

卒業研究報告

題目

走査電子顕微鏡ーラマン分光複合装置による GaN の評価

指導教員

河東田 隆 教授

報告者

安部 智規

平成 13 年 2 月 9 日

高知工科大学 電子・光システム工学科

目次

1 章 序論	2
1.1 目的	
1.2 論文の構成	
2 章 走査電顕ーラマン分光複合装置	3
2.1 はじめに	
2.2 カソードルミネッセンスの原理	
2.3 ラマン分光法の原理	
2.4 フォトルミネッセンスの原理	
2.5 走査電子顕微鏡ーラマン分光複合装置の原理	
2.6 複合化の理由とメリット	
2.7 操作上の注意点	
2.8 まとめ	
3 章 GaN の評価	11
3.1 はじめに	
3.2 カソードルミネッセンスによる評価	
3.3 ラマン分光法による評価	
3.4 まとめ	
4 章 InGaN の評価	16
4.1 はじめに	
4.2 カソードルミネッセンスによる評価	
4.3 ラマン分光法による評価	
4.4 まとめ	
5 章 結論	22
参考文献.....	23
謝辞.....	24

1 章 序論

本論文では、走査電子顕微鏡とラマン分光装置を複合させた新しい測定器を用いて有機金属気相成長法を用いて成長させたGaNとInGaNの評価を行った。GaN系半導体はSiC，ダイヤモンドと同様ワイドバンドギャップ半導体材料でバンドギャップが大きいだけでなく融点が高く絶縁破壊電界も従来のSiやGaAsよりも大きいため，高耐圧，高周波，高温動作のパワーデバイス用材料として期待されている。本論文は5章から構成されている。

1.1 目的

GaNは通常六方晶であり、基板表面に生成した六角形のファセットの面、角、辺をカソードルミネッセンス法及びラマン分光法で測定し、その得られるスペクトルから、ファセットからの発光特性を明らかにすることを目的とした。

更に、InGaNではInの組成の異なる試料をカソードルミネッセンス法及びラマン分光法で測定し得られるスペクトルからInの組成と結晶性との相関を明らかにすることを目的とした。

1.2 論文の構成

論文は5章から構成されており、1章では、序論と目的及び論文の構成を述べている。2章では、今回測定に使用した、走査電子顕微鏡 - ラマン分光複合装置の原理と、この測定器で得られるカソードルミネッセンス、フォトルミネッセンス及びラマン分光法の原理について述べている。3章では、GaNの六角形部分の面、角、辺におけるカソードルミネッセンスとラマン分光法で得られたスペクトルから評価と考察について述べている。4章では、InGaNのInの異なる試料におけるカソードルミネッセンスとラマン分光法で得られたスペクトルから評価と考察について述べている。5章では、全体を通してのまとめと考察について述べている。

2章 走査電子顕微鏡 - ラマン分光複合装置

2.1 はじめに

走査電子顕微鏡 - ラマン分光複合装置 (SEM-RAMAN) は、従来の走査電子顕微鏡にラマン分光装置を複合させたまったく新しい評価装置である。走査電子顕微鏡 (SEM) は、試料の表面を電子線で照射して得られた2次電子線および反射電子線をブラウン管上に映し、その電子像から試料の微細構造を観察する顕微鏡である。SEMは光学顕微鏡よりも分解能が高く、焦点深度が深いので、非常に微細な構造や凸凹の大きい試料の観察が可能である。

また、電子線を試料に照射させることによって励起された光を、ハーフミラーを用いて分光器内で分光することによってカソードルミネッセンススペクトルを得ることが出来る。

そして走査電子顕微鏡に複合化させたラマン分光装置は、試料表面に凹面鏡を使って集光させたArイオンレーザーを照射させることによって試料から励起された光を、ハーフミラーを用いて分光器内で分光することによって、得られたラマンスペクトルから試料微細部分の物質の同定や応力を測定することができる。

2.2 カソードルミネッセンス (Cathodoluminescence) 法の原理

電子ビームが試料に入射したとき、その電子は次式に示すクーロン力で試料中の価電子に跳ね返され、また試料の原子には引き寄せられる。

$$F = Qer / 4 \pi \epsilon_0 r^3$$

ここで e は電子の電荷量、 Q は相互作用する粒子の電化、 r はその瞬間の距離である。この力の大きさは、相互作用する粒子が原子核 (電子による遮蔽を考慮して、 $Q = -4e$) でもその他の原子 ($Q=e$) でもあまり変わらない。したがって、相互作用する粒子に与える影響 p はその粒子が原子核であっても電子であってもほとんど同じである。しかし、反跳粒子によって持ち去られるエネルギー E は、

$$E = p^2 / 2M$$

であり、その粒子の質量 M に依存する。従って、電子の質量は原子核よりも 22000 倍も軽いので、電子との相互作用は、原子との相互作用よりもエネルギー的にははるかに重要となる。価電子の励起は、ルネッサンスを引き起こすために必要なことである。

$$-dW/dx = \frac{ne^4}{4 \epsilon_0^2 m^2} \{ \ln(m^2/2l) - 1/2 \ln 2 + 1/2 \}$$

ここで、 n は試料中での 1m^3 あたりの電子数、 m は電子の質量である。は試料原子の平均励起ポテンシャルである。

正面衝突によってエネルギー E の電子が質量 M の試料原子に与えるエネルギーは、

$$T = 2 (E + mc^2) E / Mc^2$$

である。

カソードルミネッセンス (CL) 像は、光電子増倍管の光検知信号と操作電子線の位置座標とを同期させることにより得られる。二次電子 (SE) 像で観察している領域がすなわち電子線が照射されている領域である。CL 像の分解能は、電子線励起により発生した電子 - 正孔対が拡散及び再結合する領域の大きさにもっとも大きく影響されるが、これを決定する要因は、試料の組成、走査電子の加速電圧及び電流である。フォトルミネッセンスの場合、励起及び検出共に光を用いるので分解能は光の波長に制限され、カソードルミネッセンスのように高い分解能を得ることは不可能である。また、分光器を通して光を検出できるので、単色光で像を結ぶことが可能で、ある特定のエネルギーを持ったフォトンの発光領域を知ることができる。すなわち不純物あるいは欠陥などに固有な発光センタの分布に関する情報が得られる。

2.3 ラマン分光 (Raman spectroscopy) 法の原理

ラマンという聞きなれない言葉は、インドの物理学者 C.V.Raman に由来している。ラマン分光を発見した人の名前がそのまま測定法に名づけられた。C.V.Raman の実験を紹介して「ラマン散乱現象」を説明する (図 1)。太陽光を紫色のフィルタを通過させると紫色だけの光になる。この光をある

試料の懸濁液にあてると同じ紫色の散乱光が観測される。しかし、ほんの少しだけ「緑色の光」も観測された。Ramanは、ほんの少ししか観測されない緑色光を発見したばかりではなく、その光が試料の分子振動と密接に関係していることを解明したのだ。つまり、この散乱光を観測すれば、試料の分子構造情報が得られるということである。

C. V. Ramanの実験

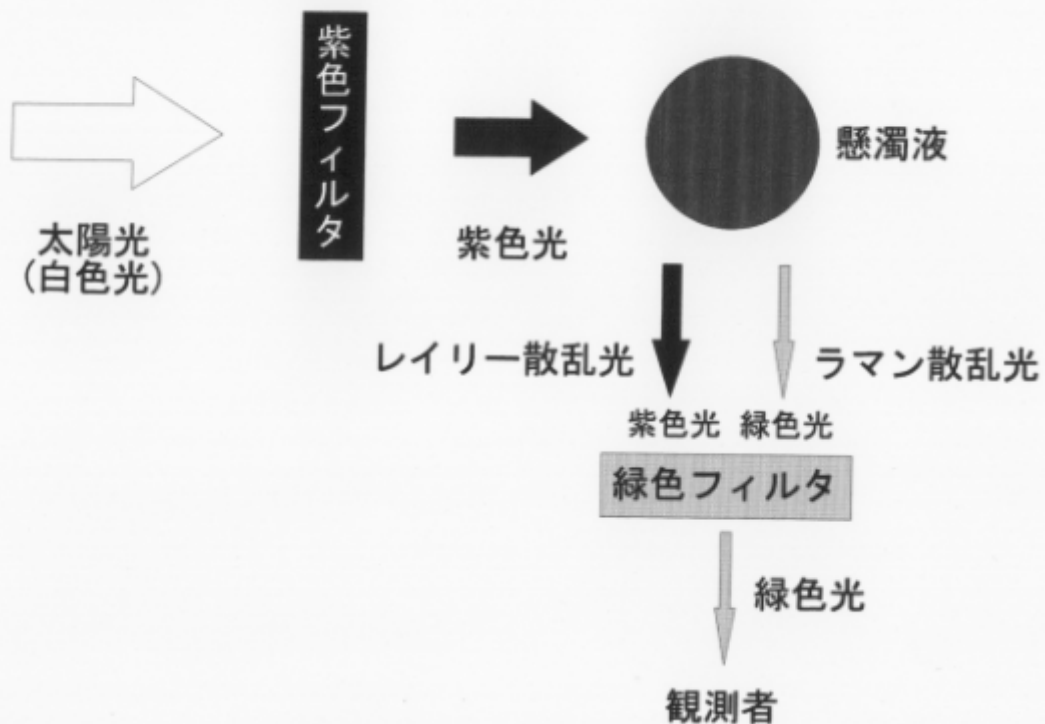


図 1

実際の装置では紫色フィルタや緑色フィルタの役割を果たすものがある。図 1 で紫色フィルタは、太陽光から紫色の光だけを取り出す働き、すなわち白色光 (いろいろな波長成分を持った光) から単色光 (一つだけの波長成分を持った光) を得る働きをしている。この単色光を簡単につくるにはレーザーが最適なので、現在はレーザー光源が使われる。

次に問題の緑色光の取り出しである。図 1 の緑色フィルタだが、これは圧倒的に強い、入射光と同じ波長の散乱光 (レイリー散乱光) から、試料によって波長の変換された緑色の散乱光 (ラマン散乱光) を区分けする働きをしている。この区分けをするために分光器を使う。

現在ではフィルタ分光器 (回折格子などの分光素子を用いて特定波長の光を除去するモノクロメータ) やシャープカットフィルタ (特定波長の光だけ

を除去する特殊透過フィルタ)を使い、まずレイリー散乱光をできる限り除去した上で、残りのラマン散乱光を別な回折格子によって分光し、目的のラマンスペクトルが得られる(図2)。

分光器の働き

- ・レイリー散乱光を除去する
(レイリー散乱光はラマン散乱光より 10^8 倍強い)
- ・ラマン散乱光を検出し、スペクトルを得る

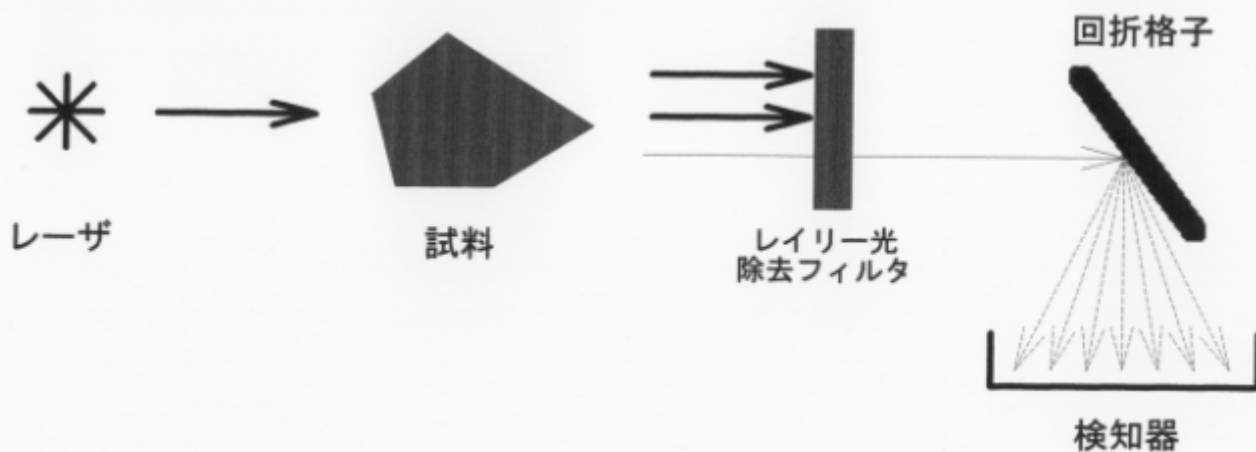


図2

レイリー散乱

分子を電場中におくと、正および負の電荷が互いに反対方向に引き付けられる。その結果、双極子モーメントが分子に誘起される。分子が双極子モーメントをもっている場合でも誘起は起こる。

あまり強くない電場中では、誘起双極子モーメント μ_1 は、

$$\mu_1 = \alpha E$$

のように書ける。比例定数 α は分極率と呼ばれる。振動数 ω_0 の放射を受ける分子を考えてみよう。電場は、

$$E = E^0 \cos \omega_0 t$$

のように振動しているので、分子中の誘起双極子モーメントも振動する。した

がって、誘起されるモーメントは次のようになる。

$$\mu_1 = E^0 \cos \omega_0 t$$

古典電磁気学によると、振動する双極子は同じ振動数の光を放射(散乱)する。入射振動数と同じ振動数の光が散乱されることを、レイリー散乱または弾性散乱という。

ラマン効果

上のレイリー散乱のところで分極率は時間とともに変化しないと仮定したが、これは実際には正しくない。分子は特定の振動数で回転し、かつ振動している。誘起されるモーメントは結合長と分子は以降に依存するので、分子の分極率は分子が回転するか振動すると変化する。

$$= \mu_0 + \mu' \cos M t$$

したがって、誘起されるモーメントも時間とともに変化する。

三角関数の標準的な関係式を適応すると、この結果を以下のような形で表すことができる。

$$\mu_1(t) = \mu_0 E^0 \cos \omega_0 t + \frac{1}{2} \mu' E^0 [\cos(\omega_0 - M)t + \cos(\omega_0 + M)t]$$

式 から、誘起双極子は振動数 ω_0 (レイリー散乱) と $(\omega_0 - M)$ および $(\omega_0 + M)$ で振動することがわかる。その結果、分子はこれらの振動数の電磁波を散乱する。和及び差振動数の電磁波の非弾性散乱はラマン効果として知られている。

これまでラマン効果についての古典的な取り扱いについて考えてきた。しかしながら、コヒーレント散乱過程や多光子遷移といったラマン効果と関係する諸現象を理解するには量子論が必要である。その理論についての数学的解析は示さないが、簡潔にラマン効果の量子論的解釈を述べる。

分子と電磁波との相互作用の間、分子のエネルギー準位は摂動を受ける。ある状態のエネルギーはもはや規則通りではなくなり、状態のエネルギーは不確

定性原理で支配される。相互作用の時間が短くなればなるほど、エネルギーの広がりが大きくなる。このような非定常状態(それらのエネルギーは不確定性のため正確に定義できない)は仮想状態とよばれる。量子力学によると、電磁波が照射されると分子は過渡的な仮想状態に移る。そしてその状態から電磁波を放出して定常状態へ戻るといように解釈される。散乱は定常状態間の遷移を含まないので、吸収とか放出という言葉で散乱過程を記述することはできない。

2.4 フォトルミネッセンス (Photo Luminescence)

ルミネッセンスは、系から熱放射以上に過剰に放出される放射と定義される。ルミネッセンス過程は、系の励起による非平衡状態の実現 準安定状態へのエネルギーの移動 光の放出という3つの過程に分けて考えることができる。励起方法により、いくつかのルミネッセンスに分類されるが、光により励起を行うものをフォトルミネッセンス (PL) 法という。

PL は、原理的には電極や表面研磨などを必要としない非破壊評価法である。また、光吸収測定におけるように試料の厚さにはこだわらず、励起光波長や試料の吸収係数にもよるが、通常 $1\ \mu\text{m}$ 程度の厚さがあれば測定可能である。試料の大きさについても励起光のスポットの大きさがあればよい。このように試料に対して融通性が大きいことが、この測定法の大きな長所となっている。

2.5 走査電子顕微鏡 - ラマン分光複合装置 (SEM-RAMAN) の原理

2.2 と 2.3 で説明したものを複合化させたのが、今回使用した測定器である。図 3 に概念図を示す。原理的には従来の SEM に、凹面鏡を用いて電子ビームがサンプルに当たるところに、ラマン分光に用いるレーザー (波長が 514.5nm の Ar イオンレーザー) を同じ場所に照射することで直径約 $10\ \mu\text{m}$ くらいの範囲での測定が可能となっている。

ラマン分光はレーザーをミラーで反射させて鏡筒内に入射させ、サンプルに当たったことで出てくる散乱光を、ハーフミラーを使って分光器内に取り込み、分光することによってラマンスペクトルが得られる。分解能は 10cm^{-1} 程度となっている。

カソードルミネッセンスも同様に、サンプルに当たることで発生する二次電子はハーフミラーを通して分光器内に取り込まれスペクトルが得られる。どちらのスペクトルも PC が測定結果を出してくれるので非常に簡単である。

走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope)

集束電子線を試料表面上に走査して、各走査点から放出される電子を検出器に受け増幅し、走査と同期させてブラウン管上に像として写し出す装置である。結像系に電子レンズを用いない為、分解能は入射電子線束の直径で決まる。像の焦点深度が大きい為表面の地形的観察に多く用いるほか、カソードルミネッセンス光をとらえて微小領域の元素分析装置としても用いられる。

2.6 複合化のメリット

SEM を用いることによって高い分解能下でのラマン測定が可能になる。更に、測定範囲の異なる CL 及びラマン分光法が使えることで、広範囲のスペクトル測定が可能である。また、微小領域の同じ箇所を測定可能なことから CL とラマンスペクトルを対比させやすいことなどが挙げられる。SEM は試料表面を立体的に表示するので、ラマンスペクトルを実際に表面を観察しながら測定することができるため、表面構造におけるスペクトルの測定が出来ることなどが挙げられる。

2.7 使用上の注意点

SEM の機能のひとつにステージを傾けることができるのだが、プローブがあるためにあまり傾けることができない。また、Ar イオンレーザーをサンプルに集光させるために鏡筒内のステージの高さを上げるときに中のプローブに当てないようにしなければならない。更に、SEM イメージの調整でステージを X 軸や Y 軸方向に動かす際も、プローブにあたらないようにしなければならない。プローブにあたると測定器の調整が必要になるだけでなく、プローブに傷が入ると反射したレーザーが散乱するため測定ができなくなる。

2.8 まとめ

ここでは、CL、RAMAN 分光法、及び PL の原理について説明した。SEM-RAMAN は同一微小領域を SEM で観察しながら CL やラマンスペクトルおよび PL を測定できるさまざまな可能性を持った測定器である。

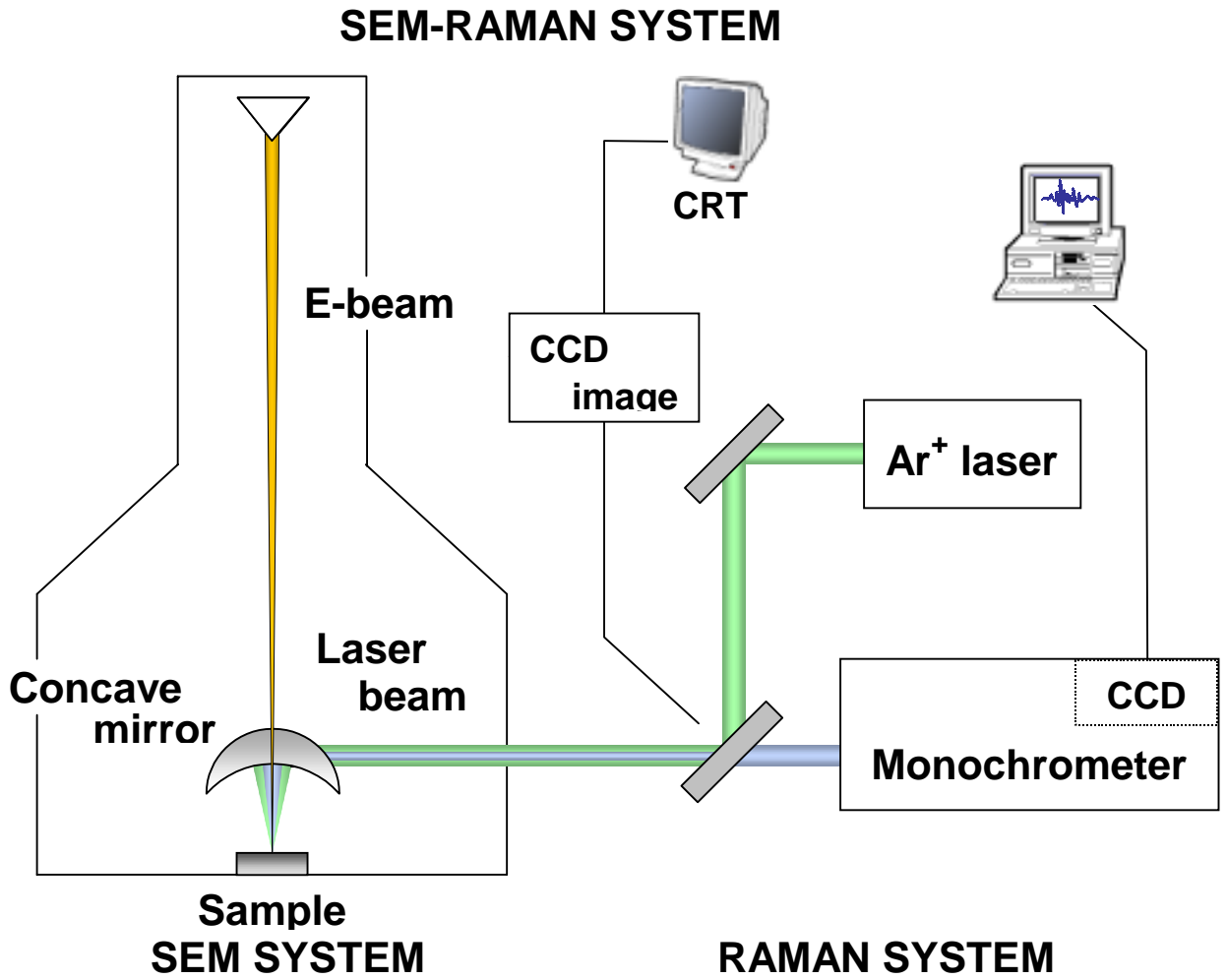


图 3 SEM-RAMAN 概略图



图 4 SEM-RAMAN 装置写真

3章 GaN の評価

3.1 はじめに

GaN は周期律表を元にして考えるとⅢ-V族窒化物半導体に属する。このⅢ-V族窒化物半導体は、いずれも室温大気圧においてウルツ鉱型結晶構造で安定し、直接遷移型のエネルギーバンド構造を持っているため SiC などの間接遷移型に属する材料と比較すると発光効率の点で優れた特性を持っている。また室温においてバンドギャップは 1.95 から 6.28eV に及ぶため紫外から赤外まで可視領域の色すべてを発光色として実現できる可能性を持ち、更にこれらの材料に共通する高融点、高硬度、高熱伝導などの特徴は耐環境性にすぐれ信頼性の高いデバイスとなりうる可能性を持っている。そのなかでも GaN は特に電子飽和速度、熱伝導率が大きく、またバンドギャップが 3.4eV であることから青色の発光素子として非常に期待されている。

しかし、窒化物はほかの一般の化合物半導体と比較して格子定数が小さく、格子整合する基板材料が少ない。そのため、基板には格子定数が大きく異なるが古くからサファイアが用いられてきた。しかし、サファイアと GaN とは格子定数が 20% 以上異なるため、良好なエピ膜が得られなかった。1983年 MBE 法でサファイア基板上に AlN バッファー層を成長させ、その上に GaN をエピ成長させると、GaN をサファイア上に直接成長させた場合より結晶性及び移動度が大幅に改善されることが示された。ここでは、成長過程で生じた六角柱の面(a)、角(b)、辺(c)についてのラマンスペクトルやカソードルミネッセンスを測定した。

図 5 に測定した面、角、辺をまるで囲んだ GaN の六角形 SEM イメージを示す。

3.2 GaN のカソードルミネッセンス

図 6 に CL スペクトルを示す。このスペクトルは系の特性を含んでいる。測定時間はすべて 10 秒で行った。スペクトル図は下から、面、角、辺のスペクトルとなっている。

まず面部分のスペクトルだがバンド端からの発光がほかの部分と比較してもっとも強く出ている。それと、ディープレベル部分のスペクトルが得られた。

次に角部分のスペクトルであるが、面のスペクトルと比較すると全体的にスペクトルが弱くなっていることがわかる。こちらでもバンド端とディープレベルからのスペクトルが得られた。

最後に辺部分からのスペクトルである。こちらも面部分と比較すると全体的なスペクトルが弱くなっていることがわかった。また、バンド端からの発光がグラフから読み取れないほどに弱くなっているが、ディープレベルからのスペクトルが面部分と比較して増えていることがわかった。

3.3 GaN のラマンスペクトル

図 7 に GaN のラマンスペクトルを示す。ラマンスペクトルのほうは測定時間 60 s で行っている。416 cm^{-1} と 749 cm^{-1} のスペクトルは Ar イオンレーザーの波長が GaN のバンドギャップよりも長いために基板のサファイアに届きサファイアからのスペクトルが出ている。739 cm^{-1} のピークは GaN (LO フォノン) である。530 cm^{-1} 付近のなだらかに傾いているところは、GaN (TO フォノン) である。中央の 568 cm^{-1} にあたる部分のピークが GaN のピークである。どのピークでも、また面、角、辺のそれぞれにおいても大きな違いは見受けられなかった。

光学的フォノン

格子振動するフォノンのうち、隣り合う構成元素が反対方向に変異するような振動モードのもの、電気双極子の振動を伴い、光と直接結合して吸収、放出に参与するのがその名の由来である。通常、隣り合う構成原子が同方向に振動する音響的フォノンに比べ、エネルギーが大きい、波の伝搬方向と原子の振動方向とが同じ向きの振動モードを LO フォノン、波の伝搬方向と原子の振動方向とが直行している振動モードを TO フォノンという。

3.4 まとめ

MOCVD でサファイア基板上に成長させたウルツ鉱 GaN 六角柱部分の面、角、辺についてのスペクトルを調べた結果、ラマンスペクトルに差は見受けられなかったが、CL スペクトルで、バンド端からの発光が面 > 角 > 辺の順に弱くなることが明らかになった。この結果から半導体デバイスとして最適な GaN 結晶成長にはなるべく平らな結晶成長が求められる。またディープレベルからの発光が辺から最も得られた点については、まだ今回の研究からはきりと同定することが出来ないが、ファセットの違いによるものか結晶性によるものではないかと考える。

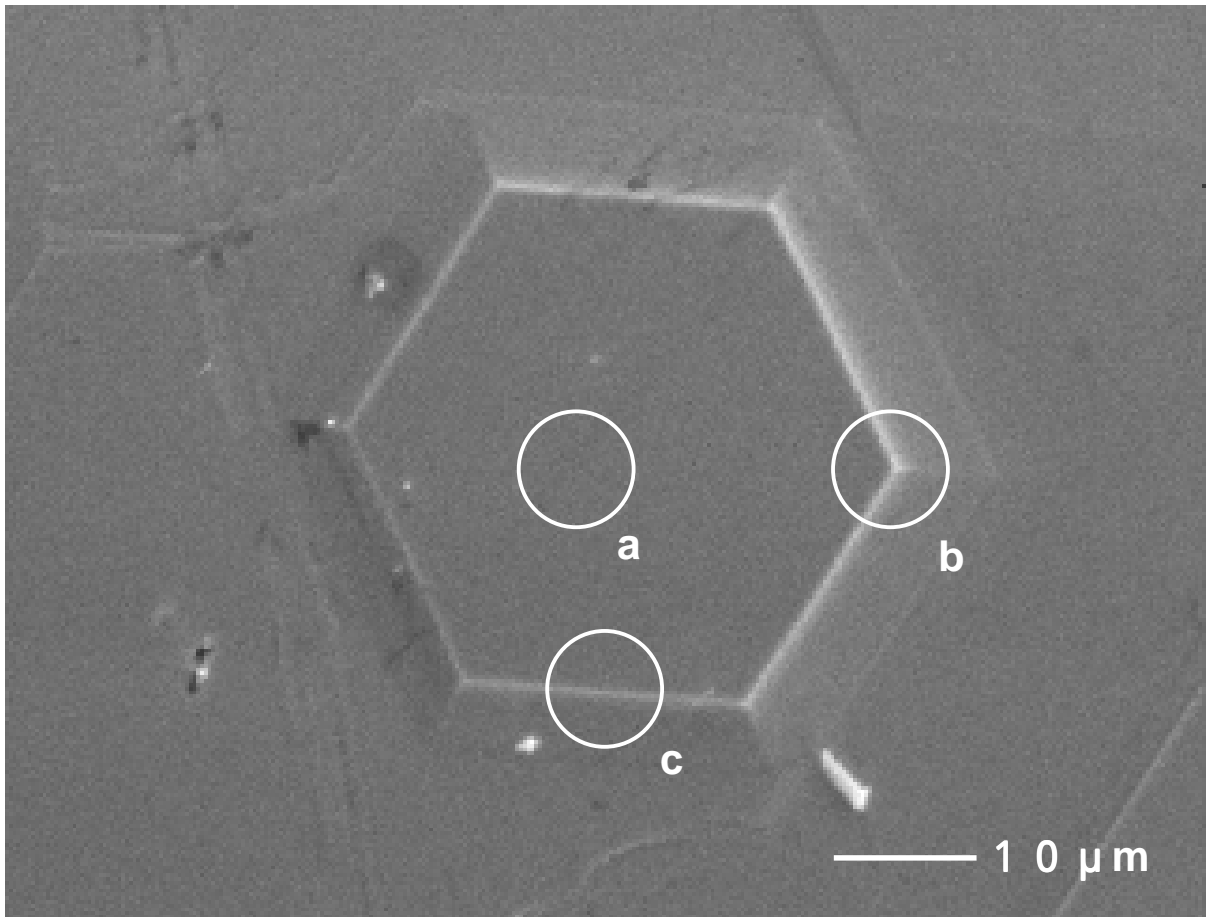


図5 六角形 GaN の SEM イメージ

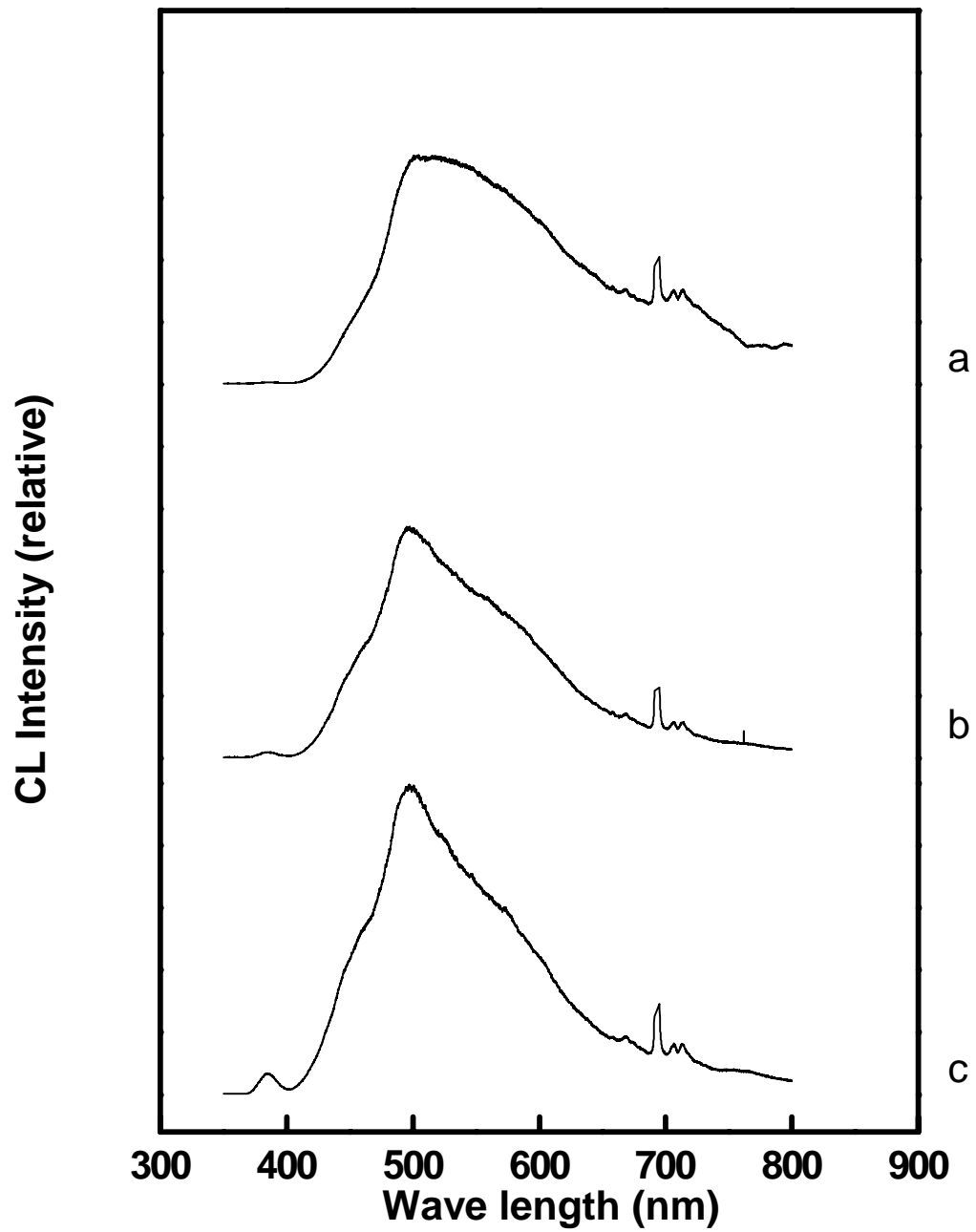


図6 六角形 GaN の CL スペクトル

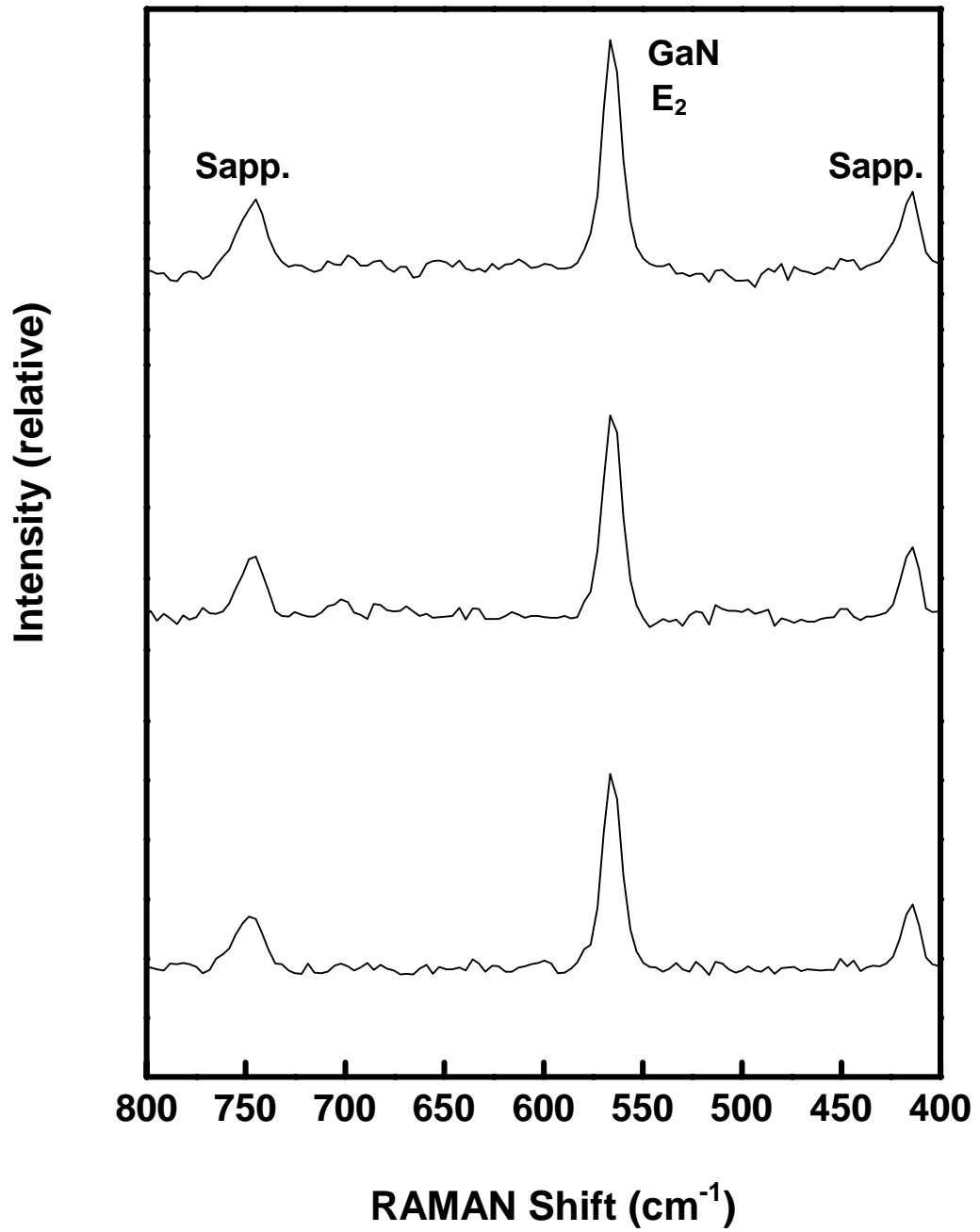


図7 六角形 GaN のラマンスペクトル

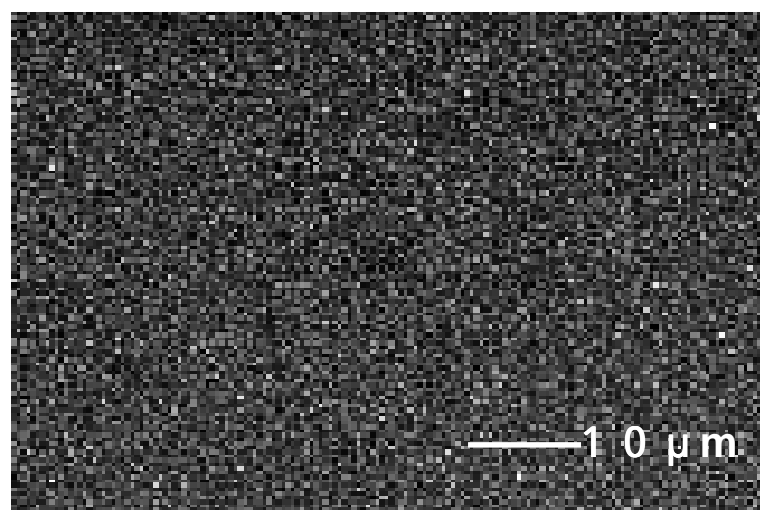
4 章 InGaN の評価

4.1 はじめに

InGaN は窒素化合物 InN と GaN の三元結晶であり、In 組成量によりバンドギャップが 2V~3.4V の間で変化する。これは活性層の In 濃度を変化させることで可能となる。この現象を利用してカンデラクラスの黄、緑、青、紫色の LED が実用化されている。しかし、In の組成量が増加すると均一な結晶成長が難しくなるという組成不均一問題がある。これは In の原子サイズが、Ga や N に比べて非常に大きなサイズであるためである。

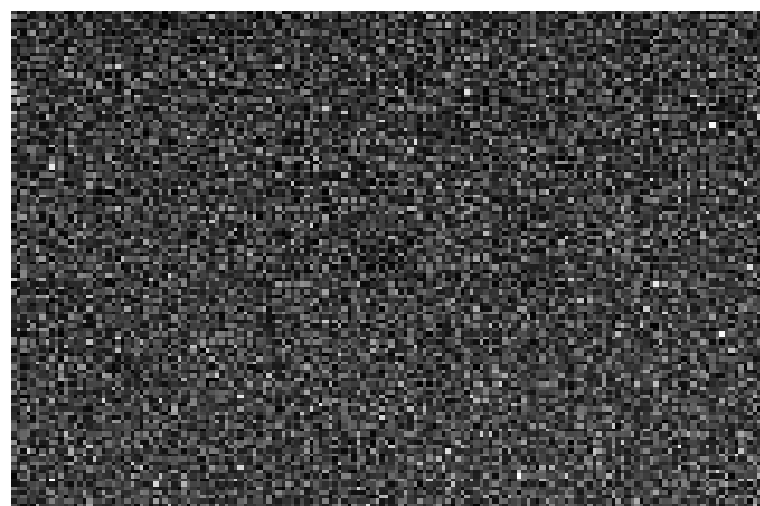
そこで今回は In の組成量がそれぞれ 5%、10%、17%のカソードルミネッセンスとラマンスペクトルを測定し、InGaN の In 組成量による結晶性及び発光エネルギーについて調べた。図 8 では、InGaN の SEM イメージを示している。

InGaN は GaN と同様に、格子整合する基板が少ない。そのためサファイア基板上に成長させた GaN 薄膜の上に InGaN を成長させている。

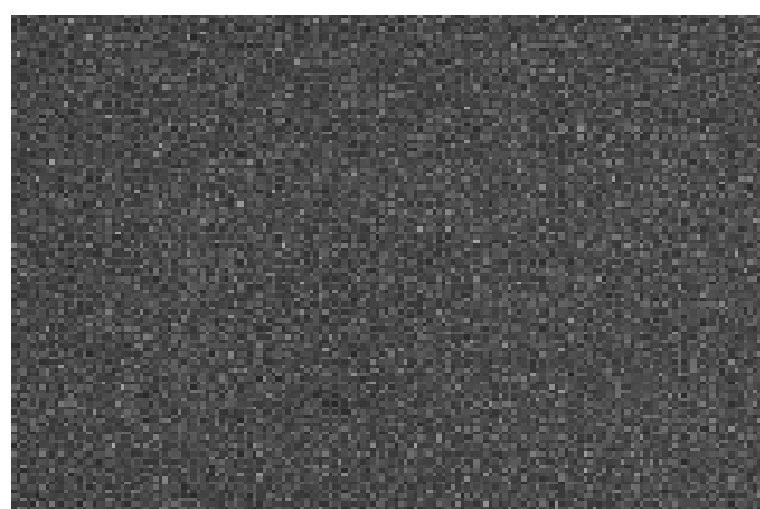


In contents

5%



10%



17%

図 8 InGaN の SEM イメージ

4.2 InGaN の CL

図 10 に In の組成量が下から 5%と 10%と 17%の CL スペクトルを示す。測定時間は 10s である。このグラフは系の特性を含んでいるため本来の CL スペクトルではない。

まず In の組成が 5%のグラフだが、バンド端からの発光スペクトルが 480nm くらいにでていることがわかる。また、ディープレベルからの発光はほとんど見受けられない。

次に In の組成が 10%のグラフだがバンド端からの発光が著しく弱くなっていることがわかる。またバンド端の発光波長が 5%のもの比べてシフトしていることがわかる。更に、5%ではほとんど見られなかったディープレベルからの発光が見受けられる。

また、In の組成が 17%のグラフだがこのグラフからはバンド端からの発光はわからなくなってしまう。しかし、ディープレベルからの発光は 3 つの中でもっとも強く出ている。このためかどうかはわからないが、このときの CL イメージはほかのもの比べて赤く発光していた。これを図の 9 に示す。またほかで得られた CL イメージも一緒に示す (図 9) 比べてみると明らかに赤く発光していることがわかる。

バンド端の発光は In の組成が増すにつれ弱くなったことから、In の組成が増すと結晶性が悪くなることがわかった。

4.3 InGaN のラマンスペクトル

図 11 に InGaN のラマンスペクトルを示す。測定時間は 60s、In の組成量は下から 5%、10%、17%となっている。

はじめに In の組成が 5%のグラフだが、InGaN の LO フォノンスペクトルが 734cm^{-1} で得られた。また 1462cm^{-1} フォノンが得られた。5%ではこの 2 つのスペクトルしか得られなかったが、強度は 3 つの中で一番強く得られた。

次に In の組成が 10%のグラフだが、同じ位置に InGaN の LO フォノンと 2LO フォノンが得られた。しかし 569cm^{-1} に GaN の E_2 のスペクトルも得られた。

続いて In の組成が 17%のグラフだが、InGaN の LO フォノンスペクトルは出していたが 2LO フォノンスペクトルはほとんど出ていなかった。また GaN の E_2 スペクトルが 3 つの中でもっとも強く出ている。このことははっきりと同定することは出来ないが結晶性と相関があると考えられる。

In の組成を 5%、10%、17%と 3 つの組成量で測定したが全体の強度は 17%が

もっとも弱く、このことから In の組成が増すことによって結晶性が悪くなっていることがラマンスペクトルからも明らかになった。

4.4 まとめ

InGaN の In の組成量が 5%、10%、17%と異なる試料の CL 及びラマンスペクトルを測定したところ、CL では 5%と 10%でバンド端からの発光スペクトルがシフトすることがわかった。17%の場合はバンド端からの発光が無くなりディープレベルのみの発光となっていた。

ラマンスペクトルのほうでは、In の組成量の増加に従い全体のラマン強度が弱くなっていることから、In の組成量が増加すると結晶性が悪くなることがわかった。

また In の組成量増加による組成不均一のため、組成量が増加するに従って GaN のピークがよく出ていたことについては、はっきりと同定することは出来ないが結晶性と何らかの相関があるのではないかと考える。

更に、In の組成量の増加に従いラマンスペクトル強度が全体的に弱くなっていることから発光強度が悪くなることがわかった。

また CL イメージが In の組成が 5%と 17%を比較すると、5%では青白い発光であったのに対し、17%の方では赤い発光であったことから、In の組成が増すことによって、発光波長が長くなることがわかった。

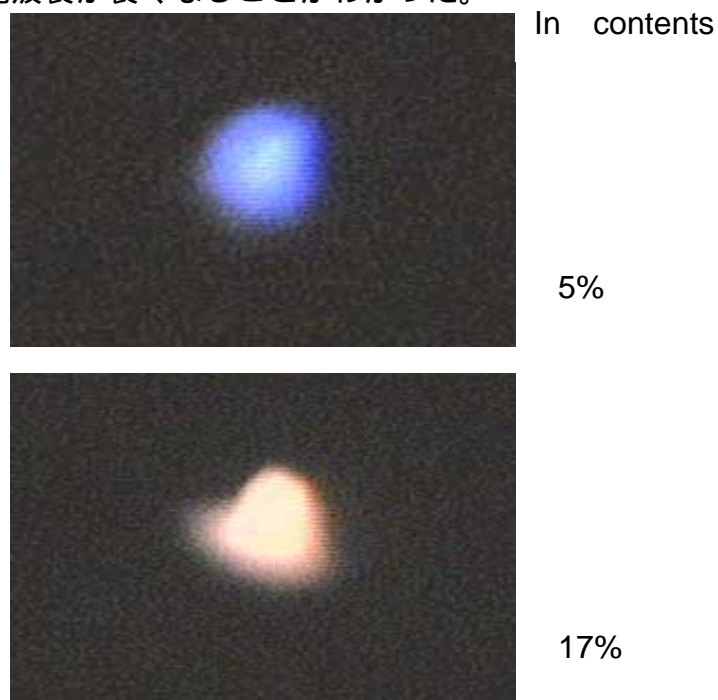


図9 CL イメージ

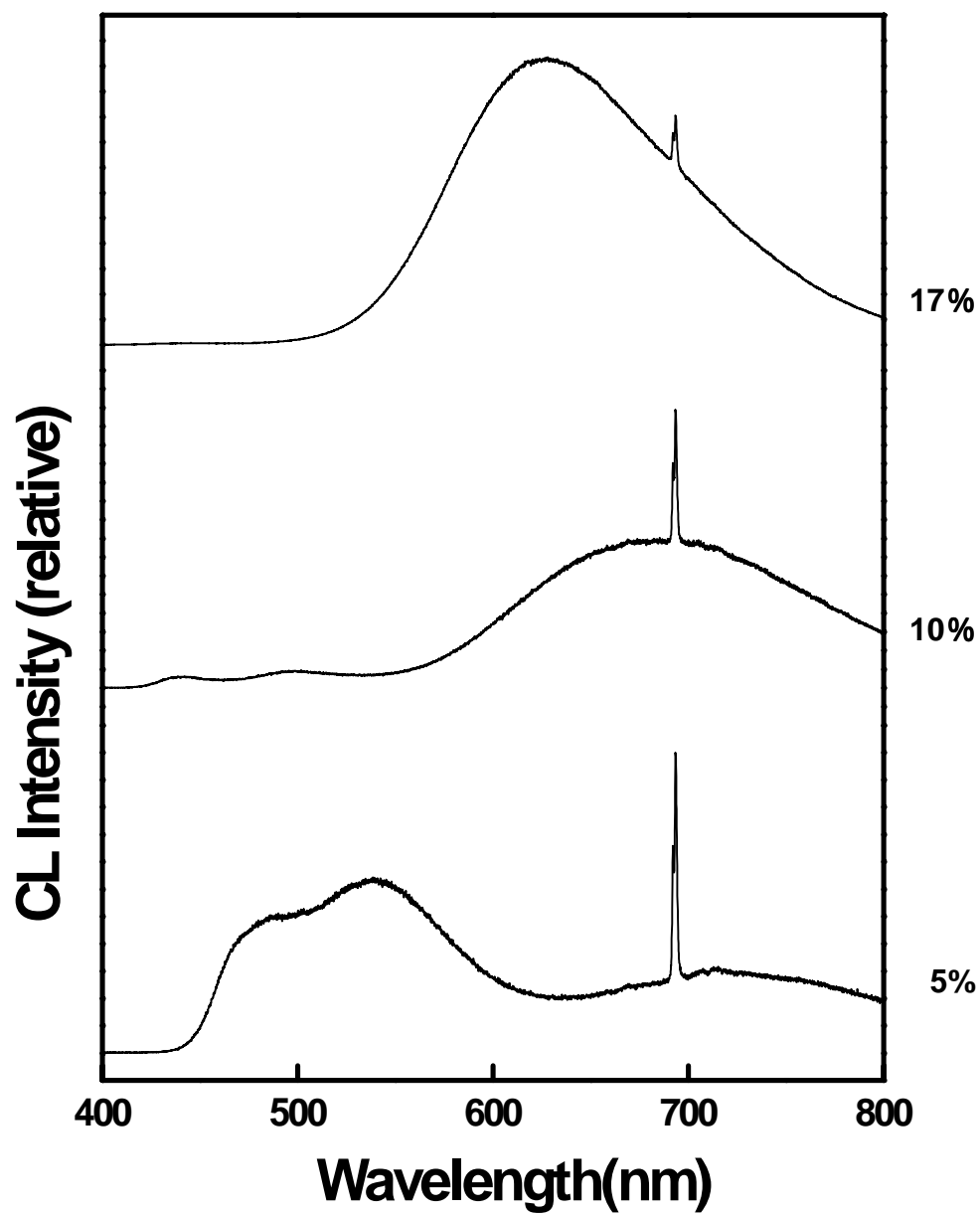


図 10 InGaN の CL スペクトル

In contents

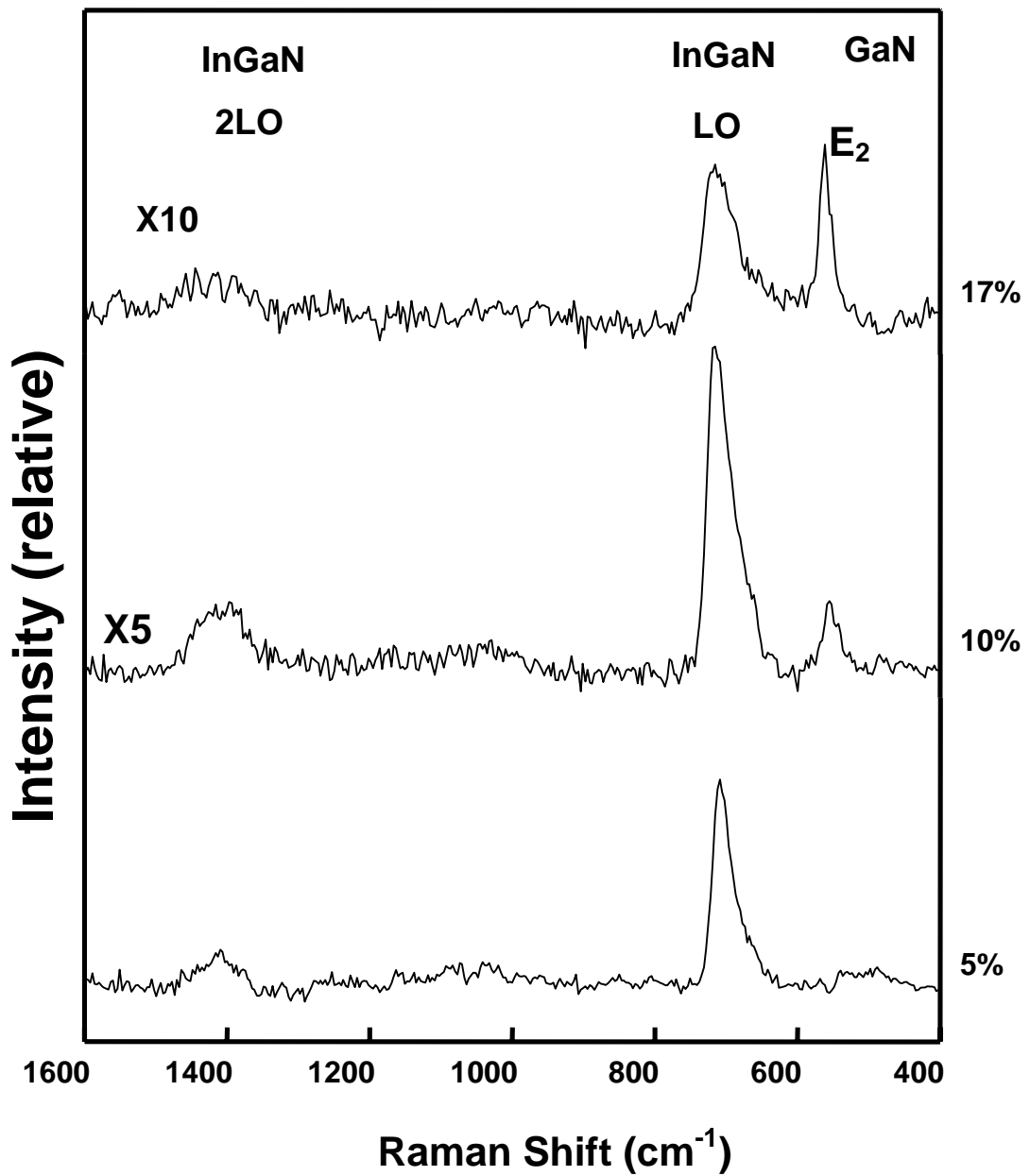


図 11 InGaN のラマンスペクトル

5 章 結論

走査電子顕微鏡-ラマン分光複合装置はこれまでになかった新しい測定装置で、これを用いて GaN を測定することで新しい結果を得ることが可能になると考える。

今回、GaN と InGaN の CL とラマンスペクトルを測定した。その結果 GaN は GaN の成長過程で出来てしまった六角形の面、角、辺の CL スペクトルとラマンスペクトルを測定した。ラマンスペクトルでは違いが見受けられなかった。

CL スペクトルのほうではバンド端からの発光が面からもっとも強く得られることがわかった。またディープレベルからの発光はまったくバンド端からスペクトルの得られなかった辺から一番強く得られ、はっきりと同定することは出来ないが、結晶性と相関があるのではないかと考えた。また 690nm の鋭いピークについてもはっきりと同定することはできないが、720nm にサイドバンドを持った電子の遷移点ではないかと考える。

また InGaN では In の組成が 5%、10%、17% の 3 つについて CL スペクトルとラマンスペクトルを測定した。ラマンスペクトルのほうでは In の組成が増すにつれラマン強度が弱くなっていることから、In の組成が増すと結晶性が悪くなることがわかった。In の組成が増すことによって強く出てきた GaN の E_2 についてははっきり同定することは出来ないが、結晶性と相関があるものと考え。

CL スペクトルのほうでも In の組成が増すとバンド端からの発光強度が弱くなったことから In の組成が増すと結晶性が弱くなることがわかった。こちらもディープレベルからの発光が一番バンド端からの発光が弱かった In 組成が 17% からが一番強かったため、ディープレベルと結晶性の相関があると考え。

更に、こちらにも 690nm から鋭いピークが得られたがこれも GaN と同様にはっきりと同定することはできないが、720nm にサイドバンドを持った電子の遷移点ではないかと考える。

参考文献

- 1) 赤崎勇編著:アドバンストエレクトロニクスシリーズ I - 21 III族窒化物半導体
- 2) 田中俊一、末松安晴一 共編、大越孝敬:オプトエレクトロニクス用語辞典
- 3) 河東田隆:KATODA LABORATORY RESEARCH REPORT Vol.1 レーザラマン分光法による半導体の評価(I)
- 4) 日本電子ホームページ <http://www.jeol.co.jp>
- 5)G.K.Vemulapalli:Physical Chemistry
- 6)U. Hömmerich at al. OPTICAL CHARACTERIZATION OF ERBIUM DOPED III-NITRIDES PREPARED BY METALORGANIC MOLECULAR BEAM EPITAXY
- 7)aschner at al. Evidence for Phase Separation in InGaN by Resonant RANAN Scattering
- 8)D.Behr at al Resonant Raman Scattering in GaN/(AlGa)N single quantum wells

謝辞

最後に本研究を行うに際し、貴重な御指導と SEM-RAMAN を任せていただいたことに、高知工科大学工学部教授 河東田 隆 博士に深甚な万謝を捧げる次第であります。

本研究を進めるにあたり適切なご助言と、資料の提供をしていただいた、高知工科大学工学部 西田 謙 助手に深甚な感謝の意を表し上げます。

SEM-RAMAN の操作を懇切丁寧にご指導していただき、また調整にも惜しみない協力を頂きました松下寿株式会社 猪本 秀夫 氏に甚大なる謝意を表します。

惜しみない協力を頂きました、本学大学院 森沢 桐彦 氏に深く感謝いたします。

本研究の共同研究者 石田 祐樹に感謝いたします。

そして同じ研究室の赤木 敏和、上条 富士太、熊谷 耕一、白川 宰、寺西 正臣、野中 英治、前田 裕子、松岡 学、安岡 圭介の皆様感謝いたします。