

プロジェクト事後評価報告書

評価委員会開催日：平成29年1月16日

評価委員：（敬称略、五十音順）

下山淳一 青山学院大学 理工学部 物理・数理学科 教授
 田中雅明 東京大学 大学院工学系研究科 電気系工学専攻 教授
 田中陽一郎 山形大学大学院 理工学研究科 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29年4月7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
研究責任者の所属・役職・氏名	国際ナノアーキテクトゥクス研究拠点・MANA 主任研究者・知京豊裕
実施期間	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も進める。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電顕を開発し、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27年度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)： この研究プロジェクトでは以下の卓越した成果が得られた。 誘電率 25 以上で Si や Ge に直接接合できる higher-k 材料、HfO₂/Ta₂O₃ 積層材料や HfO₂/TiO₂ 積層材料を発見した。また、これに関連し、メタルゲートと Higher-k 材料との界面と仕事関数を考慮した材料設計ソフトと計測手法を開発した。また、各種メモリの開発を進め、ReRAM、Memristor、Fin 型フラッシュメモリ、光スイッチメモリなどを開発した。関連する成果として、SiC 上のゲート酸化膜中に発生する界面準位を視覚化し、リークの原因が Si₂C=O 結合にあること解明した。また、SiC や GaN パワーデバイスのための高誘電体キャパシタ材料を開発し、無極性 GaN on Si 上で世界で初めて LED を作製するなど成果をあげた。分析・評価では GaAs、GaN 界面に発生する二次元電子ガス中のサイクロトロン共鳴を使って FET を作製することなく、移動度を評価する手法を開発し、その有効性を示した。また、Si、SiC、GaN、各種酸化物中の欠陥を EBIC、CL あるいは低加速 SEM で視覚化して、デバイスの信頼性評価をおこなった。</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)： 得られた成果の中で、メタルゲート/Higher-k 界面を析出や熱力学などの観点から考察し、帰納的に界面構造やしきい値を予測するプログラムを作成し、それを公開した。これは世界で進められているマテリアルズインフォマティクスの取り組みを先取りしたものである。また、Fin 型フラッシュメモリで開発した水素拡散防止膜はルネサスエレクトロニクスへ技術移転することができた。また、関連する研究であった GaN on Si の研究は現在、共同研究に発展し、ここで開発した欠陥の視覚化に関する研究は名古屋大学を中心に進められている研究コンソーシアムでも使われている。</p>
<p>プロジェクトの目標の達成度合い及び自己点検・評価</p>	<p>プロジェクトの目標の達成度合い：大きな成果を挙げており目標を十分上回った。 自己点検・評価：ここでは目標に掲げた成果を超える多種多様な成果がうまれた。しかし、本プロジェクトに参加した研究者は半導体や電子材料を専門とする研究者ばかりではない。しかし、それぞれの専門性を活かして、他の機関ではできない研究をすすめることができた。例えば、しきい値電圧を予測するプログラムは企業研究者からも好評である。また、次世代リソグラフィのレジストは有機感光剤に金属を添加した材料である。この構造は金属錯体に類似しており、その光電子分光に経験のある研究者が連係することで世界にアピールする成果をあげている。他のグループの研究者が開発したフッ化物蛍光体の屈折率が高いことから、その材料が高誘電体であること予想し、その材料がGaN用FETのゲート絶縁膜として有望であること実証も実証している。これらの研究を通じて、得意分野を持つ研究者の異分野融合が新しい技術を生むことを実証したプロジェクトであった。</p>
<p>【評価項目】</p>	<p>コメント</p>
<p>①研究計画、実施体制、マネージメント、連携 (事前・中間評価の結果を受けて、ロードマップに問題</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・半導体産業界の技術先導の役割を果たすべく、産業技術を補完する国研の材料・ナノ解析技術にフォーカスしたアプローチと目標設定は評価できる。 ・ナノエレクトロニクスデバイス開発に向けた材料評価、作製を中心に適切に研究を進めている。

<p>はなかったか、実施体制は十分だったか、マネージメントの是非、連携の範囲や連携課題、連携の成果はどうだったか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・また出口を意識した企業との連携研究を5年間で発展させられたのは、今後のNIMSのこの分野の研究開発にポジティブにこのスタイルを定着させることになったと考える。 ・マネージメントも適切である。 ・材料研究者を半導体デバイスの世界へ引き込むというアプローチはたいへん良い。 ・材料研究者の専門性を半導体デバイス研究にうまく生かしており、NIMSらしい研究成果を挙げている。 ・多岐にわたる研究テーマについて、各研究者にそれぞれの”ブランド”を明確にして実施してきたことは、責任とテーマ進捗に効果的な方法であったと思う。 ・テーマの方向性が明確に示された結果として新物質提案がなされている。 ・また、コンソーシアム体制も活用して、新規技術開発のエコシステムを構築する努力も実施している。 ・様々な機関との共同研究があり研究対象が広範に分散しているが、テーマとしての注力度合い、リソースや強み技術の優先化戦略が良く分かり難い印象がある。 ・日本の関連メーカーが停滞する状況の中、刺激する技術の発信が重要な使命である。 ・新物質あるいは新テクノロジーをナノエレクトロニクスに適用するには現在、成膜法、評価法に高い壁がある。それを打破する仕組み作りが求められる。 ・知的財産の獲得は確実ながら、事業化への道を開いてほしい。 ・特許とオープン化の両立が大事である。 ・磁性・分子機能の目標については、この技術特有の領域設定、ポジショニングを明確にした目標レビューを期待する。
<p>②プロジェクトの具体的な達成度 (目標は達成されたか、学術的価値、社会的価値、経済的価値の創造につながったか、技術レベルの向上につながったか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・光メモリ効果を持つトランジスタなど、新規機能を深掘りする研究戦略の立案に期待している。 ・4つのサブテーマとも多数の重要な研究を含み、主要目的を達成している。 ・目標だけでなく新しい現象、high-k化におけるオリジナルで提案を行うなど、この分野においてNIMSの存在感は増している。 ・新物質の提案は、機構の重要な役割である。 ・光メモリ効果を持つトランジスタなど、新規機能を深掘りする研究戦略の立案に期待している。 ・マテリアルインフォマティクスなどは物質科学の基礎づくりとして有効なものと評価できる。 ・また優れた研究員が育っていることも大きな成果とみられる。 ・かつ新たに実用化するための課題も明確にし、それらが事業全体として進められるように多くの協力者が出てくるように、道筋、あるいは研究の活性化も使命ではないか。 ・ReRAM(抵抗変化型メモリ)の研究、高誘電率キャパシタの研究は特に重要であり、実用化を目指してさらなる発展を期待する。 ・hp(ハーフピッチ)22nm以降のMOSFETを目指しGeチャネルに接合できるEOT(SiO₂換算酸化膜厚)=0.78のhigh-k材料を開発、酸化物ReRAMの素子スイッチ特性制御手法を発明、グラフェントランジスタにおけるLiNbO₃自発分極制御によるロジック化可能性実証や新規ReRAM動作提案、DRAM絶縁膜誘電率改善など、非常に有益な知見が得られた。 ・SiAlONフラッシュメモリの開発を達成し、実用化試作パイプラインに投入したことは大いに評価できる。 ・強磁場を用いた物性評価では、電子移動度、キャリア密度など重要な物理量を測定する手段を開発したことは、デバイス学理解明の貢献として評価できる。

	<ul style="list-style-type: none"> ・また、格子欠陥や挙動の可視化は産業界への有効な展開を図って頂きたい。 ・分子機能の動作実証は、将来の新原理素子を探索するプロセスとして意義深い。 ・テーマ研究を通して、明確になってきた「分子機能ならではの新規効果」を明確にして頂きたい。
<p>③研究開発の進捗状況 (研究により得られた成果は、世界レベルで比較して高いか、予算に見合った成果が得られたか、将来の新しい研究の芽が得られたか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・多くの成果は世界レベルであり、将来につながるものである。 ・基礎物性解析力と欠陥挙動解析能力は、プロセス技術と並ぶ半導体技術の要であり、この点にサブテーマとして注力し成果を出したことは評価できる。 ・新物質から実用化までには多くの研究が必要であるが、新物質開発というNIMSの最大目的のレベルは達成されている。 ・予算に見合った以上の成果と見られるが、競争の激しい競合技術が多い分野であり、界面制御などNIMSの強みが見せられた5年間の勢いを保っていくことが望まれる。 ・他国の半導体産業との競争が非常に厳しい中で、本プロジェクトが如何に日本の半導体産業界の技術を押上げているか、明確な絵を見せて頂きたい。 ・手探りの中とは思いますが、光を活用した制御など、方向性を掴む先駆的な研究を期待したい。 ・分子機能ナノエレクトロニクス領域では、二波長感応型有機トランジスタも世界初の開発であり、多値メモリや光メモリ効果について先駆的な知見を得ている。 ・ReRAMやコンピューティングに大きな影響力のある次世代不揮発性デバイスなど、将来に向けた研究戦略に焼き直す点が今後の重要課題である。
<p>④見込まれる直接の成果(アウトプット)、効果・効用(アウトカム)や波及効果(インパクト) (質の高い論文・特許が多く出たか、新技術や実用材料につながるか、思いがけない成果があったか、他分野への波及効果はあるか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・非常に広範な連携研究を遂行しており、研究ネットワーク活用の観点で評価できる。 ・論文数も多く出力も大きい。 ・また界面特性のシミュレーションシステムは論文以上の長期的にインパクトのある成果である。 ・多くの特許が出願されているが、さらにスムーズに特許が出し易い体制・制度が設けられることを期待したい。 ・その中において、知的財産権の効果的な権利化と産業化への貢献について、戦略的なアプローチを期待したい。 ・日本の半導体メーカーが元気がないので、産業界との連携を強めて半導体産業の活性化にもより一層貢献してほしい。 ・NIMSのような国研では、材料レベルからの質の高い基礎研究を産業化につなげる研究が求められるので、一層の活躍を期待する。
<p>総合評価点平均 (10点満点)</p>	<p>8.8点 (小数第二位四捨五入)</p>
<p>その他 研究全体に対する総合的な所見、①～④に入らない所見、問題点、あるいはプロジェクトに対する印象など自由にご記入ください</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・成果獲得から人材育成まで実りの多い5年間であったと思われる。 ・サブテーマ4件ともに目標(またはそれ以上)の成果を挙げている。 ・多様な基礎科学分野の集合であり、分野間連携による可能性は非常に大きい。 ・他のプロジェクト(例えば、省エネ磁性材料のメモリ関連テーマ)との交流で、新しい技術の芽を発掘できれば良いと思われる。 ・研究者の得意領域を深掘りする努力に基づく資金サポートの形を実践している。 ・運営交付金を超える規模の外部資金を得て連携研究を推進した点は大いに評価できる。 ・NIMSは材料開発からデバイスまで研究できる貴重な研究機関であり、この立場を生かしてナノエレクトロニクス分野で先端的な研究を続けてもらいたい。

第3期中長期計画プロジェクトの事後評価基準

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た。 多くの点において模範的に優れていた。
9		
8	A	総合的に優れていた。 顕著な成果が出た優れたプロジェクトであった。
7		
6		
5	B	平均的なプロジェクトであった。 一部の計画の見直しが必要であった。
4		
3		
2	C	期待されたほどではなかった。 計画を大幅に見直して実施すべきであった。
1		