

外92-66

早稲田大学大学院理工学研究科

1960

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

半導体受光素子の高性能化
に関する研究

申 請 者

加 藤 和 利

Kazutoshi Kato

平成 5 年 3 月

近年の光通信による情報伝送の大容量化、長距離化の進展にともない、光通信システムを構成する光素子の高性能化の要請が急速に高まっている。その中で受信側の中心的な構成要素となる受光素子に対しては、広帯域でかつ高い光電変換効率を持つことが要求されている。光通信用受光素子にはアバランシェフォトダイオードまたはpinフォトダイオードが使用されているが、40 Gb/s あるいはそれ以上の伝送速度が予想される将来の広帯域光通信においては、広帯域設計が可能なpinフォトダイオードが必須の構成要素になる。pinフォトダイオードの基本的な構造は、p型半導体層とn型半導体層との間にノンドープ光吸収層を設けたものであり、広帯域化のためには主に、光吸収層内で光電変換されて生じた光励起キャリアの走行時間が短くなるように光吸収層を薄くする必要がある。一方、光電変換効率を高くするためには、入射光の光吸収層内通過距離を長くしなければならない。従来のpinフォトダイオードは半導体層表面あるいは裏面から光を入射するものであり、入射光の進行方向と光励起キャリアの走行方向が同一方位となる。したがって帯域は光吸収層厚に反比例し、効率は光吸収層厚に比例するというトレードオフのために、20 GHz以上の帯域設計では効率が著しく低下するという欠点を持っていた。面入射型pinフォトダイオードの持つこのようなトレードオフを克服するために、入射光の進行方向と光励起キャリアの走行方向が互いに異なることから帯域と効率の独立設計が可能となる導波路型pinフォトダイオードが提案された。しかしフォトダイオード内の導波光の広がりファイバからの入射光のそれと比べて非常に小さいため、入射光の大部分が、フォトダイオード外に漏れ、導波路型pinフォトダイオードを用いても結局は高い効率を得ることはできなかった。以上のような理由で、従来から、数十GHz以上の帯域と高い効率とを同時に満たす受光素子の開発が待ち望まれていた。

本研究は、このようなpinフォトダイオードの研究開発の背景に立って、極めて高い結合効率を有する導波路型pinフォトダイオードの実現を目的として開始したものである。

本論文の構成は、全体で7章からなり、各章の概要は以下の通りである。

第1章では序論として、光通信における広帯域受光素子の位置づけ、pinフォトダイオードに関する従来の研究を概観した。特に従来のpinフォトダイオードの性能限界を打ち破るために高効率な導波路型pinフォトダイオードの実現が不可欠であることを説明した。そしてこれを実現する手段としてのマルチモード導波路型pinフォトダイオードおよびその導波路集積化素子の研究の位置づけを明らかにするとともに、本論文の構成について述べた。

第2章では、まず半導体受光素子の受光原理を概観した。1.55 μm 帯の光を用いた光通信では光吸収層の材料としてInGaAsが適していること、またpinフォトダイオード構造では光吸収層の不純物濃度を低くする必要があることなどの基本的な動作条件について述べた。

次にフォトダイオードの帯域について、キャリア走行時間の観点とCR時定数の観点か

ら考察した。特にCR時定数の定式化においては、容量と抵抗のみを考慮した従来の方法に新たにインダクタンスの効果を加え、解析的に最適インダクタンスの値を導くとともにインダクタンスの最適化によって帯域が4割向上されることを明らかにした。

素子性能の定式化をもとにして、広帯域化と高効率化の観点から、従来の面入射型pinフォトダイオード、導波路型pinフォトダイオード、MSMフォトダイオードの三者について性能限界と高性能化の可能性を比較検討した。その結果、30 GHz以上の帯域において導波路型pinフォトダイオードが有効であるという結論に至った。

第3章では、半導体光導波路の解析法を整理した。具体的には半導体層の形成法の特徴を反映して半導体光導波路が基本的にはスラブ導波路として扱えることを示した。スラブ導波路モデルを用いてマックスウエル方程式から結晶基板垂直方向の波動方程式の導出までの過程を概説した。次に、半導体光導波路についての波動方程式の有効な解法である階段分割法について説明し、階段分割法を用いて波動方程式を未定係数の連立方程式に変換する過程およびこの連立方程式の求根法を示した。最後に等価屈折率法による結晶基板水平方向の波動方程式の解析法を概説した。

第4章では、まず初めに導波路型pinフォトダイオードの問題点がファイバとの結合効率と帯域とのトレードオフにあることを指摘し、これを解決するための手段として、中間屈折率層を挿入した導波路型pinフォトダイオード構造を提案した。次に導波路型pinフォトダイオードの外部量子効率の定式化を行ない、その中でフォトダイオードとしては初めて光結合理論に基づいた結合効率の概念を導入した。第3章で説明した階段分割法を用いて、本提案の導波路型pinフォトダイオードの波動関数を求め、さらにファイバとの結合効率を計算した。その結果、中間屈折率層の存在によってフォトダイオード内には結晶基板垂直方向に二次以上の高次の導波モードの出現が確認され、これが原因となって結晶基板垂直方向の結合効率が飛躍的に向上することが明かとなった。結晶基板垂直方向に二次以上の高次の導波モードを有する導波路型pinフォトダイオードを我々はマルチモード導波路型pinフォトダイオードと呼ぶ。マルチモード導波路型pinフォトダイオードについて次の特徴が明かとなった。

(1) マルチモード導波路型pinフォトダイオードが実現される条件は、コア層と中間屈折率層との合計の厚さが1.1 μm 以上となることである。

(2) コア層と中間屈折率層との合計の厚さよりも広い分布を持つ光を入射した場合、マルチモード導波路型pinフォトダイオード内に励振される導波光の分布は、入射光のそれをほぼ再現する。したがって、結合効率は両者の重なり積分に比例するため、結晶基板垂直方向には90%以上の極めて高い結合効率を実現することができる。

(3) マルチモード条件を満たす範囲内であれば、コア層の厚さを変化させても結合効率は低下しない。すなわち結晶基板垂直方向の結合効率と帯域との独立設計が可能となる。

ここで得られた結果をもとにしてマルチモード導波路型pinフォトダイオードの性能限界の計算を行なった。その結果、性能限界は結晶基板平行方向の結合効率と帯域とのトレードオフで決定されることが明かとなった。さらに1 μm のスポットサイズを持つ入射光の場合には、外部量子効率の低下を起こさずに100 GHzの帯域が実現できることを示した。

第5章では、まず第4章で明かとなった特徴を生かして設計した、マルチモード導波路型pinフォトダイオードの一連の製作工程を説明した。ここでは特に高周波特性にとって重要となる光吸収層の不純物濃度の測定法と測定結果について述べ、フォトダイオードの動作条件が満たされていることを確認した。

次に、寄生容量の抑制を目的として、実装形態と出力端子接続形態の検討を行なった。そして寄生抵抗の抑制だけでなく意図的なインダクタンスの付加も可能となる、石英ガラスのサブマウントを用いた独自の形態を考案した。また高周波光信号を発生させる光ヘテロダイン法の原理を説明し、電気信号の検出に関しては高周波測定系の高精度化の方法を説明した。

以上の製作、測定技術の上に立って実現されたマルチモード導波路型pinフォトダイオードは、導波路型フォトダイオードとしては最高の50 GHzの帯域を実現し、加えて従来の常識を打ち破る68%の外部量子効率を達成した。これらの特性によって初めて導波路型pinフォトダイオードが面入射型フォトダイオードの性能限界を克服できることを示すとともに、第4章で議論した定式化モデルの妥当性が確認された。

第6章では、第4章で明かとなったマルチモード導波路型pinフォトダイオードの性能限界の要因、すなわち結晶基板平行方向の結合効率と帯域とのトレードオフを克服する方法としての、テーパー導波路集積化フォトダイオードの提案を行なった。まずテーパー導波路による結合効率の改善を確認することを目的として、集積化レーザにおいて用いられている従来型積化構造を使用して集積化素子の光学的特性の初期的な検討を行なった。その結果、テーパー導波路によって結晶基板平行方向の結合効率がフォトダイオード幅に依存しないこと、すなわち帯域とのトレードオフを克服できる可能性があることが確認された。さらに集積化レーザとは異なり、フォトダイオードの集積化の問題点は、導波路との電氣的絶縁の不完全さによる帯域の劣化であることを明らかにした。

次に、電氣的絶縁を達成することを目的として、導波路とフォトダイオードとの間に絶縁膜を設けた、半導体光素子としては全く新しい集積化構造を提案した。あわせて絶縁膜を含めた効率の計算法を示し、また製作工程を説明した。新しい集積化構造によるフォトダイオードにおいては導波路との電氣的絶縁が確認され、これを反映して集積化フォトダイオードとしては最高値である22 GHzの帯域を実現するに至った。

第7章では、本論文を総括し、本研究で得られた結果をまとめて示した。