

# ナノテクノロジー

## Nanotechnology

### あらまし

米国のクリントン前大統領が発表した「国家ナノテクノロジー戦略」により、ナノテクノロジーという名が一躍有名となった。ナノメートル（10億分の1メートル）の世界を人間が制御することにより、あらゆる材料、そしてあらゆる産業分野に技術革新をもたらす可能性があることが広く認識されるようになったからである。

富士通研究所では、半導体分野でのナノテクノロジーの研究開発は、HEMTの発明に端を発し20年前から始めている。現在では量子ドットの研究で先行、例えば、電子1個を制御する量子ドットメモリや、新しい原理に基づくテラビット光メモリの実現可能性を検証している。本稿では、これら量子ドットに関する最近の研究成果をまとめるとともに、半導体から異分野へのナノテクノロジー展開を図るために2000年12月に新設したナノテクノロジー研究センターの研究計画をご紹介します。

### Abstract

Since former President Clinton announced the “National Nanotechnology Initiative”, nanotechnology has become a well-known field. It has attracted much attention because it will enable mankind to control things on a nanometer (1/1,000,000,000-meter) scale. The benefits it promises should find wide application, bringing technological innovations to many materials and many industrial fields.

Since inventing the high electron-mobility transistor (HEMT) 20 years ago, Fujitsu Laboratories has been a leader in researching and developing nanotechnologies for application to semiconductors. It is currently at the forefront of research into quantum dots. For instance, a quantum-dot memory based on controlling single electrons and a terabit optical memory based on a new principle of operation have been demonstrated. In this report, we describe our recent work on quantum-dot technologies and introduce the research plan of the Nanotechnology Research Center, established in December 2000 and designed to extend Fujitsu's nanotechnologies from semiconductors into other fields.



粟野祐二（あわの ゆうじ）

ナノテクノロジー研究センター  
所属  
現在、ナノマテリアルの研究企画  
と推進に従事。



横山直樹（よこやま なおき）

ナノテクノロジー研究センター  
所属  
現在、ナノテクノロジーの研究企画  
と統括に従事。

## まえがき

トランジスタの発明からおよそ半世紀にわたってその高性能化は、素子寸法の微細化によってなされてきた。現在、ゲート長30ナノメートル (nm) のSiMOSFETが試作され動作している。このトランジスタに使用されているゲート酸化膜厚は0.8 nm, すでにナノメートルの世界に突入している。トランジスタの微細化の限界を探るとともに、微細化に伴って出現する量子効果を利用し、新しい電子デバイスの創生をねらうのが、半導体ナノテクノロジーの一つのミッションである。

半導体の微細化の極限は、x軸、y軸、z軸、すべての軸方向で (すなわち三次元空間で) 電子を閉じ込めることのできる「量子ドット」と呼ばれる微細ナノ構造である。一辺が1~10 nm程度の大きさで、電子も正孔も「量子サイズ効果」により、ある特定の量子化されたエネルギーしか取れない。したがって、量子ドットは、電子や正孔にとって、頑強な牢屋、あるいは極めて鋭い共鳴箱ようになっており、従来にはない特異な電氣的・光学的性質が現れる。例えば、電子1個の動きが識別できる単電子効果や、極めて強い光非線形効果が、室温下

でも現れる。これらの性質を利用し、従来よりも格段に高性能の電子・光デバイス、あるいは新しい原理に基づく高機能電子デバイスを開発することが、具体的研究テーマである。

一方、ナノテクノロジーは半導体分野にとどまらず、材料やバイオ分野にとっても重要な技術である。半導体微細化技術が進展し、人間はナノメートルサイズの構造を制御・作製できるようになった。DNAの二重螺旋径と同程度の加工寸法が可能となったことを意味し、バイオロジー分野との接点が顕在化してきた。新材料の創生や、異分野間の融合により、新しいテクノロジー分野が創生され新しい市場形成も期待できる。これら新しいナノテクノロジーの世界に焦点を当てるため、2000年12月21日、ナノテクノロジー研究センターが新設された。異分野の交流を図るため、既存研究所と独立した組織となっていることに特徴がある。国際交流を深めるため欧州においても研究グループを結成させる予定である。

## 量子ドットの作製

量子ドットの研究を行うために、まずは量子ドットを作製する技術が必要となる。その技術は、トランジスタ

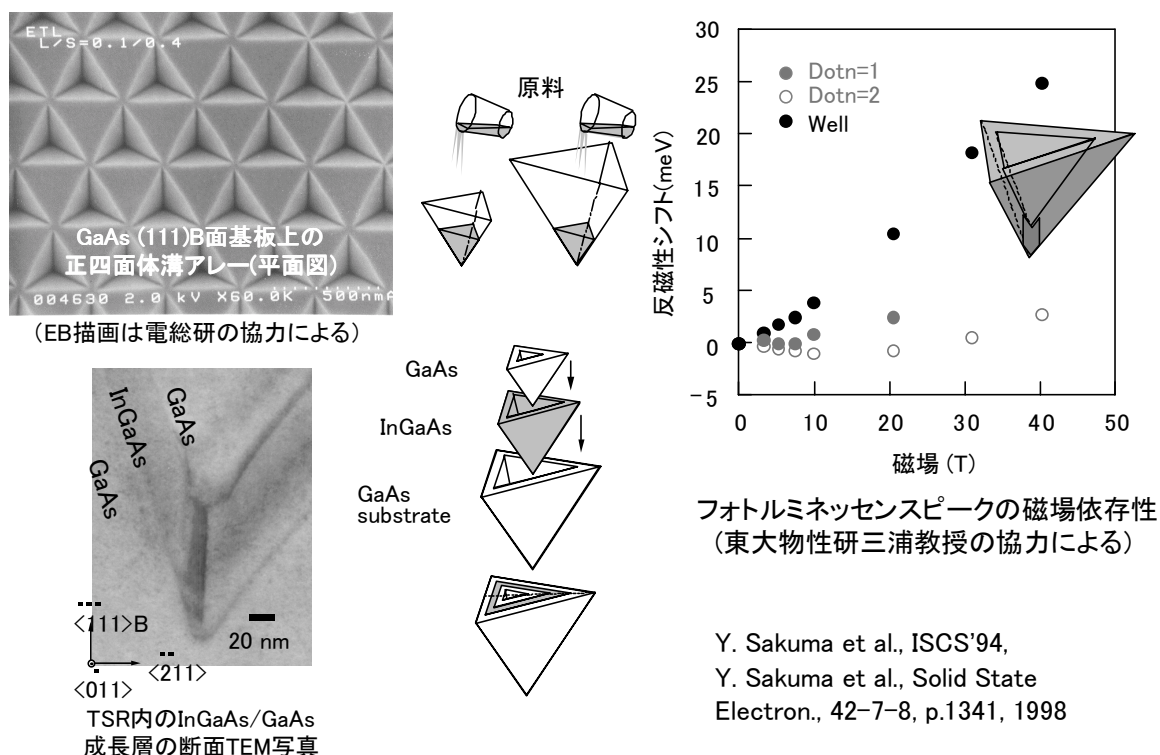


図-1 InGaAs正四面体溝 (TSR) ドットと反磁性シフト

Fig.1-InGaAs Tetrahedral-Shaped Recess (TSR) Quantum Dot (QD) and the diamagnetic shift of PL peaks from the QD.

の微細化限界の要因となるリソグラフィ技術に頼ってはいられない。著者らは、結晶成長の自己組織化現象を利用した富士通研究所独自の量子ドット作製プロセスを開発した。GaAs正四面体溝（TSR）量子ドット技術と呼んでいる<sup>(1)</sup> GaAs(111)B基板と高い選択比を持つ異方性エッチングの採用により、原子レベルでとがった正四面体型溝の形成に成功（図-1）、この溝内にInGaAs/GaAsヘテロ結晶成長を施すことにより、溝底部にだけIn濃度が高いInGaAs量子ドット領域が自己組織的に形成されることが分かった。この方法は量子ドットの数が多い欠点があるが、量子ドットの位置制御ができる点、均一度に優れた量子ドットが得られる点で、デバイス応用に有望である。TSR量子ドットが形成されていることについては、図-1の右図に示すように超高磁場下でのフォトルミネッセンスの反磁性シフトの実験によって確認している<sup>(2)</sup> 量子井戸（Well）では磁場を増加させると反磁性シフトが大きくなるが、量子ドット（Dot）では反磁性シフトが小さくなっている。これは量子ドットの中に電子や正孔が既に閉じ込められていることを示している。

もう一つの量子ドットの作製技術にSK量子ドットと呼ばれている技術がある。SKは、Stranski-Krastanovの略で、本成長モードを発見した人の名前である。GaAs基板上に分子線結晶成長法によりInAs層を成長し

ていくと、GaAsとInAsの格子定数（結晶の大きさ）が異なるため、歪みが発生、その歪みを緩和するために自然にInAsがクラスタリングを起し、量子ドットが形成される。比較的簡易に多数の量子ドットが形成できる長所があるが、量子ドットの大きさや位置制御をすることが困難であるという短所もある。しかし著者らは、量子ドットの積層化により、均一度の優れた量子ドットの形成に成功、業界初の室温連続発振する量子ドットレーザの開発などに成功している。

### 量子ドットを用いた単電子制御メモリ

TSR量子ドット1個をフローティングゲートとする縦型HEMTメモリを考案・試作した。その断面図を図-2に示す。150 Kまでの動作実証に成功した<sup>(3)</sup> 量子ドット1個によるメモリとして世界初のものである。書き込み・消去電圧は±1 V程度と極めて低く、低消費電力化も図られている。このメモリの構造的特徴は、電流が集中する溝底付近にドットがあり、ドット内の電荷数変化でチャネル電流が大きく変化する点にある。その結果、量子ドットへの電荷1個の出入りを観測することに成功<sup>(4)</sup> 10個の電荷を制御蓄積し、保持することが分かった。

さらに化合物半導体の特徴を生かした、メモリの光書き込み動作にも成功している（図-3）<sup>(5)</sup> 図-3左下図に示すように、三つの光短パルス照射（@90 s, 190 s,

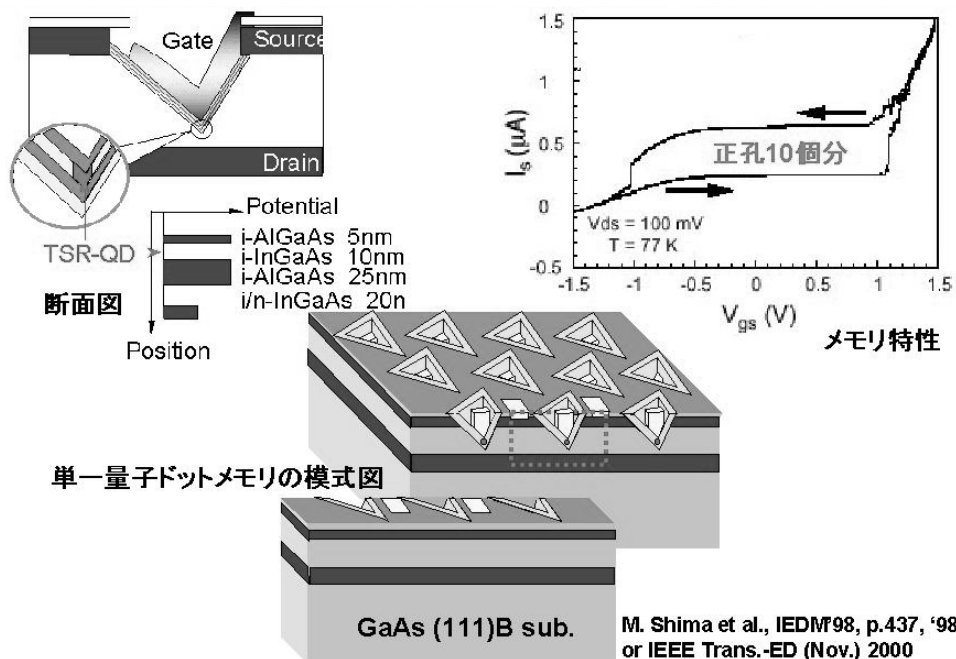


図-2 TSR単一量子ドットメモリの断面構造とメモリ特性（@77 K）

Fig.2-Structure and memory operation of a Single TSR-QD memory.

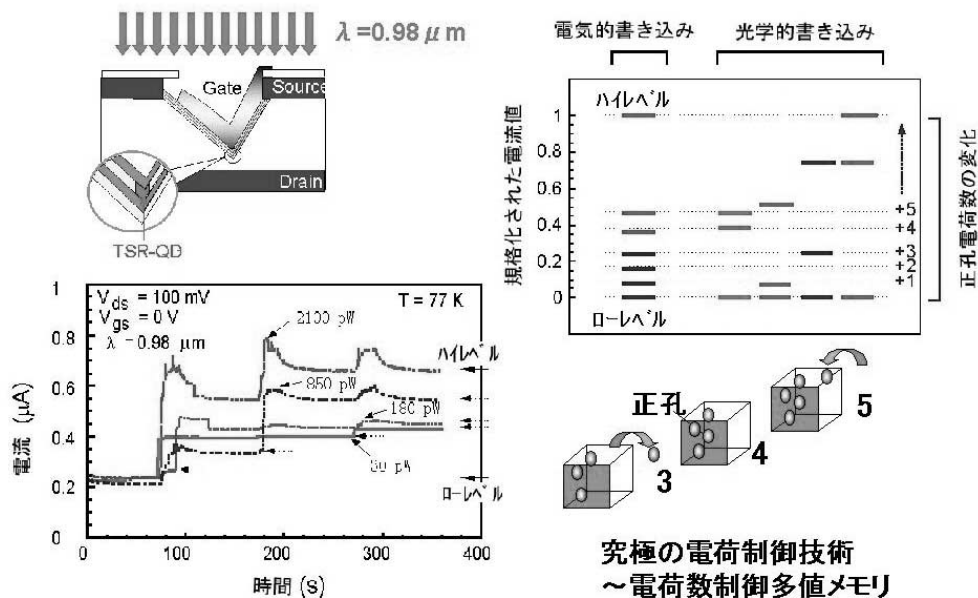


Fig.3-Optical writing characteristics of TSR-QD memory and control of the number of charges stored in QD.

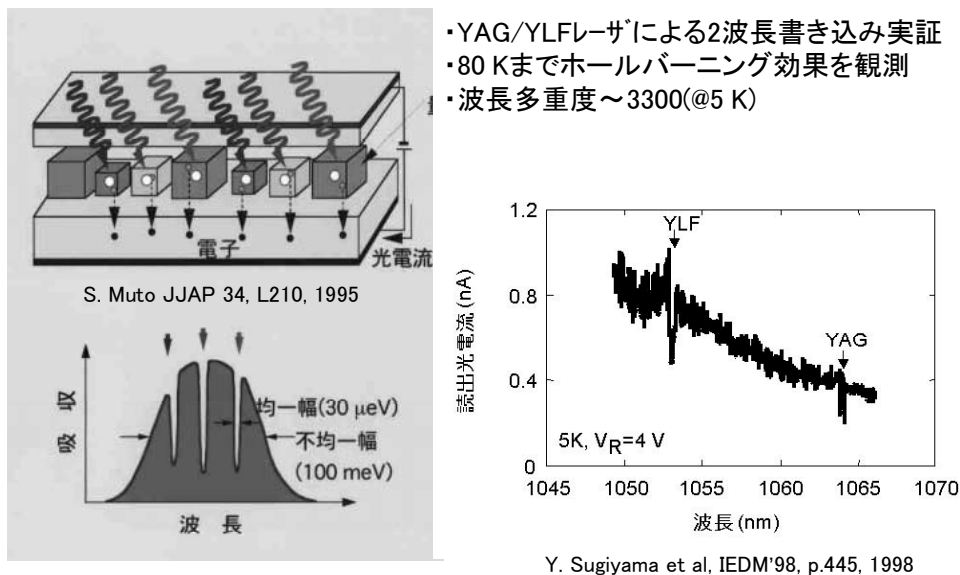


Fig.4-Operation principle of SK Quantum Dot memory and optical writing characteristics by two different wavelengths.

290 s), 照射する光強度を増していくと電流がステップ状に増加し, その電流変化はある定常値に落ち着き, 維持される。図-3の右図が, その維持された電流値と, 電気書き込みによって得られている電流値を比較したものである。ほぼ完全に対応しており, この量子ドットメモリへの情報書き込みは, 電子1個の精度で, 電氣的にも光学的にも等価に行えることが分かった。TSRメモリセルアレイとCMOS読出し回路の集積化を行い, その基本

動作も確認している。

### 量子ドットを用いた光波長多重メモリ

SK量子ドットの欠点とされるサイズばらつきを, 逆に積極的に利用し, 電氣的配線が不要な世界初の量子ドットホールバーニングメモリの原理実証に成功した<sup>9)</sup>メモリ機構は以下のように説明できる (図-4)。

大きさの異なる量子ドットの集合体に, 特定の波長の



光を当てると、その波長に共鳴する量子ドットだけで光吸収が起き、電子・正孔対が生成される。生成された電子・正孔対のうち一方を量子ドットから引き出すことで、電子・正孔対の再結合を回避し、もう片方のキャリアを量子ドットに残留させ情報を書き込むことができる。同波長の光を照射すると、光吸収飽和で吸収されないため、吸収の有無を観測することにより情報読み出しが行える。

この素子は、書き込み波長を変えることで別の量子ドットに情報を書き込めることから波長軸上でメモリ空間を創出できる。すなわち波長領域で情報記憶の多重化が可能となりメモリの高密度化が図れる。SK-InAs量子ドット層を5層埋め込んだダイオードで、80 Kで2波長のホールスペクトル観測に成功、波長多重メモリの原理実証を行った。量子ドット層を100層積層し、100ドットで一波長の情報を記録、1ミクロンのレーザスポット径で2,000波長多重化(30 K)することにより、1平方インチあたり1テラビットの情報記録が可能となる。ただし、現在のところ情報保持時間がミリ秒程度しかなくリフレッシュが必要。室温では量子ドットの光スペクトルのブロード化により波長多重度が落ちるため、汎用メモリとしては使用できない。市場拡大をねらうためには室温動作可能な新材料系の量子ドットが必要である。

### 新型量子ドットの開発と応用可能性

図-4に示したデバイスでは、光照射することにより生成された電子と正孔は両者ともに量子ドット内にとどま

る。そのままではナノ秒の単位で電子と正孔は結合し消失してしまうので、メモリとしては使用できない。そのため、電界を印加し、有効質量の小さな電子だけを引き抜く技術が使われた。しかしこの方法では、正孔も引き抜かれる確率もあるため、メモリの保持時間を制限する。

そこで光メモリの保持特性の改善を目指し、電子と正孔を原理的に空間分離できる構造としてInAsドット/GaSbモノレーヤ量子井戸の結合構造を考案・成長技術を開発した(図-5)。GaSbの上に、GaAs層を介し、InAs量子ドット層が形成されている。この構造では、GaAs層の膜厚(LB)がトンネル効果が起きる程度に薄い{9 ML(原子層)}場合、InAs量子ドットで生成された電子と正孔の正孔だけが、トンネル効果によりGaSbモノレーヤ量子井戸に移動できる。そのため、InAs量子ドット内に電子が自然に取り残される。図-5に示すフォトルミネッセンスのピークエネルギーが、GaAs層の厚みが43 MLのときと比べて9 MLのときには低エネルギー側にシフトしていることが、それを実証している。このため電子の寿命が増大し、メモリの保持時間の改善が期待できる。動作温度の高温化も期待できるが、さらなる検討が必要である。

一方、この技術により、量子ドットの中に一つの電子を閉じ込めることができるので、量子コンピュータの基本デバイス要素となるキュービットを実現できる可能性もあることが分かった。

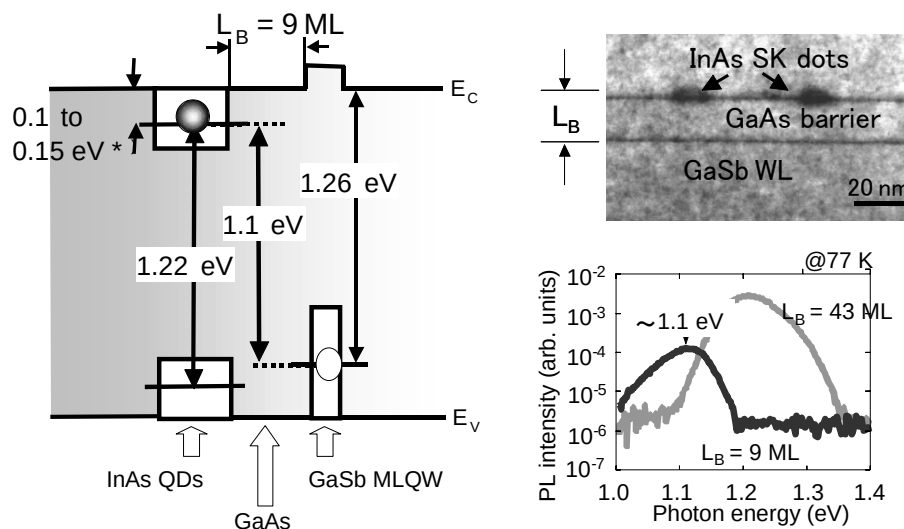


図-5 タイプII量子ドットの断面図とエネルギーバンド図

Fig.5-On the left: Band line up of type II Quantum Dots. On the right (up): TEM of the type II Quantum Dots. On the right (down): PL spectra measured for two different thicknesses of GaAs tunneling barrier.

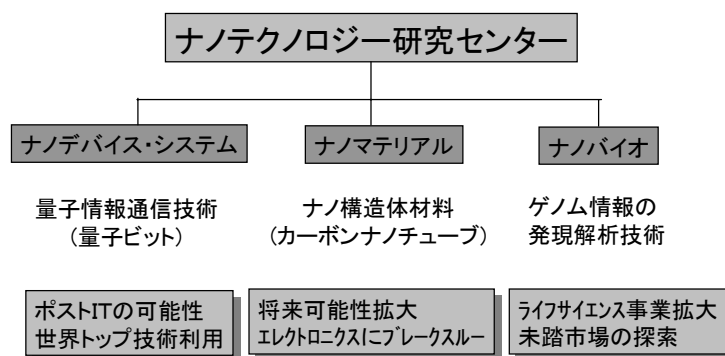


図-6 ナノテクノロジー研究センターの組織と研究テーマ

Fig.6-Organization and research subject of the Nanotechnology Research Center established in December, 2000.

## ナノテクノロジー研究センターの紹介

ナノテクノロジー研究センターには、ナノデバイス・システム、ナノマテリアル、そしてナノバイオの三つの研究グループがある（図-6）。ナノデバイス・システムグループで、未来の情報技術として期待される量子情報通信技術の研究を行う。この技術が実現すると、従来のコンピュータよりもある種の計算速度が100億倍速い量子コンピュータや、従来の光通信よりも100万倍高密度の情報のやり取りができるなど、大きな技術革新が起こる可能性がある。量子ドットの研究はこのグループで引き継ぎ、量子キュービットや量子メモリの実現をねらう。ナノマテリアルグループは、カーボンナノチューブの研究から取りかかる。カーボンナノチューブはその構造を制御できれば、低抵抗で、銅以上の電流密度が流せる配線材料として期待できる。ナノバイオグループでは、ナノテクノロジーを駆使し、ポストゲノムとして期待されるプロテオームの世界において急速に市場が形成される可能性の高いプロテッチャーや健康管理チップの実現可能性を探る。この分野は特に、生物・化学・物理・工学の異分野間の知識や技術の融合が大切で、ミュンヘン工科大学、そしてルードリッヒ・マックスウェリアン大学を中心とするCeNS（Center for NanoScience）との研究連携を進める計画である。

## む す び

半導体微細構造の究極として、量子ドットの研究を進めてきた。これまでに量子ドット1個で、メモリセルが実現できることを示すと同時に、その究極のメモリでは電子1個ずつを識別することにより、多値メモリの実現が可能になることを示した。これはメモリデバイスでは、

その心臓部の微細化が極限の10 nmまで可能であることを示すと同時に、この世界では新たな単電子効果により、電子1個ずつを制御し蓄積可能であることが分かった。ナノメータ配線（線幅10 nm以下）が可能になれば、テラビットからペタビット級のメモリ開発も夢ではないことを示した点で意義のある成果となった。配線は重要なテーマであるが、直径1～10 nmのカーボンナノチューブ配線がその一候補である。

また、配線不要のメモリとして、量子ドットの光メモリ応用を世界に先駆けて提案し、波長多重化によりテラビット級メモリが可能であることを実証した。米国のペタフロップスコンピュータプロジェクトでは最下位の高速超並列光メモリに、この光メモリが候補に挙がっている。

量子ドット技術は、安価で高性能の量子ドットレーザや光アンプの開発を目指し、フォト・エレクトロニクス研究所で応用展開が進んでいる。ナノテクノロジー研究センターでは、量子ドットの更なる技術革新を目指し、量子情報通信への適用可能性を探っている。これまで、ナノテクノロジーは半導体分野にとらわれがちであったが、センターの発足を契機として、他分野との垣根を撤廃、自由な発想のもとに、異分野の知識や技術を集積し、半導体、材料、バイオの分野において革新的ブレークスルーをねらい新しい市場形成をねらいたい。

## 参考文献

- (1) Y. Sugiyama et al. : Novel InGaAs/GaAs quantum dot structures formed in tetrahedral-shaped recesses on (111)B GaAs substrate using metalorganic vapor phase epitaxy. *Appl. Phys. Lett.* Vol.67, p.256 (1995).
- (2) Y. Sakuma et al. : Magneto-Photoluminescence Study

of Quantum Dots Formed on Tetrahedral-Shaped Recesses. *Solid State Electron.*, vol.42, no.7-8, p.1341 (1998).

- (3) M. Shima et al. : Tetrahedral-shaped recess (111)A facet AlGaAs/InGaAs heterojunction field-effect transistor with an InGaAs floating quantum dot gate. *IEEE Trans.-ED47*, p.2054 (2000).
- (4) M. Shima et al. : Random telegraph signals of tetrahedral-shaped recess field-effect transistor memory cell with a hole-trapping floating quantum dot gate. *Appl. Phys. Lett.* Vol.77, p.441 (2000).
- (5) M. Shima et al. : Optical modulation of stored charges in single floating quantum dot gate field-effect transistor memory cell. *Technical Digest of ISCS*, Th-C5 (2000).
- (6) Y. Sugiyama et al. : Spectral Hole Burning of InAs Self-Assembled Quantum Dots Written by Two Different Lasers. *Technical Digest of IEDM*, p.445 (1998).
- (7) M. Yamaguchi et al. : InAs Self-Assembled Quantum Dots Coupled with GaSb Monolayer Quantum Well. *Tech. Digest of SSDM*, p.318 (2000).

