

# ダイヤモンド半導体で高効率の紫外線発光

## 間接遷移型半導体でも高効率発光を実現

ダイヤモンドで *p-i-n* 接合ダイオードを形成し、室温での電流注入により波長が 250nm 以下の深紫外線を高効率に発光させることに成功した。この深紫外線発光は、ダイヤモンドに特有な高密度励起子状態を利用したもので、200°C 以上の高温下でも動作する。これらは、ダイヤモンドのような間接遷移型半導体でも、高効率に深紫外線を発光することができることを示す重要な結果である。

We have succeeded in fabricating a diamond *p-i-n* junction diode. The diode emits high-efficiency deep-ultraviolet (UV) light with the wavelength of shorter than 250 nm efficiently by current injection at room temperature. This deep-UV light emission has been realized by using the high density excitonic states in diamond, and can be observed at 200°C and higher temperature. These results show that even indirect transition semiconductors like diamond can emit high-efficiency deep-UV light.

### 深紫外線光源のニーズ

波長が350nm以下の深紫外線領域の光源は、殺菌・浄水、高密度光記録用光源、蛍光分析などの各種情報センシング、医療・バイオ分野などへの幅広い応用が見込まれ、盛んに研究されている。現在は紫外線ランプなどが使われているが、高い電圧が必要なうえ、小型化が難しいなどの問題がある。このため、深紫外線を放射できる半導体発光ダイオード(LED)の実現が望まれている。

### 高温量子デバイスとしてのダイヤモンドの可能性

ダイヤモンドは室温で5.47eVという

大きなバンドギャップを持ち、他の半導体材料と比較して励起子の束縛エネルギーが80meVと大きく、励起子のボーア半径も1.5nmと小さい。したがって室温でも励起子が安定に存在でき、それをより高密度( $10^{18} \sim 10^{19} \text{cm}^{-3}$ )に保持することができる。シリコンなどの他の半導体材料で励起子を安定に保持するためには極低温にしなければならない。つまり、他の半導体材料では極低温で初めて観測が可能になる物理現象が、ダイヤモンドでは室温でも観測できるのである。この特異な励起子の性質を利用すれば、ダイヤモンドのような間接遷移型半導体でも波長が250nm以下の深紫外線を効率よく発光

**牧野 俊晴** まきの としはる  
toshiharu-makino@aist.go.jp  
ナノテクノロジー研究部門  
高温量子エレクトロニクスグループ  
CREST 共同研究員 (つくばセンター)

ダイヤモンドの接合特性、特に *p-n* 接合の電気・発光特性の制御技術の開発に従事。極低温でなくても固体内素励起などの量子性が観測できる特異な材料としてダイヤモンドに注目し、高密度励起子状態とこれに起因した様々な物理現象の解明に取り組んでいる。また、これを利用したデバイスの作製にも取り組んでいる。

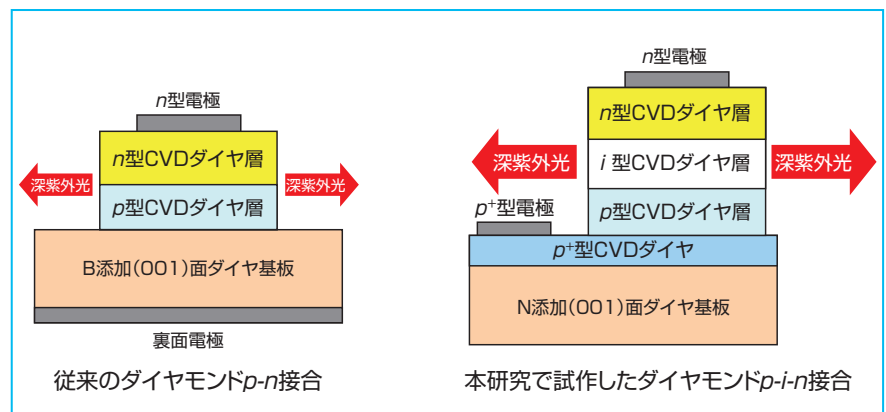


図1 ダイオード構造の模式図

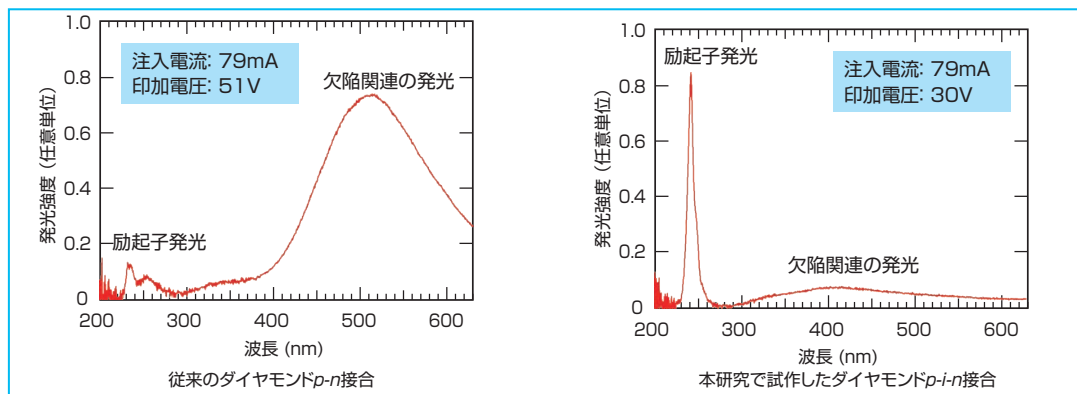


図2 発光特性

できる可能性がある。われわれは、マイクロ波プラズマ化学気相合成法により、(001) 面ダイヤモンド基板への原子レベルで平坦な高品質の単結晶ダイヤモンド薄膜の合成や、ボロン (B) ドープ *p* 型・リン (P) ドープ *n* 型の伝導制御にも成功している。そして、2005 年、この技術を使って (001) 面ダイヤモンド *p-n* 接合を作製し、室温での波長 235nm の励起子発光を実現した。

も発光効率も増す。この興味深い現象は、ダイヤモンドに特有な高密度励起子状態が深く関係していることが、最近の研究から分かり始めている。また、200℃ 以上の高温でも、図2に示したのと同様、理想に近い発光特性が観測された。これは、励起子の特異な性質に加え、ダイヤモンドの高い熱伝導率、高い熱的安定性などの特性によるものである。

### ダイヤモンドLEDの実現をめざして

ダイヤモンド深紫外線LEDを実現するには、発光機構のさらなる解明とこれに基づいたデバイス設計により深紫外線の取り出し効率や電圧効率を向上させることが必須である。今後も基礎(発光機構の物理学的な解明)と応用(デバイス化のプロセス技術の開発)の両面から、ダイヤモンドLEDの実現に向けて取り組んでいきたい。

### 紫外線発光の鍵は高密度励起子状態

しかし、このダイヤモンド *p-n* 接合ダイオードでは、励起子の発光強度よりも欠陥による深い準位からのブロードな発光強度の方が大きかった。そこで、発光領域となる *p* 型層と *n* 型層の間に結晶性の良好なダイヤモンド半導体層 (*i* 型層) を挟んだ *p-i-n* 接合ダイオードを作製した (図1)。これにより、深い準位からの発光を、従来に比べて励起子からの発光と比べて大幅 (積分強度で 20 分の 1 以下) に抑制できた (図2)。 *p-i-n* 接合ダイオードの内部量子効率は、従来の *p-n* 接合ダイオードの発光特性と比較して 1 桁以上改善されている。また、注入電流の増加に伴い、励起子の発光強度は比例して増加していくのに対して、深い準位からの発光強度の増加率は大きく減少することがわかった (図3)。すなわち、注入電流を増加すれば、励起子発光の絶対強度

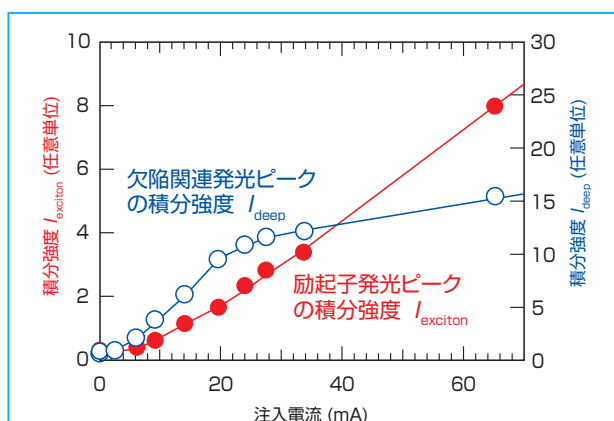


図3 発光強度の注入電流依存性

#### 関連情報：

- T. Makino, H. Kato, M. Ogura, H. Watanabe, S.-G. Ri, S. Yamasaki, H. Okushi: Jpn. J. Appl. Phys. 44, L1190 (2005).
- T. Makino, N. Tokuda, H. Kato, M. Ogura, H. Watanabe, S.-G. Ri, S. Yamasaki, H. Okushi: Jpn. J. Appl. Phys. 45, L1042 (2006).
- プレス発表 2006 年 8 月 28 日：「ダイヤモンド半導体で高効率の紫外線発光に成功」
- 特願 2006-228583 「高効率間接遷移型半導体紫外線発光素子」
- 本研究は (独) 科学技術振興機構 CREST プロジェクト「新しい物理現象や動作原理に基づくナノデバイス・システムの創製」の一環として推進された。