

炭化珪素セラミックスの誘電特性と HOM 減衰器設計への応用

竹内保直、影山達也

高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

KEKB 加速器の ARES 空洞用高次モード (HOM) 減衰器に採用された 2 種類の α 型炭化珪素 (SiC) セラミックスの誘電率は、マイクロ波領域で緩和型分散特性を示す。この性質は「低い抵抗を持つ結晶粒内と、高い抵抗を持った結晶粒界」という構造を持つと仮定すると、他の性質とともにうまく説明できる。本論文では、このような構造モデルに基づいて、SiC セラミックスの誘電特性と HOM 吸収体設計への応用について議論する。

1 はじめに

KEKB 加速器の ARES 空洞では、砲弾形炭化珪素セラミックス (砲弾形 SiC : 外径 55mm ϕ 、有効長 400mm) を使用した矩形導波管型 HOM 減衰器と、タイル状の炭化珪素セラミックス (SiC タイル : 48mm $\times$ 48mm、厚さ 9~20mm) を使用した溝付ビームパイプ型 HOM 減衰器が組み込まれている[1]。砲弾形 SiC 及び SiC タイルは、それぞれの仕様に合わせて、異なる特性を持つ 2 種類の常圧焼成 α 型 SiC セラミックスの製品が採用された。今後、砲弾形 SiC と SiC タイルの 2 種類の SiC セラミックスをそれぞれ SiC-A、SiC-B と略す。

これら二つの型の HOM 減衰器の場合、電波吸収特性は、伝搬モードである表面波の特性に大きく依存する [2]。したがって、伝搬モードに大きく影響を与える誘電率の実数部 ϵ' と、電波吸収に直接影響する虚数部 ϵ'' は、共に、マイクロ波吸収体を設計する上で極めて重要なパラメータである。誘電率 ϵ は、 $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$ 、比誘電率は、 $\epsilon/\epsilon_0 = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$ と表す。

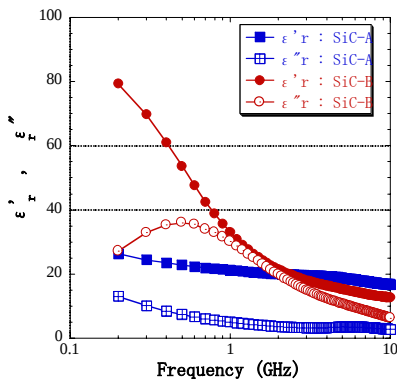


図 1 : SiC-A、SiC-B の比誘電率の周波数特性

SiC-A と SiC-B の高周波誘電特性についてと、特に、SiC-B が Debye 型分散特性を示し、その性質は「低い抵抗を持つ結晶粒内と、高い抵抗を持った結晶粒界」という構造で説明できることについては、すでに報告されている[3]。ここで、その概略に触れておく。

図 1 に SiC-A と SiC-B の代表的な比誘電率の周波数特性を示す。図 1 の SiC-B の誘電率は、(1-1) 式で表される Debye 型の分散特性を示している。

$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon_{r\infty} + (\epsilon_{r0} - \epsilon_{r\infty}) / (1 + j\omega\tau) \quad (1-1)$$

ここで、 ϵ_{r0} 、 $\epsilon_{r\infty}$ 、 τ は Debye の特性を決める定数であり、 τ は緩和時間を表す。

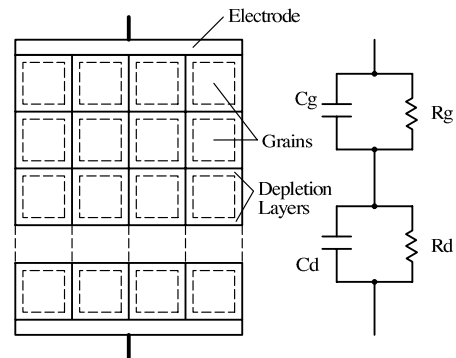


図 2 : BeO 添加 SiC の構造モデルと等価回路

一方、文献等によると、BeO (酸化ベリリウム) 添加のホットプレス SiC セラミックスでは、比較的電気抵抗が小さい半導体からなる結晶粒内 (10 Ω cm 以下と見積もられている) と、粒界近傍のキャリア空乏層からなる抵抗の大きい部分から構成される構造を持つことが確認され、図 2 のような構造モデルと等価回路が提案されている[4] [5] [6]。等価回路から、誘電率は (1-2) ~ (1-4) で表される。

$$\epsilon'_r = \epsilon_{r\infty} + (\epsilon_{r0} - \epsilon_{r\infty}) / (1 + \omega^2\tau^2) \quad (1-2)$$

$$\epsilon''_r = \omega\tau (\epsilon_{r0} - \epsilon_{r\infty}) / (1 + \omega^2\tau^2) + \sigma / (\epsilon_0\omega) \quad (1-3)$$

$$\tau = RgRd(Cg + Cd) / (Rg + Rd) \quad (1-4)$$

ここで、 Cg 、 Rg は、結晶粒内の容量及び抵抗を表し、 Cd 、 Rd はキャリア空乏層からなる粒界部分の容量および抵抗を表す。 σ は Rg と Rd を直列に接続したときの電気伝導率に対応する。このモデルでは、 $Rg \ll Rd$ 、 $Cg \ll Cd$ であるから、緩和時間は、 $\tau \approx RgCd$ となり Rg と Cd で決まる時定数で表される。 Rg は、粒内のキャリア濃度と移動度で決まる。 ϵ_{r0} 、 $\epsilon_{r\infty}$ は、それぞれ $\omega \rightarrow 0$ 、 $\omega \rightarrow \infty$ での ϵ'_r の極限值を表している。図 2 の構造モデルで、電極の面積と電極間距離をそれぞれ単位面積、単位長さを選べば、 $Rg \ll Rd$ 、 $Cg \ll Cd$ を考慮して、等価回路から、 $\epsilon_{r0} \approx Cd/\epsilon_0$ 、 $\epsilon_{r\infty} \approx Cg/\epsilon_0$ が得られる。したがって、 ϵ_{r0} は Cd により、 $\epsilon_{r\infty}$ は Cg によって決まる。 $\epsilon_{r\infty}$ は粒内の誘電率に対応するため、SiC 単結晶の誘電率に近い値になると予想される。

SiC-B にこのモデルを適用すると、抵抗率が約 $2 \times 10^5 \Omega$ cm であるため、0.2GHz 以上の周波数では (1-3) 式第 2 項が 0.05 より小となり、無視できる。(1-2) 式と (1-3) 式の第 2 項を除いた式は、(1-1) の Debye の式にほかならない。したがって、このモデルは、図 1 に示す SiC-B の誘

電特性を表すことができ、さらに低い周波数領域で (1-3) 式の第 2 項の効果が現れる誘電特性を予測している。

単結晶の SiC は、エネルギーギャップ約 3eV の半導体であるが、その誘電率が SiC-B ような緩和型分散特性を持つという例はない。SiC-B で現れた緩和型分散特性は図 2 のモデルに示されるように、SiC セラミックスが多結晶構造であることに起因する性質と考えられる。

2 原材料ロットによる誘電特性の違い

SiC-B の誘電率は、原料ロットによって異なることが確認されている [3]。図 3 に原料ロットの異なる SiC-B の比誘電率の周波数特性を示す。誘電率は、HP85070M 誘電体測定システムと HP8510C ネットワークアナライザを使用して、0.2~10GHz の周波数で 0.1GHz ステップで測定された。破線は (1-1) 式を定義とした回帰曲線である。この fitting から求めた ϵ_{r0} 、 $\epsilon_{r\infty}$ 、 τ の値を比較すると、 $\epsilon_{r\infty}$ の変化は小さく、 ϵ_{r0} の変化は 20% 以下であるが、緩和時間 τ は 2 倍以上に大きく変化している。 $\tau \approx RgCd$ であるが、 ϵ_{r0} の変化が τ の変化に比べて小さいことから Cd の変化は小さい。したがって、誘電特性の差は主に Rg が大きく変化して、 τ が変わったことによるものと考えられる。Rg の変化は、粒内のキャリア濃度の変化と移動度の変化で決まるが、キャリア濃度を支配する原料内の不純物が、有力な原因と考えられる。SiC-B は焼結助剤として B (ホウ素) を使用しているため、ほかの不純物の影響がない場合は、粒内は B (ホウ素) がアクセプターとなった p 型半導体になる。しかし、原料ロットによって緩和時間が変化することから、B (ホウ素) 以外のキャリア濃度を支配する不純物の存在が予想される。

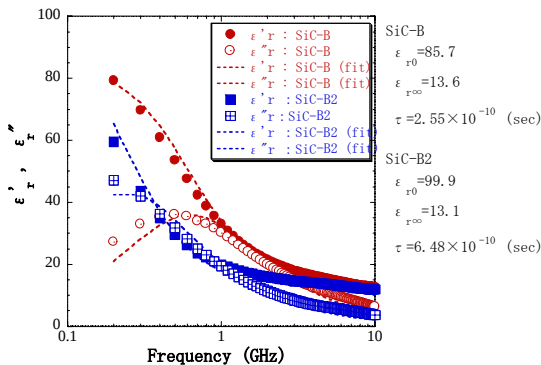


図 3 : 原料ロットの異なる SiC-B の比誘電率

3 誘電率の温度特性

SiC-B の誘電率の周波数特性を、試料の温度をパラメータとして、前章と同じシステムを用いて測定した。試料をホットプレート上で暖めて素早く誘電率を測定し、温度は、誘電率測定の直前と直後に測定して管理した。図 4 に結果を示す。試料の温度が上昇するにつれて、 ϵ'' が極大となる周波数 f_d (Debye モデルでは $f_d=1/(2\pi\tau)$) が大きく変化し、高くなっていることが分かる。測定データに Debye の特性 ((1-1) 式) を当てはめて、 ϵ_{r0} 、 $\epsilon_{r\infty}$ 、 τ の値を得た。その結果、温度上昇 (約 50K) に伴って ϵ_{r0} は 20% 程度増加し、 $\epsilon_{r\infty}$ はほとんど変化せず、緩和時間 τ が約 1/3 に急激に減少していることが分かった (図 5)。

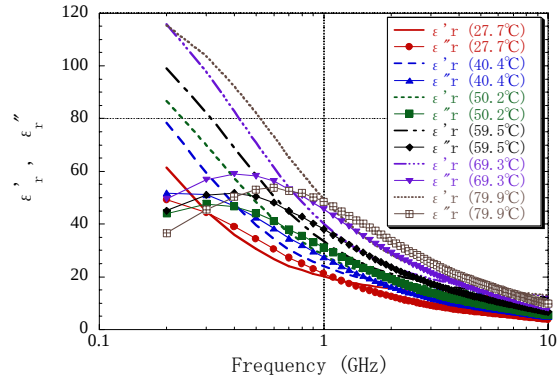


図 4 : SiC-B の比誘電率 (温度 27.7~79.9°C)

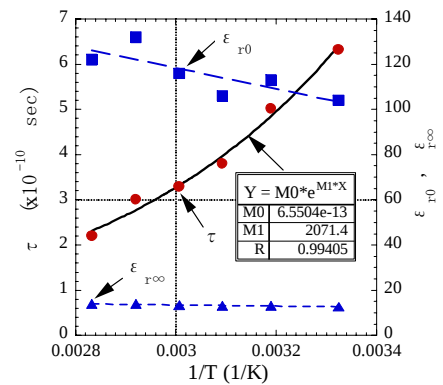


図 5 : ϵ_{r0} 、 $\epsilon_{r\infty}$ 、 τ の温度特性 (SiC-B)

ここで、図 2 のモデルを立ち返ってこの温度特性を考察してみる。 $\tau \approx RgCd$ であるが、 ϵ_{r0} の変化が τ の変化に比較して小さいことから Cd の変化は小さい。したがって、主に Rg が変化して τ が大きく変ったと考えられる。Rg の温度特性は粒内の移動度とキャリア濃度の温度特性で表される。文献によると、 α 型 SiC セラミックスの代表的な構造である 6H-SiC の不純物のエネルギーレベルは、p 型の場合、B (ホウ素) : 0.3~0.723eV、Ga (ガリウム) : 0.317~0.333eV、Al (アルミニウム) : 0.19~0.49eV である[7]。kT (k : ボルツマン定数、T : 絶対温度) の値が 300K で約 0.026eV に対応するため、0.3eV 程度のエネルギーレベルの不純物に対しては、室温付近でのキャリア濃度の温度特性は不純物領域である可能性がある。不純物領域であるとする、Rg の温度特性は、キャリア濃度の影響が大きく現れる。そこで、不純物領域でのキャリア濃度の温度依存性 $\exp(-\Delta E/2kT)$ を利用すると、 τ の温度依存性は、近似的に $\exp(\Delta E/2kT)$ で表される[8]。ここで、 ΔE は不純物のエネルギーレベルである。図 5 に示した実線の曲線は、この関数形を誘電率から求めた τ に当てはめたものである。ほぼこの関数形に一致していることが分かる。この fitting から、不純物のエネルギーレベル ΔE が求められ、 $\Delta E \approx 0.36$ eV が得られた。この値は、B (ホウ素)、Al、Ga 等の不純物のエネルギーレベルに近い値である。誘電率の温度特性 (τ の温度特性) は、見方を変えると、粒内の室温付近でのキャリア濃度が、不純物領域にあることを示しているように見える。

SiC-A の誘電率の周波数特性は、製造会社の測定により、緩和型分散特性 (f_r ≈ 10MHz) をもっていることが分かった[9]。このことは、SiC-A においても、図 2 のモデルがあてはまることを意味する。図 6 は、SiC-A の誘電率の周波数特性を、試料の温度をパラメータとして測定したグラフである。この測定結果は、緩和型特性の高い周波数側の裾を観測しており、SiC-B の特性と同じように、温度上昇とともに f_r が高くなっている様子が現れていると予想される。

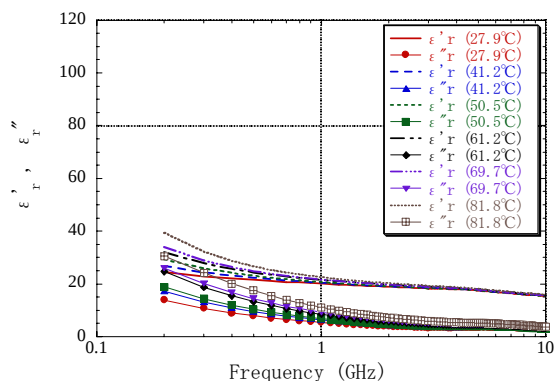


図 6 : SiC-A の比誘電率 (温度 27.9~81.8°C)

4 HOM 減衰器設計への応用

SiC-A、SiC-B のような特性を持つ SiC セラミックスを HOM 減衰器等の電波吸収体として利用する場合には、周波数領域、入力高周波電力等の要求に合わせて、必要な SiC セラミックスの特性を調整、選択することが望ましい。 ϵ_r 、 ϵ_{∞} 、 τ の 3 定数の中で、 τ ($=1/(2\pi f_r)$) の値は、使用周波数に影響するため特に重要である。さまざまな周波数帯に対応できるように、キャリア濃度の調整等によって、 τ の値を自由にコントロールできる SiC セラミックスが製品化されることが望まれる。

ARES 空洞の 2 種類の HOM 減衰器は 0.8~2GHz の高次モードを想定して設計されている。この周波数範囲は、SiC-A、SiC-B 共に、 f_r より高い周波数領域であり、特に SiC-A ではかなり f_r から離れている (図 1)。SiC-B のように f_r が HOM の周波数に近いと、大きな値の ϵ' 、 ϵ'' を利用できるが、図 4 から分かるように、温度変化に対して f_r 付近の誘電率の変動が大きい。一方、 f_r が HOM の周波数から離れている SiC-A では、大きな値の ϵ' 、 ϵ'' を利用できないが、HOM の周波数範囲の誘電率の温度変化は小さい (図 6)。ARES 空洞の 2 種類の HOM 減衰器の電波吸収特性は、伝搬モードである表面波の特性に大きく依存し、誘電率の変化によって急激に吸収特性が変化することがあるため、 ϵ' の変動には注意が必要である。例えば、砲弾形 SiC の場合、伝搬モードである HE_{11} モードの性質から、誘電率の実数部 ϵ' と SiC の直径で決まる特定の周波数 f_c ($\phi 40\text{mm}$ 、 $\epsilon'_r=22$ では、 $f_c \approx 0.95\text{GHz}$) を境に、高い周波数側で大きな吸収特性に急に変化する[2]。 f_c が f_r より高い周波数で、 f_r に近い領域にあり、かつ、 f_c 以下の周波数の高次モードが存在する場合は、温度上昇により ϵ' が大きくなり f_c が低くなって HOM を吸収し、さらに温度上昇が起こるという循環で、局所的な発熱の可能性はある。

冷却水路からはなれている砲弾形 SiC の先端付近等は十分な検討が必要である。ARES 空洞の HOM 減衰器の内、大きな電力を吸収する砲弾形 SiC では、 f_r が離れていて、HOM の周波数範囲で温度変化の影響が小さい SiC-A を採用した。それに対して、比較的小さな電力を吸収し、小さな形状が求められる SiC タイルでは、 f_r が近くて、大きな値の ϵ' 、 ϵ'' を利用できる SiC-B を採用した。このように、ARES 空洞では、2 種類の SiC セラミックスの異なる特性を用途に応じて使い分けている。

5 結論

KEKB 加速器の ARES 空洞用 HOM 減衰器に採用された 2 種類の SiC セラミックスの高周波誘電特性は、「低い抵抗を持つ不純物半導体の結晶粒内と、高い抵抗を持つ結晶粒界」というモデルで説明できる。その内 1 種類の SiC セラミックスの誘電率は、温度上昇に対して緩和時間 τ が減少する特性を持っている。この特性は、構造モデルの考察により、粒内キャリア濃度の温度特性が大きく影響していると考えられる。この構造モデルに基づいた性質を利用すれば、緩和時間の調整等によって HOM 吸収体を最適に設計できる。SiC セラミックスの高周波誘電特性等の性質を考える上で、SiC 焼結体が多結晶半導体であるという視点に立つことが重要であると考えられる。

参考文献

- [1] T. Kageyama, et al., "HOM-Damped Structure of the ARES Cavity", Proceedings of the 13th Symposium on Accelerator Science and Technology, Osaka, Japan, Oct., 2001, pp.226-228.
- [2] Y. Takeuchi, et al., "The SiC Absorber for the KEKB ARES Cavity", Proceedings of the 5th European Particle Accelerator Conference, Spain, June, 1996.
- [3] Y. Takeuchi and T. Kageyama, "RF Dielectric Properties of SiC Ceramics", Proceedings of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan, Kyoto, 2002, pp. 314-316, (Japanese).
- [4] K. Maeda, et al., "Grain-boundary Effect in Highly Resistive SiC Ceramics with High Thermal Conductivity", pp. 260-268 in Advances in Ceramics, Vol. 7, Additives and Interfaces in Electronic Ceramics, ed. M. F. Yan and A. H. Heuer, American Ceramics Society, Columbus, OH., 1984.
- [5] K. Maeda, et al., "Dielectric Behavior of SiC Ceramics with BeO Addition", Extended Abstract of Electronics Div. 21-E-85, Annual Meeting, Am. Ceram. Soc., 1985.
- [6] 前田 邦裕, (株) 日立製作所, 私信.
- [7] "Properties of Silicon Carbide", ed. G. L. Harris, INSPEC, Inst. Elect. Eng., London, 1995, pp. 87-92.
- [8] S. M. Sze, "Physics of Semiconductor Devices", 2nd edition, A Wiley-Interscience publication, Chapter 1.
- [9] 岩井明仁, 日立化成工業 (株), 私信.