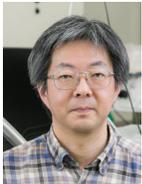


サブバンド間遷移機構の革新による未踏周波数・室温動作THz-QCL実現に関する研究

	研究代表者	国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・主任研究員	
		平山 秀樹 (ひらやま ひでき)	研究者番号: 70270593
	研究課題情報	課題番号: 24H00048	研究期間: 2024年度~2028年度
		キーワード: 量子カスケードレーザー、テラヘルツ、サブバンド間遷移、窒化物半導体、MBE成長	

なぜこの研究を行おうと思ったのか (研究の背景・目的)

●研究の全体像

微小サイズで高強度のテラヘルツ光を発生するテラヘルツ量子カスケードレーザー (THz-QCL) は、非破壊・透視検査用、車載レーダー、次世代通信用の光源など様々な分野における応用が期待されている。しかし、THz-QCLは低温でしか動作せず、周波数範囲も限られているため実用化が進んでいない。本研究は、THz-QCLの常温発振と動作周波数領域の拡大を目的とする。常温動作を実現するために、QCL活性層のサブバンド間遷移発光機構を見直し、複数の電子リークチャネルを完全に遮断した「アイソレート3準位」機構を導入し、それを用いて300K以上の発振動作を実現する。さらに、未踏周波数5~12THz帯、及び、3μmより短波長の赤外のQCLを実現するために、GaN/AlGa系窒化物半導体を導入する。GaAs系ならびにGaN系QCL構造を、高精度膜厚制御下で結晶成長し、設計された波動関数を厳密に再現することにより、室温動作、並びに、未踏周波数のQCLを実現する。

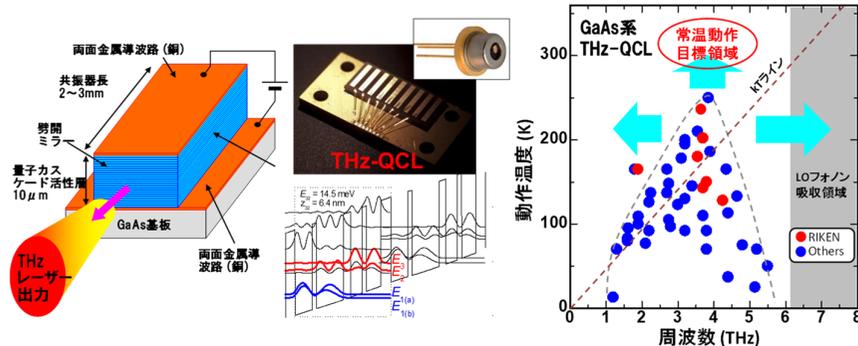


図1 テラヘルツ量子カスケードレーザー (THz-QCL) の構造イメージと、当研究で目指すTHz-QCLの新規動作領域

●窒化物半導体を用いた「未踏周波数領域」QCLの目標

ワイドギャップ半導体であるGaN (ガリウムナイトライド) 系半導体は、LOフォノン吸収エネルギー帯がGaAs系の3倍と大きく、また、伝導体のバンド不連続値がGaAs系の3倍以上大きいため、これまで未開拓領域であった、5~12 THzのQCL、並びに、0.8~6.5 μmの赤外のQCLを実現することができる。当研究では、QCLに新たに窒化物半導体を導入することで、広大な未開拓周波数領域の実現を目指す。

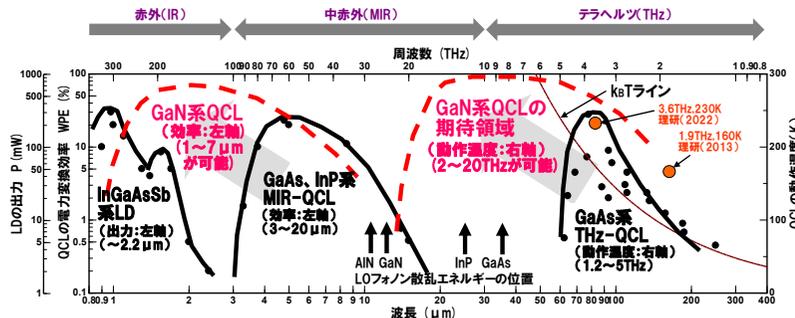


図2 窒化物Ga系半導体の導入で期待される、THz、及び、赤外QCLの動作領域

●THz-QCLの常温動作を可能にする動作機構

室温の電子のエネルギー広がり (26meV) があっても、2~4THz (8~16meV) のレーザー発振動作を可能にするため、3つの機構を取り入れる。まず、LOフォノン散乱を用いた間接注入を行うことにより、発振上位準位への選択的電子注入を行う。また、発振上位準位から付帯準位への水平電子リーク、および、熱励起電子を介したLOフォノン吸収によるジャンプアップリークを遮断し、発振に与える準位からの電子リークを阻止する。また、発振準位間の波動関数を空間的に分離して対角遷移とすることによって、熱励起電子を介したLOフォノン散乱を低減し、常温でも反転分布が形成できるようにする。これらの機構を導入することで、GaAs系THz-QCLの動作温度は340K温度までが可能であることを我々は解析で示している。

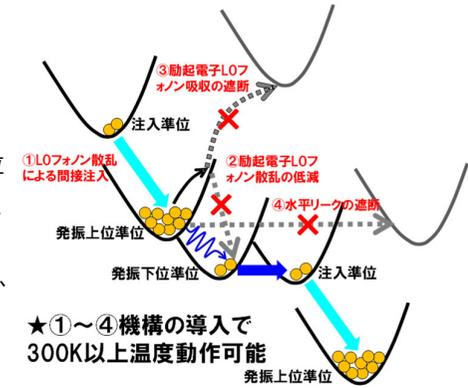


図3 THz-QCLの常温動作を可能にする「アイソレート3準位機構」

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

●GaAs系THz-QCLの室温動作の実現

室温動作を可能にする「アイソレート3準位機構」を実現する量子構造を設計し、電子リークの遮断による室温光利得を解析から求める。分子線エピタキシー (MBE) 法によるGaAs系QCL超格子構造の結晶成長と、ウェアボンディング、リフトオフ、電極プロセス、共振器作成などのプロセスを経て素子を作製し、レーザー発振を試みる。アイソレート3準位量子構造を取り入れることで、これまでに得られているTHz-QCLの最高動作温度 (230K) を凌駕し、室温動作を実現する。

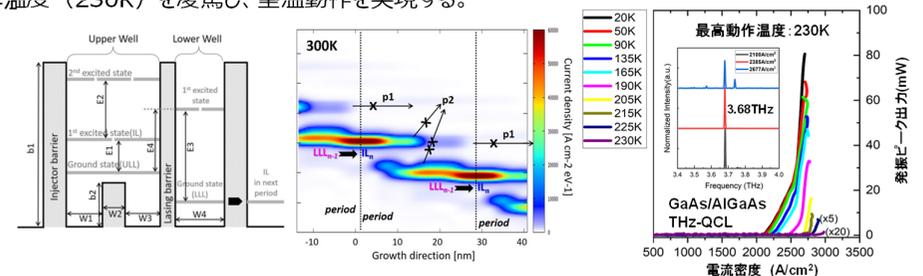


図4 最高動作温度340Kが予測されている、「変形2量子井戸型」GaAs/AlGaAs THz-QCLの構造と、動作解析の例、および、同構造を作製して得られた230Kにおける発振動作。

●GaN系THz-QCLのレーザー発振の実現

グリーン関数法を用いた厳密な解析を行うことにより、GaN/AlGa系THz、および赤外QCLの光利得の解析を行い、1.5~15.5 THz、および、0.8~6.5μmの赤外の幅広い周波数帯で室温発振が可能であることが予測された。当研究では、これまでサファイア基板上にGaN系QCLを作製し、誘導放出の観測に留まっていたが、これはサファイア基板によるTHz光の吸収のためと考えられる。光吸収がなく、屈折率光閉込めが可能なSiC (シリコンカーバイド) 基板を用いてGaN系QCLを作成し、発振動作実現を目指す。

図5 GaN/AlGa系THz-QCLの光利得の解析例とレーザー発振を目指す構造