

谷岡 健吉

日本放送協会

要約

撮像デバイスは、その感度が高ければ高いほど、暗い被写体でもより鮮明な映像として捉えることができる。このため、約80年の歴史を持つ撮像デバイスの研究においてもその高感度化は常に最重要テーマとして位置づけられてきた。当所でも1980年代の初頭に、超高感度と高画質の両立を可能とする新たな撮像デバイスの研究に着手した。その結果、1985年、光導電型撮像管のアモルファスセレン(a-Se)のターゲット(光電変換膜)を約 10^8 V/mの強電界で動作させた場合、アバランシェ増倍(電子なだれ増倍)現象が安定に連続して生じ、画質が良好な状態で極めて高い感度が得られることを見出した。これを基にHARP(High-gain Avalanche Rushing amorphous Photoconductor)とよばれる超高感度・高画質撮像管を開発、実用化した。HARP撮像管は、夜間緊急報道やオーロラ、夜行性動物の撮影などの放送用のみならず、深海探査研究やガンの早期発見等を目的としたX線医療診断の研究、新薬の開発などを目的とした国のバイオ研究など、種々の分野の先端研究で活用されている。

本稿では、HARP撮像管の発明の経緯と、今日までの長年の研究取り組みで高性能化が図られた超高感度HARP撮像管の特性を述べるとともに、この撮像技術によるさまざまな分野への応用を紹介する。

1. HARP撮像管開発の経緯

1.1. 超高感度・高画質撮像デバイスの検討

筆者が超高感度撮像デバイス開発の検討を本格的に始めた1980年代には、二次電子導電現象を利用したSEC(Secondary Electron Conduction)管⁽¹⁾や、イメージンテンシファイアとCCD(Charge Coupled Device)とを組み合わせたI-CCD^(2, 3)などの超高感度撮像デバイスの研究開発が活発に行われていた。こ

れらのデバイスは、いずれも外部光電効果(光子のエネルギーで物質の表面から電子が真空中に飛び出す現象)を利用したものである。すなわち、入射光を光電面に当て、そこから真空中に放出された光電子を高電圧で加速する方法が基本技術として用いられていた。たとえばI-CCDでは、その加速された電子を蛍光面に射突させ、そこに形成される明るい像をCCDで撮像する構成となっている。この光電面を用いる方法は、比較的容易に高い感度が得られる利点があることから、前述のデバイスのほか、SIT管(Silicon Intensifier Target Tube)⁽⁴⁾など、種々のタイプの高感度撮像デバイスが先進各国で開発・実用化された。しかし光電面を用いる従来の高感度撮像デバイスの問題点としては、ノイズが多いことや、解像度が十分でないなど、画質に難があったことから、超高感度で高画質な撮像デバイスの開発を求める声が強くなった。その背景には、当時、サチコン⁽⁵⁾などの撮像管を用いたハイビジョンカメラが実用され始めたが、感度が大幅に不足していたこと、また、標準方式のテレビ放送においても、報道番組やサイエンス系の番組の比重が大きくなり、暗い被写体でも鮮明に捉えることができる高感度で高画質なテレビカメラの必要性が従来にも増して高くなっていったことなどがあった。

このようなことから、光電面を用いない新たな動作方式の超高感度・高画質撮像デバイスの開発を計画し、光導電型撮像管のサチコンに用いられているセレン系のターゲットとほぼ同種のターゲットについて、その大幅な高感度化の可能性を検討することにした。

ところでその検討を開始した1980年代の半ば近くには、撮像デバイスの主流はそれまでの撮像管から、固体デバイスであるCCDに移り始めていた。CCDは小型・軽量で運用性、信頼性に優れるだけでなく、その内部に組み込まれている増幅器のノイズを撮像管

用の外付け増幅器のそれに比べて小さくできることから、感度の面でも撮像管よりCCDの方に発展性があると見られていた。そのような状況の中で、あえて新たに光導電型撮像管に注目したのは、この撮像管のターゲットが、究極の超高感度撮像デバイスの実現に必要な条件、すなわち理論上限の高いS/Nを得るための要件を満たす可能性が最も高いと考えたためである。また、真空管の一種である撮像管とはいえ、ターゲット自体は半導体であることから、高感度なターゲットを開発すれば将来の種々の撮像デバイスの光電変換部に適用できるとの考えもあった。

上述の究極の超高感度デバイス実現のための条件とは、以下の三つである。

- ① 入ってきた光子をすべて光電変換部に導きうること（開口率100%）
- ② 光電変換部で光子をすべて電子に変換しうること（光電変換効率100%）
- ③ 電子に変換された信号を付加雑音なしに増幅できること

このうち①と②は、入ってくる光子自体のゆらぎに起因して生じる光ショットノイズの影響の低減に、また、③は増幅器で生じるアンプノイズの影響の低減と関係している。光導電型撮像管においては、CCDなどの固体撮像デバイスでは困難な開口率100%の状態が元来実現されており、また、内部光電効果（この場合は光導電効果ともよばれ、光のエネルギーで半導体の電気伝導度が増加する現象）を利用していることから、外部光電効果のイメージインテンシファイアなどに比べて光電変換効率を高めることが容易である。したがって、もし③の事項が可能になれば、従来にない高感度で高画質な撮像デバイスが得られることになる。このような考えから、次に述べる増幅作用を有するターゲットの研究に着手した。

1.2. ターゲットの種類と増幅作用

ターゲットには、外部電極から膜内に電荷が注入されるタイプの注入型と、電荷の注入が阻止される阻止型の二つがある。注入型では、入射光子数以上の電子を外部に取り出すことが可能、すなわち増

幅作用が得られるが、一方の阻止型では、残像や暗電流が少なく画質はよいものの、増幅作用を生じさせることは不可能とされていた。このため筆者らは、注入型の高感度ターゲットの研究に取り組んだ⁽⁶⁾。

注入型ターゲットでは、原理的に増幅の利得分だけ残像が増加することや、暗電流が大きくなりやすいなどの欠点があるが、このような選択をしたのは、当時はこれ以外にターゲットに増幅機能を持たせる方法はないと考えられていたためである。

以上のような経緯で注入型のターゲットの研究を始めたが、1985年、後述の阻止型のターゲットに高電圧をかけて注入型として動作させようとした変則的な実験で、電荷の注入では説明のつかないターゲット内での増幅現象を見いだした。これがHARP撮像管の開発の発端となった^(7, 8)。

1.3. 実験への取り組み

筆者らが取り組んでいたa-Seを用いた注入型のターゲットでは、比較的低い動作電界（約 5×10^6 V/m）でも増幅現象を生じた。動作電界が低いと、光子から電子への変換効率が低下するため、光ショットノイズの影響が大きくなるなどの問題が生じる。これを改善するには、十分に高い電界が印加されたときに初めて外部電極からターゲットに電荷が注入され、増幅現象が生じるようにすればよいと考え、本来、電荷の注入を阻止する構造となっている阻止型のターゲットに強引に高電圧を印加して電子の注入を生じさせる実験を計画した。このために試作したターゲットの構造を図1に示す。

真空蒸着法で形成したa-Se層の厚さは $2 \mu\text{m}$ である。このターゲット膜では、透明信号電極(ITO)および CeO_2 （酸化セリウム）と、a-Se層との接合により、信号電極側からの膜内への正孔の注入が阻止され、また、 Sb_2S_3 （三硫化アンチモン）層によって電子ビーム走査側からの電子の注入が阻止されている。すなわちこの試作ターゲットは阻止型に属する。なお、 Sb_2S_3 層は、ターゲット印加電圧が非常に高い場合でも二次電子の放出が抑制され、ビーム走査が安定に行われるよう、多孔質膜となっている。またこの層は、a-Se層に比べて十分に薄いことから、試作ター

ゲットの膜厚はa-Se層の厚さとほぼ同じとみなすことができる。

このターゲットを2/3インチ型撮像管に組み込んだ実験管(以下、実験管Iとよぶ)を試作し、青色光を入射させてターゲットへの印加電圧と信号電流との関係(電圧-電流特性)を調べた。その結果を図2に示す。電圧を0Vから上げてゆく(信号電極側がビーム走査側に対して正電位となるよう電圧を加える)と信号電流は急激に増加し、いったん飽和する。この飽和領域は、入射光で励起された電子・正孔対のほとんどが強くなった電界によって分離され、信号電荷になっている状態と考えられる。しかし、電圧をさらに高くすると、信号電流は再び急激に増加する現象を生じる。

a-Se膜の青色光に対する量子効率 η (単位入射光子数当たりの出力電子数)は、電界が 8×10^7 V/mのとき0.9になるとされている⁽⁹⁾。試作ターゲットの厚さは $2 \mu\text{m}$ であることから、この電界は図2では印加電圧160Vに相当する。したがって、 η は同図の右縦軸のように表すことができる。これより実験管Iのターゲットでは、印加電圧180Vで η が1を超え、240Vでは η が10となっていることがわかる(η は、1以上の値となる領域では実効的な量子効率を意味する)。

1.4. 感度増加現象の考察とHARP撮像管の誕生

a-Seターゲットの電子注入阻止層の有無と電圧-電流特性との関係については、すでに丸山により報告されている⁽¹⁰⁾。それによると、図3(a)、(b)のように、正孔、電子の双方に対して阻止特性を有する構造のNo.1のターゲットでは、信号電流はターゲット電圧の増加に対し飽和特性を示すが、電子に対して阻止特性を有しないNo.2の構造のターゲット、すなわち2.2.に述べた注入型に属するターゲットにおいては、電圧が一定の値以上になると信号電流の急激な増加現象が生じるとしている。この図3(b)のNo.2と図2に示した信号電流の変化の傾向が似ていること、また従来、光導電膜では外部電極から電荷注入が生じた場合に η が1を超えることがあるとされていたことから⁽¹¹⁾、実験管Iで η が1を大幅に上回る現象については、阻止型ターゲットが非常に強い電界のため

にその阻止特性を維持できず、注入型ターゲットとして動作して増幅作用を生じたためと解釈することができる。しかしこの実験管Iでは、注入型に見られるはずの残像特性の印加電圧依存性が認められなかった。すなわち、注入型の動作理論に従えば、増幅の利得分だけ膜の実効的な蓄積容量が大きくなることから、ターゲット電圧が180V以上になると残像が急激に増加するはずであるが、この実験管にはそのような現象は現れなかった。そのため新たに以下のいくつかの実験を行った。

(1) 実効ターゲット蓄積容量の電圧依存性

実験管Iの実効ターゲット蓄積容量の印加電圧依存性を知るため、カソード変調法⁽¹²⁾とよばれる方法で各ターゲット電圧における蓄積容量を測定した。結果を図4に示す。実効ターゲット蓄積容量CEは常に一定で、電圧による変化は認められなかった。また、この測定から得られたCEの値1600pFは、a-Seの比誘電率 $\epsilon_s=6$ 、膜厚 $2 \mu\text{m}$ 、2/3インチ撮像管の走査面積 58.1mm ($6.6\text{mm} \times 8.8\text{mm}$)から計算したターゲット蓄積容量値とほぼ合っている。図2での印加電圧180V以上で見られる感度増加現象が、電荷注入によるものであれば、図4でも180V以上の領域で実効蓄積容量が増加しなければならないが、そのような傾向は現れていない。これらは、図2において実験管Iの η が1を超える現象が、少なくともターゲットへの電子の注入に基づく増幅作用によるものではないことを示唆している。

(2) 電圧-電流特性の光入射方向依存性

青色光を実験管Iのターゲットのフェースプレート側から入射させた場合(正面入射)と、ビーム走査側から入射させた場合(背面入射)との電圧-電流特性を図5に示す。

この場合、双方の特性の差を厳密に把握するため、ターゲット電圧が60Vの時に正面入射と背面入射の信号電流が等しくなるよう光量を調整した。同図では明確な光入射方向依存性が認められ、正面入射時に比べて背面入射時には、感度増加を生じる電圧が高くなっている。

ところで、a-Seの光吸収係数は、赤色光(波長 620nm)では $7 \times 10^3/\text{cm}$ であるが、波長が短くなるに

したがって大きくなり、緑色光(540nm)では $8.5 \times 10^4/\text{cm}$ 、さらに青色光(440nm)では $2 \times 10^5/\text{cm}$ と極めて大きな値を示す⁽¹³⁾。したがって青色光を用いた上述の実験では、入射光のほとんどはa-Se膜の表面付近で吸収されることになる。また、撮像管のターゲット電圧は、信号電極側が電子ビーム走査側に対し正電位となるように印加されているため、正面入射時には正孔が、また背面入射時には電子が主たる走行キャリアになると考えることができる。したがって図5は、走行キャリアが正孔の場合と電子の場合では感度増加の特性が異なることを示している。

注入型ターゲットにおいては、その利得は膜内での光励起されたキャリアの寿命時間と注入されたキャリアの走行時間とで決まることから⁽¹¹⁾、このような現象は生じないと考えられる。これを確認するため、図6に構造を示す電子注入型ターゲットの撮像管を試作し、実験管Iの場合と同様の実験を行った。結果を図7に示す。同図では、電圧-電流特性に光入射方向依存性は認められない。したがってこれらの実験結果は、実験管Iの電荷注入動作を否定するものといえる。

(3) 電界-電流特性のSe膜厚依存性

実験管Iと同様のターゲット構成で、a-Se層の膜厚を $1\mu\text{m}$ 、および $3\mu\text{m}$ とした実験管II、IIIを試作した。これらの実験管と実験管Iのターゲット電界に対する青色光による信号電流の変化を図8に示す。いずれの場合も $0.8 \times 10^8\text{V/m}$ 以上の電界で感度増加現象が認められるが、同一電界における信号電流、すなわち感度は、膜厚が厚くなるほど高くなっている。注入型ターゲットの利得は、膜内のキャリア走行時間に反比例することから⁽¹¹⁾、膜厚増加でそれが大きくなることはありえない。したがってこの実験結果も、実験管Iの感度増加が注入増幅作用によるものではないことを示している。

上述の各実験の結果から、実験管Iの η が1を大幅に上回る感度増加現象は、従来、光導電型撮像管の唯一の高感度化手法として知られていた外部電極からのターゲット内への電荷注入によるものでなく、a-Se膜内でのアバランシェ増倍(電子なだけ増

倍)作用によるものと考えられる。すなわち、入射光によって生成された電子・正孔対がキャリアとなり、電子、正孔のそれぞれが約 10^8V/m の強電界で加速され、衝突イオン化によって新たな電子・正孔対を生成する。さらにそこで生じた新たなキャリアも同様の現象を引き起こす。これが次々と繰り返され、キャリアの数がなだれのように増倍されて増えることによるものと理解できる。この作用により、入射光子1個に対して多数の電子が透明信号電極から取り出される。なお、図5に示した実験結果は、a-Seのアバランシェ増倍におけるイオン化係数(キャリアが強電界中を単位距離走行する間に起こす衝突イオン化の回数)は、正孔のほうが電子よりも大きいことを示唆している。通常の撮像管のターゲットにおいては、入射光で生成された電子・正孔対で生じるキャリアのうち、正孔が膜内の主たる走行キャリアとなることから、このような性質は高い感度を得る上で好都合である。

以上のように、試作ターゲットを用いた実験管Iで得られた感度増加現象は、それまで知られていなかった撮像デバイス用の阻止型ターゲットで生じるアバランシェ増倍によるとの結論に至った。ここにアバランシェ増倍現象を利用した高感度なHARP撮像管が誕生したわけであるが、このようにHARP撮像管は、それとはまったく別の、電荷の注入動作を念頭に置いたターゲットの高感度化の研究から生み出された。図9にHARP撮像管のターゲットの動作原理を模式的に示す。HARP撮像管で高い感度が得られるのは、同図のようにa-Seのターゲットでアバランシェ増倍現象が生じ、かつ、その増倍でノイズがほとんど付加されないことによるものである。このノイズについては重要であるので、以下に少し詳しく述べる。

実験管Iを用いてグレースケールチャートを青色光で撮像した場合の波形を図10(a)、(b)、(c)に示す。同図(a)は、ターゲット電圧160V、すなわち非アバランシェ動作で、信号電流のピークが 200nA となるように入射光量を調整して撮像した波形である。また(b)は、ターゲット電圧を(a)のときの状態に保ったまま入射光量を1/11に減じた場合の撮像波形である。さらに(c)は、入射光量を(b)の状態に保ったままターゲット電圧を240Vまで高め、信号電流をアバラン

シェ増倍により増加させて(a)と同じ200nAとした波形である。いずれの場合も4.5MHzのローパスフィルターを使用した。10図(c)は、アバランシェ増倍により η が10となった高感度動作状態であるが、階段波形に重畳されている雑音に注視すると、同図(a)、(b)からの増加は非常に小さいことが分かる。この実験を基に算出した過剰雑音係数は約1であった。すなわち実験管Iでは、ほぼ無雑音の増幅が実現されていることになる。このような結果が得られるのは、a-Se膜の正孔と電子のそれぞれに対するイオン化係数⁽¹⁴⁾の比が大きいことに加え、ターゲットのビーム走査側がフローティング状態になっている(電位が固定されていない)ことに起因して、雑音を抑制する一種の負帰還作用が生じるためと考えている。

2. 実用型HARP撮像管のターゲット構造と主要特性

2.1. ターゲット構造

実用型HARP撮像管のターゲットの基本構造を11図に示す。a-Se、CeO₂、Sb₂S₃の層を用いている点では図1の試作ターゲットと同じであるが、実用型ターゲットでは、a-SeにAs(ヒ素)、LiF(フッ化リチウム)、Te(テルル)を添加している。Asはa-Seの結晶化を抑えて欠陥(画面キズ)の発生などを防止している。またLiFは、ターゲット内の電界制御の役割を担い、a-Se膜のCeO₂との界面付近の電界を緩和させて画面キズの発生を防いでいる。Teについては、赤色増感剤として、赤チャンネル用のターゲットに添加される。なお、LiFやTeを添加している部分の厚さは、ターゲット全体の厚さの百分の一以下と非常に薄くなっている。

2.2. 主要特性

図9の動作原理からわかるように、HARP撮像管ではターゲットが厚いほどアバランシェ増倍現象の増倍率が大きくなり、高い感度を得られる。また、残像も膜厚増加に伴って低減される。これは残像特性を支配するターゲットの蓄積容量が減少するためである。

このため、開発当初のHARP撮像管では、ターゲット膜厚が2 μ mで増倍率は約10であったが、今日で

は厚さ15 μ mの膜に1500Vのターゲット電圧を印加して、約200倍の増倍率を得るHARP撮像管^(15, 16)が製品化されている。また、厚さ25 μ mの膜に2500Vの電圧を印加して約600倍の増倍率を得るもの^(17, 18)、35 μ mの膜に3500Vの電圧をかけて1000倍以上の増倍率を得る超高感度HARP撮像管⁽¹⁹⁾も開発してきた。ここでは図12に示す膜厚25 μ mの2/3インチ型HARP撮像管を例にとり、その主要特性を述べる。

(1) 感度特性 感度を表す信号電流と暗電流の印加電圧による変化を図13に示す。同図には比較のため、通常の光導電型撮像管であるサチコンを同じ入射光量で測定した場合に得られる信号電流も示した。HARP撮像管では印加電圧2500Vの時、サチコンの600倍を超える感度を得られていることがわかる。暗電流についてはこの場合約2nAであるが、カメラ実装時の撮像管の基準信号電流200nAに比べて充分小さいことから、画質への影響は無視できる。

なお、HARP撮像管は印加電圧の制御によって感度を大幅に変えることが可能であることから、日中の屋外などの非常に明るい場所での撮影にも適用できる。

(2) 残像特性

残像は、ターゲットの蓄積容量と使用する電子銃のビーム抵抗で決まる。厚膜化でその容量が130pFに低減されているHARP撮像管の残像は非常に小さく、入射光遮断後の3フィールド目の残留信号で規定される残像値は0.1%以下と無視できる値である。

(3) 解像度特性

限界解像度は800TV本以上と良好で、アバランシェ増倍動作による解像度劣化は認められない。解像度特性は撮像管の電子ビーム径に支配されことから、よりビーム径の小さな撮像管と組み合わせるとさらに高い解像度を得られる。

(4) 分光感度特性

緑、青チャンネル用の標準型と、赤チャンネル用としてターゲットにTeを添加した赤色光増感型HARP撮像管の分光感度特性の一例を図14に示す。HARP撮像管のa-Se膜は、CeO₂との接合界面近くでも再結合による電荷の消滅が少ないことから、その部分で吸収される短波長光(青色光)に対しては高

い光電変換効率が得られる。しかし標準型のHARP撮像管の長波長光(赤色光)側感度限界は、a-Se膜のバンドギャップ約2.0eVに相当する約620nmの波長となる。カラーカメラの赤チャンネル用としては、700nm程度までの感度が求められることから⁽²⁰⁾、赤色増感剤として働くTeをa-Se膜に添加してこれに対応している。

(5) 光電変換特性 γ とダイナミックレンジ

光電変換特性、すなわち γ 値は、信号電流が小さい場合には0.85~0.9であるが、信号電流200~600nA(映像信号で100~300%)の領域では0.5~0.6と低くなる。このような白圧縮作用は、HARP膜の電圧-電流特性の急峻な立ち上がり起因して生ずるものであるが、撮像管のダイナミックレンジ拡大の観点から好ましいといえる。信号電荷読み取りの電子ビーム電流を600nAに設定した場合のHARP撮像管のダイナミックレンジは、同設定の従来型撮像管サチコンのそれに比べて数倍以上大きい。なおここでは電子ビームの電流値で決まる実効的なダイナミックレンジについて述べたが、ターゲットに蓄積される最大電荷量で決まるダイナミックレンジについては、HARP撮像管ではサチコンの約10倍大きい。

3. HARP撮像管による超高感度カメラとその応用

膜厚25 μ mのターゲットを用いたHARP撮像管のカメラは、11 lx、F8という非常に高い感度を有することから、月明かり程度の照明条件でも鮮明なカラー映像を得ることができる。その高感度性をCCDカメラとの比較撮像実験を例にとり、図15に示す。CCDカメラでは18dBのゲインアップでも撮影困難な暗い被写体を、HARPカメラは鮮明な映像として捉えていることがわかる。両者の感度差は約100倍である。

超高感度で高画質なHARPカメラは、夜間の緊急報道、夜行性動物やオーロラ、水中等の暗い被写体の撮影など、種々の番組制作に活用されている。図16にオーロラを撮影した例を示す。人家の明るい部分と夜空の暗いオーロラとを同時に捉えており、ダイナミックレンジが広いというHARPカメラの特徴がよく現れている。HARPカメラの最近の話題としては、テレビドラマや映画の夜間撮影への適用が挙げられる。

ドラマや映画の制作関係者からは、以前よりこのカメラの“夜の黒壁の影”をも捉えるような暗部階調性の良さを活かした夜間撮影に強い関心が示されていた。これに応えるため、ノイズの低減などでいっそうの高画質化を図ったドラマ用HARPカメラを新たに開発した^(21, 22)。このカメラは、テレビドラマ「クライマーズ・ハイ」や、小栗康平監督の映画「埋もれ木」の夜間ロケに使用され、従来にない自然な夜を表現できる撮像技術⁽²³⁾として高い評価を得た。

HARP撮像管による超高感度で高画質な撮像技術は、放送、映画のみならず、医学や科学技術などさまざまな分野の研究に活用されている。たとえば医学関係では、ガンの早期発見や心筋梗塞、脳梗塞などの高度な診断を目指した次世代のX線微小血管撮影装置の基礎研究に約10年前よりHARP撮像管が使用されてきた^(24, 25)。この研究成果を基に開発されたHARP撮像管内蔵の病院設置型微小血管X線撮影装置は、国立循環器病センターにおいて、足の血行障害をもった患者に対して行われる血管再生治療の評価に活用されるなど、その臨床応用が始まっている⁽²⁶⁾。図17に、国立循環器病センターに設置された微小血管X線撮影装置と、それによって捉えられた微小血管の画像を示す。従来の病院のレントゲン装置では困難であった直径50~200 μ mの細い血管が可視化できるようになった。また眼科の分野においては、手術や検査の時の照明光量を弱くして網膜に優しい手術や眼底の検査技術を開発するため、眼科用の顕微鏡に超高感度HARPカメラを取り付け、従来の数分の一以下の照明光で白内障手術や眼底検査を行うことを可能とする研究が行われている⁽²⁷⁾。

医学応用に関しては国内のみならず海外の研究機関もHARP撮像管の技術に関心を示している。特に北米では乳がんの発生率が高いことから、トロントのヘルスサイエンスセンター病院やニューヨーク州立大の研究者は、乳がん等の早期発見を目的としたX線診断装置へのHARP撮像技術の適用を熱心に検討している。一方、日本国内においてもマンモグラフィとよばれるX線による乳がん検診が重要視されるようになっている。このため筆者らは、その診断にも

活用できる、より高性能なHARP撮像管の開発のための基礎実験をこれらの海外の研究者と共同で行っている。予防医療の実現や画期的な新薬の開発などを目的とした国のバイオ研究のプロジェクトにおいても、HARPカメラは細胞の中のタンパク質分子の動きを捉える役目を担っている⁽²⁸⁾。ここでは、生きた細胞の中のタンパク質分子の動きを観察し、その挙動を明らかにすることが重要となる。観察は、テレビカメラを特殊な顕微鏡に装着して行われるが、細胞に強い光を当てるとそれが短時間で死滅することから、カメラには高い感度が求められる。また詳細な観察を可能とするためには高い解像度やノイズが少ないことも必要とされる。このようなことから現在、膜厚35 μ mで増倍率1000のHARP撮像管⁽¹⁹⁾と、それを用いた極超高感度カメラの開発が進められている。バイオ関連ではこのほか、タンパク質の結晶構造解析のためのX線用HARP撮像板の開発も始まっている。a-Seを主成分とするHARPターゲットは、X線を蛍光板でいったん可視光にすることなく、直接、電子に変換できることから、感度のみならず分解能もきわめて高い二次元X線検出器が実現されると期待されている。

海洋研究開発機構の深海無人探査機「ハイパードルフィン(3000mまで潜水可能)」には超高感度HARPカメラが搭載されている⁽²⁹⁾。深海は太陽の光がまったく届かない暗黒の世界であるため、無人探査機は通常、撮影のための照明設備を備えている。しかし水中では光の減衰が大きく、照明が遠方に届きにくいことから、そこに用いるカメラは、やはり高い感度が求められる。このようなことから深海の調査研究等にHARP撮像管が活用されているが、上述のハイパードルフィンに搭載されたHARPカメラは、深海に棲む生物を鮮明なハイビジョン映像として捉えるのみならず、スマトラ沖大地震震源域の調査では、図18に示すような地震によってできた海底の大規模な亀裂や崩落の撮影に成功するなどの成果を上げている。

このほか、大災害時における夜間の被災地情報収集の有用な技術の一つとして、国が超高感度HARPカメラによる夜間空撮技術の検討を始めるな

ど、国民の安全・安心にかかわるデバイスとしてもHARP撮像管に注目が集まっている。

以上のように、NHKのオリジナル技術の一つとして知られている超高感度HARP撮像技術は、今日では社会に広く貢献する技術へと発展している。

4.むすび

HARP撮像管の発明の経緯と、高性能化が図られた現在の超高感度HARP撮像管の主要特性を述べるとともに、この撮像技術によるさまざまな分野への応用を紹介した。

本稿では紙面の都合で実用化の研究取り組みについては省略した。しかしデバイスの研究開発で最も難しいのはその実用化である。基礎的段階の研究を進展させるのに比べ、世界と競争できる高性能デバイスを実用デバイスとして世に送り出すには、桁違いの努力、能力が求められる。それでもこれまでNHK技研では、サチコンやHARPなどの撮像デバイスを比較的短時間で実用化し、放送に供してきた。これについては、メーカー等との共同研究に負うところが大きい。それに加え、放送局の研究所であるがゆえに、常に放送現場との連携で開発を進めることができたことが挙げられる。また、研究者の多くが放送現場での勤務経験を有し、現場のニーズや技術を熟知していたことなどもある。現在でも当研究グループでは、HARPターゲットの設計やプロセス技術を担当する研究者が、番組制作現場に積極的に出向き、HARPの最新の研究成果でもって“ゆく年くる年”などの番組の夜間撮影に協力すると同時に、そこから放送局の研究所として今後開発すべき撮像デバイスを考える手がかりを得ている。このような体験を活かしながら、当グループでは次世代の超高性能撮像デバイスの実現をめざして冷陰極HARP撮像板とよばれる薄型の超高感度・高機能撮像デバイスの研究をすでに開始している^(30, 31)。

“ものづくり”であるデバイス開発を担当する研究者には、材料の開発から実用化までの地味で息の長い研究取り組みにも耐えられる粘り強さが求められる。しかしその成果が放送のみならず医学や科学技術などの研究に活用され、人類の幸せにつながる

ことを考えれば、デバイスの研究は大変やりがいのある大きな仕事といえる。

最後に、HARP撮像管とそのカメラの開発に、共同研究等を通して長年にわたりご協力いただいた、株式会社日立製作所、浜松ホトニクス株式会社、株式会社日立国際電気の関係各位に深謝いたします。

参考文献

- (1)河村: “高感度撮像デバイス”, NHK技研月報, 昭和57.1, (1982), pp.7~14
- (2)藤田, 安藤, 小池, 安藤: “超高感度ハンディカメラ用撮像素子とその構成” テレビ全大, 2-1, (1987), pp.17~18
- (3)安藤, 藤田, 安藤, 小池, 北原, 河村: “II.付きCCD超高感度ハンディカメラの開発” テレビ全大, 2-2, (1987), pp.19~20
- (4)G. A. Robinson: “The Silicon Intensifier Target Tube” SMPTE J., 86, June.(1977), pp.414~418
- (5)K. Shidara, N. Goto, E. Maruyama, T. Hirai and Y. Nonaka: “The Advanced Composition of SATICON Photoconductive Target” IEEE EDL, EDL-2, 4, Apr.(1981), pp. 101~102
- (6)谷岡, 設楽, 河村, 後藤: “光導電性ターゲットの高利得化” テレビ全大, 2-5(1985)
- (7)K. Tanioka, J. Yamazaki, K. Shidara, K. Taketoshi, T. Kawamura, S. Ishioka, and Y. Takasaki, “An avalanche-mode amorphous selenium photoconductive layer for use as a camera tube target” IEEE Electron Device Letters, EDL-8, 9, Sept., (1987), pp.392~394
- (8)谷岡, 山崎, 設楽, 竹歳, 河村, 平井, 高崎, 雲内: “アバランシェ増倍a-Se光導電膜を用いた高感度HARP撮像管” テレビ誌, 44.8, (1990), pp.1074~1083
- (9)D. M. Pai and R.C.Enck: “Onsager Mechanism of Photogeneration in Amorphous Selenium” Phys. Rev. B, 11, 12, (1975), pp.5163~5174
- (10)E. Maruyama: “Amorphous Built-in-Field Effect Photoreceptors” JJAP, .21, .2, Feb.(1982), pp.213~223
- (11)竹谷: 半導体工学, 日刊工業新聞社(1966)
- (12)後藤: “11/2インチビジコンの残像特性” テレビ誌, 18, 3, (1964), pp.11~18
- (13)S. H. Hagen and P. J. A. Derks: “Photogeneration and Optical Absorption in Amorphous Se-Te Alloys” J. Non-Crystalline Solids, 65, (1984), pp.241~259
- (14)辻, 牧島, 鮫島, 長妻, 平井, 谷岡, 竹歳, 設楽: “超高感度アバランシェ増倍型撮像管” テレビ学技報, 15, 52, IPU'91-52, (1991), pp.7~12
- (15)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” 2001映情学年大, 23-7(2001)
- (16)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” 2001映情学年大, 23-8(2001)
- (17)久保田: “超高感度新Super-HARPカメラの開発” NHK技研R&D, 41, 8, Aug.(1996), pp.45~52
- (18)K. Tanioka, T. Matsubara, Y. Ohkawa, K. Miyakawa, S. Suzuki, T. Takahata, M. Kubota, N. Egami, K. Ogusu, A.Kobayashi, T. Hirai, T. Kawai, M. Hombo, and T. Yoshida: “Ultra-high-sensitivity New Super-HARP Pickup Tube and Its Camera” IEICE Trans., Electron., E86-C, 9, Sept.(2003), pp.1790~1795
- (19)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” 2003映情学年大, 12-3 (2003)
- (20)R. G. Neuhauser: “Photoconductors Utilized in TV Camera Tubes” SMPTE J., 96, 5, (1987), pp.473~484
- (21)大川, 松原, 宮川, 鈴木, 高島, 久保田, 谷岡, 小楠, 小林, 平井, 河合: “15 μ m厚新Super-HARP膜の赤色光に対する感度向上” 2005映情学年大, 22-5 (2005)
- (22)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” 2005映情学年大, 23-5(2005)
- (23)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” 2005映情学年大, 23-6(2005)
- (24)盛, 山川, 篠崎, ミンハズ, 田中, 中沢, 田中, 後藤, 飛田, 石過, 三富, 岩田, 松山, 青木, 阿部, 半田, 兵藤, 安藤, 谷岡, 久保田: “単色放射光を線源とする微小血管造影法とその臨床応用” 放射光, 8, 4, (1995), pp.50~57
- (25)久保田, 加藤, 鈴木, 谷岡, 盛, 兵藤: “ハイビジョン新Super-HARP撮像管とその放射線医療診断への応用” テレビ学技報, 20, 71, (1996), pp.13~18
- (26)第3回産学官連携功労者表彰, 日本学術会議会長賞, P.8(2005)

- (27)三宅: “高感度ハイビジョン3D-TVシステムを用いた新しい眼科観察法の可能性” 第41回日本眼光学学会・第20回眼科ME学会合同学会総会プログラム・抄録集, (2005), p.16
- (28)NEDO技術開発機構バイオテクノロジー・医療技術開発部, Jan.(1995), pp.3~4
- (29)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” JAMSTECR, 43, (2001), pp.107~114
- (30)N. Negishi, T. Nakada, K. Sakemura, Y. Okuda, H. Satoh, A. Watanabe, T. Yoshikawa, K. Ogasawara, M. Nanba, S. Okazaki, K. Tanioka, N. Egami, N. Koshida: “High-Current Emission from Active-matrix HEED (High-efficiency Electron Emission Device) -application to image sensing” Proc. of IVNC, (2005), pp.72~73
- (31)N. Egami, M. Nanba, Y. Takiguchi, K. Miyakawa, T. Watabe, S. Okazaki, K. Osada, Y. Obara, M. Tanaka, S. Itoh: “50 × 50 μ m pixel magnetic focus field emitter array image sensor with high-gain avalanche rushing amorphous photoconductor target” JVST B, 23, 5, (2005), pp.2056~2062

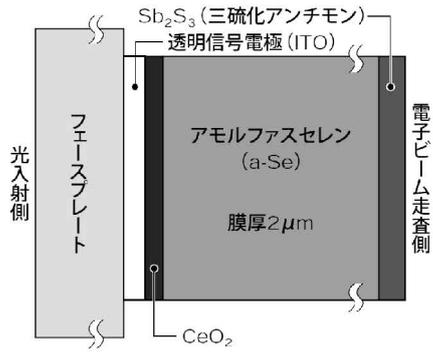


図1 試作ターゲットの構造

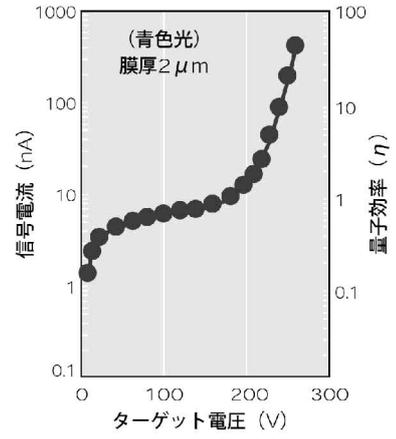
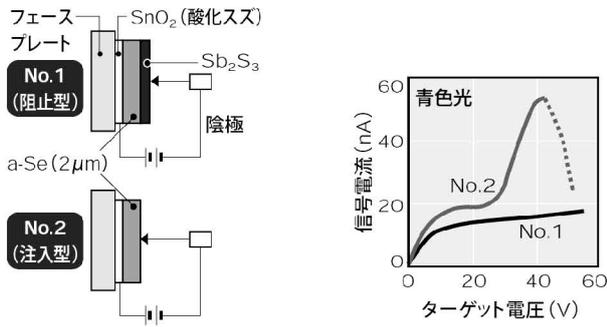


図2 試作ターゲットの電圧・電流特性



(a) ターゲット構造 (b) 電圧・電流特性

図3 ターゲット構造と電圧・電流特性の関係

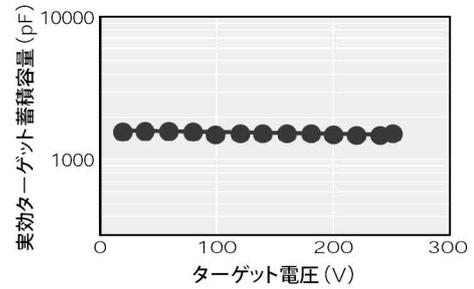


図4 実効ターゲット蓄積容量

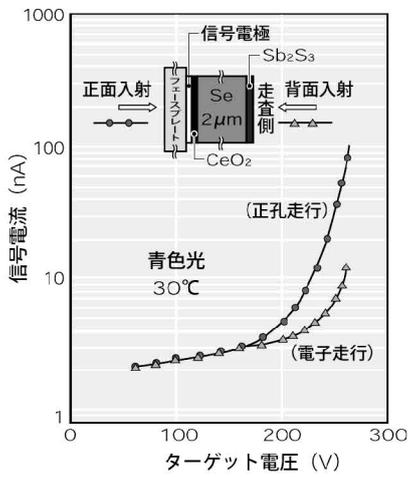


図5 電圧・電流特性の光入射方向依存性

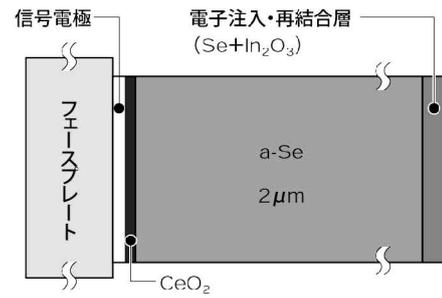


図6 電子注入型ターゲット

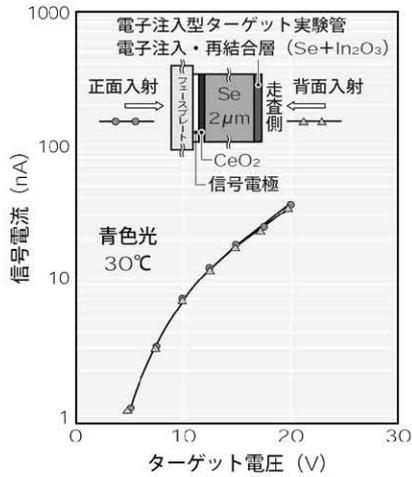


図7 電子注入型ターゲットの電圧-電流特性(光入射方向依存性)

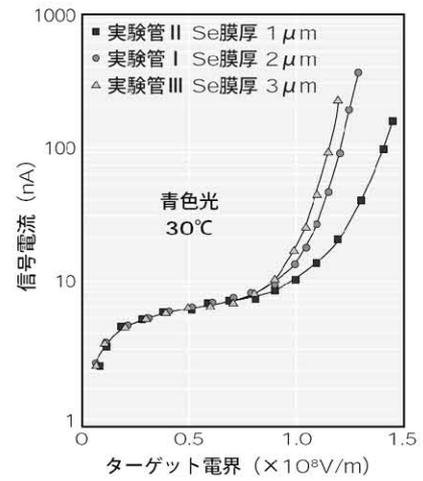


図8 電界-電流特性

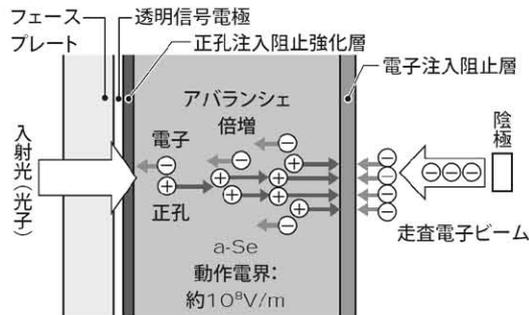


図9 HARP 撮像管の動作原理

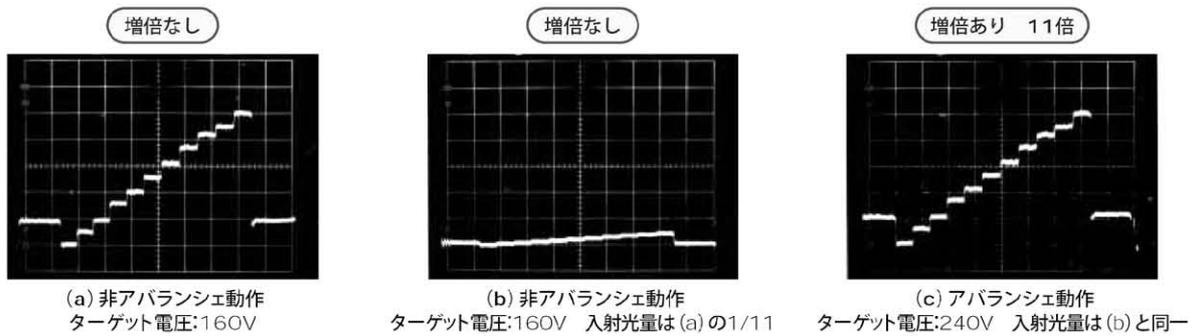


図10 グレースケールチャート撮像波形(増倍の有無とノイズの関係)

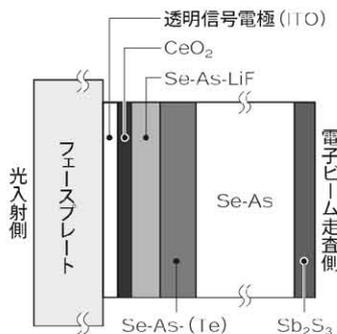


図11 実用型ターゲットの基本構造



図12 2/3 インチ型 HARP 撮像管 (ターゲットの膜厚: 25 μm)

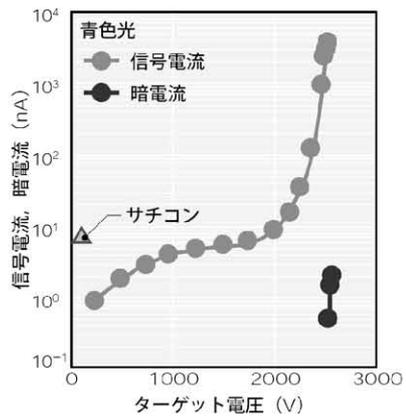


図 13 膜厚 25 μ m ターゲットの電圧-電流特性

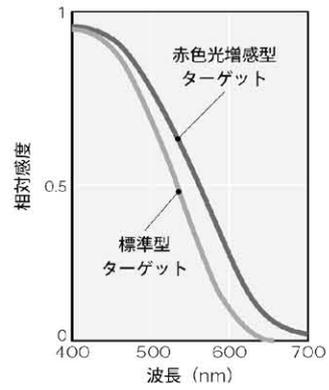


図 14 分光感度特性の一例



HARP カメラ(膜厚 25 μ m、増倍率約 600)



CCD カメラ(+18dB)

撮影条件：0.3ルクス（月明かり程度）F1.7

図 15 感度比較実験例



図 16 オーロラの撮影例



図 17 微小血管 X 線撮影装置と微小血管画像
(国立循環器病センター)



図 18 HARP カメラで撮影されたスマトラ島沖震源域の海底(海洋研究開発機構)