

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01846

研究課題名(和文)電子温度と格子温度のナノ計測による非平衡エネルギーダイナミクスの解明

研究課題名(英文)Revealing nonequilibrium energy dynamics by nano-scale temperature mapping of electrons and lattice

研究代表者

WENG QIANCHUN (Weng, Qianchun)

国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・研究員

研究者番号：20835277

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：様々な新規機能素子開発および新奇な基礎的物性現象解明のためには、電子系の持つエネルギーの流れをナノスケールで明らかにすることが重要である。しかし従来、測定上の制約でその解明は困難だった。本研究では、"走査ノイズ顕微鏡(SNoiM)"と呼ばれる新しい低温走査プローブ顕微鏡を開発し、非平衡電子デバイスにおける電子温度と格子温度をナノスケールで測定することができた。GaAs/AlGaAsナノデバイスに対して、電子温度分布と格子温度分布を直接可視化した。その結果から非平衡電子系からフォノン系へのエネルギー散逸がホットフォノンボトルネック効果によって抑制されること明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

基礎物性研究における新規現象追求と、素子開発における微細化・高機能化の要請から、電子系による熱発生をナノ領域で計測する必要性が高まっているが、それを可能にする測定手段は今まで存在しなかった。本研究では、局所的温度を可視化して電子系の運動をエネルギーの流れを含めてナノスケールで画像化することで、その要求を満たす現在唯一の測定技術である。基礎研究だけでなく産業界における半導体能動素子の製造・開発・評価の現場でも役立つ顕微鏡に発展させる。半導体分野に関してはPost More時代の指針を与えることが期待されるとともに、さらに新たな応用分野として、光触媒材料、電池材料への応用が有望と考えられる。

研究成果の概要(英文)：In order to develop various new functional devices and elucidate novel basic physical properties, it is important to clarify the energy flow of electronic systems at the nanoscale. However, in the past, it was difficult to elucidate this problem due to measurement limitations. In this study, we developed a new low-temperature scanning probe microscope called "scanning noise microscopy (SNoiM)", which measures temperatures in non-equilibrium electron devices at the nanoscale. For GaAs/AlGaAs nanodevices, we directly visualized the electron temperature distribution and lattice temperature distribution. From the results, it was clarified that the energy dissipation from the non-equilibrium hot electron system to the phonon system is significantly suppressed due to the hot phonon bottleneck effect.

研究分野：応用物理

キーワード：ナノ熱測定 テラヘルツ検出 走査プローブ顕微鏡 近接場顕微鏡

1. 研究開始当初の背景

現代の先端的技術を支えるほとんど全ての機能素子（電子・光学・熱素子）中では、電子（担体）系がまず外場（電場・光・温度場）と相互作用してエネルギーを獲得し、次に、獲得した余剰エネルギーを電子系が電子フォノン相互作用を介して格子系に受け渡し、最終的に、格子系内部でエネルギーがフォノン間相互作用を通して熱に帰す、

外場 電子系 格子(フォノン)系 熱、

という過程が起こっている(図1上)。一般に電子系は格子系との熱平衡から外れて、余剰のエネルギーを持った非平衡分布（“熱い電子系”）を形成するが、格子系へのエネルギー散逸がいったん起こると熱伝導のために素早く均一に拡散する。そのため、(熱い)電子系の温度分布 $T_e(r)$ と格子系の温度分布 $T_L(r)$ は一般に異なり、 $T_e(r)$ と $T_L(r)$ の双方を知ることが重要だが、特に電子温度 T_e が現象の特徴を直接反映するため、その空間分布を知ることが重要である。

しかし従来、電子系の温度場を調べることは実験的に困難であり、それが、電子・格子系の非平衡現象の解明に一般的な限界を与えていた。

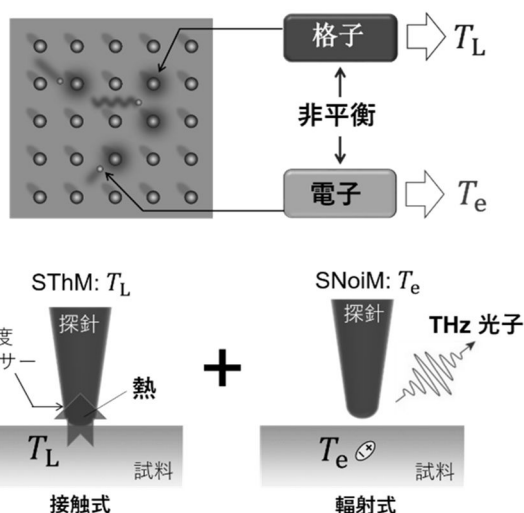


図1 .(上) 電子が外場により駆動されて格子との平衡から外れる ($T_e > T_L$)、(下) 格子の局所温度 (T_L) は熱接触による SThM により計測され、電子系の局所温度 (T_e) は揺らぎが作る近接輻射場を検出する SNoiM により別個にマッピングされる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、従来不可能だった非平衡試料における T_e と T_L の空間分布計測を最近開発されたナノ計測技術を応用して可能にし、そのことで、非平衡系試料のナノスケールにおける温度ダイナミクスの理解を格段に進展させることである。

3. 研究の方法

走査熱顕微鏡 (Scanning thermal microscope, SThM) は、最近のナノメートル分解能の温度計測に対する関心の高まりに応じて、基礎研究分野への応用が浸透している計測技術である。しかし、SThM で計測される温度は格子温度 (T_L) であり、電子温度ではないため、同一条件下で得られる温度画像が格子熱伝導によって等方的に広がって平準化したものになり、電子系の現象についてな情報が得られず、現象の解明に至らない。最近、“走査型ノイズ顕微鏡 (Scanning Noise Microscope, SNoiM)” と呼ばれる新しい走査型ナノ温度計を開発し、電子温度 (T_e) の計測・マッピングに初めて成功した。この手法(図1下右)は、電子系がその揺らぎによって試料表面に生成するテラヘルツ (THz) 領域の近接場 (エバネッセント電磁 (EM) 場) を探針プローブで散乱し、生じた散乱波を超高感度テラヘルツ (THz) 検出器で捉えるという、全く新しい原理に基づく超高感度の近接場顕微鏡である。本研究は、 T_e を計測する最先端 SNoiM を開発し、 T_L を計測する SThM の熱接触の技術と融合して、非平衡試料における T_e 分布と T_L 分布を同一条件下で同時に可視化する。そして、その装置を非平衡系試料のナノスケールにおける温度ダイナミクスの解明に応用する。

4. 研究成果

(1) 新原理超高感度テラヘルツ検出器の開発

SNoiMの心臓部分として超高感度テラヘルツ検出器を開発した。電界効果に基づく通常のCSIP検出器を作製した(図2左、サイズ: $75 \times 75 \mu\text{m}^2$)。さらに、もっと高い感度をもつ微小検出器(サイズ: $< 1 \mu\text{m}^2$)を作製に成功した。作製した微小検出器で、通常の光検出メカニズム(例えば、トンネル効果(tunneling effect)または電界効果(field effect))と異なる新しい検出方法を開発した。このメカニズム(photo-gating)により、検出器の暗電流(dark current)を大幅に抑制し、非常に高いTHzオンオフ比(on-off ratio)を実現した(図2右)。WGゲートに負のバイアスを印加すると検出器の幅はもっと細くして、photogating効果および検出パフォーマンスを大幅に向上する(図2)。(特許出願: 光検出器及び光検出方法、出願番号2022-035889)

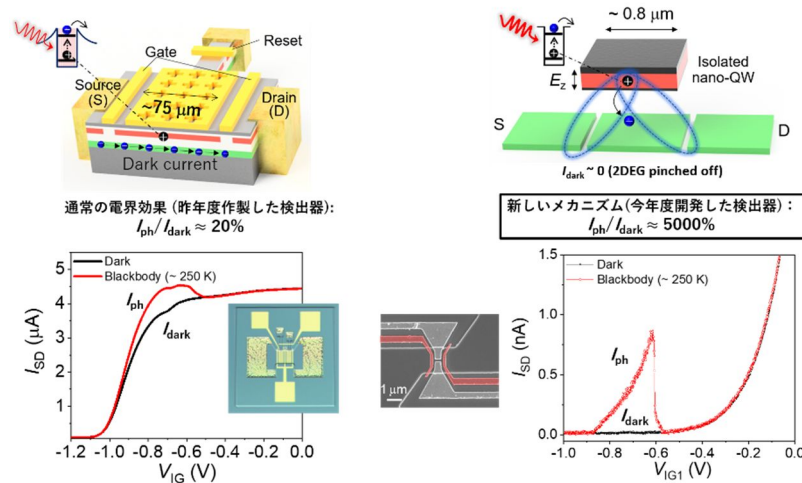


図2. 開発された新原理超高感度テラヘルツ検出器。

(2) 最先端 SNoiM を開発し、ナノスケールで温度を測定

本研究で、低温 SNoiM を開発することに成功した。この顕微鏡は約 100K の温度で通電デバイスの電子温度を測定することができた。テスト試料は金属細線(NiCr)である。まず、far-field 熱画像を測定することができた。電流を印加するとき、試料の加熱がよく見えますが、回折限界があるため分解能(約 $20 \mu\text{m}$)が悪い。ナノスケール探針を導入して、超解像近接場信号を測定することができた。室温と同様に、SNoiM 信号は探針が試料から遠ざかるにつれて急速に減衰し、エバネッセント波の特徴を示している。

(3) 非平衡電子デバイスにおけるエネルギー散逸ボトルネックの発見

T_e を計測する最先端 SNoiM と、 T_L を計測する SThM の熱接触の技術を融合して、非平衡試料における T_e 分布と T_L 分布を同一条件下で同時に可視化した。観察例1としてNiCr加熱デバイスは、電子系と格子系平衡状態になったので T_e 画像と T_L 画像は全く同じである(図3左)。GaAs/AlGaAs 2次元ナノデバイスは、高電場でホットエレクトロを励起されるため、 T_e と T_L の空間分布がナノスケールで大きく異なることを明らかにした(図3右)。その結果から非平衡電子系のフォノン系へのエネルギー散逸が“ホット・フォノン・ボトルネック効果”によって抑制されること明らかにした。

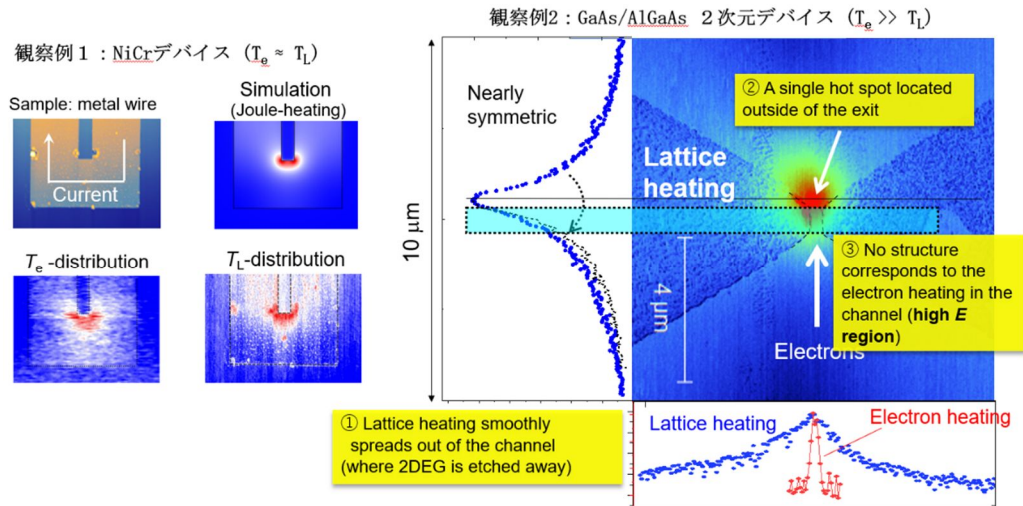


図3. 非平衡試料(左: NiCr 加熱デバイス; 右: GaAs/AlGaAs 2次元ナノデバイス)における T_e 分布と T_L 分布を同一条件下で同時に可視化した。

結論: 本研究で最先端ナノスケール温度測定技術を開発し、従来の格子温度場(T_L)のみの計測による非平衡系現象の知見を大きく超えて、熱い電子系を含む非平衡動力学についての実験的理解を格段に深める。本研究で対象とする専門分野の枠を超えて、将来、今まで存在しなかった新しい研究分野の創設につながってゆくことを期待する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Weng Qianchun, Yang Le, An Zhenghua, Chen Pingping, Tzalenchuk Alexander, Lu Wei, Komiyama Susumu	4. 巻 12
2. 論文標題 Quasiadiabatic electron transport in room temperature nanoelectronic devices induced by hot-phonon bottleneck	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-021-25094-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Lin Kuan-Ting, Nema Hirofumi, Weng Qianchun, Kim Sunmi, Sugawara Kenta, Otsuji Taiichi, Komiyama Susumu, Kajihara Yusuke	4. 巻 13
2. 論文標題 Nanoscale probing of thermally excited evanescent fields in an electrically biased graphene by near-field optical microscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1882-0786/abae0a	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 2件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Qianchun Weng
2. 発表標題 Direct visualization of energy transport and dissipation in nanoscale systems
3. 学会等名 日本物理学会領域9シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Q. Weng, L. Yang, Z. An, P. Chen, A. Tzalenchuk, W. Lu, and S. Komiyama
2. 発表標題 Imaging quasiadiabatic hot electron transport induced by hot-phonon bottleneck
3. 学会等名 24th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS)（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Qianchun Weng
2. 発表標題 IR/THz Scanning Near-field Microscopy without external illumination
3. 学会等名 The 12th International Conference on Information Optics and Photonics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Qianchun Weng
2. 発表標題 走査雑音顕微鏡 (SNoiM)
3. 学会等名 Nanospecプローブ顕微鏡研究部会 合同シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 光検出器及び光検出方法	発明者 翁銭春、小宮山進、 今田裕、金有洙	権利者 国立研究開発法 人理化学研究所
産業財産権の種類、番号 特許、2022-035889	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------