

プロジェクト事後評価報告書

評価委員会開催日：平成24年2月8日

評価委員：（敬称略、五十音順）

神谷利夫 東京工業大学 応用セラミックス研究所 教授
 財満鎮明 名古屋大学大学院 工学研究科 教授
 田中雅明 東京大学大学院 工学系研究科 教授

確定年月日：平成24年4月2日

プロジェクト名	半導体関連材料に関する基礎・基盤研究の多面的展開
研究責任者の所属・役職 ・氏名	国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 ナノエレクトロニクス材料ユニット長 (元半導体材料センター長) 知京豊裕
実施期間	平成18年度～平成22年度
研究目的と意義	Hp（ハーフピッチ）32nm～22nmノード世代の次世代半導体デバイスは多様な材料とその異種接合によって機能を発現する。ここでは、次世代の半導体デバイスに必要な材料、特にゲート酸化膜材料、メタルゲート材料の探索を進めるとともに、これらの材料を用いたナノ構造の作製と評価、ナノ界面の制御技術に関する研究を進める。これらの構造はナノ構造を有し、接近する界面どうしの相互作用やナノ界面特有の現象なども明らかにする。これらの結果をデータベース化し、半導体関連材料のインフォーマティックスの構築を目指す。
研究内容	研究目標を達成するために、ここでは、①仕事関数の制御が可能な金属メタルゲート材料に関する研究開発、②新high-k（高誘電率）材料、特に、次世代集積回路のためにSiとの直接接合が可能なゲート酸化膜の開発、③仕事関数やゲートスタック構造の電子構造解析のための手法の開発、④計算科学を使ったゲートスタック材料の設計と界面制御、⑤ゲートスタック構造中の欠陥の制御、ナノ構造の作製と不純物の制御、⑥窒化物半導体材料の開発とその More than Moore 領域への応用、⑦ZnO、有機材料とSiデバイスとの融合に関する研究を進める。また、これらの成果、特に系統的な材料データを使って半導体材料に関するインフォーマティックスの構築を目指す。
ミッションステートメント (具体的な達成目標)	MOSFET（金属酸化膜半導体電界トランジスタ）構造の基本はゲートとゲート絶縁膜界面、ゲート絶縁膜/Si界面で構成される。ゲート材料に関しては、これからの微細化に対応する0.8V以上の差を実現する仕事関数制御とナノ構造制御を同時に満たすゲート材料の研究が必要である。ここでは、①仕事関数の異なる金属を合金化して仕事関数の制御を実現する。特に将来のゲート電圧の低電圧化を視野に入れ、0.7～0.8eVの範囲での仕事関数制御を目指す。さらに、②炭素を添加して金属合金の結晶粒径を微細化し、広い範囲での非晶質化の研究を行う。③これらの研究を進めるための金属/酸化膜界面の電子構造や仕事関数を評価する手法を開発する。次世代集積回路では現在のHfO ₂ 系high-k材料より高い誘電率を持ち、かつSiと直接接合するようなゲート絶縁膜/Si界面構造が求められる。そのため、まず、④ゲート酸化膜の信頼性評価手法を開発する。この手法を使ってMOSFET構造でのゲート絶縁膜の信頼性を評価する。さらにSiナノ細線に関する研究では次世代のチャネルでの利用を念頭に置き、⑤Si細線中の不純物の分布と応力との関係の明確化を進める。また多様な機能をSi上を実現するために、有機細線デバイス、ワイドバンドギャップ半導体の開発、新チャネル材料としての金属シリサイド系材料など、More Moore, More than Moore, Beyond CMOS（相補型金属酸化膜半導体）世代にも対応できる材料開発を進める。これらの材料データを整理・統合し、最終的には半導体材料分野における材料インフォーマティックスの構築を目指す。

<p>平成18年度～平成22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）：</p> <p>①HfO₂系非晶質high-k材料を発見するとともに、Siに直接接合可能なCe系high-k材料を開発し、さらに材料設計の指針も示した。</p> <p>②メタルゲートの設計に関して、金属合金による仕事関数制御、相分離、析出を使った仕事関数制御、さらに、炭素などを添加して材料を微結晶化、非晶質化する指針を示し、0.7～0.8eVの範囲で仕事関数を実証した。</p> <p>③NIMSで開発した、基板電圧を印加して光電子分光を行い、ゲートスタックにおけるバンドアライメントを計測する手法を開発した。</p> <p>④光電子分光を使って原子スイッチやReRAM（抵抗変化式メモリー）の電極/酸化物界面でどのような反応が起こり、その結果として、イオンあるいは酸素空孔がどのように移動しているかを明らかにした。</p> <p>⑤EBIC（電子線誘起電流法）がナノスケールのhigh-k膜の欠陥評価に使えることを実証した。この成果により、high-k膜の劣化の機構が、どのように進行するかを世界で初めて示すことができた。</p> <p>⑥BNをこれまでのコーティング材料としてではなく、半導体材料としても有望であることを示し、BNを使った電子線源やBN/Siのヘテロ接合による太陽電池を実証した。</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）：</p> <p>①次世代のhigh-k材料、メタルゲート材料の設計指針を示すことができた。</p> <p>②基板電圧を印加して光電子分光を行い、ゲートスタックにおけるバンドアライメントを計測する手法は業界の標準的な手法となりつつある。</p> <p>③EBICの可能性を広げ、今後のナノスケール材料の欠陥評価への応用の道筋をつけた。</p> <p>④これまでコーティング材料としてしか使われてこなかったBNを半導体材料として利用できることを示した。</p> <p>⑤コンビナトリアル材料技術とそれから発生した材料を社会へ還元する観点から、NIMS発ベンチャー企業として、株式会社COMETを2007年12月に設立した。</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。</p> <p>自己点検・評価： 当該プロジェクトは次世代電子デバイスへの応用を念頭に置き、当初掲げた高い誘電率をもつhigh-k材料、Siと直接接合できるhigh-k材料の開発と材料設計指針の確立、仕事関数制御可能な非晶質メタルゲートの開発、ゲートスタック中の欠陥の評価、BNや酸化物を使った新機能素子の開発を達成し、さらに、低温プロセスでSiへのhigh-k材料の直接接合を可能にする「スカベンジング効果」の利用、横方向の分解能を上げたナノスケール欠陥評価手法、さらにBN/Siを使った新型太陽電池の開発など、当初の目標を上回る成果を挙げる事ができた。</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 （計画はきめ細かったか、ロードマップに問題はなかったか、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、どこが問題なのか、ほか）</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・計画・ロードマップでは、研究目的をSi ULSI技術に関連する新材料開発に絞り、具体的で現実的な計画を立てている。その上で新しい有用な材料を見つけるといった挑戦的な内容を取り込んでいる。 ・NIMSならではの材料学的な見地から、半導体デバイス用材料と界面制御に関する知見を集積し、実用可能な材料系の開発とデータベースの構築を目指したもので、NIMSとして特徴のあるプロジェクトとなっている。 ・新材料開発の2グループと特性評価の1グループを主軸に、（株）Seleteなどの企業群、および、NIMS内の理論計算グループとの協同研究・情報交流を密に行う実施体制を形成・実施してきた。 ・実施体制に挙げたいずれの研究要素も、次世代high-k材料やSi ULSIに不可欠

	<p>で、お互いに密接な関係を持つものである。これらグループの成果を共有し、他の研究に反映させたことがよく認められる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ NIMS内のみならず、産業界も含めて外部機関との連携も活発になされている。 ・ NIMSだけでは不可能な側面の研究開発を、外部、国外との連携によって、より大きな成果に結びつけており、マネージメント的にも成功したプロジェクトと判断できる。
<p>②研究開発の進捗状況及び具体的目標の達成度 (研究責任者の自己点検・評価を踏まえて、進み具合はどうだったか、目標は達成されたか、目標は具体的であったか、世界レベルで見て目標は高かったか・低かったか、問題点は何か、ほか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 新材料ではSiと酸化界面を作らないhigh-k材料、仕事関数を制御できる非晶質メタルゲートの開発、評価では欠陥分布の可視化、欠陥準位の起源の解明と解決方法の指針を示し、材料データベースを作成して一部は会員企業が利用しているなど、H22年度の最終目標に沿った成果を挙げている。 ・ 次世代ゲート絶縁膜材料やメタルゲート膜材料に対する精密な評価を行い、材料開発の考え方を提起した点や、系統的な実験を行い、その結果をデータベースとして提供したこと、埋もれた薄膜材料の欠陥評価技術の実用性を実証するなど、当初目標は十分に達成されている。 ・ NIMSでは今までに無かったSi系半導体デバイス用材料を扱い、NIMSならではの手法と考え方で材料開発の基盤を築いたこと自身、評価に値する。 ・ 論文数よりもはるかに多い招待講演数が示すように、ULSI分野での世界評価は非常に高い。 ・ 各項目において、当初目標以上の素晴らしい成果が達成されており、高く評価できる。今後は、このような優れた材料研究をデバイス研究とリンクを強めて実用化につなげて、使われる技術として育成することを期待する。 ・ サブテーマ3についても興味深い成果は得られているが、研究の方向性をより明確にして、NIMSらしさのある研究テーマへと発展することを期待する。 ・ 優れた特性を持つ新材料をいくつも開発しているが、実用の視点から見た際の課題を整理し、それらを効率的に解決していく新体制の構築、課題設定、マネージメントを行い、NIMS初の材料の実用化を目指すことが望まれる。特に、ULSI材料を開発しているという点から、実際のデバイスでの評価をもっと積極的に実施する必要があるのではないか。
<p>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） (世界レベルの質の成果が出たか、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、問題点は何か、ほか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 5年間の成果としての発表論文数は十分であり、特に、多くの招待講演があり、当該分野で権威のある国際会議にも採択されていることから、当該研究グループに対する評価は高いと考えられる。 ・ 論文や国際会議等で多数の成果が発表されており、また有用な公開データベースの提供もされており、波及効果は大きいと思われる。 ・ 論文数は決して多いとは言えないが、電子工学では評価の高い国際学会の発表が国際学会誌の論文と同等の評価が与えられるべきと考えられる。 ・ 招待講演数が非常に多いことは、この成果が実用面で高く期待・評価されていることを示している。 ・ 内容的にも、特許を出願することは重要であり、57件の特許出願と24件の特許登録は評価に値する数値と考える。 ・ 直ぐに実用化可能な材料が得られたわけではないが、デバイス応用の観点から、材料制御の考え方や欠陥評価技術を提案してきたことは高く評価すべきである。 ・ 材料インフォーマティックスの構築という点でも、産業界の研究開発場面で役に立つ成果が得られている。 ・ 研究費が少なくなっている状況を踏まえると、コンビナトリアルなどの手法を使いながら効率的な研究開発を行っている。

<p>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があれば追加してコメント)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・総合的に見て、当研究グループは当初の目的や目標をほぼ達成したと判断する。 ・Si ULSIを具体的なターゲットとして設定し、目標を達成するため着実な研究を進めている。コンビナトリアル、非晶質金属、理論計算など様々な手法・アイデアを積極的に取り込み、有用な特性を持つ新しい材料を実際に開発してきたことが高く評価できる。 ・NIMSならではの材料科学の知見を、最先端・次世代半導体デバイス分野に持ち込み、その制御技術や欠陥評価技術の提案を行ってきた点は重要であり、今後の波及効果も大きい。 ・内外の各研究機関や企業との連携を積極的に行い、半導体デバイス分野でのNIMSの存在感を示したこともプロジェクトの重要な成果と考える。 ・全体的に波及効果が大きい優れた成果が得られており、高く評価できる。今後は、材料の研究として深めると同時に、このうち有望なものをデバイスの研究開発につなげ実用化に貢献することを期待する。 ・目標が具体的なことから欠点として目立ってしまうが、実際のデバイスでの評価を積極的に行い、より実際的な実用性の検証、実用に必要な材料特性の検証を行っていくことが望まれる。 ・あえて難を言えば、研究テーマはULSIのロードマップに沿ったものが多いように見受けられ、NIMSならではのテーマを増やすことが望まれる。 ・研究論文数が評価のすべてではないが、より積極的に成果公開を進めていくことが望ましい。 	
<p>各委員の総合評価点 (10点満点)</p>	<p style="text-align: center;">9、9、9</p>	
<p>総合評価点平均 (10点満点)</p>	<p style="text-align: center;">9.0</p>	
<p>総合評価点</p>	<p>評価</p>	<p style="text-align: center;">評価基準</p>
<p>10</p>	<p>S</p>	<p>全ての点において模範的に優れていた。</p>
<p>9</p>		<p>多くの点において非常に優れていた。</p>
<p>8</p>	<p>A</p>	<p>総合的に優れていた。</p>
<p>7</p>		<p>優れたプロジェクトであった。</p>
<p>6</p>		<p>平均的なプロジェクトであった。</p>
<p>5</p>		<p>一部の計画の見直しが必要であった。</p>
<p>4</p>	<p>B</p>	<p>期待されたほどではなかった。</p>
<p>3</p>		<p>計画を見直して継続すべきであった。</p>
<p>2</p>	<p>C</p>	<p>プロジェクトの見直し、計画の抜本的な変更が必要であった。</p>
<p>1</p>		<p>大きな問題があり、プロジェクトを中止すべきであった。</p>