量子カスケードレーザー用半導体材料

大谷 啓太, 大野 英男

東北大学電気通信研究所ナノ・スピン実験施設 (〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2-1-1)

Semiconductor Material Systems for Quantum Cascade Lasers

Keita OHTANI and Hideo OHNO

*Laboratory for Nanoelectronics and Spintronics, Research Institute of Electrical Communication,
Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8577*

(Received August 22, 2007)

Quantum cascade lasers (QCLs) are long-wavelength and high-power semiconductor lasers employing carrier recycling in an active region. Since this laser utilizes an intersubband transition in quantum well structures, fundamental properties such as the laser emission wavelength are dependent on the design of structures. However ultimate laser performance depends not only on designing the structures but also on material properties. Here we have discussed semiconductor material systems suitable for the operation of QCLs. The material properties, which have an influence on laser characteristics, are presented and compared with the laser performance of state-of-art QCLs composed by the different kinds of materials. Finally we have described our recent results using InAs/AlSb which has material properties advantageous for the operation of QCLs.

Key Words: Quantum cascade laser, Intersubband transition, Carrier recycling, Semiconductor material

1. はじめに

量子カスケードレーザーは量子井戸構造のバンド構造を制御した半導体レーザーで、発光層が多段に接続された活性領域を用いることによってフォトンエネルギーの小さい長波長領域においても高出力発振を可能としたレーザーである¹⁾。量子カスケードレーザーは、1994年にJ. Faist, F. Capassoらによって実現され¹⁾、その後アメリカ、ヨーロッパ諸国を中心に活発に研究が進められた。2001年には中赤外領域において室温連続発振が²⁾、2002年にはテラヘルツ領域での発振³⁾が報告されたことを受けて、近年日本でも非常に注目されている。このレーザーでは、量子井戸構造のサブバンド間光学遷移を用いているために発振波長、振動子強度、及び非放射再結合時間などが構造により設計可能であり、現在までにさまざまな発光層構造で発振が確認されている。しかしながらこれらの極限の値は構成材料自身によって決まるため、構造の設計だけでなく材料の選択も重要である。現在までに量子カスケードレーザーは、発明当初から使用されているGaInAs/AlInAs/InPをはじめとして、GaAs/AlGaAs⁴⁾、InAs/AlSb⁵⁾、及びGaInAs/AlAsSb⁶⁾を用いて実現されている。本稿では量子カスケードレーザーの諸特性が材料にどのように依存するかについて説明し、これまでに実現されている量子カスケードレーザーの性能について材料の観点から考察する。最後に材料選択に注目した我々の取り組みについて紹介する。

2. 材料とレーザー性能との関係

量子カスケードレーザーの性能を決める基本要素として、光利得係数、動作波長域、及び動作温度が挙げられる。本節ではこれらが材料の特性にどのように依存するのかについて述べる。

2.1 光利得係数

はじめにしきい値電流密度を決める光利得係数に関して考える。3準位系をモデルにとり、レート方程式から光利得係数を導出すると式(1)のように表される⁷⁾

$$g = \frac{4\pi e z_{23} \tau_3 (1 - \tau_2 / \tau_{23})}{\epsilon_0 n \lambda L (2\gamma_{23})} \quad (1)$$

ここで z_{ij} は双極子モーメント、 τ_{ij} はサブバンド間緩和時間、 τ_j は第jサブバンドでの寿命、 $2\gamma_{ij}$ は線幅、 L はカスケード構造1周期あたりの長さ、 λ は波長、 n は屈折率である。ここで放射再結合時間に注目してみると、放射再結合時間を決める双極子モーメントはサブバンド間光学遷移の場合、量子井戸の井戸幅で決まり、井戸幅の広い方が大きな双極子モーメントを持つ。Fig. 1(a)に有効質量の異なる3つの材料(GaAs, GaInAs, InAs)の単一量子井戸における第1サブバンドと第2サブバンドの双極子モーメントの計算結果を示す。Fig. 1(a)より有効質量が小さいほうが同じ遷移エネルギーを与える量子井戸の井戸幅が広くなり、大きな双

Fig. 1 (a) Calculated dipole matrix elements between the ground (E_1) and the first excited (E_2) subband and (b) longitudinal optical (LO) phonon scattering time from E_2 to E_1 of a single QW composed by three kinds of materials. Smaller effective mass material has the larger dipole matrix element and longer LO phonon scattering time.

極子モーメントを持つことがわかる。又同じ遷移エネルギーに対して井戸幅が広がるため、界面ラフネス散乱(散乱レートは有効質量の2乗に比例)の影響を受けにくく、発光線幅も狭くなると予想される。無限障壁を仮定した場合双極子モーメントは有効質量の1/2乗の逆数に比例する。次に非放射再結合時間に注目する。サブバンド間非放射再結合はサブバンド間のエネルギー間隔が縦光学(LO)フォノンのエネルギーよりも大きな場合、LOフォノン散乱による緩和が支配的である。Fig. 1(b)にLOフォノン散乱による第2サブバンドから第1サブバンドへの緩和時間の計算結果を示す。計算にはRidleyのモデルを用いた⁸⁾。Fig. 1(b)より、有効質量の小さい材料の方が散乱の終状態の状態密度が小さくなるため緩和時間が長くなることがわかる。このモデルではLOフォノン散乱による緩和時間は有効質量の1/2乗の逆数に比例するため、最終的に式(1)の光利得係数は有効質量の3/2乗の逆数に比例する。したがって有効質量の小さい材料の方が大きな光利得係数を持ち、損失の主な要因である自由キャリア吸収が有効質量に依存しないため(自由キャリア吸収は有効質量の逆数に比例する形をとるが、その中の位相緩和時間が有効質量の逆数に比例するために結果的に有効質量には依存しない)、低い値電流密度化が可能となると考えられる。

2.2 動作波長域

動作波長域の長波長極限に関しては、サブバンド間の発光エネルギーがサブバンドのエネルギー広がりより大きければ原理的に発光は可能であると考えられる。しかしレーザー発振に関しては、励起サブバンドへの選択的なキャリアの注入が可能であるかなどの他の要因に大きく依存するため単純な問題でない。一方で短波長側の極限は量子井戸の深さで決まり、井戸と障壁の間のバンドオフセットエネルギーが大きい材料の方が短波長化に有利である。これまでの量子カスケードレーザーの多くは、 Γ 点サブバンドを用いて設計されているが、近年L, X点など他の点のバンドがレーザー特性に及ぼす影響が議論されている⁹⁾。特に井戸幅を狭くして短波長化すると、L, X点の有効質量が Γ 点の有効質量よりも重いために、

Fig. 2に示すように Γ 点サブバンドのエネルギーよりX点及びL点サブバンドのエネルギーが低くなる。 Γ 点サブバンドから他の点のサブバンドへの緩和は高速に起こることが知られており¹⁰⁾、この場合注入したキャリアが Γ 点以外のバンドにも流れるためしきい値電流密度の増大が予想される。したがって量子カスケードレーザーの短波長動作のためには深い量子井戸を形成し、他の点のバンドとのエネルギー差が大きい材料が必要である。

2.3 動作温度

素子温度が上昇してくると熱活性型フォノン散乱によって所望のサブバンドからキャリアの漏れ出しが増大するため、動作温度の向上、及び光出力の増大のためにはリークパスを少なくすることが必要である。特にFig. 3に示すようにバンドオフセットエネルギーが小さい材料では、励起サブバンド(E_3)と擬似連続準位間とのエネルギー差(E_H)が小さいため発光層の励起サブバンドから熱励起によりキャリアが漏れ出す確率(L)が大きくなる。伝導帯バンドオフセットのエネルギーが大きい材料では、このエネルギー差を大きくできるため、動作温度の向上

Fig. 2 Influence of other band subbands on the carrier transport. The $E_2(\Gamma)$ subband at Γ -point increases above the $E_1(X \text{ or } L)$ at X- or L-point band by decreasing well thickness to reduce the emission wavelength. The carriers are known to be transported efficiently from Γ -point subbands to other band subbands due to their large density of state at the other band, which has an influence on the carrier transport in the active region of QCLs.

Fig. 3 Thermal carrier leakage from the excited subband to the continuum states. This process is expected to be reduced by using the material with the large conduction band offset energy.

が期待できる。又量子カスケードレーザーでは、高速のLOフォノン散乱により量子効率が 10^{-5} - 10^{-6} 程度と小さく、通常の半導体レーザーと比較してしきい値電流密度が高くなる。そのため連続発振時には、発熱が少ないパルス発振時とは異なり、活性領域とヒートシンクの間の温度差が 80°C 程度まで大きくなることが報告されている²⁾。したがって高温まで連続発振させるためには、熱散逸の優れたデバイス構造が必要不可欠である上、構成する材料の熱伝導率が大いことが重要である。

以上から、光利得係数、動作波長域、及び動作温度の観点から量子カスケードレーザーを構成する材料として、(1)有効質量が小さい、(2)バンドオフセットエネルギーが大きい、(3) Γ 点と他の点のバンドとのエネルギー差が大きい、(4)熱伝導率が大い材料、が良いことがわかる。さらにこれらに加え、バンド構造設計上の観点からバンドオフセットエネルギーや有効質量などの材料のバンドパラメータがよく知られていることが重要である。

3. 各材料の性能

Table 1, 2にこれまで報告されている各材料の物性とレーザーの性能を示す。発明当初から用いられてきたGaInAs/AlInAs系は、有効質量、伝導帯バンドオフセットエネルギーともにGaAs/AlGaAs系、InAs/AlSb系の中間の

Table 1 Properties of the materials used for QCLs.

	GaAs/AlGaAs		GaInAs/AlInAs(AlAsSb)/InP		InAs/AlSb
Well	GaAs	Ga _{0.53} In _{0.47} As	Ga _{0.53} In _{0.47} As	Ga _{0.3} In _{0.7} As	InAs
Barrier	Al _{0.45} Ga _{0.55} As	Al _{0.52} In _{0.48} As	AlAs _{0.56} Sb _{0.44}	Al _{0.6} In _{0.4} As (Al _{0.45} In _{0.55} As/AlAs)	AlSb
Substrate	GaAs	InP	InP	InP	InAs or GaSb
Strain	Lattice matched	Lattice matched	Lattice matched	Strain compensated	0.8-1.3%
Effective mass (m_0)	0.063	0.044	0.044	0.035 ³²⁾	0.023
Band offset (eV)	0.45	0.52 ³¹⁾	1.6 ³¹⁾	0.74 ³²⁾	2.1 ²¹⁾
Energy separation of other band minimum (eV)	0.36 (L-point)	0.52 (X-point) ³¹⁾	0.52 (X-point) ³¹⁾	0.62 (L-point) ³¹⁾	0.73-0.76 (L-point) ²¹⁾
Substrate thermal conductivity ($\text{Wcm}^{-1}\text{K}^{-1}$) ³³⁾	0.54(GaAs)	0.7(InP)	0.7(InP)	0.7(InP)	0.26(InAs) 0.33(GaSb)

Table 2 Current performance of QCLs operating at mid-infrared region. Up to now QCLs based on three kinds of materials (GaAs/AlGaAs, GaInAs/AlInAs(AlAsSb, AlAs)/InP, InAs/AlSb) have been realized.

	GaAs/AlGaAs	GaInAs/AlInAs(AlAsSb)/InP	InAs/AlSb
Pulsed J_{th} (kA/cm^2)	1.6(80 K)-9(300 K) ³⁴⁾	0.2(77 K)-1.2(300 K) ³⁸⁾	0.4(77 K)-4.0(300 K)
Maximum operation temperature (Pulse) (K)	373 ³⁵⁾	>425	390
Maximum Operation temperature (CW) (K)	150 ³⁶⁾	>400 ³⁹⁾	~80
T_0 (K)	193 ³⁵⁾	>200	160
($J_{th}=J_0\exp(T/T_0)$)			
Shortest wavelength (μm)	8.5 ³⁷⁾	3.0 ^{20, 21)}	2.9 ²¹⁾
Year of birth	1998	1994	2002

値をとるが、現在のところ最も良い性能を示す。注目すべき点は導波路のクラッド層に使われるInPの熱伝導率であり、 $0.7\text{ Wcm}^{-1}\text{K}^{-1}$ といずれの材料よりも大きな値となっている¹¹⁾。GaInAs/AlInAs系では高い熱伝導率を持ち、かつ十分な光閉じ込めを与えるInPをクラッド層として用いることができる上、埋め込み再成長をはじめとするデバイス作製技術も確立しているため、温度特性という観点から非常に優れた材料と言える。又この材料系がサブバンド間光学遷移を含め、理論、実験の両面からよく研究され、バンドパラメータ等がよく知られていることも大きな利点である^{12,13)}。

GaAs/AlGaAs系はGaInAs/AlInAs系に引き続いて1998年に実現された材料であるが、伝導帯バンドオフセットが小さく、又導波路構造の問題¹¹⁾もあって、Table 2に示すように中赤外領域では特性はあまり良くない。しかしながらGaAs/AlGaAs系はGaInAs、InAsと比較して残留キャリア濃度が少なく、又伝導帯バンドオフセットエネルギーが小さくテラヘルツ領域で用いる広い井戸においても十分な井戸間の結合を与えることができるため、この領域では優れた性能を示す。実際同じ設計方針で作製された発振波長 $80\mu\text{m}$ の素子をGaInAs/AlInAs系、及びGaAs/AlGaAs系で比較してみると、GaAs/AlGaAs系の方がしきい値電流密度、最高動作温度の点で優れている^{14,15)}。現在までにGaAs/AlGaAsを用いて、テラヘルツ領域で最高の性能が得られている(最長発振波長 $182\mu\text{m}$ ¹⁶⁾、最高動作温度 167 K (波長 $90\mu\text{m}$)¹⁷⁾。

GaInAs/AlInAs系は波長 $5\text{-}11\mu\text{m}$ の領域では優れた性能を発揮するが、波長 $4\mu\text{m}$ 以下となると伝導帯バンドオフセットエネルギーが小さいため発振が難しくなる。そこで近年短波長化のため、伝導帯バンドオフセットエネルギーを大きくした歪補償GaInAs/AlInAsとGaInAs/AlAsSbが注目され、研究が進められている^{6,18)}。中でもGaInAs/AlAsSbは伝導帯バンドオフセットエネルギーが 1.6 eV と歪補償GaInAs/AlInAsよりも大きいのが特徴である。これらの材料においても、井戸にGaInAsを用いているために $4\mu\text{m}$ 以下の波長では Γ 点サブバンドの方がX点サブバンドよりもエネルギー的に低くなるという問題があるが¹⁹⁾、2007年に歪補償GaInAs/AlAs/AlInAs及びGaInAs/AlAsSbの両方で波長 $3\mu\text{m}$ で

のレーザー発振が確認されている^{20,21)}。しかしながら最高動作温度は200 K以下となっており、直接実験で明らかになってはいないがX点サブバンドの影響が指摘されている。

InAs/AlSb系は有効質量が $0.023 m_0$ と一番小さく、かつ伝導帯バンドオフセットエネルギーも2.1 eVと最も大きなエネルギーを有する。又 Γ 点とL点とのエネルギー差も0.73-0.76 eVと最も大きく、非常に優れた材料である。InAs/AlSb系量子カスケードレーザーは2002年に筆者らのグループにより実現された⁵⁾。本年度に入り、フランスのグループから波長2 μm 台での発振の報告があり²²⁾、非常に注目されている。以下の4節ではInAs/AlSb系を用いた我々の取り組みについて紹介する。

Fig. 4 Laser emission spectra ($T = 78 \text{ K}$) of InAs QCLs fabricated by our group. The present emission wavelength range is from 3.8 to 14 μm .

Fig. 5 (a) Conduction band diagram of injection/active/injection parts in the active region. Active parts are designed using a scheme of chirped superlattice. Calculated laser emission wavelength is 12 μm . (b) Layer structure of the InAs QCL with emission wavelength of 12 μm . The active region contains 35 repeats of injection/active parts; its total thickness is 3.5 μm .

4. InAs/AlSb系量子カスケードレーザー

InAs/AlSb系量子カスケードレーザーの最初の提案は、1992年のOhno, Esakiらのサブバンド間発光素子である²³⁾。その後1999年に筆者らのグループにより初めてエレクトロルミネッセンスが観測された²⁴⁾。InAs/AlSbは材料として優れた性能を示すが、Table 1に示すようにInAsとAlSbの間にはおよそ1%の格子不整合があり、量子カスケードレーザーの活性領域のようにInAsとAlSbの多層構造を良質な結晶を維持して作製することは困難であった。そこで筆者らのグループではInAsとAlSbの間に形成される界面ボンドに注目し、結晶成長中に界面に形成されるボンドをコントロールして格子歪を補償する技術を開発した²⁵⁾。この技術を用いて、InAsとAlSbの総積層数が1000を超える高品質なInAs/AlSb量子カスケード構造を作製することに成功し、2002年にInAs/AlSb量子カスケードレーザーの発振に成功した⁵⁾。その後2004年には大きな振動子強度を持つ超格子構造を発光層に用いることでこれまで報告されている最低しきい値電流密度(0.2 kA/cm^2)に近い電流密度(0.4 kA/cm^2 , 発振波長10 μm)を実現し、2006年には注入層のドーピング濃度を最適化することで室温におけるしきい値電流密度を 4.0 kA/cm^2 まで減少させ²⁶⁾、素子の最高動作温度も390 K(発振波長6 μm)まで増加させることに成功した。Table 2のInAs/AlSbのデータは最短波長のデータを除いて、筆者らのグループにより得られたものである。レーザーの性能は中赤外領域のGaAs/AlGaAs系と比較してしきい値電流密度及びパルス動作時の最高動作温度の点で優れているが、GaInAs/AlInAs系より劣っている。InAsはバンド非放物線性が大きく、又結晶成長の際に起こるAsとSbの相互混入や界面ボンドの影響があるため、バンド計算のモデルが単純でなく構造の最適化に時間を要することが原因の1つであると考えている。又しきい値電流密度の電流パルス幅依存性から見積られる素子の熱抵抗は20 K/W程度とGaInAs/AlInAs/InP(6.6 K/W)²⁷⁾、GaAs/AlGaAs(6.7 K/W)²⁸⁾系と比較して高く、Table 1の熱伝導率を反映する結果となっている。InAs/AlSbに格子整合する材料で、InPのような優れた材料は存在しないが、近年鍍金技術を用いたヒートシンク構造で良好な結果が得られていること²⁹⁾、又バンド計算のモデルに関しても、界面ボンドを取り入れたモデルで実験結果をうまく説明できることなどが明らかになっており³⁰⁾、これらの技術の進展により一層の高性能化が可能であると考えている。

5. まとめ

本稿では、材料の諸特性が量子カスケードレーザーの性能にどのように影響を及ぼすかについて述べた。光利得係数、動作波長域、最高動作温度の観点から検討を行ったところ、(1)有効質量が小さい、(2)バンドオフセットエネルギーが大きい、(3) Γ 点と他の点のバンドとのエネルギー差が大きい、(4)熱伝導率が大きいなどの材料が良いことがわかった。又これらを基にGaAs/AlGaAs, GaInAs/AlInAs, InAs/AlSb系で現在までに作製されている

量子カスケードレーザーの性能について比較を行ったところ、材料固有の特性がレーザーの性能を左右することが明らかになり、今後バンド構造の設計はもちろんのこと、材料の観点からも設計を進めることが高性能化の鍵であることがわかった。

参考文献

- 1) J. Faist, F. Capasso, D. L. Sivco, C. Sirtori, A. L. Hutchinson, and A. Y. Cho: Science **264** (1994) 553.
- 2) M. Beck, D. Hofstetter, T. Aellen, J. Faist, U. Oesterle, M. Ilegems, E. Gini, and H. Melchior: Science **295** (2002) 301.
- 3) R. Köhler, A. Tredicucci, F. Beltram, H. E. Beere, E. H. Linfield, A. G. Davies, D. A. Ritchie, R. C. Iotti, and F. Rossi: Nature **417** (2002) 156.
- 4) C. Sirtori: Appl. Phys. Lett. **73** (1998) 3486.
- 5) K. Ohtani and H. Ohno: Jpn. J. Appl. Phys. **41** (2002) L1279; ibid. Appl. Phys. Lett. **82** (2003) 1003.
- 6) D. G. Revin, L. R. Wilson, E. A. Zibik, R. P. Green, J. W. Cockburn, M. J. Steer, R. J. Airey, and M. Hopkinson: Appl. Phys. Lett. **84** (2004) 1447.
- 7) H. C. Liu and F. Capasso: *Intersubband Transitions in Quantum Wells: Physics and Device Applications II* (Semiconductors and Materials Vol. **66**, Ed. K. Willardson and Eicke R. Weber, Academic Press, San Diego, 2000).
- 8) B. K. Ridley: *Hot Carriers in Semiconductor Nanostructures: Physics and Applications* (Ed. J. Shah, Academic Press, San Diego, 1992) Chap. II.1, p.17.
- 9) L. R. Wilson, D. A. Carder, J. W. Cockburn, R. P. Green, D. G. Revin, M. J. Steer, M. Hopkinson, G. Hill, and R. Airey: Appl. Phys. Lett. **81** (2002) 1378.
- 10) M. Hosoda, K. Tominaga, N. Ohtani, H. Mimura, and M. Nakayama: Appl. Phys. Lett. **70** (1997) 1581.
- 11) C. Sirtori, S. Dhillon, C. Faugeras, A. Vasanelli, and X. Marcadet: Phys. Stat. Sol. **203** (2006) 3533.
- 12) F. Capasso, C. Sirtori, and A. Y. Cho: IEEE J. Quantum Electron. **30** (1994) 1313.
- 13) C. Sirtori, F. Capasso, J. Faist, and S. Scandolo: Phys. Rev. B **50** (1994) 8663.
- 14) G. Scalari, N. Hoyler, M. Giovannini, and J. Faist: Appl. Phys. Lett. **86** (2005) 181101.
- 15) L. Ajili, G. Scalari, N. Hoyler, M. Giovannini, and J. Faist: Appl. Phys. Lett. **87** (2005) 141107.
- 16) C. Walther, G. Scalari, J. Faist, H. Beere, and D. Ritchie: Appl. Phys. Lett. **89** (2006) 231121.
- 17) B. S. Williams, S. Kumar, and Q. Hu: Opt. Express **9** (2005) 3331.
- 18) M. P. Semtsiv, M. Ziegler, S. Dressler, W. T. Masselink, N. Georgiev, T. Dekorsy, and M. Helm: Appl. Phys. Lett. **85** (2004) 1478.
- 19) Q. Yang, C. Manz, W. Bronner, Ch. Mann, L. Kirste, K. Köhler, and J. Wagner: Appl. Phys. Lett. **86** (2005) 131107.
- 20) D. G. Revin, J. W. Cockburn, M. J. Steer, R. J. Airey, M. Hopkinson, A. B. Krysa, L. R. Wilson, and S. Menzel: Appl. Phys. Lett. **90** (2007) 021108.
- 21) M. P. Semtsiv, M. Wienold, S. Dressler, and W. T. Masselink: Appl. Phys. Lett. **90** (2007) 051111.
- 22) J. Devenson, R. Teissier, O. Cathabard, and A. N. Baranov: Appl. Phys. Lett. **90** (2007) 111118.
- 23) H. Ohno, L. Esaki, and E. E. Mendez: Appl. Phys. Lett. **60** (1992) 3153.
- 24) K. Ohtani and H. Ohno: Electron. Lett. **35** (1999) 935.
- 25) K. Ohtani, H. Sakuma, and H. Ohno: J. Cryst. Growth **251** (2003) 751.
- 26) K. Ohtani, Y. Moriyasu, H. Ohnishi, and H. Ohno: Appl. Phys. Lett. **90** (2007) 261112.
- 27) S. Blaser, D. A. Yarekha, L. Hvozdar, Y. Bonetti, A. Muller, M. Giovannini, and J. Faist: Appl. Phys. Lett. **86** (2005) 041109.
- 28) H. Page, A. Robertson, C. Sirtori, C. Becker, G. Glastre, and J. Nagle: IEEE photonics Technol. Lett. **13** (2001) 556.
- 29) A. Evans, S. R. Darvish, S. Slivken, J. Nguyen, Y. Bai, and M. Razeghi: Appl. Phys. Lett. **91** (2007) 071101.
- 30) K. Ohtani and H. Ohno: private communication.
- 31) D. G. Revin, J. W. Cockburn, M. J. Steer, R. J. Airey, M. Hopkinson, A. B. Krysa, L. R. Wilson, and S. Menzel: Appl. Phys. Lett. **90** (2007) 151105.
- 32) J. Faist, F. Capasso, D. L. Sivco, A. L. Hutchinson, S. -N. G. Chu, and A. Y. Cho: Appl. Phys. Lett. **72** (1998) 680.
- 33) 赤崎 勇編著：III-V族化合物半導体（培風館，1994年）p.148.
- 34) C. Sirtori, H. Page, C. Becker, and V. Ortiz: IEEE J. Quantum Electron. **38** (2002) 547.
- 35) C. Pflügle, W. Schrenk, S. Anders, G. Strasser, C. Becker, and C. Sirtori: Appl. Phys. Lett. **83** (2003) 4698.
- 36) H. Page, S. Dhillon, M. Calligaro, C. Becker, V. Ortiz, and C. Sirtori: IEEE J. Quantum Electron. **40** (2004) 665.
- 37) D. A. Carder, R. L. Wilson, R. P. Green, J. W. Cockburn, M. Hopkinson, M. J. Steer, R. Airey, and G. Hill: Appl. Phys. Lett. **82** (2003) 3409.
- 38) A. Evans, S. R. Darvish, S. Slivken, J. Nguyen, Y. Bai, and M. Razeghi: Appl. Phys. Lett. **91** (2007) 071101.
- 39) L. Diehl, D. Bour, S. Corzine, J. Zhu, G. Höfler, M. Lončar, M. Troccoli, and F. Capasso: Appl. Phys. Lett. **88** (2006) 20115.

レーザーワード

InAs/AlSb系量子カスケードレーザー

(InAs/AlSb system quantum cascade laser)

井戸をInAs、障壁をAlSb及びAlGaSb混晶で構成した量子カスケードレーザー。これらの材料との格子不整合差が小さいInAs基板、あるいはGaSb基板上に作製される。井戸の電子の有効質量が軽く、井戸と障壁の間で深い井戸を形成

できるのが大きな特徴である。現在波長2.7～14 μmの非常に広い波長領域でレーザー発振が観測されており、特に波長3～4 μm領域の短波長領域で動作する量子カスケードレーザーとして期待されている。

(大谷 啓太, 大野 英男)