

補助事業番号 28-122
補助事業名 平成28年度 半導体材料抵抗率の高精度な測定方法の開発 補助事業
補助事業者名 新潟大学 大学院自然科学研究科 劉雪峰

1 研究の概要

有限要素法分野での新たな研究成果を用いて、半導体抵抗率測定に於ける四探針法の新しい補正係数計算方法を開発する。当該補正係数の計算方法により、今までできなかった半導体ウェーハのオリフラ、ノッチ及びエッジ断面形状の影響を補正した高精度測定が可能となる。

2 研究の目的と背景

50年前に確立された四探針方式の抵抗率測定はサンプルを無限大の面積とした数学モデルであり、有限の面積のサンプルを測定する時は補正式を利用して誤差を補正しなければならない。現在よく使われている補正式としては山下法、イメージ法などがあるが、長方形、円形など定型形状のウェーハにしか対応できない問題がある。オリフラ・ノッチなどがあるウェーハについては、標準的な円盤に近似して計算している状況であり、その故に、エッジ5mm近くなると測定誤差が大きくなり、信頼できる測定ができないといった問題がある。

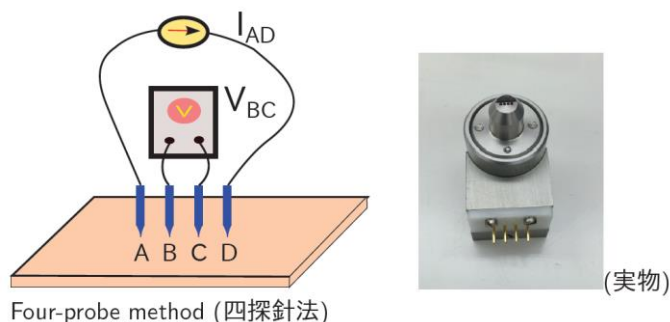


図1：四探針法と四探針の実物

本研究では抵抗率測定の数理モデルのシミュレーション結果によって、幾つかの測定誤差の影響を定量化することができた。これらの誤差原因を除去することで、ウェーハのエッジ付近の計測誤差を補正し、従来方法では測定不可能な範囲に対応できる高精度な測定方法が可能となる。

3 研究内容

(1) 半導体材料抵抗率の高精度な測定方法の開発の開発

(URL: http://mathweb.sc.niigata-u.ac.jp/~xfliu/four_probe/)

抵抗率の測定・補正計算の基礎数理モデルであるポアソン方程式の境界値問題については、探針AとDのところで、特異性が現れるので、微分方程式の解の計算は極めて難しいである。本研究は代表的な研究成果である有限要素法の最新の計算手法と誤差評価理論を取り入れることで、半導体材料の抵抗率計測の誤差原因を特定し、非定型形状要素に対応した新しい補正係数の高精度な計算方式及び検証方法を開発する。

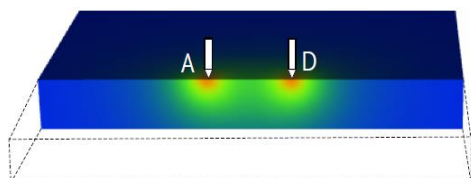


図2：探針Aと探針Dに現れる特異性

本研究で開発した補正係数の計算方法は以下の特徴がある。

1) オリフラ・ノッチのサイズとエッジ断面の形状が抵抗率測定へ及ぼす影響を確定して、エッジ付近の抵抗率補正係数を計算できる。

理論的な解析とシミュレーションの結果によると、ウェーハのエッジ付近での抵抗率の補正係数は、オリフラ・ノッチの大きさ、エッジの形状に依存していることが分かる。本研究開発は、ウェーハの幾何形状に応じて支配偏微分方程式の領域を設定し、適切なメッシュ分割を行うことで、相対誤差を理論上0.1%以下に抑える補正係数の計算方法を提案する。

2) 非一様メッシュによる3D領域における抵抗率補正係数の効率的な計算ができる。有限要素法を利用して抵抗率の補正係数を計算する時、抵抗率の測定モデルの基礎偏微分方程式の領域は3次元となる。この場合、高精度な計算結果を得るために、メッシュを細かく分割すると、計算量が膨大になり（メッシュの要素の直径が1/2になると、メモリの量は約64倍になる）、スペックの高い計算機が要求される。将来の研究開発では、解の特異性に合わせて特別な基底関数を用意したり、非一様メッシュ分割を利用したりすることで、実用的な有限要素計算方法を開発する予定である。

補正係数の計算結果の有効性への検証

ウェーハの形状がイレギュラーである場合、エッジ付近部分に関する補正係数を検証するために、円盤形のウェーハの抵抗率とウェーハをカットする後の抵抗率を測定・比較し、補正係数の有効性を検証できる。本研究では、4枚の標準ウェーハをカットする前後の抵抗率を比較することにより補正係数の検証を行った。

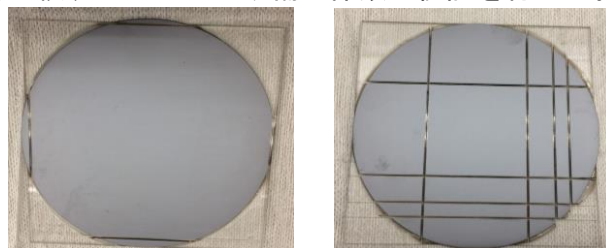


図3：円盤形のウェーハの加工（左：オリフラを作る；右：ブロックにカットする）

長方体の形状の場合、山下法で得られる補正係数の値はあるので、提案手法と山下法の比較を行った。5mm間隔の探針を長方体（縦 $a=80\text{mm}$ 、横 $b=50\text{mm}$ 、厚み t ）の中心部に置くという条件で、山下法と有限要素法の計算結果を以下の表に示す。

厚み	山下法	有限要素法	相対誤差
$t=5\text{mm}$	3.9228	3.92237 (要素数 : 154636)	0.011%
$t=10\text{mm}$	2.7497	2.74952 (要素数 : 163612)	0.0065%

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

四探針法は、半導体材料の抵抗率測定法として半導体材料の製造工程および半導体デバイスの製造工程において最も広く用いられている。近年、半導体ウェーハの大口径化により、エッジ付近で製造されるデバイスの数が増加している。しかし、四探針法によってウェーハのエッジ周辺の抵抗率を測定するとき、測定の誤差が大きくなって、ウェーハ付近の有効利用ができなくなる。ウェーハの材料の利用率を高めるために、四探針法を改善し、エッジ周辺の半導体材料の抵抗率を正確に測定することは重要な課題となっている。本研究で開発した抵抗率測定の補正係数の計算方法によって、半導体デバイス産業の歩留り向上及び製造コスト削減が期待できる。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

これまで有限要素法を数値計算法と誤差評価の数学理論を中心に研究を進めてきた。有限要素法は1950年代から研究され、有限要素法をベースにした商用ソフトも数多くの選択肢が広がっている。近年、工学などの分野では、有限要素法の商用ソフトはブラックボックスのように使用されている。しかし、今回の抵抗率測定の問題では、補正係数に関わる基礎数理モデルを解くための既存ソフトがなく、モデルの数学理論が分からないと、支配微分方程式を解くことが難しいと思われる。研究の実施者は有限要素法の数学理論を熟知しているので、新しい問題に対する有効な計算方法を提案できた。この経験によって、大学における数学理論の教育は重要であることが分かる。将来の研究では、数学の理論を深く研究し、現実の問題への応用を積極的に探索したいと思う。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

- 劉 雪峰・中本 昌雄：「4 探針法による半導体材料抵抗率の高精度な測定について」、日本応用数理学会 2016 年度年会，福岡県北九州市小倉（2016 年 9 月 13 日）
(資料：http://mathweb.sc.niigata-u.ac.jp/~xfliu/pdf/2016JSIAM_FourProbe.pdf)
- 劉 雪峰：「半導体材料抵抗率の高精度な測定方法」，新大産学交流フェスタ，新潟大学ライブラリーホール（2016 年 10 月 18 日）

7 補助事業に係る成果物

(1) 補助事業により作成したもの

- 【論文】劉 雪峰・中本 昌雄：「4 探針法による半導体材料抵抗率の高精度な測定について」, 日本応用数理学会 2016 年度年会予稿集, p. 324-325 (2016 年 9 月)
http://mathweb.sc.niigata-u.ac.jp/~xfliu/pdf/2016JSIAM_FourProbePaper.pdf
- 【ポスター】劉 雪峰：「半導体材料抵抗率の高精度な測定方法」, 新大産学交流フェスタ, 新潟大学ライブラリーホール (2016 年 10 月 18 日)
http://www.ircp.niigata-u.ac.jp/wp-content/uploads/2017/02/20161018sangakufesta_14liu-xuefeng.pdf
- 【抵抗率測定の補正係数のオンライン計算サイト】
 URL: http://mathweb.sc.niigata-u.ac.jp/~xfliu/four_probe/

半導体材料抵抗率の高精度な測定方法

【キーワード】 抵抗率測定, 四探針法, 補正係数の算出, 測定誤差の低減, 3次元シミュレーション

■概要
 四探針法は、半導体材料の抵抗率測定法として半導体材料の製造工程および半導体デバイスの製造工程において最も広く用いられている。本研究では、高精度な抵抗率の測定方法として、半導体材料抵抗率測定に於ける四探針法の新しい補正係数算出方法を提案した。高精度な抵抗率の測定方法として、従来の方法で算出された半導体ウェハーエッジ付近の抵抗率の測定について、測定精度が飛躍的に向上できる。

■詳細
 背景: 四探針法の使用では、JIS, ASTMにより標準化されている以下述の補正係数算出方法は、定数形状の測定位置に対する補正係数算出方式が一般的である。具体的には、以下の測定方法である。
 1) 補正係数の計算値と理論上の補正係数の相対誤差を0.1%以下に抑える。
 2) エッジから1mm以内で測定できる抵抗率測定ができる。(従来のウェハーのエッジから5.0mm以内の範囲での測定のみが得られる)
 3) ウェハーの形状、エッジエッジ形状の形状が円筒状に相対誤差を0.1%以下にする。
 ○測定される材料例、応用例
 ・様々な形状のウェハーの抵抗率の高精度な測定。
 ・既存の抵抗率測定装置に新しい補正係数を適用すること。
 ○今後の課題、展望
 ・異なる測定時の環境の影響を抑制し、精度の高い抵抗率の測定方法を提案する。

■応用を期待する分野
 従来の方法で高い精度な半導体ウェハーエッジ付近の抵抗率の測定について、精度の向上が期待される。よって、半導体デバイス産業の歩留まり向上と製造コスト削減が期待される。

本発明の問い合わせ先: 新潟大学 地域連携推進課
 TEL: 025-252-7854 FAX: 025-252-7513 E-mail: onestep@edu.niigata-u.ac.jp

(ポスター)

抵抗率測定の補正係数のオンライン計算サイト
 URL: http://mathweb.sc.niigata-u.ac.jp/~xfliu/four_probe/

半導体材料抵抗率の高精度な測定方法
 (High-precision semiconductor resistivity measurement)

Xuefeng LIU, Niigata University
 Contact: xfliu.math@gmail.com HP: <http://www.xfliu.org>
 Last updated: 2017/05/09

Introduction
 To measure the resistivity of semiconductors, the four-point probe method is a well used technique.

Mathematical model
 Let Ω be the domain of the semiconductor object. Given the positions for probes A and D, denoted by r_A and r_D respectively, the potential $\Phi(r)$ inside the semiconductor object is the solution of the following Poisson's equation in R^2 .

$$\Delta \Phi(r) = 2\rho I_{4p} (\delta(r - r_D) - \delta(r - r_A)) \text{ in } \Omega; \quad \frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \text{ on } \partial \Omega, \quad (1)$$

(オンライン計算サイト)

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 新潟大学大学院自然科学研究科 (ニイガタダイガクダイガクインシゼンカガクケンキュウカ)

住所: 〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐2の町

申請者: 准教授 劉 雪峰 (リュウ シュウフォン)

担当部署: 同上

E-mail: xfliu@math.sc.niigata-u.ac.jp

URL: <http://www.xfliu.org>