

令和 3 年 8 月 25 日現在

機関番号：32717

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K01427

研究課題名（和文）圧電性結晶膜を用いた集束型高周波高出力超音波トランスデューサの開発と評価

研究課題名（英文）Development of high intensity and high frequency focused ultrasonic transducers with piezoelectric films.

研究代表者

石河 睦生 (Ishikawa, Mutsuo)

桐蔭横浜大学・医用工学部・講師

研究者番号：90451864

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究グループは強力超音波の連続的な放射を目的として、エピタキシャルKNbO₃膜を用いたHF帯、VHF帯用凹面型超音波トランスデューサの開発を行った。試作した超音波トランスデューサを用いて、水中にて5MHz～20MHzで4MPaを超える送波音圧の測定および音響的な非線形現象の観測を行った。高周波数帯においてこのような非線形音響の観測は未だ例を見ないのもである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

試作した圧電結晶膜超音波トランスデューサを用いて、水中にて5MHz～20MHzにて、マイクロストリーミング、マイクロバブル、ナノバブルの発生、キャピテーションの発生、衝撃波の観察とそれによる音響化学反応の観察を行った。10MHzを超える周波数帯では上記のような非線形音響の観察例の報告は非常に少ないのが現状であるが、本研究により高周波での非線形音響現象用超音波トランスデューサの提案がなされた。

研究成果の概要（英文）：The KNbO₃ films were deposited by hydrothermal method. It is known that the hydrothermal method is able to fabricate high quality piezoelectric films. In this study, we measured sound pressures and acoustic radiation pressures at resonant frequency with prototype high-frequency ultrasonic transducer using thickness mode of hydrothermal KNbO₃ films.

The resonance frequency and radiated sound pressure of the prototype KNbO₃ ultrasonic transducers of focusing type was measured by hydrophone. And, the radiated sound pressure has a linearity relationship between the applied voltages until 3 MPa at 10MHz. And the maximum pressure was approximately 4MPa or more. This value is very high intensity at high frequency and enough value for several high intensity ultrasonic applications with nonlinear acoustics.

研究分野：超音波、圧電体

キーワード：超音波 高周波 非線形音響 圧電体 圧電結晶膜

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

超音波によるバブルの発生やその圧壊現象であるキャビテーションは、その特異的な性質から医療分野や美容など様々な分野での活用が期待され、近年ではサブミクロン以下のバブル利用や高周波キャビテーションは応用展開の期待が大きくなっている。現在までに、キャビテーション等の非線形音響現象について報告されている使用周波数帯は 10MHz 以下のものが多いが、これは 10MHz 以上ではバブルの発生とその圧壊にはそれぞれ大きな音圧が必要になり、そのような音圧の超音波を送信または照射できるような高周波強力超音波トランスデューサは入手が非常に困難であることも一因である。

そこで本研究では未だ報告例が極めて少ない周波数帯となる 10MHz 以上でのキャビテーションが実現可能な超音波トランスデューサの開発を行った。

2. 研究の目的

10MHz 以上の周波数帯で強力超音波を送信できる超音波トランスデューサの開発を行い、また試作したトランスデューサを高出力動作させた際の特性についての評価、高周波高出力動作による非線形音響現象について報告し、応用に向けた検討を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

水熱合成法により製膜された厚さ約 150 μm の KNbO_3 圧電性結晶膜に金を真空蒸着法により形成後、上部電極と下部電極としてそれぞれをコネクタ接続した。構造図を Fig.1、外観図を Fig.2 に示す。超音波トランスデューサ背面に空気層を用いる構造である。試作した超音波トランスデューサの圧電縦効果による厚み振動モードの共振周波数は約 10MHz であることを超音波送受信実験および電気的共振周波数の測定により確認した。

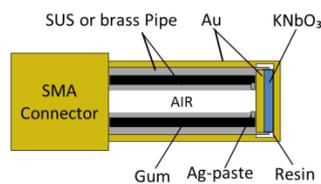


Fig.1 構造図

4. 研究成果

実際に試作した超音波トランスデューサで、中心周波数 10MHz のバースト波 (10 波) で水中にて音圧 4MPa の送信を、ハイドロフォンを用いて確認した。また高音圧超音波の放射時、大きな波形ひずみと偶数倍奇数倍の高調波が検出され、また、超音波トランスデューサ前面に音響流の発生も確認された。

高出力動作時に起こっている非線形音響現象について、KI 溶液を用いてキャビテーション発生の有無について測定した。KI 溶液は酸化反応により I^- イオンになる。この反応を超音波によるキャビテーション現象で引き起こし、 I^- イオンを生成する。 I^- イオンは溶液中に超音波を照射したとき生成する活性酸素種(過酸化水素)で酸化され、 I_2 となる。 I^- イオンを含む溶液で大部分が I_3^- となる。生成された I_3^- イオンは波長 355nm の紫外線に吸収の極大を持つ性質があるのでその性質を利用して分光光度計により I_3^- イオンの計測を行った。試作した超音波トランスデューサを用いて溶液中への超音波照射後、分光光度計 (V-550, 日本分光) を用いた吸光スペクトル測定を行うことで KI 溶液の酸化反応を測定した。実験では出力 50W と 300W のパワーアンプを用い、ファンクションジェネレータの設定値を変化させることで印加電圧を変化させた。50W のパワーアンプを用いた場合は時間、電圧変化とともに増加させても KI 溶液に変化は見られなかった。300W のパワーアンプを用いた場合は、印加電圧を上げることで吸収スペクトルに変化が見られた。照射時

間と 355nm の吸光度の関係を Fig.3 示す。照射時間の増加と共に 355nm の吸光度が増加されていることが分かった。強力超音波照射により、 I_3^- イオンが KI 溶液中に増加したことが考えられる。

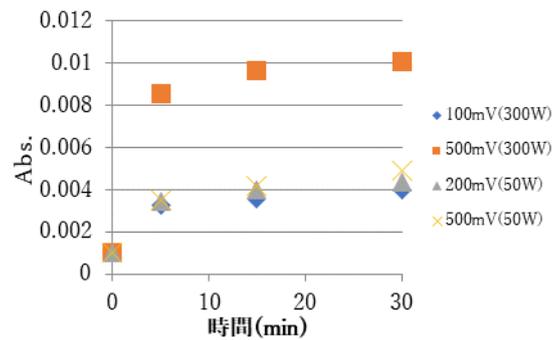


Fig.3 印加電圧を固定したときの照射時間と 355nm の吸光度の関係

試作した超音波トランスデューサは高周波といえる 10MHz にてキャビテーション発生が確認された。そこで次に高周波キャビテーションによる対象物の洗浄効果の評価を行った。対象物はチタン表面に塗った油性黒インク(対象物)を用いた。チタンに油性黒インクを塗る前と後の表面形状観察結果では、本手法による超音波トランスデューサを用いる事で、超音波洗浄機よりも 1/10 の出力であるにもかかわらず油性黒インクはチタン表面上から剥離し、洗浄効果が期待できることが分かった。さまざまな洗浄対象物に関して、今後は周波数や指向性、出力、洗浄時間等を変数に実験を行うことで、新しい高周波超音波洗浄分野への応用に向けた検討が有用であることが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yoshiharu Ito, Akinori Tateyama, Yoshiko Nakamura, Takao Shimizu, Minoru Kurosawa, Hiroshi Uchida, Takahisa Shiraishi, Takanori Kiguchi, Toyohiko J. Konno, Mutsuo Ishikawa, Hiroshi Funakubo.	4. 巻 58
2. 論文標題 Growth of epitaxial (K, Na)NbO ₃ films with various orientations by hydrothermal method and their properties	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Jpn. J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 SLLB14-1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7567/1347-4065/ab3958	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 -

1. 著者名 石河 睦生, 白石 円, 塚本 絢穂, 内田 庸助, 田原麻梨江, 黒澤 実, 舟窪 浩	4. 巻 3
2. 論文標題 広指向性を有する球状凸面型高周波超音波トランスデューサの開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 平成30年度生体医歯工学共同研究拠点成果報告会	6. 最初と最後の頁 p. 144
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mutsuo Ishikawa, Yosuke Uchida, Takahisa Shiraishi, Marie Tabaru, Hiroshi Funakubo, Minoru Kurosawa	4. 巻 IWPMA2018
2. 論文標題 Deposition of piezoelectric KNbO ₃ /PbTiO ₃ films for ultra high frequency and high intensity ultrasonic transducers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators(IWPMA2018)	6. 最初と最後の頁 113
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takahisa SHIRAIISHI, Yoshiharu ITO, Mutsuo ISHIKAWA, Hiroshi UCHIDA, Takanori KIGUCHI, Minoru K. KUROSAWA, Hiroshi FUNAKUBO, Toyohiko J. KONNO	4. 巻 126
2. 論文標題 Preparation of {001}c-oriented epitaxial (K, Na)NbO ₃ thick films by repeated hydrothermal deposition technique	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Ceramic Society of Japan	6. 最初と最後の頁 281-285
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2109/jcersj2.17251	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 -

1. 著者名 Takahisa Shiraishi ¹ , Mutsuo Ishikawa ² , Hiroshi Uchida ³ , Takanori Kiguchi ¹ , Minoru K. Kurosawa ⁴ , Hiroshi Funakubo ⁵ and Toyohiko J. Konno ¹	4. 巻 56
2. 論文標題 Characterization of (111)-oriented epitaxial (K0.5Na0.5)NbO ₃ thick films deposited by hydrothermal method	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 10PF04-1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.56.10PF04	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Mutsuo Ishikawa, Ayaho Tsukamoto, Nao Saito, Akito Endo, Shintaro Yasui, Marie Tabaru, Hiroshi Funakubo, Minoru Kurosawa.
2. 発表標題 Development of high intensity and high frequency ultrasonic transducers using piezoelectric films,
3. 学会等名 Symposium on ultrasonic electronics 2019 (USE2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mutsuo ISHIKAWA, Ayaho TSUKAMOTO, Nao SAITO, Akito ENDO, Shintaro YASUI, Marie TABARU, Hiroshi FUNAKUBO, Minoru KUROSAWA
2. 発表標題 Deposition of epitaxial piezoelectric films for high intensity and high frequency ultrasonic transducers and their applications,
3. 学会等名 International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石河 睦生, 内田 庸助, 塚本 絢穂, 齋藤 直, 遠藤 聡人, 安井 伸太郎, 田原 麻梨江, 舟窪 浩, 黒澤 実.
2. 発表標題 高周波強力超音波トランスデューサ用圧電結晶膜の製膜 とその評価
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石河 睦生, 内田 庸助, 田原麻梨江, 白石 貴久, 舟窪 浩, 黒澤 実
2. 発表標題 高周波強力超音波トランスデューサの開発と医療応用へ向けて
3. 学会等名 第 38 回エレクトロセラミックス研究討論会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mutsuo Ishikawa, Yosuke Uchida, Takahisa Shiraishi, Marie Tabaru, Hiroshi Funakubo, Minoru Kurosawa
2. 発表標題 Deposition of piezoelectric KNbO3/PbTiO3 films for ultra high frequency and high intensity ultrasonic transducers
3. 学会等名 International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators(IWPMA2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mutsuo Ishikawa, Yosuke Uchida, Takahisa Shiraishi, Marie Tabaru, Hiroshi Funakubo, Minoru Kurosawa
2. 発表標題 Characteristics of high intensity and high frequency ultrasonic transducers using hydrothermal epitaxial piezoelectric films
3. 学会等名 International Congress on Ultrasonics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Mutsuo Ishikawa, Yosuke Uchida, Nobuaki Kosuge, Takahisa Shiraishi, Marie Tabaru, Hiroshi Funakubo
2. 発表標題 Characteristics of High Frequency and High Intensity Ultrasonic Transducers using Thickness Vibration Mode of Epitaxial Piezoelectric Films
3. 学会等名 the 4th International Conference on Advanced Electromaterials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017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
研究 分担 者	田原 麻梨江 (Tabaru Marie) (60721884)	東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授 (12608)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------