

高密度パターンドメディア用磁性微粒子アレイの作製

Fabrication of a Magnetic Block Array for High-Density Patterned Media

甲野藤 真^{*,**}・川越 毅^{*}・小池 和幸^{*,**,*}・平山 義幸^{***}・棚橋 究^{***}松山 秀生^{***}・金村 崇^{****}・北上 修^{*****}・島田 寛^{*****}^{*}産業技術総合研究所つくば中央第4事業所 アトムテクノロジー研究体, つくば市東 1-1-1 (〒305-0046)^{**}産業技術総合研究所 強相関電子技術研究センター, つくば市東 1-1-1 (〒305-0046)^{***}日立製作所中央研究所, 東京都国分寺市東恋ヶ窪 1-280 (〒185-8601)^{****}日立サイエンスシステムズ, 東京都八王子市小宮町 260-1 (〒192-0031)^{*****}東北大学多元物質科学研究所, 宮城県仙台市青葉区片平二丁目 1-1 (〒980-8577)M. Konoto^{*,**}, T. Kawagoe^{*}, K. Koike^{*,**,*},Y. Hirayama^{***}, K. Tanahashi^{***}, H. Matsuyama^{***},T. Kanemura^{****}, O. Kitakami^{*****} and Y. Shimada^{*****}^{*}Joint Research Laboratory for Atom Technology (JRCAT), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba Central 4, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-0046^{**}Correlated Electron Research Center (CERC), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-0046^{***}Central Research Laboratory, Hitachi Ltd., 1-280 Higashikoigakubo, Kokubunji, Tokyo 185-8601^{****}Hitachi Science Systems, Ltd., 260-1 Komiya, Hachioji, Tokyo 184-0002^{*****}Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku Univ., 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, 980-8577

We fabricated magnetic rectangular block arrays of 130 and 260 Gblock/in² by using focused ion beam lithography. The ratios R of the total block area to the array area are 0.73 and 0.64, respectively. The magnetic domain boundaries of the arrays run along the grooves between the blocks. Each block has a single domain structure and perpendicular magnetic anisotropy. The patterning increased the squareness from 0.2 of the continuous film to 0.87 of the array with 130 Gblock/in². Application of the block arrays to high-density patterned magnetic recording media is discussed.

Key words: magnetic dot array, patterned media, FIB, perpendicular magnetic recording

1. はじめに

記録密度の増加に伴い、連続磁性膜を用いる現行の記録媒体において、熱ゆらぎによる記録状態の劣化の問題が顕在化しつつある。更なる高密度化の推進のため、磁性微粒子を規則正しく配列したアレイを磁気記録媒体として用いるパターンドメディア^{1), 2)}が提案されている。この記録方式では、1個の磁性粒子に1bitの情報を記録することから、各粒子が単磁区構造を形成し、粒子の磁化容易軸の方向がアレイ内部で統一されていることが必要である。パターンドメディアへの応用を目的とした磁性微粒子アレイは、電子ビーム(EB)^{3), 4)}、光干渉^{5)~8)}、X線^{9), 10)}、走査型プローブ顕微鏡^{11)~14)}、収束イオンビーム(FIB)¹⁵⁾など、様々なリソグラフィ法を用いて作製が試みられている。これまでに 65 Gdot/in²

の密度を有するアレイの作製なども報告されているが、これらのアレイに共通する特徴として、磁性粒子によって占められる面積がアレイの全面積に対して小さいことが挙げられる。アレイを磁気記録媒体として用いる場合には、磁性粒子が占める面積のアレイ面積に対する比 R が大きいほど有利だと考えられる。この場合、パターンの周期長を一定とすると、粒子の体積が大きくなり、磁化の熱揺らぎが低減され、信号出力が大きくなる。また、磁性粒子の面積が一定の場合には、粒子がアレイ内に密に配列され、記録密度が増大する。そこで本研究では、高密度パターンドメディアへの応用を念頭に置き、金属に対してはEBリソグラフィーより微細加工が容易なFIBリソグラフィーを用いて、垂直磁気異方性を有する連続磁性膜を矩形ブロック状の粒子に加工するという方法で、 R が大きな磁性微粒子アレイの作製を試みた。

2. 実験方法

加工に用いた連続磁性膜はスパッタリング法により Si 基板上に作製した。膜構成は Si/Ti₅₀Cr₁₀ 30 nm/CosCr₃₅ 20 nm/Co₇Cr₁₉Pt₁₀ 50 nm であった。パターンドメディアでは、磁性微粒子内が単磁区であることが必要であることから、連続膜作製時の基板温度は室温として、磁性結晶粒界へのCrの偏析を抑制し、磁性結晶粒間の交換結合を維持した。この連続膜に、FIB描画装置(日立 FB-2000A, SII SMI-2200)によってGaイオンを照射して格子状の溝を形成し、磁性微粒子によるアレイを作製した。イオンビームの直径は約 10 nm、エネルギーは 30 keV、電流は 0.15~0.7 pA、描画速度は 100 nm/sec であった。連続膜とア

レイの幾何学的構造と磁気特性は、SEM (日立 S-5000), AFM / MFM (Digital Instruments NanoScopeIII), VSM を用いて測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 連続媒体の膜組織と磁気特性

Fig. 1 には、連続磁気記録媒体の膜面に対して平行および垂直な方向に磁界を印加した場合の磁化曲線を示す。磁化が飽和に達する磁界は、垂直方向に磁界を印加した場合が約 3 kOe、水平方向に印加した場合が約 9 kOe であり、この連続媒体が垂直磁気異方性を有することがわかる。また、垂直方向に磁界を印加した場合の磁化曲線から求めた角型比は 0.2 である。

Fig. 2 は連続媒体表面の AFM 像(a)と MFM 像(b)である。Fig. 2 (a)から磁性粒子の平均粒径は約 30 nm であることがわかる。また、Fig. 2 (b)に見られるメイズパターンは連続媒体の垂直磁気異方性を反映したものである。

3.2 FIB リソグラフィにより加工された帯状パターンの磁気特性

Fig. 3(a), (b)は、FIB リソグラフィによって、連続媒体に縦方向の溝を平行に複数形成した場合の AFM 像(a)および MFM 像(b)である。溝幅は約 15 nm、溝の周期は約 85 nm であった。溝幅が非常に狭いため、AFM を用いたとしても溝の深部までの正確な形状を決定することは困難ではあるが、AFM の断面プロファイルから求めた溝の深さは約 3 nm であった。Fig. 3(b)には縦方向に長い磁区が多数見受けられ、Fig. 2(b)に示された連続媒体のメイズパターンとは明らかに異なることがわかる。Fig. 3(a)に見られる溝に沿って磁区の境界が形成されているが、溝によって区切られた帯状領域の途中にも磁壁が存在し、1本の帯状領域が複数の磁区に分割されていることがわかる。Fig. 3(c), (d)には溝をより深く形成した場合の AFM 像(c)および MFM 像(d)を示す。溝幅は約 15 nm、溝の周期は約 100 nm であった。AFM の断面プロファイルから求めた溝の深さは約 6 nm であった。Fig. 3 (d)には、Fig. 3(c)に見られる溝によって区切られた縦方向に細長い磁区が見られる。Fig. 3(b)と異なるのは、帯状領域の途中に磁壁は存在せず、1本の帯状領域が単磁区構造をとっている点である。両者の相違の原因として、溝の深さによってブロック間の磁気的相互作用が変化していることが考えられる。いずれの媒体も静

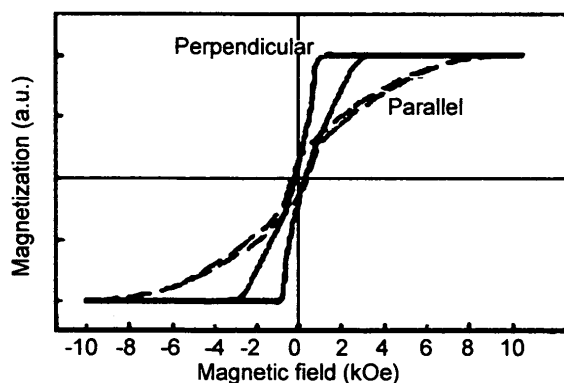


Fig. 1 Magnetization curves of a continuous magnetic recording film.

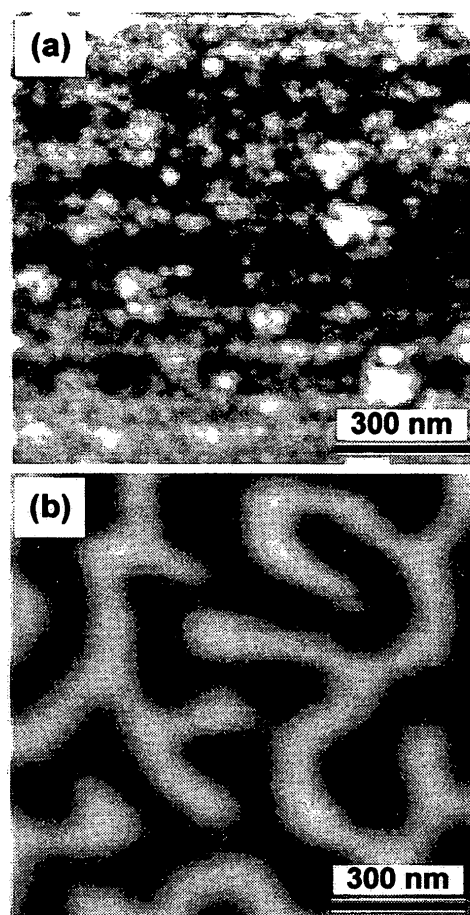


Fig. 2 (a) AFM and (b) MFM images of a continuous magnetic recording film.

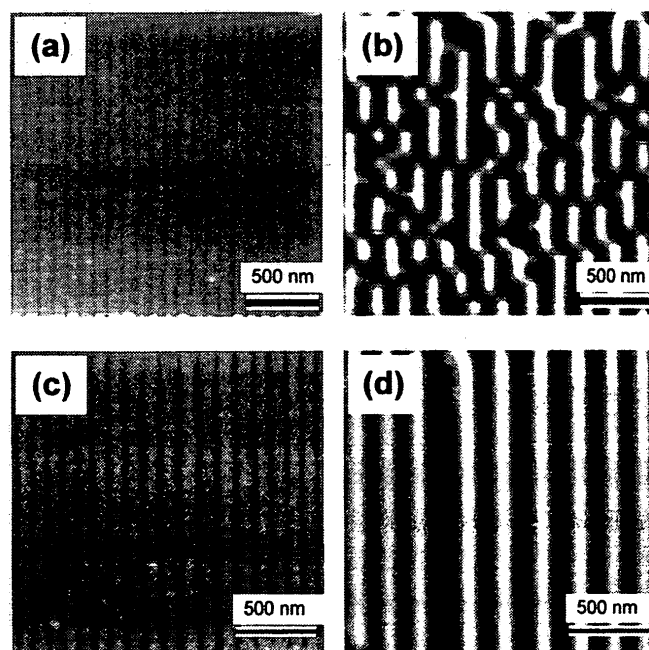


Fig. 3 (a) AFM and (b) MFM images of the film with shallow grooves fabricated by focused ion beam lithography. (c) AFM and (d) MFM images of the film with deep grooves.

磁気的相互作用エネルギーを減少させるため多磁区構造をとるが、溝を深く形成した方の媒体は、溝部分を境界として磁区を構成すれば磁壁エネルギーが大きく低減され、より安定な磁化状態が実現すると考えられる。一方、溝が浅い方の媒体では、磁性層の深部において帯状領域間に磁壁が形成され、磁壁エネルギーの減少分が小さいものと推察される。そのため、静磁気的相互作用エネルギーの低減によって安定化する必要があり、ラインの途中に磁壁を作ることで、より微細な磁区を構成していると考えられる。以上の結果から、FIB リソグラフィーを用いて、連続膜に十分な深さで溝を形成すれば、溝によって区切られた部分を単磁区とするパターンが形成可能であると考えられる。

3.3 磁性ブロックアレイの構造と磁気特性

Fig. 4 はパターンの設計周期を 70 nm として、FIB リソグラフィーを用いて作製した磁性微粒子アレイの SEM 像である。連続膜は矩形状のブロックによるアレイに加工されていることがわかる。作製されたアレイの周期には、FIB 装置の不安定性に起因する不均一性が見られ、その範囲は 57~80 nm であった。平均周期は約 70 nm であり、ブロックの密度は約 130 ギガブロック/平方インチ (Gblock/in²) である。ブロック間の溝幅は約 10 nm であることから、ブロックの一辺の長さは平均 60 nm となり、ブロックのアレイに対する面積占有率 R は 0.73 となる。密度が数十 Gdot/in² クラスの一般的なアレイの R 値は 0.3~0.4 程度であり^{1),4),6),8),10~14)}、本アレイの R 値はその約 2 倍の大きさであることがわかる。

Fig. 5(a), (b) は、交流消磁を施したアレイについて、同一の場所を同時に観察した AFM 像(a)および MFM 像(b)である。縦方向に走る溝にうねりが見えるのは、観察装置の不安定性によるものである。Fig. 5(c) は Fig. 5(a) に示されたブロック間の溝部分と Fig. 5(b) を重ね合わせた図である。Fig. 5(a) にみられる矩形の磁性微粒子は、Fig. 5(b) では黒もしくは白の矩形像として観察され、その内部にコントラストは存在しないことから、各ブロックは垂直磁気異方性を有し、単磁区構造をとることがわかる。前述のように、磁性結晶粒の平均粒径は 30 nm であったことから、ブロックの内部には複数の結晶粒が存在することになる。結晶粒界への非磁性 Cr の偏析を抑制する目的で、連続媒体の作製は室温で行っている

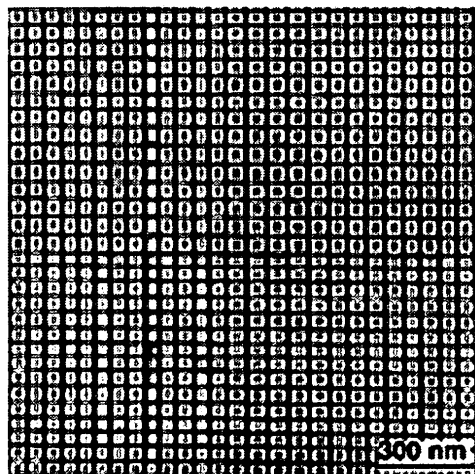


Fig. 4 SEM image of a magnetic block array fabricated by focused ion beam lithography.

が、ブロック内部が単磁区であることから、内部の結晶粒同士は強く交換結合しており、設計通り 1 ブロックが 1 ビットに対応するアレイが作製されたことがわかる。

Fig. 6 はアレイ内部の磁化を飽和させるために十分な 3000 Oe の磁界をアレイ面に垂直に印加した後、残留磁化状態で測定したアレイの MFM 像である。黒い矩形像が印加磁界を除いた後も磁化の反転が起きなかったブロックを示している。反転が起きなかったブロック数の全ブロック数に対する比としてアレイの角型比を求めると 0.87 となる。磁化曲線から求めた連続膜の角型比が 0.2 であったことから、連続膜をアレイに加工することによって角型比が約 4.5 倍に増大したことがわかる。このような角型比の増大はこれまでも報告されている^{6),16)}。パターン化による角型比増大の主な原因としては、連続膜がブロック状に加工されることによる反磁界の減少、形成された溝がピンニングサイトとなることによる磁壁移動の抑制などが考えられる。本研究では角型比が 0.2 と小さい連続膜を加工したが、加工前の状態でより大きな角型比

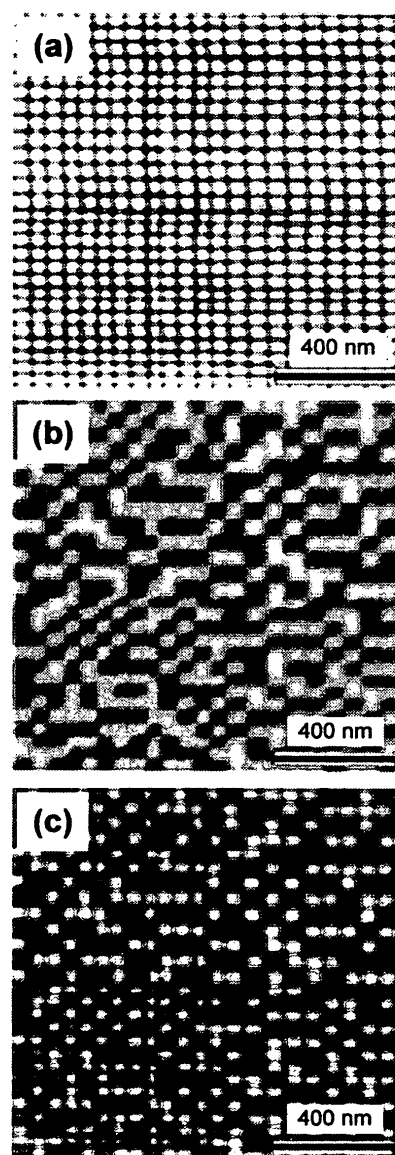


Fig. 5 (a) AFM and (b) MFM images of an ac-erased magnetic block array. (c) Superposition of the grooves seen in (a) and (b).

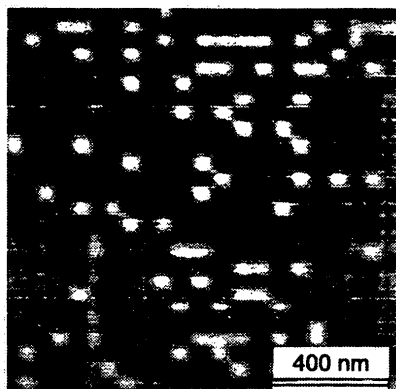


Fig. 6 MFM image of a magnetic block array in a remanent state.

を有する連続膜を用いれば、パターン化に伴う角型比の増加により、角型比1のアレイを作製することも十分可能であると予想される。

Fig. 7は、パターン設計周期を50 nmとし、FIBリソグラフィを用いて作製した磁性微粒子アレイについて、同一の場所を同時に観察したAFM像(a)およびMFM像(b)である。観察前に消磁は特に施されていない。アレイの平均周期は50 nmで、密度は約260 Gblock / in²である。溝幅は約10 nmであり、ブロックの一边の長さは平均40 nmとなる。 R 値は0.64となり、周期長70 nmのアレイと比較して減少はするが、一般的なアレイに比較して大きな値を保っている。Fig. 7(b)に見られるアレイの磁区構造は、Fig. 2(b)の連続媒体のMFM像に見られるメイズパターンとは明らかに異なるが、Fig. 5(b)に見られたような市松模様にはなっていない。これは、形成された溝の深さが十分ではなく、ブロック単位の微細な磁区構造をとると、大きな磁壁エネルギーが発生してしまうためと推察される。Fig. 7(c)には、ブロックの配置と磁区の境界との関係を検討するために、Fig. 7(a)および(b)を重ね合わせた図を示す。MFMの分解能が十分高くないことから確定的なことは言えないが、Fig. 7(c)から判断すると、磁区の境界はブロック間の溝の部分に沿っていると思われる。このアレイに1ブロックごとの記録が可能であるかは現時点で不明であるが、溝をより深く形成し、磁壁エネルギーを減少させることによって、確実な記録が期待できる。

4. まとめ

高密度パターンドメディアへの応用を目的とし、FIBリソグラフィによって、垂直磁気記録用の連続媒体に格子状の溝を形成するという方法で、矩形ブロックによるアレイを作製した。設計周期70 nmのアレイはブロック密度が約130 Gblock/in²となり、ブロックのアレイに対する面積占有率 R は0.73であった。設計周期50 nmのアレイでは、ブロック密度は約260 Gblock/in²であり、 R 値は0.64であった。いずれのアレイの R 値も、一般的な高密度アレイの値に比較して約2倍の大きさであった。ブロックの内部は単磁区で、それぞれ垂直磁気異方性を有していた。130 Gblock/in²のアレイでは、残留磁化状態での角型比は0.87であり、連続膜の値に比較して約4倍に増加し

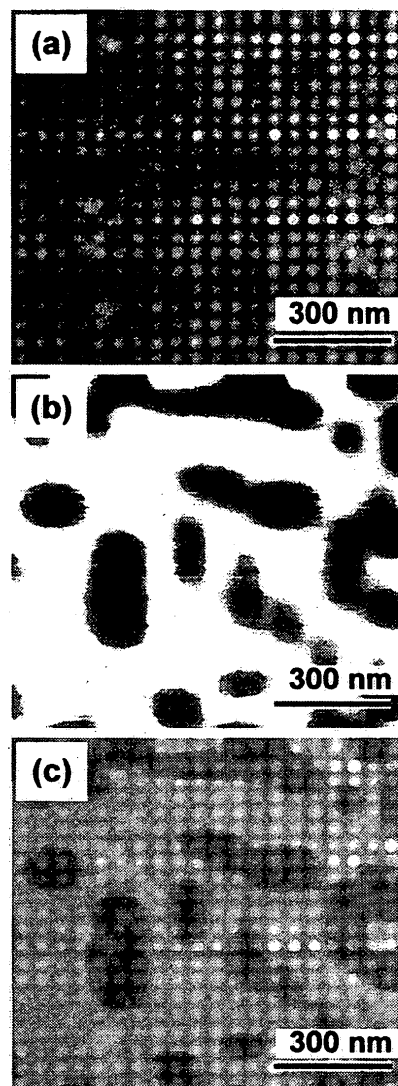


Fig. 7 (a) AFM and (b) MFM images of a magnetic block array. The array was not demagnetized. (c) Superposition of (a) and (b).

た。

謝辞 本研究は、未来開拓学術研究推進事業 (No 97R144701) および新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の援助のもとに行われた。

文 献

- 1) R. H. New, R.F.W. Pease, and R.L. White: *J. Vac. Sci. Technol. B* 12, 3196 (1994).
- 2) S. Y. Chou, M.S. Wei, P.R. Krauss and P.B. Fischer: *J. Appl. Phys.* 76 6673 (1994).
- 3) R. O'Barr, S.Y. Yamamoto, S. Schults, W. Xu, and A. Scherer: *J. Appl. Phys.* 81 4730 (1997).
- 4) J.P. Spallas, R.D. Boyd, J.A. Britten, A. Fernandez, A.M. Hawryluk, M.D. Perry, and D.R. Kania: *J. Vac. Sci. Technol. B* 14, 2005 (1996).
- 5) M. Thielen, S. Kirsh, H. Weinforth, A. Carl, and E.F. Wassermann: *IEEE Trans. Magn.* 34 1009 (1998).
- 6) M.A.M. Haast, J.R. Schuurhuis, L. Abelman, J.C. Lodder, and T.J. Popma: *IEEE Trans. Magn.* 34, 1006 (1998).
- 7) M. Farhoud, M. Hwang, H.I. Smith, M.L. Schattenburg,

- J.M.Bae, K.Youcef-Toumi and C.A.Ross: *IEEE Trans. Magn.* **34**, 1087 (1998).
- 8) M. Hwang et al.: *J. Appl. Phys.* **87** 5108 (2000).
- 9) F.Rousseaux, D.Decanini, F.Carcenac, E.Cambril, M.F.Ravet, C.Chappert, N.Bardou, B.Bartenlian, and P.Veillet: *J. Vac. Sci. Technol. B* **13**, 1287 (1995).
- 10) N.Bardou, B.Bartenlian, C.Chappert, R.Megy, P.Veillet, J.P.Lenard, F.Rousseaux, M.F.Ravet, J.P.Jamet, and P.Meyer: *J. Appl. Phys.* **79** 5848 (1996).
- 11) A.D.Kent, T.M.Shaw, S.von Molnar, and D.D.Awschalom: *Science* **262**, 1249 (1993).
- 12) S.Gider, J.Shi, D.D.Awschalom, P.F.Hopkins, K.L.Campman, A.C.Gossard, A.D.Kent, and S.von molnar: *Appl. Phys. Lett.* **69**, 3269 (1996).
- 13) S.Wirth, J.J.Heremans, S.von molnar, M.Field, K.L.Campman, A.C.Gossard, and D.D.Awschalom: *IEEE Trans. Magn.* **34**, 1105 (1998).
- 14) K.Bessho, Y.Iwasaki, and S.Hashimoto: *J. Appl. Phys.* **79** 5057 (1996).
- 15) X.Lin, J.-G.Zhu, and W.Messner: *J. Appl. Phys.* **87** 5117 (2000).
- 16) C. Haginoya S.Heike M.Ishibashi, K.Nakamura, K.Koike, T.Yoshimura, J.Yamamoto, Y.Hirayama: *J. Appl. Phys.* **85** 8327 (1999).

2001 年 10 月 6 日受理, 2002 年 1 月 17 日採録