

半導体・バイオ融合集積化技術の構築

実施予定期間：平成18年度～平成27年度

総括責任者：浅原利正（広島大学・学長）

協働機関：エルピーダメモリ（株）、
（株）生体分子計測研究所、（株）サタケ

I. 概要

広島大学では20年間一貫してシリコンデバイスの微細化研究を続けてきた。日本最大の半導体メモリ会社エルピーダメモリ（株）と協力して、現在の1000倍の高密度のメモリを開発する。この半導体技術をバイオ分野に広げるために、分子生命機能科学専攻、（株）生体分子計測研究所とともにSiナノデバイス上で微小生命体やバイオ分子の多検体高速診断システムを開発する。このために半導体とバイオの異分野の融合研究所を新設し、新アイデアや原理を創出する。

1. 機関の現状

a. 提案機関及び協働機関の研究ポテンシャルの内容

ナノデバイス・バイオ融合科学研究所は20年間一貫してシリコンデバイスの研究を続けており、有数の規模と技術を誇る研究拠点となっている。本研究所は大学院先端物質科学研究科半導体集積科学専攻とともに、平成14年度に文科省21世紀COEプログラム「テラビット情報ナノエレクトロニクス」拠点に選ばれ、多くの成果をあげた。一方、先端物質科学研究科分子生命機能科学専攻は独創的なシリコン結合ペプチドを開発しており、それを介してデバイス上へ抗体等のタンパク質を容易に結合させる技術開発など、国内外をリードする研究実績を有している。

エルピーダメモリ（株）は我が国唯一最大の最先端メモリ会社である。微細化技術に関しては世界をリードしている。300mm径ウェーハを用いて世界最先端のDRAM開発および製造を行っている。広島大学と包括的研究協力協定を2003年に締結して、共同研究を行っている。

（株）生体分子計測研究所は、独自技術である「DNA等の生体分子の可視化・計測、生体分子間力の計測、DNAナノ構造体形成」など先端技術を開発する企業である。

（株）サタケは、食品加工機総合メーカーであり、米の分野では稲の育成診断器から無洗米製造装置など幅広く開発、販売している。

b. 人材育成の実績

ナノデバイス・バイオ融合科学研究所、先端物質科学研究科半導体集積科学専攻、分子生命機能科学専攻及び工学研究科の融合領域における2005年の研究開発実績、人材育成の実績は以下のとおりである。

(1) 研究開発 国際会議発表：89件、国内会議発表：122件、
学術雑誌掲載論文：89件、特許出願：21件

(2) 人材育成 博士課程：20名、修士課程：42名、学生の受賞：7件

c. 研究開発の実績

(1) テラビットメモリ材料・デバイス

(a) 高誘電率絶縁膜（宮崎、芝原、中島）

(b) メモリ用量子ドット（宮崎、東）

(c) メモリ用トランジスタ（角南、横山）

(2) 次世代MOS「タモデル」HiSIM™の開発（三浦、江崎）

(3) 無線インタコネクタ技術

(a) 集積化アンテナ無線インタコネクタ技術（吉川）

(b) インダクタ無線インタコネクタ技術（佐々木、岩田）

(4) 三次元集積（岩田、吉川、佐々木）

(5) 画像処理、物体検出・認識システム（マタウシュ、小出、）

(6) ATP生物発光技術改良と生命体検出応用（黒田、山田）

(7) Si結合ペプチドを用いたSi上への固定化技術（黒田）

(8) アレルギーの次世代型テラーメイド医療技術の開発
（小埜・河本）

d. 協働機関における技術開発の実績

(1) エルピーダメモリ（株）：最先端DRAMの高誘電率材料としてTa₂O₅を開発し、世界で初めて量産品に適用した。また、貫通ビアを用いた三次元集積技術の構造、製造技術を研究している。

(2) （株）生体分子計測研究所：遺伝情報の転写や生体メカニズムを追及するバイオ計測用プローブ装置等の開発実績がある。

(3) （株）サタケ：食品中の重金属、残留農薬等の種々の分析装置を開発し、特に残留農薬の分野では酵素電極を利用した有機リン系農薬の高感度検出装置等の開発実績がある。

2. 拠点化の対象とする先端融合領域及び研究開発

a. 拠点で取り組む領域及び研究の内容

拠点の技術的目標は多項目・高速バイオセンサを開発し、ユビキタスな診断技術を開発し、安全かつ安心な社会構築のためのイノベーションの創出である。取り組む領域は①テラビットメモリ材料・デバイス、②バイオセンサ/診断システム、③ナノバイオ融合機能デバイスとモデリング技術、④三次元集積ワイヤレス信号処理技術、⑤センサ・メモリ集積ブレインシステムであり、この5領域からアドホックなチームを組んで融合研究を進める。

①では半導体産業の成否を左右する基幹半導体であるメモリの大容量化のために高誘電率材料の探索とメモリ記憶原理とメモリセル構造を考案し、試作で実証した。エルピーダメモリで、これを適用したDRAMの開発を開始し、生産技術化、低コスト化までを進める。また、バイオセンサで不可欠な低電力の不揮発メモリの微細化、大容量化のための材料、セル構造を研究し、順次製品に適用するとともに、センサチップ搭載の基礎技術も確立する。②では独創的技術として、Si結合タンパク質を利用したバイオ分子のSiデバイス上への高効率な固定化技術と、Siナノワイヤや量子ドット光検出器など高感度な電荷、光子のセンサデバイスとの融合を進め、診断システムに適用する。生物発光を利用した微生物や毒素の検出を可能にする高輝度発光酵素（ルシフェラーゼ）とそれを応用した高速診断技術を開発した。フラッグシップとして設定した「飲むバイオセンサ」を目指した研究は、口腔内から始め基礎データを取得しながら、システム化可能な検出を順次実験して実用化の可能性を追求するとともに、技術を優位性の有る非侵襲ユビキタス診断に適用する。食品残留農薬（殺虫剤）の高感度検出技術を確認し、可搬診断システムを開発する（サタケ協働）。③ではバイオセンサには有機物質を含む液体と無機Siと界面の機械的なインタフェース制御のために必須なMEMS技術を開発し、微細なマイクロ流路や、新原理の高感度センサデバイスの集積化を研究する。④では新考案の電磁波パルスを利用した乳癌診断のアンテナ一体型送受信センサデバイスと診断システムを試作し、臨床試験までを行う。また、何処でも無意識に使える診断システムの鍵となるワイヤレス情報・エネルギー伝送技術を開発し、診断システムに適用する。⑤では小型、低電力なシステム実現には超高速、超低電力のメモリ・プロセッサ・センサ・アナログ無線回路を三次元集積する技術（エルピーダ協働）と、それに適した並列・連想、学習処

理のアーキテクチャを確立する。ブレインとコンピュータとのインタフェースとなるメモリ・センサ融合三次元集積ブレインの基盤技術を固め、自動車やロボットへの応用を検討する。

b. 関連分野における国内外の研究開発動向

半導体メモリの動向: 画像を主とするユビキタス情報機器の進歩に伴ってメモリ大容量化の要求が強まっている。将来はテラビットメモリ（現状の500倍）が必要となるが、現在の延長線上の微細化技術では物理限界が明らかで、新材料・新原理に基づくメモリ技術開発が必要になっている。

バイオセンシングの動向: 欧米では、病原菌、アレルギー、有毒物質をどこでも検査できるバイオセンシングに関する基礎的知見と情報処理を含めたシステムの要求が出ている。

ブレインコンピュータの動向: 情報検出・処理機能を持つバイオチップの開発が活発化し、大容量メモリと生体情報センサの集積がブレークスルーになると再認識されている。

c. 先端融合領域として取り組む必要性・重要性

テラビット級の大容量・高速メモリの開発には新材料探索や新原理の導入が強く望まれている。また、有害化学物質や細菌を超高感度その場検知する化学・バイオセンサの開発において、半導体とバイオテクノロジー分野の融合・連携が必須である。バイオセンサデバイスの開発により一個体の微生物検出、複雑なアレルギー細胞応答を一度に多種類検出できるバイオデバイスが実現し、我々の生活環境や健康状態をモニター技術を確認する。本拠点の研究で新材料、新原理三次元集積メモリでテラビット規模のメモリ必須である。

d. 先端融合領域として見込まれる将来性

新産業分野として、ナノバイオセンサを用いた病原菌、アレルギー、有毒物質の検査システム、高速医療診断システム、不揮発超大容量メモリ、センサとメモリを集積したブレインチップの製品化によりユビキタス情報システム、生命体の機能を持ったロボットなど大きな市場が期待される。

3. 拠点化構想の内容

a. システム改革の内容

(1) 企業が研究資源を提供のための特別な規則の設定

- (a) 学内に存在する知財及び共同研究により生じた知財の権利（報償金）等の取り扱いには包括的な規則を設けた。
- (b) 知的財産を包括的に管理する運用者をおき、学内知財管理と参画企業と連携させ戦略的な特許出願を行う。
- (c) 特許権の出願及び実施に関する基本契約を締結した。

(2) 多様な人材の活用方策

若手研究者、女性研究者の積極的雇用を行う。

(3) 人材流動化の促進

- (a) 産学の人材交流促進 産学間異動時に同等の給料体系を導入する。
- (b) 研究能力の評価制度を作成、能力給・年俸制を導入する。
- (c) 多様なキャリアパスを提供する。

b. 企業との協働体制

(1) 企業からのコミットメントの具体的な内容

- (a) エルピーダメモリ（株）
 - (1) テラビットメモリのための材料性能および信頼性の評価のための製造設備提供、評価設備の提供を行う。
 - (2) 研究プロジェクトを組織し、研究者を投入する。
- (b) (株) 生体分子計測研究所
 - (1) 研究プロジェクトを組織し、研究者を投入する。
 - (2) 必要に応じて企業の設備の協働利用を行う。
- (c) (株) サタケ
 - (1) 研究プロジェクトを組織し、研究者を投入する。
 - (2) 必要に応じて企業の設備の協働利用を行う。

(2) 研究者・技術者の確保方策

- (a) 国際的に高い実績を有する研究者・技術者を高い給料を保証して雇用する。費用はプロジェクトから支出する。

- (b) 高い実績を有する研究者技術者は客員教授、あるいは特任教授としてプロジェクトに参加する。

(3) 協働体制の運営方法

- (a) 大学側は学長、企業側は社長をトップとするマネジメントボードを組織する。
 - (b) 企業と大学の協働プロジェクトのリーダーを企業から、サブリーダーを大学から選任する。
 - (c) 運営委員会で長期戦略を、実行委員会で戦術を実行する。
 - (d) 大学側は管理部門、研究支援部門に専任を配置する。
- ##### (4) 研究成果の取扱いの方針
- 知財権処理の包括的規則を設け、個別研究テーマに踏襲する。
- (a) 長期テーマの副産物も協働企業で迅速なビジネス化、第三者への技術実施許諾による研究投資の回収と再投資を進める。
 - (b) 開発成果の実用化のために技術移転システムを作る。
 - (c) 企業への技術移管は協働企業の場合は無償で移管するが、それ以外の企業には有償実施許諾を与える。

c. 人材育成

(1) 人材育成のための具体的な仕組み

- (a) 博士課程後期学生をRA雇用し、入学金や学費を補填する。
 - (b) 博士課程修了者を雇用し、該当分野の専門家として育成する。
 - (c) バイオから半導体などへ転向を希望するポストドクは最大3年間、融合領域研究を行い専門知識を得て就職させる。
- ##### (2) 育成された人材の活用方策

- (a) 人材の活用方法あるいはキャリアパスの多様化 バイオ、半導体、あるいは融合領域で実績を出した若手研究者は大学の助手として、融合領域開拓企業の研究者として就職させる。

d. 波及効果

大学と協働企業が、それぞれ得意とする分野を持ち寄って融合開発することで、新しい産業を創出する。同時に大学と協働企業が融合領域の研究を推進する研究所を設立するとともに、新研究所併設の新産学連携専門職大学院を新設して人材を育成する。

4. 具体的な達成目標

a. 3年目における具体的な目標

テラビットメモリのため多元系誘電体を合成探索し、比誘電率60以上を実現する。一方、ナノワイヤ、量子ドットMOSFET ナノバイオセンサを試作し、微弱な電荷・光によるターゲット微生物の超高感度検出デバイスプロトタイプを試作する。

b. 7年目における具体的な目標

ナノバイオセンサを高度化し1個のアレルゲンを検出するチップを実証開発する。メモリは 1×10^{13} bit/cm²集積度をデバイス試作、記憶回路試作により実証する。

c. 実施期間終了後における具体的な目標

メモリベースのバイオセンシングチップを試作し、ユビキタスネットワークによる診断システムを実証する。

5. 実施期間終了後の取組

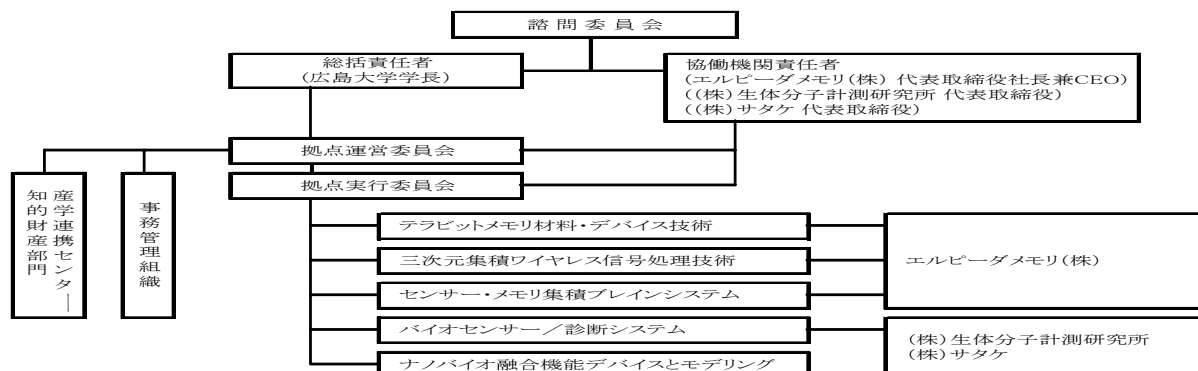
広島大学はエルピーダメモリ（株）をはじめとする協働企業と連携してメモリベースバイオセンシング融合領域の研究・開発を推進する機関を設立する。ここでは、協働企業から資金を調達し、外部の競争的資金を獲得して研究費とすることにより、半導体集積科学・バイオ科学の融合領域の研究をより発展させるとともに、人材を育成と応用領域、応用産業にも貢献する。

6. 期待される波及効果

本拠点のもたらすイノベーションは安全、安心、健康な社会の実現を目指す。人間と技術に関わる技術革新へ発展でき

る。新概念と新技術開拓に挑戦する気質と知識を備えた研究者・技術者の育成システムとして、他の領域に効果を波及できる。

7. 実施体制



| 氏名 | 所属部局・職名 | 当該構想における役割 |
|--------|-------------------------------|---|
| 浅原 利正 | 広島大学 学長 | 総括責任者 |
| 坂本 幸雄 | エルピーダメモリ(株) 代表取締役社長兼CEO | 協働機関責任者 |
| 岡田 孝夫 | (株)生体分子計測研究所 代表取締役 | 協働機関責任者 |
| 佐竹 利子 | (株)サタケ 代表取締役 | 協働機関責任者 |
| ◎岩田 穆 | 広島大学大学院先端物質科学研究科 特任教授 | センサー・メモリ集積ブレインシステムの研究開発 |
| ○吉川 公麿 | 広島大学ナノデバイス・バイオ融合科学研究所 所長 | 三次元集積ワイヤレス信号処理技術の研究開発 UWB電磁波画像化技術の研究開発 |
| ○宮崎 誠一 | 広島大学大学院先端物質科学研究科 教授 | テラビットメモリ材料・デバイス技術の研究開発 |
| ○横山 新 | 広島大学ナノデバイス・バイオ融合科学研究所 教授 | ナノバイオ融合機能デバイスの研究開発 |
| ○黒田 章夫 | 広島大学大学院先端物質科学研究科 教授 | ナノバイオセンシングと高速診断システムの研究開発 |
| 荻島 淳史 | エルピーダメモリ(株) Executive Manager | 協働機関研究代表者 |
| 杉山 幸宏 | (株)生体分子計測研究所 次長 | 協働機関研究代表者 |
| 保坂 幸男 | (株)サタケ 専務執行役員 | 協働機関研究代表者 |

8. 各年度の計画と実績

a. 平成 18 年度

(1) 計画

- (a) テラビットメモリ材料・デバイス技術
 - (1) MOCVDによる新規高誘電率薄膜形成技術を確立する。
 - (2) Si 量子ドットフローティングゲートの電荷保持特性を評価する。
 - (3) 4F²セル構造の案出と製造プロセス第0次案を構築する。
- (b) バイオセンサー／診断システム
 - (1) Si ナノワイヤ上にSi 結合ペプチドを用いて、タンパク質を固定する方法を開発する。
- (c) ナノバイオ融合機能デバイスとモデリング
 - (1) MEMS 利用ナノバイオ融合デバイスの提案と露光、エッチング技術の開発を行う。

- (d) 三次元集積ワイヤレス信号処理技術
 - 3次元誘電率分布の再現シミュレーションを行う。

- (e) センサー・メモリ集積ブレインシステム
 - (1) 三次元集積磁気、電磁波複合インテグレート TEG 設計を行う。
 - (2) 機能メモリを用いたアーキテクチャの基本構成の検討を行う。

(2) 実績

- (a) テラビットメモリ材料・デバイス技術
 - (1) 高誘電率膜材料技術:新規高誘電率膜の化学構造および電子帯構造を定量評価し、その有用性を明確化した。
 - (2) 量子ドットデバイス: Si系量子ドットフローティングゲートの設計指針を得た。
 - (3) 新原理メモリ: 微細化可能なRAMメモリセル、構造を調査・評価した。
- (b) バイオセンサー／診断システム
 - Si ナノワイヤを試作し、Si 結合ペプチドにより受容体を固定する方法の有効性を検証した。
- (c) ナノバイオ融合機能デバイスとモデリング
 - 極低電圧動作ナノバイオ融合デバイスのモデリング技術の基礎を明らかにした。高アスペクトな超微細MEMSのエッ

チング装置を立ち上げた。

- (d) 三次元集積ワイヤレス信号処理技術
 - 3-5GHzのUWB電磁波信号を送受信するアンテナと回路を設計した。

- (e) センサー・メモリ集積ブレインシステム
 - (1) センサ集積アーキテクチャ: 電磁波、磁気、光インテグレートを機能モデルで比較検討し、複合化の効果を明確化した。

- (2) メモリベース並列検索アーキテクチャを検討し、自由に構成可能な多バンクメモリの基本設計を行った。
- (3) ポストメモリアーキテクチャ: 再構成可能な演算ユニットを用い、多数バンクを結合した基本方式を開発した。

b. 平成 19 年度

(1) 計画

- (a) テラビットメモリ材料・デバイス技術
 - (1) 新規高誘電率薄膜の電氣的・光学的基礎物性評価と原子層制御 CVD プロセス技術を開発する。
 - (2) 記憶原理の探索と記憶新材料の定量評価と候補を検証する。
 - (3) 記憶セルの構造と記憶新材料による試作・評価を行う。

(b) バイオセンサー／診断システム

- (1) Si ナノワイヤを作製し、Si 結合ペプチドを用いて、有機分子固定方法を確立し、界面制御技術を開発する。
- (2) DNA ナノ構造体の設計、試作、評価を行う。

(c) ナノバイオ融合機能デバイスとモデリング

- (1) 極低電圧ナノバイオ融合デバイスのモデル開発を行う。
- (2) 超微細 MEMS のために、高アスペクトエッチング技術を用いて、Si 可動構造形成の基礎技術を開発する。

(d) 三次元集積ワイヤレス信号処理技術

- UWB 電磁波の送受信波形から伝送媒体の誘電率分布を画像化する技術を開発する。

(e) センサー・メモリ集積ブレインシステム

三次元集積の高機能化のために、磁気結合、電磁波結合、光結合を複合したインタコネクットの設計・評価を行う。メモリベースコンピュータの設計、機能メモリの設計を行う。

(2) 実績

(a) テラビットメモリ材料・デバイス技術

- (1. La-Hf 系高誘電率絶縁薄膜について、化学組成・構造変化が誘電率に及ぼす影響を定量化し、La 系有機金属錯体の原子・分子層スケールでの均一成膜を達成した。
- (2. 金属ナノドットが多数電子保持ノードとして機能することをフーティングゲートMOSデバイス特性から実証した。
- (3. 4F²メモリのセルのデバイス・プロセスを開発。柱状縦型トランジスタを試作し、125nm 直径まで正常動作を確認した。

(b) バイオセンサー／診断システム

- (1. Si ナノワイヤの不安定性の原因を突き止めて修正した。Si 結合ペプチドによる抗体などの固定方法を確立し、高発光ルシフェラーゼ開発やATP 増幅を実現した。
- (2. DNA ナノ構造体の設計、試作を行い、同構造体をシリコン基板に固定化する条件を見出した。

(c) ナノバイオ融合機能デバイスとモデリング

- (1. 極低電圧で動作するナノバイオ融合デバイスにおいて、Si ナノワイヤにおける量子準位を明らかにした。
- (2. MEMS 技術を用いて、マイクロ流路における液流制御弁となる、Si カンチレバー形成技術を開発した。
- (3. Si 光リング共振器の表面に結合した抗体による光屈折率変化を共振波長変化として観測する原理実験に成功した。
- (4. 光配線 LSI 用の光スイッチとして、初めて電界駆動の Si リング共振器型光スイッチを製作し光変調率 30% を実現した。

(d) 三次元集積ワイヤレス信号処理技術

- (1. UWB 電磁波を比誘電率の異なるターゲットに照射し、アレーアンテナで受信したターゲットからの反射波を、共焦点アルゴリズムで2次元位置画像に合成するアルゴリズムを開発した。
- (2. UWB パルス信号の送信回路とそれに同期する受信回路を0.18μm CMOS で設計試作し、200Mbps のOOK 変復調を確認した。

(e) センサー・メモリ集積ブレインシステム

- (1. 磁界結合無線インタコネクットの送受信回路を単相から差動方式に変更して耐雑音特性を改善した。
- (2. 微弱発光による微生物検出のために CMOS 高感度フォトセンサを設計し、100 倍の高感度化を可能にした。
- (3. 低雑音増幅回路、超低電力 AD 変換器を CMOS 技術で設計・試作し、10μV の信号検出、数 uW 動作の AD 変換器を得た。
- (4. バンク型多ポートメモリアーキテクチャを適用した 16 ポート SRAM を設計し、1-Tbps のバンド幅を得た。
- (5. 低電圧動作、製造ばらつき対策を研究して、超低消費電力 SRAM セルを開発し、1/10 の面積削減、1/2 の消費電力、アクセス時間削減を達成した。

c. 平成 20 年度

(1) 計画

(a) テラビットメモリ材料・デバイス技術

- (1. キャパシタ信頼性試験と原子層制御プロセス最適化を図る。
- (2. 量子ドットメモリの信頼性試験と設計パラメータの抽出を行う。
- (3. 16G(ギガ)ビットDRAMを想定した4F²セル小規模アレーの試作による、量産試作上の課題の抽出を行う。

(b) バイオセンサー／診断システム

- (1. Si ナノワイヤを完成させ、さらにアレイ化を試み、微弱光センサを試作し、微生物の計測技術確立を図る。
- (2. DNA ナノ構造体による生体分子固定の動的可視化を試行する。
- (3. 抗農薬抗体を作製し残留農薬の高感度検出の基礎を検

証する。

(c) ナノバイオ融合機能デバイスとモデリング

- (1. MEMS 基盤技術(高アスペクト・可動構造)を確立する。
- (2. 極低電圧デバイスモデル開発を行う。
- (3. マイクロ・ナノ空間における微粒子(分子、細菌等)挙動の高精度制御(分子ふるい、マイクロリアクタ等)のための流路モデリング・設計フレームワーク構築を行う。

(d) 三次元集積ワイヤレス信号処理技術

- (1. UWBインパルス信号を放射し、共焦点アルゴリズムによる2次元画像合成を実証する。
- (2. 三次元集積用チップ間UWB送受信回路によるデータ伝送実証を図る。

(e) センサー・メモリ集積ブレインシステム

- (1. 高感度フォトセンサと無線インタコネクットを融合したセンサー集積三次元バイオセンサを試作・評価する。センサーインタフェースの低電力化及び低雑音化を図る。
- (2. 高速・低消費電力の多ポートSRAMの評価を行い、低消費電力SRAMを設計し、飲むバイオセンサ搭載する、再構成可能なメモリベース連想メモリベース学習集積システムのアーキテクチャ・回路の改良を行う。

(2) 実績

(a) テラビットメモリ材料・デバイス技術

- (1. スパッタ成膜法において極薄多層積層構造を活用したTaおよびTi系の新規高誘電率薄膜を開発すると共に、ランタノイド系ジケトン錯体原料を用いたCVD法において、飽和吸着・反応・脱離を1サイクルとした原子層制御堆積に成功した。
- (2. リモート水素プラズマ支援の金属原子表面マイグレーションを活用して、金属ナノドットを高密度含有した新規誘電体薄膜の形成技術を確認すると共に、これを活用した電荷蓄積型メモリにおいて、その実用性を検証した。
- (3. 16G(ギガ)ビットDRAMを想定した4F²セル小規模アレーを試作し、量産試作上の課題を抽出し、量産化の見通しを得た。
- (4. Geデバイスの素子分離界面改質によってp/n接合デバイスのリーク電流低減の指針を得た。
- (5. Si結合タンパク質がシリコン熱酸化膜、水素終端Si(100)表面およびSi量子ドットに物理吸着した際に生じる表面電位変化の違いをAFMケルビンプローブで計測し、これを応用した高感度FETセンサー開発の指針を得た。

(b) バイオセンサー／診断システム

- (1. シリコンナノワイヤトランジスタのゲート絶縁膜をSi₃N₄ (19 nm)/SiO₂ (8 nm)まで成膜プロセスを工夫することにより、薄膜化することに成功し、バイオセンサーとして機能することを確認した。
- (2. 構築したデバイス上に、シリコン結合ペプチドを用いて任意のタンパク質を、1mm²あたりおよそ10¹⁰分子という高密度で固定化することに成功した。単一のシリコンナノワイヤトランジスタの絶縁膜上にシリコン結合ペプチド-ビオチン融合タンパク質を送液し、ビオチンを絶縁膜上に吸着させることに成功した。
- (3. 金コロイド標識イムノクロマトグラフィーによる(食中毒細菌)サルモネラの測定方法に、本プロジェクトにて開発された高輝度変異型ルシフェラーゼを組み合わせることでイムノクロマトグラフィーに単独の場合よりも約1,000倍以上高感度に”生きている”サルモネラのみを選択的に測定可能となった。また、輸液や人工透析における汚染管理が日本薬局方により義務づけられているエンドトキシン(細菌内毒素)の測定を、エンドト

キシシ測定に多用されているリムラス反応に本プロジェクトで開発された高輝度変化異型ルシフェラーゼを組み合わせたエンドトキシンの生物発光測定法を開発した。これにより、従来の発色測定法の100倍以上高感度にエンドトキシンを測定可能となり、安全性判定基準値である0.1pg/mlのエンドトキシンを15分以内に検出する迅速高感度測定技術を確立した。

- (4) 飲むバイオセンサーのプロトタイプ開発として、10bit A/Dコンバーター、120kbitSRAM、制御回路、0.01K分解能程度の温度計、10MHz OOK型送信機を2.5mm角の集積化チップに製作した。さらに薄型グルコースセンサーを開発し、口腔内歯肉溝部への配置と動作に成功した。

(c) ナノバイオ融合機能デバイスとモデリング

- (1) 高アスペクト・可動構造を作製するための厚膜リソグラフィおよび深掘りエッチング技術を開発した。また、表面活性化接合装置を用いて酸化したSi基板同士を接着させる技術を開発した。これらは、MEMS構造作製のための重要技術であり、今後のMEMSデバイス作製の基盤技術が確立できた。それを応用した成分選択性向上のための試料前処理デバイス（濃縮・分離・反応等）構造については、まず、反応分離濃縮機能を有する簡単なマイクロ流路構造を作製し、その特性を観測評価した。その結果を基に、より精密な反応分離濃縮を可能とするためのアレイ流路型の反応分離濃縮構造を提案した。
- (2) 微粒子挙動の高精度制御のための流路モデリング・設計フレームワークの構築については、まず、極微小流量である10 μ L/分から最大25mL/分まで観測可能なマイクロ流路内の流体挙動の計測系を作製した。次に、その挙動をシミュレーションするモデル系をMATLAB/Simulinkというソフトウェアを用いて構築した。今後、実験とシミュレーションの比較からより精度の高い流路設計が可能となる。

- (3) シリコン細線デバイスの電気伝導の解析的な伝導モデルの可能性の探索については、極低電圧デバイスのために、Si ナノワイヤの電子状態および電流-電圧特性を非平衡グリーン関数法とLandauer-Büttikerの公式を用いて計算した。これによりSiナノワイヤの電流-電圧特性を予測できるようになった。

- (4) シリコンリング共振器を用いたバイオセンサーおよび光スイッチ実現技術の開発については、Si光リング共振器を用いたバイオセンサーを設計・試作し、ショ糖濃度0.1%の検出を確認した。この結果から、バイオセンサーとして必要なショ糖濃度0.01%の検出に必要なリング共振器のQ値、および最適な観測波長が1.3 \cdot mであることを明らかにした。また、シリコン結合ペプチドによって、リング上に固定化したウサギ血清中の抗原に抗IgG抗体が選択吸着する現象を、共振波長のシフトから検出することに成功した。光スイッチについては、低消費電力とコンパクト性を両立できる、電界駆動型リング共振器Si光スイッチを提案・試作しその原理動作を確認できた。この結果は飲むバイオセンサーに必要な低消費電力回路の実現に寄与する。

(d) 三次元集積ワイヤレス信号処理技術

- (1) 二次元アンテナアレイによるUWB送受信システム構築のため、プリント基板上に帯域2.8-5.2GHzのバラン搭載ボウタイアンテナを設計試作し、二次元バラン搭載ボウタイアンテナアレイによるUWB送受信波形をサンプリングオシロスコープでデジタル記録を行い、共焦点アルゴリズムによって二次元画像化に成功した。画像化に成功した。
- (2) 集積化アンテナ搭載CMOS送受信回路を設計試作し評価を行い。データレート200Mbpsのデータ送受信を行う

ことに成功した。等価時間サンプリングオシロ用AD変換CMOS回路を設計試作し評価した結果、500MHz RF信号の等価時間サンプリングに成功した。これによりシリコンチップ間のUWBワイヤレス通信の実験を検証した。

- (3) カプセル内視鏡への給電技術開発を目的として、先行研究例（直径50cm）を参考に段階的に縮小したプロトタイプの試作を行った結果、直径5cmの一次試作により電力供給量に強いサイズ依存性を確認した。

(e) センサー・メモリ集積ブレインシステム

- (1) バイオセンサー用高感度フォトセンサーの設計・評価を行い、10⁻⁵Luxの高感度検出を実証した。無線インタコネクトに関しては、差動型受信回路を試作評価して、チャネルあたり3 μ W/Mbpsの低電力でのデータ転送を実証した。また、AD変換器などのアナログインタフェース回路をSRAMとともに搭載したバイオセンサーチップを設計した。また、三次元集積システムのため、貫通ビアを用いた縦型インダクタを用いた層間結合の超高速クロック生成回路の設計と試作・評価を行い、10Gbit以上の高速動作達成の基盤技術を実証した。
- (2) メモリ（SRAM）を低電力で動作させる回路を研究し、3.3 μ Wという低電力で動作する120KbitのSRAMの回路構成を実現し、アナログインタフェース回路などと混載したバイオセンサーチップを設計した。メモリベース学習集積システムの改良を行い、連想メモリを付加した並列処理アーキテクチャを考案し、パターンマッチングの処理能力を向上させた。

d. 平成21年度

(1) 計画

(a) テラビットメモリ材料・デバイス技術

- (1) 多層構造を活用した新規高誘電率薄膜の信頼性を評価し、絶縁劣化メカニズムに関する知見を得ると共に、原子層制御堆積技術を駆使した組成変調が電気的特性に及ぼす影響を明らかにする。
- (2) 金属ナノドットを高密度に含有した誘電体薄膜において、電荷注入・保持・放出特性やパルス電圧印加による電荷輸送特性変化を定量評価し、電荷蓄積型および抵抗変化型のメモリ動作を検証する。
- (3) 高密度4F²メモリセルを実用化するための要素プロセス技術開発を協働企業と連携し、推進する。

(b) バイオセンサー/診断システム

- (1) シリコン結合ペプチドの解析を行い、より強固で特異性のあるシリコン結合ペプチドを開発する。シリコンナノワイヤとシリコン結合ペプチドを用いたバイオセンサーの設計と特性を検証する。
- (2) 口腔内温度・グルコースを検出する飲むバイオセンサーのプロトタイプを作成し、その特性を検証する。
- (3) 開発した高発光型ルシフェラーゼを利用したATP、細菌、エンドトキシン高感度検出技術を検証する。

(c) ナノバイオ融合機能デバイスとモデリング

- (1) MEMSデバイスの設計を効率化するためのマイクロ流路モデリング手法を構築し、この手法を基に、バイオ微粒子を選択的に分離・濃縮するための前処理用MEMSデバイスを設計する。
- (2) シリコンリング共振器のQ値を現状の25000から倍以上に向上させ、バイオセンサーとしての感度を向上させる。導波路のシングルモード化と、導波路側面荒れをレジストメルトティング、酸化、等方性エッチ等によって改善して実現する。
- (3) 緑色蛍光タンパク質（GFP）ドープ光導波路からの緑色蛍光の単一モード遠視野観測及び外部刺激に対する蛍光応答を測定し、バイオフォトニクスセンサーとしての有用性を確認する。

- (d) 三次元集積ワイヤレス信号処理技術
- (1) ウルトラワイドバンド (UWB) 信号を CMOS 送信回路で生成し、人体を模擬した誘電体物質中に超広帯域アンテナを通して照射し、ターゲット物質からの反射波を受信し、共焦点画像処理アルゴリズムによって検証する。
- (e) センサー・メモリ集積ブレインシステム
- (1) 高感度フォトセンサ、高感度センサインタフェース回路、無線インタコネクト回路の設計、試作・評価を検証する。
 - (2) 10GHz 以上のクロック生成回路、データ転送回路の構成、設計、試作評価を検証する。
 - (3) 機能メモリをベースにした学習、画像処理技術、超低電力 SRAM の設計、試作・評価を検証する。
- e. 平成 22 年度
- (1) 計画
 - (a) テラビットメモリ材料・デバイス技術
 - (1) キャパシタの極微細化と長期信頼性試験を行う。
 - (2) 光入力 Si 系量子ドット機能メモリの光感度の向上を図る。
 - (3) 64G ビット DRAM メリセル向け、絶縁膜材料の開発を行う。
 - (b) バイオセンサー／診断システム
 - (1) 光による超高感度バイオセンサーを試作する。
 - (c) ナノバイオ融合機能デバイスとモデリング
 - (1) 光配線による信号伝達実効速度 1kb/s を実現する。
 - (2) 回路モデルとしての信頼性を評価する。
 - (d) 三次元集積ワイヤレス信号処理技術
 - (1) 三次元誘電率分布を画像化処理する CMOS 回路特性を評価する。
 - (e) センサー・メモリ集積ブレインシステム
 - (1) 飲むバイオセンサ用ブレインチップを試作する。
 - (2) センサ・学習機能融合メモリベース TEG 回路の設計・評価を行う。
- f. 平成 23 年度
- (1) 計画
 - (a) テラビットメモリ材料・デバイス技術
 - (1) DRAM での性能試験により、新材料の実用性を判定する。
 - (2) 少数光子動作 Si 系量子ドットメモリの設計・評価を行う。
 - (3) 64G ビット DRAM 小規模アレーを試作する。
 - (b) バイオセンサー／診断システム
 - (1) Si ナノワイヤを作成し、バイオセンサを試作する。
 - (c) ナノバイオ融合機能デバイスとモデリング
 - (1) 光配線による信号伝達実効速度 1Mb/s を目標に実現する。
 - (2) 分子デバイス用モデルの検討を行う。
 - (d) 三次元集積ワイヤレス信号処理技術
 - (1) 画像化による三次元誘電体構造の画像化の実証を図る。
 - (e) センサー・メモリ集積ブレインシステム
 - (1) バイオセンサ用ブレインチップの要素回路の試作、評価を行う。
 - (2) 学習機能によるメモリベースアーキテクチャの改良を行う。
- g. 平成 24 年度
- (1) 計画
 - (a) テラビットメモリ材料・デバイス技術
 - (1) 新規 DRAM プロセスの最適化と超高密度集積化の検討を行う。
 - (2) 多値動作する光入力量子ドット機能メモリ試作・評価を行う。
 - (3) テラビット DRAM メモリセル構造提案とプロセス課題の抽出を行う。
 - (b) バイオセンサー／診断システム
 - (1) スギ花粉アレルギー抗体を検出するバイオセンサを試作する。
 - (c) ナノバイオ融合機能デバイスとモデリング
 - (1) 光配線による信号伝達実効速度 1Gb/s の可能性明確化を図る。
 - (2) 分子デバイス用モデルの要素技術の開発を行う。
 - (d) 三次元集積ワイヤレス信号処理技術
 - (1) 誘電率の異なる位置を画像化する CMOS 回路設計を行う。
 - (e) センサー・メモリ集積ブレインシステム
 - (1) バイオセンサ・メモリ集積三次元プロトタイプ の試作評価を行う。
 - (2) メモリベースコンピュータのプロトタイプ 設計を行う。
- h. 平成 25 年度
- (1) 計画
 - (a) テラビットメモリ材料・デバイス技術
 - (1) DRAM 歩留まり向上技術、特性ばらつき低減技術の確立を図る。
 - (2) Si 系量子ドット機能メモリの微細化を行う。
 - (3) 集積化カンチレバーのセンシング感度の向上を図る。
 - (4) DRAM セル構造、小規模アレー試作、量産技術課題の抽出を行う。
 - (b) バイオセンサー／診断システム
 - (1) 癌マーカーなどのバイオ融合センサデバイスを作成する。
 - (c) ナノバイオ融合機能デバイスとモデリング
 - (1) MEMS 技術を用いたバイオ融合デバイスの基盤技術開発を行う。
 - (d) 三次元集積ワイヤレス信号処理技術
 - (1) CMOS 回路により癌の位置画像化技術を試作・評価を行う。
 - (e) センサー・メモリ集積ブレインシステム
 - (1) 飲むバイオセンサ向け三次元実装方式、小型化の試作を行う。
 - (2) 大容量メモリとセンサ搭載再構成システムの TEG 設計を行う。
- i. 平成 26 年度
- (1) 計画
 - (a) テラビットメモリ材料・デバイス技術
 - (1) 新規 DRAM において、長期信頼性を確保する。
 - (2) Si 系量子ドット機能メモリの特性ばらつき定量評価を行う。
 - (3) 超高密度量子ドットアレーの超精密制御技術の確立を図る。
 - (4) T ビット DRAM セルアレーの試作、メモリ動作課題の抽出を図る。
 - (b) バイオセンサー／診断システム
 - (1) バイオセンサを作成し多検体高速診断システムを開発する。
 - (c) ナノバイオ融合機能デバイスとモデリング
 - (1) MEMS によるナノバイオ融合デバイス試作・動作実証を行う。
 - (d) 三次元集積ワイヤレス信号処理技術
 - (1) 乳ガン検出システムを評価し、分解能特性を改善する。
 - (e) センサー・メモリ集積ブレインシステム
 - (1) 三次元ブレインのバイオセンサ適用領域評価を行う。
 - (2) 再構成アーキテクチャの TEG の評価とメモリベースブレインコンピューティングアーキテクチャの検討を行う。
- j. 平成 27 年度
- (1) 計画
 - (a) テラビットメモリ材料・デバイス技術
 - (1) 超高密度 DRAM の試作・評価を行う。
 - (2) 量子ドット機能メモリの高密度集積化と信頼性確保を図る。
 - (3) 超高密度量子ドットアレーメモリの試作と評価を行う。
 - (4) 1T ビット DRAM を実現するメモリセルの実現を図る。
 - (b) バイオセンサー／診断システム
 - (1) 微生物・ウイルス・アレルゲン分子・癌早期診断のための多検体の高速診断システムを開発・実用化する。
 - (c) ナノバイオ融合機能デバイスとモデリング
 - (1) MEMS 技術を用いたナノバイオ融合デバイスの高度化を図る。
 - (d) 三次元集積ワイヤレス信号処理技術
 - (1) 乳ガン 3 次元位置画像化 CMOS 回路性能を実証する。
 - (e) センサー・メモリ集積ブレインシステム
 - (1) 誘電率の異なる位置を画像化する CMOS 回路設計を行う。

- 三次元ブレイン搭載バイオセンサの高機能、高性能化を図る。
- 機能メモリベースブレインコンピュータシステムの開発を行う。

9. 年次計画

| 項目 | 18年度 | 19年度 | 20年度 | 21年度 | 22年度 |
|---------------------------------|--|--|--|---|--|
| ●拠点化構想 | | 原子層堆積膜装置導入 | | | |
| 半導体製造設備整備 大容量・高速機能メモリ設計・試作 | テラビットメモリ用材料基礎検討 | テラビットメモリ用材料実験探索 | 新材料と記憶原理の提案・候補選択 | 新材料と記憶原理の記憶セル考案 | 新材料と記憶原理の記憶セル実験検証 |
| ●調整費当計画 テラビットメモリ材料・デバイス開発の実施 | ・新規誘電率薄膜形成特性評価 ・量子ドット電荷保持 ・DRAMセル面積半減 ・4F2セル構造の案出 | ・新規誘電率薄膜の基礎物性評価と原子層制御CVD ・量子ドット電荷保持向上 ・4F2セル構造の試作 デバイス製造の課題抽出 | ・キャパシタ信頼性試験 ・量子ドットメモリ信頼性試験 ・16GビットDRAM4F2セル小規模アレーの試作 | ・新規キャパシタ材料の信頼性評価と劣化機構解明 ・金属ナノドットメモリの開発 ・4F2セル実用化に向けたプロセス最適化 | ・キャパシタ長期信頼性試験 ・光入力量子ドットメモリ ・64GビットDRAMメモリセル絶縁膜材料開発 |
| ナノバイオセンシング開発の実施 | ・SIトランジスタ上にSI結合ペグドを用いてタンパク質固定方法開発 | ・Siナノワイヤにタンパク質を固定化する界面制御技術の基礎を確立 | ・ナノワイヤアレイに有機分子を固定化バイオセンサ試作、光による生物検出 | ・SI結合ペグドを用いたバイオセンサ試作 ・口腔内バイオセンサ試作 | ・光による微生物の超高速感度バイオセンサ試作 |
| ナノバイオ融合機能デバイス開発の実施 | ・MEMS利用ナノバイオ融合デバイスの提案と、露光・エッチング技術開発 | ・MEMS加工技術を用いた高アスペクト、可動構造の形成法 | ・MEMS基盤技術(高アスペクト・可動構造)の確立 | ・MEMS設計技術確立 ・シリング、光薄層露光バイオセンサの実現、高感度化 | ・MEMSデバイス作製 ・シリング、光薄層露光バイオセンサによる生体検出 |
| 三次元集積ワイヤレス信号処理技術開発の実施 | ・UWBアンテナアレーによる受信散乱波形状のシミュレーション | ・広帯域アンテナアレー及びUWB送受信CMOS回路を設計 | ・受信波形から三次元誘電率分布を計算するアルゴリズム開発 | ・UWB信号をCMOS送信回路で生成し、共焦点画像処理アルゴリズムにて検証 | ・三次元誘電率分布を画像処理するCMOS回路特性を評価 |
| ブレインコンピューティング開発の実施 | ・三次元集積のために、複合インタコネクタTEG設計 ・再構成機能メモリコンピューティングアーキテクチャ | ・複合インタコネクタTEG評価、センサー-IN設計 ・再構成可能アーキテクチャ、機能メモ設計 | ・複合インタコネクタによる情報転送技術特性検証 ・TEGの評価とメモリベースアーキテクチャ、回路改良 | ・センサーインタフェース回路TEG試作評価 ・センサーと学習機能を融合したメモリベースアーキテクチャ基本設計 | ・センサーとインタフェース集積TEGの設計評価 ・メモリベースコンピューティングTEG回路の設計 |
| 総計 | 267 百万円 | 503 百万円 | 908 百万円 | 132 百万円 | |
| うち調整費分(間接経費含む) | 241 百万円 | 390 百万円 | 390 百万円 | 70 百万円 | |

| 項目 | 23年度 | 24年度 | 25年度 | 26年度 | 27年度 |
|---------------------------------|---|---|--|---|---|
| ●拠点化構想 | | 新材料新原理DRAM開発 | | | |
| 大容量・高速機能メモリ設計・試作 | 新材料新原理DRAM開発 | 新材料新原理DRAM開発 | 不揮発メモリ材料評価 | 不揮発メモリセル試作 | 不揮発メモリ試作評価 |
| ●調整費当計画 テラビットメモリ材料・デバイス開発の実施 | ・新材料テラビットメモリの記憶セル試作 | ・不揮発メモリセル試作評価 | ・不揮発メモリセル試作評価 | ・量子ドットメモリセル試作評価 | ・量子ドットメモリアレイ試作評価 |
| ナノバイオセンシング開発の実施 | ・ウイルス抗体を付加したSiナノワイヤでバイオセンサ試作 | ・スギ花粉、を固定化し、血抗体バイオセンサ試作 | ・医学部と連携し、癌マーカーなどを固定化バイオセンサを試作 | ・各種病気マーカーセンサを作成し、多検体の高速診断システムを開発 | ・多検体の高速診断システムを開発 |
| ナノバイオ融合機能デバイス開発の実施 | ・光配線による信号伝達速度1Mb/sを目指す | ・光配線による信号伝達実効速度1Gb/sを目指す | ・MEMS技術をナノバイオ融合デバイスへ応用する基盤技術の開発 | ・MEMS技術を用いたナノバイオ融合デバイスの試作と動作検証 | ・MEMS技術を用いたナノバイオ融合デバイスの高度化の研究 |
| 三次元集積ワイヤレス信号処理技術開発の実施 | ・集積化アンテナアレーによる画像化の実証 | ・生体内の誘電率の異なる位置を画像化するCMOS回路設計 | ・腫瘍の位置を画像化する性能を評価検証する | ・乳ガンの三次元位置を画像化するCMOS回路性能を評価、特性改善 | ・三次元位置画像化CMOS回路システム性能を実証する |
| ブレインコンピューティング開発の実施 | ・無線通信をも集積したTEG試作で、動作検証 ・TEG回路の評価とメモリベースコンピューティングアーキテクチャの改良 | ・センサー集積三次元プロトタイプ試作評価 ・メモリベースコンピューティングのプロトタイプ設計 | ・大容量メモリを三次元集積するTEGの設計試作 ・再構成アーキテクチャのTEG設計 | ・センサーとメモリを集積した三次元ブレインTEG ・メモリベースブレインアーキテクチャの検討 | ・センサーメモリ集積三次元ブレインTEG試作評価 ・機能メモリベースブレインコンピュータ設計 |
| 総計 | | | | | |
| うち調整費分(間接経費含む) | | | | | |

10. 諮問委員会

| 委員 | 所属 | 備考 |
|---------|---|-------|
| (研究実施者) | | |
| 浅原 利正 | 広島大学 学長 | 総括責任者 |
| 山根 八洲男 | 広島大学 理事・副学長 | |
| 岩田 稔 | 広島大学大学院先端物質科学研究科 特任教授 | 研究代表者 |
| 坂本 幸雄 | エルピーダメモリ(株) 代表取締役社長兼CEO | |
| 萩島 淳史 | エルピーダメモリ(株) DTD Office R&D Gr.Executive Manager | |
| 岡田 孝夫 | (株)生体分子計測研究所 代表取締役 | |
| 杉山 幸宏 | (株)生体分子計測研究所 次長 | |
| 佐竹 利子 | (株)サタケ 代表取締役 | |
| 保坂 幸男 | (株)サタケ 専務執行役員 | |
| (外部有識者) | | |
| 石原 宏 | 東京工業大学大学院総合理工学研究科 教授 | |
| 大竹 久夫 | 大阪大学大学院工学研究科 教授 | |
| 山下 洋 | 文部科学省研究振興局基礎基盤研究課ナノテクノロジー・材料開発推進室 室長 | |
| 谷口 研二 | 大阪大学大学院工学研究科 教授 | |
| 堀池 靖浩 | (独)物質・材料研究機構 フェロー | |
| 渡辺 久恒 | (株)半導体先端テクノロジーズ 代表取締役社長 | |