

## 論文の内容の要旨

### 論文題目

#### **Modulation Spectroscopic Study on Electric Fields at Nitride Semiconductor Heterointerfaces and Surfaces**

変調分光法を用いた窒化物半導体の界面・表面電場に関する研究

氏名 片山 竜二

#### 1) 本研究の背景

窒化物半導体は他の III-V 族化合物半導体と比べ、近年もなお物性の解明が続く材料であるが、現在では青色受発光素子へと応用されている。特にイオン性が強いことにより安定相構造として六方晶構造をとるが、一方で有機金属気相成長法 (MOVPE) ならびに rf プラズマ援用分子線エピタキシ (rf-MBE) などを用いて非平衡条件下にて結晶成長することにより、準安定相である立方晶構造を作製することも可能である。立方晶 GaN を例にとると、立方晶構造のへき開面をレーザーの共振器端面に利用できることから発光素子材料として利点があり、また結晶対称性が高いことによりフォノン散乱の影響が小さくドリフト飽和速度が高いなど、電子素子としての利点も期待された。ところが電流注入による誘導放出は未だ実現されておらず、また電子素子としての利点も実証には至っていない。これらの問題の共通の原因として、立方晶 GaN が準安定相であるため作製が困難であることと共に、その電氣的評価が困難であることが挙げられる。というのも、これまで報告のある立方晶 GaN の電氣的性質のほとんどが、下地の基板との界面を経路とする寄生伝導機構に強く影響を受けていると考えられ、系統的な結果が得られていないことから、まずその機構を解明する試みが必要といえる。

一方で六方晶窒化物結晶については、近年の MBE 法による窒化物半導体の薄膜成長技術の進展により、格子極性や分極という概念が極めて重要となりつつある。本来ウルツ鉱型構造

は分極を持たないが、現実には原子位置が理想的な位置から微妙に変位していることから、結晶内には無歪みでも分極が生じる。これを自発分極と呼び、+c 面 (Ga 極性面) に負、-c 面 (N 極性面) に正の分極電荷を誘起する。また結晶が歪むことにより同様に分極は誘起され、これをピエゾ分極と呼ぶ。窒化物半導体は III-V 族化合物の中でも大きな分極を有し、c 面をヘテロ界面や表面に持つ構造では巨大な電界が生じることから、量子井戸レーザー構造においては発光再結合効率が顕著に減少する、もしくは高電子移動度トランジスタ構造においてはチャネル中のキャリアを空乏化 (ピンチオフ) できないなどの問題が明らかとなった。その一方でこの巨大な分極を積極的に活かす方法、ポラリティエンジニアリングという概念が提唱され、例として周期的に極性ひいては分極を反転させた構造による第二高調波発生、もしくは両極性面の化学耐性の差を巧みに利用したフォトニックナノ構造の作製方法が試みられている。これにより、これまでは得てして破壊検査であったり巨視的な評価にとどまっていた窒化物半導体の格子極性について、より簡便に評価する方法がいつそう求められている。

これらの課題に共通している事象は、ヘテロ界面や表面に誘起された電場、もしくはバンドの曲がり具合 (ベンディング) に強く影響を受けると考えられ、つまりそれを解く鍵はこの内蔵電場を正しく評価することであるといえる。

## 2) 本研究の目的

そこで本研究においては、D. E. Aspnes らにより提唱されたフォトリフレクタンス (PR) やエレクトロリフレクタンス (ER) といった電場変調分光法に注目し、新たに改良を加えた手法を開発しこれを用いることで、背景で述べた窒化物半導体に残されている課題、

- 1) 立方晶 GaN/GaAs ヘテロ構造における界面寄生伝導の起源の解明、
- 2) 六方晶 GaN の格子極性の判定方法の開発、

を解決することを目的とする。

## 3) 実験方法と結果

以下では、本研究にて開発した変調分光的手法による評価結果についての説明にとどめ、窒化物半導体薄膜作製方法や構造特性評価結果などの詳細については本文を参照されたい。

### 3.1) 立方晶 GaN/GaAs の光バイアスエレクトロリフレクタンス (OBER)

n 型 GaAs 基板上に作製した立方晶 GaN 試料を用いて、表面に形成した半透明 Au ショットキ電極により周期的電界変調を行い、ER スペクトルを得た。GaAs のみに共鳴する波長 488 nm のレーザー光を定常的に照射し、その強度を増すことで信号の一部が減衰していくことから、GaN/GaAs 界面からの信号も重畳していることが明らかとなった。一方温度依存性により、GaN の  $E_0$  特異点近傍にて観測された信号は励起子遷移ではなくバンド間遷移によるものであることが分かり、比較的強電界が印加された領域からの信号であることが分かった。

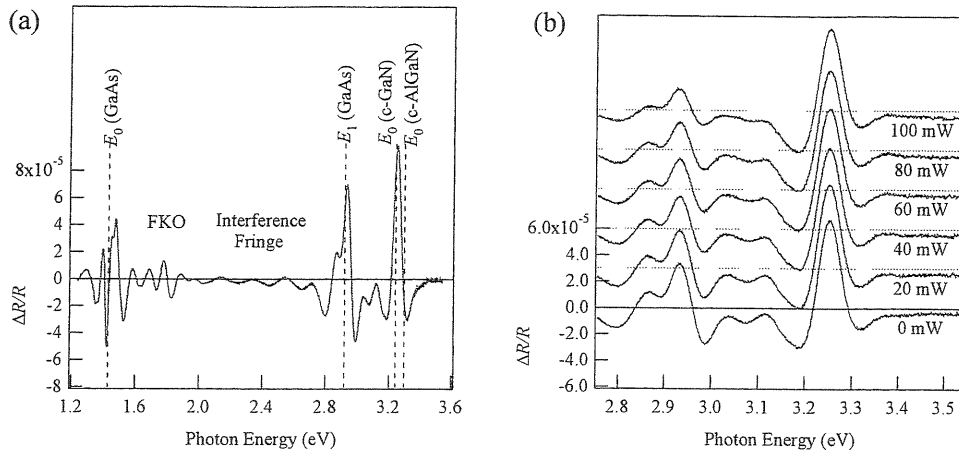


図1 立方晶 GaN/GaAs(001)の(a)ER スペクトル、(b)OBER スペクトル

### 3.2) 立方晶 GaN/GaAs の電氣的バイアスフォトリフレクタンス (EBPR)

上記と同様の試料に対し、He-Ne レーザーを励起光とした周期的変調により PR スペクトルを得、更にスペクトル中にフランツ・ケルディッシュ振動 (FKO) が観測された。このときショットキ電極に対して印加した逆バイアスを変化させることで、GaN/GaAs 界面の内蔵電場の方向の判定を試みた。振動周期つまり電界強度は逆バイアス増加に伴い単調に増加したことから、当該界面における GaAs の内蔵電場はゼロバイアスにおいても表面に向かい上向きにベンドしていることが分かった。このことにより、電気伝導評価にてしばしば観測された寄生伝導が、この界面に存在する正孔が原因であることが、初めて明らかとなった。

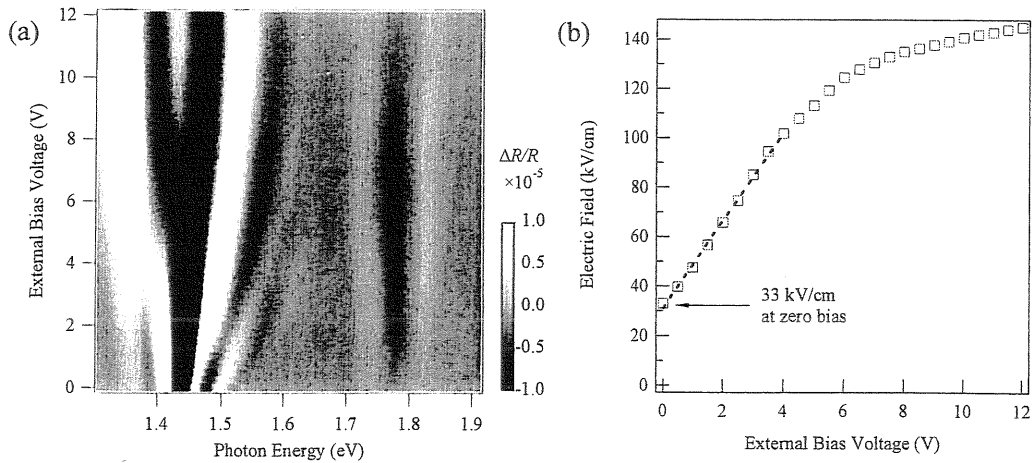


図2 立方晶 GaN/GaAs(001)の(a)EBPR スペクトル、(b)内蔵電界のバイアス依存性

### 3.3) 立方晶 GaN/GaAs の時間分解フォトリフレクタンス励起分光 (TRPRE)

上記 EBPR と同様に He-Ne レーザーを用いて GaN/GaAs 界面を周期的に変調した場合の、信号位相の周波数依存性を評価することにより、当該界面に光励起されたキャリアの緩和時

定数を見積もった。EBPR で観測された FKO が同様に観察され、またこれに関連する緩和時定数は基板である GaAs 単体の表面や GaAs バッファのそれと比べて極めて長いことが分かった。つまり GaN/GaAs 界面に形成された三角ポテンシャルに注入された正孔の緩和寿命が極めて長いこと、これが極めて理想的な正孔の伝導経路として働くことで、寄生伝導が顕著に観測されることが示唆された。

### 3.4) 六方晶 GaN 極性面のコンタクトレスエレクトロリフレクタンス (CER)

Rf-MBE 法において、サファイア基板の窒化前処理やバッファ層挿入などの条件最適化により、高品質な Ga 極性ならびに N 極性の GaN を作製する条件を求めた。これらの極性の異なる試料について、導電性ガラスを対向電極として用い 500V を周期的に印加し、静電結合による電界変調を行うことで CER スペクトルを得た。極性が異なる試料の間で、明確なスペクトル位相の反転が観測されたことから、自発分極に誘起された分極電場の方向の違いとして、GaN 格子極性を電場変調分光法により検出することが可能であることを初めて示した。また得られたデータは理論的スペクトル形状により厳密にフィッティングすることができると共に、更にそのスペクトル位相は、顕微ラマン散乱およびケルビン力顕微鏡による表面電位評価結果より得られるバンドダイアグラムから予想される絶対位相と一致することを確認した。

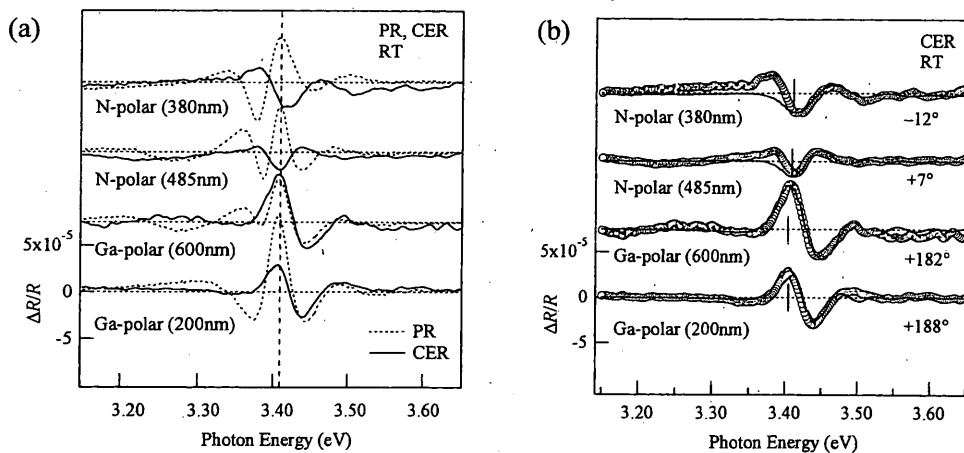


図3 六方晶 GaN/sapphire(0001)の(a) PR・CER スペクトル、(b)フィッティング結果

## 4) 総括

本研究においては、窒化物半導体のヘテロ界面と表面の特性、特にこれらに誘起された電場を対象とし、新規変調分光的評価手法を開発した。立方晶 GaN/GaAs 界面の OBER、EBPR、TRPRE により、界面の GaAs 側に形成される三角ポテンシャルに蓄積した正孔が寄生伝導の起源であることが判明し、一方六方晶 GaN の CER により、格子極性を見積もることができることを示した。このことから、ここで開発した一連の電場変調分光的手法がワイドギャップ半導体ヘテロ界面および表面における物性解明に有効であることが示された。