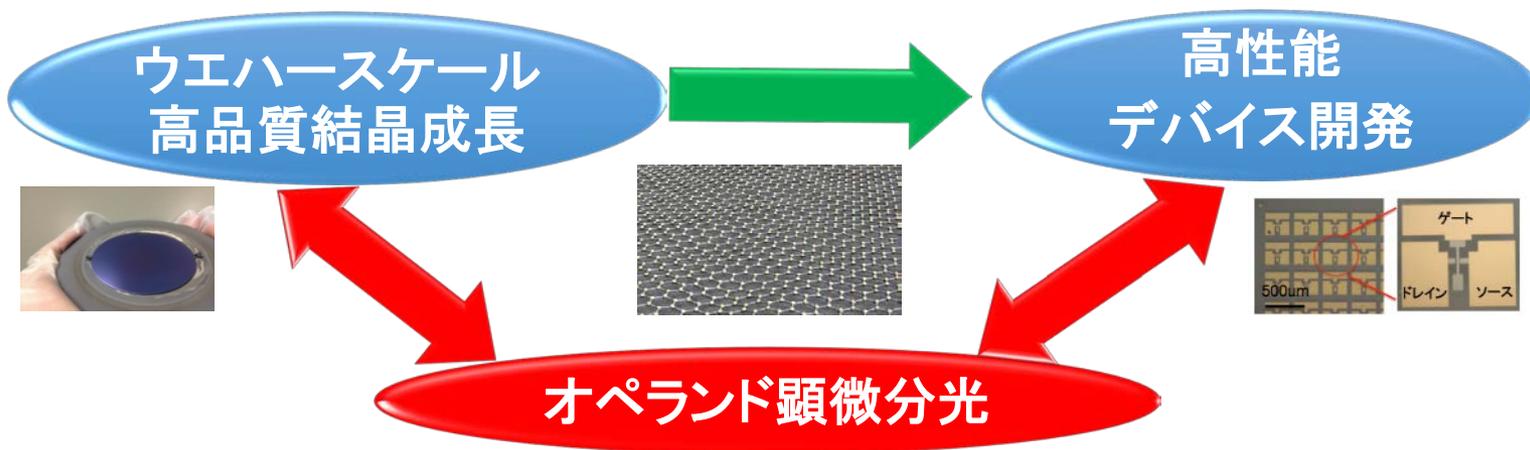
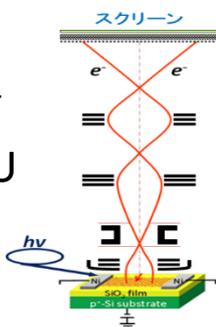


# 二次元電子系トランジスタの研究 と放射光の利用事例

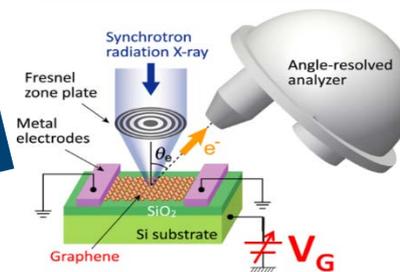
東北大学電気通信研究所 吹留 博一



**PEEM**  
@ BL17SU



**3D nano-ESCA** @ BL07LSU

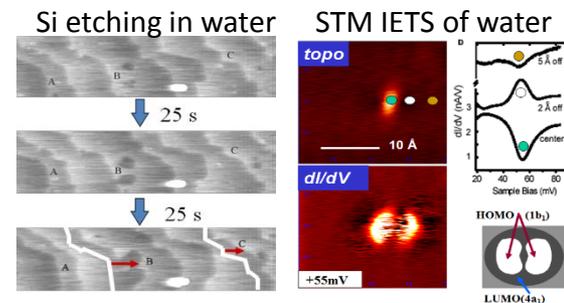


# 自己紹介

- 大阪府立四条畷高校卒業
- 大阪大学大学院修了(工学博士)
- AT&T Bell 研究所

理化学研究所等を経て

- 現在、東北大学電気通信研究所



表面

准教授

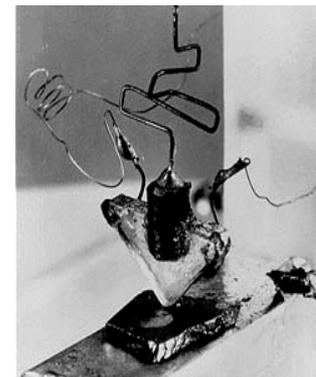
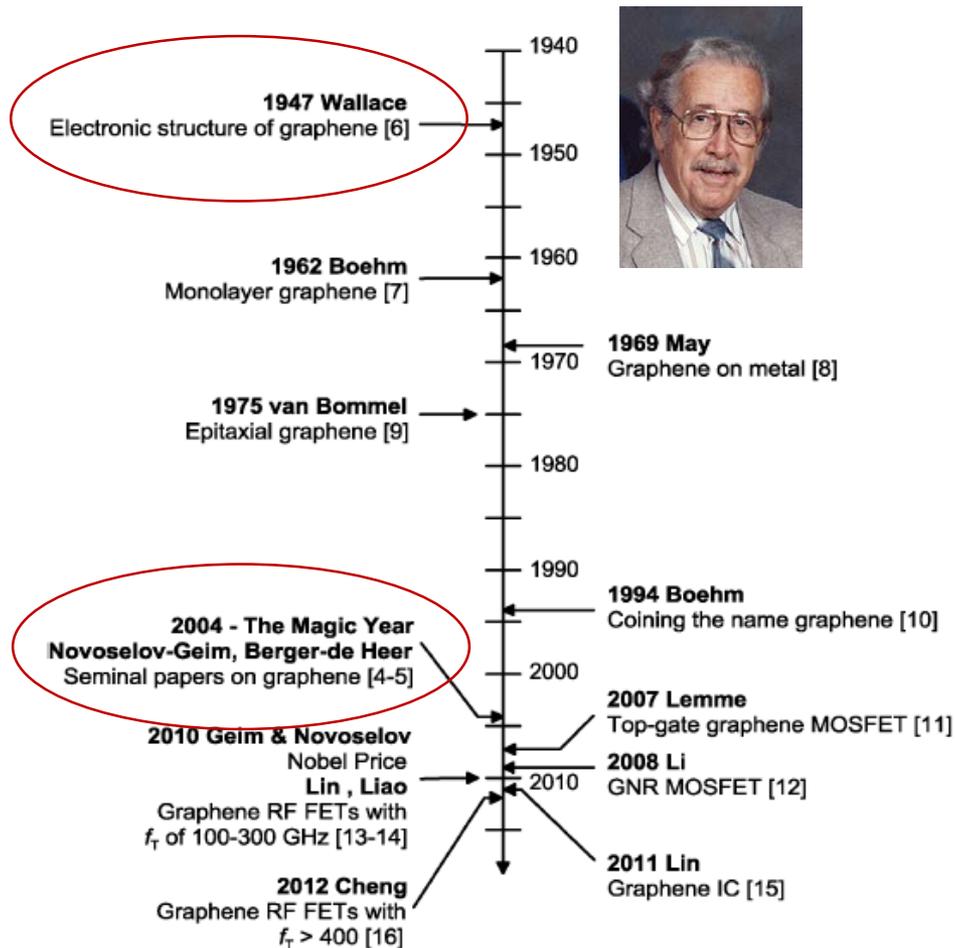
デバイス

# 発表内容

- 序論
- グラフェンFETを例とした
  - PEEMを用いたオペランド顕微分光の開拓
  - 3D nano-ESCAを用いたオペランド顕微分光の開拓
- 応用編
  - 顕微光電子分光を用いた新デバイスの産学連携開発
  - GaN-HEMTの表面電子捕獲
- まとめと今後の課題

# グラフェン開発の歴史

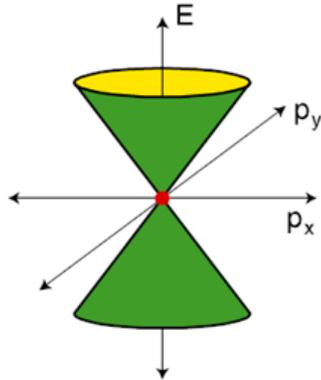
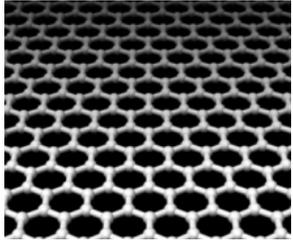
## • Graphene & 1<sup>st</sup> Transistor, the birth in 1947 !



The first transistor

# グラフェンとは？

## Dirac



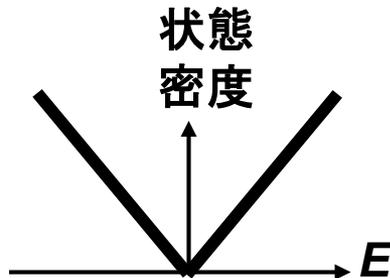
$$E = \pm v_F |\vec{p}|$$

"Fermi velocity"

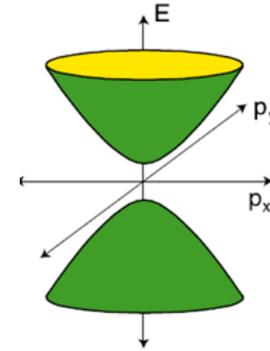
$$v_F = 8 \times 10^5 \text{ m/s}$$

$$E = \sqrt{(mc^2)^2 + (cp)^2}$$

$$\approx cp \quad (m = 0, \quad c \rightarrow v_F \approx \frac{c}{300})$$



## Schordinger

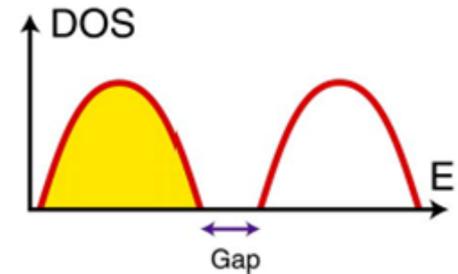


$$E_c = E_c^0 - \frac{p^2}{2m_c^*}$$

$$E_v = E_v^0 - \frac{p^2}{2m_v^*}$$

$$E = \sqrt{(mc^2)^2 + (cp)^2}$$

$$\approx mc^2 + \frac{p^2}{2m} \quad (v \ll c)$$



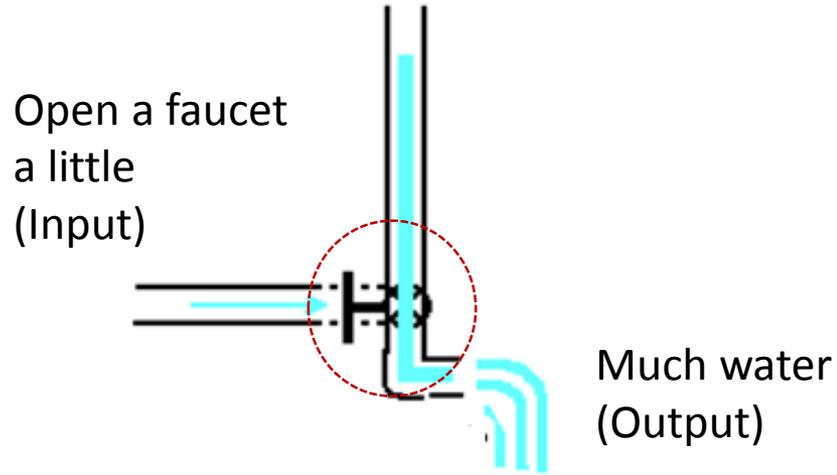
ギャップ

$$\rightarrow mc^2$$

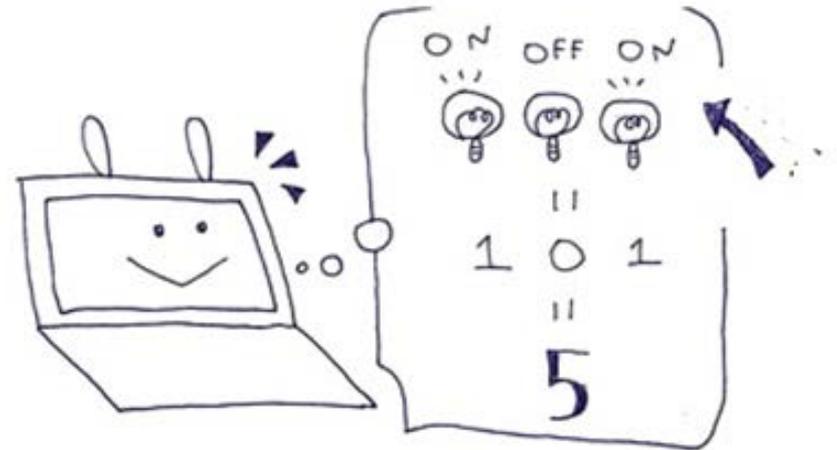
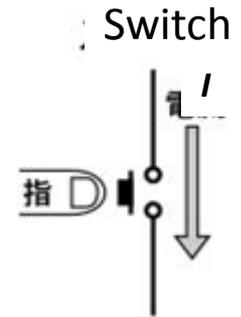
$$(c \rightarrow v_F)$$

# トランジスタの役割

## (RF)アナログ増幅



## デジタル・スイッチ

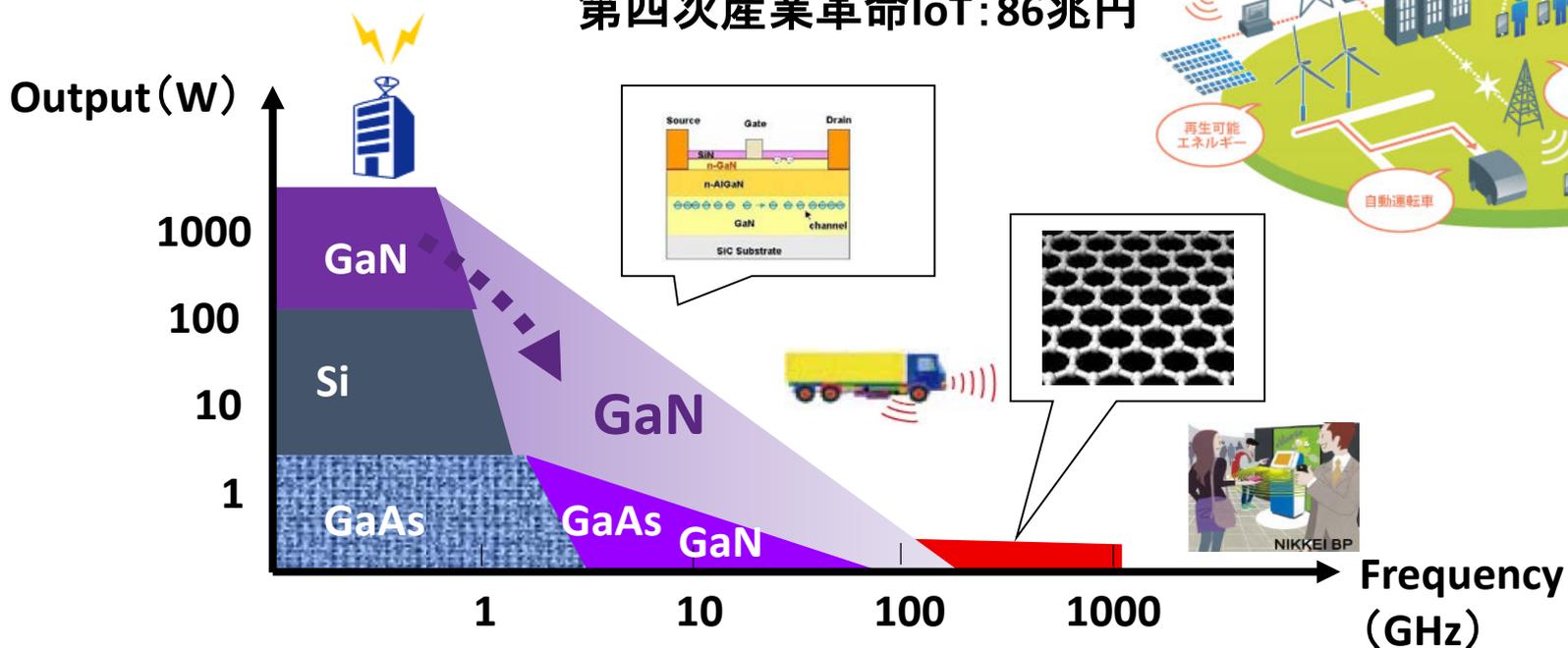


# Expectation of 2D electron systems

- Suppression of short channel effects
- Excellent electronic properties

	Si	GaAs	GaN	Graphene	MoS <sub>2</sub>
移動度 (cm <sup>2</sup> /Vs)	1,000	>4,000	2,000	200,000	<100
飽和速度(10 <sup>7</sup> cm/s)	1.0	2.0	2.7	8.0	0.3~1

ミリ波帯市場: 5,000億円  
第四次産業革命IoT: 86兆円

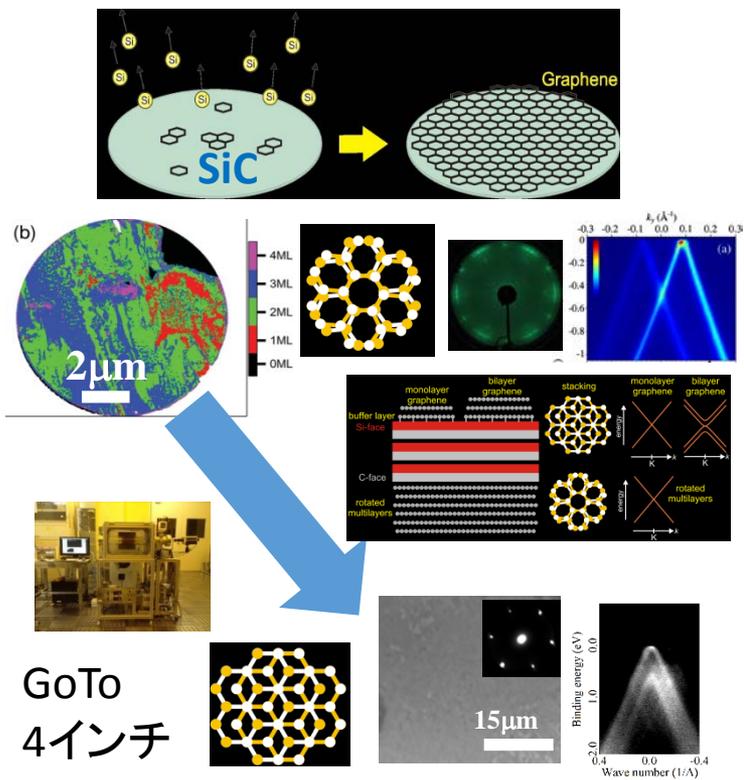


# オペランドX線分光の出発点: グラフェンの材料デバイス開発

w/ 東北大、東大物性研(LASOR)、住友電工、信越化学

## 成長・物性

光励起状態においてすら、  
100,000 cm<sup>2</sup>/Vs (Siの100倍)



## デバイス特性

「あと一歩で足踏み」

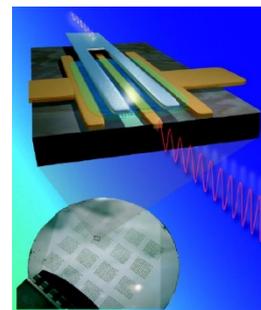
【高周波トランジスタ】

ゲート長 ×  
遮断周波数

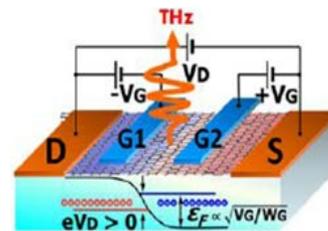
$$= 0.04 \text{ THz} \cdot \mu\text{m}$$

(理論値

$$> 0.1 \text{ THz} \cdot \mu\text{m})$$



【グラフェンTHzレーザー】



5.2 THz

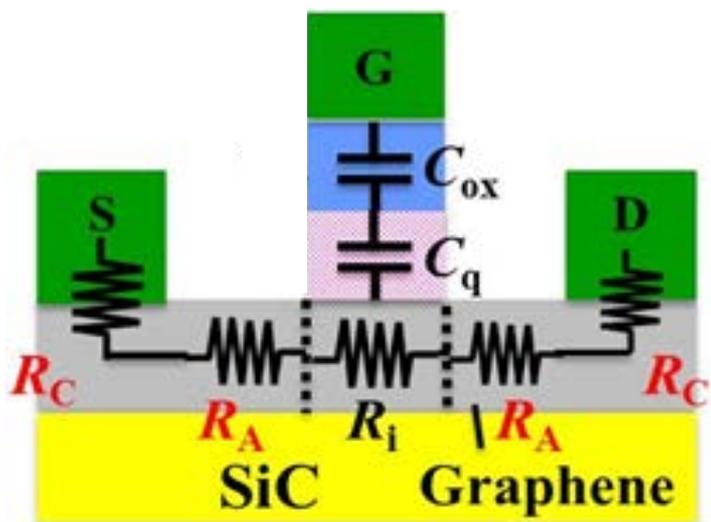
@ 100 K

Fukidome et al., APL (2012), Yamasue et al., PRL (2015),  
Someya et al., PRB being revised.

Jung et al., Proc.IEEE(2013)  
Sugawara et al., J. Lightwave (2016)

# 先端デバイスでは、寄生領域が無視出来ない

全抵抗 = 寄生領域の抵抗 + 活性層の抵抗



新材料・縮小化  
⇒抵抗 大

移動度向上  
⇒抵抗 小

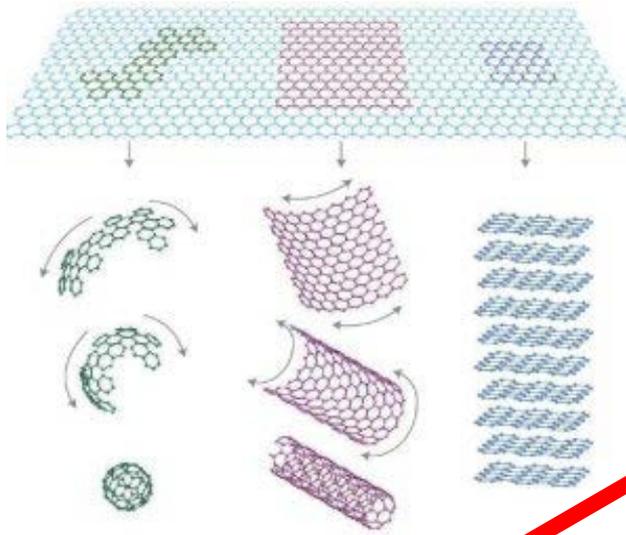
$$R_{\text{total}} = 2(R_A + R_C) + R_{\text{int}}$$

$\mu_{FE}^{\text{EXT.}}$   
↕  
 $\sim 4,000 \text{cm}^2 / \text{Vs}$

$\mu_{FE}^{\text{INT.}}$   
↕  
 $\sim 100,000 \text{cm}^2 / \text{Vs}$

# オペランド顕微分光X線への動機(裏事情)

## C<sub>60</sub>とグラフェン



廊下を挟んだ直ぐ向かいの  
部屋だったが故に、  
ナノカーボンであるグラフェン  
の研究を始めるあたりに  
慎重にならざるを得なかった

Retracted 1 November 2002; see last page

### REPORTS

used polymers; see, e.g. (29) or (30). However, the origin of this difference is controversial and may depend on photooxidation of the sample or the intensity of the excitation beam in addition to interchain effects; see, e.g. (30–32). No matter how the effect arises, under the conditions of our experiments, the decay of MEH-PPV's excited state absorp-



as follows: the first character indicates the pore direction in the lab frame (always vertical in this report), the second character indicates the lab polarization of the excitation beam, and the third character denotes the collection or probe polarization direction. For example, VHV indicates excitation light polarized perpendicular to the pore direction but collection or probe

polarized along the pore channels.  
tor and P. R. Schimel, *Biophysical Chemistry*, Freeman, San Francisco, CA, 1980), p. 474.  
The exponential fit is not representative of a model for intrachain energy transport; it is merely a way to define a characteristic time of the anisotropy increase. Because the anisotropy times is computed from the ratio of two numbers (Eq. 1 at times after most of the have decayed), we do not feel that the noise ratio of the anisotropy increase justifying to a more complex model with a higher number of parameters.

36. C. Weder, *C. Mater.* **9**, 103
  37. G. R. Hayes, *B* **56**, 3838 (
  38. A. Watanabe **273**, 227 (19
  39. A. Ruseckas e
  40. J. Z. Zhang et
  41. R. J. O. M. He J. M. Warmar
  42. Supported by istered by the the Office of 0568); the Cottrell Scho fred P. Sloan F. Wudl and l used in this v
- 2 September

## A Superconducting Field-Effect Switch

J. H. Schön,<sup>1</sup> Ch. Kloc,<sup>1</sup> R. C. Haddon,<sup>2</sup> B. Batlogg<sup>1</sup>

We report here on a novel realization of a field-effect device that allows switching between insulating and superconducting states, which is the widest possible variation of electrical properties of a material. We chose C<sub>60</sub> as the active material because of its low surface state density and observed superconductivity in alkali metal-doped C<sub>60</sub>. We induced three electrons per C<sub>60</sub> molecule in the topmost molecular layer of a crystal with the field-effect device, creating a superconducting switch operating up to 11 kelvin. An insulator was thereby transformed into a superconductor. This technique offers new opportunities for the study of superconductivity as a function of carrier concentration.

itance  $C_i$  of 1: dielectric. Fin deposited on measurements temperatures  $t$  space charge were used to ( locally active de crystals (10).  $\Gamma$  as low as  $3 \times$  molecules) are cantly lower th er vacuum-grc Previous th  $n$ -type behavi  $0.09 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$

# DCオペランド顕微X線分光の開拓と応用

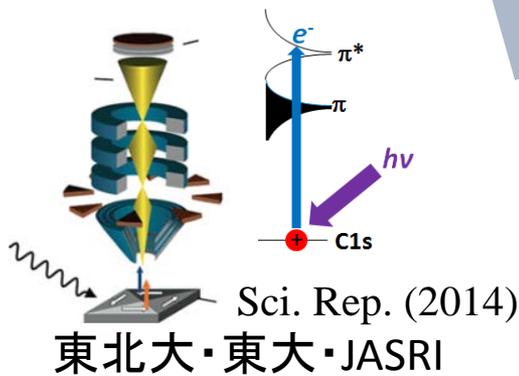
……動作しているデバイスの電子状態

を高分解能観察

(20-70 nm, < 100 meV)

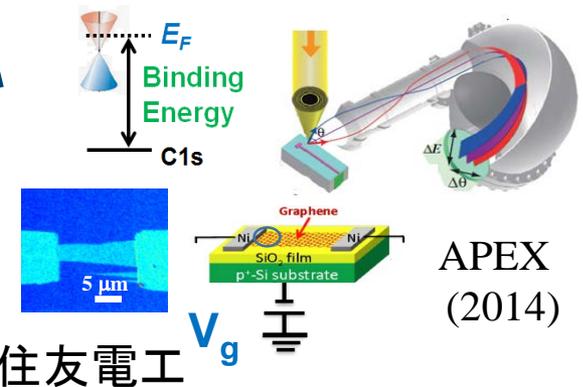
## 顕微X線吸収

@ SP-8 BL17SU



## 顕微光電子分光

@ SP-8 BL07LSU



+ 化学結合状態

材料の  
物性

ギャップ

デバイスの  
特性

# PEEMを用いた オペランド 顕微X線吸収分光

SCIENTIFIC  
REPORTS



OPEN

Orbital-specific Tunability of Many-Body Effects in Bilayer Graphene by Gate Bias and Metal Contact

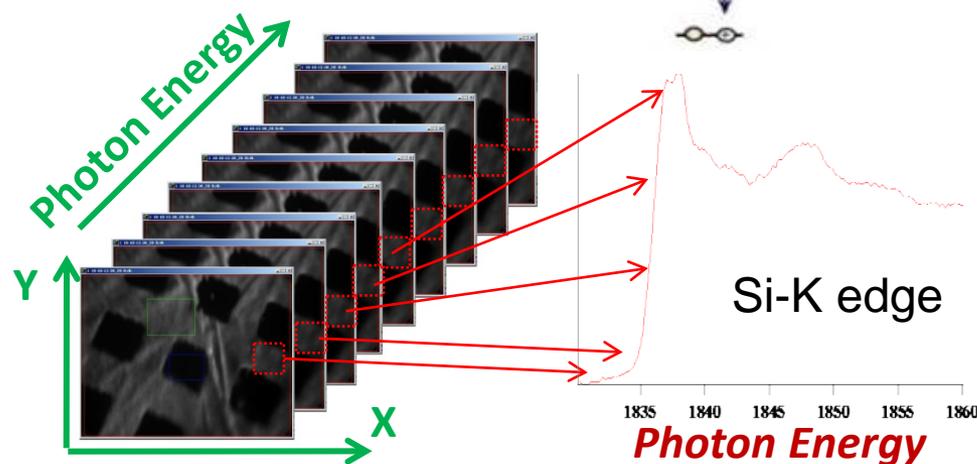
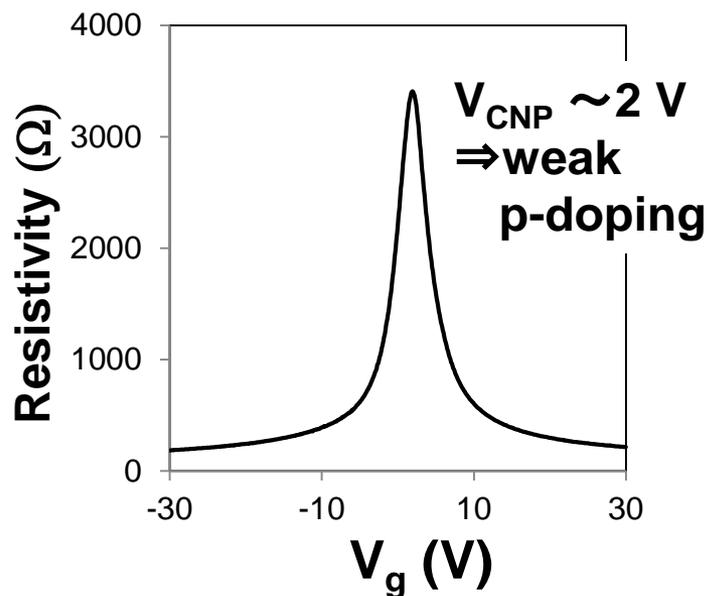
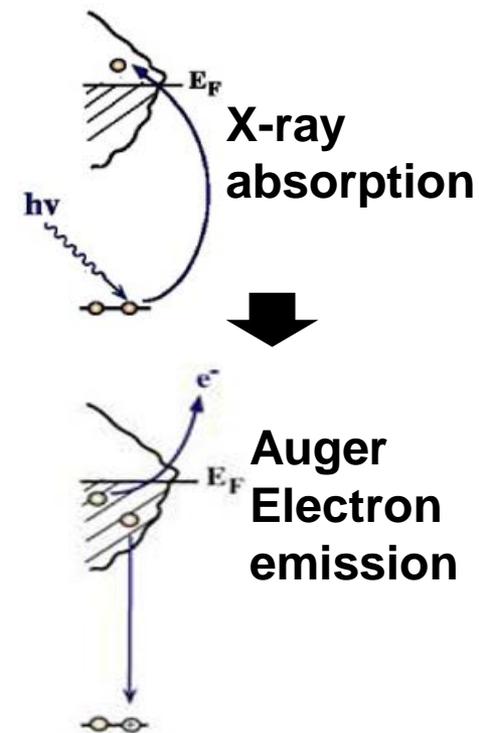
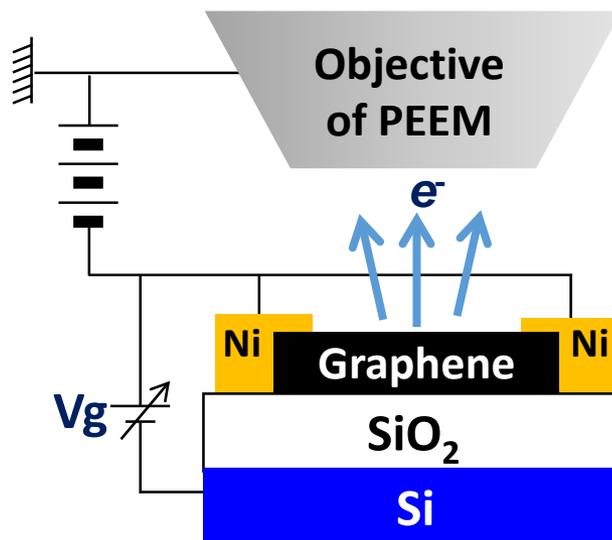
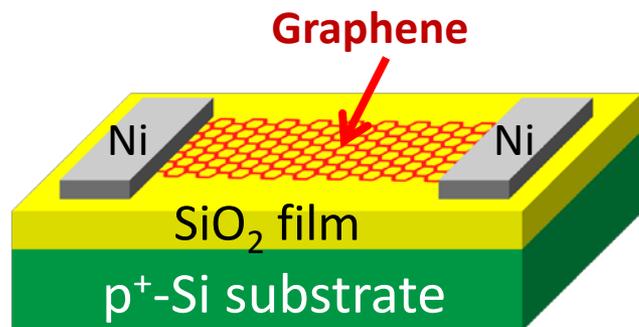
SUBJECT AREAS:

OPTICAL PROPERTIES AND DEVICES

ELECTRONIC PROPERTIES AND DEVICES

Hirokazu Fukidome<sup>1</sup>, Masato Kotsugi<sup>2</sup>, Kosuke Nagashio<sup>3</sup>, Ryo Sato<sup>1</sup>, Takuo Ohkochi<sup>2</sup>, Takashi Itoh<sup>4</sup>, Akira Toriumi<sup>3</sup>, Maki Suemitsu<sup>1</sup> & Toyohiko Kinoshita<sup>2</sup>

# How to Perform Operando PEEM



# グラフェンデバイスの問題点

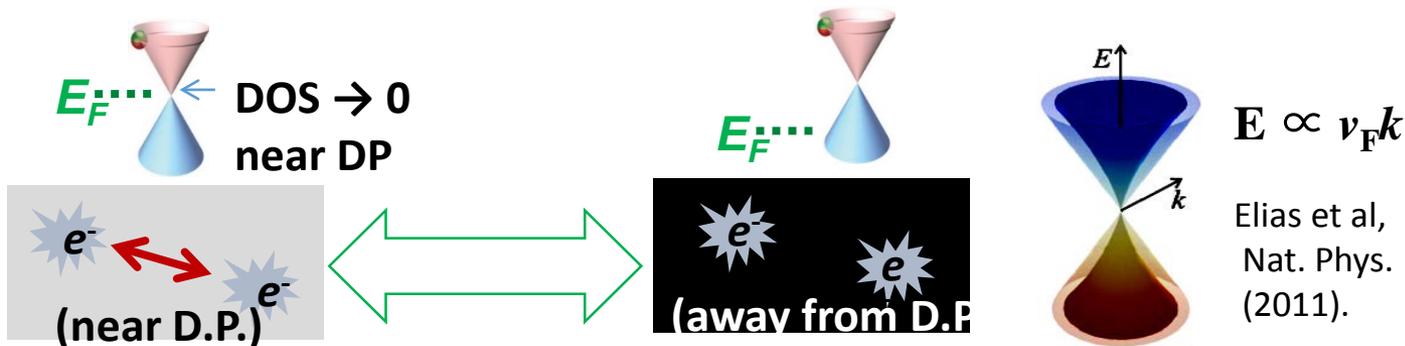
グラフェンが**極限的に薄い蜂の巣状**の二次元結晶であることから、

## 【メリット】

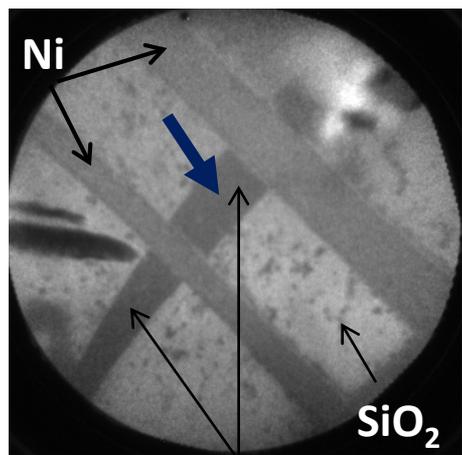
- ・最高の移動度・飽和速度
- ・短チャネル効果の抑制

## 【デメリット】

- ・周りの環境に影響され易い → 界面による電子状態の変調
- ・無視出来ない相互作用 →  $E_F$ に依存する多体効果

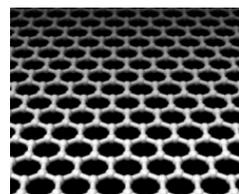
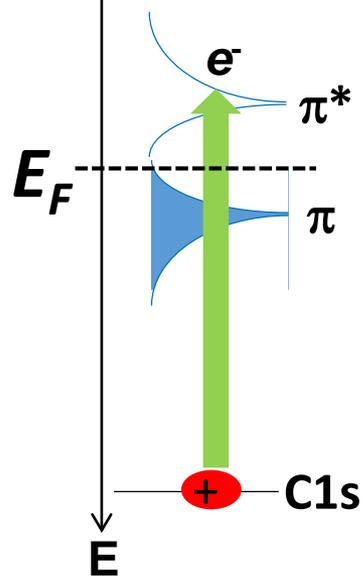


# PEEMによるゲート電圧印加下のC1s XASの変化



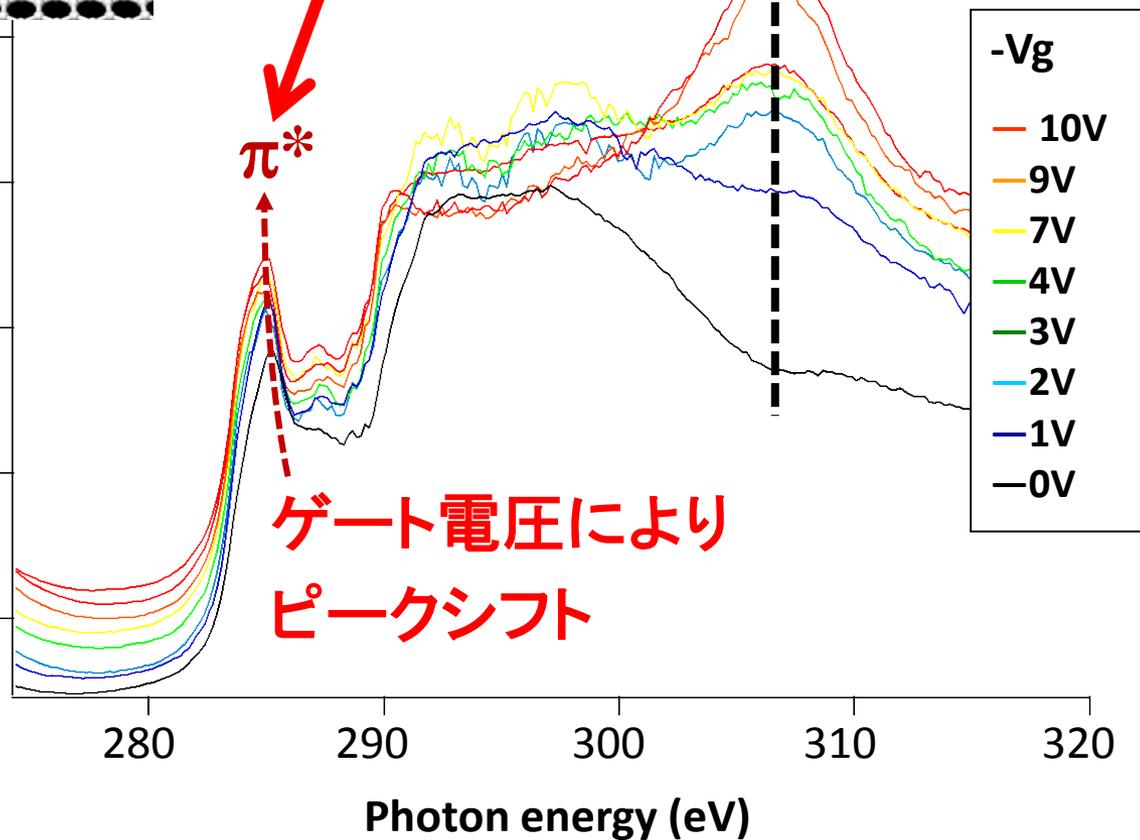
Graphene

DOS

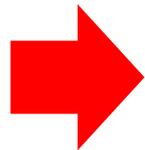


Hole doping

Intensity (a.u.)



# Excitonic effect causes $\pi^*$ peak shift



**DOS  
redistribution**

$$\hbar\omega_p' = \hbar\omega_p + E_i$$

$(E_i \leq 0)$

: self energy  
of core hole

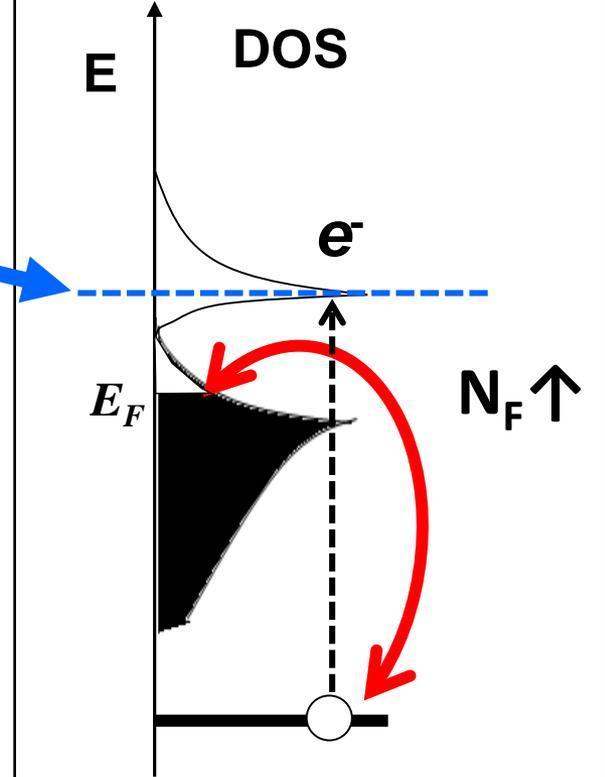
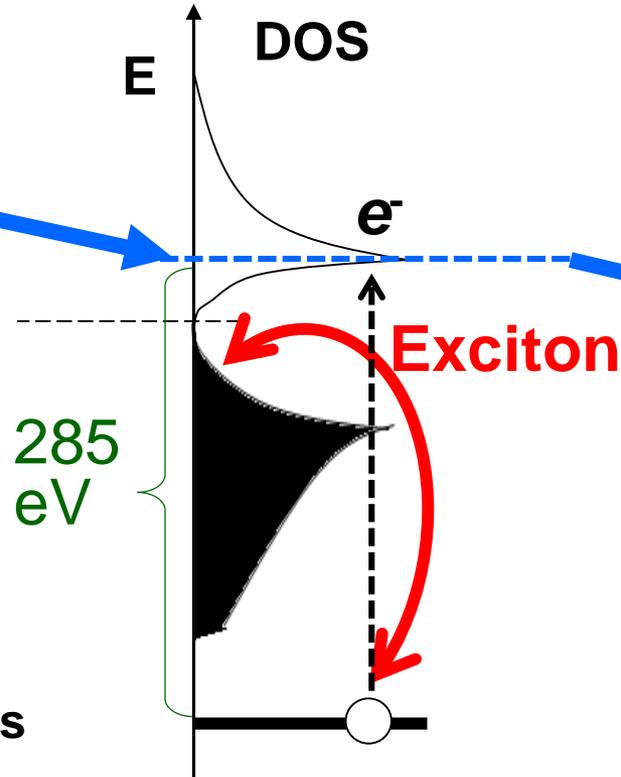
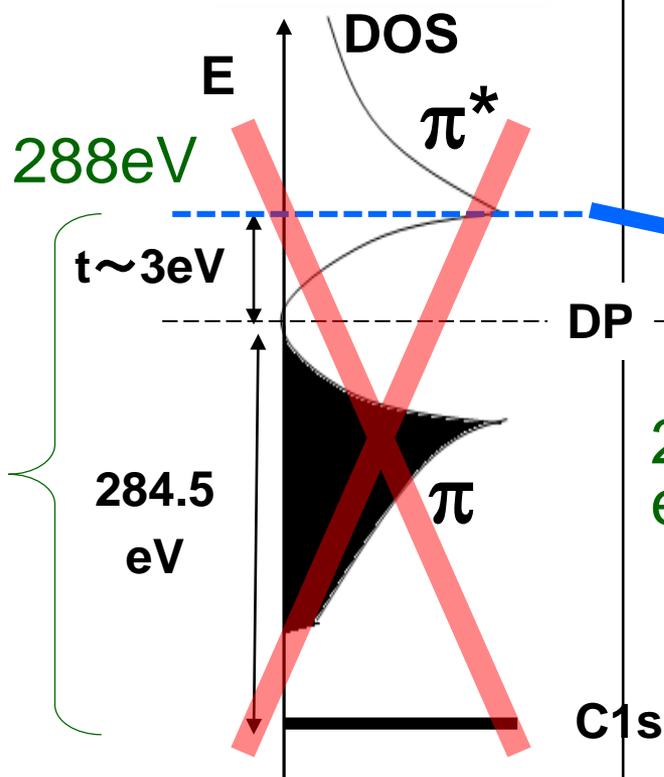
**W/O Gate Bias (HOPG)**

E.J.Mele et al. PRL (1979)

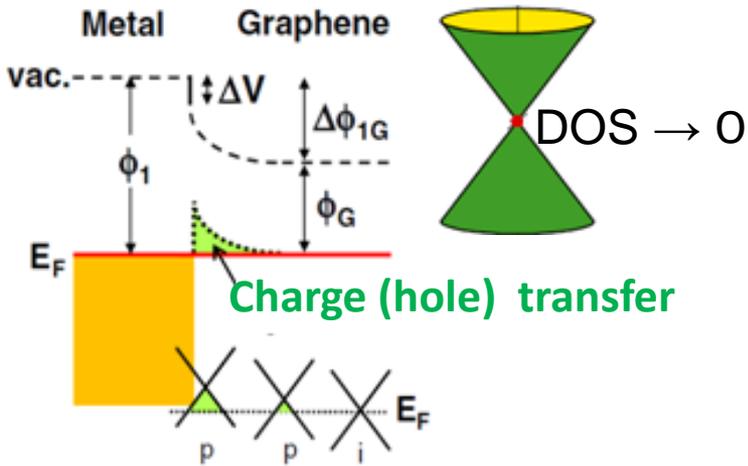
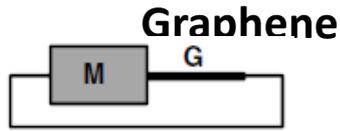
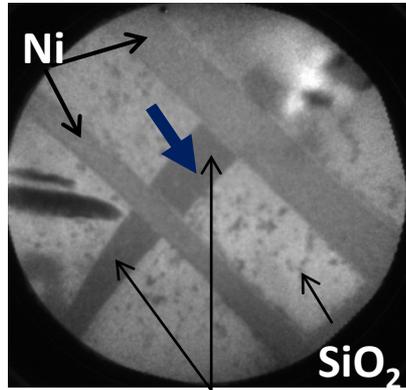
**W/ Gate Bias**

**Initial state**

**Final state**



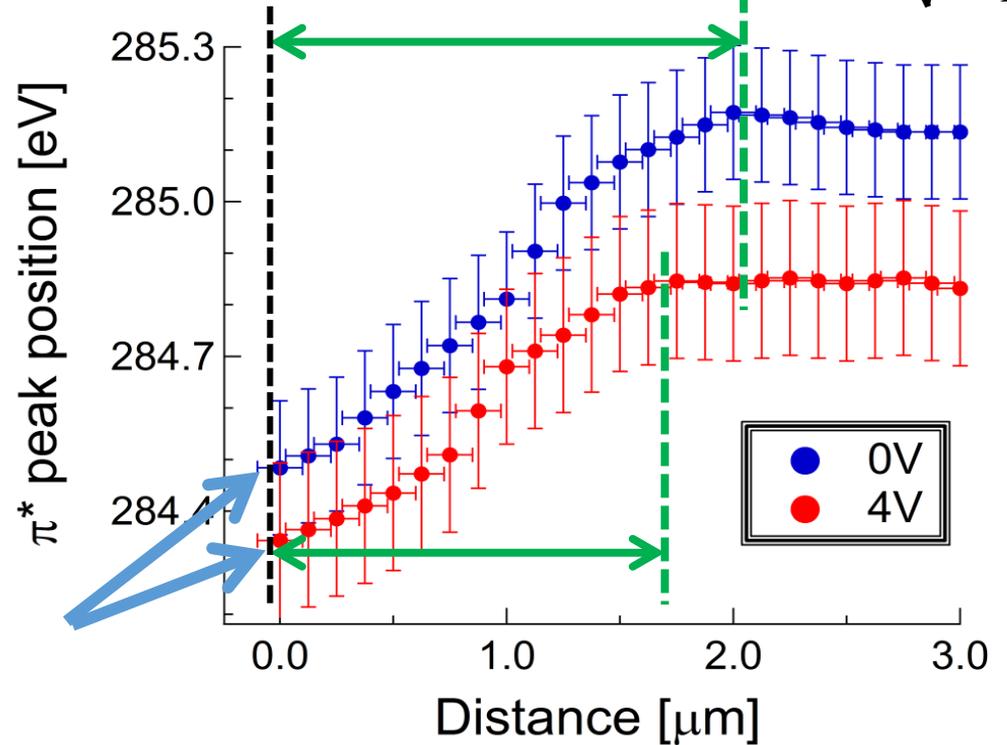
# グラフェンとソース/ドレイン金属(Ni)界面



Ni | Graphene

遮蔽長

$$\propto \frac{1}{\sqrt{N_F}}$$



- ・電荷移動領域は、ゲート電圧により変化する
- ・金属電極によるフェルミ準位ピンニングなし

# 3D nano-ESCAを用いた オペランド 顕微光電子分光



OPEN

Microscopically-Tuned Band Structure of Epitaxial Graphene through Interface and Stacking Variations Using Si Substrate Microfabrication

SUBJECT AREAS:  
ELECTRONIC PROPERTIES  
AND DEVICES  
OPTICAL PROPERTIES AND  
DEVICES

Applied Physics Express 7, 065101 (2014)

<http://dx.doi.org/10.7567/APEX.7.065101>

**Pinpoint operando analysis of the electronic states of a graphene transistor using photoelectron nanospectroscopy**

Hirokazu Fukidome<sup>1\*</sup>, Kousuke Nagashio<sup>2</sup>, Naoka Nagamura<sup>3</sup>, Keiichiro Tashima<sup>1</sup>, Kazutoshi Funakubo<sup>1</sup>, Koji Horiba<sup>4,5,6</sup>, Maki Suemitsu<sup>1</sup>, Akira Toriumi<sup>2</sup>, and Masaharu Oshima<sup>4,5,6</sup>

# 3D nano-ESCAの概略

放射光のエネルギー : 850 eV

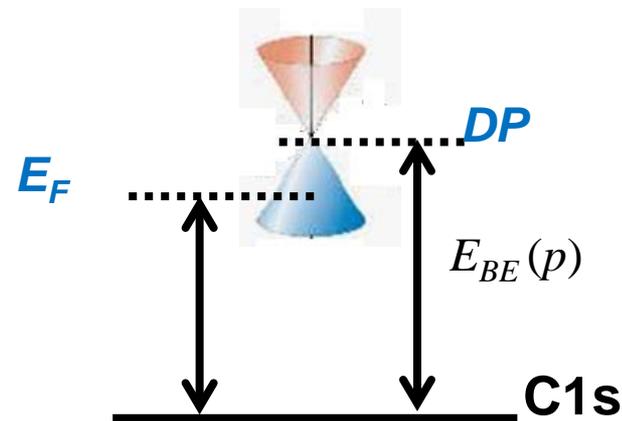
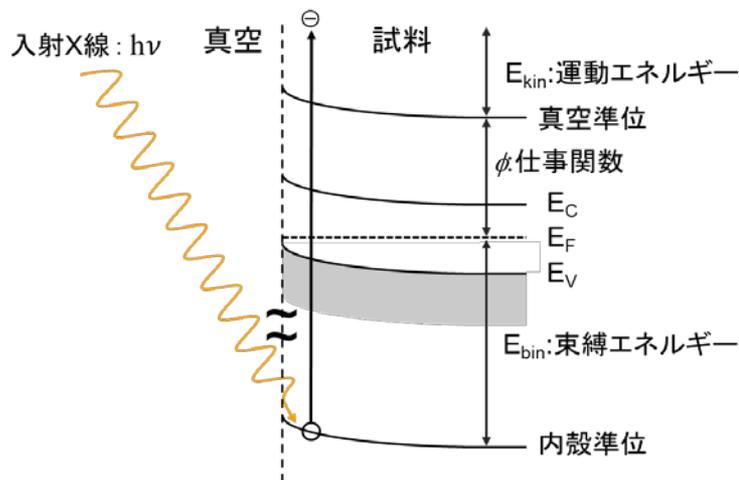
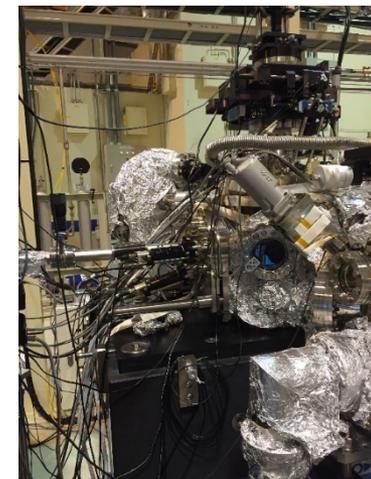
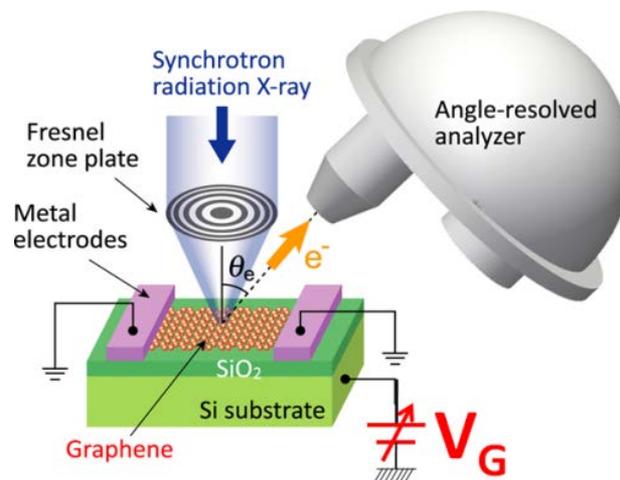
水平分解能 : 70 nm

深さ分解能 : 1 Å

真空度 :  $\sim 10^{-7}$  Pa

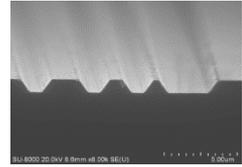
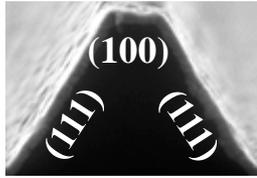
光電子分光法(ESCA  $\cong$  XPS)

化学組成  
化学結合状態  
電子状態

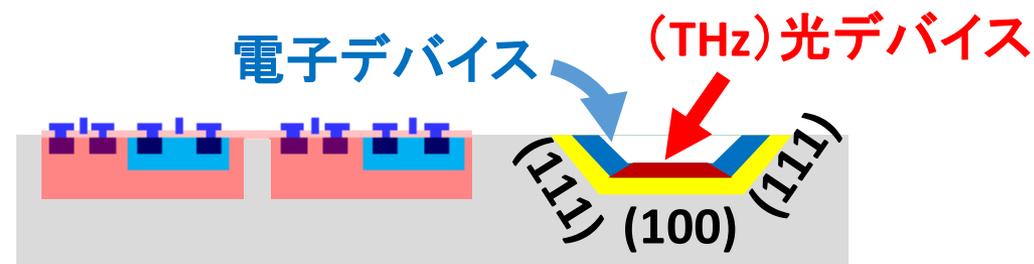
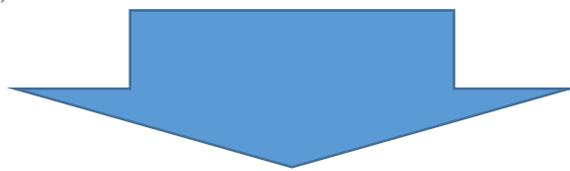
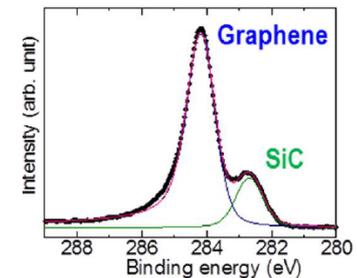
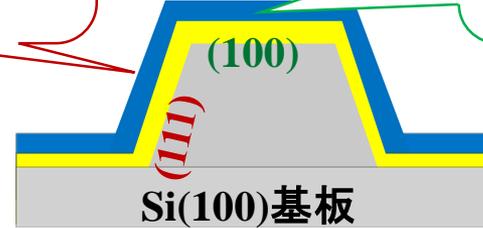
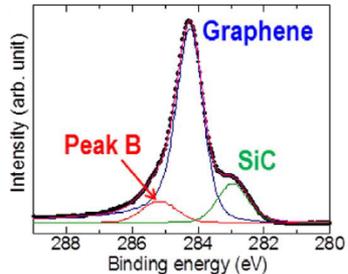
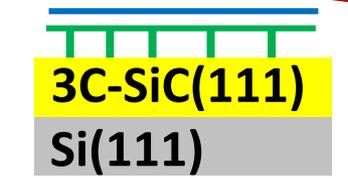
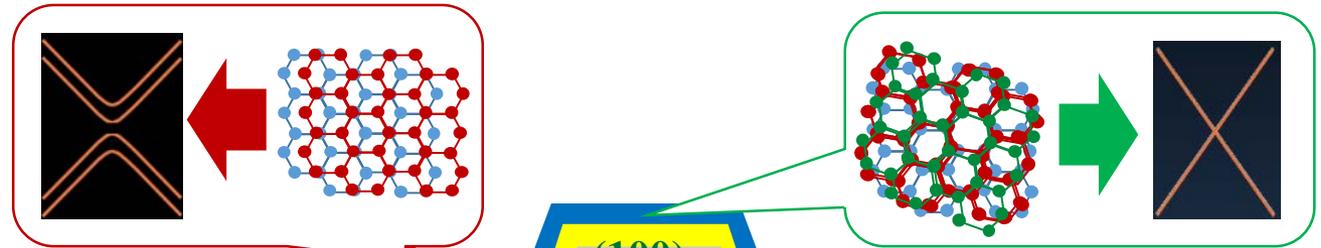


# 3D nano-ESCAの顕微能の実証例

Fukidome et al., APL (2012) and Proc. IEEE (2013)

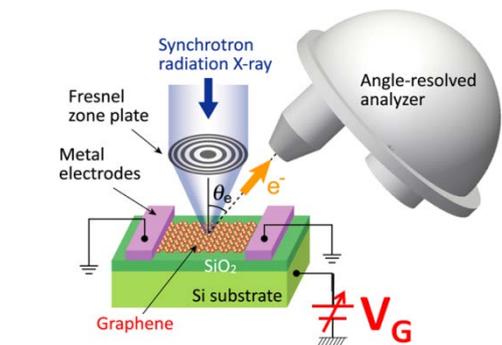


最少パターン  
~200 nm

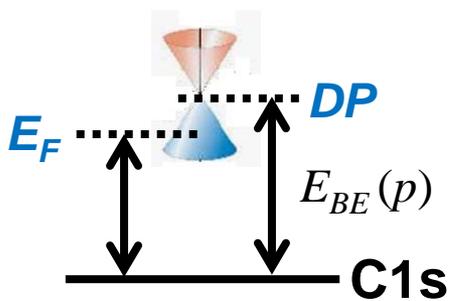
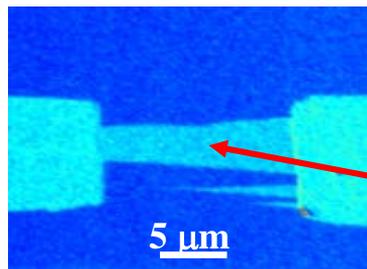


# 3D nano-ESCAのオペランド能の検証1/2) 定性的

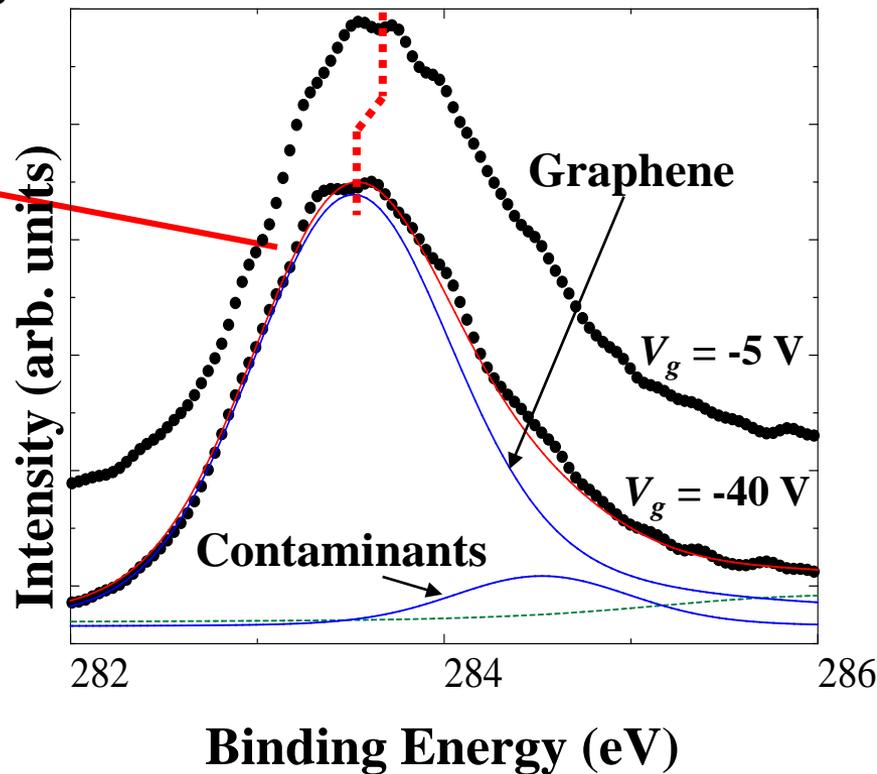
H. Fukidome et al., APEX (2014).



## C 1s intensity mapping

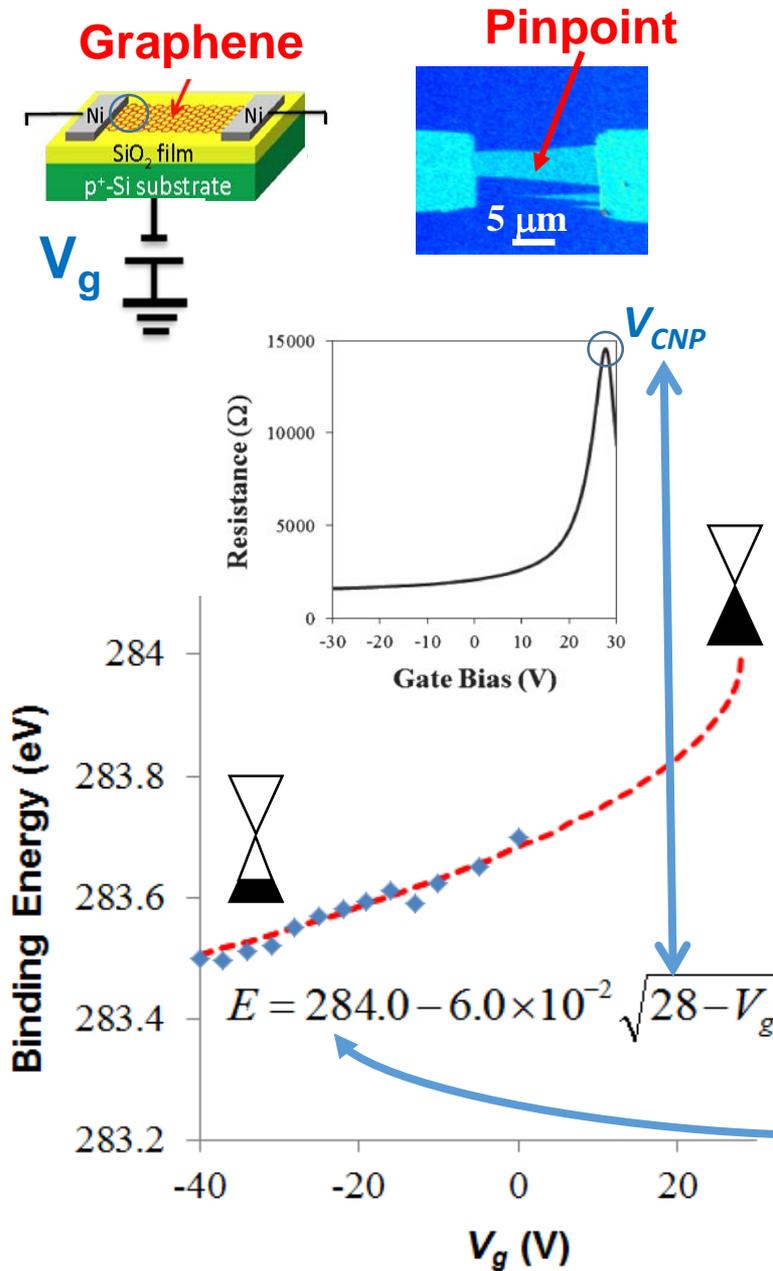


ゲートを負に  
 ⇒ グラフェンが正  
 ⇒ 正孔ドーピング



# 3D nano-ESCAのオペランド能の検証 2/2) 定量的

Fukidome et al., APEX (2014)



**-LINEAR DOS**

**-Simple Capacitance Model**

状態密度

半導体 金属

Gra. SiO<sub>2</sub> Si

$V_g$

$E_{BE}(p) = E_{BE}(DP) - 0.06 \sqrt{V_{CNP} - V_g}$

$E_F$

$284.4 \text{ eV} \sim E_{BE}(DP)$

$E_{BE}(p)$

**C1s**

**DP**

**顕微光電子分光**

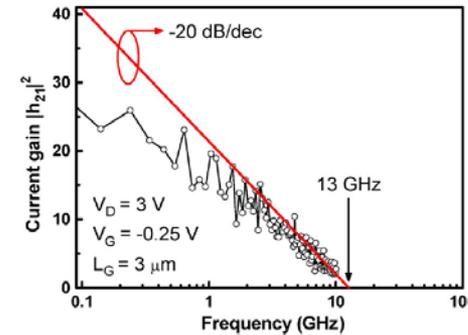
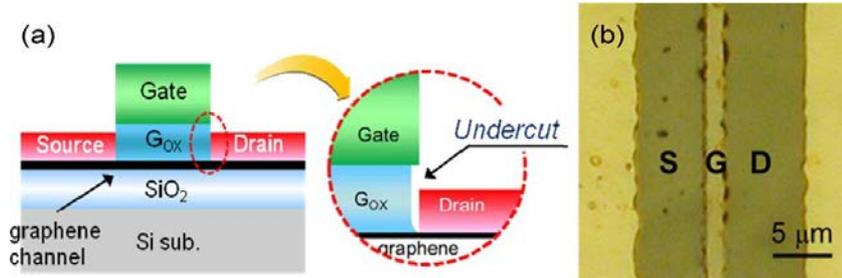
**を用いた**

**新デバイスの開発と検証**

# グラフェンの高周波応用の問題点

これまでの我々の研究(セルフ・アライン構造)

M. H. Jung, H. Fukidome et al.,  
Proc. IEEE (2013)



## 高周波特性を決める要因

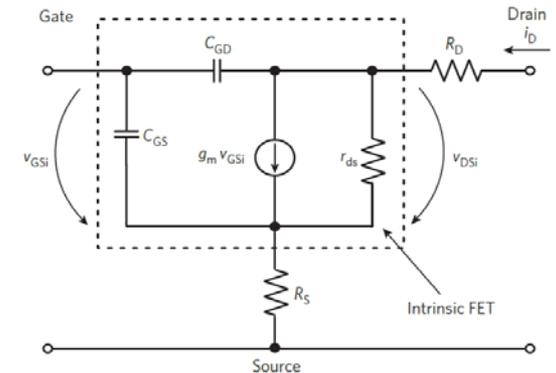
$$g_m = \frac{g_m(\text{int.})}{1 + g_m(\text{int.})R_s + \underline{g_{ds}}(R_s + R_D)}$$

$$f_T \cong \frac{\underline{g_m}}{2\pi (C_{GS} + C_{GD}) [1 + \underline{g_{ds}}(R_s + R_D)] + C_{GD} \underline{g_m}(R_s + R_D)}$$

$$f_{\max} \cong \frac{f_T}{\sqrt{\underline{g_{ds}}(R_s + R_i + R_D) + 2\pi f_T C_{gd} R_g}}$$

- $g_m$  を大きく
- (寄生)容量・抵抗を小さく
- ドレインコンダクタンス ( $g_{ds}$ ) を小さく

F. Schiwerz  
Nat. Nano



**Drain current saturation**

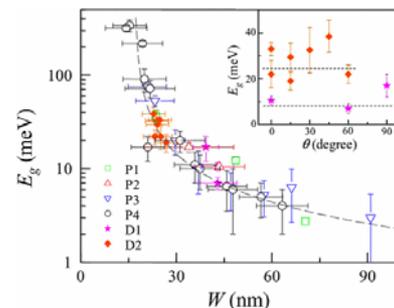
$g_{ds} \rightarrow 0$

バンドギャップを開けると(GNR)



$< 200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

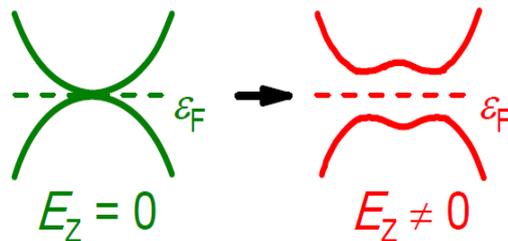
ドレイン・コンダクタンスを抑制できるが、  
移動度が大幅に低下する



Kim group,  
PRL (2007)

垂直電場の利用

➡ギャップは開くが  
移動度が低下



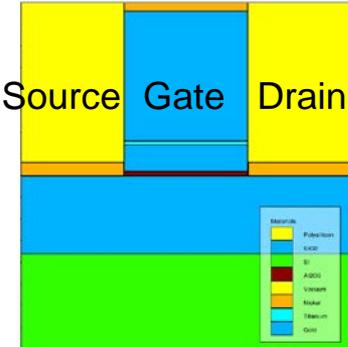
他の二次元原子薄膜

➡そもそも飽和速度がSiよりも低い

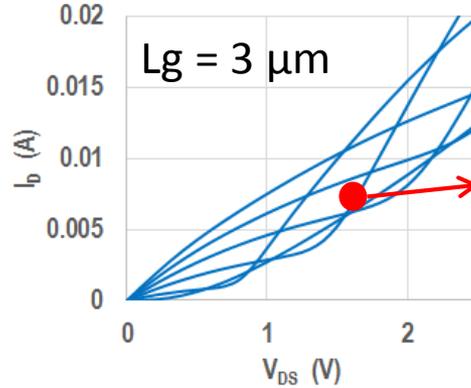
# Dual gate構造の提案・設計と動作検証

館野泰範、吹留博一、末光眞希 特許公開 2016-058449, US14/844,996

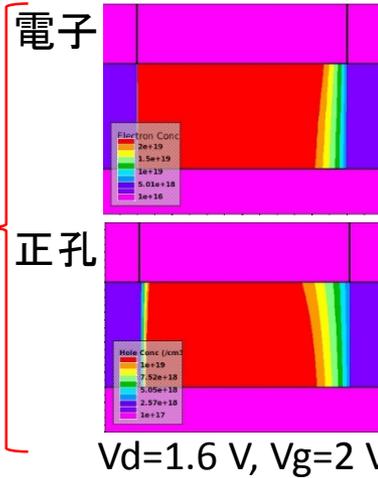
## Single gate



## シミュレーション特性



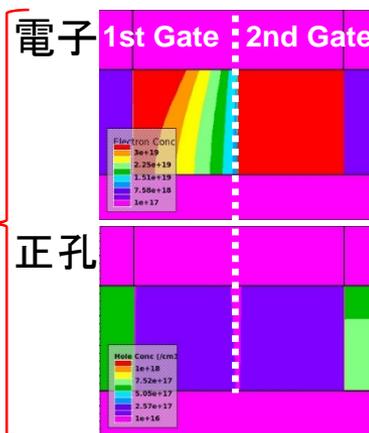
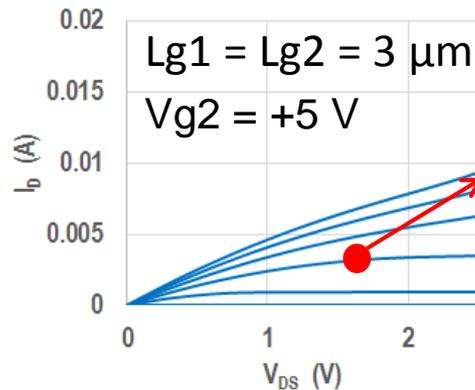
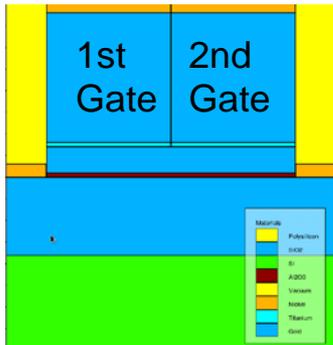
## キャリア濃度分布



## 試作結果

$L_g = 1 \mu\text{m}$

## Dual gate



$L_{g1} = 1 \mu\text{m}, L_{g2} = 2 \mu\text{m}$

基板: SiC, チャネル: グラフェン

$V_d = 1.6 \text{ V}, V_{g1} = 2 \text{ V}, V_{g2} = 5 \text{ V}$   
ホール濃度の増加を抑制

GaN-HEMTの

オペランド

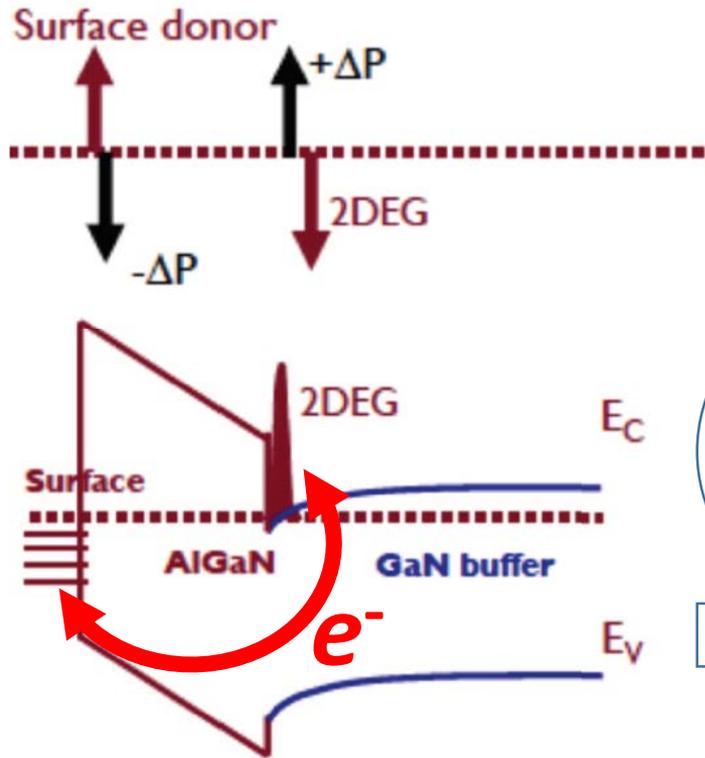
顕微光電子分光観察

# Dual roles of surface donor states of GaN-HEMT

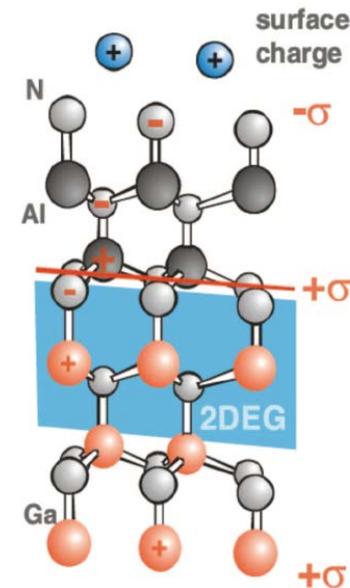


**Good : 2DEG supplier**  
 $2,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}@10^{13}/\text{cm}^2$

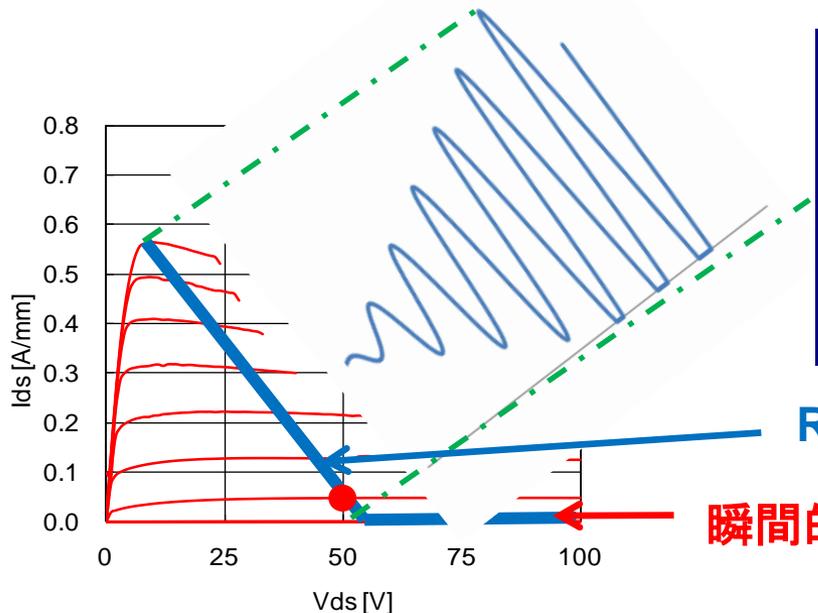
**Bad : Degradation of electrical characteristics**



**Knowing surf. trapping tells us 2DEG conditions**



# (RF動作時の)電流コラプス現象



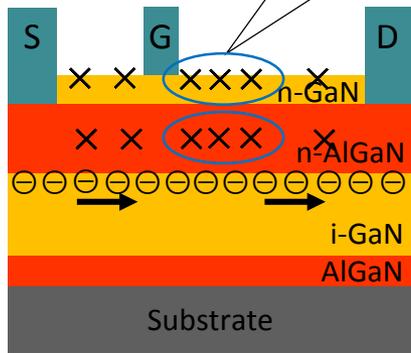
高出力動作時に瞬間的に高電圧ストレス  
 がかかり、ドレイン電流が低下  
 → 電圧振幅・電流振幅の低下  
 → 出力電力・効率の悪化をもたらす

RFパワー動作の負荷線

瞬間的に高い電圧ストレス

表面・界面・バルク中に  
 トラップが多数存在

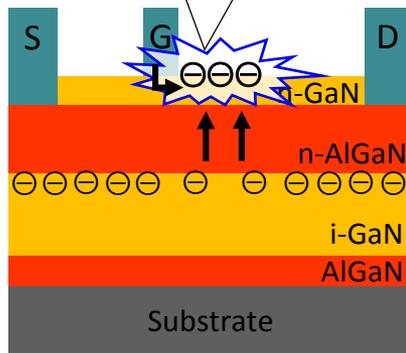
橋本 保, 日本結晶成長学会誌,  
 36, 59 (2009)



通常時

電界集中領域でトラップへの  
 電荷捕獲が発生すると予想

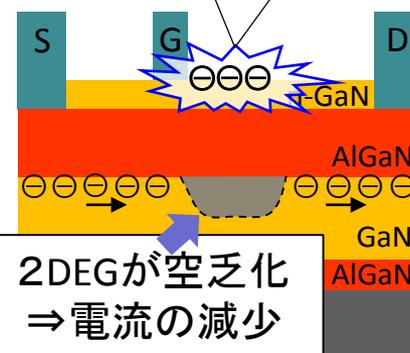
T.Mizutani et al., IEEE transactions on  
 electron devices, 50, 2015 (2003)



高電圧ストレス印加時

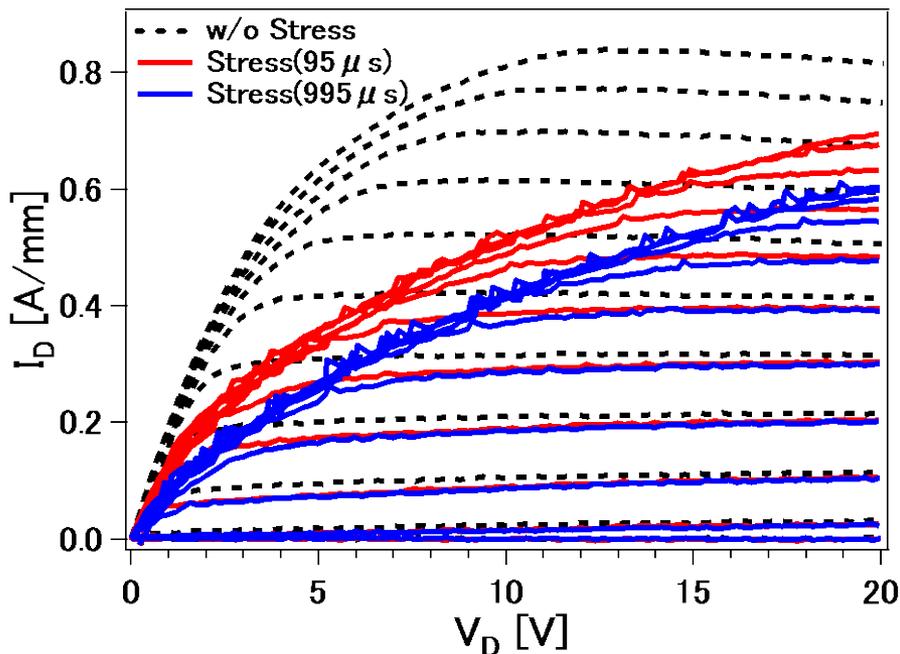
捕獲された負電荷が負に  
 印加されたゲートのように  
 振舞う

R.Vetury et al., IEEE transactions on  
 electron devices, 48, 560 (2001)

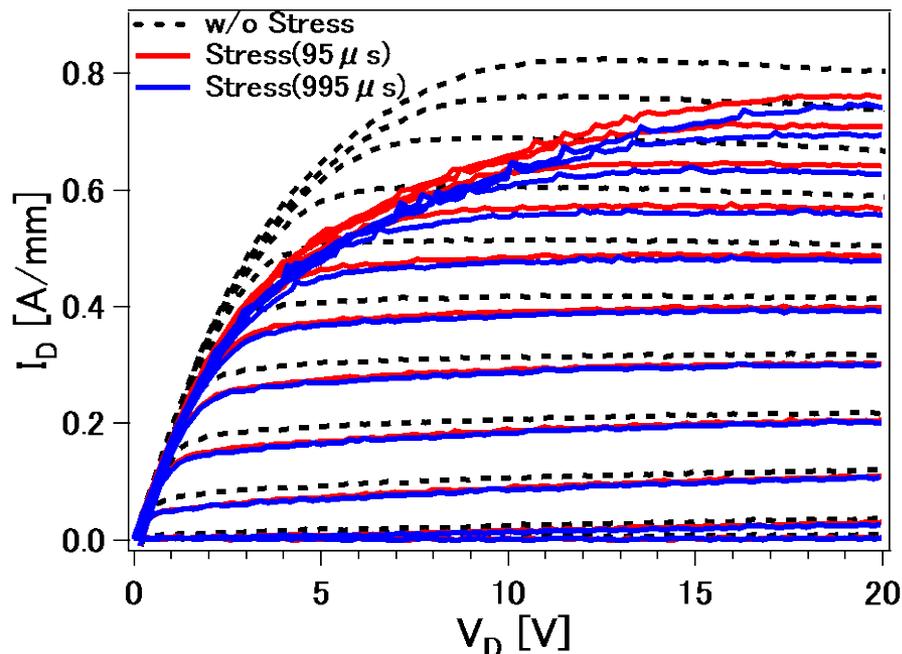


高電圧ストレス印加直後

SiN保護膜無し

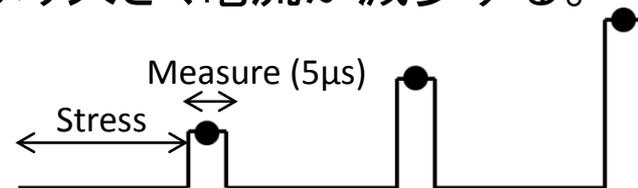


SiN保護膜有り



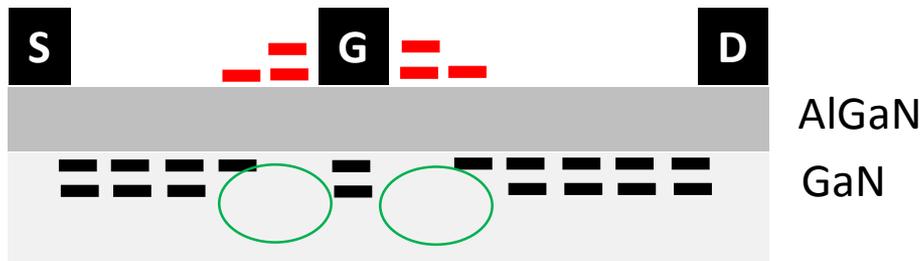
※Stress条件： $V_G=-5[V]$ ,  $V_D=30[V]$

- ✓ SiN保護膜のpassivationによりコラプス現象が緩和されている。
- ✓ SiN保護膜無しのサンプルでは、  
高電圧ストレス印加時間を長くすると、より大きく電流が減少する。

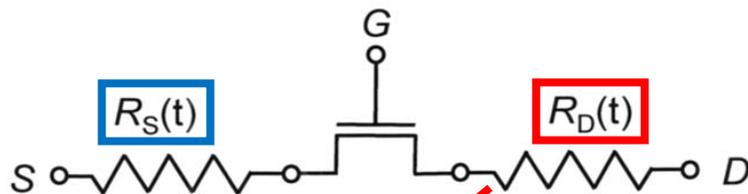


# 表面電子-2DEG間の電子移動とI-V特性の関係

## 表面電子捕獲



2DEG電子欠乏 → 高抵抗化



D側表面電子捕獲

→ D側チャネル: 高抵抗化

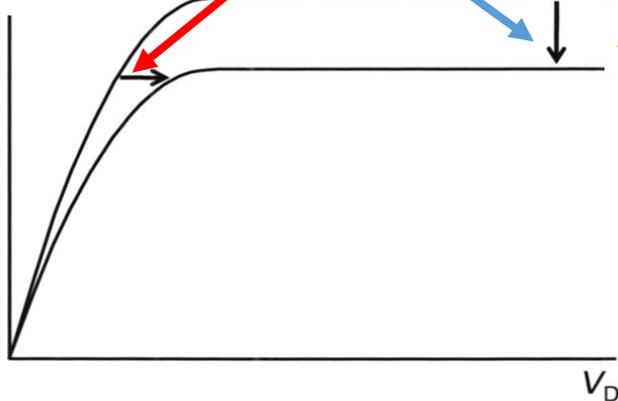
→ 線形領域のOn抵抗: 増大

S側表面電子捕獲 → S側チャネル: 高抵抗化

→ 正味のG電圧低下 → 飽和電流「低下」

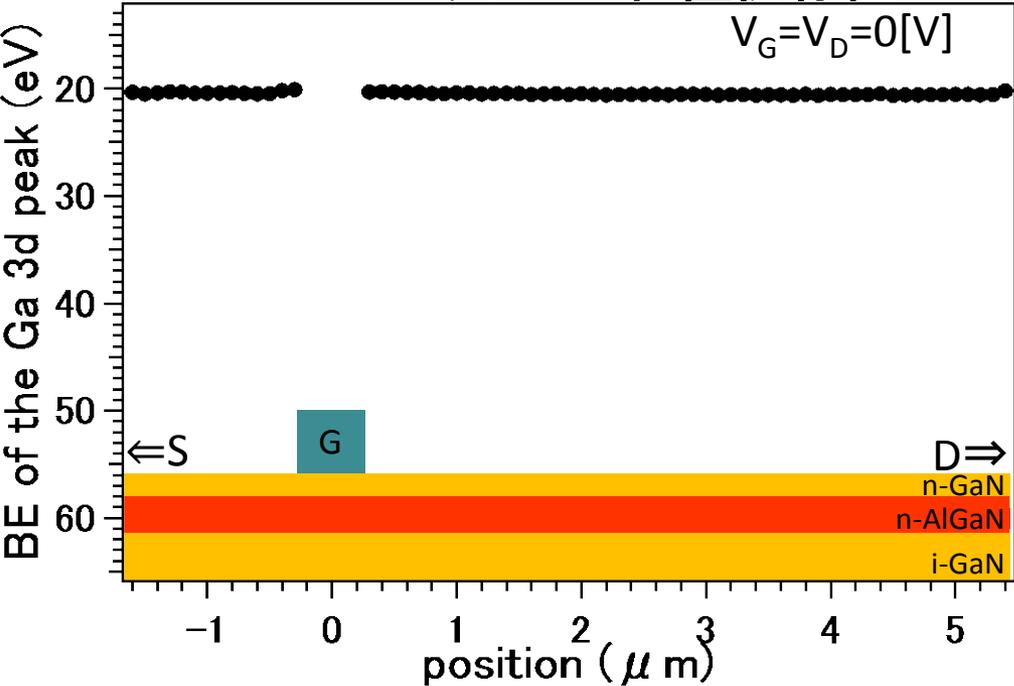
$$\Delta V_D(t) = R_D(t)[I_{D_0} + \Delta I_D(t)]$$

$$\Delta I_D(t) = -g_m R_S(t)[1 + g_m R_S(t)]^{-1} I_{D_0}$$

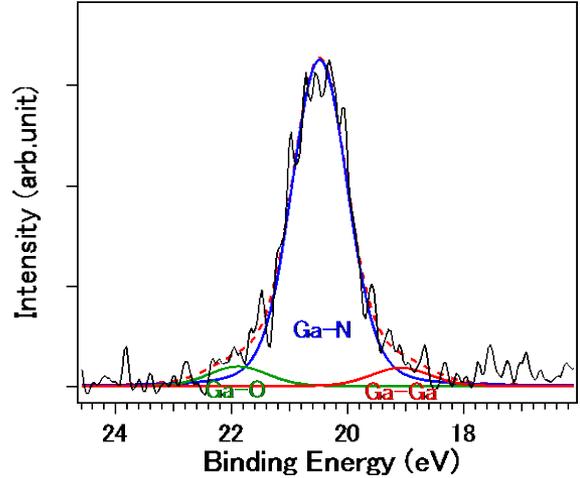


# No voltage stress

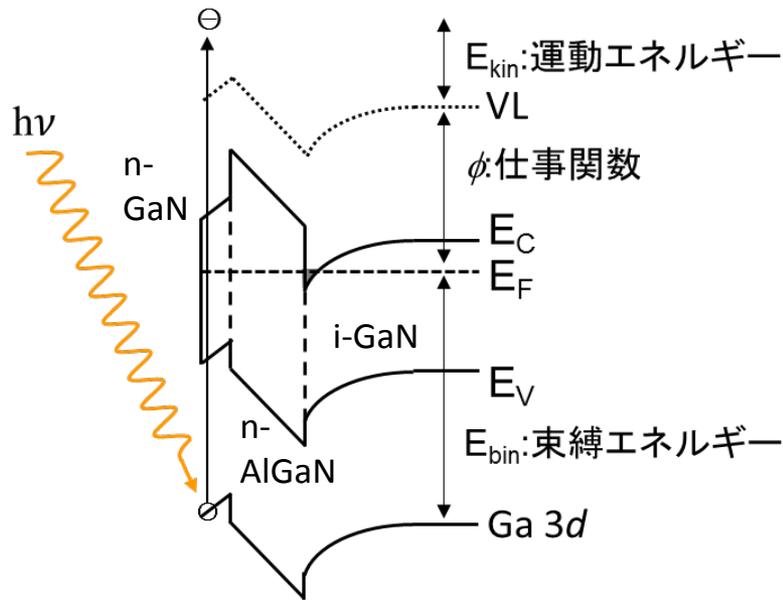
## Ga 3dスペクトルの位置依存性



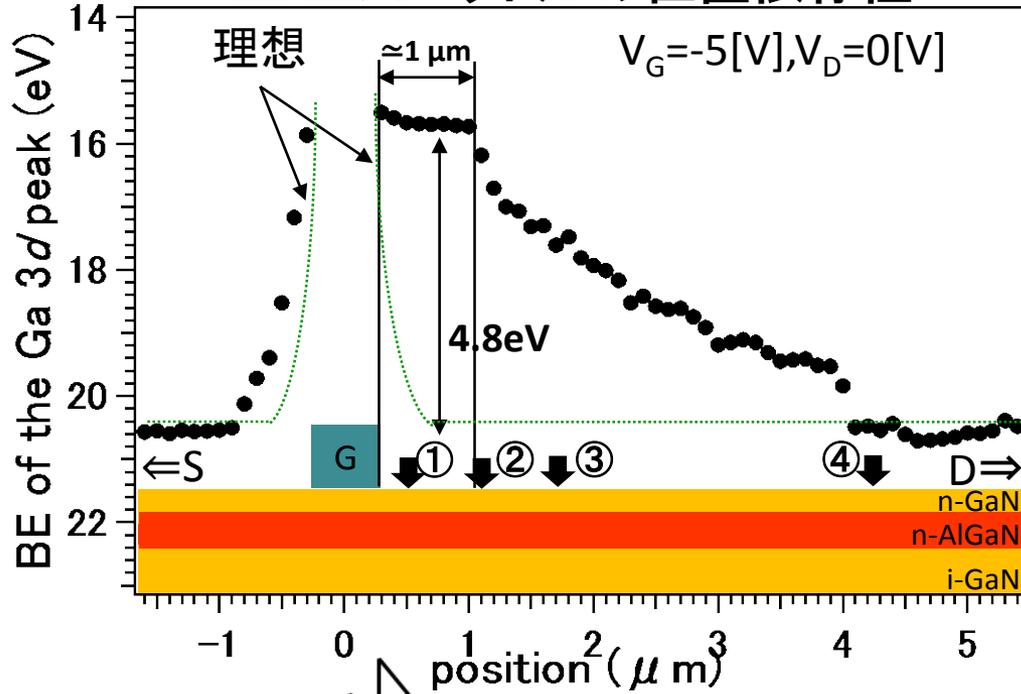
## Ga 3d スペクトル



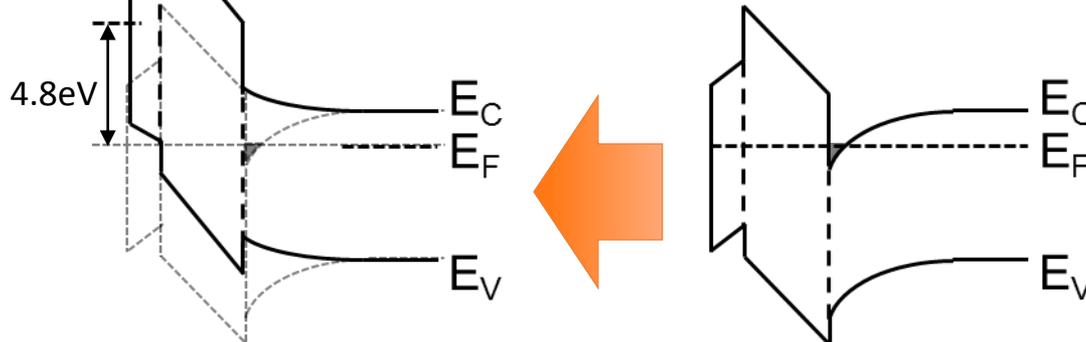
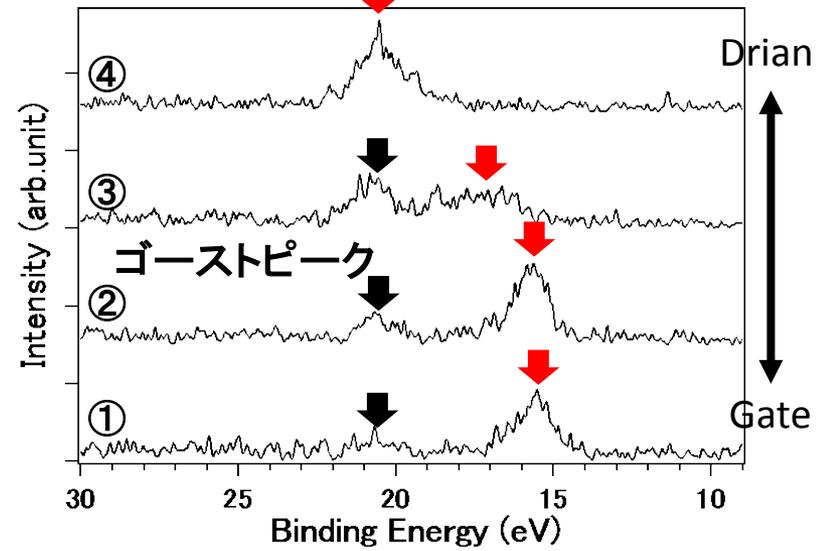
Ga 3dの表面ポテンシャルの変化は観測されなかった。



## Ga 3dスペクトルの位置依存性

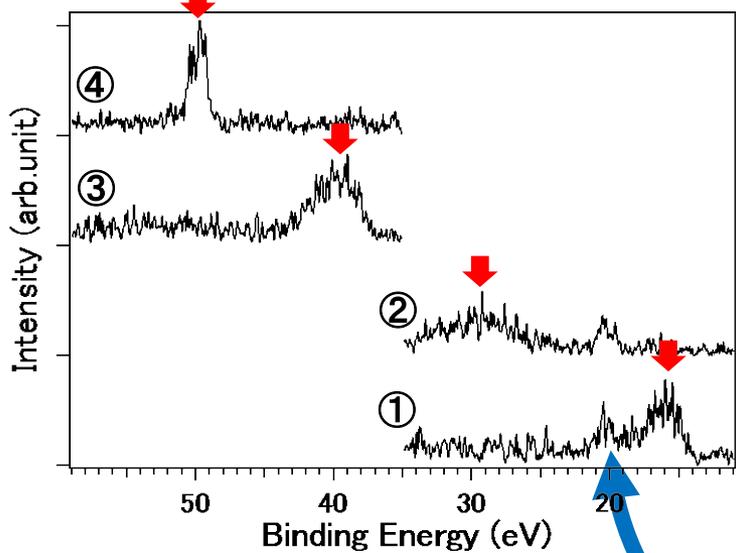


## Ga 3d スペクトル



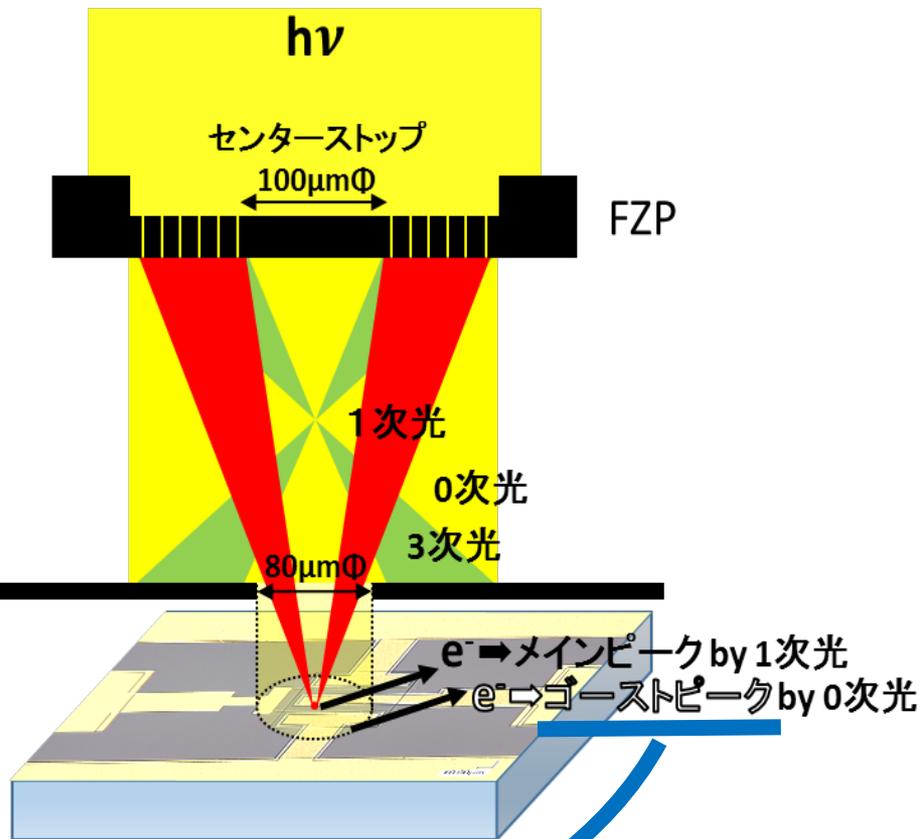
負電荷蓄積により、バンドが湾曲

### Ga 3d スペクトル



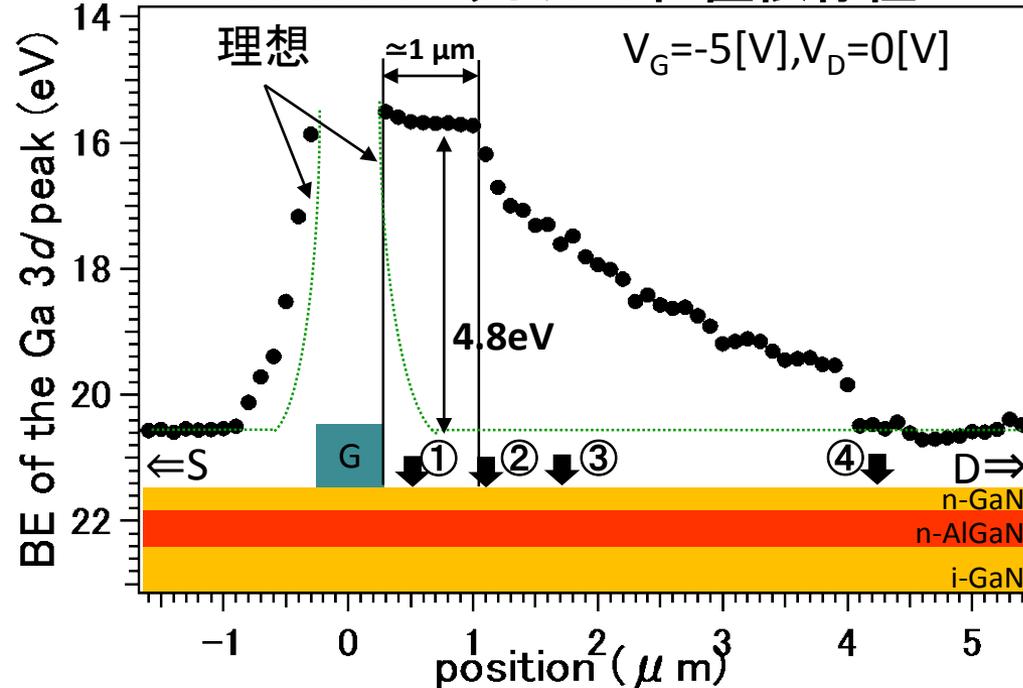
Drain

Gate OSA

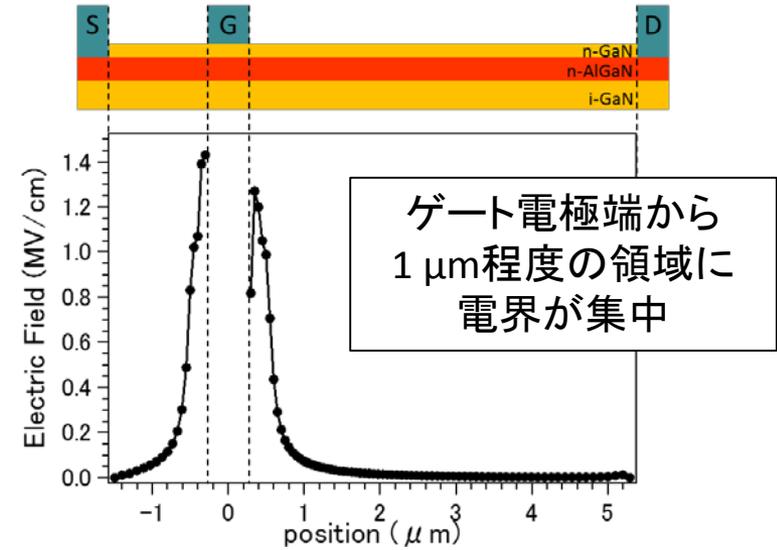


# ゲート電圧のみ印加した場合には？

## Ga 3dスペクトルの位置依存性

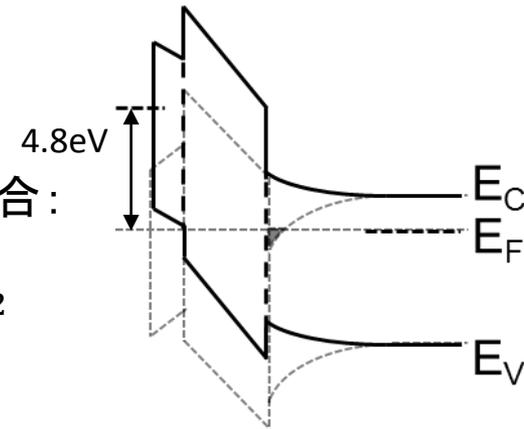


## GaN-HEMT表面の電界



Binding Energy の変化がバンド湾曲のみを反映していると仮定した場合：

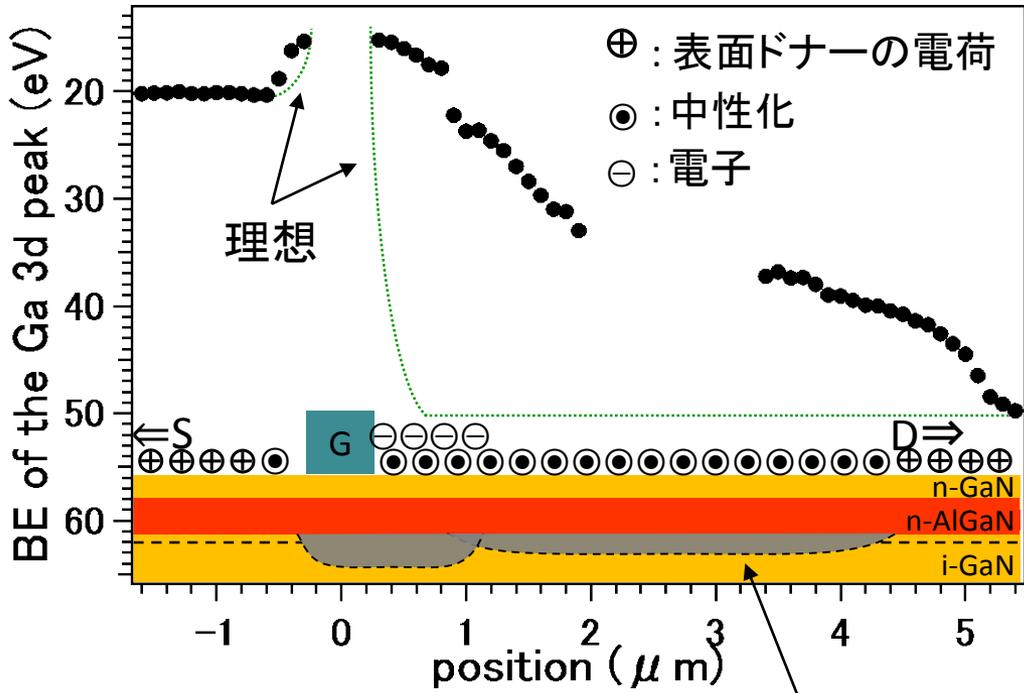
$$N_{\text{trap}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{\text{GaN}} \epsilon_{\text{AlGaN}}}{q(d_{\text{GaN}} \epsilon_{\text{AlGaN}} + d_{\text{AlGaN}} \epsilon_{\text{GaN}})} \cdot \frac{\Delta V_{\text{BE}}}{= 4.8 \text{ eV}} \cong 9.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$$



蓄積している負電荷の密度は、 $\sim 9 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$

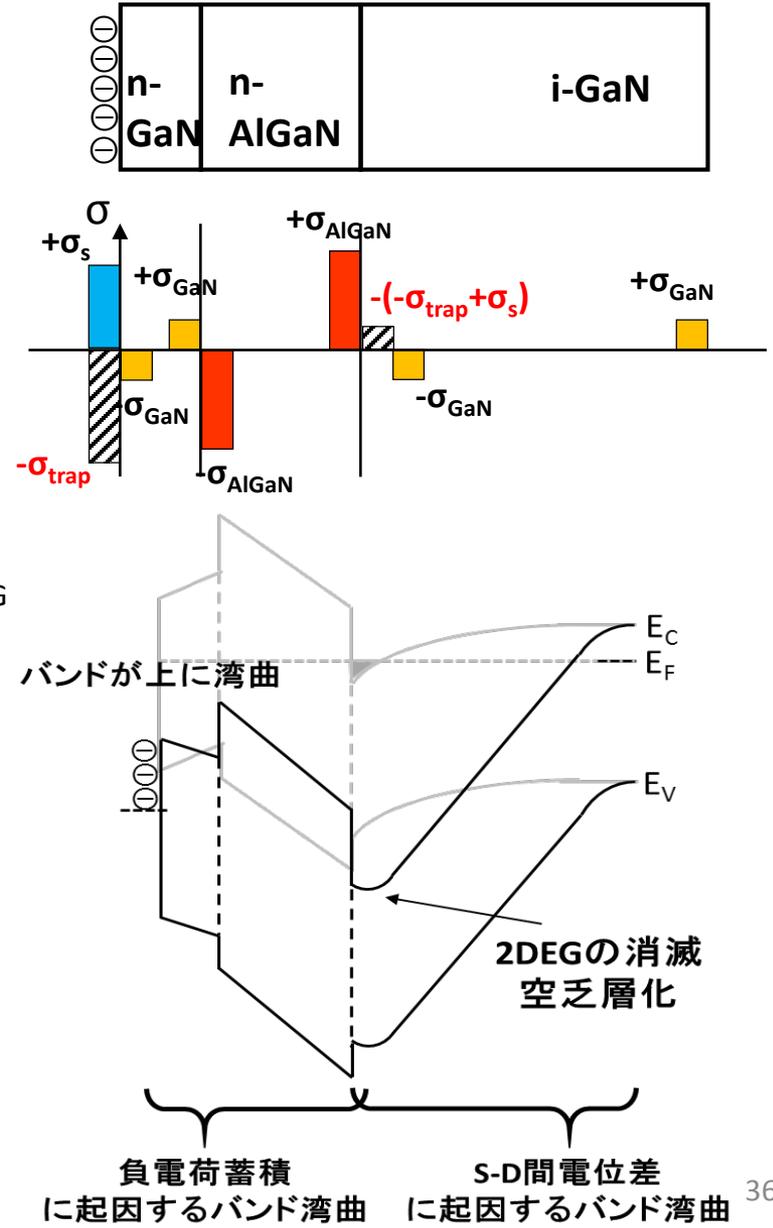
# ストレス電圧(G+D)印加

## Ga 3dスペクトルの位置依存性

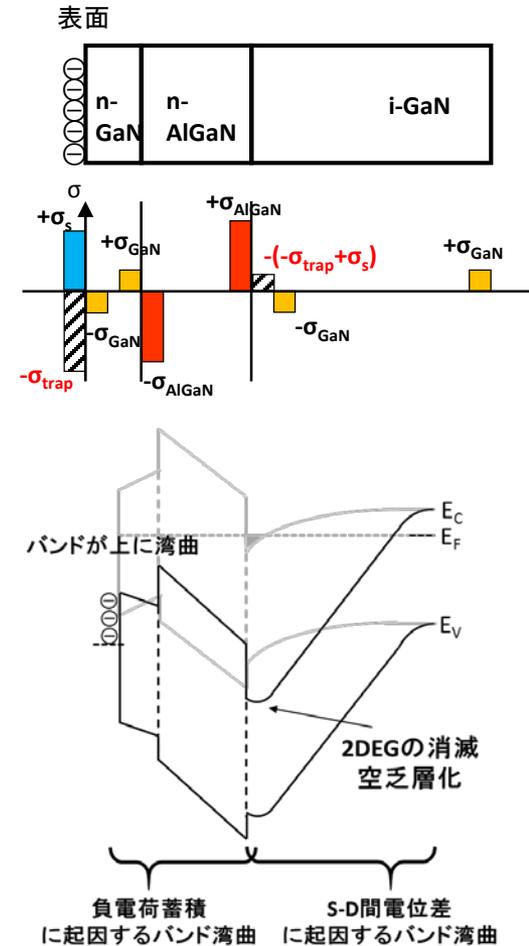
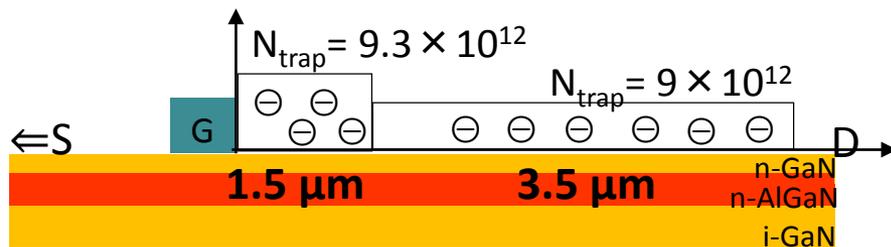
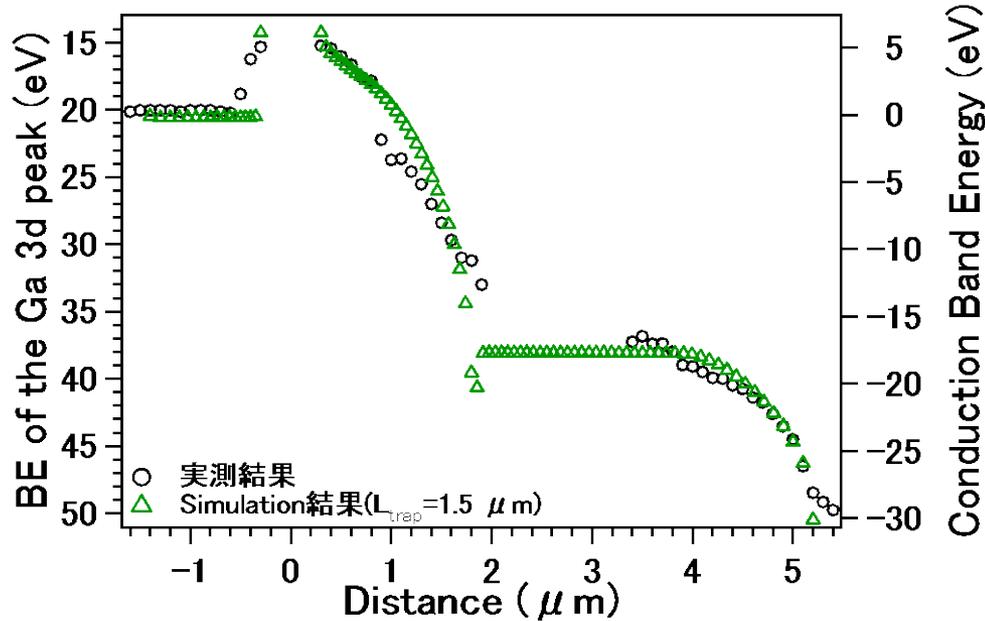


空乏層の拡大に伴い、チャネル内の抵抗が増加  
 ⇒チャネル内の電位も変化

## 表面



# デバイスシミュレーションによる解析(裏付け)



- ・デバイス・シミュレーション⇒表面電子捕獲により実測値を再現
- ・  $10^{11}\text{cm}^{-2}$ オーダーの表面準位密度を評価出来る

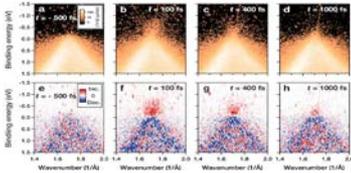
⇒ nano-ESCAを用いて殆どの半導体表面反応を評価可能

# まとめ

- ・二次元電子系のデバイスの動作時のキャリアの挙動をオペランドで観察することに成功した。
- ・デバイス・シミュレーションの併用により  
 $10^{11} \text{ cm}^{-2}$ の表面電子捕獲を評価できる
  - ➡ほとんどの半導体表面電子移動を  
3D nano-ESCAを用いて定量的に評価できる！

# 今後の課題

- ・硬X線を用いた埋もれた界面のオペランド観察
- ・キャリア・ダイナミクス(時間分解能の賦与)



レーザー  
光電子分光

フェムト秒からピコ秒

ナノ秒からマイクロ秒

ミリ秒

分

Nano-ESCA  
で対応可

活性層  
(例:チャネル)

活性層  
と基板との界面

浅い  
表面準位  
( $E_a \sim 0.5 \text{ eV}$ )

深い  
表面準位  
( $E_a > 1 \text{ eV}$ )

# 謝辞

## 【共同研究者】

住友電工

尾嶋名誉教授、永村博士、小嗣講師、堀場准教授

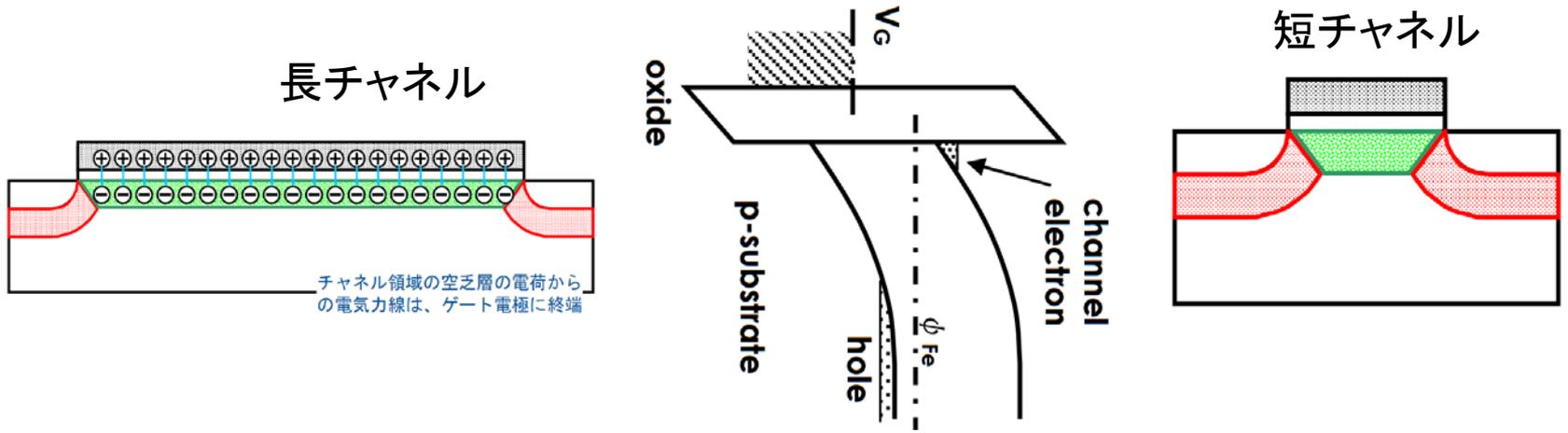
## 【研究助成】

基盤B・基盤S・新学術およびNEDO産学連携プロジェクト  
による助成を受けた

**SUPPLEMENT**

# 何故トランジスタ材料として期待されるのか？・・・薄いから

- ・極限まで薄い 👁 短チャネル効果の抑制 (∵空乏層が存在しない)



注：実は、Intelは、ゲート長：20 nmまでなら、短チャネル効果を克服している

- ・優れた物性 (微妙な場合もある)

	Si	GaAs	GaN	グラフェン	数層MoS <sub>2</sub>
移動度 (cm <sup>2</sup> /Vs)	1,000	2,000-4,000	2,000	200,000	<100
飽和速度 (10 <sup>7</sup> cm/s)	1.0	2.0	2.7	8.0	0.3~1