

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420333

研究課題名(和文) 通信波長帯動作するサブバンド間遷移フォトダイオードの開発

研究課題名(英文) Development of photodetector using intersubband transition for the communication wavelength band

研究代表者

牛頭 信一郎 (Shin-ichiro, Gozu)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員

研究者番号：90392729

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：分子線エピタキシ成長による結合量子井戸構造を利用してサブバンド間遷移による光検出器の作製を試みた。作製した素子は暗電流が多く光検出が出来なかった。バンド構造計算により障壁高さが足りないことがわかった。そこで、暗電流のないバイアス印可無しで動作する量子カスケード型検出器の作製を試みた。しかし、明瞭な光検出は出来ず、構造の正確性を評価する必要があった。結合量子井戸構造の評価を行ったところ、結晶成長中に発生する相互拡散によってバンド構造が変調されることが分かり、その変調分を加味した設計が必要であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：A photodetector by intersubband transition using coupled double quantum well (CDQW) structure by molecular beam epitaxy was fabricated. Dark current was large in the fabricated device, and light detection was impossible. It was found that the barrier height was insufficient for the light detection at room temperature by calculation of the band structure. So, a quantum cascade detector which operates without bias resulting in no dark current was fabricated. However, clear light detection was not possible, and it was necessary to evaluate the accuracy of the structure. By evaluating the CDQW structure, the band structure was modulated by inter diffusion occurring during crystal growth. It was concluded that QW design considering the modulation component was highly required.

研究分野：結晶成長、電子光物性

キーワード：光検出器 サブバンド間遷移 分子線エピタキシ 相互拡散

1. 研究開始当初の背景

ネットワークに流れる情報量は増大し続けている。主たる理由は映像情報の増大から近年話題のビックデータ活用等で、今後も増え続けると考えられる。この増え続ける情報を伝達するために、光ファイバ通信は光の資源である波長・位相・偏波の3自由度を全て利用し伝送容量を増やし続けてきた。しかし、光ファイバの非線形性等により伝送信号は劣化し、受信端で回復する信号処理を必要としている。増え続ける情報量はこの信号処理量も増大させるため、今後消費電力の問題に直面すると考えられており、その解決が必要であった。

2. 研究の目的

前述したとおり、光ファイバによって構成されるネットワークに流れる情報量は増大を続けている。現在では光のもつ3つの自由度：波長・位相・偏波を全て使い、増え続ける情報を伝送している。しかし、実際には光ファイバの波長・偏波分散等の非線形性、レーザー光源の位相揺らぎによって伝送容量・距離の制限を受ける。特に基本伝送レートの上昇に伴い光ファイバの偏波分散が大きな問題になる。これらの問題を回避するため、現在は受信後に電子回路によるデジタル信号処理によって全てを補償するデジタルコヒーレント技術が有望視されている。光領域で補償する技術も研究が進んでいるが、デジタルコヒーレント技術程の補償は達成されていない。一方、3自由度を利用する光通信では利用する波長の数だけ偏波・位相情報を扱える送受信機が必要である。研究レベルでは100波長以上の多重伝送も実現されており、今後実用でも同等の波長数を使うことが予想される。そのため、将来は大規模な光集積回路が必要となる。さらに後段に膨大な電子回路が信号処理のためだけに必要となる。この時すべての問題を電子回路によって解決しようとするすると負荷が重くなり、システム全体の消費電力増加が問題になる。従って、申請者はアナログ領域でデジタルコヒーレント技術の補助が必要になると考えた。例えば、波長分散量・偏波分散量・レーザー光の位相揺らぎ量を受信と同時に検出し、複雑な推定計算を省く技術である。この技術を実現するためには、集積に向けたシリコンフォトニクス技術、本質的に光を扱うことに長けている III-V 族化合物半導体集積回路技術が有望である。

一方、我々は今までに通信波長帯で動作するサブバンド間遷移素子を通信応用する研究を行ってきた。この素子は分子線エピタキシによって成長された III-V 族化合物半導体超薄膜量子井戸を導波路にする事で得られる。サブバンド間遷移素子は通常量子井戸で利用されるバンド間遷移と比較して二つの大きな特徴：(1)励起キャリアの緩和が大変速い (2)光学遷移に偏光依存性（量子井戸の積層方向に平行な電界ベクトルを持つ光：垂

直偏光）がある。この特徴の中で(1)を利用し我々は数ピコ秒(10^{-12} sec)以内で動作する全光スイッチ・位相変調器等を実現してきた。(2)の特徴：「光学遷移に偏光依存性」を利用した受光器を作製出来れば、光の偏光方向をモニタできる。これは先に述べた、伝送レートを高くすると一番問題となる光ファイバの偏波分散をモニタするために必要な要素技術の一つである。現在使用されているバンド間遷移を利用した通常のフォトダイオードでは偏光依存を持つことがなく、偏光を見分ける事ができない。空間型・導波路型偏光ビームスプリッタを使用し、各偏波を個別に受光することも可能だが、構成が複雑になり、サイズが大きくなる。従って、サブバンド間遷移を利用したフォトダイオードは将来必要になると考えている。

そこで本研究ではサブバンド間遷移素子を応用して、偏波を検出できる集積化可能なデバイスの作製を目指す。

3. 研究の方法

通信波長帯においてサブバンド間遷移を示す超薄膜量子井戸構造は分子量エピタキシ法によって結晶成長して作製した。この超薄膜構造設計はバンド構造の非放物線性を取り入れたシュレディンガー方程式を解くことによって行った。作製した半導体結晶は研磨等のプロセスを経て基本的な電子光物性を評価可能なサンプルにした。作製したサンプルはフーリエ変換赤外分光器により波長特性を評価した。電気的評価にはソースメジャーユニットを利用して IV, LI 特性を得た。

4. 研究成果

InP 基板上に InGaAs/InAlAs 材料をベースとした結合量子井戸構造を分子線エピタキシ(MBE)法によって成長させた。典型的な構造を図1に示す。

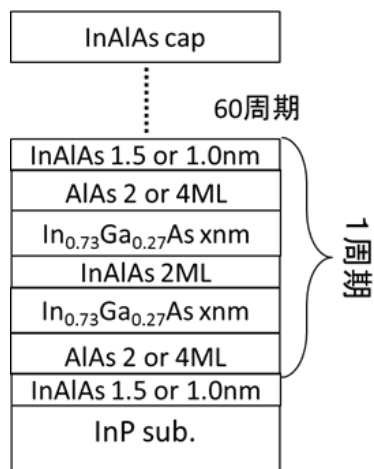


図1 典型的な結合量子井戸構造

ML: 分子層の略

この図1のなかで、In_{0.73}Ga_{0.27}As x nm の膜厚を調整することによって、結合量子井戸の

サブバンド間遷移に起因した光吸収波長の制御が可能になる。概ね $x=2\sim3$ で通信波長帯 (1550 nm) に光吸収ピークを調整できる。実際に x を 2.6 へ調整し通信波長帯で光吸収のある結合量子井戸構造に光電流を取り出すための n -InP を設けたサンプルを作製し (図 2)、IV 測定を行った (図 3)。なお、IV

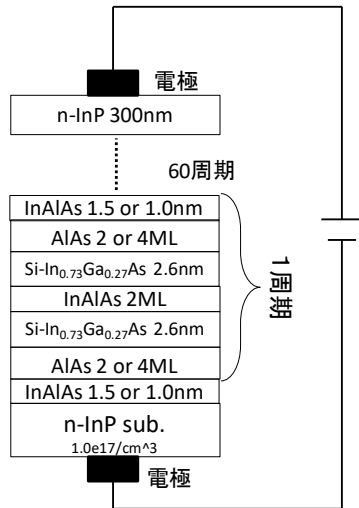


図 2 作製したサンプル構造と IV 測定
のセットアップ

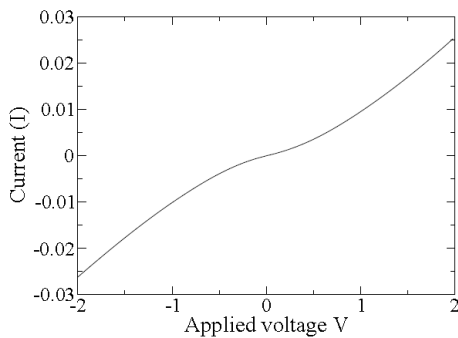


図 3 図 2 サンプルの IV 特性 (室温)

測定は室温で行った。図 3 に示す通り、若干の負性抵抗を観測した。しかし、流れる電流が多く、光検出器として使用するのが難しいことも分かった。本結合量子井戸は、サブバンド間遷移による光吸収を得るために、井戸層にドーピングが施してある。量子井戸構造のバンド計算により求められる基底準位とフェルミエネルギーの総和により、AlAs/InAlAs の障壁高さが求めた。その結果、既存のサブバンド間遷移を利用した検出器と比較して高いことは分かったが、その高さが電流を下げるために十分でないこともわかった。この電流は検出器として動作させるときは暗電流として寄与し、実際に受光実験を行っても明瞭な光電流は観測できなかった。そこで、室温でも光検出が可能な構造として近年研究が盛んになってきている量子カスケード検出器構造にトライした (図 4)。

本図に示している井戸は InGaAs、バリアは InAlAs で形成されている。最初の試みであるため、サブバンド間遷移波長は通信波長帯よ

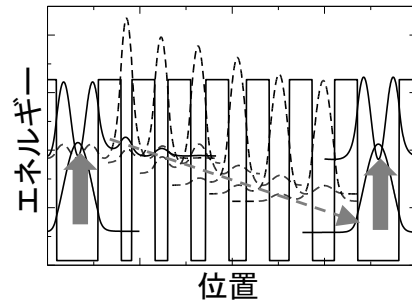


図 4 量子カスケード構造のバンド
構造図

りも長い波長である。この理由は遷移双極子の大きさが井戸幅で決まるため、厚い井戸幅であれば強い光吸収が得られるからである。この図のなかで左右両端は光吸収を起こす量子井戸である。その間にある量子井戸は緻密な膜厚制御によって、光吸収を起こす量子井戸の励起準位から、LO フォノンのエネルギー程低い量子準位に制御し、その準位間隔を保ちつつ段構造 (カスケード構造) にする。その結果、光吸収によって励起準位に遷移した電子が基底準位に戻るよりも効率よく隣の井戸に遷移するため、光による電流が発生する (光検出)。実際に作製して図 2 と同様なサンプルを作製し、光検出の実験を試みたが明瞭な光電流を観測することが出来なかった。この原因を追究するために、量子井戸構造の設計と作製が問題無く出来ているか検討を行った。ここで検討した構造は今までに実績のある結合量子井戸構造 (図 1) である。この構造を選んだ理由は、設計・MBE 成長・評価に慣れており、検討スピードが速く出来るからである。一方、InGaAs/InAlAs 系結合量子井戸構造の MBE 成長において成長条件の最適化が完全に終了しておらず、その最

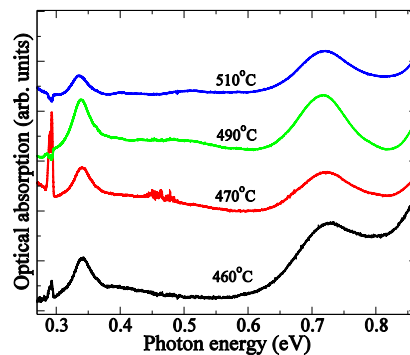


図 5 結合量子井戸構造の光吸測定
結果

適化も合わせて行うことにした^{①, ②}。図 5 に

図1の構造において $x=3.1$ にした結合量子井戸の成長温度を変えてMBE成長したサンプルの光吸収測定結果を示す。本図の通り、成長温度に依存して光吸収強度、半値幅、ピーク位置の変化が見られた。X線回折測定の結果（非表示）も合わせて比較すると、 490°C の時に最も結晶性良く成長出来ていることがわかった。一方、光吸収のピーク位置を比較すると、成長温度の上昇に伴って、若干のレッドシフト (0.35 eV のピーク) と、ほぼ一定 (0.75 eV のピーク) の二つの挙動が確認された。これらのサンプルは同一構造で同一日にMBE成長しており、膜厚・組成はサンプル間でほぼ均一であるといえる。しかし、図5で見られるような変化があるため、成長温度を変えることによって起こる変化を考察した。本結合量子井戸ではAlを多く使用している。そのため、成長表面でのマイグレーションが低温では阻害され、高い結晶性が得られないことが知られている。一方高温ではAsの再蒸発によってV族欠陥が生じ、結晶性が悪くなることも知られている。これら現象は、中温度である 490°C で最も結晶性が良いサンプルが得られたことを上手に説明できる。一方、成長表面におけるマイグレーションは結晶性の向上のみならず、界面（例えばInGaAs/InAlAs 界面）において相互拡散を起こすことが予想できる。そこで文献検索を行

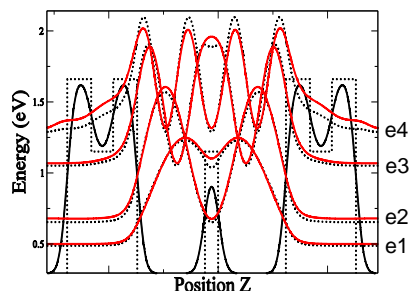


図6 結合量子井戸のバンド構造。黒点線：界面拡散の効果無しバンド構造及び波動関数、黒実線：界面拡散を考慮したバンド構造、赤実線：界面拡散を考慮した波動関数、黒点線：界面拡散を考慮しないバンド構造及び波動関数

い、典型的な相互拡散係数を調べた。その値を利用して結合量子井戸構造のバンド構造計算を行った。その結果を図6に示す。先に示した 0.35 eV 程度のピークは2-3準位間の遷移で、 0.75 eV 程度のピークは1-4準位間のピークに対応する。この計算により、相互拡散は実効的な井戸幅を狭める効果と、バリア高さを下げる効果があることがわかった。これらの効果が起こると、2-3準位は狭まり、一方1-4準位間は若干広がることで計算によって明らかになった。すなわち、界面拡散の存在によって、光吸収測定では簡単に見分け

のつかない量子準位の変化が起こっていることを明らかにできた^③。この量子準位の変化が量子カスケード構造を作製した時に、設計値からのずれを引き起こし、特性が得られなかった原因だと考えられる。今後のサンプル作製においては、相互拡散の影響も上手に取り入れた計算を行って設計を行う必要があることがわかった。

<引用文献>

- ① 牛頭信一郎、第63回応用物理学会春季学術講演会、20p-P16-11
- ② 牛頭信一郎、The 32nd North American Conference on Molecular Beam Epitaxy、MBE-MoP24
- ③ 牛頭信一郎、投稿中

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 2 件)

- ① 牛頭信一郎、第63回応用物理学会春季学術講演会、20p-P16-11
<https://confit.atlas.jp/guide/event/jsap2016s/session/20p-P16-1~12/advanced>
- ② 牛頭信一郎、The 32nd North American Conference on Molecular Beam Epitaxy、MBE-MoP24
<http://www2.avs.org/conferences/NAMBE/2016/pdf/program.pdf>

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

牛頭 信一郎 (Gozu Shinichiro)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員
研究者番号：90392729

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し

(4) 研究協力者

無し