

令和 2 年 5 月 26 日現在

機関番号：13102

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H06086

研究課題名（和文）金属構造と光誘起構造の融合体で構成されるメタマテリアルによる動的光制御

研究課題名（英文）Dynamic control of light wave using a metamaterial composed of metal and photo-induced structures

研究代表者

玉山 泰宏 (Tamayama, Yasuhiro)

長岡技術科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50707312

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,500,000円

研究成果の概要（和文）：光によって電磁応答が動的に制御可能な、構造中に高抵抗シリコンを含むメタマテリアルの過渡応答特性を評価し、そのメタマテリアルを用いた電磁波の捕捉と解放の実証実験を行った。シリコン部分にレーザー光を照射した直後の過渡応答時間は照射レーザー光のパワーに反比例するのに対し、レーザー光の照射を止めた際の過渡応答時間は数十マイクロ秒もの時間がかかることがわかった。この結果を踏まえて、メタマテリアルを一方の入射鏡として含むようなファブリペロー共振器を用いる手法を提案した。メタマテリアルへのレーザー光の照射により、ファブリペロー共振器内に数十ナノ秒程度蓄えられた電磁波を解放することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光によって電磁応答が動的に制御可能なメタマテリアルを用いることによる電磁波の捕捉と解放は本研究により初めて達成されたものである。本研究における実験はマイクロ波領域において行ったが、用いる半導体のバンドギャップエネルギーが電磁波の光子のエネルギーよりも大きい限りメタマテリアルを動的媒質として利用できるので、この手法は光などの高周波領域にも用いることができる。電磁波の捕捉と解放は電磁波を用いた情報処理において非常に重要な技術であるので、この手法をさらに小型の系を用いて実現できるようにすることによって、情報技術の発展に大きく貢献するだろう。

研究成果の概要（英文）：We evaluate the transient response of an optically tunable metamaterial that is loaded with a piece of high-resistivity silicon and perform a proof-of-concept experiment to demonstrate the storage and release of electromagnetic waves using this metamaterial. The transient time of the metamaterial immediately after commencing laser light illumination of the silicon in the metamaterial is found to be inversely proportional to the incident laser power. In contrast, the transient time after the laser light used to illuminate the silicon in the metamaterial is turned off is several tens of microseconds. Based on this result, we propose a method for the storage and release of electromagnetic waves using a Fabry-Perot resonator that includes the metamaterial as one of its mirrors. The electromagnetic wave that is stored in the Fabry-Perot resonator for a few tens of ns is then successfully released by illuminating the silicon in the metamaterial with the laser light.

研究分野：電磁光学

キーワード：メタマテリアル 量子・光工学 電磁波 動的制御 光励起

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

電磁波の波長に比べて十分小さい構造の集合体であるメタマテリアルを用いることにより新たな電磁波制御が実現できることから、世界中で盛んにメタマテリアルに関する研究がなされている。メタマテリアルにおいては、通常物質において原子や分子に相当するものを人工的に作製した構造体で置き換えることになるので、その構造体の材料や形状、配置を工夫することにより、自然界には存在しないような電磁応答を示す媒質を得ることができるようになる。特に、構造中に半導体や相転移物質等を含むようなメタマテリアルにおいては、電圧や温度、照射光強度などの様々な外部パラメータにより電磁応答を大きく変化させることができる。これを利用すると、自然界に存在する媒質のみでは実現困難な電磁波の動的制御が実現できるようになる。電磁波の動的制御は電磁波を用いた情報処理において重要な技術であるので、深く研究される必要がある。

### 2. 研究の目的

本研究では、光領域での電磁波の捕捉および解放の実現を目指し、半導体と金属構造で形成されたメタマテリアルを用いることによる電磁波の捕捉および解放の実証実験を行う。まずは、メタマテリアル中の半導体部分にレーザー光を照射した際のメタマテリアルの電磁応答の過渡応答特性を評価する。その結果を基にして、メタマテリアルへのレーザー光照射を制御することによる電磁波の捕捉および解放の実験を行う。

### 3. 研究の方法

メタマテリアル中の半導体部分にレーザー光を照射したときのメタマテリアルの電磁応答の過渡応答特性を評価するために、図1のような構造のメタマテリアルのマイクロ波領域における透過特性を調べることにした。金属構造部分はプリント基板を用いて作製し、その金属ギャップ部分に高抵抗シリコンを両面導電性テープで貼り付けることで、レーザー光の照射により電磁応答が動的に制御できるメタマテリアルを得た。

メタマテリアルの透過特性を測定するための実験系を図2に示す。メタマテリアルは導波管内に配置し、信号発生器から発生させた電磁波をメタマテリアルに照射するようにした。ここで、メタマテリアルへの入射電磁波はファンクションジェネレータで制御できるスイッチにより変調できるようにした。メタマテリアルを透過した電磁波は広帯域ダイポールアンテナで受信した後、包絡線検波し、オシロスコープで波形を観測した。また、メタマテリアルのシリコン部分に照射するレーザー光はレーザーダイオードから発生させた。ここで、レーザーダイオードの駆動電流はファンクションジェネレータにより制御できるようにした。つまり、メタマテリアルに入射する電磁波とシリコンを励起するレーザー光の照射タイミングをファンクションジェネレータにより制御できるようにしたということである。ただし、メタマテリアルの透過スペクトルを測定する際は、図2の破線部分をそれぞれネットワークアナライザの送信ポートと受信ポートに置き換えた。

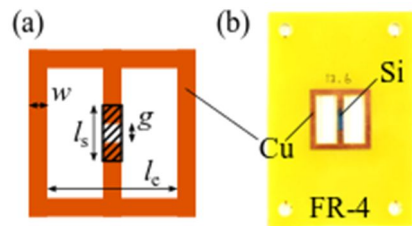


図1: (a) 半導体と金属構造で形成されるメタマテリアルの構造の概略図と(b)作製したメタマテリアルの写真。

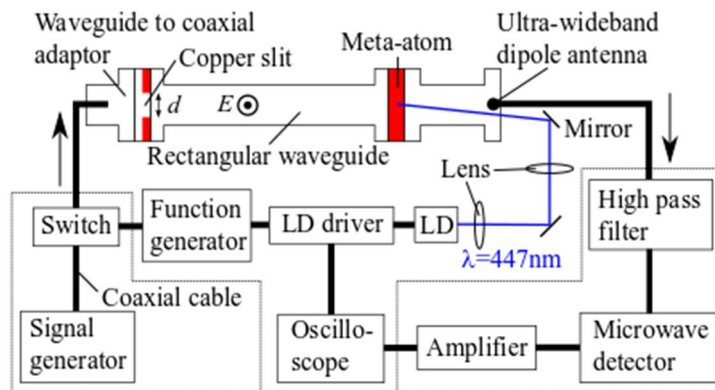


図2: 実験系の概略図。メタマテリアルの透過スペクトルを測定する際は、図中の破線で囲った部分はそれぞれネットワークアナライザの送信ポートおよび受信ポートに置き換えた。また、導波管中の銅のスリットは電磁波の捕捉実験においてのみ用いた。

### 4. 研究成果

図3(a)にメタマテリアル中のシリコン部分にCWのレーザーを照射した状態でのメタマテリアルの透過スペクトルを測定した結果を示す。レーザー光を照射していない場合には3.39GHz付近にメタマテリアルの共振による透過ディップが観測されている。レーザー光を照射すると、共

振周波数における透過ディップが浅くなる様子が確認できる。これは、シリコンへのレーザー光の照射により、シリコン表面に光キャリアが励起され、シリコン表面の導電率が増加することによるものである。図 3(b) にシリコン表面の導電率を変化させたときのメタ材料の透過率を数値解析した結果を示す。導電率を増加させると 3.54GHz 付近の共振による透過ディップが浅くなる様子が確認できる。これは実験結果とよく合うものである。さらに導電率が増加すると、低周波側に新たな透過ディップが発生する様子も確認できる。これは、シリコン表面が損失性媒質というよりも金属のようにふるまうことにより、メタ材料のキャパシタ部分の実効的な形状が変化し、共振周波数が変化するために生じる現象である。実験において 100mW のレーザーを照射したときでも元々の共振周波数よりも低周波側に新たな透過ディップが発生する現象は発生していないため、100mW のレーザー照射時のシリコン表面の導電率はおよそ  $10^3\text{S/m}$  程度であると推測できる。

次に、メタ材料に共振周波数と等しい周波数をもつ電磁波を入射させている状態でシリコン部分にパルスレーザー光を照射した場合の透過電磁波の包絡線波形を測定した結果を図 4(a) に示す。レーザー光が照射された瞬間には電磁波の透過率が急上昇するのに対し、レーザー光照射を止めた後ではゆっくりと透過率がレーザー光非照射時の値に戻っていく様子が確認できる。レーザー光を照射した直後付近を拡大したものを図 4(b) に示す。照射レーザーパワーが大きくなるにつれて透過率の時間変化が大きくなる様子が確認できる。これらのメタ材料の透過率変化の過渡応答特性はレート方程式による解析結果とよく合うことも確認できた。電磁波の捕捉と解放においては、高速な電磁応答の変化が必要であることから、以上の結果より、レーザー光を照射した際に生じるメタ材料の電磁応答の変化のみを利用して系を構築する必要があるということが明らかになった。

半導体を含むメタ材料にレーザー光を照射した際の電磁応答の高速な変化のみを利用して電磁波の捕捉と解放を行う手法として、図 2 のように、ファブリペロー共振器の一方の反射鏡をメタ材料に置き換えたものを用いる手法を考案した。ここで、ファブリペロー共振器の共振周波数とメタ材料の共振周波数は一致させるようにした。このような系においては、メタ材料にレーザー光を照射しない状態でファブリペロー共振器の共振周波数と等しい周波数をもつ電磁波を入射させると、その電磁波はファブリペロー共振器中に蓄えられる。この状態で入射電磁波をオフにすると、しばらくの間、ファブリペロー共振器中に電磁波が蓄えられる状態を保持することができる。ここで、メタ材料のシリコン部分にレーザー光を照射すると、メタ材料の透過率が急上昇するため、ファブリペロー共振器中に蓄えられた電磁波を放出することができるということになる。

この考え方を基にして、電磁波の捕捉および放出の実験を行ったときの透過包絡線波形を図 5(a) に示す。この実験において、入射ミラーとして用いるスリットの幅は 20mm とし、共振器長は 1173mm とした。また、入射電磁波は  $t=-140\text{ns}$  のときにオンにし、 $t=0\text{s}$  のときにオフにした。そして、 $t=t_d$  において、メタ材料中のシリコン部分へのレーザー光の照射を開始した。図 5(a) を見ると、 $t=t_d$  の直後に透過電磁波の振幅が増加し、その後、減少していることがわかる。これはレーザー光の照射により、ファブリペロー共振器中に蓄えられた電磁波が放出されたことを表している。また、 $t_d$  を大きくすると、放出される電磁波のピークパワーが減少する様子も確認できる。 $t_d$  と放出される電磁波のピークパワーの関係を図 6 に示す。ここで、電磁波のピークパワーの値は  $t_d=0\text{s}$  の時の値で規格化している。図中にはフィッティング直線  $\exp(-t_d/\tau)$  も併せて示してある。測定結果とフィッティング曲線 ( $\tau = 12.5\text{ns}$ ) はよく合っていることが確認できる。ここで、フィッティングパラメータ  $\tau$  の妥当性について検討しておく。 $\tau$  の値については、

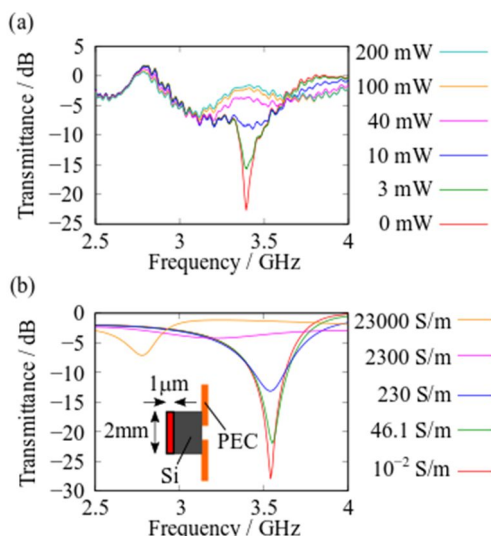


図 3: (a) メタ材料のシリコン部分に CW のレーザーを照射したときの透過スペクトルの測定結果と (b) シリコンの表面部分の導電率を変化させて計算した透過スペクトル。

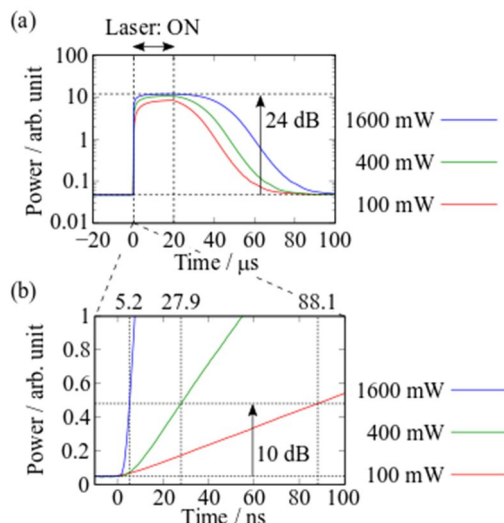


図 4: (a) メタ材料に CW のマイクロ波を照射し、シリコン部分にパルスレーザーを照射したときの透過マイクロ波の包絡線波形の測定結果。(b) 0s 付近の拡大図。



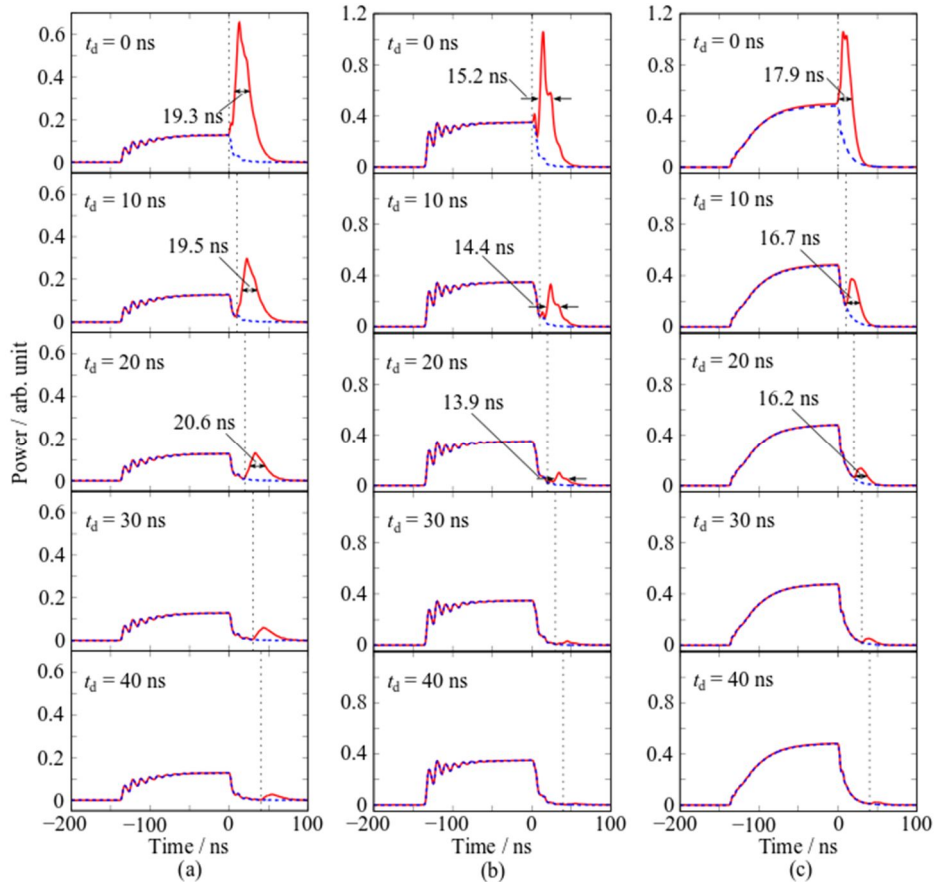


図 5: 電磁波の捕捉と解放実験における透過マイクロ波の包絡線波形の測定結果。破線はレーザー光を照射しない場合の電磁波の包絡線波形である。

ファブリペロー共振器中の損失と伝搬時間から見積もることができる。ファブリペロー共振器を片道伝搬すると、電磁波のパワーは 0.76 倍になり、ファブリペロー共振器を往復するのにかかる時間は 10.1ns であったことから、共振器寿命は  $\tau = -10.1\text{ns}/\ln 0.48 = 13.8\text{ns}$  であると求められる。この値は実験値と近い値になっていることから、観測されたパルスは確かにファブリペロー共振器中に蓄えられていたものだということが言える。図 5(b)と 5(c)は、それぞれ、入射ミラーのスリット幅と共振器長を 27mm、1173mm、および、20mm、533mm とした場合の透過包絡線波形の測定結果である。これらの条件においても、ファブリペロー共振器中への電磁波の捕捉と解放が行えていることがわかる。スリット幅を広げたこと、および、共振器長を短くしたことの影響は、共振器寿命の減少として現れている。これらの条件において放出されるマイクロ波パルスのピークパワーの  $t_d$  依存性も図 6 に示す。やはり、フィッティング直線  $\exp(-t_d/\tau)$  とよく合う様子が確認できる。図 5(b)および 5(c)の条件におけるフィッティングパラメータは、それぞれ、8.6ns、10.0ns であり、共振器寿命から計算される値である 8.6ns、9.4ns ともおおよそ合うことが確認できた。以上の結果より、光によって電磁応答が動的に制御可能なメタ材料をファブリペロー共振器の一方の反射鏡として用いることにより、電磁波の捕捉と解放が実現できるということが実証された。今後は、ファブリペロー共振器のような大きな実験系を用いるのではなく、単一のメタ表面のような小型の系を用いることで電磁波の捕捉と解放を行えるようにすることが重要である。

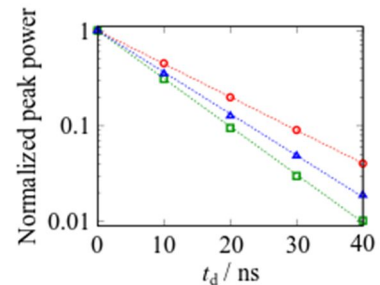


図 6: ファブリペロー共振器から放出される電磁波のピークパワーの  $t_d$  依存性。

上記の研究とは別に、当初の予定にはなかったが、研究の過程で、電磁波の入射角によって群遅延を可変制御できるようなメタ表面を見出した。図 7 のように 2 種の異なる共振周波数をもつスプリットリング共振器で構成されるメタ表面に、磁場のみがスプリットリング共振器を励振できるように電磁波を入射させるようにするという状況を考える。入射角が小さいとスプリットリング共振器を貫く入射電磁波の磁束は小さいが、入射角が大きくなるにつれてスプリットリング共振器を貫く磁束が増加する。このことは、入射角が増加するにつれてメタ表面の共振線幅が増加することを意味している。また、共振周波数が異なる 2 種のスプリットリング共振器が存在することから、これらの共振周波数の平均周波数における分散は入射角が増加するにつれて急峻になる、つまり、群遅延が増加することになる。

図 7 の構造をもつメタ表面による群遅延の可変制御を実証するために、メタ表面の透過特性

の数値解析を行った。その結果を図 8 に示す。まず、図 8(a)に示した透過率の解析結果から見ていく。垂直入射の場合はおおよそフラットな透過スペクトルが得られているのに対し、入射角が増加するにつれて 2 種のスプリットリング共振器の共振による透過ディップが深くなる様子が確認できる。図 8(b)は透過ピーク周波数付近の群遅延の解析結果を示したものである。垂直入射時は遅延時間がほぼ 0 であるが、入射角が増加するにつれて群遅延の最大値が増加する様子が確認できる。これらの結果より、図 7 のようなメタ表面を用いることにより、入射角によって電磁波の群遅延が可変制御できることが実証できた。ここでの数値解析結果を踏まえて、今後は、実験的な検証およびより作製の容易な構造の設計を行う必要がある。

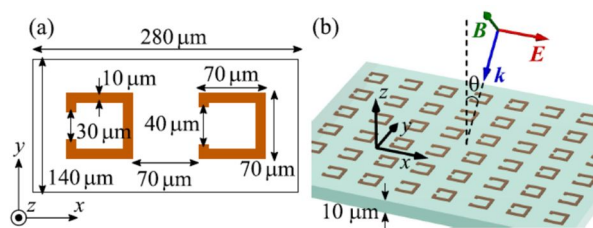


図 7: (a)群遅延の可変制御のためのメタ表面の構造および(b)入射電磁波の向きとの関係。

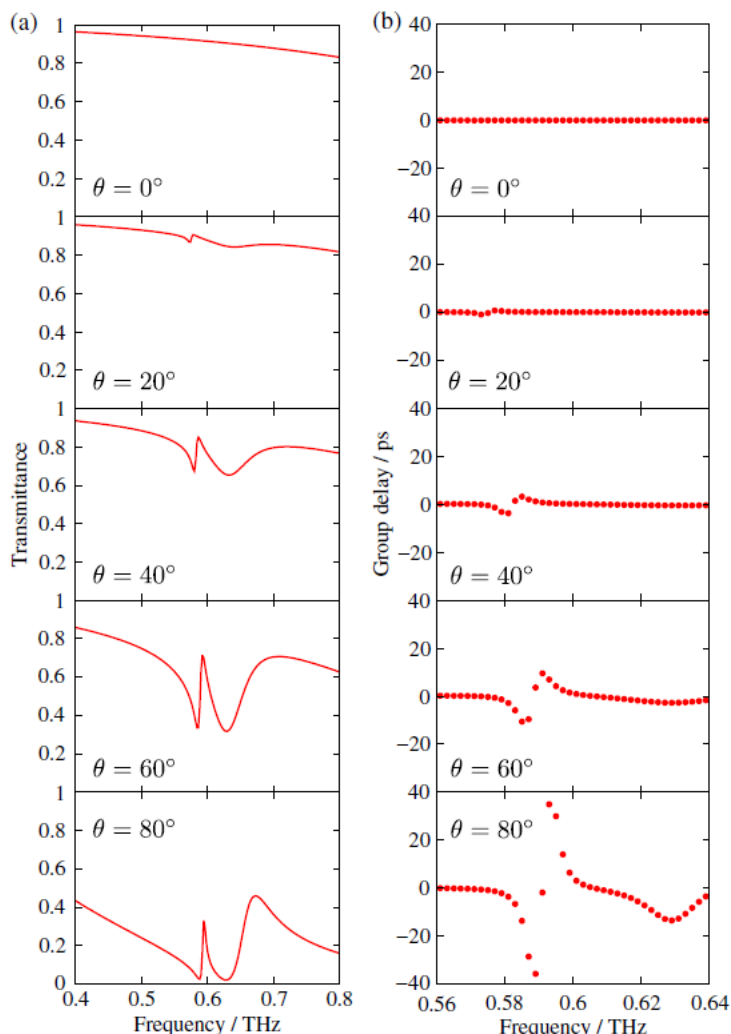


図 8: 入射角を変化させたときのメタ表面の(a)透過率および(b)群遅延の周波数依存性の数値解析結果。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tamayama Yasuhiro, Kida Yutaro	4. 巻 36
2. 論文標題 Tunable group delay in a doubly resonant metasurface composed of two dissimilar split-ring resonators	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Optical Society of America B	6. 最初と最後の頁 2694 ~ 2699
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/JOSAB.36.002694	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 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 木田 悠太郎, 玉山 泰宏
2. 発表標題 二重共振メタマテリアルによるテラヘルツ波の群遅延の可変制御
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 金成 憲吾, 玉山 泰宏
2. 発表標題 光による動的制御が可能なメタミラーを含むファブリペロー共振器を用いた電磁波の保存と放出
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
---------------------------	-----------------------	----