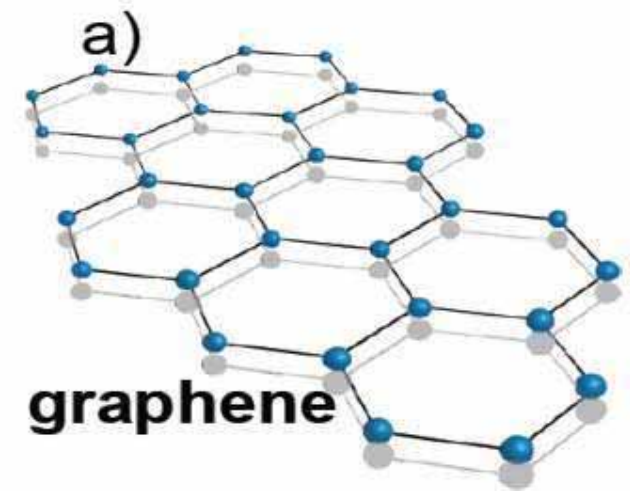


原子薄膜の魅力(3Dから2Dへのパラダイムシフト)

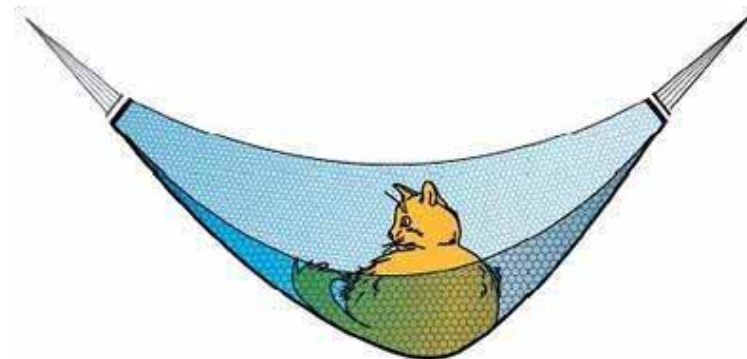
グラフェン

宇宙で最も薄く、最も強靱な、
最も導電性に優れる材料



厚み: 0.332 nm、導電率: 7.5×10^7 S/m、電流密度: $>10^8$ A/cm²

グラフェン1層のハンモックで兎(4kg)を載せられる



2010 ノーベル物理学賞 炭素新素材グラフェン



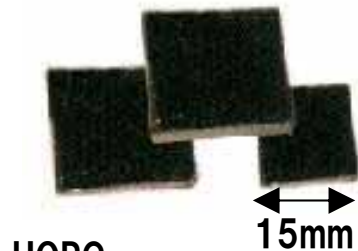
英マンチェスター大

Andre Geim



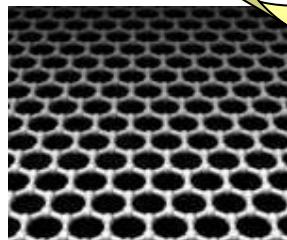
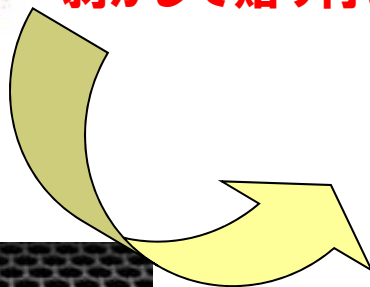
Konstantin Novoselov

Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films
K. S. Novoselov, A. Geim *et al.*, Science 306, 666 (2004)



HOPG
(Highly Oriented
Pyrolytic Graphite)
熱分解黒鉛

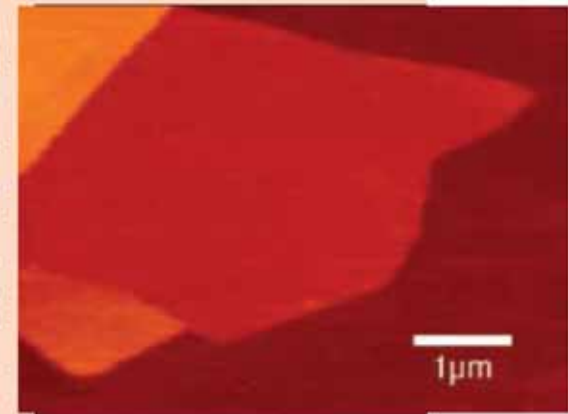
スコッチテープで
剥がして貼り付け



Graphene is a single layer of graphite, where carbon atoms form a two-dimensional (2D) honeycomb lattice.

Graphene Transistor

Carbon nanotubes are often described as rolled-up sheets of graphene (a single layer with graphite). However, stable isolated graphene sheets have so far not been obtained. Novoselov *et al.* (p. 666) have now exfoliated single sheets of graphene, one to several atomic layers thick, from a high-quality graphite parent crystal. They fabricated devices with these sheets of carbon, and demonstrate a metallic-channel field-effect transistor. The high mobility observed, in excess of 10,000 square centimeters per volt per second at room temperature, paves the way for further development of these films in device electronics.



グラフェンが示す驚異的な物性

- 想像しうる最も**薄い物質** (0.3nm)
- 質量あたり最も**広い表面積** (3,000 m²/g)
- 測定された中で最も**強靱な物質** (破壊強度 130 GPa以上)
- 知られている中で最も**堅い物質** (ダイヤモンド以上)
- 最も**伸長, 折り曲げ**できる結晶 (ヤング率 1000 GPa以上)
- **熱伝導度の最高記録** (3,000 W/mK, ダイヤモンド以上)
- 室温で**最高の電流密度** (銅(10⁶A/cm²)の1000倍以上)
- **完全な物質不透過性** (高圧のHe気体をブロック)
- 最も**高い電荷移動度** (Siの100倍以上)
- **伝導電子ゼロの極限でも電気伝導**
- 最も**軽いキャリア** (Dirac fermion:有効質量ゼロ)
- 室温で最も**長い電荷平均自由行程** (~ μm)

※ ICMAT2011 Geim教授基調講演(2011年6月29日, シンガポール)

様々な組み合わせで新機能を発現

(応用例)

- グラフェン + 絶縁膜 + 電極 ⇒ トランジスタ
- + プラスティックフィルム ⇒ 透明導電性フィルム
- + タンパク質 ⇒ バイオセンサー
- + レーザ ⇒ 超短パルスレーザー
- + 導波路 + 絶縁膜 + 電極 ⇒ 高速光変調器
- + TiO₂ + 色素 + 電解質 ⇒ 色素増感太陽電池
- + Li + 電解液 ⇒ リチウムイオン電池

グラフェンの3つの応用例

1. 透明導電性フィルム



レアメタル代替
\$1B

2. 蓄電・発電



高出力・大容量化

\$10B

3. トランジスタ 集積回路



<http://www.intel.com/>

高速・省電力化

\$100B

2015

2020

2030

透明導電膜の応用分野

タッチパネル



LED



太陽電池

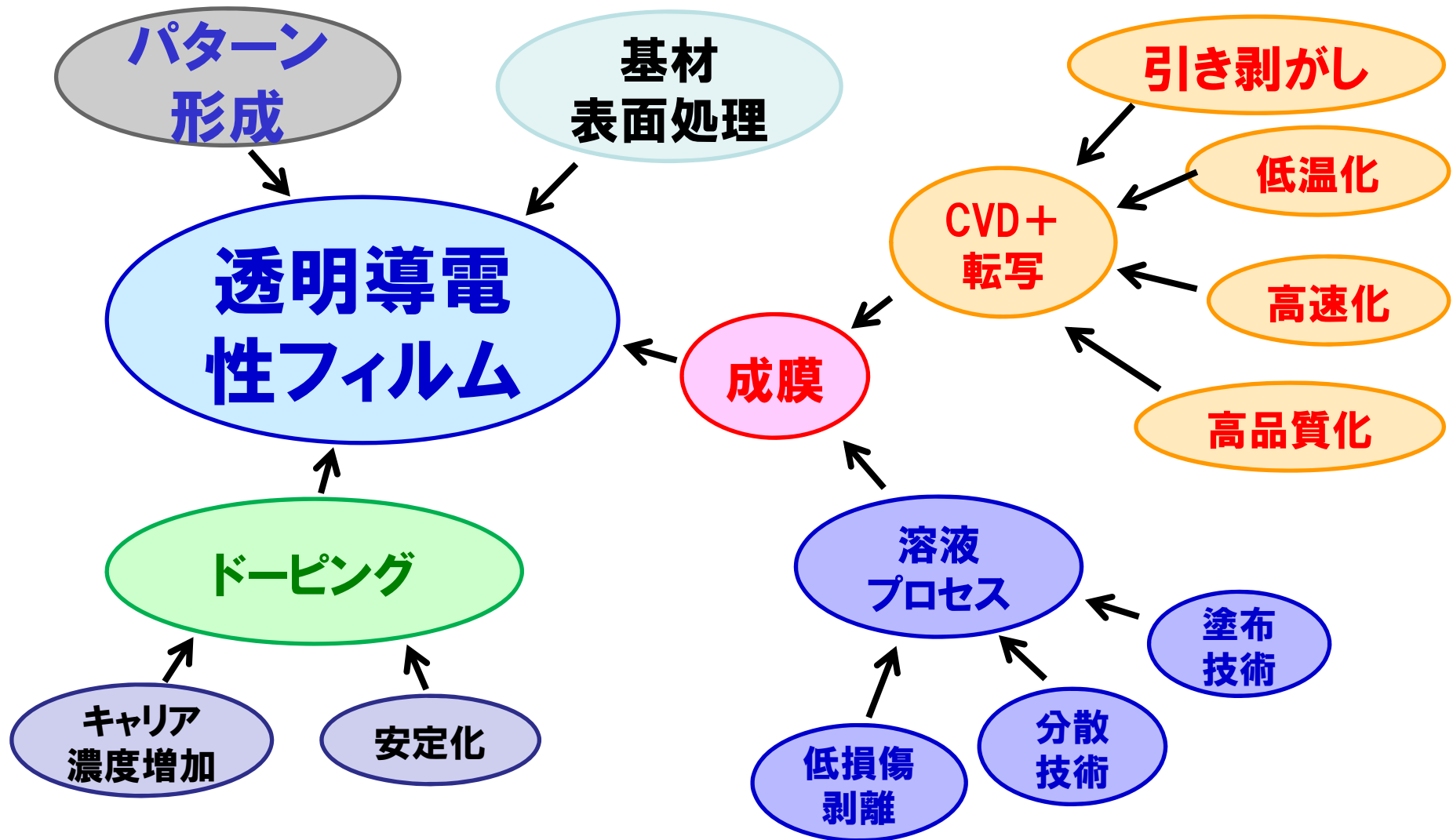


LCD



Image from KONICA MINOLTA
<http://www.konicaminolta.jp>

透明導電膜応用のための課題



透明導電膜の市場調査

用途	市場規模	年度	ソース	先行企業
太陽電池向け 透明導電膜基板	944億円	2012年	富士経済 (2008)	日本板硝子 旭硝子
ITO電極市場 (世界全体)	8300億円 (\$1=100円)	2014年	Nanomarket (2009)	
フレキシブルエレクトロニクス向け透明導電膜	3400億円 (\$1=100円)	2020年	Grobl information , Inc,(2009)	

- ・薄膜太陽電池、有機EL照明、タッチパネルなどが市場を牽引。今後、急速な市場の拡大が予想される。
- ・主流のITOはInの供給問題が(政治的に)深刻なため、代替材料が市場に割って入る可能性は十分ある。

グラフェンの3つの応用例

1. 透明導電性フィルム

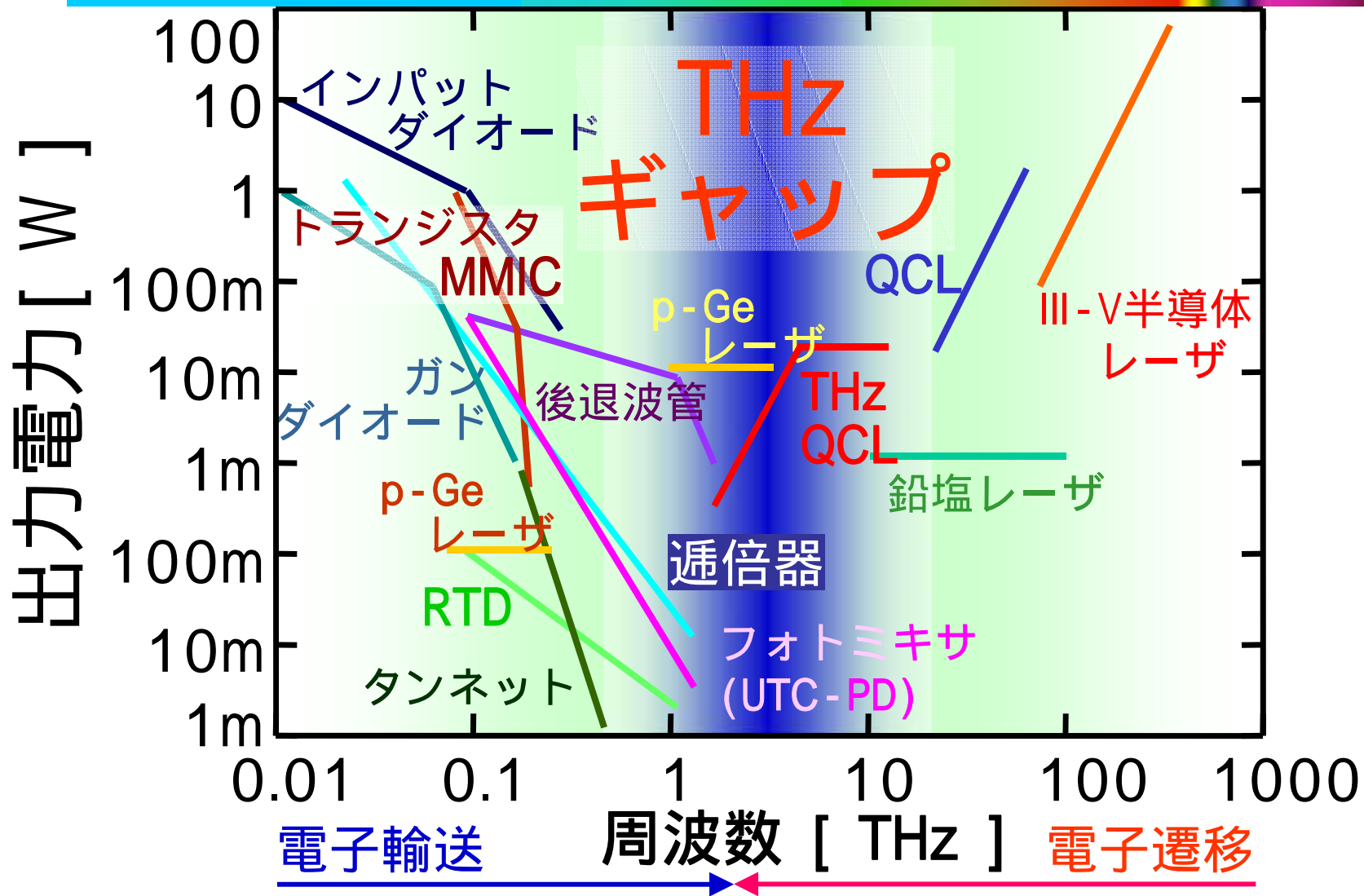


2. 蓄電・発電

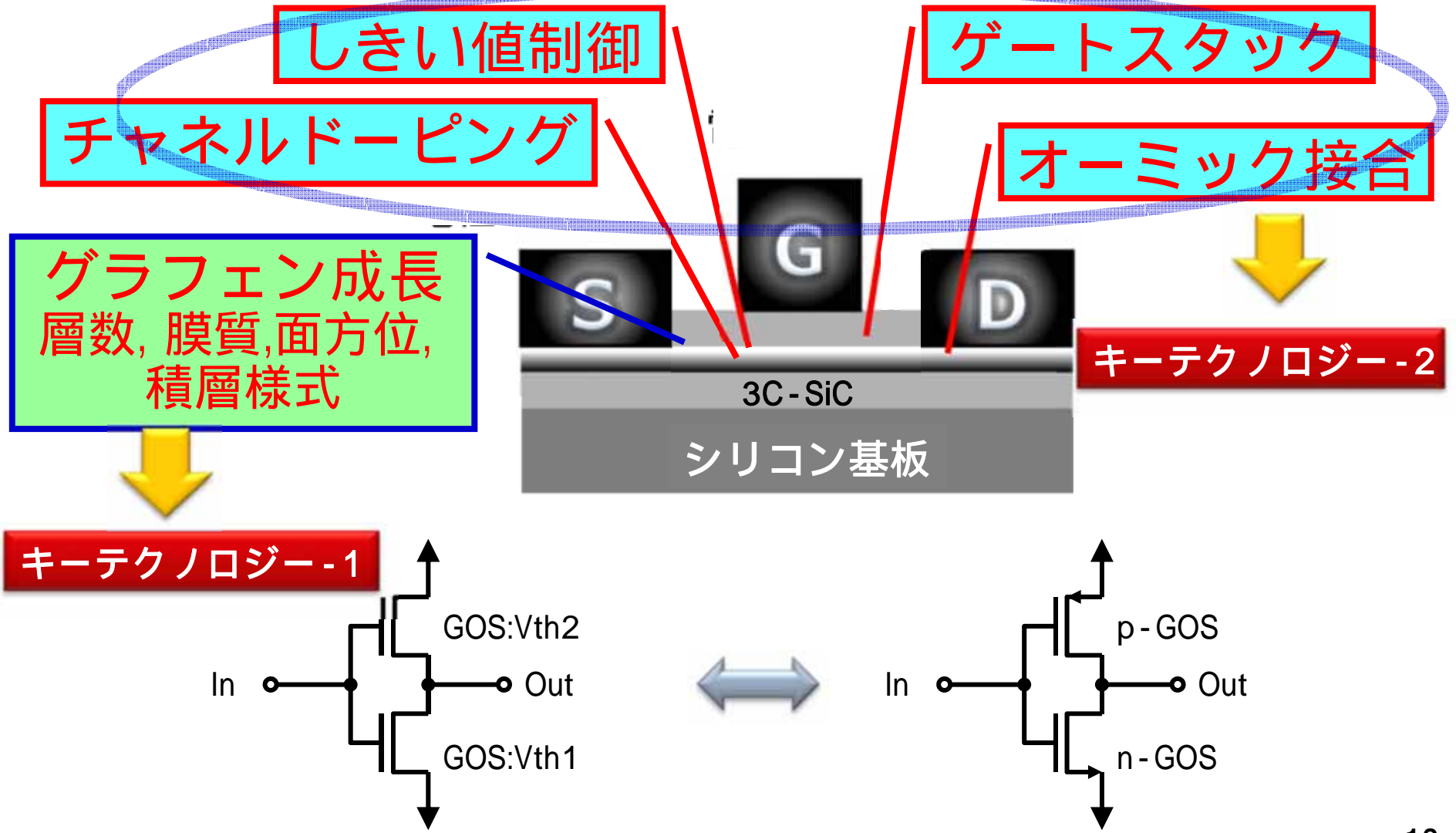


3. トランジスタ集積回路



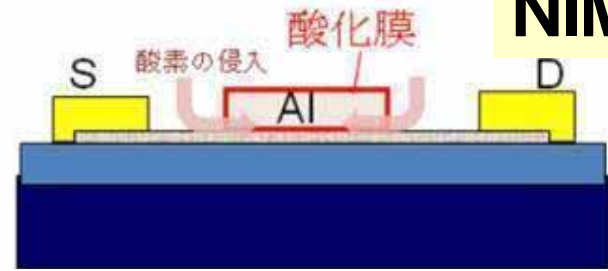
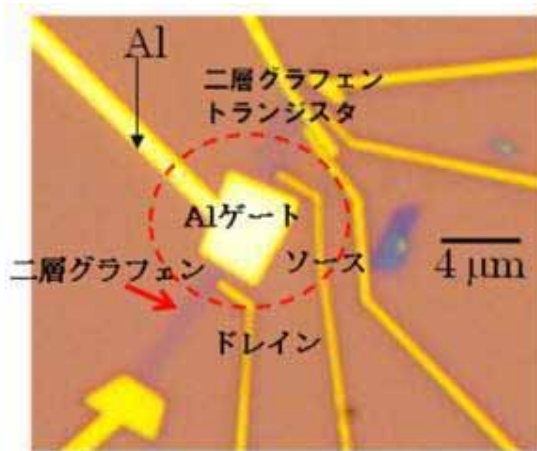


グラフェンFET高性能化のための プロセス技術の課題

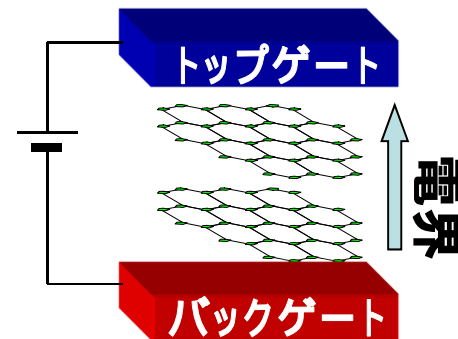
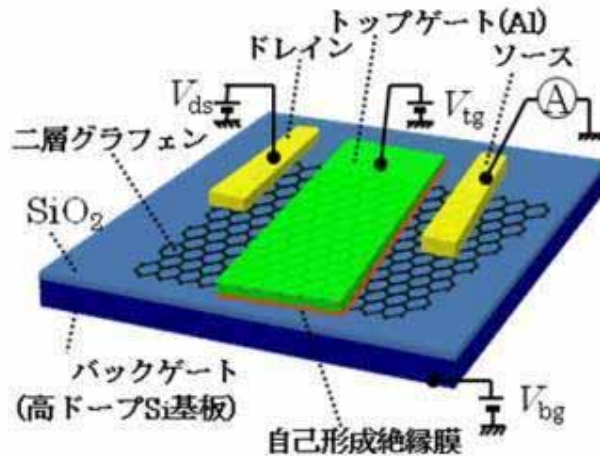


2層グラフェンのバンドギャップ制御FET試作

NIMS:塚越氏



グラフェンとアルミニウム電極界面に酸素が拡散して、酸化膜が形成される



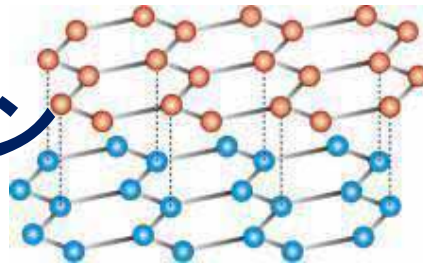
バンドギャップを導入するための電界はトップゲートとバックゲート間に電圧をかけることで印加することができる。

独自のゲート作製技術により、高効率（低電圧で動作可能）かつプロセスが簡易なトップゲートを実現

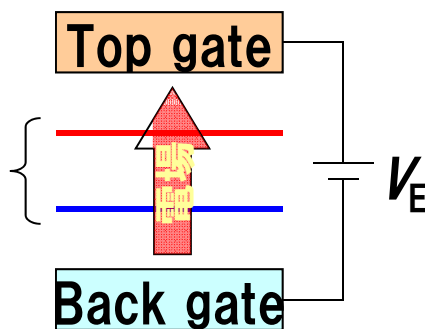
2層グラフェンにおけるバンドギャップ制御

層間相互作用のため、単純な2枚のグラフェンと異なり、新たな性質が発現

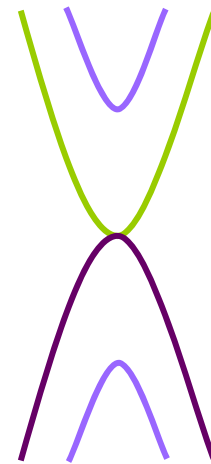
2層グラフェン



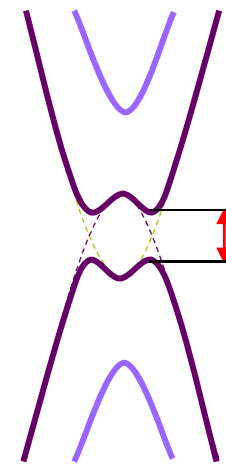
2層グラフェン



電場なし



電場あり



バンドギャップ

2層グラフェンに垂直電界を印加することで、バンドギャップを導入でき、半導体化が可能

電場 $\sim 2 \text{ V/nm}$

バンドギャップ $\sim 0.2 \text{ eV}$

(Si: 1.2 eV)

グラフェンの各国研究予算例

現在検討中

EU: Graphene Flagship ランカスター大 Falko教授
€ 1 billion (約1250億円) 10年間 (2012-2021)



EUでは、基礎・開発・応用研究、イノベーションと、
多様な階層のプロジェクトが並走。

USA: 米空軍: Multidisciplinary University Research Initiative (MURI) grants



コロンビア大 Kim, Heinz
\$ 7.5 million 5年間

DARPA

コロンビア大 Kim, IBM
\$ 15 million/年 5年間

米国は個別研究が中心で、
いろいろな所から出てくる
独自の成果が、総体として
米国の材料科学技術を支
えている。

Keck Foundation

テキサス大 Ruoff \$ 3 M 3年間

ノースウエスタン大 Hersam \$ 3M 3年間

東南アジアの予算例

韓国

約600億円 2011-2016

Samsung (三星)

Sungkyunkwan U.(成均館大学)

中国

清華大学中心の

「973」Pjに

US\$30M

シンガポール大学

グラフェンR&Dセンター US\$100M

世界中の優秀な研究者をスカウティング

ボストン大・Neto教授を所長に

ノーベル賞のNovoselov教授と連携

