

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24246008

研究課題名(和文) 発振波長が温度に依存しない希釈ビスマス 族半導体レーザの実現

研究課題名(英文) GaAsBi laser diodes with low temperature dependence of lasing wavelength

研究代表者

吉本 昌広 (Masahiro, Yoshimoto)

京都工芸繊維大学・工学科学研究科・教授

研究者番号：20210776

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,000,000円

研究成果の概要(和文)：半導体半金属混晶GaAsBiを用いることで、発振波長が温度に依存しない光通信半導体レーザの実現が期待される。分子線エピタキシャル法を用いて、高品質なGaAsBiを得た。Bi組成9.5%のGaAsBi薄膜から、室温において通信波長帯である1.3 $\mu\text{m}$ で発光が得られた。GaAsBiレーザダイオード(LDs)を試作し、最大波長1045 nmでの室温レーザ発振を実現し、その発振波長の温度係数が低減できることを世界で初めて実証した。

研究成果の概要(英文)：Molecular beam epitaxy (MBE) of GaAsBi and related alloys opens up a new path to exploit metastable alloys exhibiting a particular property such as luminescence with a temperature-insensitive wavelength. A surfactant-like effect of Bi atoms contributes an improvement in quality of GaAsBi under an extreme growth condition outside the conventional one for high-quality III-V semiconductors.

GaAsBi alloys with GaBi molar fractions up to 14.8% has been coherently grown on GaAs. GaAsBi emitted bright photoluminescence (PL) at a wavelength of 1.3  $\mu\text{m}$  without intensity degradation. The lasing emission of up to 1.2 and 1.05  $\mu\text{m}$  was demonstrated in photo- and electrically-pumped GaAsBi lasers, respectively at room temperature.

研究分野：半導体工学

キーワード：レーザダイオード III-V族半導体 半金属 分子線エピタキシー レーザ 結晶成長 ビスマス 局在準位

## 1. 研究開始当初の背景

Bi(V族元素)やInBiは半金属であり、GaBiも理論的に半金属と予測されている。Biを数パーセント含むGaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub>やIn<sub>1-y</sub>Ga<sub>y</sub>As<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub>、Ga<sub>Ny</sub>As<sub>1-x-y</sub>Bi<sub>x</sub>などの希釈ビスマス系III-V族混晶(GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub>系混晶)は半導体と半金属の混晶である。この混晶は、以下のような特長を持っている。

**(1) GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub>系混晶における禁制帯幅の温度無依存化**：半導体の禁制帯幅は温度上昇とともに減少する負の温度特性を示す。一方、半金属の禁制帯幅は正の温度依存性を示す。半導体と半金属の混晶を形成することで、禁制帯幅を温度無依存化できる。

**(2) Biの大きなナローギャップ効果**：Biを添加することで、Nと同じように禁制帯幅が大きく減少(ナローギャップ化)する。Ga<sub>Nx</sub>As<sub>1-x</sub>の場合は、N原子の準位とGaAsの伝導帯が共鳴することで、GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub>の場合は、Bi原子の準位とGaAsの価電子帯が共鳴することで、大きくナローギャップ化すると説明される。

**(3) Biサーファクタント効果による高品位の結晶成長**：Ga<sub>Nx</sub>As<sub>1-x</sub>やGa<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>N<sub>y</sub>As<sub>1-y</sub>の場合、Nの添加が結晶性を大きく劣化させる。一方、Biは結晶成長の際にサーファクタント効果があり、GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub>などの混晶を形成しても、N添加のときのような結晶性の劣化は無い。

**(4) 毒性の無い元素Bi**：Biは、周期律表で同じ第6周期にあるHg、Tl、Pbや、他のV族元素(AsやSb)と異なり毒性が無い。Bi化合物は、化粧品の添加物や整腸剤として用いられている。ビスマスは安全な元素である。禁制帯幅が温度無依存化する混晶として知られるHg<sub>x</sub>Cd<sub>1-x</sub>TeやHg<sub>x</sub>Cd<sub>1-x</sub>Se、Tl<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>Asとは対照的である。

希釈ビスマス系III-V族半金属半導体混晶は、京都工芸繊維大学名誉教授の尾江がNTT在職中の1995年に提唱し、有機金属気相成長(MOCVD)法によりGaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub>を創製した。MOCVD法では、意図せぬ炭素混入など、デバイス化の際に多くの問題があったため、尾江が本学に赴任後の2001年頃より、分子線エピタキシー(MBE)法を手がけていた吉本と、MBE法によるGaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub>混晶の研究を開始した。GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub>、Ga<sub>Ny</sub>As<sub>1-x-y</sub>Bi<sub>x</sub>やIn<sub>1-y</sub>Ga<sub>y</sub>As<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub>の創製とその物性の解明は、吉本と尾江らが世界に先駆けて行ってきた。

海外ではカナダBritish Columbia大が2003年ごろにGaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub>の研究を開始した。2005年秋にBostonで開催されたMaterials Research Society(MRS)秋大会で、吉本らが招待講演を行った頃から、希釈ビスマス系

III-V族半金属半導体混晶が注目を集めるようになり、2010年以来、毎年「Biを含む半導体混晶国際ワークショップ」が開催されるようになった。英国Nottingham大、Surrey大、Sheffield大等、アイルランドTyndall研究所、ドイツMarburg大、米国再生エネルギー研(NREL)、Arizona州立大、Delaware大、Michigan大、Wisconsin大、Duke大など、海外の多くの研究機関で研究されている。

国外の研究は、従来、物性的興味のレベルの研究が中心であった。2010年に当グループが世界初のレーザ発振を実現したことから、デバイス品質のGaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub>系混晶が製作可能になった。これにより、最近では、レーザだけでなく、太陽電池や長波長光センサなどへの応用の提案が多くなされている。物性探求に加え、高品位化にむけた研究が盛んである。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、半導体レーザにおいて、周囲温度の変化に対する発振波長の安定化を図ることにある。禁制帯幅の温度係数が小さくなるBi系III-V族半導体半金属混晶を用いることで、半導体レーザの発振波長の温度係数が低減できる。

また、GaAsへのBi混入によって、spin-orbit splitting energyが増大し、長波長帯発光デバイスで問題となっているオージェ再結合の抑制も期待できる。これは、長波長帯発光デバイスの高効率化につながる。

本研究では、次項を研究目的とする。

- (1) 光通信波長帯で発光する高品質の高Bi含有GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub>を制御性良く得る方法を確立し、
- (2) AlGaAsをクラッド層、GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub>を活性層とするヘテロ接合構造を製作し、電流注入レーザ発振を実現する。この過程で、
- (3) 高品質のGaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub>を用いて、この材料のもつ真の物性を探求し、半導体基礎物性の分野への貢献を行う。

## 3. 研究の方法

半導体レーザの実現には、GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub>の高品質化が必須である。現有のMBEシステムを改良し、成長条件を確立する。さらに良好なGaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub>/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>Asヘテロ構造作製によるレーザしきい値の低減化に努め、電流注入レーザ発振を目指す。

さらに得られた高品質のGaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub>を用いて、Biが誘起する局在準位について調べる。Ga<sub>Nx</sub>As<sub>1-x</sub>などの希釈窒素系III-V族半導体混晶では、窒素が誘起する局在準位が、混晶の物性に大きな影響を与えている。本研究では、GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub>の局在準位について明確にする。

## 4. 研究成果

### (1) 高 Bi 組成 GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> の成長と特性

Bi 系 III-V 族半導体半金属混晶の成長において、通常の III-V 族半導体成長と異なるのが、Bi 原子のサーファクタント効果である。Bi 原子はサーファクタント原子として働き、構成原子の表面マイグレーションの促進に寄与する。Bi サーファクタント効果による表面およびヘテロ界面の平坦化や発光強度の上昇が報告されている。通常のサーファクタント効果は、Bi 原子が成長層に取り込まれない高温成長下で得られる。MBE 法による Bi 系 III-V 族半導体半金属混晶 GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> の成長では、Bi 原子を取り込むために、成長温度 400 以下という準安定な状態で行う。

このような成長条件では、GaAs に取り込まれる Bi 原子と、表面偏析しサーファクタント効果に寄与する Bi 原子とが共存すると考えられる。このため、GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> の成長では、擬似的なサーファクタント効果 (surfactant-like effect) が得られ、成長層の結晶性が向上に寄与する。

固体ソース MBE 法を用いて、最大 Bi 組成 14.8% の GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> 薄膜を GaAs(001) 基板上に成長した。Bi 原子を混入させるため、GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> の成長温度は 310 ~ 375 に設定した。また、成長表面の As と Ga のフラックス比が 1 になるように厳密に各フラックス量を制御した。Matthew と Blakeslee モデルから見積もった臨界膜厚以下で成長することで、全ての試料は GaAs 基板上にコヒーレント成長している。成長後の表面は鏡面であり、Ga や Bi ドロップレットは無かった。透過型電子顕微鏡による観察においては、Bi 組成  $x < 9.5\%$  の GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> 薄膜において、転位や転位ループ、凝集、組成変調構造、秩序構造といった欠陥は確認されていない。

図 1 に成長した p-GaAs 基板および GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> ( $x \leq 14.8\%$ ) 薄膜の室温ホトルミネセンス (PL) 測定の結果を示す。Bi 組成が増加す

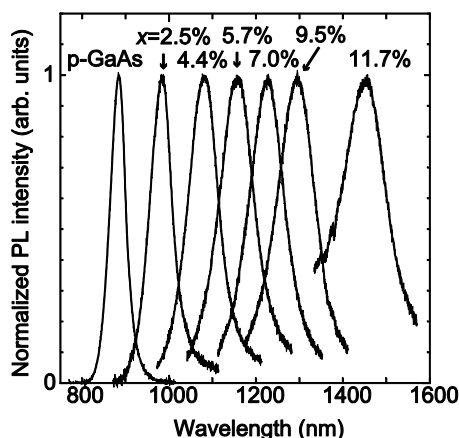


図 1. GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> ( $x \leq 14.8\%$ ) 薄膜の室温 PL スペクトル。

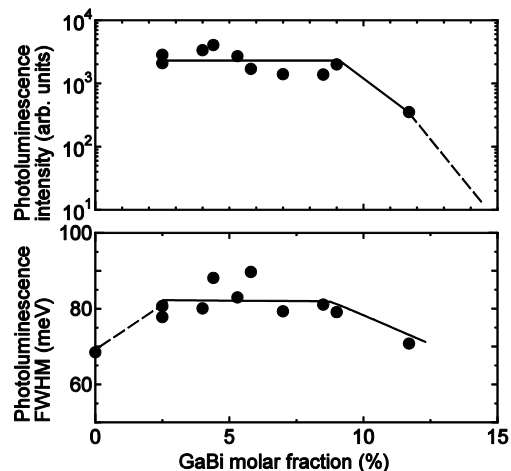


図 2. GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> ( $x \leq 14.8\%$ ) 薄膜の励起光強度を一定とした室温 PL 強度および半値幅 (FWHM) の Bi 組成依存性。

るに従って、発光波長は長波長化していく。室温において Bi 組成 9.5% の試料からは通信用波長帯である 1.3  $\mu\text{m}$ 、Bi 組成 11.7% の試料からは、1.45  $\mu\text{m}$  での発光を得た。

GaAs 基板上的 GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> ( $x = 9.5\%$ ) の格子歪は 0.95% である。このような高い歪量を有する結晶を成長する際には、臨界膜厚以下での成長であっても格子歪が結晶性に与える影響を考慮しなければならない。図 2 に、GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> ( $x \leq 11.8\%$ ) 薄膜の励起光強度を一定とした室温 PL 強度および半値幅の Bi 組成依存性を示す。1.45  $\mu\text{m}$  での発光を実現した Bi 組成 11.7% の試料では、9.5% 以下の試料に比べて約一桁程度発光強度が低下したが、通信用波長帯である 1.3  $\mu\text{m}$  での発光を実現した Bi 組成 9.5% までは、顕著な発光強度の低下は見られなかった。また、GaAs の半値幅 70 meV と比べて、GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> の半値幅は 10 ~ 20 meV 増加する。これは、内部歪エネルギーの増加に伴う Bi 組成ゆらぎによるものだと考えられる。Bi 組成ゆらぎにより引き起こされる局在準位については後述する。

### (2) 利得導波路型 GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> レーザダイオード

MBE 法によって n-GaAs 基板上に Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As クラッド層、Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As 光ガイド層および GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> ( $x=0, 3, 4\%$ ) 発光層を有する分離閉じ込めヘテロ構造 (separated confinement heterostructure) を成長した。n 型ドーパントとして Sn を、p 型ドーパントとして Be を用いた。成長後の表面は鏡面であり、Ga や Bi ドロップレットは無かった。スパッタ法により製膜した SiO<sub>2</sub> 絶縁膜を幅 10 ~ 20  $\mu\text{m}$  のストライプ型にエッチングし、試料表面には AuZn を、試料裏面には AuGeNi をオーミック電極として蒸着した。キャビティ長約 1 mm で劈開することで、ファブリ・ペロー共振器を製作し、ストライ

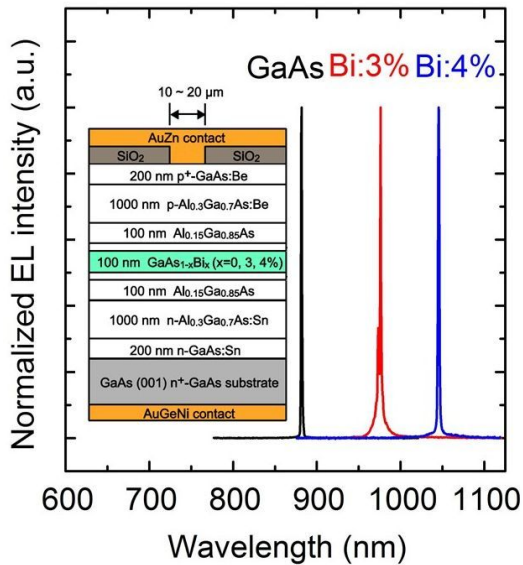


図 3. パルス駆動(パルス幅:100 nsec、  
デューティ比: 0.1%)における GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub>  
(x=0、 3、 4%) LD の室温発振スペクトル  
およびレーザ構造。

プ電極利得導波路型 GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> (x ≤ 4%)  
レーザダイオード(LD)を試作した。GaAs 発  
光層の成長温度は 560 °C、GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub>(x=3、  
4%)の成長温度は 375 °C である。

InGaAs ホトダイオードアレイを装備した  
分光器を用いて、GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> (x ≤ 4%) LD の  
エレクトロルミネセンス(EL)測定を行った。  
発熱による影響を避けるために、注入電流は  
パルス幅 100 nsec でデューティ比 0.1%に設  
定した。

図 3 に、パルス駆動(パルス幅:100 nsec、デ  
ューティ比: 0.1%)における GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub>(x=0、  
3、 4%) LD の室温発振スペクトルとレーザ構  
造を示す。GaAs<sub>0.96</sub>Bi<sub>0.04</sub> LD から、波長 1045  
nm において室温レーザ発振を実現した。発  
振波長は、室温 PL 測定から得られた Bi 組成  
と発光波長の関係と一致している。発振スペ  
クトルの半値幅は GaAs LD で 1.2 nm、  
GaAs<sub>0.97</sub>Bi<sub>0.03</sub> LD では 1.1 nm、GaAs<sub>0.96</sub>Bi<sub>0.04</sub>  
LD では 1.8 nm であり、一般的な半導体レー  
ザの半値幅よりも広がった。レーザ構造から  
算出される縦モード間隔は約 0.1 nm である  
のに対し、今回用いた測定系の波長分解能は  
約 0.5 nm であり、縦モードスペクトルの包  
絡線が観測されていると考えられる。

発振しきい値電流密度は、GaAs LD では 17.0  
kA/cm<sup>2</sup>、GaAs<sub>0.97</sub>Bi<sub>0.03</sub> LD では 13.8 kA/cm<sup>2</sup>、  
GaAs<sub>0.96</sub>Bi<sub>0.04</sub> LD では 7.49 kA/cm<sup>2</sup> であつた。  
今回の LD 構造は、ストライプ電極のみで電  
流を狭窄させる利得導波路型 LD となる。こ  
の構造の場合、ストライプ外側にかんりの電  
流が漏れていると考えられる。また、InGaAs  
赤外線カメラによって、絶縁膜からの電流漏  
れも確認している。高温で成長した GaAs LD

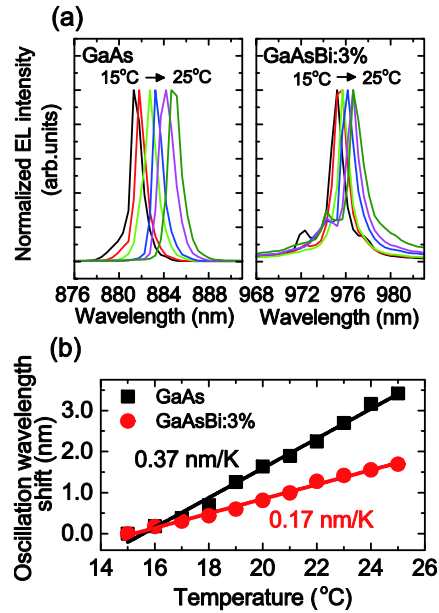


図 4. GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub>(x = 0、 3%) LD の 15  
から 25 °C における発振スペクトルおよび  
それぞれの発振波長の温度依存性。

においても非常に高いしきい値電流を示し  
たことから、GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub>層の品質が問題では  
なく、レーザ製作プロセスに起因していると  
考えている。

ペルチェ素子を用いて、GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub>(x = 0、  
3%) LD の温度特性を測定した。図 4 に、  
GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub>(x = 0、 3) LD の 15 °C から 25 °C  
における発振スペクトルおよびそれぞれの発  
振波長の温度依存性を示す。GaAs LD の発  
振波長の温度依存係数 0.37 nm/K に対し、  
GaAs<sub>0.97</sub>Bi<sub>0.03</sub> LD の温度依存係数は 0.17  
nm/K であつた。GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub>を活性層に適用  
することで、発振波長の温度依存係数を約  
45%に低減することに成功した。

### (3) 長波長化への展望

(1)節で述べたように、発光強度の低下無しに、  
通信用波長帯である 1.3 μm での発光が得ら  
れており、高 Bi 組成の試料においても高い  
品質を有している。図 5 に、室温における光  
励起による GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> 薄膜からレーザ発振  
スペクトルおよび発振波長の Bi 組成依存性  
を示す。Bi 組成 5.9%の試料から最大 1.2 μm  
でのレーザ発振がすでに得られている。また、  
GaAs/GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> 多重量子井戸(MQW)構造  
の製作も実現しており、室温において 1.3 μm  
での発光が得られている。

さらに、GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> に窒素(N)原子を添加し  
た 4 元混晶 GaN<sub>y</sub>As<sub>1-x-y</sub>Bi<sub>x</sub> では、GaAs 基板  
に格子整合し、電流注入による 1.3 μm での  
発光を実現している。これらの結果から、今  
後、GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> や GaN<sub>y</sub>As<sub>1-x-y</sub>Bi<sub>x</sub> を用いて、  
レーザダイオードの発振波長の長波長化や  
量子井戸構造を用いたレーザダイオードの

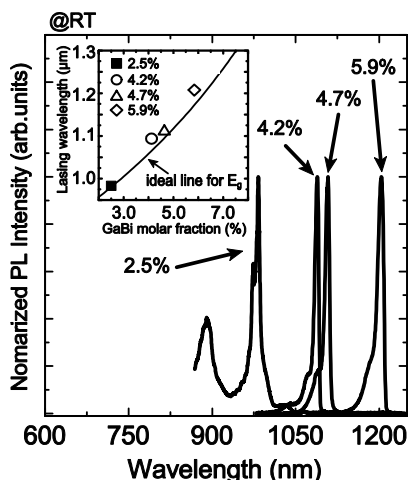


図 5. 室温における光励起による GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> 薄膜からのレーザ発振スペクトルおよび発振波長の Bi 組成依存性。

実現が十分期待できる。

#### (4) Bi 誘起の局在準位

GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> の局在準位に関して系統的に調べた。ホトルミネセンス法の結果より、Bi 起因の局在準位は価電子帯上端付近より約 90meV 程度エネルギーの高い所まで連続的に分布しており、その密度は $\sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 程度であった。

希釈窒素系 III-V 半導体 GaAs<sub>1-x</sub>N<sub>x</sub> の場合、伝導帯端付近の局在準位が電子移動度を大きく低下させる。GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> の価電子帯端付近の局在準位が正孔移動度に及ぼす影響をホール効果測定によって調べた。これまでの報告では、GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> の正孔移動度は通常の GaAs などの半導体とはかけ離れた温度特性を示していた。一方、本研究では、室温付近において GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> の正孔移動度は、GaAs の場合と同様の温度特性を示した。室温における正孔移動度は、 $x \leq 3.6\%$  までの試料において、GaAs 結晶と同等の高い移動度を実現した。成長条件を最適化した我々の試料では、Bi 原子の surfactant-like effect が効果的に働いていると考えられる。

DLTS 法を用いて GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> の価電子帯側の深い準位を観測した。深い準位の活性化エネルギーや DLTS スペクトルの形状から、深い準位は AsGa や BiGa の複合欠陥や点欠陥クラスタに起因すると考えられる。通常、成長温度が低いほど吸着原子の表面マイグレーションが抑制され点欠陥密度が上昇する。しかし、370 という低温成長にもかかわらず、その欠陥密度は 560 で成長した GaAs と同程度 ( $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  のオーダー) であった。Bi 原子の surfactant-like effect によって表面マイグレーションが促進された結果である。

#### (5) まとめ

MBE 法を用いて、GaAs 基板にコヒーレント成長する高品質な高 Bi 組成 GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> を成長した。GaBi モル比 9.5% の GaAs<sub>0.905</sub>Bi<sub>0.095</sub> 薄膜から室温において通信波長帯である 1.3 μm でのホトルミネセンス(PL)が得られ、かつ、発光強度の劣化は見られなかった。利得導波路型 GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> レーザダイオード(LD)を試作し、最大 1045 nm での室温レーザ発振を実現した。GaAs LD の発振波長の温度依存係数 0.37 nm/K に対し、GaAs<sub>0.97</sub>Bi<sub>0.03</sub> LD の温度依存係数は 0.17nm/K であった。活性層に GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> を適用することで、発振波長が低い温度依存性を有する半導体レーザを実現した。また、GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> における Bi 誘起の局在準位を評価した。

#### 5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計 6 件)

T. Fuyuki, K. Yoshida, R. Yoshioka, M. Yoshimoto, "Electrically pumped room-temperature operation of GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> laser diodes with low-temperature dependence of oscillation wavelength" Appl. Phys. Express 7 (2014) 082101(4 pages). 査読有 . doi:10.7567/APEX.7.082101

冬木琢真、伊藤瑞記、角浩輔、吉本昌広 「GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> および GaAs/GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> ヘテロ界面における局在準位」材料 62 巻 11 号 672-678. 査読有 . [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsms/62/11/62\\_672/\\_article/char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsms/62/11/62_672/_article/char/ja/)

T. Fuyuki, R. Yoshioka, K. Yoshida and M. Yoshimoto, "Long-wavelength emission in photo-pumped GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> laser with low temperature dependence of lasing wavelength", Appl. Phys. Lett. 103 (2013) 202105 (4 pages). 査読有 . doi:10.1063/1.4830273

M. Yoshimoto, M. Itoh, Y. Tominaga, and K. Oe, "Quantitative estimation of density of Bi-induced localized states in GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> grown by molecular beam epitaxy", J. Cryst. Growth, 378 (2013) 73-76. 査読有 . doi:10.1016/j.jcrysgro.2012.12.157

T. Fuyuki, S. Kashiyama, K. Oe, M. Yoshimoto, "Study of the Deep Levels of a GaAs/p-GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> Hetero-structure Grown by Molecular Beam Epitaxy", MRS Proceedings 1432 (2012) 27-32. 査読有 . doi:10.1557/opl.2012.904

T. Fuyuki, S. Kashiyama, K. Oe, M. Yoshimoto, "Interface State in p-Type GaAs/ GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> Heterostructure", Jpn.

J. Appl. Phys. 51 (2012) 11PC02 (5 pages).  
査読有 . doi:10.1143/JJAP.51.11PC02

[学会発表](計 21 件 うち招待講演 7 件)

M. Yoshimoto, "GaAsBi laser diodes with low temperature dependence of lasing wavelength (**Invited**), 6th International Workshop on Bismuth-Containing Semiconductors, Madison, USA, July 20, 2015.

吉本昌広、「ビスマス系 III-V 族半導体の創成とレーザダイオードへの応用」(**招待講演**)、平成 26 年度第 1 回講演会見学会、広島大学(東広島市)、2015 年 1 月 24 日

M. Yoshimoto, "Molecular beam epitaxy of GaAsBi and its application to laser diodes with low-temperature dependence of oscillation wavelength (**Invited**)", 18th European Molecular Beam Epitaxy workshop, Canazei, Italy, March 17, 2015.

R. Yoshioka, T. Fuyuki, K. Yoshida, M. Yoshimoto, "Molecular Beam Epitaxy of Laser-quality GaAsBi (**Invited**)", 18th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE 2014), Flagstaff, Arizona, USA, September 10, 2014.

冬木琢真、吉田憲司、吉岡諒、吉本昌広、「発振波長の低い温度依存性を有する GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> レーザダイオードの実現」(**招待講演**: 講演奨励賞受賞記念講演) 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、北海道大学(札幌市)、2014 年 9 月 18 日

M. Yoshimoto, "Molecular beam epitaxy of GaAsBi and its lasing characteristics" (**Invited**), 6th International Conference on Optical, Optoelectronic and Photonic Materials and Applications (ICOOPMA), Leeds, UK, July 31, 2014.

M. Yoshimoto, R. Yoshioka, K. Yoshida, and T. Fuyuki, "GaAsBi laser diodes fabricated by molecular beam epitaxy", 5th International Workshop on Bismuth-Containing Semiconductors, Cork, Ireland, July 22, 2014.

T. Fuyuki, R. Yoshioka, K. Yoshida, M. Yoshimoto, "GaAsBi Laser Diodes with Low Temperature Dependence of Lasing Wavelength", CLEO 2014, San Jose, USA, June 10, 2014.

M. Yoshimoto, T. Fuyuki "Localized states in GaAsBi and GaAs/GaAsBi heterostructures (**Invited**)", 4th International

Workshop on Bismuth-Containing Semiconductors, Arkansas, USA, July 15, 2013.

T. Fuyuki, M. Yoshimoto, "Long wavelength emission of GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> laser with low-temperature coefficient of lasing wavelength", 40th International Sympo. on Compound Semiconductors (ISCS 2013), 神戸コンベンションセンター(神戸市), May 20, 2013.

M. Itoh, Y. Tominaga, K. Oe, M. Yoshimoto, "Quantitative estimation of the density of Bi-induced localized states in GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> grown by molecular beam epitaxy", 17th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE2012), 奈良県新公会堂(奈良市), September 24, 2012.

T. Fuyuki, S. Kashiyama, K. Oe, M. Yoshimoto, "Study of the Deep Levels of a GaAs/p-GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> Heterostructure Grown by Molecular Beam Epitaxy", 2012 Materials Research Society, Spring Meeting, San Francisco, USA, April 10, 2012.

[図書](計 3 件)

吉本昌広、(分担執筆)「GaAsBi 系半導体レーザ」光技術動向調査報告書、1 章 3.2 節、(財)光産業技術振興協会、p.19-23、2015 年 3 月

M. Yoshimoto, T. Fuyuki (分担執筆) "Localized States in GaAsBi and GaAs/GaAsBi Heterostructures" Chapter 9 in "Bismuth-Containing Compounds" (H Li, Z. M. Wang, editor), Springer, pp.201-224. 2013 年 10 月, ISBN: 9781461481201.

M. Yoshimoto, K. Oe, (分担執筆) "Molecular beam epitaxy of GaAsBi and related quaternary alloys" Chapter 8 in "Molecular Beam Epitaxy: From research to mass production" (M. Henini, editor) Elsevier, pp. 159-170, 2012 年 11 月, ISBN: 9780123878397.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

吉本 昌広 (YOSHIMOTO, Masahiro)  
京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・教授  
研究者番号: 20210776

### (2) 連携研究者

尾江 邦重 (OE, Kunishige)  
京都工芸繊維大学・名誉教授  
研究者番号: 20303927