

レーザ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、岩田博之、澤木宣彦（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、フェムト秒レーザを用いた光励起キャリアの過渡解析装置の改善を行い微弱な信号変化を捉えることに成功した。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を用いてテラヘルツ波測定装置開発の報告を行う。また、機械研磨されたGaN試料表面あるいは電極構造を有するGaNデバイスの電極周りなど加工に伴う結晶歪みをするラマン分光装置を用いた窒化ガリウム基板の応力測定を行ったのでご報告する。

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、キャリア過渡解析、テラヘルツ波、シリコンカーバイト（SiC）、窒化ガリウム

1. 研究開始当初の背景

高効率な太陽電池として理論変換効率は75%と予想する例もある。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、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である。

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。

SiC（シリコンカーバイト）は、広いバンドギャップを持ち、高電界に強い特性を持つ。加えてレアアースを用いないことから応用が期待されている。

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を用いてポンプ・プローブ法測定装置を構築した。

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、シリコンカーバイト（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。本稿ではその結果の一部を報告する。

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によって、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。本実験パルス幅が150フェムト秒であるので、時間分解能はサブピコ〜ピコ秒の分解能となる。今回は測定精度を向上するため信号ノイズ除去を主に行った、図1の光センサ1、2を組み込むことによりノイズを低減することに成功した。第2に透過光の検出器(光センサー1)をシリコン半導体型電子冷却方式の高感度型に変更した。図2はガリウムヒ素基板における光キャリア寿命を計測したものである。寿命は6ピコ秒と高い時間分解能を持っていることが分かる。

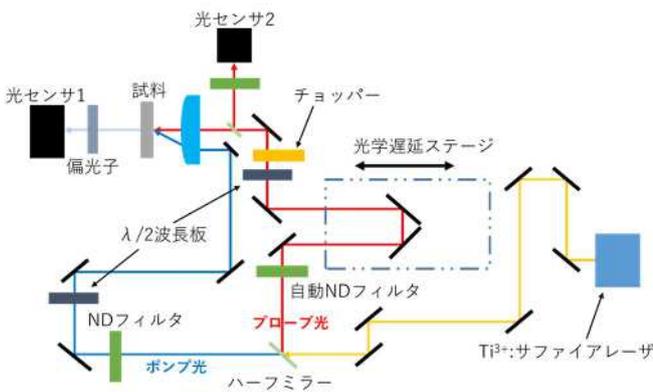


図1 ポンプ・プローブ法測定概略図

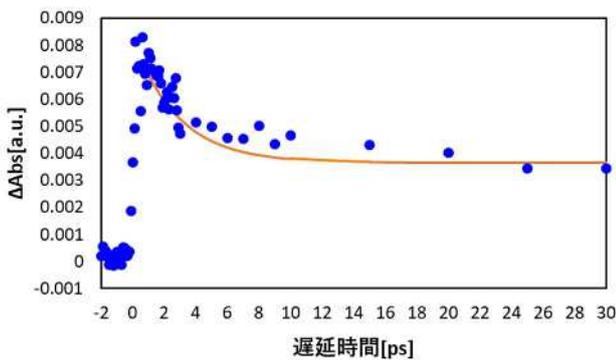


図2 信号改善の一例

(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。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。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。今回、THz レンズを装着して空間分解能を従来の約10倍に向上させた。

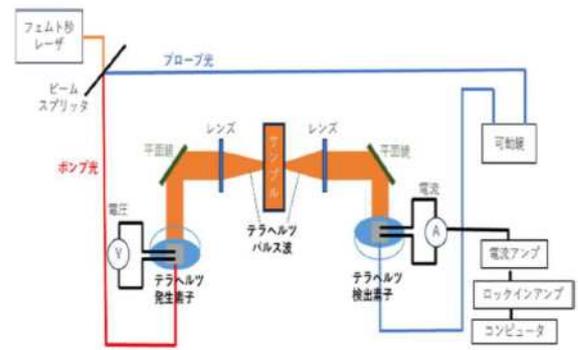


図3 テラヘルツ時間分解測定 (THzTDS) 概略図

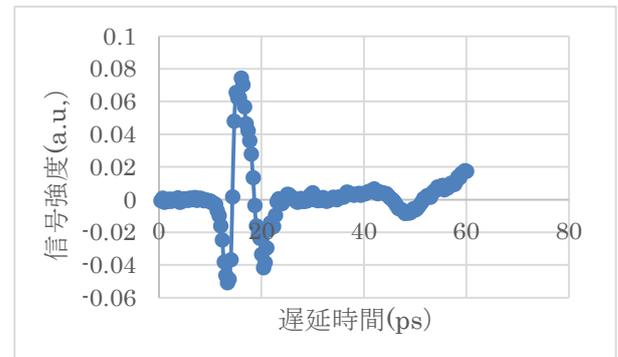


図4 テラヘルツ時間領域分光結果

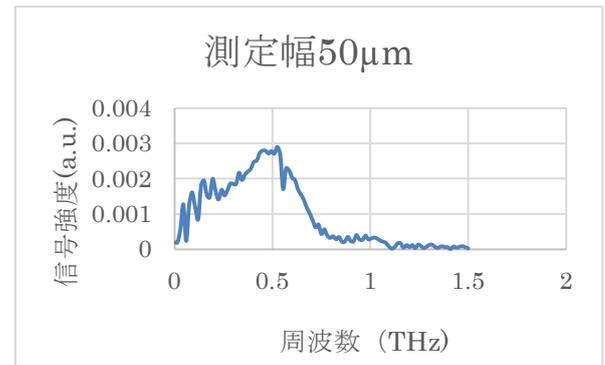


図5 周波数スペクトル

(3) ワイドギャップ半導体 GaN の顕微ラマン分光測定

パワーデバイスには大きな結晶を用いる必要性があり、バルク材料の機械研磨などの工程が必須で、そのときに導入される転位がデバイス性能に大きな影響を与える。本研究では、機械研磨された GaN 試料表面あるいは電極構造を有する GaN デバイスの電極周りなど加工に伴う結晶歪みを測定評価することを主な内容とする。励起光として 325nm の紫外線を用いる GaN の顕微ラマン実験では、共鳴ラマン散乱効果による強いラマン信号が得られ、励起光侵入深さが浅く、GaN 試料最表面 80nm 程度からの情報が得られるという特徴があり、加工表面の諸物性を詳細に評価することができる。

実験方法

試料として、納維科技有限公司（中国上海市）製の LED 作製用エピレディ GaN 薄膜を用いた。本研究では加工プロセスが結晶に及ぼす効果を明らかにするために、①エピレディ GaN ウエハにダイヤモンドドレッサーで罫描き痕を作り付けた試料、②エピレディ GaN ウエハを劈開により切断した試料、③劈開した試料端を研磨紙（粒度 1 ミクロン）で研磨した試料の 3 種類について、顕微ラマン分光測定を行い、LO フォノンエネルギーの変化から残留歪みを評価した。実験で用いた試料の一例を図 1 に示す。この試料①についてはドレッサー痕の太い場合（強い研磨を想定）と細い場合（弱い研磨を想定）の 2 種類について測定した。太い線は線幅 120~200 μm で、細い線の線幅は約 8 μm であった。



図 6 ドレッサー痕試料（目盛は 1mm 方眼紙）

4. 実験結果と考察

試料①の細いドレッサー痕に関する実験結果を図 7 に示す。横軸はドレッサー痕近辺の任意位置を原点としている。ドレッサー痕の部分で、ラマンシフトの値が大きくなり、PL 強度が弱くなっていることが分かる。ラマンシフ

トは研削していない部分を基準にすると最大 20 cm^{-1} ものブルーシフトとなることがわかった。これは圧縮歪み約 5GPa に相当する。

材料に力を加えると、圧縮歪みに加わり材料は変形する。ドレッサー痕部分では PL 強度が弱くなりラマンシフトが大きくなっていることから、機械研削により転位が導入され、残留圧縮歪みが生じたことを示している。ドレッサー痕の近傍で PL 強度の低下が見られない部分でもやや大きなラマンシフトが見られることは、この部分での圧縮歪みは弾性歪みだと考えられる。

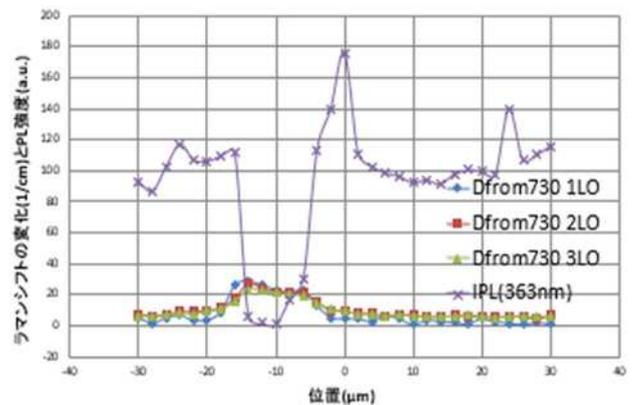


図 7 PL 強度とラマンシフトの変化