

論文の内容の要旨

論文題目 Research on Monolithic Integration of WDM Subsystem on InP

(WDM サブシステムの半導体モノリシック集積化に関する研究)

氏名 アルアミンアブドゥラー

近年の情報通信ネットワークの急速な発展に伴い、光通信網が基幹線を含む重要なリンク上に銅線を置換し社会の不可欠な基盤になっている。今後の流れとして光によるネットワークが静的から動的に変わっていき、超高速大容量データを光電変換しないでパスを切り替えるようになることがわかっている。最終的には光によるパケット処理をした、光パケット通信が柔軟で資源効率のいい通信方式になると期待されている。しかしこうした技術が普及するにはやはりデバイス技術の発展が必要で、低コストで高機能な光素子の需要は高い。光集積回路 (Photonic Integrated Circuit, PIC) はこのような期待に応える重要な分野で、ここ数年精力的に研究がなされています。化合物半導体における能動受動集積化に関して、大きな問題点は同一基板上に異なるバンドギャップの組成を成長することであって、そのための簡単なプロセスとして選択領域成長 (Selective Area Growth) 法が提案されています。本研究では選択成長を用いて能動素子のアレイと受動素子のアレイ導波路回折格子型光合分波器 (arrayed waveguide grating, AWG) の集積化により、波長多重 (Wavelength Division Multiplex) ネットワークに必要な機能素子を作ろうとしている。

動的にパスが切り替わるネットワークに必要な重要な機能としてダイナミック利得等化がある。現在光ネットワークの損失補償のためにエルビウムドープ光増幅器 (EDFA) 使われているが、光増幅の過程から原理的に利得の波長依存性が多チャンネル増幅の時のチャンネル間パワーばらつきを生じさせる。また、EDFA は通常利得飽和領域にある関係以上あるチャンネルの入力レベルが変わると残りのチャンネルが受ける利得が変動し、この効果が多段になって信号の劣化を招く。ある程度は EDFA に利得制御器があればポンプ光の増減によっても調整できるが、断線やチャンネルロスがパス切り替えによって著しく変わる場合は利得のスロープも変わるなど、チャンネルごとの利得を制御する機能の必要性が認識されいくつかの方法が提案されている。この中では平面光集積回路 (PLC) と呼ばれるシリカ系の銅波路のものは挿入損失が小さいなどのメリットがあるが、熱光学効果を使用するため動作速度はミリ秒と遅い。将来のパケット通信に使うため、ナノ秒程度の応答速度の半導体利得等化器が有望であるので、本研究では InP 基板上に AWG および半導体光増幅器 (semiconductor optical amplifier, SOA) や位相変調器の集積化によるダイナミック利得等化器を目指し設計、結晶成長や試作の実験を行った。

理想的な利得等化器は広い減衰幅、広帯域、低偏頗依存性、低損失、高速な応答および安定性の特徴をもつ。提案されたひとつの方式では AWG によって波長ごとに分離し、おのおのを位相変調しもうひとつの AWG で多重する。また全体をマッハツェンダー干渉計

にすることで位相変調を強度変調に変換する。一回の成長ステップでかつコンパクトに集積化するためにはマスクをアレイ状に並べた選択成長法を用いることにした。実証のためのもっとも簡単な設計としてチャンネル間隔 400GHz の 8 チャンネルの AWG 2 個を MMI3dB カプラーによってマッシュウェンダー干渉計にした。その結果のチップが $3 \times 9\text{mm}^2$ の中におさまった。

アレイ状マスクを用いた選択長のための条件を実験とシミュレーションにより最適化した。選択成長のメカニズムには表面拡散および気相拡散があり、前者を用いたレーザアレイの報告があるが、この方法は異常成長になりやすく、曲がり導波路などに対応ができない。マスクの間隔を広げ表面拡散の影響を少なくした方法は比較的均一な領域にエッチングにより導波路を作成できるが、このとき隣のマスクペアの影響を避けるに間隔を $300\mu\text{m}$ 以上空けなければならない。しかしマスクペアを間隔小さくすれば全体をよりコンパクトにできる。その条件を探るためマスク幅および間隔を変えたパターンを使用し、5 層の量子井戸を選択成長で作製した。評価方法として表面プロファイラーおよび空間分解フォトルミネセンス (μPL) 法を使用した。その結果としてアレイマスクを用いた場合は 135nm と、通常よりも大きな PL ピークシフトが得られた。より大きなシフトはパッシブ導波路にとっての吸収損失を小さくする上に役立つ。

普通伝搬方向に対し緩やかに変化する 2 次元あるいは 3 次元の導波デバイスはビーム伝搬法で計算できるが、われわれが検討する利得等化器は伝搬方向から大きくずれる AWG などを含んでいるので、簡単のために散乱行列法と有効屈折率近似の元で計算した。利得等化器の特性としてマッシュウェンダー干渉計の両アームにおけるパワーの非平衡からそのダイナミックレンジが制限されることがわかった。今回の試作したパッシブ導波路は 30dB/cm にもなる大きな損失を示したので試作のときに導波損失低減に注力した。

利得等化器の実現に向けてその基礎的に部分、例えば直線および曲線導波路、多モード干渉型 (MMI) カプラーおよび AWG をパッシブ構造での試作および評価を行った。その結果としてドライエッチング技術による高い屈折率差を用いた構造で MMI3dB カプラーや 8 チャンネル 400GHz の AWG の動作が示された。AWG は 10dB のクロストークと大きな偏波依存性を示した。クロストークの悪化は主に高次モードの励振が問題で、偏波依存性も最適な導波路幅でなくすることができる。損失低減の方法としてドライエッチング後のウェット処理により損失が減ったことが確認できた。これはドライエッチングによる表面のダメージが取れるためである。また、今後の改善点として 2 回以上のドライエッチングプロセスが必要となることがわかった。これにより曲がり導波路は深いエッチング、直線部分は浅いエッチングにすることでコンパクトおよび低ロスを両立できることがわかった。

本研究によって得られたノウハウは今後の試作プロセスの多いに役立つといえる。また利得等化器だけではなく、同じ技術を用いてさらに多くの WDM の機能を InP のワンチップ上で実現することも可能であることに本研究の意義があると信じている。