

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：12605

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15023

研究課題名(和文) Novel terahertz NEMS bolometers by using two-dimensional nanomaterials

研究課題名(英文) Novel terahertz NEMS bolometers by using two-dimensional nanomaterials

研究代表者

張 亜 (Zhang, Ya)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80779637

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,700,000円

研究成果の概要(和文)：グラフェンなどの2次元材料は、単一層や少数層の原子からなり、微小な熱容量・面内熱伝導を持っているため、高感度・高速なテラヘルツセンサの実現に有望である。本研究では、CVD成長された単層・多層グラフェンを用い、異種金属電極を付き浮遊型グラフェン光検出器を作製した。入力光を照射すると、グラフェン膜が加熱され、ゼーベック効果により、グラフェンの高低温領域の間に電圧差が生じる。光電力<2mWの場合、応答性は約90V/Wとなった。また、入射光の変調周波数を100Hzから1kHzまでに増加した時、光応答の低下はまったく見られないため、高感度・高速なテラヘルツセンサの実現に寄与すると期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

テラヘルツ・赤外領域の分光・検出技術は、基礎科学、医学・薬学、製造業、安全・安心分野など様々な分野への応用として注目されている。このような技術を社会の様々な場面で広く応用展開していくためには、極低温への冷却を必要としない高感度・高速のテラヘルツ・赤外検出用ボロメータの開発が必要不可欠である。本研究では、新規な2次元ナノ材料を用いたボロメータの動作原理を検証し、2次元ナノ材料の超低熱容量・超低熱伝導のメリットを利用して超高速・高感度ボロメータの実現を可能にする。そのため、本研究はテラヘルツ・赤外光を利用する産業分野に寄与する。

研究成果の概要(英文)：Two-dimensional materials such as graphene have a very small heat capacity and in-plane thermal conductance, and thus are very promising for realizing sensitive and fast terahertz thermal sensors. By using CVD-grown graphene, we have developed a photodetector with a suspended graphene layer and two different types of metal electrodes. When irradiated with the input light, the graphene film is heated up, and the Seebeck effect causes a voltage output between the two electrodes (Au-Al). We have found that when the input light power<2mW, the photodetector gives a responsivity of ~90 V/W. Moreover, when the modulation frequency of the incident light is increased from 100 Hz to 1 kHz, there is no observable decrease in the optical response, indicating that the thermal time constant is very small. The result shows that the fabricated graphene photodetector will be useful for realizing sensitive and fast terahertz sensors.

研究分野：半導体デバイス テラヘルツ技術

キーワード：テラヘルツ グラフェン 2次元材料 光センサ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ・赤外領域の分光・検出技術は、基礎科学、医学・薬学、製造業、安全・安心分野など様々な分野への応用として注目されている。また、近年では、装置の小型化・高性能化が進み、実験室での計測器や、生産現場や医用応用などオンサイトで用いられる小型ポータブルの測定器への展開も急速に進んでいる。このようなテラヘルツ領域の計測技術を、社会の様々な場面で広く応用展開していくためには、極低温への冷却を必要としない高感度・高速のテラヘルツ・赤外検出器の開発が必要不可欠である。

光子エネルギーが非常に小さいテラヘルツ・赤外領域では、光を一旦熱に変換し、温度上昇による抵抗の変化などを信号として用いるボロメータ技術が有効である。一般に、基礎研究に用いられるボロメータは、極低温における半導体や超伝導体などの抵抗の温度依存性を信号として用いるため、大掛かりな冷却が必要となり、実用的ではない。また、焦電検出器、Vox ボロメータなどの室温で動作するテラヘルツ検出器は存在しているが、従来のバルク材料は熱容量及び熱伝導が大きいいため、センサの感度が不十分であり熱応答が遅いという問題がある。

2. 研究の目的

本研究は、新規な2次元ナノ材料を用いて、高感度・超高速なテラヘルツ検出器を実現することを目的とする。グラフェンなどの2次元材料は、単一層や少数層の原子からなり、非常に小さな熱容量・面内熱伝導を持っているため、高感度・高速な熱型の光センサの実現に非常に有望である。

3. 研究の方法

本研究では、単層/多層グラフェンを用いて超高感度で高速な光検出器の作成・評価を行う。サポート基板から熱的に隔離された浮遊型グラフェン膜を作製する。入力光を照射すると、浮遊型グラフェン膜が加熱され、グラフェン膜内にホットエレクトロンと内部熱応力が発生する。グラフェン NEMS 共振器の共振周波数のシフトを測定したり、熱的に誘発された光電流または電圧を測定したりするなど、グラフェン膜の温度上昇を読み取るためのさまざまなタイプの原理が存在する。本研究では、主に後者の方法に成功した。

4. 研究成果

(1). 浮遊型グラフェン光検出器の作成

浮遊型グラフェン光検出器の作成過程及び検出器構造の概要図は図 1(a)に示されている。単一層、あるいは多層(6~8層)のCVD成長グラフェンをシリコン(Si)/SiO₂基板に転写し、酸素プラズマエッチングによって小さなダッシュ(長さ:30μm、幅:6-10μm)をパターン化した。金属電極をグラフェンダッシュの上に堆積させることで、グラフェン層と電気的に導通とした。バッファードフッ酸(BHF)あるいは、気相フッ酸による犠牲層であるSiO₂層をエッチングし、浮遊型グラフェン素子を完成した。Au-Au 同じ金属電極を付きグラフェン素子、Au-Al 異種金属電極を付きグラフェン素子の2種類のグラフェン素子を作製した。作製したサンプルの顕微鏡画像を図 1b-1cに示している。

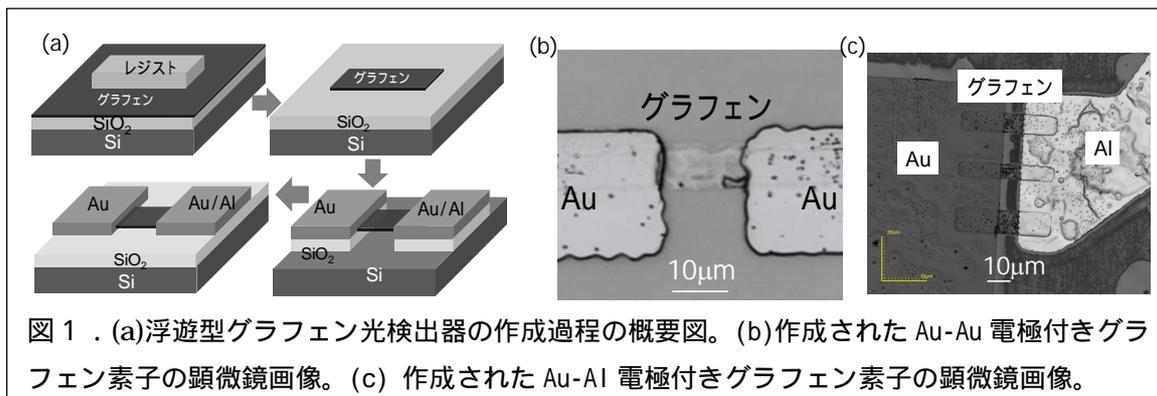


図 1 . (a)浮遊型グラフェン光検出器の作成過程の概要図。(b)作成された Au-Au 電極付きグラフェン素子の顕微鏡画像。(c) 作成された Au-Al 電極付きグラフェン素子の顕微鏡画像。

(2). 浮遊型グラフェン光検出器の評価

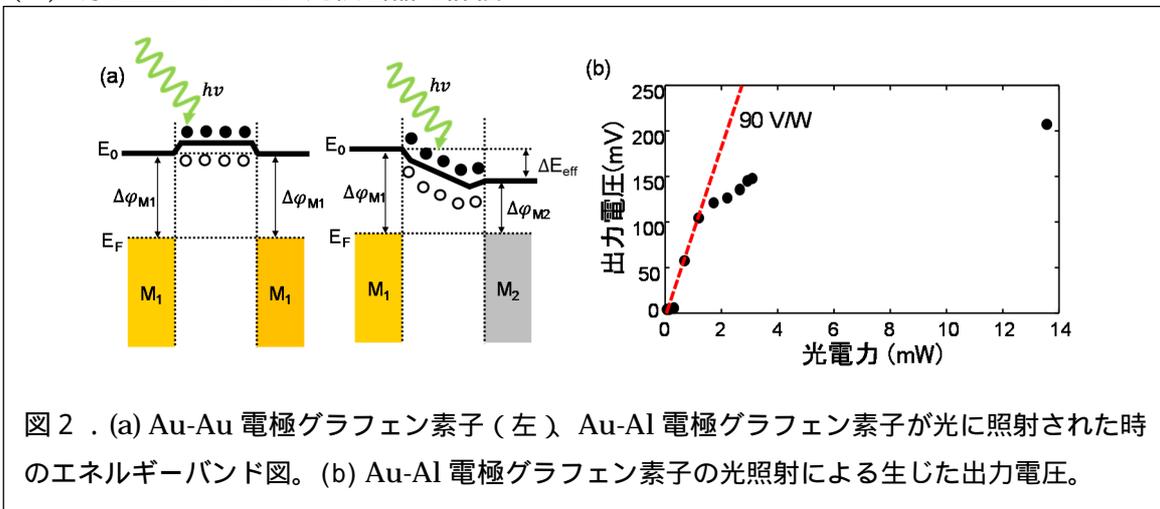


図2 . (a) Au-Au 電極グラフェン素子 (左) Au-Al 電極グラフェン素子が光に照射された時のエネルギーバンド図。 (b) Au-Al 電極グラフェン素子の光照射による生じた出力電圧。

図 2 (a)はグラフェン素子の光照射される時のエネルギーバンド図を示している。入力光が照射されると、2つの電極間のグラフェン領域は加熱によって、電極の下領域よりも高温になる。ゼーベック効果により、グラフェンの高温領域と低温領域の間に電圧差が生じる。Au-Au の場合、両方の電極が低温エリアにあるため、光照射による電圧出力はない。一方、2つの電極が仕事関数を持つ金属である場合、つまり Au-Al 電極の場合、グラフェン膜においてフェルミレベルに勾配が発生し、光励起・光熱励起が生じることで電子が流れ、Au-Al 電極の両端に出力電圧が発生する[1]。図 2 (b)は Au-Al 電極グラフェン素子は可視光(波長 400nm)に照射された時の出力電圧を示している。照射の光電力が 2mW 以下の場合、光に対する応答性は約 90V/W となった。しかし、照射光の増加に伴い、出力電圧は 200mV で飽和した。この飽和電圧は Au-Al 電極による生じたフェルミレベルの差であると理解している。

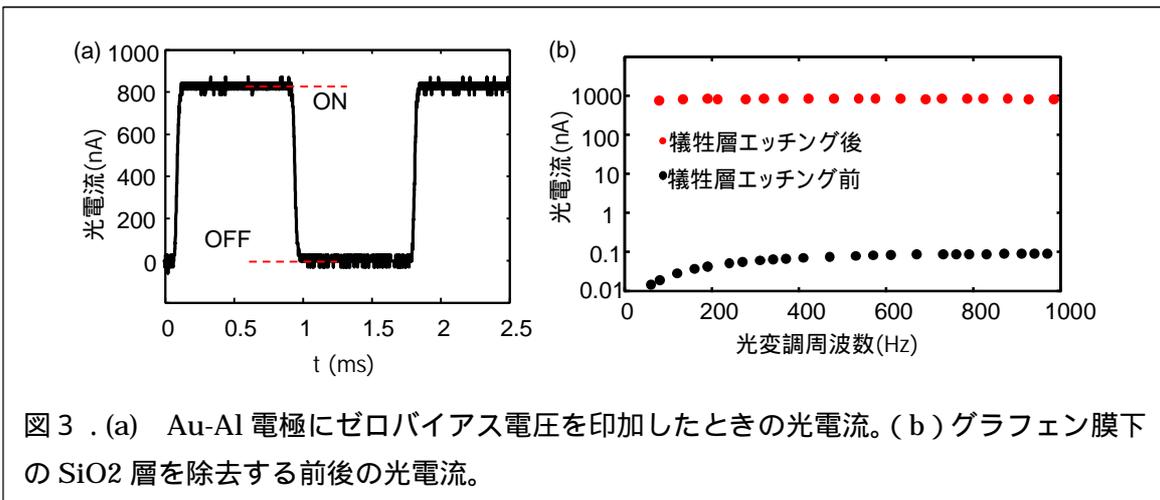


図3 . (a) Au-Al 電極にゼロバイアス電圧を印加したときの光電流。 (b) グラフェン膜下の SiO₂ 層を除去する前後の光電流。

図 3 (a) は、Au-Al 電極にゼロバイアス電圧を印加したときの光電流を示している。見てわかるように、光照射 (~13.5 mW) でオンとオフを切り替えると、光電流 (約 800nA) は急速に変化する。ただ、直接光励起と光熱励起の両方が、観測された光電流に寄与する可能性がある。しかし、直接光励起が支配的プロセスである場合、グラフェン層の下の SiO₂ 層を除去しなくても、生成される光電流はそれほど変化しないはずである。図 3 (b) は、グラフェン膜下の SiO₂ 層を除去する前後の光電流を示している。見てわかるように、SiO₂ 層の除去前の光電流は非常に小さい。一方、SiO₂ 層を除去した後、光電流は約 10000 倍に増大した。このことは、光熱電効果 (ゼーベック効果) が光電流や電圧発生のプロセスに支配的であることを示している。また、入射光の変調周波数を 100Hz から 1kHz までに増加した時、光電流の低下はまったく見られない。これは、このグラフェン光検出器の熱時定数が非常に小さいことを示している。

[引用文献]

[1] Cai, X.et al. Nature Nanotech 9,814-819(2014).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Zhang Ya, Yoshioka Yuri, Morohashi Isao, Liu Xin	4. 巻 14
2. 論文標題 1:1 internal mode coupling strength in GaAs doubly-clamped MEMS beam resonators with linear and nonlinear oscillations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 014001 ~ 014001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abd198	査読の有無 有
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 該当する
1. 著者名 Niu Tianye, Qiu Boqi, Zhang Ya, Hirakawa Kazuhiko	4. 巻 59
2. 論文標題 Control of absorption properties of ultra-thin metal insulator metal metamaterial terahertz absorbers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 120904 ~ 120904
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abc925	査読の有無 有
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 -
1. 著者名 Qiu Boqi, Zhang Ya, Akahane Kouichi, Nagai Naomi, Hirakawa Kazuhiko	4. 巻 117
2. 論文標題 Effect of beam deflection on the thermal responsivity of GaAs-based doubly clamped microelectromechanical beam resonators	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 203503 ~ 203503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0029188	査読の有無 有
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 -
1. 著者名 Zhang Ya, Kondo Ryoka, Qiu Boqi, Liu Xin, Hirakawa Kazuhiko	4. 巻 14
2. 論文標題 Giant Enhancement in the Thermal Responsivity of Microelectromechanical Resonators by Internal Mode Coupling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 014019 ~ 014019
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.14.014019	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 Morohashi Isao, Zhang Ya, Qiu Boqi, Irimajiri Yoshihisa, Sekine Norihiko, Hirakawa Kazuhiko, Hosako Iwao	4. 巻 41
2. 論文標題 Rapid Scan THz Imaging Using MEMS Bolometers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves	6. 最初と最後の頁 675 ~ 684
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10762-020-00691-5	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 -

1. 著者名 Morohashi Isao, Zhang Ya, Qiu Boqi, Irimajiri Yoshihisa, Sekine Norihiko, Hirakawa Kazuhiko, Hosako Iwao	4. 巻 41
2. 論文標題 Rapid Scan THz Imaging Using MEMS Bolometers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves	6. 最初と最後の頁 675 ~ 684
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10762-020-00691-5	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 -

1. 著者名 Zhang Ya, Kondo Ryoka, Qiu Boqi, Liu Xin, Hirakawa Kazuhiko	4. 巻 14
2. 論文標題 Giant Enhancement in the Thermal Responsivity of Microelectromechanical Resonators by Internal Mode Coupling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.14.014019	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 Qiu Boqi, Zhang Ya, Nagai Naomi, Hirakawa Kazuhiko	4. 巻 119
2. 論文標題 Enhancing the thermal responsivity of microelectromechanical system beam resonators by preloading a critical buckling strain	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 153502 ~ 153502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0065800	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Niu Tianye, Morais Natalia, Qiu Boqi, Nagai Naomi, Zhang Ya, Arakawa Yasuhiko, Hirakawa Kazuhiko	4. 巻 119
2. 論文標題 GaAs-based microelectromechanical terahertz bolometers fabricated on high-resistivity Si substrates using wafer bonding technique	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 041104 ~ 041104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0058260	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 Zhang Ya, Yoshioka Yuri, Iimori Mirai, Qiu Boqi, Liu Xin, Hirakawa Kazuhiko	4. 巻 119
2. 論文標題 Thermal tuning of mechanical nonlinearity in GaAs doubly-clamped MEMS beam resonators	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 163503 ~ 163503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0065271	査読の有無 有
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 該当する

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Ryoko Yamamoto, Naomi Nagai, Kazuhiko Hirakawa Akira Kojima, Nobuyoshi Koshida, Ya Zhang
2. 発表標題 Improvement of the thermal sensitivity of MEMS sensors with mesh phononic nanostructures
3. 学会等名 応用物理学会春季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tianye Niu, Natalia Morais, Boqi Qiu, Naomi Nagai, Ya Zhang, Yasuhiko Arakawa, Kazuhiko Hirakawa
2. 発表標題 Effect of Reststrahlen band and phonon absorption on the response spectra of GaAs-based MEMS terahertz bolometers
3. 学会等名 応用物理学会春季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ya Zhang, Yuri Yoshioka
2. 発表標題 1:1 mode coupling strength in GaAs MEMS resonators investigated by thermal effect
3. 学会等名 応用物理学会秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tianye Niu, Natalia Morais, Boqi Qiu, Naomi Nagai, Ya Zhang, Yasuhiko Arakawa, Kazuhiko Hirakawa
2. 発表標題 GaAs-based MEMS terahertz bolometers fabricated on high-resistivity Si substrates using wafer bonding technique
3. 学会等名 応用物理学会秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shota Iino, Ya Zhang, and et al.
2. 発表標題 Quasi double layer terahertz meta-absorber for bolometric applications
3. 学会等名 応用物理学会春季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuri Yoshioka, Ya Zhang, and et al.
2. 発表標題 A sensitive MEMS bolometer with high temperature stability
3. 学会等名 応用物理学会春季講演会
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 I Morohashi, Y Zhang, B Qiu, N Sekine, K Hirakawa, I Hosako
2 . 発表標題 Improvement of acquisition time using high speed MEMS bolometer in active imaging
3 . 学会等名 Fourth International Conference on Photonics Solutions (ICPS2019) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 K Hirakawa, Y Zhang, B Qiu, T Niu, R Kondo, N Nagai, K Kuroyama
2 . 発表標題 Fast and sensitive bolometric terahertz detection at room temperature through thermomechanical transduction
3 . 学会等名 2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T Niu, B Qiu, Y Zhang, K Hirakawa
2 . 発表標題 Effects of Substrate Phonon Absorption on the Resonance Properties of Ultrathin Metamaterials in the Terahertz Range
3 . 学会等名 2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T Niu, B Qiu, Y Zhang, K Hirakawa
2 . 発表標題 Control of absorption properties of MEMS terahertz bolometers using metamaterials
3 . 学会等名 2019 Compound Semiconductor Week (CSW) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryota Seki, Morohashi Isao, Ya Zhang
2. 発表標題 Thermoelectric photodetector using CVD graphene and asymmetric-metal electrodes
3. 学会等名 JSAP 69th Spring meeting
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryota Seki, Morohashi Isao, Ya Zhang
2. 発表標題 Thermoelectric photodetector using monolayer graphene and metal electrodes of different working functions
3. 学会等名 JSAP autumn meeting 2021
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Reserach Introduction http://web.tuat.ac.jp/~zhang/research.html</p>

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
研究協力者	平川 一彦 (Hirakawa Kazuhiko)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	諸橋 功 (Morohashi Isao)		
研究協力者	劉 シン (Liu Xin)		

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			
中国	北京工業大学			