

論文の内容の要旨

論文題目

Studies of formation process and optical properties of self-assembled Ge/Si nano-structures

(和訳 自己形成 Ge/Si ナノ構造の生成過程と光学特性に関する研究)

氏名 三浦 真

現在の半導体デバイスにおいて、シリコン(Si)の果たす役割は極めて大きい。微細化によるデバイスの性能向上が次第に頭打ちになっている今日、Si の特性そのものを向上させるということは重要であり、現代の情報化社会の発展においても急務である。

10 年ほど前から急速に発達してきた分子線エピタキシー法は、良質なヘテロ構造の作製を可能にし、低次元性など様々な特性を半導体に付加することが出来るので、特性の向上・改善に大きな可能性を持っている。この分子線エピタキシー法によって作製された、同じIV属半導体であるゲルマニウム(Ge)とのヘテロ接合は、Si にバンドエンジニアリング、移動度の向上など様々な利点、及び可能性を与え、既に Si/Ge ヘテロバイポーラトランジスタが開発、実用化されるなど、大きな進歩を得ている。また、低次元構造作製により、従来発光には全く向いていなかった、間接遷移型半導体である Si の光学特性の大幅な向上が期待でき、光デバイスと電子デバイスの融合という究極のデバイスへの可能性が開ける。

Si と Ge の間に存在する約4.2%の格子不整合は、Si 上への Ge の成長時に歪みをもたらし、ある一定の Ge 膜厚以上で歪み緩和による Ge の三次元成長を誘起することが知られている。三次元成長により生じる構造を自己形成島と呼ぶが、Si/Ge ヘテロ接合において、この自己形成量子ドットが実現すると、大きな特性の向上が期待される。それは、振動子強度の大幅な増大、状態密度の離散化など通常の量子ドットの特性に加え、波数空間でのエネルギー分散関係の消滅による擬似的な直接遷移への移行という大きな効果が期待できるからで

ある。また、欠陥の生成を伴う人工的なプロセスを必要としないため、自己形成 Ge 島により量子ドットが実現すると、物性の変化という物理的な興味と共に、発光特性の大幅な改善が期待できる。しかし、自然発生的な形成過程に起因して、そのサイズや位置、密度の制御は非常に困難である。また、Ge 島のサイズそのものも非常に大きく、横方向のキャリアの閉じ込めが非常に弱い。自己形成島のサイズを制御する方法は今までにいくつか試みられてきたが、未だに量子ドット実現には至っていない。本論文では、Ge 島の形成メカニズムを解明し、島の均一化と微小化を実現させることを目的に、様々な構造の提案、作製を行うと共に、島の形成過程、発光特性を調べた。

本研究では、試料はガスソース分子線エピタキシー(GSMBE)法を用いて作製した。この方法は急峻な界面を得ることが出来るという点で、良質なヘテロ界面を必要とする光学特性の研究には有用である。評価には、原子間力顕微鏡(AFM)、フォトルミネッセンス分光法(PL)、透過型電子顕微鏡(TEM)、X 線回折装置を用いた。

一般的に島のサイズ、位置が均一化すると知られている、図 1 に示す自己形成島の多層構造を作製し、その自己組織化過程、及び自己組織化メカニズムの成長温度依存性を調べた。

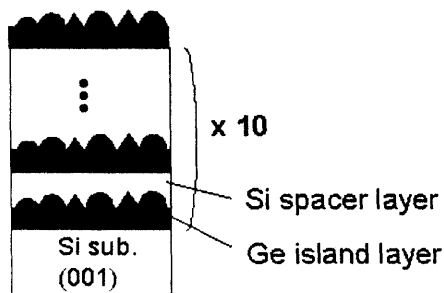


図 1 : Ge 島の多層構造

成長温度 600 度においては、Si の中間層厚の減少と共に、表面 Ge 島のモフォロジーには、埋め込まれた Ge 島からの歪みの影響が現れ始め、Si 中間層厚 39 nm のところで、島のサイズの増大、密度の減少と共にサイズの均一化が見られた。しかしながら、さらなる Si 中間層厚の減少では、逆に不均一さが増加するという結果が得られた(図 2)。これにより、島間の歪み場の相互作用が Si 中間層厚によって大きく変化し、均一化、不均一さの継承という二つの異なる作用を示すことが分かった。成長温度が 525 度の場合、Si 中間層厚の減少に伴う Ge 島の自己組織化は同様に観測された(図 3)。

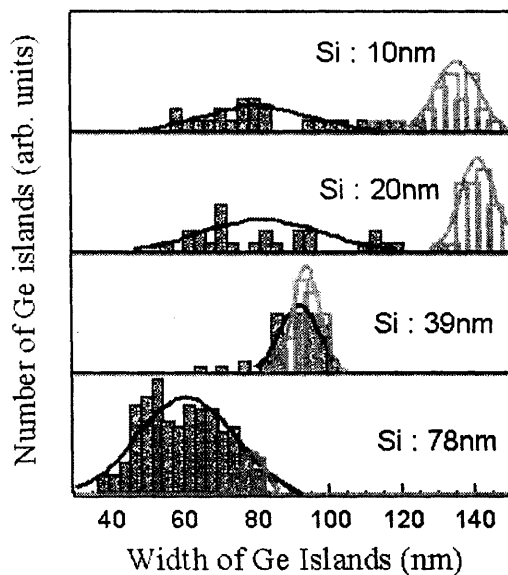


図 2 : 600 度で成長した Ge 島多層構造のサイズ分布
形状の異なる二つの島についての分布を載せてある。

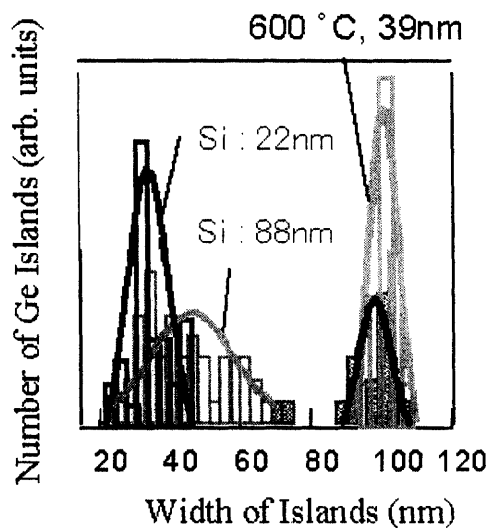


図 3 : 525 度で成長した Ge 島多層構造のサイズ分布
比較のために 600 度で均一化した試料のサイズ分布も添付する。

しかし、この場合の自己組織化の仕方は 600 度の場合と大きく異なり、均一化と共に、島密度の増加、サイズの減少を伴うことが分かった。この温度による自己組織化のメカニズムの違いは、埋め込まれた島からの歪み場と、成長の kinetics の関係で説明でき、熱平衡状態により近い高温では均一化と共に島のサイズ増加、密度の減少が起こり、低温では Ge の表面拡散が小さいため、微小な島がサイズをさらに減少しながら均一化することが分かった。

埋め込まれた Ge 島の歪みが Si 表面上の Ge 島形成に与える影響をより詳細に調べるため、薄い Si 中間層を介して Ge 島を二層積層させたときの効果について述べる。それぞれ特徴的な Ge 島の形状、密度を示す 8.0 ML、18.0 ML の Ge 層の上に、Si 中間層 7 nm を介して、島の臨界膜厚以下の 6.0 ML の Ge を成長させたとき、臨界膜厚以下にも関わらず、上部 Ge 層において島の形成が確認できた。また、その島は、サイズ、密度が下地の Ge 島のものをそのまま引きずって成長していることが分かった。これは下の Ge 島の強い歪み効果を示しており、埋め込まれた Ge 島が Si 表面で Ge にとって安定なサイトを供給し、Ge 島が形成されやすくなったことに起因し、サイズの再現が起こったことから、この歪みは非常に強く、島のサイズ制御に有効であることが分かる。

この強く関連した系においては、Ge の成長速度の低減、及び熱処理によっても Ge 島の

形状は変化しないことが分かる。Ge 島一層構造においては、成長速度の低減、熱処理は熱平衡状態へ近づくことによるサイズの増大、密度の減少が見られるが、この場合の積層構造においては、これらの変化は全く見られず、微小な島が安定に存在することが分かった。

また、Si 中間層厚を増加させると、Si 中間層が薄いときに全く見られなかった熱処理の効果が再び現れることが分かる。このことから、歪み場は Si 中間層厚の大小に応じて、上部の Ge 島を Si 表面内に閉じ込めることが分かる。従って、積層構造作製によって熱的に非常に安定な微小島が作製可能であることが分かった。

上述の結果で、Si 中間層の薄い場合における Ge 島積層構造においては、Ge 島の形成を制御する可能性が提唱されたので、サイズの微小化、島の形成過程の更なる制御を目的とし、温度変化を伴う積層構造を考案した。まず、島のサイズが小さい 500 度で第一層目の Ge 島を成長し、その上に薄い Si 中間層を介して第二層目の Ge 島を 600 度で堆積させた。これにより、第二層目の Ge 島の密度、サイズは通常の 600 度での成長の場合に比べ、極めて高密度、かつ微小になることが分かった(図 4)。

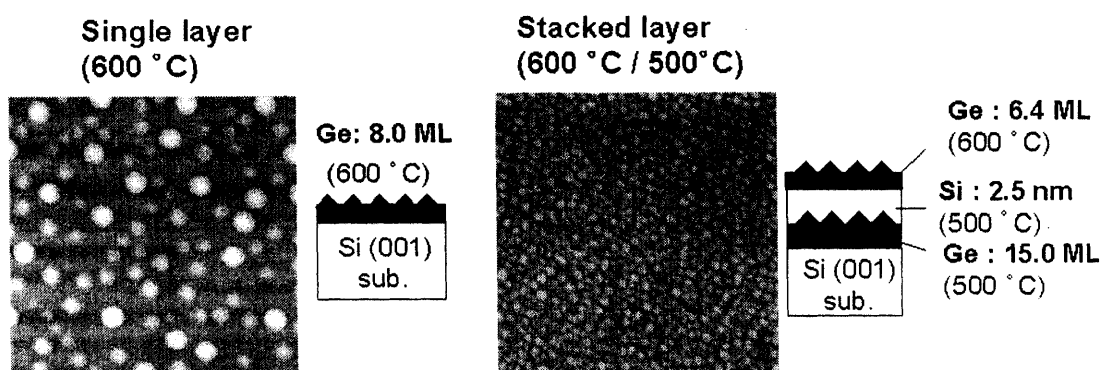


図 4：温度変化を伴った積層構造、及び 600 度で成長した Ge 島一層の表面 AFM 像
600 度で作製した Ge 一層の構造と比べ、サイズの減少、密度の増加が顕著に見られる。

これは埋め込まれた低温成長層での微小島が、Si 表面における Ge の表面拡散を大幅に減少させ、島の上部の微小領域に Ge を強く束縛し、島の微細化をもたらしたことを示している。この結果は、結晶欠陥の少ない高温領域でも微小島が形成可能であることを示唆すると共に、形成過程の制御に関して大きな指針を与えるものであるといえる。