

法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-11

高精度相補型スプリットリング共振器グルコースセンサー

吉村, 浩司 / Yoshimura, Koji

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学研究科編

(巻 / Volume)

65

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

5

(発行年 / Year)

2024-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00030723>

高精度相補型スプリットリング共振器 グルコースセンサー

A Complementary Split Ring Resonator Sensor Optimized for Maximizing
the Dip and Q-value in S21 Frequency Characteristics

吉村 浩司
Yoshimura Koji
指導教員 安田 彰

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士課程

Abstract—A modified complementary split ring resonator (CSRR) sensor with a high-quality factor (Q-value) and sensitivity is developed for aiming at fluidic dielectric characterization, such as glucose monitoring. The microstrip transmission line and the CSRR sensor are formed on the front and backplane of a printed circuit board, respectively. The CSRR sensor is formed by two straight-line inductors, placed perpendicular to a microstrip line and a single ring-shaped capacitor. The width of the microstrip line (MSL) is widened, despite of lowering the characteristic impedance less than 50Ω . The printed circuit board was fabricated. From S21 measurements, the dip was -56 dB at 6.14 GHz without a glucose aqueous solution on the CSRR sensor. Changes in S21 dip frequency and amount of the dip were observed to be approximately 100 MHz and 3 dB, respectively, for five different concentration of glucose aqueous solutions of 0, 1, 3, 5, and 10 wt%.

Key Words : CSRR, Q-value, Ring capacitor, Straight-line inductor, Wide microstrip line

1. はじめに

モバイル機器やウェアラブル機器の利用が急速に進んでいる。糖尿病から人々を守るために、腕時計にグルコースセンサーを取り付ける試みが行われたが、感度に問題がある可能性がある[1]。血液中であっても流体の誘電率やグルコース濃度を測定するアプローチとして、ある周波数で共振し、誘電率やグルコース濃度が変化すると周波数が変化する相補型スプリットリング共振器 (CSRR) 構造が利用されている。典型的な CSRR 構造は、誘電体回路基板のグラウンドプレーン上に形成された内輪と外輪のコンデンサとインダクタを使用する。この構造は共振器として機能する[2]。この構造は、誘電体基板の表側のマイクロストリップ線路 (MSL) と組み合わせて利用され、帯域除去フィルタのような特定の周波数にディップを有する S21 特性を持っている[3],[4]。しかし、そのディップ量は十分とはいえなかった。

グルコースセンサーのような高感度液体センサーを実現するためには、CSRR センサー自体の共振性能を向上させる必要がある。このような場合、シンプルなレイアウト構造が有効となる可能性がある。そこで本研究では、共振や Q 値に与える部品の影響を考慮し、簡単な構造で高感度な CSRR センサーを実現することを目的とする。

2. 測定原理

a. CSRR センサーの提案構造

本研究では、MSL と CSRR を用いて S21 周波数特性のディップを測定する。図 1 に提案構造の俯瞰図を示す。CSRR は、基板が FR-4 と呼ばれるプリント基板 (PCB) の裏面にグラウンドプレーンとともに構築されている。MSL は基板の前面に配置されている。

CSRR の詳細なレイアウトを図 2 に示す。グラウンドプレーンにある金属膜のない円形の領域は、内側の金属領域 (以下、金属島と呼ぶ) と外側のグラウンドプレーンとの間でコンデンサ C_c として機能する。金属島は電界を利用して MSL からの信号と結合し、コンデンサ C_s を形成する。

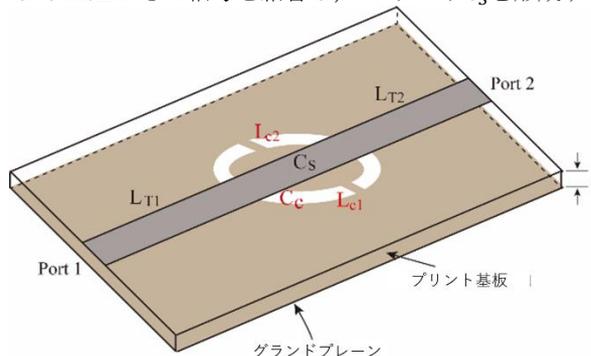


図 1 提案する CSRR センサーの構造

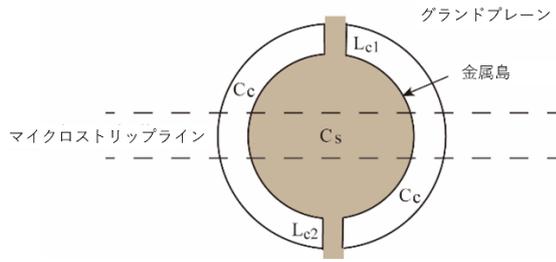


図2 グランドプレーンのレイアウト

金属島と接地面の間には置かれた 2 本の直線は、インダクタ L_{c1} および L_{c2} として機能する。

b. 動作原理

S21 周波数特性のディップ周波数は、図 1 と図 2 に示す構造で測定する。図 1 のポート 1 に入力信号を印加し、ネットワークアナライザを用いてポート 2 の出力を測定する。S21 とはポート 1 に入力された信号がポート 2 からどれくらい出力されるかを表す。例えば、入力信号が減衰することなくすべて出力される場合、S21 は 1 つまり 0dB となる。本研究で提案する CSRR センサーは共振器であり、直列共振が発生する。共振時はポート 1 から入力された信号は MSL から金属島を経由してグランドプレーンへと流れるため、ポート 2 からの出力は限りなく小さくなる。そのため、共振時は S21 特性にディップが観測される。図 2 の金属島上に、ある誘電率を持つ液体や水溶液を置くと、液体や水溶液の濃度差によってディップ周波数が変化する。したがって、液体の濃度が測定できる。

図 3 に CSRR センサーの等価回路を示す[3]。 L_{T1} と L_{T2} は MSL のラインインダクタンスを示し、 C_s は MSL と金属島間のキャパシタンスを示す。 L_c は L_{c1} と L_{c2} の並列組み合わせを示す。 R_1 はコイルの直列抵抗を示す。 C_c は、金属島と外部グランドプレーンによって形成される容量を示す。 R_c はコンデンサ C_c の損失を示す。

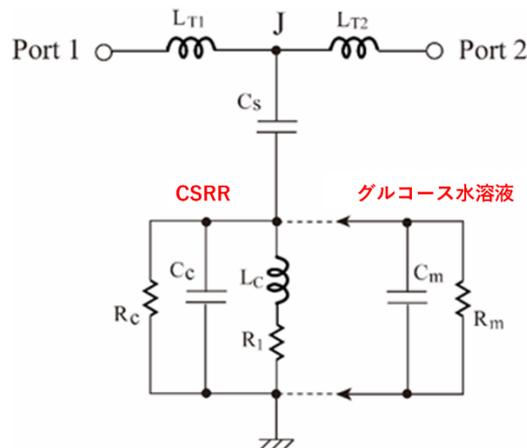


図3 図1のCSRRセンサーの等価回路と測定器の追加

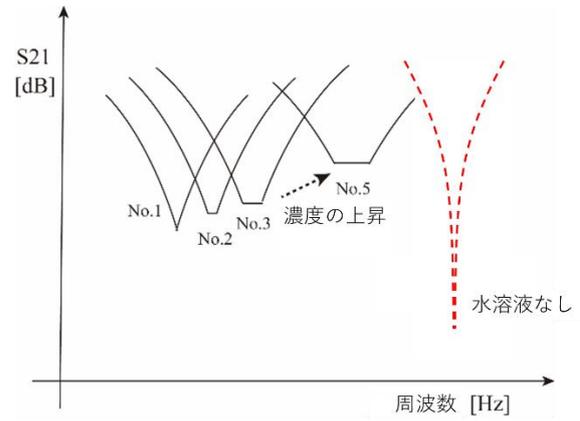


図4 グルコース水溶液の濃度に対する周波数とディップの変化

金属島上に液体や水溶液を置くと、図 3 に示すようにコンデンサ C_m と損失抵抗 R_m が並列に接続される。また、 C_m と R_m の値は、液体や水溶液の濃度によって変化する。その結果、ディップ周波数とディップ量が変化する。実際にグルコース水溶液を置き、測定をした場合、図 4 に示すような状況になる。水溶液がない場合は、ディップ周波数が高く、ディップも深くなる。水溶液を CSRR センサーに置くと、コンデンサと損失抵抗が追加されるため、ディップ周波数が低くなり、ディップも浅くなる (No.1)。S21 測定の曲線は、図 4 に示す No.1 のようになる。そして、グルコース濃度が増加すると、キャパシタンス C_m が減少し、損失が増加するため (これは R_m の減少に対応する)、 No.1 から No.5 の順でディップ周波数と大きさが推移すると考える。グルコース濃度は、ディップ周波数を読み取るによって決定される。

3. CSRR のレイアウトの最適化

a. Q 値の計算

図 11 の結果より、共振回路にグルコース水溶液を接続すると S21 周波数特性のディップはかなり減衰することが想定できる。そのため S21 の周波数特性の感度を上げるためには、大きなディップ (Q 値) が必要である。コンデンサ C_c とインダクタ L_c の配置が重要になる。Q 値は、図 3 の J 点からグランドを見た回路を用いて、RLC 直列回路に換算して求める。 C_c と C_m 、 R_c と R_m の並列組み合わせをそれぞれ C_p と R_p に代入し、 R_1 は高周波数になるにつれ $R_1 \ll \omega L_c$ となり、インダクタのインピーダンスに対して限りなく小さく見えるため R_1 を無視すると、CSRR の等価回路の合成インピーダンスから R_e と L_e は次のようになる。

$$R_e = \frac{\omega^2 L_c^2 R_p}{R_p^2 (1 - \omega^2 L_c C_p)^2 + (\omega L_c)^2}$$

$$L_e = \frac{L_c R_p^2 (1 - \omega^2 L_c C_p)}{R_p^2 (1 - \omega^2 L_c C_p)^2 + (\omega L_c)^2} \quad (1)$$

ここで、共振周波数 ω_0 は、 C_s 、 C_p 、 L_c によってのみ決定されると仮定する。

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_c(C_s + C_p)}} \quad (2)$$

この ω_0 を用いると、共振時の Q 値は次のようになる。

$$Q = \frac{\omega_0 L_e}{R_e} = \frac{\omega_0 L_c R_p^2 (1 - \omega_0^2 L_c C_p)}{\omega_0^2 L_c^2 R_p} = R_p \sqrt{\frac{C_s + C_p}{L_c}} \times \left(\frac{C_s}{C_s + C_p} \right) \quad (3)$$

式 (3) は、 C_s が大きく L_c が小さいと Q 値が大きくなることを示している。グルコース水溶液のように C_p が大きくなると Q 値は悪化する。

b. インダクタの位置

本研究で提案する CSRR センサーはグラウンドプレーン面に CSRR、表面に MSL を設けたレイアウトになっている。CSRR のレイアウトは従来の CSRR に比べシンプルなレイアウトにしている。図 2 より、インダクタの大きさも小さくなり Q 値の向上が見込める。しかし、MSL からの電界や磁界の影響によって、インダクタの特性は異なると考える。そこで、インダクタの位置を変えた時、S21 周波数特性にどのような変化があるのか検討する。

従来の 2 重リング CSRR のレイアウトパターンを図 5(a) "Double Ring" に示す。次に、本研究で提案する CSRR のレイアウトパターンをインダクタの位置を変えて図 5(b),(c),(d) に示す。(b) "Horizontal" は MSL の向きに対して水平方向にインダクタを配置し、(c) "45degrees" は MSL に対して 45°回転させ配置、(d) "Vertical" は MSL に対して垂直にインダクタを配置している。

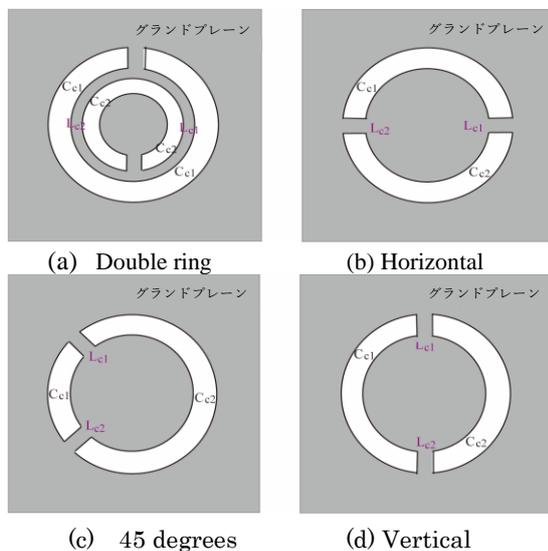


図 5 CSRR レイアウトパターンの比較

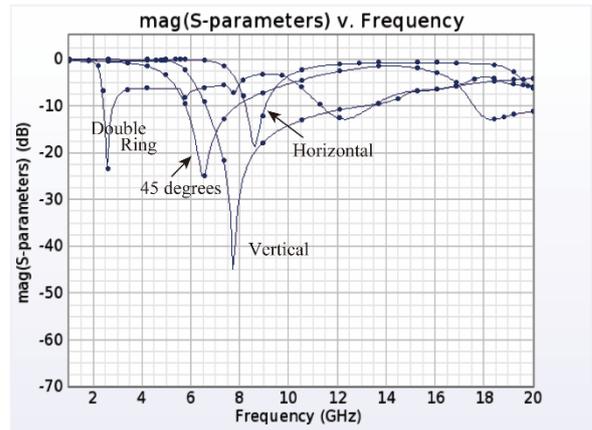


図 6 S21 の周波数特性の比較

図 5 に示すレイアウトのシミュレーション結果を図 6 に示す。(a) "Double Ring" はインダクタが長いので L_c は大きくなり、コンデンサ C_c も大きいため、共振周波数や Q 値が低くなってしまふ。(b),(c),(d) はリングが形成するコンデンサの大きさは一緒のため、やはりインダクタの配置によって MSL からの電界と磁界の影響によって S21 周波数特性は変化する。その中で、最も S21 周波数特性が良かったものは (d) "Vertical" である。(d) "Vertical" の場合、MSL への印加信号は横波 (TEM 波) とみなされ、電界と磁界がインダクタに対して垂直に交差する。そこで、CSRR には図 5(d) のレイアウトパターンを採用する。

c. MSL の線幅の検討

高周波数技術では不要反射による損失を防ぐためインピーダンスマッチングつまり 50 Ω 整合が取れた線路になるよう設計することが一般的である。しかし、Q 値の計算より、MSL-CSRR 間容量 C_s が大きくすることで Q 値が良くなるのがわかる。そのため、MSL の線幅を広げることは MSL-CSRR 間容量 C_s が大きくなることにつながる。また、S21 周波数特性はインピーダンスマッチングなしで測定できるので、ディップが大きければ MSL の線幅の調整は不要である。

EMpro を用いて MSL の線幅 w を 1.7 mm と 5.7 mm に設定し、CSRR センサーが共振した場合の電磁界解析を行い、MSL-CSRR 間容量 C_s が MSL の線幅を 1.7 mm に設定したときに比べ、5.7 mm に設定したときの方が大きくなることを確認する。MSL-CSRR 間の電界 E と容量 C_s は

$$E = \frac{Q}{\epsilon_0 S} \text{ [V/m]} \quad (4)$$

$$C_s = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{Ed} \text{ [F]} \quad (5)$$

と表せる。

次に電磁界解析結果を図 7, 図 8 に示す。図 7 は MSL の線幅 w が 1.7 mm の時の E フィールド強度を示しており、図 8 は MSL の線幅 w が 5.7 mm の時の E フィールド

強度を示している。図 7, 図 8 より, 共振が発生すると MSL とグランドが短絡し信号が反射して入力側へ戻ってくる。そのため, E フィールド分布は入力から CSRR の位置までに限定される。そして図 7 と図 8 の電界の大きさを見ると, MSL の線幅 $w=5.7\text{ mm}$ の方が MSL の線幅 $w=1.7\text{ mm}$ に比べ電界が小さいことがわかる。つまり(24)式より, 線幅を広くした方が MSL-CSRR 間容量 C_S が大きくなることが確認できる。

MSL の線幅は広くした方が, MSL-CSRR 間容量 C_S が大きくなり, S_{21} 周波数特性の Q 値も大きくなるのが理論的に示せるので, 実際に MSL の線幅を 1.7 mm から 9.7 mm まで 1 mm 毎大きくしていった時の S_{21} 周波数特性を測定する。測定結果を図 9 に示す。MSL の線幅を大きくしていくと MSL-CSRR 間容量 C_S が大きくなるため, (2)式よりディップ周波数は小さくなる。そして MSL の線幅 w が 1.7 mm から 5.7 mm まで大きくした時は(3)式よりディップが深くなり, S_{21} 周波数特性の Q 値が大きくなる。しかし, MSL の線幅 w を 6.7 mm より大きくすると S_{21} 周波数特性の Q 値は小さくなる。

S_{21} 周波数特性が悪化する境界, MSL の線幅 $w=5.7\text{ mm}$ と $w=6.7\text{ mm}$ には CSRR のインダクタがある。つまり, MSL の線幅を大きくしていき, グランドプレーン面の CSRR のインダクタと重なり始めると, ディップが浅くなり, S_{21} 周波数特性の Q 値が小さくなる。MSL の幅を適切に選択することで, 大きな S_{21} ディップと高い Q 値を実現できる。

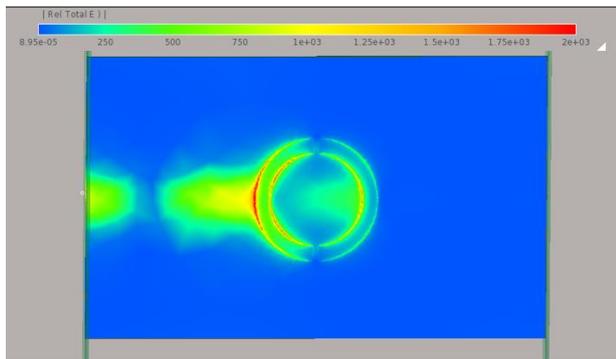


図 7 E フィールド (MSL の線幅 $w=1.7\text{ mm}$)

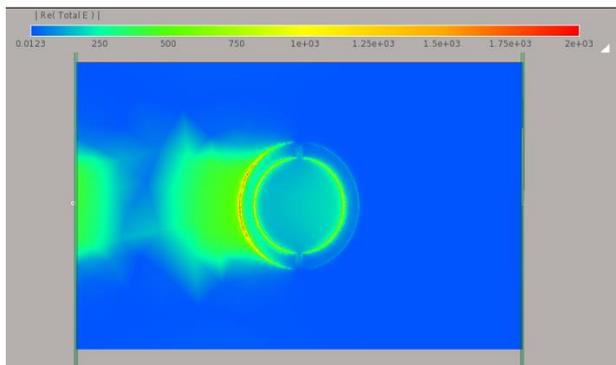


図 8 E フィールド (MSL の線幅 $w=5.7\text{ mm}$)

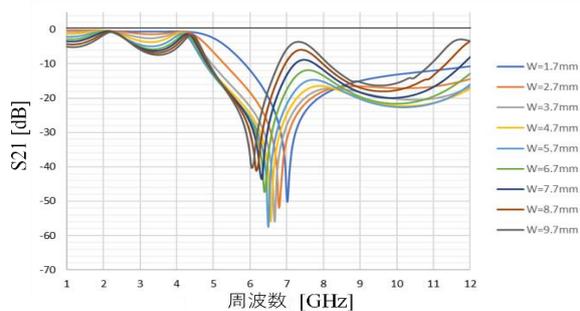


図 9 様々な MSL の線幅での S_{21} 周波数特性

4. 実験結果

グルコースセンサーを実現するために, 図 10 に示すようなプリント回路基板を作製した。基板サイズは $20\text{ mm}\times 30\text{ mm}\times 0.8\text{ mm}$ で, 誘電率は 3.8 である。図 10 に示すように, 直径 10 mm , 高さ 10 mm の円形の abs 樹脂チューブを CSRR 金属パターン上に配置した。様々な濃度のグルコース水溶液をチューブに入れ, 実験を行った。CSRR センサーは, 共振周波数が約 7 GHz になるように作られた。これは, グルコース水溶液の誘電率の実部が, この周波数では温度依存性を持たないためである[5]。したがって, 共振周波数は温度によって変化しない。湿度, 接触圧, 指紋など他の要因の影響については, 今後の課題としたい。

S_{21} の周波数特性は, 円管も水溶液も用いずに測定した。図 11 に結果を示す。ディップ周波数は 6.14 GHz , ディップ量は -55.8 dB であった。



図 10 円形チューブを使った CSRR の測定設定

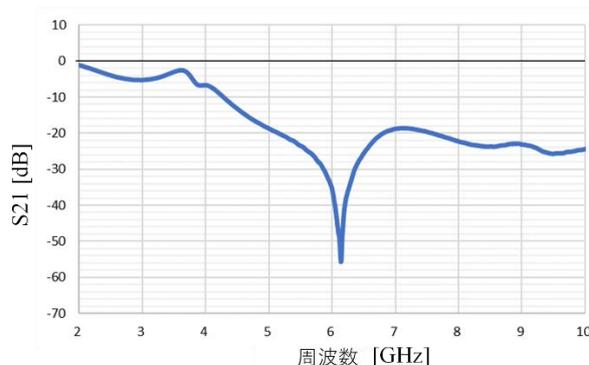


図 11 チューブと水溶液を使用しない CSRR センサーの S_{21} 周波数特性

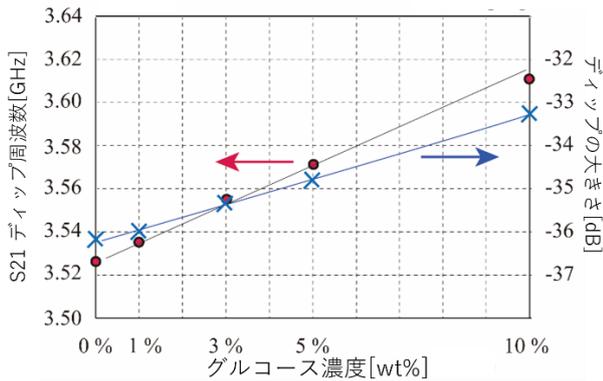


図 12 グルコース濃度対ディップ

次に、様々な濃度のグルコース水溶液を図 9 の円管に入れる。水溶液の体積は約 1 cm^3 である。この実験では、5 つの異なる濃度 (0 wt%, 1 wt%, 3 wt%, 5 wt%, 10 wt%) のグルコース水溶液を用いて測定を行う。ここで 1wt%とは、水に 1 g のグルコースが含まれ、水溶液の総重量が 100 g であることを意味する。図 12 に 5 種類のグルコース水溶液のディップ周波数とディップ量の実験結果を示す。赤色のプロットが縦軸左の S21 ディップ周波数を示し、青色のプロットが縦軸右のディップの大きさを示す。グルコース水溶液の静電容量と損失が大きいため、ディップ周波数は約 3.6 GHz、ディップ量は -33 dB 以下となる。グルコース水溶液の場合、濃度が高くなると誘電率が低下し、損失が増加する。図 12 の結果は、グルコース水溶液の濃度が高くなるにつれて、ディップ周波数は約 100 MHz 増加し、ディップ量は約 3 dB 低減する。よって、理論とよく一致する。また、図 12 の結果のプロットされた点を結ぶと周波数変化の直線性が表れる。直線性は外れ値がないことを示すため、重要な要素の 1 つである。

5. 結論

S21 周波数特性のゼロが最小になるように、最適化された CSRR レイアウトパターンが提案されている。2 つの短いインダクタを MSL に垂直に配置し、リング型コンデンサを 1 つだけ使用し、MSL の幅を大きくすることで、ディップは十分に大きくなった。MSL と CSRR を搭載したプリント基板を作製し、測定した結果、グルコース水溶液の濃度を検出できる可能性が確認された。このように、本研究で述べた最適化は、将来のウェアラブル・グルコース・センサーの実現に有効である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多大なるご指導とご助言をしていただきました、安田先生、山下先生、杉本先生に深く感謝申し上げます。また、本研究にご協力いただいた安田研究室の皆様にもこの場をお借りして感謝申し上げます。また、本研究は東京大学大規模集積システム設計教育研究センターを通しキーサイト株式会社の協力で行われたものである。

参考文献

- [1] T. Chang, et. al., "Highly integrated watch for noninvasive continual glucose monitoring," Open Access, Microsyst. & Nanoeng., vol. 8, no.25, 2022.
- [2] J. Bonache, M. Gil, I. Gil, J. Garcia-Garcia, and F. Martin, "On the Electrical Characteristics of Complementary Metamaterial Resonators," IEEE Microwave and Wirel. Compon. Lett., vol.16, no.10, pp.543-545, October 2006.
- [3] M. S. Boybay, and O. M. Ramahi, "Material Characterization Using Complementary Split-Ring Resonators," IEEE Trans.Instrumentation and Measurement, vol.61, no.11, pp.3039-3046, November 2012.
- [4] A. Ebrahimi, W. Withayachumnankul, S. Al-sarawi, and D. Abbott, "High-Sensitivity Metamaterial-Inspired Sensor for Microfluidic Dielectric Characterization," IEEE Sens. J., vol.14, no.5, 1345-1350, May 2014.
- [5] K. Fujimori, N. Li and Y. Sugimoto, "Sensitivity Comparison Between Reflection and Transmission Coefficient by Free Space Method for Non-Invasive Glucose Monitoring Sensor," Proceedings of the 2017 IEEE 17th International Conference on Bioinformatics and Bioengineering (BIBE 2017), pp.379-382, October 2017.