

社会課題解決に向けた 高感度・高機能センサー

長永隆志*
Takashi Takenaga
秋山浩一*
Koichi Akiyama

Advanced Sensing Device Technologies for Solving Social Problems

*先端技術総合研究所(博士(工学))

要旨

三菱電機は、環境、ヘルスケア、産業分野での課題解決のため、半導体をベースとした高感度・高性能なセンサーデバイスを開発している。開発例としては、環境分野向けデバイスではグラフェン光センサー、ヘルスケア分野向けデバイスでは非侵襲血糖値センサー、産業分野向けデバイスではMEMS(Micro Electro Mechanical Systems)型3D超音波センサー及び静電容量センサーが挙げられる。

1. ま え が き

社会課題として日常生活での安心安全の確保や自然環境の維持、健康の管理、産業での高精度化、高効率化及び省力化への対応が必要になっており、当社ではこれらの課題の解決に向けて、様々な階層で取り組みを行っている。これらの取り組みの中で、それぞれの課題に貢献するとともに新たなサービス、ソリューションを提供するため、従来にない高感度・高機能なセンサーデバイスの開発を進めている。

本稿では、センサーデバイスの開発例として、監視や見守り、インフラモニタリング等で利用可能な高感度グラフェン光センサー、医療やヘルスケア分野での利用に向けた痛みを伴わない非侵襲血糖値センサー、自動搬送や人協同ロボットなどで産業を支えることを目的とした3D位置センシング用MEMS超音波センサー、HMI(Human Machine Interface)用として広く社会に役立っている静電容量センサーについて、それぞれの動作原理と応用を述べる。

2. グラフェン光センサー

グラフェンは炭素原子が二次元平面上でハニカム形状に結合した原子層状物質であり、その優れた電子・光物性を応用した光センサー、特に赤外線センサーは従来のセンサーを超える性能の実現が期待されている。現在、当社はこのようなグラフェン固有の光ゲート効果を応用し、高感度・非冷却・低コスト赤外線センサーを開発しており、これまで試作した中波長赤外線センサーで従来比5倍の高感度を達成している。

図1(a)(b)にグラフェン光センサーの動作原理を示す。図1(a)で光増感層に可視光を吸収するp型Si(シリコン)基板を用いたグラフェンFET(Field Emission Transistor)型を例にとって、光ゲート効果について述べる。可視光照射でSi基板中に発生した電子・正孔対によってSi/SiO₂(二酸化ケイ素)界面での空乏層厚が変化する。これに伴ってバックゲート電圧 V_{bg} が変化する(変化量を ΔV_{ph} とする)、FETの $V_{bg}-I_d$ 特性は図1(b)のように変化する。光入射による電流変化 ΔI_{ph} は $V_{bg}-I_d$ の傾きに比例し、傾きはグラフェンの電界効果移動度に比例する。グラフェンの電界効果移動度はSiの100倍程度と極端に大きく、さらにグラフェンは原子一層の薄膜であるため微小な電圧変化であってもその電流変調効果は極めて大きくなる。結果として ΔI_{ph} は光ゲート効果のない場合と比較して10~1,000倍以上と極端に大きな値が得られる。これが光ゲート効果である。一般化すると、対象とする波長の光によって電圧変化を発生する光増感層をグラフェン近傍に配置できれば、任意の波長で光ゲート効果を発生させることが可能になる。

そこで検出波長に合わせて光増感層を変えることで紫外線波長域から遠赤外領域まで、高感度に検出できることを実証した。現在は図1(c)のようにMWIR(Mid Wavelength InfraRed)領域の赤外線イメージセンサーの作製を完了しており、LWIR(Long Wavelength InfraRed)での非冷却赤外線イメージセンサーの開発に取り組んでいる。このような高感度の赤外線センサーは、図1(d)のような長距離・広範囲の移動体の監視や工場での漏洩(ろうえい)ガスの検知などのシステムへの応用が期待される。

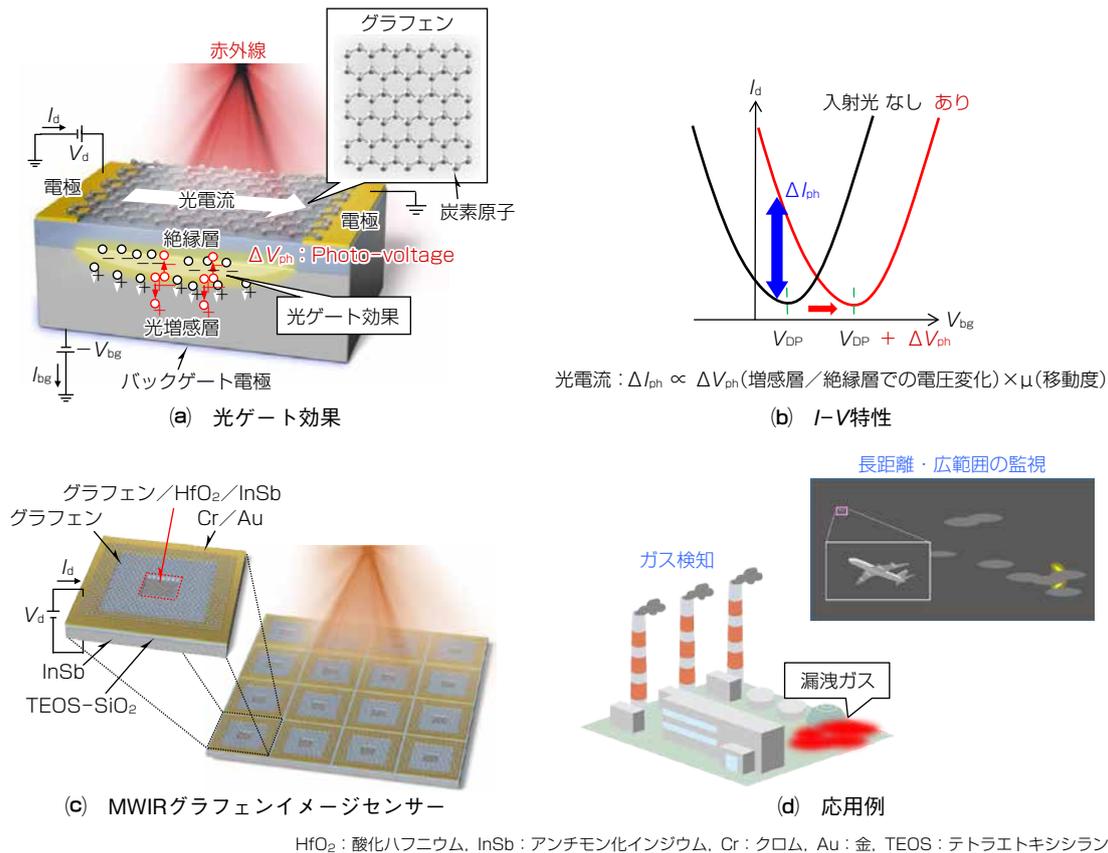


図1-グラフェン光センサー

3. 非侵襲血糖値センサー

生活習慣病の予防・治療の観点から血糖値が重要な指標として注目されている。従来の血糖値測定は、静脈採血や指先採血による自己血糖測定器SMBG(Self Measurement of Blood Glucose)、皮下間質液中グルコースを穿刺(せんし)してモニターするCGM(Continuous Glucose Monitor)などの侵襲的な方法が用いられている。図2(a)のように、これらの方式では苦痛を伴うことやランニングコストが高価なことから、非侵襲的な血糖値測定法の開発が求められている。そこで図2(b)のように、グルコースの光吸収強度が大きいいわゆる指紋スペクトルを持つ赤外線の波長領域で、生体スペクトルを測定する技術の開発を行った。この技術では、生体の皮膚を機器に当てるだけで高いS/N比(Signal-to-Noise Ratio)で生体スペクトルを取得できる。さらに、そのスペクトル中に含まれるグルコーススペクトルから血糖濃度を推定するアルゴリズムを構築した。

今後は試験データの取得やアルゴリズムの改良によって、高精度な血糖値センサーシステムの開発を目指す。

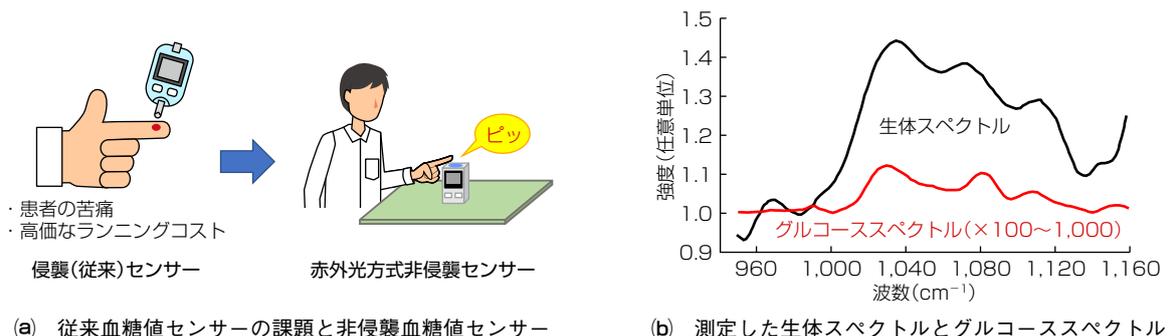


図2-非侵襲血糖値センサー

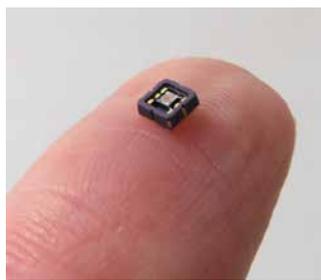
4. MEMS型3D超音波センサー

開発したMEMS型3D超音波センサーは、送信した超音波パルスが対象物で反射し戻ってくるまでの時間を用いて距離を測定するMEMS超音波センサーと、複数のセンサーを用いて三次元的な位置を検知するデバイスである。

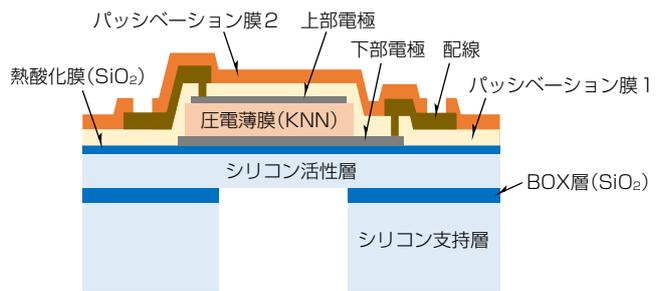
この素子は図3(b)のようにSiメンブレン上に圧電薄膜を形成し、メンブレンを振動させることで超音波の送受信を行う。圧電薄膜にはPZT:Pb(Zr, Ti)O₃(チタン酸ジルコン酸塩)が一般的に用いられるが、環境負荷軽減の観点から鉛フリーのKNN:(K, Na)NbO₃(ニオブ酸カリウムナトリウム)を採用し、PZTと同等の性能を実現した。MEMS技術を適用することによって、素子サイズは1.2mm角、体積はバルクPZT素子の0.01%と超小型になった。

MEMS超音波センサーはメンブレンが極小のため、高い送信音圧を得るために共振駆動を用いるが、メンブレンの変位量はハードスプリング効果という非線形周波数特性によって制限される。この開発では、圧電薄膜の構造と積層薄膜の応力によってハードスプリング周波数特性、ソフトスプリング周波数特性、ハードスプリングとソフトスプリングの混合周波数特性を制御でき、混合周波数特性でメンブレンの変位を最大化できることを見いだした。これによって、5m以上の測距性能を達成した。

複数の受信素子での受信時間差を解析することによって、対象物の三次元位置を検出できる。MEMS超音波センサーは小型かつ低コストな三次元位置検知を可能にして、自律型モビリティでの足元センシングをはじめとする各種アプリケーションへの応用が期待される。



(a) パッケージに搭載した素子



(b) 素子の断面模式図



(c) 自律型モビリティでの足元センシング



(d) 透明な物体の検知

図3-MEMS型3D超音波センサー

5. 静電容量センサー

静電容量センサーは、センサー電極と検出対象物との間に生じる静電容量の変化を検知することで、接触・非接触を問わず導電体や誘電体の存在を検出できるセンシング技術である。光や機械的接触を必要とせず、微細な静電容量変動を高感度に測定できるため、外乱光や摩耗の影響を受けにくく、長期にわたり安定した動作が可能である。

この開発では、図4(a)に示すように金属プレート越しでも非接触検知が可能なセンサー電極形状を設計することで、金属意匠面を介した非接触ボタン機能を実現することに成功し、図4(b)のように当社製エレベーター操作盤へ搭載している。

さらに冬季など乾燥した時期には、操作する人物が帯電した電荷を金属意匠面に静電気放電(ESD: Electrostatic Discharge)しやすくなる。この際に発生する過電流が静電容量センサーの検出ICに流入すると、故障の原因になる。そこで

検出電極とは別に過電流を受けやすいESD対策用電極を追加配置し、その耐性を向上させている。

これらの技術(非接触操作ボタンで培った等価回路による容量モデル化技術、タッチパネルで検証したロバスト性向上技術、そして微小容量の高感度検出技術)を応用し、当社では静電容量センサーを検査用CIS(Contact Image Sensor)検出センサー、ロボット用接触検知センサー、圧力検知センサー、触覚フィードバックデバイス、さらにはエレベーターやFA機器、家電などの各種当社製品の入力装置へ展開している。

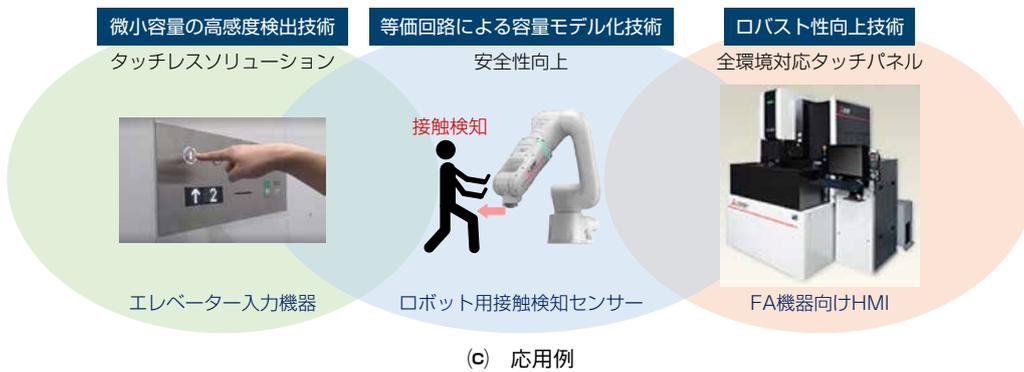


図4-静電容量センサー

6. む す び

環境、ヘルスケア、産業分野での課題解決のため、半導体をベースとした高感度・高性能なセンサーデバイスを開発した。このセンサーデバイスを活用し、それぞれの課題に貢献するとともに、新たなサービス、ソリューション創出に取り組む。