



半導体材料の誘電率と電気伝導度 およびマイクロ波加熱の関係

Relation between permittivity, electric conductivity and
microwave heating of semiconductor materials

Hideoki Fukushima

(株) 豊田中央研究所 福島 英沖

〒4801192 愛知県長久手市横道 41-1

e-mail: h-fukushima@mosk.tytlabs.co.jp

1. はじめに

誘電体材料のマイクロ波吸収性能は複素誘電率、とくに虚数部分の誘電損率に依存する。マイクロ波プロセスは内部加熱、低温加熱、選択加熱に特徴があり、半導体技術のマイクロ波応用として、プリントドエレクトロニクスや各種熱処理などに適用され始めている。マイクロ波プロセスでは、材料の複素誘電率の違いが加熱の善し悪しを左右する。一方、金属やメタマテリアル、高損失材料などでは「負の誘電率」が現れるといわれている¹⁾。金属材料はプラズマ周波数²⁾以下で誘電率が負になるというドルーデモデル³⁾があるが、マイクロ波加熱性との関係はよく分かっていない。また、金属薄膜や半導体材料のマイクロ波吸収性や加熱特性は世の中にほとんどなく、データが不足している。本研究では、半導体素子のマイクロ波吸収性をデータベース化するために、LED素子の各部位の複素誘電率とマイクロ波加熱性の関係を調査した⁴⁾。

一方、今まで誘電損率と電気伝導度は正の相関があると言われていたが、誘電体(絶縁体)に比べて半導体や金属では材料の抵抗値が著しく小さくなるため、必ずしもこの関係が成り立つとは限らない。そこで、今回は半導体材料として、種類の異なるSi基板の複素誘電率をマイクロ波帯で測定し、電気伝導度(抵抗率の逆数)とマイクロ波吸収性の関係を調べた⁵⁾。

2. LED素子の複素誘電率とマイクロ波加熱性の関係

LED素子の薄膜はドーパントの異なるGaN(p/i/n型)、透明電極、発光層とし、いずれもサファイア基板上に形成させた。基板にはGaN、サファイア単体の他、ドーパ量とドーパントの種類を変えたSiウェハを用いた。試料寸法は、いずれも20*20mmとした。複素誘電率の測定には、エバネッセント波を用いた開放型同軸法(AET社)を用いた⁶⁾。比誘電率 ϵ_r と $\tan \delta$ を測定(誘電損率 $\epsilon'' = \epsilon_r \cdot \tan \delta$)し、周波数は2.45GHz, 5.8GHzのISMバンドで測定した。一方、LED素子のマイクロ波加熱実験には、スロットアンテナを有した小型均一加熱装置(ニッシン製)を用い、2.45GHzで加熱した。また、試料の温度測定にはサーモカメラを用い、マイクロ波装置の外部からin-situに温度分布を測定した。

図1にLED各部位、各基板の複素誘電率を示す。ただし、2.45GHzで測定し、p/n-Si基板は標準品を用いた。その結果、各部位の複素誘電率は大きく異なった。特にGaN基板、p/n-Si基板、n-GaN薄膜、透明電極は負の誘電率 ϵ_r を示し、これらの誘電損率 ϵ'' は、著しく大きいことが分かった。一般に、金属粒子や金属薄膜などでは負の誘電率を示す場合があり、パーコレーション(粒子間が密に接触してつながる現象)⁷⁾を起こすと、マイクロ波吸収

性の高いカーボン粒子などは、誘電率がマイナスになるといわれている⁸⁾。今回、負の誘電率を示した材料は、 ϵ'' が大きく、導電性を持っていると思われる。従って、これらの材料は自由電子キャリアを持った半導体素子であると考えられる。これらの結果、GaN 薄膜では p より n 型の方が ϵ'' は著しく大きく、透明電極、GaN 基板もマイクロ波吸収性が高いことが判明した。さらに、Si 基板では i-Si (ノンドーピング) はほとんどマイクロ波を吸収しないが、p/n-Si はいずれもマイクロ波吸収が高いことが分かった。

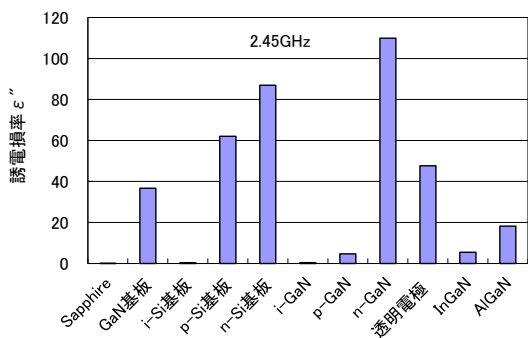
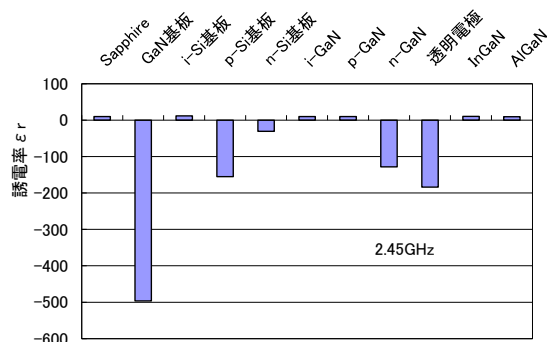


図 1. LED 素子(薄膜、基板)の複素誘電率

次に、LED 各部位(サファイア基板上に薄膜形成)と各基板のマイクロ波加熱を行った。マイクロ波加熱条件は 2.45GHz、300W、30sec とした。n-GaN 薄膜、p/n-Si 基板はマイクロ波で急速に 200℃以上に加熱された。図 2 に LED 素子のマイクロ波加熱特性と複素誘電率の関係を示す。ただし、どちらも 2.45GHz での値である。その結果、各部位の誘電損率 ϵ'' とマイクロ波加熱性には正の相関があることが明らかとなった。薄膜でも ϵ'' が大きければ、短時間で高温に加熱できることが分かった。特に、n-GaN 薄膜は p/n-Si 基板よりも加熱されやすく、透明電極、AlGaIn 発光層もマイクロ波加熱し易い部類に入る。一方、

Si 基板では、標準品の p/n-Si は高温に加熱されるが、ノンドーピング i-Si、高ドーピング量の p/n-Si はほとんど加熱されないことが分かった。すなわち、マイクロ波吸収性はドーピング量よりもドーパントの種類やキャリアの活性(電子移動度)が寄与していると思われる。

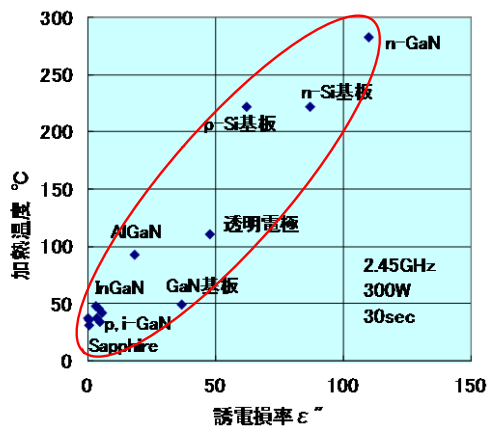


図 2. LED 素子のマイクロ波加熱性と誘電損率の関係

3. Si 基板の複素誘電率と電気伝導度の関係

今回用いた Si 基板には、ドーピング量とドーパントの種類を変えた 12 種類の Si ウェハ(20*20*0.38mm)を用い、n 型/p 型、結晶面(100)及び(111)を準備した。メーカー仕様の抵抗値から、高抵抗(20 Ω cm 以上)、標準(1-15 Ω cm)、低抵抗(0.02 Ω cm 以下)に分類した。実際の抵抗率測定は、Si 基板のシート抵抗を 4 端子法で測定し、基板厚さの補正と温度補正を行い、25℃に換算して求めた。複素誘電率の測定には、AET 社の開放型同軸法を用い、周波数は 0.8 GHz、2.45GHz、5.8GHz で測定した。

高抵抗、標準、低抵抗の Si 基板について、複素誘電率の周波数依存性を調べた。図 3 に示すように、比誘電率 ϵ_r の場合、高抵抗 Si は正の値、低抵抗 Si は負の値を示すが、周波数の影響はあまり見られなかった。これに対して、標準 Si の ϵ_r は周波数が高くなるにつれて増大する傾向を示した。一方、誘電損率 ϵ'' の場合、周波数が高くなるにつれて高抵抗の Si では減少、低抵抗の Si では増加する傾向を示した。これに対して、標準の Si では 2.45GHz 付近で ϵ'' は最大を示し、最もマイクロ波の吸収が高いことが分かった。

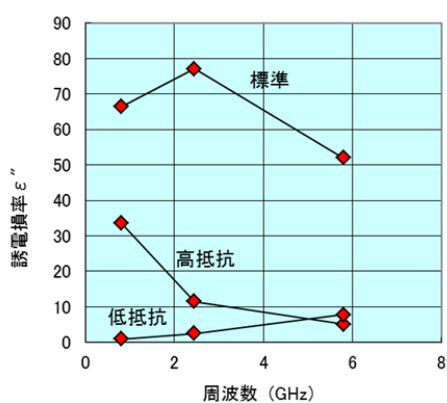
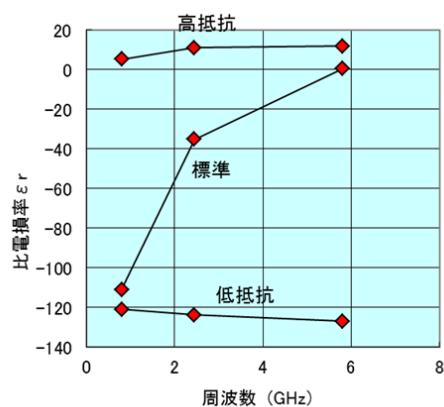


図 3. Si 基板の複素誘電率の周波数依存性

次に、各 Si 基板の抵抗率を 4 端子法で精密に測定した。いずれもメーカー仕様値の範囲内であった。図 4 に複素誘電率の抵抗率依存性を示す。図中には抵抗率 ρ から求めた電気伝導度 σ ($\sigma = 1/\rho$) も示した。比誘電率 ϵ_r の場合、 $2 \Omega \cdot \text{cm}$ 以下では -100 以下を示すのに対して、 $1 \Omega \cdot \text{cm}$ を超えると徐々に大きくなり、 $20 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上では正の値を示した。一方、誘電損率 ϵ'' の場合、抵抗率が大きくなるにつれて ϵ'' は増大し、 $1 \sim 10 \Omega \cdot \text{cm}$ で最大となり、さらに抵抗が大きくなると減少する傾向を示した。一般に、誘電損率 ϵ'' と電気伝導度 σ には、 $\sigma = \omega \epsilon''$ (ω : 角周波数) の関係があり⁹⁾、 σ が増すと ϵ'' も大きくなると言われてきた。しかしながら今回の結果から、 σ と ϵ'' は比例関係になく、 $\sigma = 10 \sim 100 \text{ S/m}$ のとき ϵ'' が最大となることが分かった。以上のことから、マイクロ波帯では誘電損率 ϵ'' (すなわちマイクロ波吸収性) が最大となる抵抗率(すなわち電気伝導度)が存在することが明らかとなった。

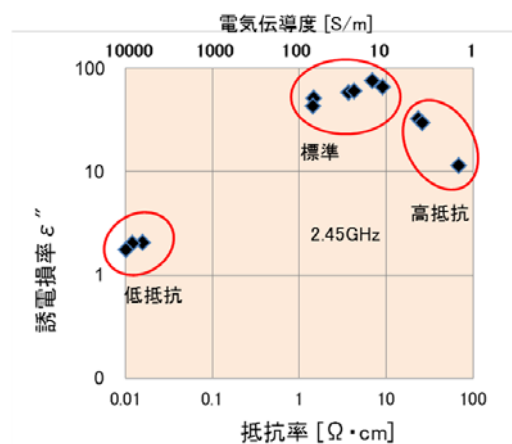
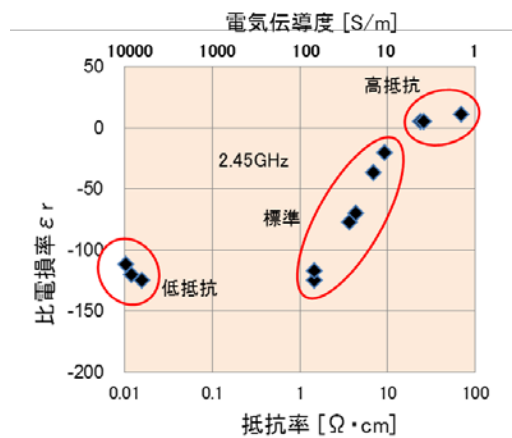


図 4. Si 基板の複素誘電率の抵抗率依存性

4. まとめ

LED 素子は各部位でマイクロ波吸収性(すなわち加熱性能)が著しく異なり、これら材料の複素誘電率をデータベース化することが重要である。また今回の結果から、自由電子キャリアの少ない半導体(i-Si, i-GaN)はドルーデ則には従わないが、n-GaN, p/n-Si、透明電極では半導体と金属の中間的な性質となり、マイクロ波帯で負の誘電率が現れたと推測された。また、導電性の高い材料が必ずしもマイクロ波加熱し易いわけではなく、今後、これら負の誘電率を示す材料とマイクロ波吸収性との関係を明らかにし、メカニズムを解明する必要がある。

今まで誘電損率と電気伝導度は正の相関があるとされていた。しかし、半導体材料として抵抗の異なる Si 基板を用い、複素誘電率と電気伝導度の関係を調べた結果、誘電損率(マイクロ波吸収性)が最大となる電気伝導度

(抵抗率)が存在することが明らかとなった。さらに、抵抗率によって誘電率が負になる領域が存在することが分かった。今回の結果は、GaN などのパワー半導体や SiC 繊維, CFRP 繊維などの複合材料にも適用でき、マイクロ波加熱に適した材料を把握するうえで重要な技術データとなると思われる。

参考文献

- 1) 島山賢一, 蔦岡孝則: 電子情報通信学会誌, 93 (6), (2010) 457-462
- 2) キッテル固体物理学入門下, 第 8 版, (2005) 421
- 3) 佐藤勝昭: 光と磁気, 朝倉書店, (1988) 59

- 4) 福島英沖, 他: 第 9 回 JEMEA シンポジウム, 講演要旨集 (2015) O-02.
- 5) 福島英沖: 日本鉄鋼協会, 第 174 回秋季大会, CAMP-ISIJ 30 (2017) 595
- 6) エーイーティー, <http://www.aetjapan.com/>
- 7) 島山賢一, 蔦岡孝則, 三枝健二: 初めて学ぶ電磁遮へい講座, 科学情報出版 (2013) 133
- 8) N. Yoshikawa, et al., JOURNAL of APPLIED PHYSICS 117, (2015) 084105.
- 9) W. D. Kingery, et. al, Introduction to Ceramics, John Wiley & Sons, (1976) 710