

研究課題別評価

1. 研究課題名： シリコンをベースとする新光機能素子の創製

2. 研究者氏名： 深津 晋

研究員：菅原 由隆(研究期間 H.17.4 ~ H.18.3)

3. 研究の狙い： 本研究の目的は、シリコン・ベースのヘテロ構造における電子・正孔系と PHz 電磁場との相互作用をデザインし、シリコンに残された最後の課題である「光発生・増幅」機能を実現することで、真の“シリコン” フォトニクス of 早期形成に資することである。

4. 研究成果：

1) 界面局在電子・正孔系を利用した新しい光学遷移制御法の確立

Si が光発生に不向きな原因は、生来の間接遷移バンド構造にある。本研究では、この歴史的難題を解決するための新原理を提案し、その検証を行った。Si よりエネルギーギャップの小さい直接遷移物質を Si 中に導入しても、直接遷移特性は生かせない。これは、電子に対して斥力のバンド不連続が生じ、電子が常に Si 中に存在するためである。過去の研究はこのジレンマが解決できず頓挫した。我々は、コペルニクス的転換により、反電子ポテンシャルを逆手にとる戦略に出た。V 族/Si 界面に発生する双極子は、強い短距離電子トラップとして働くが、III-V 族物質内へエバネセント電子波が浸出する結果、直接バンド端成分が電子に継承される。この効果を通じて「Si の電子」であるにも拘わらず、電子・正孔系に直接遷移特性が発現し、Si を間接遷移の呪縛から解放することにはじめて成功した。

2) GaSb/Si量子ドットの形態とポテンシャル制御

分子線エピタキシ(MBE)法により、GaSb/Si 量子ドットの形態がほぼ系統的に制御できること、および量子ドットのバンドプロファイルが、歪の符号に無関係にキャリアを遠方から引き寄せる効果を新たに見だし、励起法に依存しない構造設計が可能であることを示した。

3) GaSb/Si量子ドットの高輝度蛍光

GaS/Si 量子ドットは、Si サブギャップ(1.1-1.7 μ m)に強いブロードバンド蛍光を呈するが、赤外カメラによるイメージングが可能なほどの高い外部効率(>0.3%,@10K)を持つことがわかった。外部効率は低下するものの、単一層の量子ドットでも、室温蛍光が観測され、量子ドットの内部量子効率は 1%にも及ぶことがわかった。室温で 500MHz 以上の変調帯域を確保し、イントラチップ用途であれば実用化が視野に入り得ることを示した。

4) GaSb/Si量子ドットの光増幅機能

シリコン系では初めてとなる近バンド間遷移の光利得を検証した。ポンプ・プローブ配置で、スラブ導波路のシングルパス on-off 利得を評価し、低温(10K)で、光励起。電流励起ともに 10dB/cm 以上の値を得た。また、プローブ光強度依存性、利得スペクトルから界面3準位電子系の反転分布を検証した。さらに、SOI 導波路搭載の量子ドットにおいて増幅自然放出光(ASE)の観測に成功

し、共振器化を待ってレーザ発振検証を行う準備が整った。一方、高温動作には閉じ込めポテンシャルの改良か、材料系変更が必要なことがわかった。

5) SiGe/Si量子井戸を利用した単一チップ電場制御型多波長可変LED

SiGe/Si の反電子型バンド接続を通じて電子が電場敏感となる性質に注目し、光学利得のない光源でも適用可能な、新しい波長制御法を案出した。電子のみの分布を縦電場で制御すると、電子の欠乏した井戸が消光する効果を利用する。インパクトイオン化を利用したの双方向性 LED 構造において、3波長までの波長スイッチング動作を検証した。

6) Si一次元導波路を利用した波長変換・光発生デバイスの開発

シリコン・ベースの一次元導波路を利用した、 $\chi^{(3)}$ 起源の波長可変コヒーレント光源・波長コンバータを目指した。内因性の導波路損失で最も顕著な、自由キャリア吸収 (FCA)の抑制法として、低次元構造の導入を提唱した。SiGe/Si量子井戸による光・キャリアの空間分離を通じて、従来の電場掃引法によらずともFCAを 1%程度に抑制できることを理論的に示した。一方、二次元層の採用により、FCA素過程である電子、正孔のバンド内間接遷移終状態を 10%オーダーまで抑制できる可能性ほか、広帯域利得発生への指針を示した。実験では、シリコンSOI一次元矩形導波路において自然放出ストークスラマン光を観測できたが、伝播結合損失が大きく、誘導光発生を検証には至っていない。高精度に制御された導波路の確保が課題である。

7) その他シリコン・ベース材料の新光機能

バンド端近傍の反射光強度変調は、KK 変換により吸収係数に支配されるため、シリコン・ベース物質では、0.01%以下の変調度しか得られないことが予想される。しかし、SiGe の表面にはギャップ近傍に欠陥起因の強い吸収帯が発生し、1%強の光強度変調度が得られた。

5. 自己評価:

研究紹介文に謳った、究極目標のひとつであるレーザ発振に関しては、SOI 導波路搭載の GaSb/Si 量子ドット試料単一チップ上での ASE 発生まで検証が進み、共振器化技術の完成を待つて、ようやく手の届く段階にまで迫ることができた。

一方、諸般の事情により、研究開始直前のタイトル調整段階において、若干、最終目標を下方修正する必要があったため、「シリコン・ベースの新光機能素子」もターゲットに入ることとあいなった。これらに関しては、未だに原理の検証の域を出ないものもあるが、少なからず期待以上の成果を上げることができたと自負している。中でも、SiGe/Si 量子井戸を利用した電場制御型波長可変 LED は、タイプ II 量子構造に普遍的かつ極めて単純な動作原理に基づき、単一チップフォーマットのインコヒーレント光源を、縦電場のみの制御を通じて、波長可変な光源へと変貌させ得る技術であり、稀に見る高機能集約の例であると言えよう。

一方、中途より開始した、導波路の非線形性にもとづく波長変換・光発生デバイスに関しては、予想外の技術的制約のせいで失速に苦しんだ。しかし、導波路能動デバイスの設計指針に関する、有意義な提言を行うことができた。導波路では、二光子吸収起因の FCA が顕著となるが、低次元構造によってこれが抑制可能となるなばかりでなく、広帯域での利得発生など、高機能化を推進する駆動力として、低次元構造の利用が有効に機能する可能性を指摘した。

研究の中核をなす光学遷移制御法に関しては、バンド物理に立脚した物性制御の停滞状況を打破する、大きな前進であることに間違いはなく、シリコン・フォトンクス完成への唯一のネックとなっていた、シリコン・光エミッタの実現を一気に推しすすめるための牽引力になってくれるものと信じている。

尚、シリコン・ベース材料による光発生の方法論には、別の可能性も残されているはずであり、今回、我々が提案、検証した方法が唯一絶対の方法だとは考えていない。今後は、単一光子、相関光子対発生などのマイルストーン達成も視野に入れながら、従来の一電子近似の範疇を越えて、光と物質の相互作用を追求したい。例えば、光電場と強く結合した電子系や、凝縮状態の利用など、従来の変極子遷移の制約を払拭できる、もしくは変極子遷移を利用しながらも、全く異質な効果が期待できる、新たな可能性についても、積極的に検討してゆきたいと考えている。

6. 研究総括の見解:

ナノ構造を応用した Si ベースの新機能素子の創製を目的に、GaSb ドットを用いた LED や SiGe/Si の多波長 LED などユニークなデバイスを提案して実証し、また理論的解析も示して学術的にも貢献した点が評価できる。今後は、実用化に向けた課題を明確にして、Si フォトンクスとして実用に結びつけていくことが期待される。

7. 論文等: 10件

- 1) M. Jo, K.Ishida, N.Yasuhara, Y.Sugawara, K.Kawamoto, and S.Fukatsu
Appl. Phys. Lett. **86**, 103509 (2005).
- 2) M. Jo, N. Yasuhara, Y. Sugawara, K. Kawamoto, and S.Fukatsu
J. Cryst. Growth **278**, 142-145 (2005).
- 3) N. Yasuhara and S.Fukatsu, J. Cryst. Growth **278**, 512-515 (2005).
- 4) Y. Sugawara, Y. Kishimoto, Y. Akai, and S.Fukatsu, Appl.Phys.Lett. **86**, 011907 (2005).

他6件

招待講演: 国際学会 1件、国内学会 3件