



新材料は半導体デバイスの低消費電力化 に貢献できるか?

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) 有田幸司 (ルネサスエレ)、粟野祐二 (慶應大)、内田建 (慶大)、 大野雄高 (名大)、大森克実 (TOK)、佐々木秀幸 (東芝ナノアナリシス)、 品田賢宏 (産総研)、杉山直之 (東レリサーチ)、相馬聡文 (神戸大)、 竹村誠洋 (物材機構)、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)、山田茂 (イビデン)

用語集



BN Boron Nitride

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

OEL Occupational Exposure Limit

PEMS Polydimethylsiloxane

PET Polyethylene Terephtalhate

PIDS Process Integration, Devices, and Structures

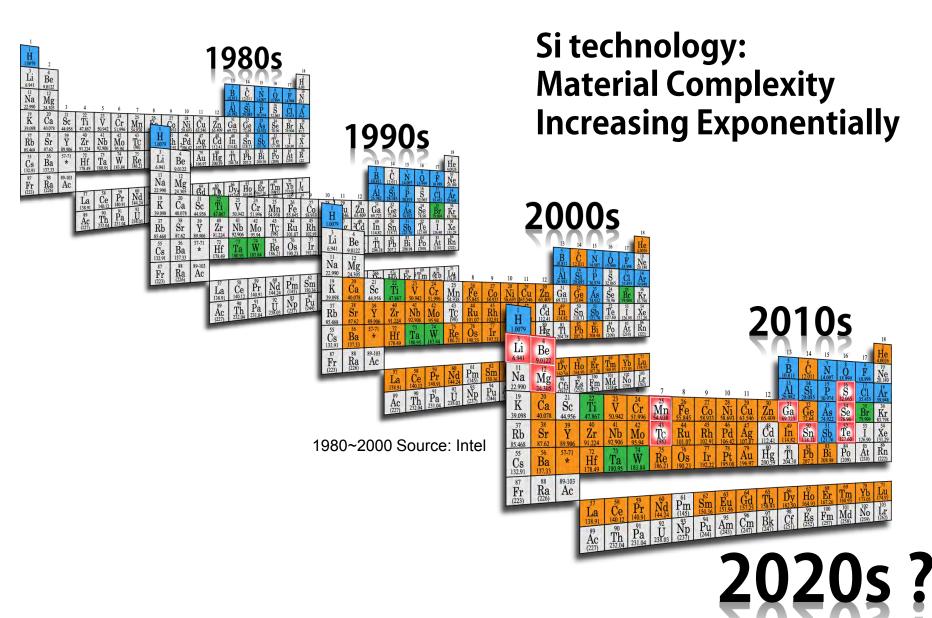
REDOXRAM 学術論文でRRAM, ReRAMと呼ばれているメモリのこと

SAM Self-Assembled Monolayer

STT Spin-Transfer Torque

SOG Spin-On Glass







> WG13 (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	o
Sharing roles	Members			
Introduction (Scope, etc)	全員(20名)			
Emerging Research Device Material	粟野(慶大)	酒井(東芝)	内田(慶大)	大野(名大)
	佐藤(産総研)	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)	大森(TOK)	松澤(ソニー)	品田(産総研)
Emerging FEP and PIDS Materials	有田(ルネサス)			
Interconnects	有田(ルネサス)	粟野(慶大)	酒井(東芝)	佐藤(産総研)
Assembly and Package	山田(イビデン)	佐藤(産総研)	大野 (名大)	
Environment, Safety, and Health	竹村(NIMS)			
Metrology	佐々木 (東芝ナノアナリシス)	杉山 (東レリサーチ)		
Modeling and Simulation	宮本(産総研)	相馬(神戸大)		

ヒアリング ご協力ありがとうございました



❖ WG13 (ERM) 独自の活動

「SiC材料・デバイスの課題」 産総研 畠山哲夫様 2013年3月21日

「非平衡量子伝導理論の現状と今後 ~熱問題に対する取り組みを中心に~」 産総研 浅井美博様 2013年4月18日

「走査プローブを用いた半導体評価技術~STMによるドーパント分布計測 および 高速AFMによるレジスト現像プロセスの観察~」 生体分子計測研究所 西澤正泰様 2013年5月29日

「14nm技術世代以細対応マルチゲートFinFETデバイス技術」 産総研 昌原明植様 2013年7月24日

「先端メモリデバイス/材料における評価解析技術」 東芝セミコンダクター&ストレージ社 圷晴子様 2014年2月19日



微細化による低消費電力化

> リソグラフィ材料

担当:大森委員、戸所委員、松澤委員

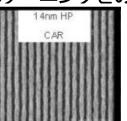


リソグラフィによる微細化推進により半導体デバイスの低消費電力化に資する

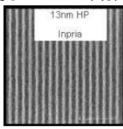
❖EUVレジスト

- ◆ EUVLリソグラフィ向けレジスト材料の微細化に向けて、既存化学増幅系レジストの更なる改善および、EUV反応効率の高い新規無機系レジスト開発が報告されている
- ◆ それぞれの解像例として化学増幅系14nmHP、および無機系13nmHP
- ◆ 更にダブルパターニングとの組み合わせで9nmHPの解像例が報告されている

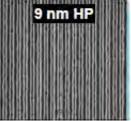
14nmHP Chemical amplified resist



13nmHP Inorganic resist



9nmHP EUV double patterning



Rudy Peeters, et al, Proc. of SPIE Vol. 8679 86791F-1, 2013

❖Directed Self Assembly (DSA)

- ◆ DSAにおける挑戦的課題として、欠陥密度の低減、オーバーレイ、10nm以下の微細化達成が 挙げられる
- ◆ 欠陥密度の低減については、各DSAプロセスステップにおいての欠陥発生要因調査が行われている (Y. Cao, et al, Proc. of SPIE Vol. 8680 86801S1, 2013)
- ◆ 10nm以下の微細解像性能達成の材料として、High Chi(x)* Block 候補一覧がTable ERM9に 挙げられている

Block Copolymer A-b-B	Flory-Huggins Parameter χ(25°C)	Flory-Huggins Parameter χ(150°C)
$Polystyrene\ Homopolymer\ (block\ A)$		
PS-b-PMMA	0.04	0.030
PS-b-PEO	0.08	0.05
PS-b-PI	0.09	0.068

*Chi (x)パラメーター: モノマー成分同士の斥力の数値、この数値が大きいほどモノマー同士の反発力が向上するため微細CDの相分離が可能となるex. x parameter (PS-b-PMMA)=0.04

▶ Deterministic(決定論的)ドーピング 担当:品田委員

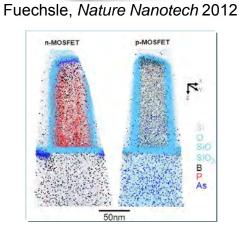


❖ Deterministicドーピング

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

❖ 2013年版アップデート

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

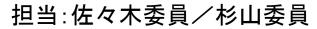


Inoue, Microscopy Today 2012

❖技術的課題

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

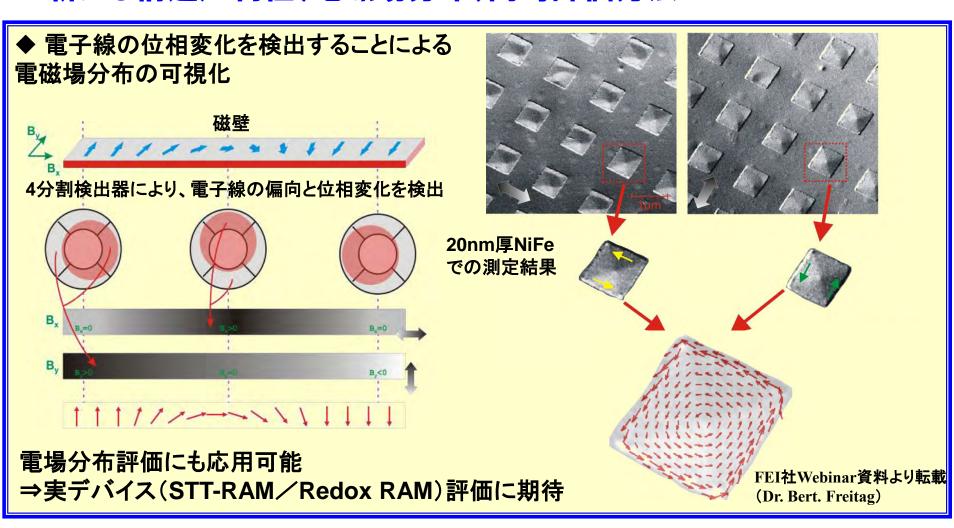
> 先端計測





差分位相コントラスト法(Differential Phase Contrast; DPC)

❖新たな構造/物性(電磁場分布)同時評価方法





低電圧駆動による低消費電力化

▶ ナノカーボン配線材料 (CNT) 担当:酒井委員



配線抵抗やコンタクト抵抗の低減ほか

❖高強度で軽量なCNTファイバー電線の可能性

◆ ヨウ素ドープしたCNTファイバーでカーボ ンファイバー並みの引張強度と金属並み の密度あたりの導電率を得た。軽量で高 強度の配線や架線電線の可能性。

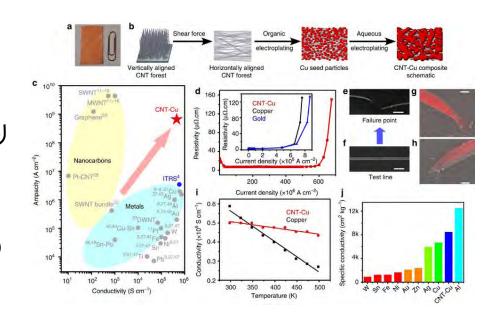
(Behabtu et al., Science 339, 182 (2013))

図面使用許可未取得

◆CNTーCu複合化により、 導電性と電流密度耐性を両立

◆ CNTバンドルにCuをメッキした複合構造でCu並みの導電率を保持しつつ、Cuより2桁大きい高電流密度耐性を得た。CNTと金属の複合化による配線性能向上の可能性を提示。

(Subramaniam et al., Nature Comm. 4, 2202 (2013))



> ナノカーボン配線材料 (グラフェン)

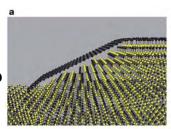
STRI

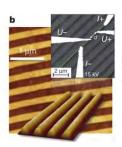
担当:酒井委員

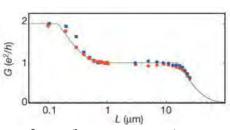
配線抵抗やコンタクト抵抗の低減ほか

᠅グラフェンナノリボンで金属より2桁低い低抵抗を観測

◆ SiC上成長ジグザグエッジグラフェン (幅40nm)で10µmを超えるバリス ティック伝導を観測。超低抵抗配線や 新デバイスへの展開可能性を示唆 (Baringhaus et al., Nature 506, 349 (2014))



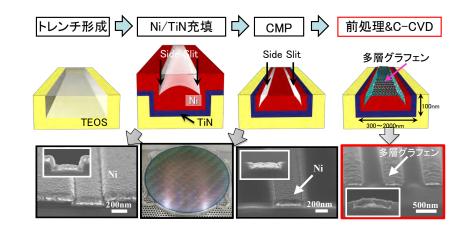




プローブ間10µm以上まで、 一定の導電性(抵抗)を示す

❖300mmSiウェハ上にグラフェン配線パターンを低温形成

◆ 300mm Si基板上のNiダマシン配線 上に低温(500°C)CVDにより多層グラフェンを選択成長。BEOLプロセスでの配線集積の可能性を提示 (Wada et al., Proc. IITC 2013, 187 (2013), 第3回LEAP成果報告会, 87 (2014))



> ナノカーボン材料 (グラフェン) 担当: 佐藤委員



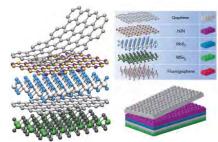
配線抵抗やコンタクト抵抗の低減~不揮発性デバイス

❖ITRS2013改訂の特記事項

◆ グラフェンのセクションに、MoS2に代表される遷移金属ダイカルゴゲナイドの記述を 大幅追加

❖新たなグラフェンデバイスの提案 - 異種二次元材料の積層

- ◆ 異種二次元材料の積層によるデバイス作製 (Geim and Grigorieva, Nature 499, 419 (2013))
- ◆ グラフェン-MoS₂ 積層構造による 多機能光応答メモリ (Roy et al., Nature Nanotechnol. 8, 826 (2013))



(Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: A. A. K. Geim and I. V. Grigorieva, Nature **499**, 419 (2013). copyright 2013)

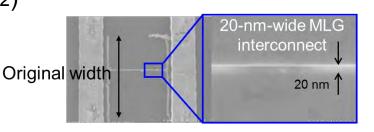
❖低抵抗グラフェン配線

◆ SiC上に形成された40nm幅のグラフェンナノリボンで、10ミクロンを超える バリスティック長が室温で得られた。

(Baringhaus et al., Nature (2014) doi:10.1038/nature12952)

◆ 多層グラフェンのインターカレーションによる 銅なみ抵抗とすぐれた信頼性の実証。20nm まで微細化しても抵抗劣化せず。

(Kondo et al., IITC 2013, SSDM 2013, ISDRS 2013)



低抵抗微細配線の実現で、LSIの低消費電力化に貢献

Work in Progress - Do not publish

STRJ WS: March 7, 2014, WG13 ERM

▶ ナノカーボン材料(CNTデバイス) 担当:大野委員

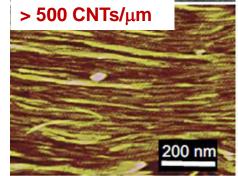


配線抵抗やコンタクト抵抗の低減~高性能トランジスタ(低いS値)

❖分離·成膜技術

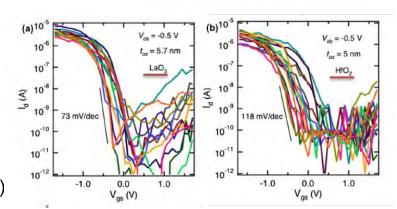
- ◆ 半導体CNTの高純度化 (>99.9%) (Tulevski et al., ACS Nano 7, 2971 (2013))
- ◆ 温度制御クロマトグラフィによるカイラリティ分離 (Liu et al., Nano Lett. 13, 1996 (2013))
- ◆ Langumuir-Schaefer法よる超高密度・配向CNT薄膜 (Cao et al., Nat. Nanotechnol. 8, 180 (2013).)

Temperature Scale Bar 10 °C 12 °C 14 °C 15 °C 16 °C 20 °C 26 °C Pump (6, 4) (6, 5) (7, 5) (8, 3) (8, 4) (7, 6) (8, 6)



❖ゲート絶縁膜の探索と素子特性制御

- ◆ LaOxによる低いs値と小さいしきい値ばらつき (Franklin et al., Appl. Phys. Lett. 102, 013108 (2013))
- ◆ 界面電荷によるp/n制御とCMOS (Moriyama et. al., Appl. Phys. Express 3, 105102 (2010))



STRJ WS: March 7, 2014, WG13 ERM

Work in Progress - Do not publish

スピントロニクスデバイス材料 担当:松倉委員



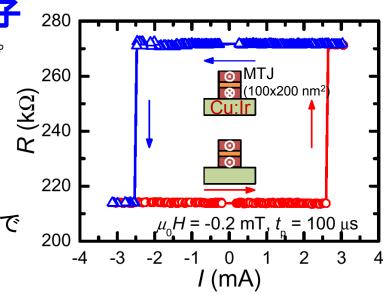
不揮発性デバイスの低電圧&電流駆動

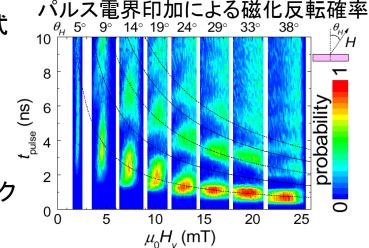
❖スピンホール効果を用いたスピン三端子

- ◆ VLSIの配線材料であるCuベースの材料(Irドープ Cu)中のスピンホール効果を利用した磁化反転 (Yamanouchi *et al.*, APL 1**02**, 212408 (2013))
- ◆ 三端子化により、高速性と信頼性が向上
- ◆ スピンホール角の大きいBiドープCuを用いることで 低消費電力化が期待

❖電界誘起磁化反転

- ◆ 磁化歳差運動を利用した高速・低消費磁化反転方式
- ◆ 面内印加磁界強度を変えることでサブナノ秒の電界 誘起磁化反転を実現 (Kanai *et al.*, APL 1**03**, 074208 (2013))
- ◆ 電流(スピン流)を用いないので、従来のスピントロニクス素子より2-3桁低い電力での磁化反転が可能





STRJ WS: March 7, 2014, WG13 ERM

Work in Progress - Do not publish

> 複合酸化物材料

担当:富岡委員

STRJ

不揮発性デバイスの低電圧駆動

◇新たな酸化物デバイスの提案 ピエゾ(圧力) 効果を利用したトランジスタ (Piezoelectronic Transistor, PET)

PR; pressure sensitive piezoresistive material (SmSe, TmTe,Cr-doped V_2O_3) PE; relaxor piezoelectric, PZN-PT, PMN-PT $(1-x)[Pb(A_{1/3}Nb_{2/3})O_3]-x[PbTiO_3]$ (A;Zn, Mg)

With use of piezoelectric (PZN-PT, PMN-PT), voltage state is transduced to pressure or stress state for the PR materials.

Due to the high dielectric constant of PE, the gate/PE/common stack behaves like a parallel capacitor.

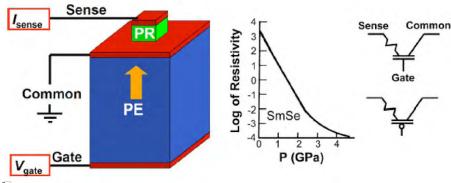


FIG. 1. (Left): PET with three terminals (gate, common, and sense), a PE element between the common and gate terminals and a PR element between the common and sense terminals. The constraining mechanical yoke is omitted for clarity, (center): Resistivity-pressure characteristic for a PR, SmSe, ¹⁶ (right): Symbols for noninverting (top) and inverting (bottom) PET.

D. Newns, B. Elmegreen, X. H. Liu and G. Martyna J. Appl. Phys. **111**, 084509 (2012). より転載

high speed (ps) and low voltage (~ 0.1 V) operation



その他の関連トピックス

> 分子デバイス

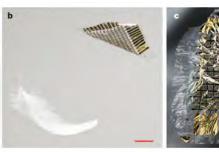
担当:野田委員

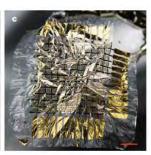


製造プロセスの低コスト化・低消費電力化

◇超軽量プラスチック電子デバイス

- ◆ 厚さ1 µm、重量3 g/m²の超軽量プラスチック箔上に、 大面積の有機半導体デバイス群の作製に成功。
- ◆ くしゃくしゃにしても、半径 5 µm 以下の折り曲げ 歪みを繰り返し加えても、デバイス特性は変化せず。





(Kaltenbrunner et al., Nature 499, 458 (2013))

❖数インチサイズの有機半導体単結晶薄膜

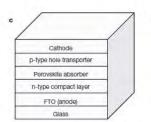
◆ 高移動度有機半導体(C10-DNBDT)の溶液を基板表面に滴下し、チョクラルスキー法に似た原理で、数インチサイズの有機半導体結晶の成長に成功。

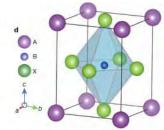
図面使用許可未取得

(Soeda et al., Appl. Phys. Express **6**, 076503 (2013))

❖有機/無機複合プレーナー型へテロ接合太陽電池

◆ 光吸収層に有機金属ハロゲン化物ペロブスカイトを使用。複雑なナノ構造を用いることなく、15%超の太陽光電力変換効率を達成。



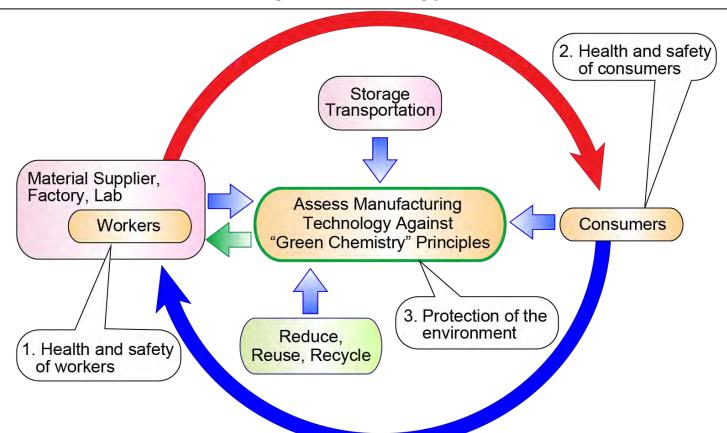


(Liu et al., Nature 501, 395 (2013))

ESH (ライフサイクルアセスメント) 担当: 竹村委員



Consensus Building in Multi-Stakeholder Life-cycle Risk Assessment of Manufacturing Technology and Products



Risk Management:

Practical Risk < Assessed Risk = Assessed Hazard x Assessed Exposure

Assessment procedure:

Nanomaterial characterization, Performance & Reliability assessments

STRJ WS: March 7, 2014, WG13 ERM 20



参考文献

Title: Research Updates: The three M's (materials, metrology, and modeling) together pave the path to future nanoelectronic technologies

Authors: Sean W. King, Harsono Simka, Dan Herr, Hiro Akinaga and Mike Garner

Journal: APL Mat. 1, 040701 (2013)

Free Access!!

http://scitation.aip.org/content/aip/journal/aplmater/1/4/10.1063/1.4822437

http://dx.doi.org/10.1063/1.4822437



ご清聴ありがとうございました