

イノベーションエンジンとしてのERM

秋永広幸 (産総研: リーダー)
酒井忠司 (東芝: サブリーダー)、佐藤信太郎 (産総研: 幹事)
青井信雄 (パナソニック)、栗野祐二 (慶應大)、内田健 (東工大)、
大野雄高 (名大)、大森克実 (TOK)、苅谷隆 (イビデン)、
佐々木秀幸 (東芝ナノアナリシス)、品田賢宏 (早大)、
杉山直之 (東レリサーチ)、関谷瑞木 (産総研)、
戸所義博 (奈良先端大)、富岡泰秀 (産総研)、野田啓 (京大)、
松倉文礼 (東北大)、松澤伸行 (ソニー)、宮本良之 (産総研)、
由上二郎 (ルネサスエレ)、和田恭雄 (東洋大)、

| | |
|-------|--|
| CNT | Carbon Nanotube |
| CTE | Coefficient of thermal expansion |
| DSA | Directed Self Assembly |
| ERD | Emerging Research Device (WG) |
| ERM | Emerging Research Material (WG) |
| ESH | Environment, Safety and Health |
| EUV | Extreme Ultra-Violet |
| FEFET | Ferroelectric Field Effect Transistor |
| FEP | Front End Process (WG) |
| GNR | Graphene Nano Ribbon |
| ILD | Inter Layer Dielectrics |
| NEMS | Nano Electro Mechanical Systems |
| PIDS | Process Integration, Devices, and Structures |
| SAM | Self-Assembled Monolayer |
| STT | Spin-Transfer Torque |

➤ ERMのミッション

■ ミッション:

各ITWG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

➤ ERMのスコープ

- ERD材料 (Memory用材料、Logic用材料)
- 低次元材料 (Low Dimensional Materials: ナノ微粒子、ナノワイヤ、CNT、グラフェン他)
- 界面 & ヘテロ界面
- スピン材料 (Spin Materials)
- 複合金属酸化物 (Complex Metal Oxides)
- 機能的(巨大)分子 (Macromolecules)
- 制御された自己組織化材料 (Directed self-assemble)
- リソグラフィ材料 (Directed self-assemble材料を含む)
- FEP、Interconnect、ASP材料
- 確定的ドーピング (Deterministic doping)
- ESH (Environment, Safety, and Health)
- 計測 (Metrology)
- シミュレーション (Simulation)
- その他

➤ ERMのスコープ

| 材料 | ERDメモリ | ERDロジック | リソグラフィ | フロントエンド プロセス | 配線 | アッセンブリ &パッケージ ング |
|---------------------------|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| 低次元材料 | NEMSメモリ | ナノチューブ ナノワイヤ グラフェン他 炭素材料 | High-index Immersion liquid | | ナノチューブ 金属ナノワイ ヤ | 電氣的応用 熱応用 機械的応用 |
| 機能性分子 (巨大分子) | 分子メモリ | 分子デバイス | レジスト インプリント用 ポリマー | 新規洗淨 選択エッチング 選択デポ | 低誘電率ILD | ポリマーの電氣 的、熱的、機 械的性能制御 |
| 自己組織化材 料 | | | リソグラフィ内パタ ーン形成、超高 精度寸法制御 | 選択エッチング 選択デポ 確定的ドーピ ング | 選択エッチング 選択デポ | 高性能キャパ シタ |
| スピン材料 | STT-RAM | スピン依存伝導 強磁性半導体 トンネル絶縁体 | | | | |
| 複合金属酸化 物 (遷移金属 酸化物) | 1Tr-FeRAM Redox RAM | マルチフェロ イック材料 新規相転移 | | | | 高性能キャパ シタ |
| 接合とヘテロ 界面 | 電氣的、スピン 伝導の電極と 接合界面 | 電氣的、スピン 伝導の電極と 接合界面 | | | 電極と接合界 面 | |

➤ 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に成長。

| Sharing roles | Members |
|--------------------------------------|---|
| Introduction (Scope, etc) | 全員(20名) |
| Emerging Research Device Material | 栗野(慶大) 酒井(東芝) 内田(東工大) 大野(名大) |
| | 佐藤(産総研) 和田(東洋大) 松澤(ソニー) 野田(京大) |
| | 松倉(東北大) 富岡(産総研) 杉山 (東レリサーチ) 秋永(産総研) |
| Lithography Materials | 戸所(奈良先端大) 由上(ルネサスエレ) 大森(TOK) 品田(早大) |
| Emerging FEP and PIDS Materials | 由上(ルネサスエレ) |
| Interconnects | 青井(パナソニック) 栗野(慶大) 酒井(東芝) 佐藤(産総研) |
| Assembly and Package | 苅谷(イビデン) 佐藤(産総研) 大野(名大) |
| Environment, Safety, and Health | 関谷(産総研) |
| Metrology | 佐々木 杉山 (東芝ナリアナリス) (東レリサーチ) |
| Modeling and Simulation | 宮本(産総研) |

Hiro Akinaga, Jesus de Alamo, Dimitri Antoniadis, Nobuo Aoi, Masakazu Aono, Koyu Asai, Asen Asenov, Yuji Awano, David Awschalom, Rama Ayothi, Kaustav Banerjee, Chris Bencher, Agnès Barthélémy, Daniel-Camille Bensahel, Kris Bertness, Stacey Bent, Mikael Björk, August Bosse, Bill Bottoms, George Bourianoff, Rod Bowman, Alex Bratkovski, Robert Bristol, Ahmed Busnaina, Jeff Calvert, John Carruthers, Bernie Capraro, Chris Case, David Chan, An Chen, Eugene Chen, Zhihong Chen, Joy, Cheng, Toyohiro Chikyow, Byung Jin Cho, U-In Chung, Jonathan Coleman, Luigi Colombo, Johann Coraux, Hongjie Dai, Ralph Dammel, Juan DePablo, Anton Devilliers, Thibaut Devolder, B. Dieny, Jean Dijon, Athanasios Dimoulas, Catherine Dubourdieu, John Ekerdt, Tetsuo Endoh, James Engstrom, Thomas Ernst, Michael Flatte, Glenn Fredrickson, Gregory Fuchs, Satoshi Fujimura, C. Michael Garner, Emmanuel Giannelis, Niti Goel, Michael Goldstein, Suresh Golwalkar, Guido Groeseneken, Roel Gronheid,

Wilfried Haensch, Cliff Henderson, Daniel Herr, Hiro Hibino, Marc Hillmyer, Bill Hinsberg, Toshiro Hiramoto, Judy Hoyt, Greg Hughes, Jim Hutchby, Harold Hwang, Hyunsang Hwang, K. Inoue, Takamasa Ishigaki, Saori Ishizu, Nobuyuki Ishiwata, Yoshio Ishiwata, Kohei Ito, Taisuke Iwai, Ajey Jacob, Raj Jami, David Jamieson, Ali Javey, James Jewett, Berry Jonker, Xavier Joyeux, Yeon Sik Jung, Ted Kamins, Zia Karim, Takashi Kariya, Masashi Kawaski, Leo Kenny, Richard Klein, Philip Kim, Sang Ouk Kim, Michael Kozicki, Mark Kryder, Roger Lake, Steve Lange, Sean King, Atsuhiko Kinoshita, Gabriel Kotliar, Victor Krivokapic, Mark Kryder, Yi-Sha Ku, Hiroshi Kumigashira, Nabil Laachi, Jang Ein Lee, Yi Jun Lee, Harry Levinson, Chenhsin Lien, Liew Yun Fook, Lloyd Litt, Scott List, Chi Chun Liu, Wei-Chung Lo, Louis Lome, Gerry Lucovsky,

Mark Lundstrom, Yale Ma, Allan MacDonald, Blanka Magyari-Kope, Prashant Majhi, Arun Majumdar, Francois Martin, Lane Martin, Witek Maszara, Jennifer McKenna, Fumihiko Matsukura, Nobuyuki Matsuzawa, Claudia Mewes, Dan Millward, Yoshiyuki Miyamoto, Stephane Monfray, Andrea Morello, Mick Morris, Azad Naeemi, Boris Naydenov, C Gomez-Navarro, Paul Nealey, Kwok Ng, Fumiyuki Nihey, Mizuhisa Nihey, Yoshio Nishi, Kei Noda, Yaw Obeng, Chris Ober, Katsumi Ohmori, Yutaka Ohno, Laurent Pain, Ray Pearson, Jeff Peterson, Er-Xuan Ping, Alexei Preobrajenski, Victor Pushparaj, Ganapati Ramanath, Ramamoorthy Ramesh, Nachiket Raravikar, Ben Rathsack, Curt Richter, Heike Riel, Dave Roberts, Sven Rogge, Jae Sung Roh, Ricardo Ruiz, Thomas Russell,

Tadashi Sakai, Gurtej Sandhu, Krishna Saraswat, Hideyuki Sasaki, Mitusru Sato, Shintaro Sato, Barry Schechtman, Thomas Schenkel, Jan Seidel, Mizuki Sekiya, Sadasivan Shankar, Matthew Shaw, Takahiro Shinada, Michelle Simmons, K. Singer, Kaushal K. Singh, Jon Slaughter, Mark Slezak, Bruce Smith, Tom Smith, Mark Somervell, Mark Stiles, Tsung-Tsan Su, Maki Suemitsu, Naoyuki Sugiyama, Chun-Yung Sung, Raja Swaminathan, Michiharu Tabe, Hidenori Takagi, Shin-ichi Takagi, Koki Tamura, Shinji Tarutani, Raluca Tiron, Yoshihiro Todokoro, Yasuhide Tomioka, Peter Trefonas, Ming-Jinn Tsai, Wilman Tsai, Vincent Tung, King Tu, Mark Tuominen, Ken Uchida, Marc Ulrich, Philippe Vereecken, Yasuo Wada, Vijay Wakharkar, Kang Wang, Weie Wang, Zhong Lin Wang, Rainer Waser, Jeff Welser, Lars-Erik Wernersson, Andrew Whittaker, Grant Willson, C.P. Wong, H.S. Philip Wong, Dirk Wouters, Wen-Li Wu, Hiroshi Yamaguchi, Toru Yamaguchi, Chin-Tien Yang, Kenji Yoshimoto, Yi-Sha Yu, SC Zhang, Yuegang Zhang, Jiro Yugami, Victor Zhirnov, Paul Zimmerman, Chuck Zmanda

Table ERM1 Emerging Research Material Technologies Difficult Challenge (2011-

| Difficult Challenges 2011-2018 | Summary of Issues |
|---|--|
| Achieving desired properties in integrated structures | <p>Achieving high hole mobility in III-V materials</p> <p>Achieving high electron mobility in Ge with low contact resistivity</p> <p>Wafer scale growth of high quality graphene with desired process conditions (ex. Low temperature growth on metal or insulator)</p> <p>Achieving a bandgap in graphene</p> <p>Synthesis of CNTs with controlled diameters, chirality and site-density</p> <p>Multiferroic with Curie temperature >400K and high remnant magnetization to >400K</p> <p>Ferromagnetic semiconductor with Curie temperature >400K</p> <p>Wafer scale growth of high quality graphene with desired process conditions (ex. Low temperature growth on metal or insulator)</p> <p>Synthesis of CNTs with controlled diameters and site-density</p> <p>Electric control of the electron correlation, ex. Mott transition, Spin dynamics</p> |
| Characterize and control coupled properties of embedded materials and their interfaces | <p>High hole mobility in III-V materials with unpinned Fermi level and ohmic contact</p> <p>High electron mobility in Ge with unpinned Fermi level and ohmic contact</p> <p>High mobility in nanowires with unpinned Fermi level</p> <p>Graphene with a bandgap, high mobility, and unpinned Fermi level at dielectric interfaces</p> <p>Complex metal oxides with unpinned Fermi levels</p> <p>Electric control of oxygen vacancies, ex. the distribution and the charged state</p> <p>Nanoscale observation of the magnetic domain structure, for example, the domain in STT-RAM under the magnetic field, i.e., the dynamic operation</p> <p>Characterization of electrical properties of molecule / metal contact interfaces (i.e. Pentacene/Au)</p> <p>Characterization of electrical properties of embedded nano contact interfaces (i.e. CNT/Metal)</p> <p>Characterization for density of dislocations and anti-phase boundary generating interface between Ge/III-V channel materials and Si</p> |
| Identifying manufacturable methodologies to enable deterministic fabrication with required property control | <p>Dopant placement and activation i.e. deterministic doping with desired number at precise location for V_{th} control and S/D formation in Si as well as alternate materials</p> <p>HVM compatible methods to place dopants in predetermined positions with minimal damage to the semiconductor</p> <p>Controlled fabrication of nanostructured materials and devices (ex. Graphene nanoribbon, graphene nanomesh)</p> <p>Controlling edge-termination / molecular absorption to graphene to achieve required bandgap</p> <p>Methods to place carbon nanotubes in predetermined locations</p> <p>Assembly of CNTs or graphene into predetermined arrays and locations</p> <p>HVM methods to deposit graphene on dielectric surfaces</p> |
| Ability to control defects in material processing | <p>Methods to reduce directed self assembly based defects to <0.01cm⁻² for litho extension</p> <p>Control defects in carbon nanotubes</p> <p>Control defects in growth and processing of graphene</p> <p>Control concentration and locations of cation and anion defects in complex metal oxides</p> <p>Control precipitation in ferromagnetic semiconductors</p> <p>Characterization for density of dislocations and anti-phase boundary generating interface between Ge/III-V channel materials and Si</p> |
| Control of Self-assembly processes to achieve desired properties reproducibly | <p>Simultaneously achieve required feature sizes in predetermined arrays with low anneal time, low defect density</p> <p>Registration of self-assembled patterning materials in desired locations with control of geometry, conformation, interface roughness, and defects</p> <p>DSA application to the realistic device pattern with reduced pattern roughness and defects</p> <p>Decrease of DSA patterning process time</p> |

Table ERM1 Emerging Research Material Technologies Difficult Challenge (2019-



| Difficult Challenges 2019-2026 | Summary of Issues |
|---|--|
| <i>Electric field control of the electrochemical reaction in a nanoscaled device and at an interface</i> | <p>Complex Oxides: Control of oxygen vacancy formation at metal interfaces and interactions of electrodes with oxygen and vacancies</p> <p>Switching mechanism of atomic switch. Improvements in switching speed, cyclic endurance, uniformity of the switching bias voltage and resistances both for the on-state and the off-state.</p> <p>Nano-Carbon / metal functional junction, such as new switch, by using electrochemical reactions</p> <p>Molecular device fabrication with precise control using electrochemical reactions</p> |
| <i>Metrology to characterize structure and properties of materials at the nanometer scale</i> | <p>III-V: Correlation between antiphase domains and electrical properties</p> <p>Development of the method to evaluate the validity of the measurement result for each ERM</p> <p>Electrical and thermal properties of each carbon nanotube</p> <p>Nanowire characterization of mobility, carrier density, interface states, and dielectric fixed charge effects</p> <p>Graphene mobility and carrier concentration</p> <p>Complex metal oxide characterization of carrier density, dielectric and magnetic properties</p> <p>Spin materials: characterization of spin, magnetic and electrical properties and correlation to nanostructure</p> <p>Characterization of electrical properties of embedded nano contact interfaces (ex. CNT/Metal)</p> <p>Evaluating material properties in realistic device structures</p> <p>Nanoscale observation of the magnetic domain structure, for example, the domain in STT-RAM under the magnetic field, i.e., the dynamic operation</p> |
| <i>Metrology to characterize defects at the nanometer scale with atomic resolution</i> | <p>Antiphase domains within III-V semiconductors and their interfaces with high κ dielectrics</p> <p>CNT vacancy and interstitial ordering around dopants</p> <p>Nanowires: Characterization of vacancies, interstitials and dopants within the NW and at interfaces to dielectrics</p> <p>Graphene: Characterization of edge defects, vacancies and interstitials within the material and at interfaces</p> <p>Metal nanoparticles: Native oxide interface and crystal defects in the nanoparticle</p> <p>Complex Oxides: Location of oxygen vacancies and the valence of the metal ions</p> <p>Spin materials: characterization of vacancies in spin tunnel barriers, and defects within magnetic materials and at their interfaces</p> <p>Evaluating material properties IN realistic nm scale devices</p> <p>Characterization of edge structure and termination with atomic resolution (ex. Graphene nano ribbon)</p> |
| <i>Accurate multiscale simulation for predictions of unit processes the resulting structure, properties and device performance.</i> | <p>Linkage between different scales in time, space, and energy bridging non-equilibrium phenomena to equilibrium phenomena</p> <p>Transferable simulation tools for many kinds of materials</p> <p>Development of platform for different simulation tools, such as TCAD and ab-initio calculations</p> <p>Nanowires: Simulation of growth and defect formation within and at interfaces</p> <p>CNTs: Simulation of growth and correlation to bandgap</p> <p>Graphene: Simulation of synthesis, edge defects, vacancies, interstitials, interfacial bonding, and substrate interactions.</p> <p>Nanoparticles: Simulation of growth and correlation to structure and defects</p> <p>Complex Oxides: Multiscale simulation of vacancy formation, effect on metal ion valence state and effect of the space charge layer</p> <p>Spin: Improved models for multiscale simulation of spin properties within materials and at their interfaces.</p> |
| <i>Fundamental thermodynamic stability and fluctuations of materials and structures</i> | <p>Geometry, conformation, and interface roughness in molecular and self-assembled structures</p> <p>Device structure-related properties, such as ferromagnetic spin and defects</p> <p>Dopant location and device variability</p> |

➤ ERMの挑戦的課題 (2011～2018)

1. 集積化された構造において所望の機能を発現させること

- ✓III-V族半導体、Ge半導体における高い移動度
- ✓ウェハ寸法で良質のグラフェンを形成すること
- ✓400K以上の強磁性転移温度を持つ磁性半導体
- ✓電子相関(モット転移等)の電界制御

2. 埋め込まれた構造や界面にて複合機能の評価と制御を行うこと

- ✓III-V半導体、Ge半導体におけるフェルミレベル(ピニング)の制御
- ✓CNT / 金属界面、分子 / 金属界面におけるコンタクト抵抗の制御
- ✓酸化物材料における酸素欠陥分布とその荷電状態の電界制御

3. 所望の特性を引き出す確定的(決定論的)製造技術を開発する方法論を確立すること

- ✓High-volume manufacturing (HVM) に適用可能で、低ダメージの決定論的ドーピング技術
- ✓位置と個数を精密に定める決定論的ドーピング技術を用いたVthとS/Dの制御
- ✓端面終端や分子吸着によるグラフェンの特性制御

4. 材料合成の過程で欠陥を制御すること

- ✓DSAリソ材料における欠陥密度の低減(10nm以上のDefect密度が <0.01 個/cm²)
- ✓酸化物材料におけるカチオン、アニオン欠陥の制御
- ✓強磁性半導体における偏析制御
- ✓III-V族半導体、Ge半導体チャネルにおける界面での転移や逆位相境界密度の低減

5. 所望の特性を再現性高く実現する自己組織化現象を制御すること

- ✓幾何的形狀、形態、界面粗さ、欠陥を制御した材料の自己組織化による精密配置

➤ ERMの挑戦的課題 (2019～2026)

6. ナノデバイスや界面における固体化学的反応の精密な電界制御を可能とすること

- ✓酸化物材料と金属界面における欠陥と界面反応の電界制御
- ✓原子スイッチの速度、買換回数、信頼性と抵抗値の高性能化
- ✓固体化学的手法を用いたナノサイズ分子デバイスの形成

7. ナノメートル領域における材料の構造と特性の評価

- ✓III-V族半導体: 逆位相境界と電気特性の相関
- ✓ナノワイヤーの移動度、キャリア濃度、界面欠陥密度、絶縁膜の固定電荷の影響の評価
- ✓CNT / 金属界面等、埋め込まれた界面における電気的特性の評価
- ✓(ナノメートルサイズの)実デバイスにおける特性の評価

8. 原子レベル分解能での欠陥評価

- ✓グラフェンナノリボンにおける端面とその終端状態の原子レベル評価
- ✓微粒子における自然酸化膜界面や欠陥の評価
- ✓スピン材料: トンネル絶縁膜内の欠陥、強磁性金属 / 絶縁膜界面の評価
- ✓CNT / 金属界面等、埋め込まれた界面における電気的特性の評価

9. 精密なマルチスケール計算による構造、物性、デバイス特性の予測

- ✓非平衡現象から平衡状態まで包括的にシミュレーションする為に、空間と時間、およびエネルギーの異なるスケールをつなぐこと
- ✓様々な材料に適用できるシミュレーションツールの開発
- ✓TCADと第一原理計算など異なるシミュレーションツールの連結

10. 材料そのものの熱安定性と揺らぎの制御

- ✓分子材料、自己組織化材料における幾何的形狀、形態、界面粗さの制御

ITRS2011改訂内容と注目点

❖ グラフェンの形成

➤ 形成法として、前回同様、機械的剥離、SiCの高温アニール、CVD、の3つが挙げられている。SiC、CVDの参考文献がアップデートされたが、機械的剥離法や酸化グラフェンを用いた手法の詳細は省略された。

➤ CVDでグラフェンを形成した後、通常はグラフェンを転写するが、新たに転写をしない方法、新たな転写法について言及。

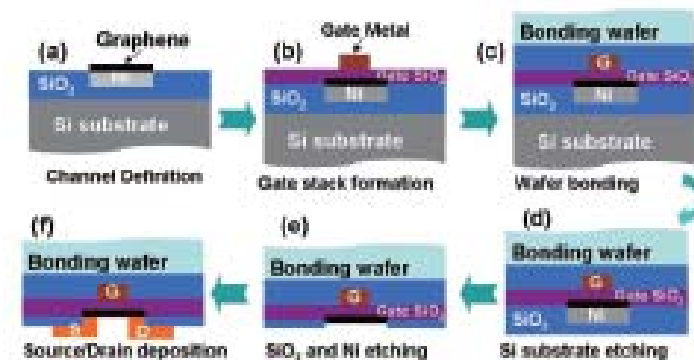


Fig. 2. Process flow for graphene FETs fabrication.

新たなグラフェン転写法

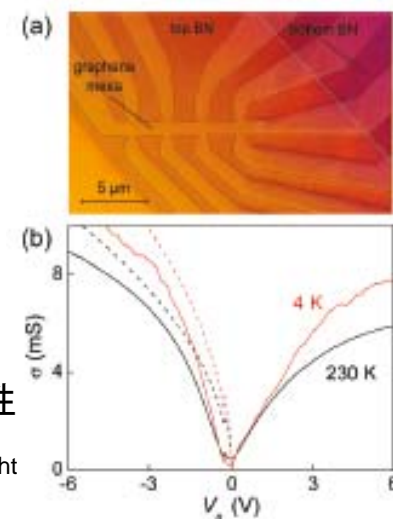
(Reprinted with permission from Wang et al., VLSI Symp. Tech. Dig., p.1 16(2011). Copyright 2011 JSAP)

❖ グラフェンの移動度

- サスペンデッドグラフェンの移動度は240Kで120,000 cm²/Vs。室温付近では、Flexural phononにより移動度は減少する。
- BNに挟まれた剥離グラフェンで、室温で100,000 cm²/V程度。
- SiCグラフェンでは15,000 cm²/Vs、CVDでは16,000 cm²/Vs程度が室温で得られた。

BN/Graphene/BNデバイスとその電気特性

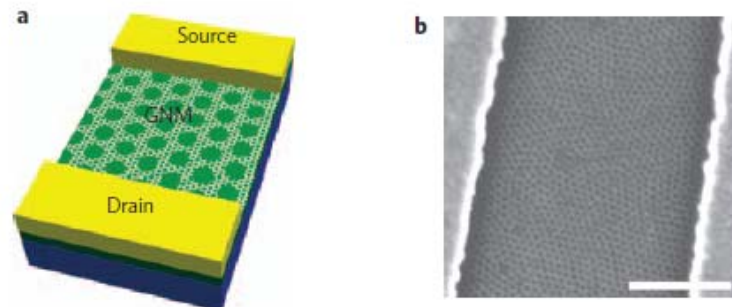
"Reprinted with permission from Mayorov et al., Nano lett. Vol.11, p.2396 (2011) Copyright 2011 American Chemical Society."



ITRS2011改訂内容と注目点

❖ バンドギャップの形成

- ナノリボン化、2層グラフェンに電場を印加する方法に加え、グラフェンに周期的な孔を開ける方法、基板(SiC、BN、MgO)との相互作用を利用する方法などに言及。リボン化においては、エッジの処理が重要な点を指摘。

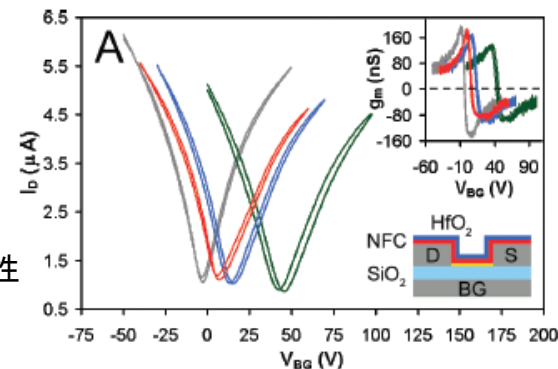


グラフェンナノメッシュデバイス
Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: Bai et al., Nature Nanotechnology, Vol.5, p.190 (2010), copyright 2010

❖ 高誘電率膜の堆積

- 大きな進展は無いが、High-k膜を、Low-kバッファ層を介してALD堆積する方法を紹介。

バッファ層を介してHfO₂膜を堆積したグラフェンランジスタの特性
"Reprinted with permission from Farmer et al., Nano Lett. Vol.9, p.4478 (2009)
Copyright 2009 American Chemical Society."



❖ ドーピング

- 大きなアップデートは無く、異種材料との接触による電荷移動によってドーピングする方法、エッジを修飾することによりドーピングする手法を紹介。
- ピリジン为原料ガスとして、Nドーピンググラフェンを直接合成する方法が新たに言及された。

❖ コンタクトの形成

- コンタクト抵抗に関しいくつかの新たな文献を挙げているが、コンタクト抵抗はまだ高い

CNT FET MATERIALS 改定内容

- Bandgap Control
 - 半導体CNT純度: CVD 95%, 分離 99%
 - 分離CNTの場合、分散剤除去プロセスが必要 ←追加
 - 純度評価技術の開発が必要 ←追加
- Control of Position and Direction
 - CVD: 20~50 aligned CNTs/ μm
 - 分離CNT: ~20 aligned CNTs/ μm ←追加
- Control of Carrier Concentration (Nanotube Doping)
 - 大きな進展なし
 - 新技術: high-k膜界面電荷によるキャリア注入制御
- Gate Dielectric Interface
 - 新技術: 濡れのよい金属(Y, Ti)を酸化する方法 (Y_2O_3 : 5 nm => EOT ~ 1 nm)
- Contact Formation
 - 大きな進展はなし (pMOS: Pd, nMOS: Sc, Y)
 - 新技術: コンタクト付近の電位をhigh-k膜中電荷で変調し低抵抗化

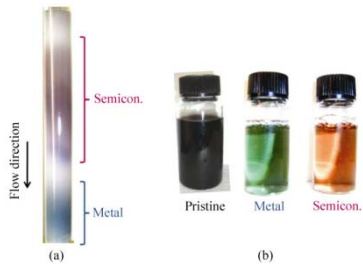
分離技術に進展
→ 主に分離CNT関連
の記述を追加

Bandgap control and Control of position and direction

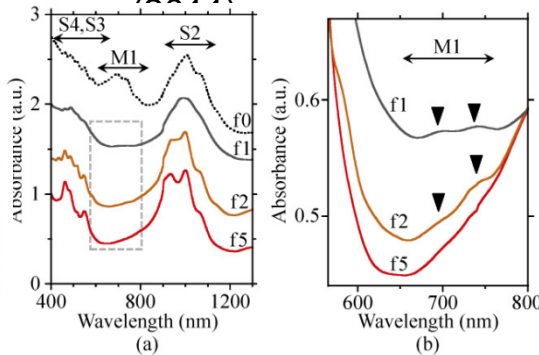
❖ Bandgap Control

高純度半導体/金属分離

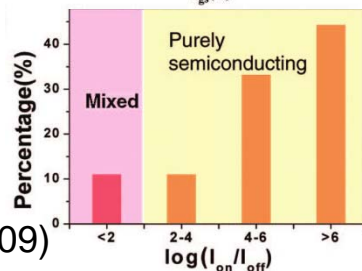
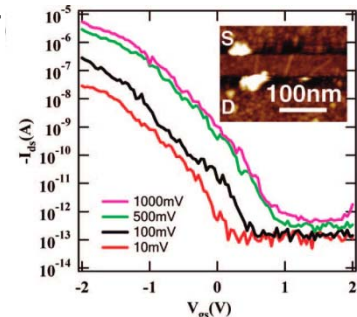
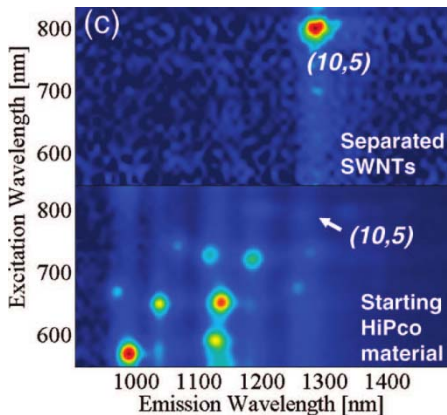
ゲルクロマトグラフィー
半導体 >99 %



Nano Res. 4, 963

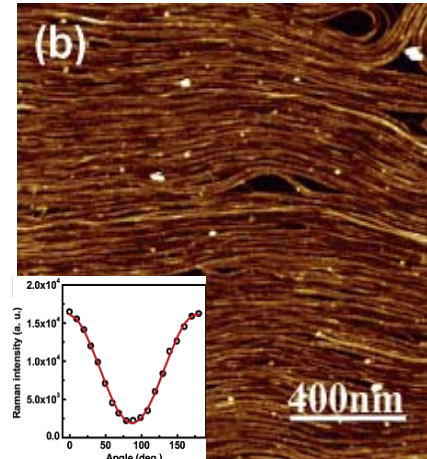


単一カイラリティ分離
>99 %, (10,5) CNT



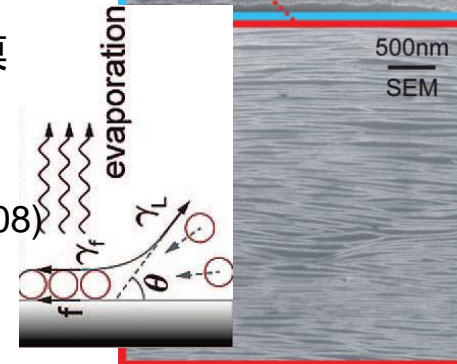
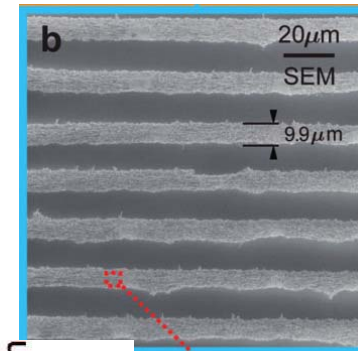
JACS 131, 2454 (2009)

❖ Control of Position and Direction



Langmuir-Blodgett 法
による高密度配向CNT

~50 CNTs/μm
JACS 129, 4890
(2007)



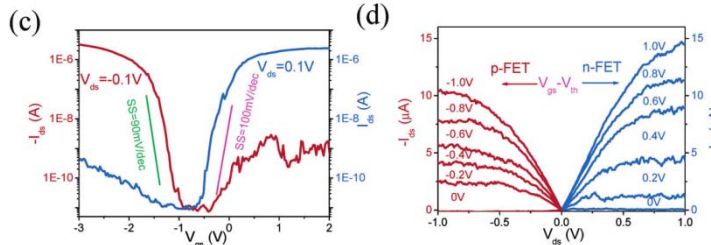
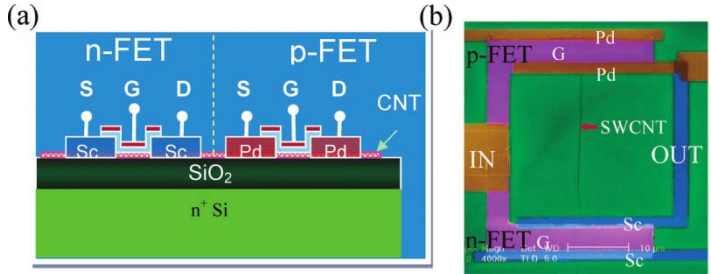
溶液プロセスによる
自己整合・配向CNT膜

半導体CNT, >20
CNTs/μm
ACS Nano 2, 2445 (2008)

Control of Carrier and Formation of Gate Dielectric

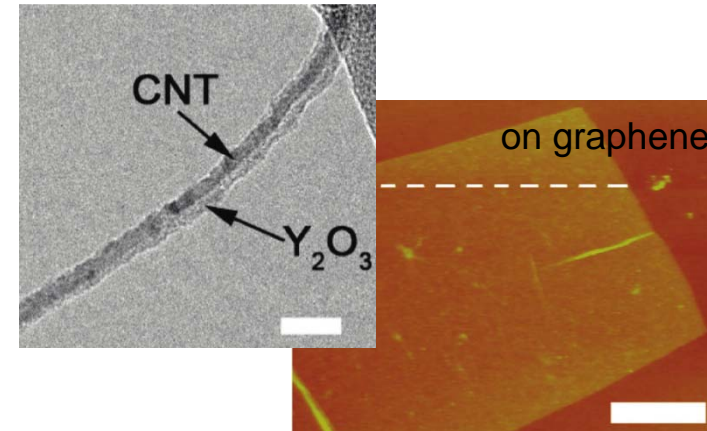
❖ Control of Carrier

Pd電極 → p型
 Sc電極 → n型 ⇒ ほぼ対称なpMOS, nMOS特性を実現



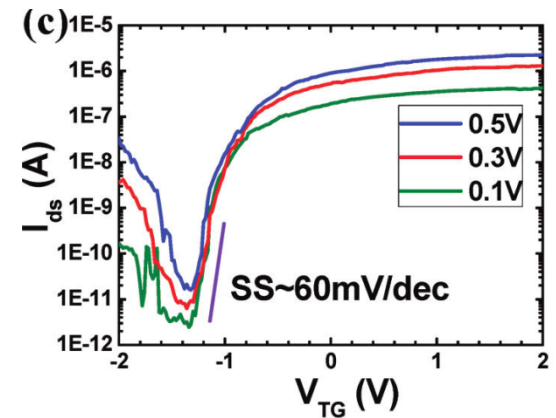
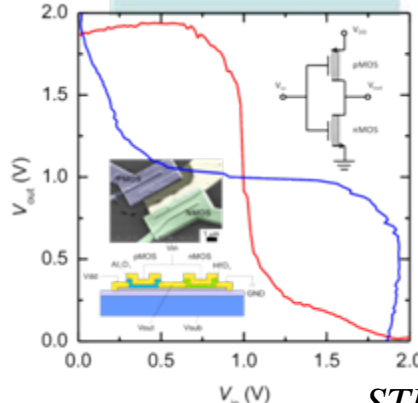
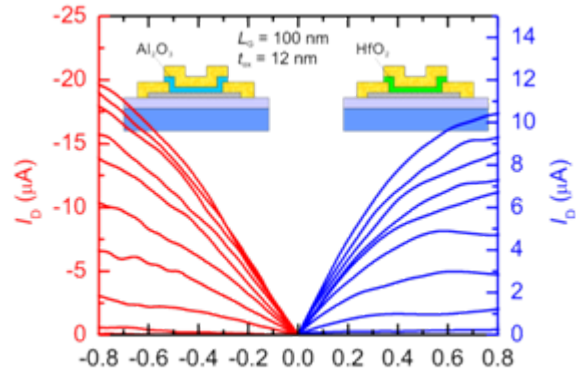
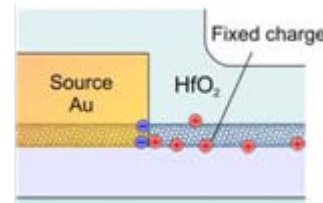
❖ Formation of Gate Dielectric

極薄high-kの均一成膜
 Y_2O_3 : 5 nm (EOT ~ 1 nm)



ゲート絶縁膜界面の固定電荷による
 キャリア注入制御

APEX 3, 105102 (2010)



Nano Lett. 10, 2024 (2010)

➤ スピントロクス材料

❖ スピントロクス材料

強磁性体材料 (不揮発、高スピン偏極、
スピン注入・検出電極)

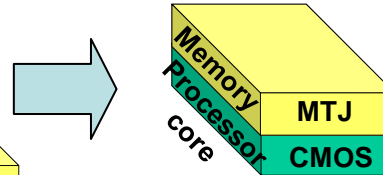
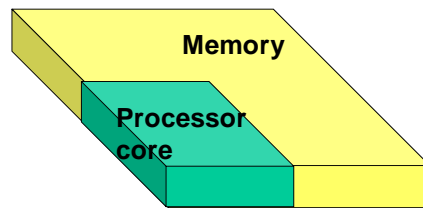
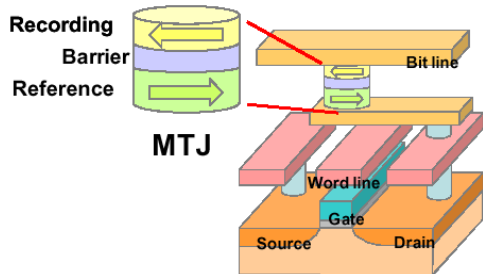
障壁材料 (スピン・フィルタリング)

チャンネル材料 (スピン緩和、スピン輸送)

❖ 磁気トンネル接合 (MTJ) を用いたスピントロクス

SPRAM (spin transfer torque RAM) ... 不揮発・高速・高書き換え耐性

ロジック-イン-メモリ構成 ... 静的消費電力の低減、配線遅延の低減

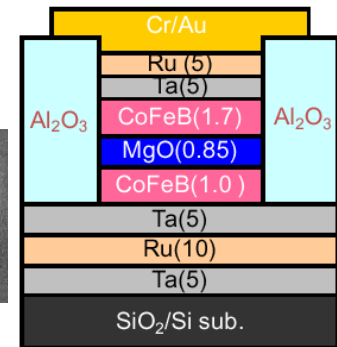
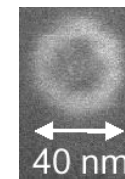


❖ 技術的課題

- 高出力 (TMR比 > 100%)
- 低スイッチング電流 ($I_c < F \mu A$; $F = \text{feature size}$)
- 不揮発性のための高い熱安定性 ($E/k_B T > 40$)
- CMOS BEOLに整合する高い熱耐性 ($T_a > 350^\circ C$; T_a : 熱処理温度)

垂直磁気異方性

CoFeB/MgO/CoFeB MTJ



ITRS2011は2009から大幅な変更は無し

➤ スピントロニクス材料

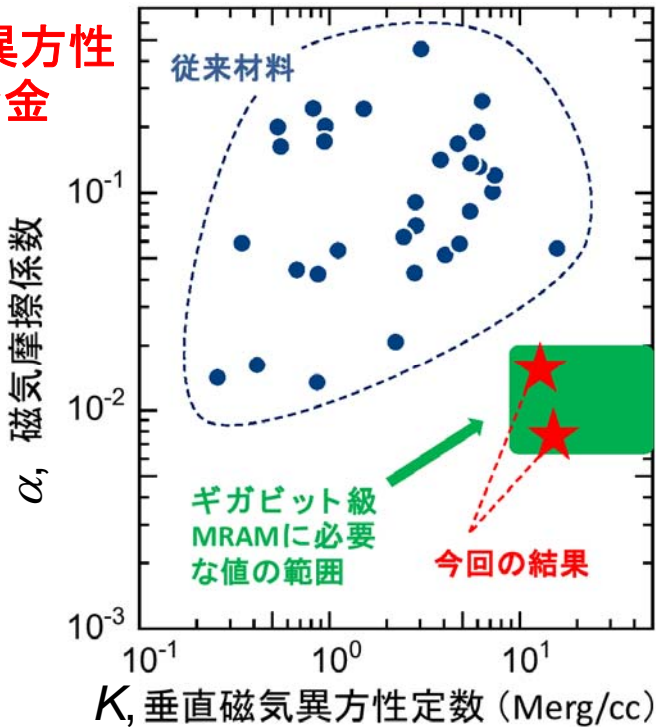
❖ 高磁気異方性 K + 低ダンピング α

熱安定指数: $\Delta \propto K$

スイッチング電流: $I_{C0} \propto \alpha K$

高 Δ & 低 I_{C0} → 高 K & 低 α 材料が必要

垂直磁気異方性
 $Mn_{3-\delta}Ga$ 合金



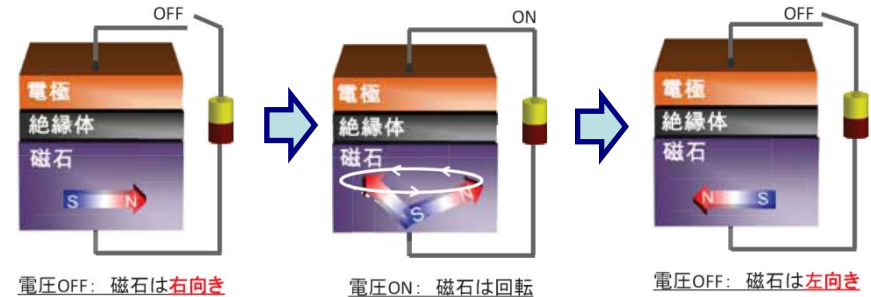
2011年3月23日東北大学プレスリリースより
S. Mizukami *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106**, 117201 (2011).
http://www.wpi-aimr.tohoku.ac.jp/miyazaki_lab/

TMR比向上が課題 (現状で~10% at RT)

Work in Progress - Do not publish

❖ 電圧印加磁化反転

不揮発性素子でDRAM並のスイッチング電力 (SPRAMの1/1000程度) が期待される

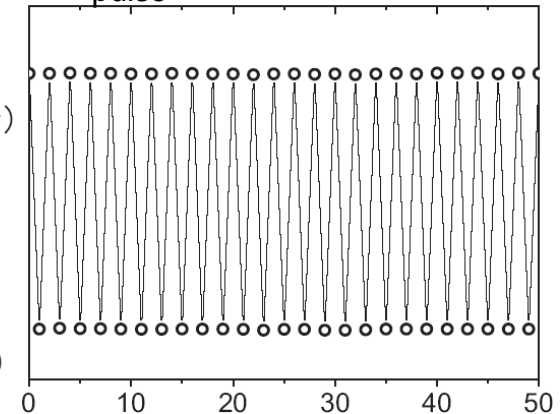


CoFe/MgO MTJ

$V_{pulse} = 1.5 V (0.55 ns)$

高抵抗状態 (磁石は右向き)

低抵抗状態 (磁石は左向き)



電圧印加回数

2011年11月11日大阪大学プレスリリースより
Y. Shiota *et al.*, Nature Mater. **11**, 39 (2012).

<http://www.suzukiylab.mp.es.osaka-u.ac.jp/topics/press2011-11-11.pdf>

4.4. Complex Metal Oxide Materials, interfaces and Superlattices

A major challenge is to control the properties with an external field, for example, modulating and controlling conductivity with an electric field.

2011, Electric field control of the temperature for the Mott (metal–insulator) transition.

Tuning of the Mott (orbital ordering) transition in an electrolyte-gated FET structure with NdNiO_3 as a channel material

4.4.1. Complex oxides for spintronics:

4.4.1.1. Magnetic and magnetoresistive oxides

Conducting ferromagnets, $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$

a conducting electrode in various devices for heteroepitaxy with other perovskites.

for spintronics devices, such as magnetic tunnel junctions or spin filters.

2011, a heteroepitaxial perovskite metal-base ($\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$) transistor

4.4.1.2. Magnetoelectric coupling using multiferroics

Multiferroics; both ferroelectric (FE) and ferromagnetic (FM) or antiferromagnetic (AFM).

a mutual control of the properties: controlling a polarization (P) by a magnetic field (H)

or a magnetization (M) by an electric field (E).

a room-temperature FE-AFM multiferroic, BiFeO_3 ; ferroelectric polarization ($P_r \sim 60 \mu\text{C}/\text{cm}^2$) with a FE

Curie temperature, $T_c \sim 1100 \text{ K}$, an AFM Néel temperature $T_N \sim 650 \text{ K}$.

2011, Resistance variations in ferroelectric tunnel junctions (FTJs)

top electrode, a conductive tip of atomic force microscope (CTAFM)

bottom electrode, ferromagnetic metal, SrRuO_3 (SRO), or $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$ (LSMO)

ferroelectric tunnel barriers, BaTiO_3 (BTO), PbTiO_3 (PTO) and BiFeO_3 (BFO)

Giant tunnel electroresistance effect (TER) (to read the polarization state of a ferroelectric film)

4.4.2. Metal Oxide Heterointerfaces and Superlattices

LaTiO₃/SrTiO₃

“Artificial charge-modulation in atomic-scale perovskite titanate superlattices”, A. Ohtomo, D. A. Muller, J. L. Grazul, and H. Y. Hwang, *Nature* **419**, 378 (2002).

LaAlO₃/SrTiO₃

“Tunable Quasi-Two-Dimensional Electron Gases in Oxide Heterostructures”, S. Thiel, G. Hammerl, A. Schmel, C. W. Schneider and J. Mannhart, *Science* **313**, 1942-1945 (2006).

LaVO₃/SrTiO₃

“Polar discontinuity Doping of the LaVO₃/SrTiO₃ Interface”, Y. Hotta, T. Susaki and H. Y. Hwang, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 236805 (2007).

SrMnO₃/LaMnO₃

“Electronic Reconstruction at SrMnO₃-LaMnO₃ Superlattice Interfaces”, S. Smadici, P. Abbamonte, A. Bhattacharya, et al., *Phys. Rev. Lett.* **99**, 196404 (2007).

La₂CuO₄(insulator)/La_{1.55}Sr_{0.45}CuO₄(metal)

“High-Temperature Interface Superconductivity between metallic and insulating copper oxides”, A. Gozar, G. Logvenov, L. Fitting Kourkoutis, A. T. Bollinger, L. A. Giannuzzi, D. A. Muller and I. Bozovic, *Nature* **455**, 782-785 (2008).

PbTiO₃(ferroelectric)/SrTiO₃(paraelectric)

“[Improper ferroelectricity](#) in perovskite oxide artificial superlattices”, E. Bousquet, M. Dawber, N. Stucki, C. Lichtensteiger, P. Hermet, S. Gariglio, J.-M. Triscone, and P. Ghosez, *Nature* **452**, 732 (2008).

4.4. Complex Metal Oxide Materials, interfaces and Superlattices

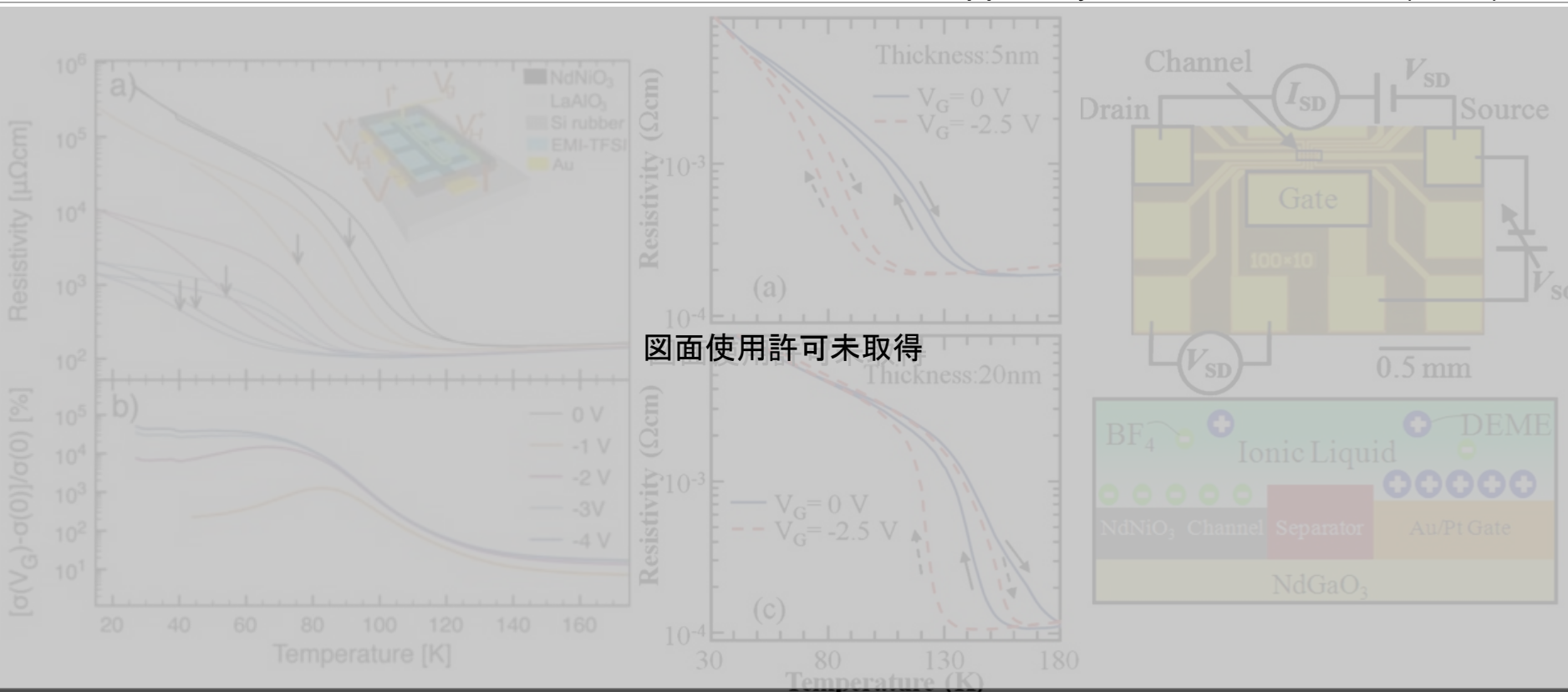
Electric field control of the temperature for the Mott (metal–insulator) transition

Tuning of the Mott (orbital ordering) transition in an electrolyte-gated FET structure with NdNiO_3 as a channel material

A gate voltage of -2.5V reduces the transition temperature by 40 K.

R. Schewitzl et al., Appl. Phys. Lett. **95**, 222114 (2009).

S. Asanuma et al., Appl. Phys. Lett. **97**, 142110 (2010).



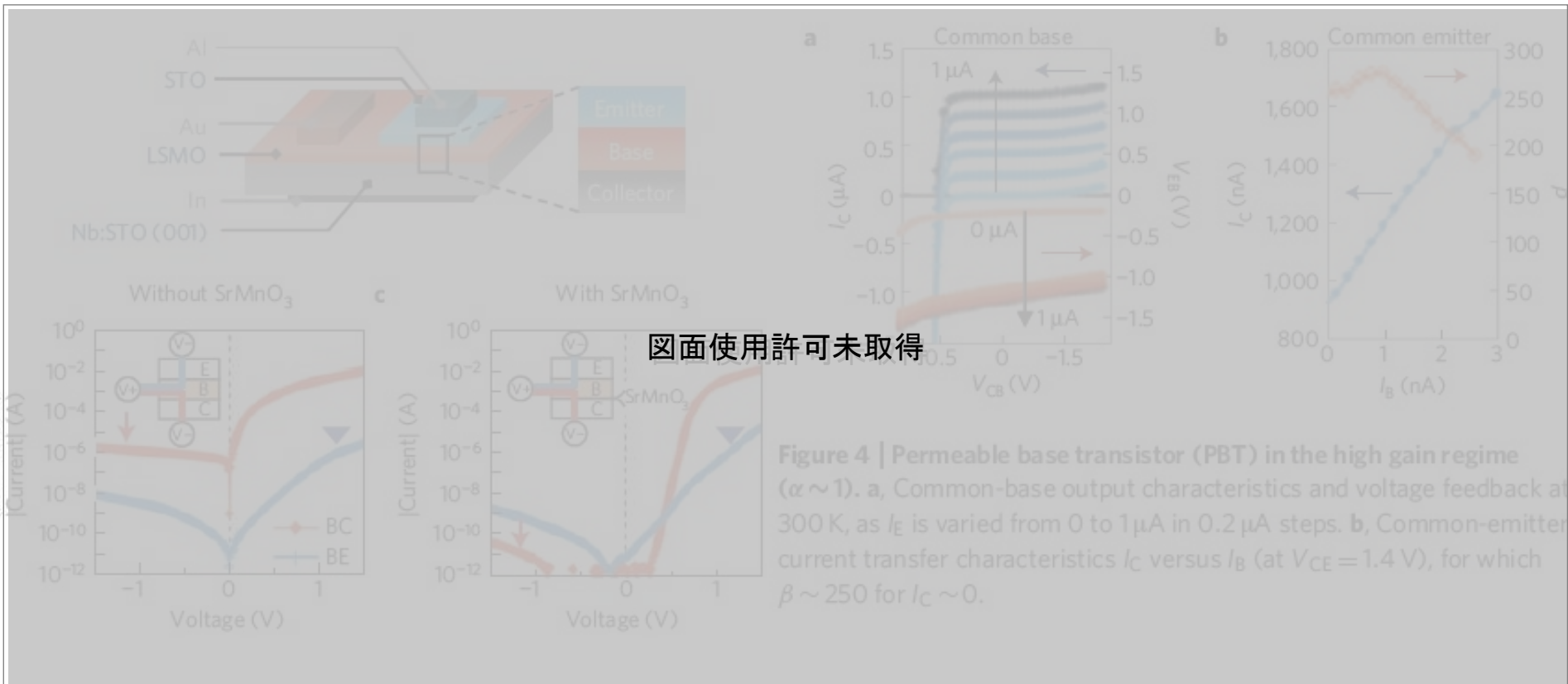
図面使用許可未取得

❖ The possibility to the Mott transistor

4.4.1 Complex oxides for spintronics:
4.4.1.1. Magnetic and magnetoresistive oxides

“A heteroepitaxial perovskite metal-base transistor”, T. Yajima, Y. Hikita and H. Y. Hwang, Nature Materials **10**, 198 (2011).

A conducting ferromagnet, $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.3$) (LSMO) is used as the base in a perovskite heteroepitaxial metal-base transistor.



❖ A platform for incorporating the exotic ground states of perovskite oxides

4.4.1.2. Magnetoelectric coupling using multiferroics

Resistance variations in ferroelectric tunnel junctions (FTJs)

top electrode, a conductive tip of atomic force microscope (CTAFM),
 bottom electrode, ferromagnetic metal, SrRuO₃ (SRO), or La_{0.67}Sr_{0.33}MnO₃ (LSMO)
 ferroelectric tunnel barriers, BaTiO₃ (BTO), PbTiO₃ (PTO) and BiFeO₃ (BFO)

Giant tunnel electroresistance effect (TER) (to read the polarization state of a FE film)

BTO(3 nm)/LSMO(30 nm) on NdGaO₃, TER ~ 75000 %

V. Garcia et al., Nature **460**, 81 (2009).

PTO(4 and 9 unit cells)/SRO bilayers on SrTiO₃, TER up to 5000 %

A. Crassous et al., Appl. Phys. Lett. **96**, 042901 (2010).

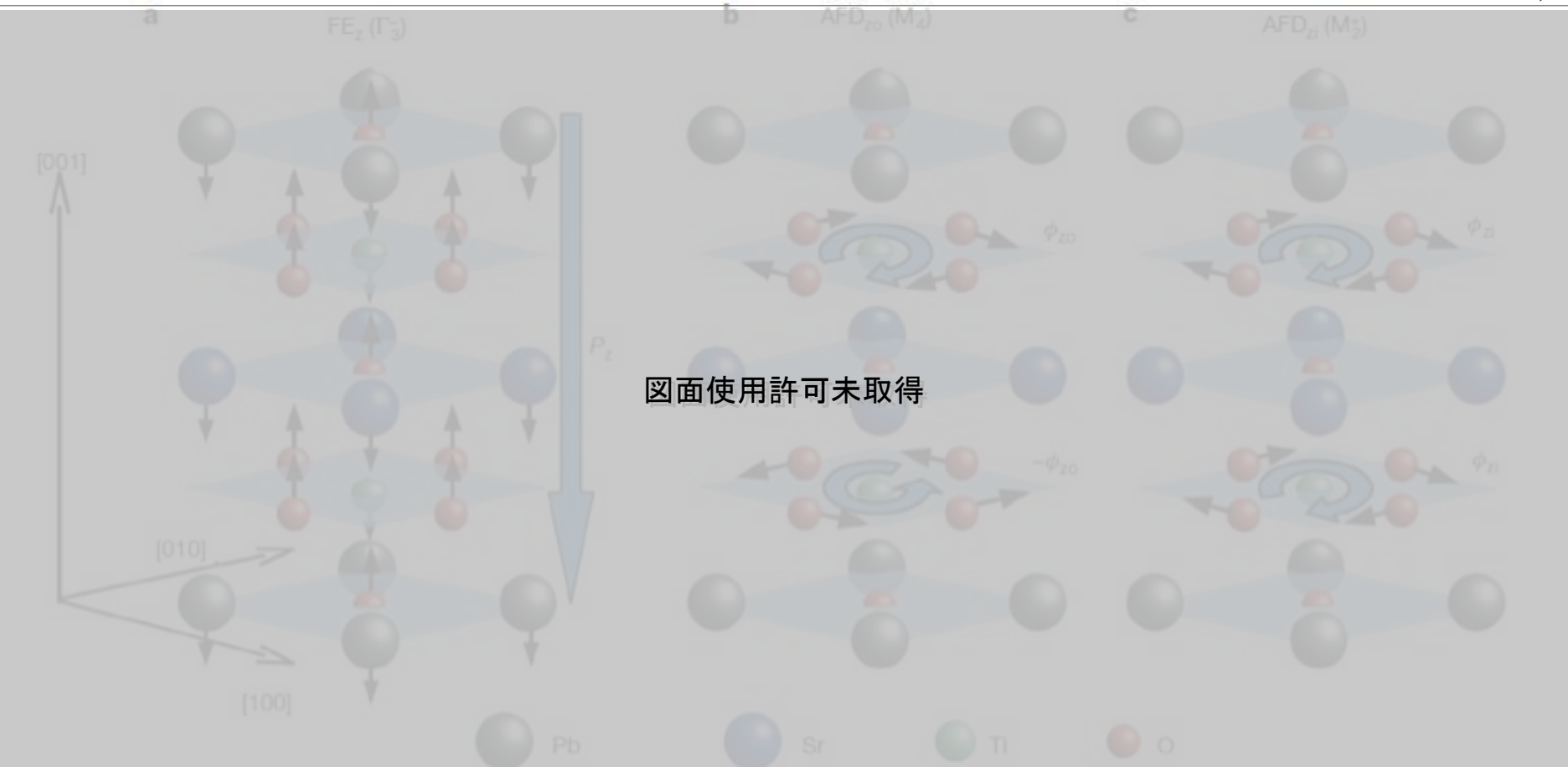


4.4.2. Metal Oxide Heterointerfaces and Superlattices

Interfaces in superlattices can change the nature of the coupling between competing instabilities and produce new properties. The physical phenomenon at oxide heterointerfaces may enable new devices and also enable new properties in superlattices.

PbTiO₃/SrTiO₃ 9/3 superlattice, improper ferroelectric due to interface coupling based on rotational distortions. The high polarization value and dielectric constant of 600 at RT.

E. Bousquet, et al., Nature **452**, 732 (2008).



図面使用許可未取得

➤ 酸化物材料＋シミュレーション

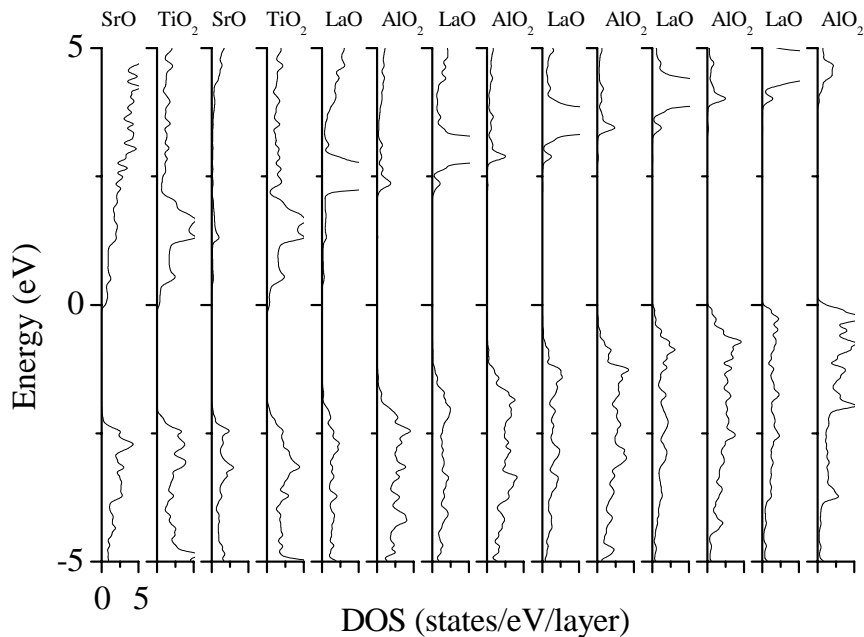
❖ 酸化物界面を取り扱うシミュレーション技術の高度化

【概要】

・LaAlO₃/SrTiO₃[001]積層膜において、(LaO)⁺と(AlO₂)⁻の交互積層による内部電場が、積層膜全体の電子状態にどのような影響を与えるか、クーロンカットオフ法を用いた第一原理計算により調べられている。LaAlO₃部分では、内部電場の影響により電子状態密度が系統的にシフトし、TiO₂層にはキャリアがドーピングされていることがわかる(右図)。

【開発技術の波及効果】

・クーロンカットオフ法を用いることで、極性を持つ薄膜の電子状態を正しく求める研究スキームが確立されたので、様々な系への適用が期待される。



Courtesy: S. Ishibashi (AIST)

ITRS2011年度版 参考文献209

Analysis of Screening Mechanisms for Polar Discontinuity for LaAlO₃/SrTiO₃ Thin Films Based on Ab initio Calculations”, S. Ishibashi and K. Terakura, J. Phys. Soc. Jpn. 77, 104706 (2008); erratum, J. Phys. Soc. Jpn. 78, 058001 (2009).

Molecular Device Materials 改定内容

有機強誘電体(フッ化ビニリデン系)を用いた
不揮発性メモリに関する研究の状況を、
当初は、“4.1.5 Macromolecular Memory Materials”に追加

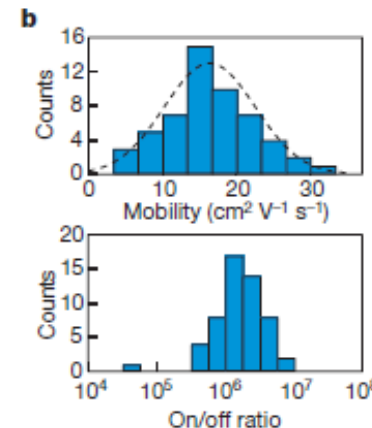
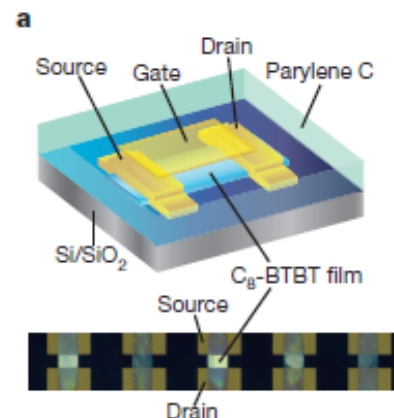
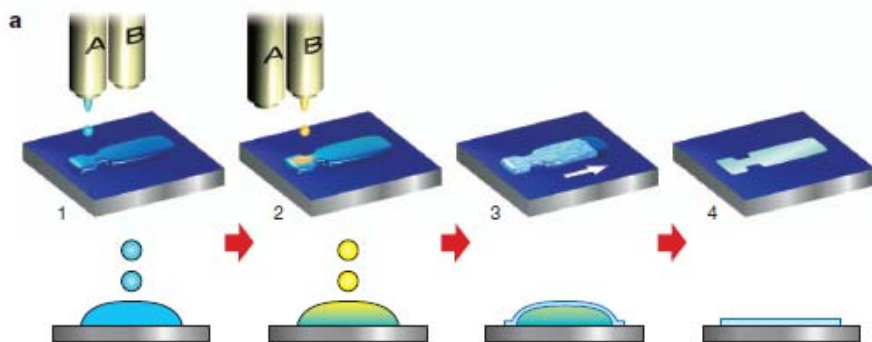


その後、“4.1.1 Emerging Ferroelectric Memory Materials”の中に
移されて、そのまま update が確定した。

Molecular Device Materials 調査内容

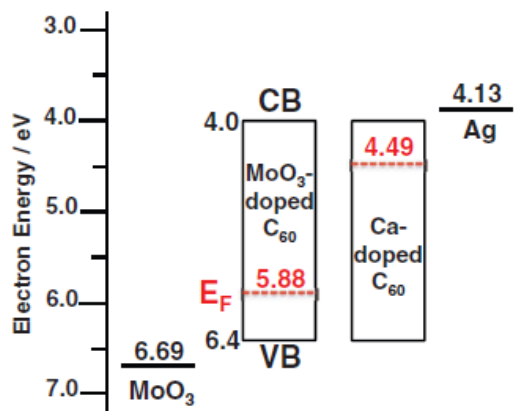
❖ インクジェット法による高移動度有機トランジスタアレイの作製

H. Minemawari et al., Nature, 475, 364 (2011).

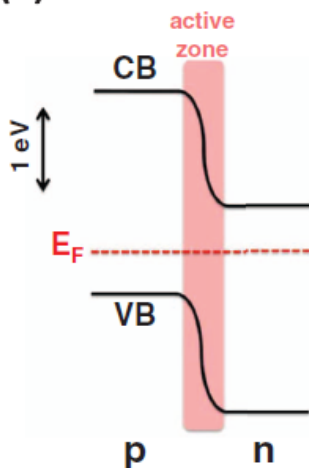


❖ n型有機半導体へのアクセプター分子ドーピングによる p型化

(a) before contact



(b) after contact



M. Kubo, et al., AIP Advances, 1, 032177 (2011).

従来はn型のC₆₀分子に、
MoO₃分子をドーピングする事でp型化



有機半導体によるpnホモ接合の形成

Molecular Device Materials 調査内容

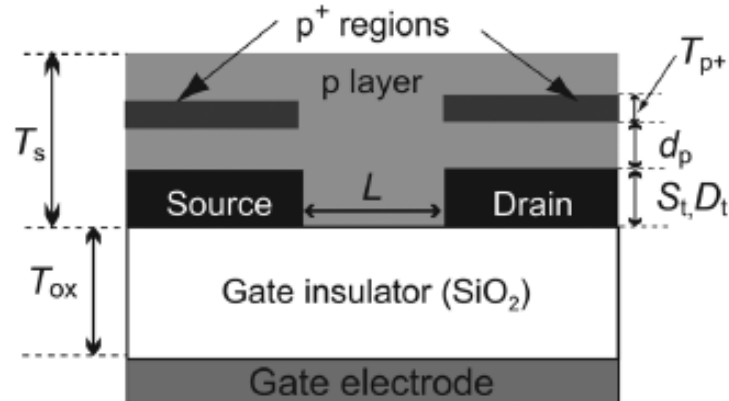
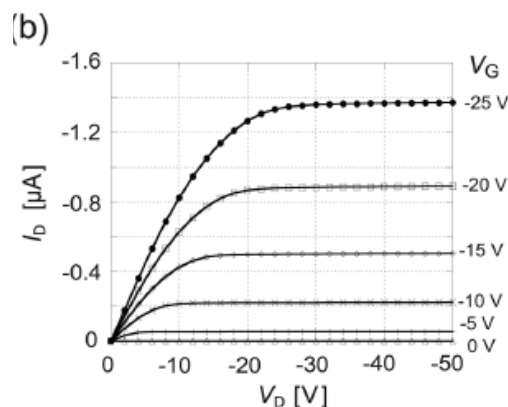
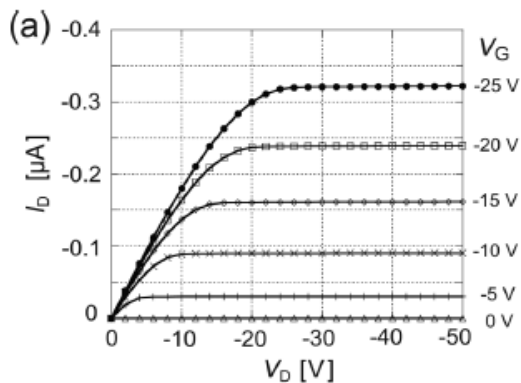
❖ 有機薄膜トランジスタにおけるコンタクト電極直上へのドーピング層の導入

p⁺層がない試料

(デバイスシミュレーション)

p⁺層を有する試料

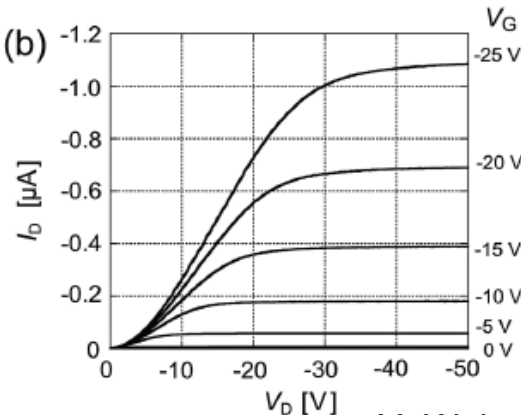
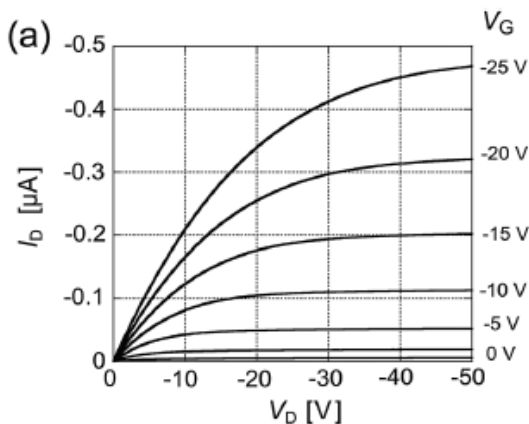
(b)



コンタクト領域への高濃度層
挿入による特性向上



(ペンタセン FET での実験結果)



キャリア濃度制御に基づく
デバイス開発の必要性

➤ リソグラフィ材料 (Directed self-assemble材料を含む)

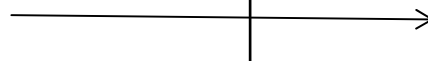
ERM5 Lithography Materials 改訂内容

- ERMでのLithography Materialsについては大きな改訂無し
大項目 (Application : 193nm extension, 193nm pitch division, EUV resist, DSA)は変更なし

| Application | 2009 | 2011 | 改訂内容 |
|-----------------|--|------------------|-----------------------------|
| 193nm Extension | Positive Chemically Amplified Resist | → | |
| | Negative Tone Development | → | Positive tone以上の解像性能 |
| | Positive Non Chemically Amplified Resist | → | Poly-sulfone base resistの記載 |
| | | Inorganic Resist | 追加 Hf oxide base resist |

| Application | 2009 | 2011 | 改訂内容 |
|----------------------|--------------------------------------|------------------------|------------------------|
| 193nm Pitch Division | Spacer Patterning | → | |
| | Double Patterning | → | |
| | Single Exposure Two Tone Development | Single Exposure Resist | PAG/PBGを利用した新しい像形成システム |
| | Double Exposure Resist | → | レジストでのパターン解像例 |

| Application | 2009 | 2011 | 改訂内容 |
|-------------|---|-----------------------------|--------------------------|
| EUV Resist | Positive Chemically Amplified Resist | → | |
| | Inorganic and Inorganic-Organic Hybrid Resist | → | 解像性能大幅な向上 36nmhp →15nmhp |
| | Non Chemically Amplified Resist | → | |
| | Non Chemically Amplified Negative Tone Resist | → | 解像性能および感度の改善 |
| | Negative Tone Cationic Resist | Resist with Acid Amplifiers | 追加 酸増殖剤により高感度化 |



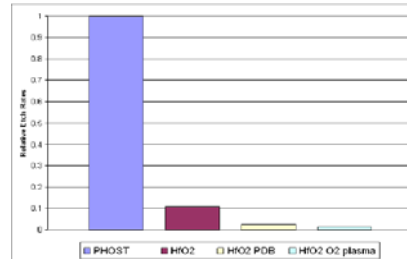
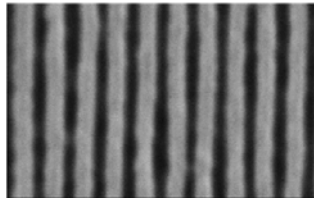
DSA Critical Assessment Table 追加

➤ リソグラフィ材料 (Directed self-assemble材料を含む)

ERM5 Lithography Materials 改訂内容

❖ 193nm extension

- Inorganic resistが追記された。EUV用途向け材料の193nmへの展開



50nmL/S解像例

エッチング耐性比較 (PHOST比約10倍)

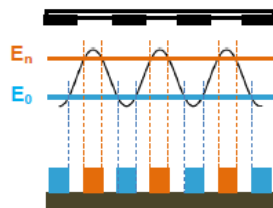
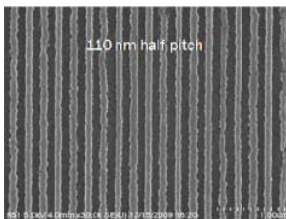
M. Krysak, et al, "Development of an inorganic nanoparticle photoresist for EUV, e-beam, and 193nm lithography", Proceedings of SPIE vol. 7972, 79721C/1-79721C/6 (2011)

- Negative Tone Developmentは、通常のTMAH有機アルカリ現像に対して、有機溶剤で現像することによりネガ型パターンを形成、スペースやホール形成においてポジ型レジストで光量が著しく減少する問題を解決できるために解像性向上を期待



❖ 193nm pitch division

- Single exposure resist においてPAG&PBGのシステムが提案されている
- 酸発生剤と塩基発生剤の量子収率の違いを利用して、露光部中の酸濃度コントラストによりパターン形成



Pitch divisionメカニズム
110nmL/S解像例

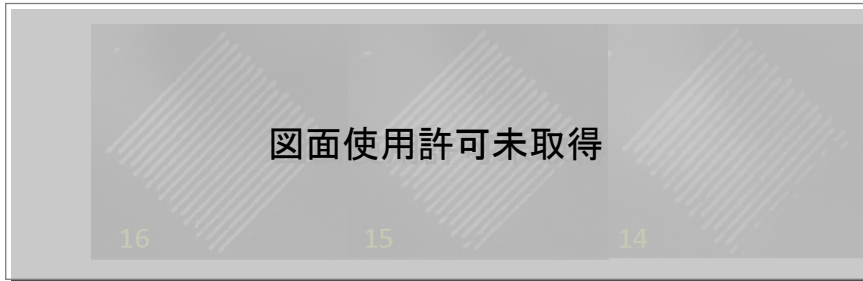
Y. Cho, et al, "Polymer-bound photobase generators and photoacid generators for pitch division lithography", Proceedings of SPIE vol. 7972, 797221 (2011)

➤ リソグラフィ材料 (Directed self-assemble材料を含む)

ERM5 Lithography Materials 改訂内容

❖ EUV resist

- 項目には大きな変更は無し、Resist Acid Amplifierが追加
- Inorganic and Inorganic-Organic Hybrid ResistのHf系レジストの解像性が向上 (EUV波長短波長化の可能性からレジストの薄膜化にともなうポリマーの吸収を上げる必要があり、有機物にフッ素や金属の導入が試みられている)

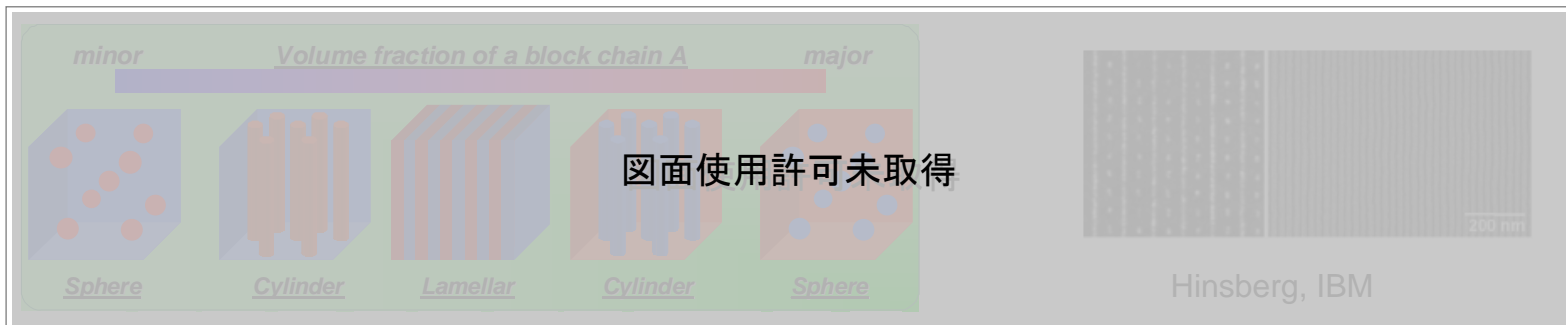


15nmhp解像例

P. Naulleau, et al, "Critical challenges for EUV resist materials," Proc. SPIE 7985, 798509 (2011)

❖ Directed self assembly

- Tableの変更は無し、新たにDSA critical assessment table (Defect, Annealing time, Etch selectivity, etc)が追加



➤ Interconnect材料 (カーボン材料)

ERM 7.2 Novel Interconnects 改定内容

- ERM Table11 Nanomaterial Interconnect Material Properties
 - SWCNTとMWCNT別々だった要求とステータスを整理
⇒ Carbon Nanotubes Challengesに統合
- 7.2.1 Nanotube Interconnects
 - CNT成長密度進展 ($\sim 1e12/cm^2 \Rightarrow 1e13/cm^2$)
 - CMP適用ビア試作・評価進展
- 7.2.2 Graphene and Graphitic Carbon Interconnects
 - 低温での配線向けグラフェン成長 ($650^\circ C$ 、約 $600^\circ C$)
 - 触媒フリーのSi/SiO₂上ネットワークナノグラファイト成長

➤ Interconnect材料 (カーボン材料)

7. 2 Novel Interconnects

Table ERM11 Nanomaterial Interconnect Material Properties 改訂

| <i>Table ERM11 Nanomaterial Interconnect Material Properties</i> | | | |
|--|---|---|---|
| <i>Application</i> | <i>Requirements</i> | <i>Carbon Nanotube</i> | <i>Challenges</i> |
| | | | <i>Carbon Nanotube</i> |
| | | | <i>Status</i> |
| <i>Vias</i> | <i>High density in small vias</i> | Need of 5-10E12 tubes/cm ² , tube diameter <5-3 nm | Ability to grow in-situ and integrate 1E12 vertically aligned tubes/cm ² in 70 nm vias with repeatable yield.[A,B] 2.5E12tubes/cm2 in 1000 nm vias. [C] |
| | <i>Defect-free metal contacts</i> | Need to produce direct metallic contacts to all the shells to minimize risks of resistance, local heating, and electromigration. | Pd to date is the best metal to contact nanotubes.[D] |
| | <i>Effective Resistivity</i> | Must achieve a high density of CNTs and a low contact resistance between CNTs and metal contacts. | Resistances down to 0.05 Ohm in 2.8 μm diameter vias (60nm high) filled with MWCNTs have been reported [E] |
| | <i>Control of chirality</i> | All MWCNTs behavior is metallic. Need to achieve accurate control of chirality distribution for SWCNTs. | Not Applicable, all MWCNTs are metallic. Only purification in liquid to date. [F] |
| | <i>Thermal behavior</i> | Need to increase density of CNTs. Need to decrease thermal resistance between CNTs and contacts | No Data Available Intrinsic CNT thermal resistance is low. Thermal interface resistance may limit performance |
| <i>Interconnects</i> | <i>Ability to grow in controlled locations</i> | Need to achieve same densities of MWCNTs as per vertical vias. | CNTs can be grown in specific locations with patterned catalyst. [G] The big issue is growing them in predefined directions. |
| | <i>Ability to grow in controlled directions</i> | Need to grow them in predefined directions. Need to achieve same high densities of CNTs as per vertical vias to achieve a bundle growth. Need to increase the growth speed of CNTs at a low CVD growth temperature. | Directional growth of a bundles of MWNTs is reported. Need higher growth rate. [H] Top-down approach to align single-walled carbon nanotubes on silicon substrate. [I] |
| | <i>Defect-free metal contacts</i> | Same as for vias, but more difficult with horizontal interconnects. | No progress reported |
| | <i>Control of chirality</i> | Not an Issue for MWCNTs. Same as for Vias for SWCNTs. | All MWCNTs are metallic. Progress reported in liquid purification for SWCNT, but requires ex-situ assembly [F] |
| | <i>Thermal behaviour</i> | Same as for vias | No progress reported |
| | <i>Effective resistivity</i> | Need to achieve same densities of CNTs as with vertical vias. Need to improve the quality of CNTs to achieve longer ballistic length. | No progress reported |

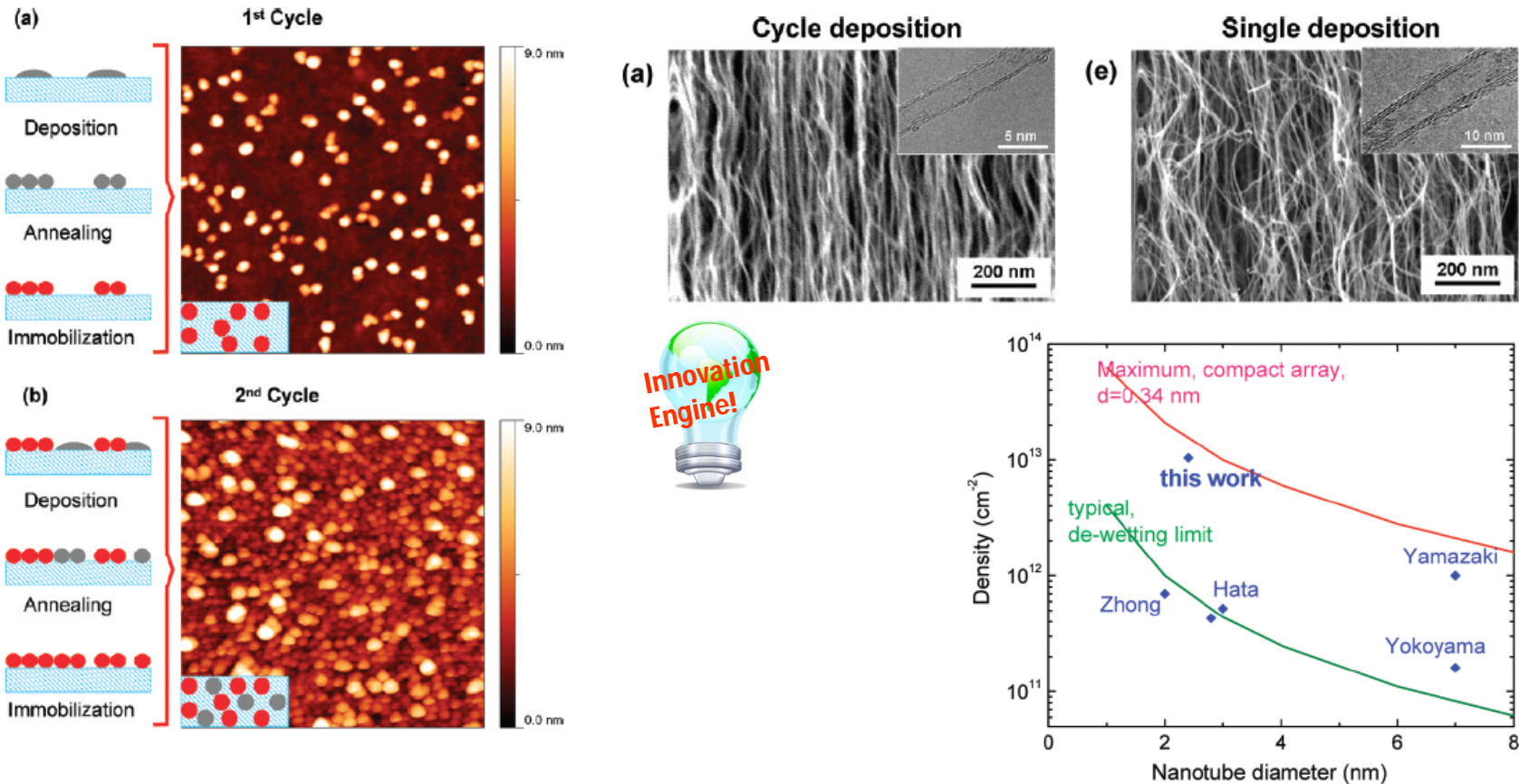
旧版では多層/単層を分離表記⇒進展は多層が大多数⇒層区分なし表記に改訂
本文・表のStatus更新

➤ Interconnect材料 (カーボン材料)

CNTの超高密度化

S. Esconjauregui, et al., ACS Nano, 4, 7431 (2010)

Growth of Ultrahigh Density Vertically Aligned Carbon Nanotube Forests for Interconnects



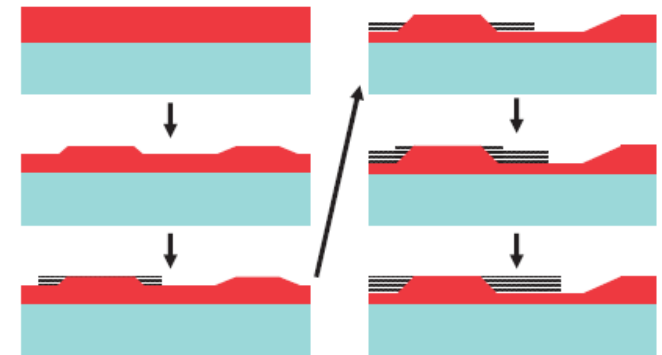
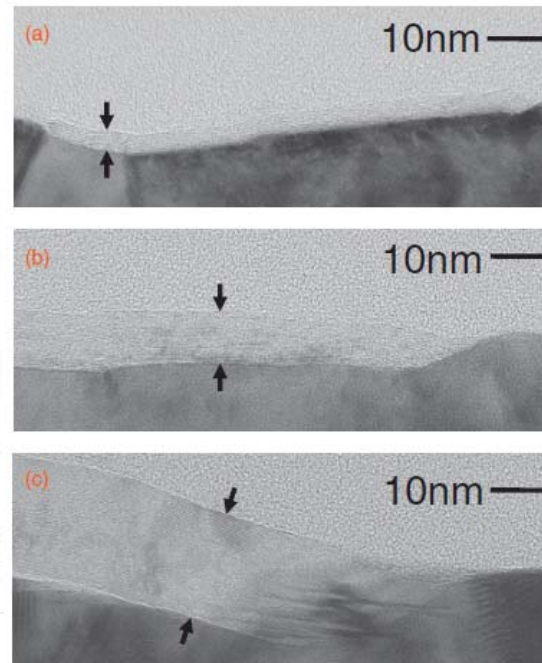
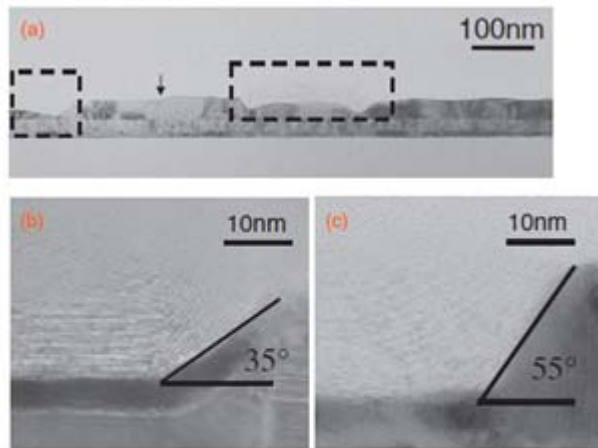
❖CNT成長用の触媒微粒子形成を繰り返すことで、 $1 \times 10^{13} / \text{cm}^2$ の超高密度成長を実現

➤ Interconnect材料 (カーボン材料)

Grapheneの低温成長

Yamazaki, et al., APEX, 5 (2012) 025101

Low-Temperature Graphene Growth Originating at Crystalline Facets of Catalytic Metal



- ❖ 600°Cで金属触媒 (Ni, Co) 上に多層グラフェンを成長
- ❖ 触媒層表面の段差を起点に面方向に成長と考察

➤ Deterministicドーピング

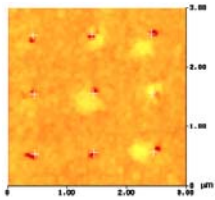
❖ Deterministicドーピング(定義)

単一もしくは少数のドーパントをチャンネル領域の他、ソース/ドレイン領域に10nm以下の精度で導入するテクノロジー群。より高いデバイスパフォーマンス、新機能創造のための原子レベルでのドーパント添加材料、デバイス、プロセス、キャラクタリゼーション。サブ16nm狙い。

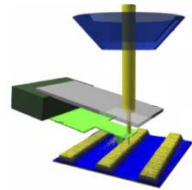
❖ State of the Art(2011版に紹介された先端技術)



単一イオン注入/ドーパント規則配列

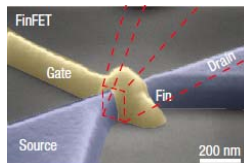


Shinada, *Nature* 2005

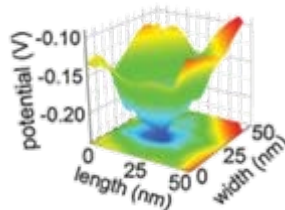


Persaud, Schenkel
JVSTB 2005

単一ドーパント輸送現象観測

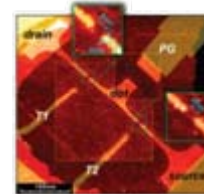


Lansbergen, Rogge
Nature Physics 2008



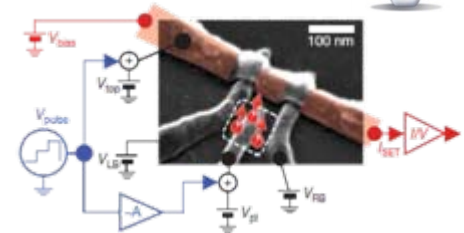
Tabe, *Phy. Rev. Lett.* 2010

STM原子トランジスタ



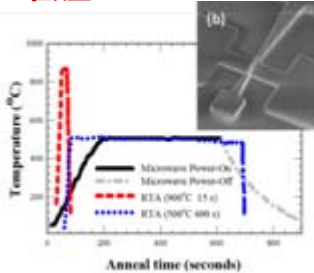
Simmons,
Nano Letters 2009

単一ドナースピン検出



Morello, Dzurak, *Nature* 2010

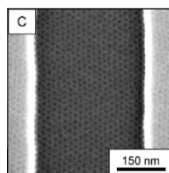
低温アニール



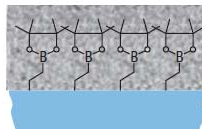
By courtesy of Dr. Lee/NDL

Ho, Javey, *Nature Materials* 2008

誘導自己組織化(DSA)
単分子膜
パターニング
ドーピング



Bosworth,
Ober, *ACS NANO* 2008

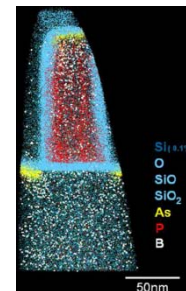


3次元離散的
シミュレーション



Roy, Asenov
Science 2005

3次元アトムプローブ



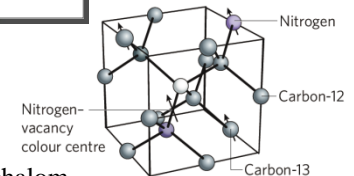
By courtesy of
Inoue/Kyoto Univ.

単一窒素-空孔
スピン検出



Nuemann, Jelezko
Science 2010

Hanson, Awschalom
Nature 2008



➤ Deterministicドーピング

❖ Key messages

- STMアシストドーピングもしくは単一イオン注入法によって、単一ドーパントデバイスが試作され、FET動作および量子効果が確認されている。
- 誘導自己組織化(DSA)単分子膜を用いたドーピングも可能に。また、ブロック共重合体は高精細なドーピングマスクにもなり得る。
- 3Dアトムプローブ、SSRM、KFMなどによって、単一ドーパント原子の可視化が可能に。
- Deterministicドーピングは、ドーパチャネルトランジスタ極限および新機能探索に意義。

❖ Difficult Challenges (Table ERM10より)

- 10nm以下の精度でドーパントを導入し、適切にアクティベート。
- 誘導自己組織化(DSA)膜の規則性と高精細性(<5nm)。
- アクティベーションのミリ秒化、低温化、均一性。
- スループットを格段に改善する必要性。

❖ 2013版へ向けた課題

- ドーパント分布、位置制御性の改善。
- スループットの向上。
- 3次元対応Deterministicドーピング材料・プロセスの開発。

➤ ESH (Environment, Safety, and Health)

改定の鍵は新規材料の不確実性への対処

9. Environmental, Safety, and Health

包括的管理策の策定に向けた取り組み、**ライフサイクルアセスメント**、キャパシティビルディング、**リスク評価**などを追加

10.1 Metrology for ERM Environmental, Safety, and Health

材料のリスク管理、ベストプラクティス策定の基礎としてのESHの追加

❖ 挑戦的課題

新規材料のESH、戦略的取り組みを

新規材料のESHの課題への取り組みが、企業競争力に大きな影響を与える
ESHの課題への取り組みはコア技術の研究開発と並行して進める
ESH情報のコミュニケーションによる政策支援とテクノロジーガバナンスの向上

背景: 欧州ではRoHS指令、REACH規則等におけるナノサイズの方法、新規材料の検討継続。米国ではEPA、FDA等の連邦政府機関に対し環境規制策の強化を求める勧告が出される。環境規制強化の動きはさらに加速。ただ、リスク管理策の策定の基礎となる曝露評価をはじめとする有害性データは依然として不足している。

➤ ESH (Environment, Safety, and Health)

❖ ESHの課題に戦略的に取り組む

* サプライチェーンのなかでESH情報を効率的に共有する

ESH情報共有のためのMSDSなどのツールの開発および開発されたツールを活用し情報を受け渡すシステムの構築
→情報共有のシステムを国際標準に

情報共有のための試み

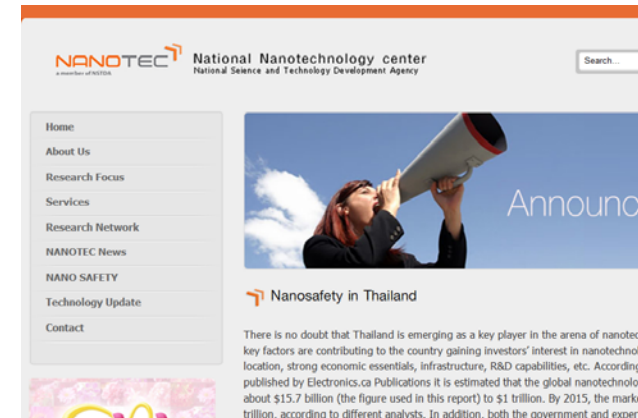
ESHを製品化プロセスへ組み込む試み



NNPC (National Nanotechnology Platform Center) website showing information in Korean. The main headline reads: "대한민국 나노기술정책의 길라잡이가 되겠습니다." (We will be the guide for Korea's nanotechnology policy). The page includes a navigation menu, a calendar for 2012, and a list of events.



nanoMark website (Taiwan) showing information in English. The main headline reads: "New Technology, New Function, New Value". The page includes a navigation menu, a "Nano Living House" link, and a "Select Certified Manufacture" dropdown menu. A circular graphic highlights various product categories: Hardware, Metal, Textiles, Building Materials, and Paint.



NANOTEC website (Thailand) showing information in English. The main headline reads: "Announce". The page includes a navigation menu, a "Nanosafety in Thailand" link, and a large image of a woman looking through a telescope. The text below the image states: "There is no doubt that Thailand is emerging as a key player in the arena of nanotechnology..."

韓国: NNPC@KISTI
<http://www.nnpc.re.kr/nnpc/wsp/main.jsp>

台湾: nanoMark by ITRI
<http://proj3.moeaidb.gov.tw/nanomark/Eng/>

タイ: NanoQ by NANOTEC
<http://www.nanotec.or.th/en/?p=1625>

➤ ERM分野における計測 (Metrology)

❖ERM分野に関連する計測装置の進展について追加

顕微鏡技術を中心にERMの課題克服のために有効と考えられる計測手法の進展/近況について追記した

- ①球面収差補正装置付きTEM/STEMによる進展について
- ②3次元アトムプローブ装置の進展について
- ③昨年5月にリリースされた超高速SPM装置について
- ④ヘリウムイオン顕微鏡(HIM)技術の進展について



❖Metrology for Memoryを独自に追加

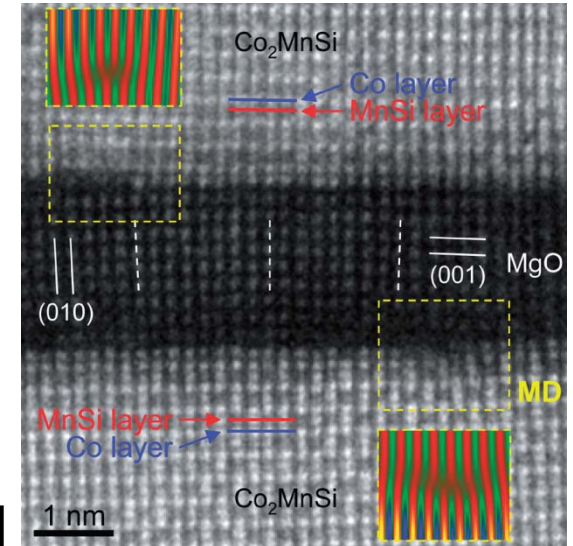
①Metrology for MTJを加筆

-MTJ膜の物理特性向上のために必要と考えられる評価項目を列記、さらにそのために必要と考えられる計測手法について提案
例)磁性膜(CoFeBや長周期規則合金など)とトンネル絶縁膜(MgO膜)の界面で接する原子種の同定や、磁性膜中の規則化度の同定など

②Metrology for Redox RAMを加筆

-Redox RAMの動作原理解明のために必要と考えられる評価項目を列記、さらにそのために必要と考えられる計測手法について提案

Cs補正HAADF-STEM法によるMTJ内
CoMnSi層/MgO界面転位の可視化



T.Miyajima et.al, APEX 2 (2009)

ERM分野における計測 (Metrology)

独自活動: 電子(イオン)顕微鏡技術の進展についての調査

「走査型電子顕微鏡(SEM)の発展、透過型電子顕微鏡(TEM)との融合について」

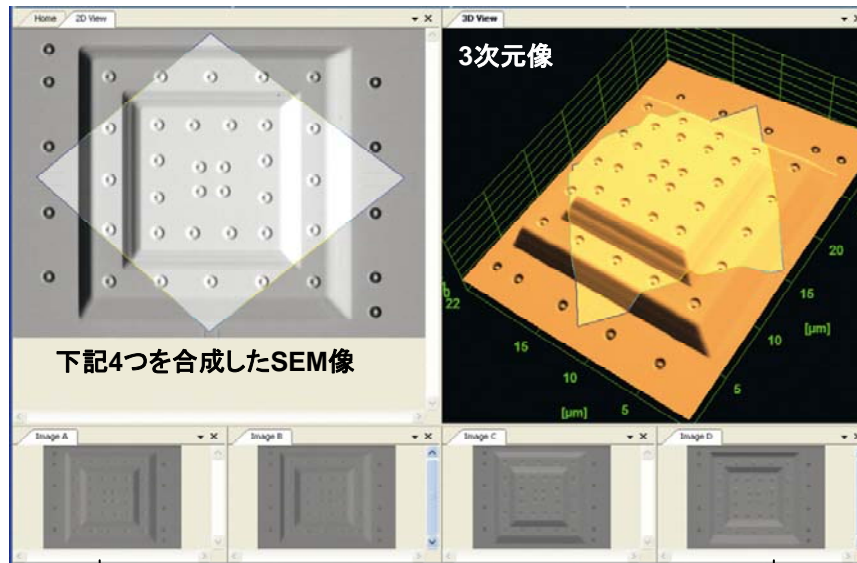
①二次電子(SE)、反射電子(BSE)検出技術(検出器)の発展

→従来のSEM像とは異なる様々なコントラストが出現、簡易な3次元化も可能に

②球面収差/色収差補正技術による電子プローブの先鋭化

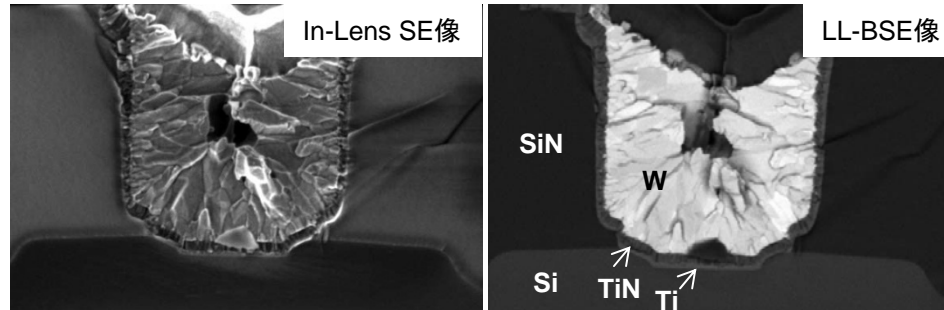
→高分解能化を目的とした高加速電圧不要、SEM/TEMの加速電圧が同レベルに

4分割型反射電子検出器を用いた3次元化(Zeiss HPより引用)



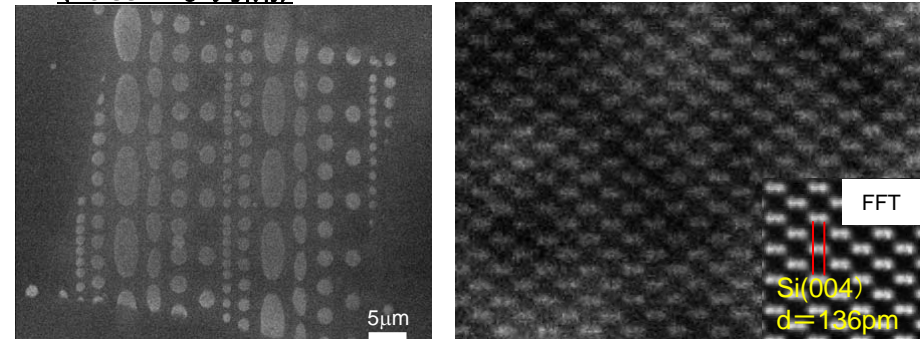
各検出器で検出したSEM像

低損失BSE(LL-BSE)を用いた組成コントラストイメージング(Zeiss HPより引用)

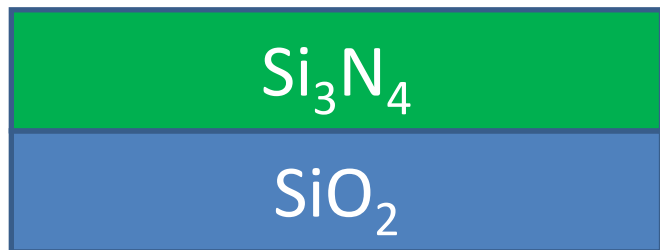


HIMで観察したSAMパターン
(Zeiss HPより引用)

200kV SEMで観察したSi110格子像
(日立ハイテクHPより引用)



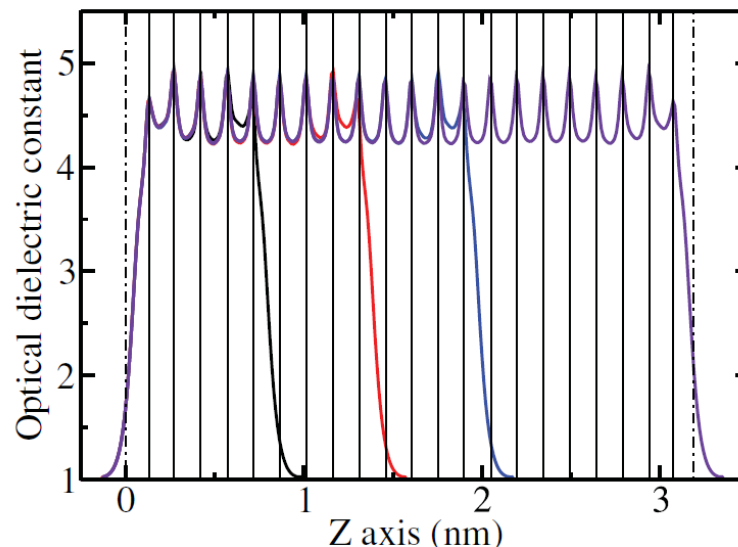
❖ Computing dielectric constant for layered insulator



Stacking of different dielectric film show dielectric constants which are different from values of bulk phase

Compute polarization P directly under the field E by DFT simulation, and numerically compute $\epsilon(Z) = dP(Z)/dE$.

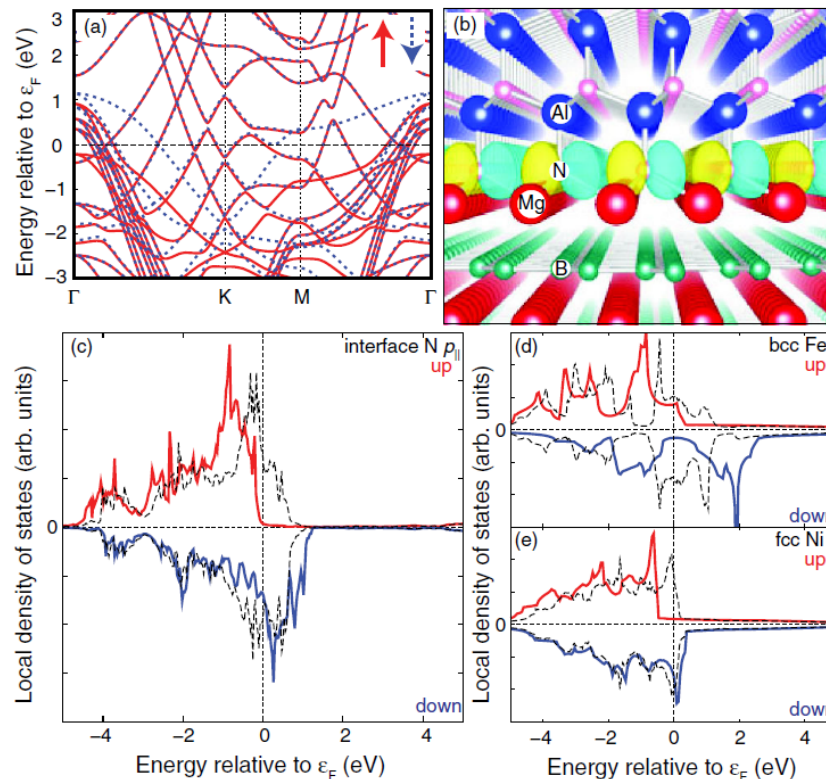
This computational technique will be applied for designing insulating gate stack et al.



Printed with permission from T. Anh Pham, et al., Phys. Rev. B84, 045308 (2011) [DOI: 10.1103/PhysRevB.84.045308] Copyright (2011) American Physical Society

❖ Designing possible spintronics material

Predicting spin-polarized interface states at GaN/MgB₂ system as a candidate of material used for quantum spin-transport device by controlling the gate voltage



Printed with permission with Y. Gohda and S. Tsuneyuki, Phys Rev. Lett 106, 047201 (2011), Copyright American Physical Society (2011).

DOI[<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.047201>]

ブロック共重合体リソグラフィおよび関連する将来技術 (Litho)

NTT物性科学基礎研 山口 徹 様 2010年4月27日

決定論的ドーピング等 (FEP) 品田委員 2010年5月27日

ナノテクノロジーの社会受容 (ESH) 関谷委員 2010年6月22日

レーザー3次元アトムプローブによるMOSFET中のドーパント分布解析

京都大学 井上耕治 先生 2010年7月29日

Massively parallel computing on an organic molecular layer (ERD)

NICT ペーパー委員 2010年9月28日 (ERD合同)

球面収差補正装置搭載STEMの現状と半導体デバイス評価への展望 杉山委員 2010年10月26日

メタルゲート/ high-k CMOSプロセスにおける技術選択の経緯 由上委員 2010年11月18日

絶縁性鎖状分子の有機薄膜エレクトロニクスへの応用

京都大学 工学部 電子工学専攻 野田 啓 先生 2010年12月17日

グラフェン電子状態の基礎理論およびナノ構造化の効果

物質・材料研究機構 若林克法 様 2011年1月27日

ナノマテリアルのリスク管理と規制の現状 JFEテクノリサーチ 大塚研一 様 2011年2月24日

研究履歴に学ぶ日本産業の問題点～ノーベル賞を逃すには～ 和田委員 2011年4月28日

電子顕微鏡法を用いた次世代磁性材料の開発 大阪府立大学 戸川欣彦先生 2011年10月18日

光電子融合システムに向けた高速・高密度シリコンフォトニクスデバイス

PETRA 中村隆宏様 2011年11月24日

ERM リソ関連材料について TOK 大森委員 2011年12月16日

【2011~2012年度活動指針】

- 「ERM実装のための技術」という視点を追加する
- 実装とは→
 - 材料の組み合わせ (ERM) or 製品イメージ (ERD)
 - 例：界面制御の問題に帰結する場合が多い
 - Grapheneに対するBN基板
 - Complex metal oxideに対する半導体基板
 - CNTに対する触媒と基板 (コンタクト抵抗)
 - ゲートスタックの問題
 - Optical Interconnectにおける実装
 - DSAガイドレジストパターンと所望のパターンの関係

【結論：キーワード】

“新材料のプロセスインテグレーション”

例：界面のダイポール制御

ご清聴ありがとうございました。
今後とも、WG13の諸活動への
ご支援を宜しくお願いいたします。