

**非線形誘電率顕微鏡の高機能化及び電子デバイスへの応用**  
Development of Highly-Functional Scanning Nonlinear  
Dielectric Microscopy and Its Application to Electronic  
Devices

**長 康雄 (CHO YASUO)**  
東北大学・電気通信研究所・教授



研究の概要 非線形誘電率顕微鏡の高機能化及び電子デバイスへの応用を目的とし、まず新規高性能走査型非線形誘電率顕微鏡法を開発する。次に原子分解能走査型非線形誘電率顕微鏡の更なる分解能の向上・適応範囲の拡大を図る。また、超高密度強誘電体記録を進展させる。更に、より微細で微小な濃度ゆらぎを持つ半導体デバイス計測に対応できるようにすると共に、一般に計測不可能と言われてきた新規半導体素子中の電荷の計測・評価技術を開発する。

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：走査プローブ顕微鏡、記憶・記録、電子デバイス・集積回路、誘電体

#### 1. 研究開始当初の背景

研究代表者は、分極分布が超高分解能で観測できる「走査型非線形誘電率顕微鏡」(SNDM)を世界に先駆けて発明・開発してきた。本顕微鏡は原子双極子モーメントを観測できる唯一の顕微鏡であり、本顕微鏡を強誘電体記録の読み取り装置に使用すれば、世界最高密度の記録技術が実現できる可能性がある。更にSNDMは $10^{-22}\text{F}$ の小さな静電容量変化に対して感度を持っているため、半導体素子中の電荷の高感度計測に成功している。

#### 2. 研究の目的

- ①新規高性能走査型非線形誘電率顕微鏡法を開発する。
- ②原子分解能SNDMの更なる分解能の向上・適応範囲の拡大を図る。
- ③現在まで大きく発展してきている超高密度強誘電体記録を更に進展させる。
- ④より微細で微小な濃度ゆらぎを持つ半導体デバイス計測に対応できるようにすると共に、従来計測不可能と言われてきた新規素子の計測・評価技術を開発する。

#### 3. 研究の方法

超高次非線形誘電率顕微鏡法を開発する。また原子種や吸着原子が発生するダイポールモーメントの同定を行い、SNDMで原子分解能が発現するメカニズムを明らかにする。次に強誘電体記録に於いてはHDD用薄膜記録媒体とHDD装置の開発を強力に進める。更に超高次非線形誘電率顕微鏡法を用い新規半導体素子中の電荷の可視化を行う。

#### 4. これまでの成果

##### ①超高次非線形誘電率顕微鏡法の開発

当初の研究目的では電界の4乗項までの高次非線形誘電率信号を検出することを最大目標にしていたが、プローブの高感度化が予想をはるかに上回り、半導体材料では電界の7乗項の非線形成分まで検出することに成功し、まだその限界には達していない。本“超高次非線形誘電率顕微鏡法”は、単に各次数の高次の非線形項を検出する方法を指しているのではなく、多数の超高次のデータセットをフルに活用して、材料ならびにデバイスの詳細な特性を抽出する一連の計測体系を指し、データの取得から分析までを統一した、全く新しい計測法の学問体系として発展し続けている。

##### ②原子分解能SNDMの更なる分解能・適応範囲の拡大

UHV-NC-SNDM装置の開発を進めた。特定の単一表面原子・分子上における非線形誘電率のバイアス電圧依存性や探針-試料間距離依存性の室温環境での精密な測定が可能となり以下の成果を得た。(i) Si(111)-(7×7)再構成表面を水素で終端する初期過程において、水素が吸着したSi原子の同定に成功した。(ii)半導体表面の観察における原子分解能の起源に関して検討を行い、双極子モーメント分布と同時観察した時間平均トンネル電流像が類似することを明らかにした。また像の類似が自発原子双極子上に局在した表面電位の誘起するトンネル電流の変調

に由来することを明らかにした。(iii) NC-SNDM をベースにした表面電位の定量的測定手法を提案し、その有効性を実証した。本手法は、KPFM と異なり、表面双極子に由来する局所表面電位を定量できる方法である。(iv) NC-SNDM の新領域への応用として、グラフェンの評価に関する研究を開始し、4H-SiC(0001) 基板上に形成された単層グラフェンの原子分解能像の観測（形状像と表面電位分布の同時観測）に成功した。

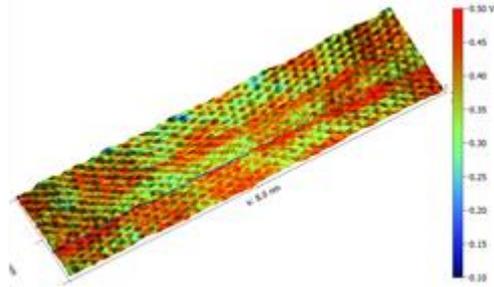


図1. NC-SNDM を用いたグラフェンの原子分解能表面電位像（形状に重ねて表示）。

### ③強誘電体記録の研究

HDD 型の試験装置を用いて、回転する強誘電体記録媒体上に高密度ドットパターンを記録する実験を行った。その結果 2.7 Tbit/inch<sup>2</sup> の記録密度を達成した。

また、薄膜強誘電体記録媒体の開発に関する研究も行った。一連の実験の結果、Zr/Ti の比率を変化させることで、非線形誘電率の値を制御できることを明らかにした。Zr/Ti 比が 52/48 の近傍において PZT 薄膜の非線形誘電率は最大の値 50 aF/V を示したが、これは従来の記録媒体より 70 倍程度大きな値である。

### ④半導体計測技術への展開

①で開発した超高次非線形誘電率顕微鏡法を用いて、微細な Si デバイスのドーパントの濃度分解能の飛躍的向上を達成した。更に現在まで良い評価方法のなかった SiC パワーデバイスのドーパント分布計測や空乏層計測に同法を適用して、7 乗までの非線形成分を利用した新規分析手法により、世界で初めてそれらの可視化に成功した。

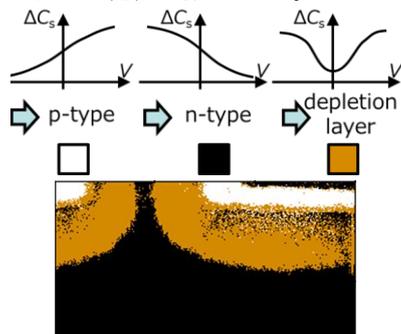


図2. 世界初、超高次非線形誘電率顕微鏡法を用いた SiC-DMOSFET の空乏層の可視化。

### 5. 今後の計画

- ①超高次非線形誘電率顕微鏡法の更なる発展を図る。
- ②原子分解能 SNDM の更なる分解能の向上・適応範囲の拡大を図る。そのためにグラフェンの更なる高精度計測、High-K 材料中のダイポールモーメントの可視化、Si の酸化過程に於けるダイポールモーメントの発生の観測等を行う。
- ③強誘電体記録の研究に於いては実用に近い HDD 型強誘電体記録を目指す。
- ④①で開発しつつある超高次非線形誘電率顕微鏡法を駆使して、更に新しい半導体計測技術を開発する。

### 6. これまでの発表論文等（受賞等も含む）

- 1) Y.Cho, “Electrical conduction in nanodomains in congruent lithium tantalate single crystal”, Appl. Phys. Lett. Vol.104, pp.042905-1-4 (2014)
- 2) D. Mizuno, K. Yamasue, and Y.Cho, “Atomic dipole moment distribution on a hydrogen-adsorbed Si(111)-(7×7) surface observed by noncontact scanning nonlinear dielectric microscopy”, Appl. Phys. Lett. Vol.103, pp.101601-1-5 (2013)
- 3) K. Yamasue and Y.Cho, “Simultaneous measurement of tunneling current and atomic dipole moment on Si(111)-(7×7) surface by noncontact scanning nonlinear dielectric microscopy”, J. Appl. Phys, Vol.113, pp.014307-1-8 (2013)
- 4) K. Honda and Y.Cho, “Scanning nonlinear dielectric microscopy observation of accumulated charges in metal-SiO<sub>2</sub>-SiN-SiO<sub>2</sub>-Si flash memory by detecting higher-order nonlinear permittivity” Appl. Phys. Lett, Vol.101, pp.242101-1-5 (2012)
- 5) N. Chinone, K. Yamasue, Y. Hiranaga, K. Honda, and Y.Cho, “Lateral resolution improvement in scanning nonlinear dielectric microscopy by measuring super-higher-order nonlinear dielectric constants” Appl. Phys. Lett, Vol.101, pp.213112-1-4 (2012)
- 6) S. Kobayashi and Y.Cho, “New evaluation of fullerene molecule on Si(111)-7×7 reconstructed structure using non-contact scanning non-linear dielectric microscopy”, Surface Science, 606, pp.174-180. (2012)
- 7) Y.Cho, “Scanning nonlinear dielectric microscopy”, J. Mater. Res., Vol.26., pp.2007-2016(2011) 【INVITED FEATURE PAPERS】

ホームページ等

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