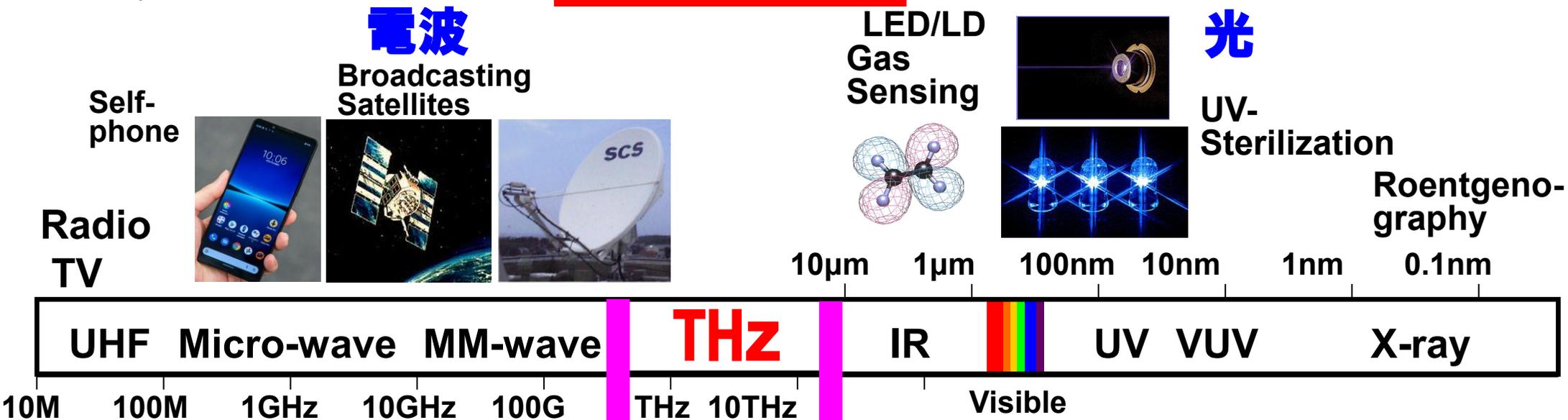


高出力・THz量子カスケードレーザー の開発

所属 理化学研究所
光量子工学研究センター
テラヘルツ量子素子研究チーム
氏名 平山 秀樹

テラヘルツ光

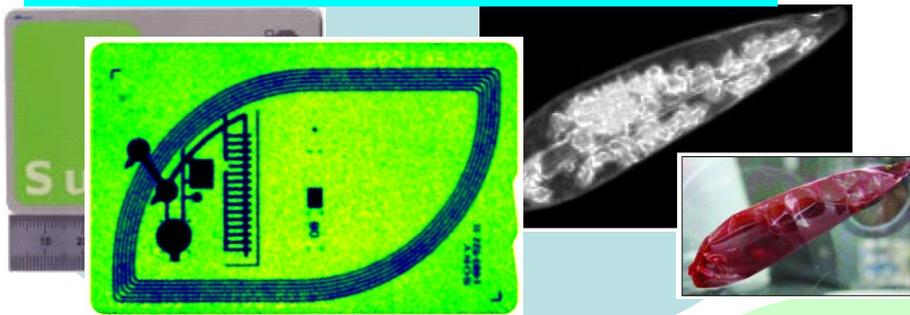


多くの物を透過
高分解能~0.1mm
深さ~10cm (乾燥物)

光と同じ伝搬特性

物質の同定

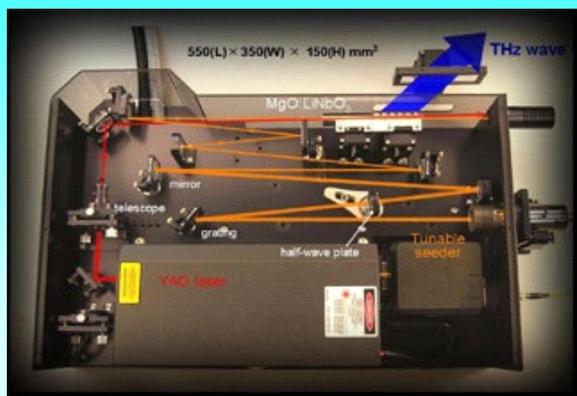
生命に無害



従来技術とその問題点

●半導体レーザへの期待（超小型/モバイルTHz光源）

THzパラメトリック発振器 (0.5~20 THz)



サイズ
素子寿命
出力
動作
価格
モバスト性
波長可変

- 大型 50×30cm
- ~2000時間
- 平均出力で数mW
- パルス動作
- 高価
- 壊れやすい
- 広い波長可変性

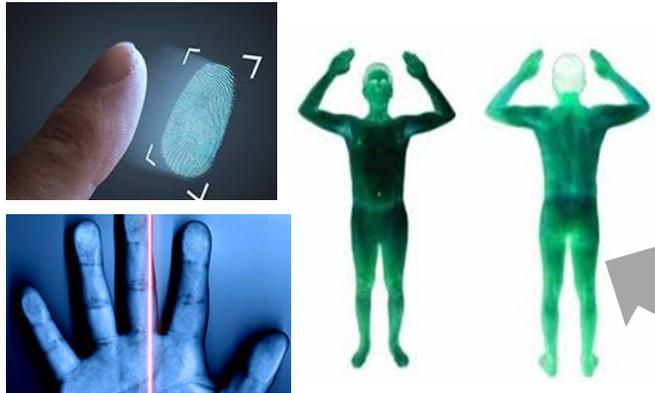
THz量子カスケードレーザ (1.2~5.4 THz)



- 微小：0.5×2mm
- 長寿命>10000時間
- >1W可能
- 連続動作
- 低価格
- 高い耐久性
- 外部共振で20%程度

THz-QCLに期待される応用分野

●セキュリティチェック

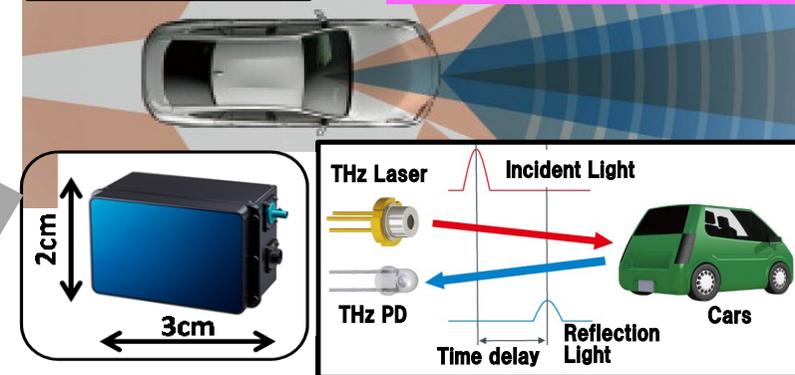


THzパイロメーター
THzカメラ

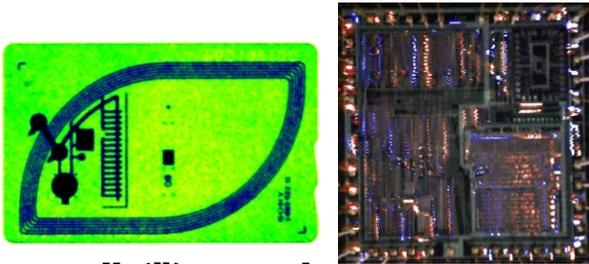


THz LiDAR

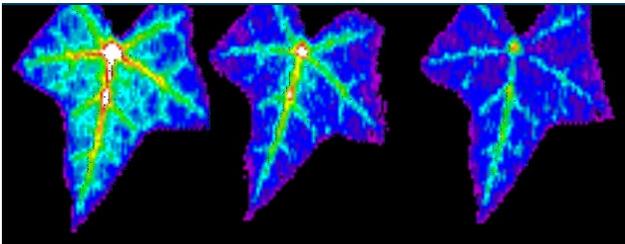
- Independent of the Weather
- High Resolution



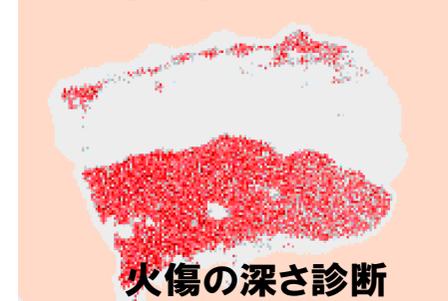
●電子産業(非接触検査)



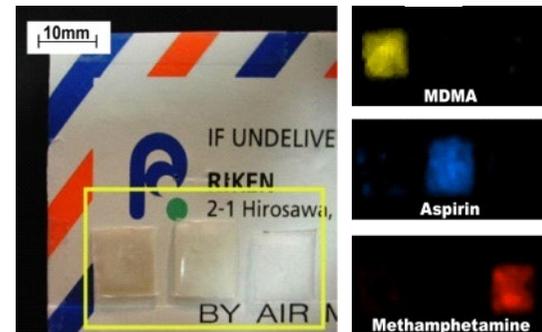
●農業への応用



●医療への応用



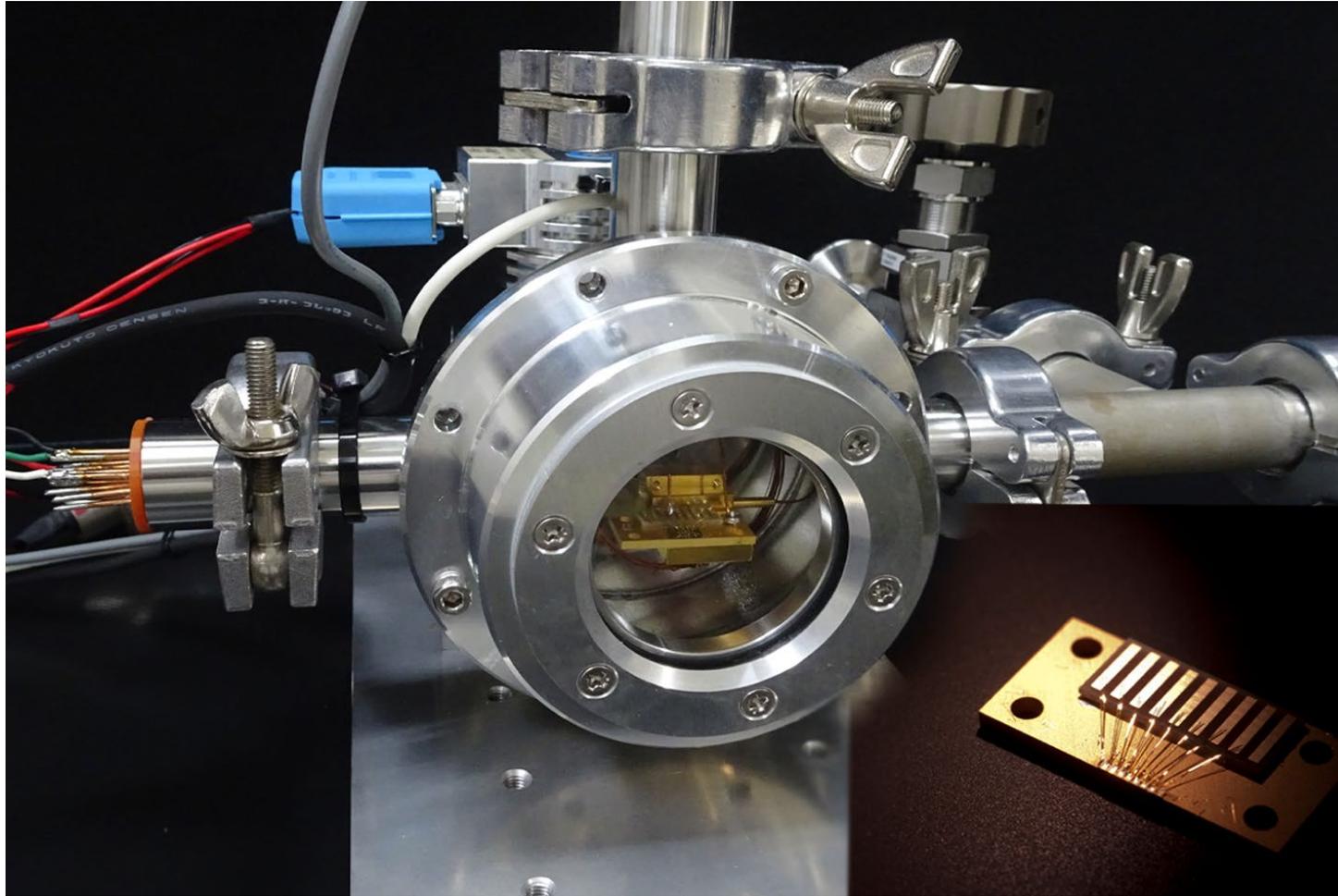
●危険物検査(麻薬・爆発物)



●食品検査



モバイル・高出力THz-QCL光源



★手のひらサイズ冷凍機で高出力THz-QCLをデモ
・動作温度～80K、出力～400mW、3～4.5 THz

THz透過試験：測定風景

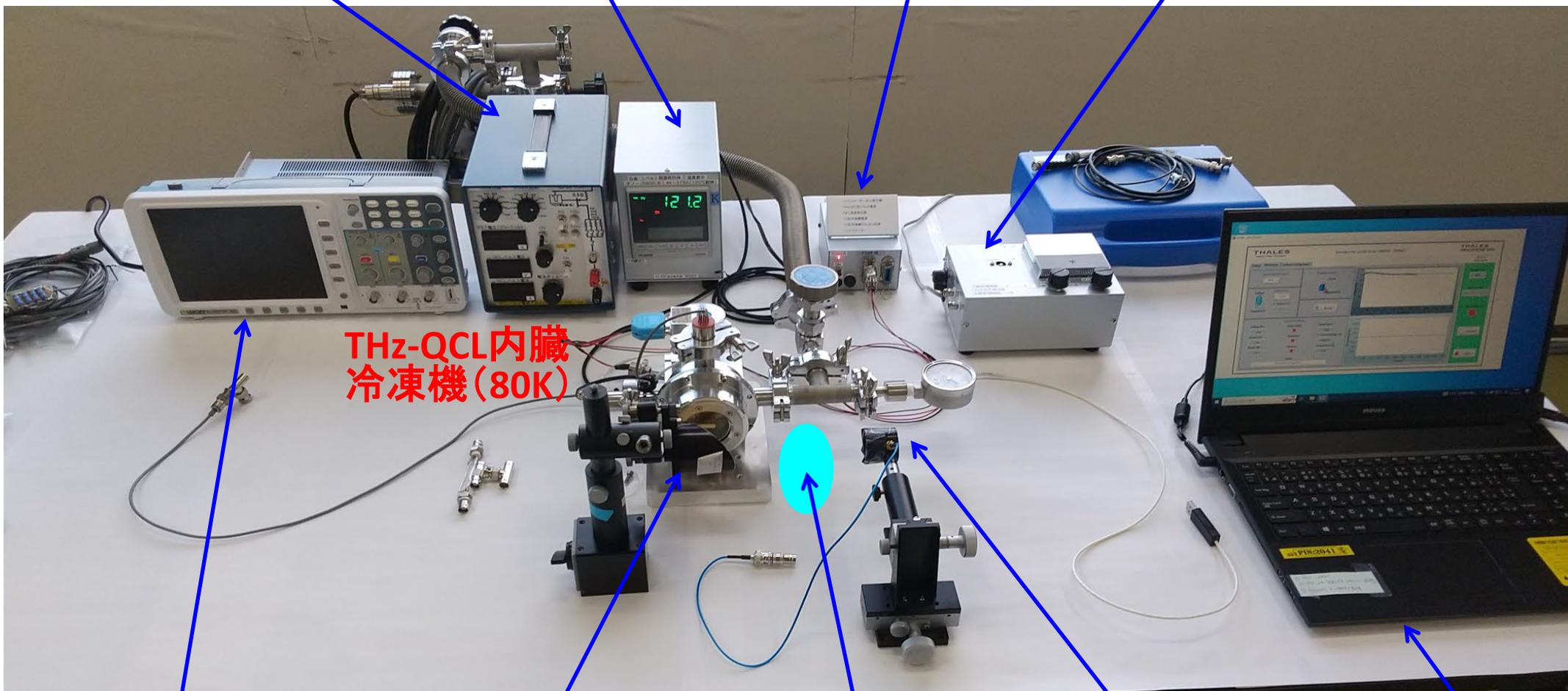
(THz-QCLとパイロメーター)

QCLパルス電源

冷凍機温度表示器

冷凍機電源

パイロメーター表示器



THz-QCL内臓
冷凍機(80K)

パルス波形表示
オシロスコープ

放物面鏡(Au)

ここに測定物を
置き透過イメー
ジを撮る

THz用パイロ
メーター

制御PC

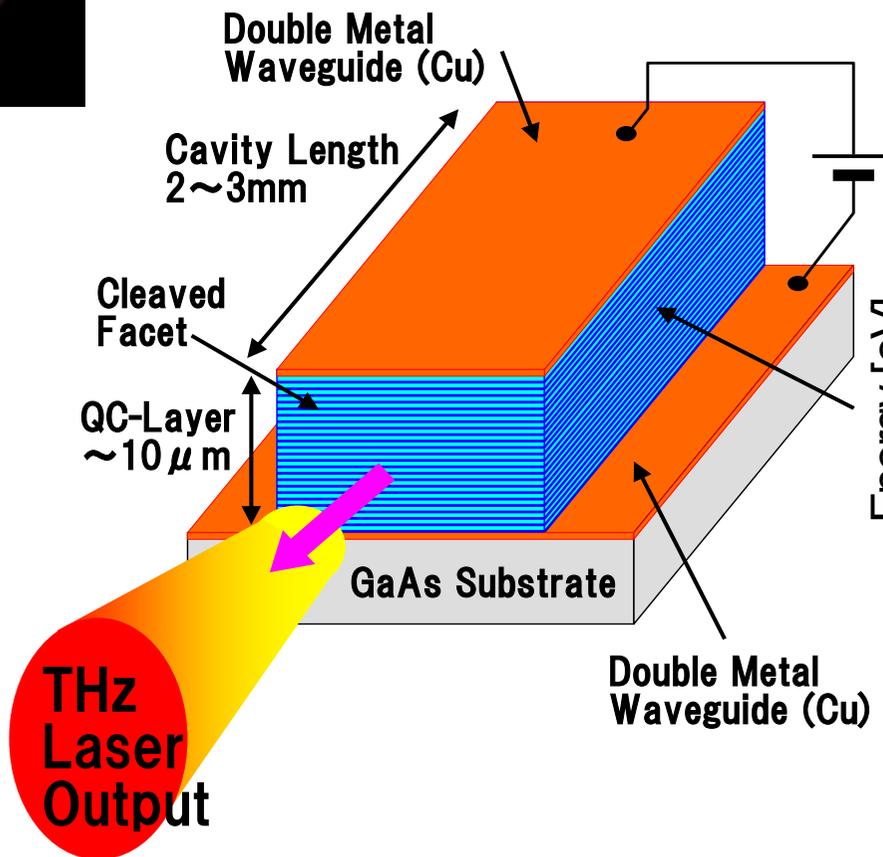
THz量子カスケードレーザー (QCL)

THz-QCL: **実用型テラヘルツ光源**

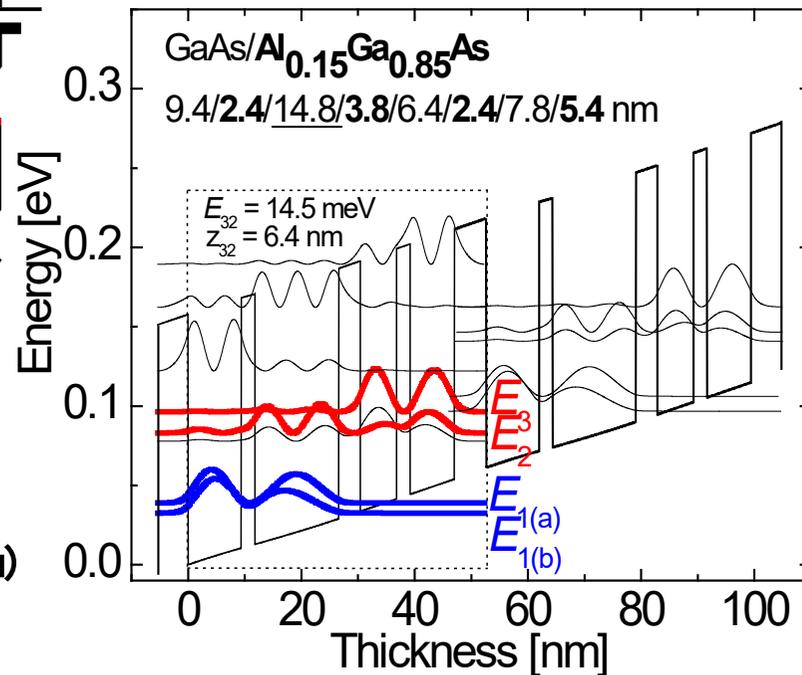
超小型、高出力、高効率、狭線幅、連続動作、安価

材料系 :
GaAs/AlGaAs
InP/InGaAlAs
GaN/AlGaN
周波数 :
1.2-5.4 THz

**●チップ1個で
ワットクラス
高出力**

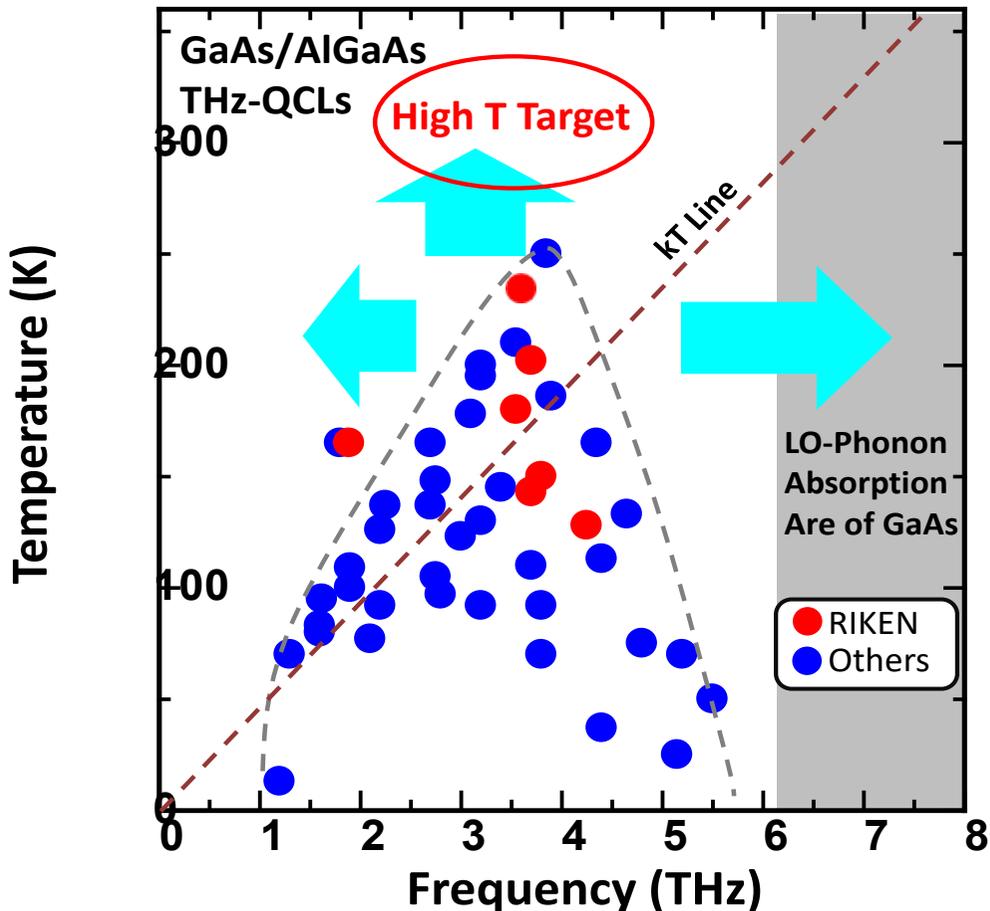


GaAs/AlGaAs QC-Active Layer
(4QW × 200 module)



- 半導体超格子からの**バンド内遷移発光**を用いたレーザー
- キャリアリサイクリングによる**高出力動作**

THz-QCLの現状と将来の目標



●現状:

周波数: 1.2-5.4 THz

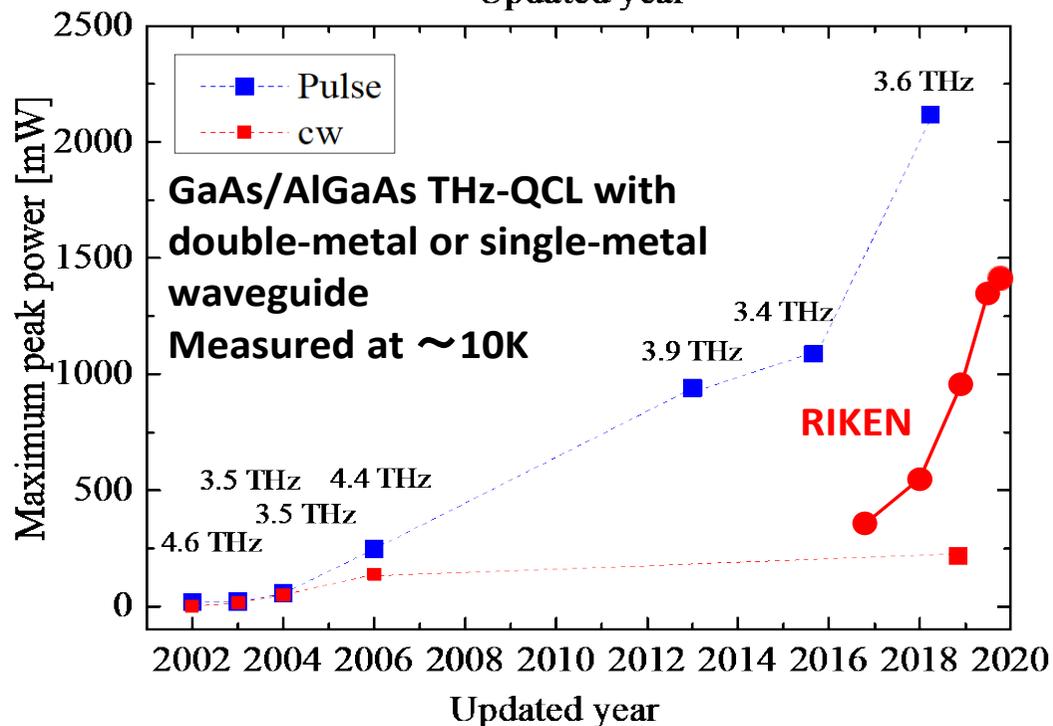
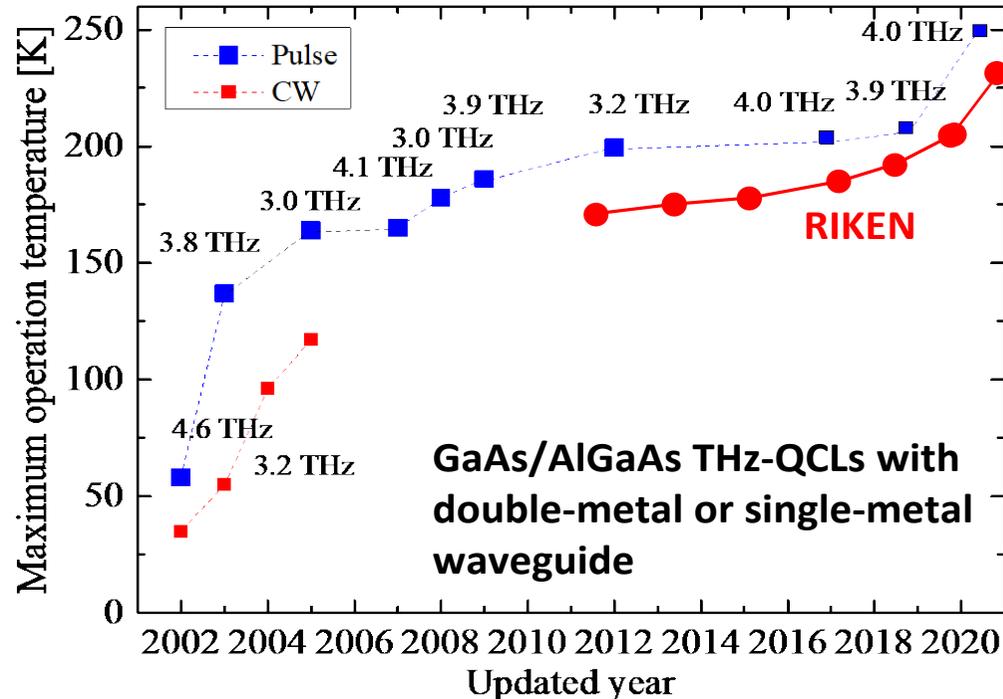
最高動作温度: 250K

最高出力: 2.4W

●将来展望

300K以上の動作

動作周波数の拡大 5-12 THz

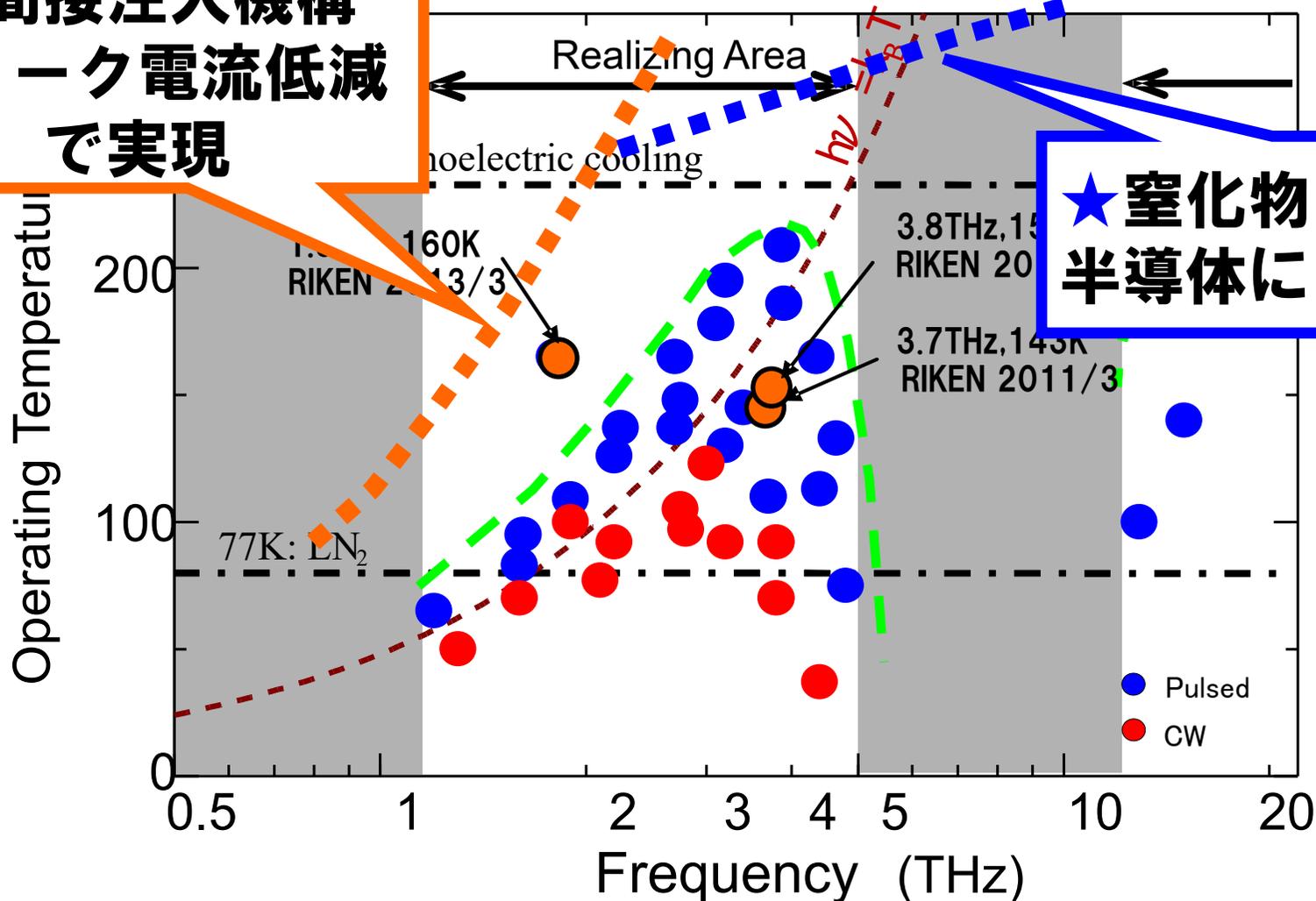


理研のTHz-QCL新領域開拓

- **ワットクラス高出力 (GaAs系)**
 - ・1.4 W出力@4.3THzの実現
 - ・リーク電流遮断とドーピング制御
- **室温動作の理論提案 (GaAs系)**
 - ・アイソレート3準位機構の提案(350Kまで可能)
 - ・最高動作温度230Kの実現
- **未開拓周波数QCL (GaN & ZnO系)**
 - ・2.5-15 THz、1~8 μ m赤外 (GaN) , 2.5-13 THz (ZnO)
- **面発光(SE) THz-QCL (GaAs系)**
 - ・超高出力(100Wクラス)、平行直進ビーム

高性能化へのアプローチ

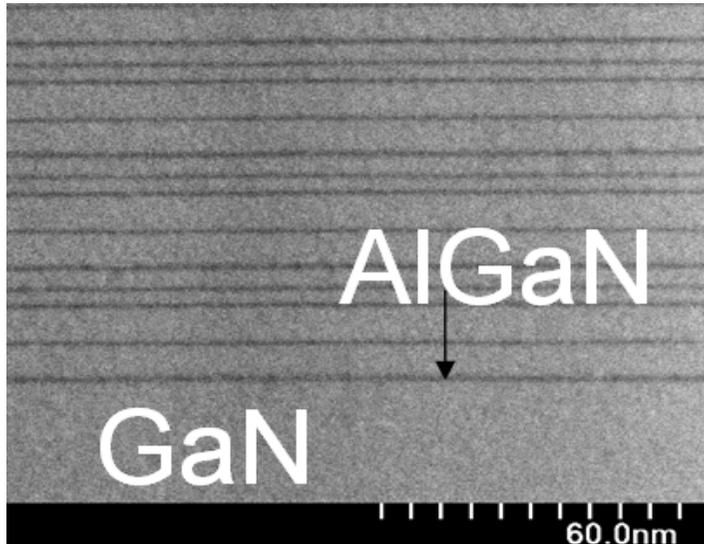
★ 間接注入機構
★ リーク電流低減で実現



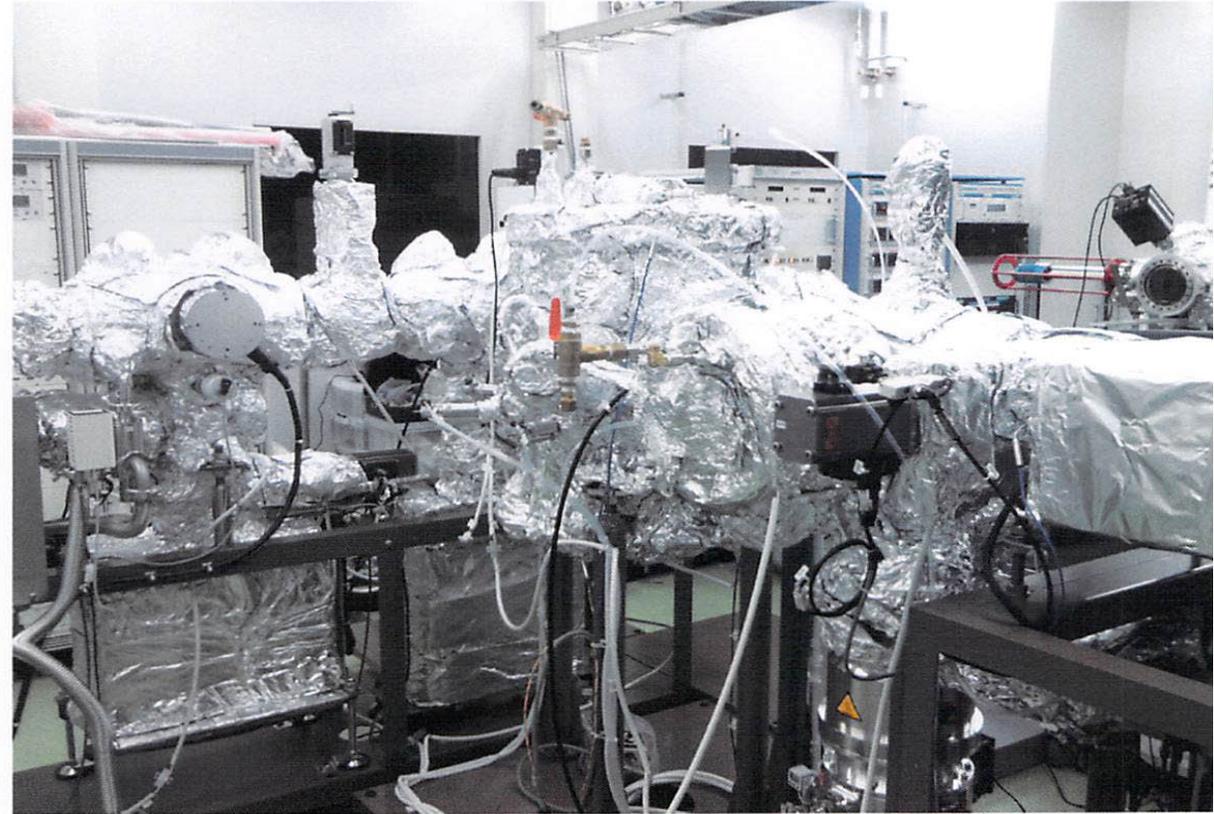
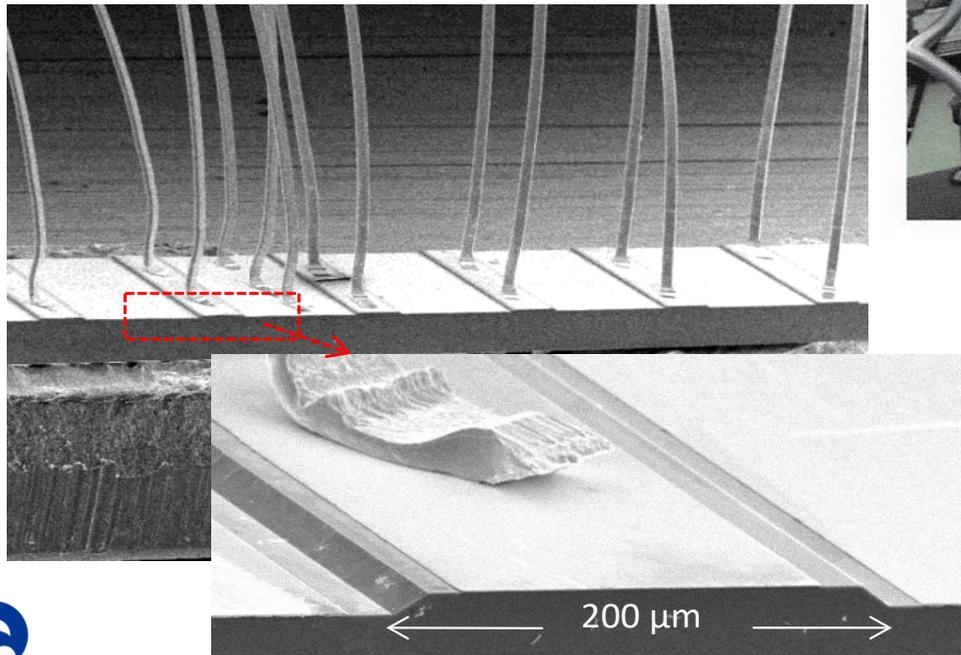
★ 窒化物・酸化物半導体により実現

- 目標
- 室温発振
 - 周波数の拡大: 1.2THz以下、5-12THz
 - 高出力化

MBEによるTHz-QCLの作製



Cu-Cu metal-metal waveguide



- 超高真空装置 (MBE) で薄膜を形成 (膜厚誤差0.5%以内)
- 半導体プロセスで両面金属導波路を形成
- FTIRで低温測定

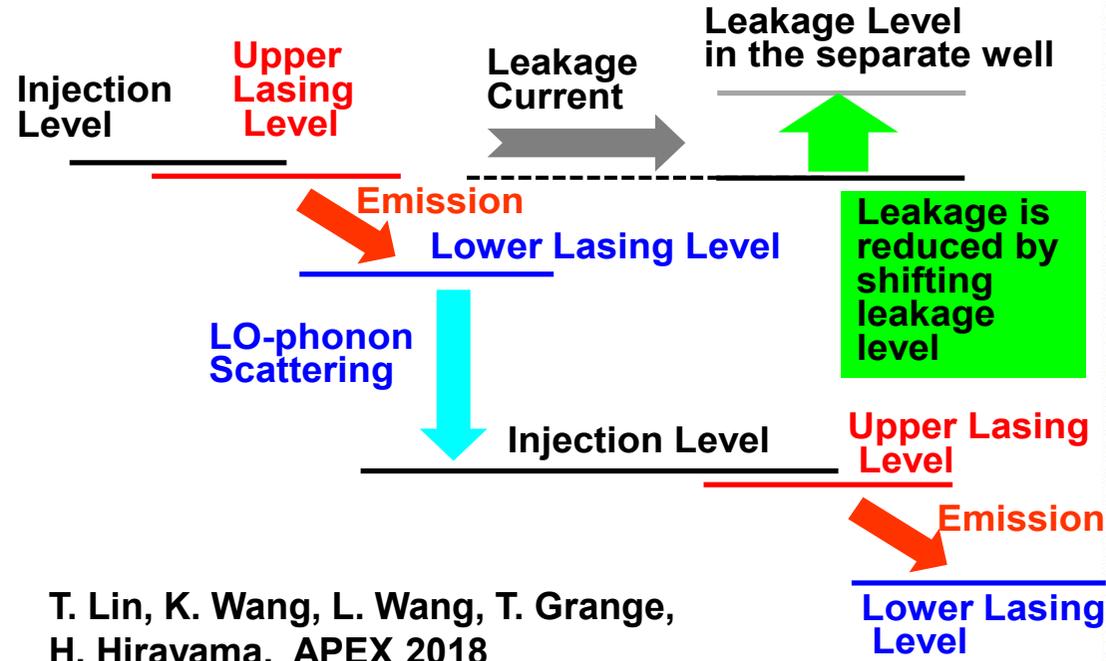
新技術の特徴・従来技術との比較

THz-QCLは室温動作が得られていない。また、高出力・高効率動作が難しく、周波数も1.2～5.4THzに限られている。

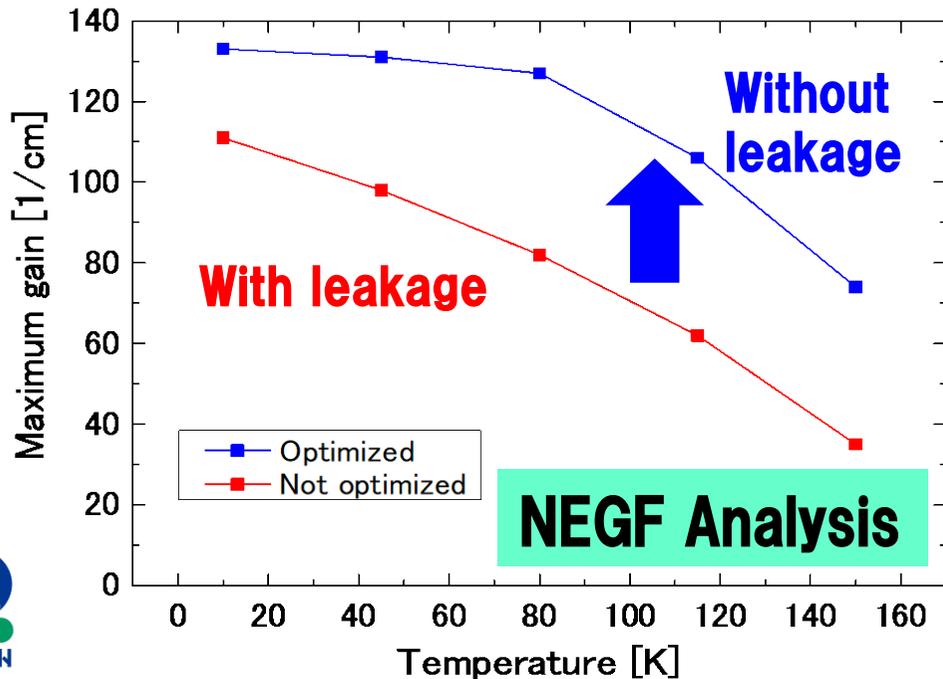
本開発 → THz-QCLに新技術を投入

- 「水平リークを遮断」することで、従来比3倍程度の高出力化を実現した。
- 高濃度ドーピング効果で従来比2倍程度の高出力を実現した。
- 「アイソレート3準位機構」の提案により、室温動作を予測した。
- GaN系半導体の導入による、赤外～THzにわたる広い未踏周波数と、高温高出力動作を解析で予測した。

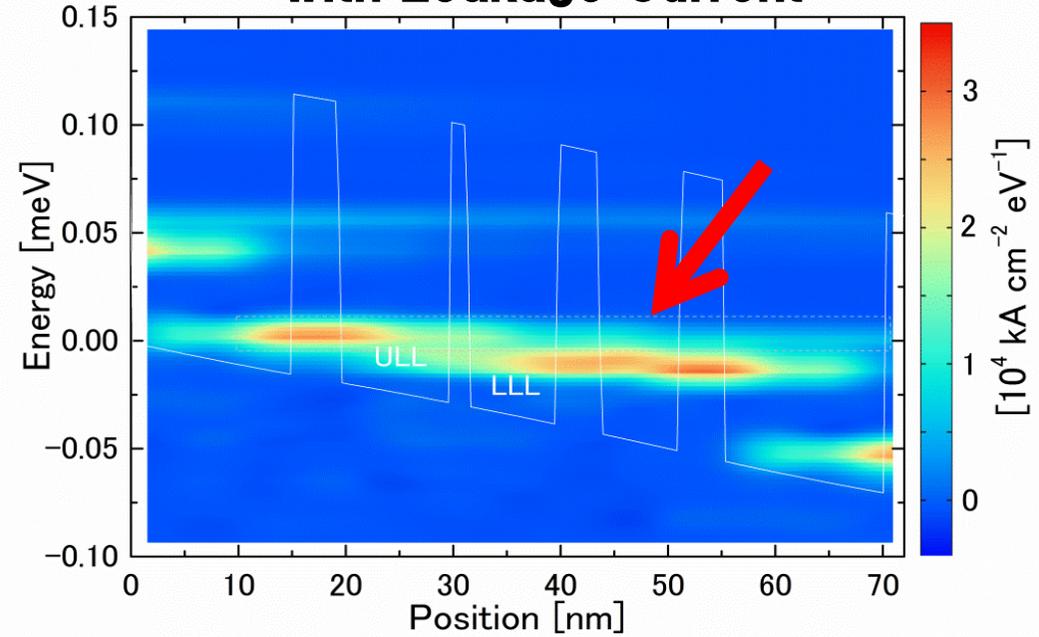
水平リーク電流遮断による高出力化の実現



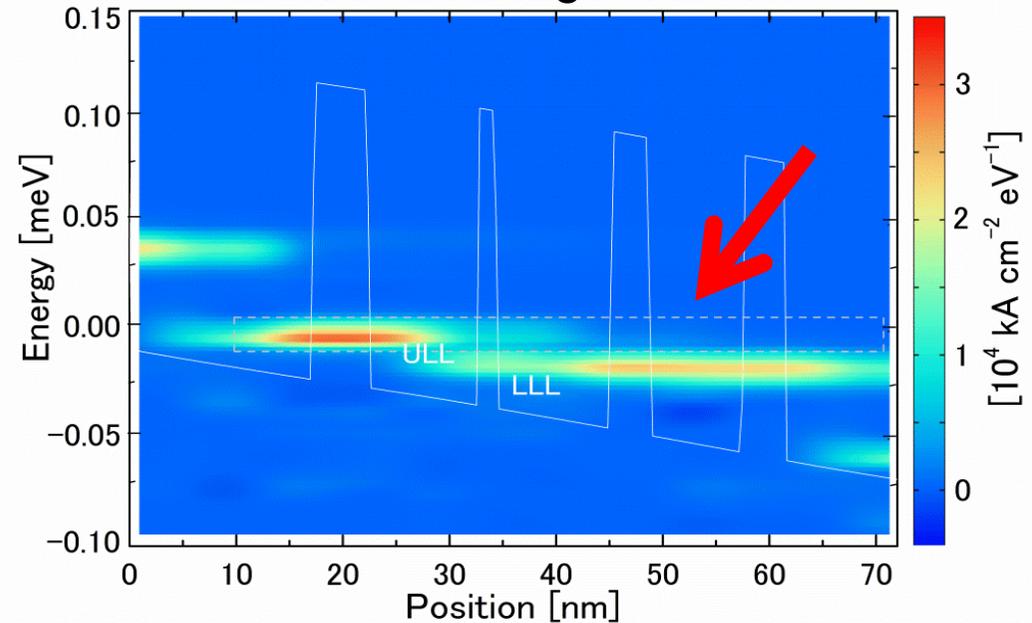
T. Lin, K. Wang, L. Wang, T. Grange,
H. Hirayama. APEX 2018



With Leakage Current



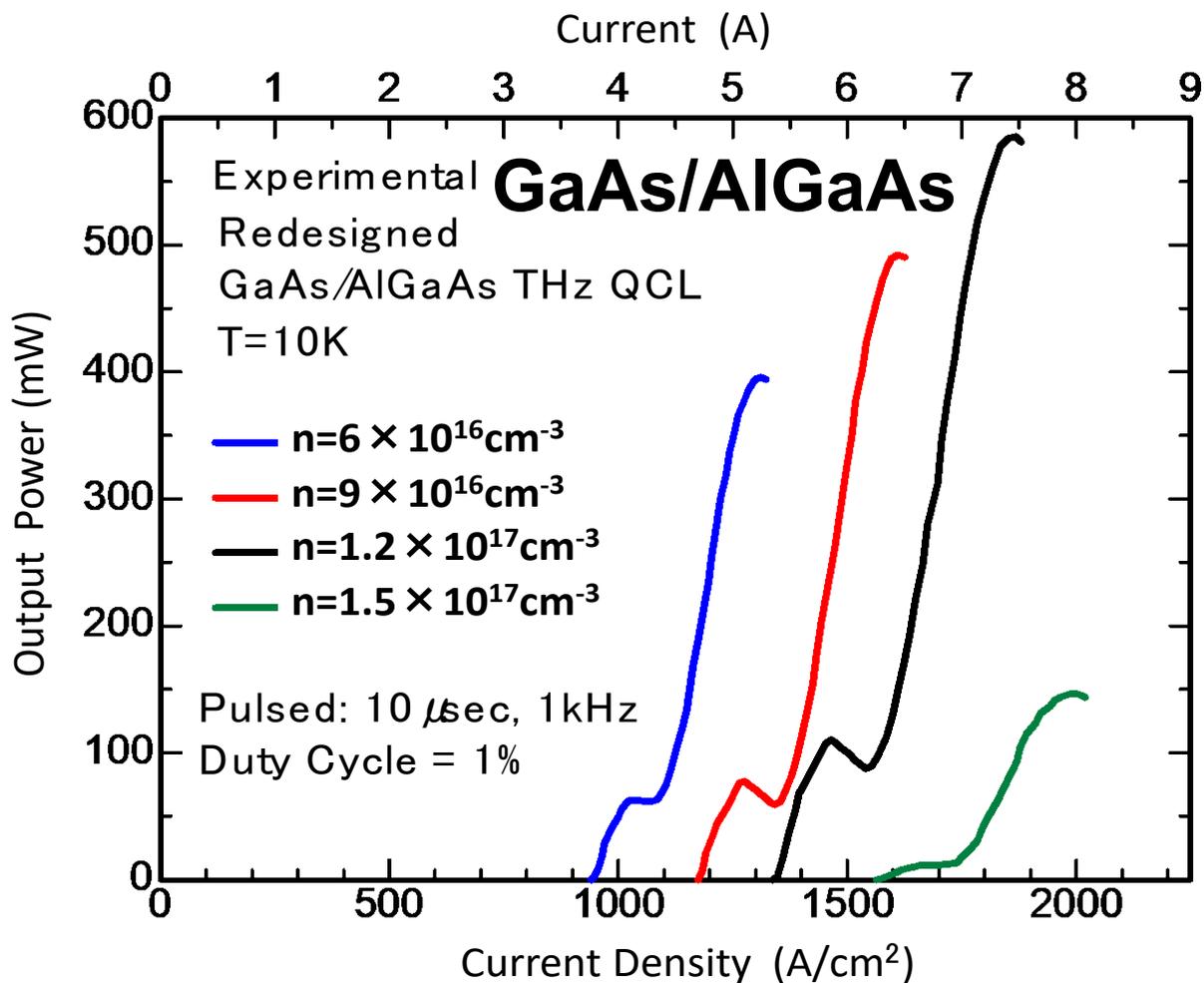
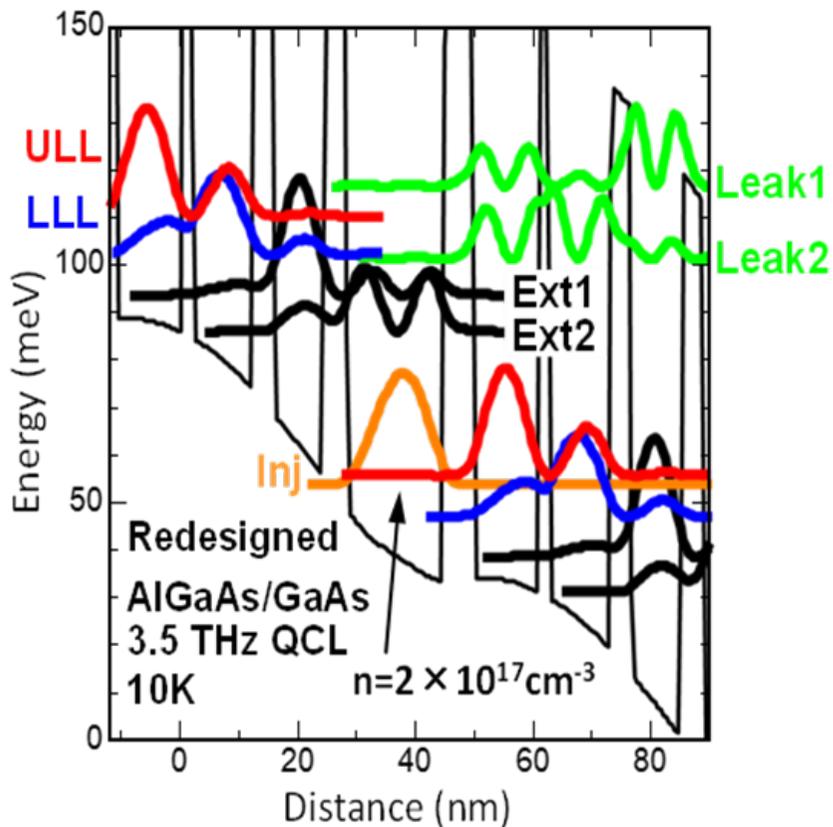
Without Leakage Current



高濃度ドーピングで高出力化

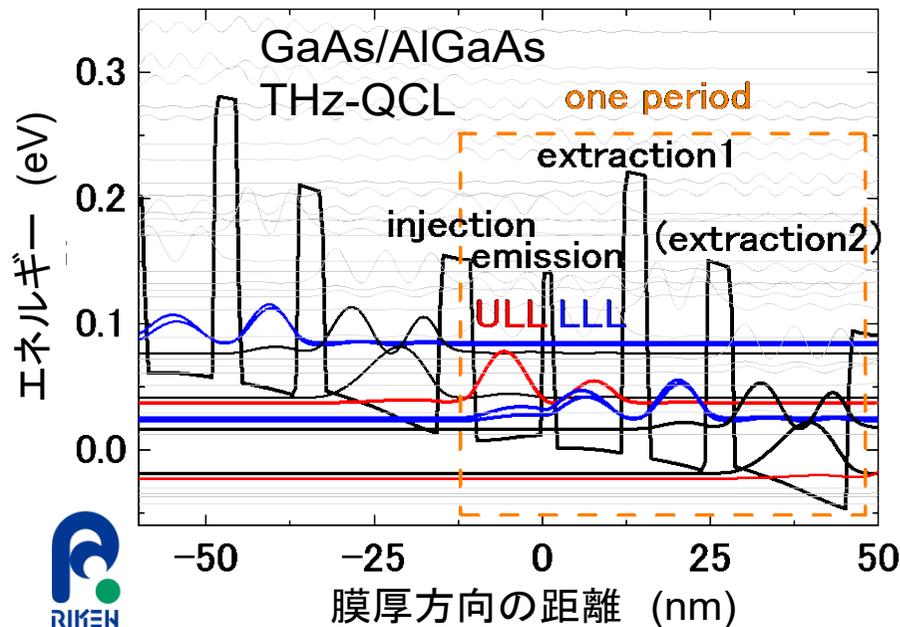
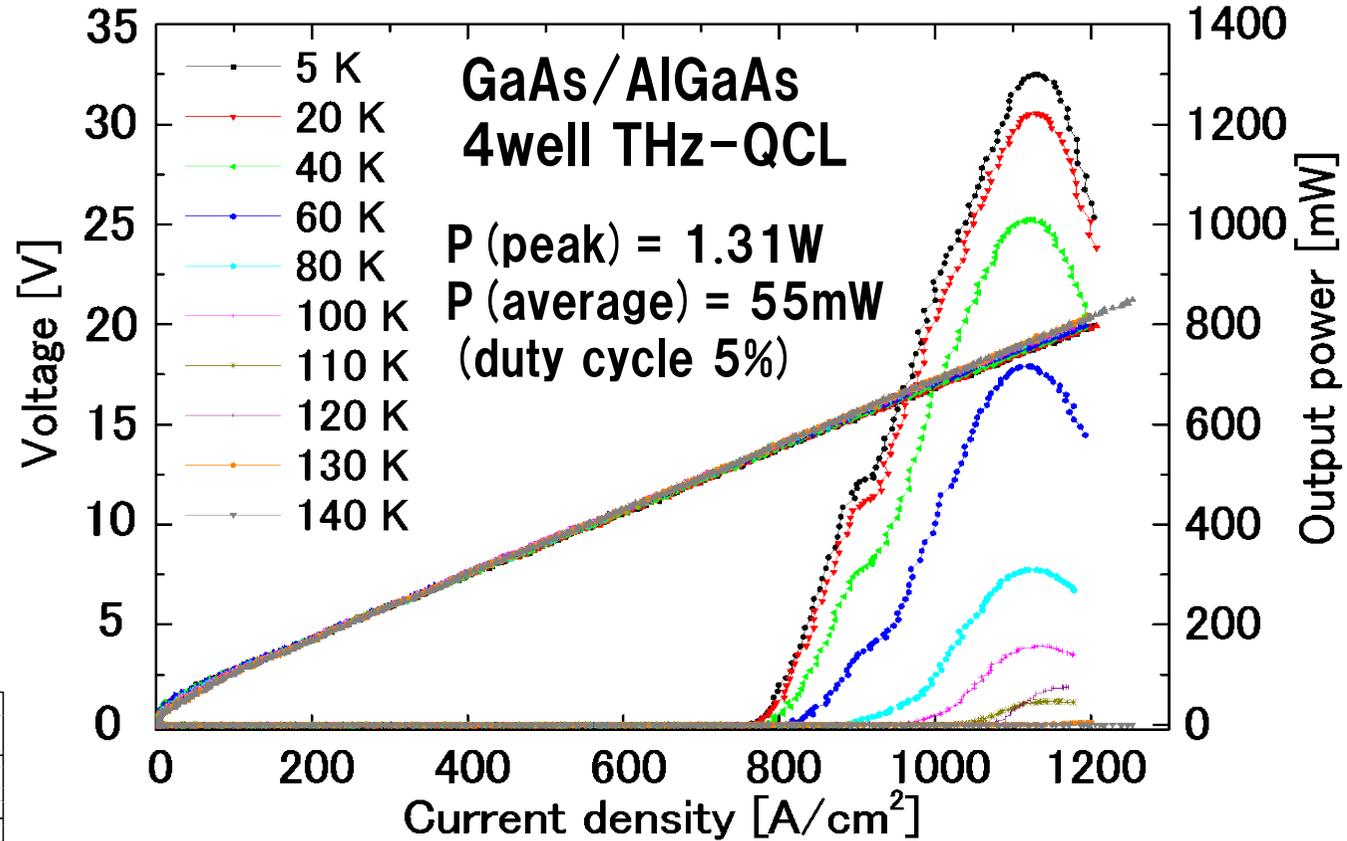
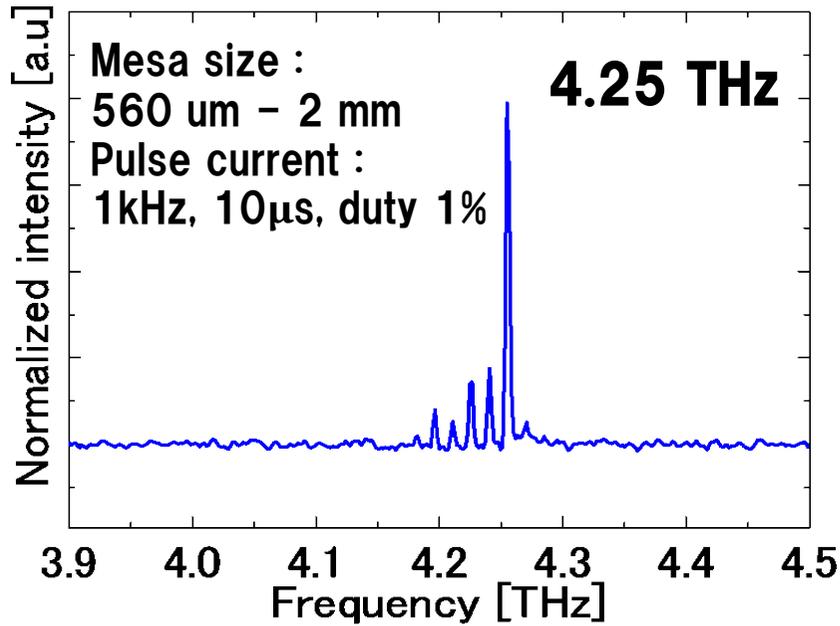
●ドーピング時にバンドアラインメントをとる事で光利得を大幅に増加

Redesigned to correct energy states



● **400mW** at $n = 6 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$, **600mW** at $n = 1.2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$

高出力(1.3W) THz-QCLを実現



Mesa Size: 400 μm \times 2 mm
Pulse: 1 kHz - 50 μs , duty 5 %

$P(\text{peak})_{\text{max}} = 1.31 \text{ W}$
 $P(\text{average}) = 55 \text{ mW}$

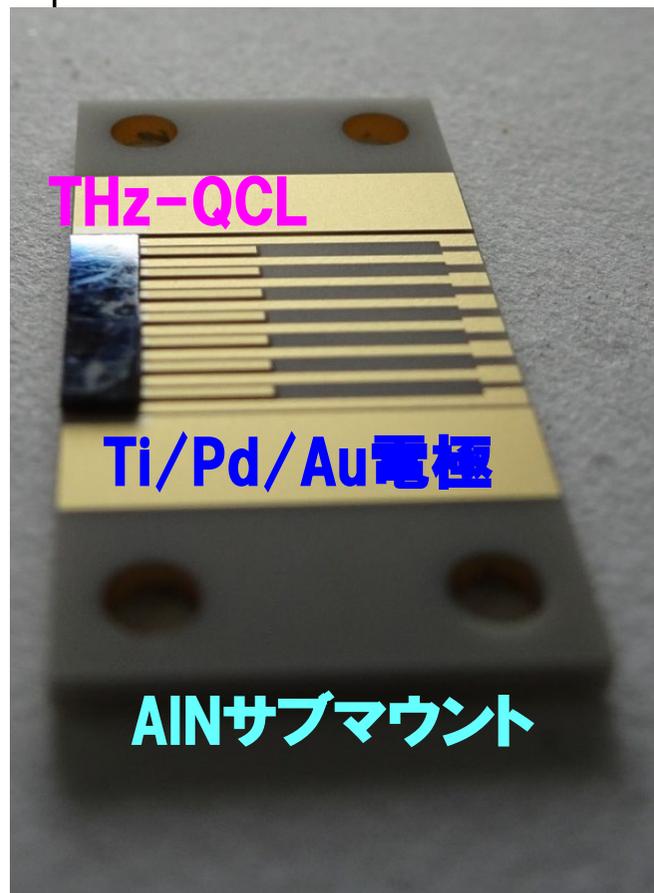
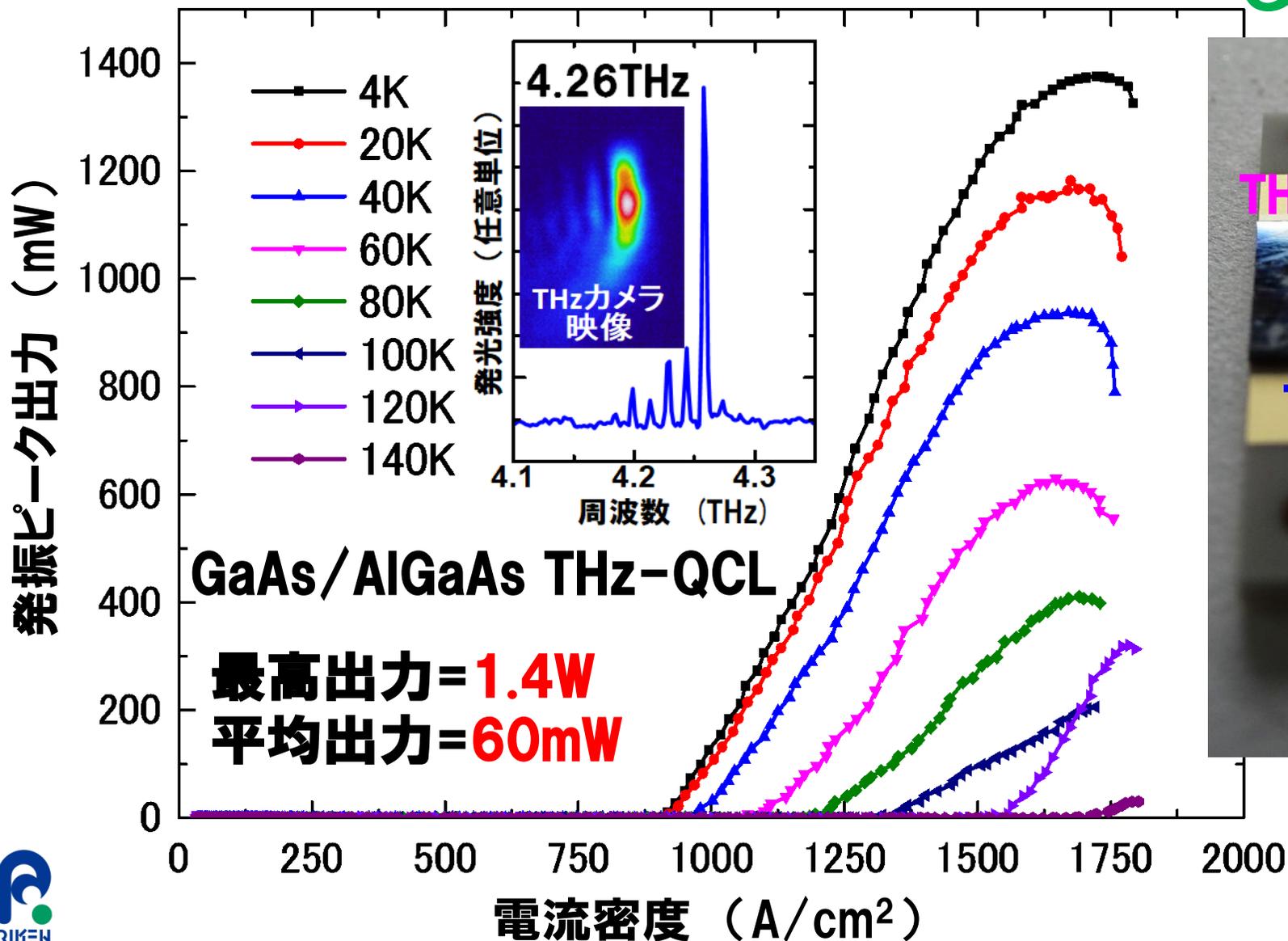
高出力1.4W THz-QCL

通常共振器構造
で世界トップ

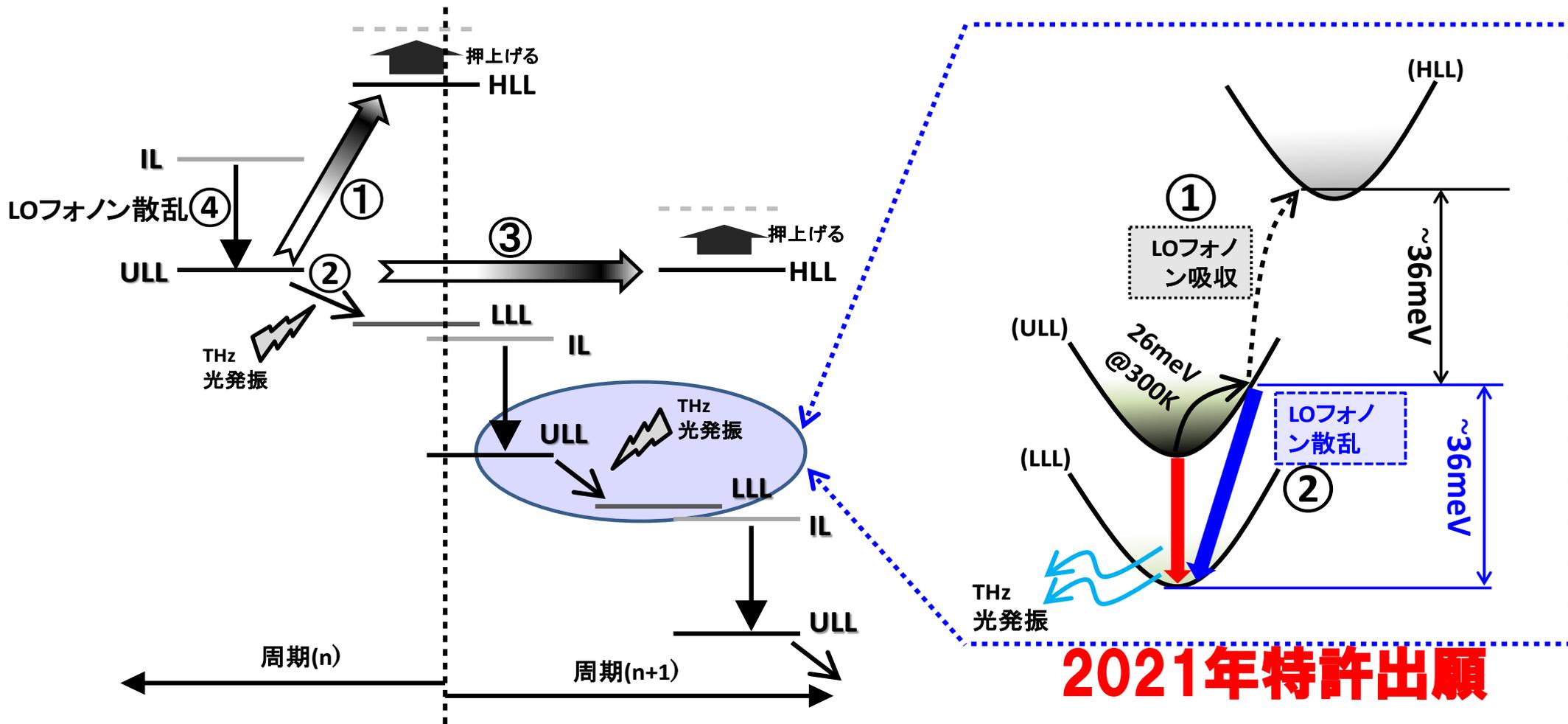
●ヒートシンクへのボンディングでさらに高出力化

$f=4.26$ THz

GaAs/AlGaAs



常温動作可能な「アイソレート3準位機構」



ULL: 発振上位準位 (Upper Lasing Level)
 LLL: 発振下位準位 (Lower Lasing Level)
 IL: 注入準位 (Injection Level)
 HLL: 上空リーク準位 (Highly Lying Level)

- ①熱励起電子LOフォノン吸収リークチャンネル
- ②熱励起電子LOフォノン散乱リークチャンネル
- ③水平トンネルリークチャンネル
- ④垂直間接注入

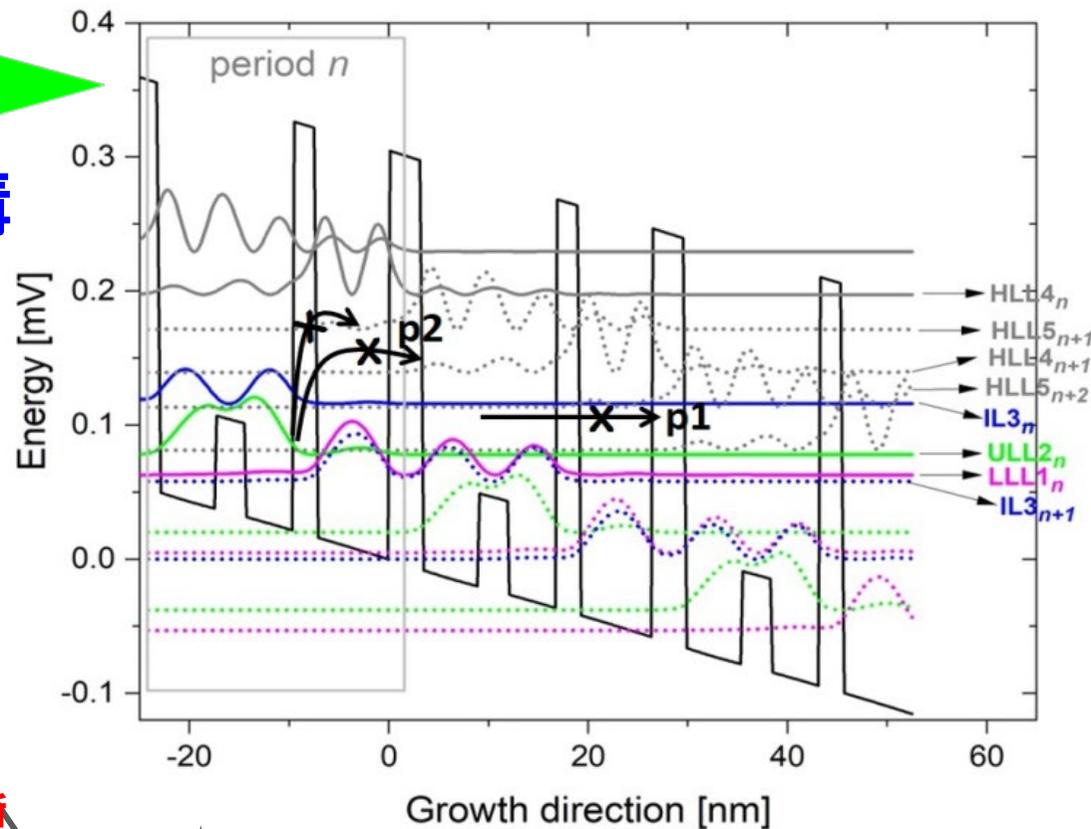
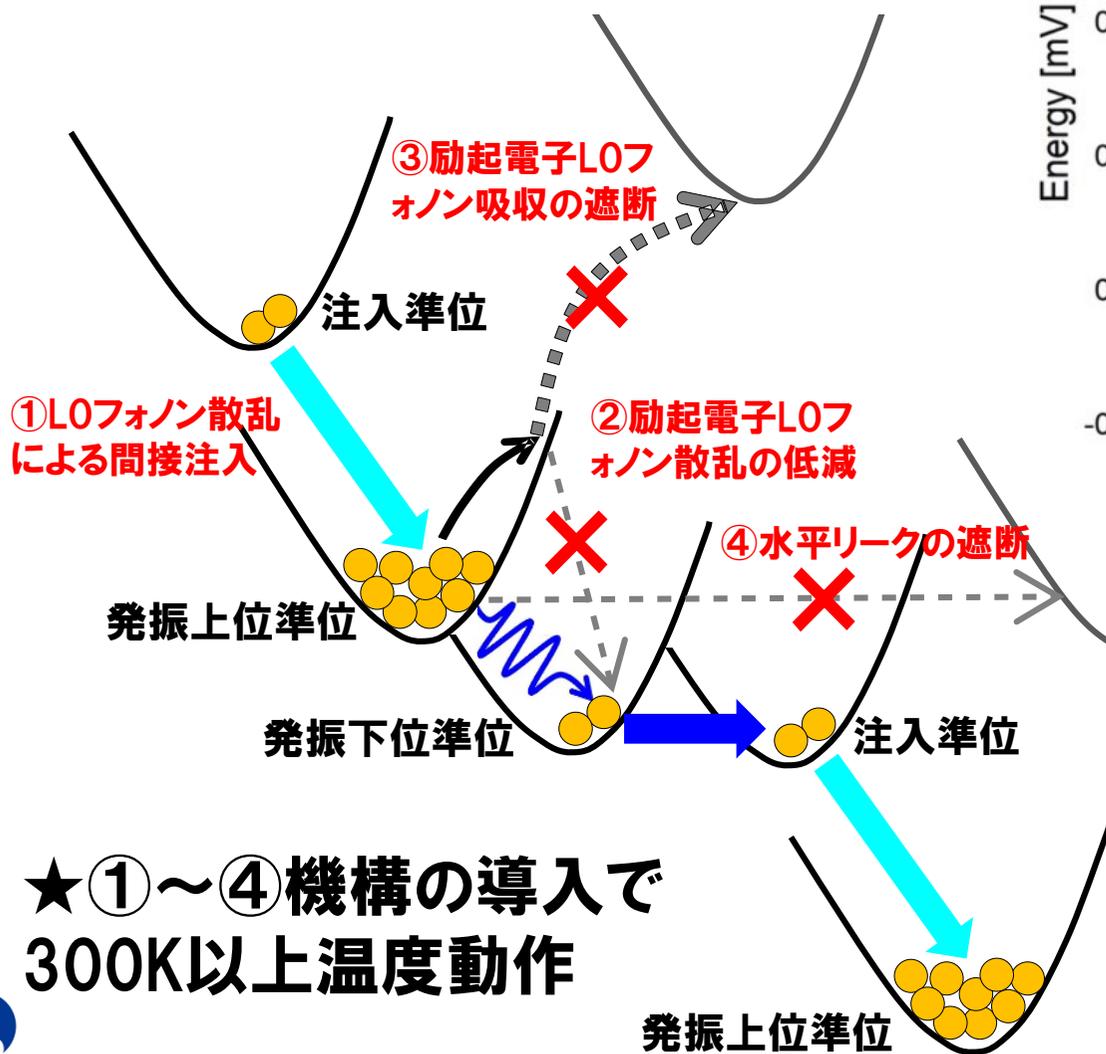
①～③ のリークを遮断

間接注入

対角遷移で誘導放出

常温動作可能にする構造

アイソレート3準位機構

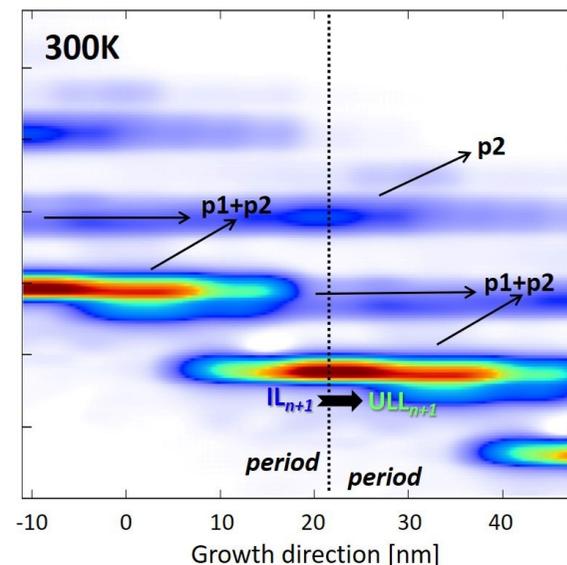
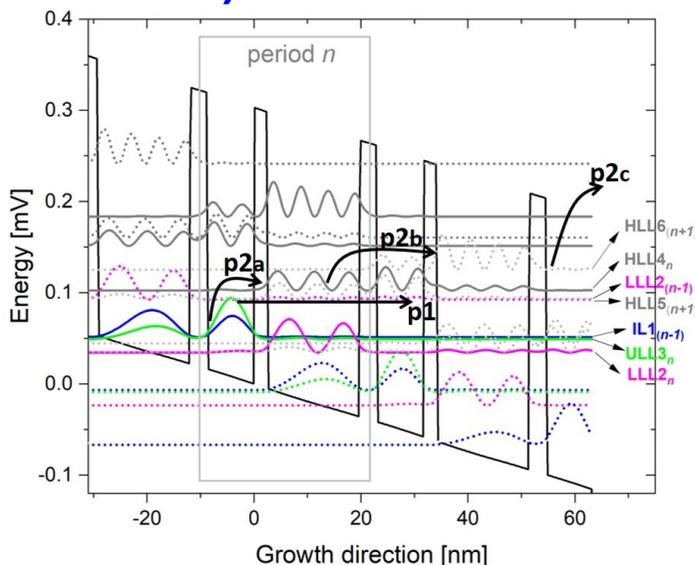
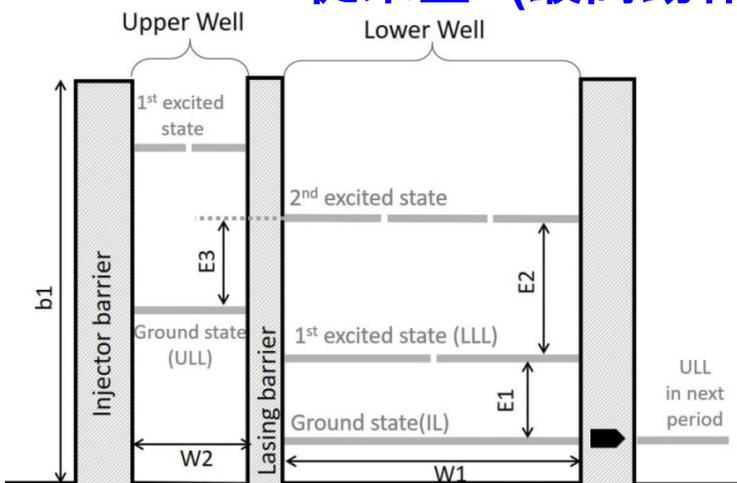


変形2量子井戸構造

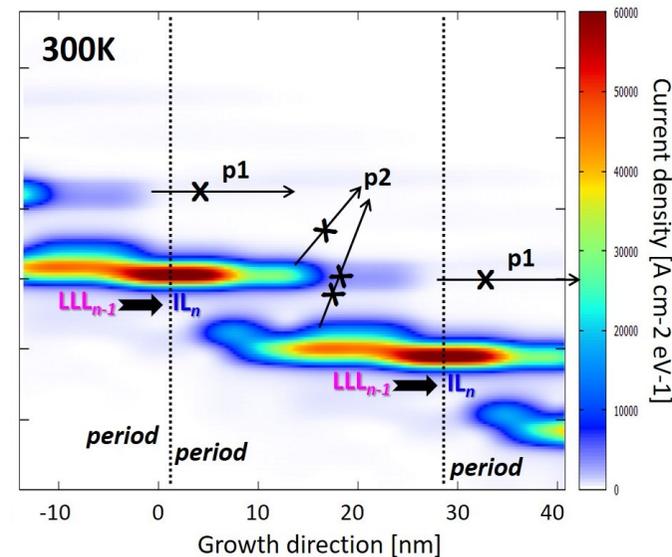
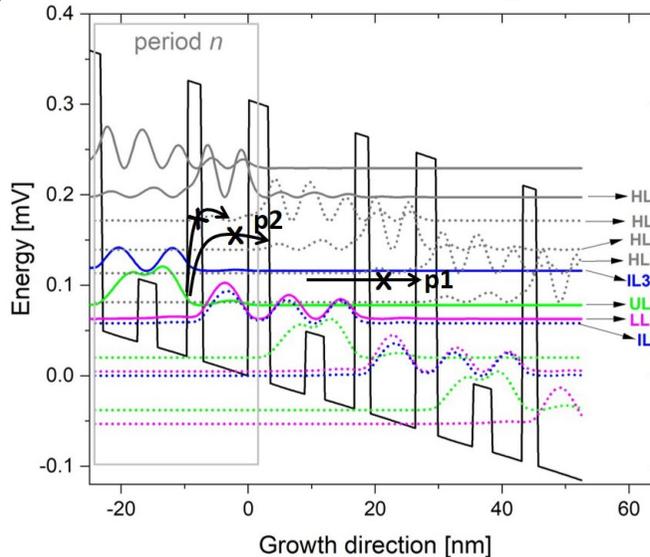
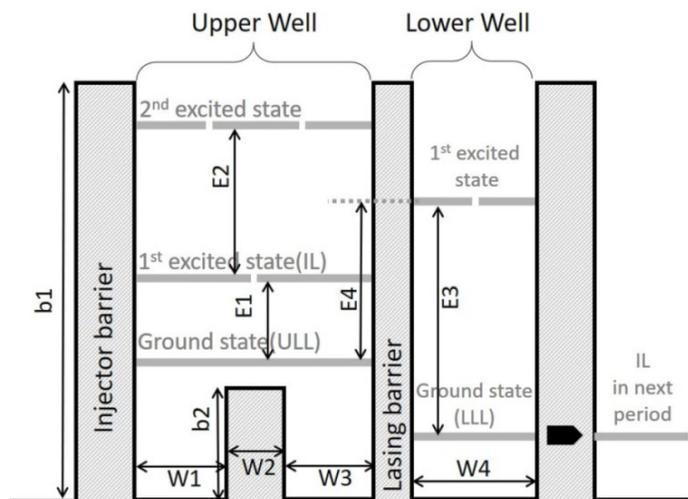
★①～④機構の導入で
300K以上温度動作

室温動作 = 従来型から革新

従来型 (最高動作温度250K) : 2量子井戸型 (電子リークあり。)



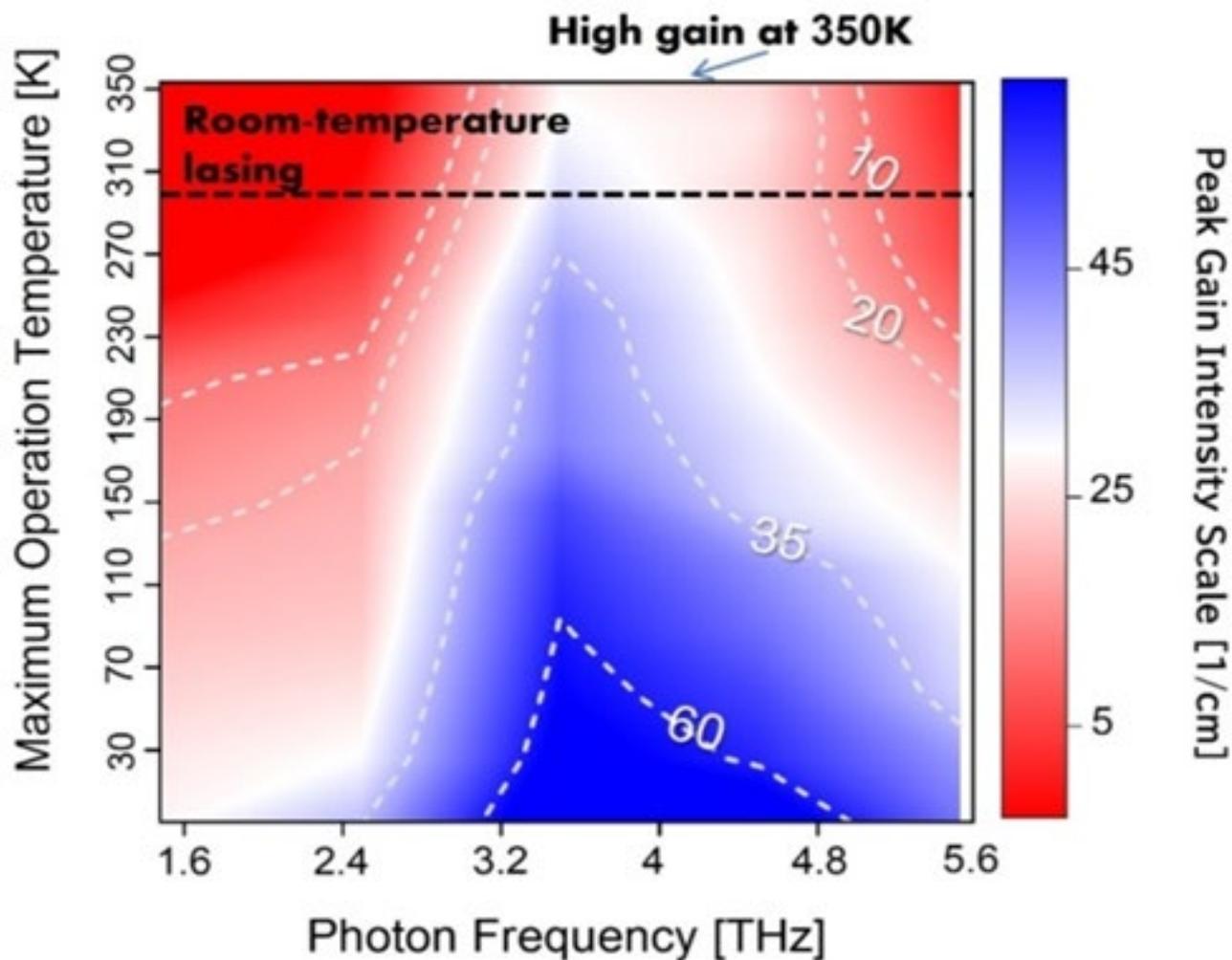
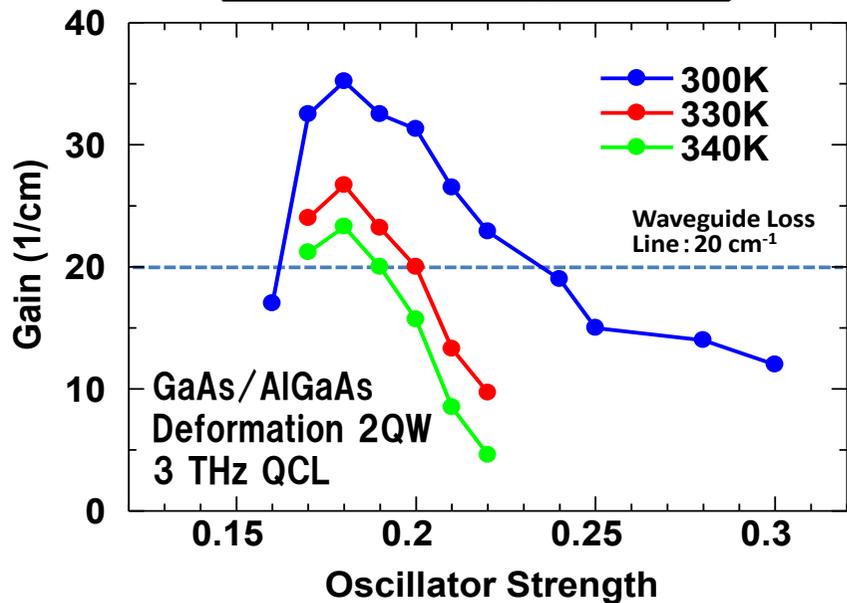
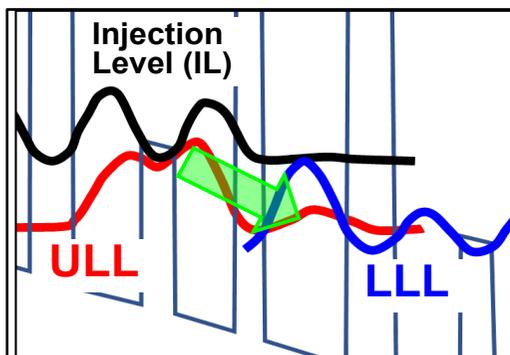
高温型 (最高動作温度340K) : 変形2量子井戸 (電子リークチャンネルを完全に遮断。)



GaAs系THz-QCLの室温動作範囲

解析: NEGF法

対角遷移でLOフォノン散乱を大幅に低減

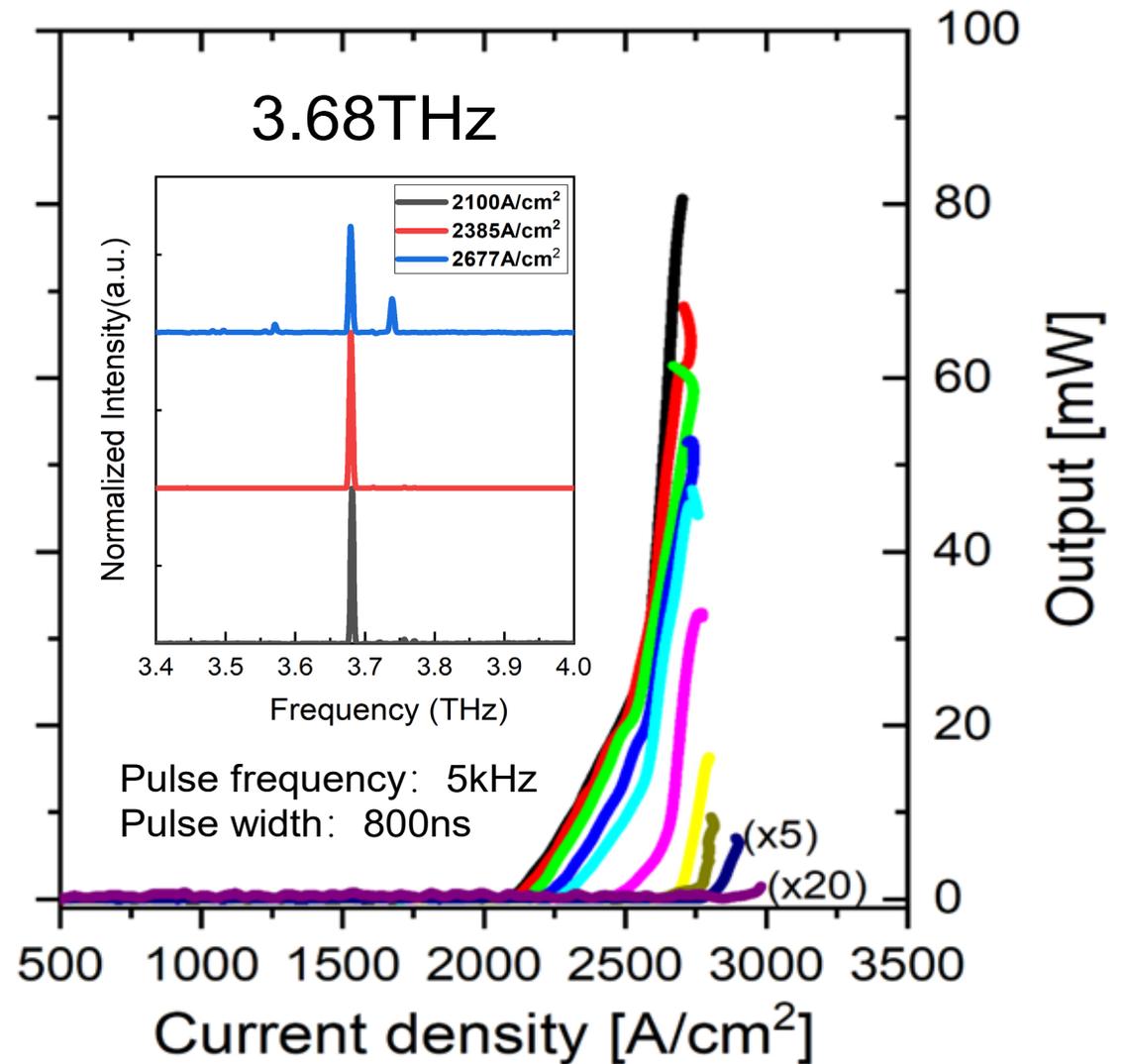
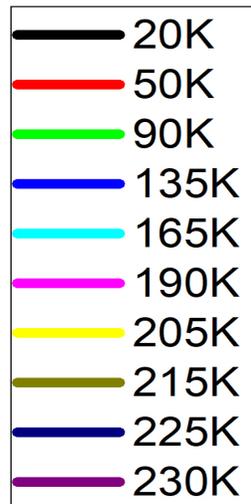
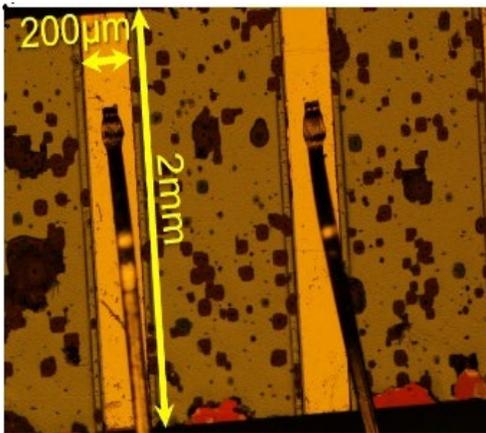
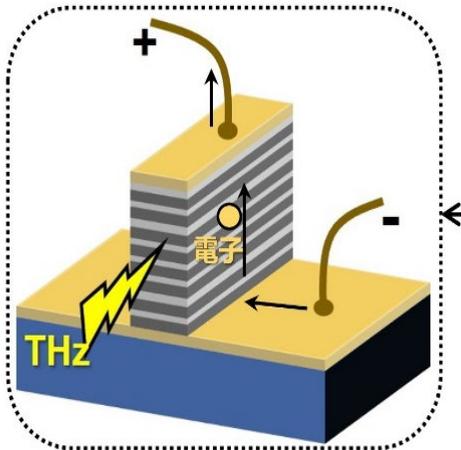


● 3.2~4.0 THzで室温動作可能

● 最高動作温度は350K(3.8THz付近)

GaAs系THz-QCLの230K動作を実現

「アイソレート3準位機構」 GaAs/AlGaAs THz-QCL



● 230Kでレーザー発振を実現

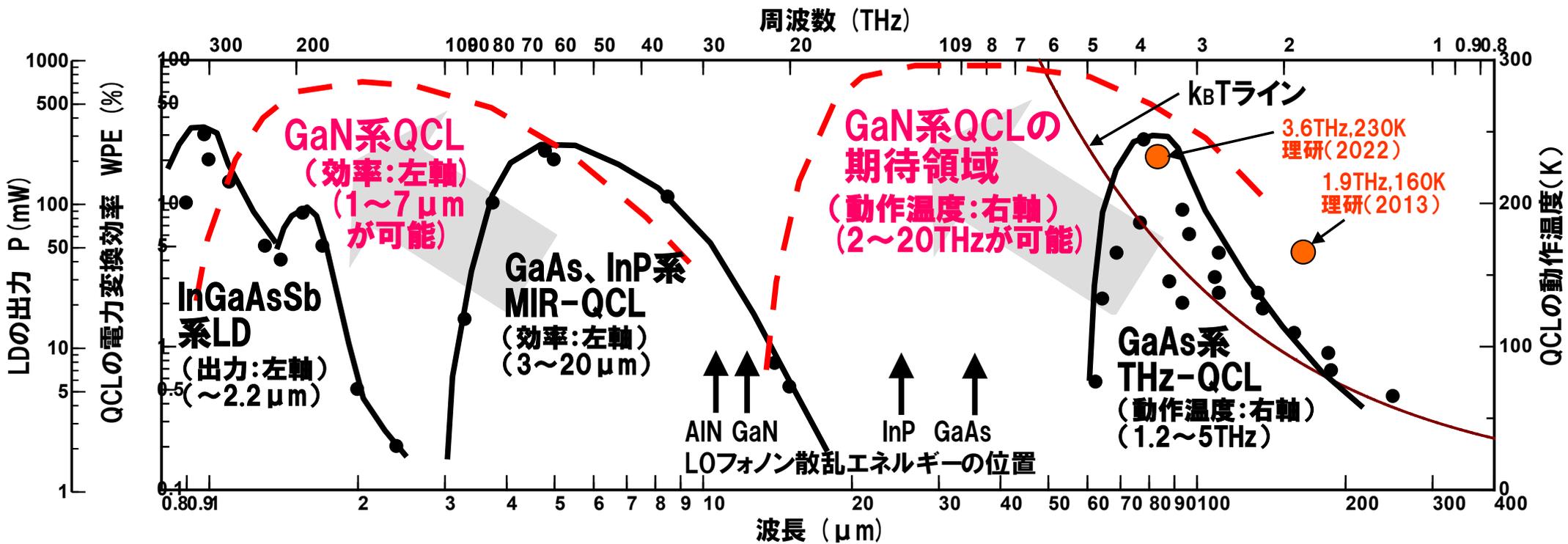
● 室温発振ならず → 共振器メサが台形: 注入不均一により光利得が低下
現在垂直メサ構造を作製中

GaN系半導体による新領域開拓

GaNの特異な物性を利用 → QCL未開拓領域へ進出

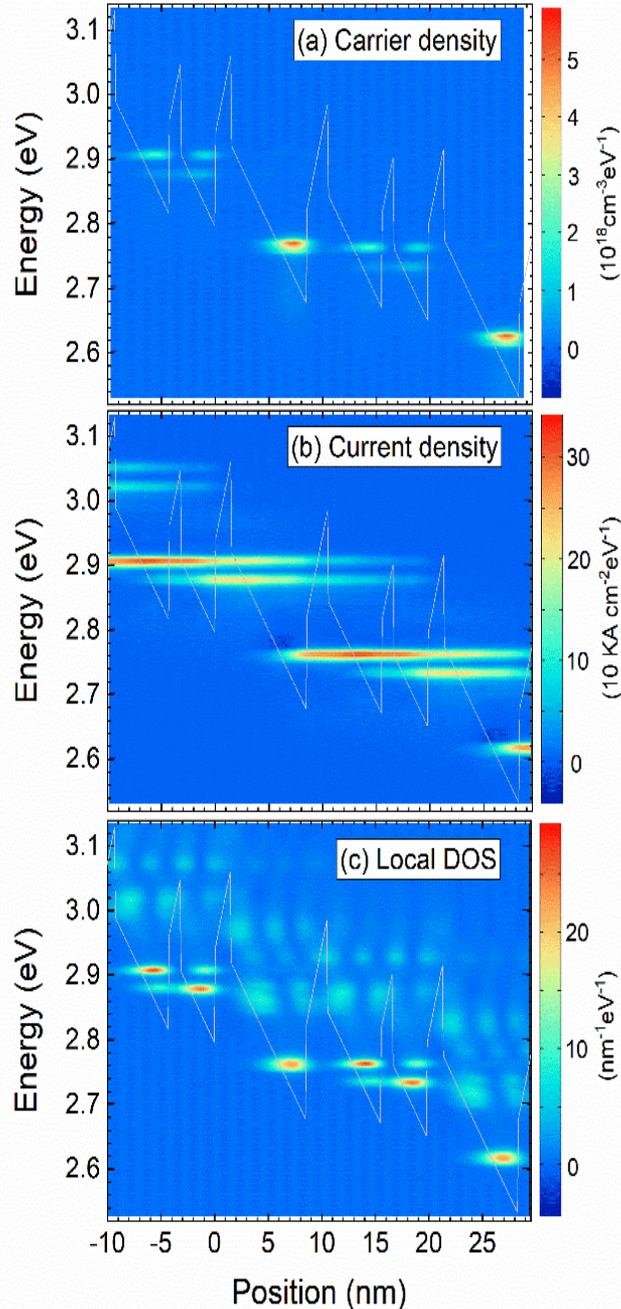
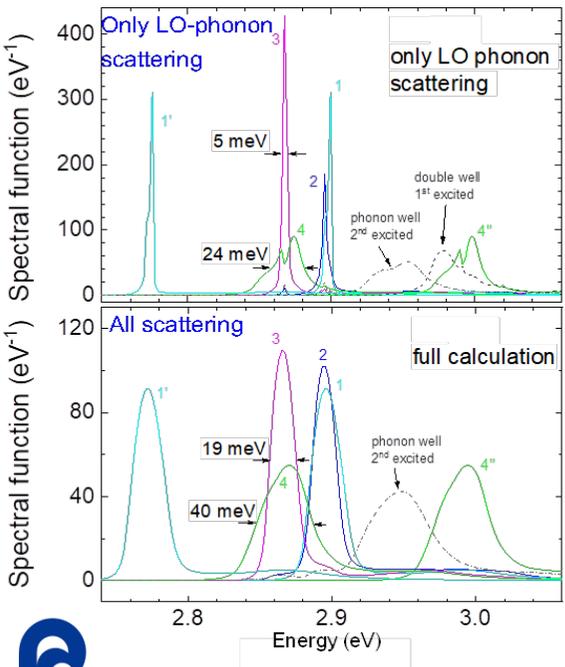
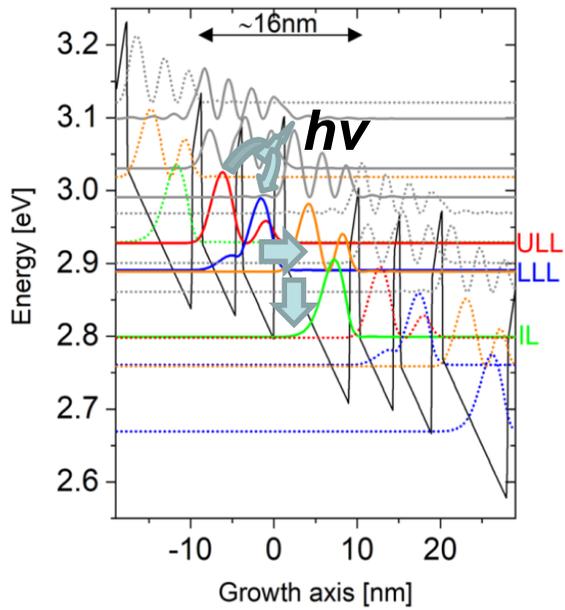
- LOフォノン散乱エネルギー = GaAs系の3倍 → 3-20THz帯QCLが可能
- バンド不連続値 = GaAs系の3倍 → 1~8 μm帯QCLが可能

赤外(IR) ← 中赤外(MIR) ← テラヘルツ(THz)



● 未開拓波長: 5~15 THz、及び、2~3 μmの実現が可能に
● 大きいLOフォノンエネルギーのため高温動作に有利

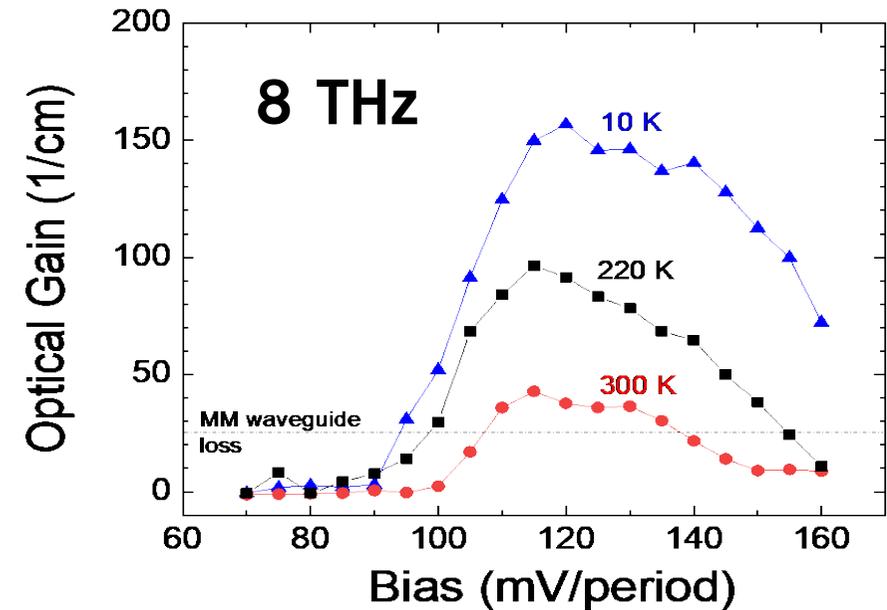
GaN/AlGaN THz-QCLの解析



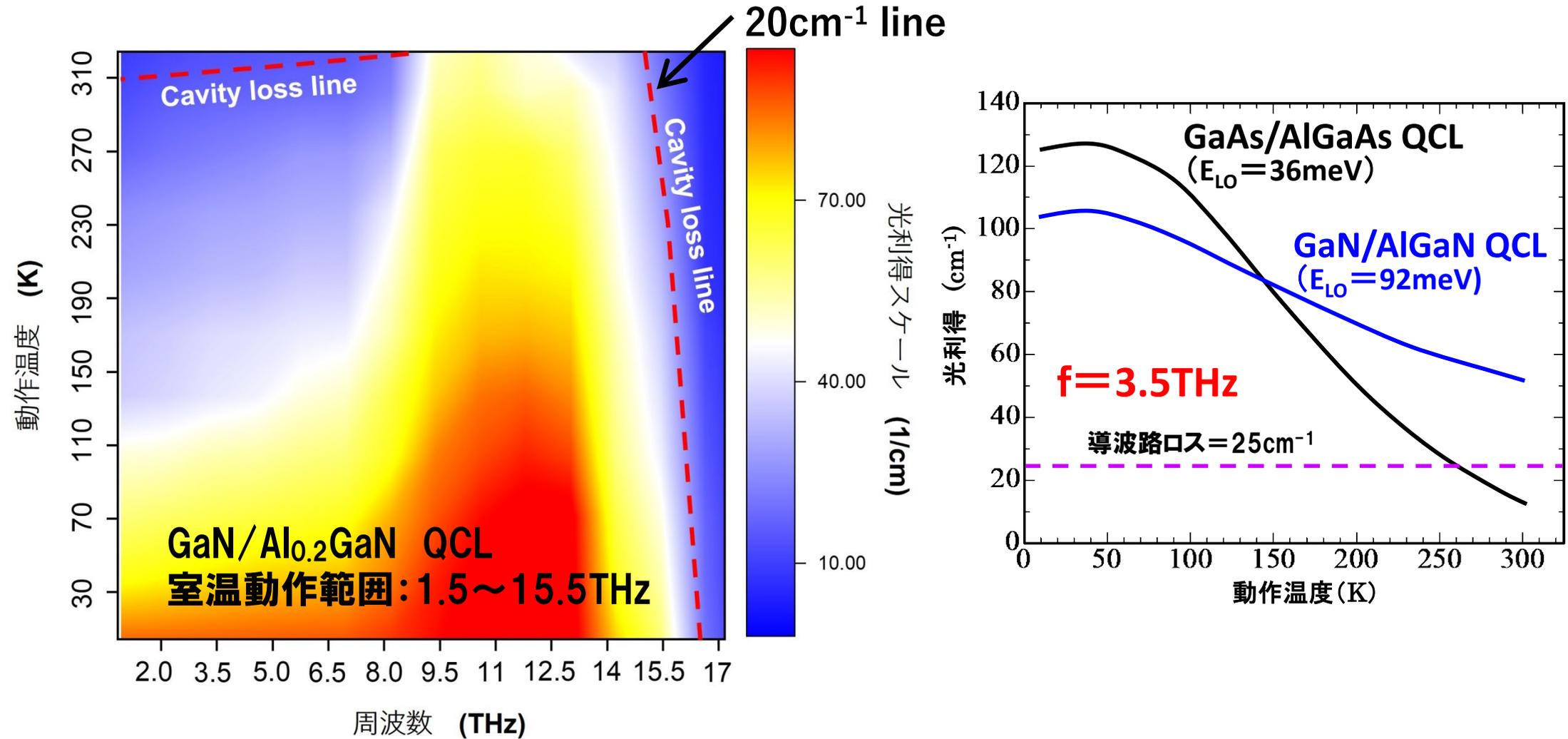
●すべての散乱過程を導入、不確定性原理に基づくバンドブロードニング効果を解析

- ☑電子・電子散乱
- ☑電子・LOフォノン散乱
- ☑不純物散乱
- ☑界面ラフネス散乱

●2~15THzで室温光利得が可能



GaN/AlGaN THz-QCLの動作範囲

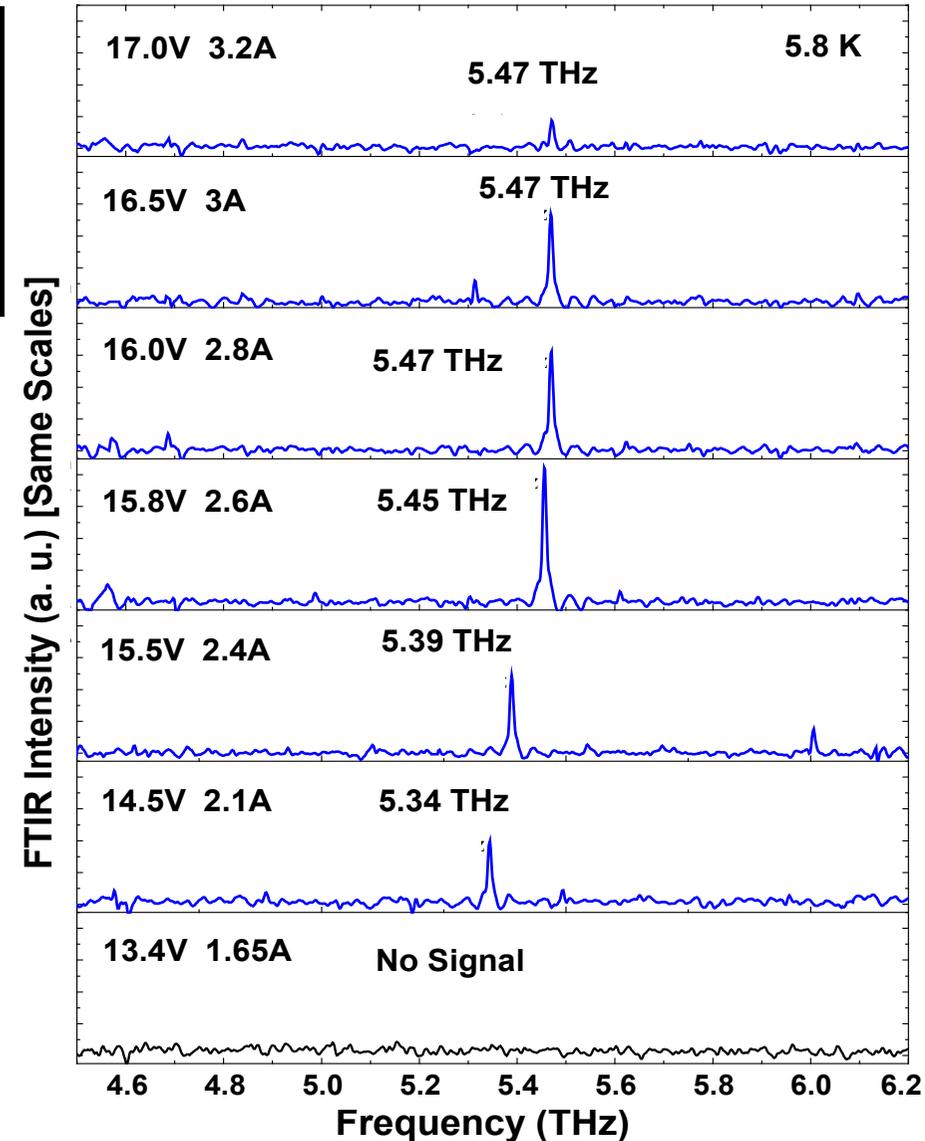
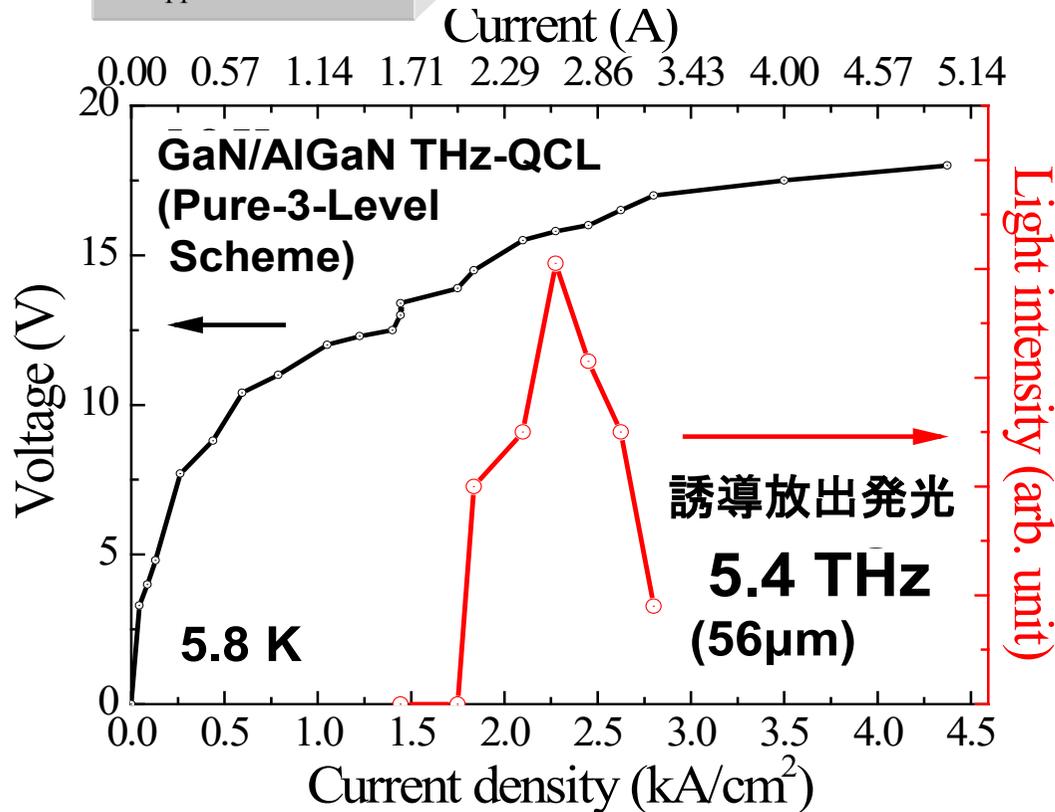
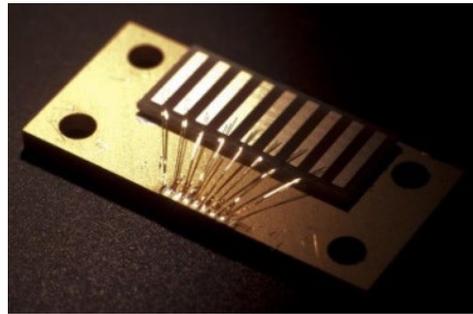
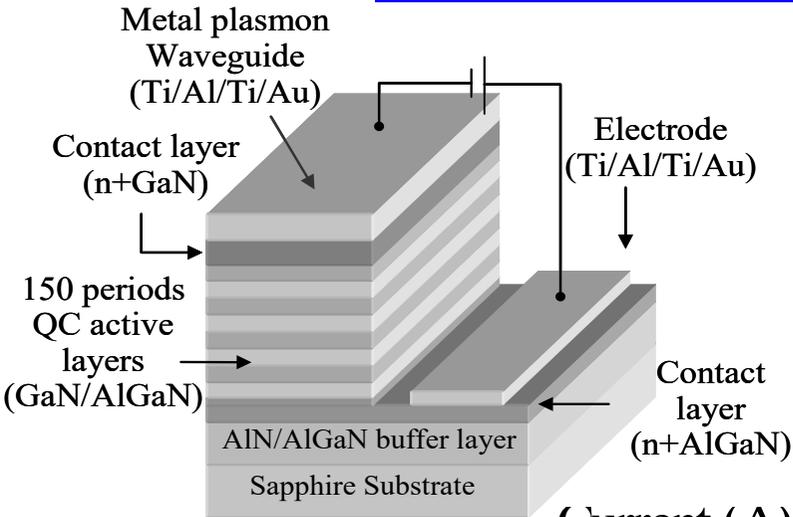


●室温動作範囲は1.5~15.5 THzが可能

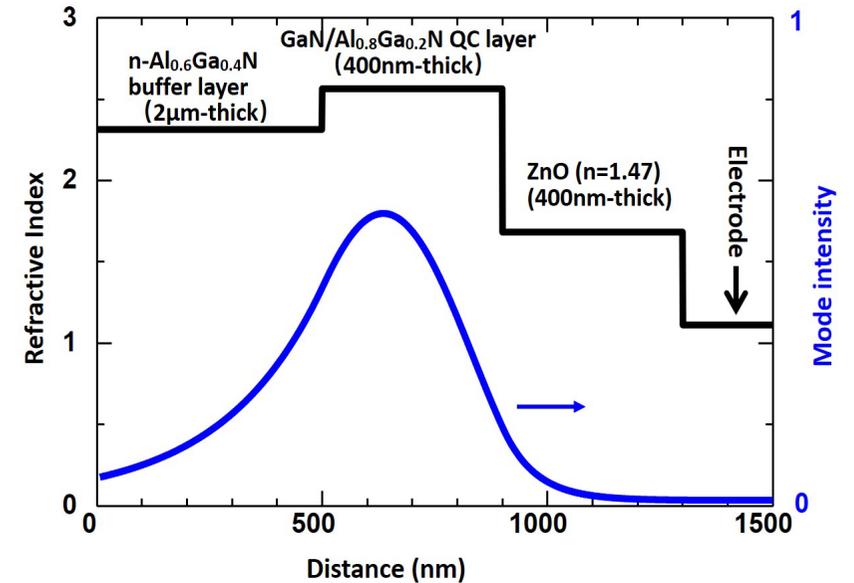
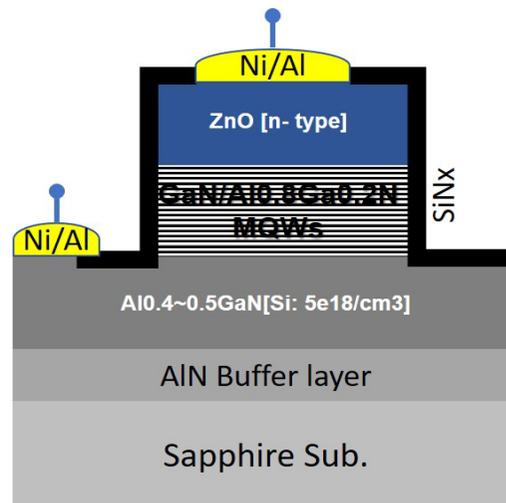
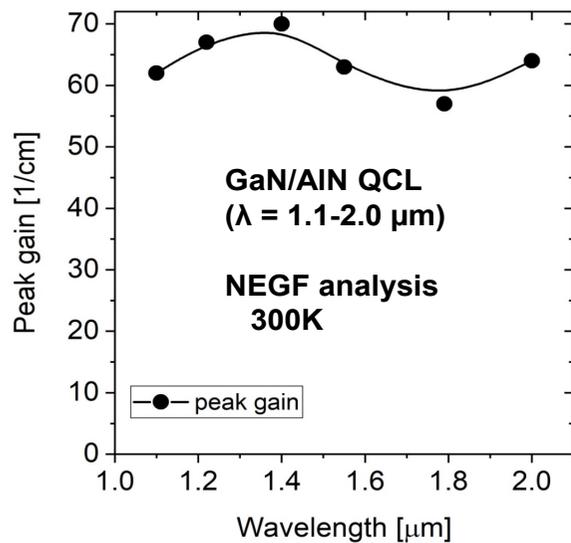
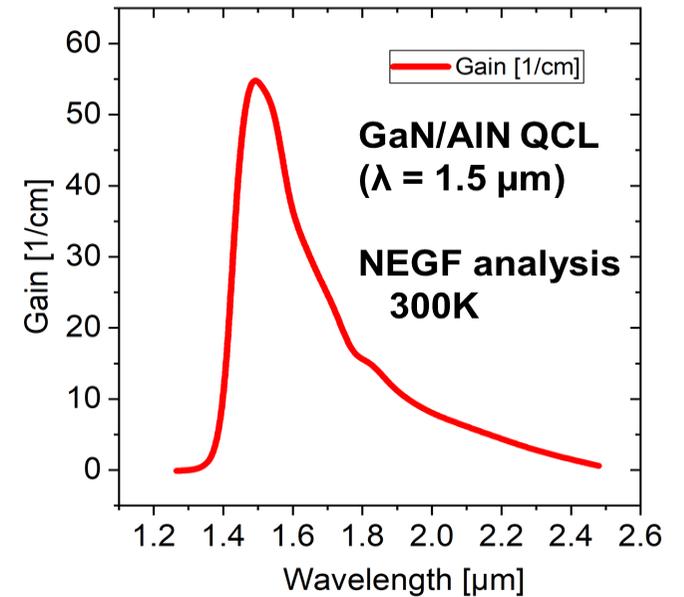
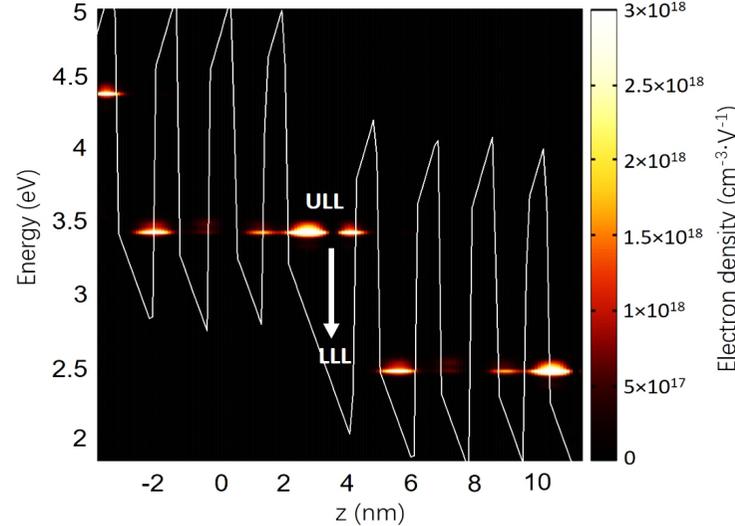
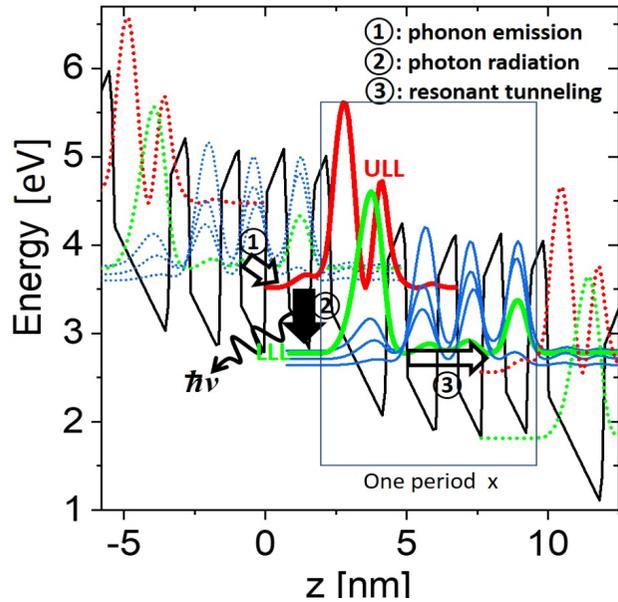
●GaN系はTHzの室温動作で非常に有利(4倍の光利得)

GaN系バンド内遷移誘導放出の実現

●未開拓周波数の5.4 THz

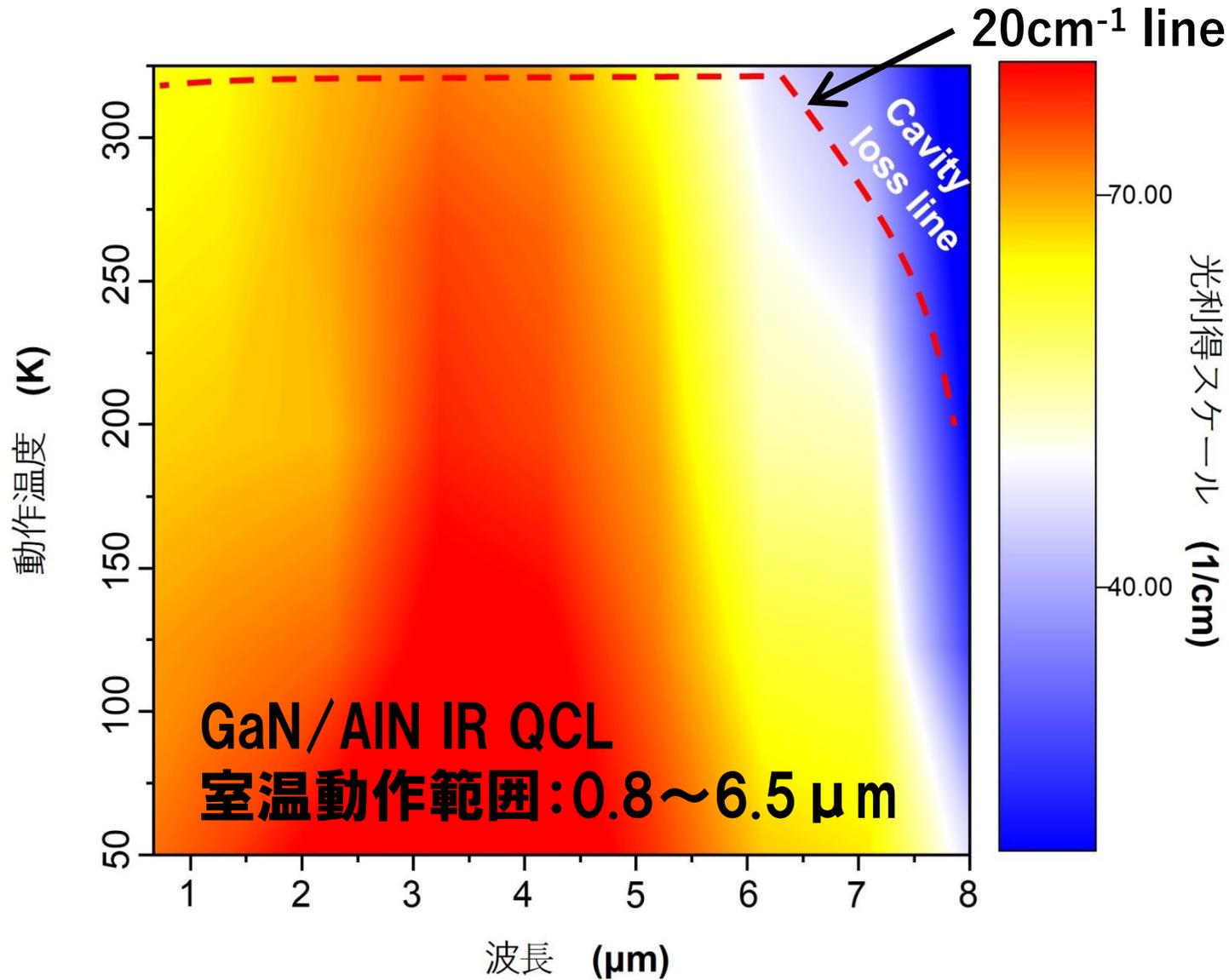


GaNを用いた赤外QCLの提案



- 波長0.8~7 μm のGaN/AlN赤外QCLの設計が可能
- 室温に於いて60 cm^{-1} の高い光利得が可能

GaN/AIN赤外QCLの動作範囲



- 未開拓波長2~3 μm を含む0.8~6.5 μm のGaN/AINQCLが可能
- ガス分析、環境計測、血液検査等の医療への応用に期待

実用化に向けた課題

- QCLの製品化に向けた、結晶成長とデバイスプロセスの再現性や信頼性の確保、歩留まりの向上が今後必要。
- ドライエッチングによる垂直共振器の低ダメージ形成で**1年以内に室温（300K）動作を達成見込み。**
- GaN系QCLの実現は、基板材料にSiC（シリコンカーバイド）を用いる事で、**未開拓周波数QCLの実現が可能**と考えられる。
- QCLの高性能化の為に、超格子構造の膜厚誤差を0.2%程度まで下げる必要があるが、近年の製造技術の向上により実現のめどが経っている。

企業への期待

- THz-QCL、赤外QCLの開発に関して、結晶成長、素子化プロセス、測定・評価を含めた総合的な開発で**共同研究**を行ってくれる企業を希望しております。
- また、THz-QCLを用いたイメージングや計測への応用に置いて**共同研究**を行ってくれる企業を探しております。
- 将来的に本技術をコア技術とした**スタートアップの立ち上げも検討中**であり、チームメンバーや投資家を探しております。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 量子カスケードレーザー素子
- 出願番号 : 特許第7157995号 (JP)
特許第10666018号 (US)
特許第3534469号 (EP)
- 出願人 : 理研
- 代表発明者 : 平山秀樹

お問い合わせ先



株式会社理研鼎業 (りけんていぎょう)

新技術説明会事務局

E-mail: senryaku@innovation-riken.jp