

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 9 月 13 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25790077

研究課題名(和文) 受光素子における応答非直線性とその波長依存性の抑制手法確立に向けた研究

研究課題名(英文) Development of suppression method of nonlinearity and its wavelength dependence for optical sensor

研究代表者

田辺 稔 (Minoru, Tanabe)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・物理計測標準研究部門・研究員

研究者番号：80586339

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：光パワー重ね合わせ法を原理とした光センサの応答直線性評価システムを開発した。このシステムを用いて可視光から近赤外波長におけるシリコンフォトダイオードの応答非直線性の波長依存性を測定した。半導体内での光電流生成を考慮した理論モデルと、この実測値の比較から、入射波長に依存した非直線性を定量的に説明することに成功した。理論モデルとの比較結果から、シリコンフォトダイオードの応答非直線性を抑制できる知見を得た。また、任意波長や入射光パワーに対するSi-PDの出力の応答非直線性を補正できるので、入射光強度の精密な評価が可能となる。

研究成果の概要(英文)：Nonlinearity measurement system for optical sensor with optical flux addition has been developed. Spectral nonlinearity of silicon photodiodes in the range from visible light to near-infrared light was measured with the developed system. Comparing these experimentally measured results with theoretical models including the photocurrent generated in the Si bulk, the model enables us to quantitatively explain the starting power level and wavelength of the nonlinearity for a silicon photodiode. These comparison results contribute the suppression of nonlinearity generation for a silicon photodiode and the precise optical evaluations over wide optical power ranges and various incident wavelengths.

研究分野：計測工学

キーワード：光センサ 光計測 シリコンフォトダイオード 応答非直線性 レーザ

1. 研究開始当初の背景

(1) 情報通信、光メモリ等の様々なレーザー光利用分野の拡大にともない、広波長域・広いパワー領域での高精度光パワー管理計測が求められるようになってきた。受光素子の一種であるシリコンフォトダイオード(Si PD)は、そのような広帯域領域に対して応答を示すため、光パワーメータ用の受光部として広く用いられている。ところが、Si PDの型式によっては、入射光に対する出力光電流が比例関係とならない応答非直線性を示し、時にはそれが数～数十%の挙動を示す場合がある。また、その非直線性は、応答度(あるいは量子効率)の波長依存性と別な波長依存性を有することが知られている。

(2) Si PDの応答非直線性は、内部直列抵抗が起因となって回路に光電流が殆ど流れなくなる応答の飽和、素子内の再結合中心に捕獲される発生キャリアが飽和し高入力パワーほど光電流が増加するスーパーリニアリティがある。飽和に関しては、フォトダイオードの等価回路と素子パラメータを用いて説明でき、光電流の回路特性のみに起因する現象であるため応答の波長依存性は無い。しかし、スーパーリニアリティは、PDの空乏層外で発生したキャリアの再結合中心における捕獲ロス割合が、高入射パワーとなるにつれ飽和し、見かけ上光電流が増加する現象で、入射光波長に大きく依存する性質をもつ。

(3) これまでの国内外の研究において、Si PDの内部量子効率に基づき、スーパーリニアリティを評価した報告が発表されてきたが、多波長測定やその実測結果と理論モデルとの比較・検討を行い、その応答非直線性の物理機構を解明した報告例はない。以上の様な背景から、Si PDの応答非直線性やその他依存性を抑制する技術の確立に向け、Si PDのスーパーリニアリティに着目し、その発生物理機構を解明する研究を進めてきた。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、広波長帯域・広ダイナミックレンジに渡るSi PDの応答非直線性を測定し理論モデルとの比較により、その波長依存性の物理機構を解明することを目的とする。

(2) Si PDの応答非直線性の測定結果や理論モデルから、その応答非直線性抑制法を提案する。また、任意の光波長や入射強度に対して、Si-PDを用いた精密光測定法を確立する。

3. 研究の方法

(1) レーザ光源の整備と光パワー重ねあわせ法による高精度なSi PDの応答非直線性計測システムを構築する(図1)。応答非直線性の導出手順は、以下の通りである。まず、光源からの光をパワー調整用の光減衰器で任意のパワーにする。次に、減衰器を通過し

た光を偏光ビームスプリッターで2経路に分岐させ、それぞれの分岐において同じパワー値になる様にバランス調整用の光減衰器で調整する。両方の分岐のシャッタをONにし、光を同時入射した出力値 R_{12} を計測する。さらに、それぞれのシャッタを交互にON, OFFし、それぞれの分岐からの出力値 R_1, R_2 を計測する。その時の出力値 R_{12} での非直線性 $LF=R_{12}/(R_1+R_2)$ が計算される。 $LF=1$ であるならば、応答が直線性である。



図1 光パワー重ねあわせ法による応答非直線性計測システム

(2) 構築したシステムを用いて、Si PDの応答非直線性の波長依存性の測定データを取得し、その測定結果と理論モデルとの比較・検討を行い、応答非直線性の発生原因を明らかにし、その抑制の知見を得る。

4. 研究成果

(1) 市販のSi PDに対して近赤外波長帯域での応答非直線性の測定を実施した。また、Si PDの内部構造(各層の厚さやドープ量)をパラメータにし、Siバルク内での再結合を考慮したスーパーリニアリティの理論モデルを構築した。次に、内部構造パラメータの実測データを導入して計算した結果と波長依存性の実測結果と比較した。その結果、図2に示すように850nm以下の波長では理論モデルと一致するが、図3に示すように980nmの波長では完全には一致しない結果となった。これは、980nmでは、空乏層外での吸収される割合が多く、構築した理論モデルでは、このような空乏層外でのキャリアの拡散項が完全に組み込まれていないためであると考えられる。以上の結果は、Si PDの構造パラメータと数点の波長での非直線性測定で、応答非直線性を理論的に予測できる可能性を示唆している。

(2) 近赤外波長帯域と同様のSi PDに対して、応答非直線性を可視光波長帯域でも測定し、その波長依存特性を評価した(図4と図5)。波長405nmにおいては、最大1%程度のスーパーリニアリティが観測された。また、光電流 $1\mu A$ を下回る様な低い光パワーからスーパーリニアリティが発生することがわか

った。一方、波長 660nm では、スーパーリニアリティは 0.1%未満と顕ではなかった。以上の結果から、入射波長が短いほど、スーパーリニアリティが大きくなるのが分かり、可視光波長帯でも応答非直線性の波長依存性を観測した。また、405nm のスーパーリニアリティの形状は、近赤外光を入射した時と関数形状が異なることが分かった。短波長光でのスーパーリニアリティの発生要因は、入射吸収長が短い事から Si バルク内での再結合だけでなく、Si 表面酸化膜近傍での表面再結合も起因していると考えられる。そのため、可視光波長でのスーパーリニアリティ発生の要因を定量的に説明するため、デバイスシミュレータ PC1D を用いて解析を行ったところ、短波長光でのスーパーリニアリティは、Si 表面酸化膜近傍での表面再結合が主要因であり、単位面積当たりの表面電荷が 10^{12} cm^{-2} 個以上でスーパーリニアリティが発生することがわかった。

(3) 近赤外波長帯と可視光波長帯における Si PD のスーパーリニアリティの実測と理論の比較検討の結果は以下のとおりである。近赤外波長ではシリコンバルク内での再結合、可視光ではシリコンと酸化膜との再結合がスーパーリニアリティを発生させる主要因であることを明らかにした。この結果より、それら再結合を抑制することで、非直線性が発生しない Si PD の開発が可能であるという知見を得た。また、以上の非直線性の波長依存性の結果は、任意波長の入射光に対する Si-PD の出力の応答非直線性を補正できるため、入射光強度に対して精密な光測定が可能となる。

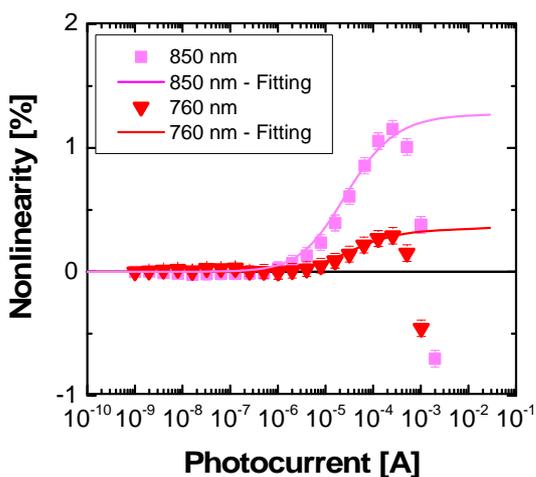


図2 760 nm と 850 nm での Si PD の応答非直線性と理論モデルとの比較

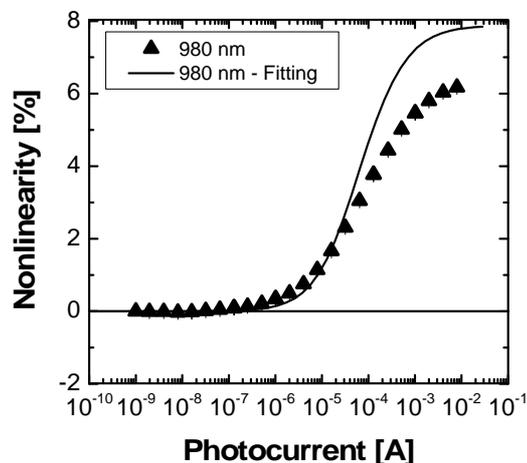


図3 980 nm での Si PD の応答非直線性と理論モデルとの比較

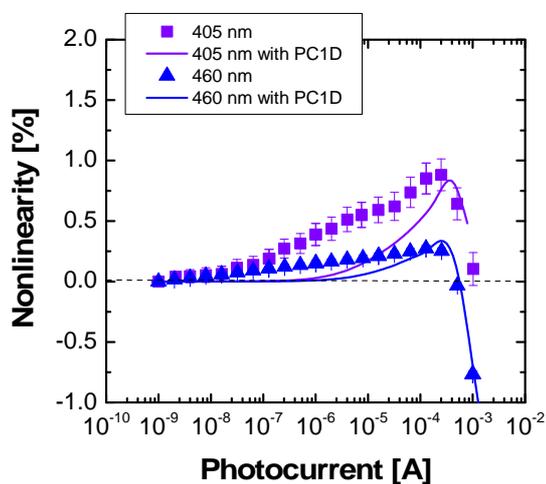


図4 405 nm と 460 nm での Si PD の応答非直線性とデバイスシミュレータとの比較

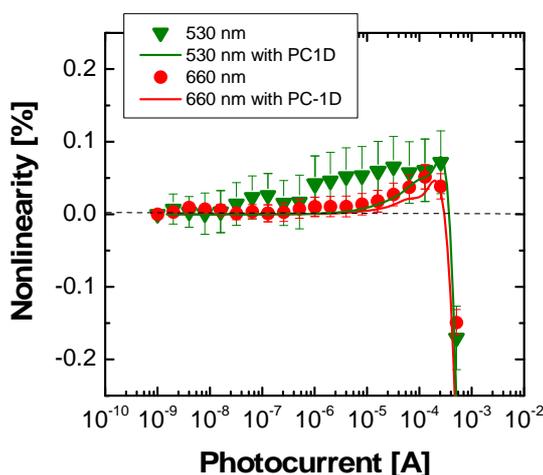


図5 530 nm と 660 nm での Si PD の応答非直線性とデバイスシミュレータとの比較

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2件)

田辺 稔、雨宮 邦招、沼田 孝之、福田 大治、Spectral supralinearity of silicon photodiodes in visible light due to surface recombination、Applied Optics、査読有、Vol. 55、No. 1、pp. 3084-3089、2016

DOI: 10.1364/AO.55.003084

田辺 稔、雨宮 邦招、沼田 孝之、福田 大治、Spectral supralinearity prediction of silicon photodiodes in the near-infrared range、Applied Optics、査読有、Vol. 54、No. 36、pp. 10705-10710、2015

DOI: 10.1364/AO.54.010705

〔学会発表〕(計10件)

田辺 稔、雨宮 邦招、沼田 孝之、福田 大治、可視光波長帯におけるシリコンフォトダイオードの応答非直線性の波長依存特性、第63回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学大岡山キャンパス、2016/03/21

田辺 稔、雨宮 邦招、沼田 孝之、福田 大治、シリコンフォトダイオードの波長に依存した応答非直線性の理論解析による精密光計測、2015年度計量標準総合センター成果発表会、産業技術総合研究所つくばセンター、2016/02/10

田辺 稔、雨宮 邦招、沼田 孝之、福田 大治、シリコンフォトダイオード応答非直線性の波長依存性の予測に向けた実験的・理論的考察、第76回応用物理学会秋季学術講演会、愛知県名古屋市名古屋国際会議場、2015/09/16

田辺 稔、雨宮 邦招、沼田 孝之、福田 大治、シリコンフォトダイオード応答非直線性の波長依存性要因の実験的・理論的検証 II、第62回応用物理学会春季学術講演会、東海大学湘南キャンパス、2015/03/13

田辺 稔、雨宮 邦招、沼田 孝之、福田 大治、シリコンフォトダイオードの応答非直線性の波長依存性 I、2014年度計量標準成果発表会、産業技術総合研究所つくばセンター、2015/01/2

田辺 稔、雨宮 邦招、沼田 孝之、福田 大治、シリコンフォトダイオード応答非直線性の波長依存性要因の実験的・理論的検証 I、第75回応用物理学会秋期学術講演会、北海道大学札幌キャンパス、2014/09/18

田辺 稔、雨宮 邦招、沼田 孝之、福田 大治、座間 達也、Spectral non-linear responsivity of silicon photodiodes、The 12th International Conference on

New Developments and Applications in Optical Radiometry、City of Espoo、2014/06/26

田辺 稔、雨宮 邦招、沼田 孝之、福田 大治、座間 達也、シリコンフォトダイオード応答非直線性の波長依存性要因の実験的・理論的検証、第61回応用物理学会春季学術講演会、青山学院大学相模原キャンパス、2014/03/18

田辺 稔、雨宮 邦招、沼田 孝之、福田 大治、座間 達也、シリコンフォトダイオードの応答非直線性の波長依存性、計量標準総合センター2013年度成果発表会、産総研つくば中央、2014/01/24

田辺 稔、雨宮 邦招、福田 大治、沼田 孝之、座間 達也、フォトダイオードの応答非直線性の波長依存特性 I、第74回応用物理学会秋季学術講演会、同志社大学京田辺キャンパス、2013/09/16

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

6. 研究組織

(1)研究代表者

田辺 稔(TANABE, Minoru)

産業技術総合研究所・物理計測標準研究部門・研究員

研究者番号：80586339