

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 5 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22560053

研究課題名（和文） 側面光照射方式カラーフォトセンサに関する研究

研究課題名（英文） Research on side-illuminated color photosensor

研究代表者

有吉 哲也（ARIYOSHI TETSUYA）

九州工業大学・マイクロ化総合技術センター・助教

研究者番号：60432738

研究成果の概要（和文）： 現在、多種多様なカラー撮影方法が研究・実用化されている。カラー情報をより容易に、同時に偽色やモアレを生じさせること無く簡単な画素構造にて得ることが求められている。本研究では、シリコン基板の側面に光を照射してカラー撮影を行う「側面照射型カラー撮像素子」の原理に基づき新しいカラー撮影の検討を行い、その基礎を確立して実現可能性を示した。

研究成果の概要（英文）： A great variety of color imaging methods are put to practical use now. Simple pixel structure to easily obtain color information is required without generating false color and moiré. In this study, we investigated new color photography based on the principle of side-illuminated type color sensor. Consequently, we estimated fundamentals of the new side-illuminated color photosensor and demonstrated their feasibilities.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2011 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012 年度	100,000	30,000	130,000
年度	0	0	0
年度	0	0	0
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：光センサ

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用物理学一般

キーワード：イメージセンサ・カラー撮像・側面光照射・MEMS・カラーフィルタなし

1. 研究開始当初の背景

撮像素子はシリコン半導体から作製された CCD (Charge Coupled Devices: 電荷結合素子) タイプ及び CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor: 相補性金属酸化膜半導体) タイプが主流であり、可視光から近赤外光 (波長範囲: 400nm~1100nm) を検知することができる。このようなシリコン撮像素子は冷却などの特別な処置が不要なので低コストで運用することができる。近年では通常の LSI 製造プロセスをそのまま

利用することで、CCD と比べて安価に作製できる CMOS 撮像素子の開発が進められている。これらシリコン半導体を用いた従来の撮像素子そのものには色の分光能力は無い。そのため、カラー撮影するためにはシリコン撮像素子とは別に様々な工夫が施されている。以下、その例を示す。

特定の波長域の光を通過させるカラーフィルタを各画素に配列した方式が多く考案されている。その代表的なものとして、緑のカラーフィルタが市松、赤及び青のカラーフ

フィルタが画素上に線順次に配列されている Bayer 方式が実用化されている。この方式では、2個の画素を緑、1個ずつの画素を赤及び青に割り当てていることから、4画素で RGB の3原色のデータを作り出している。

別のカラー撮影技術として、Foveon 方式が知られている。この方式は、P型シリコン基板上にN型、P型、N型シリコン層を交互に形成した構造の画素を用いる方法である。シリコンは異なる深度で異なる色の光を吸収するため、光の入射方向に生成するそれぞれのPN接合層は別々の色を取り込む。従って、カラーフィルタを用いることなく個々の画素から RGB のデータを得ることができる。この他、シリコン材料とは別に化合物半導体を用いる撮像素子や3つのダイクロミックミラーを用いて各色を分離する3板式が提案されている。

2. 研究の目的

しかし、カラーフィルタを用いる方法では、例えば緑のカラーフィルタを有する画素は緑色光以外の光をカットすることになるので、利用する光量の低下は避けられない。この他、カラーフィルタの作製は通常の CMOS 製造プロセスには含まれておらず、別途カラーフィルタの作製プロセスを必要とする。また、個々の画素では一つの色データしか得られず、残りの二つの色データは周囲の画素から補間処理して推定することとなる。その過程で偽色やモアレが発生してしまう問題がある。Foveon 方式では、例えば緑色検知用フォトダイオードと青色検知用フォトダイオードのアノード電極が共通であり、緑信号が青信号と折り重なってしまう。つまり、信号電極が各 PN 接合層で独立していないので、3色の信号を分離する特別な処理が別途必要となる。また、3層の NPN シリコン層を的確に形成するには特別なプロセスを必要とする。化合物半導体を用いる方法では材料そのものが高価であり、また高度な結晶育成技術を要する。ダイクロミックミラーを用いた3板式では3つのダイクロミックミラーと3つの CCD を使うので、カメラ本体が大きくなりやすく、価格も高価になってしまう。

我々は、シリコン基板の側面から光を照射する方式のカラー撮像素子を提案した。この提案方式では安価なシリコン材料と通常の CMOS 製造プロセスを利用している。そのため製造コストを抑えつつ、カラーフィルタ無しでカラー撮影が可能となる。また、各 PN 接合部はお互いに独立しているので、容易な処理で色情報を分離することができる。加えて、この画素構造によれば、生成する光電荷をほとんど失うことなく収集することができるので、受光感度を高めることができる。この技術によって撮像素子はより少ない照

射エネルギーで、しかも、より短い露光時間でのカラー撮像が可能となり、低消費電力や高速撮影が求められる応用分野への採用が期待できる。提案した側面照射型のカラー撮像素子の有効性を確認するために、我々はテストデバイスを試作して、可視光～近赤外光に対する分光特性を評価した。

3. 研究の方法

図1に提案する側面照射型カラー撮像素子の画素構造の上面図を示す。図2に、図1に示す側面照射型カラー撮像素子の X-X' 断面構造図を示す。

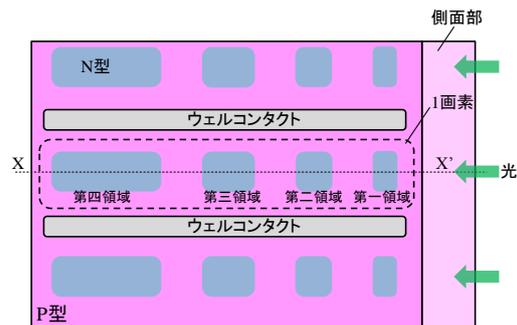


図1 側面照射型カラー撮像素子の上面図

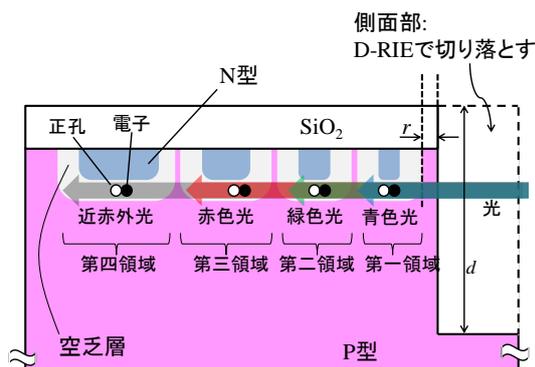


図2 側面照射型カラー撮像素子の画素の X-X'断面構造図

光の入射に伴って発生する信号電荷（電子正孔対）はPN接合部に生じる空乏層領域で主に収集されて電気信号となる。P型シリコン基板の表面上に、光の入射方向側から順番に、四つのN型シリコン領域を形成する。これにより、シリコンに対する侵入長がそれぞれ異なる青、緑、赤及び近赤外光の各光を検出する四つのPN接合部が光の入射方向に沿って形成される。これら四つのPN接合部を光の入射方向から順に第一領域、第二領域、第三領域、第四領域とする。また、赤や近赤外光のような侵入長が長い光ほどN型シリコン領域を長くして十分な量の光を吸収し、全体として様々な波長領域における光を均一に吸収することで、高感度の撮像素子を実現

することができる。シリコンに対する侵入長は以下のとおりである：青は $0.2\text{-}0.5\mu\text{m}$ 、緑は $0.6\text{-}1.3\mu\text{m}$ 、赤は $1.8\text{-}6.6\mu\text{m}$ 、近赤外は $7.3\text{-}50\mu\text{m}$ である。これらの侵入長からそれぞれの光検知領域の長さや間隔が設計される。また、この光検知領域の長さや間隔は併せて、CMOS 設計ルールに基づいて設計される。また、入射側面の平坦化と入射光の減衰を少なくするために、センサの側面部を深さ d まで取り除く加工を施す。チップ側面からフォトダイオード端までに残る側面シリコン幅 r は短いほど良い。現状では、提案する光の照射方法ではラインセンサしか構成することができない。そこで、図3に示すように、提案するセンサの基板を薄くして複数積層することで、イメージセンサを形成することができる。

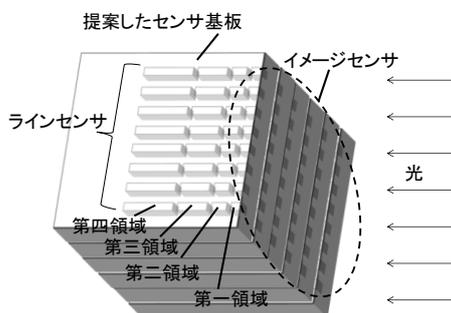


図3 積層によるイメージセンサ化

四つある光検知領域のうち、第一領域は Blue(B)+Green(G)+Red(R)+Infrared(IR) (信号値: α) のすべての光が到達し通過する。第二領域には波長が最も短い B の光は到達しないため、G+R+IR (信号値: β) の光に反応する。同様に第三領域では第二領域までで吸収された B+G を除く R+IR (信号値: γ) の光に反応し、第四領域では IR の光にのみ反応する。そこで、R の値は、第四領域で探知した δ から第三領域で探知した γ を引くことで求めることができる。さらに、第二領域で探知した β から R と IR の値を引いて G の値を求め、最後に、第一領域で探知した α から G と R と IR の値を引いて B の値を求めることができる。以上の演算処理を式 (1) のように、行列表記にまとめた。

$$\begin{pmatrix} B \\ G \\ R \\ IR \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & -a_{12} & -a_{13} & -a_{14} \\ 0 & a_{22} & -a_{23} & -a_{24} \\ 0 & 0 & a_{33} & -a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ \delta \end{pmatrix} \quad (1)$$

4つの光検知領域で観測される信号の比率は光の波長によって異なる。観測された光の波長はこの比率から識別することができる。光の強度は4つの光検知領域から観測される信号の強度から決めることができる。この

ように、提案方式ではカラーフィルタを設けることなく、また形成する PN 接合部はお互いに独立しているため、単一画素にて色情報を容易に検出することができる。

4. 研究成果

$0.35\mu\text{m}$ CMOS 1-poly 4-metal プロセスを用いてテストチップを試作した。図4に試作したテストチップの顕微鏡写真を示す。

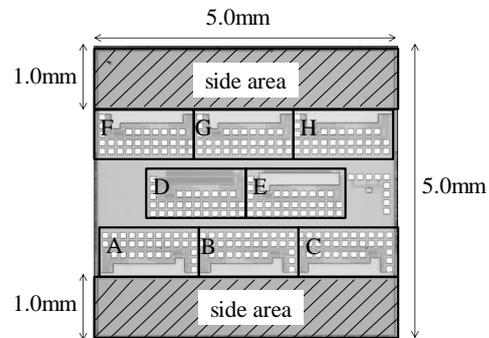


図4 テストチップの顕微鏡写真

そのチップサイズは $5.0 \times 5.0 \text{ mm}^2$ である。このテストチップには、図2に示すフォトダイオード端からの余裕 r が異なる3種類のラインセンサ回路が配置されている。センサ回路 A, B 及び C における r は、それぞれ $0.0\mu\text{m}$ 、 $1.0\mu\text{m}$ 、 $2.0\mu\text{m}$ である。また、ラインセンサの表面は遮光のための金属配線層で覆っているため、側面からの入射光のみを受光することができる。この遮光のための金属配線は側面シリコンを取り除く加工の際のマスクとしても働く。図4の斜線で描かれた“サイドエリア(side area)”は側面照射のために取り除かれる領域であり、幅が 1.0mm 、長さが 5.0mm である。この“サイドエリア”は RIE (Reactive Ion Etching) 技術によって削り取り、深さ約 $80\mu\text{m}$ までエッチングされた。PN 接合部はチップ表面から数 μm の位置に形成されることから、この $d=80\mu\text{m}$ という深さは側面照射を行うのに十分に深く、側面からの入射光を直接 PN 接合部に導くことができる。“サイドエリア”に追加加工を施した後のテストチップ写真を図5に示す。センサは、4つの光検知領域を有する128個の画素回路、その画素回路からの電流信号を電圧信号に変換する128個の I/V 変換回路、512 (=128×4) 出力から一つを選択するための128段のシフトレジスタと 2bit デコーダから構成される。光はチップの側面方向からフォトダイオードに沿って照射される。図6に、側面照射型カラー撮像素子の画素レイアウト図を示す。この画素は $0.35\mu\text{m}$ CMOS ルールで設計した。画素ピッチは $9.0\mu\text{m}$ 、深さ d は $80\mu\text{m}$ 、側面シリコン幅 r は $1.0\mu\text{m}$ である。各光検知領域が光を漏れなく検知するた

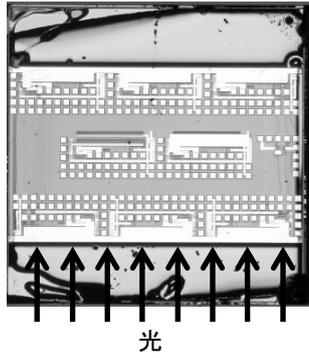


図5 側面切り落とし後のテストチップ顕微鏡写真

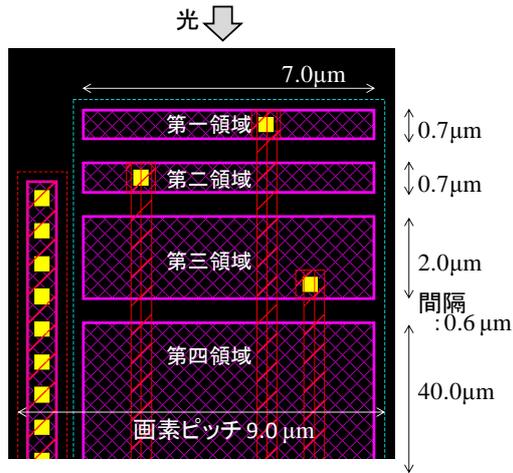


図6 側面照射型カラー撮像素子の画素レイアウト図

めに、光検知領域の横幅 $7.0\mu\text{m}$ は隙間なく $n+S/D$ 領域で埋めた。第一領域、第二領域、第三領域、第四領域の長さはそれぞれ $0.7\mu\text{m}$ 、 $0.7\mu\text{m}$ 、 $2.0\mu\text{m}$ 、 $40\mu\text{m}$ であり、各光検知領域間のスペースは $0.6\mu\text{m}$ である。画素回路の構成図を図7に示す。電源電圧は 3.0V である。バイアス電圧 PixVb はフォトダイオードのリセット電圧を与え、今回の測定では 1.5V とした。Amplified MOS Imager トランジスタ (AMI Tr.) がそのフォトダイオードの電位を電流に変換する。デコーダによって選択された電流が I/V 変換回路によって電圧信号に変換される。

センサ回路 A が動作しなかったため、センサ回路 B を用いて測定実験を行った。図8に側面部をエッチングする前後におけるセンサ B の暗電流を示す。この評価における蓄積時間は 524ms である。横軸は光検出領域の種類 (第一領域～第四領域)、縦軸は暗電流値である。フォトダイオード長が長くなるにつれて暗電流は増加する結果を得た。エッチング前後において、暗電流は 2～3 倍増加した。エッチングによって画素回路にダメージ

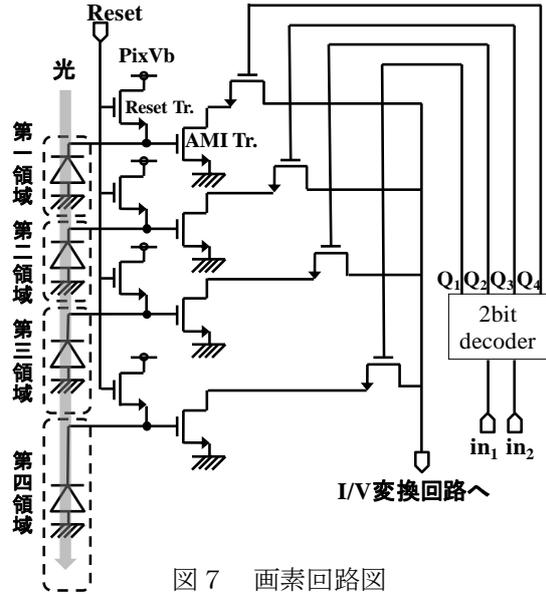


図7 画素回路図

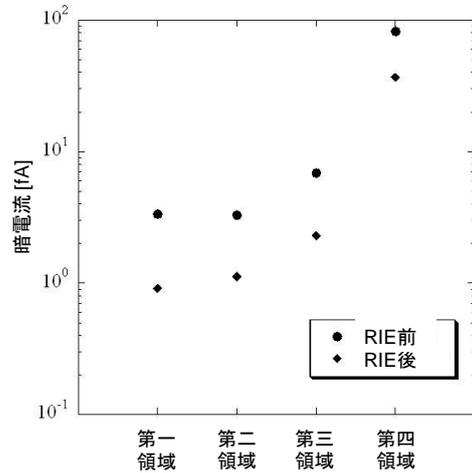


図8 側面部エッチング前後における暗電流

がやや生じたものと思われる。

テストチップへの光照射実験を行い、可視光から近赤外光までに対する分光特性を測定した。各波長の照射光強度は $60\mu\text{W}/\text{cm}^2$ である。今回は、オフラインにて各光検知領域での探知信号 (α 、 β 、 γ 、 δ) を B、G、R、IR の信号へ変換している。今回用いた各パラメータは次のとおりである。 $a_{11}=1.0$ 、 $a_{12}=0.5$ 、 $a_{13}=0.2$ 、 $a_{14}=0.1$ 、 $a_{22}=2.0$ 、 $a_{23}=0.1$ 、 $a_{24}=0.2$ 、 $a_{33}=1.5$ 、 $a_{34}=0.1$ 、 $a_{44}=0.8$ (特開 2011-205085 参照)。図9に、センサ回路 B を用いて得られた分光特性を示す。全体的に分光特性の広がりはあるものの、4色を分離することができた。しかし、B、G、R、IR におけるピーク波長はそれぞれ 480nm 、 650nm 、 775nm 、 925nm であり、緑、赤に関しては実際の色範囲よりも長波長側にシフトしている。これは $0.35\mu\text{m}$ ルールで設計した画素の各光検出領域が長く、各光検出領

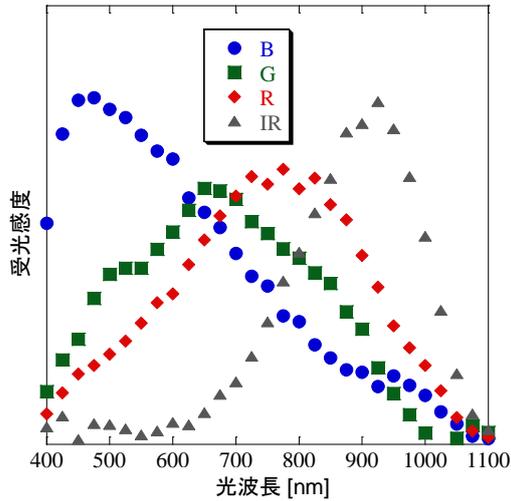


図9 分光特性の測定結果

域の間隔が広いことに起因している。そこで図10に示すような、設計ルールを犯すことなく各光検出領域を短くした新たな構造の画素を提案した。光検知領域の端を一部削除した分、各光検知領域を短くすることができた。第一領域、第二領域、第三領域、第四領域の長さはそれぞれ0.3 μm 、0.5 μm 、1.4 μm 、40 μm であり、各光検知領域間のスペースは0.6 μm である。また、側面シリコン幅 r は0.5 μm であり、深さ d は16 μm である。図11にチップ側面部の断面のSEM像を示す。センサの側面はほぼ垂直に切り落とされていた。

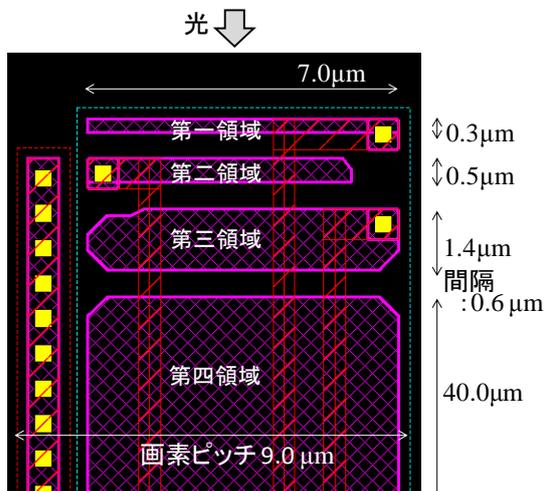


図10 新たな画素構造のレイアウト図

この新たなテストチップへの光照射実験を行い、可視光から近赤外光までに対する分光特性を測定した。図12に、得られた分光特性を示す。四色を分離することができ、B、G、R、IRにおけるピーク波長はそれぞれ450nm、525nm、625nm、875nmと、実際の色範囲内に収めることができた。

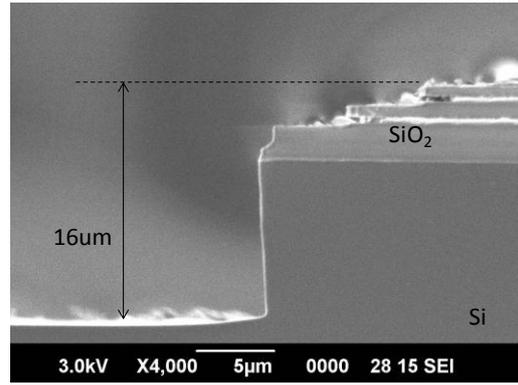


図11 チップ側面部のSEM断面像

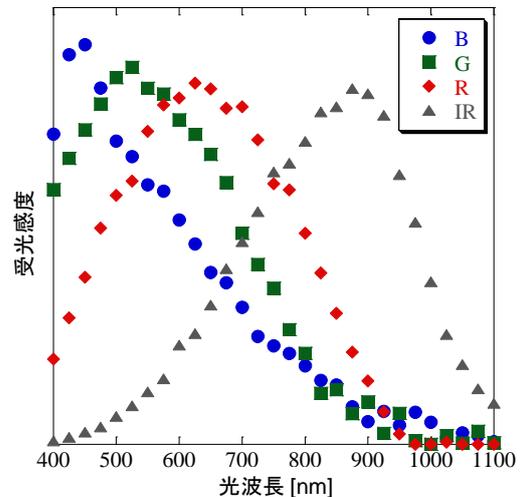


図12 新たな画素を有するセンサの色分離特性の測定結果

本研究では、シリコン基板の側面から光を照射し、光路に沿って四つの光検知領域を配置する画素構造を採用することで、簡単に分光特性を得る実験を行った。一画素あたり、光を検知・分離するのに十分な長さ・間隔のPN接合を四つ形成し、各光検知領域に沿って光電荷を効率よく発生させる光センサLSIを試作した。試作には通常の0.35 μm シリコンCMOSプロセスを利用した。このセンサLSIにReactive Ion Etching (RIE)を用いることで側面部を切り落とすことができることを確認した。側面から可視光～近赤外光を照射して分光特性を得たところ、カラーフィルタ無しで色を容易に分離することが可能であることを確認した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① T.Ariyoshi, A.Baba, Y.Arima,

“Side-Illuminated Color Photosensor,” Japanese Journal of Applied Physics, 52 (2013) 04CE10.
(査読有)

(Doi:10.7567/JJAP.52.04CE10)

[学会発表] (計 2 件)

① 有吉哲也, “近赤外センサの高感度化と色フィルタ無しでのカラー撮像” 九州工業大学新技術説明会、2012.12.7、JST 東京別館ホール (東京・市ヶ谷)

② T. Ariyoshi, A. Baba, Y. Arima, “Side-Illuminated Color Photo Sensor,” International Conference on Solid State Device and Materials 2012. 9. 26, 京都国際会館 (京都市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

有吉 哲也 (ARIYOSHI TETSUYA)

九州工業大学・マイクロ化総合技術センター・助教

研究者番号：60432738

(2) 研究分担者

有馬 裕 (ARIMA YUTAKA)

九州工業大学・マイクロ化総合技術センター・教授

研究者番号：10325582

馬場 昭好 (BABA AKIYOSHI)

九州工業大学・マイクロ化総合技術センター・准教授

研究者番号：80304872