

プロジェクト中間評価報告書

評価委員会開催日：平成26年2月25日

評価委員：（敬称略、五十音順）

天野 浩 名古屋大学大学院工学研究科 教授
 大塚洋一 筑波大学大学院数理物質科学研究科 教授
 田中雅明 東京大学大学院工学系研究科 教授
 山部紀久夫 筑波大学大学院数理物質科学研究科 教授

確定年月日：平成26年3月3日

プロジェクト名	ナノエレクトロニクスのための新材料・新機能の創製
研究責任者の氏名・所属・役職	知京豊裕 ナノエレクトロニクス材料ユニット長
実施予定期間	平成23年度～平成27年度
研究目的と意義	<p>近年、エレクトロニクス製品が消費する電力の問題が顕在化している。半導体の利用がさらに進めば、対性能比の消費電力はさらに増加すると考えられている。そのため、材料、デバイスから、システムアーキテクチャ、回路・設計技術までの工夫による低消費電力化が求められており、新たな技術領域を開拓していく必要がある。次世代半導体デバイスに求められているのは、高速化、高集積化、多機能化、そして低消費電力を同時に満たすデバイスである。この問題を解決するために、より誘電率の高い材料（Higher-k材料）をSi基板上に直接接合する材料とその技術、また、それに対応して低電圧化するメタルゲート材料の開発などが必要であり、ここでは、こうした材料の開発と関連する革新的な評価技術、さらにそれらを使ったメモリなど基礎から応用までの研究が必要である。</p> <p>NIMSは国内で最大の規模をもつ材料研究機関であり、金属、半導体、セラミックスまでの材料開発研究を進めている。材料開発においては、国内の中心的拠点として機能しており、産学独連携を積極的に進めている。さらに、ゲート酸化膜、仕事関数を制御したメタルゲート材料、など多くのエレクトロニクス関連材料探索を横断的分野融合の発想で行ってきた実績もある。</p> <p>本研究は産業・経済活動の活性化・高度化に貢献するものである。また、本研究はナノデバイスに材料という日本が最も得意とする分野を使って貢献しようとするものであり、国際競争力の向上や研究活動を通じて生まれる知的財産の確保や高付加価値のナノエレクトロニクスやIT関連製品に応用され、汎用性がある研究開発プロジェクトである。</p>
研究内容	<p>次世代の超高密度集積回路を実現するために、将来のゲートスタック材料開発と新評価技術の開発を目指す。キーテクノロジーは新材料開発と界面制御、分野融合である。そのために、より誘電率の高い材料（Higher-k材料）をSi基板上に直接接合する材料を開発する。さらにHigher-k材料に適した仕事関数の制御可能なメタルゲート材料の開発を進める。評価手法として、チャンネル中の電子の移動度を、強磁場を使って評価する手法を開発し、界面制御開発の効率化を図る。また、ナノレベルで埋め込まれた構造をナノレベルで評価する手法も開発する。これらの成果を使って、現在のフラッシュメモリに代わるメモリの実現を目指す。材料に分子など、新規性のある材料を使うことで、電荷だけでなく、光で制御するメモリが可能になる。これらの研究で得られた知識を産学独連携や国際連携を活用して、この分野・領域の「オープンイノベーション」を進める。</p>
ミッションステートメント （具体的な達成目標）	<p>新材料開発として、Si基板と直接接合でき、かつ誘電率が25を超えるHigher-k材料、仕事関数差が0.8eV以上で非晶質なメタルゲート材料を発見、開発する。</p> <p>革新的な評価手段として強磁場におけるサイクロトロン共鳴を使った次世</p>

	<p>代ナノ MOS の評価手法、キャリア輸送の計測技術、量子ホール効果を使って電子の移動度の評価方法を開発する。また、多次元 EBIC（電子線誘起電流）法による次世代半導体の欠陥など、100V 電子顕微鏡を開発し、埋め込まれたチャンネル特性を可視化する技術を開発する。最後にこれらの材料の実用化を目指して、これらの材料を使った MOSFET と分子や他の元素を Higher-k 材料に添加した不揮発性メモリを完成させる。</p>
<p>平成 23 年度～平成 25 年度中間評価時までの主な研究成果（アウトプット）及び研究成果から生み出された（生み出される）効果・効用（アウトカム）、波及効果（インパクト）</p>	<p>1) 主な研究成果（アウトプット）： Si 基板への Higher-k 材料の直接接合では、スカベンジング効果を使った界面の SiO₂ 層の除去に関する原理を示し、HfO₂ の Si への直接接合を実現した。現在では Ge 基板上への Higher-k 材料である TiO₂ の直接接合も実現している。 微細化に対応した非晶質材料で仕事関数の制御を可能にした TaC-Al 系メタルゲート材料を開発した。これは Al の拡散を使って界面ダイポールを形成することでフラットバンド制御ができることを利用したもので Si プロセスとの整合性も高い画期的な方法である。界面反応の観点から、メタルゲート/Higher-k 界面を電圧印加型 EBIC で計測し、窒化物系、炭素系材料がメタルゲート材料として有効であることを示した。 強磁場を使った MOS 界面でのサイクロトロン共鳴を使った移動度の評価は、SiO₂/Si を使った評価を終え、MOSFET の移動度とほぼ同じ結果を得た。現在は Higher-k/Si や酸化物 FET の移動度の評価にも挑戦し、概ねよい結果を得ている。 不揮発性メモリの高密度化としては、世界で初めて Fin 型フラッシュメモリを NIMS で開発した新材料を使って実現した。有機分子を使ったメモリでは電荷の蓄積が確認され、微細化に対応できるかを検討している段階である。分子には光感受性があるものがあり、これを使った光メモリも実現した。関連する研究として、Si 上に高い発光効率をもつ緑色 LED を企業との共同研究で実現し、現在は複数の企業への技術提供を検討している。また、三次元 LSI への導入を目指して、導電性ポリマーを開発し抵抗を金属の水準まで下げることができた。この材料は特許化し、現在、複数の企業とコンタクトしている。</p> <p>2) 研究成果から生み出された（生み出される）効果・効用（アウトカム）、波及効果（インパクト）： メタルゲート材料設計には合金中の金属の析出を予測するソフト、“SurfSeg” が使われた。これは金属の析出のデータと計算科学を融合したもので、どの元素が析出するかを予測することができる。仕事関数計測には当ユニットで開発した光電効果を使った計測機器が使われた。メタルゲート/Higher-k 界面反応による欠陥の生成を電圧印加型 EBIC で計測し、窒化物系、炭素系材料がメタルゲート材料として有効であることを示した。これらの結果は今後の微細化 MOSFET のメタルゲート材料設計の指針を示した成果である。これらの方針などを使って、世界で初めて Fin 型フラッシュメモリを NIMS で開発した新材料を使って実現した。この成果は現在、企業で実用化に向けた検討がなされている。このように、本プロジェクトからは社会に還元できる成果が多く生まれている。</p>
<p>中間評価時の進捗状況及び自己点検・評価</p>	<p>中間評価時の進捗状況： High-k ゲートスタック材料に関してはゲート長 10nm 世代の材料設計指針を提示することができた。将来を視野に入れて Ge 上の Higher-k も探索している。これらの知見を進展させ、新材料を使った Fin 型フラッシュメモリを企業と連携して開発するなど、当初の計画をさらに進める成果を出している。また、社会ニーズを捉え集積回路の三次元化に関する材料の開発も進め、すでに企業との連携も始めた。このように当プロジェクトは当初の予定を上回って進んでいる。</p> <p>自己点検・評価：</p>

	<p>High-k/ゲートスタック材料での設計指針を3年目で示すことができたことは大きな成果である。また、NIMSの持つ材料の蓄積データと計算科学を使ったことは、NIMSがこの分野でも貢献できることを実証したものである。進歩するエレクトロニクスの分野で、着実に研究計画を遂行するだけでなく、時代の要請に対応する研究開発や三次元集積回路のための材料を開発できたことも大きな成果である。有機材料に関する研究は応用より基礎研究に属する内容が多くあり、今後の実用化につながる種が多く生まれている。このように、材料科学に立脚した研究成果と企業との連携を通じた社会貢献だけでなく、基礎科学分野でも貢献しており、バランスのとれた研究体制を実現することができた。</p>
【評価項目】	コメント
<p>①研究計画、実施体制、マネジメント、連携 (研究開発の方向性・目的・目標の見直し、計画・ロードマップの問題点、実施体制・マネジメントの改善、連携のあり方、ほか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ Hp (ハーフピッチ) 22nm 以降のナノデバイス要素技術というシリコン関連技術を中心とする研究開発の方向性・目的・目標の設定は妥当である。 ・ サブテーマ 1、2、3 については目標設定がクリアである。サブテーマ 4 については不明確である。 ・ 各サブテーマで確実に研究を進めている点も評価できる。 ・ ロードマップは従来の ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors) の半導体ロードマップに基づいており客観性はあるが、材料の点から NIMS 独自の視点に基づくロードマップがあってもよい。 ・ 強磁場による界面移動度評価は、原理部分での意義は理解できるものの、実用的評価手段として既存評価法に対する優位性は十分に説明されていないように思う。 ・ 平成23年度からも、日本の半導体産業の変化に対応しているのか。 ・ 公的研究機関としてのミッションを半導体産業ではどこにおいているのか。 ・ 日本から世界に発信し、ナノエレクトロニクスの進歩に貢献し、種々の製品として日本に返ってくるという考え方は一つのグローバル貢献の見方としてあるが、知的財産戦略の抜けは、命取りになりかねない。 ・ 材料研究から、材料を活かすナノエレクトロニクスの応用への転換ももっと視野に入れる必要はないのか。
<p>②研究開発の進捗状況及び進め方 (進捗状況の把握、研究責任者の自己点検・評価の妥当性、進め方の見直し(継続・変更・中止等)、研究資源(資金・人材)の再配分、ほか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 各サブテーマについて、順調に成果が挙げられている。 ・ 物質研究の歴史の上に立った研究となり、成果に結び付けている。 ・ 成果は2.5年でよく出ている。変化のある産業分野にも、よく対応を考えて活動している。 ・ 進捗の管理は明確である。 ・ 研究責任者の自己点検・評価(80~90%の達成度)も妥当である。 ・ 計画に沿って順調に進展しているものと認められる(ただし、プレゼン資料に記された進捗%数値はやや甘めである)。特にサブテーマ1は当初目標をほぼ達成している。サブテーマ2は手法の原理確認ができた段階である。サブテーマ3も重要な成果を挙げている。サブテーマ4は当初目的を額面上達成しているが、事前評価結果における意見にもあるように、当初目標がやや曖昧であったことを考慮する必要がある。 ・ 中間段階ですでに80~90%達成しているならば、残りの2年は、追加の目標設定が可能なのではないか。 ・ Al₂O₃/SiO₂ 形成におけるV_{th} (閾値電圧)バラツキについてはIMEC (Interuniversity Microelectronics Centre) などとアライアンスを組んで評価している。 ・ 評価説明資料6ページ目の界面のSiO₂形成の抑制のため、ゲートラスト

	とするか、0拡散ブロックなどにより工夫を求めることは一つの方向である。プロセス温度全体の低温化に特に触れないのは、守備範囲が広すぎると考えているのか、説明は必要であろう。	
③論文・特許等の直接の成果（アウトプット）、効果・効用（アウトカム）、波及効果（インパクト） （研究成果の質は世界レベルか、どのような効果・効用あるいは波及効果が出たか/期待されるか、研究タイプを考慮した費用対効果はどうか、セレンディピティー、ほか）	<ul style="list-style-type: none"> ・高い分析能力をもとにした優れた材料開発の成果が出ている。 ・進展する技術の中で成果をタイムリーに出している。 ・世の中の状況が把握されている。 ・日本の物質研究のあり方の1つの形を示しているように見える。 ・多くの論文、招待講演、特許出願などの成果を挙げており、材料研究として世界レベルの成果が挙げられている。 ・平成25年のプロシーディングが極端に少ないのは、理由があるのか、世界的な研究動向に乗っているか、この分野では、No.1、Only1ともに成果が求められる。 ・金属被覆導電性ポリマーの発見とその3次元配線への応用という思いがけない進展も見られている。 ・High-k材料や非晶質金属ゲートのテーマを始め、ナノエレクトロニクスにおける波及効果は大きいと思われる。 ・特許管理をどのようにしているか不明確である。 ・追従するメーカーと知的財産あるいは権利を取得することが公的機関の責務である。同時に情報公開も求められる。 ・日本の半導体産業の現状において、成果を実デバイスにどのように反映し社会還元していくかが問題である。 	
④総合評価 （研究全体に対する総合的所見、及び上記評価項目①～③に含まれない、その他の評価ポイント、問題点等があれば追加してコメント）	<ul style="list-style-type: none"> ・総体的に高いレベルの成果を挙げているプロジェクトである。 ・LSI開発におけるNIMSの材料分野の貢献はよくわかった。ただし製造ラインと直結していないので、フィードバックに時間がかかることが懸念される。 ・アディショナルな成果をいくつか報告していたが、将来のLSIに対してどの程度意味をもつものか不明である。どれくらいの確率で実用化できるか、見通しはどのくらいなのか。 ・アプリケーションの発掘も大きな使命である。 ・世界の産業界の動きに対応しているかどうかは、今後も問われる状況である。 ・ナノエレクトロニクスは、今後も重要技術であることは間違いないと考えるが、日本のナノエレクトロニクスの先導役として、より高みを期待したい。 ・NIMSで開発した材料技術を日本の半導体産業の再興に少しでも役立ててほしい。 	
各委員の総合評価点 （10点満点）	9、8、9、9（順不同）	
総合評価点平均 （10点満点）	8.8（小数第二位四捨五入）	
評価点	評価	評価基準
10	S	全ての点において模範的に優れている。 計画を変更することなく継続すべきである。
9		
8	A	総合的に優れている。 一部計画を見直し継続すればS評価になる可能性がある
7		

6		平均的なプロジェクトである。
5	B	継続は認めるが、継続する時に、一部計画を見直した方が良い点がある。
4		期待されたほどではない。
3		計画を見直して継続すべきである。
2	C	プロジェクトの見直し、計画の抜本的な変更が必要である。
1		大きな問題があり、継続を中止すべきである。