

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	次世代通信応用に向けたGHz–THz帯におけるガラス材料の誘電応答に関する研究
Title(English)	Study on dielectric response of glass materials in GHz–THz band for next generation communication applications
著者(和文)	金原一樹
Author(English)	Kazuki Kanehara
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12717号, 授与年月日:2024年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:保科 拓也,中島 章,矢野 哲司,松下 伸広,岸 哲生
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12717号, Conferred date:2024/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

## 論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	材料 材料	系 コース	申請学位 (専攻分野)： 博士 (工学) Academic Degree Requested Doctor of Engineering
学生氏名： Student's Name	金原 一樹		審査員主査： Chief Examiner 保科 拓也

### 要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters )

本論文は「Study on dielectric response of glass materials in GHz–THz band for next generation communication applications (次世代通信応用に向けた GHz–THz 帯におけるガラス材料の誘電応答に関する研究)」と題して、6 章から構成されている。

第 1 章「General Introduction」では、次世代通信 (Beyond 5G, 6G) 向け誘電体基板材料に求められる一般的な特性と課題について述べ、誘電率、誘電損失、平坦性、耐熱性、剛性、コスト等の観点から有望な候補材料としてガラス材料があることを示した。ただし、次世代通信での利用が想定されている周波数帯 (100 GHz 超帯) の誘電特性に関する報告は未だ少なく、ガラス材料の誘電分極機構は完全に理解されているわけではない。100 GHz 超帯の誘電特性の起源を理解するためには、GHz–THz 帯の複素誘電率を測定・解析することが重要であることを示した。また、次世代通信技術を確立する上で重要なデバイスの 1 つに周波数フィルタがあり、誘電体基板上に電極パターンを形成したマイクロストリップラインフィルタが有効であることを示した。これらを踏まえた上で、GHz–THz 帯の複素誘電率を測定・解析する手法を確立し、代表的なガラス材料に関して誘電分極機構を明らかにするとともに、ガラス系材料を用いた周波数フィルタを試作することを本論文の目的として示した。

第 2 章「Development of Measurement System for Complex Permittivity in GHz–THz Frequency Range」では、THz 帯の複素誘電率測定には分光エリプソメトリーが有効であると示し、テラヘルツ分光エリプソメータシステムを独自に開発した。SrTiO<sub>3</sub> 単結晶を標準物質として用いた測定結果は、開発したシステムが 1–21 THz の周波数範囲で有効であることを示唆している。また、テラヘルツ時間領域分光装置とテラヘルツ分光エリプソメータを併用することで GHz–THz 帯におけるガラス材料の誘電特性が測定可能になったことを示した。

第 3 章「Effect of Network Modifier on Dielectric Response of Silicate Glasses in GHz–THz Frequency Range」では、ガラス材料の製造性や諸物性を变化させる修飾イオンが、ケイ酸塩ガラスの GHz–THz 帯の誘電特性に与える影響について調査した。アルカリケイ酸塩ガラスでは、1–9 THz の帯域で誘電緩和を示し、この緩和が GHz 帯の誘電特性に影響を与えることを見出した。また、分子動力学法により高周波電界下でのイオンの動きを調査し、1–9 THz の帯域における誘電緩和の起源がアルカリ金属イオンのその場振動とサイト間の移動によるものであることを明らかにした。また、GHz 帯において誘電損失が低いガラスを得るためには小さな原子番号のアルカリ金属イオンを必要最小限含有させることが重要だと示した。また、ガラス中に複数種類のアルカリ金属元素を含有させることで、アルカリ金属イオンのサイト間移動の頻度を抑制し、GHz 帯の誘電損失を低下させることが可能であると明らかにした。一方、アルカリ土類金属イオンもアルカリ金属イオンと同様の効果誘電特性に与えることを示した。

第 4 章「Effect of Network Former on Dielectric Response of Sodium Silicate Glasses in GHz–THz Frequency Range」では、ガラスの諸物性を变化させるもう 1 つの構成要素である網目形成イオンが GHz–THz 帯の誘電特性に与える影響について調査した。ナトリウムケイ酸塩ガラス中の Si イオンの一部を Al イオンや B イオンに置換した場合の GHz–THz 帯の誘電特性を測定し、THz 帯の誘電損失が無置換の試料に比べて増加することを示した。また、THz 帯の誘電損失のピーク周波数は Al イオンに置換すると低周波側に、B イオンに置換すると高周波側にシフトすることを確認し、両者の違いをガラス構造から説明した。また、GHz 帯で低誘電損失のガラスを得るためには、Al イオンより B イオンを含有した方がよいことを示した。

第 5 章「Fabrication and Evaluation of Prototype Filter Device Using Glass-Ceramic Material」では、次世代通信向けの周波数フィルタデバイスとして、ガラス系材料を基板として用いたマイクロストリップラインフィルタの試作を行った。通常のガラスの誘電率の温度依存性は+100 ppm/K 程度であり周波数フィルタの材料として適当ではないが、誘電率の温度係数が負であるルチル結晶をガラス中に均一に析出させることで、最終的に-2.7 ppm/K とゼロ温度係数に近い結晶化ガラスの開発に成功した。また、温度係数の小さな結晶化ガラス基板を用いてミリ波帯の周波数フィルタを作製し、挿入損失が低く、フィルタ特性の温度変化が微小なデバイスとなることを示した。

第 6 章「General Conclusion」では、各章で得られた成果を総括して結論を述べている。

これらを要するに本論文は、GHz–THz 帯の誘電特性の測定手法を開発し、これまで未知であった GHz–THz 帯のガラス材料の誘電特性の起源を解明するとともに、低損失ガラス材料の設計指針を示したものである。また、周波数フィルタを試作することで、ガラス系材料が次世代通信技術に応用できることを実証したものである。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ (T2R2) にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)  
Doctoral Program

## 論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of Graduate major in	材料 材料	系 コース	申請学位(専攻分野)： 博士 (工学) Academic Degree Requested Doctor of Engineering
学生氏名： Student's Name	金原 一樹		審査員主査： Chief Examiner 保科 拓也

### 要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

In this study, the dielectric property of glass in GHz-THz band was investigated.

In Chapter 1, the characteristics of dielectric substrates required for next-generation communication were reviewed. Glass is the candidate material for next-generation communication because glass materials have high quality flatness and low dielectric loss. However, dielectric properties of glass material in the GHz-THz band have not been clarified.

In Chapter 2, a terahertz ellipsometer was developed to measure the dielectric properties in THz band. The complex permittivity of glass materials could be measured using both the developed ellipsometer and terahertz time-domain spectrometer.

In Chapter 3, the effect of network modifier on the dielectric property in silicate glass was clarified. Measurements of the dielectric properties of glasses in the THz band and molecular dynamic simulations indicated that the dielectric dispersion in alkali silicate glasses is caused by the vibration and migration of alkali metal ions in the glass. Moreover, it was found that the influence of alkaline earth metal ions on the dielectric property is almost the same as that of alkali metal ions.

In Chapter 4, the dielectric properties of sodium silicate glass with Al or B were investigated. Due to the difference in the peak frequency change of dielectric loss in the THz band, Al ion significantly raises the dielectric loss in the GHz band, while B ion does not significantly change the dielectric loss.

In Chapter 5, a prototype frequency filter device which is one of the applications of dielectric substrates, was developed. To obtain a dielectric substrate with low temperature dependence of dielectric constant, rutile  $\text{TiO}_2$  was crystalized in glass. The glass-ceramic substrate with low temperature dependence was applied to a microstrip line filter. Consequently, the filter device operated at a frequency of 30 GHz, and the temperature dependence of the device characteristics was found to be remarkably small.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note: Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).