テラヘルツ電磁波による半導体ウェーハの
電気的特性の計測・評価*巨 陽^{*1}, 久保田 穂高^{*2}Measurement and Evaluation of Electrical Properties of
Semiconductor Wafer by Terahertz WavesYang JU^{*3} and Hotaka KUBOTA^{*3} Department of Mechanical Science & Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

Using a time-domain spectroscopic technique based on the generation and detection of a collimated beam of subpicosecond broadband terahertz pulses, we measured frequency-dependent electrical properties of doped silicon in the terahertz wave range of 0.1-1.2 THz. These results are well fit by Drude theory. It is shown that carrier density can be evaluated well by the suggested method.

Key Words: Nondestructive Evaluation, Spectrum Analysis, Terahertz Wave, Electrical Property

1. 緒 言

シリコンなどの半導体ウェーハは電子デバイス、特に集積回路の基板として利用されている。導電率をはじめとする電気的特性は電子デバイスの電気容量、抵抗などに影響を及ぼすため、半導体の電気的特性はデバイスを設計するうえで重要なパラメータである。そのため、半導体の電気的特性を決定付けるキャリアダイナミクスの研究^{(1)~(3)}が盛んに行われてきており、特にキャリアの緩和時間やプラズマ振動数と同程度の周波数域であるテラヘルツ領域の研究に強い関心もたれている。しかし、テラヘルツ時間領域分光法が確立されて間もないことから、テラヘルツ領域の半導体の電気的特性に関する研究はまだ十分に行われていない状況にある。

従来、導電率計測には四探針法が広く用いられてきた。四探針法は、4本金属製プローブを被測定物の表面に接触させ、測定を行う。外側2本のプローブ間に定電流を流し、内側2本のプローブ間における電位差

を計測することにより比抵抗、あるいは導電率を求めることができる。しかしながら四探針法による半導体ウェーハの導電率の測定では、ウェーハの表面を汚したり、傷つけたりする問題がある。また、四探針法による導電率測定は接触型であるため、膨大な生産量の場合ではオンライン検査を行うことは困難である。また、半導体材料のキャリア濃度や電気移動度の評価方法としては、主にホール効果測定法が用いられているが、この方法では測定の際に試験片と電極端子を溶接したり、試験片を切断するなど試験片の加工が必要となるため、現在の検査方法では半導体部品の全数の検査は不可能である。また、金属と半導体間の接続ではショットキー障壁が存在し、キャリア濃度が低い場合など電気特性を正確に計測することが困難である。

そこで、本研究は以上の状況を踏まえ、テラヘルツ時間領域分光法を基に、実験結果と適切なキャリア伝導理論を融合することにより、今まで測定が困難であったテラヘルツ電磁波領域の半導体の電気的特性を非接触・非破壊で測定・評価する技術を提案する。

2. 実験方法

実験で使用した光路システムを図1に示す。本実験では光伝導アンテナをもつエミッタ、ディテクタによ

* 原稿受付 2009年9月30日。

^{*1} 正員、名古屋大学(☎464-8603 名古屋市千種区不老町)。^{*2} 中部電力(株)(☎437-1695 御前崎市佐倉5561)。

E-mail: ju@mech.nagoya-u.ac.jp

リテラヘルツ波の発生・検出を行った。レーザ発振装置にはモードロック型の Ti:sapphire レーザ(波長 790 nm, レーザ出力 850 mW, 繰り返し周波数 80 MHz, パルス幅 100 fs)を使用した。ポンプ光とプローブ光のエネルギーはそれぞれ 150 mW, 50 mW, バイアス電圧 50 V の条件で測定した。ポンプ光はロックインアンプで信号を検出する際の参照信号を得るため、ライトチョッパにより 500 Hz に周波数変調をかけた。ディテクタから発生した電流信号はロックインアンプで検出した。

エミッタとディテクタの間には 2 枚の放物面鏡を置き、その間に Si ウェーハ試料を挿入し、透過した電磁波を検出した。今回は抵抗率の異なる 5 種類の試料で測定を行った。挿入した試料の物性値を表 1 に示す。

透過測定から求めた電磁波の振幅透過率と位相差から、複素屈折率($\tilde{n}=n+ix$)および複素誘電率($\tilde{\epsilon}=\epsilon_1+i\epsilon_2$)を算出した⁽⁴⁾。ここで、複素屈折率と複素誘電率は以下の式で結びついている。

$$\tilde{\epsilon}(\omega)=\tilde{n}(\omega)^2 \quad (1)$$

さらに、実験プロットにフィッティングする関数として、ドルーデの理論式を用いた。ドルーデの理論式は

以下のように表現される。

$$\tilde{\epsilon}(\omega)=\epsilon_\infty-\frac{\omega_p^2}{\omega^2+(i\omega/\tau)} \quad (2)$$

式(2)で ϵ_∞ は高周波の誘電率, ω_p はプラズマ振動数, τ は衝突の緩和時間を表している。また, プラズマ振動数, 衝突の緩和時間はキャリア濃度, 電気移動度, 直流伝導度と以下の関係がある。

$$\omega_p^2=\frac{Ne^2}{m\epsilon_0} \quad (3)$$

$$\tau=\frac{m\mu}{e} \quad (4)$$

$$\sigma_0=\frac{Ne^2\tau}{m}=Ne\mu \quad (5)$$

式(3)~(5)で N はキャリア濃度, e は素電荷, m はキャリアの有効質量, ϵ_0 は真空の誘電率, μ は電気移動度, σ_0 は直流伝導度を表している。フィッティングにより求めたドルーデの理論式中の各パラメータを式(3)~(5)に代入することで、試料のキャリア濃度, 電気移動度, 直流伝導度を実験的に推定した。

3. 実験結果

実験で得られた電磁波の時間波形をフーリエ変換して得た電場振幅スペクトルを図 2 に示す。図 2 を見ると試料の抵抗率が小さくなるにつれて、試料を通過する電磁波の振幅が小さくなっていくことがわかる。また、測定可能な周波数範囲は 0.1~1.2 THz であった。

次に、5 種類の Si ウェーハの複素屈折率の実部である屈折率の周波数依存性を図 3 に、複素屈折率の虚部である消衰係数の周波数依存性を図 4 に示す。プロットは実験で求めた値であり、実線は実験プロットにドルーデの理論式をフィッティングさせた結果である。なお、フィッティングに使用した周波数の範囲は 0.176~1.2 THz である。また、図 3、図 4 のフィッティングに使用した理論式の係数値およびそれらの係数

Table 1 Properties of Si wafers

Thickness[μm]	Resistivity [Ωcm]	Mobility[cm ² /Vsec]	Carrier concentration[cm ⁻³]
528	0.509	1.39×10 ³	8.82×10 ¹⁵
349	0.883	1.51×10 ³	4.69×10 ¹⁵
531	1.68	1.55×10 ³	2.41×10 ¹⁵
337	2.93	1.66×10 ³	1.28×10 ¹⁵
355	16.5	1.76×10 ³	2.15×10 ¹⁴

Fig. 1 Schematic diagram of THz-TDS set-up

Fig. 2 Amplitude spectra of THz pulses

Table 2 Fit parameters used to fit reflective index shown in Fig. 3

Material	Si				
Resistivity [Ωcm]	0.51	0.88	1.68	2.93	16.5
ω_p [THz]	7.80	5.08	3.83	3.89	3.19
τ [psec]	0.309	0.488	0.641	0.549	0.571
ϵ_∞ [psec]	11.0	11.0	11.2	11.5	11.7
$N [\times 10^{15}\text{cm}^{-3}]$	7.14	3.00	1.70	1.76	1.18
$\mu [\text{cm}^2/\text{Vsec}]$	1470	2320	3050	2610	2720
$1/\sigma_0$ [Ωcm]	0.60	0.90	1.20	1.36	1.94

Table 3 Fit parameters used to fit extinction coefficient shown in Fig. 4

Material	Si			
Resistivity [Ωcm]	0.51	0.88	1.68	2.93
ω_p [THz]	10.10	7.58	5.36	4.60
τ [psec]	0.190	0.196	0.261	0.153
ϵ_∞ [psec]	11.7	11.3	11.3	11.6
$N [\times 10^{15}\text{cm}^{-3}]$	11.8	6.68	3.54	2.46
$\mu [\text{cm}^2/\text{Vsec}]$	900	930	1240	730
$1/\sigma_0$ [Ωcm]	0.59	1.00	1.51	3.50

値から算出したキャリア濃度, 移動度, 直流伝導度の値をそれぞれ表2, 表3に示す。ただし, 表3において, $16.5\ \Omega\cdot\text{cm}$ の試料はデータ値が小さく, ばらつきが大きいため, フィッティングでよい近似が得られなかったため省略されている。

図3から, 抵抗率が大きい試料ほど屈折率も大きくなるのがわかる。一方, 図4から, 抵抗率が大きいほど, 消衰係数は小さくなるのがわかる。また, 屈折率, 消衰係数ともに $0.2\ \text{THz}$ 以下の低周波数域では, 変化が急激であり, データに誤差が大きいように思われる。

次に, 図3, 図4で示した複素屈折率から算出された複素誘電率の実部である誘電率の周波数依存性を図5に, 複素誘電率の虚部である誘電損失の周波数依存性を図6に示す。また, 図5, 図6のフィッティングに使用した理論式の係数値およびそれらの係数値から算出したキャリア濃度, 移動度, 直流伝導度の値をそれぞれ表4, 表5に示す。ただし, 表5に示す誘電損失の結果において, $16.5\ \Omega\cdot\text{cm}$ の試料はデータ値が小さく, ばらつきが大きいため, よい近似が得られなかったため省略されている。

図5から, 抵抗率が大きい試料ほど誘電率も大きい。

Fig. 3 Analysis results for refractive indexes; solid lines describe Drude theory

Fig. 5 Analysis results for dielectric constants

Fig. 4 Analysis results for extinction coefficients; solid lines describe Drude theory

Fig. 6 Analysis results for dielectric loss factors

Table 4 Fit parameters used to fit dielectric constants shown in Fig. 5

Material	Si				
Resistivity [Ωcm]	0.51	0.88	1.68	2.93	16.5
ω_p [THz]	10.28	6.15	4.47	4.50	3.50
τ [psec]	0.244	0.395	0.513	0.420	0.469
ϵ_∞ [psec]	11.7	11.3	11.3	11.5	11.8
N [$\times 10^{15}\text{cm}^{-3}$]	12.3	4.40	2.32	2.35	1.42
μ [cm^2/Vsec]	1160	1880	2440	2000	2230
$1/\sigma_0$ [Ωcm]	0.44	0.76	1.10	1.33	1.96

Table 5 Fit parameters used to fit dielectric loss factors shown in Fig. 6

Material	Si			
Resistivity [Ωcm]	0.51	0.88	1.68	2.93
ω_p [THz]	10.00	7.76	5.59	4.83
τ [psec]	0.168	0.160	0.196	0.122
ϵ_∞ [psec]	11.7	11.3	11.3	11.6
N [$\times 10^{15}\text{cm}^{-3}$]	11.7	7.00	3.63	2.71
μ [cm^2/Vsec]	800	760	930	580
$1/\sigma_0$ [Ωcm]	0.67	1.17	1.84	3.96

ことがわかる。一方、図6から、抵抗率が大きい試料ほど誘電損失は小さくなることがわかる。

次に、ホール測定結果で得られたキャリア濃度、移動度と複素誘電率および複素屈折率のデータへのフィッティングから得られたキャリア濃度、移動度の値とを比較したグラフをそれぞれ図7、図8に示す。

図7を見ると、複素誘電率および複素屈折率から得られるキャリア濃度は最も高抵抗率である $16.5\ \Omega\cdot\text{cm}$ の試料を除いては、ホール効果測定値に比較的近い値を示している。しかし、高抵抗率側に近づくにつれて、データ近似値は測定値から徐々にずれていくように見える。一方、図8から、移動度は複素誘電率および複素屈折率から得られたどの値においても測定値からかなりずれている。また、屈折率および誘電率から得られた2つの値を比較すると、キャリア濃度および移動度において互いに近い値となっている。同様のことは虚部である消衰係数および誘電損失から得られた値にも成り立つ。また、実部の値は測定値よりも高め、虚部は測定値よりも低めの値になる傾向が見られる。

このように複素誘電率の実部、虚部から求められる値の差異が生じているのは、複素屈折率の実部、虚部

Fig. 7 Comparison between THz TDS measurement results and Hall effect measurement results for carrier density

Fig. 8 Comparison between THz TDS measurement results and Hall effect measurement results for mobility

の値に差異があるためであると考えられる。理論的には実部、虚部から同一の値が得られるべきであるので、今回は実部、虚部からそれぞれ得られたキャリア濃度、移動度の平均値をとって測定値と比較してみた。実部と虚部の両方から求められたキャリア濃度、移動度の平均値とホール効果測定値との比較をそれぞれ図9、図10に示す。図9を見ると、実部と虚部の平均値をとることで、評価値は測定値により近づく結果となった。また、キャリア濃度が高い試料ではよい一致を示すが、キャリア濃度が低い試料ほど一致しなくなる傾向がみられる。また、図10から、移動度も平均値をとることで実部および虚部から得られる値よりも測定値に近づく結果となった。従って、実部と虚部の平均値を用いることで、より信頼性の高い結果が得られると考えられる。

キャリア濃度、移動度の両方で抵抗率 $16.5\ \Omega\cdot\text{cm}$ の試料の実験値が測定値と大きく異なる結果となった

Fig. 9 Comparison between THz TDS measurement results and Hall effect measurement results for carrier density

Fig. 10 Comparison between THz TDS measurement results and Hall effect measurement results for mobility

が、それは試料の抵抗率が大きいのが原因であると考えられる。高抵抗率の試料では低周波領域から透過率が高く、消衰係数の値の周波数依存性が判断し難いために、理論式をフィッティングする際に大きな差異が生じてしまうと考えられる。このように測定データの信頼性が劣るために、本研究で示した測定法は高抵抗率の半導体試料での電気的特性評価には適さないと考えられる。

4. 結 論

(1) 抵抗率が異なる5種類のSiウェーハのテラヘルツ波透過測定の結果、試料の抵抗値によって各試料の複素屈折率、複素誘電率の周波数依存には大きな差異が生じることがわかった。また、それらの周波数依存性は低周波側で特に変化が大きく、高周波に近づくにつれて一定値に漸近していくことがわかった。

(2) 実験で得られた複素誘電率および複素屈折率のデータにドルーデの理論式をフィッティングすることでキャリア濃度や移動度といった物性値を推定できた。さらに、実験データのフィッティングから得られたキャリア濃度、移動度とホール効果測定で得られた実測値との比較・検討を行った結果、フィッティングにより得られたキャリア濃度は実測値に近い値を示したが、移動度はあまり近い値にならなかった。その原因としては、実験データの精度が足りないということとドルーデの理論式だけでは半導体の電気伝導の様子を正確に表せてないということが考えられる。半導体試料のより高精度な電気的特性の評価のためには、半導体中の電子の伝導を模擬したさらに適切な理論の発見が望まれる。

文 献

- (1) Jeon, T. and Grischkowsky, D., Nature of Conduction in Doped Silicon, *Physical Review Letters*, Vol. 78, No. 6 (1997), pp. 1106-1109.
- (2) Fekete, L., Němec, H., Kadlec, F., Kužel, P., Stuchlík, J., Fejfar, A. and Kočka, J., Carrier Dynamics in Microcrystalline Silicon Studied by Time-resolved Terahertz Spectroscopy, *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 352, No. 26-27 (2006), pp. 2846-2849.
- (3) Beard, M. C., Turner, G. M. and Schmittenmaer, C. A., Subpicosecond Carrier Dynamics in Low-temperature Grown GaAs as Measured by Time-resolved Terahertz Spectroscopy, *Journal of Applied Physics*, Vol. 90, No. 12 (2001), pp. 5915-5923.
- (4) Tonouchi, M., *Terahertz Technology* (in Japanese), (2006), pp. 43-44, Ohmsha.