

今や Vintage か？ 電子管式超高速カメラ

ZOFFY

昔の仕事になりますが、電子管式超高速カメラを設計しました。電子管を超高速イメージセンサとして、二次元画像を最大 300 万コマで撮影することができる超高速カメラです。近年では、半導体二次元センサを用いた超高速カメラが主流となりましたが、未だに電子管式は感度や S/N で半導体式を凌駕します。本稿で紹介する超高速カメラは今では製造中止となりましたが、そのハードウェア設計を紹介します。

1. 電子管式超高速カメラとは、

レーザ励起超音波などの超高速光現象をシングレイイベントで連続した画像として記録・観測するために電子管式超高速カメラ（以後フレーミングカメラ）を開発^{1)、2)}しました。

フレーミングカメラは最大 300 万駒 / 秒の高速撮影ができます。更には MCP (Micro Channel Plate)³⁾ を内蔵した超高感度イメージ管の採用により、今までは捉えられなかった微弱光領域の撮影を可能としました。出力像の読み出しにデジタルカメラを入力とした画像処理装置を用いることにより、撮影結果を即時に記録・定量解析ができます。(開発当時としては、画期的な性能でした・・・)



図1 外観

主な性能

感度領域	200 ~ 850 nm
ダイナミックレンジ	1,000 (1枚の画像において)
ゲート消光比	$10^7 \sim 10^{10}$
空間解像度	13lp/mm (光電面中心において)
フレーム数	1, 2, 4, 8 枚 切り替え可能
露光時間	最短 50 ns から 100 ms まで連続可変
フレーム間隔	最短 300 ns から 1s まで連続可変
有効光電面サイズ	5.4 × 7.7 mm (8フレーム撮影において)

2. 動作原理、ブロック図

フレーミングカメラは、イメージコンバータ管とこれを駆動する電子回路系および光学像を入出力するための光学系により構成されます。図2はフレーミングカメラの構成図です。

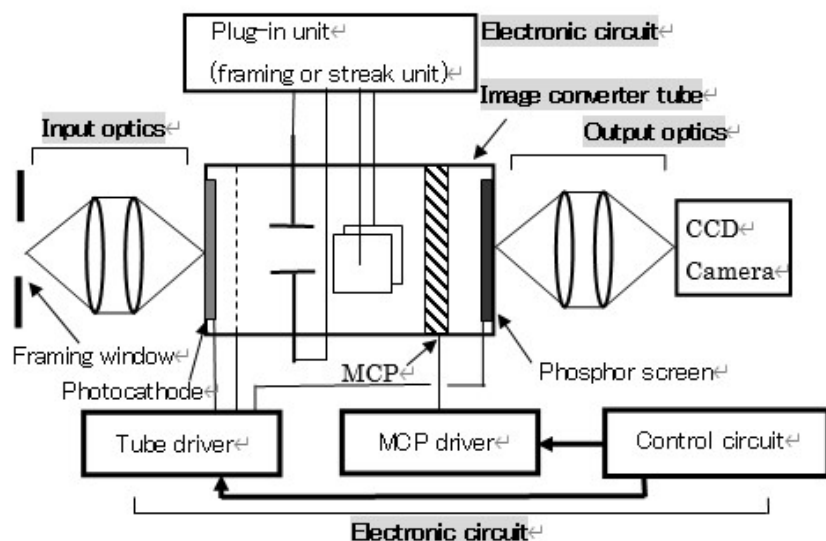


図2 フレーミングカメラの構成

図3に撮影時におけるイメージコンバータ管の動作原理を示します。イメージコンバータ管は光電面、偏向板、MCPおよび蛍光面を備えた電子管です。対物レンズにより入力光学系のフレーミングウィンドウに結像された観測対象物は、入力光学系によりイメージコンバータ管の光電面に再度結像されます。この入力光像は外部光電効果により光電面で電子像に変換され、メッシュ電極により加速された後に垂直および水平偏向板の間を通過します。電子像がこの偏向板を通過する瞬間に階段波状およびステップ状の電圧を加え、電子像をMCP上の所定の位置に偏向することで時間系列情報を2次元空間位置に変換します。MCP上に結像された電子像は、偏向電圧と同期してMCPに加えられるパルス電圧によりゲーティングまたは電子増倍された後に、更に加速され蛍光面に衝突して再び光学像に変換します。ゲーティングとは電子シャッター動作により出力を遮断することであり、高速度撮影における駒と駒の間は、ゲーティングにより出力を遮断します。蛍光面に現れた光学像は出力光学系を介して読み出し用デジタルカメラの受光面に結像され、画像としてPCに取り込まれます。

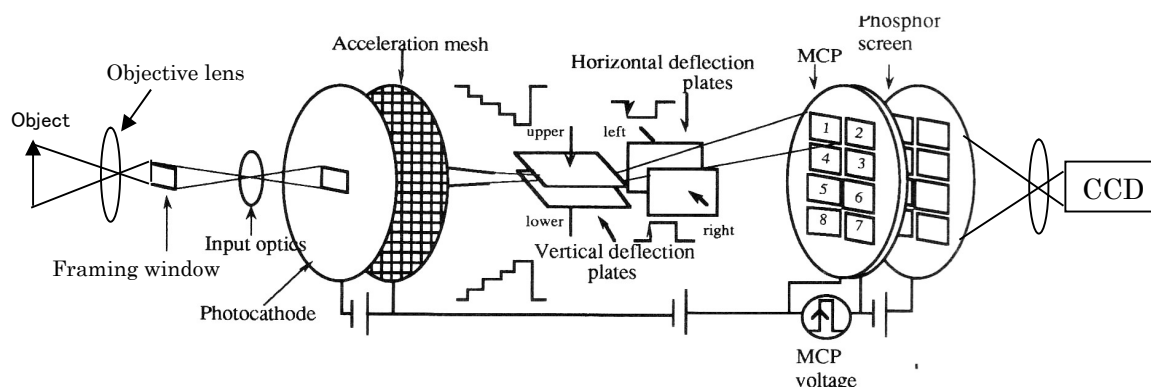


図3 高速度撮影時のイメージコンバータ管の動作原理

図 4 は高速度撮影時のタイミングチャートです。蛍光面上のフレーミング像に対する垂直偏向板、水平偏向板および MCP に印加される電圧とタイミングを示します。垂直偏向板、水平偏向板にそれぞれ階段波およびステップ電圧を印加することにより縦方向、横方向に瞬間画像を配置します。これと同期して MCP にパルス電圧を加え、ゲーティング動作を行うことで、8 枚の瞬間像が蛍光面に並んで出力されます。

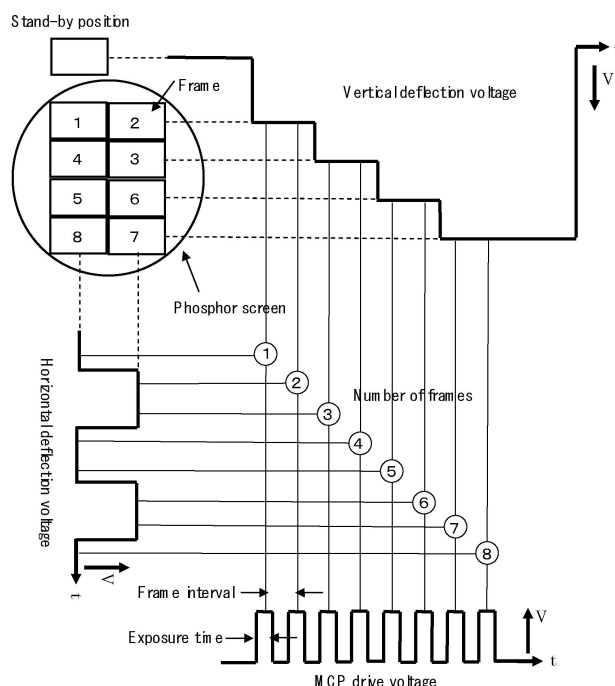


図 4 フレーミング動作のタイミングチャート

3. ハードウェア設計

3-1. イメージコンバータ管

イメージコンバータ管（浜松ホトニクス製 N3831）の外観形状⁴⁾を図 5 に示します。Photocathode、Mesh、Focus1、Focus2、Anode の 5 つの電極により静電レンズを構成するイメージコンバータ管です。それぞれ 1 組の垂直偏向板と水平偏向板で偏向動作を行います。

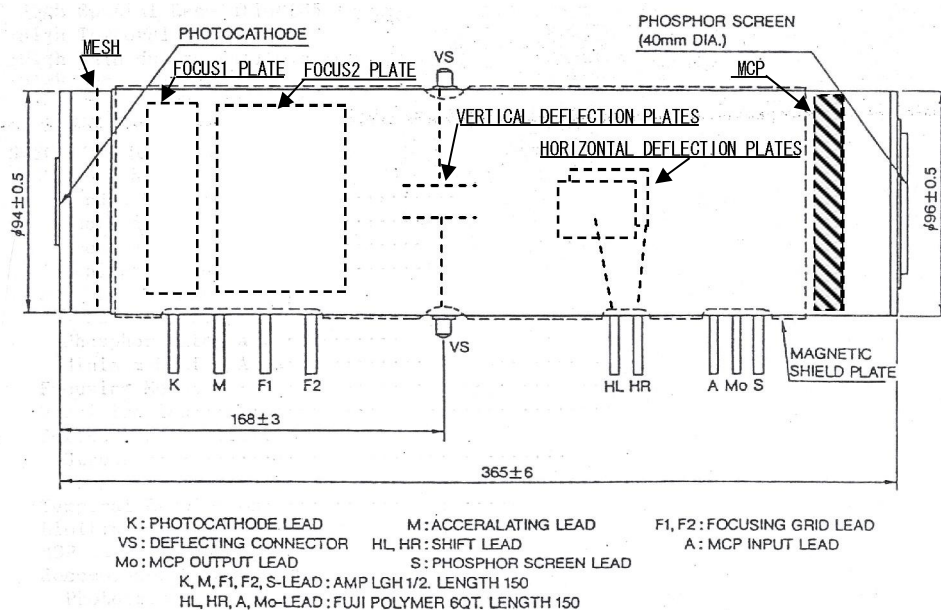
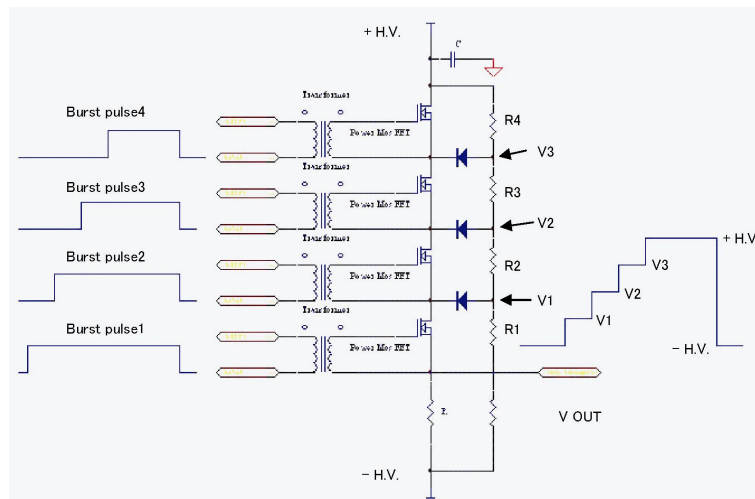


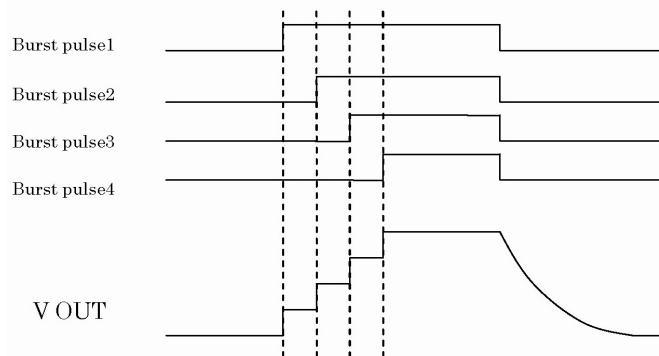
図 5 イメージコンバータ管の外観形状⁴⁾

3-2. 階段波生成回路

高速度撮影を行うためには、図4に示すように偏向板に階段波状の電圧を印加します。このため図6(A)の回路⁵⁾を用いて高电压かつ高速で良好な平坦度をもつ階段波を生成します。この回路は4個の抵抗R1～R4の直列回路にて+HV から-HV 間を分圧し、電圧V1～V3を得る設計としました。また、4個のスイッチ素子であるFETは逆流阻止用のダイオードを介して、それぞれ分圧電圧V1～V3および+HV に接続されています。絶縁トランスを介して一定の周期で高速にオン/オフを繰り返すバーストパルスを入力し、下段より順番にFETをオンすることにより、V OUT に階段波を出力します。同図(B)に階段波生成動作のタイミングチャートを示します。同様に同図(B)と逆極性の回路を加えて用いることにより、正極出力と負極出力の階段波を生成し、イメージコンバータ管の垂直偏向板の両極に印加し垂直方向にプッシュプル偏向を行います。同図(C)はオシロスコープで観測した正極側階段波電圧の階段波部分であり、同図(D)は繰り返し動作時の波形全体を捉えたものです。水平偏向板にはほぼ同様な回路構成により、正極出力と負極出力の2値の高電圧を印加し、水平方向にプッシュプル偏向を行います。プッシュプル偏向を行う理由は、偏向動作中も偏向板の中心を零電位に保つことで、イメージコンバータ管の電子レンズ系の歪を避けるためです。



(A)



(B)

図6 階段波生成回路 (A) 階段波生成回路 (B) 階段波動作タイミングチャート

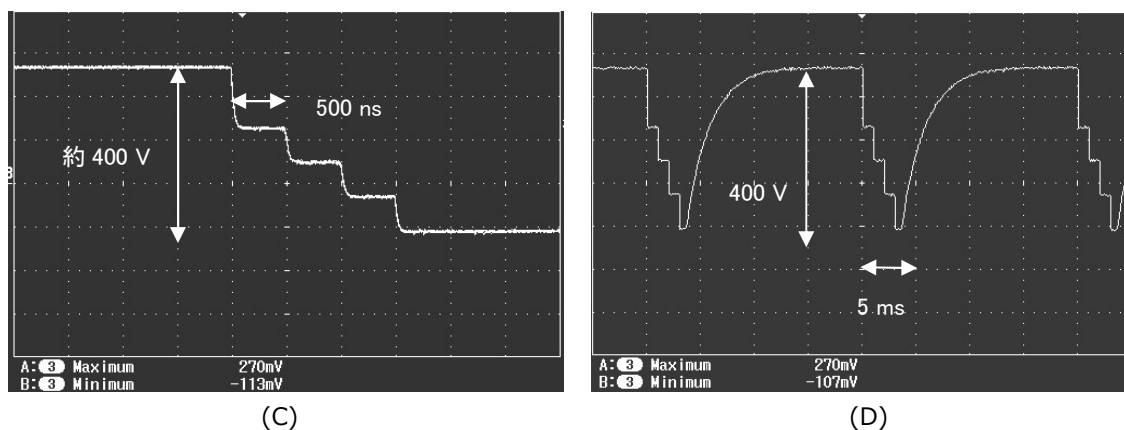


図6 階段波生成回路 (C) 階段波電圧波形、(D)繰り返し時の全体波形

4、レーザ励起超音波の撮影

パルスレーザ励起超音波が金属板表面から空気中に広がっていく様子をシャドウグラフ法で可視化し、高速度撮影した結果を図7(A)に示します。パルスレーザ照射から14 μs 後まで2 μs 毎の8枚の瞬間像により構成され、右上を1番目とし、撮影の順番を図に番号で記入しました。撮影視野は同図(B)に示す配置とし、大きさは13.2 mm(H) × 19.2 mm(V)です。レーザ照射部から衝撃波が半円状に広がる様子が鮮明に捉えられています。

1フレームから8フレーム目までの14 μs 間に広がった波面の伝播距離は6.4 mmであり、これより伝播速度 V は460 m/s ($V = 6.4 \text{ mm}/14 \mu\text{s} \div 460 \text{ m/s}$) と計算されます。空気中の音速360 m/sを超えているため、観測波はマッハ1.3で伝わる衝撃波と考えます。

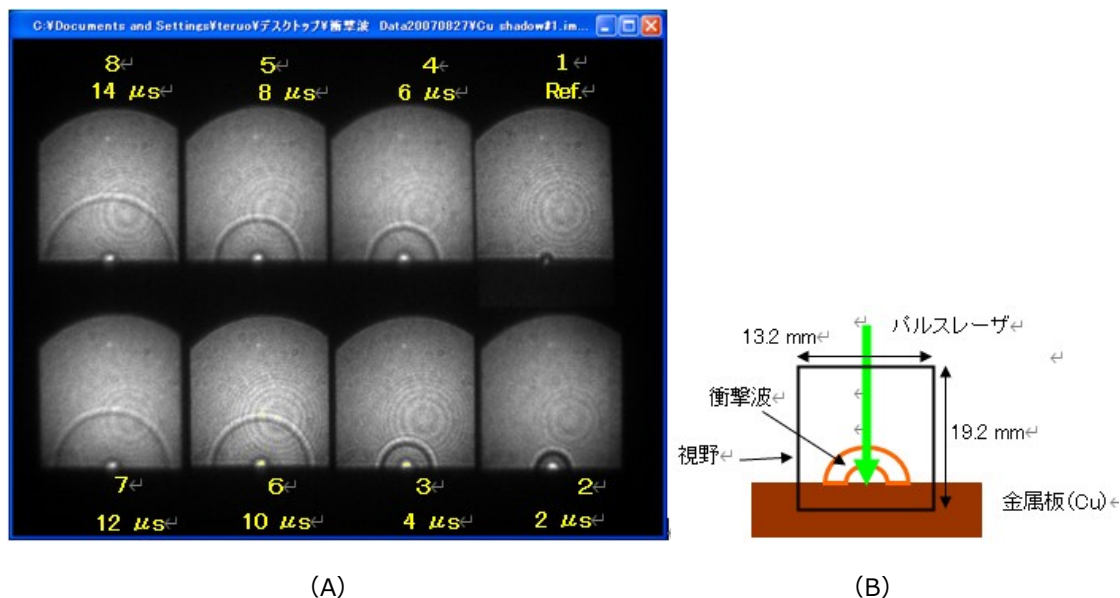


図7 空気中に広がるレーザ励起衝撃波 (A) 撮影データ、(B) 視野の説明

引用文献

- 1) 竹下,照雄、鈴木,一孝、高橋,聡、小石,結 :「フレーミング・ストリークカメラの開発」(〔画像処理・コンピュータビジョン研究会画像応用研究会〕合同) The Journal of the Institute of Television Engineers of Japan 45(8),1029,19910820(ISSN 03866831)
- 2) Teruo Takeshita, Kazutaka Suzuki, Akira Takahashi, Musubu Koishi : “Development of the FRAMING STREAK CAMERA” ITEJ Technical Report 15(20),31-36,19910322(ISSN 03864227) (The Institute of Image Information and Television Engineers)
- 3) 「光電子増倍管」浜松ホトニクス株式会社: (1993) p.82～92
- 4) Technical data sheet 「Large format type streak tube N3831」浜松ホトニクス株式会社 (1989)
- 5) 竹下 照雄、内山 公朗、高橋 聡 :「階段波発生回路」【特許番号】特許第 3317709 号 (P3317709)
【国際特許分類第 7 版】H03K 4/02

(以上)