

平成 31 年 3 月 27 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14189

研究課題名(和文)共振型光音響センサ

研究課題名(英文)Resonant Photoacoustic Sensor

研究代表者

小野 崇人(Ono, Takahito)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：90282095

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：体内の成分を非侵襲で測定するための光音響センサを開発した。光音響センサは、シリコンの振動子からなり、シリコンとガラスの陽極接合により真空中に封止して高いQ値を持つことを特徴としている。また、センサにはレーザー光を通す、ガラスの窓を形成してある。パルスレーザー光をガラス窓を通して対象に照射し、吸収が起きた際に発生する音響波を、ガラスとシリコンの支持部を通して、センサの振動として検出する。開発したセンサは、ゼラチンに含有させたわずかなグルコースの濃度を測定することが可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究が成功すれば、非侵襲で体内物質を検出でき、ヘルスケアなどの応用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：A photoacoustic sensor is developed for the noninvasive detection of biological substances in human body. The photoacoustic sensor is consisted of a high quality factor silicon resonator which is hermetically packaged by glass-silicon bonding. A glass window is formed in the sensor in order to irradiate pulse laser light to an object. The laser pulses passing through the window is irradiated to the object is converted to acoustic wave if the laser pulses are absorbed. The acoustic wave travels to the resonators via the glass and silicon support, thus, the acoustic wave can be detected from the vibration amplitude of the resonator. It is demonstrated that the small amount of glucose concentration in gelatin samples can be estimated from the developed photoacoustic sensors.

研究分野：高感度センサ

キーワード：高感度センサ 光音響 ヘルスケア

1. 研究開始当初の背景

肥満者の増加に伴う糖尿病患者の増加は、世界的に医療費の増大を招き、大きな問題となっており、予防という観点からもその簡易測定は極めて大きな需要がある。血液採取によらない糖尿病の非侵襲計測は、超音波、電気（インピーダンス）、光吸収などを利用した多くの研究がなされているにも関わらず、現在に至るまで、決定的な技術が実現していない極めて挑戦的な課題である。グルコースを検出するコンタクトレンズや唾液からグルコースの検出などの研究も進められているが、これらのグルコースは2次的なものであり、体内のグルコースと必ずしも一致しないケースがある。グルコースの光吸収計測では、皮膚や他物質による光の吸収・散乱により、再現性のあるデータ取得が難しく、実用レベルには至っていない。

これに対して、光音響検出を利用したグルコース検出手法が知られている。光音響とは、物質に光を断続的に照射した時に光が吸収されて音波に変換する現象であり、光熱効果の非線形を利用することで体内物質の情報を取得できる。光音響の1つの利点は、音響波は生体組織内でも減衰が少なく伝播する点にある。また別の利点として、光熱変換は、非線形性があり、光を集光した部分で強く光熱変換が起きるため、光の散乱の影響は受けにくい。実際光音響において光音響測定により実際の患者から高い精度でグルコースの検出が、いくつか報告されている（例えば、*Clinical Chemistry* 45 (1999) 1587.）。しかし、これまでの報告では、CO₂ レーザーなど大型のレーザーを使う必要があり、実験室レベルでの実証に留まっている。

2. 研究の目的

本研究では、高感度な音響センサを開発し、半導体 LD でも光音響信号が計測できるようにすることで、家庭でも使える小型のグルコース検出システムを目指した要素技術を開発する。高感度検出のために、センサにおいて機械共振や音響共振（ヘルムホルツ共振）を使うことを特徴としている。一般に用いられている、市販のマイクロフォン（エレクトレットマイクロフォン等）は、人の可聴帯において感度がフラットな特性になるように作られている。一方、共振を用いると、外部からのわずかな信号を振動系に蓄積し、増幅することが可能になる。そこで、音響センサを片持ち梁構造などにし、外部からの音波により機械共振するように設計することで高感度化を試みる。最終的に人の指先等でグルコースを測るためのプロトタイプを試作する

3. 研究の方法

光音響計測用のユニットを開発し、このユニットに作製した光音響センサを取り付けて、その性能を評価した。光音響ユニットは

2種のレーザーダイオード(LD)を取り付けてあり、レーザー光を照射するガラス窓を形成してある。また、ヘルムホルツ共振器も形成してある。センサ等を設計・試作し、その性能を評価した。

4. 研究成果

(1) ヘルムホルツ共振の測定

光音響センサとしては、マイクロフォン型と超音波トランスデューサ型の2種類が一般に使われている。マイクロフォン型においては、試料にレーザーパルスを照射した時に、吸収による熱により気体が熱して膨張するのを検出する。この場合、空気を媒介するため、固体から気体への音響インピーダンスが問題になる。そこで、ヘルムホルツ共振器を試作し、音響波を増幅させることを試みた。ヘルムホルツ共振器は機械加工で、キャビティと管を作り、そのサイズで共振数波数を決めた。共振数波数が 250Hz 近傍で 25 倍の増幅率が得られた。

(2) 片持ち梁型の共振センサ

片持ち梁型の振動子で光音響波を測定する音響センサを設計、試作した。振動子支持部に貫通穴を形成し、この部分にレーザーを照射し、接触している試料からの音響波を振動子に伝えてその振動振幅から音波を検出する。試作したセンサは 790Hz に 1 次モードの共振周波数があり、その Q 値は大気中では、40 ほどであった。試作したセンサにおいて、1550nm と 905 nm の両方の波長のレーザーパルスを天然ゴム試料に照射して、その際の光音響波の検出を試み、その動作を確認した。

また、シリコン振動子の Q 値を高くするため、真空中に封止したセンサを開発した。このセンサでは、Q 値が 5000 以上になり極めて高感度な測定が可能であることを示した。

(3) リング状圧電センサ

圧電素子を加工し、貫通孔にレーザーを通すことが可能なリング状の圧電センサを開発した。材料としては PZT および圧電性能が高い PZNT の両方の材料を試してみた。これらの振動子はたわみ振動モードを 100 - 1MHz の範囲内に持ってあり、レーザーのリングの中心部から光音響波が同心円状に広がる際に、音響波と強くカップリングする振動モードにおいて高感度化が可能なることを示した。570kHz の近傍に見られる共振が強く音響波と結合し、その Q 値は約 20 - 40 程度であった。

(4) 試作したユニットによる光音響実験

2種の LD を使った光音響信号の検出実験を行った。グルコースを混ぜた PDMS (シリコンゴム) における光音響信号強度のグルコース濃度依存性を測定した。真空封止型シリコン振動子とリング状の圧電センサの両方で実験を行った。なお、PDMS は人の体と音響インピーダンスが近いことから利用している。PDMS とグルコース水溶液を 11 対 2 の重量比で混ぜ合わせ、その水溶液中のグルコー

ス濃度に対する信号強度依存性を測定した。1550nmの波長の信号では、濃度の増加に対して光信号強度が増加したのに対して、905nmの波長のレーザーでは大きな変化は見られなかった。905nmのレーザーによる信号を参照信号としてその信号比はグルコース濃度にほぼ比例して増大することが分った。以上の実験から、2種の波長の光音響信号比がグルコースの濃度と相関があり、グルコース計測に利用できることを実証した。

また、実際に人体にてグルコース検出の実験を行い、体内の血液を取り出して測定したグルコース濃度と光音響信号の比較を行った。その結果、グルコースの濃度変化と光音響信号の間に相関関係が見られた。

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9件)

- (1) Nguyen Van Toan, Naoki Inomata, Masaya Toda, and Takahito Ono, ELECTRICALLY DRIVEN ION TRANSPORT IN NANOPORES FABRICATED BY METAL ASSISTED CHEMICAL ETCHING METHOD, Proceeding of IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 19 (2018) 1253-1256. (査読有)
- (2) Nguyen Van Toan, Masaya Toda, and Takahito Ono, High Aspect Ratio Silicon Structures Produced via Metal Assisted Chemical Etching and Assembly Technology for Cantilever Fabrication, IEEE Transactions on Nanotechnology, (2017) 567 – 573. (査読有)
- (3) Van Toan, N., Shimazaki, T., Inomata, N., Song, Y., Ono, T., Design and fabrication of capacitive silicon nanomechanical resonators with selective vibration of a high-order mode, Micromachines 8, 10 (2017) 312. (査読有)
- (4) Nguyen Van Toan and Takahito Ono, Progress in performance enhancement methods for capacitive silicon resonators, Japanese Journal of Applied Physics 56, (2017) 110101 (1 to 11). (査読有)
- (5) Gaopeng Xue, Masaya Toda, and Takahito Ono, VACUUM PACKAGED CANTILEVER SENSOR MOUNTED WITH A MAGNETIC PARTICLE FOR MAGNETIC FORCE DETECTION, Proceeding of International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 19 (2017) 1096-1099. (査

読有)

- (6) Nguyen Van Toan, suguru Sangu and Takahito Ono, Design and fabrication of a large area freestanding compressive stress SiO₂ optical window, Journal of Micromechanics and Microengineering, 26 (2016) 075016 (9pp). (査読有)
- (7) Nguyen Van Toan, Tsuyoshi Shimazaki, and Takahito Ono, Single and mechanically coupled capacitive silicon nanomechanical resonators, Micro & Nano Letters, 11, 10 (2016) 591-594. (査読有)
- (8) Nguyen Van Toan, Suguru Sangu, and Takahito Ono, Fabrication of high aspect ratio SiO₂ and Tempax glass pillar structures and its application for optical modulator device, Journal of Microelectromechanical Systems, 25, 4 (2016) 668-674. (査読有)
- (9) Y. Kawai, J.H. Kim, N. Inomata, and T. Ono, Parametrically Actuated Resonant Micromirror Using Stiffness Tunable Torsional Springs, 28 (2), (2016) 131–139. (査読有)

[学会発表](計11件)

- (1) Nguyen Van Toan, Masaya Toda, Takumi Hokama and Takahito Ono, Patterning high aspect silicon pillars on cantilever by metal assisted chemical etching for humidity sensing, The 30th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, January 22-26, Las Vegas, USA, (2017)1232-1235.
- (2) Wataru Suwa, Naoki Inomata, Masaya Toda and Takahito Ono, RESONANT MAGNETIC SENSOR USING MAGNETIC GRADIENT FIELD FORMED BY PERMALLOY CONCENTRATOR, The 19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers 2017) Kaohsiung, Taiwan, June 18-22 (2017) 822-825.
- (3) 猪股 直生, 小野 崇人, 酸化バナジウム薄膜のピエゾ抵抗評価と圧力センサ応用, 第34回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム、広島 広島国際会議場 10月31日 11月2日(2017).
- (4) Nguyen Van Toan, Tsuyoshi Shimazaki, Naoki Inomata, Takahito Ono Capacitive silicon nanomechanical resonators capable of selective vibration of high-order mod, 第34回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム、広島 広島国際会議場 10月31日 11月2日(2017).
- (5) 朱 敏杰, 猪股 直生, 小野 崇人, バナ

ジウムドーブ二硫化モリブデン二次元膜の合成に関する研究, 第34回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム、広島 広島国際会議場 10月31日 11月2日(2017)。

- (6) 諏訪 亘, 猪股 直生, 戸田 雅也, 小野 崇人, 第34回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム、広島 広島国際会議場 パーマロイコンセントレータによる磁場勾配を用いた共振型磁気センサ, 10月31日 11月2日(2017)
- (7) Nguyen Van Toan, Suguru Sangu, and Takahito Ono, Glass reflow process and its applications, Proceeding of the 11th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and. Molecular Systems (NEMS), Matusshima Bay and Sendai MEMS city, Japan, 17-20 April, (2016) 260-264.
- (8) Tsuyoshi Shimazaki, Nguyen Van Toan, and Takahito Ono, Mechannically coupled capacitive silicon nanomechanical resonators, Proceeding of the 11th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and. Molecular Systems (NEMS), Matusshima Bay and Sendai MEMS city, Japan, 17-20 April, (2016), 591 - 594.
- (9) N.V. Toan, M. Toda, and T. Ono, High aspect silicon structures using metal assisted chemical etching, Proceedings of the 16th International Conference on Nanotechnology, Sendai, Japan, August 22-25, 2016, pp.720-723.
- (10) Imran Latif. Zhonglie An, and Takahito Ono, Resonant acoustic microsensors for photoacoustic detection, Proceedings of the 16th International Conference on Nanotechnology, Sendai, Japan, August 22-25, 2016, pp. 925-927.
- (11) Yuya Mochimaru, Masaya Toda and Takahito Ono, Fabrication and evaluation of CVD diamond resonators, Proceedings of the 16th International Conference on Nanotechnology, Sendai, Japan, August 22-25, 2016, pp. 676-677.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕 該当なし

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕
該当なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小野 崇人 (Ono, Takahito)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：90282095

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし