デジタルマイクロミラーディスプレイ*

帰 山 敏 之*1

(受理1999年9月7日, 掲載決定1999年11月6日)

Digital Micromirror Display*

Toshiyuki KAERIYAMA*1

(Digital Imaging, Texas Instruments Japan Ltd., Nishishinjuku 6-24-1 Shinjuku-ku, 160-8366 Tokyo)

(Received September 7, 1999, Accepted November 6, 1999)

1. はじめに

デジタルマイクロミラーデバイス (DMD™, 以下 DMD とする) は半導体アドレス回路チップ上にマイクロマシン技術を用いモノリシックに集積化された高速に動作するデジタル光スイッチの反射型スイッチからなるアレーであり, 1987年に TI (テキサス・インスツルメンツ) のラリー・ホーンベック等によって発明された¹⁾. シリコンから CMOS アドレス回路, ミラー構造, そしてパッケージングプロセスより製造される DMD は各々 $10^6 \sim 10^7$ 個の機構部品とトランジスタより構成されており, デジタル電気ワード入力を直接光のデジタルワード出力に変換することができる. DMD を基にしてデジタル入力データを光のデジタル出力に変換し, パルス幅変調 (PWM, 以下 PWM とする) すなわち高速に変化する光のバーストを生成しそのバーストが目の中でデジタル/アナログ変換されて画像イメージとして認識される. これがデジタルライトプロセッシング (DLP™, 以下 DLP とする) であり, ソースから眼までオールデジタル処理を基本として視覚情報を投射ディスプレイする新しい技術である^{2,3)} (図 1).

2. 製造プロセス

DMD は, CMOS SRAM メモリー上に通常のウェハ

図1 デジタル光プロセッシングシステム

ープロセス (0.72 μm 技術) を基にマイクロマシン技術により形成され, 電気/機械/光学機能を1個の半導体チップ上に集積した反射型光変調器である (図2). その製造プロセスはシリコンから CMOS アドレス回路形成まで72工程, ミラー構造形成まで22工程, そしてパッケージング完了まで12工程からなり, 通常のウェハプロセスラインが使用される⁴⁾ (図3).

ミラーの下に位置する CMOS は6トランジスタ SRAM により構成され, ツインウエル CMOS, 0.72 μm , ダブルレベルメタル (DLM) 技術が用いられる. アルミニウム (Al) 配線による DLM CMOS アドレス回路形成後, 厚い酸化膜の堆積, CMP による平坦化に

*「真空誌」「マイクロマシン」特集号に投稿

*1 日本テキサス・インスツルメンツ(株)デジタルイメージング (160-8366 東京都新宿区西新宿 6-24-1 西新宿三井ビル)

図2 DMD ピクセルの分解構造

よりミラー構造形成の基本面が形成される。SRAMの相補出力はピクセルのアドレス電極に出力される。

ミラー構造はアドレス電極/バイアスバス層、ヒンジ層、ヨーク層及びミラー層から構成されSRAMメモリ上にAl合金によるスパッター膜によりモノリシックに形成されていく。一貫した低温化プロセスがミラー形成

プロセス全工程を通じて使用されており、CMOSのDLM (Al) 配線の品質は劣化しない。アドレス電極とヒンジ/ヨーク層間、及びヒンジ/ヨーク層とミラー層間にスピン塗布により有機ポリマーによる平坦化層が形成されているが、最終的にプラズマエッチングにより除去される犠牲層としての役割を果たす。ピクセルは3次元構造素子でありZ方向の厳密な寸法制御はミラー傾斜角度とアドレス電圧の良好な再現性、及び均一性を確保するために重要である。DMDピクセルの動作時には各パーツ間の最近接距離は $0.2\mu\text{m}$ にまで近づく。構造体の中に存在する微小なパーティクルは電気的不良のみならずピクセルの機械的不良の原因となり、サブミクロンサイズのパーティクルコントロールはミラー形成の全プロセスを通じて重要である。

DMDチップをウェハから分離しアセンブリする工程はDMD特有である。ウェハは後工程でチップに分離するためまずウェハの途中まで部分的にダイシングされ、等方性プラズマエッチングにより有機ポリマーによる犠牲層が除去されDMD各部品の間空隙が形成される。ミラー構造の表面処理後、全自動ウェハテスターにより電気・機械・光学の各機能の動作確認を行い良品を選別する。次に部分的にダイシングされたウェハを割りチップに分離し、パッケージに接着・配線し再びミラー構造の表面処理後、光学的に高品質の窓を溶接封止する。パッケージされたDMDはバーニンを行った後最終テストで品質確認・出荷される。

図3 DMD プロセスフロー

図4 スプリングチップとヨークのSEM写真

3. 基本動作

DMDは半導体チップ上に $16\mu\text{m}$ 平方のAlミラーが $17\mu\text{m}$ ピッチで数十万個以上のレベルで形成され、メモリ出力に応じてミラーは光を2方向(+又は-10度)の内の1方向に反射することができる。薄いねじれヒンジにより空間に吊るされたミラー及びヨークはメモリセルとの間に作用する静電引力により着地面に着地するまで回転する。ヨークの先にはスプリングチップ(図4)が形成されており、このチップが静電引力エネルギーを蓄積、放出することによってより確実なミラーの回転動作が保証される。メモリは通常の5Vで動作する。

DLP光学システム(図5)において光は20度の角度でDMDに対し入射し、ミラーがON状態にセットされた時にプロジェクションレンズに向けて反射されてスクリーン上のピクセルは明るく表示される。OFF状態にセットされた時には-40度の角度でレンズから外れて反射され、ピクセルは黒く表示される事になる。ミラーの回転方向は5V動作のSRAMデータにより任意に決定することができる。ミラーは通常水平位置が安定であるが、SRAM電圧に対しミラーにバイアスをかけるとON(又はOFF)の回転位置が安定状態に移りSRAMデータに依存しなくなる。これがDMDの持つ優れた電気機械的ラッチ性能である。次に、ミラーよりバイアスを除去するとラッチ状態より開放され、ミラーの回転方向はSRAMデータにより決定される。

DMDピクセルはアドレス電極とミラー間に作用する静電引力により駆動する。バイポーラリセット駆動⁵⁾(図6)によるミラーのリセットシーケンスは5つのステップより構成される。ステップA(メモリーレディ)：

図5 DMD光スイッチングの原理

CMOS SRAMにデータの書き込みが完了する。ステップB(リセット)：インパルスバイアス印加によりミラーに共鳴エネルギーを与える。同時にCMOS SRAMの電圧が5Vより7.5Vに昇圧される。ステップC(リリースと差別化)：バイアスが無印加の状態、CMOS出力にそってミラーの反転、又は保持の初期状態が決定される。ステップD(着地とラッチ)：バイアスが再印

図6 DMDのリセットシーケンスとミラー軌跡

加されミラーは新しい状態に着地し、ラッチされる。ステップE: SRAM電圧を7.5Vから5Vに戻し電位差を大きくし、着地側のトルクを大きくして領域Dからの移行を完了する。ミラーに作用するトルクは1500 nNm, 静電力は700 nNのレベルである。光学的スイッチングは投射レンズに光が入射しはじめ100%に達する時間、すなわちミラー角度が0度より10度に回転する時間で2 μ s, ミラーの機械的スイッチングはリセットパルスからミラーが反転し振動がおさまリ、SRAMデータを書き換えてもミラーが誤動作を起こさなくなるまでの時間により決定され15 μ sの能力を持つ。

DMDピクセルのスイッチ時間は静電界の強さ、ピクセルの慣性、ねじれヒンジの堅さに依存する。ヒンジ材料の改良により、ねじれ動作による非弾性変形は許容度以下に制御されている。スプリングチップが着地面に着地/接触すると10数 nN レベルの接触力が発生する。残存する分子間のファンデルワールス力や表面力は依然としてヒンジの戻り力より大きい、リセット電圧パルスがヨークとミラーに印加されるとヨークの先のスプリングチップがしなり戻る時に反動力が発生し、スプリングチップは着地面から確実に開放される。

4. 動作信頼性

DMDは発明より今日に至るまで実用化にむけて着実に進化してきた。初期のDMDは不安定な動作、光学的に低コントラストの性能を示していた。1992年にはミラーの下にヒンジ構造を隠すHH構造が導入されて、

光学的コントラストが著しく改善された。1995年にはミラーのみならずヨークにも静電引力が作用する構造のHH3が導入され、ピクセルの動作速度、および動作安定性が改善され、次にヨークの先にスプリングチップを取り付けたHH3STが登場し、そのピクセル動作信頼性は10万時間に到達している⁶⁾。

ヒンジの信頼性がミラースイッチング動作の加速試験により評価され、1.7兆回以上の加速試験においてもヒンジの曲がりや破壊は観察されないことを確認している。この現象はヒンジ膜厚が1粒径程度と非常に薄く、膜上下に自由表面が存在することにより転移発生が抑制される為と考えられている。高光束密度照射時には光吸収によりDMDチップの温度が上昇する。過度の温度上昇はミラーを1方向に偏って動作させる条件で起こるヒンジ変形(メタルクリープ)を加速し、DMDの長期信頼性に影響を及ぼす。この変形を極力抑え確かな動作を保証する為に特殊なヒンジ合金が使用され、限界動作温度範囲は10°C以上、65°C以下に制限される⁷⁾。

5. 表示性能

デジタルディスプレイ: デジタル画像メディアの急速な進展に伴いデジタルビデオ技術の重要性が高まってきた。デジタルソースの内容が投射ディスプレイまで伝達された時、アナログの光バルブに接続するとデジタル/アナログ変換処理により、ソース映像の品位が劣化する事になる。よって、デジタル処理で一貫した映像システムの最終段階には、電気的ビット入力を光学的ビット出

図7 DLP と LCD ピクセルの写真と画像品質

図8 パッケージされた DMD チップ

図9 DMD ミラーの SEM 写真 オリジナルミラー, SRV (small rotated via), SMG (small mirror gap) + SRV

力に変換するデジタルディスプレイがデジタルビデオへの自然なインターフェースであると考えられる。DLP ベースのディスプレイはデジタルフレームからフレームへの時間ずれやにじみがおきない。

ピクセル光利用効率：DMD の光効率は入射光に対する出力光の割合であり、開口率（91%）、PWM で利用する有効フィールド内“ON”時間（92%）、表面の反射率（90%）、回折効率（85%）の積で定義され、64%以上の能力を示す。ミラー間スペースは $0.8\mu\text{m}$ に制御されて、ピクセルとピクセル間隙間の非常に小さい画像が得られる。その結果、目にはより多くの視覚情報が得られ、またより高い解像度を知覚する事ができる（図7）。PWM 時に DMD の位相リセット駆動法⁸⁾によるビット分割の手法によりビデオフィールド時間が高効率に使用

され、明るさ及び画質は改善された。反射率は Al 表面状態に、回折効率はミラー形状に依存している。

解像度：DMD チップファミリーには共通のピクセルデザインルールが採用されており、画素数の増加に伴いチップサイズは大きくなる（図8）。

コントラスト比：DMD のフル ON/フル OFF コントラスト比は ON ピクセルと OFF ピクセルからの光量比により決定される。OFF ピクセルからの漏れ光はミラー隙間より入り込んだ光の下部構造からの反射散乱、ミ

図10 1チップ、2チップ、3チップDLPプロジェクションシステム

ラーをヨークに支持する為の穴からの回折光などが支配的である。ピクセルデザインの改善によりコントラスト比は著しく向上してきた⁹⁾ (図9)。今後の民生市場やデジタルシネマ応用に向けて1000:1以上のコントラスト比を得る為の改良が進んでいる。

高輝度化：ミラー構造とパッケージモデルによりヒートシンクマウントからミラー構造と窓への熱抵抗が計算され、DMDに要求される動作温度条件を満たす様々の冷却構成が低出力 (<2000 lm) から中高出力 (2000～8000 lm)、超高出力 (>10000 lm) の各用途別に開発された¹⁰⁾。高輝度応用時には、ヒートシンクとファン付き熱電冷却器がDMDパッケージの裏に取り付けられる。TI 試作デジタルシネマシステム (DLP CinemaTM) では、DMDを水冷することにより13000 lmの超高出力を達成している⁹⁾。

6. 光学システム

DMDは単純な反射型光スイッチで偏向板を必要としない。DMDの高速応答性をいかして、DMDチップを1 (または2) 個使用した1 (または2) チップDLP投射システムが設計されている (図10ab)。このシステムはカラーホイールを用い色を時分割しカラーイメージ得る。色時分割駆動方式において、画面上で視線が動くとき赤緑青の原色が知覚される場合がある。この現象はカラーセパレーションと呼ばれている。カラーホイールの色分割数を増やす、かつ回転数を増やすことによりこの現象が低減される。1チップシステムでは16.7 ms (1/60秒) のNTSC TVフィールドが例えば赤緑青赤緑青と6分割される。また回転板に無色を追加した赤緑青白構成をとることによりコントラストを改善し白の明るさ

表1 DLP応用分野

ビジネスプロジェクター
携帯 ウルトラ/マイクロポータブル
会議室用
ビデオウォール
大規模公衆用
娯楽プロジェクター
ホームシアター*
デジタルシネマ*
ホトフィニッシング
デジタルホトフィニッシング
モニター
車載用計器パネル
デジタルモニター

* 開発中

を更に強調できる¹¹⁾。各色8ビット階調表示が可能である。

2チップシステム (図10b) はマゼンダと黄色のカラーホイールにより赤色は常に赤専用DMDに、もう一つのDMDで緑色と青色を時分割する。赤色に不足するが長寿命のメタルハライド型ランプやUHPランプに最適化され、赤色出力は3倍に、緑色と青色は各50%増加し優れた色再現性と高い光効率が得られる。

DMDを3個使用した3チップDLPシステム (図10c) では、赤色、緑色、青色の各DMDが同時に動作することにより最も高い光効率と画像品質が得られ、各色10ビット階調表示が可能である。

7. 応用分野¹²⁾

DLP プロジェクション技術を基にした種々の応用分野が開発されている⁹⁾ (表 1)。モバイル分野では重さ 2.5 kg, 光束 800 lm の軽量小型 1 チップ DLP プロジェクタ, ビデオウォール分野ではキューブ間の色と階調のつりあいが重要であり, DLP ビデオウォールにおいて端から端までの均一性と安定性の新しい業界標準を提供している。SXGA 解像度の DLP 専用モニターが航空管制用, 遠隔医療用等に製造されている。XGA の解像度で 9,000 lm の高光束出力, 大規模公衆用の 3 チップ DLP プロジェクタは業界標準として広く認知されてきた。そのシステムの色バランス, 均一性, ガンマ特性はデジタルに制御され温度により影響されず, 短時間で稼動状態に入る。

娯楽映画がデジタル配給される時代がやってくる。デジタルの忠実性と安定性を特徴とする DLP Cinema™ が, 各地の映画スタジオでの実演を重ねフィルム映画と同等またはそれ以上の映像品質を示し好評を博している。

米国ではすでに 1999 年春より 10 都市で地上波デジタルハイディフィニション (HD) 放送が開始されている。日本では 2000 年末に BS デジタル試験放送が開始予定であり, デジタル HD の高精細・高品質の番組が家庭でも楽しめるようになる。大画面 HD テレビ市場を睨み, DLP 技術を用いた 1280×720 解像度, アスペクト比 16:9 の大画面の HDTV 開発プログラムが進行している。その他, 実効 36 ビット色で 320 dpi の解像度のカラー写真が毎時 5000 枚プリントできるデジタルホットフィニッシングや車載用のダッシュボードパネルへの応用等が開発されている。

8. ま と め

DMD はマイクロマシン技術によって通常のウエハープロセスラインで製造されている。半導体製造のノウハ

ウと能力を基に歩留まり向上による低コスト化が推進され, 同時に DMD の高精細化, 高画質化に向けての弛まぬ開発努力により画像表示性能はさらに向上していく。今後, DLP デジタルディスプレイ技術による新規の応用分野が開拓され, 拡大してくるであろう。教育, 商業, 映画などの娯楽, マルチメディアの分野においてオールデジタル化の波を迎え, DLP はデジタル時代に適応するプロジェクションディスプレイ技術として飛躍が期待される。

〔文 献〕

- 1) L. J. Hornbeck and W. E. Nelson: *OSA Technical Digest Series, Vol. 8, Spatial Light Modulator and Applications*, pp. 107-110, (1988)
- 2) L. J. Hornbeck: *Proc. SPIE*, Vol. 3013, Projection Displays III, pp. 27-40 (1997)
- 3) P. F. Van Kessel, L. A. Hornbeck, R. E. Meier and M. R. Douglass: *Proceedings of the IEEE*, Vol. 86, No. 8 (1998) pp. 1687-1704
- 4) L. J. Hornbeck: *Proc. SPIE*, Vol. 2639, Micromachining and Microfabrication Process Technology, p. 2 (1995)
- 5) R. L. Knipe: *SPIE Europto Proceedings*, Vol. 2783, pp. 135-145 (June 12-13, 1996)
- 6) L. J. Hornbeck, T. R. Howell, R. L. Knipe and M. A. Mignardi: *Microelectronic Systems 1997*, DSC-Vol. 62, pp. 3-8, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (1997)
- 7) M. R. Douglass: *IEEE International Reliability Physics Proceedings*, pp. 9-16, (1998)
- 8) D. Doherty and G. Hewlett: *SID Symposium Digest of Technical Papers*, pp. 125-128, (1998)
- 9) L. A. Hornbeck: *International Display Workshop '98*, pp. 713-716 Kobe (Dec 7-9 th 1998)
- 10) J. D. Grimett: *International Systems and Packaging Society*, San Diego, CA (Dec 1997)
- 11) A. Kunzman and G. Pettitt: *SID Symposium Digest of Technical Papers*, pp. 121-124, (1998)
- 12) Digital Light Processing World Wide Web site: <http://www.ti.com/dlp>