

氏名	ふゆき たくま 冬木 琢真
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	博甲第694号
学位授与の日付	平成26年3月25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	高Bi組成 GaAsBi の成長とレーザダイオードへの応用
審査委員	(主査)教授 吉本昌広 教授 播磨 弘 教授 野田 実

論文内容の要旨

本研究は、高品質な Bi 系 III-V 族半導体半金属混晶 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ を分子線エピタキシャル (Molecular Beam Epitaxy: MBE) 法で成長し、 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ を発光層とした利得導波路型 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ レーザダイオード (LD) を製作して、世界で初めて、高い特性温度および低い発振波長の温度依存性を併せ持つ $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ LD を実現した。

光ファイバー通信では、伝送容量を大きくするために波長分割多重(WDM)通信方式が用いられている。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ので、この混晶を用いて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。

Bi 系 III-V 族半導体半金属混晶は非常に大きな非混和性を有しており、 400°C 以下の低温でしか成長できない。本研究では、非平衡状態での結晶成長法である MBE 法を用い、GaAs 基板に高品質な高 Bi 組成 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ 薄膜をコヒーレントに成長した。具体的には、 $\text{GaAs}_{0.905}\text{Bi}_{0.095}$ 薄膜から室温において通信波長帯である波長 $1.30\ \mu\text{m}$ でのホトルミネセンス(PL)が得られた。発光強度はやや低下したものの、 $\text{GaAs}_{0.882}\text{Bi}_{0.118}$ 薄膜から波長 $1.45\ \mu\text{m}$ での PL が得られた。また、 400°C 以下という低温成長にもかかわらず、 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ 中の欠陥密度は 560°C で成長した GaAs と同程度であることを Deep Level Transient Spectroscopy(DLTS)法から明らかにした。

さらに、LD を製作する前段階として、 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{GaAs}$ ヘテロ接合より大きな伝導帯オフセットを有し、電子の閉じ込めに有利な $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ ヘテロ接合の製作を実現した。光励起により、 $\text{GaAs}_{0.941}\text{Bi}_{0.059}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ から波長 $1204\ \text{nm}$ のレーザ発振を実現した。特性温度(T_0)が $100\ \text{K}$ 、発振波長の温度係数($d\lambda/dT$)が $0.2\ \text{nm/K}$ であり、現在実用の InGaAsP LD の報告値 ($T_0=66\ \text{K}$ および $d\lambda/dT=0.45\ \text{nm/K}$) よりも優れていた。

最終的に、ストライプ電極利得導波路型 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ LD を製作し、パルス電流注入による室温レーザ発振を実現した。 $\text{GaAs}_{0.96}\text{Bi}_{0.04}$ LD の発振波長は $1045.4\ \text{nm}$ であった。 $\text{GaAs}_{0.97}\text{Bi}_{0.03}$ LD の温度特性は $T_0=125\ \text{K}$ 、 $d\lambda/dT=0.16\ \text{nm/K}$ であり、 $d\lambda/dT$ は、同様のプロセスで製作した GaAs LD に比べて、約 40% に低減していた。 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ LD は高い特性温度および低い発振波長の温度依存性を併せ持つことを世界で初めて実証した。

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、結晶欠陥を中心とした物性を解明し、最終的に電流注入による $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ 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。所期のレーザダイオードを実現するうえで大きな進展と言える。論文中の主たる成果として、次の4点がある。

- 1) 発光波長の長波長化を目指して、高品質で高 Bi 組成の $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ 結晶成長法を確立し、Bi 組成 11.8% の薄膜から波長 $1.45 \mu\text{m}$ の発光を得た。
- 2) $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ 結晶中および $\text{GaAs}/\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ 界面の結晶欠陥密度を初めて明らかにし、 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ 結晶中の欠陥密度はデバイスに応用しうる程度に小さく、界面の欠陥密度については低減の方策を明らかにした。
- 3) 電子の閉じ込めを促進するために、 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ ヘテロ接合を実現し、光励起により波長 $1.205 \mu\text{m}$ でのレーザ発振を実現した。これはこれまでで最も長波長での発振で、発振波長の温度係数も低減した。
- 4) ストライプ電極利得導波路型 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ レーザダイオードを試作し、最長波長 $1.045 \mu\text{m}$ でレーザ発振した。本レーザは高い特性温度および低い発振波長の温度依存性を併せ持つことを世界で初めて実証した。

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 5 編の論文をもとに構成されている。

1. **Takuma Fuyuki**, Yoriko Tominaga, Kunishige Oe, and Masahiro Yoshimoto, “*Growth of $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ multi-quantum-well structures*”, Japanese Journal of Applied Physics, **49** (2010) 070211 (3 pages).
2. **Takuma Fuyuki**, Shota Kashiya, Yoriko Tominaga, Kunishige Oe, and Masahiro Yoshimoto, “*Deep-hole traps in p-type $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ grown by molecular beam epitaxy*”, Japanese Journal of Applied Physics, **50** (2011) 080203 (3 pages).
3. **Takuma Fuyuki**, Shota Kashiya, Kunishige Oe, and Masahiro Yoshimoto, “*Interface states in p-type $\text{GaAs}/\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ heterostructure*”, Japanese Journal of Applied Physics, **51** (2012) 11PC02 (5 pages).
4. 冬木琢真、伊藤瑞記、角浩輔、吉本昌広、「 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ および $\text{GaAs}/\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ ヘテロ界面における局在準位」、材料, **62** (2013) 672-678 .
5. **Takuma Fuyuki**, Ryo Yoshioka, Kenji Yoshida, and Masahiro Yoshimoto. “Long-wavelength emission in photo-pumped $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ laser with low temperature dependence of lasing wavelength”, Applied Physics Letters **103** (2013) 202105 (4 pages).

また、内容の一部は以下の 1 編の著書にまとめられている。

1. Masahiro Yoshimoto, **Takuma Fuyuki**, “*Localized states in GaAsBi and GaAs/GaAsBi heterostructures*”, Chapter 9 (24 pages) in “*Bismuth-containing compounds*” (Z. M. Wang, editor) 分担執筆 (Springer, 2013) ISBN: 9781461481201.

以上、本論文では、半金属半導体混晶の結晶成長から取り組み、結晶欠陥を中心とした物性を解明し、独自のデバイス製作工程を経て、高い特性温度および低い発振波長の温度依存性を併せ持つ $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ レーザダイオードを実現している。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。