

ケルビンフォース顕微鏡を用いた材料評価 ~新機能デバイス創出を目指して~

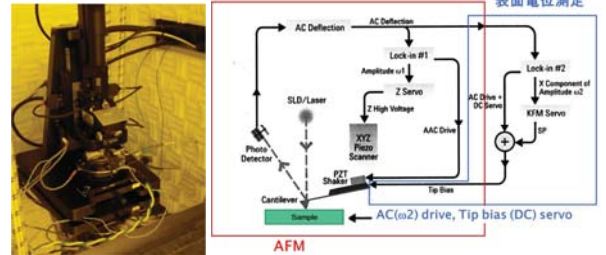
有田誠¹ 山内貴志² 本岡輝昭² 齊藤勝彦³ 郭其新³
¹九州大学大学院 工学研究院 材料工学部門
²九州大学クリーン実験ステーション
³佐賀大学シンクロtron光応用研究センター

九州シンクロtron光研究センター合同シンポジウム 8/5/2014

1

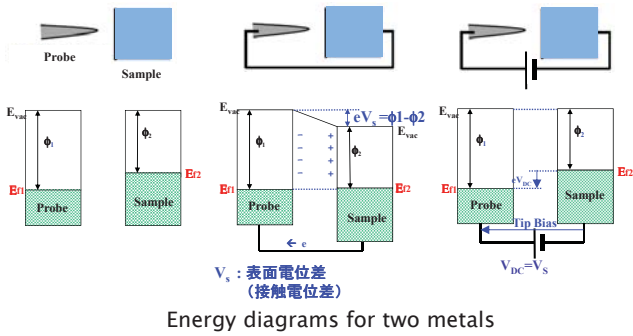
ケルビンフォース顕微鏡 KFM (Kelvin Force Microscopy) 表面電位差(仕事関数差)の二次元分布を観察

KFM = AFM + ケルビン法



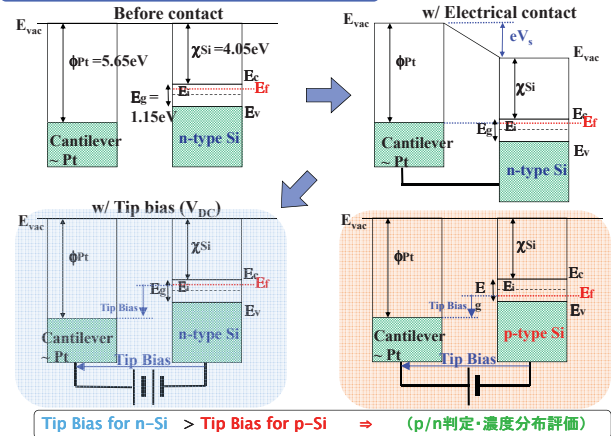
2

【表面電位差】



3

【Energy diagrams for Si and tip material】



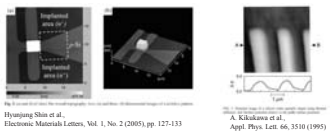
4

【半導体デバイスのKFM観察】

"Surface band-bending and Fermi-level pinning in doped Si observed by Kelvin force microscopy", Appl. Phys. Lett. 104, 132103 (2014)

<これまでの研究>

・表面電位コントラストは得られるが、定量性が
ない。(表面単位によるフェルミレベルピン
が影響)
・ドーピング濃度と表面電位差の関係を系統的
に調べた研究は無い。(特に低濃度Si)



Hyoungjin Shin et al., Electronic Materials Letters, Vol. 1, No. 2 (2005), pp. 127-133

A. Kikukawa et al., Appl. Phys. Lett. 66, 3510 (1995)

<本研究>

極低濃度領域を含む広範囲キャリア濃度のSiについて、
KFMによりキャリア濃度と仕事関数の関係を調査

5

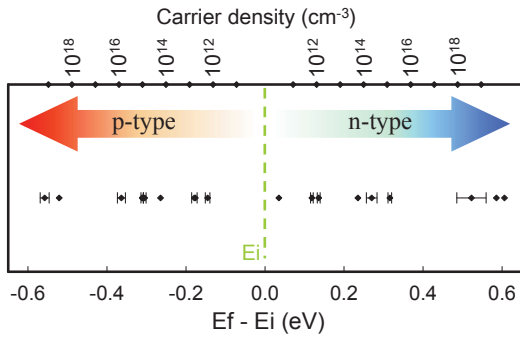
【様々なSPMによるキャリア濃度分布評価】

	SCM scanning capacitance microscopy	SSRM scanning spread resistance microscopy	KFM Kelvin force microscopy
Signal detected	dC/dV	Electric Resistance	Surface potential
Distinguishable n-type from p-type?	○ Yes	△ No	○ Yes
Resolution in measured surface	20 nm	③ 3 nm	20 nm
Structure requirement and/or damage by test	△ MOS structure	△ destructive to surface (~10nm)	○ None
Available range of carrier density	$10^{16} \sim 10^{18}$	$10^{15} \sim 10^{19}$	② (Theoretically $n_i \sim 10^{20}$)

KFM has the potential ability to be the simplest and the most convenient methods

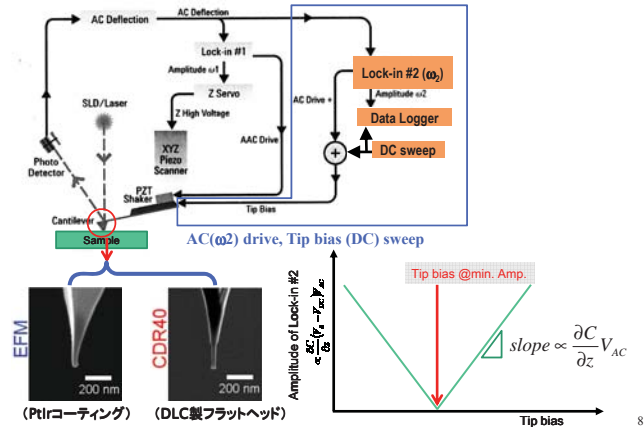
6

【実験に用いた試料のキャリア濃度範囲】



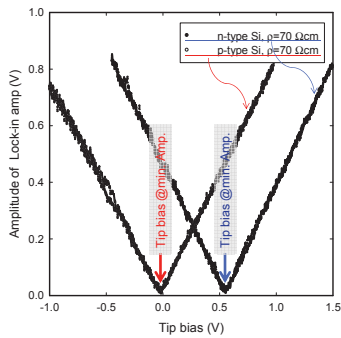
7

【DCバイアスを掃引して振動の0点を求める】



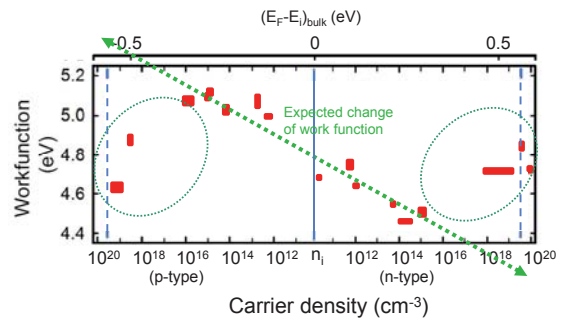
8

【測定結果の一例: p-type Si, n-type Si】

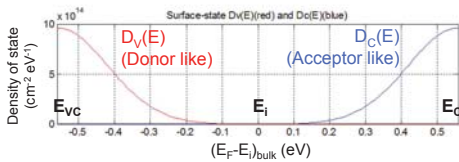


9

【測定された仕事関数】



10



1. Acceptor-like character

$E > E_f$ neutral (vacant)
 $E < E_f$ negative (filled)

$$D_v(E) = a e^{-(E-E_v)^2/b^2}$$

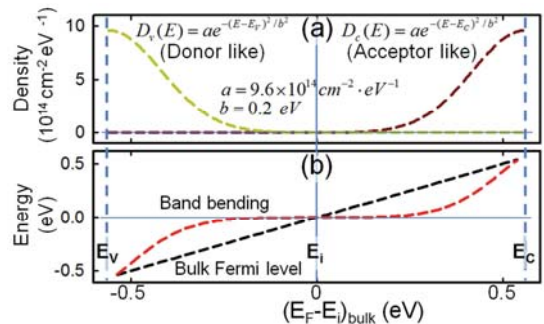
2. Donor-like character

$E > E_f$ positive (vacant)
 $E < E_f$ neutral (filled)

$$D_c(E) = a e^{-(E-E_c)^2/b^2}$$

Assuming two types of surface state with a simple distribution of Gaussian shape.

11

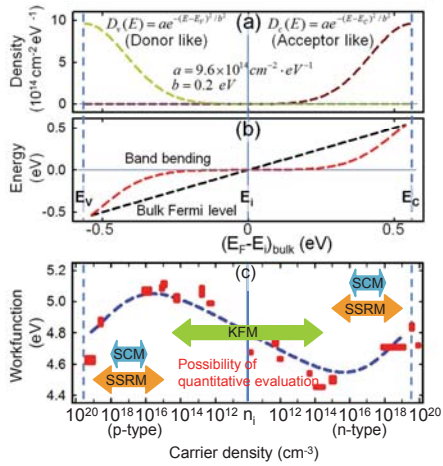


Bulk Fermi level: $E_f = E_i + kT \ln(n/n_i)$, $n_i = 1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

Total charge: $Q_{SS} = e \int_{E_v}^{E_c} [1 - F(E)] D_v(E) dE - e \int_{E_v}^{E_c} F(E) D_c(E) dE$

Band bending = $Q_{SS} t / 2\epsilon$, $t = 5 \text{ \AA}$, $\epsilon_r = 11.9$

12



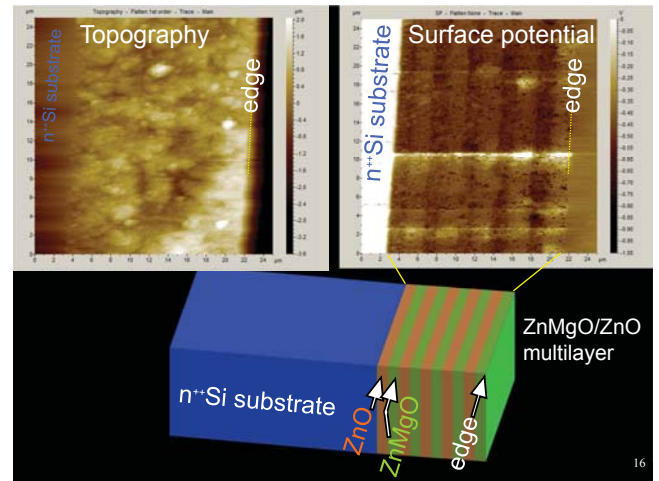
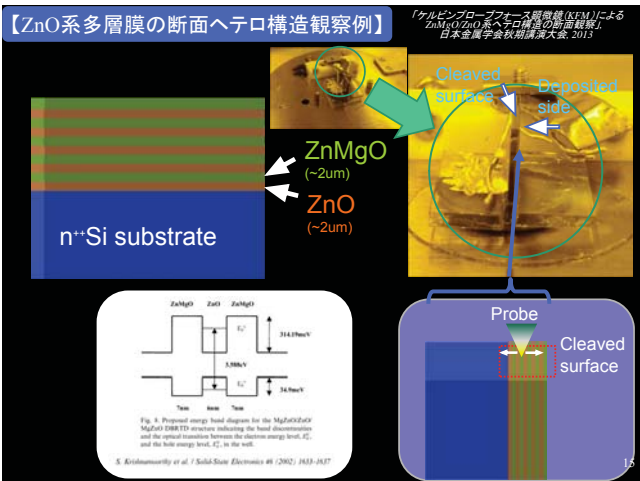
13

KFMによる半導体キャリア濃度定量

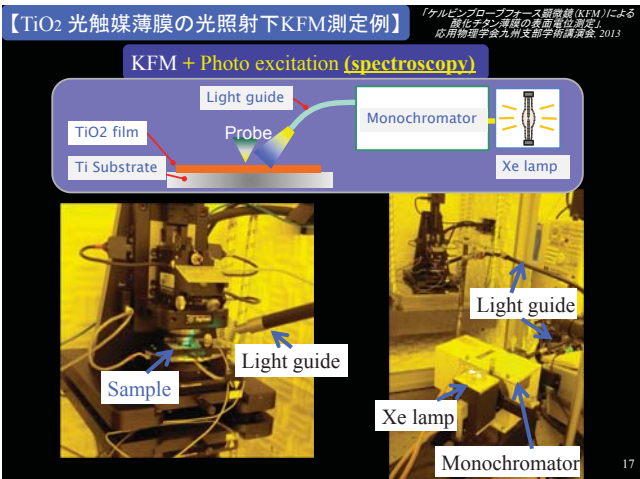
Si: 低濃度領域でのキャリア濃度定量性

~ 今後 ~
SiC, ダイヤモンド等ワイドギャップ半導体デバイスへの適用

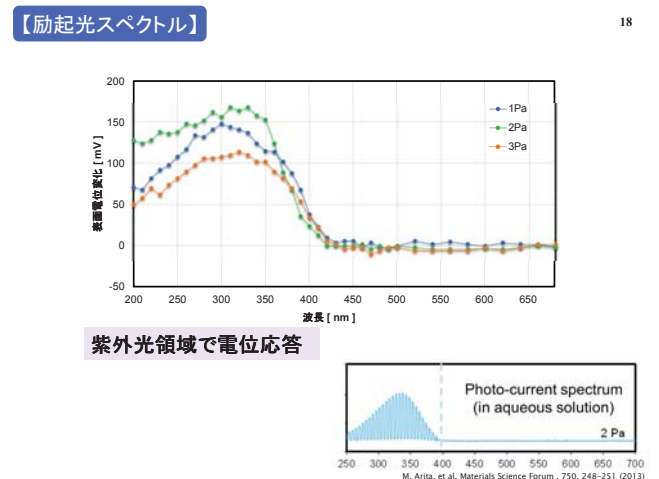
14



16

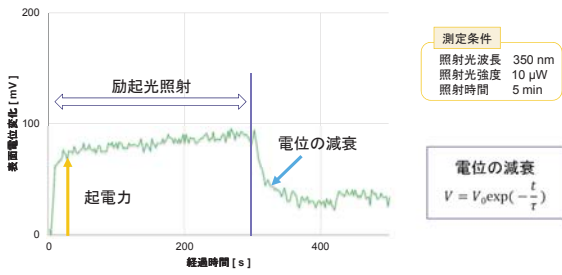


17



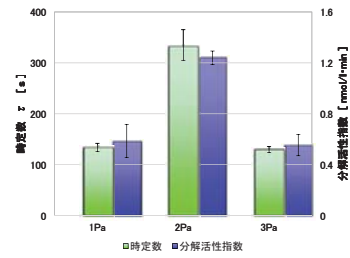
18

【表面電位変化】



波長350nmの単色光を照射し、遮断後の電位減衰の時定数を計算

【表面電位変化の時定数と光触媒活性】



電位減衰の時定数が光触媒活性と対応

【まとめ】

【Siドーピング濃度評価】

広範囲にわたるドーピング濃度のSiについてKFMにより仕事関数を測定 (p-type ~10¹⁹ to n-type ~10²⁰ cm⁻³)
測定された仕事関数は適当な表面準位を仮定することで説明可能
~10¹⁴ cm⁻³以下の低濃度領域で定量評価の可能性

【酸化チタン薄膜材料へのKFM使用例】

- スパッタリング法で作製したZnMgO/ZnO多層膜の劈開面をKFMで観察
→多層構造に対応した表面電位像
- 酸化チタン薄膜に単色光を照射しながらKFM観察
酸化チタンのバンドギャップに対応した電位応答スペクトル
試料の光触媒活性と電位減衰の時定数が対応

ケルビンフォース顕微鏡を用いた材料評価
様々な新機能デバイスの評価・研究への適用可能性

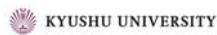
九州大学クリーン実験ステーション
Kyushu University Cleanroom Laboratory Facility

Agilent 5400 Scanning Probe Microscope

KFM装置利用に関するお問い合わせ先
九州大学クリーン実験ステーション(文部科学省先端研究基盤共用・プラットフォーム形成事業) サポートオフィス
e-mail: info@kuclf.kyushu-u.ac.jp, home page: http://kuclf.kyushu-u.ac.jp/

【謝辞】

Mr. Nagaoka
Mr. Nagano
Mr. Kaneko
(graduate students, Kyushu University)



Dr. Torigoe
(SUMCO Corporation,)



Dr. Aiso
Dr. Yamashita
(Toyo Corporation)



Dr. Harada
(Advanced Power Electronics Research Center, AIST)



KAKENHI Grant No. 23656386
KAKENHI Grant No. 26630297