

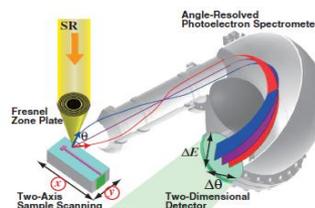
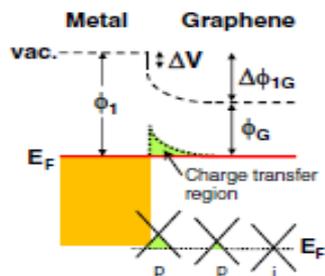
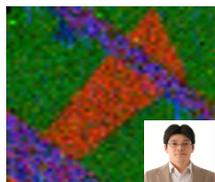
グラフェンデバイスの電子状態のナノ分析



吹留博一¹⁾、永村直佳^{2), 3)}、篠原稔宏²⁾、井出隆之¹⁾、黒角翔大²⁾、豊田智史^{2), 3)}、堀場弘司^{2), 3)}
 長汐晃輔²⁾、末光真希¹⁾、鳥海明²⁾、尾嶋正治^{2), 3)}



- 1) 東北大学電気通信研究所、
- 2) 東京大学大学院工学研究科、
- 3) 東京大学放射光連携機構、



(今回の発表内容は、2011A/B期・S課題(堀場)の一部、2011B期・G課題(吹留)のビームタイムを用いて得られた結果である。
 尚、発表内容の一部は、永村さんを中心にまとめられているところである。)





【序論】 なぜ、3D NanoESCAでグラフェンを観察するのか？

0. グラフェンの特徴と課題
1. これまでの研究
2. 残された課題
3. なぜ、3D NanoESCA？
4. 目的

【結果と考察】 3D NanoESCAでグラフェンは観察出来るのか？

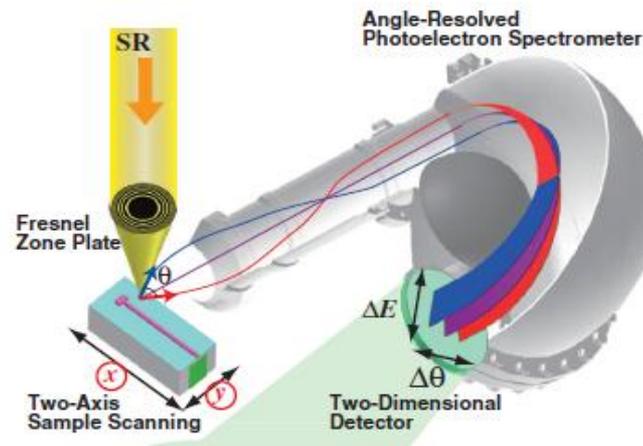
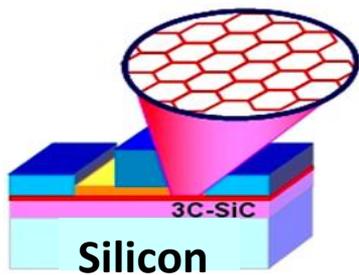
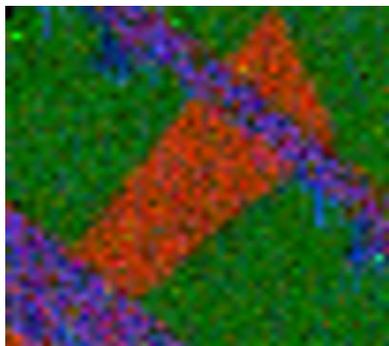
0. 用いた(標準)試料
1. 3D NanoESCAでグラフェンが見えるのか？
2. グラフェン/金属界面
3. グラフェン/基板界面

【まとめ】

【今後の展望】

序論

何故、グラフェンを、3D NanoESCAで、観察するのか？



(0) グラフェンの特徴と課題

Dirac電子系に属し、新奇・優れた多様な物性を有する



熱的・化学的安定性に優れる ⇒ (素子)応用に適した材料



E_F 変調(ゲート電圧印加)により、物性が変化するという特徴



グラフェン物性の多彩さは素子応用の際の弱点にもなり得る。
(シンプルな原理・物性に基づいたからこそ、Si-LSIは成功した)

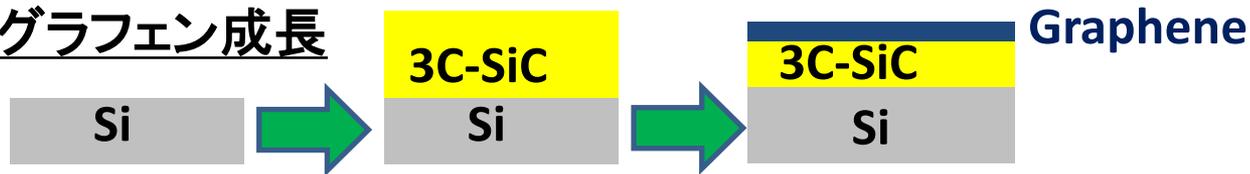


デバイス応用に適した基板(ex. Si)上にグラフェンを成長させ、
かつ、用途に応じて物性を制御することが重要となる

(1) 自身のこれまでの研究

1. Si基板上へのグラフェン成長

(Miyamoto et al.,
eJSSNT (2009))

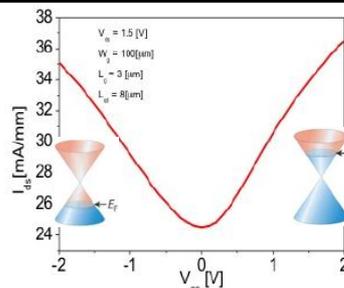
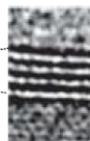
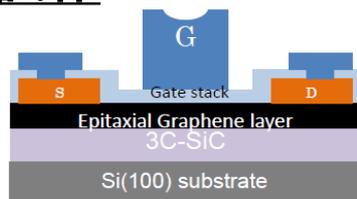
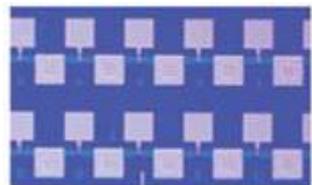


2. 界面制御による グラフェン構造物性制御

(Fukidome et al.,
J. Mater. Chem. & APEX (2011))

	Graphene/ SiC(111)/Si(111)	Graphene/ SiC(100)/Si(100)	Graphene/ SiC(111)/Si(110)
積層 構造	Bernal 	回転 	乱層
バンド 構造			

3. トランジスタ試作



両極性動作の確認
(nにもpにも)

T. Suemitsu et al.,
ECS Trans (2011).



最終目標

- ・超高速トランジスタ(カットオフ周波数 1 THz @ 100nm ゲート)
- ・THzレーザ

(2) 残された課題

【課題①】擬スピン？

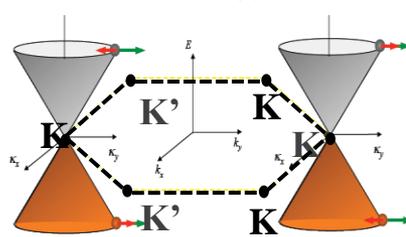
Aにおける量子力学的振幅

$$H_k = \hbar v_F \begin{pmatrix} 0 & k_x - ik_y \\ k_x + ik_y & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_k \\ \beta_k \end{pmatrix} = E(k) \begin{pmatrix} \alpha_k \\ \beta_k \end{pmatrix}$$

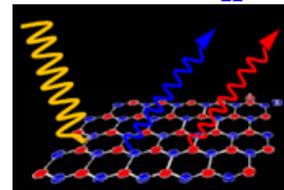
Bにおける量子力学的振幅

擬スピン

運動量 → 擬スピン →



$$I^2 = |I_K + I_{K'}|^2$$

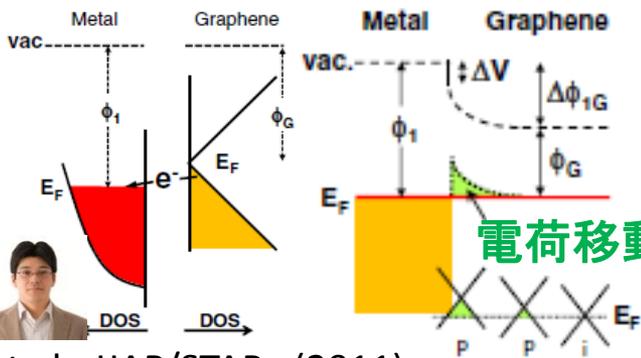


~ Young's Double Slit

これまでの研究: si基板上へのグラフェン成長と多機能化

【課題②】動作下でのグラフェンの電子状態？

グラフェン/金属界面の効果



Nagashio et al., JJAP/STAP (2011)

アクセス領域 (S/D-ゲート間) の効果

ゲート変調効いてる？



最終目標: グラフェンTHzデバイス



(3) 何故、NanoESCA ?



	PEEM	LEEM	3D NanoESCA
原理	光電子の一括投影型 イメージング(17SU)	回折電子による イメージング(17SU)	光電子の走査型 イメージング(07LSU) 
分解能	22 nm	~2 nm	70 nm
長所	・分子軌道識別可能 (顕微X線吸収分光)	・高い空間分解能 ・デジタル層数計測	・三次元的・高分解能な 内殻電子状態測定 (内殻光電子分光) ・試料周りをいじり易い ⇒電圧印加が容易
短所	高エネルギー分解能な 内殻光電子分光は苦手	・直接的な電子 状態観察は×	現状では、顕微X線 吸収分光は難しい

これらを相補的に活用しつつ、
3D NanoESCA ⇒ 電圧印加下のグラフェンデバイスの3D内殻電子状態を観察



(4) 研究目的



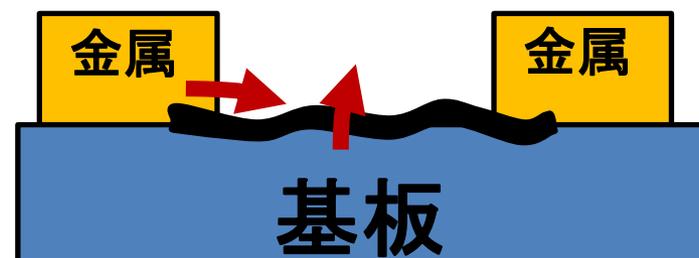
(2011期)

グラフェン(デバイス)の界面ナノ電子状態の分析の
3D NanoESCAによる研究の実行可能性の検証

(⇔**グラフェンが3D NanoESCAで本当に見えるのか?**)

【具体的な分析対象】

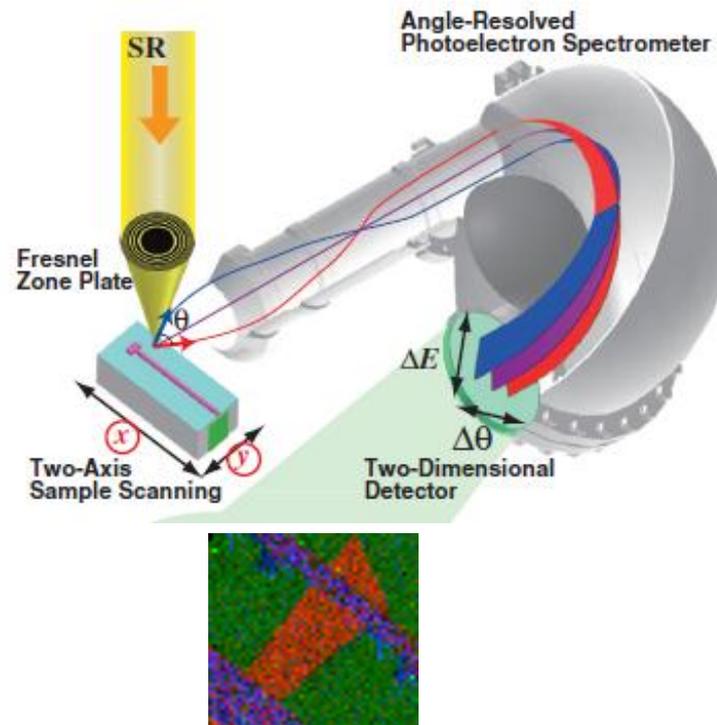
- ・グラフェン-金属(電極)界面 (横)
- ・グラフェン-基板界面 (縦)



・・・縦/横方向の界面電子状態を解明

結果と考察

3D NanoESCAで、グラフェンは、観察出来たのか？

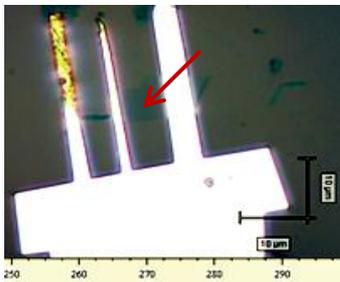


0. 用いた標準資料: 素子応用・エピ成長用

へき開グラフェン/SiO₂/Si + 金属電極付き

- 1) キッシュグラファイトからへき開したグラフェンをSiO₂/Siへ転写
- 2) Ni or Au/Tiを蒸着
⇒ ソース・ドレイン電極
(（バック）ゲート電極は、Si基板)

(電圧印加が可能な仕様。
但し、今回は印加無し。)

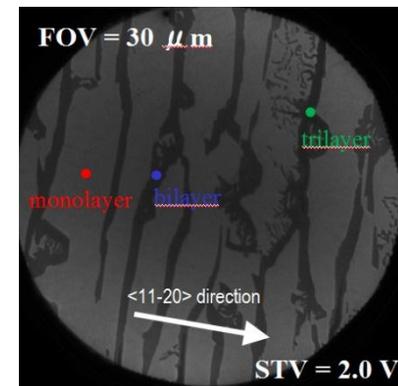


デバイス
標準試料

エピタキシャルグラフェン /SiCバルク基板

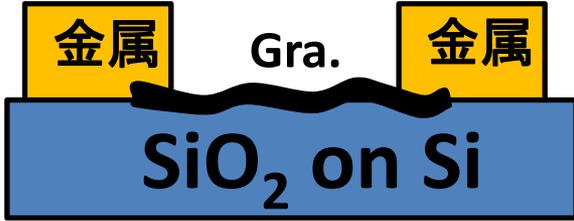
- 1) ~1700 K で水素エッチング
⇒ 表面平坦化
- 2) ~1900 K・Ar雰囲気下で処理
⇒ Si 原子が表面から昇華
⇒ グラフェン化

エピ成長
標準試料



GOSは発展途上 ⇒ デバイス用・エピ用の二種類の標準試料を準備

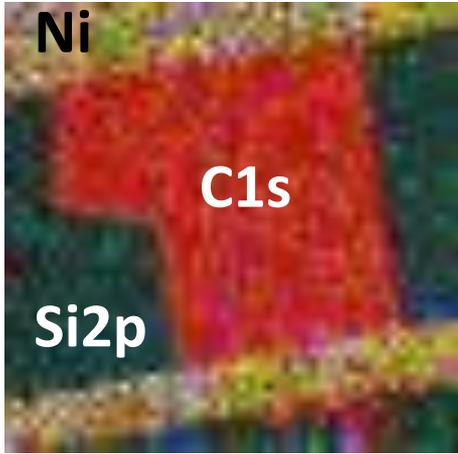
(1) グラフェン見える? : A. デバイス構成部位の識別



2D 元素マッピング

- ・C グラフェン
- ・Si(O₂)
- ・Ni or Au (金属電極)

(N. Nagamura et al., in preparation.)

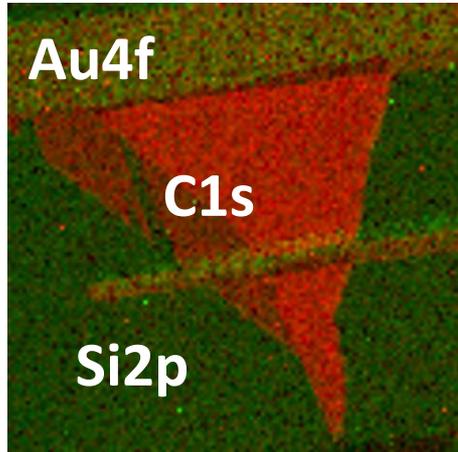


一層グラフェン

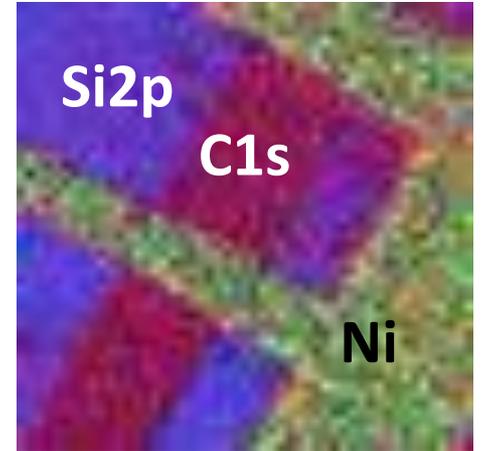


光学
顕微鏡像

(10x10 μm²)



(一層 + 多層) グラフェン



三層グラフェン

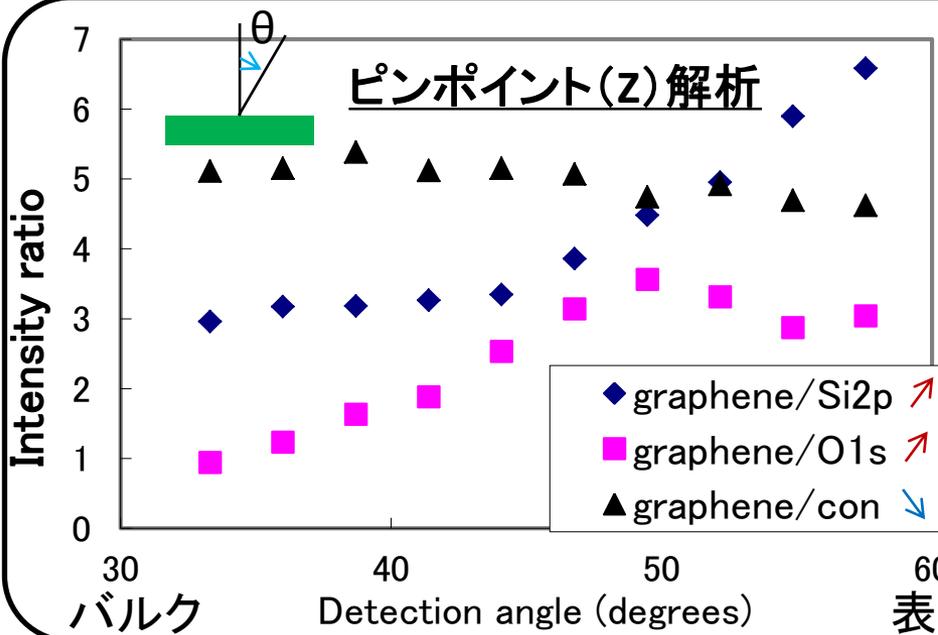
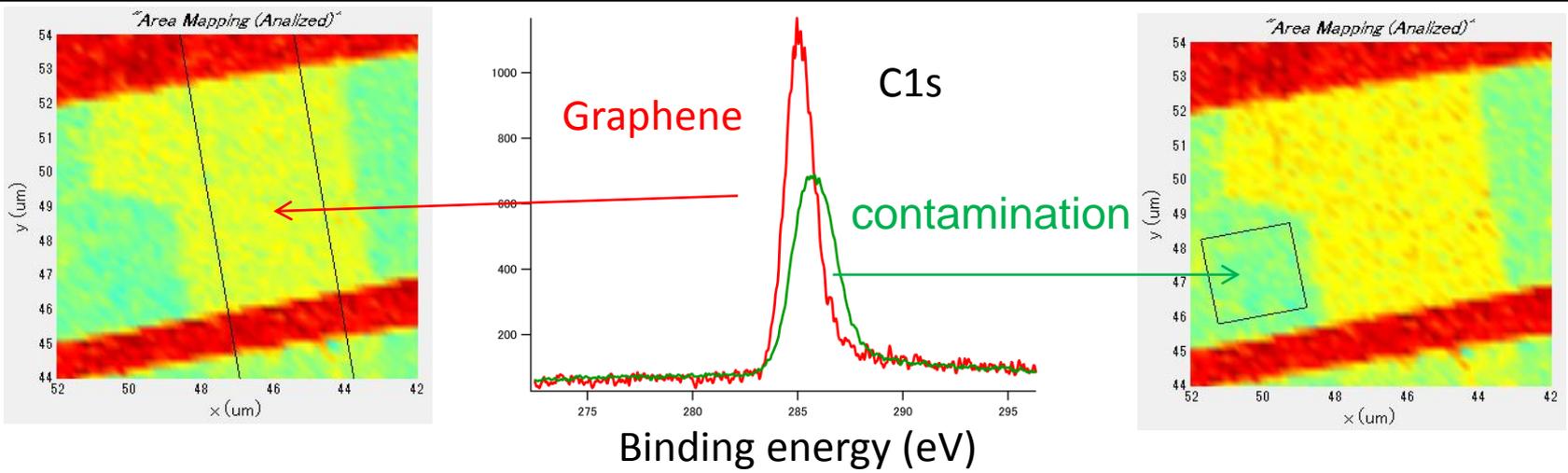
チャネル(C)・絶縁物(SiO₂)・電極(Ni/Au)の識別!





(1) グラフェン見える? : B. グラフェンとコンタミの識別

(N. Nagamura et al., in preparation.)



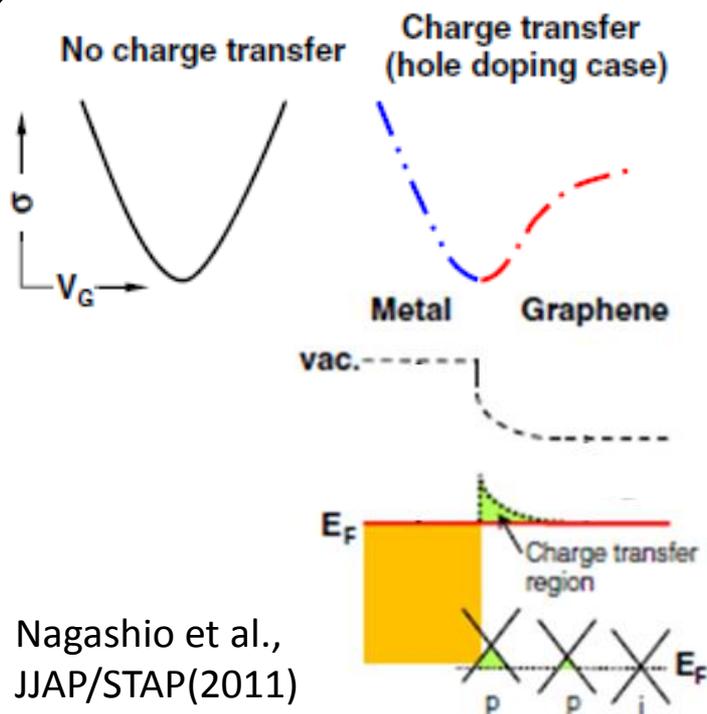
グラフェンとコンタミの識別可能



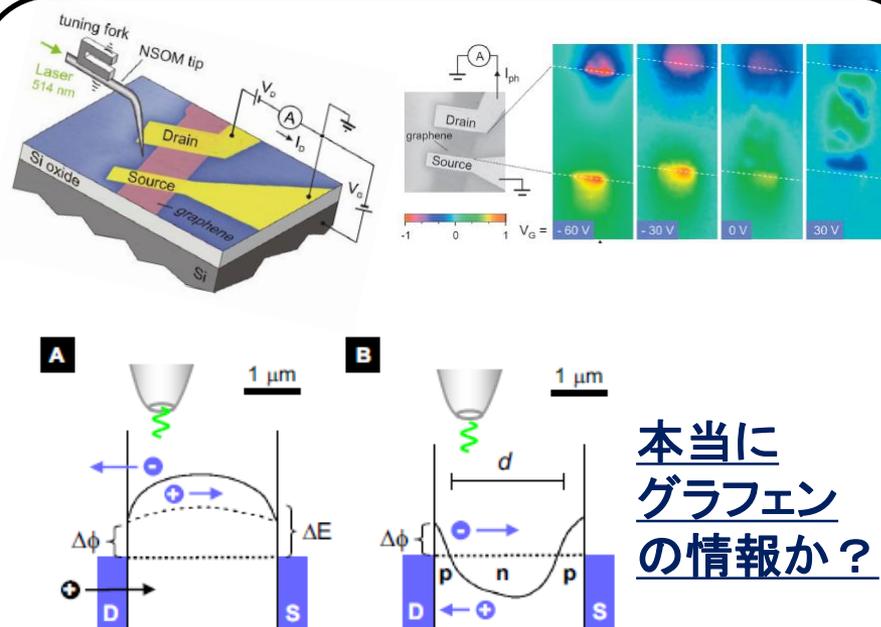
グラフェンが NanoESCAで見える!

(2) グラフェン/金属界面の研究: 先行研究

Macro. I-V characteristic



Scanning Photocurrent Microscopy



T. Mueller *et al.* PRB (2009)

E.J.H. Lee *et al.*, Nature Nanotech. (2008)

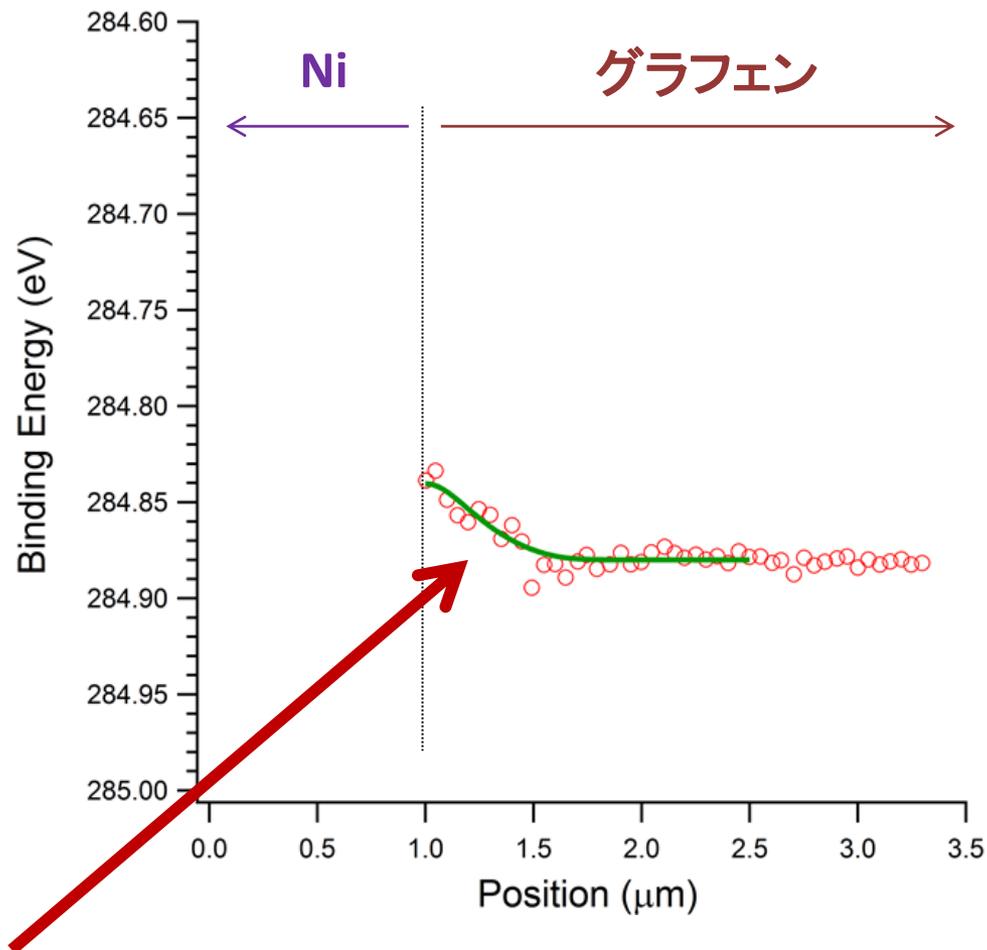
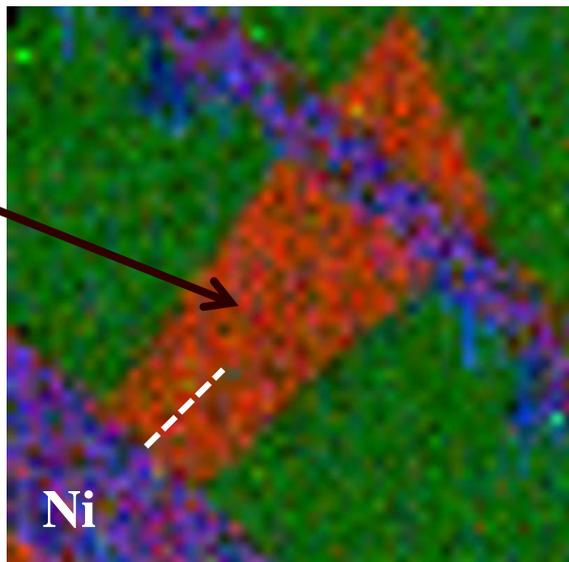
内殻電子状態の直接観察可能な顕微分光研究は無い
 ⇒ 電荷移動領域の直接的な証拠は得られていない
 ⇒ NanoESCAでやるべき第一のターゲット

(2) グラフェン/金属界面 : B. 電荷移動領域の実証

(10x10 μm^2)

(N. Nagamura et al., in preparation.)

一層
グラ
フェン

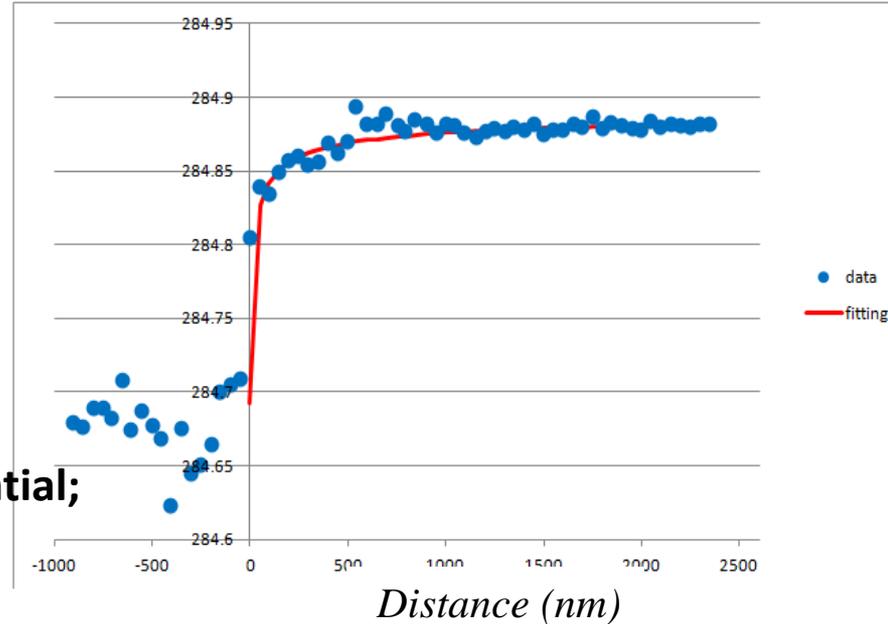
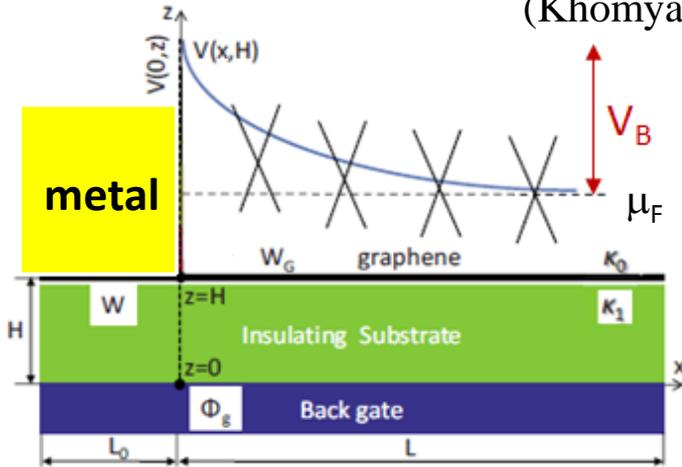


電荷移動(p型)領域の存在を確認!



(2) グラフェン/金属界面: C. 疑問点 Screening ?

(Khomyakov et al., PRB 82, 115437 (2010).)



• Thomas –Fermi equation for electrostatic potential;

$$\nabla^2 V(x, z) = \frac{e[\sigma(x) + \bar{\sigma}]}{\epsilon_0 \kappa} \delta(z - H) \quad (\sigma(x): \text{charge density})$$

• The variational solution is;

$$V(x) = \frac{V_B}{\left(\sqrt{\frac{x}{l_s} + \beta_2^2} + \beta_1 - \beta_2 \right)^{1/2} \left(\frac{x}{l_s} + \beta_1^{-2} \right)^{1/4}} \approx \frac{1}{\sqrt{\frac{x}{l_s}}}$$

$$l_s = \frac{\hbar v}{\pi \alpha |V_B|} = 0.08 \times \frac{\kappa}{|V_B|} [\text{nm}]$$

• Comparison with our experiment

$$l_s \sim 8, \kappa \sim 20$$

$\kappa_0 = 1$ (真空)として良いのか?

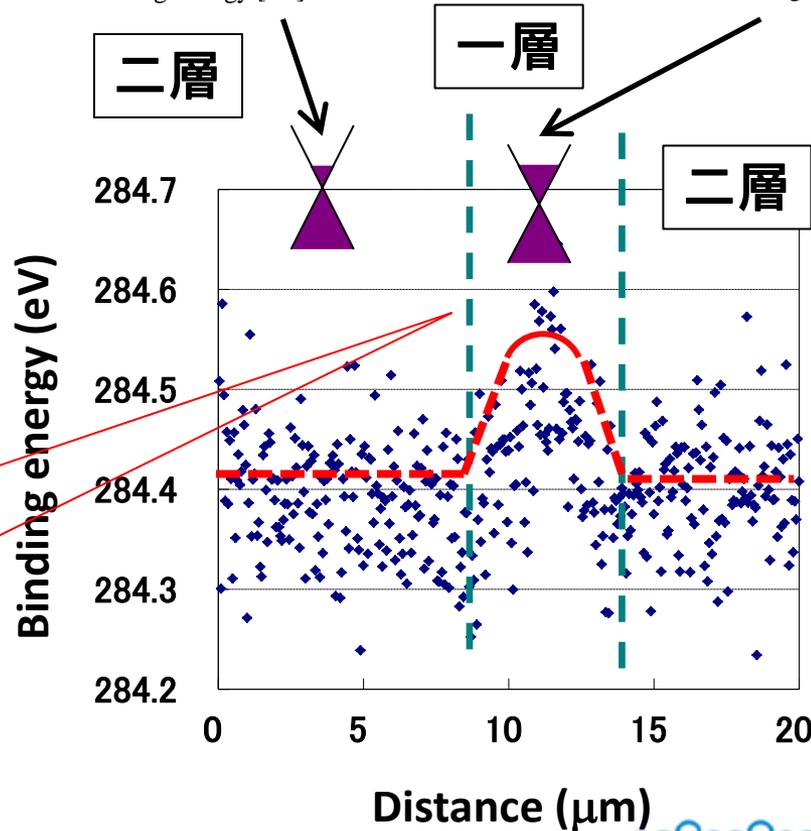
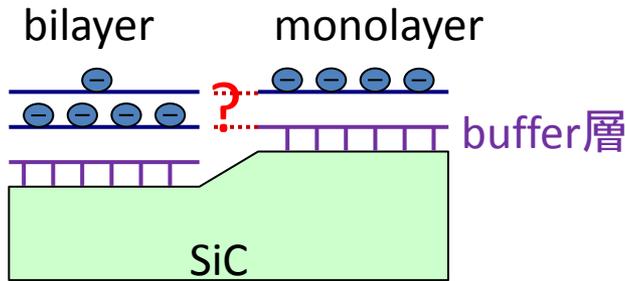
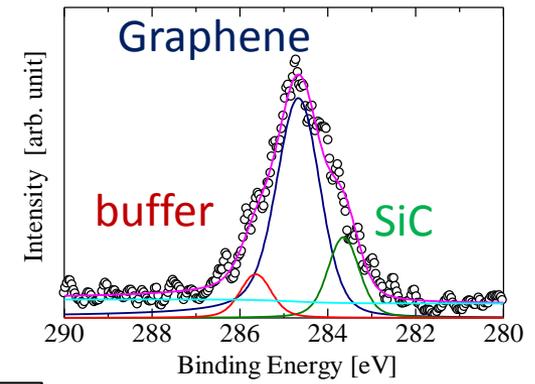
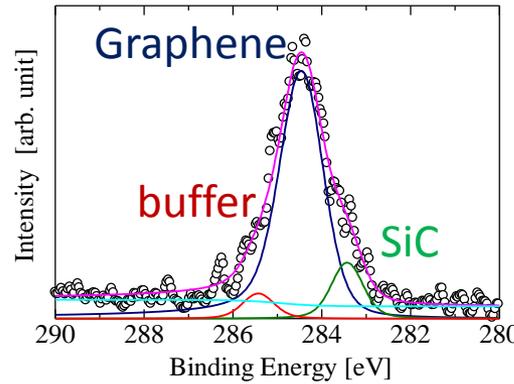
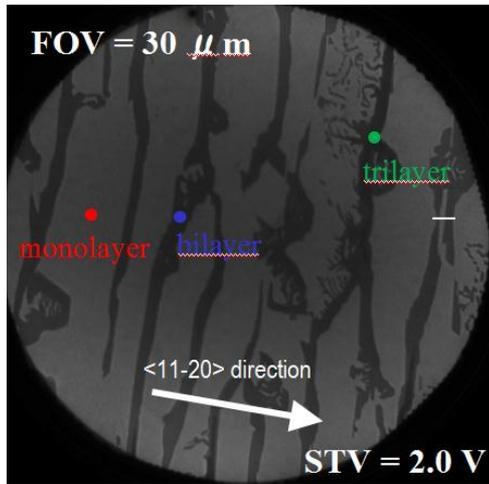
$$\kappa \approx \frac{\kappa_0 + \kappa_1}{2} \approx \frac{\kappa(\text{vac.}) + \kappa(\text{SiO}_2)}{2} = \frac{1 + 3.9}{2} = 2.45$$

* $\kappa(\text{bulk graphite}) = 2.4$

(T. Ando, JPSJ (2006))

**グラフェン中の遮蔽は
今後の重要検討課題となる? !**

(3) : グラフェン⇔基板相互作用 : Gra./SiC



C1s
Linescan

一層・二層の界面に
電位勾配が
存在することを
示唆している？



【まとめ】

【グラフェンと3D NanoESCAのマッチング】

デバイスの各構成部位の識別、及び、グラフェンと炭素汚染物の識別に成功

⇒ グラフェンデバイス研究に於ける3D NanoESCAの有用性が示された。

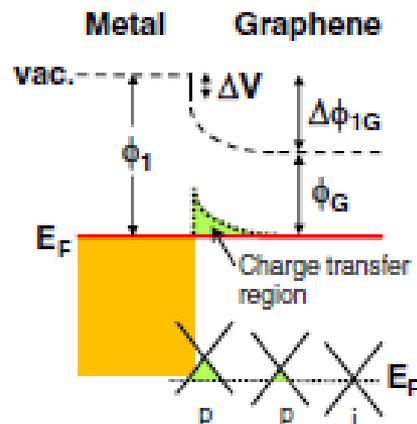
【グラフェン/金属界面】

グラフェン/金属間に

電荷移動領域(ドーピング領域)

が形成されていることを

3D NanoESCAにより実証した。



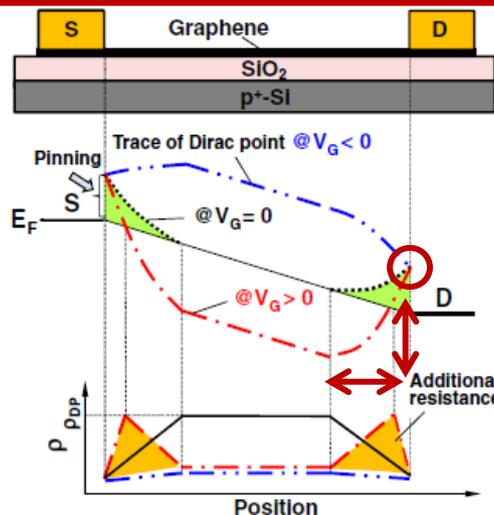
【グラフェン/基板界面】

・グラフェン/SiC: (縦方向の)グラフェン/SiC界面電荷移動量が、層数により変化

⇒ (横方向の)一層・二層界面に電位勾配が生じている？

【今後の展望：2012～2013期】

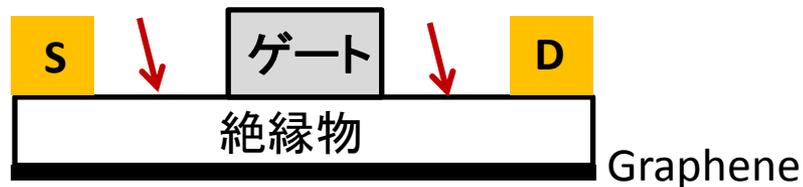
- ① 3D NanoESCAにゲート・ドレイン電圧印加機能を賦与
⇒ 長汐さん提唱の動作機構の検証
(へき開グラフェンデバイス)



Nagashio et al., JJAP/STAP (2011)



- ② グラフェンデバイスのアクセス領域
(ソース・ゲート間)でのフェルミ準位変調



- ③ 三次元多機能化された
グラフェンの観察

