

令和元年5月27日現在

機関番号：13301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13716

研究課題名(和文)炭酸ガスレーザーを用いたTHz局在励起の研究

研究課題名(英文)Study of THz nonlinear localization using carbon dioxide lasers

研究代表者

佐藤 政行(Masayuki, Sato)

金沢大学・数物科学系・教授

研究者番号：00266925

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：固体結晶の表面に非線形性により出現する局在した励起を生成、検出することを試みた。格子の周波数はテラヘルツであり、一般に発生が難しい。一方、赤外の炭酸ガスレーザーは強力である。2台の炭酸ガスレーザーの差の周波数によりテラヘルツ振動を非線形結晶表面で直接発生させ、また別の2台を用いて検出する。3台のレーザーを準備し実験を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多数の巨視的な非線形振動子からなる一様なアレイでは、同じ振動子からなるにもかかわらず、ある点に局所的にエネルギーの集中が起こることが観測されている。このような非線形局在励起は固体結晶中にもできると考えられるが未だはっきりとした観測例はない。2次元表面での局在なら外部から観測が容易と考え実験を企てた。このような局在励起が制御できるようになれば、ナノサイズのメモリーなど応用は広い。

研究成果の概要(英文)：Nonlinear localized vibrations on a solid material surface were tried to generate and detect. Phonon frequency is about a terra-hertz and it is generally hard to generate. On the other hand, a carbon dioxide laser is a high power infrared source. Three lasers were renovated in total. Using two carbon dioxide lasers, attempt for generating nonlinear terra-hertz vibrations at a surface of a crystal was made. Detecting of the localized excitation was planned to do using other set of lasers.

研究分野：非線形物理学

キーワード：非線形局在励起 炭酸ガスレーザー 固体表面 テラヘルツ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

非線形性と格子性により局在励起が安定に存在できることが約30年前(1988)に発見された。十数年後までには MEMS 振動子アレイやジョセフソン回路などの巨視的な非線形格子では直接観測が容易で存在が確立されており、局在励起の性質や制御の研究がなされている。一方、固体中の局在励起ではナノサイズの励起が生成されることが予想されるが実験が困難で理論やシミュレーションによる研究がなされている。最近では材料工学の立場から熱伝導の理解や制御への応用までも考えられている。固体での実験も行われたが固体内部のため直接観測は無理でスペクトル観測からのみ研究されており、局在励起の存在が示唆されるだけで、推測の域を出ない。

近年、ロシアの格子振動の分子動力学シミュレーショングループは結晶の表面に局在する非線形局在励起の報告を行った。(図1)3次元固体中では、局在励起は生成してもアクセスする方法がないが、表面の2次元面内に局在する現象ならば外部アクセスが可能であり興味深い。例えば、スペクトル観測と微小探針による表面観察の組み合わせが考えられる。

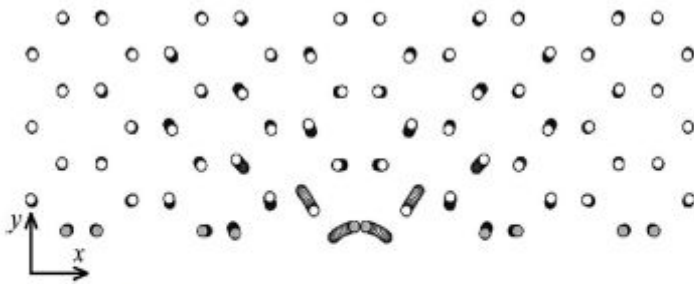


Figure 2 Stroboscopic picture of atomic motion in the vicinity of DB excited at the edge of a graphene nanoribbon strained with $\epsilon_{xx} = 0.15$. The edge atoms are colored in light gray.

図1 分子動力的 (MD) に

得られた DB=discrete breather の振動パターン。下側が表面である。2次元表面に点状に局在した振動がみられる。これは光学活性ではないので、このような振動の検出は難しい。しかし、このような非線形を原因とする局在振動は MD で盛んに研究され、興味を持たれている。果たしてこのような振動波本当に存在するのであろうか。S. Dmitriev, Physica Status Solidi B-1Phys. Status Solidi B, 1.5 (2015) / DOI 10.1002/pssb.201451673

2. 研究の目的

格子振動による局在励起を表面に生成する。このため2台の炭酸ガスレーザーからの赤外光の差周波発生を用いる。試料にはもともと2次の非線形性のある、GaAs や CdTe などの結晶を用いる。差周波発生、局在励起生成、試料の非線形性を用いる。さらに局在励起の検出に、局在励起の持つ大きな非線形性を利用する。

3. 研究の方法

格子振動による局在励起を生成するために、2台の炭酸ガスレーザーからの赤外光の差周波発生を用いる。非線形局在を表面で生成するその非線形性を利用し、直接局在励起を生成する。一般には差周波発生効率は低いので、ある結晶で生成した差周波を用いて別の結晶を励起する方法では局在励起の生成は困難である。しかし、差周波発生と局在励起発生を同じ結晶で場所で行えば効率が良いと期待される。

試料はもともと2次の非線形性のある、GaAs や CdTe などの結晶を用いる。表面フォノンの周波数を目標に、2台のレーザーの波長をセットする。局在励起(表面局在)の周波数は表面フォノンの周波数よりも非線形性により低いことが予想される。

検出も非線形性を用いる。もう一台の炭酸ガスレーザーからの赤外光と、生成に用いる2台のうちのレーザー一つの組み合わせで別の周波数のテラヘルツ光を作り、局在励起のからの信号とダイオードでミキシングするとマイクロ波になる。これを検出することが考えられる。あるいは試料表面で直接検出に用いる差周波を生成する。局在励起の存在は、2台の差周波が表面フォノン近傍で非線形シグナルが大きくなること、周波数差が低い方がシグナルが大きくなるなどの兆候が期待される。

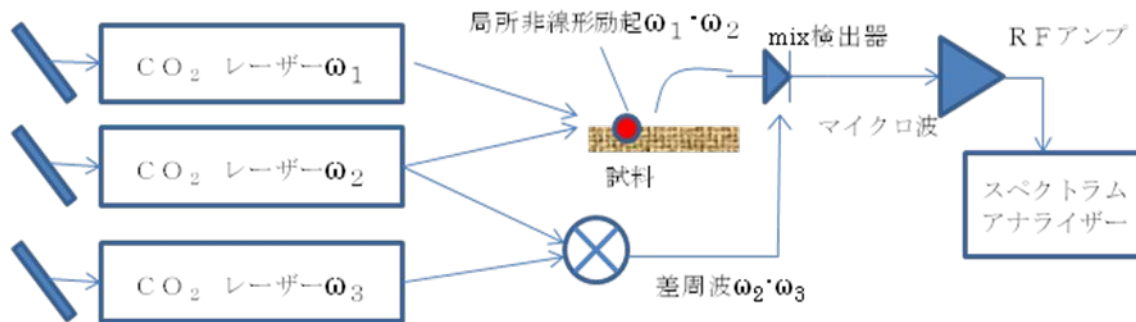


図 2. 実験概略図

まず、3台のCW炭酸ガスレーザーを整備する。GaAs 結晶を用いた場合でも差周波発生効率の低いので、強力な炭酸ガスレーザーの方が望ましい。このためパルスではあるがTEA（横励起高気圧）レーザーも考慮に入れる。テラヘルツで動作するダイオードは学内の予算で購入された。

4. 研究成果

まず、炭酸ガスレーザーシステムの整備を行った。ヘリウムガスが高価であり、手に入りづらくなったりするので、循環システムを構築してあったが、2台のみ（図3のAdkinとapollo）であった。3台目として、COレーザー（図3のadkin2）を改造して整備した。プラズマチューブのガス導入部が壊れていたので作り直す必要があった。欠けているチューブの端を切り落とし、プリュースター窓のアダプターにガス導入チューブを取り付けた。ガス循環システム（図3）には赤外式の炭酸ガス濃度センサーを作成し、デジタル流量計を追加、還流側に一酸化炭素酸化触媒を追加、ガス冷却器を追加するなど改良を行った。数時間程度の運転が1度のガス充填でできる。炭酸ガスの分解により、出力が低下した場合、炭酸ガスセンサーを見ながらポンペより追加することである程度回復する。

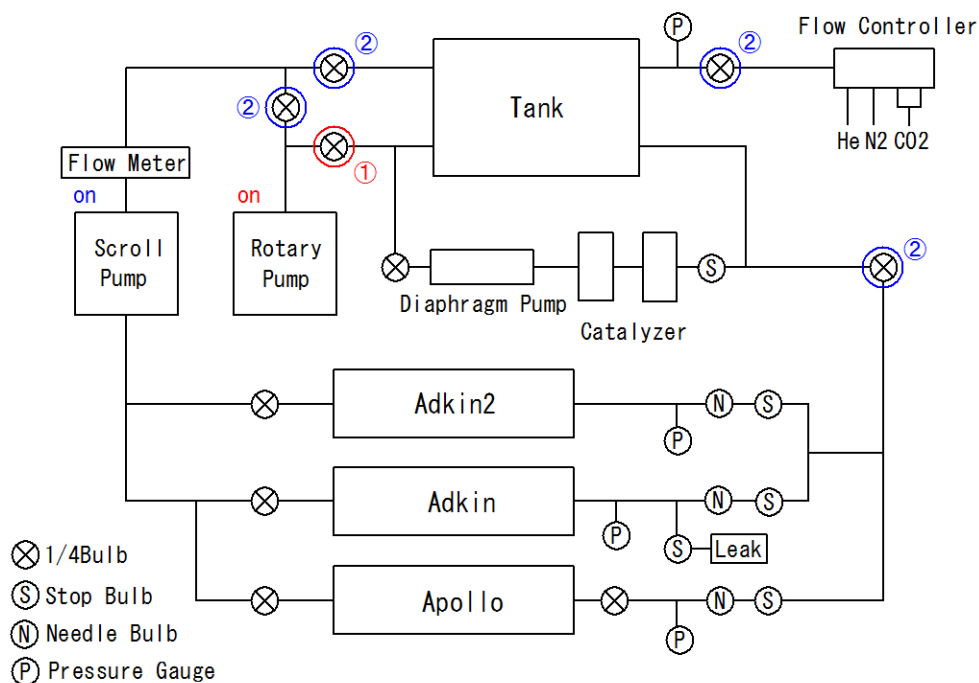


図 3. 3 台のガスシステム

次にGaAsを用いて差周波発生を試した。実験装置は図3のようである。テラヘルツと、赤外光で屈折率が異なるのでノンコリニアの位相整合を試みている。角度をつけてビームを交差させている。レーザーの出力が10Wと1Wと小さかったためかテラヘルツ発生は確認できていない。後日、結晶方位をラウエ法で調べてみると(100)面の結晶であり、電場方向が非線形が最大の(111)方向成分を含んではいるが一致していないことがわかった。その後、レーザーを再調整し、30Wと20W出力が出ようになった。今後再実験を行う予定である。

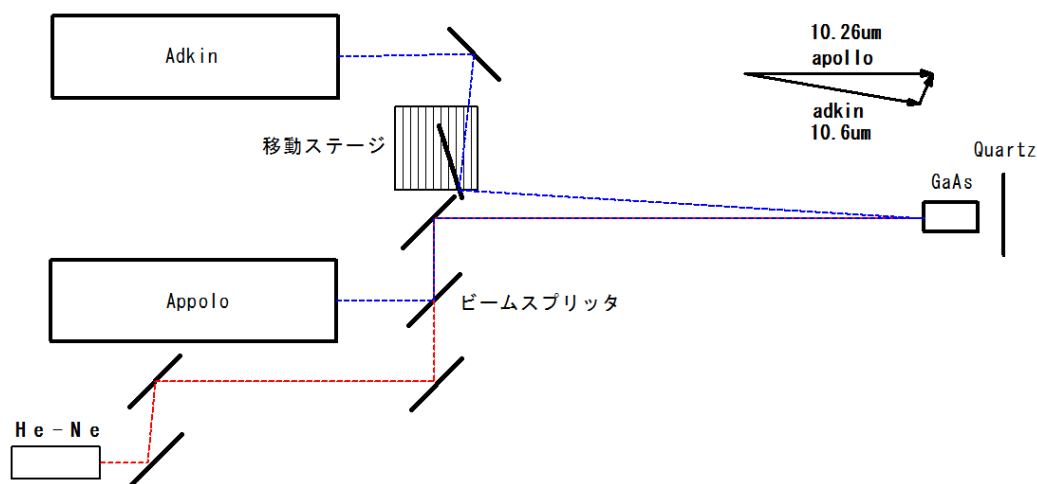


図 3. 差周波発生の実験装置図 結晶の後ろに石英板をおいて炭酸ガスレーザーからの直接光を遮断し、差周波光をその後ろに置いた検出器で検出する。

また、GaAs 以外に CdTe 結晶を用意した。ラウエ法で方位を確認し非線形性のある(111)方向が表面に垂直であることがわかってる。レーザー光を表面に沿う方向で、偏光電場を表面に垂直方向に入射する。これにより表面に垂直方向のテラヘルツ電場が生成できる。この電場を

用いて表面局在励起を生成することを行う予定である。

予備用として、TEA炭酸ガスレーザーを励起レーザーとして用いるD₂Oレーザーを作成した。3mのガラスチューブにKRS-5入射窓と石英出射窓を取り付けた構造である。9.66 μmで数Jの励起に対して波長66 μmで数mJの出力が得られた。将来、励起用や検出用のテラヘルツ光源として用いられると期待している。

現在まで、我々は固体の非線形局在励起の検出を目指して研究を行ってきたが、未だはっきりとした結果はどこからも得られていない。最初に非線形局在励起が1988年にSievers-武野により提唱されてからすでに30年がたち、2018年にはそれを記念して京都とギリシアでそれぞれ、International Symposium on Intrinsic Localized Modes, 30th Anniversary of DiscoveryとInternational work shop: Nonlinear localization in latticesが開催された。移動する局在励起の研究が最近の進展である。固体に関しては、最近では熱伝導の制御の観点から興味もたれているが分子動力学的なシミュレーションによる進展が多い。実験の進展はあまりなく、例外的にArchillaらが雲母(モスコバイト)中で電荷をもち高速走行する局在励起についての実験的な観測を報告している。本研究の表面での非線形3次元局在は固体中の非線形局在よりも観測の可能性があると考えられるので、以後も引き続き研究を進めたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 件)

〔学会発表〕(計 1件)

International work shop: Nonlinear localization in lattices, held at AKSS, Spetses, Greece, 18-26.6.2018, Experiments and Simulations of Driven-damped Intrinsic Localized Modes, M. Sato

〔図書〕(計 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：曾我 之泰

ローマ字氏名： Yukihiro Soga

所属研究機関名：金沢大学

部局名：数物科学系

職名：助教

研究者番号(8桁): 90525148

(2)研究協力者

研究協力者氏名：A. J. Sievers

ローマ字氏名： A. J. Sievers

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。