Ba-ferrite Particulate Media for Linear Tape System

O. Shimizu, T. Harasawa, R. Suzuki, H. Suzuki, N. Yamazaki, A. Musha,
Y. Murata, M. Sueki, T. Nishida, and H. Noguchi

Recording Media Research Laboratories,
FUJIFILM Corporation, 2-12-1 Ohgi-cho Odawara, Kanagawa 250-0001, Japan

Two types of Ba-ferrite particulate media used in technical demonstrations that achieved 6.7 Gbit/in² in 2007 and 29.5 Gbit/in² in 2010 were compared by focusing on differences in their magnetic particle properties and tape characteristics. The results revealed that the difference in SNR between these two media could be explained by the difference in the particle volume and the orientation of the easy axis. The difference in the surface profile of these two media affected their frictional and stictional behavior without affecting their read/write characteristics in the short wavelength region. The long-term chemical stability of Ba-ferrite particulate media was also investigated using a Battelle Class II environment. The results indicated that Ba-ferrite particulate media have superior resistance to chemical corrosion compared to conventional metal particulate media.

Key words: magnetic recording, Ba-Ferrite, particulate media, linear tape system

Ba-ferrite 磁性体を用いたリニアテープシステム用塗布型媒体

清水 治・原沢 建・鈴木涼太・鈴木宏幸・山崎信夫・

武者敦史・村田悠人・居樹 実・西田徹二・野口 仁

富士フイルム(株) 記録メディア研究所, 神奈川県小田原市扇町 2-12-1 (〒250-0001)

1. はじめに

世界のデジタルデータ量はとどまることなく増え続けている。International Data Corporation (IDC) によれば、2009 年は世界的な不況であったにもかかわらず年率にして 62%もの増加を示し、ついに 800 Exa Byte (10¹⁸ byte)に達した。また、今後もとどまることなく 2020 年には 35 Zetta Byte (10²¹ byte) に達する見込みとのことである¹⁾。このように増え続ける情報の保存媒体として、安価であること、長期保存に対する信頼性が高いこと、などの点で磁気テープが選択されており、必然的に高密度化への要求は高い。この要求に応えるべく、これまで、さまざまな研究が行われている^{2)~6)}。このような中で、最近までリニアテープシステムは、年率 40 %、ほぼ 2 年で 2 倍のペースで容量増加を続けてきた。この記録密度向上は、主にメタル磁性体の微細化によって達成されている。しかし、近年この記録密度上昇トレンドに鈍化の傾向が現れてきている。これは、メタル磁性体における保磁力の発現が、その針状形状に由来しており、微細化が進むにつれて磁気特性を維持することが困難になってきていることが一つの理由である。これを克服する手段としては結晶磁気異方性を、その保磁力の起源とする粒子の採用が考えられ、Ba-ferrite(以下 BeFe)は適切な結晶磁気異方性を持つ粒子として古くから研究されている^{17), 18)}。

Fig. 1 に面記録密度に関するハードディスクとリニアテープシステムの製品ベースでのトレンド及びリニアテープシステムでの技術デモンストレーションでのトレンドを示す。リニアテープシステムの製品ベースでの記録密度上昇が鈍化しているのとは対照的に、その技術デモンストレーションにおける面記録密度上昇はむしろ、従来の製品ベースでの上昇トレンドさえも凌駕する傾向を示している。Fig. 1 中に示す Demo A⁹⁾ 及び Demo B¹⁰⁾はいずれも BaFe 磁性体を用いた塗布型媒体で実現されたもので、それぞ

Fig. 1 Areal density trends in linear tape systems and hard disk drives. Open circles: Linear tape system products. Solid circles: Technical demonstration of linear tape systems. Triangles: Hard disk drive products.

れ 6.7 Gbit/in² 及び 29.5 Gbit/in² の面記録密度達成を示したものである(以下 Demo A のシステムを System A, Demo B のシステムを System B と記す)。これらは、リニアテープシステムとしての走行マージン(トラッキング位置再現性)の実測結果も踏まえた検討

Table 1 Comparison of operating points between Systems A and B.

	System A	System B	ratio
Linear density [kBPI]	400	518	1.3
Track density [kTPI]	17	57	3.4
Reader width [μm]	0.5	0.2	1/2.5
Track margin [μm]	1.0	0.25	1/4
Areal density [Gbit/in ²]	6.7	29.5	4.4
Channel	32-state DD-NPML	16-state DD-NPML	—

結果であり、BaFe 磁性体を用いた記録媒体の高記録容量化への実用的完成度の高さを示したものである。本報告では、これら2つの報告で用いられた媒体の差異と両者の性能の関係を明確にし、今後の媒体開発の指針とすると共に、併せて BaFe 媒体の長期保存に対する化学的安定性についての評価結果を報告する。

2. System A と System B の比較

2.1 オペレーティングポイント

Table 1 に System A (6.7 Gbit/in²) 及び System B (29.5 Gbit/in²) 両者のオペレーティングポイント比較の一覧を示す。

System A では、線記録密度 400 kBPI、トラック密度 17 kTPI で 6.7 Gbit/in² を達成していたが、System B では線記録密度で 1.3 倍の 518 kBPI、トラック密度で 3.4 倍の 57 kTPI を実現し、面記録密度として 4.4 倍の 29.5 Gbit/in² を達成している。この、トラック密度の向上には、電磁変換特性の向上に伴う再生トラック幅の低減のみではなく、トラックマージンの低減効果(1/4)の寄与も大きい。電磁変換特性の向上による分は、線記録密度 1.3 倍と再生トラック幅 1/2.5 即ち、記録ビットサイズで 1/3.25 である。

Fig. 2 に、ループテストを用いて、摺動速度 4.1 m/s、再生トラック幅 0.5 μm 、シールド間距離 0.12 μm の GMR ヘッドで測定した Tape A 及び Tape B の SNR の線記録密度依存性を示す。この測定における、アンプノイズ及びヘッドノイズは十分に小さく、ここで示すものは媒体の SNR とみなして良い。線記録密度 259 kFCI (518 kBPI に対応) における両媒体の SNR 差は約 3.5 dB である。記録ビットサイズ 1/3.25 の達成はこの媒体性能差 3.5 dB

Table 2 Comparison between Particles A and B. Volumes were obtained from TEM observations and magnetic properties were measured by VSM.

	Particle A	Particle B
Volume, V [nm ³]	2100	1600
Coercivity, H _c [kA/m]	183	207
σ_s [Am ² /kg]	52	48

Fig. 2 Dependence of SNR on linear density for Tape A used in 6.7-Gbit/in² demonstration (dashed line) and Tape B used in 29.5-Gbit/in² demonstration (solid line).

とヘッド性能の向上の結果達成したものである。厳密には、System A で用いた channel が 32-state DD-NPML (data-dependent noise-predictive, maximum-likelihood)検出であったが、System B で用いた channel は、実装上より現実的な 16-state DD-NPML である。この channel の差も System B の電磁変換特性向上によって補われていると考えられる。ここで、もし必要なトラックマージンの低減がなく、System A と System B で同一であり、System B でも 1 μm のトラックマージンが必要であると仮定すると、System B で達成できるトラックピッチは、System B の再生トラック幅の 0.2 μm と System A のトラックマージン 1.0 μm の和の 1.2 μm (21 kTPI)であり、達成しうる面記録密度は高々 11 Gbit/in² 程度になってしまう。このトラックマージンの改善は、トラッキングを行うアクチュエータの高性能化の寄与もあるが、媒体とヘッドの走行性改善による効果も非常に大きい。

2.2 磁性体

System A で用いられた BaFe 磁性体 Particle A と System B で用いられた BaFe 磁性体 Particle B の比較を Table 2 に示す。体積 V は透過型電子顕微鏡(TEM)観察結果から板径 D と板厚 t を測定し、六角板状と仮定して、

$$V = \frac{3\sqrt{3}}{8} D^2 t \quad (1)$$

から計算したものである。また、保磁力 H_c と磁化量 σ_s は VSM によって測定した値である。Particle A の平均体積が 2100 nm³ であるのに対して、Particle B は SNR 向上を目的に微細化しており、Particle A の 76 %, 即ち 1600 nm³ に低減している。筆者らは、

Table 3 Comparison of magnetic properties between Tapes A and B.

	Tape A	Tape B
Perpendicular direction		
Coercivity H_{CP} [kA/m]	215	231
Squareness ratio SQ_P	0.69	0.86
Longitudinal direction		
Coercivity H_{CL} [kA/m]	159	119
Squareness ratio SQ_L	0.39	0.22
$SQ_P - SQ_L$	0.30	0.64

1500 nm³から 2200 nm³の各種体積の BaFe 磁性体粒子を用いて同一条件下で、テープを作成し体積と SNR の関係を調査した¹²⁾。その結果は、粒子性ノイズを前提とした理論値

$$SNR \propto 10 \log(1/V) \quad (2)$$

とよく対応していた。即ち、今回の Particle A から Particle B へと磁性体の体積を 76 % 減少させることによる SNR 向上は 1.2 dB 程度と推定される。

2.3 配向

System A で用いられた媒体 Tape A と System B で用いられた媒体 Tape B の比較を Table 3 に示す。Tape B はテープ製造の乾燥工程で垂直磁界を印加し配向制御を行ったため、垂直方向の角型比 SQ_P が 0.86 に達し、逆に長手方向の角型比 SQ_L は 0.22 まで低下している。一方、Tape A では製造時において特に積極的制御は行わなかったが、若干垂直方向の角型比が長手方向の角型比よりも大きくなっている。これは、粒子の形状(板状)の影響で、塗布によって垂直方向に配列しやすくなった効果と考えられる。両者の TEM 断面図を Fig. 3 に示す。Tape A は粒子の向きがほとんどランダムなのに対して、Tape B は、多くの粒子で板面が摺動面と平行に配列し、その結果、粒子の横断面のみが観察されており、容易軸(板面に垂直方向)が垂直方向に配向しているのがわかる。BaFe 媒体をモデル化し、配向のみを変化させた場合の SNR の変化をマイクロマグネティックシミュレーションにより計算した。モデルの詳細は文献¹³⁾を参照されたい。結果を Fig. 4 に示す。横軸は、垂直配向の程度を表すパラメータとして、垂直方向の角型比 SQ_P と長手方向の角型比 SQ_L の差 ($SQ_P - SQ_L$) を取り、縦軸に SNR のシミュレーション結果をプロットしたものである。Table 3 に示す通り、Tape A は $SQ_P - SQ_L = 0.30$ であり、Tape B は $SQ_P - SQ_L = 0.64$ である。このシミュレーション結果より、この配向差によって得られた SNR の向上は +2 dB 程度と推定される。

2.4 表面性及び摺動性能

Tape A 及び Tape B の表面形状を光干渉型表面形状粗さ計 (Optical Interferometric Profiler : OIP) と原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope : AFM) によって測定した平均表面粗さ Ra と十

Fig. 3 Cross-sectional TEM image of Tape A (unoriented) and Tape B (perpendicularly oriented).

Fig. 4 Dependence of simulated SNR on orientation. SQ_P and SQ_L correspond to squareness ratios in perpendicular and longitudinal directions.

Table 4 Surface roughness measured with optical interferometric profiler (OIP) and atomic force microscope (AFM).

	Tape A	Tape B
Optical interferometric profiler		
Ra [nm]	2.1	0.7
Rz [nm]	23	7
Atomic force microscope		
Ra [nm]	2.0	2.1
Rz [nm]	39	32

Fig. 5 Surface profiles measured with optical interferometric profiler in area of $180\ \mu\text{m} \times 240\ \mu\text{m}$.

Fig. 6 Surface profiles measured with atomic force microscope in area of $40\ \mu\text{m} \times 40\ \mu\text{m}$.

Fig. 7 Frictional coefficient measured with AITiC at speed of $14\ \text{mm/s}$ and back tension of $0.98\ \text{N}$. Figures are plotted from 50 to 100 reciprocatory motions. Six stiction events were observed at points indicated in Tape A figure.

点平均粗さ R_z を Table 4 に、またそれぞれのプロファイルを Fig. 5 及び Fig. 6 に示す。OIP による測定は、 $180\ \mu\text{m} \times 240\ \mu\text{m}$ の比較的大きな面積を測定したもので、広い領域のウネリを表すものであるが、サブミクロン以下の分解能は無いため、小さな突起は測定されていない。一方 AFM による測定は $40\ \mu\text{m} \times 40\ \mu\text{m}$ の領域を測定したもので、微小突起が測定可能であるが大きな広い領域での変化は測定できない。Table 4 の数字で比較すると、OIP の

測定結果からは Tape B に比較して Tape A の粗さが目立つ結果となっているが、AFM の結果は同等の R_a となっている。これに対応し、Fig. 5 の OIP プロファイルは、Tape B の平滑さが際立つ結果となっている一方で、Fig. 6 の AFM プロファイルを見ると、Tape A と比較して、Tape B は、非常に多数の微小突起によって粗面化されていることが分かる。即ち、Tape B はウネリの無い面にと多くの微小突起が形成されており、この面形状によって、

Table 5 Test condition for gas environmental test.

Battelle Class II conditions	
Cl ₂ concentration	10 ppb
NO ₂ concentration	200 ppb
H ₂ S concentration	10 ppb
Relative humidity	70 %
Temperature	30 °C

摺動特性の大幅な改善を実現している。Fig. 3 の TEM 像では、この微小突起は確認されていない。これは、この微小突起の面密度が、数平方ミクロンに1個程度であり、局所的な TEM 観察に現れていないためである。Fig. 7 に、Tape A 及び Tape B の摺動テストの結果を示す。これは、0.98 N (100 gf) の荷重をかけて、速度 14 mm/s という低速領域で、直径 3 mm の AlTiC 部材に対し 180 度巻きつけで、45 mm の長さを往復摺動させた時の歪ゲージにかかった負荷 x [N] の変化を、

$$\mu = \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{x}{0.98} \right) \quad (3)$$

で摩擦係数に換算した値をパス回数に対してプロットしたものである (Fig. 7 では 50 パスから 100 パスまでを示している)。通常の摺動状態であれば、引っ張り摺動時は歪ゲージに印加される負荷 x は荷重 0.98 に摺動負荷が加わり 0.98 以上の値となり、(3) 式で換算された値は正の値を、戻り時は摺動負荷が差し引かれるので負の値になるが、ここでは正の値のみをプロットしている。Tape A の摩擦係数は 0.5 近い値を示しているのに対して、Tape B では摺動を繰り返しても 0.25 程度を維持している。また、Tape A では、グラフ図中 Stiction events と示す 6 箇所 で不連続な負荷変動が観察されている。これは、戻り摺動時に張り付きが発生し、戻り動作中にこの張り付きが開放され、荷重の落下に伴い急激な負荷上昇が発生した場所である。一方 Tape B では全てのパスで定常の摩擦挙動が観察されており、張り付きの発生はなく、安定した走行が実現していることが分かる。最も簡単な摩擦係数の低減方法は媒体の摺動面を粗面化することである。しかし、この場合、必ずスペーシングの増大を招く。Tape B では、微小突起による粗面化と長周期のウネリを除去することを同時に実現し、ヘッドと媒体間のスペーシングの増大を招くことなく摩擦係数の低減を実現することを目指したものである。Fig. 2 の線記録密度特性からわかるように Tape A と Tape B の高線記録密度領域での応答はほぼ平行移動であり、また、両者の磁性層厚が Fig. 3 の TEM 像から明らかのように、共に 70 nm 程度と同一であることを考慮すれば、Tape A と Tape B のスペーシングに大きな差がないことが推察される。実際、出力の波長特性から、実効的スペーシング (磁気的スペーシング d と遷移幅パラメータ a の和 $d+a$) を見積もった¹⁹⁾。その結果、Tape A の $d+a$ は 30.3 nm、Tape B は 28.7 nm と、むしろ若干ではあるが、Tape B が Tape A よりも小さい値を示した。

(a) BaFe tape—before test

(b) BaFe tape—after Battelle Class II 14 days test

(c) MP tape—before test

(d) MP tape—after Battelle Class II 14 days test

Fig. 8 Tape surfaces observed with differential interference microscope. (a) BaFe tape before test, (b) BaFe tape after test, (c) MP tape before test, and (d) MP tape after test. Environmental test was conducted using Battelle Class II condition.

Table 6 Change in Mrt (remanent magnetization x thickness) value in Battelle class II test.

	Before [mA]	After [mA]	Ratio
BaFe tape (bare)	3.1	3.1	1.00
MP tape (bare)	19.5	12.5	0.64
MP tape (in cartridge)	21.4	21.7	1.01

つまり、Tape B の表面形状は、スペーシングの増大を招くことなく、摺動特性の大幅な改善を実現していると言える。

3. 長期保存安定性

現在最も利用されている磁気テープは金属(MP)テープであり、MP テープは長期にわたり磁気テープの中心的役割を果たしている。1985 年に利用が開始された放送用金属テープ MII は 25 年たった現在でも十分利用可能であり、その長期保存安定性は、実際の利用において証明されているといっても良いだろう。今後、新規素材として BaFe を用いた磁気テープを市場導入していくためには、その長期安定性の確認が必須である。もともと酸化物である BaFe は比較的安定な化合物であり一般的な温湿度環境テストでは変化しないと想定される。そこで、腐食性ガスを用いた加速環境による腐食テストとして Battelle Class II 環境によるテストを行った。これは、Battelle 研究所によって開発された環境テストのひとつ²⁰⁾で、温湿度管理されていない室内環境での腐食を加速していると考えられており、これまでも磁気テープのテストに利用されている^{21), 22)}。比較の為に、市場実績がある MP テープと同時にテストした。Table 5 にテスト環境を示す。この環境下に BaFe テープについては表面を剥き出しにした状態で、MP テープについては表面を剥き出しにした状態とカートリッジに入れられた状態の二通りで、14 日間放置した。加速比率については、幾つかの見解があるが、概ね 400~1000 倍である²³⁾。従って今回の 14 日間のテストは、15 年~38 年に相当する。表面を剥き出しにした場合のテスト前後のテープ表面を微分干渉顕微鏡で撮影した結果を Fig. 8 に、残留磁化・厚さ積の変化を Table 6 に示す。通常磁気テープはカートリッジ内で巻かれており、ほとんど外部の大気に接触することがないことを考慮すると、表面を剥き出しにした状態は相当に過酷な環境である。実際、実使用において何ら問題のない MP テープでも、表面が変化し、腐食した状態が Fig. 8 (d) から観察されている。また、Table 6 に示すように、MP テープでは、このテストの前後で磁化量は大きく低下した。しかし、Fig. 8 (a)及び(b)に示すように BaFe テープ表面はほとんど変化することなく、テスト前後での磁化量も同一であった。この結果は BaFe テープの化学的安定性が極めて

高いことを意味している。カートリッジ内の(リーダテープ直後の)MP テープは全く腐食せず、テスト前後で磁化量変化も無かった。

4. まとめ

リニアテープシステムとして面記録密度 6.7 Gbit/in² 及び 29.5 Gbit/in²それぞれを実現した BaFe テープの詳細を比較した。両テープを同一条件で測定した SNR 差(媒体のみの SNR 差)は 3.5 dB であった。出力の波長特性から見積もられた両者の実効的スペーシング(d+a)はほとんど同一であり、3.5 dB の差は、両者の磁性体粒子の体積差による向上分 1.2 dB と垂直配向による向上分 2.0 dB で、ほぼ達成していると考えられる。但し、Tape B の摺動面のウネリ(比較的長周期凹凸)の低さや、磁性層と下層との界面の平滑性の改善(Fig. 3 の TEM 断面図参照)もノイズ特性に影響を与えていると推定される。しかし、今回の解析では、これらの影響を評価することは出来ていない。今後、ノイズスペクトルの解析などを通してこれらの影響を明確にしていきたい。一方、面記録密度 29.5 Gbit/in²実現の為に、電磁変換特性の改善だけではなく、トラッキングマージンの 1 μ m から 0.25 μ m と大幅な低減を必要としている。これには、走行性能改善に伴う走行トラック位置の再現性向上が大きな役割を果たしているが、これは、ウネリの少ない面にたくさんの微小突起を形成することによって、電磁変換特性を犠牲にすることなく摺動性改善を実現した結果である。また、今後の BaFe テープの市場導入に向けて、その化学的安定性について市場実績がある MP テープと比較して評価した。評価環境には Battelle Class II 環境を用いて 14 日間のテストを行った。その結果、BaFe テープは MP テープを超える長期化学的安定性を持つことが明らかになった。これは、今後 BaFe テープをリニアシステム用の高記録密度磁気テープとして、実用化していく上で化学的安定性については全く問題がなく十分に市場での保存耐久性があることを意味している。

References

- 1) J. Gantz and D. Reinsel, "The Digital Universe Decade – Are You Ready?", (2010) available at <http://idcdocserv.com/925> (As of Sep. 27, 2010).
- 2) T. Inoue, K. Nakiri, H. Mitsuhashi, M. Fukumoto, T. Doi, Y. Sasaki, M. Kishimoto, *IEEE Trans. Magn.*, **42**, 465 (2006).
- 3) T. Nagata, T. Harasawa, M. Oyanagi, N. Abe, and S. Saito, *IEEE Trans. Magn.*, **42**, 2312 (2006).
- 4) K. Motohashi, T. Sato, T. Samoto, N. Ikeda, T. Sato, H. Ono, and S. Onodera, *IEEE Trans. Magn.*, **43**, 2325 (2007).
- 5) D. Berman *et al.*, *IEEE Trans. Magn.*, **43**, 3502 (2007).
- 6) S. Matsunuma, T. Inoue, T. Doi, T. Matsuu, A. Hashimoto, H. Fujiura, K. Hirata, S. Nakagawa, *IEEE Trans. Magn.*, **44**, 3561 (2008).
- 7) M. L. Watson, R. A. Beard and, S. M. Kientz, *IEEE Trans. Magn.*, **44**, 3568 (2008).
- 8) D. Berman, V. H. Chembroru, T. Topuria, S. Matsunuma, T. Inoue, T. Doi, T. Matsuu, A. Hashimoto, K. Hirata, and S.

- Nakagawa, *IEEE Trans. Magn.*, **45**, 3584 (2009).
- 9) S. Matsunuma, T. Inoue, T. Doi, T. Matsuu, A. Hashimoto, K. Hirata, S. Nakagawa, *IEEE Trans. Magn.*, **45**, 3598 (2009).
 - 10) P.-O. Jubert, D. Berman, W. Imaino, T. Sato, N. Ikeda, D. Shiga, K. Motohashi, H. Ono, and S. Onodera, *IEEE Trans. Magn.*, **45**, 3601 (2009).
 - 11) S. Ölçer, E. Eleftheriou, R. A. Hutchins, H. Noguchi, M. Asai, and H. Takano, *IEEE Trans. Magn.*, **45**, 3765 (2009).
 - 12) A. Matsumoto, Y. Murata, A. Musha, S. Matsubaguchi, and O. Shimizu, *IEEE Trans. Magn.*, **46**, 1208 (2010).
 - 13) O. Shimizu, T. Harasawa, and M. Oyanagi, *IEEE Trans. Magn.*, **46**, 1607 (2010).
 - 14) T. Harasawa, R. Suzuki, O. Shimizu, S. Ölçer, and E. Eleftheriou, *IEEE Trans. Magn.*, **46**, 1894 (2010).
 - 15) G. Cherubini *et al.* "29.5 Gb/in² Recording Areal Density on Barium Ferrite Tape" presented at the 21st magnetic recording conference TMRC-2010, La Jolla California, 2010 C3, and to be published in *IEEE Trans. Magn.*
 - 16) S. Matsunuma, T. Inoue, T. Doi, T. Watanabe, S. Gomi, Y. Mashiko, K. Hirata, and S. Nakagawa, *Digests of 34th Annual. Conf. on Magn. Jpn* 5aA-10 (2010) (in Japanese).
 - 17) T. Fujiwara, M. Isshiki, Y. Koike, and T. Oguchi, *IEEE Trans. Magn.*, **18**, 1200 (1982).
 - 18) O. Kubo, T. Ido, and H. Yokoyama, *IEEE Trans. Magn.*, **18**, 1122 (1982).
 - 19) Y. Murata and K. Inoue, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **34** 182 (2010) (in Japanese).
 - 20) W. H. Abbott, *IEEE Trans. Components, Hybrids, Manuf. Technol.*, **11**, 22 (1988).
 - 21) P. J. Sides, G. Spratt, and J. P. Kampf, *IEEE Trans. Magn.*, **30**, 4059 (1994).
 - 22) T. Iwano and K. Kobayashi, *IEEE Trans. Magn.*, **41**, 3010 (2005).
 - 23) D. C. Abbott, R. A. Frechette, G. Haynes, and D. W. Romm, "Shelf-Life Evaluation of Nickel/Palladium Lead Finish for Integrated Circuits" Texas Instruments Application Notes, (1998) available at <http://focus.ti.com/lit/an/szza002/szza002.pdf> (As of Sep. 27, 2010).

2010年10月13日受理, 2011年 1月17日採録