



## PRESS RELEASE

岡山大学記者クラブ

文部科学記者会

科学記者会

御中

令和 7 年 6 月 19 日

岡 山 大 学

### 最先端半導体技術開発に新たな分析手法を提供

#### ◆発表のポイント

- ・ 三次元 LSI などの最先端半導体開発に貢献する、新しい分析手法を開発。
- ・ 半導体 PN 接合の光励起による電子の動きとテラヘルツ波放射の関係を説明する単純化モデルを提案。
- ・ シリコン (Si) ウェハ内部に浅く形成された PN 接合の深さを、簡単に非破壊・非接触で、ナノメートル精度で、推定できることを実証。

岡山大学、ライス大学、サムスン電子、日本サムスンによる国際研究グループは、シリコンウェハに埋め込まれた PN 接合にフェムト秒レーザーを照射して生成されるテラヘルツ波を観察することで、非破壊かつ非接触で、簡単にウェハ内の PN 接合の深さを推定する分析技術を、6月20日午後3時（日本時間）、Springer Nature 出版「Light: Science & Applications」で発表します。PN 接合から放射されるテラヘルツ波と光励起された電子の複雑な動きを関連づける単純化したモデルを提案することで、電子の動きや内部電界などの情報を抽出でき、ウェハ表面近傍に浅く形成された PN 接合の深さをナノメートル分解能で定量的に推定することが可能になりました。

この技術は、三次元 LSI などの先進的な半導体デバイスの開発を支援する新技術で、従来の半導体製造工程における信頼性や省エネルギー環境にも貢献する包括的な測定ソリューションを提供することができるもので、半導体産業に大きな貢献が期待できます。

#### ◆研究者からのひとこと

半導体産業の再興は日本復活のカギを握ることが、ようやく認識され始めました。今また、キャッチアップが始まり、失った物以上に革新が必要とされています。その中で、材料開発やデバイス開発が注目を浴びていますが、3次元 LSI 開発などを支える新たな分析科学の誕生も必要となります。地味な分野ですが、半導体分析技術にも注目してほしいところです。



斗内教授



## PRESS RELEASE

### ■発表内容

#### <現状>

シリコン半導体は、半世紀にわたり、半導体産業と現代のエレクトロニクス産業の中心的存在で、その集積回路製造技術は、現代社会の基盤として不可欠な技術です。しかし、先進半導体開発は、デバイスの小型化・3次元化により高密度集積化を実現するため、常に新しい分析技術の誕生を待ち望んでいます。特に、シリコン（Si）の大きなウェハスケールで、デバイス内部の電気場分布、キャリア輸送特性、欠陥、および高速応答を、迅速かつ非破壊・非接触で評価する技術が切望されています。

#### <研究成果の内容>

今回、国際共同研究グループはフェムト秒レーザーを半導体に照射することにより発生するテラヘルツ波を検出・計測することで、シリコンウェハ内部に隠れたPN接合を非破壊・非接触で評価・分析できることを初めて示しました。図1に示すようにウェハ内に形成されたPN接合領域で励起された電子がn型Si層側へ、正孔がp型Si層側へ流れます。この時に発生する瞬間的な電流の流れで、テラヘルツ波は生成され、表面へと伝搬し、空間に放射されます。このテラヘルツ波を観測することで、ウェハ内部でのキャリアの主観的な動きをあらわにすることができます。PN接合の部分には、正電荷と負電荷の領域があるため、その接触による電界（ビルトイン電界）が存在するため、高速な電荷の動きは複雑ですが、本研究では、その動きとテラヘルツ波の関係を単純化したモデルで表すことで、PN接合の深さを推定できる新しい分析技術を開発することに成功しました。

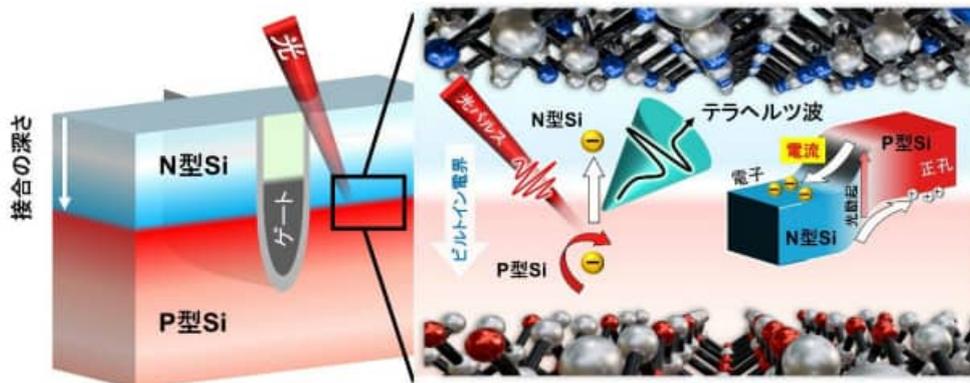


図1 ゲート埋め込み型トランジスタ構造とPN接合からのテラヘルツ波発生の様式図。

シリコンウェハ内部へ侵入する励起光の強度は深さに対して指数関数的に減少します。一方テラヘルツ波の電界強度は光キャリア密度に比例するため、発生するテラヘルツ波電界振幅からPN接合の深さを評価することができます。図2は異なるシリコンウェハから発生するテラヘルツ波の時間的な変化とPN接合深さの関係を表しています。どのウェハからのテラヘルツ波も約10ピコ秒（1ピコ秒=10<sup>-12</sup>秒）の位置にピークを持ち、その振幅はPN接合が深いほどに振幅が小さくなるのが分かります。図2bに示したテラヘルツ波ピーク振幅とPN接合深さの関係から、振幅は深さに対して指数関数的に変化しており、約5ナノメートルのPN接合深さの違いを明確に判別することが可能であるとわかります。

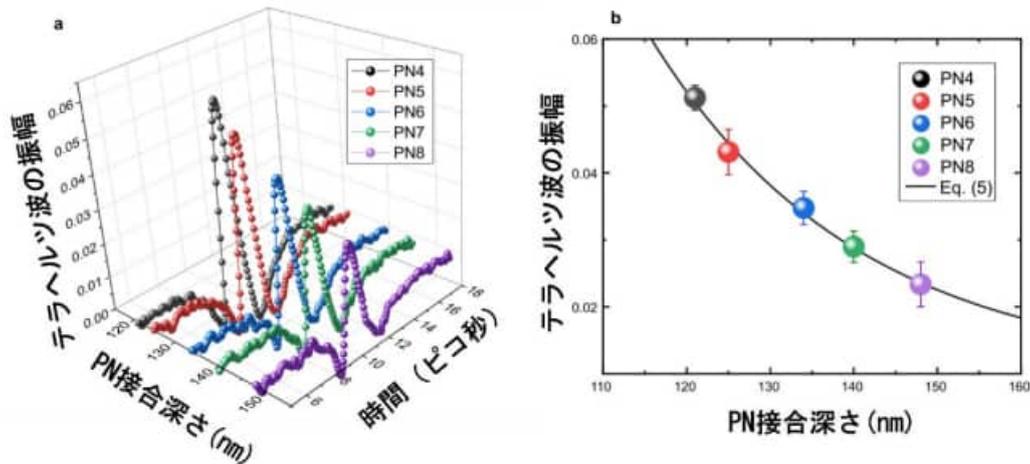


図2 ウェハから発生するテラヘルツ波。PN 接合位置が深いウェハでは得られる電界振幅が小さくなる様子が見られる。PN4~8 は深さの異なるサンプルを意味する。

若手研究者であるライス大学村上史和博士は、今回の成果を次のように説明しています。「シリコンの浅いPN 接合を励起するために短いレーザー波長を使用することでうまくいきました。典型的なフェムト秒レーザーの波長は 800 ナノメートル前後（赤色領域）ですが、その光の侵入する深さは、シリコンでは 10 マイクロメートルよりも長いいため、当初はシリコンウェハ表面の浅いPN 接合を、この手法を使って評価することは容易でないと考えていました。しかし、今回、その波長を半分（紫外領域の光）にしてみたところ、光の侵入する深さが浅くなるため、今回の目的に適していることを見つけました。今後は、波長を制御することに、より浅い接合部をより正確に評価でき、また深さ方向のプロファイルも評価できる可能性があります。

#### <社会的な意義>

半導体集積回路は、それなくして社会が成立しないほど不可欠なものとなっています。シリコンチップの製造には、膨大な量の化石燃料・化学薬品・きれいな水が必要とされています。微細化により生産の複雑さはますます増し、半導体ウェハ・デバイス評価技術は半導体産業にとっては重要な課題であり続けています。3次元集積回路の開発や従来半導体生産歩留まりを最大化することは、省エネルギーと廃棄物の最小化に不可欠で、それらを非破壊・非接触で分析・検査する技術は、その課題を解決するために重要なイノベーションをもたらします。今回の成果は、テラヘルツ波の発生検出がウェハ内部のPN 接合を非破壊・非接触での分析・評価に有効であることを示したことで、さらに他の技術と組み合わせることで、迅速かつナノメートルスケールの詳細な定量分析が可能となります。このテラヘルツ放射分光法が半導体製造プロセスに非接触試験を可能にする統合計測ソリューションを提供することが期待されます。



## PRESS RELEASE

### ■論文情報

論文名 : Non-contact and nanometer-scale measurement of PN junction depth buried in Si wafers using terahertz emission spectroscopy

掲載紙 : *Light: Science & Applications*

著者 : Fumikazu Murakami, Shinji Ueyama, Kenji Suzuki, Ingi Kim, Inkeun Baek, Sangwoo Bae, Dougyong Sung, Myungjun Lee, Sungyoon Ryu, Yusin Yang, and Masayoshi Tonouchi

DOI : <https://doi.org/10.1038/s41377-025-01911-0>

### ■研究資金

本研究の一部は、科学研究費補助金の支援を受けて実施しました（基盤研究 A、23H00184）

### ■補足・用語説明

#### ※1 PN 接合

電子が電流を運ぶ半導体を N 型半導体といい、正孔（正の電荷をもつ電荷）が電流を運ぶ半導体を P 型という。P 型と N 型がつながることで PN 接合が形成され、ダイオードとして動作するもので、半導体デバイスの基本要素（半導体表面、金属/絶縁体/半導体構造など）の一つである。接合面では正電荷の領域と負電荷の領域が接触することで、電界（ビルトイン電界）が存在する（空乏層という）。

#### ※2 フェムト秒レーザー

極短光パルス発振のレーザーで、その光のパルス幅が、 $10^{-14}$  から  $10^{-13}$  秒程度で、繰り返し周期が数 Hz から  $10^9$  Hz 程度で、さまざまなパワーのものがあり、光通信から、計測、加工などさまざまな場面で応用されている。代表的なものにチタンサファイヤフェムト秒レーザーがあり、パルス幅 100fs ( $10^{-13}$  秒)、繰り返し周期が 80MHz 程度のものが広く普及している。

#### ※3 テラヘルツ波

周波数が 1 テラ（1 兆）ヘルツ前後にある電磁波の総称。1 テラヘルツは波長にして約 0.3 ミリメートルである。光と電波の中間に位置する電磁波であり、光の直進性と電波の透過性双方の性質を併せ持つ。1 光子のエネルギーは、X 線のその 100 万分の 1 相当であり、物質を被曝させることなくイメージングすることができる。がん診断、薬物検査、半導体デバイス検査、食品の品質管理、超高速通信など、多岐に渡る応用利用が期待されている。ここでは、フェムト秒レーザー照射により半導体中で電子が動くときに発生する高速な電流が誘起する電磁波をテラヘルツ波と呼んでいる。

#### ※4 テラヘルツ放射分光法

放射されるテラヘルツ波を用いて、電荷の動きを議論する分析法で現在注目を浴びているが、まだ確立したものではない。フェムト秒レーザー励起によるテラヘルツは発生の原理と放射分光への



## PRESS RELEASE

応用については、著書「テラヘルツ時間領域分光：物質科学への応用」（内田老鶴圃、2021）で詳細に説明されている。

### <お問い合わせ>

岡山大学学術研究院先鋭研究領域（異分野基礎）  
特任教授 斗内政吉（とのうちまさよし）  
（電話番号） 080-7015-4935



岡山大学は持続可能な開発目標（SDGs）を支援しています。