])らはこの現象の原因は、量子井戸の結晶格子の熱振動によるものだとしている。一般的に、熱による結晶格子の振動は、目で見えるようなゆっくりとした振動ではないが、試料結晶内の欠陥や不純物によって、熱振動が幅広い振動数に分散される。そのうちのゆっくりとした振動が、量子井戸内の電子の波動関数を変化させて、それが不安定点滅現象になるのだという。しかし、正確な検証はなされておらず、未だ定まったモデルはない。

不安定点滅現象は他に、CdSe のナノクリスタルや量子ドット、ZnCdSe、GaAs、InP の量子ドット、多孔質シリコンでも発見されている[4]。

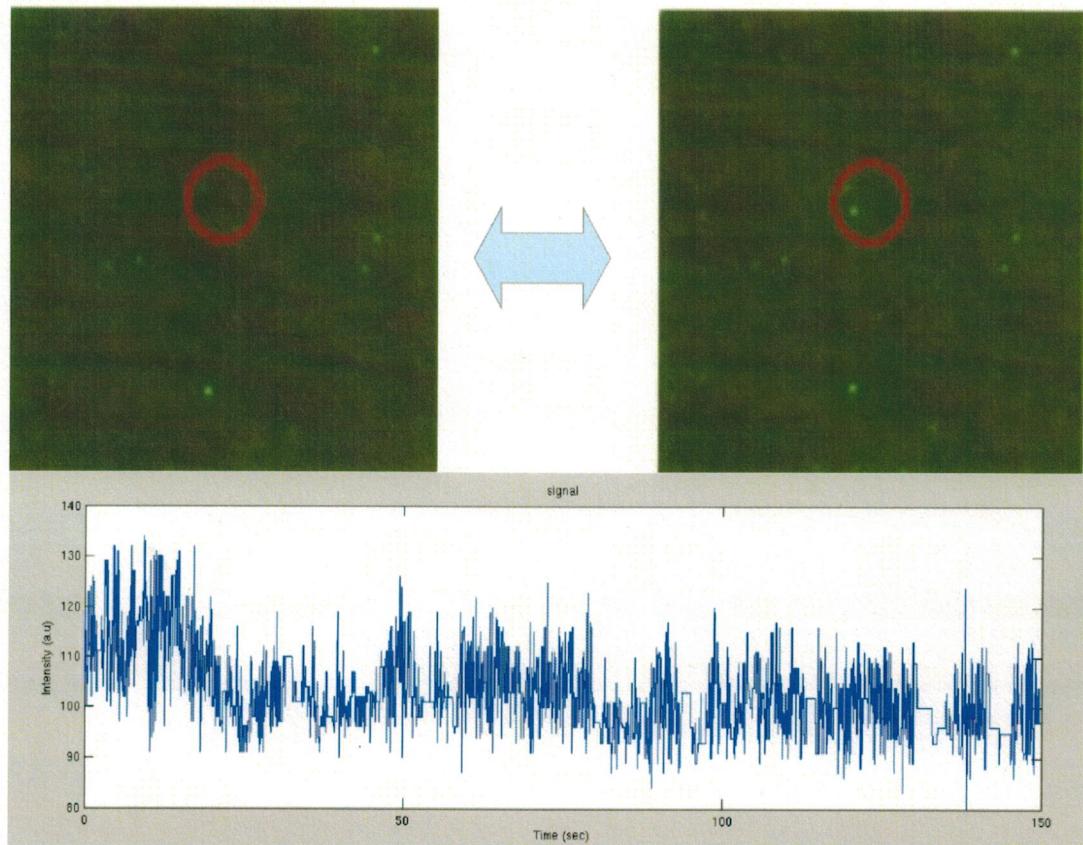


Fig.1-4 励起光 364nm、発光中心 510nm での InGaN/GaN 試料の不安定点滅現象

### 1.2.3 光メモリ効果

GaN の光メモリ効果は V.A.Joshkin(1997[5]) によって発見された。R.Micheletto(2006[1]) によって InGaN/GaN 試料の光メモリ効果も観測されている。この現象は GaN 系半導体でのみ観測される。光メモリ効果は、励起光を照射した試料が光をため込む現象である。例えば、1 日暗室で放置した InGaN/GaN 試料に励起光を照射すると、初めは試料表面の発光は弱いが、時間が経つにつれ徐々に発光強度を増す(Fig.1-5)。また、1 日暗室に放置した試料よりも、1 時間励起光を照射し続けた直後の試料の方が、励起光を当てた瞬間の蛍光強度が大きい。1.2.1 で述べたように、半導体の発光効率は、「発光再結合寿命」と、「非発光再結合寿命」のバランスで決まる。光メモリ効果は、欠陥や不純物が何らかの作用をし、徐々に発光効率が上がっていることが考えられる。不安定点滅現象と同様に、この現象において欠陥や不純物がどのような振る舞いをしているのか、定まったモデルはない。

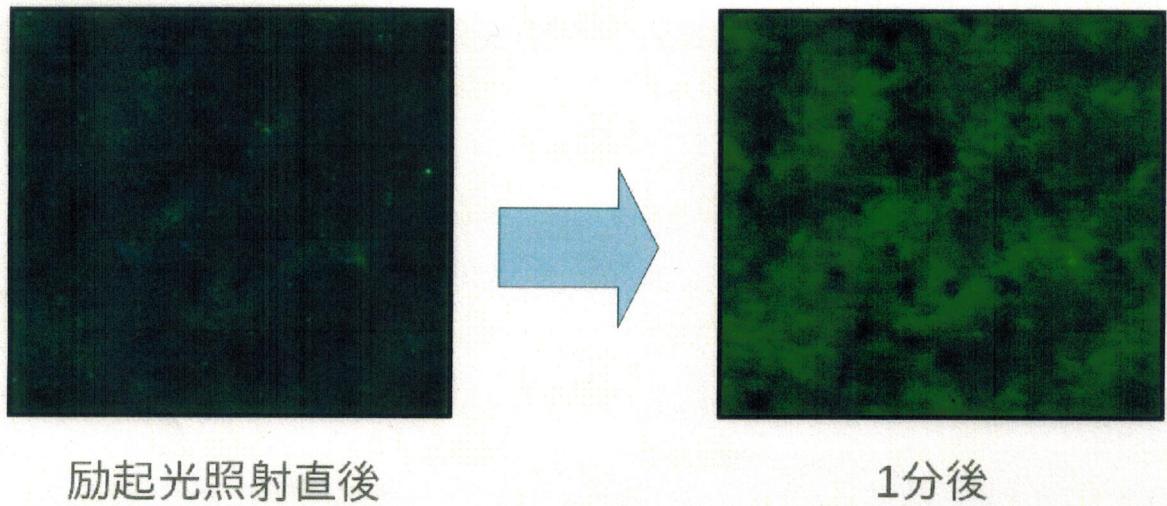


Fig.1-5 励起光 365nm、発光中心 510nm の InGaN/GaN 試料の光メモリ効果

## 1.3 研究目的

本研究の目的は、InGaN/GaN 試料の結晶構造の欠陥が原因と考えられる現象について調べることにより、その光学的物性について解釈を深めることである。欠陥のない、理想的な InGaN/GaN 試料を作成するためには、不安定点滅現象や光メモリ効果が生じる原因を、知る必要がある。先行研究では InGaN/GaN の不安定点滅現象と光メモリ効果は同様に構造欠陥が原因と考えられている現象であるにも関わらず、別々の現象として考えられていた。一方で、本研究では長時間の PL 測定により、大きな時間の中で起こる現象について包括的に測定や考察を行い、InGaN/GaN 試料の新たな物性の発見・解明に努めた。

# 第2章 方法

## 2.1 InGaN/GaN 試料

本研究で用いた InGaN/GaN 試料(Fig.2-1)は、InGaN 単一量子井戸構造をしている。有機金属気層成長法(MOVCD)法を用いて、サファイア基板上に作成した。結晶の成長面は(0001)である。試料の発光中心波長は、 $In_xGa_{1-x}N$  の In 組成  $x$  の値で決まるが、今回は不安定点滅が観測されやすい 540nm を発光中心とする  $x$  の値とした。

本研究で使用した InGaN/GaN 試料は、京都大学の川上養一教授に依頼して、日亜化学で作成して頂いた、研究用のものである。

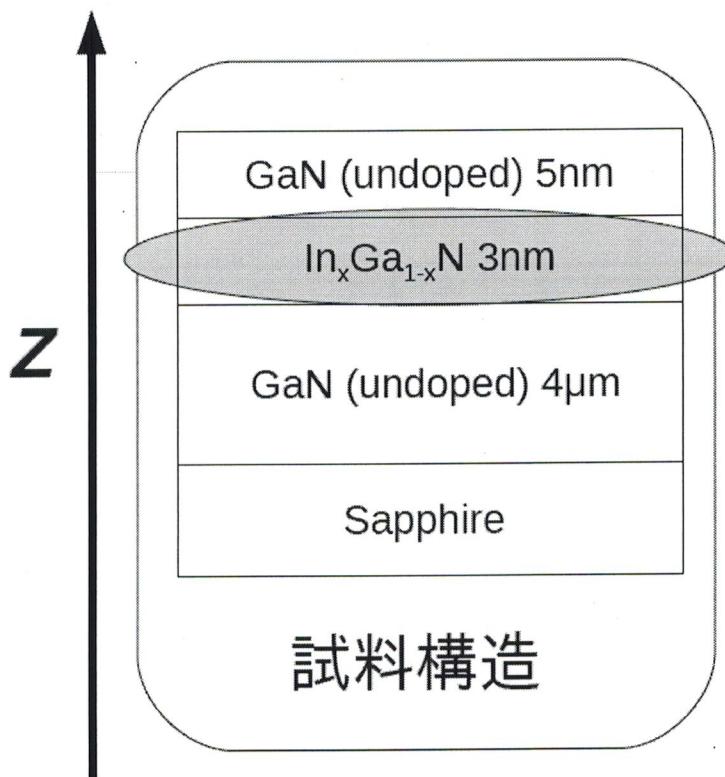


Fig.2-1 InGaN/GaN 試料

## 2.2 実験装置

3CCD カメラと選択励起光学顕微鏡を用いて時間分解フォトルミネッセンス(PL)測定を行った。測定装置の概略図を(Fig.2-2)に図示した。He-Cd ランプから照射された光は、干渉フィルターによって、励起光(365nm)のみが選択されて、試料に照射される。GaN の室温でのバンドギャップが約 3.4eV なので、この励起光は GaN のバンド端の裾を励起している。試料からの散乱光はローパスフィルター(510nm～)によって、試料のフォトルミネッセンスによる波長のみが透過され、3CCD カメラに記録される。ランプの光は必要に応じて、シャッターで遮断できるようにした。対物レンズは 50 倍、カメラレンズは 10 倍で合わせて 500 倍の倍率でカメラに記録をした。画素数は  $1440 \times 1088$ 、フレームレート 60fps(時間分解能は約 16.7msec)とした。すべての測定は、常温(約 25°C)で行った。

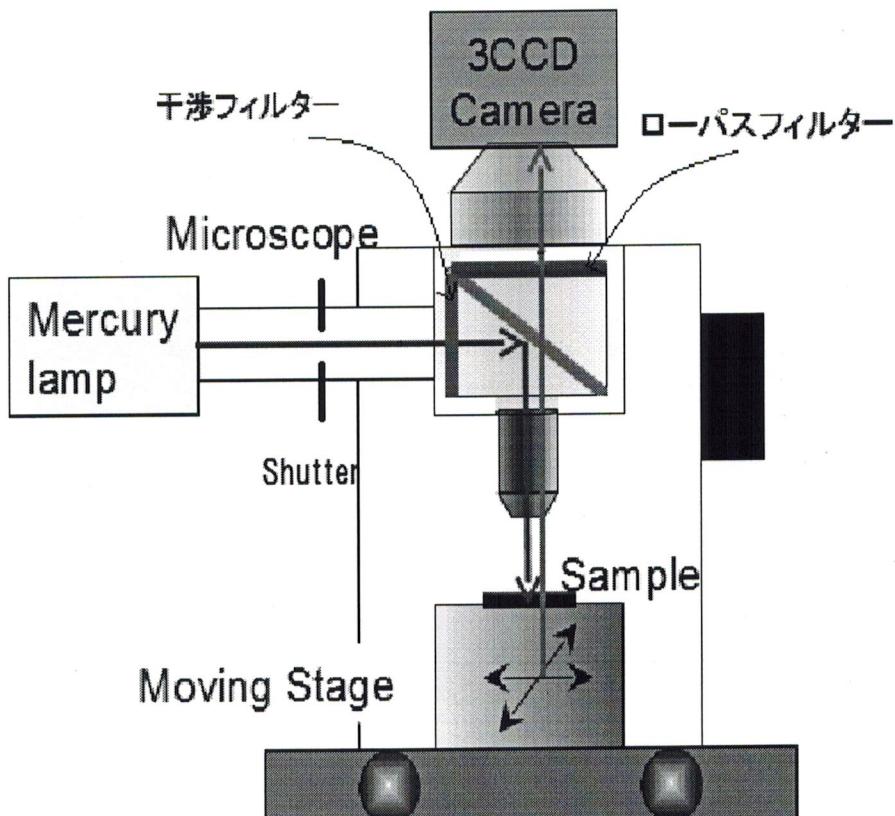


Fig.2-2 選択励起光学顕微鏡

## 2.3 実験方法

上記の InGaN/GaN 試料と測定装置を用いて、次の流れで観測を行った。

- (1) スライドガラス上にのせた InGaN/GaN 試料を測定装置のステージに置き、シャッターを開き、ランプをオンにして、焦点と観測領域を調整した。
- (2) InGaN/GaN 試料は光メモリ効果により、励起光に当たると励起子をため込む性質をもつため、試料と測定装置を暗室に 1 日以上放置した。
- (3) ランプの安定のために、シャッターを閉めた状態で 10 分ほどランプをオンにした。
- (4) 3CCD カメラを録画状態にし、シャッターを開き、1 時間のあいだ、時間分解 PL 測定を行った。
- (5) 1 時間経過した後、シャッターを閉じ、3CCD カメラの録画を止め、ランプをオフにした。

# 第3章 結果

## 3.1 励起光を照射した試料表面の時間変化

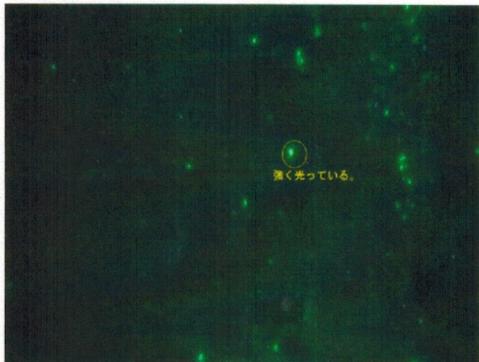
InGaN/GaN 試料は光メモリ効果によって徐々に光が立ち上がっていくが、その間の発光の様子について、次のような結果が得られた。解析のため、いくつかのフレームをピックアップし、試料の発光の様子を観察した。(Fig3-1)では、ピックアップしたフレームを時間ごとに並べ、それぞれのフレームの特徴を述べる。

- ・ 0.03 秒 いくつかの輝点の数は少ない。黄色円内の輝点の光の強度が強い。
- ・ 54.30 秒 白い円内に、輝点の数が増えた。また黄色円内の輝点の光の強度が弱まった。
- ・ 88.50 秒、143.62 秒 徐々に全体の光の強度が上がっている。桃色円内に輝点はない。
- ・ 255.55 秒 全体的に輝点の数が増えた。黄色円内の輝点は強く光っている。また、桃色円内にいくつかの光の強度の弱い輝点が出現した。
- ・ 545.72 秒 桃色円内の輝点は光の強度を増した。一方、黄色円内の輝点の光は弱まった。
- ・ 727.93 秒、1027.00 秒 ほぼ変化なし。輝点の数が最大。

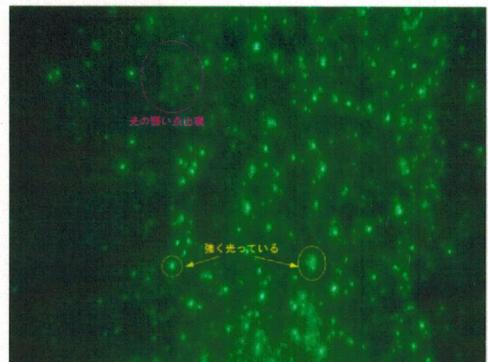
以上の観察から、次のことが分かった。

- ・ 輝点の数は増える。
- ・ 新たに出現した輝点は、はじめは光の強度は弱いが、徐々に光の強度を増す。
- ・ 光の強度が最大になった輝点はその後、光の強度が弱まる。
- ・ 輝点の数が最大になった後、その状態で安定し、ほとんど変化がなくなる。

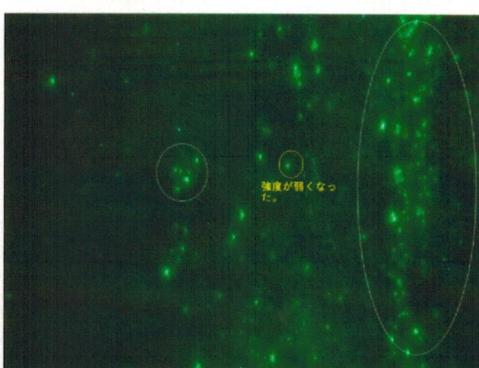
0.03 秒



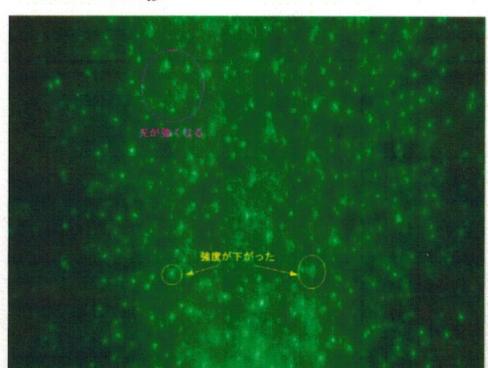
255.55 秒



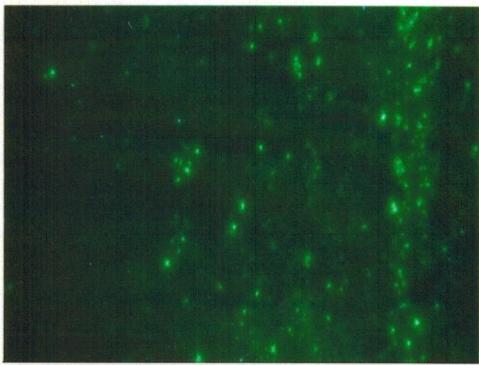
54.30 秒



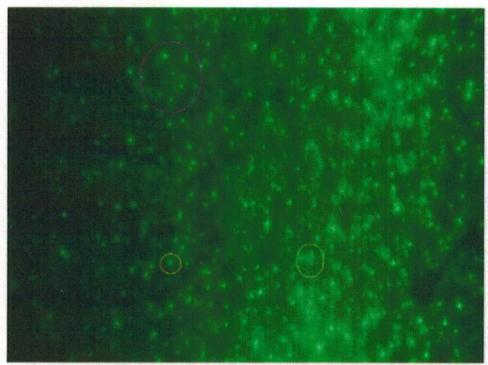
545.72 秒



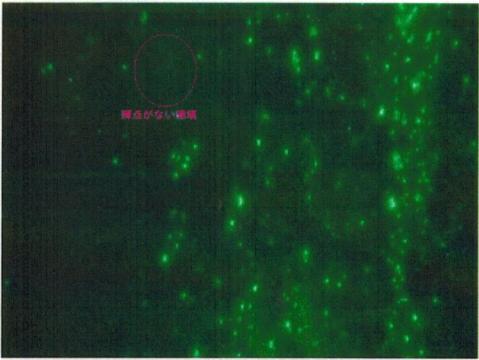
88.50 秒



727.93 秒



143.62 秒



1027.00 秒

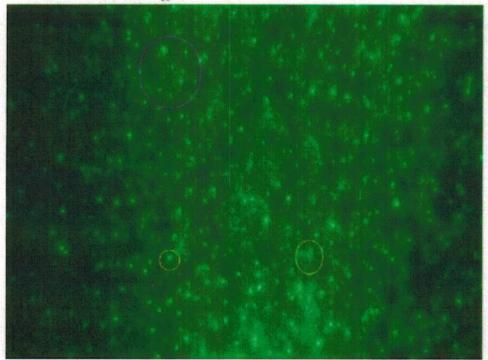


Fig.3-1 時間ごとの試料表面のフォトルミネッセンスの様子

### 3.2 輝点上のピクセルにおける光強度の時間変化

次に、2つの輝点に注目して光の強度の時間変化の比較を行った。3CCD カメラの色や明るさはRGB カラーモデルで表現されるため、光の強度を次のように定義した。I を光の強度、R を赤色、G を緑色、B を青色とした。R、G、B はどれも 0~255 の間の値である。

$$I = (R+G+B)/3$$

比較する輝点上のピクセルは、次のようなものを選んだ。

A) 3.1 の結果から、途中で光の強度が最大になり、その後徐々に弱まっていくように見える(Fig.3-1 の 255.55 秒後の写真、左側の黄色の円の中)の輝点上のピクセル。

B) 同様に 3.1 の結果から、動画の数百秒後に出現し、徐々に強くなっていくように見える(Fig.3-1 の 143.62 秒後の写真、桃色の円の中)の輝点上のピクセル。

A と B の光の強度の時間変化のグラフはそれぞれ、(Fig.3-2)と(Fig.3-3)である。それぞれのグラフを比較すると、以下のことがわかる。A のグラフでは、はじめのうちは光の強度を増している(1)。このときのグラフの振り幅をみると、大きく不安定点滅をしていることが分かる。測定開始から約 280 秒後、光強度はピークに達し、その後は徐々に減少していく(2)。次に、B のグラフについてみる。約 200 秒までは、光の強度を 60 前後で安定させていた(1)が、その後、急激に増加(2)し、約 450 秒程でピークに達する。3.1 の写真の比較では確認にくかったが、ピークに達した後、なだらかに光の強度は減少している(3)。A と B の光の強度のピークはどちらも 160 前後である。また、B のグラフの黄色の枠の中だけをみると、A のグラフと似ていることが分かる。A と B のグラフを関連づけてみると、B の輝点の光の強度が増加し始めたあとに、A の輝点がピークに達していることがわかる。このように考えると、B の輝点がその後ピークに達した理由は、B よりも後に立ちあがってくる他の輝点の光の強度の増加によるものだと考えられる。

以上のことにより、輝点の数が増えるにつれて、光の強度が強くなった輝点はその強度を減少させることができた。

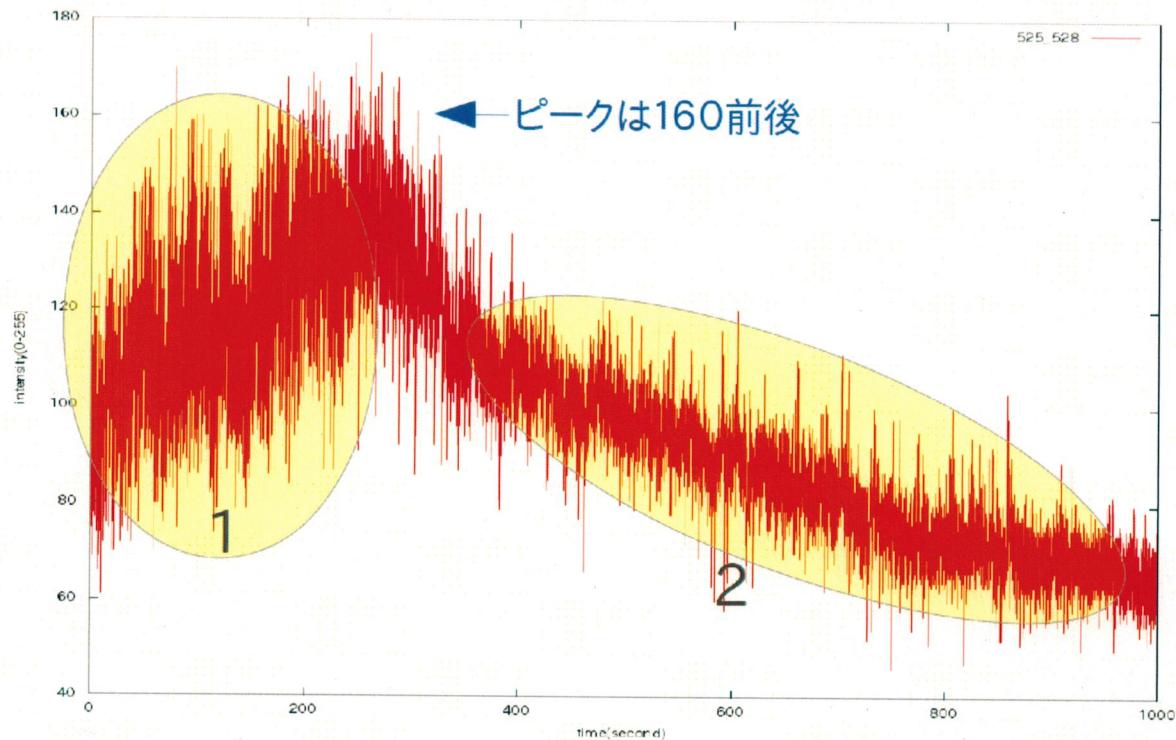


Fig.3-2 あるピクセル”A”上の光の強度の時間変化

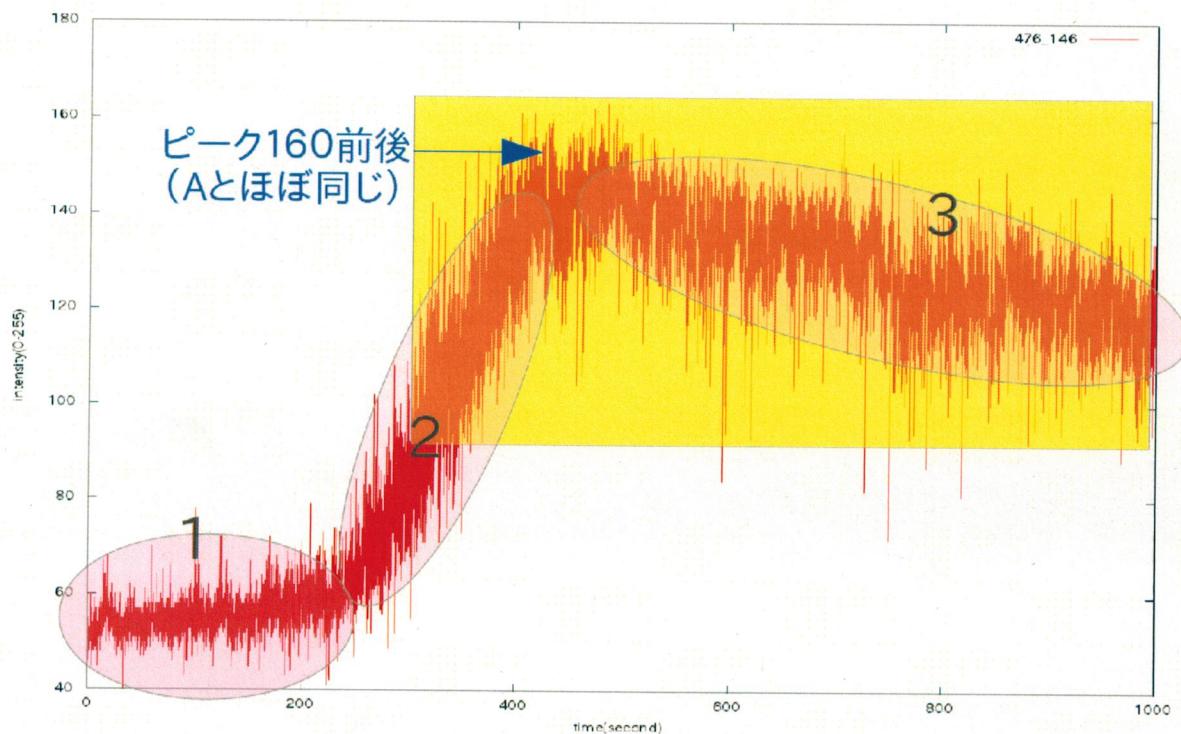


Fig.3-3 あるピクセル”B”上の光の強度の時間変化

### 3.3 測定を終了した後の発光の様子

最後に、1時間の時間分解PL測定が終了した後の様子を観察した。測定終了後は(Fig3-4)の左の写真の様に、輝点が満ちていることが分かる。一方、右の写真は対物レンズの倍率を50倍から10倍に下げて撮影したものである。レンズの倍率が下がると、視野が広がると同時に、励起光が照射される領域も広がる。この2つの写真をみると、励起光が照射され続けていた領域と、照射されていなかった領域には輝点の数に差があることがわかる。

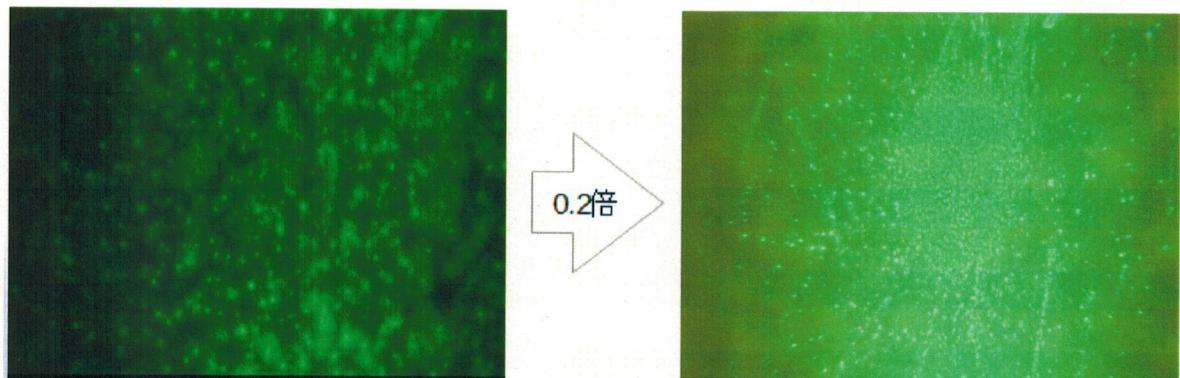


Fig.3-4 時間分解PL測定終了後の試料の様子(左)と、それを0.2倍縮小して撮影した試料の様子(右)

# 第4章 考察

## 4.1 観察結果から得られた発光メカニズム

不安定点滅と光メモリ効果を包括的に測定した結果から、InGaN/GaN 試料の巨視的なメカニズムは次のようなループ構造になることが分かった。励起光を試料に照射し、いくつかの輝点が出現することで、(Fig4-1)のように、光強度の小さな輝点が不安定点滅をしながら光強度を増すこと、光強度が強すぎた輝点は徐々に弱くなって安定すること、そして光強度の小さな輝点が新たに生まれることがループする。輝点の数が最大になったところでループから抜け、その状態で安定する。

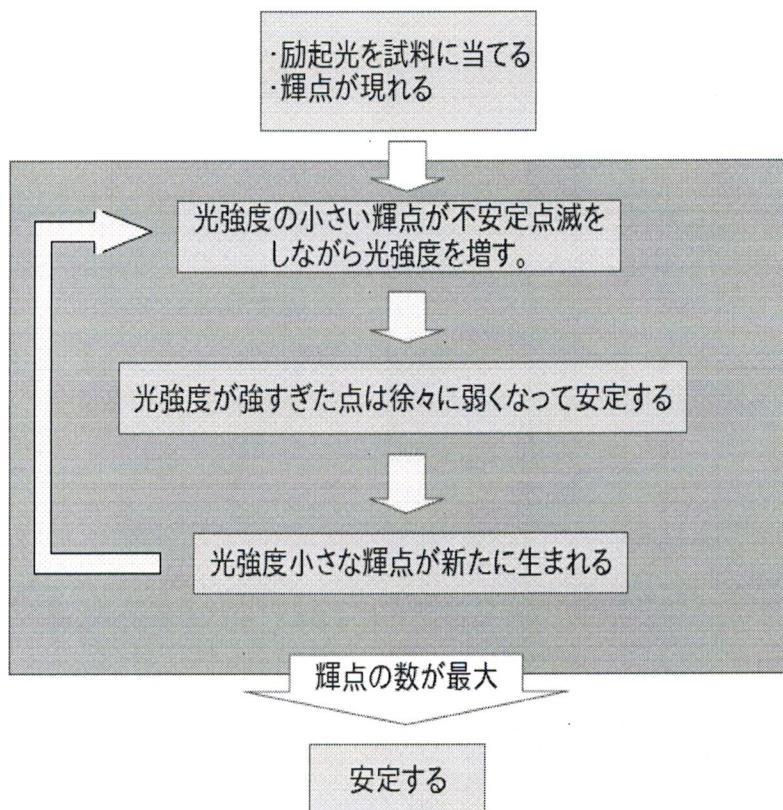


Fig.4-1 励起光を照射している InGaN/GaN 試料の発光のメカニズム

## 4.2 輝点増加の量子井戸モデル

以上の観測結果から、この現象の量子井戸モデルの提案をする。(Fig.4-2)は輝点増加の量子モデルのイメージ図である。まず、InGaN/GaN 試料表面に励起光が照射されることにより、キャリアが生成される。キャリアは、発光準位には捕まらず、多量の構造欠陥によって作られた深い準位に捕まる。ここで、キャリアが深い準位に捕まる速さに比べ、非発光再結合をする速さが遅い(非発光再結合寿命が長い)とすると、徐々に深い準位に捕まっているキャリアの数が増えていく。このことから、深い準位に捕まることのできるキャリアの数と欠陥量は相関があると考えられる。そして、深い準位に入っているキャリアの数が最大になったところで、あふれるように InGaN の発光準位に流れ込み、試料表面に輝点が出現する。それぞれ輝点の出現する時間が一定でないことは、結晶構造の不均一性により、それぞれ輝点周辺の欠陥構造が異なり、深い準位に捕まるキャリアの数、深い準位に捕まる速度、または非発光再結合をする速度が変化するためであると考えられる。

ただし、輝点の発光強度はある時間に急激に上昇するわけではなく、(Fig3-2,3-3)のグラフのように、徐々に光の強度を増していく。このため、深い準位に捕まっているキャリアの数が増えるにつれて、キャリアが発光準位に入りこむ確率は上がっていくと考えられる。

また、同様の考え方で光メモリ効果についても説明できる。深い準位に入ることができるキャリアの数と、欠陥の量には相関があると考えると、GaAs や GaP に比べ、InGaN は 1 万～10 万倍の欠陥構造があるためにキャリアが深い準位にたまっていくのに時間がかかる。そのため、キャリアが発光準位に入りこむ確率が上がっていくのに時間がかかり、数分～数時間かけ徐々に光の強度が増すことが考えられる。

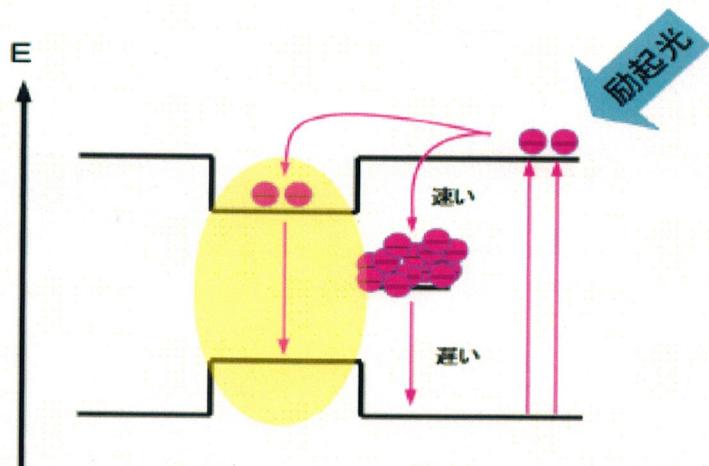
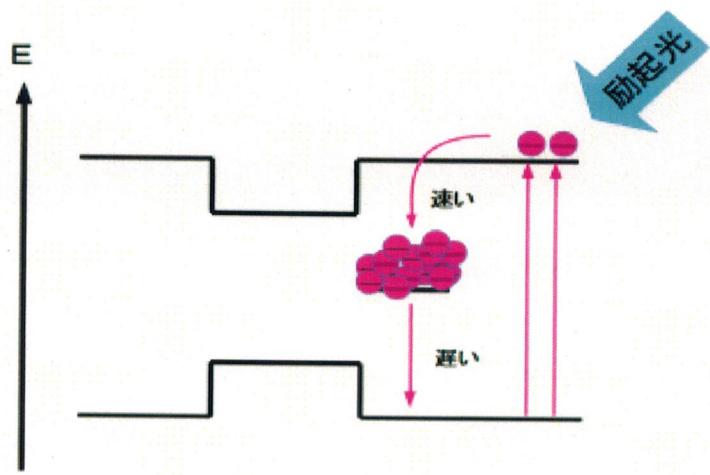
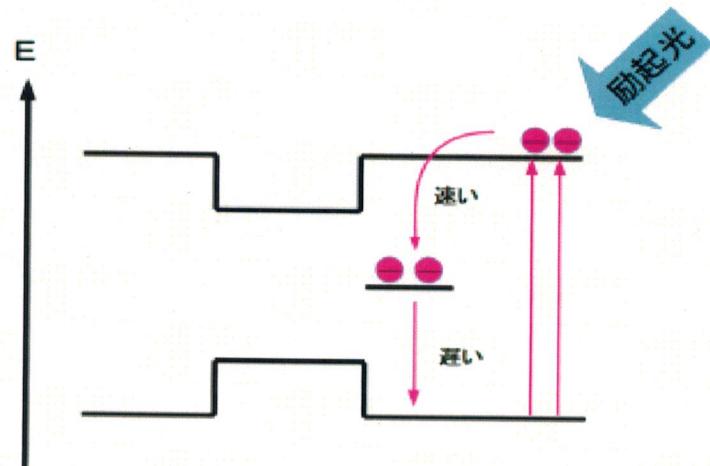


Fig.4-2: 輝点増加の量子井戸モデル

## 4.3 今後の課題

本研究では、InGaN/GaN 試料表面に数十分間の励起光を照射すると、局所的な輝点が徐々に増加していく現象を発見し、その現象の量子井戸モデルを提案した。また、この現象については、不可解な部分多い。例えば、輝点の光強度がピークを迎えた後に減少していくことについては観測したもの、原因が不明なため本論文では深く考察していない。また、(Fig.3-2)の輝点は強度を増している間、強く不安定点滅をしているが、(Fig.3-3)の輝点の不安定点滅はそれほど強くない点についても同様である。これらの現象についてより考察を行い、本論文で提案したモデルに修正を加えていく必要がある。

その他に観測された現象について、温度特性の実験や、深い準位の同定、試料の構造欠陥の量との関係性等の調査を行っていく必要がある。また今回は、365nm の励起光で InGaN と GaN を両方を励起させて実験を行ったが、よりエネルギーの低い波長を使って InGaN のみを励起させた蛍光スペクトルの様子も観察すれば、GaN と InGaN それぞれの働きを知ることができる。輝点増加のモデルでは、トラップにキャリアがたまっていくことを述べた。もしそれが正しければ、数十分間励起光を照射され続けた InGaN の深い準位にはキャリアがたまっているため、発光準位と深い準位のエネルギー差分の波長の試料表面に当たることで、2段階励起が起きる可能性がある。それを確かめることができれば、本モデルの妥当性が上がる。

今後はこれらのことと調べ、InGaN と GaN を用いた半導体の物性のさらなる解明に努めたい。

# 参考文献

- [1] S.Chichibu, A.Uedono, T.Onuma, B.Haskell, A.Chakraborty, T.Koyama, P.Fini, S.Keller, S.DenBaars, J.Speck, U.Mishra, S.Nakamura, S.Yamaguchi, S.Kamiyama, H.Amano, I.Akasaki, J.Han, and T.Sota, "Origin of defect-insensitive emission probability in In-containing (Al,In,Ga)N alloy semiconductors", *Nature Materials* **5**, 810 - 816 (2006)
- [2] R. McHeletto, M. Abiko, A. Kaneta, Y. Kawakami, Y. Narukawa, and T. Mukai, "Observation of optical instabilities in the photoluminescence of InGaN single quantum well", *Applied Physics Letters* **88**, 061118 (2006)
- [3] R. McHeletto, K. Oikawa, and C. Feldmeier, "Observation of lattice thermal waves interference by photoluminescence blinking of InGaN quantum well devices", *Applied Physics Letters* **103**, 172109 (2013)
- [4] 我孫子正義 京都大学卒業論文 (2003)
- [5] V.Jonskin, J.Roberts, F.McIntosh, S.Bedair, E.Piner, and M.Behbehani, "Optical memory effect in GaN epitaxial films", *Applied Physics Letters* **71** (2), 234-236 (1997)

# 謝辞

本研究を進めるにあたって、指導教員であるミケレット・ルジェロ教授には、大変なご指導をいただきました。他大学であるにもかかわらず、InGaN/GaN 試料を作成したいただき、さらに、様々なご助言を下さった京都大学の川上養一教授、川上研究室の方々に心からお礼を申し上げます。

また、ミケレット研究室の孫さん、渡利藤香さん、鷹取さん、黄俊明さん、磯崎陽一さんは日ごろから大変お世話になりました。研究室 OB であるにも関わらず親身に相談に乗つていただいた及川虎太郎さん、ご協力いただいた皆様に心から感謝いたします。本当にありがとうございました。