

非線形誘電率顕微鏡法を用いた界面電荷輸送現象における
諸問題の起源解明

Origin elucidation of the problems in the interface
electric charge transportation phenomenon
using scanning nonlinear dielectric microscopy

課題番号：16H06360

長 康雄（CHO, YASUO）

東北大学・電気通信研究所・教授



研究の概要

界面電荷輸送現象における諸問題の起源解明のため、新規多機能・高性能走査型非線形誘電率顕微鏡（SNDM）群を開発する。これらの手法を種々の界面に適用し計測・分析を行い、移動度低下の原因を明らかにする。ひいては界面（表面）を使った半導体デバイスや伝導デバイスの性能を飛躍的に向上させる。

研究分野：工学

キーワード：走査型非線形誘電率顕微鏡、MOS界面、移動度、DLTS

1. 研究開始当初の背景

MOSデバイスに代表される電子デバイスでは界面におけるキャリア輸送がそれらの機能発現のために多用されている。しかし実際に得られる界面チャンネル移動度が予想を遥かに下回り、期待されるデバイス性能が達成されていない。その最大の理由は、移動度低下の原因に関して諸説あるものの、界面をミクロに非破壊で検査する方法が無く、原因の特定が困難であったことにある。

2. 研究の目的

本研究課題では界面キャリア輸送に係る諸問題の起源を明らかにすること最終目標とし、新規多機能・高性能走査型非線形誘電率顕微鏡（SNDM）群を開発する。これらの手法を種々の界面に適用し計測・分析を行い、MOSデバイスの移動度低下の原因を明らかにする。

3. 研究の方法

上記示した、目的を達成するため以下の研究を行う。

- ① 超高次非線形誘電率顕微鏡法（SHO-SNDM）の更なる高度化。
- ② 原子分解能非接触 SNDM（NC-SNDM）ならびに界面評価用非接触非線形誘電率ポテンシオメトリ（NC-SNDP）の高度化。
- ③ 局所 DLTS 法の開発。
- ④ 走査型非線形誘電率常磁性共鳴顕微鏡法（SNDMR）の研究開発。
- ⑤ 以上の SNDM 装置群を有効に組み合わせ、種々の具体的な界面に適用し、移動度低下の

原因となっている原因を明らかにする。

4. これまでの成果

① 超高次非線形誘電率顕微鏡法の更なる高度化
超高次非線形誘電率顕微鏡法（SHO-SNDM）は研究開始当初より既に単独での測定手法はほぼ確立したものであったが、その後局所 DLTS や後に述べる $\partial C/\partial z$ -SNDM と組み合わせることで、酸化膜/半導体界面をより多角的に評価・分析できる複合装置へと発展した。また、SHO-SNDM 法を用いた具体的な測定事例においても、いくつかの成果が得られた。まず、薄膜アモルファスシリコン太陽電池に対し SHO-SNDM 観察を行い、p-i-n 接合の各層を明瞭に可視化することに成功した。加えて、深さ方向の各点において同手法によって C-V カーブを取得した。

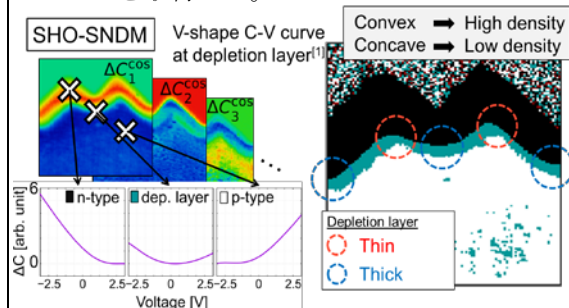


図1 超高次非線形誘電率顕微鏡法によるSi太陽電池のPN接合界面の可視化。

- ② 原子分解能非接触 SNDM（NC-SNDM）ならびに界面評価用非接触非線形誘電率ポテンシ

ヨメトリ (NC-SNDP) の高度化
 超高真空原子分解能 NC-SNDM および NC-SNDP を用いたグラフェンや遷移金属ダイカルコゲナイドなど層状材料評価を遂行し、その有用性を示す結果を得た。加えて、以上の NC-SNDP を層状半導体材料評価に応用する研究から新たに着想を得て、超高真空 NC-SNDM/NC-SNDP を用いるものではないが、大気中 SNDM を用いて、他のプローブ顕微鏡では実現されていない数原子層以下の層数を持つ原子層半導体の内因性多数キャリアの同定とその分布観察を行うことに初めて成功した。

③局所 DLTS 法の開発

従来から半導体工学の分野では、DLTS と呼ばれる精密な空乏層容量応答測定に基づく界面準位密度の測定方法が知られていた。DLTS は有用ではある一方、空間分解能を持たず試料全体の平均的な特性のみを得る手法であるため、界面のキャリア移動度低下の原因特定には不十分であった。そこで、本課題では、DLTS の測定原理を SHO-SNDM に融合させることで、ナノスケールで定量的な界面準位密度分布を実現する局所 DLTS の開発に成功した。さらに、局所 DLTS で実測された界面準位密度分布を反映する SiC-MOSFET のデバイスのモデルを確立、シミュレーションによるデバイス特性の予測を可能にし、本研究により初めて観測された D_{it} 分布が移動度低下の原因になっていることを明らかにした。

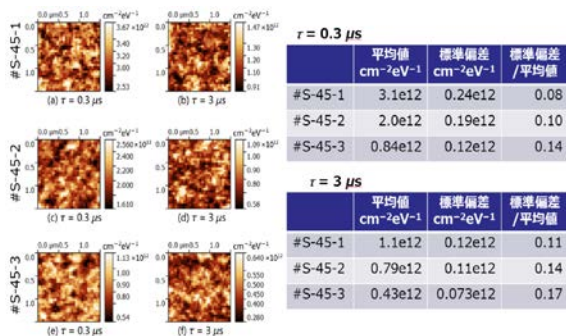


図 2 局所 DLTS による SiO_2/SiC 界面の界面準位密度分布の定量測定例 (上から順にポスト処理無/窒化処理 10 min./窒化処理 60 min. の試料評価結果)

④走査型非線形誘電率常磁性共鳴顕微鏡 (SNDMR) の研究開発

SNDMR の装置開発に先立ち、まず理論計算による信号強度の概算を行った。実際の実験条件を想定し、欠陥密度 $N_t = 10^{12}\text{cm}^{-2}$ の測定サンプルを半径 150 nm の探針電極を用いて信号検出を行うという仮定のもと試算を行ったところ、 1.3×10^{-19} F/V 程度の信号強度が得られるとの結果を得た。これは現行の SNDM によって十分検出可能な信号強度である。そこで、この結果を受けて実際に装置開発を行

い、試作機を完成させた。

5. 今後の計画

超高次非線形誘電率顕微鏡法 (SHO-SNDM) の更なる高度化では界面準位と並んで重要な評価対象である界面固定電荷分布の定量評価を行う方法を確立する。

原子分解能非接触 SNDM (NC-SNDM) ならびに界面評価用非接触非線形誘電率ポテンシオメトリ (NC-SNDP) の高度化では、 SiO_2/SiC 断面計測による界面評価や HfO_2/SiC 界面双極子の可視化を実現する。

SNDMR の研究開発では完成した装置を用いて共鳴ピーク検出に関する実験を今後行ってゆく。あわせて、欠陥種同定へ向けて、理論解析に関する検討を開始していく。

以上の研究を通して界面電荷輸送現象における諸問題の起源解明を達成する。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

1) Kohei Yamasue and Yasuo Cho, “Local carrier distribution imaging on few-layer MoS_2 exfoliated on SiO_2 by scanning nonlinear dielectric microscopy” *Appl. Phys. Lett.*, Vol.112, (2018) 243102,

2) Yoshiomi Hiranaga, Norimichi Chinone, and Yasuo Cho “Nanoscale linear permittivity imaging based on scanning nonlinear dielectric microscopy” *Nanotechnology*, Vol.29, (2018) 205709.

3) Yuji Yamagishi and Yasuo Cho, “Nanosecond microscopy of capacitance at $\text{SiO}_2/4\text{H-SiC}$ interfaces by time-resolved scanning nonlinear dielectric microscopy” *Appl. Phys. Lett.*, Vol.111, (2017) 163103.

4) Norimichi Chinone and Yasuo Cho “Local deep level transient spectroscopy using super-higher-order scanning nonlinear dielectric microscopy and its application to imaging two-dimensional distribution of SiO_2/SiC interface traps” *J. Appl. Phys.*, Vol.122 (2017) 105701.

5) Norimichi Chinone, Alpana Nayak, Ryoji Kosugi, Yasunori Tanaka, Shinsuke Harada, Hajime Okumura, and Yasuo Cho, “Evaluation of silicon- and carbon-face SiO_2/SiC MOS interface quality based on scanning nonlinear dielectric microscopy” *Appl. Phys. Lett.*, Vol.111, (2017) 061602.

受賞

第 40 回応用物理学会論文賞 (平成 30 年 9 月 18 日) 長康雄

7. ホームページ等

<http://www.d-nanodev.riec.tohoku.ac.jp/>