



| | |
|--------------|---|
| Title | TDIR技術を用いた熱型赤外線センサモジュール 「MeLDIR」開発 |
| Author(s) | 前川, 優宏; 服部, 公春; 安井, 慎一 他 |
| Citation | 電気材料技術雑誌. 2020, 29, p. 39-46 |
| Version Type | VoR |
| URL | https://doi.org/10.18910/77723 |
| rights | |
| Note | |

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

TDIR 技術を用いた熱型赤外線センサモジュール「MeDIR」開発

前川 優宏¹ 服部 公春¹ 安井 慎一¹

山縣 有輔¹ 金光 伸高² 太田 彰¹

¹ 三菱電機株式会社 高周波光デバイス製作所 〒664-8641 兵庫県伊丹市瑞原 4-1

² 三菱電機株式会社 高周波光デバイス営業第二部 〒100-8310 東京都千代田区丸の内 2-7-3

Development of uncooled IRFPA “MeDIR” with using TDIR technology

Tomohiro Maegawa¹ Masaharu Hattori¹ Shinichi Yasui¹
Yusuke Yamagata¹ Nobutaka Kanemitsu² Akira Ota¹

¹ MITSUBISHI ELECTRIC CO.,LTD HIGH FREQUENCY & OPTICAL DEVICE WORK 4-1, Mizuhara, Itami, Hyogo 664-8661, Japan

² MITSUBISHI ELECTRIC CO.,LTD Semiconductor & Device Marketing Div.B 2-7-3, Marunouchi, Chiyoda, Tokyo 100-8310, Japan

We developed uncooled Infrared focal plane array (IRFPA), in which single crystal pn junction diodes formed in an SOI layer are used as temperature sensors. We are calling this Thermal Diode InfraRed (TDIR) sensor technology which is our original. By using this technology, we have succeeded to develop a new product “MeDIR” which is cost effective high performance sensor.

キーワード：熱型赤外線センサ サーマルダイオード

1. はじめに

波長 380nm (青) ~780nm (赤) の可視光よりも波長の長い領域の光を赤外線と呼び、中でも 8 ~15 μm の赤外線は、遠赤外あるいは LWIR (Long-Wavelength InfraRed) と呼ばれている。常温程度の熱源からの放射が大きいことと、大気による吸収が少ないという特徴を有している。

遠赤外線イメージの特長としては、被写体温度の判別が可能であることはもちろん、図 1 に示すように、照明の無い真っ暗なところでも暗視が可能であること、可視波長の外乱光の影響を受けにくいため、煙、霧など波長より小さい微粒子による散乱の影響を受けにくいうことが挙げられる。このため、屋外・屋内環境での高温の物体や人・動物などのセンシ

ング用途で多く利用されており、近年では夜間歩行者検知センサとして車載用途でも利用されている。



図 1 可視、遠赤外線イメージ画像

Fig 1. The image of visible and infrared radiation

当社では、1980 年代より赤外線センサ分野での技術開発を開始し、今年にわたるまで新規技術の継続発展を続けており、多画素高精細技術⁽¹⁾⁽²⁾、高感度化技術⁽³⁾、低コスト高信頼性封止技術⁽⁴⁾、検知精度向上技術等⁽⁵⁾、様々な独自技術を有するに至っている。

昨今では、IoT 技術の進化、エネルギー効率を重視するインフラシステムの需要拡大、また COVID-19 の感染拡大を受けて、従来の製品よりも高精度で、かつ低コストでの非接触体温検知、動体検知センサとしてのニーズが高まっている。

本稿では、これまで長年にわたり培ってきた赤外線サーマルダイオード（以降、Thermal Diode InfraRed : TDIR）技術を応用し、新たに開発を行った熱型赤外線センサモジュール「MeDIR」について報告すると共に、赤外線センサを利用した市場変化予測と応用例について報告する。

2. 赤外線について

2. 1. 赤外線センサ市場ニーズの変化

図2は2018年から2025年にかけてのセンサヘッド部販売価格ベースの市場動向推移予測である。⁽⁶⁾

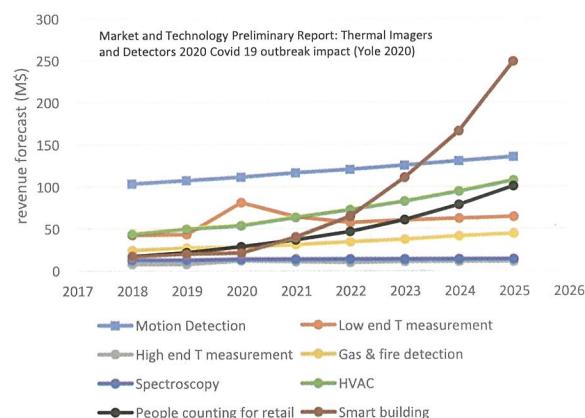


図2 赤外線センサヘッド部市場動向

Fig 2. Revenue forecast of infrared detector

まず特徴的なのは、2020年 COVID-19 流行を受け、ローエンド温度検知センサに対するニーズが高まった点である。2021年度以降も、本用途に対して一定のニーズが見込まれ、一般的に使用されている

照準検知型非接触温度計に加えて、面検知型非接触温度計へのニーズも高まっている。面検知型非接触温度計は、複数点の温度検知を同時にを行うことが可能であり、オペレーターが不要であるなど、照準検知型非接触温度計と比べて様々なメリットがある。

次に、2021年度よりスマートビルディング、人数カウントといった、これまで大きくなかった市場が急成長を示している点も特徴的である。これには、前述の IoT 技術の進化、エネルギー効率を重視するインフラシステムの需要拡大が寄与していると思われる。その他用途に関しても、堅調に需要が伸びていくことが見込まれる。

前述のスマートビルディング、人数カウント、面検知型非接触温度計といった新たな市場に、赤外線センサモジュールを適用するにあたり、高精度な温度把握と、広範囲を高空間分解能で撮像することが求められる。加えて、低コストであることも必須条件となると予想される。

2. 2. 従来の赤外線センサの種類と特徴

遠赤外線センサは、図3に示す量子型と熱型の2種に大別される。

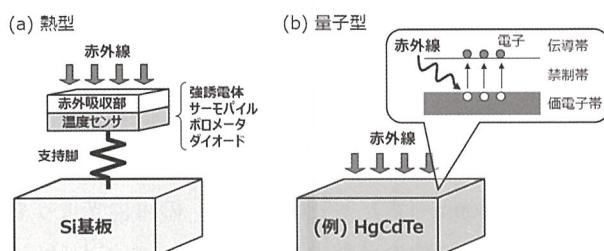


図3 热型、量子型赤外線センサイメージ

Fig 3. The image of uncooled and cooled infrared ray sensor

量子型（図3 (b)）は赤外線吸収で生じる光電効果を利用するものである。通常のカメラの検出器に用いられる Si 材料は、検出波長が $1.1 \mu\text{m}$ 以下に限定されるため、遠赤外線は大半が透過し、十分な感度を得ることが困難である。一般的に、赤外線センサにはテルル化水銀カドミウム HgCdTe (MCT : Mercury Cadmium Telluride と呼ばれる) など禁制帯（バンドギャップ）の狭い化合物半導体が用いられ

る。量子型は感度に優れるものの、熱雑音を低減するため冷却が必要である。

もう一方の熱型（図3(a)）は赤外線吸収により生じる画素の温度変化を電気特性変化として検出するものである。量子型に感度は劣るものの、冷却が不要で、サイズ・コストに優れることから、近年、前節で述べたような用途への適用が進んでいる。

熱型赤外線センサとしては、温度変化を検出する材料により、焦電センサ方式、サーモパイル方式、ボロメータ方式の三方式が主流であった。

強誘電体の分極変化を検出する焦電方式（焦電センサー）は、省エネルギーの観点で優れており、製造コストが低いという利点を有する。一方で検知部を基板部と異種材料で構成するため、画素サイズが大きく多画素化には向きであり、また自発分極は温度の変化成分に対して発生するため、絶対温度検知利用にはチョッパの使用が必須という欠点が存在する。これらの特徴から、一定領域に対する侵入を検知する人感センサとして広く普及している。

サーモパイル方式は異種金属を接合した熱電対の熱起電力を検出する方式である。熱起電力を検知するため画素部に対して電源の供給が不要であるため、省エネルギーの観点で優れており、半導体工程でアレイ化可能であるという利点を有する。一方で、十分な感度を得るために複数本直列接続する必要があるため、一般的には画素サイズは $100 \mu\text{m}$ 程度以上が必要となる。このため、比較的画素数の少ない温度センサに用いられる。

ボロメータ方式は、画素部に抵抗体を有しており、入射赤外線光起因で発生する温度変化による電気抵抗変化を検出するもので、半導体工程によるアレイ化が容易であり、抵抗体の熱電変換効率が優れているため感度が高いという利点を有する。一方で、様々な製造上の課題も存在する。第一に、十分な感度を得るために画素環境を真空状態に保持する必要があるため、実装コストが高価である。第二に、抵抗体を a-Si もしくは酸化バナジウム(VO_x)で構成し、かつ中空断熱のために MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)プロセスを使用する必要があるため、ウエハ製造コストが高価である。最後に、特に VO_x を抵抗体として使用するにあたり、感度均

一性、環境特性の安定性向上ために、様々な補正処理を行う必要があるため、検査コストが高価である。これらのことから、サーモグラフィに代表される、高機能な赤外線画像センサとして用いられる。

以上の特徴をまとめると、熱型赤外線センサは、図4に示すように、焦電センサやサーモパイルのような画素数は少ない（1画素～ 16×16 画素程度）が価格の安い赤外線センサと、ボロメータ方式に代表される感度・解像度ともに高いが高価な赤外線カメラに二分されていることが分かる。前者は安価であるため、主にモーション検知、ローエンド温度検知センサ、ガス検知、火点検知センサとして、利用されている。一方、後者は高価であるが非常に空間分解能、温度検知性能共に高いため、ハイエンド温度検知センサ、いわゆるサーモグラフィや、分光器の検知機器、防犯、軍事防衛等で利用されている。

ただ、前節で述べた、スマートビルディング、人數カウント、面検知型非接触温度計といった新たな市場に求められる、高精度な温度把握と、広範囲を高空間分解能で撮像、低成本という特徴を達成する方式は存在しないことが分かる。

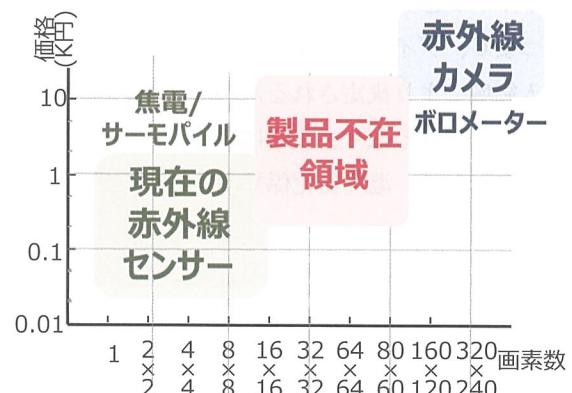


図4 赤外線センサ製品群イメージ

Fig 4. The image of infrared ray sensor lineup

2. 3. TDIR 方式の開発

そこで当社は、前節で述べた課題を克服すべく、人・物の識別及び人の行動把握に使用されることを想定し、焦電センサやサーモパイルより高性能（高解像・高感度）で、ボロメータ方式の赤外線力

メラより低価格な、当社独自の TDIR(Thermal Diode InfraRed)方式を適用した赤外線センサモジュール「MeIDIR」を開発した。

温度検知部として半導体工程で形成される PN ダイオードを採用している。PN ダイオードは定電流駆動しており、その際の順方向電圧とその温度変化率は以下の式で得ることができる。⁽⁷⁾

$$V_f = \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{I_f}{I_s} + 1 \right)$$

$$I_s = \frac{e A_d D_h p_{n0}}{L_h} = A_d T^m \exp \left(-\frac{E_g}{k_B T} \right)$$

$$\frac{dV_f}{dT} = \frac{k_B}{e} \left(\ln I_f - \ln A_d - m - \ln T^m \right)$$

$$\approx -\frac{E_g/e - V_f}{T}$$

ここで、 k_B はボルツマン定数、 I_f はダイオードの動作電流量、 I_s はダイオードの逆方向飽和電流、 A_d は有効 PN 接合面積、 D_h は少数キャリア拡散定数、 p_{n0} は少数キャリア密度、 L_h は少数キャリア拡散長、 E_g はシリコンのバンドギャップ電圧、 m は温度係数である。ここで、式に使用したパラメータは、P+N-ダイオードをモデルとして立式したものである。

つまり、ダイオード順方向電圧は各種注入条件と注入領域により決定されるため、一般的な半導体工程で製造される限り、非常に高均一に製造することが可能である。温度変化係数 dV_f/dT に関しても同様である。

つまり、TDIR 方式を適用した赤外線センサは、画素特性の均一性が優れているため、感度均一性、環境安定性向上ための補正処理の負荷が小さく、検査コスト、部材コストを、ボロメータ方式と比べて低く抑えることができる。加えて、一般的な半導体プロセスすべてで製造することができるため、画素サイズを $25 \mu m$ 以下まで容易に縮小することが可能であり、サーモパイル方式、焦電方式と比べて高精細、高空間分解能を達成することができる。

これらのことから、TDIR 方式は、焦電センサやサーモパイルより高性能（高解像・高感度）で、ボロメータ方式の赤外線カメラより低価格という目標

に対して、最適な方式であるといえる。

加えて、次章で示す、多画素、高温度分解能、低コストを達成するセンサチップ製造プロセス開発と、小型化、省スペース化を達成するウエハレベル真空封止プロセスの開発を行い、高性能、低価格な赤外線センサモジュール開発に成功した。

図 5 は赤外線センサモジュール「MeIDIR」の外観写真である。性能面では、表 1 に示す通り、サーモパイル他社製品と比較し、画素数、空間分解能が 10 倍、被写体の温度分解能が 5 倍、モジュールサイズ 80%縮小を達成した。



図 5 MeIDIR 外観写真

Fig 5. The picture image of MeIDIR

表 1 MeIDIR 性能表

Table 1. Performance table of MeIDIR

| | 従来品 | MeIDIR |
|-----------|-------------------------------------|---|
| 素子 | サーモパイル | サーマルダイオード 赤外線センサー |
| 画素数 | 16×16 | 80×32 (従来比 10倍) |
| 温度 分解能 | $500 mK$ | $100 mK$ (典型値) (従来比 5倍) |
| サイズ | $47 \times 26 \times 6.9$ mm^3 | $19.5 \times 13.5 \times 9.5 mm^3$ (従来比 80%縮小) |

3. 製品開発での具体的な取り組み

3. 1. 多画素、高温度分解能、低コストを達成するセンサチップ製造プロセス開発

本製品に適用した画素構造の鳥瞰電子顕微鏡画像を図 6 に示す。

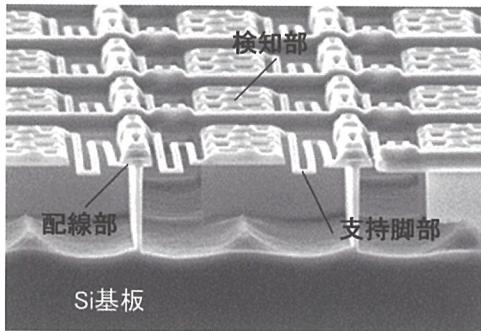


図 6 画素構造の鳥瞰電子顕微鏡画像

Fig 6. The picture of pixels with using scanning electron microscope

サーマルダイオードを含む検知部と、検知部を断熱状態で支持するための支持脚と、配線部で構成されている。支持脚は、サーマルダイオードと配線部を電気的に接続する役割も果たしている。ウエハ部材として薄膜 SOI (Silicon On Insulator) 基板を用い、単結晶 Si からなる SOI 層でダイオードを形成する。同時に、同じく単結晶 Si からなる支持基板側に各種トランジスタ、抵抗体等の読み出し回路構成要素を画素と同一ウエハ上に、しかも一般的なシリコンプロセス工程を用いて形成することが可能となっている。

加えて、シリコンプロセス工程完了後のウエハに対してドライエッチングによりシリコン部分を除去するのみで画素構造が完成するため、他の方式と比べて非常に簡便かつ低成本で製造することが可能となっている。

画素サイズは、 $25 \mu\text{m}$ とサーモパイル方式と比べて面積比 1/10 以下で形成することで多画素化が可能となっている。また、読み出し回路を同一チップ上に形成することで、雑音の発生を抑制することに成功しており、温度分解能に関してもサーモパイル方式と比べて 5 倍の性能を達成している。

3. 2. 小型化、省スペース化を達成するウエハレベル真空封止プロセスの開発

TDIR 方式では、ボロメータ方式と同様、センサチップの感度向上のため、画素部周辺を真空上に保つ必要がある。従来、センサチップ全体をセラミッ

クパッケージに封入してきたが、セラミックパッケージ自体のコストは高く、かつセンササイズの増大を引き起こしていた。

これら問題点を克服するため、センサウエハ上に金属層で構成された封止枠を形成し、対応する位置に同じく封止枠を形成したシリコンウエハを窓材として張り合わせる技術を開発した。イメージ図を図 7 に示す通り、センササイズを体積換算で従来比 15% 以下まで縮小することに成功すると共に、コスト低減も同時に達成している。

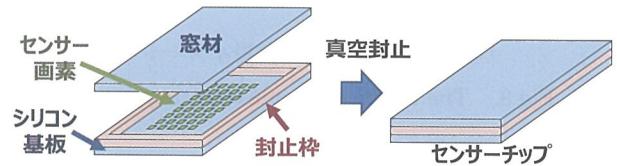


図 7 ウエハレベル真空封止イメージ

Fig 7. The image of wafer level vacuum package

4. 赤外線センサモジュール「MeIDIR」の応用例

開発した赤外線センサ「MeIDIR」の用途としては、防犯、見守り、空調・照明制御、人数カウントなど、IoT 活用のために有効な用途を想定している。ここではそれらを想定したいくつかのケースで撮影を行い、その有効性を検証した。

4. 1. 人数カウント

MeIDIR を用いて屋内で人の撮影を行い、サーモパイルを想定した 16×16 画素の低解像画像と比較した結果を図 8 に示す。モジュール設置は、地表から 2.5m とし、一般的なオフィス、通路を模擬している。5 名の通行人の存在が 80×32 画素の MeIDIR では検知でき、さらに手や頭の位置も検知可能である。一方、 16×16 画素では人数の判別はできない。従って、 80×32 画素の本センサは、屋内で人数や動作を認識するのに十分な性能を有していることが確認できた。

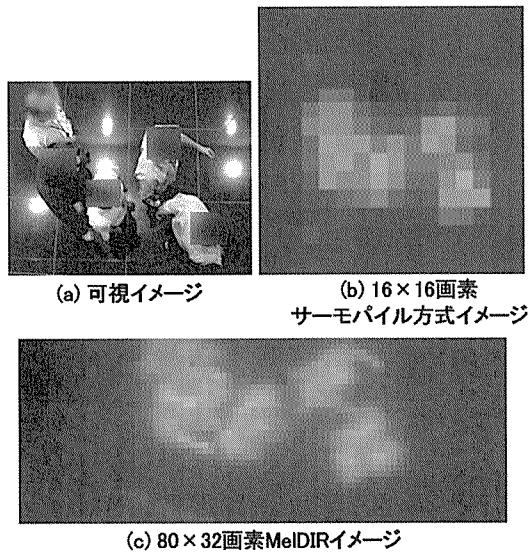


図8 人数カウント利用イメージ

Fig 8. The image of people counting usage

4. 2. 防犯、見守り用途

サーモバイル方式をはじめとする低価格の赤外線センサを用いることでも暗い部屋でも人を検知できるが、MelDIR を用いると、図9に示すように、人の動作（物色する不審な動き）まで検知することができる。また侵入者の人数も検知でき、人と動物の侵入も判別できる。



図9 防犯用途利用イメージ

Fig 9. The image of crime prevention usage

くわえて、本特徴は見守り用途でも有効に作用する。図10はベッドに対向する形でセンサを配置した際の撮像画像である。図からわかる通り、自宅や

病院などで療養中の人の様子を見守ることができる。例えばベッドからの脱落、転倒、寝返り等の複雑な状態検知が可能になり、加えて、温度測定が同時にできるので、体温をモニターすることもできるため、より高度な医療対応、見守り対応が可能になる。さらに、赤外線センサでは個人の特定は難しいため、通常のカメラとは異なり、プライバシーへの配慮が必要なところにも設置可能である。

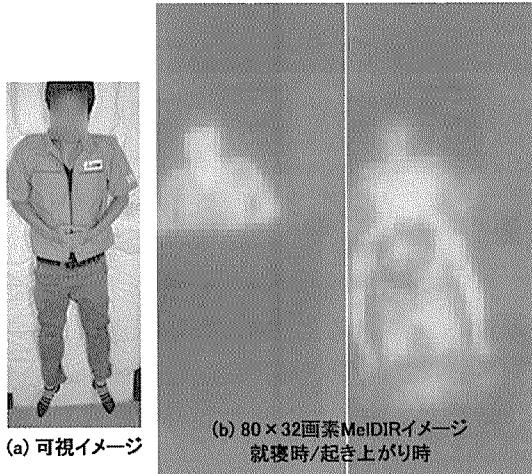


図10 病床見守り用途利用イメージ

Fig 10. The image of bed monitoring usage

4. 3. 空調・照明制御用途

次に空調・照明制御用途を模擬した使用環境を模擬し、撮像した結果を図11に示す。会議室の使用状況（人の数・動作）が検知可能であると共に、温度の高いOA機器（プロジェクタ、ノートPC）も検知できる。本センサを活用すれば、温度に加えて、人と稼働中の機器の位置を認識することができ、その位置によって自動的に空調や照明を制御することが可能である。また、逆にOA機器に対しては空調を当てず、人にのみ空調方向を制御することで、よりパーソナルな省エネルギー制御も可能になる。

なお、当社では、本センサを昨年11月発売のルームエアコン⁽⁸⁾に搭載し、快適空間実現のための自動空調制御に活用している。また同時にスマートフォンを用いた外部からの空調制御及び見守りにも活用している。



図 11 空調・照明制御利用イメージ

Fig 8. The image of air conditioning and lighting control usage

以上のように、MeIDIR は、長波長の赤外線センサの特長をいかし、人・物の識別及び人の行動把握に有効なセンサであると考えられる。

5. まとめ

人・物の識別及び人の行動把握に最適な TDIR 方式赤外線センサモジュール「MeIDIR」を開発した。本センサモジュールは、低コスト、かつ人・物の識別や行動把握を行うにあたり十分な性能を有しているため、防犯、見守り、空調・照明制御、人数カウント、体温測定・監視などの用途に適用することができる。今後、安心・安全な空間、スマートな空間を実現するための有効なセンサとなることを期待している。

参考文献

- (1) D. Fujisawa, et al., Proc. SPIE 8353, 83531G (2012).
- (2) D. Fujisawa, et al., Proc. SPIE 11407, 114071G (2020).
- (3) T. Maegawa, et al., Sensors and Materials, Vol. 26, No. 4 (2014) 229-238
- (4) H. Hata, et al., Proc. SPIE 6206, 620619-1 (2006).
- (5) D. Fujisawa, et al., Proc. SPIE 11002, 110022C (2019).
- (6) Yole development, Market and Technology Preliminary Report: Thermal Imagers and Detectors 2020 COVID 19 outbreak impact (Yole 2020) pp68-74
- (7) T. Ishikawa, et al., Proc SPIE 3689 (1999) pp.556-564
- (8) <https://www.mitsubishi-electric.co.jp/news/2019/0827-a.html>

(2020 年 7 月 2 日 受理)

著者略歴



前川 優宏 (まえがわ ともひろ)
1983年生。2008年3月東京工業大学大学院物理電子システム創造専攻終了。同4月三菱電機株式会社入社。主として、赤外線センサの開発に従事。現在、高周波光デバイス製作所 赤外線センサデバイスプロジェクトグループに所属。2020年JEMA電機工業技術功績者表彰最優秀賞受賞。



金光 伸高 (かねみつ のぶたか)
1978年生。2004年12月ダラステキサス大学大学院経営学専攻終了。別会社を経て、2007年1月三菱電機株式会社に入社。主として、赤外線センサの営業に従事。現在半導体第二事業部に所属。



服部 公春 (はっとり まさはる)
1973年生。1999年3月京都工芸繊維大学大学院電子情報工学専攻終了。同4月三菱電機株式会社入社。主として、赤外線センサの開発に従事。現在、高周波光デバイス製作所 赤外線センサデバイスプロジェクトグループに所属。



太田 彰 (おおた あきら)
1989年大阪府立大学電気工学科卒、1991年同大学院修士課程修了、2001年同大学院博士課程修了。1991年4月三菱電機株式会社入社後高周波デバイスの開発、設計に従事。現在高周波光デバイス製作所 赤外線センサデバイスプロジェクトグループマネージャー。



安井 慎一 (やすい しんいち)
1984年生。2011年3月大阪大学大学院理学研究科物理学専攻修了。同4月三菱電機株式会社入社。主として、赤外線センサの開発に従事。現在、高周波光デバイス製作所 赤外線センサデバイスプロジェクトグループに所属。



山縣 有輔 (やまがた ゆうすけ)
1974年生。1993年3月下旬工業高校電子科卒業。同4月三菱電機株式会社入社。主として、赤外線センサの開発に従事。現在、高周波光デバイス製作所 赤外線センサデバイスプロジェクトグループに所属。