



ERMの挑戦的課題 ～ERMで何が出来るのか？～

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)、
大森克実 (TOK)、苅谷 (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)、



用語集

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

- 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)
- 制御された自己組織化材料 (Directed self-assemble)
- 確定的ドーピング (Deterministic doping)
- 複合金属酸化物 (Complex Metal Oxides)
- スピン材料 (Spin Materials)
- 機能性(巨大)分子 (Macromolecules)
- リソグラフィ材料
- FEP、PIDS、ASP材料
- 界面 & ヘテロ界面
- シミュレーション (Simulation)
- 計測 (Metrology)
- ESH
- 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	新規洗浄 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20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)
	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)
Environment, Safety, and Health	関谷(産総研)
Metrology	佐々木 杉山 (東芝ナリアリシス) (東レリサーチ)
Modeling and Simulation	宮本(産総研)



ERMの国際メンバー

STRJ メンバー 取りまとめ役

Hiro Akinaga AIST
 Jesus de Alamo MIT
 Tsuneya Ando Tokyo Inst. Tech
 Dimitri Antoniadis MIT
Nobuo Aoi Panasonic
 Koyu Asai Renesas
 Asen Asenov U. of Glasgow
Yuji Awano Keio Univ
 David Awschalom UCSB.
 Kaustav Banerjee UCSB
 Daniel-Camille Bensahel ST Micro
 Stacey Bent Stanford U.
 Kris Bertness NIST
 Bill Bottoms Nanonex
 George Bourianoff Intel
 Rod Bowman Seagate
 Alex Bratkovski HP
 Robert Bristol Intel
 Bernard Capraro Intel
 John Carruthers Port. State Univ.
 An Chen Global Foundry
 Eugene Chen Grandis
 Zhihong Chen IBM
 Toyohiro Chikyo NIMS
 Byung Jin Cho KAIST
 U-In Chung Samsung
 Luigi Colombo TI
 Hongjie Dai Stanford U.
 Thibaut Devolder Univ. Paris Sud
 Athanasios Dimoulas IMS Greece
 Catherine Dubourdieu L. Mat. Genie
 Phys. & IBM
 John Ekerdt U. of Texas
 Tetsuo Endoh Tohoku Univ.
 James Engstrom Cornell U.

Michael Flatte U. Iowa
 Satoshi Fujimura TOK
Michael Garner Intel
 Niti Goel Intel
 Michael Goldstein Intel
 Suresh Golwalkar Intel
 Wilfried Haensch IBM
Dan Herr SRC
 Hiro Hibino NTT
 Bill Hinsberg IBM
 Judy Hoyt MIT
 Jim Hutchby SRC
 Ajey Jacob Intel
 David Jamieson U. Melbourne
 Ali Javey U.C. Berkeley
 James Jewett Intel
 Berry Jonker NRL
 Xavier Joyeux Intel
 Ted Kamins Consultant
 Zia Karim AIXTRON AG
Takashi Kariya Ibidem
 Masashi Kawaski Tohoku U.
 Leo Kenny Intel
 Philip Kim Columbia U.
 Sean King Intel
 Atsuhiko Kinoshita Toshiba
 Michael Kozicki ASU
 Mark Kryder CMU
 Yi-Sha Ku ITRI
 Hiroshi Kumigashira U. Tokyo
 Y.J. Lee Nat. Nano Lab TW
 Liew Yun Fook A-Star
 Wei-Chung Lo ITRI
 Louis Lome IDA Cons.
 Gerry Lucovsky NCSU
 Mark Lundstrom Purdue U.
 Yale Ma Seagate
 Blanka Magyari-Kope Stanford U.
 Allan MacDonald Univ. of Texas

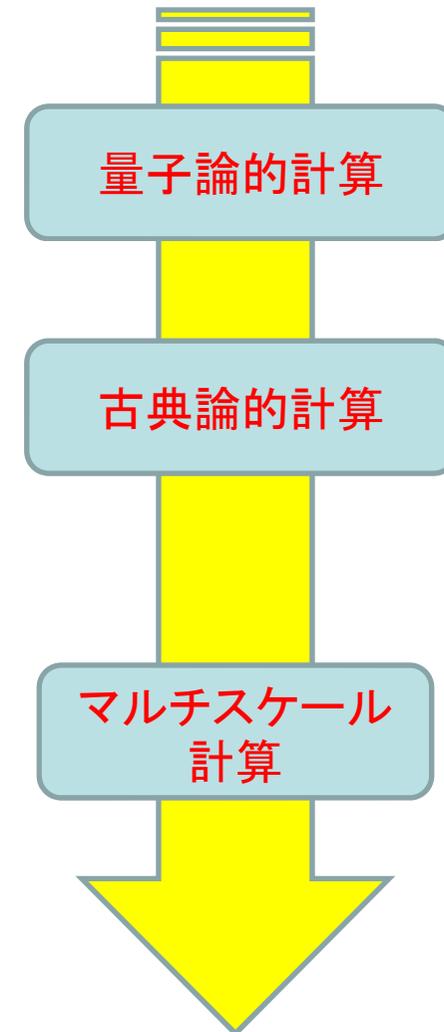
Prashant Majhi Intel
 Witek Maszara Global Foundry
 Francois Martin LETI
Fumihiko Matsukura Tohoku U.
Nobuyuki Matsuzawa Sony
 Jennifer Mckenna Intel
 Claudia Mewes U. Alabama
Yoshiyuki Miyamoto AIST
 Andrea Morello UNSW
 Boris Naydenov U. Stuttgart
 Paul Nealey U. Wisc.
 Kwok Ng SRC
 Fumiyuki Nihey NEC
 Yoshio Nishi Stanford U.
 Dmitri Nikonov Intel
Kei Noda Kyoto U
 Yaw Obeng NIST
Chris Ober Cornell Univ
 Katsumi Ohmori. TOK
 Yoshichika Otani Riken Inst.
 Jeff Peterson Intel
 Alexei Preobrajenski Lund Univ.
 Victor Pushparaj AMAT
 Ganapati Ramanath RPI
 Ramamoorthy Ramesh U.C.
 Berkeley
 Nachiket Raravikar Intel
 Heike Riel IBM
 Dave Roberts Nantero
 Mark Rodwell UCSB
 Sven Rogge Delft U.
Jae Sung Roh Hynix
 Tadashi Sakai Toshiba
 Gurtej Sandhu Micron
Krishna Saraswat Stanford U.
 Hideyuki Sasaki Toshiba
Nanoanalysis
 Shintaro Sato AIST
 Akihito Sawa AIST
 Barry Schechtman INSEC
 Thomas Schenkel LBNL
 Sadasivan Shankar Intel

Mizuki Sekiya AIST
 Matt Shaw Intel
Takahiro Shinada Waseda Univ.
 Michelle Simmons UNSW
 Kaushal Singh AMAT
 Jon Slaughter Everspin
 Bruce Smith RIT
 Tsung-Tsan Su ITRI
 Maki Suemitsu Tohoku U.
Naoyuki Suqiyama Toray
 C-Y Sung IBM
 Raja Swaminathan Intel
 Michiharu Tabe Shizuoka U.
 Hidenori Takagi U. of Tokyo
 Shin-ichi Takagi U. of Tokyo
 Koki Tamura TOK America
 Ian Thayne U. of Glasgow
Yoshihiro Todokoro NAIST
Yasuhide Tomioka AIST
 Mark Tuominen U. Mass
 Peter Trefonas Dow
 Ming-Jinn Tsai ITRI
 Wilman Tsai Intel
Ken Uchida Tokyo Tech
Yasuo Wada Toyo U
 Vijay Wakharkar Intel
 Kang Wang UCLA
 Rainer Waser Aacken Univ.
 Jeff Welser IBM/NRI
 C.P. Wong GA Tech. Univ.
 H.S. Philip Wong Stanford U.
 Dirk Wouters IMEC
 Wen-Li Wu NIST
 Hiroshi Yamaguchi NTT
 Toru Yamaguchi NTT
 Chin-Tien Yang ITRI
 Hiroaki Yoda Toshiba
Jiro Yugami Renesas
 SC Zhang Stanford U.
 Yuegang Zhang LBNL
 Victor Zhirnov SRC
 Paul Zimmerman Intel



❖STRJ-ERMにおける検討項目

1. 計測結果の解析
電子状態計算によるスペクトルデータ解析支援
安定構造計算による構造データ解析支援
2. デバイス形状効果の評価
電磁シミュレーションによる、配線間クロストーク
弾性シミュレーションによる界面歪場
熱拡散シミュレーション
3. 新規材料探査・評価－熱力学安定性・物性限界
電導度、光吸収、磁気モーメントなど
動作機構の解明(MRAM、ReRAM、PCRAM)
4. デバイス動作のコンパクトモデル化
等価回路・マクロモデル構築
速度方程式へのモデリング





Modeling & Simulation

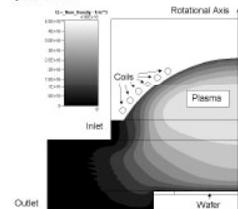
via circuit simulation to system simulation. In other words, simulation starts with a detailed description of devices on nano-scale (using high-resolution numerical grids) and – by using appropriate interfaces between the simulation levels – ends up by modeling of the entire system on macroscopic level.

To this end, we develop predictive physical models which are capable of delivering nominal data as well as variations. Furthermore, tight integration of the simulation modules is carried out. For analyzing the simulation results (e.g. for studying sensitivity, robustness, and reliability, for optimization, for data extraction and reduction), powerful algorithms are developed and implemented.

The Fraunhofer simulation modules provide interfaces to third-party tools, e.g. to tools from Synopsys, Cadence, or TU Vienna.

Process and device simulation

Within process simulation, physical-based models are used to determine the geometry (e.g. using the simulators Dr.LITHO and ANETCH for modeling of lithography and etching) and doping of devices, including variations, caused e.g. by variations of process parameters. Subsequent device simulation and compact model extraction allow investigation of circuit performance and its variations. In effect, this concept allows transfer of variations from process to circuit and system level.

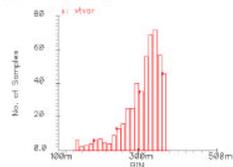


Equipment simulation of an etching reactor carried out to determine variations of the etch rate across the wafer. The figure shows the concentration of chlorine ions.

Circuit simulation

On circuit level, compact models of the integrated devices are used to analyze

circuit block characteristics. Since these compact models are nonlinear in nature the variations of the extracted model parameters due to the considered process variations will exhibit non-normal density functions both for normal and non-normal distributions of process parameters. Therefore add-on tools have been developed that allow the simulation of random variables with arbitrary probability density functions.

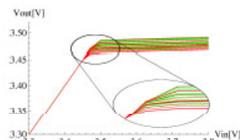


Generated random numbers following a given non-symmetrical probability density function.

System simulation

Based on the circuit netlists, model cards, and parameter distributions, a behavioral model on system level is generated. This allows fast simulation of the system and extraction of statistics regarding the output quantities of interest.

Furthermore, parameters being relevant for system behavior can be identified with sensitivity analysis, and their influence on the output quantities can be studied without the need to perform costly Monte Carlo simulations.



Input-output characteristics of an overvoltage protection circuit with model parameter variations. Green: original system, red: symbolic approximation.

The software Analog Insydes allows reduction of the behavioral model preserving the symbolic parameters. Model order reduction here significantly reduces simulation times. Though, keeping the system parameters preserves information regarding relevant dependencies of the system for the design process.

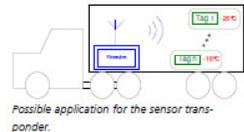
Algorithms and integration

The third-party tools Minimos-NT (TU Vienna) and Spice3 (Univ. Berkeley) have been integrated into the simulator MECS (Univ. Cologne / SCAI). In this way, tightly coupled circuit and device simulation is enabled. Instead of standard compact models (e.g. Spice3 BSIM), some fully discretized devices (Minimos) can be used for increasing accuracy of results. For analyzing parameter variations of the process-device-circuit chain, the DesParO software tool is used. The extended linear solver package SAMG speeds up simulators on different levels.

Demonstrator

The demonstrator where the hierarchical simulation procedures and concepts are applied is a passive UHF sensor transponder that combines RFID technology with smart sensors to create new applications for modern transponder technology. Requiring no batteries, an operating range of several meters can be achieved.

The extended range enables new implementations in many applications like monitoring the cooling chain for medical transports, food chain management, or health care.



Possible application for the sensor transponder.

This work was supported by the Fraunhofer Internal Programs under Grant No. MAVO 817759 (HIESPANA).

Fraunhofer Project HIESPANA
www.hiespana.fraunhofer.de

Coordinator: Fraunhofer Institute for Integrated Systems and Device Technology IISB

Contact:
Dr. Jürgen Lorenz, Fraunhofer IISB
juergen.lorenz@iisb.fraunhofer.de



HIESPANA – HIERARCHICAL SIMULATION OF NANOELECTRONIC SYSTEMS FOR CONTROL OF PROCESS VARIATIONS

www.hiespana.fraunhofer.de/

3Dリソシミュレータ～
デバイス・回路シミュレータ

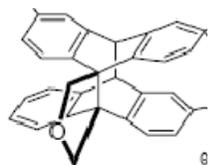
STRJ リソグラフィ材料

193nm Extensions Resist

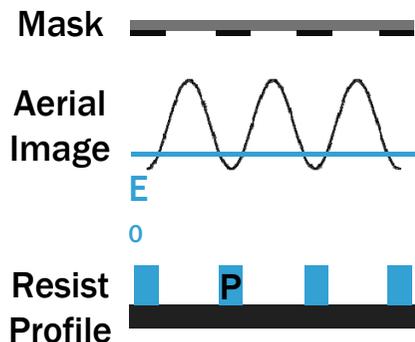
- ✓ Positive tone chemically amplified resist
- ✓ Negative tone resist

193nm Pitch Division Resist

- ✓ One Exp. → Two tone develop
 - ✓ Double Exp. resist
- Dual tone resist



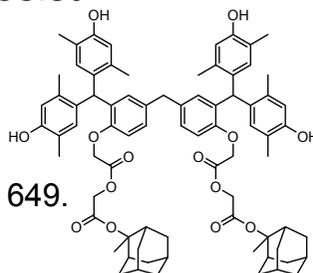
Bristol, Intel



EUV Resist

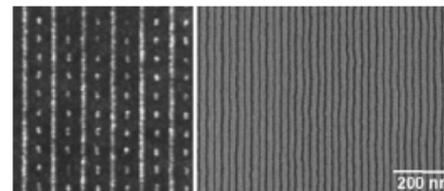
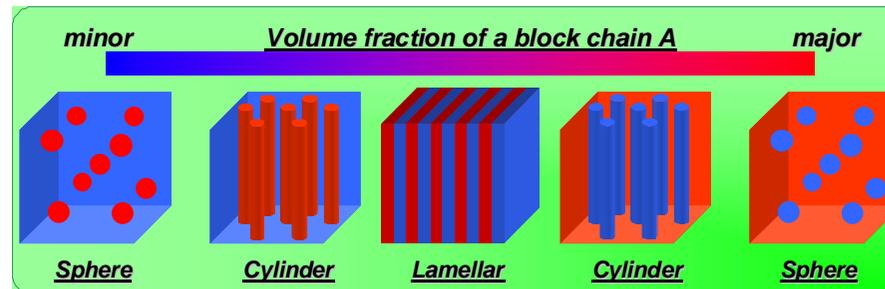
- ✓ Inorganic-organic hybrid resist
- ✓ Molecular glass resist

Daiju Shiono, *et al*
 J. Photopolym. Sci. Technol. 23 (2010) 649.



Work in Progress - Do not publish

Directed Self Assembly



Hinsberg, IBM

- ✓ DSA workshops
- Oct.2010@Kobe/JPN, Mar.2011@CA/US
- ✓ 2011 critical assessment
- Defect, Annealing time, Etch selectivity, etc

レジスト関連(193nm, EUV)はLitho TWGIに移る。
 ERMには誘導自己組織化(Directed Self Assembly)が記載。欠陥低減、加熱時間短縮、エッチング精度などが挑戦的課題として記述される。



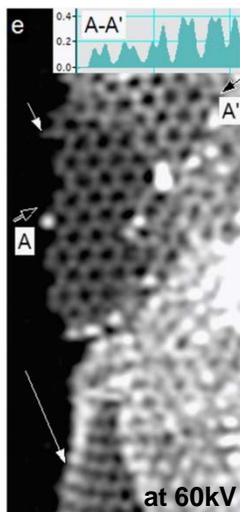
ERM分野におけるMetrology

❖ 球面収差補正付きSTEM/TEMの躍進

- ① 元素種識別顕微鏡(HAADF/ABF-STEM) や原子スケール分光法の発展
→ 複合酸化物材料、MTJ材料などに有効
- ② 低加速観察による材料に優しい観察/分析の実現
→ 特にカーボン系材料に有効
- ③ 電子線モノクロメーターを搭載し、高エネルギー分解能の解析が可能に
- ④ 検出器の発展により、4D-TEM(実空間+逆空間)、高TATの実現

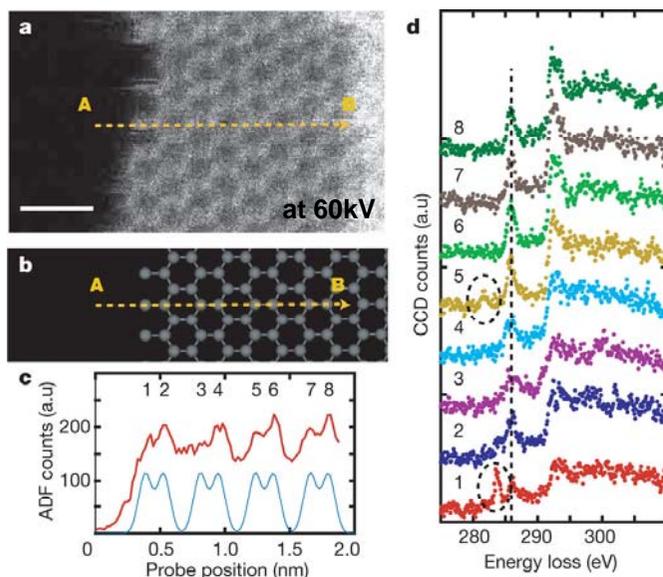
❖ 過去約2年間の進展(文献より)

単層グラフェンのSTEM観察



O.L.Krivanek et al, *Ultramicroscopy* 110 (2010) K Suenaga & M Koshino *Nature* 468 (2010)

グラフェンKleinエッジでの原子スケール分光

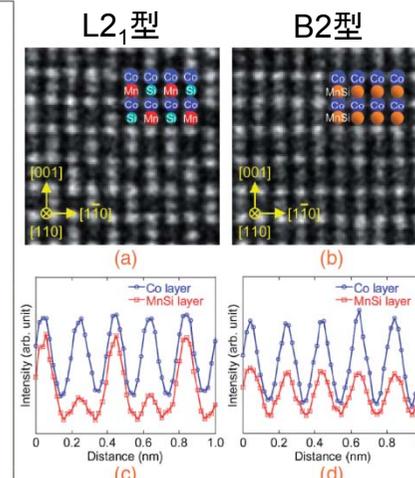


STO/LSMO積層膜の原子スケールスペクトルイメージング



D.A.Muller et al, *Science* 319 (2008)

HAADF-STEM法によるMTJ内CoMnSi層の規則構造の識別



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



ERM分野におけるMetrology

❖ 挑戦的課題

- 各材料がデバイスの一部として実装された際の評価
- 形状と物性の同時評価(磁性、電気特性など)

昨年度報告されたTEM内でのMTJの物性評価結果: 米国NISTとBrookhaven国立研究所の共同研究結果



J.W.Lau *et al.*, Appl.Phys.Lett. **96** 262508(2010)



- Nano-Ionic Memoryの動作原理を実証する評価
→ Filamentの可視化(金属フィラメント? 酸素欠損の整列(Magnéli相の発現)?)

❖ STRJ-ERMの方針

ナノカーボン材料(グラフェン、CNT)、新規メモリ(STT-RAM、Redox RAMなど)等の有望な材料について、それらの材料に特化した評価方法、報告例の調査、執筆を行っていく。



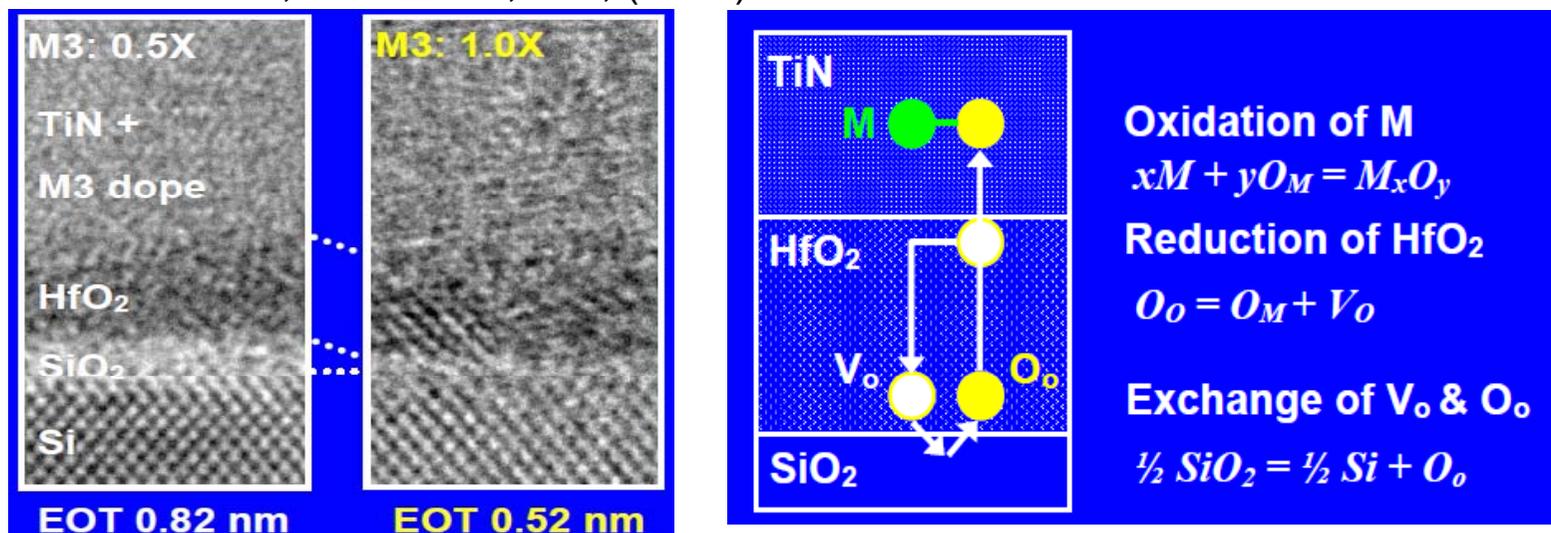
新探求ロジック: III-V, high-k材料

Difficult Challenges	Topics	Mat.	Ref.
✓ Mobility (n / p, channel direction))	高圧酸化によりGeO脱離を抑制、Siを超える移動度。electron: 1920 cm ² /Vs, hole: 725 cm ² /Vs	Ge	(1)
✓ Interface with high-k (low Dit, unpinned Fermi level with high-k growth)	ALD-Al ₂ O ₃ 形成による良好な界面特性 (TMA*によるセルフクリーニング効果) *Trimethyl-aluminum	InGaAs, InP	(2) (3)
✓ Low R _{SD} S/D formation	Ni/InGaAsのアロイにより低抵抗SDを形成	InGaAs	(4)
✓ Selective growth of channel materials	SiO ₂ 上でのGe単結晶成長(400μm)に成功(急速溶融成長法)	Ge	(5)

- 1) C. H. Lee *et al.*, IEDM2010, 416, (2010)
- 2) Y. Xuan *et al.*, Electron Device Lett., 29, 294, (2008)
- 3) N. Taoka *et al.*, IWDTF2011, 149, (2011)
- 4) S. H. Kim *et al.*, IEDM2010, 597, (2010)
- 5) K. Toko *et al.*, SSDM2010, 31, (2010)

Difficult Challenges	Topics	Mat.	Ref.
✓ Sub-nm EOT with high carrier mobility	急速加熱によるSi Nano-wire上HfO ₂ 結晶成長(界面酸化膜なし)	HfO ₂	(1)
✓ High-k gate stack on 3-D / alternate substrate	ゲート材料による界面酸化膜の Scavenging	?	(2)

- 1) S. Migita *et al.*, IEDM2010, 269, (2010) / S. Migita *et al.*, IWDTF2011, 5, (2011)
- 2) T. Ando *et al.*, IEDM2009, 423, (2009)



安藤氏(IBM)提供資料 (Ref. 2)

ゲート電極中の物質M3の量により界面層膜厚とEOTを制御できる(左図)

Mの酸化、HfO₂の還元と界面層の減少が連鎖する(右図)

❖ 挑戦的課題

- 大面積で高品質なグラフェンの一様合成
- バンドギャップの形成(移動度を劣化させずに)
- ソース・ドレイン電極の選定
- ゲートスタックの選定
- 極性の制御
- 基板の影響の排除

ほか

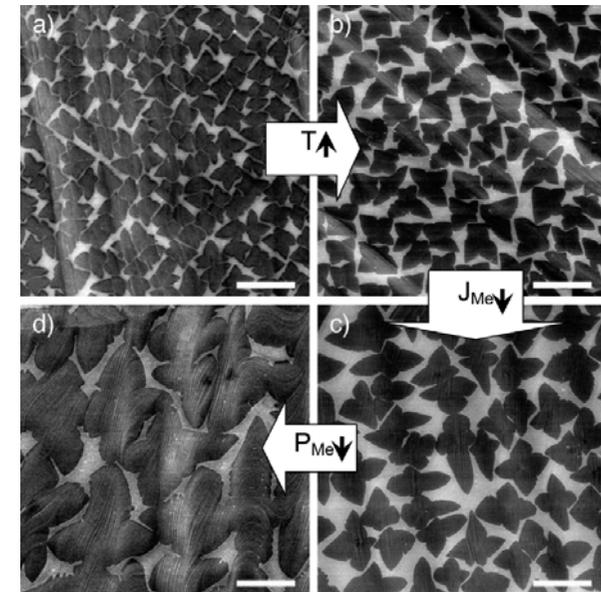
最近のトピックス

☆ドメインサイズが大きいグラフェンの形成

グラフェンの核形成ポイントの制御により数10 μm -
数100 μm のドメイン形成に成功

Li et al., Nano Lett. 10, 4328 (2010)

Li et al., JACS, dx.doi.org/10.1021/ja109793s



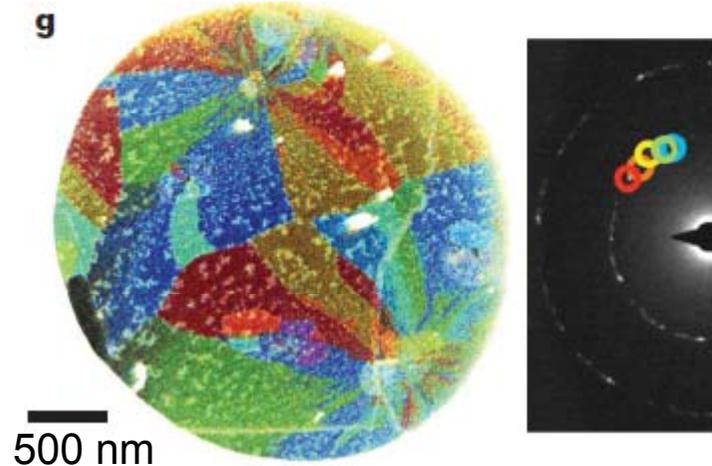
流量、分圧の制御がポイント

"Reprinted with permission
from Li. *et al.*, Nano lett. Vol.10, p.4328
(2010) Copyright 2010 American Chemical
Society."

☆グラフェンのドメインサイズの評価

暗視野TEMを利用することにより、グラフェンのドメインサイズを評価

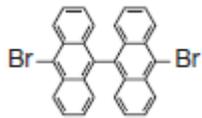
Huang et al., Nature 469, 389 (2011)



回折面でアパーチャを使うことにより、方向が異なるグラフェンを区別

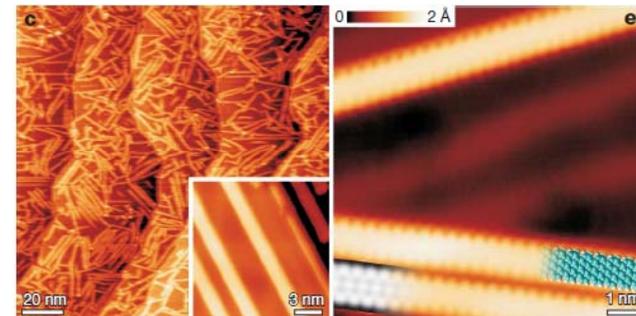
[Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: Huang et al., Nature Vol.469, p.389 \(2011\), copyright 2011](#)

☆均一幅のグラフェンナノリボンの形成



をプレカーサとして利用し、金基板上で幅の揃ったアームチェアナノリボン(N=7)を形成
電気特性は未評価

Cai et al., Nature 466, 470 (2010)



[Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: Cai et al., Nature Vol.466, p.470 \(2010\), copyright 2010](#)

☆高周波特性

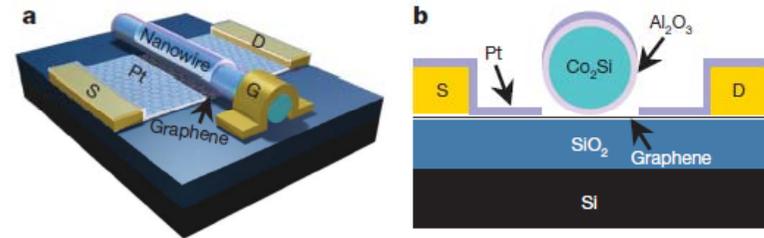
コアシェルナノワイヤをセルフアライントップゲートとして使用。 $f_T = 300$ GHz(最高値)

Liao et al., Nature 467, 305 (2010)

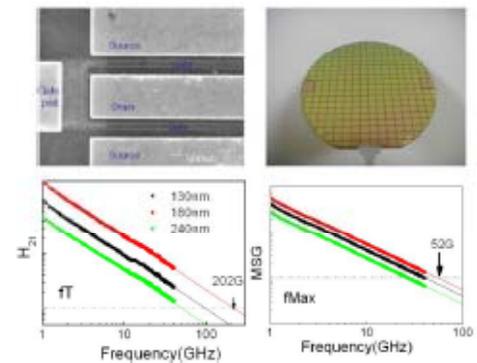
ICP Plasma CVDにより650°Cで合成したグラフェンにより、埋め込みゲートのトランジスタ作製
 $f_T = 202$ GHz

J. Lee et al., IEDM 2010, p.568

K. Kim, IEDM 2010, p.1



Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: Liao et al., Nature Vol.467, p.305 (2010), copyright 2010



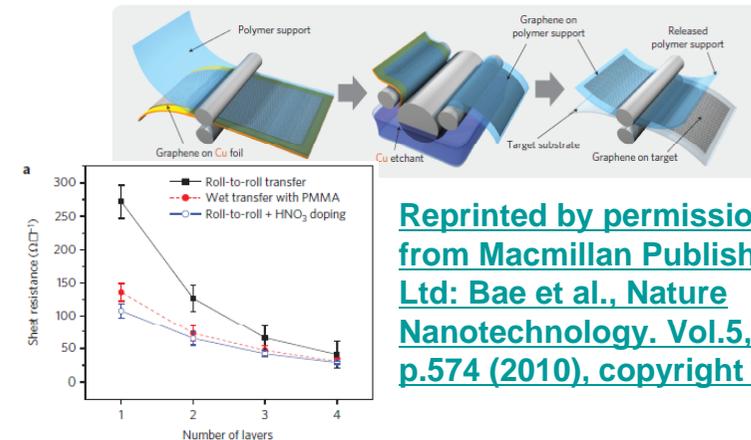
Reprinted with permission from K. Kim., IEDM Tech. Dig., p.1 (2010). Copyright 2010 IEEE

☆透明電極への応用

銅フォイル上に合成したグラフェンを転写し透明電極形成

ドーピングすることによりITOを超える性能 (30Ω/□ @90% transparency)を達成

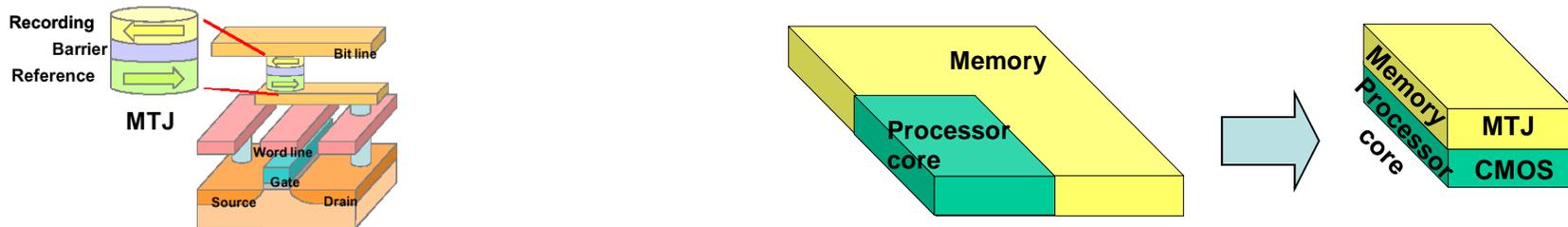
Bae et al., Nature Nanotech. 5, 574 (2010)



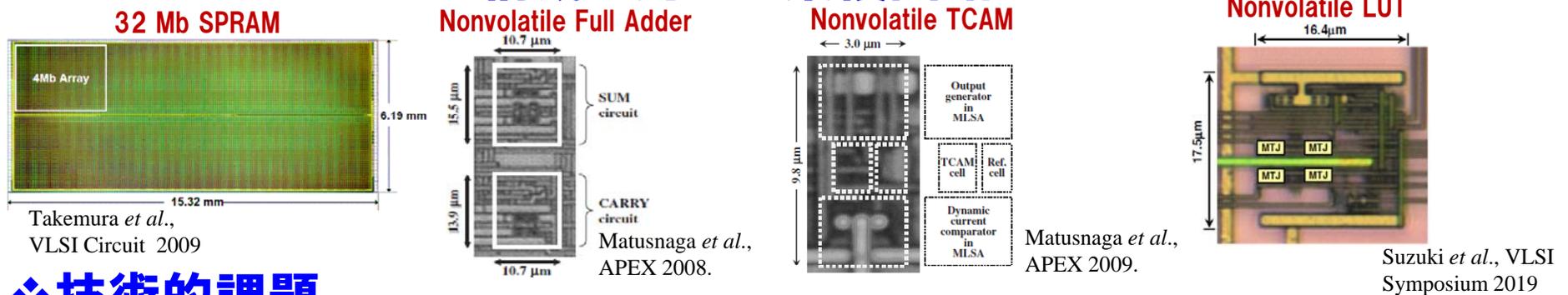
Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: Bae et al., Nature Nanotechnology. Vol.5, p.574 (2010), copyright 2010

❖ MTJ (磁気トンネル接合) を用いたスピントロニクス

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



❖ ロジック-インメモリ構成を用いた集積回路



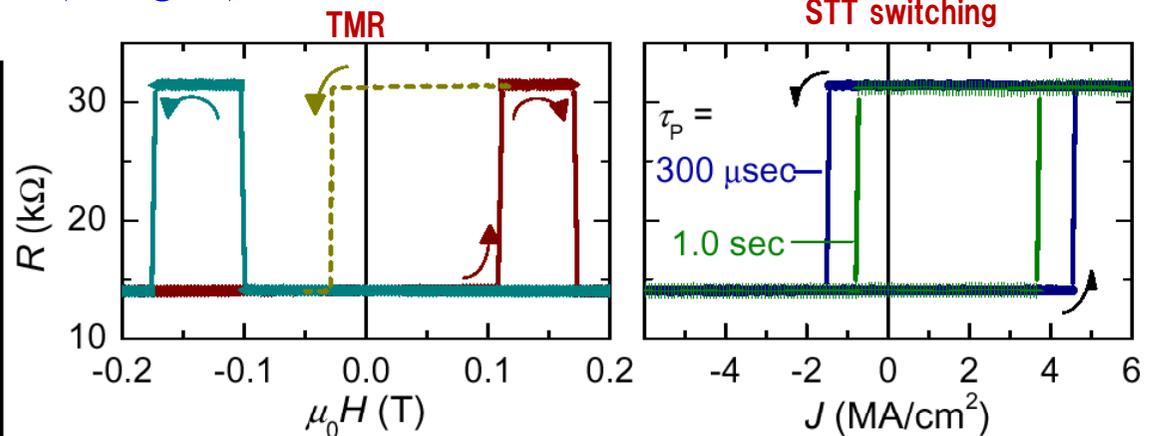
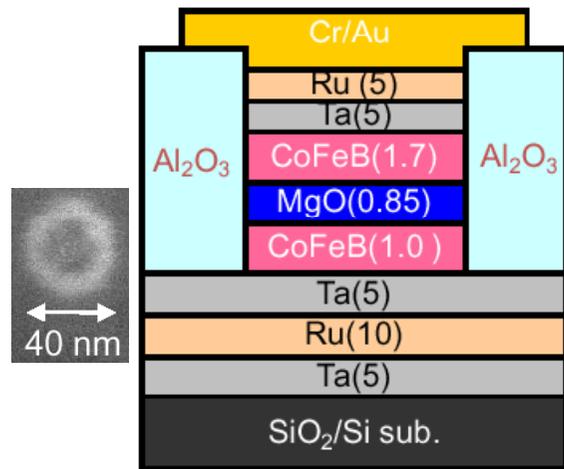
❖ 技術的課題

- 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)



新探求メモリ: スピントロニクス材料

垂直磁気異方性CoFeB/MgO/CoFeB MTJ



- TMR比 > 120%
- $I_c < 50 \mu A$
- $E/k_B T > 40$ at 40 nm ϕ
- $T_a = 350^\circ C$

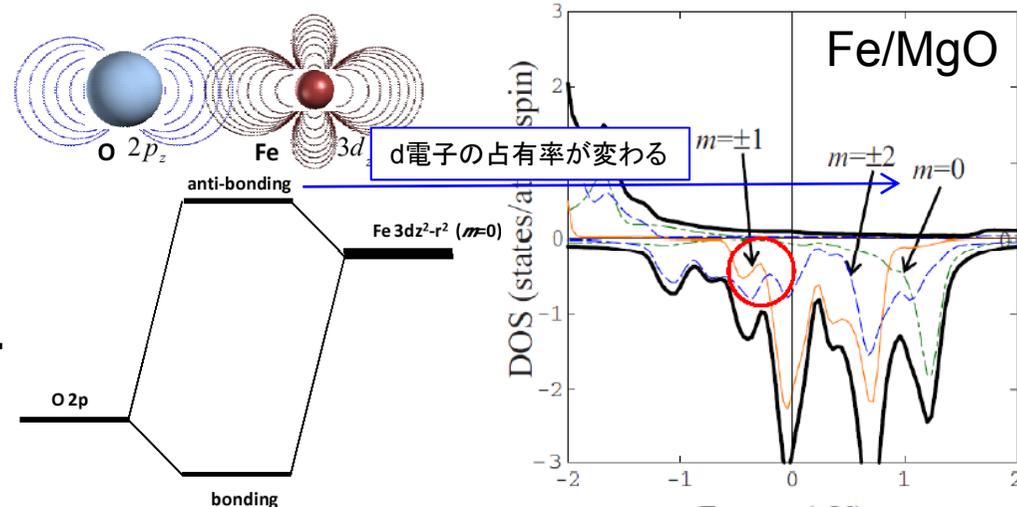
Ikeda *et al.*, Nature Mater. 2010, CSIS Intl. WS 2011.

STRJ-ERMの方針

高熱安定性、低スイッチング電流を両立する材料、材料の組み合わせの探索 (高磁気異方性、低ダンピング定数)。材料パラメータの外部因子 (電界等) による制御。

Work in Progress - Do not publish

界面磁気異方性

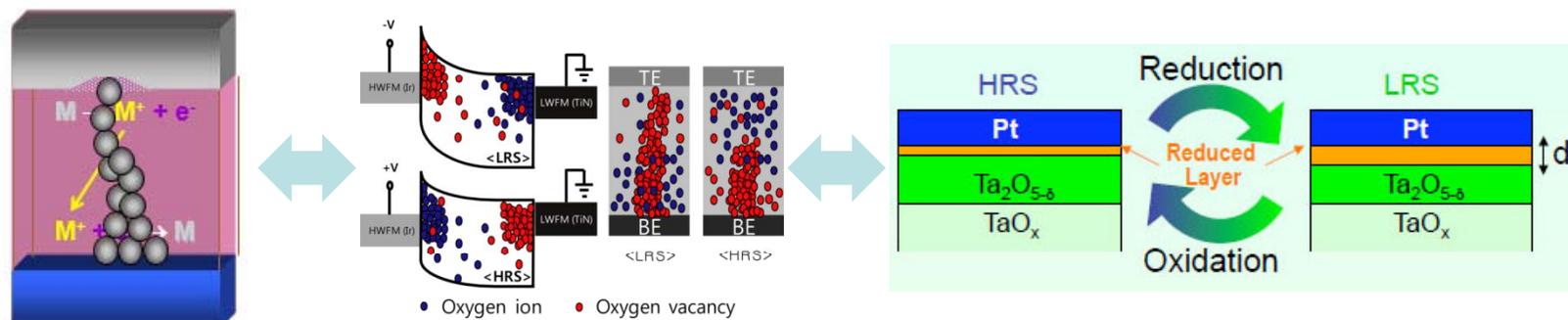


Nakamura *et al.*, PRB 2010.

Memory Materials Workshop

2010.11.30, Tsukuba, Japan (38 participants)

Redox RAM: How can we experimentally verify that the Redox RAM operating mechanism?



STT-RAM: What materials or interface research should be performed to enable reduction of write energy by 10X?

Even with the combination of MgO-CoFeB (normally in-plane), interface control enables Perpendicular MTJ.



Emerging Memory Technology Maturity Workshop April 6~7, 2010

Evaluation Criteria (Must Have)

- Potential for scaling beyond the 16nm generation
 - What is the limit of scaling and limiting factor?
 - Are there intrinsic statistical fluctuations that could limit scaling?
 - Multi-bit (Multi-layer) potential?
- Low Switching Energy (~Smaller Addressing Device)
 - Fast operation, Random Access, Parallel Processing
- CMOS Compatibility
 - Bit cost competitiveness
- How well is the switching physics understood?



新探求メモリ: 複合酸化物材料

Before Discussion

Nanothermal:

- NW – PCM
- Fuse/Antifuse Memory

Nanoionic Memory

Electrochemical, Valence change
Thermo-chemical

Electronic Effects Memory:

- Charge Injection
- Mott Transition
- FE Polarization reversal

Macromolecular Memory

After Discussion

Nanothermal:

- NW – PCM

Redox Memory

Electronic Effects Memory:

- Charge Injection
- Mott Transition

FeFET Family (?)

Macromolecular Memory





新探求ロジック・メモリ:分子材料

ITRS2009に挙げられた問題点:分子と電極のコンタクト

“stable, reproducible low potential barrier contacts” (ERM p.17)

半導体のコンタクトは不純物(キャリア)濃度、金属の仕事関数などにより量子力学的に定量化されている(1914年)

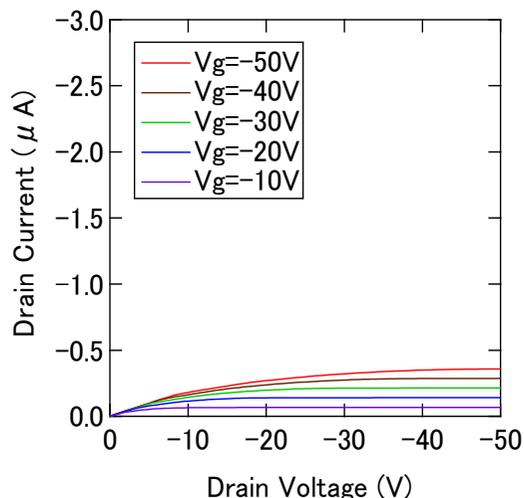
(W. H. Schottky, *Physik der Glühelktroden*, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1928.)

しかし、分子と電極のコンタクトは全く定量化も、理論化も、計測方法の標準化すらなされていない。そればかりか、分子膜のキャリア濃度、移動度計測技術すらも標準化されていない。

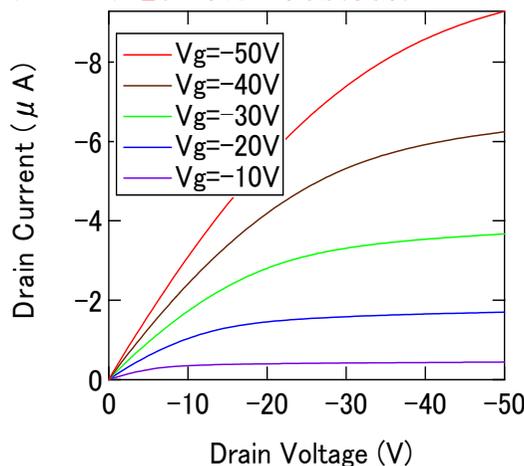
計測方法の標準化が必要



新探求ロジック・メモリ:分子材料



現在一般的な、電極部分に高濃度層のないOTFT特性



電極部分に高濃度層のあるOTFT特性

電極部分への高濃度層挿入による特性向上

Y. Ishikawa, et al., J. Appl. Phys., 107, 053709 (2010).

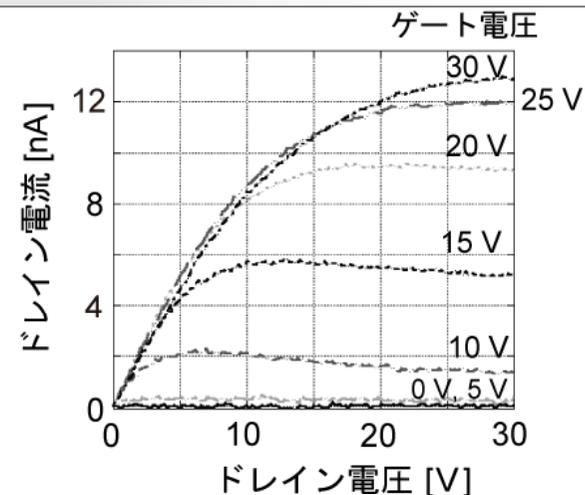
Work in Progress - Do not publish

高濃度層を挿入するだけで三〇倍特性向上

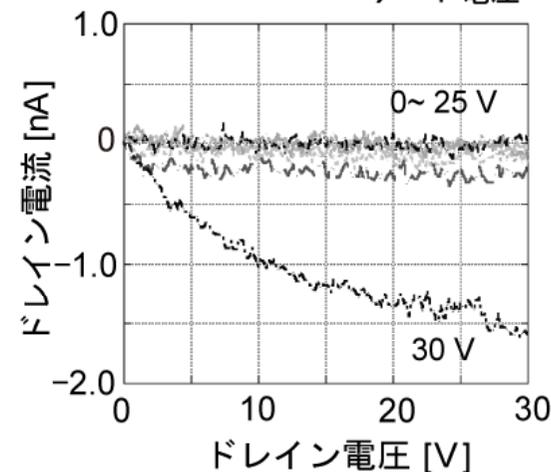
∴デバイスの本質的特性であってコンタクトが理由ではない

∴有機材料と酸素の反応であってコンタクトが理由ではない

大気に曝すだけで性能大幅低下



真空中における出力特性
ゲート電圧



大気中における出力特性

計測雰囲気による特性の変化

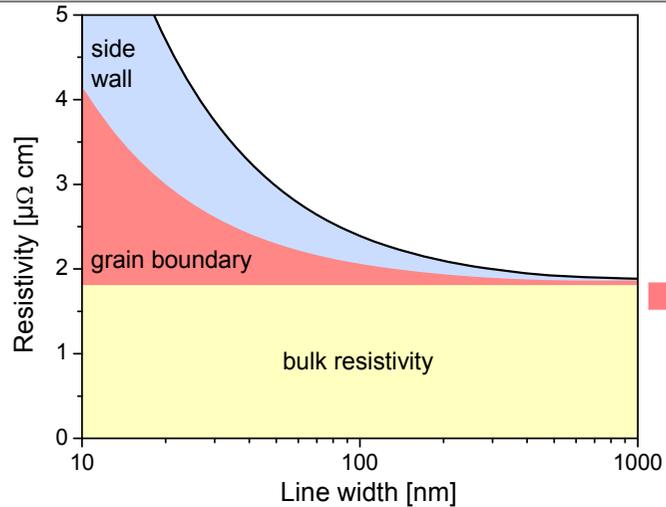
野田啓他、機能材料 vol.29 no.4 pp. 80-86.

STRJ WS: March 4, 2011, WG13 ERM 24

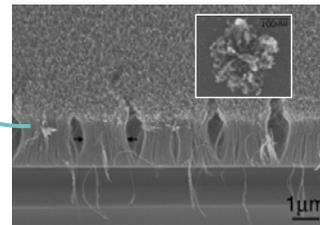


Interconnect材料 (Carbon)

Interconnect Efficiency

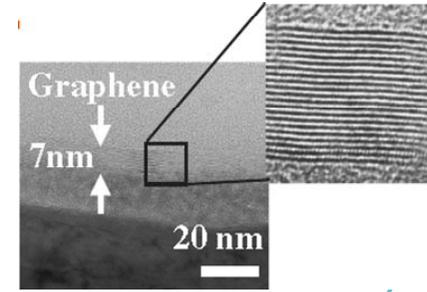


Carbon Nanotubes

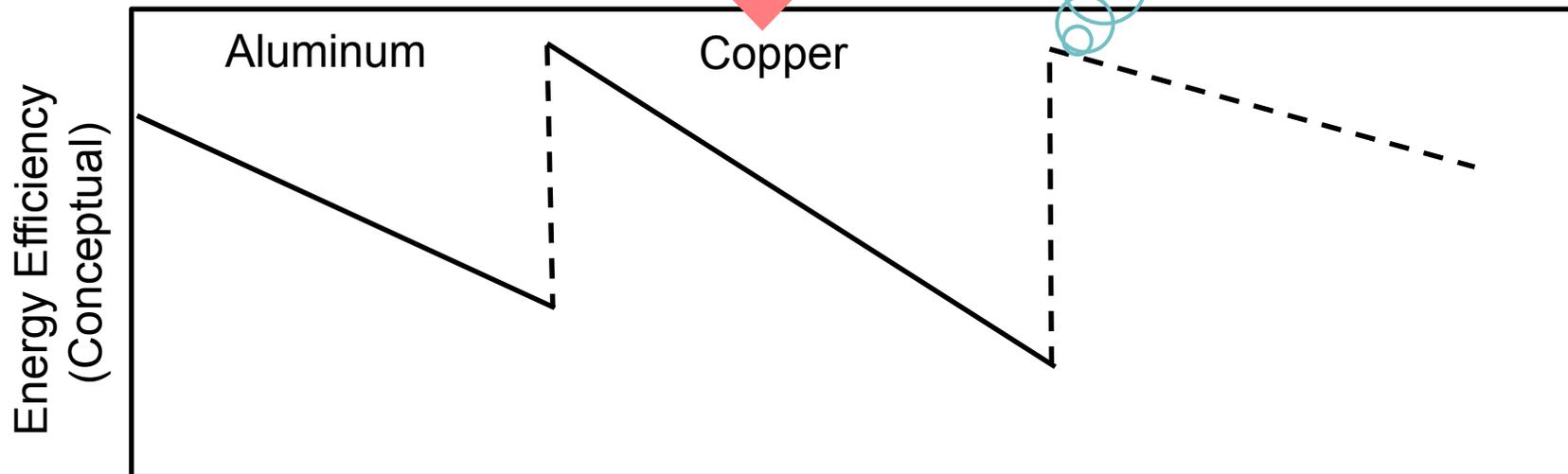


MIRAI-Selete, APEX3

Graphene



Fujitsu / CREST, APEX3



After M. Garner , ITRS 2010 Winter Meeting

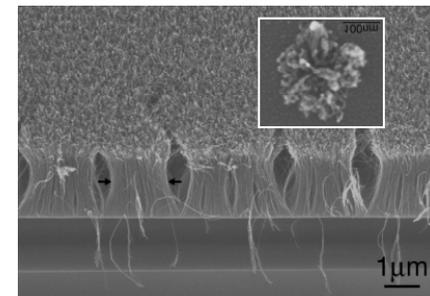


Interconnect材料 (Carbon)

❖配線応用ナノカーボン材料のアップデート

- Carbon Nanotubes

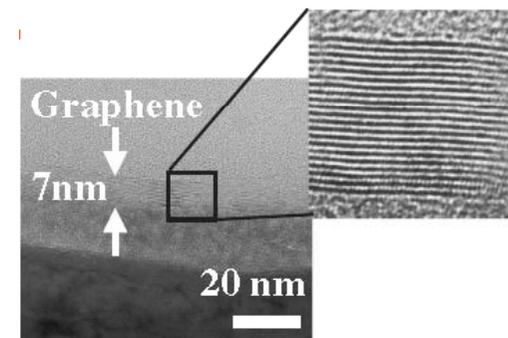
- 超高密度成長 $>1 \times 10^{12}$ tubes/cm²
 - MIRAI-Selete / Toshiba, APEX 3 (2010) 055002
 - Cambridge Univ. et al, ECS Nano 4 (2010) 7431
- ビア集積化
 - MIRAI-Selete / Toshiba, ADMETA 2010
 - CEA et al., IEDM 2010 33.4



MIRAI-Selete, APEX3

- Graphene

- 低温成長 650°C
 - Fujitsu Lab / CREST, APEX 3 (2010) 025102
- CMOS 集積化
 - Stanford Univ. et al., IEEE ED 57 (2010) 3137



Fujitsu / CREST, APEX3



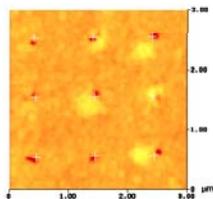
確定的ドーピング(Deterministic Doping), FEP

◆ 確定的ドーピングとは何か(定義)

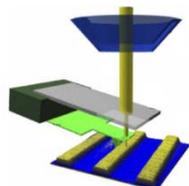
単一もしくは少数のドーパントをチャンネル領域の他、ソース/ドレイン領域に10nm以下の精度で導入するテクノロジー群。より高いデバイスパフォーマンス、新機能を創造するための原子レベルでのドーパント添加材料、デバイス、プロセス、キャラクタリゼーションテクノロジー。

◆ 過去5年間の進展(Deterministic Doping WSより:2010年11月、米国バークレー)

単一イオン注入、ドーパント規則配列

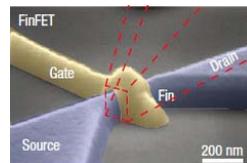


Shinada, Nature 2005

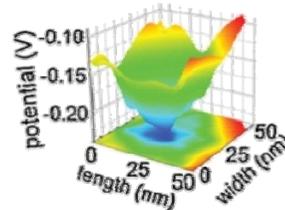


Persaud, Schenkel
JVSTB 2005

単一ドーパント輸送現象観測

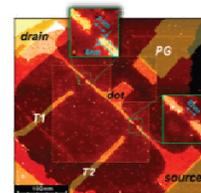


Lansbergen, Rogge
Nature Physics 2008



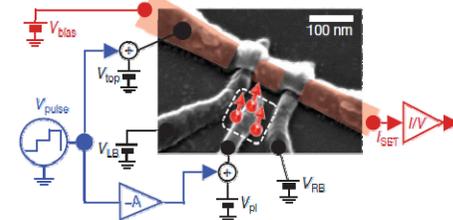
Tabe, Phys. Rev. Lett. 2010

STM原子トランジスタ



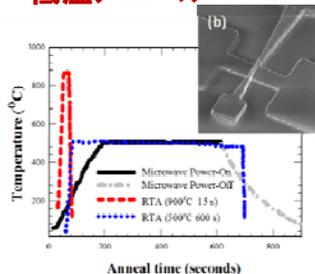
Simmons,
Nano Letters 2009

単一ドナースピン検出



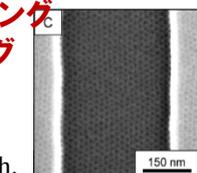
Morello, Dzurak, Nature 2010

低温アニール

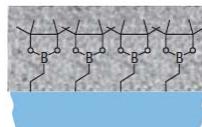


By courtesy of Dr. Lee/NDL

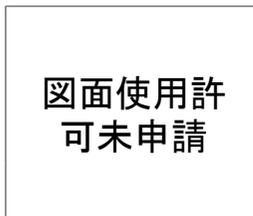
自己組織化単分子膜
パターニング
ドーピング



Bosworth,
Ober, ACS NANO 2008



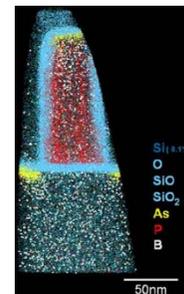
3次元離散的
シミュレーション



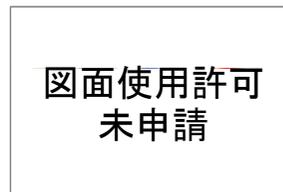
図面使用許
可未申請

Roy, Asenov
Science 2005

3次元アトムプローブ



By courtesy of
Inoue/Kyoto Univ.

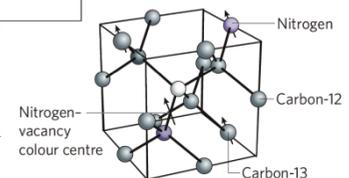


図面使用許可
未申請

Nuemann, Jelezko
Science 2010

Hanson, Awschalom
Nature 2008

単一窒素-空孔
スピン検出





確定的ドーピング(Deterministic Doping)

❖ 挑戦的課題

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すること(確定的ドーピングの定義)。

❖ 個別課題(Deterministic Doping WSより)

単一イオン注入: スラグリング、拡散抑制。スループット改善。

自己組織化単分子膜: 均一性、欠陥制御。

STM原子トランジスタ: スループット改善。

アクティベーション: 低温化、均一性。

イメージング: 検出効率、S/N比改善。サンプル作製。

モデリング: 第一原理計算からデバイスシミュレーションへ階層的アプローチ。

単一ドーパント輸送: 低温動作、ゆらぎ耐性。

単一ドナーSpin制御: コヒーレントSpin輸送。高品質同位体フリーシリコン。

単一窒素-空孔Spin制御: 窒素-空孔生成率改善。

❖ STRJ-ERMの方針

ドーピングのみならず、材料設計、デバイス、ファブリケーションをカバー。

ITRS2011版執筆担当。



Assembly and Packaging 材料

- 1D Interconnects
 - Critical Assessment
 - Nanosolder, CNT & NW
- Polymers with Mechanical, Electrical & Thermal Properties
- Polymers With Zero Moisture Absorption
- Ion Free or Immune Mold Compound
- Management of III-V & Ge Device Stress

Public conference 資料より
December 3, 2010



ERMにおけるESH

Vicki Colvin (ライス大学)
 CNTsの可能性は大きい。...
 「私たちはCNTsの扱い方を知っている」と確信
 することが重要
 ⇒確信できるほど詳しくなることが重要
 (WG13であげられた考え方の一例)

❖ 挑戦的課題

備えあれば憂いなし

想定外の事象が起こったら？

「どのように対応するのか」を事前に注意深く練っておく
 最悪の結果が起こる可能性を「見ないふり」をしない



ナノテクノロジー社会受容ポータルサイト



ICON™
 INTERNATIONAL COUNCIL
 ON NANOTECHNOLOGY

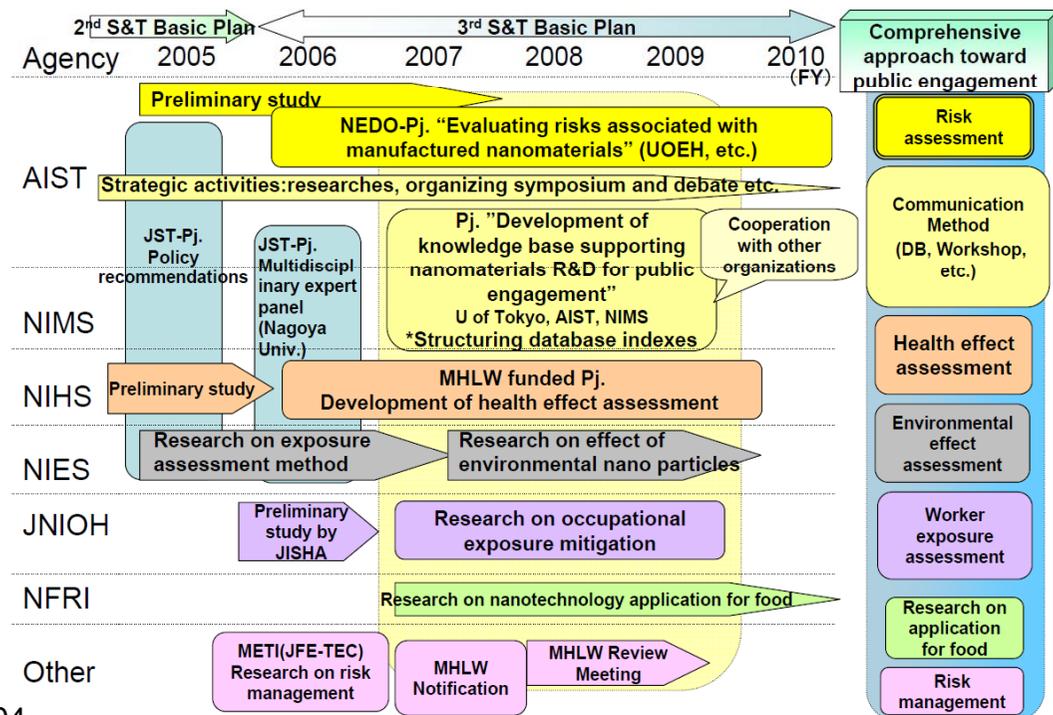


ICON@Rice Univ.

- ・ 情報共有のためのプラットフォームの構築
- ・ リスク管理ツール開発
- ・ 信頼性の高い材料データの蓄積
- ・ 人材育成
- ・ 環境応用の可能性の探索と安全性の両立
- ・ 双方向性のコミュニケーションおよびコミュニケーションツールの開発

❖ERMのESHに関するトピックス

- ・ 欧州（RoHS指令、REACH規則等）、米国（EPA、FDA等）を中心とする環境規制の強化
 - ナノサイズが検討対象に
 - 新規材料（ナノサイズに限らない）も視野に
 - 個別材料を対象としたナノ材料規制の開始
- ・ 材料の有害性情報の増加、一方で**リスク評価の難しさ**の指摘（例：製品のライフサイクルにおけるESH）
- ・ リスク管理策の策定の要請
- ・ 各国のESH関連研究への継続的な予算配分



ESH-related effort in Japan since 2004

By S. Ishizu, AIST



STRJ-ERM (WG13) の独自調査活動

ヒアリング記録

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 4月27日

決定論的ドーピング等 (FEP) 品田委員 5月27日

ナノテクノロジーの社会受容 (ESH) 関谷委員 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 7月29日

Massively parallel computing on an organic molecular layer (ERD)

NICT ペーパー委員 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 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 (FEP/PIDS)

由上委員 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 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テクノロジー 大塚研一 様 2011年2月24日

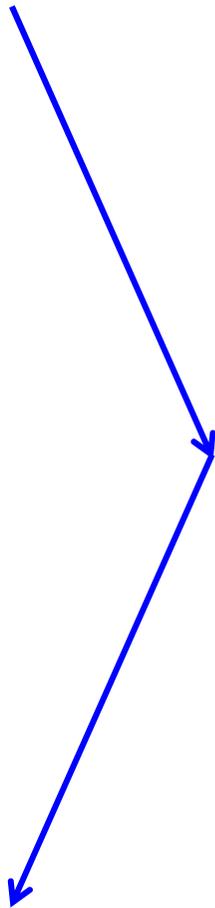


STRJ-ERM (WG13) の独自調査活動

ITRS / ERM 2007 version : 材料別

Table ERM12 ITWG Earliest Potential ERM Insertion Opportunity Matrix

	Ge & III-V	Carbon Nanotubes and other Metal Nanotubes	Nanowires	Graphene	Oxide Nanoparticles	Metal Nanoparticles	Novel Macromolecules	Self Assembled Materials	Complex Metal Oxides	Spin Materials (Fe, Co, Mn, Ni, etc.)
Application										
Process Materials	Black	Black	Black	Black	White	Black	Yellow	Blue	Black	Black
Lithography	Black	Black	Black	Black	Yellow	Black	Yellow	Blue	Black	Black
Device: Memory	Cyan	Blue	Blue	Blue	Black	Black	Blue	Black	Cyan	MRAM
Device: Logic	Cyan	Blue	Blue	Blue	Black	Black	Blue	Black	Cyan	Purple
Interconnect	Cyan	Cyan	Blue	Blue	Black	Black	Cyan	Cyan	Black	Purple
Packaging	Black	Yellow	Cyan	Cyan	Yellow	Yellow	Cyan	Yellow	Cyan	Black
LEGEND	Earliest Potential Insertion									
	Current Apps		3-5 yrs	5-10 yrs	10-15 yrs	15+ yrs	Not on the Roadmap			



ITRS / ERM 2009 version : 応用別

Work in Progress - Do not publish



STRJ-ERM (WG13) の独自調査活動

Difficult challenges

10 Most Difficult Challenges < 16nm	Summary of Issues	OHT & sub-terminal nanoribbons	Nanoribbon	Capitance	Oxide Nanoparticles	Metal Nanoparticles	Novel Macromolecules	Self-Assembled Monolayers	Functional Self-Assembled Monolayers	Spin Materials	Materials for Charge Storage	Materials for Storage Elements	
1	Materials showing the extreme properties	FLP Contact R	FLP Contact R FLP: Contact R Control of the physical property of the contact						Ultra high k, Multiferroic with Tc > RT	Ferromagnetic with Tc > RT		PID, FEP, EFD	
2	Interface control		reliability, leakage, Control of interface with insulators						Fluorinated surface control			PID, FEP, EFD	
3	Defect control			Defect formation during device fabrication processes should be assessed and minimized.					Diffusion control of carbon / anion			EFD	
4	Electrochemical control			Control of chemical doping					Interface defect control at interface, Oxygen defect control			EFD	
5	Self-assembled formation and the property control			Controlled fabrication of nanoribbons and nanowires		Inorganic metal and molecular pattern fabrication		Arbitrary				Liho	
6	Deterministic fabrication and the property control			Dopant placement and activation i.e. deterministic doping with desired number at precise location for Vth control and S/D formation								PID, FEP, EFD	
7	Metrology	electrical and thermal properties of each nanoribbon	p/n junction (or carrier distribution) visualization	p/n junction (or carrier distribution) visualization					dielectric, magnetic and thermal properties visualization (or property mapping)	spin structure, magnetic and electric properties visualization (or property mapping)		Met.	
8	Metrology	vacancies, interstitials, and dislocations around other elements (dopants)	vacancies, interstitials, and dislocations around edge contacts, dopants	vacancies, interstitials, and dislocations around edge contacts	nanowire-type, cross-section, interface and crystal defects.	nanowire-type, cross-section, interface and crystal defects.	disordering of configuration.		oxygen vacancy and vacancy of metal ion.	oxygen vacancy and vacancy of tunnel oxide.	defects generation after charge/discharge process in positive electrode materials	Met.	
9	Modeling & Simulation	Simulations for fabrications	Simulations for fabrications	Physics models of the edge and the substrate interaction	Simulations for control of structure and properties	Simulations for control of structure and properties	Statistical simulations as well as electronic structure calculations		Multiscale simulations, SOC effect at interface	Need of improvement in basic physics	Simulations for performance and lifetime	Simulations for performance and lifetime	MIS, ESH
10	ESD Risk management												ESH



ポイント1:
縦方向に、挑戦的課題を整理できるように項目出し。
界面制御、欠陥制御、固体化学的制御、確定的製造など。
➤計測、モデリング、ESHを追加

ポイント2:
横方向に、創・蓄エネ材料を追加

ポイント3:
マトリクスにその課題の解決が重要になるであろう時期を予想。



まとめ STRJ-ERM (WG13)

- ERMの章に2010年度の改訂なし
- Beyond 16nm世代の新探求メモリについて
クリティカルアセスメントを実施
- ハイライトされることになったメモリの材料学的設計
と課題についてのワークショップを実施
- 確定的ドーピング、カーボン材料等について
ワークショップを実施
- ERMで出来ることは多い ⇔ 今後はリスク管理が重要
- 国内独自の活動として、2011年度版改訂に向けた
ヒアリング、また、挑戦的課題テーブルの検討を実施



Proceedings of the IEEE, Vol. 98, No. 12 (2010)

Nanoelectronics Research: Beyond CMOS Information Processing

Nanoelectronics Research for Beyond CMOS Information Processing

Bourianoff, G. Brillouet, M. Cavin, R. K. **Hiramoto, T.** Hutchby, J. A. Ionescu, A. M. **Uchida, K.**

Regional, National, and International Nanoelectronics Research Programs: Topical Concentration and Gaps

Brillouët, M. Bourianoff, G.I. Cavin, R.K. **Hiramoto, T.** Hutchby, J.A. Ionescu, A.M. **Uchida, K.**

In Quest of the “Next Switch”: Prospects for Greatly Reduced Power Dissipation in a Successor to the Silicon Field-Effect Transistor

Theis, T.N. Solomon, P.M.

Carbon Nanotubes for VLSI: Interconnect and Transistor Applications

Awano, Y. Sato, S. Nihei, M. **Sakai, T.** Ohno, Y. Mizutani, T.

Graphene for CMOS and Beyond CMOS Applications

Banerjee, S.K. Register, L.F. Tutuc, E. Basu, D. Seyoung Kim Reddy, D. MacDonald, A.H.

III-V Nanowires—Extending a Narrowing Road

Wernersson, L.-E. Thelander, C. Lind, E. Samuelson, L.

Enhancing CMOS Using Nanoelectronic Devices: A Perspective on Hybrid Integrated Systems

Ricketts, D.S. Bain, J.A. Yi Luo Blanton, R.D. Mai, K. Fedder, G.K.

Mechanical Computing Redux: Relays for Integrated Circuit Applications

Pott, V. Hei Kam Nathanael, R. Jaeseok Jeon Alon, E. Tsu-Jae King Liu



Proceedings of the IEEE, Vol. 98, No. 12 (2010)

Nanoelectronics Research: Beyond CMOS Information Processing

Low-Voltage Tunnel Transistors for Beyond CMOS Logic
Seabaugh, A.C. Qin Zhang

Molecular Nanoelectronics
Vuillaume, D.

Spin-Transistor Electronics: An Overview and Outlook
Sugahara, S. Nitta, J.

The Promise of Nanomagnetism and Spintronics for Future Logic and Universal Memory
Wolf, S.A. Jiwei Lu Stan, M.R. Chen, E. Treger, D.M.

Device and Architecture Outlook for Beyond CMOS Switches
Bernstein, K. Cavin, R.K. Porod, W. Seabaugh, A. Welser, J.

Memory Devices: Energy–Space–Time Tradeoffs
Zhirnov, V.V. Cavin, R.K. Menzel, S. Linn, E. Schmelzer, S. Bräuhaus, D. Schindler, C. Waser, R.

Phase Change Memory
Wong, H.P. Raoux, S. Kim, S. Liang, J. Reifenberg, J.P. Rajendran, B. Asheghi, M. Goodson, K.E.

The Atomic Switch
Aono, M. Hasegawa, T.

Resistive Random Access Memory (ReRAM) Based on Metal Oxides
Akinaga, H. Shima, H.