

9. 撮像デバイス・システムの研究

ハイビジョンによる夜間緊急報道の強化や多様な番組制作への対応などを目的に、超高感度撮像デバイスや超高速度撮像デバイスなどの研究を進めるとともに、これらの撮像デバイスを適用したカメラシステムの研究に取り組んだ。

撮像デバイスの研究では、超高感度撮像デバイスの実現に向けて、HARP(High-gain Avalanche Rushing amorphous Photoconductor)光電変換膜と、これを適用した撮像デバイスの研究を推進した。また、超スローモーションでの撮影を可能にする超高速度 CCD や、3 板式カラー撮像と同等な画質を目指した有機単板カラー撮像デバイスの研究に着手した。

HARP 膜に関しては、膜厚を増してアバランシェ領域を長くすることで超高感度化を図った。また、テルルの添加量を増すことで長波長光に対する光電変換効率を、アバランシェ増倍時の暗電流を減らすことで実効的な感度をそれぞれ改善した。HARP 膜を適用した撮像デバイスについては、HARP 膜研究の成果をもとに、厚さ 15 μm (電荷増倍率 200 倍)および 35 μm (電荷増倍率 1000 倍)の HARP 膜を適用した超高感度 HARP 撮像管や、赤色光に対する光電変換効率を従来の 2 倍に高めた赤色光増感型 HARP 撮像管などを開発した。また、小型の HARP 撮像デバイスを目指して、HARP 膜と冷陰極アレーとを対向させた冷陰極 HARP 撮像板の多画素化を進め、冷陰極アレーのアクティブ駆動や磁界による電子ビーム集束などを可能にすることで、厚さ約 10 mm の標準テレビ用 1 インチ撮像板の開発に成功した。

超高速度 CCD の研究では、各画素に直結した電荷転送路をメモリーとして使用した CCD の開発に着手し、その高集積化を図ることで、最大撮影速度 100 万フレーム/秒の 15 万画素 CCD を開発した。また、2 枚の 15 万画素 CCD をはり合わせる技術や、CCD 上にカラーフィルターを搭載する技術を開発することで、多画素化や単板カラー化を図った。

有機撮像デバイスの研究では、有機材料を用いることで光の 3 原色のうち 1 色の光のみを吸収して電荷に変換し、ほかの色は透過する光電変換膜が実現できることを見いだした。また、基礎実験用有機単板カラー撮像デバイスを試作し、光の 3 原色それぞれに感度をもつ有機光電変換膜と各有機光電変換膜から電荷を読み出す透明な回路とを交互に積層することで、カラー撮像が可能であることを実証した。

このほか、固体撮像デバイスの高感度化に向けて、HARP 膜を CMOS 固体走査回路上に積層した固体 HARP 撮像デバイスの研究や、低電界でのアバランシェ増倍などが期待できるシリコンナノ結晶光電変換膜の研究に取り組んだ。また、広ダイナミックレンジな固体撮像デバイスを目指して、通常の電荷読み出しに加え、フォトダイオードの飽和情報を入力するパルス出力型撮像デバイスの研究を行った。

カメラシステムの研究では、上述した撮像デバイス研究の成果をもとに、超高感度 HARP 撮像管カメラや超高速度 CCD カメラの開発を進めるとともに、放送をはじめとして医療や学術など、さまざまな分野への応用に取り組んだ。また、ハイビジョンの高画質化の一環として、カメラの順次走査に向けた研究を行った。

HARP 撮像管カメラについては、上述した 2 種類の超高感度 HARP 撮像管や、赤色光増感型 HARP 撮像管を適用したハイビジョンハンディカメラを開発した。これらのうち、厚さ 15 μm の HARP 膜を適用したカメラは、放送技術局や報道局、各拠点局に配備され、夜間緊急報道や自然科学番組の制作などに使用された。また、赤色光増感型 HARP 撮像管を適用したカメラは高画質が要求されるドラマや映画の制作などに主に利用された。さらに、超高感度な HARP カメラやその技術は、放送以外にも、医療やバイオ、深海探査、理学、セキュリティなど、さまざまな分野で利用され、多くの成果を生み出した。

超高速度 CCD カメラに関しては、30 万画素の単板カラー CCD を適用した小型カメラシステムを開発した。一瞬の現象を鮮明な超スローモーション映像としてとらえることができるこのカメラシステムは、スポーツ番組や自然科学番組の制作などに使用され、高い評価を得た。

また、ハイビジョンの順次走査撮像技術の研究では、M-FIT (Multiple Frame Interline Transfer) CCD やインターレース用 FIT-CCD を用いてハイビジョンでの順次走査を可能にする技術を開発するとともに、これらの CCD を適用したカメラシステムを構築した。

[江上 典文]

9.1 超高感度撮像デバイス・カメラ

9.1.1 HARP 光電変換膜

HARP 膜は、アモルファスセレン (a-Se) 薄膜内でのアバランシェ (なだれ) 増倍現象を利用した超高感度な光電変換膜である。2000 年代に入ってから、ハイビジョンによる取材や番組制作の比率が高まるにつれて、超高感度なハイビジョンハンディカメラの開発・実用化が望まれるようになったことから、その実現に向けて、HARP 膜の感度の向上や、色再現性の改善などに関する研究を進めた。

(1) 厚膜化による感度向上

HARP 膜では、動作原理上、膜を厚くするほどアバランシェ領域が長くなり、より高い電荷増倍率 (感度) を得ることができる。また、HARP 膜を適用した撮像管などでは、残像は膜の静電容量と走査電子ビームの等価抵抗の積によって決まり、膜を厚くするほど、その静電容量が小さくなることから、HARP 膜の感度の向上と残像の低減とを目的に、膜厚を従来の $8\ \mu\text{m}$ から $15\ \mu\text{m}$ に増した HARP 膜の開発・実用化に取り組んだ。この厚さ $15\ \mu\text{m}$ の HARP 膜では、高輝度なスポット状の被写体を長時間撮影すると、その部分に膜欠陥 (ハイライトキズ) が発生するという問題があった。そこで、ハイライトキズの発生メカニズムの解明を進めた。その結果、膜が厚くなると、a-Se に捕獲される電子数が増加し、局所的な電界集中によって光入射側界面で膜の正孔注入阻止構造が破壊されることがハイライトキズの主たる発生原因であることを突き止めた。また、HARP 膜の動作温度を a-Se のガラス転移温度である 30°C 程度以上に保つことで、捕獲されていた電子が解放され、ハイライトキズの発生を防止できることを見いだした。さらに、HARP 膜のビーム走査側に適切な濃度分布で三セレン化ヒ素層を挿入し、膜の耐熱性を強化することで、固定パター的なノイズとなって現れる膜しわや画面最周辺部での杵状の膜欠陥を生じることなく、HARP 膜を 30°C 以上で長時間、動作させることを可能にした⁽¹⁻⁴⁾ (図 9.1)。この厚さ $15\ \mu\text{m}$ の HARP 膜を適用したハイビジョン用 HARP 撮像管 (増倍率 200 倍) は 2001 年に実用化された。

上述した厚さ $15\ \mu\text{m}$ の HARP 膜の開発、実用化で得られた知見をもとに、引き続き、600 倍の電荷増倍率が得られる厚さ $25\ \mu\text{m}$ の HARP 膜の信頼性向上に取り組んだ。また、バイオ研究用顕微鏡の開発プロジェクトへ

の参加 (9.1.5 項参照) を契機に、厚さ $35\ \mu\text{m}$ の HARP 膜の開発に着手し、膜構造の基本設計や成膜技術の開発を進めた。2002 年には、試作した厚さ $35\ \mu\text{m}$ 膜において、1000 倍の電荷増倍率が得られることや、厚膜化による解像度の劣化は認められないことなどを確認した。またあわせて、a-Se 層が厚くなることで、前述の捕獲電子数が増加するため、電子の走行性をより高めることのできる動作温度条件を明らかにした。2004 年には、カラーカメラの赤チャンネル用として、赤色増感材であるテルル (Te) を添加した厚さ $35\ \mu\text{m}$ の HARP 膜を開発し、カラー撮像実験を行った⁽⁵⁻⁸⁾。さらに、厚さ $35\ \mu\text{m}$ を超える厚膜化は成膜装置の制約上、困難と考えられたが、従来比 3 倍の高速度蒸着法や、膜厚モニターの制御技術を確認し、試作プロセスの効率化、安定化を図ることで、これを可能にした。2006 年には、厚さ $50\ \mu\text{m}$ の HARP 膜を試作し、この膜では 2000 倍の電荷増倍率が得られることを確認した。

(2) 光電変換効率改善

HARP 膜では、主材料である a-Se のバンドギャップが $2.0\ \text{eV}$ と大きいことから、入射光の波長が長くなるにつれて光電変換効率が低下する。そのため、赤チャンネル用 HARP 膜には赤色増感材としてバンドギャップが $0.3\ \text{eV}$ と小さい Te を添加していたが、その効果は必ずしも十分とは言えなかった。そこで、Te の添加量を増すことで、長波長光に対する HARP 膜の光電変換効率を高める研究に取り組んだ。それまでの研究から、Te の添加量を増すと、赤色光に対する光電変換効率が向上する一方、光入射側界面付近の電界が強くなり、暗電流や残像の増加、膜欠陥の発生など、特性が劣化することがわかっていた。そこで、光入射側界面付近の電界を弱める働きをする電界緩和層の強化を進め、2005 年に、赤色光に対する光電変換効率を従来の約 2 倍に高めた赤色光増感型 HARP 膜を開発した⁽⁹⁻¹³⁾。また 2007 年

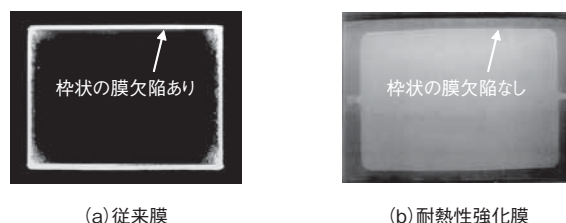


図 9.1 加熱動作後の撮像画面

には、同様の手法を用いることで、緑色光に対する光電変換効率を約 1.5 倍に高めることに成功した。さらに、可視光全域における光電変換効率の抜本的な改善に向けて、可視光域で高い光電変換効率を有するセレン化カドミウム (CdSe) を感光層に用いた次世代高効率 HARP 膜⁽¹⁴⁾の研究を推進した。この次世代高効率 HARP 膜では、感光層と a-Se から成るアバランシェ増倍層とで、最適な電界強度が約 1 けた異なる。これを可能にするため、膜内の電界を制御することができるフッ化リチウム (LiF) の低濃度添加技術を開発した。また、各層に印加されている電界の推定手法を確立した。これらの要素技術開発により、2009 年に、可視光全域での 80% 以上の高い光電変換効率と、約 4 倍の電荷増倍とを可能にした次世代高効率 HARP 膜の試作に成功した⁽¹⁵⁾。

(3) 暗電流低減

上述したように、HARP 膜の感度向上は膜を厚くすることで進めてきたが、同時に高感度を得るにはより高い印加電圧が必要となることから、2007 年以降、同じ膜厚の HARP 膜で電荷増倍率を向上させる研究に取り組んだ。通常、HARP 膜では、膜に印加する電圧を高くするほど、より高い電荷増倍率を得ることができるが、同時に暗電流が増加し、画質劣化を招くことから、実効上の最大電荷増倍率は暗電流の値によって制約される。HARP 膜における暗電流の発生原因はいくつか考えられるが、その 1 つである外部電極からの電荷の注入に着目し、正孔注入阻止性能の強化による暗電流の低減を検討した。その結果、正孔注入阻止層の材料である酸化セリウム (CeO₂) の成膜時に基板を加熱することで、CeO₂ 中の欠陥準位が減少して透明信号電極 (ITO : Indium Tin Oxide) とのエネルギー障壁が拡大し、暗電流が低減されること、すなわち実効上の最大電荷増倍率をより高くできることを見いだした⁽¹⁶⁾。

(4) FOP 上への HARP 膜形成

多様化する科学番組制作への対応に際して、近赤外光や X 線に対しても高い感度を有する撮像デバイスが求められていた。そこで、2005 年から、多数のファイバーを束ねた光学素子である FOP (Fiber Optic Plate) 上に HARP 膜を形成するための研究を開始した。FOP は硬さや弾性係数が異なる 3 種類のガラスから構成されるため、HARP 膜の形成に必要な表面の平坦化は困難と考えられてきたが、新たな研磨技術を開発することでこれを可能にし、FOP 上に形成した HARP 膜で初めてアバランシェ増倍を実現した^(17,18)。

HARP 膜の性能向上や実用化は、浜松ホトニクス (株) との共同研究により進めた。また、暗電流の発生原因や膜内での電荷の走行性など、a-Se の基礎物性の解明は、2008 年から開始したニューヨーク州立大学およ

びカナダ TBRI (Thunder Bay Regional Research Institute) との国際共同研究により行った。

以上の研究は、谷岡健吉、岡崎三郎、鈴木四郎、高島保、江上典文、久保田節、宮川和典、大川裕司、松原智樹、菊地健司、斎藤信雄、小林規矩男が主に担当した。

[久保田 節]

9.1.2 HARP 撮像管・カメラ

(1) ハイビジョン用 HARP 撮像管

撮像管は、電子ビームの集束および偏向を、電界もしくは磁界のどちらで行うかで、4 種類に分類される。そのうち、集束、偏向とも電界で行う全静電型 (SS 型) は、カメラの小型化が可能で、解像度の画面内均一性にも優れていることから、1990 年代は SS 型の電子銃を適用したハイビジョン用 HARP 撮像管の開発に主力が置かれた。しかし、SS 型の電子銃は量産が難しく、カメラの低廉化が期待できないことがわかったため、2000 年代に入ってから、量産性、信頼性に優れた磁界集束、磁界偏向型 (MM 型) 電子銃を適用したハイビジョン用 HARP 撮像管の開発・実用化に取り組んだ。

撮像管の解像度とダイナミックレンジは、主に電子銃のビームアパーチャー径に依存し、この径が小さくなると、高い解像度が得られる反面、ダイナミックレンジは低下する。そこで、ハイビジョン用として必要な解像度を得ることのできる、最大のビームアパーチャー径を試作実験によって求め、その直径を 17.5 μm とした MM 型電子銃を開発した。この MM 型電子銃と 9.1.1 項で述べた厚さ 15 μm の HARP 光電変換膜とを組み合わせ、電荷増倍率 200 倍の 2/3 インチハイビジョン用 HARP 撮像管 (図 9.2) が、2001 年に、浜松ホトニクス (株) より「AP イメージャ」の名称で製品化された⁽¹⁹⁾。

(2) ハイビジョン HARP カメラ

AP イメージャを適用したハンディタイプのハイビジョン HARP カメラの開発を (株) 日立国際電気と共同



図 9.2 2/3 インチ MM 型ハイビジョン HARP 撮像管



図 9.3 ハイビジョン HARP カメラ (口絵参照)

で進め、2002年に「SK-H 5000」(図 9.3)の型名で製品化した。厚さ 15 μm の HARP 膜の駆動には約 1500 V の印加電圧が必要になるため、プリアンプの入力回路には高耐圧のカップリングコンデンサーを挿入しなければならないが、SK-H 5000 では、その配置などを工夫し、浮遊容量の低減を図ることで、ハイビジョンに対応できる高い SN 比を確保した。また、HARP 膜を最適な温度で動作させるため、ペルチェ素子の制御電圧を正負両方向に可変できるようにした温度制御機構を設けた。これにより、周囲の温度環境にかかわらず、電源投入後 30 秒以内に HARP 膜の温度を 30~35 $^{\circ}\text{C}$ に設定することが可能になった。さらに、信号処理回路を LSI 化することで、カメラの小型軽量化と低電力化を図った結果、バッテリーでの運用が可能になり、AC 電源や CCU (Camera Control Unit)が必要であった従来の SS 型ハイビジョン HARP カメラに比べて、格段に運用性が向上した。SK-H 5000 の最大感度は放送用ハイビジョン CCD カメラの約 30 倍(40 lx、F 8)である。また、被写体の動きが遅い場合には、暗電流が非常に少ないという HARP 撮像管の特長を生かした、長時間の蓄積増感動作も可能である。この SK-H 5000 は放送技術局、報道局、各拠点局に配備され、夜間の緊急報道や自然科学番組の制作(図 9.4)などに使用されている⁽²⁰⁻²⁴⁾。また、SK-H 5000 以外にも、AP イメージャを適用した産業用途向けのモノクロカメラ「C 9720」が浜松ホトニクス(株)から製品化された。このカメラは、映像信号のリアルタイム微分処理機能を備えており、クリーンルーム内のじんあいの検出やガラスなどの表面検査に利用されている。

HARP 膜の厚膜化による感度向上の研究を受けて、厚い HARP 膜ではより高い印加電圧が必要になることから、カメラの高圧化についても検討を行った。SK-H 5000 に、5000 V までの高圧が発生できる電源ユニット

の付加とカップリングコンデンサーの高耐圧化改修を施すとともに、カメラ起動時の HARP 膜の温度を 2 段階に制御できる機構を追加し、2004 年に、厚さ 35 μm の HARP 膜を適用したハイビジョン用 HARP 撮像管カラーカメラを試作した。撮影実験の結果、被写体照度 0.1 lx 以下でも鮮明なカラー映像を得られることを確認できた。このカメラは、同年 5 月の北朝鮮拉致被害者家族帰国時の緊急報道に使用され、焦点距離 1600 mm の超望遠レンズと組み合わせて、羽田空港から約 2 km 離れた城南島より家族が搭乗した機体を撮影した。

(3) ドラマ・映画制作用 HARP カメラ

デジタルシネマの普及により、ハイビジョン CCD カメラが映画制作に用いられるケースが増えてきた。しかし、カメラの感度が不十分なため、夜間シーンの撮影においては照明を多用せざるを得ず、肉眼で見えるような自然な夜の映像表現は困難であった。そこで、映画制作など、高画質が要求される分野へのハイビジョン HARP カメラの応用展開を目的に、カメラの画質改善の検討を行った。赤色光に対する光電変換効率を従来の 2 倍に高めた赤色光増感型 HARP 撮像管(9.1.1 項参照)を適用するとともに、基準信号電流値を従来の 2 倍に設定するなどのカメラ内部の信号レベルダイヤの見直しを行った結果、色残像の発生の防止や SN 比、色再現性の改善を図ることができた⁽²⁵⁾。このカメラは開発過程において、小栗康平監督の映画作品「埋もれ木」の夜の森のシーン撮影に試用され⁽²⁶⁾、同作品は 2005 年のカンヌ国際映画祭監督週間でも上映された。また、放送技術局と共同でドラマ制作への応用検討を進め⁽²⁷⁾、特集ドラマ「クライマーズ・ハイ」の谷川岳での夜明けシーンの撮影に利用された。このほかにも、テレビの大画面化が進むにつれて超高感度カメラの映像の高画質化を望む番組演出担当者の要望にこたえて、「ダーウィンが来た!生きもの新伝説」や「NHK スペシャル」などの番組制作に協力した。



図 9.4 HARP カメラで撮影したツキヨタケ
(2008 年 11 月放送「ハイビジョン特集
雨の物語〜日本最多雨 大台ヶ原の四季〜」より) (口絵参照)

(4) FOP-HARP カメラ

FOP上に形成したHARP膜でアバランシェ増倍が確認できたことから(9.1.1項参照)、2005年より、FOP-HARP撮像管の試作に着手した⁽¹⁷⁾。この撮像管を適用したモノクロカメラによりX線撮影実験を進めたほか、2009年には、FOP-HARP撮像管とイメージインテンシファイアー(I.I.)を結合した撮影装置を試作した。I.I.は光増強の役割を担うデバイスの1つであり、これまでも極低照度の被写体の撮影時にHARP撮像管と組み合わせて使用した例はあったが、そのときはI.I.の蛍光面とHARP撮像管とをレンズ光学系で結合する方式をとっていたため、光の損失が大きいという問題があった。しかし、FOPを使うことでI.I.の出射面とHARP膜とをファイバーで結合することができるようになり、光の損失が最小限に抑えられた。また、I.I.の光電面として近赤外光に感度を有するものを選択することで、FOP-HARP撮像管との組み合わせで超高感度で高画質な近赤外光撮影が可能になった⁽²⁸⁾。

以上の研究は、谷岡健吉、岡崎三郎、鈴木四郎、高島保、江上典文、久保田節、宮川和典、大川裕司、松原智樹、菊地健司、斎藤信雄、小林規矩男が主に担当した。

[久保田 節]

9.1.3 固体 HARP 撮像デバイス

CCDの感度を超える固体撮像デバイスを目指して、1993年に着手した、超高感度HARP光電変換膜とCMOS固体走査部とを組み合わせた固体HARP撮像デバイスの研究を引き続き実施した。2000年から2002年にかけて、HARP膜と固体走査部との接合技術や、固体走査部の低雑音化技術、デバイスの高耐圧化技術の開発など、主に固体HARP撮像デバイスの高感度・高SN比化に向けた要素技術開発に取り組んだ。

接合技術については、ガラス基板上に形成したHARP膜と固体走査部とを微小なインジウム(In)電極を介して圧着接合する方法と、固体走査部上にHARP膜を直接積層する方法について検討を進めた。前者については、HARP膜側に画素ごとに分離した金(Au)電極を形成する技術を開発し、この技術を適用したデバイス(図9.5)を試作した結果、これまで問題となっていたIn電極とHARP膜との接触面積のばらつきに起因した固定パターン雑音を大幅に低減することができた^(29,30)。また、後者については、直接積層に向けて、シリコンウエハーに形成された固体走査部表面を化学機械研磨法により研磨する技術を開発し、ウエハー全体で1 μm 以下、局所的には0.05 μm の平坦性を実現した^(31,32)。

また、低雑音化技術に関しては、2000年から、電荷転送型信号読み出し回路の開発に着手した。この回路は、フォトダイオードで光電変換された電荷を、フォトダイ

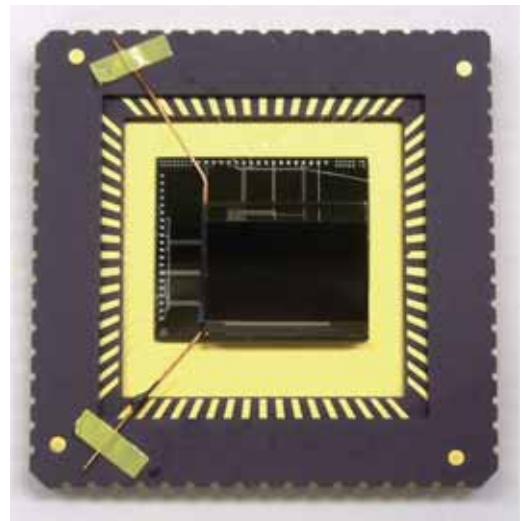


図 9.5 試作した固体 HARP 撮像デバイス (口絵参照)

オードよりも小さな静電容量へ一度、転送することで、信号電圧を増幅し、高SN比を実現するものである。2001年に、画素数128×128の基礎実験用回路(画素サイズ20 μm ×20 μm 、HARP膜は未積層)を試作し、従来に比べて、縦縞固定パターン雑音を4.6dB、ランダム雑音を8.1dB改善できることを実証した⁽³³⁻³⁸⁾。また、2002年には、画素トランジスタのしきい値のばらつきに起因した画素間固定パターン雑音の低減に取り組み、しきい値に依存しない電荷読み出し法を考案、採用することで、画素間固定パターン雑音を約21dB改善した⁽³⁹⁾。

高耐圧化技術に関しては、HARP膜への高抵抗保護膜の積層や、過電流による固体走査部の損傷防止に向けたヒューズ構造の導入などの要素技術開発を進めた。

以上の研究のうち、固体走査部の低雑音化技術の研究は、広島国際大学との共同研究により進めた。

以上の研究は、国分秀樹、渡辺敏英、大竹 浩、山内正仁、渡部俊久、井口義則、石黒雄一、林田哲哉、松下裕樹、諸星光造、小林規矩男、阿部正英、谷岡健吉、江上典文、丸山裕孝、田島利文、後藤正英、瀧口吉郎、宮川和典、小杉美津男、鈴木四郎、高島 保、山田正人、安藤文彦が主に担当した。

[渡部 俊久]

9.1.4 冷陰極 HARP 撮像板

冷陰極HARP撮像板は、電圧を印加するだけで電子を放射する微小な冷陰極を平面上に多数並べた冷陰極アレーと、超高感度なHARP光電変換膜とを向かい合わせた構造の小型超高感度撮像デバイスである。

この撮像板の研究開発は、夜間緊急報道などに不可欠な小型超高感度ハイビジョンカメラの実現に向けて、

1990年からスタートし、2000年までに、その原理実証と基本撮像特性の検証とを完了した。これを受けて、2000年以降は、ハイビジョン用超高感度撮像板の開発に向けて、円すい状の陰極とそれを取り囲むゲート電極から成るスピント型冷陰極と、酸化シリコンを2枚の電極で挟み込んだ HEED (High efficiency Electron Emission Device) 型冷陰極を用いた2種類の撮像板の高解像度化や高感度化などに取り組んだ。

2000年から2001年にかけては、冷陰極アレーの多画素化や、撮像板用パッケージング技術の開発を進めた⁽⁴⁰⁻⁵⁴⁾。多画素化に関しては、画素サイズを従来の300 μm ×300 μm から180 μm ×180 μm に縮小し、画素数を従来(60×60)の約3倍の128×96に増やしたスピント型冷陰極アレーを開発した。また、精密な電極組み立て技術や、高真空封止技術を開発することで、上記冷陰極アレーに厚さ4 μm のHARP膜(電荷増倍率約30倍)を対向させた、厚さ約10mmの撮像板を試作した。撮像実験の結果、試作撮像板では長期間冷陰極アレーを駆動させてもエミッション特性がほとんど劣化しないことなどが確認でき、冷陰極HARP撮像板の実用化にある程度の見通しを得ることができた。

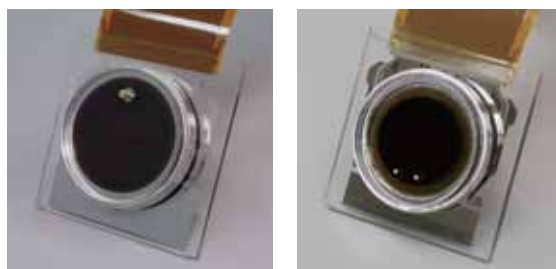
2002年には、さらなる多画素化と高感度化を図った、画素サイズ90 μm ×90 μm 、画素数256×192の撮像板を試作した^(55,56)。この撮像板では、冷陰極アレー、メッシュ電極およびHARP膜をより近接させて配置し、メッシュ電極に高電圧を印加することで、冷陰極アレーから放射された電子ビームの空間広がりを抑制した。これにより、ほぼ画素数に相当する解像度を得ることができた。また、厚さ8 μm のHARP膜(電荷増倍率約60倍)を適用することで、従来の2倍の感度を実現することができた。

2003年から2004年にかけては、画素の微細化、磁界を用いた電子ビーム集束技術の開発、高感度化、および新たな冷陰極アレー駆動技術の開発などに取り組んだ⁽⁵⁷⁻⁶⁴⁾。それまでの撮像板では、解像度を左右する電子ビームの空間広がりを、冷陰極アレーとHARP膜の近接配置やメッシュ電極への高電圧印加により抑制していたが、画素サイズをさらに縮小すると、これらの方法では十分な解像度が得られないことがわかった。そこで、新たに永久磁石を用いた磁界による電子ビーム集束技術を開発し、画素サイズを50 μm ×50 μm に微細化した撮像板(画素数256×192)に適用した。その結果、画素サイズに相当する白黒の縦縞パターンを撮影したときの振幅変調度が従来の約10%から約75%に向上し、解像度を大幅に改善することができた。高感度化に関しては、厚さ25 μm (電荷増倍率約600倍)のHARP膜を撮像板に適用し、電荷増倍率に比例した超高感度が得られること

や、膜の静電容量が小さくなって残像が大幅に低減することなどを確認した。また、冷陰極アレーの駆動については、駆動用ICチップを実装したフレキシブル基板を冷陰極アレーに近接させて接続する技術を開発し、出力信号への駆動パルスの飛び込みなどを抑制した。

2004年までは、外部から供給したパルス電圧で撮像板の冷陰極アレーを直接駆動していたが、この方式ではアレーの水平および垂直方向の画素数に相当する数の配線を外部に取り出す必要があり、撮像板の多画素化を阻害する大きな要因となっていた。そこで、2005年に、駆動回路を内蔵したHEED型冷陰極アレーを開発し、これを適用した基礎実験用256×192画素撮像板(画素サイズ50 μm ×50 μm)を試作した⁽⁶⁵⁻⁶⁸⁾。駆動回路内蔵冷陰極アレーには、画素ごとに冷陰極を駆動するための高耐圧MOSトランジスタを、また、画素領域の周辺部にこれらのMOSトランジスタを制御するための走査回路を配置したアクティブ駆動方式を採用した。撮像実験の結果、試作撮像板では12本の外部接続配線を介してクロック信号や駆動電圧などを加えるだけで、冷陰極アレーを駆動できることがわかり、撮像板の多画素化を阻害する1つの要因を取り除くことができた。

2006年は、撮像板のさらなる多画素化へ向けて、スピント型冷陰極アレーとHEED型冷陰極アレーの高集積化に取り組んだ⁽⁶⁹⁻⁷⁵⁾。スピント型については、HEED型と同様にアクティブ駆動回路の内蔵に取り組み、これを達成した。また、HEED型については、冷陰極の高効率化や内蔵駆動回路との整合性を図ることで放射電流密度を従来の10倍に高めた。これらの要素技術開発により、従来に比べて格段に画素の集積度を高めた、画素数640×480、画素サイズ20 μm ×20 μm のスピント型およびHEED型冷陰極アレーの開発に成功した。またあわせて、これらの冷陰極アレーに厚さ15 μm のHARP膜(電荷増倍率約200倍)を組み合わせた標準テレビ用1インチ磁界集束型撮像板を試作し(図9.6)、標準テレビの画素数に相当する良好な解像度が得られることを確認した。



スピント型

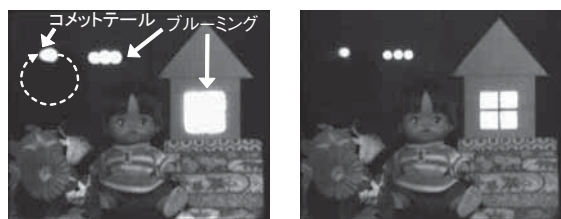
HEED型

図9.6 標準テレビ用撮像板(口絵参照)

2007年は、2004年から継続して進めていた、超高感度撮影時に強い光(ハイライト)が入射した際の画質改善に本格的に取り組んだ⁽⁷⁶⁻⁸⁰⁾。撮像板では、HARP膜にハイライトが入射すると、その部分に多量の電荷(正孔)が生成、増倍、蓄積され、膜の電子ビーム走査側の電位が著しく上昇する。その結果、走査中の電子ビームが電位の高いハイライト入射部に引き寄せられ、ブルーミング(高輝度な被写体が実際より膨らんで見える現象)と呼ばれる偽信号が発生する。また、1回の電子ビーム走査ではハイライト入射部に蓄積された多量の電荷を読み出すことができず、残像の一種である comet テール(移動する高輝度な被写体がいすい星のように尾を引く現象)と呼ばれる偽信号が発生し、画質を著しく損なう。この問題を解決するため、冷陰極アレーから放射された電子ビームを利用することで、ハイライト入射時に HARP 膜に多量に生成、蓄積された電荷の一部を走査前の水平ブランキング期間に、また、HARP 膜の読み残し電荷を走査直後の水平ブランキング期間に取り除くという新たな駆動法を考案した。スピント型冷陰極アレーを適用した撮像板にこの駆動法を採用した結果、映像信号の白レベルの数百倍に相当するハイライトが入射したときでも、ブルーミングや comet テールの発生を抑制することができることがわかり、所期の目標を達成することができた(図 9.7)。

2008年から2009年にかけては撮像板の小型化に向けて、HEED型冷陰極アレーの微細化を行うとともに、永久磁石や電磁コイルを必要とせず冷陰極アレー上に設けた集束電極に電圧を印加することで、スピント型冷陰極から放射された電子ビームを集束する電界集束系の開発を進めた^(81,82)。

HEED型冷陰極アレーの微細化については、画素サイズ $13.75\mu\text{m} \times 13.75\mu\text{m}$ 、画素数 640×480 の冷陰極アレーを開発し、これを適用した標準テレビ用 2/3 インチ磁界集束型撮像板の試作を行った。試作撮像板では冷陰極アレーのエミッションサイト(電子ビームが放射されるくぼみ)の高集積化を図ることで、少ない画素面積でも十分な放射電流が得られること、および画素サイズに相当する解像度が得られることを確認した⁽⁸³⁾。



残留電荷除去なし

残留電荷除去あり

図 9.7 残留電荷除去駆動法の効果

電界集束系については、FED(Field Emission Display)用として、すでにいくつかが提案されていたが、これらの集束系では、電子ビームの集束度を強めるために集束電極の電圧を下げると、陰極先端近傍の電界強度が弱められ、電子ビーム量が極端に減少するという欠点があり、FEDより格段に画素が小さく、より多くの電子ビーム量を必要とする撮像板への適用は困難であった。そこで、従来の電界集束系の欠点を解消するため、新たにゲート電極の厚さを従来の3倍にした、画素サイズ $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$ 、画素数 100×75 の基礎実験用電界集束スピント型冷陰極アレーとこれを適用した撮像板を試作した。撮像実験の結果、集束度は若干足りなかったが、従来に比べて、約8倍の電子ビーム量を得ることができ、電界集束型撮像板の開発に向けた有用な知見を得ることができた⁽⁸⁴⁾。

以上の研究は、2000年4月から2001年2月までは双葉電子工業(株)との共同研究、2001年3月から2005年3月までは双葉電子工業(株)、浜松ホトニクス(株)との共同研究、2005年4月からは双葉電子工業(株)、浜松ホトニクス(株)、パイオニア(株)との共同研究により進めた。

以上の研究は、江上典文、岡崎三郎、山岸敏郎、難波正和、瀧口吉郎、渡部俊久、平野喜之、長田勝玄、本田悠葵、阿部正英、谷岡健吉、高野善道、久保田節、宮川和典、大川裕司、相原聡、菊地健司、瀬尾北斗が主に担当した。

[瀧口 吉郎]

9.1.5 HARP 撮像デバイスの放送以外への応用

(1) 医療

東海大学医学部と共同で進めてきた X 線微小血管撮影実験の結果をもとに、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の研究開発プロジェクト「次世代単色 X 線治療・診断システム」(1999~2003年度)により、HARPカメラを用いた病院設置型微小血管診断装置(図 9.8)が開発され、2004年3月から国立循環器病センターにおいて、血管再生治療の評価などへの臨床応用が開始された⁽⁸⁵⁾。また、2006年からは、筑波大学、高エネルギー加速器研究機構とともに、FOP-HARP 撮像管カメラの微小血管撮影への適用実験を開始し、造影剤濃度低減によるじん臓の負担軽減や診断対象部位拡大の可能性などが明らかになった⁽⁸⁶⁻⁸⁸⁾。

眼科関係では、手術時の照明低減による患者の負担軽減を目的に、手術用顕微鏡への HARP カメラの適用が検討され、2001年8月には大阪大学附属病院において、低照度下(従来の 1/3 から 1/10 程度の照度)での HARP カメラを用いた網膜手術が初めて行われた⁽⁸⁹⁾。

日本でも内視鏡を用いた子宮内胎児治療が行われるよ



図 9.8 HARP カメラを用いた病院設置型微小血管診断装置
(国立循環器病センター提供)

うになってきたが、CCD カメラを用いた従来の内視鏡では強い照明が必要で、発達中の胎児の眼に対する影響や羊水の温度の上昇が懸念されている。そこで、NEDO と厚生労働省の連携型研究開発事業である委託研究「インテリジェント手術機器研究開発プロジェクト」を 2007 年度から 2009 年度まで受託し、小型の HARP 撮像デバイスの実現を目指して開発を進めている冷陰極 HARP 撮像板を胎児治療用内視鏡に応用する検討を進めた⁽⁹⁰⁾。

(2) バイオ

細胞内で起きている現象のメカニズムを解明するための装置には、電子顕微鏡レベルの分解能が必要とされるが、電子顕微鏡では細胞を生きのまま観察できないという問題があった。そのため、NEDO の研究開発プロジェクトである委託研究「細胞内ネットワークのダイナミズム解析技術開発」を 2002 年度から 2006 年度まで受託し、横河電機(株)が開発したニポウディスク式共焦点ユニットと HARP カメラを組み合わせた新型レーザー顕微鏡を開発した。この顕微鏡は、感度、撮影速度とも従来の光学顕微鏡の 100 倍以上の性能をもつとともに、100 nm 以下という電子顕微鏡に匹敵する解像度を実現している。同顕微鏡により細胞内小器官「ゴルジ体」のタンパク質輸送メカニズムが解明され、その研究成果が Nature 誌に掲載された⁽⁹¹⁾。

(3) 深海探査

2/3 インチ MM 型ハイビジョン用 HARP 撮像管を適用した超高感度カメラが 2001 年に完成し、3000 m 級深海探査機「ハイバードルフィン」に装備された。このカメラは、容積の小さな耐圧容器に格納するため、特殊な折り返し型プリズム分解光学系を採用し、撮像管カメラとしては従来にないコンパクト化(レンズ込みの直径 190 mm、長さ 450 mm)を実現しており⁽⁹²⁻⁹⁴⁾、2004 年 12 月に発生したインドネシア・スマトラ島沖大地震の震源域海底調査などに利用された。また、このカメラで撮影された熱水噴出孔やその周囲に群がるゴエモンコシオリエビの映像が、2007 年、BBC(英国放送協会)との国際共同制作番組「プラネットアース 第 11 集 青い砂漠外洋と深海」で使用された。なお、同カメラのために開発された回路などの要素技術は、**9.1.2 項**で述べた放送用のハイビジョン HARP カメラ SK-H 5000 の開発に生かされた。

以上のハイビジョン用 HARP 撮像管カメラの深海探査への応用に関する調査研究は、1999 年 9 月から 2002 年 3 月まで(独)海洋研究開発機構との共同研究により進めた。

(4) 理学

2003 年に東京大学農学部と共同で、HARP カメラによる暗中の稲の根の撮影実験を行い、5 時間で 4 回転という一定の周期でらせん運動を行いながら成長する過程が明らかになり、その様子が「ニュース 10」で紹介された⁽⁹⁵⁾。

HARP 光電変換膜は X 線にも高い感度を有することから、X 線を透過するベリリウム基板上に形成された HARP 光電変換膜と冷陰極アレーを組み合わせたタンパク質結晶構造解析用 X 線検出器の検討を、(独)科学技術振興機構(JST)の先端計測分析技術・機器開発事業「X 線 HARP を用いた生体超高分子構造機能解析装置」(2004~2007 年度)として進めた⁽⁹⁶⁾。

(5) 安全・安心

アメリカでの 2001 年の同時多発テロを受けて、日本でも主要な港湾設備の警備を強化することになり、2005 年に HARP カメラを用いた東京湾口監視システムが導入された。同事例をもとに、2007 年 6 月に首相官邸で開催された総合科学技術会議において、安全・安心な社会の実現に役立つ技術として HARP カメラが紹介された。

夜間など悪条件下でのヘリコプターからの撮影能力向上による被災状況の早期把握を目的とした総務省消防庁「ヘリコプターによる被災地情報収集の在り方検討会」(2006 年 2 月~2007 年 3 月)に参加し、HARP カメラをはじめとする各種超高感度カメラの有効性検討実験に協

力した。

以上の研究は、谷岡健吉、岡崎三郎、鈴木四郎、高島保、江上典文、久保田節、宮川和典、大川裕司、松原智樹、菊地健司、斎藤信雄、小林規距男が主に担当した。

[久保田 節]

9.1.6 シリコンナノ結晶光電変換膜

光電変換膜を積層した高感度な固体撮像デバイスの実現を目指して、引き続き、低電界でのアバランシェ増倍などの優れた特性が期待できるシリコンナノ結晶光電変換膜の研究に取り組んだ。

2000年には、低圧化学気相堆積法を使ったシリコン量子ドット(図9.9)の自己形成とドット表面の熱酸化とを連続的に繰り返すことにより作製したシリコンナノ結晶膜が、光電変換特性を示すことを、広島大学との連携により初めて確認した⁽⁹⁷⁻¹⁰⁰⁾。また、シリコンナノ結晶膜がその構成要素であるシリコン量子ドットの光吸収スペクトルに対応した分光感度スペクトルを有することを明らかにし、シリコン量子ドットのサイズを調節することで、分光感度特性を選択できる可能性を示した。

アバランシェ増倍の実現に向けては、シリコンナノ結晶膜の厚膜化と光電変換効率の改善が課題であった。これらの課題を解決するため、2001年からはシリコンナノ結晶膜作製装置の新規開発を進めた。2002年には、新装置において、従来装置の約3倍の速度でシリコンナノ結晶膜を成膜することに成功し、厚膜化の見通しを得た。また、2003年から2004年にかけては、シリコンナノ結晶膜の構造最適化を進めた。その結果、シリコン量子ドット表面の酸化膜厚の調整によりドット空間密度を増大させるとともに、水素ラジカル雰囲気中での熱処理によりシリコンナノ結晶膜中に含まれる構造欠陥を低減させることで、従来のシリコンナノ結晶膜では0.1%以下であった光電変換効率を約50%にまで大幅に改善できることを明らかにした^(101-103,105)。

2005年から2006年にかけては、アバランシェ増倍型光電変換膜としての可能性を実証するための基礎検討を行った。その結果、シリコンナノ結晶膜を冷却することで光電変換効率が増大し、77 Kでは約2400%に達する

ことを確認した^(104,106)。また、a-Se光電変換膜よりも低い電界でアバランシェ増倍が起きることを確認し、シリコンナノ結晶膜が低電圧駆動可能なアバランシェ増倍型光電変換膜として有望であるとの結論を得た。

以上の研究は、阿部正英、佐藤史郎、谷岡健吉、斎藤信雄、久保田節、大竹 浩、平野喜之、相原 聡が主に担当した。

[平野 喜之]

9.2 超高速撮像デバイス・カメラ

肉眼や通常のテレビカメラではとらえることができない高速現象を可視化する新たな映像表現の開拓を目的に、放送用超高速撮像デバイス、およびこれを適用した超高速カメラに関する研究を2003年に開始した。

高速現象を可視化するための超高速カメラは主に産業計測用途を中心に開発が進められてきたが、これらの超高速カメラには通常、CMOS撮像デバイスが用いられている。これは、長い転送路を経て信号電荷を読み出すCCDに比べて、X-Yマトリックスのスイッチング方式により信号電荷を読み出すCMOS撮像デバイスの方がはるかに高速な動作が可能である。しかし一方で、CMOS撮像デバイスはCCDに比べてノイズが多く感度が不十分であるという問題があり、例えば、既設の照明のみで対応しなければならない野球のナイトゲーム中継などでは、高画質な超高速撮影が困難になることが予想された。

そこで2003年は、近畿大学との連携、(株)島津製作所との共同研究により、信号電荷を蓄積するメモリーを画素内のフォトダイオードに直結して設けるとともにフォトダイオードを大面積化することで、超高速動作と高感度とを両立させた8万画素の超高速CCD⁽¹⁰⁷⁾を適用した3板式カラーカメラ^(108,109)を試作し、撮影実験を行った。その結果、最大100万枚/秒までの超高速撮影に対応できることや、CMOS撮像デバイスを用いた超高速カメラの約10倍の高い感度が得られることなどが確認できた。また、試作カメラを屋内外のスポーツ中継で試用したところ、特別な照明なしに、被写体の動きに応じた超高速撮影(例えば、野球のナイトゲームでは1000枚/秒、ゴルフ中継では4000枚/秒など)を実現でき、放送分野での有効性が実証された。

2004年は、放送への本格的な応用に向けて、超高速CCDの性能向上に取り組んだ⁽¹¹⁰⁾。転送路の幅の縮小や、画素上部に配置している金属配線数の削減など、レイアウト設計の最適化を図ることで集積度を高め、従来のデバイスサイズで、画素数を約2倍の15万に、フォトダイオードの面積を約1.3倍に増すことに成功した。また、超高速撮影時の記録時間をより長くするた

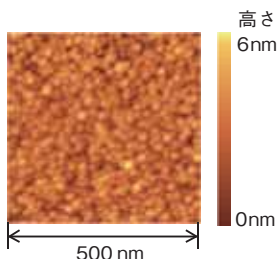


図9.9 シリコン量子ドットの原子間力顕微鏡像

めに、飽和電荷量を勘案しつつ、メモリー面積をデザインルールの最小値である $3.0\ \mu\text{m} \times 3.6\ \mu\text{m}$ に縮小することで、記録枚数を従来の約 1.4 倍の 144 枚まで増やした。さらに、用途によっては、より長い撮影時間が要求されることがあるため、撮影した画像データを高速で外部へ出力できるように、水平 CCD を 8 分割し、並列に駆動する構造とした。この場合、従来の配置では各分割部に出力アンプを配置する面積が確保できなくなるため、水平 CCD の後段を U 字型に曲げることで解決を図った。

超高速度 CCD は内部にメモリーを有する特殊な構造を採用しているため、このメモリーも画素と見なせば、2004 年に試作した 15 万画素超高速度 CCD は、プロセス上、2000 万画素の CCD を製作することに匹敵する。このことから、デバイス単体で、さらなる多画素化を行った場合、製作歩留まりの著しい低下が予想されたため、2005 年は、超高速度 CCD の多画素化に向けて、15 万画素超高速度 CCD を 2 枚、はり合わせることに取り組んだ。はり合わせに必要な要素技術として、15 万画素 CCD の端面切削時のウェハーの欠けや、切削面への機械的ダメージによるリーク電流などを防止できる高精度切削技術と、2 枚の CCD のフォトダイオードの中心を $1\ \mu\text{m}$ 以下の精度ではり合わせることでできる高精度位置合わせ技術を開発し、これらの技術を用いることで 30 万画素超高速度 CCD (図 9.10) を実現した⁽¹¹¹⁾。

2006 年には、前年度に開発した 30 万画素超高速度 CCD にオンチップカラーフィルターを搭載するとともに、これを適用した小型の単板式超高速度カラーカメラ (図 9.11) を試作した^(112, 113)。このカメラに、1000 枚/秒以下の撮影速度であれば CCD で生成された信号電荷を順次、外部に読み出すことができる撮影モードを設け、長時間の連続撮影(外部メモリー容量が 2 ギガバイトの場合、1000 枚/秒の撮影速度で約 5 秒)を可能にした。水平 CCD の並列駆動時に各出力アンプの特性の不均一性に起因したノイズが発生する問題については、各アン

プを最適な駆動電圧で動作させるための自動補正回路を考案し、付加することで解決した。さらに、超高速度撮影では限られた記録時間で被写体の動きを取り込まなければならないため、カメラの試作にあわせて、高速ラインセンサーを用いた高精度なトリガー信号(撮影開始タイミング信号)発生装置を開発した。試作したカメラは、「ダーウィンが来た! 生きもの新伝説」での水面上を走るバシリスクトカゲの撮影 (図 9.12) をはじめ、数多くの番組制作に使用された^(115, 116)。また、研究成果の社会還元の一環として、眼科用超音波手術機器の動作解析などにも取り組み、医療や産業など、放送以外の分野での有用性を確認した。

2007 年は、上記 30 万画素超高速度 CCD の高感度化に向けて、集光効率を高めるためのオンチップマイクロレンズを開発した。超高速度 CCD のフォトダイオードは縦長形状 ($50\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$) で、各フォトダイオードはその長手方向に連続して配置されている。そのため、レンズの形状を幅約 $50\ \mu\text{m}$ の半円筒形とし、このような大きなレンズを作製するため、新たに樹脂による型押し法を考案した⁽¹¹⁴⁾。また、レンズと CCD をはり合わせ際には、その接触面を減らして CCD へのダメージを



図 9.11 30 万画素単板式超高速度カラーカメラ (口絵参照)

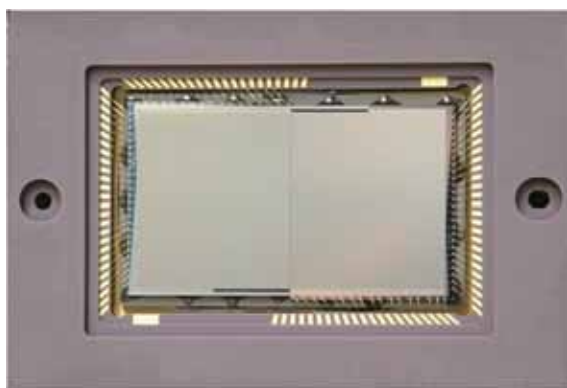


図 9.10 30 万画素超高速度 CCD



図 9.12 超高速度カメラで撮影したバシリスクトカゲ (撮影速度: 250 枚/秒、2007 年 1 月放送「ダーウィンが来た! 生きもの新伝説」より) (口絵参照)

軽減するためにレンズを下向きにするとともに、高い精度が求められるレンズと CCD の位置合わせのために、レーザー顕微鏡と圧電素子を用いた位置合わせ装置を開発し、 $\pm 2 \mu\text{m}$ 以下の精度でレンズと CCD をはり合わせることに成功した。このマイクロレンズの適用により、従来の約 2 倍の感度向上を実現し、より高速度な撮影や、長焦点レンズによる撮影、顕微鏡を用いた高倍率撮影などにも対応可能になった。

2008 年には、撮影対象の広がりにあわせて、超高速度撮影時の記録枚数の増加を求める声が高まってきたことから、2 分割光学系(ビームスプリッター)の 2 つの出力端にそれぞれ 30 万画素超高速度 CCD を取り付けた構成の撮影装置を試作した。各 CCD の撮影条件は個別に設定でき、トリガー信号で 2 つの CCD の撮影をつなぐことにより、記録可能な枚数を従来の 2 倍の 288 枚に増すことができる。

2009 年には、超高速度カメラの抜本的な高感度化に向けて、裏面照射型超高速度 CCD の要素技術開発に着手した。配線などがない裏面から光を入射させることで高感度化を図る裏面照射型構造は、すでに、通常の CCD の一部に採用されているが、この構造を超高速度 CCD に適用する際には、CCD の裏面に入射した光によって生成された電子を短時間で電荷集積部に集めることが不可欠となる。そこで、電子を高速で移動、集積させることができる内部電界を形成するため、p-n2 重エピタキシャル層から成る新たな裏面照射構造を考案した。内部電界分布と裏面近傍で発生した電子の移動経路のシミュレーション結果から、電子が発生地点から電荷集積部までに到達する時間は約 1.9 ナノ秒であることがわかり、従来に比べて約 6 倍程度の高感度化が見込める裏面照射型超高速度 CCD の開発に見通しを得た⁽¹¹⁷⁻¹¹⁹⁾。

なお、2009 年 11 月には、15 万画素超高速度 CCD を適用した産業学術用途向けの小型単板カラーカメラ「HS-106 E」が(株)ナックイメージテクノロジーから製品化された。

超高速度撮像デバイスの高性能化については 2009 年 4 月から近畿大学との共同研究により進めた。

以上の研究は、北村和也、米内 淳、新井俊希、山田 正人、松下裕樹、大竹 浩、林田哲哉、丸山裕孝、栗田 泰市郎、谷岡健吉が主に担当した。

〔丸山 裕孝〕

9.3 有機撮像デバイス

3 板式カラーカメラと同等な撮像特性を有する超小型単板カラーカメラの実現に向けて、光の 3 原色それぞれに感度をもつ有機光電変換膜と各有機光電変換膜で生成された電荷を読み出す透明な回路とを交互に積層するこ

とで、入射した光を深さ方向で色分離する新たな単板カラー撮像デバイス(有機撮像デバイス)の研究開発を 2000 年に開始した。

有機撮像デバイスの開発には、まず、光の 3 原色のうち、いずれか 1 色の光のみを選択的に吸収して電荷に変換し、かつ、ほかの色は透過する有機光電変換膜が必要となる。そこで、2000 年から 2002 年にかけては、有機材料の光導電特性についての基礎調査を進め、有機光電変換膜の波長選択機能を検証した^(120,121)。光の 3 原色のうち 1 色の光のみを吸収して、ほかの色は透過する有機光電変換膜の色は、光の 3 原色の補色に見えるとの考えなどをもとに、青色に感度をもつ有機光電変換膜(青色用有機膜)として、クマリン 6 を添加したポリシラン塗布膜を試作した。同様に緑色用有機膜としてローダミン 6G を添加したポリシラン塗布膜を、赤色用有機膜として亜鉛フタロシアニンとアルミニウムキノリンを接合した蒸着膜を試作し、これらの膜を透明電極とアルミニウム電極で挟んだ 3 枚のサンドイッチセルの分光感度特性を調べた。その結果、これらの膜は光の 3 原色それぞれにのみ感度を有し、有機材料の種類を替えることで膜の波長選択性を制御できることがわかった。また、青色用および緑色用有機膜の光電変換効率(照射した光子数のうち、光電流として取り出すことのできる電子数の割合)は約 1% であったが、正孔輸送性の有機材料(亜鉛フタロシアニン)と電子輸送性の有機材料(アルミニウムキノリン)とを接合した赤色用有機膜では約 20% の効率が得られ、有機光電変換膜の光電変換効率の改善に向けて重要な指針を得ることができた。

2003 年には、亜鉛フタロシアニンを光電変換材料とした赤色用有機膜をハイビジョン用撮像管に適用し、撮像実験を行った⁽¹²²⁾(図 9.13)。試作管では 800 TV 本以上の解像度が得られ、有機材料を用いることでハイビジョンにも十分対応可能な高精細撮像デバイスが実現できることや、有機光電変換膜では横方向の比抵抗が高く、固体撮像デバイスなどに適用したときに膜を画素ごとに

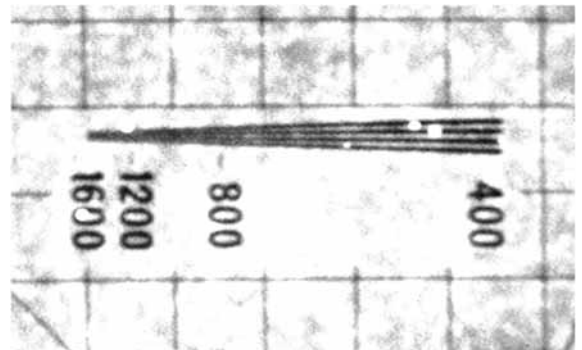


図 9.13 試作管のハイビジョン撮像例

分割する必要がないことなどが確認できた。

2004 年は、撮像管による有機光電変換膜の評価をもとに、青色用有機膜の光電変換効率の改善に取り組んだ。2002 年に得られた指針に基づいて、正孔輸送性の有機材料(ポルフィリン誘導体)と電子輸送性の有機材料(アルミニウムキノリン)を接合した青色用有機膜を試作し、光電変換効率を従来の 1% から 20% に向上させることに成功した⁽¹²³⁾。しかし一方で、20% の効率が得られるときの動作電圧は約 90 V で、動作電圧の低減が課題として残された。

一方、目標とする、有機膜を積層した単板カラー撮像デバイスの実現には、有機膜内で生成された電荷を固体回路で読み出す必要がある。そこで、CMOS 回路を用いた信号読み出しの基礎実験を 2004 年から 2005 年にかけて行った^(124, 125)。画素数 128×128、画素有効面積 1.34×1.34 mm² の CMOS 回路を試作し、この回路上に亜鉛フタロシアニンから成る赤色用有機膜を形成したデバイスの動作特性を調べた。その結果、赤色光を照射したときにみに信号が出力されることなどがわかり、有機膜を固体回路上に形成することで、有機膜からの光生成電荷の読み出しが可能であることが確認できた。

有機光電変換膜の光電変換効率については、すでに青色用および赤色用有機膜で 20% の効率が得られていたため、2005 年から 2006 年にかけては緑色用有機膜の光電変換効率改善に取り組んだ。正孔輸送性の有機材料にキナクリドン誘導体を、電子輸送性の有機材料にペリレン誘導体を選択し、これらを接合した蒸着膜を試作した。接合膜の厚さと光電変換効率の関係を詳細に調べた結果、効率を 35% にまで改善することができた⁽¹²⁶⁾。

2007 年には、有機光電変換膜を積層したときの特性を調べるために、光の 3 原色それぞれに感度を有する有機膜を透明電極で挟み込んだ 3 種類のサンドイッチセルを試作し、これらを光の照射側から青、緑、赤色用セルの順に積層したカラーセンサーの分光感度特性を評価した⁽¹²⁷⁾。正孔輸送性の光電変換材料として、青色用にはポルフィリン誘導体を、緑色用にはキナクリドン誘導体を、赤色用には亜鉛フタロシアニンを、すべての膜はアルミニウムキノリン(電子輸送性材料)との接合構造とした。このカラーセンサーでは、白色光を照射したときに、各セルで光の 3 原色にほぼ対応した光電流応答が得られ、有機膜を積層した構造で光の 3 原色を分離できることがわかった。

以上の結果を受けて、2008 年には有機膜を積層した基礎実験用単板カラー撮像デバイスを試作した⁽¹²⁸⁾。この撮像デバイスは、緑色光、赤色光にそれぞれ感度をもつ有機膜を個別に、可視光を透過する薄膜トランジスター回路(光透過型 TFT 回路)上に形成し(図 9.14)、

光の入射側から緑色用有機膜、赤色用有機膜の順に重ね合わせたものである。緑色用有機膜の光電変換材料にはキナクリドン誘導体とペリレン誘導体を、赤色用有機膜にはフタロシアニン誘導体を用いた。また、有機膜に電圧を印加する電極には、下層に光を透過させる必要がない赤色用有機膜ではアルミニウム電極を、入射光側に位置する緑色用有機膜では透明電極を用いた。一方、有機膜で生成された電荷を読み出す光透過型 TFT 回路には、可視光を透過する酸化亜鉛(ZnO)を半導体層に使用した ZnO TFT 回路(画素数 47×30、画素ピッチ 600 μm)を適用した。試作したデバイスで赤色と緑色から成る被写体を撮影した結果、入射光パターンに対応したカラー映像を得ることができ、光の 3 原色それぞれに感度をもつ有機膜と、各有機膜から電荷を読み出す光透過型 TFT 回路とを交互に積層した構造でカラー撮像が可能であることを実証した。

また、2008 年から 2009 年にかけては、上記有機撮像デバイスのフルカラー化に向けて、正孔輸送性材料に電子輸送性材料を添加することで、青色用有機膜の動作電圧の低減と光電変換効率の改善に取り組んだ⁽¹²⁹⁾。正孔輸送性の光電変換材料としてクマリン 30 を、電子輸送性の材料としてフラーレン(C₆₀)を選択し、C₆₀ を 10% 添加したクマリン 30 を用いた青色用有機膜を試作した。この膜の分光感度特性を調べた結果、試作膜では 10 V の印加電圧で光電変換効率が 64% に達し、所期の目標を達成することができた。さらに 2009 年には、有機撮像デバイスの解像度の改善に向けて、ZnO TFT 回路の微細化・多画素化を進めた。新たに画素ピッチ 100 μm、128×96 画素の ZnO TFT 回路を設計・試作し、信号読み出し回路として動作することを確認した。

以上の研究のうち、塗布型有機膜の研究は、2002 年 4

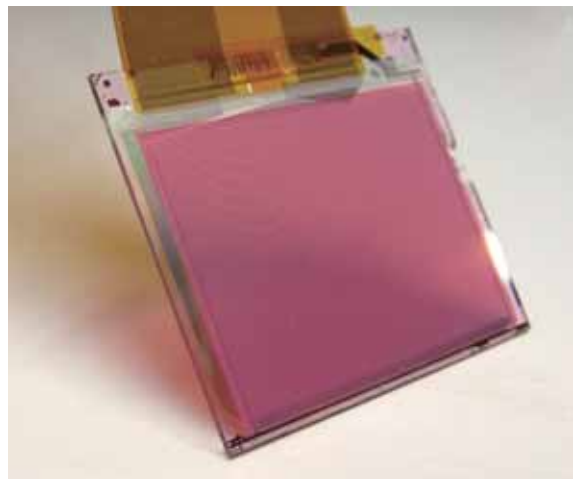


図 9.14 光透過型 TFT 回路上に緑色用有機膜を積層した素子

月から埼玉大学との共同研究、蒸着型有機膜の研究は、2005年11月から2007年3月まで富士写真フイルム(株)との共同研究によりそれぞれ進めた。ZnO TFT 回路の研究は、2007年9月から2010年3月まで(財)高知県産業振興センターおよび高知工科大学との連携により、また、2009年12月から高知工科大学との共同研究により進めた。

以上の研究は、阿部正英、谷岡健吉、江上典文、斎藤信雄、田島利文、久保田節、大竹 浩、渡部俊久、鈴木四郎、高島 保、難波正和、宮川和典、平野喜之、大川裕司、相原 聡、松原智樹、瀬尾北斗が主に担当した。

[相原 聡]

9.4 広ダイナミックレンジ撮像デバイス

1998年に開始した生体型撮像技術研究の中でのダイナミックレンジの改善に関する提案を受けて、2000年から2001年にかけて、パルス出力型の広ダイナミックレンジ撮像デバイスに関する研究に取り組んだ。

パルス出力型広ダイナミックレンジ撮像デバイスは、通常の蓄積電荷の読み出しに加え、フォトダイオードの飽和情報を検出する手段を備えたデバイスである。2000年に、画素数 32×32 の基礎実験用デバイスを設計・試作した(図 9.15)。通常の撮像デバイスでは、強い光が入射し、蓄積電荷量がフォトダイオードの蓄積容量によって決まる上限値に達すると、信号出力が飽和する。これに対して、このデバイスでは、フォトダイオードの蓄積電荷量が、外部から与えたしきい値を超えると、パルス信号が画素外に出力され、同時にフォトダイオードがリセットされる。フィールド期間内に出力されたパル

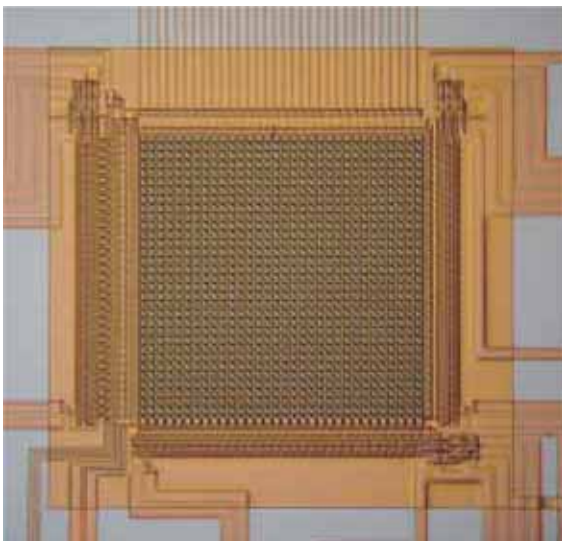


図 9.15 広ダイナミックレンジ撮像デバイス (口絵参照)

ス信号の数は、画素外に設けたカウンターで計測され、外部に出力される。また、このとき、フォトダイオードに残った電荷量もアナログ信号として出力され、両信号から広ダイナミックレンジな画像が再構成される。撮像実験の結果、試作デバイスでは上述した動作がほぼ実現できていることが確認できたが、一方で、外部から一定の値のしきい値を与えた場合には、パルス信号の出力タイミングの関係から、入射した光量とパルス信号の数との間に不整合が生じることがわかった。

この問題を解決するため、2001年に、しきい値を1フィールド内で可変する新たな駆動法を考案した。撮像実験の結果、入射光量に比例した数のパルス信号が得られ、所期の目標を達成することができた⁽¹³⁰⁻¹³²⁾。

以上の研究は、阿部正英、渡辺敏英、伊藤崇之、安藤文彦、丸山裕孝、大竹 浩、山野浩司、瀧口吉郎、渡部俊久、後藤正英が主に担当した。

[瀧口 吉郎]

9.5 ハイビジョン順次走査撮像技術

ハイビジョンの高画質化の一環として、カメラの順次走査化の研究を行った。2000年には、2/3インチ200万画素ハイビジョンCCDの倍速駆動を実現した。全画素分の蓄積部をもつM-FIT(Multiple Frame Interline Transfer)CCDを、水平駆動周波数148.5MHz、FIT転送用垂直駆動周波数1.16MHzで駆動した。このCCDを用いてRGB3板式カメラを試作し、フィールドごとの出力映像を外部で合成することによりフレーム周波数60Hzの順次走査映像を得た^(133, 134)。

2002年には、既存のインターレース用FIT-CCDを用いて順次走査映像を出力する新しい駆動方式を提案した。フレーム内の奇数ライン信号はFIT駆動(蓄積部に蓄積してから読み出す)、偶数ライン信号はIT駆動(蓄積することなく読み出す)とすることで、全ラインを1/60秒内に順次走査することを可能にした。この駆動方式を用いた3板式カラーカメラヘッドを試作した。限界解像度は水平、垂直ともに1000TV本以上、垂直のMTF(Modulation Transfer Function)特性は700TV本で57%であった。あわせて、輪郭補償、ガンマ変換、1080/I変換(2ライン加算)の機能を有する順次走査用カメラコントロールユニット(CCU)を試作した(図 9.16)。2003年に、このカメラの順次走査出力信号をインターレース信号に変換する際に用いる垂直フィルターの特性を設計し、折り返しによるインターラインフリッカー妨害を抑圧しつつ垂直変調度を高くできることを確認した⁽¹³⁵⁾。

2001年から2003年にかけて、ハイビジョン順次走査カメラの開発について、松下電器産業(株)(現パナソ



図 9.16 試作した順次走査撮像実験装置 (カメラヘッドとCCU)

ニック(株))と共同研究を実施した。

以上の研究は、岡野文男、菅原正幸、三谷公二、山下誉行、島本洋、古賀則行が主に担当した。

[菅原 正幸]

文 献

- (1) 大川, 宮川, 鈴木, 高島, 江上, 谷岡, 小林, 小楠, 平井 : 実用型新 Super-HARP 膜, 映情学年次大, 23-7, pp. 345-346 (2001)
- (2) 大川, 宮川, 松原, 菊地, 鈴木, 久保田, 江上, 谷岡, 小林 : 超高感度 15 μm 厚 HARP 光電変換膜, 映情学誌, Vol. 62, No. 10, pp. 1641-1648 (2008)
- (3) 大川, 宮川, 松原, 菊地, 鈴木, 久保田, 江上 : 15 μm 厚 HARP 光電変換膜, NHK 技研 R & D, No. 109, pp. 22-29 (2008)
- (4) Y. Ohkawa, K. Miyakawa, T. Matsubara, K. Kikuchi, S. Suzuki, M. Kubota, N. Egami and A. Kobayashi : Temperature dependence of carrier traps in high sensitivity HARP photoconductive film, Physica Status Solidi C, Vol. 6, No. S 1, pp. S 224-S 226 (2009)
- (5) 松原, 大川, 宮川, 鈴木, 高島, 江上, 谷岡, 小林, 小楠, 平井 : 極超高感度新 Super-HARP 膜の試作, 映情学年次大, 12-3 (2003)
- (6) T. Matsubara, Y. Ohkawa, K. Miyakawa, S. Suzuki, T. Takahata, M. Kubota, K. Tanioka, K. Ogusu, A. Kobayashi, T. Hirai and T. Kawai : Super High-Sensitivity HARP Target, Proc. 2005 IEEE Workshop on Charge-Coupled Devices and Advanced Image Sensors, P 13, pp. 98-101 (2005)
- (7) Y. Ohkawa, K. Miyakawa, T. Matsubara, K. Kikuchi, S. Suzuki, M. Kubota, N. Egami and A. Kobayashi : Ultrahigh-sensitivity pickup tube using 35- μm -thick HARP photoconductive film, IEICE Transactions on Electronics, Vol. E 92-C, No. 6, pp. 894-897 (2009)
- (8) 大川, 宮川, 松原, 鈴木, 高島, 久保田, 谷岡, 小楠, 小林, 平井, 河合, 吉田 : 極超高感度新 Super-HARP 膜の赤色光感度向上とハイビジョンカラーカメラへの適用, 映情学年次大, 20-5 (2004)
- (9) 大川, 松原, 宮川, 鈴木, 高島, 久保田, 谷岡, 小楠, 小林, 平井, 河合 : 15 μm 厚新 Super-HARP 膜の赤色光に対する感度向上, 映情学年次大, 22-5 (2005)
- (10) T. Matsubara, Y. Ohkawa, K. Miyakawa, S. Suzuki, M. Kubota, N. Egami, K. Tanioka, K. Ogusu, A. Kobayashi, T. Hirai and T. Kawai : Improvement photoelectric conversion efficiency of red light in HARP film, Proc. IS&T/SPIE 19 th Annual Symposium on Electronic Imaging 2007, Vol. 6501, pp. 650108-1-650108-9 (2005)
- (11) 大川, 松原, 宮川, 鈴木, 久保田, 谷岡, 小楠, 小林, 平井, 河合 : 15 μm 厚新 Super-HARP 膜の赤色光に対する感度向上 (その 2), 映情学年次大, 16-2 (2006)
- (12) 大川, 宮川, 松原, 菊地, 鈴木, 久保田, 谷岡, 小林 : 赤色光増感型高感度 15 μm 厚 HARP 光電変換膜の開発, 映情学誌, Vol. 62, No. 12, pp. 2031-2036 (2008)
- (13) Y. Ohkawa, K. Miyakawa, T. Matsubara, K. Kikuchi, S. Suzuki, K. Tanioka, M. Kubota, N. Egami and A. Kobayashi : Heat treatment to suppress image defect occurrence in amorphous selenium avalanche multiplication photoconductive film with improved red-light sensitivity, IEICE Electronics Express, Vol. 6, No. 15, pp. 1118-1124 (2009)
- (14) 大川, 松原, 宮川, 鈴木, 高島, 江上, 谷岡, 小林, 小楠, 平井 : CdSe 層接合による HARP 光電変換膜の量子効率改善, 映情学年次大, 14-2 (2002)
- (15) 大川, 宮川, 松原, 菊地, 鈴木, 谷岡, 久保田, 江上, 小林 : CdSe 層を接合した高量子効率 HARP 光電変換膜, 映情学年次大, 12-9 (2009)
- (16) 菊地, 松原, 大川, 宮川, 鈴木, 久保田, 江上 : 暗電流低減による HARP 膜の感度向上, 映情学年次大, 12-7 (2008)
- (17) 宮川, 大川, 松原, 鈴木, 久保田, 小林, 小楠, 鈴木, 平井, 河合, 香取, 岡本, J. A. Rowlands, W. Zhao : FOP 基板を用いた HARP 撮像管の試作, 映情学年次大, 16-3 (2006)
- (18) K. Miyakawa, Y. Ohkawa, T. Matsubara, K. Kikuchi, S. Suzuki, K. Tanioka, M. Kubota, N. Egami, T. Atsumi, S. Matsushita, T. Konishi, Y. Sakakibara, K. Hyodo, Y. Katori and Y. Okamoto : Development of FOP-HARP imaging device, Proc. IS&T/SPIE Electronic Imaging 2010 (2010)
- (19) 小林, 小楠, 平井, 河合, 大川, 宮川, 鈴木, 高島, 江上, 谷岡 : ハイビジョン用超高感度撮像管, 映情学年次大, 23-8, pp. 347 (2001)
- (20) 宮川, 大川, 鈴木, 高島, 江上, 谷岡, 小林, 小楠, 平井, 本坊, 吉田 : 超高感度ハイビジョンハンディカメラ, 映情学年次大, 23-9, pp. 348 (2001)
- (21) 江上, 大川, 宮川, 谷岡, 小林, 平井, 本坊, 吉田, 内田, 盛 : 超高感度ハイビジョン新 Super-HARP カメラの応用, 映情学年次大, 23-10, pp. 349 (2001)
- (22) 松原, 大川, 宮川, 鈴木, 高島, 江上, 谷岡, 小楠, 小林, 平井, 河合, 本坊, 吉田, 内田, 盛 : 超高感度ハイビジョン新 Super-HARP 撮像管カメラの開発とその応用, 映情学技報, Vol. 26, No. 42, pp. 35-38 (2002)

- (23) K. Miyakawa, Y. Ohkawa, T. Matsubara, T. Takahata, S. Suzuki, M. Kubota, N. Egami, K. Tanioka, K. Ogusu, A. Kobayashi, T. Hirai, T. Kawai, M. Hombro and T. Yoshida : Ultrahigh-sensitivity HDTV New Super-HARP Camera, Proc. IS & T/SPIE 17 th Annual Symposium on Electronic Imaging 2005, Vol. 5677, pp. 26-34 (2005)
- (24) 吉田, 浮ヶ谷, 谷岡 : 超高感度 HARP カメラの開発とその応用, 日立評論, Vol. 89, No. 4, pp. 66-72 (2007)
- (25) 松原, 大川, 宮川, 鈴木, 高島, 久保田, 谷岡, 井関, 大和谷, 市川, 小楠, 小林, 平井, 河合, 吉田 : ドラマ制作用高感度・高画質ハイビジョン HARP カメラの開発, 映情学年次大, 23-5 (2005)
- (26) 久保田 : ドラマ・映画制作用高感度ハイビジョン HARP カメラの技術概要, 映画テレビ技術, No. 635, pp. 28-32 (2005)
- (27) 大和谷, 井関, 市川, 松原, 大川, 宮川, 鈴木, 高島, 久保田, 谷岡, 小林, 吉田, 佐々木, 小栗 : 高感度・高画質ハイビジョン HARP カメラのドラマ制作への応用検討, 映情学年次大, 23-6 (2005)
- (28) K. Miyakawa, Y. Ohkawa, T. Matsubara, K. Kikuchi, S. Suzuki, K. Tanioka, M. Kubota, N. Egami, T. Atsumi, S. Matsushita, T. Konishi, Y. Sakakibara, K. Hyodo, Y. Katori and Y. Okamoto : Development of FOP-HARP imaging device, Proc. IS & T/SPIE Electronic Imaging 2010 (2010)
- (29) 松下, 林田, 石黒, 大竹, 井口, 山内, 宮川, 鈴木, 高島, 江上, 谷岡, 丸山 : Au 画素電極を用いた HARP 積層型 CMOS 撮像素子, 映情学年次大, 14-4 (2002)
- (30) 大竹, 松下, 林田, 石黒, 井口, 山内, 宮川, 鈴木, 高島, 江上, 谷岡, 丸山 : HARP 積層型 CMOS 撮像素子用 Au 画素電極の形成, 信学技報, EID 2002-57, pp. 17-20 (2002)
- (31) 林田, 田島, 山内, 小杉, 大竹, 石黒, 渡部, 山野, 瀧口, 国分, 渡辺, 阿部 : HARP 膜積層 CMOS イメージセンサのプロセス開発, 映情学年次大, 10-3, pp. 139-140 (2000)
- (32) 林田, 山内, 小杉, 諸星, 国分, 渡辺, 谷岡, 木下, 土肥 : HARP 膜積層 CMOS イメージセンサのプロセス開発～平坦化 CMP の適用～, 精密工学会秋季大会学術講演会, A 31 (2000)
- (33) 渡部, 大竹, 後藤, 国分, 渡辺, 江上, 谷岡 : 固体 HARP 用高 S/N 信号読み出し回路の検討, 映情学年次大, 24-6, pp. 360-361 (2001)
- (34) 渡部, 大竹, 後藤, 国分, 渡辺, 江上, 谷岡 : 固体 HARP 用高 S/N 信号読み出し回路の検討, 映情学技報, Vol. 25, No. 54, pp. 81-86 (2001)
- (35) 渡部, 大竹, 後藤, 国分, 渡辺, 江上, 谷岡 : 固体 HARP 用 CMOS 信号読み出し回路の高 S/N 化, 信学技報, EID 2001-44, pp. 13-18 (2001)
- (36) T. Watabe, M. Goto, H. Ohtake, H. Maruyama and K. Tanioka : A New Readout Circuit for an Ultrahigh Sensitivity CMOS Image Sensor, IEEE. Trans. Consum. Electron. , Vol. 48, pp. 394-399 (2002)
- (37) T. Watabe, M. Goto, H. Ohtake, H. Maruyama and K. Tanioka : A New Readout Circuit for an Ultra High Sensitivity CMOS Image Sensor, in Proc. IEEE Int. Conf. on Consumer Electronics, pp. 42-43 (2002)
- (38) T. Watabe, M. Goto, H. Ohtake, H. Maruyama, M. Abe, K. Tanioka, and N. Egami : New Signal Readout Method for Ultrahigh-Sensitivity CMOS Image Sensor, IEEE. Trans Electron. Devices, Vol. 50, pp. 63-69 (2003)
- (39) 渡部, 大竹, 後藤, 丸山, 谷岡, 江上 : 固体 HARP 用 CMOS イメージセンサの固定パターン雑音低減, 映情学技報, Vol. 27, No. 10, pp. 9-12 (2003)
- (40) 瀧口, 長田, 宮川, 難波, 岡崎, 山岸, 江上, 田中, 伊藤 : パッケージ型冷陰極 HARP 撮像板の試作・検討, 信学技報, ED 2000-208, pp. 21-26 (2000)
- (41) 江上, 長田, 宮川, 瀧口, 難波, 岡崎, 山岸, 田中, 伊藤 : 冷陰極 HARP 撮像板の多画素化基礎検討, 映情学冬大, 4-6 (2000)
- (42) 長田, 瀧口, 宮川, 難波, 岡崎, 山岸, 江上, 田中, 伊藤 : 冷陰極 HARP 撮像板の小型パッケージ化, 映情学冬大, 4-7 (2000)
- (43) 難波, 山岸, 岡崎, 江上, 谷岡, 阿部, 高山, 田中, 伊藤 : 冷陰極 HARP 撮像板, 映情学誌, Vol. 54, No. 2, pp. 242-247 (2000)
- (44) N. Egami, M. Nanba, K. Osada, Y. Takiguchi, S. Okazaki, T. Yamagishi, K. Tanioka, M. Tanaka and S. Itoh : Field emitter array image sensor with HARP target, Proc. IVMC 2000, pp. 159-160 (2001)
- (45) Y. Takiguchi, K. Osada, K. Miyakawa, M. Nanba, S. Okazaki, T. Yamagishi, N. Egami, K. Tanioka, M. Tanaka and S. Itoh : FEA Image Sensor with HARP Target, Proc. AD/IDW '01, pp. 1169-1172 (2001)
- (46) 長田, 瀧口, 宮川, 難波, 岡崎, 山岸, 江上, 谷岡, 田中, 伊藤 : 冷陰極 HARP 撮像板の試作, 信学技報, LQE 2001-68, pp. 29-34 (2001)
- (47) 難波, 長田, 宮川, 瀧口, 岡崎, 山岸, 江上, 田中, 伊藤 : 128x96 画素冷陰極 HARP 撮像板の開発, 信学技報, ED 2001-172, pp. 57-62 (2001)
- (48) 難波, 長田, 宮川, 瀧口, 岡崎, 山岸, 江上, 田中, 伊藤 : 冷陰極 HARP 撮像板の多画素化基礎検討 - 第 2 報, 映情学年次大, 24-9 (2001)
- (49) Y. Takiguchi, K. Osada, K. Miyakawa, M. Nanba, S. Okazaki, T. Yamagishi, N. Egami, K. Tanioka, M. Tanaka and S. Itoh : Flat FEA image sensor with HARP target, Proc. IVEC 2002, pp. 63-64 (2002)
- (50) Y. Takiguchi, K. Osada, M. Nanba, K. Miyakawa, S. Okazaki, T. Yamagishi, K. Tanioka, M. Abe, N. Egami, M. Tanaka and S. Itoh : 128 x 96 pixel FEA image sensor with HARP target, IEICE Trans. Electron. , Vol. E 85 c, No. 11, pp. 1916-1921 (2002)
- (51) T. Yamagishi, M. Nanba, K. Osada, Y. Takiguchi, S. Okazaki, N. Egami, K. Tanioka, M. Tanaka and S. Itoh : 128x96 pixel field emitter-array image sensor with HARP target, Proc. SPIE, 4669, pp. 29-36 (2002)
- (52) 瀧口, 長田, 宮川, 難波, 岡崎, 山岸, 江上, 田中, 伊

- 藤：冷陰極 HARP 撮像板の解像度特性, 映情学技報, Vol. 26, No. 74, pp. 21-24 (2002)
- (53) 瀧口, 難波, 長田: メッシュ電極の適用による冷陰極 HARP 撮像板の特性改善, NHK 技研 R&D, No. 78, pp. 38-45 (2003)
- (54) 難波, 瀧口, 長田, 宮川, 岡崎, 山岸, 江上, 田中, 伊藤: 冷陰極 HARP 撮像板におけるメッシュ電極の役割, 映情学技報, Vol. 27, No. 10, pp. 5-8 (2003)
- (55) 難波, 長田, 宮川, 瀧口, 岡崎, 山岸, 江上, 田中, 伊藤: 256×196 画素冷陰極 HARP 撮像板, 映情学年次大, 14-3 (2002)
- (56) Y. Takiguchi, M. Nanba, K. Osada, Watabe, S. Okazaki, N. Egami, K. Tanioka, M. Tanaka and S. Itoh : 256×192 pixel field emitter array image sensor with high-gain avalanche rushing amorphous photoconductor target, J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 22, No. 3, pp. 1390-1395 (2004)
- (57) N. Egami, M. Nanba, Y. Takiguchi, K. Osada, T. Watabe, S. Okazaki, Y. Obara, M. Tanaka and S. Itoh : FEA image sensor with electron-beam focusing system, Tech. Digest IVNC 2004, pp. 228-229 (2004)
- (58) 瀧口, 難波, 長田, 宮川, 渡部, 岡崎, 江上, 谷岡: 冷陰極 HARP 撮像板, NHK 技研 R & D, No. 87, pp. 42-47 (2004)
- (59) 難波, 長田, 瀧口, 宮川, 渡部, 岡崎, 江上, 山岸, 伊藤, 田中: 1 インチ 256×192 画素冷陰極 HARP 撮像板の試作, 映情学年次大, 20-3 (2004)
- (60) 難波, 瀧口, 長田, 宮川, 渡部, 岡崎, 江上, 小原, 田中, 伊藤: 1 インチ 256×192 画素磁界集束型冷陰極 HARP 撮像板の試作, 映情学技報, Vol. 28, No. 53, pp. 13-16 (2004)
- (61) N. Egami, M. Nanba, Y. Takiguchi, K. Miyakawa, T. Watabe, S. Okazaki, K. Osada, Y. Obara, M. Tanaka and S. Itoh : 50×50 um pixel magnetic focus field emitter array image sensor with high-gain avalanche rushing amorphous photoconductor target, J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 23, No. 5, pp. 2056-2062 (2005)
- (62) Y. Hirano, M. Nanba, Y. Honda, K. Miyakawa, T. Watabe, S. Okazaki, N. Egami, Y. Obara, M. Tanaka, S. Itoh and A. Kobayashi : Highly Sensitive Magnetic Focus FEA Image Sensor with HARP Target, in Proc. IEEE Workshop on CCD & AIS, 2005, pp. 52-55 (2005)
- (63) 難波, 瀧口, 長田, 宮川, 渡部, 岡崎, 江上, 小原, 田中, 伊藤: 磁界集束系を備えた 1 インチ 256×192 画素冷陰極 HARP 撮像板, 映情学誌, Vol. 59, No. 3, pp. 396-402 (2005)
- (64) 本田, 平野, 宮川, 難波, 渡部, 岡崎, 江上, 小原, 田中, 伊藤, 小林: 超高感度スピント型冷陰極 HARP 撮像板の諸特性, 信学技報, ED 2005-113, pp. 27-32 (2005)
- (65) 難波, 宮川, 大川, 渡部, 岡崎, 谷岡, 江上, 田中, 中田, 酒村, 奥田, 根岸, 佐藤, 渡辺, 吉川, 小笠原, 小林, 越田: アクティブ駆動型 HEED 冷陰極 HARP 撮像板の試作, 映情学年次大, 23-3 (2005)
- (66) 難波, 宮川, 大川, 渡部, 岡崎, 谷岡, 江上, 田中, 中田, 酒村, 奥田, 根岸, 佐藤, 渡辺, 吉川, 小笠原, 小林, 越田: アクティブ駆動型 HEED 冷陰極 HARP 撮像板の試作, 信学技報, ED 2005-187, pp. 27-32 (2005)
- (67) 難波, 宮川, 渡部, 岡崎, 谷岡, 江上, 田中, 中田, 酒村, 奥田, 根岸, 渡辺, 吉川, 小笠原, 小林, 小楠, 越田: 1 インチ 256×192 画素アクティブ駆動型 HEED 冷陰極 HARP 撮像板, 映情学誌, Vol. 61, No. 3, pp. 387-392 (2007)
- (68) 難波, 本多, 平野, 宮川, 渡部, 岡崎, 瀧口, 江上: 1 インチ 256×192 画素アクティブ駆動型 HEED 冷陰極 HARP 撮像板, NHK 技研 R&D, No. 109, pp. 30-37 (2008)
- (69) M. Nanba, Y. Hirano, Y. Honda, K. Miyakawa, Y. Oookawa, T. Watabe, S. Okazaki, N. Egami, K. Miya, K. Nakamura, M. Taniguchi, S. Itoh and A. Kobayashi : 640×480 pixel HARP image sensor with active-matrix Spindt-type FEA, Proc. IDW '06, pp. 1817-1820 (2006)
- (70) 平野, 難波, 本田, 宮川, 大川, 渡部, 岡崎, 江上, 宮, 中村, 谷口, 伊藤, 小林: 標準テレビ用スピント型冷陰極 HARP 撮像板の試作, 映情学冬大, pp. 3-11 (2006)
- (71) 難波, 本多, 平野, 渡部, 宮川, 大川, 岡崎, 江上: 冷陰極 HARP 撮像板, NHK 技研 R & D, No. 104, pp. 36-43 (2007)
- (72) 瀧口, 江上: 小型超高感度 HARP 撮像デバイスの実現に向けて, 画電学誌, Vol. 37, No. 5, pp. 589-595 (2008)
- (73) 難波, 久保田, 江上: FEA と HARP 光電変換膜を適用した小型超高感度撮像デバイスの開発, 表面科学, Vol. 29, No. 11, pp. 707-712 (2008)
- (74) 江上: FEA とアバランシェ増倍型光電変換膜を組み合わせた小型超高感度撮像デバイスの開発, 応用物理, Vol. 78, No. 4, pp. 343-346 (2009)
- (75) M. Nanba, Y. Takiguchi, Y. Honda, Y. Hirano, T. Watabe, N. Egami, K. Miya, K. Nakamura, M. Taniguchi, S. Itoh and A. Kobayashi : 640×480 pixel active-matrix Spindt-type field emitter array image sensor with high-gain avalanche rushing amorphous photoconductor target, J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 28, No. 1, pp. 96-103 (2010)
- (76) 本田, 瀧口, 難波, 渡部, 江上, 宮, 中村, 谷口: アンチブルーミング FEA-HARP, 映情学年次大, 12-8 (2008)
- (77) 本田, 瀧口, 難波, 渡部, 江上, 宮, 中村, 谷口: アンチブルーミング FEA-HARP, 映情学技報, Vol. 32, No. 50, pp. 1-4 (2008)
- (78) 本田, 瀧口, 難波, 渡部, 江上, 宮, 中村, 谷口: アンチラグ FEA-HARP, 映情学冬季大, 1-5 (2008)
- (79) 瀧口, 難波, 本田, 久保田, 江上, 中村, 谷口: FEA-HARP におけるブルーミング抑制駆動法, 映情学誌, Vol. 64, No. 3, pp. 339-404 (2010)
- (80) Y. Takiguchi, M. Nanba, Y. Honda, T. Watabe, N. Egami, K. Nakamura, M. Taniguchi and H. Mimura : Lag Characteristics of Flat Image Sensor Consisting of Field Emitter Array and High-Gain Avalanche Rushing Amorphous Photoconductor Target, Applied Physics Express, 3, 027001 (2010)
- (81) 本田, 難波, 菊地, 瀬尾, 相原, 渡部, 大竹, 瀧口, 江上, 西周, 中村, 谷口: 電界集束型 FEA-HARP の基礎検

- 討, 映情学年次大, 1-5 (2009)
- (82) Y. Honda, M. Nanba, Y. Takiguchi, K. Kikuchi, H. Seo, S. Aihara, H. Ohtake, T. Watabe, N. Egami, Y. Saishu, K. Nakamura and M. Taniguchi : Electrostatic Focusing for FEA Image Sensor with HARP Target, Proc. IDW '09, pp. 1993-1994 (2009)
- (83) T. Nakada, T. Sato, Y. Matsuba, K. Sakemura, Y. Okuda, N. Negishi, A. Watanabe, T. Yoshikawa, K. Ogasawara, M. Nanba, K. Tanioka, N. Egami, A. Kobayashi and N. Koshida : 2/3 in. ultrahigh-sensitivity image sensor with active-matrix high-efficiency electron emission device, J.Vac.Sci.Technol.B, Vol.28, No.2, pp.C 2 D 11-C 12 D 14 (2010)
- (84) Y. Honda, M. Nanba, Y. Takiguchi, K. Kikuchi, H. Seo, S. Aihara, H. Ohtake, T. Watabe, N. Egami, Y. Saishu, K. Nakamura and M. Taniguchi : Electrostatic Focusing for FEA Image Sensor with HARP Target, Proceeding of the 16 th International Display Workshop, pp.1993-1994 (2009)
- (85) 知久, 西上, 竹下, 林, 野々木, 荻野, 中谷, 田中, 内藤, 盛, 宮武, 友池, 北村 : 病院設置型微小血管造影装置による微小血管の評価, 脈管学, Vol. 45, No. 11, pp. 965-971 (2005)
- (86) T. Konishi, S. Matsushita, K. Hyodo, H. Sugimori, C. Tokunaga, Y. Enomoto, S. Kanemoto, Y. Watanabe, Y. Hiramatsu and Y. Sakakibara : Synchrotron Radiation And A High Sensitivity Receiver Make Lower Doses Of Contrast Medium Possible ?, Proc. American Heart Association Scientific Session 2008, 131 (2008)
- (87) 宮川, 大川, 松原, 菊地, 鈴木, 谷岡, 久保田, 江上, 渥美, 松下, 小西, 榊原, 兵藤 : FOP-HARP 撮像管とその医療応用, 映情学年次大, 12-10 (2009)
- (88) K. Miyakawa, Y. Ohkawa, T. Matsubara, K. Kikuchi, S. Suzuki, K. Tanioka, M. Kubota, N. Egami, T. Atsumi, S. Matsushita, T. Konishi, Y. Sakakibara, K. Hyodo, Y. Katori and Y. Okamoto : Development of FOP-HARP imaging device, Proc. IS&T/SPIE Electronic Imaging 2010 (2010)
- (89) 谷岡, 大路, 中田, 生野, 五味, 日下, 田野, 三宅, 吉田, 小林, 望月 : 超高感度ハイビジョンカメラ-立体観察システムを用いた低照度下の硝子体手術, 第 25 回日本眼科手術学会総会, V-18 (2002)
- (90) 石山, 山下, 三好, 千葉 : 超高感度内視鏡技術の開発, 炎症と免疫, Vol. 16, No. 1, pp. 1-6 (2008)
- (91) K. Matsuura-Tokita, M. Takeuchi, A. Ichihara, K. Mikuriya and A. Nakano : Live Imaging of Yeast Golgi Cisternal Maturation, Nature, Vol. 441, pp. 1007-1010 (2006)
- (92) 内田, 棚田, 谷岡 : 超高感度深海ハイビジョン TV カメラの開発, 海洋科学技術センター試験研究報告, No. 43, pp. 107-114 (2001)
- (93) 内田, 棚田, 谷岡 : 超高感度深海用ハイビジョンカメラの開発, 映情学技報, Vol. 26, No. 78, pp. 27-30 (2002)
- (94) 大川, 松原, 宮川, 鈴木, 高島, 江上, 谷岡 : 新 Super-HARP 撮像管を用いた深海探査用超高感度ハイビジョンカメラの開発, NHK 技研 R&D, No. 78, pp. 20-25 (2003)
- (95) 超高感度カメラで植物の「成長リズム」を解明, 新技研だより, No. 51 (2003)
- (96) 江上, 若槻 : X 線 HARP を用いた生体超高分子構造機能解析装置, 第 14 回大阪電気通信大学エレクトロニクス基礎研究所公開シンポジウム予稿集, No. 8, pp. VIII-1-VIII-8 (2007)
- (97) 平野, 大竹, 佐藤, 斎藤, 阿部, 宮崎, 廣瀬 : シリコンナノ結晶材料を用いた光導電膜の検討, 映情学年次大, 10-6 (2000)
- (98) Y. Hirano, F. Sato, S. Aihara, N. Saito, S. Miyazaki, and M. Hirose : Photoconductive Properties of Nanometer-Sized Si Dot Multilayers, Appl. Phys. Lett., Vol. 79, No. 14, pp. 2255-2257 (2001)
- (99) 平野, 相原, 斎藤, 谷岡 : シリコンナノ結晶光電変換膜, NHK 技研 R&D, No. 78, pp. 32-37 (2003)
- (100) 平野, 佐藤, 相原, 斎藤, 宮崎, 廣瀬 : シリコンナノ結晶膜の作製と光導電特性~高感度・高機能光導電膜を目指して~, 第 46 回応用物理学シリコンテクノロジー研究会, No. 46 (2003)
- (101) 平野, 久保田, 谷岡, 山崎, 越田 : シリコンナノ結晶膜の光電変換効率改善, 映情学年次大, 13-5 (2004)
- (102) 平野, 久保田, 谷岡, 山崎, 越田 : シリコンナノ結晶膜の光電変換効率改善, 映情学技報, Vol. 28, No. 72, pp. 13-16 (2004)
- (103) 山崎, 平野, 久保田, 谷岡, 越田 : 自己形成シリコンナノ結晶膜の水素化処理による光導電特性の改善, 第 52 回応用物理学関係連合講演会, No. 3, 31-a-YH-11, p. 1639 (2005)
- (104) 岡本, 平野, 越田 : 自己形成ナノ結晶シリコン膜の光導電特性, 第 54 回応用物理学関係連合講演会, No. 3, 28 p-ZK-9, p. 1522 (2007)
- (105) Y. Hirano, S. Yamazaki, and N. Koshida : Improved Photoconduction Effects of Nanometer-Sized Silicon Dot Multilayers, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 47, No. 4, pp. 3095-3098 (2008)
- (106) Y. Hirano, K. Okamoto, S. Yamazaki, and N. Koshida : Avalanche Multiplication of Photocarriers in Nanometer-Sized Silicon Dot Layers, Appl. Phys. Lett., Vol. 95, 063109 (2009)
- (107) T. G. Etoh, D. Poggemann, A. Ruckelshausen, A. Theuwissen, G. Kreider, H. -O. Folkerts, H. Mutoh, Y. Kondo, H. Maruno, K. Takubo, H. Soya, K. Takehara, T. Okinaka, Y. Takano, T. Reisinger and C. Lohmann : A CCD Image Sensor of 1 Mframes/s for Continuous Image Capturing of 103 Frames, Proceedings 2002 IEEE International Solid State Circuits Conference, pp. 46-47 (2002)
- (108) 丸山, 林田, 山田, 大竹, 松下, 谷岡 : 超高速度高感度カラーカメラの開発, 映情学年次大, 21-10 (2003)
- (109) H. Maruyama, T. Hayashida, H. Ohtake, M. Yamada, K. Kitamura, T. Arai and K. Tanioka : Color video camera capable of 1, 000, 000 fps with triple ultrahigh-speed image sensors, SPIE 26 th, ICHSP, No. 5580-60 (2004)
- (110) 林田, 大竹, 山田, 北村, 新井, 丸山, 谷岡 : 15 万画素超高速度高感度 CCD の設計, 映情学年次大, 19-3 (2004)
- (111) 林田, 米内, 北村, 大竹, 新井, 谷岡, 丸山, 江藤, 飯田 : 30 万画素超高速度高感度 CCD, 映情学年次大会, 23-1 (2005)

- (112) K. Kitamura, T. Arai, J. Yonai, T. Hayashida, H. Ohtake, T. Kurita, K. Tanioka, H. Maruyama, J. Namiki, T. Yanagi, T. Yoshida, H. van Kuijk, Jan T. Bosiers and T. G. Etoh : Ultra-high-Speed, high-sensitivity color camera with 300000-pixel single CCD, Proceedings of SPIE 27 th International Congress on High-Speed Photography and Photonics, 6279, 62791 L-1 (2006)
- (113) 米内, 新井, 大竹, 北村, 林田, 丸山, 谷岡, 江藤, 並木, 柳, 吉田 : 30 万画素単板式超高速高感度カラーカメラ, 映情学年次大, 17-12 (2006)
- (114) 林田, 新井, 北村, 大竹, 米内, 丸山, 栗田, 谷岡, 江藤, 北川, 幡手, 山口, 竹内 : 超高速高感度 CCD の開口率改善, 映情学年次大, 5-8 (2007)
- (115) K. Kitamura, T. Arai, J. Yonai, T. Hayashida, T. Kurita, K. Tanioka and H. Maruyama : An Ultrahigh-Speed, High-Sensitivity, Portable CCD Color Camera, SMPTE MIJ (2008)
- (116) 丸山, 林田, 新井, 北村, 米内, 江藤 : 超高速 CCD カラーカメラ, NHK 技研 R&D, No. 112, pp. 10-15 (2008)
- (117) 新井, 林田, 北村, 米内, 丸山, 江藤, Harry : 裏面照射型超高速 CCD の構造の検討, 映情学年次大, 11-3 (2009)
- (118) T. G. Etoh, T. Hayashida, H. Maruyama, T. Arai, N. Uchiyama and T. Sakamoto : Backside Illuminated Image Sensors manufactured with Graded Double Epitaxial Layers : an Application to a High-speed High-sensitivity Image Sensor, Proceedings of 2009 International Image Sensor Workshop, Session 06 (2009)
- (119) T. Arai, J. Yonai, T. Hayashida, K. Kitamura and H. Maruyama : Simulation based design for back-side illuminated ultrahigh-speed CCDs, SPIE Photonics West (2010)
- (120) S. Aihara, S. Tonsho, H. Sato, R. Ishii, Y. Hirano, N. Saito, K. Tanioka, N. Kamata, D. Terunuma and M. Abe : Photoelectric Properties of Diphenyl-Based Soluble Polysilane Doped With Organic Dye Molecule, First Int. Conf. on Molecular Electronics & Bioelectronics, 6 p-PC-91 a (2001)
- (121) S. Aihara, Y. Hirano, T. Tajima, K. Tanioka, M. Abe, N. Saito, N. Kamata, and D. Terunuma : Wavelength selectivities of organic photoconductive films : Dye-doped polysilanes and zinc phthalocyanine/ tris-8-hydroxyquinoline aluminum double layer, Appl. Phys. Lett. , Vol. 82, No. 4, pp. 511-513 (2003)
- (122) S. Aihara, K. Miyakawa, Y. Ohkawa, T. Matsubara, T. Takahata, S. Suzuki, N. Egami, N. Saito, K. Tanioka, N. Kamata, and D. Terunuma : Image Pickup from Zinc Phthalocyanine/Bathocuproine Double-Layer Film Using Pickup Tube, Jpn. J. Appl. Phys. , Vol. 42, No. 7 B, pp. L 801-L 803 (2003)
- (123) S. Aihara, K. Miyakawa, Y. Ohkawa, T. Matsubara, T. Takahata, S. Suzuki, M. Kubota, K. Tanioka, N. Kamata, and D. Terunuma : Photoconductive Properties of Organic Films Based on Porphine Complex Evaluated with Image Pickup Tubes, Jpn. J. Appl. Phys. , Vol. 44, No. 6 A, pp. 3743-3747 (2005)
- (124) 相原, 渡部, 江上, 久保田, 谷岡, 鎌田, 照沼 : CMOS 読み出し回路に積層した有機光電変換膜の信号出力特性, 第 52 回応用物理学関係連合講演会, 29 p-D-5 (2005)
- (125) T. Watabe, S. Aihara, N. Egami, M. Kubota, K. Tanioka, N. Kamata and D. Terunuma : CMOS Image Sensor Overlaid with an Organic Photoconductive Film, IEEE Workshop on CCD&AIS, R 13 (2005)
- (126) 瀬尾, 相原, 宮川, 大川, 松原, 鈴木, 高島, 久保田, 谷岡, 鎌田, 照沼 : 有機ヘテロ接合型光導電膜の撮像管を用いた特性評価, 第 53 回応用物理学関係連合講演会, 23 p-S-9 (2006)
- (127) H. Seo, S. Aihara, T. Watabe, H. Ohtake, M. Kubota and N. Egami : Color Sensors with Three Vertically Stacked Organic Photodetectors, Jpn. J. Appl. Phys. , Vol. 46, No. 49, pp. L 1240-L 1242 (2007)
- (128) S. Aihara, H. Seo, M. Namba, T. Watabe, H. Ohtake, M. Kubota, N. Egami, T. Hiramatsu, T. Matsuda, M. Furuta, H. Nitta and T. Hirao : Stacked Image Sensor with Green- and Red-Sensitive Organic Photoconductive Films Applying Zinc-Oxide Thin Film Transistors to a Signal Readout Circuit, IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 56, No. 11, pp. 2570-2576 (2009)
- (129) 瀬尾, 相原, 久保田, 江上 : C₆₀ 添加 Coumarin 30 薄膜の光導電特性, 第 56 回応用物理学関係連合講演会, 1 a-A-14 (2009)
- (130) 後藤, 大竹, 渡部, 丸山, 江上, 谷岡 : 可変しきい値を用いたリニア出力型広ダイナミックレンジ撮像デバイス, 映像学冬大, pp. 81 (2001)
- (131) 後藤, 渡部, 大竹, 丸山, 江上, 阿部, 谷岡 : パルス出力型広ダイナミックレンジ CMOS イメージセンサの検討, 映情学技報, Vol. 26, No. 41, pp. 1-4 (2002)
- (132) M. Goto, T. Watabe, H. Ohtake, M. Abe, N. Egami and K. Tanioka : Wide-dynamic-range digital-pixel CMOS image sensor applying new readout operation, IEICE Trans. Electron, Vol. E 89 c, No. 2, pp. 206-208 (2006)
- (133) 島本, 菅原, 岡野, 永吉 : 200 万画素 M-FIT CCD の高速全画素読み出し実験, 映情学年次大, 9-5 (2000)
- (134) M. Sugawara, H. Shimamoto, F. Okano and K. Itakura : An experimental 60-fps progressive-scan HDTV camera, NAB 2001 (2001)
- (135) 島本, 菅原, 三谷, 山下, 古賀, 岡野 : 60 フレーム/秒ハイビジョン順次走査 3 板カラー撮像実験, 映情学誌, Vol. 58, pp. 369-374 (2004)