新しいビームプロセスによるトップダウン加工

—究極のトップダウン加工を目指して—

寒 川 誠 二

東北大学・流体科学研究所・流体融合研究センター ☎ 980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1

(2004 年 3 月 2 日受理)

Advanced Beam Processes for Precise Top-down Patterning

Seiji SAMUKAWA

Institute of Fluid Science, Tohoku University
2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8577

(Received March 2, 2004)

Recent ultra-large-scale integration (ULSI) production processes involve fabricating sub-0.1- μm patterns on Si wafers. High-density plasma sources are key technologies for developing precise etching processes. The disadvantages of these technologies include several types of radiation damage caused by the charge build-up of positive ions and electrons or by ultraviolet and X-ray photons during etching. These are very serious problems that must be overcome in the fabrication of future nanoscale devices. To overcome these problems and achieve accurate nanoscale patterning, a high-performance neutral-beam etching system is required.

1. 序 論

半導体デバイス製造においては微細加工、表面改質、薄膜堆積などのキープロセスで反応性プラズマが多く用いられており、今や原子層レベルの加工精度や堆積精度が要求されている。しかしながら、今後の主流となるナノオーダーの極微細デバイスにおいては、Fig. 1 (a) に示すようにプラズマから放射される電子やイオンによる電荷蓄積や真空紫外光などの放射光による欠陥生成などのデバイス特性を劣化させるダメージがより深刻な問題になってくる¹⁻¹⁰⁾。ナノデバイスではわずかな欠陥でも大きくデバイス特性を左右するためである。これらの問題を解決する手段として、Fig. 1 (b) に示すような中性粒子ビーム技術が注目を集めている¹¹⁻¹³⁾。中性粒子ビームは荷電粒子や放射光の基板への入射を抑制し、運動エネルギーを持った中性粒子のみを照射できるので、ダメージフリーの高精度プロセスが可能であるとして期待されている。現在まで、プラズマを利用したもの、熱エ

ネルギーを利用したものなど多数の中性粒子ビームによるエッチング加工が報告されている。しかし、これらの中性粒子ビームではビーム密度が低く、またビームエネルギーが大きすぎる（プラズマを利用した場合）、あるいは低すぎる（熱エネルギーを利用した場合）という問題点があり、プロセスが限定される、あるいは実用性に乏しいという大きな問題を抱えていた。最近、これらの問題点を解決できる新しい中性粒子ビーム源が開発され、実用化が現実的になってきた。現在既に、最先端シリコンデバイスの製造において 2 nm 程度シリコン酸化膜が用いられており、原子層レベルの表面反応、欠陥生成などの制御が必要になってきていることから、いよいよ実用的な中性粒子ビームの出番である。本稿では、プラズマプロセスにおける深刻な問題、従来提案された中性粒子ビーム、そしてそれらの問題を解決するために私どもが開発した新しい中性粒子ビーム生成手法を紹介し、最近精力的に行われているナノプロセスへの応用について述べる。

E-mail: samukawa@ifs.tohoku.ac.jp

Fig. 1. Advantages of neutral beam etching in comparison with conventional plasma etching.

Table 1. Comparison of high energy particles in semiconductor fabrication technology.

Process	High Energy Particle	Energy (eV)	Radiation Flux (cm^{-2})	Damages
Ion Implantation	Ion	A few 10 k	$10^{10} \sim 10^{16}$	Defect Dislocation Degradation of Dielectric Film
EB Lithography	Electron	A few 10 k	10^{13}	Interface State Fixed Charge
Plasma Etching	Ion	20~1000	$10^{18} \sim 10^{19}$	Amorphous
	Fast Neutral Atom	20~1000	$10^{18} \sim 10^{19}$	Contamination
	Electron	<50	$10^{18} \sim 10^{19}$	Defect
	Photon (UV)	>5	$10^{14} \sim 10^{15}$	Interface State Degradation of Dielectric Film

2. プラズマプロセスの課題

超 LSI における配線が 100 nm を切る時代になり、プラズマから放射される電荷（イオン、電子）や光（紫外線）が加工特性やデバイス特性を大きく劣化させることが問題となっている。Table 1 にプラズマプロセスと高エネルギー粒子を用いる他の半導体プロセスとを、入射粒子種、エネルギー、照射量、発生する損傷の種類について比較してある¹⁴⁾。イオン打ち込みや電子ビーム描画に比べて、プラズマプロセスは入射粒子のエネルギーは比較的小さいが、照射量は 10^{19}cm^{-2} と著しく大きいのが特徴である。このため、基板表面に多量の損傷が発生する。

基板表面の微細パターンに蓄積する電荷は、パターン内へのイオンの入射を妨げてエッチング精度を劣化させ、また、ゲート絶縁膜の破壊などデバイス特性を大幅に低下させている。Fig. 2 にそのメカニズムを示す。基

板表面には電子が先に到達することによって生成されるイオンシースがある。このイオンシースでは正イオンは加速され異方性をもつ。一方、電子は減速されて熱運動となるため、電子はアスペクト比の高いパターン底部に到達することは難しい。そのため、パターン内では荷電分離が生じ、底部に多量の正電荷蓄積がおこる。その結果として、下地ゲート絶縁膜が破壊される。また、その正電荷により入射するイオンの起動が曲げられ、エッチングが途中で止まったり（エッチングストップ）、寸法シフトの大きなエッチングになるなどの問題が指摘されている。

プラズマから放射される紫外光も絶縁膜中や界面に欠陥を生じさせるため大きな問題になっている。光子は電荷を持たず運動量も小さいため純粋なエネルギー供給粒子と考えられる。紫外線光子のエネルギーが SiO_2 バンドギャップエネルギー (8.8 eV) より大きくなると（紫外線波長としては 140 nm 程度以下になると）、 SiO_2/Si

Fig. 2. Charge build-up problems in conventional plasma etching processes.

界面に正電荷が形成されることがわかっている。その形成率は $10^{-3} \sim 10^{-2}$ の程度である。紫外光によって界面に正電荷が形成される機構は、紫外光の吸収によって SiO_2 内に電子-正孔対が形成され、再結合を免れた正孔が SiO_2/Si 界面に到達して捕獲され正電荷が形成されると考えられる。絶縁膜として Si_3N_4 を使う場合にはバンドギャップが 5 eV 程度であるので、250 nm 程度の紫外光放射まで問題となってくる。これらの紫外光は現在使われているプラズマ生成条件においては十分に基板に放射されており、無視することはできない。実際に界面準位にきわめて敏感である固体撮像素子 (CCD, CMOS イメージセンサー) では、紫外光照射による界面準位上昇が画像劣化を引き起こし大きな問題となっている。また、これら紫外光は表面に欠陥を作ることによって表面反応にも大きく寄与している。つまり、紫外光による欠陥生成によりエッチング反応を促進するため選択性を劣化させる、あるいは薄膜堆積においては膜質を劣化させるという問題を引き起こしているものと推測される。そのため、

Fig. 3. Conventional neutral beam etching system.

原子層レベルの加工や表面処理を行う場合には、放射光の抑制制御が極めて重要である。さらに、紫外光照射に弱い生体超分子や有機分子、カーボンナノチューブなどの新しい物質を用いたデバイスにおける加工・堆積にも放射光の制御が重要であると考えられる。

このように、今後の革新的先端デバイスで求められる原子層レベルの加工・堆積プロセスには電荷や光の影響を抑えた中性粒子ビームが極めて重要な技術になると考えられる。

3. 中性粒子ビーム生成装置

中性粒子ビームエッチング装置は、1988年に日立中央研究所の水谷ら¹¹⁾や鈴木ら¹²⁾によって提案された。水谷らによって提案された中性粒子ビームは Fig. 3 に示すように、プラズマから正イオンを加速し、途中でガス分子と衝突させることで運動エネルギー (数百 eV 以上) を保ったまま電荷交換により中性化された中性粒子ビームを基板に照射するというものである。一方、鈴木らはプラズマを用いるのではなく熱エネルギー (1 eV 以下) 程度しかエネルギーを持たないホット分子ビームを提案した。このホット分子ビームは振動および並進エネルギーの励起されたハロゲン系分子ビームである。しかし、これらはそれぞれ大きな問題を抱えていた。水谷らの提案した中性粒子ビームは正イオンを加速してガス分子との電荷交換により中性化する方法が取られてきたが、この電荷交換を行うには数百 eV 以上のイオン加速エネルギーが必要であるばかりでなく、中性化効率もそれほど大きくはない。そのため結果として、低ビーム密度、高ビームエネルギーという問題点があり、エッチング速度が低い、あるいはエッチング選択性が低く実用性に乏しかった。鈴木らの提案したホット分子ビームは損傷が極めて小さいというメリットがあるものの、プラズマエッ

Fig. 4. Our newly developed neutral beam etching system.

チングの数百分の一という低エッチング速度であり、また、大面積化も難しいという大きな課題を抱えていた。

そこで、私どもは主に負イオンを中性化する方法を用いて中性粒子ビームを生成する方法を検討した。負イオンは正イオンに比べると弱いエネルギーで電子を離脱させることが容易であり、低エネルギーで高効率な中性粒子ビーム生成を実現できた。Fig. 4に私どもが開発した中性粒子ビーム生成装置の概要を示す¹⁵⁾。基本的に通常の誘導結合プラズマ源であり、その石英チェンバの上下にイオン加速用のカーボン電極が設置されている。

この平行平板電極に印加する直流電圧の極性により、正イオンあるいは負イオンを加速することができる。プラズマ放電としては連続放電およびパルス変調放電を用いることができるが、本装置では主に負イオンを用いて中性粒子ビームを生成させるために μ 秒オーダーパルス変調プラズマを用いた。ガスは上部電極からシャワー状に導入され、プラズマから加速されたイオンは下部電極に形成された径1mmで厚さ10mmのアパーチャーを通過する過程で中性化される。Fig. 5はSF₆パルス変調プラズマ（パルスON時間：50 μ 秒，パルスOFF時間：50 μ 秒）において生成された正負イオンを質量分析装置で測定した結果である。正イオンとしてはSF₃⁺，SF₂⁺，SF⁺，S⁺などが観察され、負イオンとしてはF⁻だけがはっきりと観察された。この時、正イオンおよび負イオンを加速し、下部電極アパーチャーを介した中性粒子ビームの中性化率をそれぞれカロリメータを使っ

て測定した結果をFig. 6に示した。正バイアスを上部電極に印加し下部電極は接地した場合には正イオンが加速され、中性化率は精々50~60%であるが、負バイアスを印加した場合には90%近い中性化率を示している。負イオンを用いることにより低エネルギー高効率F原子中性粒子ビーム生成が実現できた。このようにパルス変調プラズマを用いることでより効率の良い中性粒子ビームの生成が可能となり、本稿ではFおよびCl原子ビームを用いた極微細ゲート電極加工、量子ナノドット形成やN₂分子ビームを用いた超高精度な極薄ゲート酸化膜形成技術に関して紹介する。

4. 極微細ゲート電極エッチングへの応用

Fig. 7にSF₆/Cl₂混合ガスプラズマにより形成されたF/Cl混合原子ビームにより加工した50nmレベルのポリシリコンゲート電極エッチング形状を示す¹⁶⁾。加工精度を高めるためにエッチング速度を300Å/min程度に抑え、ビームエネルギーの制御により下地ゲート酸化膜に対しては100程度の選択性が得られている。このとき注目すべきはレジストに対する選択性も高く単層レジストでエッチング加工を実現できることである。通常のプラズマエッチングを用いた場合には紫外光などの照射によりレジストが硬化し、プロセス中に倒れたりするためにシリコン酸化膜のようなハードマスクが用いられる。中性粒子ビームは紫外光放射が抑制されているためにハードマスクは必要なく、その結果、よりシンプルで高精

(a)

(b)

Fig. 5. Residual ion species by (a) negative DC bias and (b) positive DC bias in neutral beam (SF_6 plasma).

度な加工が達成されている。このときにゲート酸化膜に対するダメージについてもアンテナ MOS キャパシタ (アンテナ比: 400~20000) を用いて検討を行った。Fig. 8 に照射後のゲート酸化膜リーク電流を通常の高密度プラズマによるエッチングと比較した結果を示す。MOS キャパシタにプラズマおよびビームを照射し、その時のゲートリーク電流を測定した。この結果より中性粒子ビームを用いたエッチングではアンテナ比依存性は若干あるものの低電界側のリーク電流がプラズマエッチングの場合に比べて一桁小さいことがわかった。電荷蓄積や紫外光放射の抑制により、よりダメージの少ないエッチングが実現されていることが実証された。このことは次世代ゲート絶縁膜を選択する上でも極めて重要なデータである。このプラズマ照射によるダメージを私どもが開発したセンサーにて定量的に測定した。Fig. 9 に示すように、シリコン酸化膜にプラズマおよび中性粒子ビームを照射し、シリコン酸化膜中に生成されるホール電流の測

Fig. 6. Neutralization efficiency of negative ions and positive ions in neutral beam (SF_6 plasma).

Fig. 7. High-performance 50 nm poly-Si etching profile using Low energy Cl/F neutral beam. KrF resist was used as the etching mask.

定を行った。この結果は SiO_2/Si 界面に生成される界面準位に対応していることは既にわかっており¹⁷⁾、この結果からプラズマに比較して中性粒子ビーム照射では殆どシリコン酸化膜中でホールの生成がないことがわかった。このように中性粒子ビームでは従来のプラズマで問題になる照射損傷を極限まで抑制することが可能であることがわかり、高誘電率ゲート絶縁膜の実用化段階におけるプロセス技術として今後、必要不可欠になると考えられる。

5. 極薄ゲート酸化膜形成への応用 (表面改質)

現在、ゲート絶縁膜のリーク電流の低減 (高誘電率化) やゲート電極からのボロン付きぬけを防止するねらいで 2 nm 以下のシリコン酸化膜中に窒素を導入するプラズマ窒化が注目を集めている。しかしながら、シリコン酸

Antenna MOS Capacitor (Tox: 5nm)

ICP Etching System

(HBr/Cl₂ Optimum Condition)

Neutral Beam Etching

(Cl₂/SF₆ RF bias Optimum Condition)

Fig. 8. Gate oxide leakage current after plasma and neutral beam etchings.

Schematic of Measurement System

Comparison of Hole Current

Fig. 9. On-wafer monitoring for measuring UV induced current (hole-electron pair) in SiO₂ film. Comparison between plasma radiation and neutral beam radiation.

化膜中の窒素濃度プロファイルの制御が難しく、特にシリコンとの界面に窒素が到達すると界面順位が発生して信頼性が低下することが問題となっている。また、プラズマからの電荷や放射光の照射は欠陥を生成し、やはりデバイス特性を劣化させる原因となる。そこで、私どもは中性窒素分子ビームによるシリコン酸化膜の形成を試みた¹⁸⁾。窒素プラズマ中では N_2^+ イオンの生成が主であり、負イオンの生成はない。この時 50 eV 以下のビームエネルギーでは N_2^+ イオンの中性化率は 90% 以上となっている。Fig. 10 に照射窒素中性粒子ビームのピー

Fig. 10. N depth profile in thin SiO_2 film as a function of beam energy using continuous wave neutral beam.

クエネルギーと 2 nm 厚シリコン酸化膜中での深さ方向の N 濃度プロファイルを実験的に求め、この結果より、 N_2 ビームエネルギーとして 3 eV 以上ないとシリコン酸化膜中に窒素が注入されないことがはじめてわかった。このことはプラズマ中の窒素ラジカルのような運動エネルギーを持っていない活性種では窒化は促進されず、窒化には運動エネルギーを持ったイオンや中性粒子が必要であることを示している。この窒化メカニズムをベースに Fig. 11 に示すパルス変調窒素分子ビームによる「間歇的な窒化」方法によりシリコン酸化膜中の窒素濃度プロファイル制御を試みた¹⁸⁾。パルス変調窒素プラズマを利用することで Fig. 11 に示すように注入されるビームエネルギーも時間変調され、プラズマ OFF 中にはピークエネルギーが 2 eV 以下のビームとなり、プラズマ ON 中にはピークエネルギーが 10 eV 以上のビームが注入される。つまり、プラズマ ON 中のみに窒素がシリコン酸化膜中に注入されることになり、間歇的な窒化が実現される。この時、ON 時間を 10 μ s まで短くするとシリコン酸化膜中の窒素濃度プロファイルはピーク濃度を低下させずに表面側に大幅にシフトすることがわかった。パルス変調窒素ビーム注入により表面温度上昇や欠陥生成が抑制されているために窒素の内部での拡散が抑制されているのではないかと推測している¹⁸⁾。つまり、シリコン酸化膜

Fig. 11. (a) Pulsed N_2 neutral beam injection method for control of N depth profile and (b) the actual N_2 neutral beam energy.

中での窒素の拡散は表面温度上昇や欠陥生成により促進されていることが予想され、その拡散は μ 秒オーダーの時定数で起きているものと想像できる。パルス変調窒素中性粒子ビームでは低エネルギービーム照射時に表面温度が低下し、窒素の拡散が抑制されるものと考えられる。結果として、Fig. 12に示すようにパルス変調窒素中性粒子ビームを用いることで窒素濃度プロファイル制御が実現でき、信頼性も大幅に向上した。

6. 量子ドットの形成

現在のシリコン LSI は既に 100 nm 以下の世代に突入し、2020 年までにはムーアの法則の破綻やトランジスタ動作の物理的限界に到達すると指摘されている。そういうなかで量子効果を利用した新しい原理のデバイスの

Fig. 12. N depth profile in thin SiO₂ film using continuous wave and pulsed neutral beams.

開発が進められている。このデバイスにおいては如何に精度良く損傷がなくナノ構造（ドット、ワイヤ）を形成するかが大きな鍵になっている。ナノドットの形成にはプラズマエッチングを用いたトップダウン方式と自己組織化を利用したボトムアップ方式の両面で検討が行われている。しかし、プラズマを用いたトップダウン加工ではマスク材料との選択性やイオンなどの活性粒子の入射方向性に問題があり、現在までの結果では精々 10 nm 程度の加工で限界であると考えられる。さらに、量子サイズのデバイスではプラズマからのイオン衝撃や紫外光照射による結晶欠陥などダメージが大きな問題となっている。一方、ボトムアップ方式では損傷などの問題は少ないものの、ナノドット配列や構造の均一性などの問題を抱えている。いずれにしても、精度の良いナノ構造の作製が今後のポイントとなる。

そこで、私どもは低エネルギーダメージフリープロセスが実現できる中性粒子ビームを用いたトップダウン加工による 10 nm 以下のナノドットの形成を検討した。数 nm ドットの加工マスクとしては、山下らが提案しているバイオナノプロセス¹⁹⁾を用いた。Fig. 13に示すように生体超分子（蛋白質）であるフェリチンは直径 13 nm で内部が 7 nm の空洞となっている。この空洞内部は負の電荷を帯びており、鉄イオンが溶けた溶液中にフェリチンを入れると鉄イオンがフェリチン内部に吸収され鉄コアを作る。この鉄コアの直径は 7 nm である。この鉄内包のフェリチンをシリコン基板上に 2 次元配

Fig. 13. (a) Structure of ferritin (protein) including iron core in the cavity and (b) Bio-nanoprocess for nanocolumn structure by using a ferritin iron-core mask.

列した上でUV オゾン処理で蛋白質を除去し、鉄コアだけを基板上に残してエッチングマスクとするプロセスである (Fig. 13)。ここで問題となるのは、フェリチン内部で形成された脆弱な鉄のコアがエッチングマスクとして耐性があるかということである。すでに、山下らによってフルオロカーボンプラズマによるエッチングが試みられているが、鉄がマスクとして十分な耐性がなく、また、プラズマエッチング中の電荷蓄積などで鉄が凝集し、パターンがくっついてしまうなどの問題があり、十分アスペクト比の高いパターンが実現できなかった。私も独自に塩素プラズマでも検討を行ったが、Fig. 14 (a) に示すようにやはり鉄コアの耐性がなく、エッチング形状は垂直ではなく丸まってしまっている。耐性がない理由は、プラズマから照射される紫外線により鉄コアが破壊されることにあると考えられる。そこで塩素を主体とした中性粒子ビームにより鉄コアをマスクにエッチングを試みた。Fig. 14 (b) に塩素中性粒子ビームによるエッチング形状を示す。鉄コアマスク通りに垂直な高アスペクト異方性加工が実現できており、世界で初めて

7 nm 径シリコンドットの形成に成功した²⁰⁾。XPS を用いて塩素プラズマおよび塩素中性粒子ビームによる鉄コアのエッチング速度を求め、シリコンとの選択性を算出した。塩素プラズマでは選択比はほとんどないが、中性粒子ビームでは90に近い選択性が得られていることがわかった。低エネルギーであると同時に紫外線などの放射もない塩素・中性粒子ビームで初めて鉄コアに対して高選択比が実現できたと考えられる。今後、バイオテクノロジーとナノテクノロジーの融合を考えると、生体超分子を破壊してしまう紫外光などの高エネルギー粒子を抑制して必要な活性種だけを低エネルギーで照射できる中性粒子ビームが極めて重要な技術となることが予想される。このように、プラズマで発生する電荷や紫外線を制御することで、従来ではありえない究極のトップダウン加工が実現できることを示した。今後はこのナノドットの結晶構造および結晶欠陥を解析した上で量子効果デバイスなどの新デバイスへの展開を促進していきたいと思う。

7. ま と め

ナノオーダーの次世代半導体デバイスあるいは将来のナノ構造を利用した新しいデバイスに必要な不可欠なダメージフリー高精度加工・表面改質として主に中性粒子ビームプロセスを紹介した。プラズマプロセスでは電荷蓄積や放射光の照射によるデバイス特性の劣化が大きな問題になっており、それらの問題解決に中性粒子ビームが極めて有効であり、且つ、原子層レベルの反応制御が実現できることがわかった。今後は新材料のエッチングや新しい機能薄膜材料堆積などの応用に展開し、新しい原理のデバイスにおいても中性粒子ビームの有効性が実証されていくことが期待される。

文 献

- 1) T. Nozawa and T. Kinoshita: Jpn. J. Appl. Phys. **34**, 2107 (1995).
- 2) T. Kinoshita, M. Hane and J.P. McVitte: J. Vac. Sci. Technol. B **14**, 560 (1996).
- 3) H. Ootera: Jpn. J. Appl. Phys. **33**, 6109 (1993).
- 4) H. Ohtake and S. Samukawa: Proc. 17 Dry Process Symp. (Institute of Electrical Engineering of Japan, Tokyo, 1995) p. 45.
- 5) K.P. Cheung and C.S. Pai: IEEE Device Lett. **16**, 220 (1995).
- 6) J-P. Carrere, J-C. Oberlin and M. Haond: Proc. Int. Symp. on Plasma Process-Induced Damage (AVS, Monterey, 2000) p. 164.
- 7) T. Dao and W. Wu: Proc. Int. Symp. on Plasma Process-

(a)

(b)

Fig. 14. Si etching profile with iron core mask using (a) conventional plasma and (b) neutral beam processes.

- Induced Damage (AVS, Monterey, 1996) p. 54.
- 8) M. Joshi, J.P. McVitte and K. Sarawat: Proc. Int. Symp. on Plasma Process-Induced Damage (AVS, Monterey, 2000) p. 157.
 - 9) C. Cismura, J.L. Shohet and J.P. McVitte: Proc. Int. Symp. on Plasma Process-Induced Damage (AVS, Monterey, 1999) p. 192.
 - 10) J.R. Woodworth, M.G. Blain, R.L. Jarecki, T.W. Hamilton and B.P. Aragon: J. Vac. Sci. Technol. A **17**, 3209 (1999).
 - 11) T. Mizutani and S. Nishimatsu: J. Vac. Sci. Technol. A **6**, 1417 (1988).
 - 12) 鈴木敬三：応用物理 **57**, 1721 (1988).
 - 13) F. Shimokawa: J. Vac. Sci. Technol. A **10**, 1352 (1992).
 - 14) 徳山 巍：“半導体ドライエッチング技術”(産業図書, 1992).
 - 15) S. Samukawa, K. Sakamoto and K. Ichiki: J. Vac. Sci. Technol. A **20**, 1566 (2002).
 - 16) S. Noda, H. Nishimori, T. Ida, T. Arikado, K. Ichiki and S. Samukawa: Extended Abstracts of International Conference on Solid State Devices and Materials (Tokyo, 2003) p. 472.
 - 17) S. Samukawa, Y. Ishikawa, S. Kumagai and M. Okigawa: Jpn. J. Appl. Phys. **40**, L 1346 (2001).
 - 18) S. Samukawa, Y. Minemura and S. Fukuda: Jpn. J. Appl. Phys. **42**, L 795 (2003).
 - 19) 山下一郎：応用物理 **71**, 1014 (2002).
 - 20) T. Kubota, T. Baba, H. Kawashima, Y. Uraoka, T. Fuyuki, I. Yamashita and S. Samukawa: Appl. Phys. Lett. **84**, 9 (2004).