

報告番号



甲第1303号

# 主論文の要旨

題名 光通信用 InGaAsP/InP  
光機能素子に関する研究

氏名 酒井 士郎

## 主論文の要旨

報告番号

※甲第1303号

氏名

酒井 士郎

1970年の低損失光ファイバと室温で連続発振する半導体レーザの発明以来、光ファイバ通信実現に向け各国で活発に研究が行なわれ、GaAlAs/GaAs半導体レーザを光源とし、Si APD (シリコンなだれ光ダイオード) を受光器とする波長0.8  $\mu\text{m}$  帯での光通信はもはや実用間近かの状態になった。しかし、その後光ファイバの低損失化とともに光ファイバの低損失波長領域はしだいに長波長側に移動し、1976年には波長1.2  $\mu\text{m}$  付近で0.5 dB/km、1979年には波長1.55  $\mu\text{m}$  で0.2 dB/km という極低損失光ファイバが報告されるにいたった。さらに、従来のGaAlAs/GaAsレーザは波長0.9  $\mu\text{m}$  より長波長側では発振不可能であり、かつSi APDは波長1.1  $\mu\text{m}$  以上では感度が低い。そこで、最近の光ファイバの低損失領域である波長1.0~1.7  $\mu\text{m}$  帯での光源、光検出器の研究開発が強く望まれている。

本研究は波長0.95~1.7  $\mu\text{m}$  にバンドギャップエネルギーを有する新しいIII-V族四元化合物半導体InGaAsPを用いた光源および光検出器の開発を行なったものである。

本論文は7章よりなる。以下簡単に各章を要約する。

# 主論文の要旨

報告番号

※甲第

号

氏名

酒井 士郎

## 第1章 序論

本章では波長 $1.0\sim 1.7\mu\text{m}$ 帯における光機能素子材料を展望し、 $\text{InGaAsP/InP}$ 系の占める位置を明らかにした。また本論文の構成を示し、本論文の目的およびその意義について述べた。古くから知られている物質で波長 $1.0\sim 1.7\mu\text{m}$ 帯にバンドギャップを有するものに $\text{Ge}$ (ケルマニウム)があるが、 $\text{Ge}$ は間接遷移型半導体であるので光源としてのレーザ発振が困難であり、また現在得られている $\text{Ge APD}$ は暗電流が大きく光通信用受光器として十分なものはいい難い。 $\text{Ge}$ 以外にこの波長帯にバンドギャップを有するものは混晶以外になく、広範な材料探求がなされた結果、 $\text{InGaAsP/InP}$ 系、 $\text{GaAsSb/GaAlAsSb}$ 系、 $\text{InGaAs/InGaP}$ 系などの光源、光検出器が報告された。この中でも $\text{InGaAsP/InP}$ 系は、(1) $\text{InP}$ 基板に格子整合をとりながらのエピタキシャル成長が可能であるので素子を作製するのに十分な良質の結晶が得られること、(2)その固相比を変化させることにより格子整合条件を満足しながら光ファイバの低損失領域をすべてカバーする波長 $0.95\sim 1.7\mu\text{m}$ の広い範囲でバンドギャップを可変にできること、などのため最も研究が進んでおり、データも豊富である。本研究では良質の結晶を用い、光通信に適した光源、光検出器を得るという目的でこの混

# 主論文の要旨

報告番号

※甲第

号

氏名

酒井 士郎

晶をとり上げ、素子の最適化、試作、および新しい素子の提案を行なった。

## 第2章 ヘテロ構造光検出器の理論

光通信用光検出器には高感度、高速応答という特性が要求されるが、InGaAsP/InP系を用いて作製されるいろいろな構造の光ダイオードの感度および高速応答特性に関する理論的検討は従来行なわれていなかった。本章では、光照射により励起された光ダイオード内少数キャリアの輸送方程式を解くことにより、いろいろな構造(ホモ接合構造、シングルヘテロ構造、ダブルヘテロ構造)の光ダイオードの量子効率と応答時間を定量的に求め、その優劣を比較した。その結果、四元層厚と接合深さを最適に選んだダブルヘテロ構造光ダイオードが最も高い量子効率をもつこと、およびその最適は接合深さおよび四元層厚はほとんど四元層の光吸収係数( $k_2$ )とキャリア拡散長( $L$ )だけの関数であり、 $k_2 = 10^4 \text{ cm}^{-1}$ 、 $L = 2 \mu\text{m}$ のときはそれぞれ  $1 \mu\text{m}$ 、 $3 \sim 4 \mu\text{m}$  であり、そのときの最大内部量子効率は84%であることを明らかにした。また、キャリア輸送方程式の過渡解よりダブルヘテロ構造光ダイオードの応答時間は  $p$ - $n$  接合面積が十分小さい場合には少数キャリアの拡散時間により、接合面積が大きい場合には接合容量と負荷抵抗  $R$  の積である  $RC$  時定数により制限を受けること

# 主論文の要旨

報告番号 ※甲第 号 氏名 酒井 士郎

を明らかにした。

## 第3章 $\text{InGaAsP}/\text{InP}$ ダブルヘテロ構造光ダイオード

本研究とほぼ同時にいくつかの報告があるが、最近の光ファイバが波長  $1.55 \mu\text{m}$  付近で極低損失を示すにもかかわらず、従来波長  $1.4 \sim 1.6 \mu\text{m}$  まで感度をもつ  $\text{InGaAsP}/\text{InP}$  系光検出器は報告されていなかった。本章では従来明らかでなかった波長  $1.4 \sim 1.6 \mu\text{m}$  帯にバントギャップをもつ  $\text{InGaAsP}$  層の  $\text{InP}$  基板への液相エピタキシャル成長条件および成長したウエハから作製したダブルヘテロ構造光ダイオードの特性について述べた。本章で明らかにされた結晶成長条件は本章に続く残りすべての章の基石となるものであり、本論文の根幹をなす部分でもある。本研究で得られた光ダイオードはほとんど最大限界に近い外部量子効率  $65\%$  を示し、その感度波長領域も  $\text{InGaAsP}$  層の固相比により可変にできるので光通信用として非常に有望である。

## 第4章 $\text{InGaAsP}$ 層中のキャリア拡散長と表面再結合速度の測定

$\text{InGaAsP}$  四元結晶はその歴史が浅いこともあって、その物性、物質定数はあまり明らかではない。本章ではとくに光検出器の設計に必要な物質定数、キャリア拡散長 ( $L$ )、キャリア拡散係数 ( $D$ )、および表面再結合速度 ( $S$ ) の測定手法と結果について述べた。これらの定数は、互いの独立な実験(再度研磨した

# 主論文の要旨

報告番号 ※甲第 号 氏名 酒井 士郎

ダブルテロウエハのレーザ光誘起電流測定と光ダイオードの応答時間測定)の結果を、第2章で導出された式および結果を用いて解析することにより得られた。得られた結果は  $L=1.8 \sim 1.9 \mu\text{m}$ 、 $D=2 \sim 3 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、 $S=3 \sim 5 \times 10^4 \text{ cm}/\text{sec}$  であり、四元素のバンドギャップエネルギー  $0.86 \sim 0.95 \text{ eV}$  の範囲では、これらの値に四元素の固相比依存性は見られなかった。この表面再結合速度  $S$  の値は  $p\text{-InP}$  上のそれより約1桁大きく、 $\text{GaAs}$  上のそれより約2桁小さい。

## 第5章 InP 陽極酸化膜のレーザおひ光検出器への応用

InP 陽極酸化膜は高い抵抗率をもつのでストライプレーザの電流領域制限用絶縁膜として、また透明で最適な屈折率を有する点を利用して光検出器の反射防止膜として応用できる。得られた  $\text{NOS}$  (Native Oxide Stripe) レーザは最低しきい値電流  $110 \text{ mA}$  ( $1.2 \text{ kA}/\text{cm}^2$ ) をもち低温 ( $188 \text{ K}$ ) で連続発振した。また受光面に酸化膜を形成した光ダイオードは、表面での光反射率約  $28\%$  が約  $6\%$  にまで抑えられた結果、外部量子効率  $82\%$  を示した。従来多く用いられていた  $\text{SiO}_x$ 、 $\text{Si}_x\text{N}_y$  スパッタ膜に比べると陽極酸化膜は、(1)形成が容易であり、(2)結晶に与えるダメージが少なく、(3)膜厚の制御が容易かつ正確である。また液体中で形成されるので、ほこり等によるピンホールが形成された

# 主論文の要旨

報告番号

※甲第

号

氏名

酒井士郎

く。このようは応用に際して必要となる酸化膜の諸特性についても明らかにしている。

## 第6章 波長多重光通信用発光・受光素子

波長1.0~1.7 $\mu\text{m}$ 帯における高性能発光・受光素子が開発されたのち、次に問題になるのは光信号をさらに有効に使うための波長多重光通信である。従来、波長多重光通信を行なうため光混合器と分波器を使用する方法が提案されてきた。しかし、この方法は余分な光素子を必要とし、その上その挿入損失も問題となる。そこで本章では波長多重通信をより簡単に行なうための発光・受光素子、すなわちニ波長レーザと波長分波機能を有する新型光検出器について論じた。新型波長分割光検出器については、まず理論的にその最適設計を行なった。試作した素子は60%以上の外部量子効率と低いフロストーフ(漏話)を示した。また試作したニ波長光源はその発光スペクトルが注入電流によりコントロールされ、波長多重光通信用光源として有用であることを明らかにした。

最後に第7章で本論文全体を総括した。