

「電子・光子等の機能制御」  
平成11年度採択研究代表者

小田 俊理

(東京工業大学量子効果エレクトロニクス研究センター 教授)

## 「ネオシリコン創製に向けた構造制御と機能探索」

### 1. 研究実施の概要

ナノ結晶シリコンの粒径と粒子間隔を原子スケールで制御した「ネオシリコン」は、粒子内での電子の局在化と粒子間の相互作用により、電子輸送、光放出、電子放出特性において、従来の単結晶やアモルファスを超える新物性が期待できる第3のシリコン材料と位置づけられる。デジタルプラズマプロセスやラジカル窒化などユニークな材料制御技術により「ネオシリコン」の機能を明確にすることが研究のねらいである。

ナノシリコンの粒径制御は $8 \pm 1$ nmをすでに実現し、1 - 2個のドットによる単電子トンネル特性や隣接ドットによる影響を観測しているが、さらにプラズマパルス条件と酸化条件の最適化により、粒径3-4nmを目指す。トンネル障壁としての表面酸化膜の重要性に関してはこれまでに明らかにしてきたが、今後直接熱窒化およびラジカル窒化法により、一層の粒子間隔制御と電気特性の向上を目指す。粒子位置の制御については、自己組織的テンプレートによる表面核の形成、電氣的トラップ法を検討している。

ネオシリコンの電子輸送特性については、磁場環境での測定や、極低温測定を行い、伝導機構の解明を進めている。正孔輸送や、単電子素子回路の検討も進めている。

ネオシリコンからの電子放出特性に関しては、ポーラスシリコン並の効率0.8%が得られており、今後のドット形成条件、絶縁膜形成条件の最適化によりさらなる高効率化が期待できる。ホットエレクトロン注入によるパリスティック伝導機構についても検討を加えている。発光特性についても評価を開始しており、表面酸化膜による影響を考慮した検討を行う。

ネオシリコンの素子応用については、超低消費電力高速動作不揮発性メモリ機能素子、システムオングラス、面電子放出素子について、目標と課題の検討を行った。

### 2. 研究実施内容

#### 1. ネオシリコン試料作製グループ

ナノ結晶シリコンの粒径をこれまでの8nmから3-4nmに微小化すること、粒子間隔を1-2nmで制御することを目的とする。粒径微小化のためにはナノシリコン作

製条件の変更と酸化条件の探索を行った。短パルスガス供給を可能にするため、ナノシリコン形成装置の真空排気系を改良した。ナノシリコンドットを形成後同一真空装置内の酸化チャンバーに試料を搬送し、種々の条件で熱処理する事により、酸化膜の形成、エッチングの過程をTEM観察により評価した。今後、酸化膜のストレスによる酸化速度の自己停止機構を検討する。新しいトンネル障壁として、低温直接窒化膜を検討するため、ナノシリコン形成装置に窒素ラジカル発生装置を取り付けた。今後、窒化条件を検討する。

## 2. 電気特性評価グループ

ナノシリコンドットを平面型および縦型の微細電極構造中に堆積し、単電子輸送特性の評価を行った。1個のドットによる特性および隣接するドット間の相互作用による影響を観測した。縦型微細トランジスタでバリスティック伝導を観測した。磁場を中での特性を観測することにより伝導機構を検討した。ナノシリコンドットを浮遊ゲートとするトランジスタにおいて単電子メモリ効果を観測した。

サイドゲートを有するナノ細線トランジスタの特性をポリシリコンとナノシリコンで測定し、いずれも単電子トンネル特性を観測した。

## 3. 発光・電子放出特性評価グループ

シリコン発光素子については、赤色EL発光の外部電力効率を0.37%まで向上した。シリコン光集積については、埋込導波路を作製し、屈折率変化による非線形光学効果の観測を行った。ポーラスシリコンの電子放出素子は効率を1%まで改善し、機構が弾道電子放出によることを検証した。ネオシリコンの電子放出も検討を行い、効率0.8%を得た。

## 4. 少数電子・回路応用グループ

ネオシリコン系の電子輸送として、シリコンでのヘテロ構造ホットエレクトロン・ダイオードの解析を行った。印加電圧を増加していくと半導体層とトンネル膜の境界で、ホットエレクトロン・インスタビリティが起こり、トンネル電流から熱電子放出電流に変化し、負の微分抵抗が現れることを示した。更に、トンネル膜としてシリコン窒化膜を用いることにより低電圧動作が可能であることを示した。このヘテロ構造ホットエレクトロン・ダイオードとネオシリコン電子放出を組み合わせたデバイスを提案した。

ネオシリコンの実現に鍵となる極薄トンネル膜形成法を調べた。多結晶シリコンを750 から900 でアンモニア雰囲気中に10分置くことにより、多結晶シリコン表面にシリコン窒化膜を形成した。温度により窒化膜の厚さが1nm-2nmに制御できること、多結晶シリコンのリン濃度が高いと窒化膜が厚くなることを見出した。この実験結果から、薄く良質なトンネル膜を形成するには、多結晶シリコンに不

純物を含まないことが重要であることを明らかにした。更に、このトンネル膜＋シリコン層のダイオード特性をシミュレーションし、実測値と良い一致を得た。

## 5. 素子応用検討グループ

ネオシリコンの特徴を生かす応用目標をニーズ面から探索することを目的とする。他のグループと相補的、かつ、一体となって進め、知的所有権確保にも努める。11年度は、応用の可能性や材料評価法について広く検討した。具体的には：

### (1) ニーズと必要性能

#### \* 超低消費電力高速動作不揮発性メモリ機能素子

オン時nS ( $10^{-9}$ S) で動作、オフ時10年 ( $10^9$ S) 保持を想定し、ON/OFF比18桁を目指す。現状では、ON/OFF比1 2桁程度。6桁の改善には革新的技術開発が必要。

#### \* システムオングラス

液晶表示素子のガラス基板上等にULSIを形成することは、高速・低消費電力・低コスト化の切り札と成り得る。素子性能では単結晶Si素子を上回る途を探る。

#### \* 面電子放出素子

FED (電界放射素子) 実現の鍵となる高効率、高信頼の電子放出源が求められている。最近、SiC、ダイヤモンド薄膜、カーボンナノチューブ等の種々の競合技術が現れているが、これらと同等以上の性能実現を目指す。

### (2) 材料評価法

ネオシリコンの電導特性を決定するシリコン粒間の電子輸送現象を掘り下げて検討するため、単一粒界の評価の可能性について検討した。その結果、まず、実用的な観点からも解明が期待されている100nmレベル (液晶駆動用TFTレベル) の多結晶を取り上げる。結晶粒界やシリコン/絶縁膜界面での界面準位評価の有力な手段として、電子スピン共鳴状態で電気伝導度が変化する事が利用出来る。また、電子線ホログラフィー技術を用いた粒内のポテンシャル分布測定の可能性もあり、今後具体化を検討する事とした。

## 3. 主な研究成果の発表 (論文発表)

M.Takahashi and N.Koshida, Fabrication and characteristics of three-dimensionally buried porous silicon optical waveguides, J. Appl. Phys. 86, 5274-5278 (1999).

N. Koshida, X. Sheng, and T. Komoda, Quasiballistic electron emission from porous silicon diodes, Appl. Surf. Sci. 146, 371-376 (1999).

T. Komoda, X. Sheng, and N. Koshida, Mechanism of efficient and stable surface-emitting cold cathode based on porous polycrystalline silicon films, J. Vac. Sci. Technol. B 17, 1076-1079 (1999).