

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：32682

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25790049

研究課題名(和文) 液浸ラマン分光法によるIII-V化合物半導体最表面の異方性応力評価技術の確立

研究課題名(英文) Examination of anisotropic stress state evaluation in III-V compound semiconductors by oil-immersion Raman spectroscopy

研究代表者

小瀬村 大亮 (KOSEMURA, Daisuke)

明治大学・研究・知財戦略機構・客員研究員

研究者番号：00608284

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：GaN最表面の異方性応力評価手法について検討した。本課題で重要なひずみラマンシフト係数について応力印加装置を用いた手法とラマン、X線回折を使った手法で導出した。液浸と表面増強ラマンの技術を組み合わせてGaN最表面の情報を抽出した。c, a, m, s面のラマン偏光選択則を明らかにした。液浸ラマンで励起したE1T0のピーク位置が異常を示し、これはフォノンmixingに因ることを明らかにした。フォノンmixingの式を用いた異方性応力評価手法について検討した。本課題で得られた上記の成果は、GaNの応力評価の観点で重要な知見を含んでおり、GaN系材料の結晶評価技術、成長技術に貢献できると考えている。

研究成果の概要(英文)：Anisotropic stress states at the surfaces of GaN samples were studied. Strain-shift coefficients which are important to accomplish this study were introduced by using a tool for strain introduction as well as methodology with Raman spectroscopy and X-ray diffraction. The information at the surface of the GaN sample was extracted by the combination of oil-immersion Raman and surface-enhanced Raman. The Raman polarization selection rules not only for c-plane but also for a-, m-, and s-plane GaN were experimentally and numerically examined. An anomalous behavior of the E1T0 peak excited by oil-immersion Raman was observed, which was attributed to the phonon mixing effect. The anisotropic stress state in the GaN can be evaluated using this phonon mixing effect. The results described above include important insights regarding the stress evaluation in GaN, which can contribute to the technology of measurement and crystal growth for GaN related materials.

研究分野：半導体電子物性

キーワード：III-V化合物半導体 GaN 非極性面 液浸ラマン分光法 表面増強ラマン分光法 フォノン ウルツ鉦構造 カソードルミネッセンス

### 1. 研究開始当初の背景

III-V 化合物半導体は発光デバイス、高周波高耐圧トランジスタなどの主要な材料であり、通信、照明、輸送など生活していく上で重要なアプリケーションに多用される。上記デバイスを高性能化する余地は大いにあると考えられ、その中でも大きな割合を占めるのが III-V 半導体基板の高品質化である [1]。

III-V 半導体の中で注目度の高い GaN 系材料は wurtzite 構造であり、どんなに高品質な薄膜を成長させても通常用いられる光学的対称軸面 (c 面) を採用する限り強い内部電界の存在がデバイス特性の改善を制限する [2]。そこで、非極性面として a, あるいは m 面、半極性面として s 面成長が提案されている [3]。一方、c 面以外の方角で成長する場合、格子定数や熱膨張係数などの物性が異方性を持つため、III-V 半導体に異方性応力 (歪) が必然的に生じる。その他の課題として、GaN, あるいは Al を添加した AlGaIn は比較的大きなバンドギャップを持つことが特徴で、可視光領域の光に対して透明に振る舞う。このため GaN 系材料の最表面評価、あるいは AlGaIn 薄膜の評価は一般的に困難である。高品質な III-V 半導体の非極性面成長を達成するためには最表面の異方性応力評価技術の確立が望まれている。

### 2. 研究の目的

主要な半導体デバイス材料である III-V 半導体結晶の高品質化を行うために、結晶成長において重要な“応力評価”の観点から、III-V 半導体結晶制御の研究を行う。前述の問題点を鑑みて、高品質な結晶を得るためには、III-V 半導体最表面の異方性応力を正確に評価して、成長条件を最適化する必要がある。

我々がこれまでに進めてきた Si 歪の正確な計測、微細メサ加工が施された Si, SiGe の異方性 2 軸応力評価、および試料最表面測定技術を本課題に拡張して、III-V 半導体最表面の異方性応力評価技術の確立を試みる [4-7]。そして、高品質な III-V 半導体の成長条件に関する知見を得て、各種化合物半導体デバイスの高性能化に貢献する。

### 3. 研究の方法

項目	年度	H25年度	H26年度
フォノン変形ポテンシャルの導出 (GaN, AlN, InN, AlGaIn, InGaIn など)		III-V 半導体の PDPs 導出	
		同時並行で進める	表面評価手法の確立
III-V 化合物半導体の表面評価手法の確立			フィードバック
液浸ラマン分光法による異方性応力の評価			
a 面成長 III-V 半導体の高品質化の検討		予備的検討	比較検討 a 面 III-V 半導体の高品質化の知見提供
その他		可能なら随時 報告・計画見直し	国内外学会発表・論文投稿 最終報告

Fig. 1 Research schedule suggested in the application submitted.

Fig. 1 に申請書に記載した研究計画線表を示す。まず、正確に異方性応力を評価するためには、高い精度のフォノン変形ポテンシャル (PDPs: phonon deformation potentials) が必要となる。この PDPs を用いてラマン波数シフトを歪、あるいは応力に変換できる。PDPs を得るために、2 種類のアプローチを採用した。1 つ目は、本研究で試作した 2-4 インチ基板に引っ張り応力を印加可能な応力印加装置を利用して、GaN のラマンピークシフトと印加応力の関係から PDPs を求めた。2 つ目は、GaN の E<sub>2</sub> モードのピーク位置と XRD で求めた応力値から PDPs を導出した。次に、GaN 最表面の評価を行うために、液浸と組み合わせた表面増強ラマン分光法 (SERS: surface enhanced Raman spectroscopy) を適用した。そして、GaN の異方性応力評価手法を検討するために、液浸ラマン測定を行った。c 面以外の結晶面をラマンで評価する上で、各モードのラマン活性配置を予め把握する必要がある。そこで、c 面に加えて、a, m, および s 面 GaN 基板を準備してラマン活性配置を確認した後、ラマン偏光選択則の計算結果と比較した。その他に、カソードルミネッセンス (CL: cathodoluminescence) を用いて GaN の直接遷移発光を観測して、その他の手法で得られた結果の理解を深めた。本課題で準備した GaN 試料を Table 1 に示し、その中の No1 における断面透過型電子顕微鏡 (TEM: transmission electron microscopy) 像を Fig. 2 に示す。

Table 1 GaN samples prepared in this study.

No	Name	Surface orientation	Doping level	Stress	Off-angle
1	GaN on Si	c-plane: (0001)	< 1E+15	Tensile	Just
2	GaN on Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	c-plane: (0001)	< 1E+15	Compressive	0.15° to a-plane
3	GaN on Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	c-plane: (0001)	< 1E+16	Compressive	
4	GaN on Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	c-plane: (0001)	< 5E+18	Compressive	
5	Bulk GaN	a-plane: (2-1-10)	2-3E+17	Stress-free	0.2° to m-plane
6	Bulk GaN	m-plane: (11-20)	1.3E+17	Stress-free	2.95° to a-plane
7	Bulk GaN	s-plane: (20-21)	6.7E+17	Stress-free	4.77° to c-plane

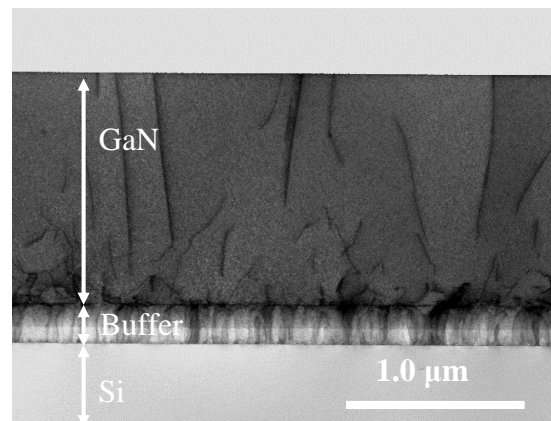


Fig. 2 Cross-sectional TEM image for sample No1.

#### 4. 研究成果

(1) 応力印加装置を用いた GaN PDPs の導出  
本課題で設計した応力印加装置の設計図を Fig. 3(a)に示す。調節ネジでウェハを押し込むことによりウェハ面内等方性 2 軸応力  $\sigma_{\text{biaxial}}$  が導入される。Stoney's equation を用いて調節ネジの間隔  $d$  と応力  $\sigma$  が関係付けられる。Fig. 3(b)に試料 No3 に応力印加 ( $d = 0.1, 0.2, 0.3$  mm) した結果を示す。E<sub>2high</sub> ピーク位置をプロットした結果を Fig. 3(c)に示す。 $d$  増加、つまり  $\sigma$  増加に伴い、線形的に低波数シフトすることが分かる。この結果より、Eq. (1)が得られた。

$$\Delta\omega_{\text{E2high}}[\text{cm}^{-1}] = -4.38 \times \sigma_{\text{biaxial}}[\text{GPa}] \quad (1)$$

この値は Kisielowski *et al.* が提案した  $-4.2 \pm 0.3[\text{cm}^{-1}/\text{GPa}]$  と近い[8]。

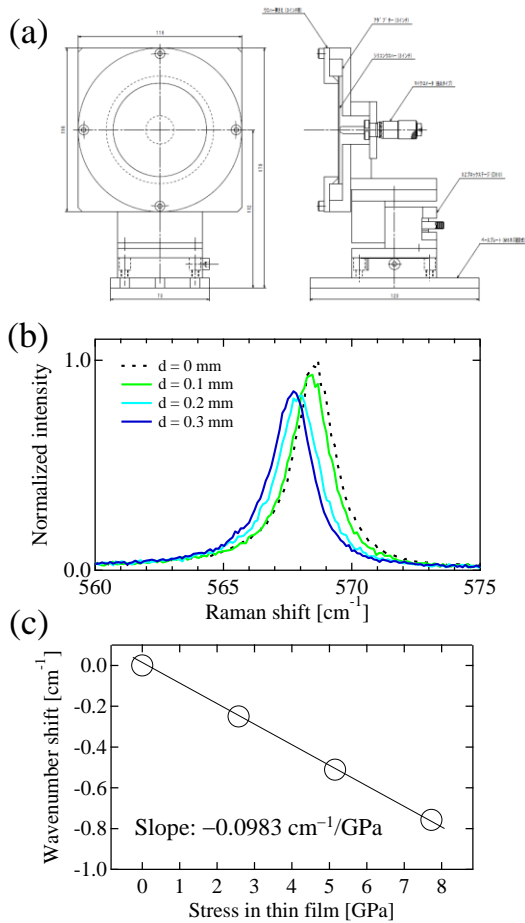


Fig. 3 (a) Schematic of the tool for stress introduction, (b) Raman spectra of GaN during stress introduction, and (c) Raman wavenumber shift in GaN as a function of stress.

#### (2) ラマンと XRD から導出した GaN PDPs

Fig. 4(a), および(b)に試料 No1 と No2 におけるラマン、および XRD で得られたデータを示す。GaN と基板材料との格子不整合から予想される面内引っ張り歪 (GaN/Si)、および圧縮歪(GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)に起因するピークシフ

トを両データで確認した。この結果より、面内等方性 2 軸応力の PDPs として使われる、所謂  $b$  係数を計算した (Table 2)。値にばらつきが確認される理由として、GaN の結晶性が試料ごとに異なり、歪 (応力) に対するラマンの応答が変化したことが挙げられる。実際、ラマン、XRD あるいは次節の CL の結果より、スペクトルの線幅が GaN/Si と GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> で異なる。

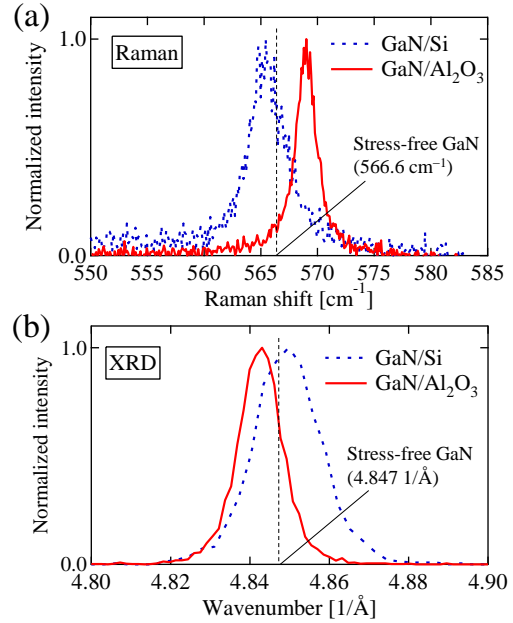


Fig. 4 (a) Raman spectra and (b) XRD profiles for GaN on Si and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> substrates.

Table 2 Summary of PDPs values obtained in this study and from literatures.

Parameter	Stress introduction		Literature
	GaN/Si	GaN/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
$\sigma_{\text{biaxial}}$ [MPa]	468	-831	
$\Delta\omega_{\text{E2high}}$ [cm <sup>-1</sup> ]	-0.8	-1.3	+2.5
<sup>a</sup> $b$ coefficient [cm <sup>-1</sup> /GPa]	-4.38	-2.78	-1.67
<sup>b</sup> $b$ coefficient [cm <sup>-1</sup> /GPa]			-3.43
<sup>c</sup> $b$ coefficient [cm <sup>-1</sup> /GPa]			-4.2
<sup>d</sup> $b$ coefficient [cm <sup>-1</sup> /GPa]			-2.9

<sup>a</sup>This work <sup>b</sup>Ref. 13 <sup>c</sup>Ref. 8 <sup>d</sup>Ref. 14

#### (3) CL による GaN 評価

CL の結果より、GaN/Si では GaN の発光エネルギーとして知られている 3.4 eV ( $\lambda = 364.7$  nm) に対して高波長シフトが観測されバンドギャップが引っ張り歪効果で収縮したことが分かり、一方、GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> では逆の低波長シフトでバンドギャップが圧縮歪効果により増大したことが分かる (Fig. 5(a))。ラマン、および XRD の結果と整合する。Fig. 5(b)に CL ピークの加速電圧依存性を示す。両試料ともに、加速電圧増加に伴い、長波長シフトが確認された。Fig. 2 で示した TEM の結果と合わせて考えると、1 つの理由として、加速電圧が高い場合、電子線の侵入長は深くなり、欠陥密度の高い界面付近の情報を多く含む。欠陥を多く含む分、バンドギャップが

収縮したように観測されたと考えられる。

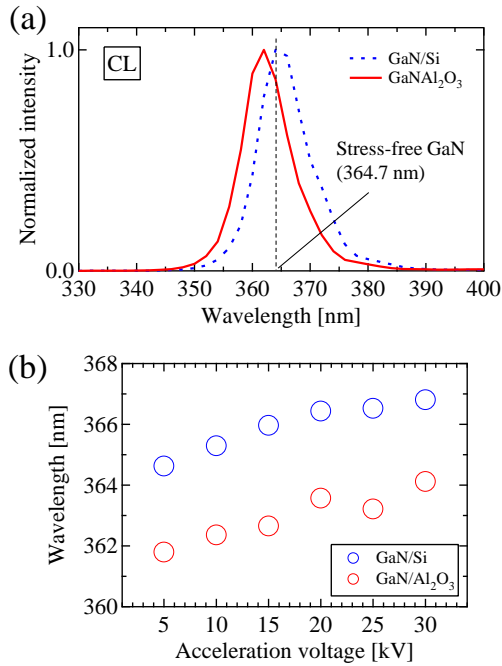


Fig. 5 (a) CL spectra of GaN on Si and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> substrates and (b) Acceleration voltage dependence on the CL peak position of GaN.

Table 3 Parameters obtained by CL.

Sample	$\lambda$ [nm]	$E$ [eV]	$\Delta E$ [meV]	$\sigma_{\text{biaxial}}$ [MPa]
GaN/Si (No1)	365.29	3.39	-5.47	203
GaN/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (No2)	362.36	3.42	21.98	-814

#### (4) SERS による GaN 試料最表面評価

GaN の最表面を評価するために SERS を用いた。本研究で液浸ラマンと組み合わせることにより効率的に銀ナノ粒子における局在プラズモン共鳴効果を増大可能なことが明らかとなった。これは、屈折率の大きな材料で銀ナノ粒子を覆うことにより共鳴波長が励起光の波長に近づいたことと、高 numerical aperture (NA) レンズにより集光された光の中に多くの  $z$  偏光成分が含まれ、この  $z$  偏光が局在プラズモン励起を促進したと考えられる [9]。銀ナノ粒子はスピニング (7000 rpm/30 sec) とその後の焼結 (250 °C/5 min) で形成した。

SERS 測定で得られた試料 No1 の結果を Fig. 6 に示す。ラマンスペクトルは Si 基板のピークで規格化した。565 cm<sup>-1</sup> 付近に GaN の E<sub>2high</sub> モードが見られる。通常のラマンで観測された E<sub>2high</sub> と比較するとラマン強度の増大、半値幅の減少、およびピーク位置の低波数シフトが確認された (Table 4)。ラマン強度増大の結果より、Eq. (2) を用いて SERS 効果による Enhancement factor  $\eta$  を計算した結果、約 61 が得られた。

$$\eta = \frac{I_{\text{SERS}}}{I_{\text{normal}}} \cdot \frac{V_{\text{normal}}}{V_{\text{SERS}}} = \frac{I_{\text{SERS}} \cdot \pi r^2 \cdot l}{I_{\text{normal}} \cdot \pi r^2 \cdot \phi} \sim 61 \quad (2)$$

ここで、 $I_{\text{SERS}}$ ,  $I_{\text{normal}}$ ,  $V_{\text{SERS}}$ ,  $V_{\text{normal}}$ ,  $r$ ,  $l$ , および  $\phi$  は、それぞれ SERS で得られた GaN のラマン強度、通常のラマンで得られた GaN の強度、SERS 条件の散乱体積、通常条件の散乱体積、スポット半径、光の侵入長、および銀ナノ粒子の直径である。

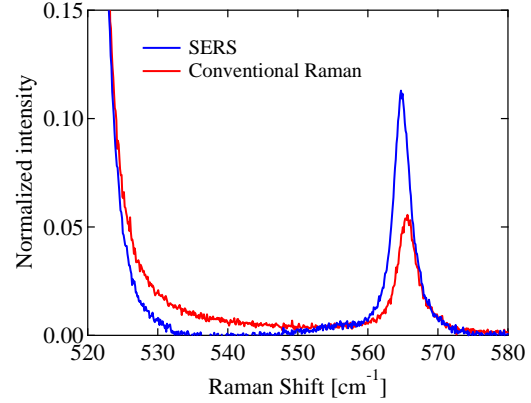


Fig. 6 Raman spectra in SERS and conventional conditions.

Table 4 Parameters obtained in SERS and conventional Raman.

Parameter	SERS	Conventional Raman
Raman shift [cm <sup>-1</sup> ]	564.9	565.6
FWHM [cm <sup>-1</sup> ]	2.8	3.2
Intensity ratio of GaN to Si	0.11	0.6
Enhancement factor	~61	

半値幅の減少については、前節の CL データの解釈と同様、SERS により、欠陥の少ない表面領域の信号が支配的であることに因ると考えられる。

#### (5) 各種面方位 GaN のラマン偏光選択則の検討

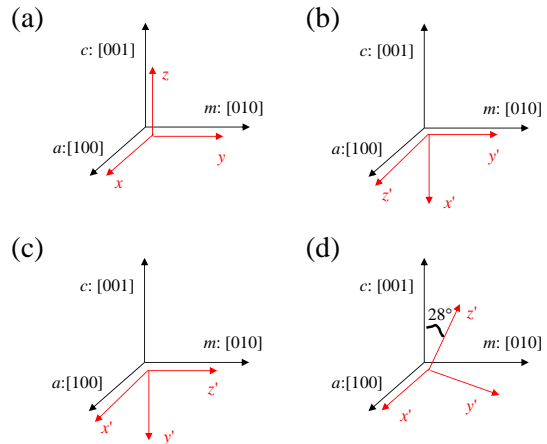


Fig. 7 Coordinates for (a)  $c$ -, (b)  $a$ -, (c)  $m$ -, and (d)  $s$ -plane GaN samples.

Mode	Dry condition				Oil-immersion condition			
	$z(x\ x)z$	$z(x\ y)z$	$z(y\ x)z$	$z(y\ y)z$	$z(x\ x)z$	$z(x\ y)z$	$z(y\ x)z$	$z(y\ y)z$
(a) $A_1(z)$	✓			✓	✓			✓
$E_1(x)$					✓			✓
$E_1(y)$						✓		✓
$E_2$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Mode	Dry condition				Oil-immersion condition			
	$z(x\ x)z$	$z(x\ y)z$	$z(y\ x)z$	$z(y\ y)z$	$z(x\ x)z$	$z(x\ y)z$	$z(y\ x)z$	$z(y\ y)z$
(b) $A_1(z)$	✓			✓	✓			✓
$E_1(x)$					✓			✓
$E_1(y)$		✓	✓	✓		✓	✓	✓
$E_2$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Mode	Dry condition				Oil-immersion condition			
	$z(x\ x)z$	$z(x\ y)z$	$z(y\ x)z$	$z(y\ y)z$	$z(x\ x)z$	$z(x\ y)z$	$z(y\ x)z$	$z(y\ y)z$
(c) $A_1(z)$	✓			✓	✓			✓
$E_1(x)$		✓	✓	✓		✓	✓	✓
$E_1(y)$						✓		✓
$E_2$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Mode	Dry condition				Oil-immersion condition			
	$z(x\ x)z$	$z(x\ y)z$	$z(y\ x)z$	$z(y\ y)z$	$z(x\ x)z$	$z(x\ y)z$	$z(y\ x)z$	$z(y\ y)z$
(d) $A_1(z)$	✓			✓	✓			✓
$E_1(x)$		✓	✓	✓		✓	✓	✓
$E_1(y)$						✓		✓
$E_2$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Table 5 Calculated Raman polarization selection rules for (a)  $c$ -, (b)  $a$ -, (c)  $m$ -, and (d)  $s$ -plane GaN, respectively.

$c$ ,  $a$ ,  $m$ , および  $s$  面 GaN のラマン偏光選択則について検討した。ラマン偏光選択則は Eq. (3) で計算される。

$$I \propto \sum_j |e_s^T R_j e_i|^2 \quad (3)$$

ここで、 $I$ ,  $e_s$ ,  $e_i$ , および  $R_j$  は、それぞれラマン強度、散乱電場、入射電場ベクトル、および各モードのラマンテンソルである。GaN のラマンテンソルは文献[10]を参照した。上付き  $T$  は転置を示す。通常ラマンテンソルは Fig. 7(a) で示される座標で定義される。その他の面方位 ( $a$ ,  $m$ ,  $s$  面) のラマン偏光選択則を計算するために Eq. (4) により座標変換する必要がある[11]。

$$T'_{ij} = \alpha_{ik} \alpha_{jl} T_{kl} \quad (4)$$

$T$ ,  $T'$ , および  $\alpha$  は座標変換前の 2 階テンソル、変換後の 2 階テンソル、および方向余弦マトリクスである。Eq. (3), および (4) を用いて計算した  $c$ ,  $a$ ,  $m$ , および  $s$  面 GaN のラマン偏光選択則を Table 5 に示す。計算結果より、液浸ラマンにより観測できるモードが増えることが分かる。例えば、 $c$  面 GaN の場合、液浸ラマンを用いれば、本来不活性な  $E_1$  を励起できることが分かる。このラマン偏光選択則の計算結果を実証するために、 $c$  面 GaN について液浸ラマン測定を行った。結果を次節に示す。

#### (6) 液浸ラマン分光法による GaN の不活性フォノン励起

Fig. 8 の液浸ラマンの結果より  $E_2$  high モードの低波数側に明瞭な  $E_1$  TO 起因のピークが確認できる。 $E_1$  TO を液浸ラマンで励起可能な理由は、高 NA 液浸レンズで光を集光する

と高開口角成分が増大して  $c$  面に対して垂直な偏光 ( $z$  偏光) が生じ、この  $z$  偏光により選択則が崩れるためである。

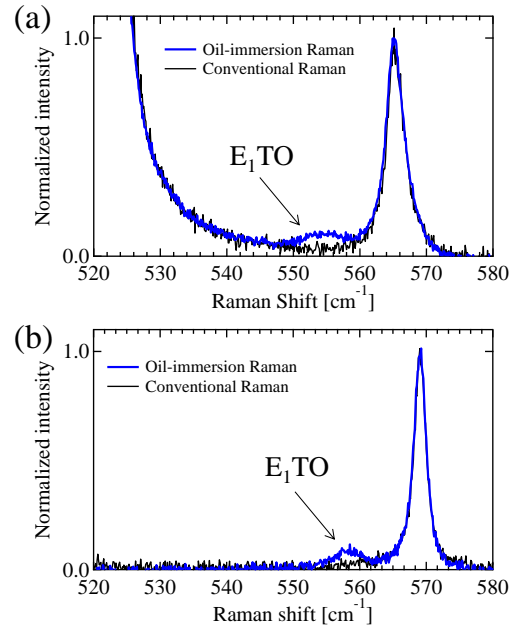


Fig. 8 Raman spectra of GaN on (a) Si and (b)  $Al_2O_3$  substrates in dry and oil-immersion conditions.

液浸ラマンで新たに得られた  $E_1$  TO のピーク位置を詳しく調べるために、液浸ラマンとドライラマンで得られた各モードのピーク位置を Table 6 にまとめた。

$E_2$  high のピーク位置に関して液浸とドライの条件で全く差は見られなかった。一方、液浸ラマンで得られた  $E_1$  TO のピーク位置において、本研究で得られた無歪 GaN の  $E_1$  TO ピーク位置  $558.0\text{ cm}^{-1}$  からのピークシフトに注目すると、異常な挙動を示した。GaN/Si における  $E_1$  TO のピークシフトは  $-4.2\text{ cm}^{-1}$  となり、Si 基板上 GaN に導入された引っ張り歪だけでは説明できない。一方、 $Al_2O_3$  基板上 GaN では圧縮歪が導入されているにもかかわらず bulk GaN と同じ値を示した。この挙動についての考察を以下に示す。

Table 6 Raman peak positions of  $E_2$  high and  $E_1$  TO modes for GaN on Si and  $Al_2O_3$  substrates in dry and oil-immersion conditions.

Measurement condition	Phonon mode	GaN/Si	GaN/ $Al_2O_3$
Dry	$\omega E_2(\text{high})\text{ [cm}^{-1}\text{]}$	565.3	569.1
	$\Delta\omega E_2(\text{high})\text{ [cm}^{-1}\text{]}$	-1.3	+2.5
Oil-immersion	$\omega E_2(\text{high})\text{ [cm}^{-1}\text{]}$	565.3	569.1
	$\Delta\omega E_2(\text{high})\text{ [cm}^{-1}\text{]}$	-1.3	+2.5
	$\omega E_1(\text{TO})\text{ [cm}^{-1}\text{]}$	553.8	558.0
	$\Delta\omega E_1(\text{TO})\text{ [cm}^{-1}\text{]}$	-4.2	$\pm 0.0$

Anastassakis により Eq. (5) で表されるフォノンの mixing モデルが提案された[12]。

$$\omega_{\text{TO}}^2(\theta) = \omega_{\text{A1TO}}^2 \sin^2 \theta + \omega_{\text{E1TO}}^2 \cos^2 \theta \quad (5)$$

上式は、歪導入後の zinc-blende 構造、あるいは wurtzite 構造を持つ結晶のフォノン波数方向に依存してピーク位置が変化することを示す。本課題で取り扱う GaN は wurtzite 構造でありこのモデルが当てはまる。液浸ラマンの場合、上述したように、高開口角成分の寄与が増大するが、この効果は励起されるフォノンの波数方向を変化させる。A<sub>1</sub>TO が E<sub>1</sub>TO に比べ低波数に位置することを考慮すると、Eq. (5)より、液浸ラマンで得られた E<sub>1</sub>TO のピーク位置はその分低波数シフトすることになる。すなわち、GaN/Si では引っ張り歪の低波数シフトに加え、フォノン mixing による低波数シフト分が重畳された結果と解釈できる。一方、GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の場合、圧縮歪による高波数シフトと mixing による低波数シフトがちょうど相殺されたことにより実質ピークシフトが無いように見られたと考えられる。

E<sub>1</sub>TO、および A<sub>1</sub>TO のピークシフトは Eq. (6)と表される。

$$\Delta\omega_{\text{E1TO}(x)} = \frac{p_{11}\epsilon_{11} + p_{12}\epsilon_{22} + p_{13}\epsilon_{33}}{2\omega_0} \quad (6a)$$

$$\Delta\omega_{\text{E1TO}(y)} = \frac{p_{12}\epsilon_{11} + p_{11}\epsilon_{22} + p_{13}\epsilon_{33}}{2\omega_0} \quad (6b)$$

$$\Delta\omega_{\text{A1TO}(z)} = \frac{p_{13}\epsilon_{11} + p_{13}\epsilon_{22} + p_{33}\epsilon_{33}}{2\omega_0} \quad (6c)$$

ここで、 $\omega_0, p_{11}, p_{12}, p_{13}, p_{33}$  は、それぞれ無歪 GaN のピーク位置、および 6 つのうち 4 つの PDPs である。上式に加え Eq. (5)を用いることにより、4 つの PDPs を導出することができる。c 面 GaN の異方性応力に適用できる。

#### (7) まとめと今後の展望

III-V 化合物半導体の中で注目度の高い GaN において最表面の異方性応力評価手法について検討した。本課題を達成するために重要な PDPs について、応力印加装置を用いた手法とラマン、および XRD を使った手法の 2 種類のアプローチを採用して導出した。液浸ラマンと SERS 技術を組み合わせて GaN 最表面の情報を抽出した。上記手法で得られた結果の理解を深めるため CL により GaN の直接遷移発光のピークについて検討した。c 面に加えて、a, m, および s 面のラマン偏光選択則について、実験、および計算を用いて明らかにした。液浸ラマンにより不活性モードである E<sub>1</sub>TO を励起した。新たに得られた E<sub>1</sub>TO のピーク位置が異常を示し、これはフォノン mixing に因ることを明らかにした。フォノン mixing の式を用いることにより異方性応力に必要な PDPs を導出可能になる。今後、本手法の任意面方位への拡張について検討する。本課題で得られた上記の成果は GaN

の応力評価の観点で重要な知見を含んでおり、III-V 化合物半導体、特に GaN 系材料の結晶評価技術、成長技術に貢献できると考えている。

本課題遂行に当たり各種実験を担当した明治大学今井亮佑氏、TEM 観察にご協力頂いた澤本直美氏、XRD 測定にご協力頂いた高輝度光科学研究センター広沢一郎氏に御礼申し上げます。

#### 参考文献

- [1] T. Paskova, Phys. stat. sol. (b) **245**, 1011 (2008). [2] S. Dun *et al.*, Phys. Status Solidi A **209**, 1174 (2012). [3] M. Katsikini *et al.*, Phys. Status Solidi A **209**, 1085 (2012). [4] A. Ogura *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **45**, 3007 (2006). [5] D. Kosemura *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **51**, 02BA03 (2012). [6] D. Kosemura *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 04CA05 (2013). [7] D. Kosemura *et al.*, J. Raman Spectr.sc. **45**, 414 (2014). [8] C. Kisielowski *et al.*, Phys. Rev. B **54**, 17745 (1996). [9] S. Kawata, *Topics in Applied Physics, Near-field Optics and Surface Plasmon Polaritons*, Springer, Berlin, 2001. [10] C. A. Arguello *et al.*, Phys. Rev. **181**, 1351 (1969). [11] J. F. Ney, *Physical Properties of Crystals*, Oxford at the Clarendon Press, 1957. [12] E. Anastassakis, J. Appl. Phys. **81**, 3046 (1997). [13] J.-Y. Lu *et al.*, AIP Advances **1**, 032132 (2011). [14] F. Demangeot *et al.*, Solid State Commun. **100**, 207 (1996).

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① R. Imai, D. Kosemura, and A. Ogura, Oil-Immersion Raman Spectroscopy for c-Plane GaN on Si and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> substrates, ECS Transactions, with reviewing process, **66**, 119-126 (2015), DOI:10.1149/06601.0119ecst

[学会発表] (計 1 5 件)

- ① R. Imai, D. Kosemura, and A. Ogura, Oil-Immersion Raman Spectroscopy for c-Plane GaN on Si and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> substrates, ECS meeting, May 25th, 2015, Chicago, USA  
② 今井亮佑、小瀬村大亮、永田晃基、シティノルヒダヤ・ビンディ・チェモハマドユソフ、木嶋隆浩、山本章太郎、小椋厚志、銀ナノ粒子による電場増強効果を用いた GaN 最表面のラマン測定、応用物理学会春季学術講演会、2014 年 3 月 20 日、青山学院大学、神奈川

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

小瀬村 大亮 (KOSEMURA, Daisuke)  
明治大学・研究・知財戦略機構・客員研究員  
研究者番号：00608284