最高撮影速度 100 万枚/秒の 30 万画素単板カラーカメラ*

大竹 浩**

1- Mfps 300-kpixel Ultrahigh-speed Single-chip Color Camera

Hiroshi OHTAKE

1. 緒 論

高速度カメラは、肉眼でははっきり見えない動きの速い現象をとらえ、スローモーション映像としてそれを可視化できるため、科学計測研究用だけではなく放送用としてもその高性能化が望まれている¹⁾。

従来、これらの高速度カメラは感度が不十分であるため、露光時間の短い高速度撮影時には、特に強い照明がないと S/N の良い映像が得られないという問題があった。したがって、既設の照明のみで対応しなければならないナイトゲームのスポーツ中継などでは、高画質な高速度撮影は困難であった。

NHK では動作速度が速くかつ感度にも優れた 8 万画素の超高速 CCD²⁾を用いて 3 板式超高速高感度カラーカメラを製作し、プロ野球やプロゴルフの中継などに試用した結果、バットやクラブがボールとインパクトする瞬間をこれまでにない鮮明な映像としてとらえ、高性能な超高速カメラが新たな映像表現を可能とするために強力なツールとなることを実証した³⁾。以上の取り組みを踏まえ、解像度や機能性の点でより優れた放送用の高性能な超高速カメラを実現するために、画素数を約 4 倍に増加させた 30 万画素超高速高感度 CCD を開発した。この CCD は内部にメモリーを有するため、このメモリー部分を含めると、製作上 4000 万画素の CCD を作る難しさが予想された。このため、画素数がその半分である 15 万画素の CCD を設計・試作し、CCD の端部を高精度に切削して 2 枚をはり合わせる技術を開発することで 30 万画素の超高速 CCD を実現した。また、本 CCD にオンチップカラーフィルターを適用することで単板カラーカメラを開発した。

本項では、30 万画素 CCD 作製のために開発した要素技術について説明し、最後に 30 万画素 CCD を用いた単板カラーカメラとそのカメラによる撮影例を紹介する。

2. 超高速 CCD の原理³⁾

通常の CCD は Fig. 1 (a) に示すように、入射光によってフォトダイオード内に生成された信号電荷を、フレームごとに長い転送路を通して CCD の外部に取り出す必要があり、撮影速度を高めることは困難である。これに対し、本 CCD は、Fig. 1 (b) に示すように信号を記録するためのメモリーを各画素のフォトダイオードに直結して配置し、フレームごとの電荷転送段数を 1 段とすることにより、最高で 1 秒間に 100 万フレームもの超高速撮影が可能となっている。また、メモリー CCD の最終段には、ドレイン部を設けており、144 段だけ転送された古い信号は順次基板を通して CCD 外部に排出される。この連続した上書き動作によって高速度現象の発生の瞬間を確実にとらえることができる。

3. 15 万画素超高速高感度 CCD

放送用としてより高画質、高機能な高速度カメラを開発するため、15 万画素超高速 CCD⁴⁾を設計、試作した。

Fig. 1 Ultrahigh-speed CCD operational principle.

* 原稿受付 2017 年 2 月 9 日

** 日本放送協会放送技術研究所
(〒157-8510 東京都世田谷区砧 1-10-11,
E-mail: ootake.h-ey@nhk.or.jp)

3.1 多画素化

多画素化に際しては、当時の最新プロセス情報を基に CCD 各部のレイアウトを見直し、画素面積の縮小設計を行った。まず、CCD 転送路の幅を $3\mu\text{m}$ に縮小した。それによって転送効率などの性能劣化が生じないように、デバイスシミュレーターを用いて各部分での電位勾配が滑らかにつながることを確認しながら設計を行った。

次に、画素上部に配置している金属配線数の削減について検討を行った。超高速 CCD では、フォトダイオード部および CCD メモリー部での信号電荷転送を高速に行う必要があるため、CCD 電極へ駆動電圧を供給する配線抵抗の低減が必要である。本 CCD では、CCD 電極への駆動電圧の供給に抵抗の低い金属配線（通常は CCD 電極と同じポリシリコンで配線されている）を用いることと、CCD 電極に最短距離となる画素の上部に、その金属配線を配置し接続することで配線抵抗の低減を図っている。しかし、画素面積の縮小に伴い金属配線間の距離が狭くなると、電極間ショートによる製造歩留まりの低下が問題となるため、金属配線数の削減について検討した。シミュレーションの結果、従来は連続上書き動作を行うためにドレイン電極で必要とされていた専用の金属配線が、CCD 内部の不純物濃度分布の最適化と駆動電圧の工夫により省略できることが明らかとなった。この削減により金属配線間距離を縮小することなく画素の縮小が可能となり、目標とする面積に 15 万画素を集積化することができた。

3.2 撮影記録枚数

超高速撮影時の撮影記録枚数（メモリー CCD 数）を増加させるために、メモリー CCD の面積をデザインルールの最小値である $3.0\mu\text{m} \times 3.6\mu\text{m}$ まで縮小した。それにより、撮影記録枚数を 144 枚に増やすことができた。しかし、CCD メモリー面積の縮小は飽和電荷量の低下につながるため、シミュレーションにより飽和電荷量の解析を行った。本 CCD の雑音電子数を 10 電子と仮定すると 10 ビットのダイナミックレンジを確保するためには、10000 電子以上の飽和電荷量が必要である。シミュレーションにより、飽和電荷量は約 11500 電子との結果が得られ、目標の 10000 電子以上であることが確認できた。

3.3 バッタブル構造

超高速 CCD は各画素に大面積のフォトダイオードとそれに直結するメモリー CCD を持つ特殊な構造をしているため、多画素化すると面積が増加し、製造歩留まりが著しく低下する。そこで、複数の撮像素子をはり合わせて大面積素子を構成するバッタブル構造により、30 万画素超高速 CCD を実現することとした。Fig. 2 に設計した 30 万画素 CCD のバッタブル構造を示す。15 万画素 CCD の設計においては、バッタブル構造による 30 万画素化が可能のようにフォトダイオードの位置を画素の左端に配置し、チップ左端のフォトダイオードと

Fig. 2 300-kpixel CCD buttable structure.

接合部切断面との間に $10\mu\text{m}$ 以上の切削マージンが得られるよう、レイアウト設計を行った。

4. CCD はり合わせのための要素技術

4.1 高精度切削技術

15 万画素 CCD を 2 枚はり合わせて 30 万画素 CCD を実現するには、左右の CCD のフォトダイオード中心位置を画素間隔である $504\mu\text{m}$ にあわせて配置する必要がある。

そのためには向かい合う側の CCD 端面を高精度に切削する技術が重要となる。シリコンウェハの切削技術には、高速回転刃による機械的切削や、エッチングなどの化学的切削手法がある。我々は、一般的な半導体プロセスで用いられる高速回転刃を用いた切削手法（ダイシング法）を採用した。Fig. 3 にダイシング装置の概略図を示す。切削はブレード（ダイヤモンドブレード）と呼ばれる薄いフィルム状のダイヤモンド砥石を高速に回転させ、ウェハを乗せた高精度 X-Y ステージを移動させることによって行う。この切削は、デバイスと切削位置が $100\mu\text{m}$ 程度の切削マージンをもって切る場合に用いられ、切削時に発生する $5 \sim 10\mu\text{m}$ 程度のウェハ欠け（チップング）はデバイス特性に影響を与えないものとして許容している。しかし、15 万画素 CCD に許される切削マージンは 10 数 μm と少ないことから、切削の影響がデバイス特性に悪影響を与える可能性がある。このため、切削面の欠け量（チップング量）をより少なくす

Fig. 3 Dicing apparatus and cutting condition.

る切削条件を実験により求めた。また、その結果を基に実際のダイオードに近接して切削を行い、切削によるデバイスへのダメージ（リーク電流）についても実験により調べた。

なお、通常のブレードダイシングでは、切削部の断面上部が鈍角になるため、位置合わせ時に CCD の裏面同士が接触してしまい位置合わせが困難となる。そこで、切削装置の回転軸を約 1° 傾斜させることによりこの問題を解決した。

4.2 チッピングと最適切削条件

チッピング量が最小となる切削条件を実験により求めた。パラメータは、①ダイヤモンド砥粒径（ブレードの型番：ブレード型番が小さいほどダイヤモンド砥粒径も小さくなる）、②ブレード回転速度、③ステージ送り速度である。チッピング量は切削後の切削面を光学顕微鏡で観察し、一番大きなチッピングの幅で定義した。その結果、ダイヤモンド砥粒小、ブレード回転速度最大、ステージ送り速度小という条件でチッピング量が最小となることがわかった。

最適化された条件下で切削を行ったときの切削面の顕微鏡写真を Fig. 3 に示す。この時のチッピング量は、約 $2\mu\text{m}$ まで低減することができた。

4.3 近接切削によるダイオード特性への影響

今回採用した切削法はデバイスの切削面に機械的なダメージをあたえるため、このダメージがリーク電流の増加などデバイス特性に影響する可能性がある。今回、切削位置とダイオードのリーク電流との関係を調べるため、ダイオードを試作した。前記のチッピング量が最小となる条件下で、切削位置を n 型拡散層端の基準 (0 位置) に対して変化させたときのリーク電流を測定した。その結果、n 型拡散層と切削位置が $+4\mu\text{m}$ 以上離れていればリーク電流の増大は生じないことがわかり、15 万画素 CCD ではフォトダイオードから切削位置までの距離が $10\mu\text{m}$ 以上と $4\mu\text{m}$ より十分に広いことから、切削の影響を受けないことがわかった。

4.4 高精度位置合わせ技術とパッケージの試作

15 万画素 CCD 2 枚を高精度に位置合わせをして 30 万画素 CCD を実現するため、高精度レーザー顕微鏡と、

ピエゾ素子を用いた高精度ステージを組み合わせた独自の高精度位置合わせ装置を開発した。本装置は、X-Y 方向 $1\mu\text{m}$ 以内の精度での位置合わせが可能である。

また、30 万画素 CCD 用のパッケージの試作を行った。通常 CCD に使用されるセラミックパッケージは焼成で製作されるため、面精度を要求される実装には適していない。本 CCD は今後マイクロレンズの適用を予定しており、感度の均一性の点から面内高低差を $5\mu\text{m}$ 以内にするのが求められる。このため、パッケージとは別に面内高低差 $5\mu\text{m}$ 以内に研磨した、素子とほぼ同じ面積の台座を製作した。CCD と直接接する台座の材質には線膨張係数がシリコンに近く、放熱性の良い窒化アルミ基板を選定した。パッケージはペルチェ素子による冷却も可能な構造とし、またバッタブル構造の CCD チップに対応して回転対称な構造とした。

開発した高精度位置合わせ装置を用いて 30 万画素 CCD の試作を行った。パッケージング後のチップ写真とその接合部の拡大写真を Fig. 4 に示す。本装置を用いることで、左右の CCD のフォトダイオード中心を $1\mu\text{m}$ 以下の精度ではり合わせることができた。

5. 30 万画素超高速単板カラーカメラ

5.1 カメラの構成と動作

30 万画素超高速 CCD にオンチップカラーフィルター（ベイヤー配列、RGB 原色フィルター）を適用し、単板超高速カラーカメラを試作した。カメラの外観を Fig. 5 に、またカメラの仕様を Table 1 に示す。30 万

Fig. 4 300-kpixel CCD and bonding section.

画素単板カラー CCD の対角長が約 40mm あることから、光学系には F マウントレンズを用いている。したがって、安価で多種類の市販レンズを使用できるため、さまざまな被写体に対応することができる。

Fig. 6 にカメラの構成の概略を示す。メカニカルシャッターは超高速度撮影終了後の信号電荷読み出し期間に閉じることで、電荷転送路への光の進入を防ぐ。CCD 駆動部は、駆動 FPGA (Field Programmable Gate Array) とドライバー 2 つで構成され、30 万画素超高速度 CCD の駆動、メカニカルシャッター制御、トリガ制御を行う。信号処理部は A/D、半導体メモリー、信号

Fig. 5 300-kpixel single chip color camera.

Table 1 Specification.

Image sensor	Ultrahigh-speed CCD
Pixel number	720 pixel × 410 pixel
Aspect ration	15.9:9
Device size	40mm diagonally
Frame rate	30 to 1,000,000fps
Shooting frames	144枚
Video output	HD-SDI:1
External trigger input	TTL or switch closure
Lens mount	F mount
Camera weight	Approx. 7Kg
Power consumption	Approx. 75VA

処理 FPGA, HD-SDI 発生回路から構成される。16ch 並列読み出しの CCD 出力信号を高速で処理するため、A/D から映像信号を蓄積する半導体メモリーまで 16ch 並列の回路構成としている。信号処理 FPGA は、A/D とメモリーの制御、16ch 信号合成処理、およびカラー処理を行う。

5.2 カメラの動作

本モードは、撮影速度 30~100 万枚/秒に対応する。CCD 内部のメモリーに信号電荷を蓄積させるため、1 回の撮影では、どの撮影速度に設定しても記録時間は 144 フレーム分となる。

撮影動作は、あらかじめ設定した撮影速度に応じて CCD 駆動 FPGA で駆動パルスが作られ、カメラは撮影準備状態に入る。この時、記録される 144 フレーム分のメモリーでは、繰り返し上書き記録動作が始まり、トリガ信号の入力を待つ。トリガ信号が入力されると上書き記録動作を停止し、144 フレーム分の連続した超高速度映像がメモリー CCD に記録される。また、このトリガ信号は、144 フレームの中の任意の位置に入れることができるため、撮影する超高速度現象の発生直前から記録することができる。撮影終了後、メカニカルシャッターを閉じ、CCD 内部に蓄積された信号電荷を 16ch 並列で外部に読み出す。各出力信号は、A/D 変換後、半導体メモリーに蓄積される。全フレームのデータ転送終了後、半導体メモリーに蓄積したデータを信号処理 FPGA で合成し、HD-SDI 信号として出力する。トリガ入力後、撮影データをすべて転送し、カラー処理の後 HD-SDI 信号として出力する時間は 1 秒以下である。

5.3 撮影例

ここでは、人工衛星にスペースデブリ（宇宙空間を高速で飛翔する「宇宙ゴミ」）が衝突したときの影響を調べるための実験でこのカメラを使った撮影の様子を紹介する。Fig. 7 に示すように、被写体は真空容器の中の人工衛星の模型である。これにスペースデブリを模した飛翔体（直径 2 cm のアルミニウムの球体）が秒速 1.7km

Fig. 6 300-kpixel ultrahigh-speed CCD camera configuration.

で衝突する瞬間を 21 万 fps にて撮影した。照明にはフラッシュライト（輝度特性を Fig. 8 に示す）を用いた。撮影時間が $686\mu\text{s}$ と非常に短いため、飛翔体が模型に衝突し、破片が飛び散る様子が撮影時間内に収まるようにフラッシュライトの点火や撮影開始のタイミングを調整した。Fig. 9 に撮影のタイミングチャートを、Fig. 10 に実際に撮影した映像を示す。飛翔体が人工衛星の模型に大きなダメージを与え、貫通する様子を克明に捕らえることができた。

6. 謝 辞

本超高速度 CCD の開発は、江藤剛治教授と、また、超高速度カメラの研究は、島津製作所、日立国際電気、ナックイメージテクノロジーの協力で行われたものである。

Fig. 7 Experimental system.

Fig. 8 Brightness characteristic of flash.

Fig. 9 Timing chart.

Fig. 10 Imaging example (210-kfps).

参考文献

- 1) 小笠原他: “5 倍速ハイビジョンハイスピードカメラの開発”, 放送技術, pp.119-125, (2005 年 5 月).
- 2) T.G. Etoh et al. “A CCD Image Sensor of 1Mframes/s for Continuous Image Capturing of 103 Frames,” Proceedings 2002 IEEE International Solid State Circuits Conference, pp.46-47 (2002).
- 3) H. Maruyama et al.: “Color Video Camera Capable of 1,000,000 fps with Triple Ultrahigh-speed Image Sensors,” SPIE 26th International Congress on High-Speed Photography and Photonics, pp.5580-60 (2004).
- 4) H. Ohtake et al.: “Design of a 148,680-pixel Ultrahigh-speed High-sensitivity CCD,” Proc. of 2005 IEEE Workshop on CCD and AIS (2005).