

inVia™ ラマンマイクロスコープによる 化合物半導体の分析

材料科学

化合物半導体は、次世代デバイスに適した特性をさまざまな応用分野へ提供可能なことから、この 10 年で注目が高まってきている。しかし、次世代デバイスの製造は、材料に課題があり、なかなか進んでいない。主に研究レベルでは克服されてきたものの、工業生産へとスケールアップするところで依然として問題が残っている。

レニショーの inVia ラマンマイクロスコープは、非破壊かつ非侵襲な分析ツールで、材料の振動、結晶、電子構造に関する情報をサブミクロン単位で取得できる。化合物半導体の測定時に、このシステムを使用してラマンスペクトルおよびフォトルミネッセンス (PL) スペクトルを収集することにより、次の情報を取得できる。

- 物質の同定
- 合金の割合
- 歪み/応力
- ドーパント濃度
- 薄膜の膜厚
- 結晶構造のタイプと配向
- 結晶品質と欠陥レベル
- サンプルの均一性
- SiC インクルージョンなどの微粒子分析
- 異物の同定
- サンプル形状 (ウェハの反り)
- (稼働中デバイスの) サンプル温度

本アプリケーションノートでは、inVia ラマンマイクロスコープの性能と材料の課題を調査する能力を示す事例をいくつか紹介する。

AlGaIn/GaN ヘテロ構造の特性評価

GaN ベースのデバイスの開発は、質の悪い材料が原因で長年わたり進まなかった。ここへ来てようやく克服されてきたものの、大量生産に必要なスケールアップは依然として困難である。新しい機器をオンラインで購入し、最適な効率で稼働させるプロセスも同様である。ここでは、inVia ラマンマイクロスコープを品質管理ツールとして使用し、ウェハを調査する方法を説明する。分析したウェハは、300 μ m のサファイア基板の上に形成された 2 μ m の GaN 層上にある 30nm の Al_{0.28}Ga_{0.72}N 層で構成されている。さまざまな励起レーザー波長でラマンスペクトルと PL スペクトルを収集し、構造内の各層を調査した。

図 1 と図 2 に、励起波長を用いて構造の層から収集したスペクトルを示す。これらのモードを分析することにより、結晶品質、応力、自由担体濃度、アルミニウム含有量を定量化できる。

本例では、GaN 層を分析した結果、図 3 a) の E₂ ピーク位置に見られるように、応力がわずかに変化するだけという高レベルの均一性が明らかになっている。この AlGaIn 層は、ウェハ (最大半径 5mm) の縁部で Al 濃度が 0.5% と大きくばらついていることが判明した。inVia Qontor ラマンマイクロスコープが持つ別の利点として、ラマン測定と同時にサンプルの形状を測定できることが挙げられる。これにより、ウェハの反り具合を求めることができる。図 3 b) および c) にこれを示す。



レニショー inVia Qontor® コンフォーカルラマンマイクロスコープ

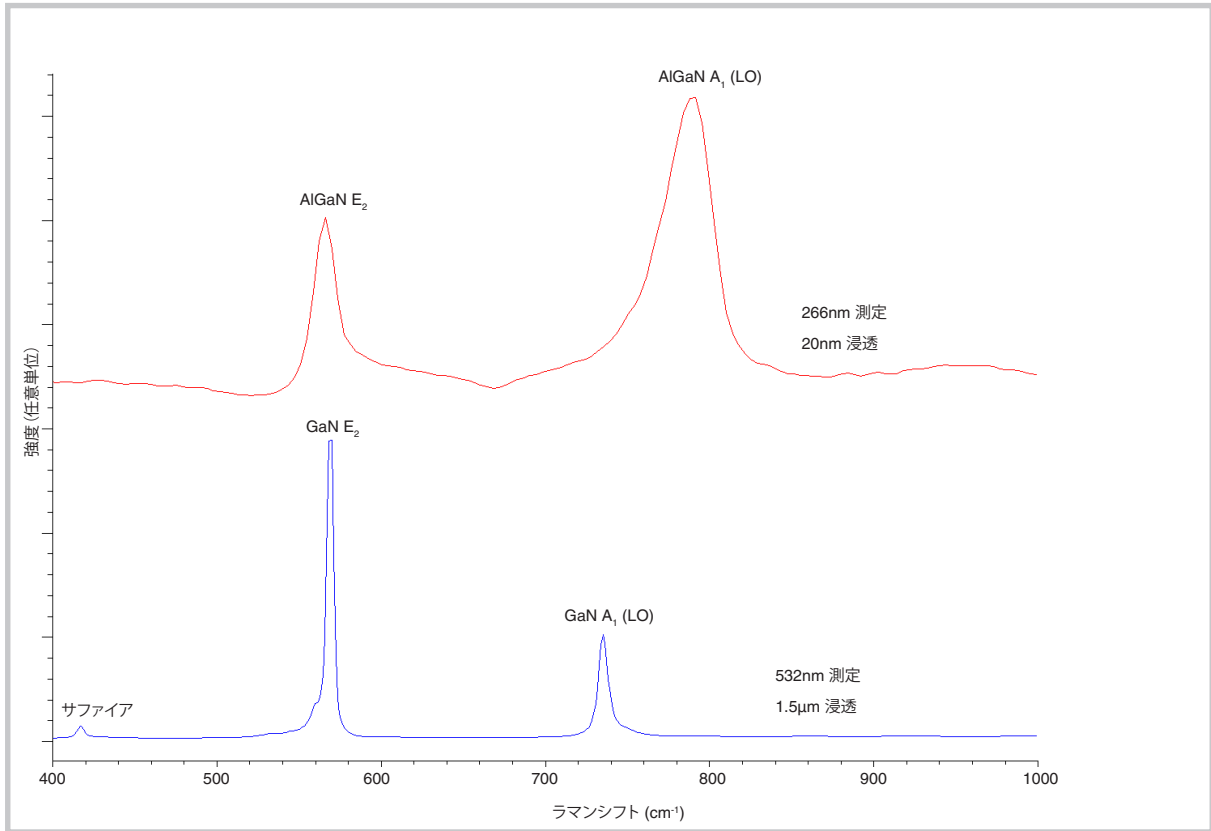


図 1: AlGaIn/GaN ヘテロ構造内の各層のラマンスペクトル。ラマン分光法で調査される深さは、励起波長によって異なる。ここでは励起 UV レーザーを使用しており、極薄 AlGaIn 層を測定できる。

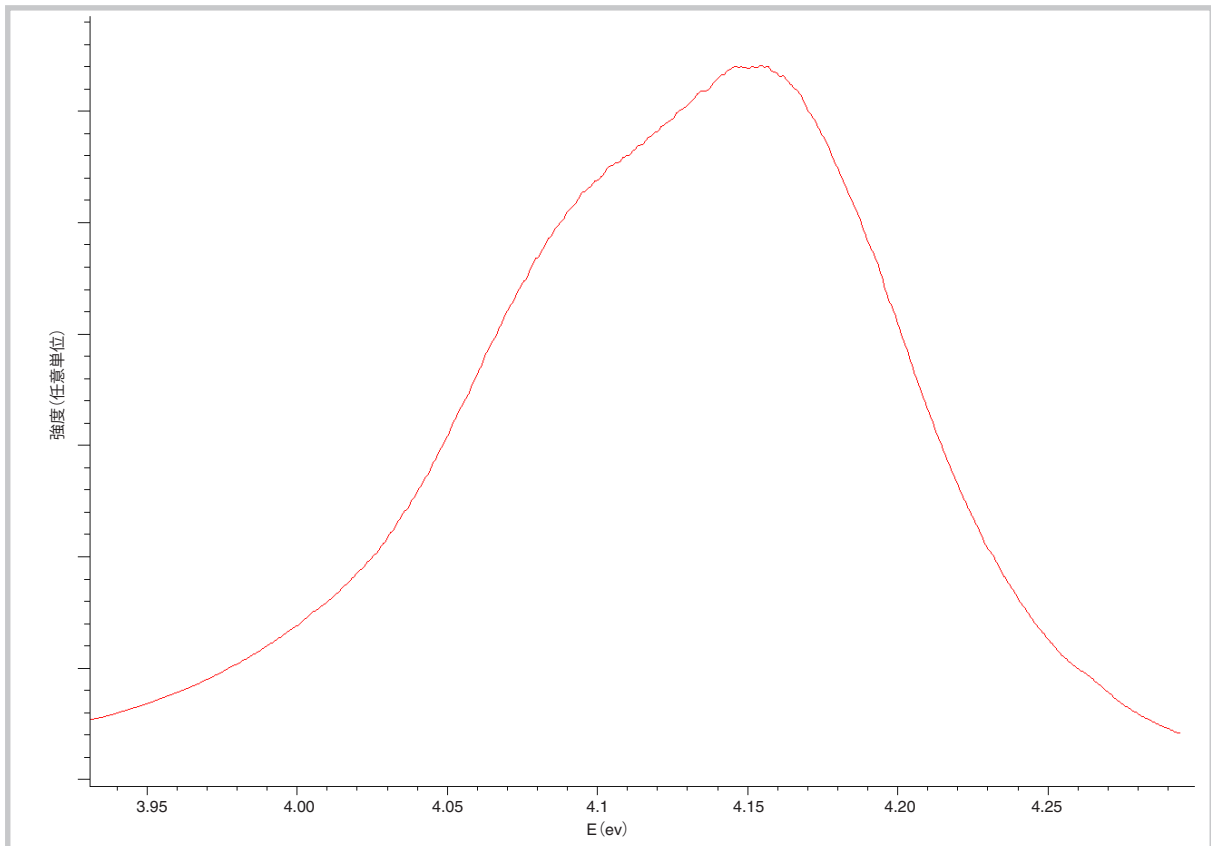


図 2: AlGaIn 層のフォトルミネッセンス (PL) スペクトル。

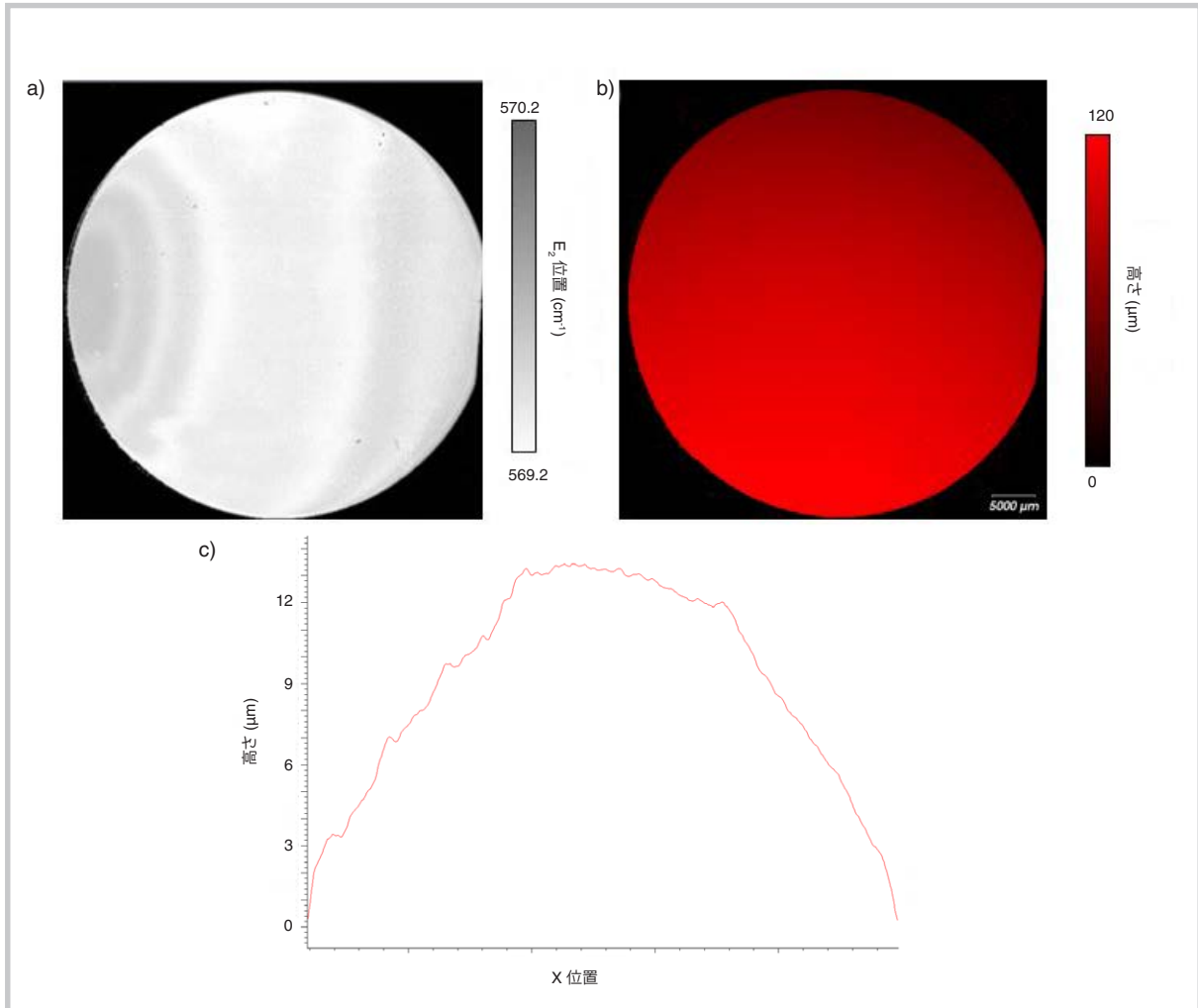


図 3:a) ウェハ全体の応力を示す E_2 モードのピーク位置、b) ラマン測定中に収集した形状イメージ、c) (ウェハの傾きを差し引いた) ウェハの反り

新しい GaN 構造の 3D 微細構造と応力の特性評価

GaN の貫通転位は、光担体と電荷担体の両方の散乱の中心となり、LED などの光電子デバイスの性能を妨げることがある。貫通転位の空間分布をよく理解し、特性を把握することにより、新しい方法を用いて層形成を最適化できる。ここでは、癒着プロセスを制御するために、エピタキシャル横方向成長 (ELOG) 技術を用いて形成したサンプルの微細構造と応力の特性を、規則的なナノダッシュ配列を含む成長孔を使用して評価する。

150mW、532nm の励起レーザー光源を備えた inVia コンフォーカルラマンマイクロスコープを使用してラマン測定を行った。図 4 に、サンプルから収集した代表的なスペクトルを示す。成長後に、さまざまな深さでレーザーのフォーカスを合わせることでサンプルから 3D ラマンデータを収集した。また、比較のために、成長を中断させてサンプルを SEM に転送することにより、成長プロセス中に SEM イメージを収集した。これらのイメージを図 5 に示す。

ラマン強度イメージは、サンプルの微細構造を明確に表しており、転位密度の高い領域を明示して、SEM イメージと極めて良好に一致している様子を示す。これは、成長後に、より複雑な中断成長および SEM 分析の代替としてラマン分光法を使用できることを示している。

E_2 ラマンバンドのピーク位置を調べることにより (図 4)、1GPa に対応する $2.7cm^{-1}$ の変化でサンプルの応力分布を調査できる。深さ $-5\mu m$ では、微細構造 (強度イメージ) と応力分布が明確に相関している。表面に近づくと、図 6 に示すように、層のピーク位置の変動における一貫性が強まり、予想される無応力値 ($567.5cm^{-1}$) に向かって上方にシフトする。これは、新しい構造が、設計どおりに層に応力を集中させることによって応力の大きさを低減させることを実証している。

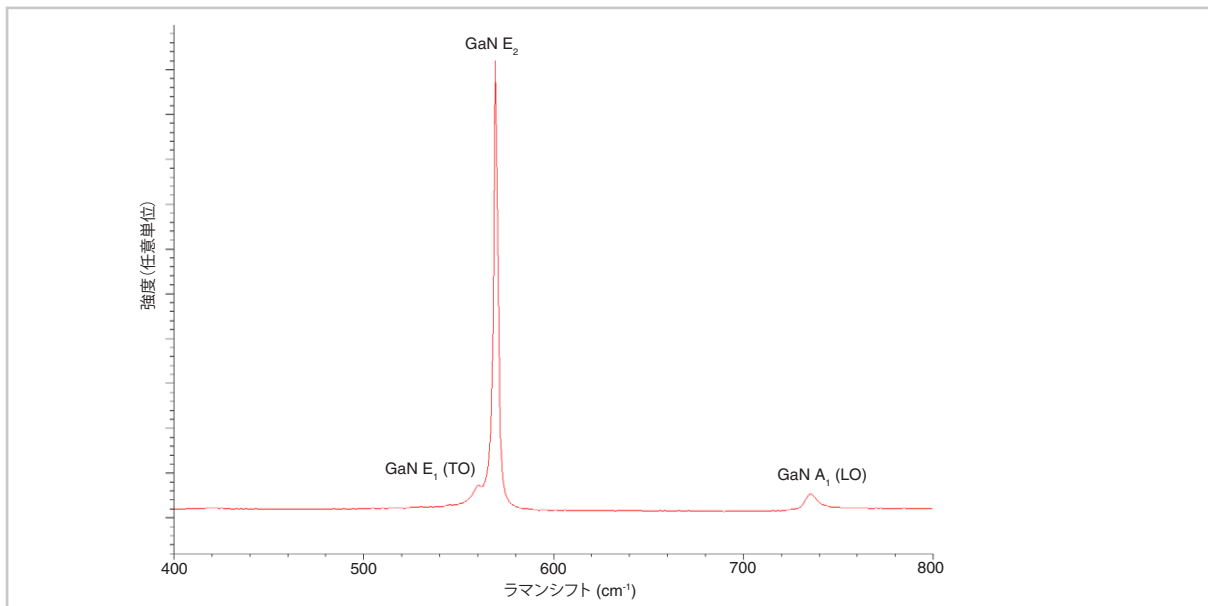


図 4: GaN ラマンモードがラベリングされた新しいナノ構造からの典型的なスペクトル。E₁ (TO) モードは、材料の軸外成長のために存在する。

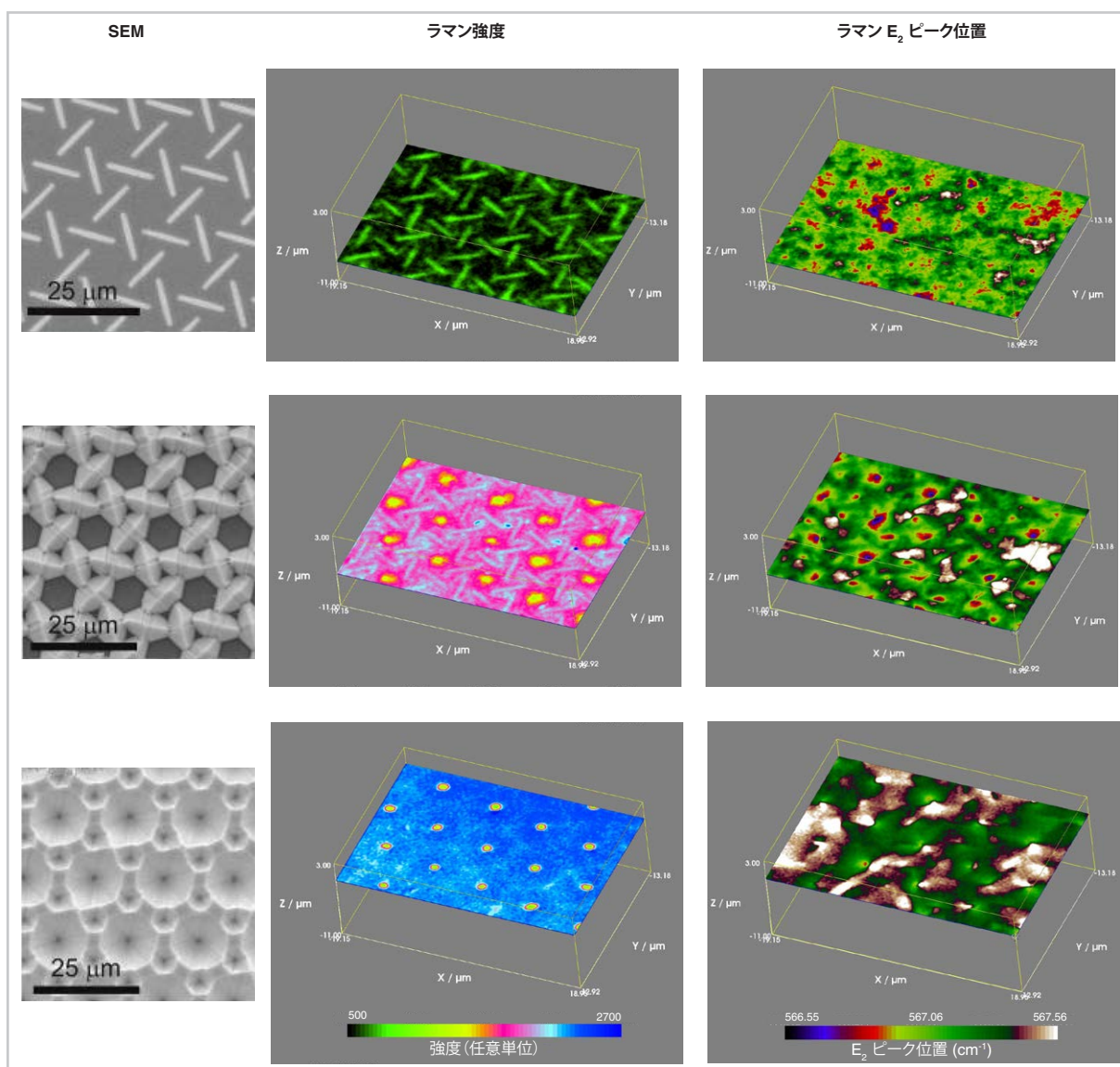


図 5: サンプルから収集した SEM およびラマンイメージ。z = 0 μm は表面である。ラマン強度イメージはサンプルの微細構造を示しており、SEM 画像と良好に相関している。E₂ バンドのピーク位置は、表面で無応力値に向かって移動する。ラマン測定面積は 38.1 μm × 26.1 μm × 14 μm で、ステップサイズは 0.3 μm × 0.3 μm × 2 μm である。

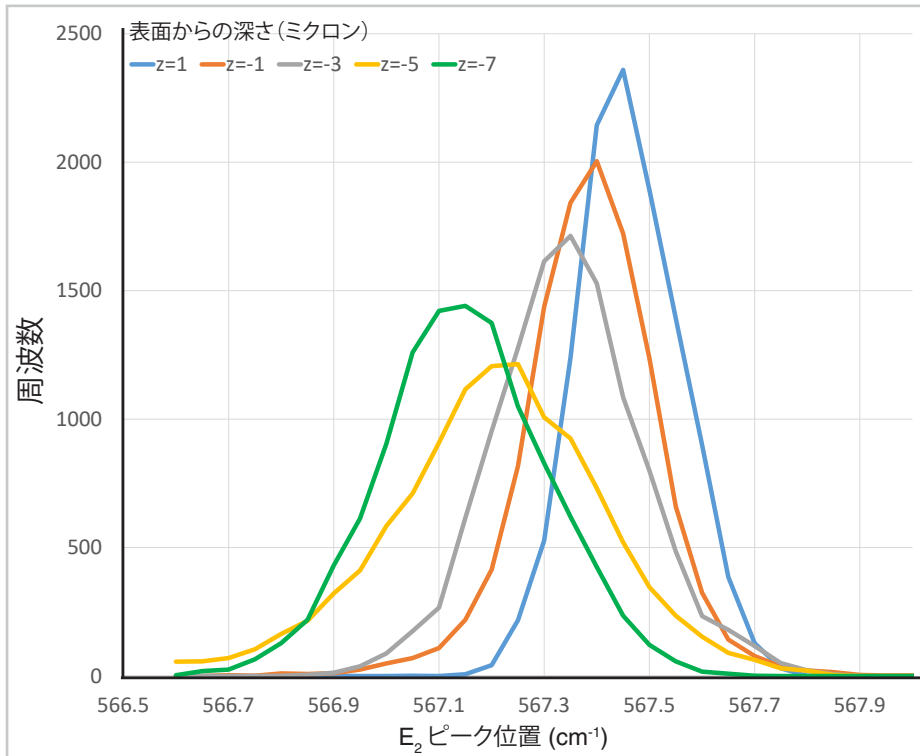


図 6: 構造内のさまざまな深さにおける E_2 ピーク位置の変動を表すヒストグラム。典型的なピーク位置は、無応力値 567.5cm^{-1} に向かって上へとシフトし、バルクからサンプルの表面への移動時に分布が先鋭化する。

ラマンサーモグラフィ

ピーク動作デバイス温度は、デバイスの寿命を推定するための重要なパラメータで、寿命試験のシミュレーションに使用される。従来の方法（電気式および IR）だと、空間分解能が低く、デバイス全体の平均温度を取得することが多いため、ピーク温度を大幅に過小評価してしまう。Martin Kuball 氏らによって行われた研究により、ラマン分光法が、DC [1] およびパルスモード [2] の両方で、アクティブデバイスのピーク動作温度を測定する優れたツールであることが証明された。

ラマンサーモグラフィは、材料のフォノンエネルギーが温度とともに変化するという原理に基づいている。図 7 は、ON 状態およびピンチオフ状態の HEMT デバイスのラマンバンド位置の変化を示している。この変化は、温度との直接的な相関性がある。デバイス上でラマンマップを実行することにより、サブミクロン単位の分解能で温度分布を把握できる。図 8 は、サファイア基板と SiC 基板上に製造された HEMT のソースドレイン間の温度分布を示している。ここでは、 180°C のピーク温度でデバイスを動作させると、SiC 上のデバイスが 3 倍を上回るの電力密度で動作できることがわかる。これは、サファイアと比較して SiC の熱伝導率が高いためである。加えて、GaN の熱伝導率がサファイアよりも高いことから、サファイア上のデバイスの温度分布の方がはるかに平坦になり、熱が垂直方向に抽出されるよりも水平方向に広がりやすくなる。

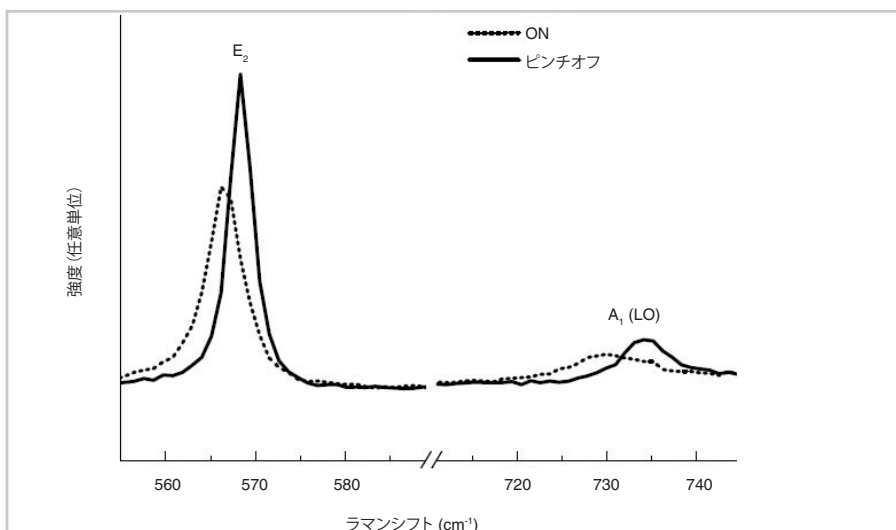


図 7: ON (ホット) 状態のデバイスとピンチオフ (コールド) 状態のデバイスのラマンスペクトルの比較

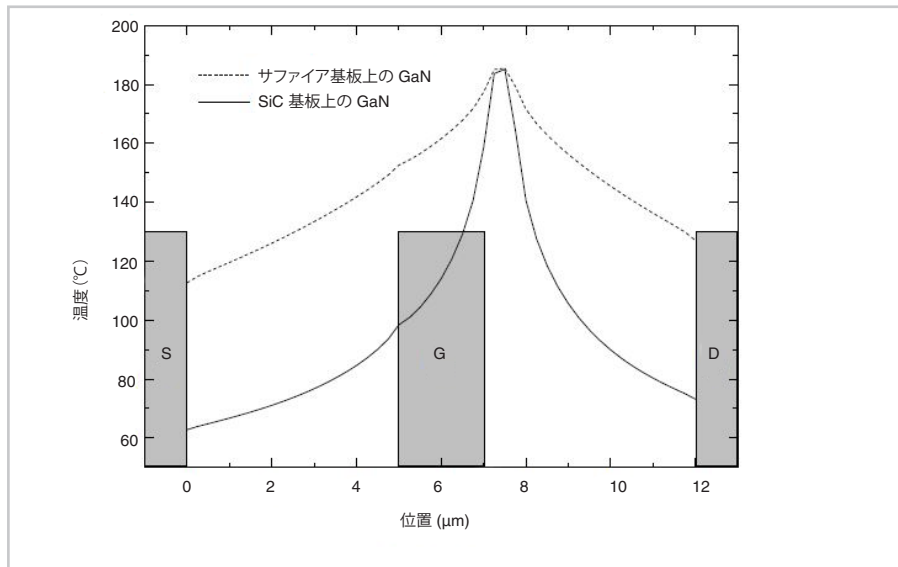


図 8: サファイア基板および SiC 基板上に作製された HEMT の温度分布。さまざま電力密度でデバイスを動作させて 180°C のピーク温度を生成した。

結論

上記の例は、inVia ラマンマイクロスコープを使用して、以下の化合物半導体特性を調べる方法を示している。

- 化学的組成
- 歪み/応力
- デバイス温度
- 結晶構造
- 欠陥
- フォトルミネセンス

レニショーの inVia ラマンマイクロスコープと、化合物半導体に適用した場合の機能の詳細については、レニショーオフィスまたは代理店までお問い合わせください。

謝辞

ELOG サンプルを提供してくださった Bath 大学の Emmanuel Le Boulbar 博士、Duncan Allsopp 教授、Philip Shields 教授にお礼申し上げます。

参考文献

[1] Kuball, M., Hayes, J. M., Uren, M. J., Martin, I., Birbeck, J. C. H., Balmer, R. S., & Hughes, B. T. (2002). Measurement of temperature in active high-power AlGaIn/GaN HFETs using Raman spectroscopy. *IEEE Electron Device Letters*, 23(1), 7-9.

[2] Kuball, M., Riedel, G. J., Pomeroy, J. W., Sarua, A., Uren, M. J., Martin, T., ... & Wallis, D. J. (2007). Time-resolved temperature measurement of AlGaIn/GaN electronic devices using micro-Raman spectroscopy. *IEEE electron device letters*, 28(2), 86-89.

レニショー:ラマンのイノベータ

レニショーは、高速化学イメージングテクノロジーを搭載したコンフォーカルラマンマイクロスコープ、専門分析装置、走査型電子顕微鏡および原子間力顕微鏡用インターフェース、分光用固体レーザー、そして最先端冷却 CCD 検出器などさまざまな高性能分光関連製品を製造しています。

広範な領域と用途において最高レベルのパフォーマンス、感度、そして信頼性を提供するレニショーの製品は、お客様のニーズに合わせて設計されているため、非常に難しい分析でも自信を持って行っていただけます。

世界各国のレニショー現地法人および販売代理店のネットワークを通して、優れたサービスとサポートをお客様に提供いたします。

詳細については、www.renishaw.jp/carbon をご覧ください。

資料も各種用意しております。詳細については、最寄りのレニショーオフィスまでお問い合わせください。

レニショーでは、本書作成にあたり、細心の注意を払っておりますが、誤記等により発生するいかなる損害の責任を負うものではありません。

© 2020 Renishaw plc 無断転用禁止

仕様は予告無く変更される場合があります。

RENISHAW および RENISHAW ロゴに使用されているブルーピンボールドは、英国およびその他の国における Renishaw plc の登録商標です。

apply innovation ならびにレニショー製品および技術の商品名および名称は、Renishaw plc およびその子会社の商標です。

本文書内で使用されているその他のブランド名、製品名は全て各々のオーナーの商品名、標準、商標、または登録商標です。