

積層半導体基板向け電気物性値抽出手法の開発

Development of the inspection method of electrical properties for multilayered semiconductor wafer

関西大学システム理工学部電気電子情報工学科 准教授 佐藤 伸吾

Department of Electrical, Electronic and Information Engineering,
Faculty of Engineering Science, Kansai University, Shingo Sato

要旨

積層半導体基板上に半導体素子を作り込むことなく電気物性値を抽出するための検査手法である Pseudo-MOS 法の直流測定・交流測定に関して電気物性値の高精度抽出に関する検討を行った。

直流測定に関する検討では、四探針法による抵抗率抽出時に使用する形状補正係数に関して、複雑な解析関数を使用することなく測定結果のみから形状補正係数を抽出する 2 重配置法を Pseudo-MOS 法に適用した。その結果、試料端からの距離に依存しない抵抗率抽出手法を確立し、電気物性値を高精度に抽出する手法を開発・提案することに成功した。

交流測定に関する検討では、 $G\Omega$ 級の高入力インピーダンスをもつバッファ回路を設計し、既存の測定器に付与することで Pseudo-MOS 法において交流 Kelvin 測定を実現した。その結果、交流信号がチャンネル上を放射状に伝搬する際に観測されるインピーダンス特性を観測することに成功し、Pseudo-MOS 法を用いて移動度のチャンネル電荷量依存性を抽出する見通しを得た。

1. はじめに

現在、最先端微細加工技術による集積回路の製造では単一半導体からなるバルク基板が使用されているが、更なる微細化、超低消費電力を実現するために積層半導体基板を活用する試みが報告されており[1]、積層半導体基板の電氣的品質を簡便に検査する手法が求められている。

Pseudo-MOS 法は積層半導体基板上に金属探針をあてるだけで積層半導体基板の電気特性を抽出できる大変簡便な手法である[2]。本研究では積層半導体基板として SOI 基板を使用し、Pseudo-MOS 法の直流測定法と交流測定法に関して電気物性値の高精度抽出に関する検討を行った。

本研究では試料寸法依存性を測定するためにドライエッチング技術により、SOI 基板の半導体層に様々な寸法の Si 島を作成した。

2. Pseudo-MOS 法(直流測定)

図 1 に Pseudo-MOS 法の直流測定の概要図を

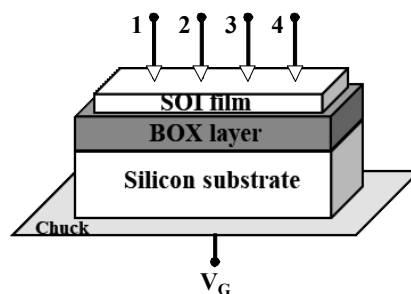


図 1. Pseudo-MOS 法の概要図(直流測定)

示す。金属探針間や基板裏面への電圧印加により、疑似的な MOSFET 構造を形成し、各種電気物性値を抽出する。四探針測定では探針 1-4 間に電流を流し、探針 2-3 間で電圧を測定することにより金属探針-測定試料間の接触抵抗を除去し、形状補正係数を用いて高精度に抵抗率を抽出する。形状補正係数は測定試料端から金属探針までの距離が金属探針間の距離と比較して非常に大きい薄膜試料に対して、4.53 であることが知られている[3]。上記条件

を満足しない場合は測定試料端の影響(エッジ効果)が顕在化するため、複雑な解析式と正確な金属探針位置を駆使して補正係数を導出する必要がある[3]。

図2に測定試料端からの距離を調整したPseudo-MOS法におけるゲート電圧 V_G -チャンネルコンダクタンス $G_D(=I_{14}/V_{23})$ 特性を示す。金属探針は測定試料端に対して垂直となるように設定した。測定試料端から遠いほどチャンネルコンダクタンスが増加する結果が得られており、明確にエッジ効果が観測されている。本研究では金属探針位置を正確に知るための特殊な測定装置を使わず、また複雑な解析式を使用することなく形状補正係数を導出、つまりエッジ効果を除去するために等角写像法を用いた2重配置法[3-4]を適用した。

図3に2重配置法により実験的に抽出した形状補正係数のゲート電圧依存性を示す。エッジ効果がない試料中央近傍での形状補正係数抽出結果は理論値(~4.53)とほぼ等しくなっており、正しく形状補正係数が抽出できていることがわかる。また試料端に近づくほど形状補正係数が小さくなることがわかり、ゲート電圧依存性はほとんど観測されなかった。ゲート電圧依存性が確認されない理由は半導体と絶縁物の界面に形成されたチャンネル(反転層、蓄積層)を数nm厚さの薄膜試料と見なす

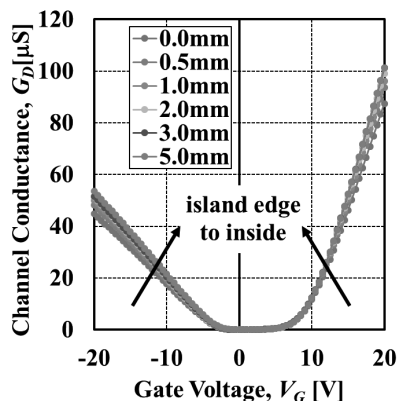


図2. G_D - V_G 測定結果。測定試料端から離れるほど G_D が増加するエッジ効果が確認できる。

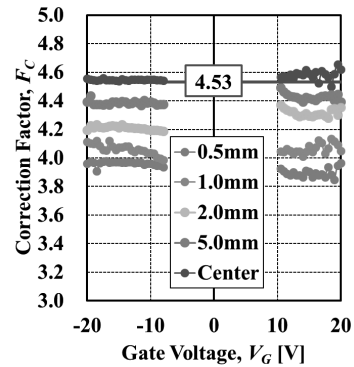
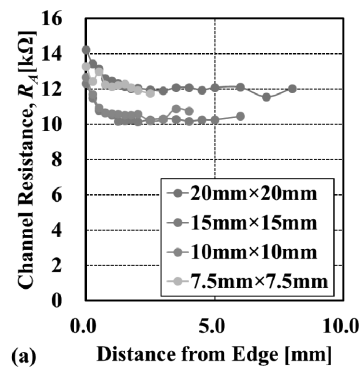
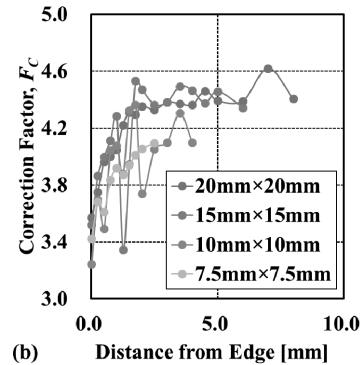


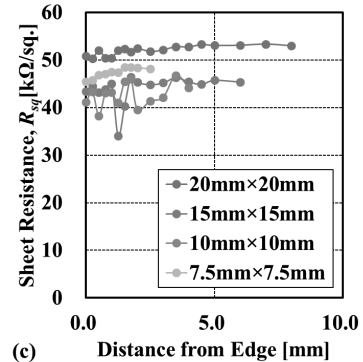
図3.形状補正係数の抽出結果



(a)



(b)



(c)

図4. 様々な試料寸法に対する(a) チャンネル抵抗 R_A , (b) 形状補正係数 F_C (c) チャンネル表面抵抗率 R_{sq} の試料端からの距離依存性

ことが可能であることによる。

図4に各種試料寸法におけるチャンネル抵抗、形状補正係数、チャンネル表面抵抗率の試料端からの距離依存性を示す。試料端に近いほどチャンネル抵抗が増加していることに対して、形状補正係数は減少しており、両者の結果が相殺された結果としてチャンネル表面抵抗率は試料端からの距離に依存せずにはほぼ一定値となっていることがわかる。これはいずれの試料寸法においても同様の結果が得られており、2重配置法により適切にエッジ効果を除去できることが分かった。

上記結果から Pseudo-MOS 法に2重配置法を適用することにより、複雑な解析式を用いることなく、エッジ効果を除去したチャンネル表面抵抗率を抽出できることがわかった。

3. Pseudo-MOS 法(交流測定)

Pseudo-MOS 法の交流測定法は金属探針-基板裏面間の電圧(ゲート電圧)印加により疑似的な MOS 構造を形成し、従来の MOS 構造との類似性から各種電気物性値の抽出を実現する方法として近年活発に研究されている[5]。以前の研究で金属探針-測定試料間の接触抵抗がゲート電圧依存性を持ち、また閾値電圧近傍でその接触抵抗が増加することから、高精度な電気物性値抽出のために交流測定においても接触抵抗を除去する必要があることを示した[6]。

図5に Pseudo-MOS 法の交流測定の概要図を示す。通常の交流測定では図中スイッチ S_A の

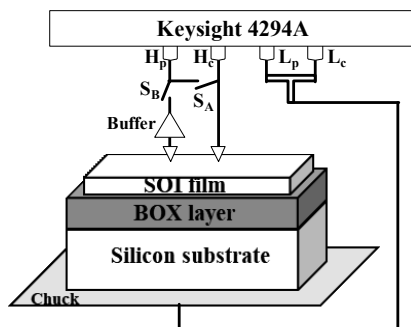


図 5. Pseudo-MOS 法の概要図(交流測定)

みを ON にして測定することが一般的であるが、この測定手法では接触抵抗が測定結果に含まれる。スイッチ S_B のみを ON にして別の金属探針を用いて電圧を測定することで接触抵抗を除去した測定結果を得ることができる。ただし、既存の測定装置の入力インピーダンスが比較的小さいため、被測定試料のインピーダンスが大きい場合、信号が減衰し正確な電圧信号測定が不可能である。SOI 基板を用いた Pseudo-MOS 法では最大数百 $M\Omega$ のインピーダンスを持つため[6]、信号を正確に測定するために本研究では全ゲート電圧範囲で使用可能な $G\Omega$ 級の入力インピーダンスを持つバッファ回路を設計した。

図6に実際に設計したバッファ回路を示す。USB 電源から正負電源を生成し、高入力インピーダンスで広い周波数帯域を持つ AD8065 を用いて、ブートストラップ法によりバッファ回路を作成した。当初、信号強度が微弱であることを想定し2段階の信号増幅回路を実装予定であったが、バッファ回路のみで十分に検出可能な信号強度であったため、増幅回路は使用しなかった。

図7に設計したバッファ回路の入力インピーダンスのシミュレーション結果を示す。40Hz 以上の周波数において AD8065 の入力インピーダンスと同等の性能を示しており、低周波領域($\sim 1kHz$)において $G\Omega$ 級の入力インピーダンスを持っていることがわかる。このバッファ回路を図5のように測定試料-測定器間

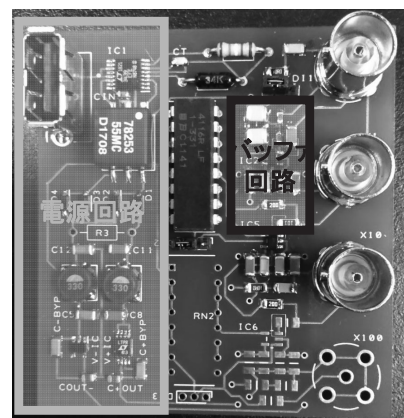


図 6. 設計したバッファ回路

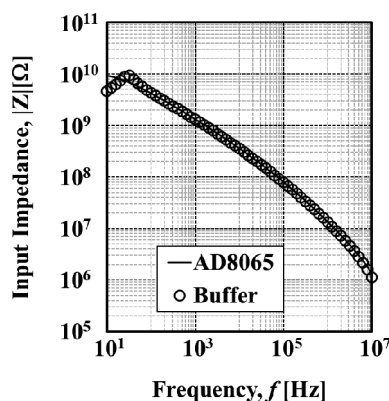


図7. バッファ回路の入力インピーダンスの周波数依存性

に挿入し、Pseudo-MOS法の交流測定法において、接触抵抗を除去したインピーダンス特性の取得を試みた。

図8にPseudo-MOS法におけるインピーダンスのゲート電圧依存性を示す。測定周波数は40Hzである。図5におけるスイッチ S_A と S_B の切り替え、バッファ回路の有無の差異を測定した。スイッチ S_B を用いてバッファ回路有無を比較した時、全ゲート電圧領域においてバッファ回路有の場合にインピーダンス値が増加しており、高入力インピーダンスを持つバッファ回路により信号強度が減衰することなく測定できていることがわかる。またバッファ回路有では高 V_G 領域においてスイッチ S_A で測定した場合と同等の結果が得られている。これは $V_G = 0[V]$ 近傍では全インピーダン

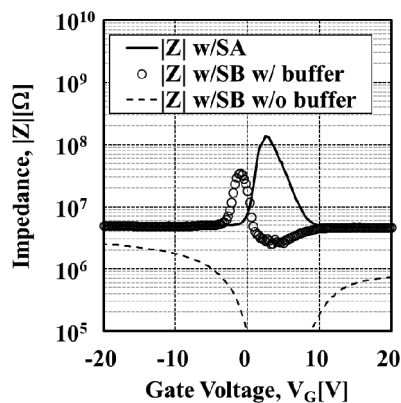


図8. インピーダンスのゲート電圧依存性

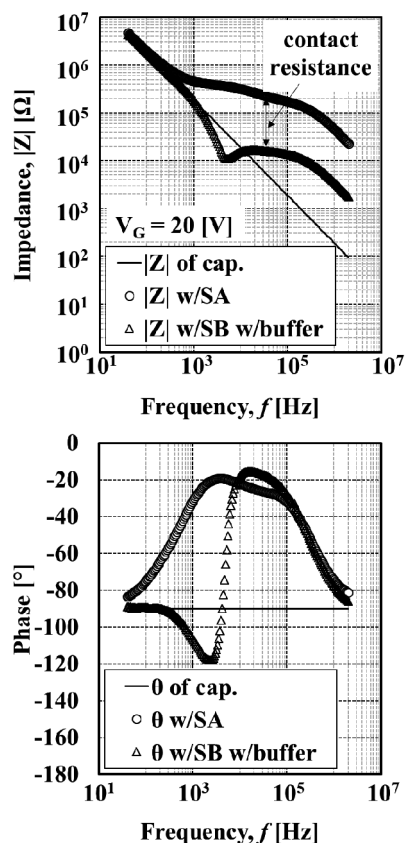


図9. インピーダンスの周波数依存性

スに対して接触抵抗が占める割合が増加し、高 V_G 領域では絶縁膜容量が占める割合が増加するという以前の報告と対応しており[6]、正しく測定できていることを示す証左である。図9に各種測定条件におけるインピーダンスの周波数依存性を示す。低周波数領域では絶縁膜容量値の理論値と等しい依存性が得られ、1kHz以上の周波数領域ではスイッチ S_A の場合の測定結果とスイッチ S_B でバッファ回路有の測定結果の間で接触抵抗によるインピーダンス差が確認された。この結果からバッファ回路挿入によりPseudo-MOS法における交流Kelvin測定を実現し、金属探針-測定試料間の接触抵抗が除去されたことを確認できた。また図9において接触抵抗を除去した測定構成ではインピーダンス値が絶縁膜容量の理論値を下回り、 -90° を超える位相値が観測されている。この位相特性は金属探針を中心としてチャネル上を放射状に信号が伝搬する状況を反

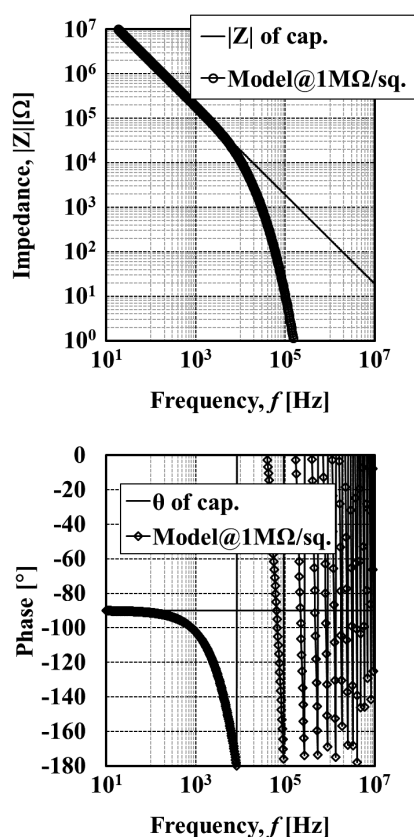


図 10. 解析モデル式によるインピーダンスの周波数依存性、チャンネル表面抵抗率を $1\text{M}\Omega/\text{sq.}$ で計算している。

映しており、図 10 に示す解析モデルの結果からも同様のインピーダンス値と位相特性が得られている。図 9 と図 10 における高周波領域における特性の差異はチャック-SOI 基板裏面間の接触抵抗に起因すると推測される[7]。SOI 基板裏面への電極形成により、チャック-SOI 基板裏面間の接触抵抗を低減・除去し、更なる解析モデルと測定結果の特性一致により、インピーダンスの周波数依存性を用いた移動度のチャンネル電荷量依存性の抽出が可能になる。

上記の結果からバッファ回路設計により、金属探針-半導体層間の接触抵抗を除去し、チャンネル伝導に起因するインピーダンス特性を確認することができた。

4. まとめ

本研究では Pseudo-MOS 法の直流測定・交流測定に関して電気物性値の高精度抽出に関する検討を行った。直流測定では 2 重配置法を適用することにより試料端からの距離に依存せず、抵抗率等の電気物性値を高精度に抽出することに成功した。交流測定ではバッファ回路の設計により交流 Kelvin 測定を実現し、チャンネル伝導に起因するインピーダンス特性を確認し、移動度のチャンネル電荷量依存性を抽出する見通しを得た。

謝辞

本研究遂行にあたり、関西大学の太田泰久名誉教授より適切なお助言、鈴木昌人准教授、山本峻己氏より技術的なサポートをいただきました。ここに感謝いたします。

また本研究を援助いただきました公益財団法人京都技術科学センターに感謝いたします。

参考文献

- [1] S. Cristoloveanu, *et al.*, vol. 143, pp. 10-19, 2018.
- [2] S. Cristoloveanu, *et al.*, IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 47, no. 5, pp. 1018-1027, 2000.
- [3] M. Yamashita, *et al.*, Japanese Journal of Applied Physics, vol. 42, pp. 695-699, Part 1, No. 2A, 2003.
- [4] ASTM F1529-97.
- [5] L. Pirro, *et al.*, IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 62, no. 9, pp. 2717-2722, 2015.
- [6] S. Sato, *et al.*, Solid-State Electronics, vol. 159, pp. 197-203, 2019.
- [7] I. Yarita, *et al.*, ECS Transactions, vol. 77, pp. 1887-1892, 2017.

研究成果

- 1) D. Mori, and S. Sato, "Revisiting an influence of island edge on electrical characteristic of pseudo-MOSFET method", Proc. of EUROSIOI-ULIS'2020, August (2020), in print.