異種結晶接合による光アイソレータと LD 集積化

Integration of LD and optical isolator by using heterogeneous wafer bonding

○水本哲弥、櫻井一正、庄司雄哉 (東京工業大学・大学院理工学研究科 電気電子工学専攻)

○Tetsuya Mizumoto, Kazumasa Sakurai, Yuya Shoji (Tokyo Institute of Technology, Dept. EEE)

1.はじめに

半導体レーザへ反射戻り光が再入射すると、強度雑音や位相雑音の原因となる。また、光増幅器などの光能動素子に意図せぬ方向から光が入射すると、その素子が意図した動作とは異なる動作を引き起こし、システム構成上問題となる。光アイソレータは、光を一方方向にのみ透過させる機能を持ち、これらの不都合の発生を防止する本質的な解決手段を提供するものである。

現在、商用に供されている光アイソレータはいわゆるバルク型のデバイスであり、ファラデー回転子をはじめとする光学要素のアセンブリを必要とするために低価格化が困難であることと、光能動素子との一体集積化が不可能であるという欠点がある。これらの問題点を解決するために、導波路型光アイソレータが研究されている。

初期の研究段階では、バルク型アイソレータの動作原理をそのまま導波路で実現する、いわゆる TE-TM モード変換型アイソレータが検討された。このアイソレータは、導波 TE モードと導波 TM モードの結合を利用するため、TE-TM モード位相整合が必須であり、導波路パラメータの変動に対して特性が極めて敏感に変化するという欠点があった。この問題を解決するために、一偏波で動作する干渉型光アイソレータが有力である。

一方、光アイソレータを形成するためには、磁気光学効果が必要であり、受動光アイソレータでは透明な磁気光学材料である $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (YIG) に代表される磁気光学ガーネットを用いることが必須である。この材料上の制約が、能動素子との一体集積化という点において大きな足枷になっていた。すなわち、わずかな試みがなされたものの、光能動素子の構成材料である III-V 族化合物半導体と磁気光学ガーネットの物性が大きく異なるため、互いに良好な結晶成長が実現されていない。我々の研究グループでは、この問題を解決するために、ウエーハ直接接合という手法を用いて、ガーネットと化合物半導体の接合を検討してきた。本稿では、これらの検討結果について紹介する。

2. ガーネットと化合物半導体の直接接合

磁気光学ガーネット ($\text{R}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) の格子定数は約 $1.238\text{--}1.245\text{nm}$ であるのに対して InP 基板は 0.587nm と大きく異なる。また、熱膨張係数も、ガーネットの 9.2×10^{-6} に対して InP は 4.6×10^{-6} である。このように、大きく物性の異なる結晶同士を集積化する方法として、我々は次の二つのアプローチにより直接接合を検討してきている。

2-1. 親水化接合

接合するウエーハの表面を適当な処理により親水性にし、OH 基を吸着させる。OH 基が吸着した表面同士を室温で貼り合わせ、 H_2 雰囲気中で熱処理を行い、脱水縮合によって

図 1 親水化接合のプロセス

表面のダングリングボンドを介して接合する方法である(図 1)。高温 H_2 雰囲気による強い還元作用によってガーネットが還元されると Fe^{3+} が Fe^{2+} に変化して、近赤外領域で大きな光吸収が発生する。これを避けるため、また、熱膨張係数差による発生応力をできるだけ小さくするために、低温熱処理が重要である。検討の結果、 220°C の H_2 雰囲気中で良好な接合形成に成功した[1]。また、接合後にエッチングや熱処理など、想定されるデバイス製作プロセスに対する接合の耐性も確認した。

2-2. 表面活性化接合

親水化処理による接合は、デバイスに必要な長さ(面積)にわたって、均一かつ強固な接合を再現性よく実現することがなかなか難しい。そこで、真空中でプラズマ照射などによって結晶表面を活性化し、そのまま真空中でウエーハを接合する表面活性化接合も検討している(図 2)。

表面活性化の方法は、Ar イオンビーム照射、Ar プラズマ照射など、いくつかの方法が考えられる[2]。磁気光学ガーネットと GaInAsP/InP の組み合わせに対しては、 O_2 プラズマにウエーハを短時間照射し、直後に真空チャンバ中で接合を行う方法で強固な接合に成功した。図 3 に、接合したガーネット ($\text{CeY})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (Ce:YIG)/ GaInAsP ($\lambda_g=1250\text{nm}$) の様子を示す。引張試験によって接合したサンプルの接合強度の測定を試みたところ、約 0.5MPa の引張力で InP 基板に破壊が生じ、 Ce:YIG/GaInAsP の接合面は剥離することなく接合を保った。このことから、接合強度は光デバイスへの応用として十分であると判断する。

さらに、 GaInAsP でリブ導波路を形成し、上クラッド層として Ce:YIG を接合している[3]。接合面積を稼ぐために、

図2 表面活性化接合のプロセス

図3 Ce:YIG/GaInAsP 導波路接合サンプル

幅 $2\text{--}3\mu\text{m}$ の導波路ストライプから $30\mu\text{m}$ 離れた場所に、広いテラス面を設けている。

3. 干渉型光アイソレータ

干渉型光アイソレータの構造を図4に示す。MZI 干渉計を形成する2本のアームを伝搬するTMモードが伝搬方向によって異なる伝搬定数をもつ(非相反移相効果)ことを利用している。2本の導波路アームで、磁気光学材料の磁化方向が反転しているため、非相反移相効果によって互いに逆符号の位相変化が生ずる。この結果、例えば一方の導波路を基準として位相差が $-\pi/2$ 発生したとすると、この位相差は光路差によって発生する相反位相差 $+\pi/2$ によって打ち消され、この伝搬方向(順方向)では同位相で干渉する。結果として、出力側結合器の出力端から出力される。一方、逆方向伝搬時には非相反移相効果による位相差の符号が反転するため、相反な位相差と相加して2本の導波路間の位相差は π となる。入力側の結合器に戻った逆方向伝搬光は干渉して打消し、入力端に戻ることがない。図4の構造ではTMモード一偏波で動作するため、分散特性のことなる直交偏波どうしの位相整合を図る必要がなく、製作誤差による導波路パラメータの変化に鈍感な特性を示す。

半導体レーザとの一体集積化をねらい、GaInAsP 導波路の上に親水化接合によってCe:YIGを接合し、波長 $1.55\mu\text{m}$ でアイソレータ動作の検証を行った。微小な永久磁石を用いて、 $300\mu\text{m}$ の間隔をもつ2本の導波路に互いに反並行な磁

図4 干渉型光アイソレータ

界を印加した。印加する磁界の方向を反転させることによって伝搬方向を反転したと等価な状況とし、入出力の透過損失変化を測定した。結果として、磁界の方向を反転することによって5dBの透過損失が発生し、アイソレータとしての動作することが示されている[4]。

アイソレータ特性が不十分な理由は、十分な非相反効果を得られなかったことに起因する。必要な非相反移相器長が 6.14mm であるのに対して、実験に用いた磁石の長さが 3mm であり、Ce:YIGの磁化が十分に配向していなかったことと、必要なデバイス長にわたって、完全な接合がなされていなかったことが原因と推察される。

図5に示すように、導波層の屈折率を増大させることによって非相反移相器の長さを短縮することができる。例えば、InP基板上に格子整合した $\lambda_g=1.42\mu\text{m}$ のGaInAsP(屈折率3.45)を用いると、非相反移相器長は 3.7mm に短縮される。

図5 非相反移相器長と導波層GaInAsP屈折率の関係

4. まとめ

光能動素子と光アイソレータの一体集積化をめざして、異種結晶接合法の検討結果を述べた。親水化接合を用いてGaInAsP導波層に磁気光学ガーネットCe:YIGを接合し、干渉型光アイソレータを試作した結果、波長 $1.55\mu\text{m}$ でアイソレーション5dBが得られた。今後、表面活性化接合によってデバイスを試作し、アイソレータ特性の改善を図るとともに、半導体レーザと一体集積化を検討する。

参考文献

- [1] H. Yokoi, et al, JJAP, vol.38, 195-197 (1999)
- [2] T. Suga, et al, 2004 ECTC, 484-490 (2004)
- [3] 櫻井、他、2005年春応物、31a-ZQ-6 (2005)
- [4] H. Yokoi, et al, Appl. Opt., vol.39, 6158-6164 (2000)
- [5] T. Mizumoto, et al., APOC 2006, 6352-90 (2006)