

## 3-1-2 GaSb 系量子カスケードレーザ

### 3-1-2 GaSb Quantum Cascade Laser

安田浩朗

YASUDA Hiroaki

#### 要旨

GaSb/AlSb 系化合物半導体を用いて縦光学フォノン共鳴法により反転分布を形成する型のテラヘルツ帯量子カスケードレーザを作成した。GaSb の縦光学フォノンエネルギーや電子の有効質量が GaAs よりも小さいため、GaSb/AlSb 系テラヘルツ帯量子カスケードレーザの発振開始電界を GaAs/AlGaAs 系量子カスケードレーザの場合よりも小さくすることができ、低パワー動作が可能になることが示された。さらに、シングルプラズモン導波路型の GaSb/AlSb 系テラヘルツ帯量子カスケードレーザを GaAs 基板上に作成することで、レーザ活性層への高いテラヘルツ波閉じ込めを簡単な作成プロセスで実現できることを明らかにした。

A GaSb/AlSb terahertz quantum cascade laser (THz-QCL) using a resonant longitudinal optical (LO) phonon depopulation scheme was successfully demonstrated. A smaller threshold electric field was expected for the GaSb/AlSb QCL because GaSb has a lower LO phonon energy and smaller electron effective mass than GaAs. Experimental results indicated that the threshold electric field of the GaSb/AlSb QCL was 3.2 kV/cm. These results mean that the GaSb/AlSb QCL is suitable for low input power operation. Furthermore, the GaSb/AlSb QCL on a GaAs substrate using single surface plasmon waveguide provides high confinement of terahertz waves in the QCL active region without a complicated fabrication process.

#### [キーワード]

テラヘルツ波信号源, 量子カスケードレーザ, プラズモン導波路, ガリウムアンチモン

Terahertz wave generation, Quantum cascade laser, Plasmon waveguide, Gallium Antimonide

## 1 まえがき

テラヘルツ帯量子カスケードレーザは、半導体多重量子井戸構造中のサブバンド間の電子の遷移を利用してレーザ発振を実現するものであり、小型・高出力のテラヘルツ帯の信号源として期待を集めている。4.4 THz における 2002 年の初発振報告<sup>[1]</sup>以来、連続波での発振、レーザ出力の向上、動作温度の向上、低周波数における発振などを目指して活発に研究がなされている。材料系に関しては、これまで発表されたテラヘルツ帯量子カスケードレーザはいずれも GaAs/AlGaAs 系であり、それ以外の材料系の報告はない。材料系を代えることにより、量子カスケードレーザの設計可能範囲を広げることが可能となり、あるいは動作原理について新たな知見を得られることも考え

られる。今回、GaSb/AlSb 系のテラヘルツ帯量子カスケードレーザを作成したので、その概要を紹介する<sup>[2]</sup>。

## 2 GaSb 系量子カスケードレーザ

### 2.1 レーザ活性層

レーザが発振するにはレーザ活性層において反転分布が形成されていることが必要である。テラヘルツ帯量子カスケードレーザでの反転分布形成方法として、チャープ超格子法、バウンド・トゥ・コンティニューム法など提案されている。その一つに、縦光学(LO)フォノン共鳴法がある<sup>[3]</sup>。これは所望のテラヘルツ波に相当するエネルギー差がある二つのサブバンド準位のうち、下の準位

に存在する電子を縦光学 (LO) フォノンが高速に散乱するよう多重量子井戸構造を設計して、反転分布を形成するものである。この方法は、各種の反転分布形成方法の中で最も高い温度での動作を可能にすると考えられている。しかし、発振開始に必要な電界が高いという問題がある。

図 1 に GaAs と GaSb の各種の物性値を示す。GaAs と比べると、GaSb の電子の有効質量は小さく、縦光学フォノンエネルギーも小さい。GaSb 系量子カスケードレーザでは、電子の有効質量が小さいので量子井戸の幅を広くすることができる。その結果、分子線エピタキシー (MBE) 法等を用いた結晶成長の際、膜厚の制御を比較的緩やかにすることができる。さらに、縦光学フォノン共鳴法を採用すると GaSb の縦光学フォノンエネルギーが小さいので、発振電界を下げることも可能となる。

我々は、シュレディンガー方程式とポアソン方程式を自己無撞着に解いて、図 2 に示すように 1 ユニットが GaSb からなる 4 個の井戸と AlSb からなる 4 個の障壁からなるレーザ活性層構造を設計した。Te は n 型のドーパントである。発振周波数の設計値は 2.6 THz である。また発振開始電界は設計値で 5.4 kV/cm であり、同様の構造の GaAs/AlGaAs 系量子カスケードレーザでの 12 kV/cm (発振周波数 3.4 THz) [3] よりも低下している。

なお、上述の自己無撞着計算ではサブバンド準位のエネルギーのみ求められる。より詳細なレー

ザ活性層の状態、すなわちサブバンド準位における電子の分布、電流・電圧特性、レーザ利得等をシミュレートするには、フォノン散乱、電子間散乱など多体効果を考慮しなければならない。そのため、非平衡グリーン関数法 [4] を用いたプログラムを開発した。

## 2.2 導波路

テラヘルツ帯量子カスケードレーザではレーザ活性層を含む導波路の構造に関して特有の問題が存在する。レーザ活性層を波長程度の厚さにするには、周波数が 3 THz、半導体の屈折率が 4 の場合、25 μm もの厚さの化合物半導体層を成長させなければならない。しかし、この厚さの半導体層を MBE 法などの一般に用いられる成長方法で高品質に作成することは困難である。そのためレーザ活性層の厚さを波長以下にしなければならない。その場合、レーザの電磁界モードと不純物ドーパ層とが空間的に重なることになる。テラヘルツ帯では自由電子による吸収が強いため、この空間的な重なりを極力減らす必要がある。その対策として、例えば金属と誘電体といった誘電率の符号が異なる二つの物質の界面に生じる表面プラズモンを用いて界面付近にモードを引き寄せる方法が用いられている。現在、テラヘルツ帯量子カスケードレーザに用いられている導波路にダブルメタル型導波路とシングルプラズモン型導波路がある。

ダブルメタル型導波路は、レーザ活性層の上下

Bulk Material Constants	Unit	GaAs	GaSb
	Electron Effective Mass	$m^*/m_e$	0.063
Optical Phonon Energy	meV	36	28.9
Refractive Index @3THz	-	3.65	3.99
Thermal Conductivity	W/cmK	0.55	0.32
Energy Gap	eV	1.424	0.726
Conduction Band Offset	eV	0.12	0.4

図 1 GaAs と GaSb の物性値

Material	Thickness (nm)	Doped Te (cm <sup>-3</sup> )
AlSb	4.3	-
GaSb	14.4	-
AlSb	2.4	-
GaSb	11.4	-
AlSb	3.8	-
GaSb	24.6	$1.9 \times 10^{16}$
AlSb	3	-
GaSb	16.2	-

図 2 GaSb/AlSb 量子カスケードレーザ活性層構造

に金属層を設けたもので、レーザ活性層の両側に表面プラズモンモードが存在する。モードとレーザ活性層との重なり合いの程度を閉じ込め係数で表すと、ダブルメタル型導波路の閉じ込め係数はほぼ1となり、完全な閉じ込めを実現できる。また、不純物がドーピングされたコンタクト層を薄くできるので、導波路の損失のほとんどは金属層で生じることになる。一方、ダブルメタル型導波路の作成には、ウェハ貼り付けや基板の選択的エッチングなど投量を要する複雑なプロセス工程が必要となる。

シングルプラズモン型導波路は、レーザ活性層の上に金属層を設け、レーザ活性層の下に高濃度に不純物をドーピングした半導体層(厚さ0.5~1.0 $\mu\text{m}$ )を介して半絶縁性半導体基板を設けたものである。不純物を高濃度にドーピングした半導体層の誘電率はドルーデの式に従い、テラヘルツ帯では負になるので、上部の金属・半導体界面とともにドーピング半導体層の上下にも表面プラズモンモードが生じる。そのため、半導体基板にもモードがしみ出すことになり、閉じ込め係数は0.1~0.5程度と低くなる。一方、ダブルメタル型導波路より作成が簡単という利点がある。

図3にシングルプラズモン型導波路を用いたGaSb基板上的GaSb系量子カスケードレーザにおける電界分布を示す。有限要素法を用いて固有モード計算を行った[5]。半導体GaSb/AlSbレーザ活性層の厚さは15 $\mu\text{m}$ 、レーザリッジ構造の幅は150 $\mu\text{m}$ 、レーザ活性層の下の不純物ドーピング半導体層の厚さは1.0 $\mu\text{m}$ 、ドーピング層における電子濃度は $4 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ である。閉じ込め係数は0.5となった。なお、計算には化合物半導体や金属のテラヘルツ帯での複素屈折率の値が必要であるが、複素屈折率が報告されていない物質も少なくない。我々は、テラヘルツ時間領域分光法(THz-TDS)を用いて金属のテラヘルツ帯の複素屈折率を測定した[6]。

ところで、GaSb系量子カスケードレーザはGaSb基板上に成長させるだけでなく、GaAs基板上にバッファ層を介して成長させることも可能である。図1に示すようにGaSbの屈折率はGaAsの屈折率より高い。電磁波は屈折率の高い部分に集まりやすいことから、GaSb系量子カスケードレーザの場合、基板をGaAsに代えることでシ

ングルプラズモン型導波路でもより高い閉じ込めを実現することができる。図4はシングルプラズモン型導波路を用いたGaAs基板上的GaSb系量子カスケードレーザにおける電界分布を示す。GaSb基板をGaAs基板とバッファ層に代えた以外は図3の構造と同一である。閉じ込め係数は0.9以上となった。

このようにGaAs基板上的シングルプラズモン型GaSb系量子カスケードレーザでは、ダブルメタル型導波路並の閉じ込め係数を簡単な作成プロセスで実現できる。また、図1に示すようにGaAsの熱伝導率が大きいため、量子カスケードレーザの放熱性を高めることができる。さらに、アンチモンがレアメタルであるため、GaSb/AlSbの分子線エピタキシャル成長自体に費用がかかるものの、基板を安価なGaAsとすることでコストの増加を抑えられる。ただ、バッファ層を導入してもGaAsとGaSbの格子定数が異なるためGaSb層に転位が生じることを避けられない。しかし、量子カスケードレーザでは電子のみで発振し、ホールはほとんど存在しないので、転位が電子・ホールの再結合中心としてレーザ動作へ悪影響を及ぼすことは少ないものと思われる。

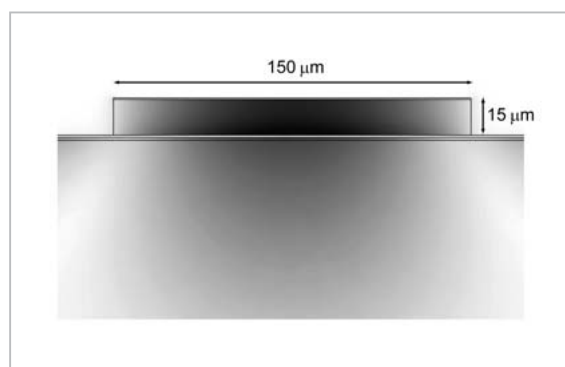


図3 GaSb基板上シングルプラズモン型導波路における電界分布

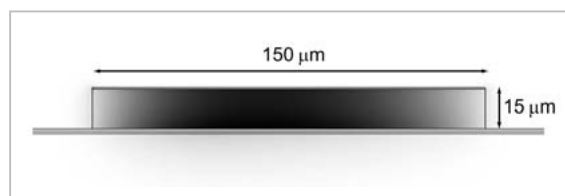


図4 GaAs基板上シングルプラズモン型導波路における電界分布

## 2.3 プロセス

GaAs 系化合物半導体のプロセス技術に比べ、GaSb 系化合物半導体のプロセス技術は成熟しておらず、改良の必要があることが多い。

n 型にドーピングした化合物半導体層へのコンタクト電極として、GaAs 層に対しては一般に AuGe/Ni/Au 等を用いる。GaSb 層に対し AuGe/Ni/Au 電極を作成したところワイヤボンディングの際などにはがれやすく、コンタクト抵抗も高いという問題が生じた。そこで、GaSb 層表面を硫化アンモニウムで処理し、パラジウムを蒸着した後に、AuGe/Ni/Au 電極を作成することで、付着力の増強とコンタクト抵抗の低減を実現した。

また、GaAs 基板上の GaSb 系量子カスケードレーザの場合、上述のように転位が存在する。酒石酸等の溶液を用いてレーザ活性層をウェットエッチングすると、転位の近傍が急速にエッチングされ、不均一なエッチングとなった。そこで、反応性イオンエッチング (RIE) 等のプラズマ気体を用いたエッチング法を用いることにした。ただ、10 数  $\mu\text{m}$  の深さに達するエッチングを行わなければならない、RIE 法では 10 % 程度のエッチング量の面内分布が生じるため、エッチングストップ層となるコンタクト層を厚くする等の対策が必要である。

## 2.4 実験結果

今回、GaAs 基板上にシングルプラズモン型 GaSb/AlSb 系量子カスケードレーザを作成した。まず、MBE 法を用いて半絶縁性 GaAs 基板上に GaSb と AlSb からなる厚さ  $1.3 \mu\text{m}$  のバッファ層を成長し、続いて、 $4 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  の濃度で n 型にドーピングされた厚さ  $0.8 \mu\text{m}$  の GaSb 下部コンタクト層、図 2 に示した構造を 230 回繰り返した厚さ  $18.4 \mu\text{m}$  のレーザ活性層、最後に n 型 GaSb 上部コンタクト層を成長した。RIE により幅  $150 \mu\text{m}$  のレーザリッジ構造を作成し、下部コンタクト層を露出させた。上部コンタクト層及び下部コンタクト層に Pd/AuGe/Ni/Au 電極を形成し、劈開により長さ  $2 \text{mm}$  の共振器構造を作成した。

図 5 に、この量子カスケードレーザにおける電界と電流密度の関係、テラヘルツ波出力と電流密度の関係を示す。量子カスケードレーザと Ga

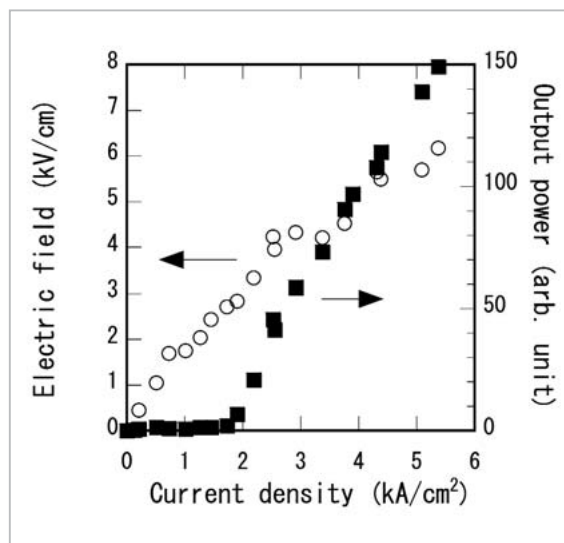


図5 GaSb/AlSb 系量子カスケードレーザの電界・電流密度特性及び、テラヘルツ波出力・電流密度特性

ドーピング Ge 検出器を液体ヘリウム温度に冷却して測定した。パルスモード (入力電圧パルス幅  $1 \mu\text{s}$ ) で発振させた。 $1.8 \text{kA/cm}^2$  の電流密度近辺から急激なテラヘルツ波出力の増加が見られた。その立ち上がりに対応する電界は  $3.2 \text{kV/cm}$  であり、予想したように GaAs 系 QCL に比べてかなり減少している。

## 3 むすび

GaSb 系半導体材料を用いてテラヘルツ帯量子カスケードレーザを作成した。レーザ活性層については、より高い温度で発振させるため縦光学フォノン共鳴法を用い、GaSb/AlSb 系の多重量子井戸構造を設計した。GaSb の縦光学フォノンエネルギーや電子の有効質量が GaAs よりも小さいため、GaSb/AlSb 系テラヘルツ帯量子カスケードレーザの発振開始電界を GaAs/AlGaAs 系量子カスケードレーザよりも小さくすることができた。さらに、導波路については、作成プロセスが簡単であるシングルプラズモン導波路を採用した。GaAs 基板上に GaSb 系量子カスケードレーザを作成することで、ダブルメタル型導波路と同程度の高いレベルで、レーザ活性層へのテラヘルツ波閉じ込めを実現した。テラヘルツ帯量子カスケードレーザの実用化にあたっては、室温動作の困難等様々な課題を解決しなければならない。GaAs

系以外の材料系による量子カスケードレーザーは、これらの課題の解決策の一つとなり得るか、少な

くとも解決のための手がかりをもたらすものと考ええる。

### 参考文献

- 1 R. Köhler, A. Tredicucci, F. Beltram, H. E. Beere, E. H. Linfield, A. G. Davies, D. A. Ritchie, R. C. Iotti, and F. Rossi, "Terahertz semiconductor-heterostructure laser", Nature, Vol.417, pp.156-159, 2002.
- 2 H. Yasuda, I. Hosako, S. Miyashita, and M. Patrashin, "Terahertz electroluminescence from GaSb/AlSb quantum cascade laser", Electron. Lett., Vol.41, pp.1062-1063, 2005.
- 3 B. S. Williams, H. Callebaut, S. Kumar, Q. Hu, and J. L. Reno, "3.4-THz quantum cascade laser on longitudinal-optical-phonon scattering for depopulation", Appl. Phys. Lett., Vol.82, pp.1015-1017, 2003.
- 4 S.-C. Lee and A. Wacker, "Nonequilibrium Green's function theory for transport and gain properties", Phys. Rev. B, Vol.66, 245314, 2002.
- 5 S. Kohen, B. S. Williams, and Q. Hu, "Electromagnetic modelling of terahertz quantum cascade laser waveguide and resonators", J. Appl. Phys., Vol.97, 053106, 2005.
- 6 H. Yasuda and I. Hosako, "Measurement of terahertz refractive index for plasmon waveguides", 2007 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., pp.1125-1128, Jun. 2007.



やすだ ひろあき  
安田浩朗

新世代ネットワーク研究センター光波  
量子・ミリ波ICTグループ主任研究員  
半導体デバイス