

氏 名	とみなが よりこ 富永 依里子
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	博 甲 第 633 号
学 位 授 与 の 日 付	平成 24 年 3 月 26 日
学 位 授 与 の 要 件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研 究 科 ・ 専 攻	工芸科学研究科 設計工学専攻
学 位 論 文 題 目	Bi 系 III-V 族半導体半金属混晶のレーザ特性と量子井戸に関する研究
審 査 委 員	(主査)教授 吉本昌広 教授 播磨 弘 教授 尾江邦重

論文内容の要旨

本研究は、発振波長が温度に依存しない光通信用半導体レーザを実現することを目的としてビスマス(Bi)系 III-V 族半導体半金属混晶の分子線エピタキシャル(MBE)成長に取り組み、そのレーザ特性および量子井戸の特性を明らかにしたものである。

急増する伝送情報の需要に対応する方法の一つとして、光通信分野では波長分割多重(WDM)通信方式が用いられている。この WDM 通信方式を広く加入者端末まで普及させるために、発振波長が周囲温度によって変動しない光通信用半導体レーザの開発が望まれている。Bi 系 III-V 族半導体半金属混晶は禁制帯幅の温度依存性が小さいことが既に明らかになっている。この混晶をレーザの活性層に適用することで発振波長が温度に依存しない光通信用半導体レーザの実現が期待できる。

$\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ などの Bi 系 III-V 族半導体半金属混晶は非常に大きなミシビリティギヤップを有しているため、非平衡状態でなおかつ 400 °C 以下の低温でしか成長しない。このため、レーザ動作するほど高品質な Bi 系混晶を成長するのは困難であると従来考えられてきた。

本研究では $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ の成長条件を従来よりも細かく調整することでレーザ品質のエピタキシャル薄膜を得た。光励起により $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x / \text{GaAs}$ ファブリ・ペロー共振器付き薄膜からのレーザ発振を世界で初めて実現した。このレーザの特性温度は 83 K であり、発振ピークエネルギーの温度係数は -0.18 meV/K であった。これは GaAs の禁制帯幅の温度係数の 40% であり、 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ の発振波長の温度係数は小さいことを実証した。

さらに、Bi 系 III-V 族半導体半金属混晶で構成された量子井戸を初めて実現した。現在実用化されている多くの半導体レーザには、その特性向上のために量子井戸が用いられており、 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ を用いた量子井戸構造が製作できることが望ましい。従来、Bi 原子は III-V 族半導体の成長時にサーファクタントとして用いられており、容易に表面偏析し、量子井戸構造は製作困難と考えられていたが、適切な製作条件のもとでは、 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x / \text{GaAs}$ 量子井戸構造が実現できることを実証した。

以上の結果は、発振波長が温度無依存化するレーザ材料として $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ が極めて有望な材料であることを示すものである。

論文審査の結果の要旨

本研究は、発振波長が温度に依存しない光通信用半導体レーザを実現することを目的として $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ の分子線エピタキシャル結晶成長に取り組み、初めて $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ からのレーザ発振を実現し、その発振波長の温度無依存化を実証している。さらに、 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ 含む量子井戸構造を初めて実現している。ともに当該材料を用いたレーザダイオードを実現するうえで重要な成果と言える。論文中の主たる成果として、次の 2 点がある。

(1) $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ のレーザ発振の実現と発振波長の温度無依存化の実証 従来 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ は、Bi を結晶内に取り込むために、350°C と比較的低温で結晶成長する必要がある。このような低温ではレーザ発振するような高品質の結晶は得られないと予想されていた。成長条件を丹念に探索することにより、光励起でレーザ発振する $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ 結晶を得ている。低温での結晶成長にもかかわらずレーザ発振が得られた理由として、Bi のサーファクタント効果により、各構成原子 (Ga, As および Bi) の表面マイグレーションが促進されたためと推論している。レーザ発振特性としては、特性温度が 83 K、発振ピークエネルギーの温度係数が -0.18 meV/K であった。特に、この温度係数は GaAs の禁制帯幅の温度係数の 40% であり、 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ の所期の特性である発振波長の温度無依存化を実現している。また、このレーザの発振しきい値は大きかった。この原因を議論し、AlGaAs クラッド層を用いた改善方法を提言している。

(2) $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{GaAs}$ 量子井戸構造の実現 量子井戸構造はレーザダイオードの高性能化に必須である。 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ レーザダイオードにおいても、最終的には、 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ と GaAs などを積層した量子井戸構造 ($\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{GaAs}$ 量子井戸構造) が必要となる。一方、従来、Bi 原子は III-V 族半導体の成長時にサーファクタントとして用いられており、容易に表面偏析しやすいことが知られている。このため、 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{GaAs}$ 量子井戸構造は実現困難とされてきた。本論文では $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{GaAs}$ 量子井戸構造を実現できる成長条件を見出し、偏析のほとんど無い量子井戸構造ができていることを、X 線回折や二次イオン質量分析、透過電子顕微鏡観察を用いて明らかにしている。最終的には、通信用波長帯(波長 1.3 μm)で発光する GaBi モル比 10.9% の $\text{GaAs}_{0.89}\text{Bi}_{0.109}/\text{GaAs}$ 量子井戸構造を得ている。

本論文は、以下に示すように、審査を経て掲載され申請者が筆頭著者である 4 編の論文をもとに構成されている。

1. Yoriko Tominaga, Kunishige Oe and Masahiro Yoshimoto: “Temperature-insensitive photoluminescence emission wavelength in $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{GaAs}$ multiquantum wells”, phys. stat. sol. (c) **8** (2011) 260-262.
2. Yoriko Tominaga, Kunishige Oe and Masahiro Yoshimoto: “Low Temperature Dependence of Oscillation Wavelength in $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ Laser by Photo-Pumping”, Appl. Phys. Express **3** (2010) 062201 (3 pages).
3. Yoriko Tominaga, Yusuke Kinoshita, Kunishige Oe and Masahiro Yoshimoto, “Structural investigation of $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{GaAs}$ multiquantum wells” Appl. Phys. Lett. **93** (2008) 131915 (3 pages)
4. Yoriko Tominaga, Yusuke Kinoshita, Gan Feng, Kunishige Oe and Masahiro Yoshimoto: “Growth of $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{GaAs}$ multi-quantum wells by molecular beam epitaxy” phys. stat. sol. (c) **5** (2008)

以上、本論文では、 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ レーザダイオードの実現の基礎となる知見を初めて明らかにしており、この成果は学術的価値や産業応用面から重要性が高いことを各審査委員が認めた。