

(エネルギーイノベーションプログラム・ITイノベーションプログラム・ナノテク・部材  
イノベーションプログラム)

「次世代照明等の実現に向けた窒化物半導体等基盤技術開発」基本計画

電子・材料・ナノテクノロジー部

## 1. 研究開発の目的・目標・内容

### (1) 研究開発の目的

地球温暖化問題は、世界全体で早急に取り組むべき最重要課題であり、経済・社会活動と地球環境との調和を実現することが求められており、情報、環境、安全・安心、エネルギー等、経済・社会活動を支えるあらゆる分野で省エネルギー化を図る画期的な技術革新が求められている。

これを実現するためには、従来のデバイスと比較して、機能・特性の向上や新機能の発現により、更なる省エネルギー化が期待できる化合物半導体や有機物半導体などの新材料を用いたデバイスに関する基盤技術を推進する必要がある。

新材料デバイスの適用領域としては、白熱電球や蛍光灯といった従来照明をLEDや有機ELへ置き換えることにより省エネルギー化や高機能化が期待できる照明分野や、情報通信機器のみならず自動車や医療機器など広範な分野の製品の省エネルギー化、高機能化が期待される窒化物半導体を用いたワイドバンドギャップ半導体の分野がターゲットとなる。

しかし、照明に関しては、寿命・発光効率・演色性の観点で高効率・高品質な性能に加えて、材料、並びに製造プロセスのコストを低減させる必要があり、その為には既存技術の改良にとどまらない基盤的な研究開発が不可欠である。また、LEDや有機ELといった次世代照明の普及促進のためには、国際標準化フォローアップ活動や次世代照明の用途探索活動など、研究開発以外の側面支援も必要である。

また、窒化物半導体に関しては、高周波演算素子やパワーデバイス等の高性能デバイスを実現する上で十分な品質の結晶作製が実現しておらず、既存のバルク半導体単結晶成長技術やエピタキシャル成長技術を超える基盤技術の確立が不可欠である。

本プロジェクトでは、これら課題を解決するための基盤技術開発ならびに国際標準化等の研究開発支援を行うことにより、我が国のエネルギー消費量削減に貢献するとともに、地球温暖化抑制につなげることを目的として実施する。

## (2) 研究開発の目標

蛍光灯と比較して消費電力を半分にする発光効率（130 lm/W以上）の高さと自然光に限りなく近い演色性（平均演色評価数 80 以上）を両立しつつ、蛍光灯並みのコスト（寿命年数及び光束当たりのコスト 0.3 円/1 m・年以下）で量産可能な次世代照明の実現を目指すための基盤技術開発を行い、当該照明の早期実用化を図る。併せて、今後我が国が次世代照明を健全に普及させるとともに、海外市場を開拓して産業を発展させていくために、性能評価等の国際規格策定に関する活動を行い、次世代照明の国際標準を確立するための側面支援を行う。

また、ハイパワー・超高効率の電力素子、超高速電子素子などの作成に必要な窒化物半導体結晶成長技術を目指して、4 インチ有極性単結晶基板及び 3~4 インチ無極性単結晶基板の開発、並びに無欠陥ヘテロ接合構造実現のための低欠陥高品質 GaN 及び混晶エピ層を実現するエピタキシャル成長法をそれぞれ開発するとともに、窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価として、有極性、無極性それぞれの単結晶基板で作成した FET の特性の差違、利害得失の明確化や、広い混晶範囲における耐圧と結晶欠陥の相関の明確化を行う。

## (3) 研究開発の内容

上記目標を達成するために、以下の研究開発項目について、別紙の研究開発計画に基づき研究開発を実施する。

### 研究開発項目① 次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発

- (1) LED 照明の高効率・高品質化に係る基盤技術開発  
[委託][共同研究（NEDO 負担率：1/2）]
- (2) 有機 EL 照明の高効率・高品質化に係る基盤技術開発  
[委託][共同研究（NEDO 負担率：1/2）]
- (3) 戦略的国際標準化推進事業[委託]

### 研究開発項目② ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発

－窒化物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長技術の開発

- (1) 高品質大口径単結晶基板の開発[委託]
- (2) 大口径基板上の高品質エピタキシャル結晶成長技術[委託]
- (3) 窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価[委託]

## 2. 研究開発の実施方式

### (1) 研究開発の実施体制

本研究開発は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下「NEDO」という。）が、単独ないし複数の原則本邦の企業等の研究機関（原則、本邦の企業等で日本国内に研究開発拠点を有していること。なお、国外企業等（大学、研究機関を含む）の特別の研究開発能力、研究施設等の活用または国際標準獲得の観点から国外企業等との連携が必要な部分を国外企業等との連携により実施することができる。）から公募によって研究開発実施者を選定し、委託して実施する。

また、研究開発項目②については、研究開発に参加する各グループの研究開発ポテンシャルを最大限活用することにより効率的な研究開発の推進を図る観点から、NEDOが委嘱する研究開発責任者（プロジェクトリーダー）として、国立大学法人福井大学 葛原 正明氏を置き、その下に研究者を可能な限り結集して効果的な研究開発を実施する。

### (2) 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDOは、経済産業省および研究開発責任者と密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的及び目標、並びに本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。具体的には、必要に応じて設置される技術推進委員会等における外部有識者の意見を運営管理に反映させる他、四半期に一回以上、プロジェクトの進捗について報告を受けること等を行う。

## 3. 研究開発の実施期間

研究開発は、平成 19～25 年度に実施する。

研究開発項目①次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発の（1）、（2）は、ステージ I として 2 年間（平成 21～22 年度）、ステージ II として 3 年間（平成 23～25 年度）それぞれ実施する。（3）については、平成 22～25 年度の 4 年間実施する。

研究開発項目②ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発－窒化物系化合物半導体基板は、6 年間（平成 19～24 年度）実施する。

## 4. 評価に関する事項

NEDOは、技術的および政策的観点から見た技術開発の意義、目的達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の中間評価を行い、必要に応じてプロジェクトの加速・縮小・中止等見直しを迅速に行う。研究開発項目①次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発のうち、（1）（2）について

は平成 23 年度、研究開発項目②ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発－窒化物系化合物半導体基板については平成 21 年度に中間評価を実施する。

また、事後評価については、研究開発項目①次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発については平成 26 年度に、研究開発項目②ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発－窒化物系化合物半導体基板については平成 25 年度に実施する。評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況などに応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

また、研究実施主体が競争的に研究開発を行うことによりイノベーションを加速させることを目的として、研究開発項目①次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発の(1)、(2)については「ステージゲート制度」を導入する。具体的には、プロジェクト実施期間を前半 2 年間の「ステージ I」(平成 21～22 年度)と後半 3 年間の「ステージ II」(平成 23～25 年度)に分割し、「ステージ I」の最終段階(平成 22 年度)にステージゲート評価を実施する。ステージゲート評価では、「ステージ I」の研究目標に対する達成度、「ステージ II」の研究目標に対する実現性を中心に、定性的・定量的に評価を行い、「ステージ II」における研究開発主体の選定を行う。「ステージ II」へ移行するにあたり、研究開発の進捗状況を踏まえ、必要に応じて、ミッション及び実施体制を見直すこととする。また、本プロジェクト終了後に事後評価を実施し、最終的なミッションの達成度を定性的・定量的に評価する。

## 5. その他の重要事項

### (1) 研究開発成果の取り扱い

#### ①成果の普及

得られた研究開発成果のうち、共通基盤技術に係るものについては、プロジェクト内で速やかに共有した後、NEDOおよび実施者が協力して普及に努めるものとする。

そのために、次世代照明の健全普及と海外市場の開拓により産業を発展させていくために、性能評価等の国際規格策定に関する活動を行い、次世代照明の国際標準を確立していくための側面支援を行う。

#### ②知的財産権の帰属

委託研究開発の成果に関わる知的財産権については、「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー・産業技術業務方法書」第 26 条の規定等に基づき、原則として、すべて委託先に帰属させることとする。

なお、国際展開を見据えた次世代照明技術に係る知財管理を適切に行うこととする。

### (2) 基本計画の変更

NEDOは、基本計画の内容の妥当性を確保するために、社会・経済的状況、内外の技術開発動向、政策動向、プログラム基本計画の変更、評価結果、研究開発費の確

保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、達成目標、実施期間、研究開発体制等、基本計画の見直しを弾力的に行う。

(3) 根拠法

本プロジェクトは、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第15条第1項第1号二に基づき実施する。

6. 基本計画の改訂履歴

- (1) 平成23年3月 「次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発」と「ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発」及び「戦略的国際標準化推進事業」（LED及び有機ELに関する標準化）の基本計画の統合
- (2) 平成23年4月 根拠法変更に伴う改訂
- (3) 平成23年7月 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法の改正に伴う改訂
- (4) 平成24年3月 次の項目を修正
  - ① 「次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発」に中間評価結果を反映
    - ・ 「(1) LED照明の高効率・高品質照明の基盤技術開発」に目標を追加
    - ・ 「(3) 戦略的国際標準化推進事業」に「(c)次世代照明を用いた評価実証」を追加
  - ② 「ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発」の目標追加及び期間延長

研究開発項目① 次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発

(1) LED照明の高効率・高品質に係る基盤技術開発

1. 研究開発の必要性

LED照明を高効率かつ高品質にするには、現在一般的にLED照明用基板の材料として使われているサファイアを窒化物材料等にするなど、基板部分を高性能な材料にすることが有効であるが、サファイア以外の基板については、基板の価格が非常に高額であるため、バルク化や大口径化等、基板の低コスト化に繋がる手法の確立が求められている。同時に、照明用LEDとして高効率な性能を実現するために、基板の結晶欠陥を極力減少させることも求められている。

これらの問題を解決し、高効率かつ高品質LED照明の作製を低コスト化することを目的として、LED照明用窒化物等基板の製造等に関する研究開発を実施する。

2. 研究開発の具体的内容

高効率 (LEDデバイスレベルで  $200 \text{ lm/W}$ 以上) かつ高品質 (平均演色評価数 80 以上) LED照明の低コスト化を実現するため、窒化物等の照明用基板の生産性向上を目的とした結晶成長技術の開発やLED素子構成構造の最適化等デバイスの高度化についての技術開発を行う。

(a) 窒化物等結晶成長手法の高度化に関する基盤技術開発

バルク結晶方式、板状結晶方式等の手法を用いて、低歪・低転位窒化物等結晶成長技術を高度化するための開発を実施する。

具体的には、結晶核から大口径の低歪・低転位種結晶作製のための成長方位制御や大口径種結晶基板上に窒化物等結晶を高速・長時間成長を目指すバルク結晶方式、異種基板上での大口径窒化物等結晶低歪化技術及び大口径窒化物等結晶の高速・長時間成長技術を目指す板状結晶方式等、結晶成長手法の高度化を可能とするための技術を開発する。

あわせて、発光効率  $200 \text{ lm/W}$ 以上かつ平均演色評価数 80 以上を達成するLEDデバイスを実現するための技術開発を行う。

(b) 基板の応用によるデバイス技術の開発

基板の特殊ドーピングやLEDデバイス構造の最適化等、窒化物等結晶成長技術の高度化以外のアプローチにより、発光効率  $200 \text{ lm/W}$ 以上かつ平均演色評価数 80 以上のLED照明を低コスト化するための技術開発を行う。

### 3. 達成目標

それぞれの方式について、以下の目標を達成する。

#### (a) 窒化物等結晶成長手法の高度化に関する基盤技術開発

<ステージ I 達成目標（平成 22 年度末）>

5～10mm角サイズの結晶の作成およびLEDデバイスとしての評価を行い、発光効率  $175 \text{ lm/W}$ 以上、平均演色評価数 80 以上の達成可否を検証する。

<ステージ II 達成目標（平成 25 年度末）>

バルク結晶成長方式で、結晶欠陥  $10^4 \text{ cm}^{-2}$ 以下、LED発光波長領域において光吸収が極めて少なく、かつ研磨後の基板サイズが 4 インチ以上となる結晶成長技術を、板状結晶成長方式で、結晶欠陥が  $10^6 \text{ cm}^{-2}$ 以下、LED発光波長領域において光吸収が極めて少なく、かつ研磨後の基板サイズが 6 インチ以上となる結晶成長技術を、それ以外の手法においては、上記基板サイズ的大型化に相当する生産性を実現する技術をそれぞれ確立する。

いずれの手法においても、LEDデバイスとして電流値  $350\text{mA}$  以上で発光効率  $200 \text{ lm/W}$ 以上かつ平均演色評価数 80 以上を達成する。またLEDデバイスにした場合のコストを評価するための試算を行う。

#### (b) 基板の応用によるデバイス技術の開発

<ステージ I 達成目標（平成 22 年度末）>

5～10mm角サイズの結晶の作成およびLEDデバイスとしての評価を行い、発光効率  $175 \text{ lm/W}$ 以上、平均演色評価数 80 以上の達成可否を検証する。

<ステージ II 達成目標（平成 25 年度末）>

LEDデバイスとして発光効率  $200 \text{ lm/W}$ 以上、平均演色評価数 80 以上を達成する。またLEDデバイスにした場合のコストを評価するための試算を行う。

(注) ステージゲート評価の結果、本研究テーマについては平成 22 年度末をもって終了した。

## (2) 有機EL照明の高効率・高品質化に係る基盤技術開発

### 1. 研究開発の必要性

有機EL照明は、均一発光が可能な効率的な面発光光源であるため、今後の省エネルギー化を促進する照明として期待されている。

現在の有機EL照明技術は、課題とされていた演色性、寿命等において蛍光灯と同等以上の性能を実現できるレベルにある。今後、有機EL照明が蛍光灯を代替するためには、演色性、寿命のみならず、さらに効率性においても蛍光灯を大幅に凌ぐ性能向上が要求される。さらに普及の観点からは蛍光灯と同等以上の低コスト化も望まれる。

有機EL照明の効率性を大幅に向上させると同時に低コスト化を図ることができれば、蛍光灯の代替普及が急速に進み、省エネルギー化に貢献できる。そのために、高効率・高品質及び低コスト化を同時に実現する革新的な技術開発を行う。

### 2. 研究開発の具体的内容

#### (1) 高効率・高品質有機EL照明デバイス技術開発

高効率（発光効率 130 lm/W以上）高品質（平均演色評価数 80 以上、輝度 1,000 cd/m<sup>2</sup> 以上、輝度半減寿命 4 万時間以上）を実現する有機EL照明デバイス技術開発を行う。具体的には、光学干渉の影響を抑制して効率を向上させる光取り出し技術、気密性を高めて品質を向上させる封止技術、製造工程の高速化を図るプロセス制御技術、材料の利用効率向上を図る薄膜層形成技術等の技術開発を行う。加えて有機ELを構成する基板・透明電極・有機層等について高効率・高品質化且つ低コスト化に向けた材料開発を行う。

### 3. 達成目標

#### (1) 高効率・高品質有機EL照明デバイス技術開発

＜ステージ I 達成目標（平成 22 年度末）＞

発光面積 100 cm<sup>2</sup> 以上で発光効率 130 lm/W以上、平均演色評価数 80 以上、輝度 1,000 cd/m<sup>2</sup> 以上、輝度半減寿命 4 万時間以上の有機EL照明実現の技術課題を明確にして、具体化する実行計画を策定する。理論解析・光学シミュレーション等により実現方式の光学設計を行い、プロトタイプ試作により発光面積 25 cm<sup>2</sup> 以上で発光効率 50 lm/W以上、平均演色評価数 80 以上、輝度 1,000 cd/m<sup>2</sup> 以上、輝度半減寿命 1 万時間以上の有機EL照明光源を実現する。

また高効率な製造プロセス実現に必要とされる要件を明確にして設計・製作及び基本データの収集を行い、要件を充足していることを検証する。

<ステージ II 達成目標（平成 25 年度末）>

発光面積  $100 \text{ cm}^2$  以上で発光効率  $130 \text{ lm/W}$ 以上、平均演色評価数 80 以上、輝度  $1,000 \text{ cd/m}^2$  以上、輝度半減寿命 4 万時間以上の有機 EL 照明光源を実現すると同時に、コストを評価するための試算を行う。

### (3) 戦略的国際標準化推進事業

#### (a) LED光源並びにLED照明器具の性能評価方法の国際標準化に係る研究開発

##### 1. 研究開発の必要性

近年、白熱電球や蛍光灯に代わる省エネルギー光源として、LED光源およびLED照明器具（以下、LED照明）は国内外で広く普及しつつある。性能の向上は著しく、また今後も、現在主に用いられている蛍光灯やHIDランプ（高輝度放電ランプ）の性能を超えるような著しい性能向上が期待されることから、二酸化炭素の大幅な排出削減が見込まれる次世代の照明として、LED照明の世界市場が急速に拡大していくことが予想される。

しかし、LED照明は半導体の固体発光素子に基づく全く新しい光源であり、従来の白熱電球や蛍光灯とは発光形態が大きく異なるため、白熱電球や蛍光灯で定められた国際規格および国内規格による定義、測定方法、照明方法などは、多くの場合、そのまま適用できない。すなわち現在、LED照明の性能を評価する基準の多くには、国際的な統一基準が存在していないため、消費者がLED照明器具を同じ基準で比較検討し適切に選択することができず、LED照明の世界的な普及の阻害要因となっている。

今後我が国のLED照明等の次世代照明を健全に普及させるとともに、海外市場を開拓して産業を発展させていくためには、LED照明の性能が正しく評価される世界共通の「ものさし」をつくることが重要であるとともに、性能評価の国際標準化の分野において主導的役割を果たせるようにすることが必要である。

そのため、本事業は、LED照明の性能評価方法に関する基盤技術を開発し、国際標準化に向けた活動に繋げることを目的とする。

##### 2. 研究開発の具体的内容

本事業は、我が国の研究開発による成果を国際市場に普及してくために、国際標準化に向けた研究開発等を実施することで、研究開発成果を早期に上市し、国際市場の獲得に結びつけるための環境作りに寄与することを目標とし、事業を実施する。

具体的には、国際標準化獲得に向けた戦略を十分に検討した上で、光の強さ、色、寿命等、LED照明の性能を正しく試験評価するために必要な課題を設定し、これを克服するための研究開発を実施するとともに標準化に向けた活動を行う。

##### 3. 達成目標

LED照明の評価技術に関して、それぞれ以下の課題を達成することを目標とする。

(i) LED照明利用技術に関わる評価技術開発

(ア) LED照明の色再現性能評価技術開発

現在CIEで検討が行われている現行の演色性評価方法の改訂を踏まえて、LED照明の特徴を踏まえた新しい演色性評価方法の確立に向けて、試験色の選定、視感評価を行うと共に、LED用の演色性評価方式についての検討を行う。

(イ) LED照明のグレア評価技術開発

LED照明は高輝度発光体の集合体で構成されていることから、現行のCIEによるグレア評価方法では正確に評価出来ず、照明設計の実際面において大きな支障になっています。そのような課題を踏まえ、LED照明に特徴に対応した新しい評価手法の確立を検討する。具体的には、評価用の照明器具を試作すると共にLED照明のグレアの評価実験を行い、現行法の課題を整理する。併せて、CIE等の動向も踏まえつつLED用計測システムの検討を行い、技術開発の方向性や現状の問題点の明確化を行う。

(ii) LED照明の測光技術開発

(ア) LED照明の配光測定技術開発

現状測定が不可能とされているLED照明の全光束、配光、器具効率の測定を実現するため、多受光方式配光測定装置による配光・全光束一括測定技術の検討および手法の確立を行う。併せて、より汎用的な測光技術の確立についても検討を行う。

(イ) LED照明環境における視作業効率測光技術

現在CIEにおいて検討されている屋外照明の明るさ効率評価方法に対する規格変更に対応するため、薄暮から夜間における視作業効率に関する測光方法の確立を目指す。視作業効率測光装置を設計・試作するとともに、現在当該分野で主導的な位置付けにあるNIST等とも意見交換を行いつつ、本装置の評価を行う。

## (b) 有機EL照明に関する標準化

### 1. 研究開発の必要性

有機EL照明は、一般照明である蛍光灯を将来代替する高効率の次世代照明として急速に進化しつつある。現在は研究開発段階であるが、一部のパネルメーカーからはサンプル出荷が始まっており、数年以内には次世代照明として製品化されて国際的な競争が始まろうとしている。

有機EL照明は日本が世界に先駆けて開発し、現在も研究開発の最先端を走っている技術分野である。今後、製品化段階で日本の有機EL照明技術が活かされるためには、製品を規定する国際標準が本技術レベルを踏まえて決定されなければならない。照明の国際標準規定には通常は3～4年を要することを考慮すると、現段階から標準化活動を開始することが必須である。

また有機EL照明の標準化は、照明業界にとっては世界に先駆けて日本から初めて発信する先取り標準化活動であり、照明業界での日本の国際的な地位向上にもつながる。

### 2. 研究開発の具体的内容

従来の照明器具の標準を土台に、有機EL照明の課題に絞り標準化を進める。標準化の課題として光源／器具の測光方法、光源／器具の性能に取り組む。

### 3. 達成目標

標準推進団体にて標準規格化を行う際に必要な光源／器具測光方法・測色方法の研究として、測光設備を利用した測光方法の検討・試験・評価・検証を行い、標準化を提案に必要な裏付けデータを集積して報告する。本活動結果は、照明学会ガイドライン委員会にて平成23年度末に作成される標準化ガイドラインに反映され、国際照明委員会での日本規格提案の根拠として活用される予定である。さらに国際照明委員会での情報収集、提案支援を行い国際標準化活動に貢献する。

### (c)次世代照明を用いた評価検証

#### 1. 研究開発の必要性

LED照明と有機EL照明は、発光原理が既存照明と異なる新しい照明であることから、人体に与える生体的影響については十分把握されていない。今後、これら新しい照明の普及がますます加速していくと予想されることから、本照明が生体に与える影響を調査分析し、その特質を明確にすることは、LED照明と有機EL照明の健全な普及促進に重要である。

#### 2. 研究開発の具体的内容

LED照明または有機EL照明が人体に与える影響について、医学的工学的観点から調査分析することを目的とした評価検証等を行い、次世代照明の基盤技術開発、国際標準化事業のプロジェクト推進方針変更や規格整備等に活用する。

#### 3. 達成目標

LED照明、有機EL照明を適用した照明空間を設営の上で評価検証を実施し、これらの照明が人体に与える影響について客観的に評価することが可能な検証結果を示すとともに、国際規格化等を検討する。

## 研究開発項目② ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発—窒化物系化合物半導体基板

### 1. 研究開発の必要性

(1) 低損失で高出力の電子デバイスとして期待される窒化物半導体ウエハは、現在GaN系ヘテロ構造がSiやSiC等の異種基板上に作製されている。このため電子デバイス構造としては横型に限定される上に大きな格子不整合によりデバイス内部に多数の欠陥が発生し、耐圧、オン抵抗等のデバイス特性についても物性値から期待されるような十分な特性は得られていない。また電源などで重要なノーマリオフ動作についても実用的な高出力デバイスとしては実現されていない。

このような問題を解決するためには、本質的に結晶構造が等価で格子整合する高品質窒化物単結晶の有極性、或いは無極性基板上にデバイス構造を成長・作製することが必要不可欠である。また、横型デバイス用の高抵抗ウエハ、縦型デバイス用の低抵抗ウエハ実現に向けて、単結晶基板の伝導度制御技術の確立が重要となる。

窒化物単結晶基板を成長するにはHVPE法やNa系フラックス溶液成長法、昇華法等が知られているが、現状電子デバイス用の高品位な結晶性を持つ大口径単結晶基板の育成は実現されていない。そこで本研究開発では、窒化物半導体電子デバイス作製に必要とされる4インチ級の究極の高品質有極性バルク単結晶、及び無極性バルク単結晶を育成する技術を開発し、Siデバイスと同等、或いはそれ以上の安定性を有する高出力デバイスの実用化に資する。

(2) 化合物半導体エピ材料の特徴としては、ヘテロ接合を用いたデバイスを作製できることにあり、中でも窒化物は高速化、高出力化、高耐圧化、省エネ化などに優れた性能を発揮できる物性を有している。このような特性を実現するためには、これらデバイス構造中のチャンネル層やドリフト層を形成する薄膜成長技術、即ち結晶欠陥や残留キャリアの低減、ヘテロ接合界面でのキャリアの散乱を抑制するための界面組成急峻性や広い範囲での平坦性、多層構造はもちろんのこと、極めて薄いチャンネル層を作製するための組成や不純物濃度を原子層レベルで制御できる薄膜成長技術が必須である。加えてGaN-AlN-InN系窒化物は、AlGaNやInGaNでも格子不整合が大きく、分極電界や転位、欠陥、クラックなどの問題が生じている。

自動車用インバータなどでは例えば、オン抵抗 $<1.5\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 、耐圧 $>2\text{KV}$ で高 $g_m$ 、かつノーマリオフ型等の省電力タイプの電子デバイスの実現が望まれている。しかしSiCやSi基板上でのエピ成長ではヘテロエピタキシーの制約のため、デバイス特性からの要求品質或いは物性値から期待される特性を十分に満足する段階には未だ達しておらず、高機能の横型、及び縦型窒化物半導体電子デバイス実現のためには、今後窒化物単結晶基板上でAlN-GaN-InNの高範囲に渡る高品質大口径エピタキシャル混晶成長技術が必要である。

また、これら混晶成長に関して、高 In 組成領域では線欠陥、原料の気相反応に基づく反応物による点欠陥、成長中の熱分解が大きな問題であり、高 Al 組成領域では、酸素および炭素などの不純物の混入を抑制すると共に、効率の良いドーピング技術の開発によるキャリア濃度の向上が必須である。

更に、実用的な電子デバイス用エピタキシャルウエハとしては、厚みやキャリア濃度等のウエハ特性に関して、4 インチ級の大口徑にわたる均一性が要求される。

(3) 現在窒化物電子デバイスは、端緒についたばかりであり、実用化したデバイスは SiC などの基板上に形成した GaN チャネルを用いた FET 構造のみである。その応用は 2-5GHz の携帯電話基地局用の 200-400W 増幅器と 30GHz 帯の小型 20W 級増幅器に限定されている。窒化物系半導体が元来有する物性を考慮すると、今後は AlN-GaN-InN 系材料を広範囲に自由に組み合わせたヘテロ接合トランジスタの実現が望まれ、その応用は高周波高出力ばかりでなく、高温動作デバイス、高耐圧デバイス、超高速デバイスなど、広い応用範囲が実現可能である。

例えば 2-5GHz では 1kW 以上の増幅器が実現可能となり、基地局ばかりでなく、固体デバイスを用いた超小型マイクロ波加熱（電子レンジ、半導体プロセス装置）、マイクロ波送電などに応用可能である。

またパワーエレクトロニクスにおいても、高電圧動作と高周波動作が同時に実現できるため、例えば数 kW 級のインバータ回路は、従来は周波数が低いためコイルやコンデンサが大型化し、モノリシック集積化が不可能であった。窒化物半導体を用いれば高電圧のまま高周波に対応可能であるためパワーエレクトロニクス機器の小型化を推進でき、エアコンなどの家電製品、情報家電、自動車におけるインバータの画期的な性能向上などその応用範囲は極めて広い。

このような電子デバイスを実現するためには、高品質窒化物半導体基板の開発、及び理論的可能で現在までに検討されなかった新しいエピタキシャル成長技術・不純物ドーピング技術の開発をベースに、可能な限り広い範囲の組成のヘテロ接合構造や面方位の組み合わせによるデバイス構造を従来の異種基板上ウエハや各種窒化物半導体ウエハ上に実際にデバイスレベルで試作して、高耐圧性、低損失性、高速性などの諸特性を比較・検証するとともに、その結果を課題①、②の基板・エピ開発にフィードバックすることが必要である。

## 2. 研究開発の具体的内容

### (1) 高品質大口徑単結晶基板の開発

#### (a) 窒化物単結晶成長における基礎技術の検討

窒化物半導体バルク成長法における、成長初期過程制御技術、核発生制御技術等を最適化し、必要な有極性、及び無極性窒化物単結晶育成要素プロセスの開発を行う。

転位等の欠陥挙動を解明し、転位低減化、高品質化を図る。さらに 2～4 インチ級へ

の大口径化、長尺化を検討し、大型単結晶育成に必要な要素技術を明らかにする。

(b) 大口径種結晶の開発

結晶成長に必要な種結晶として、格子整合が良く、4インチ級の大口径が得られる有極性、及び無極性面成長と剥離に適した下地基板の選択を行い、大口径の数百 $\mu\text{m}$ 厚結晶自立基板を作製する。V/III比、成長温度などの成長条件の最適化、横方向成長等の結晶欠陥低減手法の導入、また成長の阻害となる不純物の低減など、表面性や結晶欠陥制御を検討して2~4インチ種結晶の実現を図る。

(c) 高導電性窒化物単結晶基板の開発

結晶の高品質化、大口径化を行うと同時に、固体、有機珪素化合物、ガスなどを用いて結晶への不純物添加を検討して、効率的なドーピング技術による導電性制御を行い、縦型デバイス動作に必要な低抵抗率の基板を実現する。

(d) 高抵抗化窒化物単結晶基板の開発

結晶の高品質化、大口径化を行うと同時に、炉環境の清浄化や原料高純度化などにより結晶への不純物混入を極力低減して、単結晶の高純度化を図り、不純物キャリア濃度の低減による高抵抗化を目指す。また高純度化に加えて欠陥の低減、アクセプター性不純物の効果的ドーピングを検討し、添加元素の種類、添加量、添加条件などを最適化することにより直流から高周波迄の用途に適する均一で安定した高抵抗単結晶の基板を実現する。

(2) 大口径基板上的高品質エピタキシャル結晶成長技術

課題(1)で開発された大口径高品質窒化物単結晶基板等を用い、4インチ級の有極性、及び無極性窒化物半導体大口径基板上的エピタキシャル成長に関して、転位等の結晶欠陥や残留キャリアを低減し、原子層レベルでの膜厚、平坦性、不純物を均一に制御する技術を開発するとともに、AlInN/InGaNやAlGaN/InGaNなどのヘテロ接合を実現する成長技術を開発する

(a) 高In組成窒化物層成長技術

有極性、及び無極性窒化物半導体基板上への高均一、高In組成InGaN層を用いた高品質電子デバイス用大口径ウエハの成長技術、および当該InGaN層への不純物高濃度ドーピング技術を開発する。

(b) 高Al組成窒化物層成長技術

有極性、及び無極性窒化物半導体基板上への高均一高Al組成AlGaN層を用いた高品質電子デバイス用大口径ウエハの成長技術、および当該AlGaN層への不純物高濃度ドーピング技術を開発する

(c) 高A1組成窒化物層成長技術

有極性、及び無極性窒化物半導体基板上への高均一高A1組成AlGaN層を用いた高品質電子デバイス用大口径ウエハの成長技術、および当該AlGaN層への不純物高濃度ドーピング技術を開発する

(d) 結晶成長その場観察評価技術

基板上での原料のマイグレーションを促進して成長面をナノレベルで平坦化するため、成長速度、歪、組成等をその場観察して、原子層レベルの成長制御を最適化し、気相反応を抑制する技術を開発する。

(3) 窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価

(a) 横型電子デバイスの評価

横型のパワー高周波素子、パワースイッチング素子を想定して、評価デバイスパターンを標準化し、エピ材料・構造・品質とデバイス特性との相関関係を、プロセス要因を極力排除した評価を通して検討する。

課題(2)で開発された大口径高品質窒化物エピタキシャルウェハー等を用い、簡素なソース/ゲート/ドレイン電極構造による評価トランジスタパターンにおいて、キャリア濃度特性、I-V特性、C-V特性などの基本特性評価を行う。また、ゲート長を短くした実用デバイスに近いFET構造において、耐圧、オン抵抗、リーク電流、高周波特性などより実際の特性の評価を行う。

(b) 縦型電子デバイスの評価

縦型のパワー高周波素子、パワースイッチング素子を想定して、評価デバイスパターンを標準化し、エピ材料・構造・品質とデバイス特性との相関関係を、プロセス要因を極力排除した評価を通して検討する。

課題(2)で開発された大口径高品質窒化物エピタキシャルウェハー等を用い、簡素なソース/ゲート/ドレイン電極構造による評価トランジスタパターンにおいて、キャリア濃度特性、I-V特性、C-V特性などの基本特性評価を行う。

(c) 窒化物単結晶基板上デバイスの優位性確認

窒化物単結晶基板上に成長したエピタキシャルウェハーをもとに、その上の各種デバイス特性を従来のサファイア、SiC等の基板上デバイスの特性と比較検討し、その優位性を確認する。

(d) 有極性、及び無極性デバイス構造の比較

有極性、及び無極性面方位をもつ高品質窒化物基板上に成長したエピタキシャルウェハーをもとに、その上の各種デバイス特性の比較検討を行う。電圧未印加時に電流の流れないエンハンスメント型の動作、電流コラプスを抑制した低オン抵抗化、高In系チャンネル導入による高速化、高A1バリア導入による高耐圧化など、将来の家電・通信・交通システムへの応用を目指したデバイス構造を試作・評価して、有極性面上と無極性

面上での長所、短所を明確化し、それらのデバイス可能性を検討する。

### 3. 達成目標

#### (1) 高品質大口径単結晶基板の開発

4インチ有極性単結晶基板、及び3～4インチ無極性単結晶基板を実現する。有極性単結晶基板では転位密度 $<5 \times 10^3 \text{ cm}^{-2}$ 、無極性単結晶基板では転位密度 $<10^5 \text{ cm}^{-2}$ 、積層欠陥密度 $<10^3 \text{ cm}^{-1}$ の特性を得る。また、伝導度制御として、導電性基板では比抵抗 $<10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ 、高抵抗基板では比抵抗 $>10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ の特性を得る。

#### (2) 大口径基板上的高品質エピタキシャル結晶成長技術

無欠陥ヘテロ接合構造を実現するために、高品質、高導電性制御されたエピタキシャル成長法を開発し、以下の低欠陥高品質GaN及び混晶エピ層を実現する。

AlGaN及びInGaN混晶エピ成長層において、Al又はIn組成  $1 \geq x \geq 0.5$  で

転位密度 $<10^6 \text{ cm}^{-2}$

ドーピング不純物濃度 N型 $>10^{18} \text{ cm}^{-3}$  P型 $>10^{17} \text{ cm}^{-3}$

口径4インチ基板状にて、面内均一度：厚み $\pm 10\%$ 、組成： $\pm 10\%$ 、ドーピング不純物濃度 $\pm 20\%$

また、GaNエピ成長層において

残留ドナー濃度 $<10^{15} / \text{cm}^3$

転位密度：有極性基板上で $<5 \times 10^3 \text{ cm}^{-2}$ 、無極性基板上で $<10^5 \text{ cm}^{-2}$

口径4インチ基板状にて、面内均一度：厚み $\pm 5\%$ 、ドーピング不純物濃度 $\pm 10\%$ 、ドーピング精度 $\pm 20\%$

また、上記エピ層からなる窒化物半導体ヘテロ構造において

2次元電子ガス移動度 $>2,500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

#### (3) 窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価

有極性単結晶基板上FETと無極性単結晶基板上FETの特性の差違、及びその利害得失の明確化を実施する。広い混晶組成範囲における耐圧と結晶欠陥の相関の明確化と課題①、②へのフィードバックを実施する。

また、GaN基板を用いて、耐圧 $>1,200\text{V}$ 級の縦型および横型トランジスタを試作・評価し、SiやSiC等多種基板との比較においてGaNが有利または不利な点を明らかにする。