

【日本語版】

キーセンテンス：

1. ワイドギャップ窒化物半導体の結晶成長技術の開拓
2. 深紫外LED、半導体レーザの開発
3. テラヘルツ量子カスケードレーザの開発

キーワード：

量子光デバイス、量子電子デバイス、レーザダイオード、発光ダイオード、深紫外発光素子、テラヘルツ量子素子、半導体結晶成長、窒化物半導体、半導体超格子

研究目的

深紫外（波長 200-350nm）やテラヘルツ（THz）周波数帯の半導体レーザ、LED など、これまで実現が難しかった未開拓周波数領域の半導体発光素子は、殺菌や医療、高密度光記録、半導体照明、生化学産業、化学工業、各種非破壊・透視検査など広範囲にわたる新たな応用分野への展開が期待され、それらの開発が強く求められている。当研究室では、新規半導体材料の結晶成長技術の開拓、ならびに、原子・ナノスケールで制御された人工構造による電子・光制御技術の導入などにより、未踏波長領域発光素子などの革新的な機能を有する半導体発光素子を実現する研究を行っている。これまで、ワイドギャップ半導体の新規結晶成長法の考案による世界最高品質結晶の実現とそれを用いた発光効率の飛躍的向上や、新しい原理に基づく量子ヘテロ構造・フォトリックナノ構造の導入などにより、実現が難しいとされてきた未踏領域の深紫外LED、THz半導体レーザを実現し、さらにそれらの限界性能の追及を行ってきた。未踏波長素子の実現とそれらの高性能化により様々な応用分野が切り開かれ、今後の産業の発展への大きな貢献が期待される。

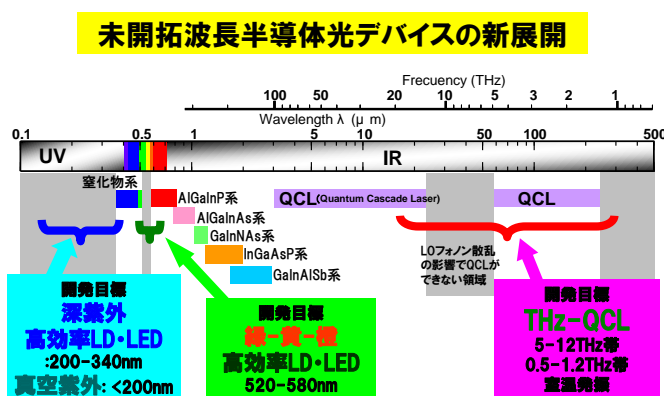


図 1. 半導体レーザの実現波長領域と開発目標としている未開拓領域

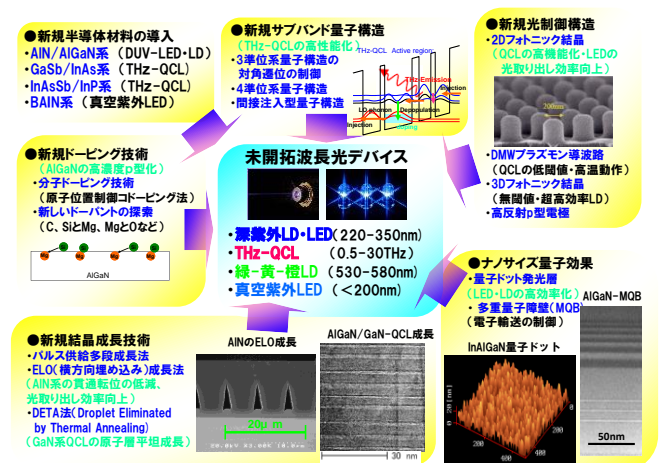


図 2. 未開拓波長発光デバイス実現のために投入している新規半導体技術

## 1、ワイドバンドギャップ窒化物半導体の結晶成長技術の開拓と深紫外LEDの開発（平山、藤川、前田）

波長が 220-350nm の深紫外 LED・半導体レーザは、医療、殺菌・浄水、高密度光記録、照明、生化学産業、化学工業、公害物質の高速分解など、幅広い分野での応用が考えられ、その実現が大変に期待されている。しかし、深紫外発光素子を実現する上で最も有望な AlGaN 系混晶半導体は、結晶の欠陥が多く発光効率が著しく低減するなど LED 素子の開発は難しかった。

本研究では、高品質 AlGaN 系混晶半導体の結晶成長技術の開拓を新規に行い、世界最短波長の高効率深紫外 LED を実現した。「アンモニアパルス供給多段成長法」という新しい結晶成長法を考案し、世界最高品質 AlN 結晶の実現、それを用いて内部量子効率の飛躍的改善（100 倍程度）を達成した。また、In 組成変調領域への電子・ホール局在効果を用いて 80% 程度の非常に高い内部量子効率も実現した。さらに、多重量子障壁(MQB)を用いた電子リーク制御法による注入効率の向上、光取り出し効率の改善などを行うことで、最短波長領域 220-280nm の高効率 LED を世界に先駆けて実現した。得られた深紫外 LED は殺菌、医療応用などにおいて実用レベルの高出力（連続動作で 30mW 以上）をすでに達成しており、一般家庭や公共設備などへの普及の可能性を大いに広めた。今後、技術をさらに発展させ、青色 LED と同等の高効率化の実現、紫外レーザダイオード (LD) の実現、真空紫外 LED などへの展開が期待される。

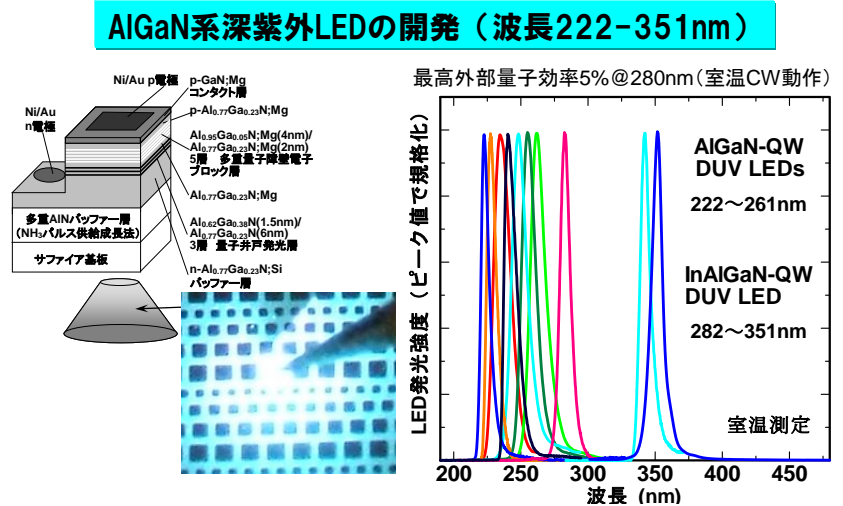


図3. 実現した AlGaN 系半導体深紫外 LED (波長 222-351nm) の構造と動作スペクトル

## 2、GaAs 及び GaN 系半導体を用いたテラヘルツ量子カスケードレーザの開発（平山、寺島、林、佐々木）

光と電波の間の周波数領域に位置するテラヘルツ光は、電波の透過性と、光の取り扱いやすさや高分解能など両方の性質を兼ね備えているため、各種非破壊・透視検査など幅広い応用分野において期待されている。テラヘルツ量子カスケードレーザ (THz-QCL) は、小型・高効率、長寿命、連続出力、安価なテラヘルツ光源としてその実現が期待されている。しかし THz-QCL は現在開発途上であり、動作周波数は 1-5THz に限られており、また低温動作しか得られていない。本研究では精度の高い結晶成長技術を駆使し GaAs 系及び GaN 系 QCL 構造を実現し、その高温動作において世界をリードしている。間接注入型量子構造を採用することにより、低周波数 QCL における世界最高動作温度 (1.89 THz, 160K) を実現し、さらに、LO フォノンエネルギー増加法を用いた室温動作実現にも取り組んでいる。また、現在実現が不可能とされている 5-12THz の QCL の実現を目指し、新たに GaN 系半導体を用いた QCL の実現への試み始めており、世界初の GaN 系バンド内遷移 THz 発光の観測にも成功している。

### THz-QCLの開発（3.7THz、最高動作温度150K）

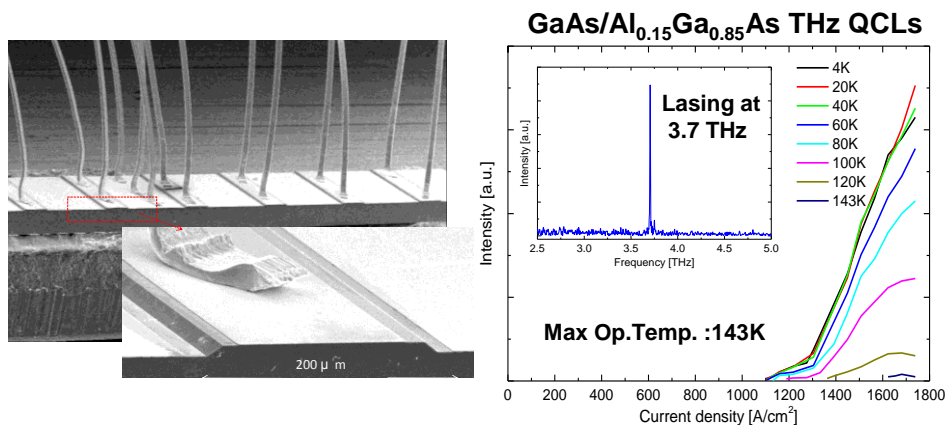


図4. GaAs 系テラヘルツ量子カスケードレーザの素子概観と発振動作特性

**[English]**

Key Sentence :

1. Development of crystal growth technique for wide-bandgap nitride semiconductors
2. Development of deep-UV LEDs and laser diodes
3. development of terahertz quantum cascade lasers

Key Word : Quantum optodevice, Quantum electronic device, Laser diode, Light-emitting diode, Deep-ultraviolet emitting device, Terahertz quantum device, Semiconductor crystal growth, Nitride semiconductor, Semiconductor superlattice

**Purpose of Research**

The development of new-frequency semiconductor light sources, such as deep-ultraviolet (DUV) light-emitting diodes (LEDs) and laser diodes (LDs), or terahertz quantum-cascade lasers (THz-QCLs) is one of the most important subjects, because they are required for a wide variety of potential applications, i. e., sterilization, water and air purification, medicine and biochemistry, light sources for high density optical recording, white light illumination or non-destructive seeing-through examinations. Quantum Optodevice Laboratory is studying to stand at the forefront of optics and nanotechnology, e.g. in creating innovative optical device including undeveloped frequency semiconductor emitters, and develop a new research field through merging advanced optical/laser science, atomic/nano-scale material fabrication technology, and novel semiconductor crystal growth technologies and so forth. Through the introduction of the novel crystal growth technology for wide-gap semiconductors, we have achieved innovative emitting devices such as highly-efficient DUV-LEDs with shortest wavelength regime (220-350nm), or THz-QCLs. We have also investigated the performance-limit of these devices by introducing innovative quantum heterostructures and/or photonic nano-structures. Through the creation of the applicable field of these new emitting devices, we aim for contributing to the realization of rich human being society.

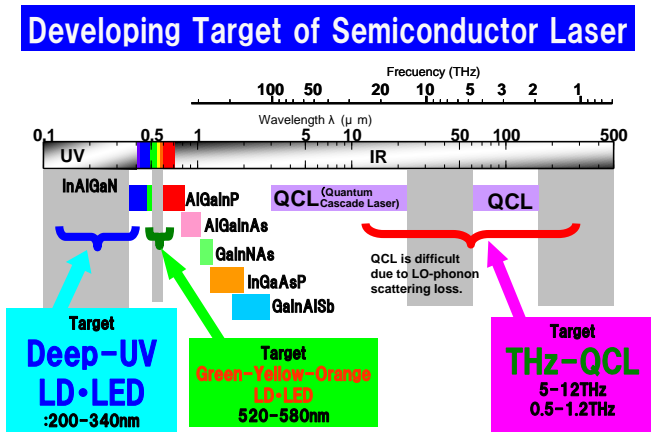


Fig. 1. Development target for new-frequency semiconductor light-emitting devices

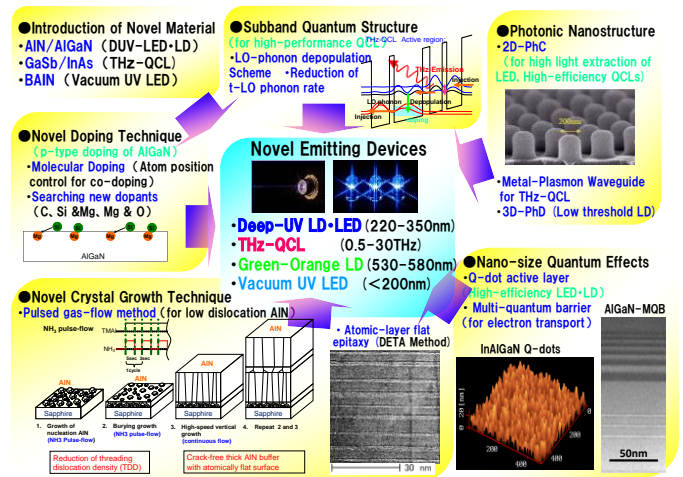


Fig. 2. Innovative semiconductor techniques introduced for achieving undeveloped-frequency light-emitting devices

**1. Development of AlGaN-based semiconductor crystal growth techniques and realization of deep-UV LEDs (Hirayama, Fujikawa, Maeda)**

Deep-ultraviolet light-emitting diodes (DUV-LEDs) and laser diodes (LDs) are in strong demand for various applications including sterilization, water purification, medicine and biochemistry, light sources for high-density optical recording, and so on. 220-350 nm-band DUV-LEDs have been achieved by developing novel crystal growth techniques for wide-bandgap AlN and AlGaN-based

semiconductors. An epitaxial growth technique using pulsed-gas feeding has been introduced, and a dramatic reduction in the threading-dislocation density (TDD) of AlN has been realized. Significant increases in internal quantum efficacy (IQE) have been achieved for AlGa<sub>N</sub> quantum-well (QW) DUV emissions by using low TDD AlN templates. The IQE of the DUV emission from AlGa<sub>N</sub>-QWs were enhanced by approximately two orders of magnitude by reducing TDD of AlN templates. We have observed quite high IQE value (>80%) by introducing In-segregation effects in AlGa<sub>N</sub> alloy. The electron injection efficiency (EIE) of the LEDs was also significantly increased by introducing a multi-quantum barrier (MQB) as an electron blocking layer (EBL). The maximum output power and external quantum efficiency (EQE) of the 280 nm DUV-LED were over 30 mW and 5 %, respectively. We have obtained the highest-record output powers and EQEs measured under room temperature (RT) continuous wave (cw) operations for LEDs with wavelength shorter than 260 nm, i. e., the output powers of 15 mW and 5 mW for the 247 and 237 nm DUV-LEDs, respectively. These achievements will contribute to accelerating the practical application of DUV-LEDs and to expanding them to a wide range of applications.

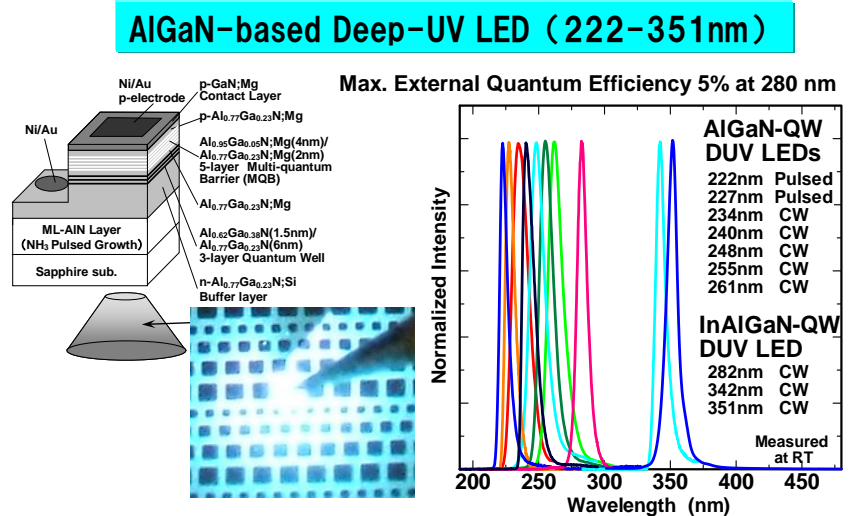


Fig. 3. Recent achievements of deep-UV LEDs using AlGa<sub>N</sub>-based semiconductors

## 2. Development of terahertz quantum-cascade lasers (THz-QCLs) (Hirayama, Terashima, Lin)

Terahertz quantum-cascade laser (THz-QCL) is promising as an advanced THz laser source, since THz-QCL has a lot of advantages, i.e., the size is quite small, continuous wave, high-power and high-efficiency operation is possible, the lasing line-width is quite sharp, and it is maintenance free (long-lifetime). However, there are still major problems preventing the THz-QCL from practical use, i.e., the lasing is obtained only at low temperature and the frequency range is limited. Therefore, our subjects for the THz-QCLs are to achieve room temperature (RT) lasing and to expand the lasing wavelength both to 5-12 THz and 0.5-1.2 THz-band. We have developed 3 THz-band QCLs with GaAs/AlGaAs semiconductor. We fabricated QCL superlattices (SLs) structures with one-atomic-layer accuracy flat hetero-interfaces by using a molecular beam epitaxy (MBE). We have introduced low-propagation-loss double-metal plasmon-waveguide (DMW) for THz-QCLs using silver (Ag) and copper (Cu) metal. We obtained a high accuracy layer thickness control (within 1%) by measuring satellite peaks of X-ray diffraction rocking-curves. We then achieved 1.9 THz lasing of the GaAs-based THz-QCL. The maximum operating temperature was 160K. We also achieved the first observation of inter-subband emission from GaN-based QC structures by current injection.

## AlGaAs-based THz-QCL (3.7THz, Op. Temp.150K)

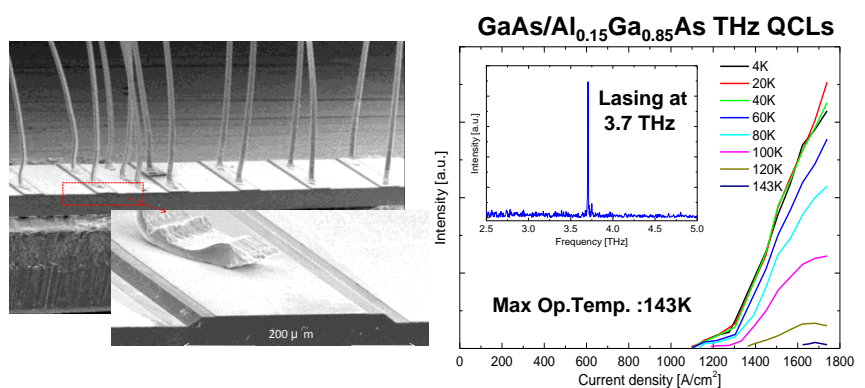


Fig. 4. Achievements of high-temperature operation of GaAs-based THz-QCLs

***Principal Investigator***

平山 秀樹      Hideki Hirayama

***Research Staff***

寺嶋 亘      Wataru Terashima

定 昌史      Masafumi Jo

***Students***

Yun Joosun

***Assistant and Part-timer***

佐藤 知子      Tomoko Sato

***Visiting Members***

松浦 恵里子      Eriko Matsuura

鹿嶋 行雄      Yukio Kashima

森島 嘉克      Yoshikatsu Morishima