

WG13 Emerging Research Materials (ERM)

新奇デバイスのためのERMとその動向

佐藤信太郎 (リーダー、富士通研)

野田啓 (幹事、慶應大)、秋永広幸 (国際担当、産総研)

坪 晴子 (東芝)、栗野祐二 (慶應大)、市原 学 (東理大)、内田建 (慶大)、
大野雄高 (名大)、大森克実 (TOK)、小笹健仁 (産総研)、酒井忠司 (東芝)、
佐々木秀幸 (東芝ナノアナリシス)、品田高宏 (東北大)、杉山直之 (東レリサーチ)、
相馬聡文 (神戸大)、戸所義博 (奈良先端大)、富岡泰秀 (産総研)、松倉文礼 (東北大)、
松澤伸行 (ソニー)、宮本良之 (産総研)、山田茂 (イビデン)

BC	Beyond CMOS
CNT	Carbon Nanotube
DSA	Directed Self Assembly
ERD	Emerging Research Device (WG)
ERM	Emerging Research Material (WG)
ESH	Environment, Safety and Health
EUV	Extreme Ultra-Violet
FEP	Front End Process (WG)
FIB	Focused Ion Beam
FT	Focus topic
KFM	Kelvin Probe Force Microscopy
MM	More Moore
MtM	More than Moore
MWCNT	Multi-walled CNT
OLED	Organic Light Emitting Diode
OSC	Outside system connectivity
PBTtT	Poly(2,5-bis(3-hexadecylthiophen-2-yl)thieno [3,2-b]thiophene)
PMMA	Polymethyl Methacrylate
PIDS	Process Integration, Devices, and Structures
ReRAM	Resistive Random Access Memory
SS	Subthreshold Swing
TMDC	Transition Metal Dichalcogenide
TSV	Through Silicon Via

1980s

1990s

2000s

2010s

**Si technology:
Material Complexity
Increasing Exponentially**

1980~2000 Source: Intel

2020s ?

2020s ?

➤ WG13 (ERM) のミッション

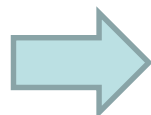
■ ミッション：

各ITWG、FT(フォーカストピック) の抱える「困難な技術課題」を解決する可能性のあるERMについて、その技術的・時間的要請を明らかにすること

■ 取り組み：

- 1) 各ITWG、FTのニーズを明らかにする
- 2) ニーズを満たす可能性のあるERM候補を探し出す
- 3) ニーズとの技術的ギャップを明らかにする。複数候補がある場合、それらを比較検討する
- 4) 実現すべき時期を明らかにする

さらに新たなミッションとして、 *Potentially disruptive materials opportunities* の調査も提案されている



ITRS2015の執筆へ展開

➤ ITRS 2.0について

新たに以下の7つのフォーカストピック(FT)が設定された。
現状のITWGは維持され、FTとITWGについてITRS2015は執筆される。FTとITWGは相互に影響しあうことになる。

System Integration—studies and recommends system architectures to meet the needs of the industry. It prescribes ways of assembling heterogeneous building blocks into coherent systems.

Outside System Connectivity—refers to physical and wireless technologies that connect different parts of systems.

Heterogeneous Integration—refers to the integration of separately manufactured technologies that in the aggregate provide enhanced functionality.

Heterogeneous Components —describes devices that do not necessarily scale according to “Moore’s Law,” and provide additional functionalities, such as power generation and management, or sensing and actuating.

Beyond CMOS—describes devices, focused on new physical states, which provide functional scaling substantially beyond CMOS, such as spin-based devices, ferromagnetic logic, and atomic switch.

More Moore—refers to the continued shrinking of horizontal and vertical physical feature sizes to reduce cost and improve performance.

Factory Integration consists of tools and processes necessary to produce items at affordable cost in high volume.

ERMリーダーのGarner氏が“Outside system connectivity”のリーダーに。STRJ-ERMもそれを意識した取り組みを行いつつあるが、それに限定されるわけではない。

➤ ERMの国内メンバー

現在21名。ナノエレ全般に対応できる
国内有数の専門家集団。

Sharing roles	Members
Introduction (Scope, etc)	全員(21名)
Emerging Research Device Materials (ERDM)	栗野(慶大) 酒井(東芝) 内田(慶大) 大野(名大)
	佐藤(富士通研) 野田(慶大) 松倉(東北大) 富岡(産総研)
	杉山 (東レリサーチ) 秋永(産総研) 小笹(産総研)
Lithography Materials	戸所(奈良先端大) 大森(TOK) 松澤(ソニー) 品田(東北大)
Interconnects	栗野(慶大) 酒井(東芝) 佐藤(富士通研)
Assembly and Package	山田(イビデン) 佐藤(富士通研) 大野(名大)
Environment, Safety, and Health	市原(東理大)
Metrology	佐々木 (東芝ナノアナリシス) 杉山 (東レリサーチ) 坪(東芝)
Modeling and Simulation	宮本(産総研) 相馬(神戸大)

「先端メモリデバイスの解析」

東芝 坏晴子委員 2014年4月14日

Metrology

「FIBの技術動向と最新型FIB(トリプルビーム)技術の紹介」

東レリサーチセンター 杉山直之委員 2014年5月23日

Metrology

「Ge-on-insulatorデバイス技術とその応用」

東芝・研究開発センター 手塚 勉 様 2014年6月27日

ERDM(MM)

「ナノテクノロジーの安全性と産業衛生学」

東京理科大学 市原学委員 2014年7月25日

ESH

「グラフェンをはじめとする二次元原子膜の成長とエレクトロニクス応用」

九州大学 吾郷浩樹先生 2014年9月26日

ERDM
(MM, BC, MtM)

「3次元アトムプローブによる先端半導体材料の微細構造解析」

東芝ナノアナリシス 佐々木智一様 2014年10月31日

Metrology

「ネットワークの大容量化と省電力化を目指す光通信用デバイス の研究動向」

慶應義塾大学 津田 裕之 先生 2014年11月27日

OSC

「微小流体デバイスのバイオ・環境応用」
北陸先端大 高村 禅先生 2014年12月12日

MtM

「固体中の角運動量変換」
慶應義塾大学 安藤 和也 先生 2015年1月23日

ERDM (BC)

「通信用高周波デバイスの現状・課題と展望」
富士通研究所 岩井 大介 様 2015年2月10日

OSC

ヒアリングを通じて新技術・材料についての情報を集めた。
既存枠組みに対応したヒアリングを行うと共に、7つのフォーカスト
トピックを意識した講師選定を行った。



ITRS2015に反映させる予定

最近の技術トピック紹介

➤ リソグラフィ材料

担当: 大森委員、戸所委員、松澤委員



最近の進展: DSAではPS-b-PMMAで更なる欠陥改善、また新規材料で<HP10nm加工例が報告。EUVレジストについては、特性改善の為の無機材料応用が新たな流れ。

❖ Directed Self Assembly (DSA)

- ◆ PS-b-PMMA L0=28(28nmLS)において、材料・プロセス・エッチング検討にて改善
(Roel Gronheid et al., *Proc. SPIE* **9049** (2014) 904905-1)
- ◆ Double-Decker Silsesquioxane(DDSQ)にてsub10nm加工例が報告
(Lei Wang et al., *J. Photopolymer Sci. Technol.*, **27(4)** (2014) 431-434)
- ◆ DSAを使用してFinFET形成例の報告
(Chi-Chun Liu et al., *Proc. SPIE* **9049** (2014) 904909-1)

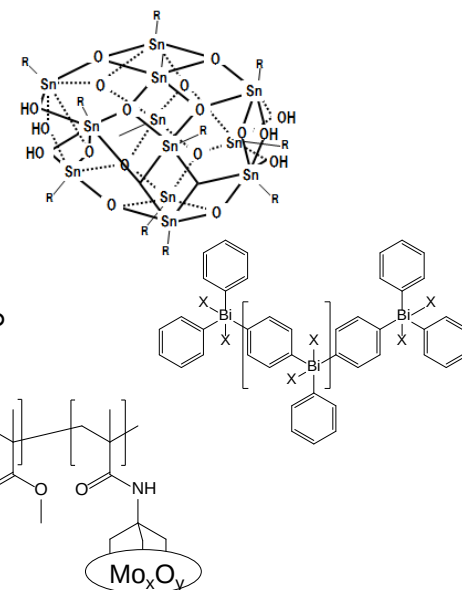
図面使用許諾
未取得

図面使用許諾
未取得

図面使用許諾
未取得

❖ EUVレジスト

- ◆ 酸化スズ系の材料で、18 nm L/Sパターンの形成が報告。
(Cardineau et al., *Proc. SPIE* **9051** (2014) 90511B-1)
- ◆ トリアリルビスマスオリゴマ系でも、21 nm L/Sパターンが形成。
(Amador et al., *Proc. SPIE* **9051** (2014) 90511A-1)
- ◆ PMMAの側鎖に、酸化モリブデンクラスターを導入した系で、
16 nm L/Sパターン形成が報告。
(Singh et al., *Proc. SPIE* **9051** (2014) 90511W-1)

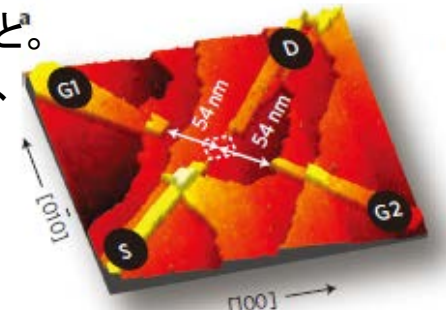


➤ Deterministic(決定論的)ドーピング

担当: 品田委員

❖ Deterministicドーピングとは

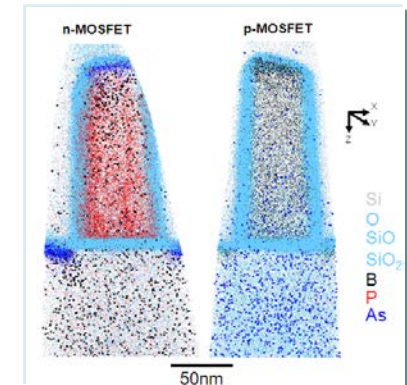
- ドーパント集合体の制御から、個々のドーパント制御をディレクションすること。
- 原子スケールの精度でドーパントを導入し、適切にアクティベートすること。
- ドーパントばらつき、ゲート仕事関数、極浅接合、ドーパント分布の制御、新原理デバイスの実証、低消費電力化に資すること。



(Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: Nature Nanotechnology 7, 242 (2012), copyright 2012)

❖ 最近の進展

- **単一ドーパントランジスタの動作実証** (Fuechsle, Simmons, *Nature Nanotech* 2012, Prati, Shinada, *Nature Nanotech* 2012 & *IEDM 2014 Plenary*)。
- **高温動作化** ~150K (Hamid, Tabe, *PRB* 2013)。
- 3次元対応 **Monolayerドーピング** (Ang, *IEDM* 2011)
- **低温マイクロ波アクティベーション** (Lee, *IEDM* 2012)。
- 3Dアトムプローブ (Inoue, *Microscopy Today* 2012)、KFM (Anwar, Nowak, Tabe, *APL* 2011 & 2013)による **単一ドーパントの可視化**。



Inoue, *Microscopy Today* 2012

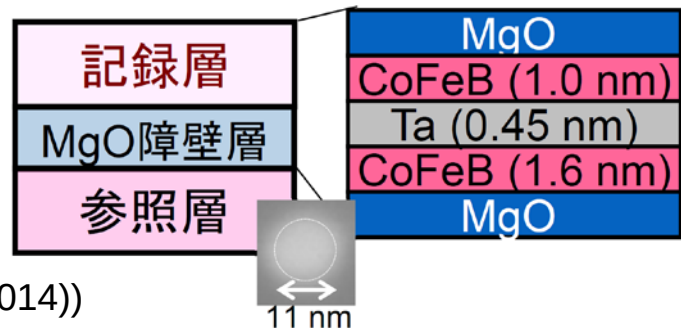
❖ 技術的課題

- ERD: 高温動作 (300K~400K)、インターコネクト、ナノコンタクト、スケールアップ。
- FEP: DSA活用ドーピング、アクティベーションのミリ秒化、低温化、均一性、スループット、3次元対応。
- Metrology: 単一ドーパントの存在、位置、電子状態の評価、非破壊。

微細化、新材料、新規現象によるスピントロニクスデバイスの高性能化

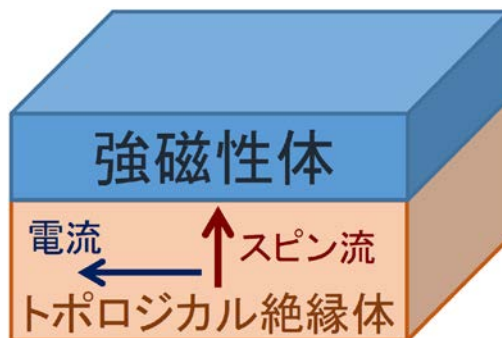
❖ 微細スピントロニクスデバイス

- ◆ 11 nm ϕ の磁気トンネル接合
(H. Sato *et al.*, IEDM 2013, APL **105**, 062403 (2014))
- ◆ 20 nm幅の磁壁移動デバイス
(S. Fukami *et al.*, IEDM 2013, IEEE Trans. Magn. **50**, 3401006 (2014))



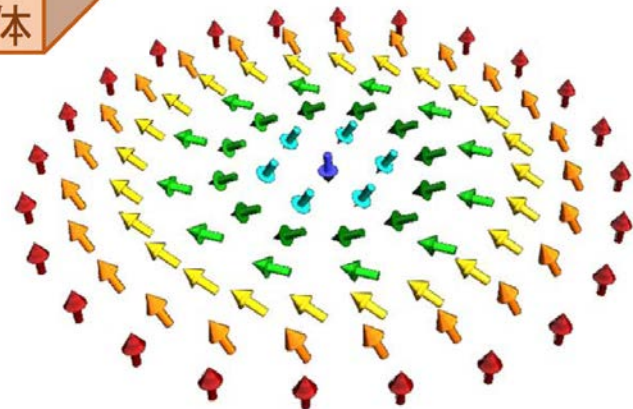
❖ トポロジカル絶縁体からの巨大スピン・トルクを用いた磁化操作

- ◆ 巨大スピン・ホール角の観測
- ◆ スピン・トルク強磁性共鳴
(A. R. Mellnik *et al.*, Nature **511**, 449 (2014))
- ◆ スピン・トルク磁化スイッチング
(Y. Fan *et al.*, Nat. Mater. **13**, 699 (2014))



❖ 磁気スカーミオン

- ◆ 磁壁より数桁低い電流密度で駆動。
(X. Z. Yu *et al.*, Nat. Commun. **3**, 1990 (2012);
J. Sampaio *et al.*, Nat. Nanotech. **8**, 839 (2013);
解説: 十倉、永長、応用物理 **84**, 124 (2015).)



❖ 最近の傾向

- ◆ Nature姉妹紙にニューロモルフィック素子や回路への応用に関する投稿が増加
- ◆ Appl. Phys. Lett. などの学術誌には、まだ、動作モデル等の投稿が続いている
- ◆ IEDM等の学会では、ReRAM動作信頼性向上に関する発表件数が増加

❖ フレキシブルReRAM

- ◆ 書換、熱耐性の特性評価をフィルムを曲げた状態で実施⇒試験の範囲内では、曲げたことによる影響はほとんど無し。

(Yeom et al., APEX 7, 101801 (2014))

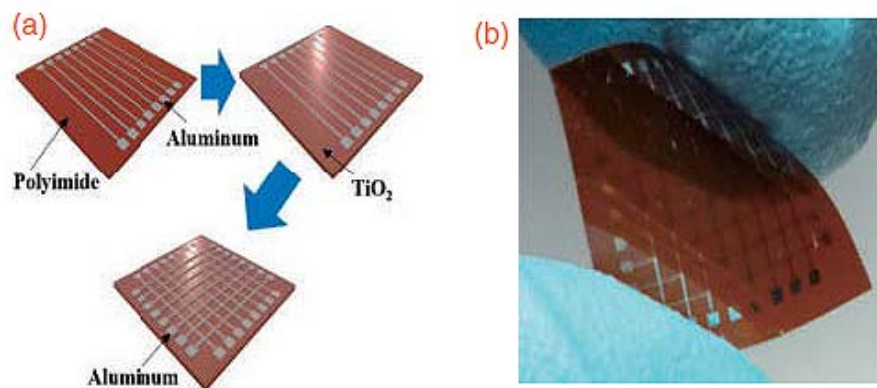


Fig. 1. (a) Schematic image showing the process flow of flexible ReRAM. (b) CCD camera image of the device when device was bent.

Copyright 2014 The Japan Society of Applied Physics

❖ ERD/ERMに関係する多くの日本人メンバーが執筆したIEEE Proceeding特集号に投稿したReRAM関連論文の引用回数が「最近になってから」増えてきました。

Resistive Random Access Memory (ReRAM) Based on Metal Oxides

H. Akinaga and H. Shima, PROCEEDINGS OF THE IEEE

Vol.98, No.12, pp. 2237-2251 発行: DEC 2010 ⇒ 引用回数159 @2015.2.8

❖スピントロニクスにおける複合金属酸化物材料

・磁性および磁気抵抗酸化物 --- 二重整列ペロブスカイト酸化物薄膜 ($\text{La}_2\text{CrFeO}_6$, LaSrVMoO_6 , etc.) の開発
伝導キャリアのスピンの偏極度100% (ハーフメタル) --- スピン偏極キャリアの注入源としての電極材料

“ LaSrVMoO_6 , A case study for A-site covalency-driven local cationic order in double Perovskites”

S. Jana, et al., *Phys. Rev. B*, vol. 86, pp. 014203, (2012).

・マルチフェロイックによる電気磁気結合 --- 分極 (P)、磁化 (M) の組み合わせによる4状態不揮発メモリの提案

“Magnetic Tunnel Junctions with Ferroelectric Barriers: Prediction of Four Resistance States from First Principles”

J. P. Velez, et al., *Nanoletters*, vol. 9, pp. 427, (2009). etc.

❖複合酸化物界面と超格子

酸化物ヘテロ界面 ($\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$, $\text{KTaO}_3/\text{SrTiO}_3$, etc.) における新規物性、 $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ におけるn型伝導界面の生成 (2次元電子ガス, two dimensional electron gas, 2DEG) (**Si基板上に形成**)

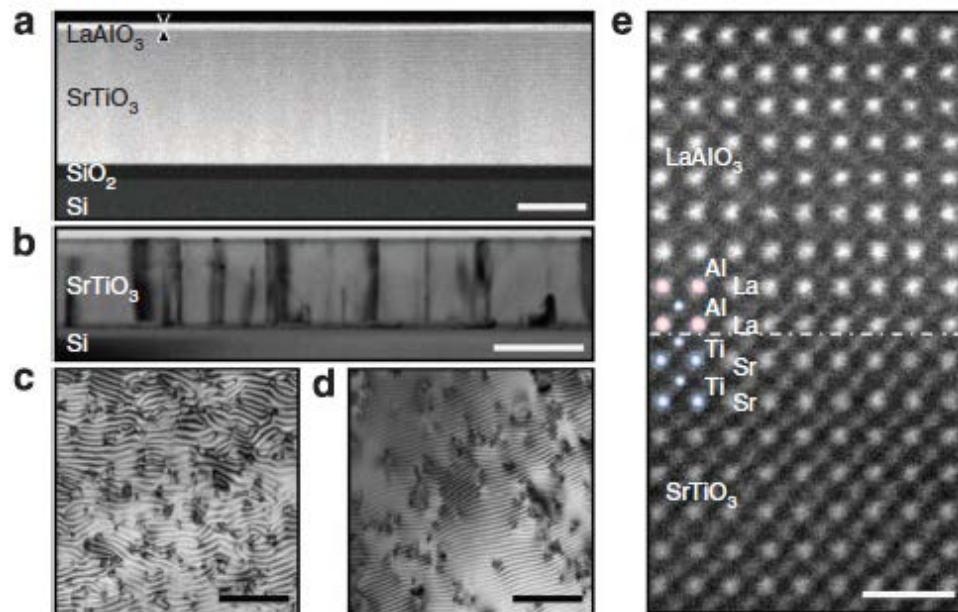


Figure 2 | TEM investigation of the LAO/STO heterointerface on Si.

(a) A cross-sectional high-angle annular dark field (HAADF) image of a 5-nm-thick LAO/annealed TiO_2 -STO heterostructure grown on Si. Arrows indicate the thickness of the LAO layer. The scale bar corresponds to 50 nm. (b) A cross-sectional bright-field TEM image of the same sample showing the existence of threading dislocations in the STO layer. Planar-view TEM images of (c) as-grown and (d) annealed STO films showing moiré patterns. The scale bars in b, c and d correspond to 100 nm. (e) A high-resolution HAADF image showing an atomically sharp interface between LAO film and annealed TiO_2 -STO on Si. The dimension of the scale bar is 1 nm.

Cited from “Creation of a two-dimensional electron gas at an oxide interface on silicon”

J. W. Park, et al., *Nature Communications*, vol. 1, pp. 94, (2010).

Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: Nature Communications, copyright (2010).

ToF-ERDA (Time of Flight Elastic recoil Detection Analysis)

飛行時間 反跳散乱分析法

❖ 薄膜積層の軽元素プロファイル定量評価

- ◆ Cl, Br, I のイオンを 1-3 MeV を試料に入射
- ◆ 反跳されるイオンのエネルギーと飛行時間を計測
- ◆ 積層薄膜中の軽元素のプロファイル取得
- ◆ H~V まで定量 ⇒ 新規機能膜評価精度向上

図面使用許諾
未取得

図面使用許諾
未取得

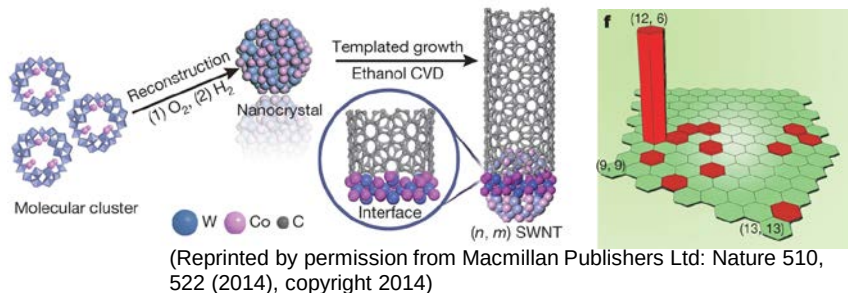
➤ ナノカーボン材料 (CNT)

担当: 大野委員



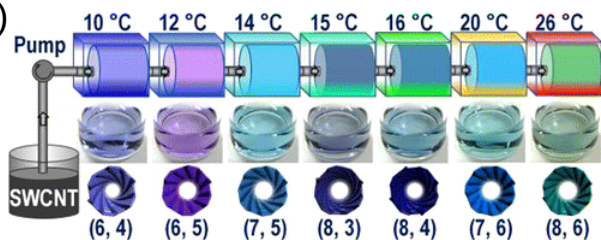
❖ カイラリティ選択成長

- ◆ 2元触媒によるカイラリティの選択成長 (Yang et al., Nature 510, 522 (2014))
- ◆ 有機合成により設計されたキャップ構造を用いた選択成長 (Sanchez-Valencia et al., Nature 512, 61 (2014))

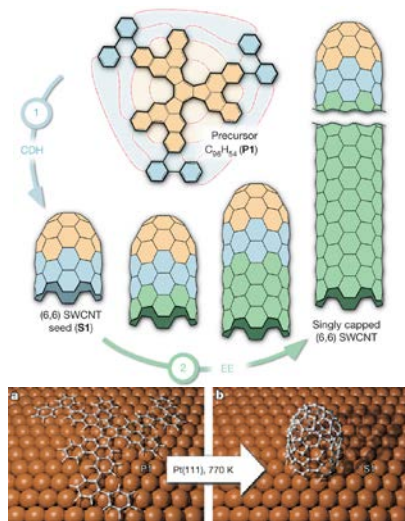


❖ 分離技術

- ◆ クロマトグラフィーによる高速・大量分離 (Liu et al., Nano Lett. 13, 1996 (2013))



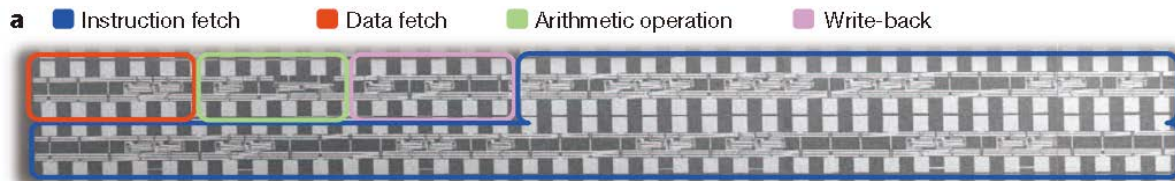
(Reprinted with permission from Nano Lett. 13, 1996 (2013). Copyright 2013 American Chemical Society)



(Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: Nature 512, 61 (2014), copyright 2014)

❖ 集積化技術

- ◆ 電気破壊法により高効率で金属CNTを除去 (半導体CNT:99.997%)
→CNT Computer (178 Tr) の実現 (Shulaker et al., Nature 501, 526 (2013))



(Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: Nature 501, 526, 61 (2013), copyright 2013)

➤ 二次元材料(グラフェン・TMDC)

担当: 佐藤委員



最近の注目トピック

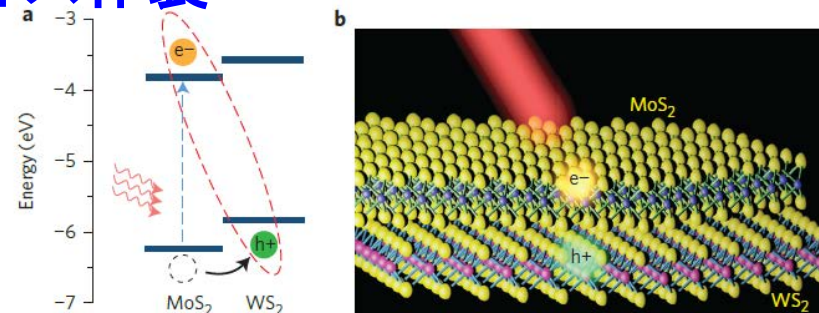
❖ 異種二次元材料の積層によるデバイス作製

- ◆ n-MoS₂, p-WSe₂ 積層による極薄PN接合の形成ーフォトディテクタ等に応用

(Lee et al, Nature Nanotechn. 9, 676 (2014), Hong et al, Nature Nanotechn. 9, 682 (2014))

- ◆ グラフェン-MoS₂ 積層によるショットキーダイオード作製。10⁴A/cm²程度の順方向電流

(Moriya et al., Appl. Phys. Lett. 105, 083119 (2014))

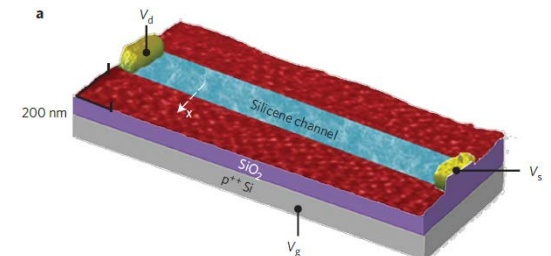


(Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: Nature Nanotechnology 9, 676 (2014), copyright 2014)

❖ シリセン

- ◆ シリセンを利用して世界で初めてトランジスタ作製。グラフェンの特性で、移動度は100cm²/Vs程度

(Tao et al., Nature Nanotechnology. (2015) DOI: 10.1038/NNANO.2014.325)

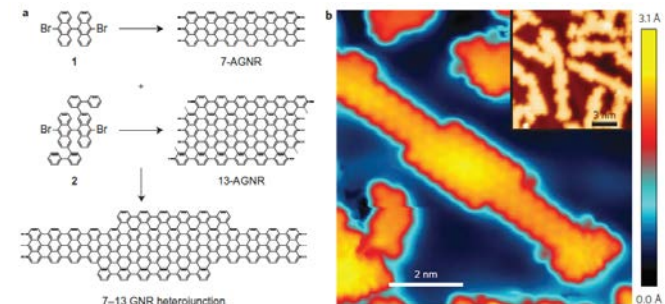


(Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: Nature Nanotechnology DOI: 10.1038/NNANO.2014.325, copyright 2015)

❖ グラフェンナノリボンヘテロ接合

- ◆ 2つの異なる前駆体を利用し、幅、電子状態が異なる2つのナノリボン接合体の合成に成功
新たなデバイス材料としての可能性

(Chen et al., Nature Nanotechnology 10, 156–160 (2015))



(Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: Nature Nanotechnology 10, 156 (2015), copyright 2015)

STRJ WS: March 6, 2015, WG13 ERM

➤ ナノカーボン配線材料（グラフェン、CNT）

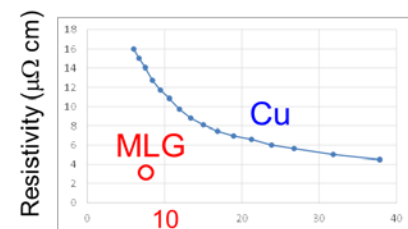
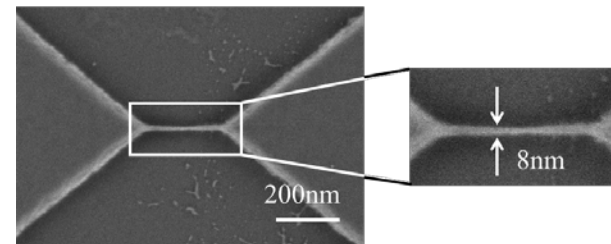
担当：酒井委員

サブタイトル：最近の進展とITRS2014改訂への注目点

❖ 極微細幅(8nm)でCuを超える 低抵抗特性を多層グラフェンで実証

- ◆ インターカレーションした多層グラフェンにより、8nm幅でCuを下回る低抵抗(最小3.2 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$)を実証。

(Kondo et al., IITC2014 (2014))

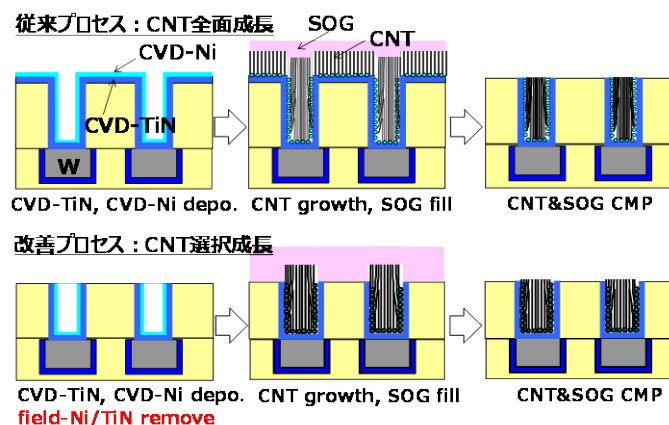


MPU/ASIC Metal Half Pitch (nm)

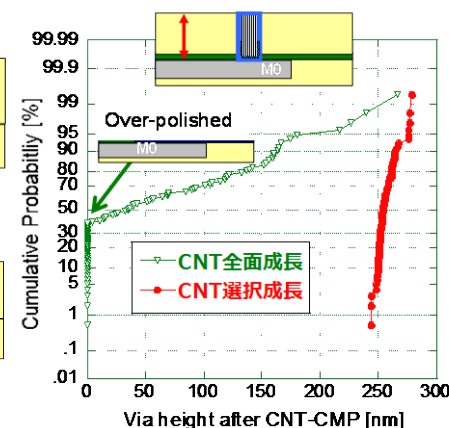
❖ 300mmSi上で、全面均一なCNT ビア形成プロセスを開発

- ◆ CNTのビア内選択成長プロセス開発により、300mmSi基板上で全面均一なCNTビア形成を実証。

(Isobayashi et al., ADMETA 2014 (2014))



CNTビア部の高さ分布測定結果



➤ パッケージング & 実装

➤ 最近の傾向

- ✓ 3D実装: 放熱、層間接続が技術的な課題として取り上げられている
- ✓ 2.1D、2.5D実装: 微細配線形成に関して多くの報告がなされている

➤ 3D化技術トピックス

✓ イメージングデバイス

Sensor-Logic Array間を貼り合わせ後、
TSV一括接合により、高速、低消費電力化を実現

図面許諾未取得

CMOS Image Sensor cross section TSV
(Advanced Packaging
June. 2014, Yole Development)

✓ ロジック + メモリー積層

CNTによるトランジスタ形成、積層間接合による
高放熱・高速駆動を実現

図面許諾未取得

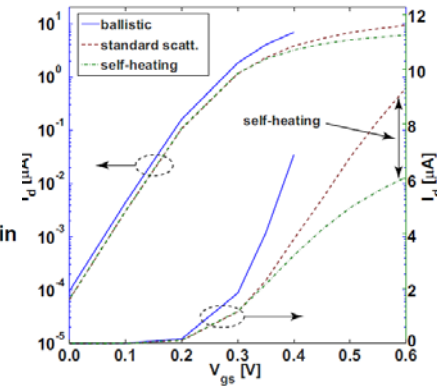
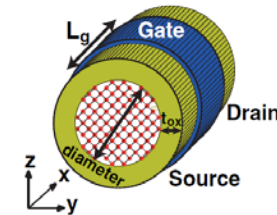
Logic-Memory-Memory-Logic 4層スタック構造
<http://news.stanford.edu/pr/2014/pr-high-rise-chip121514.html>

STRJ WS: March 6, 2015, WG13 ERM

モデリング & シミュレーション

非平衡電子/非平衡フォングリーン関数法による ナノワイヤFETの自己発熱効果解明

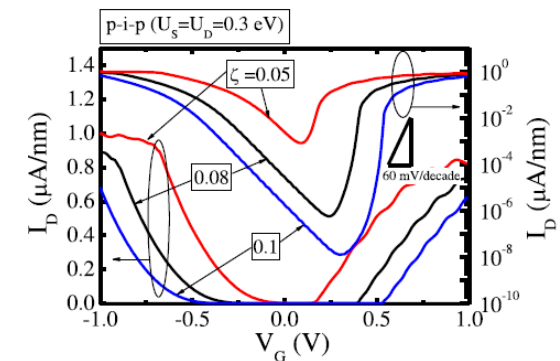
- ・電子系、フォノン系を対等に非平衡グリーン関数で記述
- ・フォノン系を平衡状態と近似する従来の手法では不可能な自己発熱効果の解明
- ・1万5千以上の原子からなるナノワイヤFETへの適用
- ・ホットスポットの形成(自己発熱効果)による電子-フォノン結合の増大
→オン電流が50%程度減少



R. Rhyner et al., Phys. Rev. B
89, 235311 (2014)
©2014 American Physical
Society

グラフェンにおける歪み誘起擬似磁場を用いた低S値 FETの提案

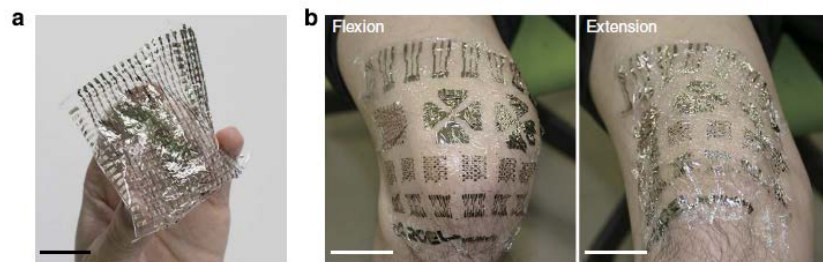
- ・ソース/ドレイン領域を無歪み、チャネル領域を歪みグラフェンとする構造
- ・歪み/無歪み界面に生じる擬似磁場の発生をFETの制御に利用
- ・歪み領域でのディラック点のシフトにより、無ギャップ状態にも係わらずバンド間トンネルFETに類似の機構が可能→10%以下の歪みで、室温でSS~25mV/decadeが4桁の電流の増加で可能



S. Souma et al., Appl. Phys. Lett.
104, 213505 (2014)
© 2014 American Institute of
Physics

❖ 全印刷プロセスで作成した 軽量プラスチック電子デバイス

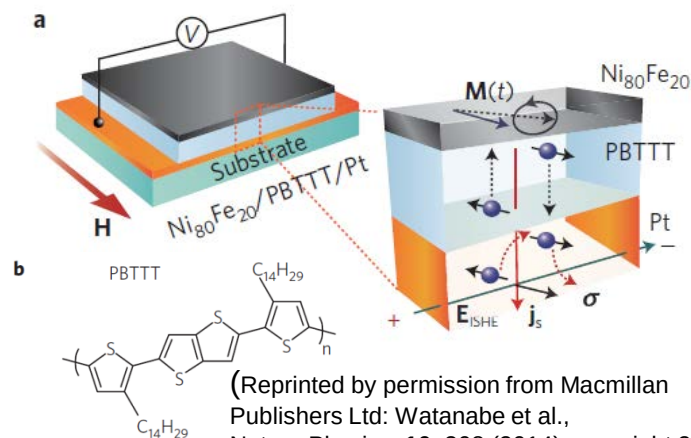
- ◆ 厚さ1 μm 、重量2 g/m^2 の超軽量プラスチック箔上に、オール印刷プロセスによって、大面積有機半導体デバイス群の作製に成功。



(Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: Fukuda et al., Nature Commun., 5, 4147 (2014), copyright 2014)

❖ 半導体ポリマーでのスピン流観測

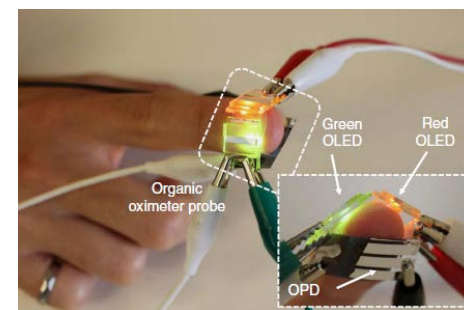
- ◆ 強磁性体($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$)／半導体ポリマー(PBTTT)／非磁性体(Pt)の3層構造を作製し、強磁性共鳴を用いたスピンプンピングによって、PBTTT内のポーラロンが数百nmに渡って、スピン流を輸送できることを実証。



(Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: Watanabe et al., Nature Physics 10, 308 (2014), copyright 2014)

❖ 全有機光電センサーによる ウェアラブルバイオ計測

- ◆ OLEDと有機フォトダイオードを指に巻き付けたウェアラブルデバイスを開発。血中酸素のモニタリングを高精度で実現。



(Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: Locher et al., Nature Commun. 5, 5745 (2014), copyright 2014)

最近の進展

❖ 欧州MARINA (Managing Risk of Nanomaterials,2011-15):

試験サンプルの均質化と安定化、ナノマテリアルの特性評価と分散についてのプロトコルを完成

❖ 欧州FP7の後継フレームワークプログラムHorizon 2020

2014年1月開始

❖ 日本バイオアッセイ研究センター

13週間多層カーボンナノチューブ吸入曝露実験 気管支肺胞洗浄液中の炎症パラメータの上昇が $0.2\text{mg}/\text{m}^3$ で観察され、この濃度が最小有害作用量であった。

❖ 国立医薬品食品衛生研究所

MWCNTを分散する方法(Taquann法)と独自のカーボンナノチューブ吸入曝露装置を開発

❖ Oberdorster教授 東京大学講演(2014年4月4日)

3Dプリンターの安全性問題を取り上げた。

まとめ

- WG13(ERM)のミッションは、各ITWG、フォーカストピック（FT)の抱える「困難な技術課題」を解決する可能性のあるERMについて、その技術的・時間的要請を明らかにすることである。
- ITRS2015の執筆は、来年早々から始まるが、含めるトピックについては、現在米国ERMの新リーダーのHerr氏などと議論中。
- 日本のWG13としては、本日紹介した新しい動き、また独自活動であるヒアリングなどから得た情報から、ITRS2015へ含める内容について提案していく