

レーザー光を用いた半導体物性解析

[研究代表者] 五島敬史郎 (工学部電気学科)
[共同研究者] 竹内和歌奈 (工学部電気学科)

研究成果の概要

半導体の特性 (物性) を詳しく解析することは、スマートフォンを代表する現代を支える電子デバイスの性能向上に欠かせない手法である。レーザー光を用いた半導体物性解析もその評価方法の一部である。特に III-V 属半導体と呼ばれる光を吸収・発光することができる半導体材料の特性評価には強力なツールとなる。我々は、紫外線レーザーを用いたラマン分光装置を用いた SiC 量子ドットの評価、フェムト秒レーザーを用いた光励起キャリアの過渡解析装置、加えて電波と光波の両方の特性を持つ周波数帯 (テラヘルツ領域) での測定が可能なテラヘルツ領域時間分解領域装置の構築を行っているのでその報告を行う。

研究分野: 光物性、半導体物性、半導体プロセス

キーワード: ラマン分光、フェムト秒レーザー、キャリア過渡解析、テラヘルツ波、シリコンカーバイド (SiC)

1. 研究開始当初の背景

高効率な太陽電池として量子ドット太陽電池が期待されている。理論変換効率は 75% と予想する方向例もある。しかし現実にはその理論変換効率には届いていない。その原因を探るため、太陽光によって生成された光キャリアの半導体中の振る舞いを正確に観測することが重要になってくる。

300GHz~10THz の領域をテラヘルツ帯と呼び電波と光波の両方の特性を持ち合わせている。テラヘルツ波は幅広いセンシング技術への期待が寄せられている。我々は窒化ガリウムを用いた共鳴トンネル型発振器の研究を進めている。

SiC ドット形成に向けて、化学気相成長法を用いて Si 基板上に SiC 層と BN 層の積層構造を 10 層積層した構造を形成した。その基礎的物性評価を行った。

2. 研究の目的)

半導体量子ドットを用いた電子デバイスの応用は多岐に渡り検討されている。代表的な応用例として、高効率太陽電池や、高効率半導体レーザーの応用が期待されている。

これらの性能を正確に評価するためには、量子ドットを含んだデバイス構造と、その構造に由来するキャリア (電子-正孔対) の振る舞いを正確に観測する必要がある。III-V 属半導体中のキャリアの振る舞いは非常に高速で、ピコ秒オーダーの時間分解能が必要になる。そこでフェムト秒レーザーを用いてポンプ・プローブ法測定装置を構築する。

また、電波と光波の中間の性質を持つ窒化ガリウムを用いた共鳴トンネル型発振器の性能評価装置として、フェムト秒レーザーを用いたテラヘルツ領域時間分解計測によって非常に幅広いテラヘルツ領域を評価できることが可能になってきた。よって合わせてこの装置の構築も行っている。

加えて、シリコンカーバイド (SiC) の量子ドット作成を行いその特性評価についてラマン分光装置を用いてフォトルミネッセンス (PL) 法により光学的な評価を行ったので報告する。

3. 研究方法・測定結果

(1) ポンプ・プローブ法

図 1 にポンプ・プローブ法の測定原理の模式図を示す。

ポンプ・プローブ法とは、試料に強いポンプ光を当て励起し、調節可能な遅延時間後にプローブ光を試料に当てることで、プローブ光の吸収、増幅、反射の強さあるいは偏光面の回転を測定することが出来る測定方法である。この測定方法では、1つの光源を使用する。光源から射出されたパルス光のビームを2本のビームに分離する。一方のパルス光は、ポンプ光として試料に照射され、それにより試料の光化学反応を誘起する。他方のパルス光は、光学的遅延ステージにより時間を遅らせて、プローブ光として試料に当てる。それによりポンプ光とプローブ光とに、任意の時間差が付与され、かつこの時間差を変化させることにより、時間変化のデータが得られる。プローブ光にパルス光が用いられるので、ポンプ光パルス照射後に試料が高速に変化していても、その中の一瞬、すなわちパルス幅に相当する時間幅の情報のみが切り出され、検出器に捉えられるため、検出器の性能によらず、得られる情報はパルス幅を反映したものとなる。パルス幅がフェムト秒であれば、時間分解能はサブピコ〜ピコ秒の分解能となる。測定結果の一例を図2に示す。今後は温度変化測定できる改善を行う。

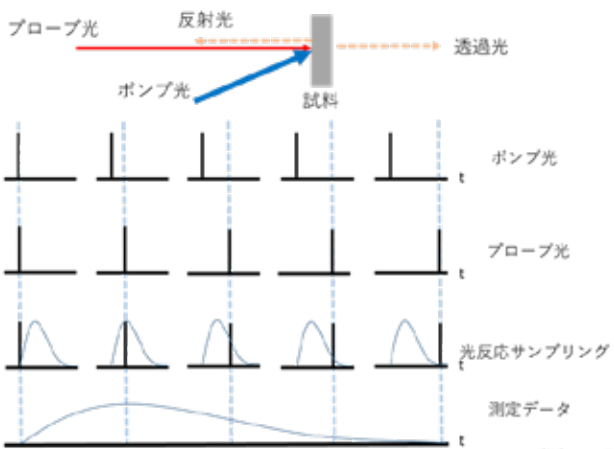


図 1

ポンプ・プローブ法測定原理

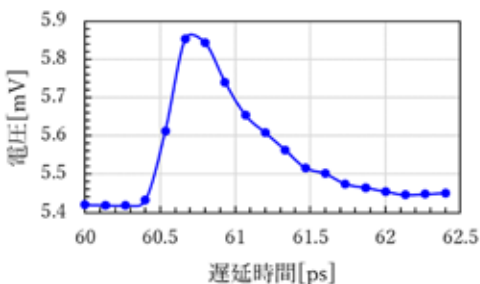


図2. ガリウム・ヒ素半導体過渡特性 測定結果例

(2) テラヘルツ時間領域分光

フェムト秒レーザから照射されたパルス光をビームスプリッタにより、ポンプ光・プローブ光に分離する。プローブ光は THz パルス波を発生させるため発生素子に、ポンプ光は THz パルス波を検出するため検出素子にそれぞれ導かれる。基本構成は図3に示す、ポンプ光側にテラヘルツ発生素子、プローブ光側にテラヘルツ検出素子を使用する。両素子ともに微小ダイポールアンテナのギャップ間にフェムト秒レーザでパルス波を当てることで光吸収が発生する。これにより光電流の時間微分に比例したテラヘルツ電磁波が外部に放射される。一方で検出素子は発生素子から放射された電磁波を収束させて回路を閉じることで電磁波の振幅に比例した瞬時電流が流れるため、これを測定する。今回使用するフェムト秒レーザは 80MHz の繰り返しでパルス波を発生させるため、パルス波を瞬時に計測することはできない。そこで可動鏡を利用することで時間波形の測定を行う。プローブ光は光路上に可動鏡が設置されているため、可動鏡を動かすことで光路長を変えることができる。これによりパルス波が検出素子に到達するタイミングを光路長が短くなれば速く、長くなれば遅くすることができる。検出素子はパルス波が到達した瞬間のみ測定を行うので可動鏡により時間的遅延を与えることでサンプリングを行うことができる。

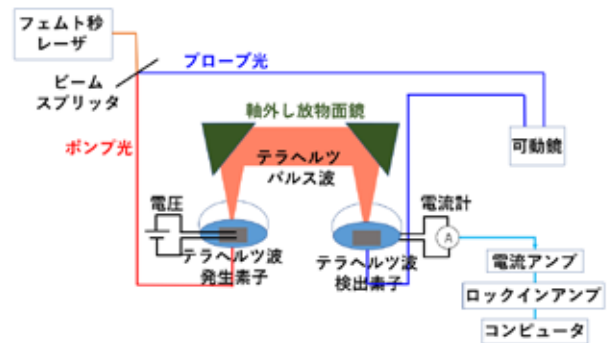


図3. テラヘルツ時間領域分光装置概略図

(3) ラマン分光測定

SiC ドット形成に向けて、化学気相成長法を用いて Si 基板上に SiC 層と BN 層の積層構造を 10 層積層した構造を形成し、フォトルミネッセンス (PL) 法により光学的な評価を行った。

図 4(a)に SiC/BN 積層後の試料写真および PL 測定箇所を示す。図 4(b)は試料左側 N、I、M 測定点の測定結果及び比較のために、SiC、BN それぞれ単層で積層した試料の

PL 結果を示す。これらの測定点では BN 単層で得られた結果に近いスペクトルが得られた。一方で、BN 由来と考えられるピークは単層膜よりシャープになりピークのブルーシフトが見られた。SiC 由来のピークでは SiC 単層に比べてレッドシフトが観察された。右端の測定点の結果を図 4 (d) に示す。図 4 (b) と同様に BN 由来のピークが支配的であるが、420 nm 付近の強度に比べて 680 nm 付近のピークが顕著になっている。一方で、積層化によって BN 由来のピークはシャープになり、ブルーシフト化することがわかった。この BN 由来のピークが欠陥由来のものと考えられる。積層化によって量子閉じ込め効果が顕在化したかまたは結晶性が揃うことで、ピークがシャープになったものと考えられる。

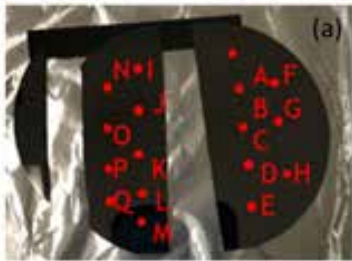


図 4 (a) 資料写真

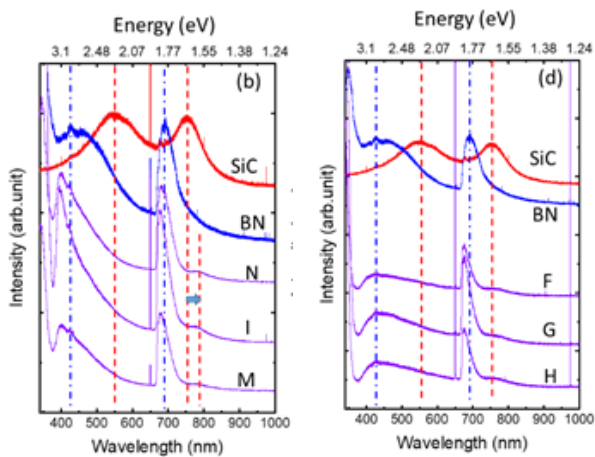


図 4. (b), (d) SiC 量子ドット PL 測定結果