

# 解 説

## 極微弱光域画像化計測の現状と将来

土 屋 裕

浜松ホトニクス(株)中央研究所 〒434 浜北市平口 5000

(1993年2月25日受理)

### Ultra-Low-Light-Level Imaging and Measurement: Present and Future

Yutaka TSUCHIYA

Central Research Laboratory, Hamamatsu Photonics K. K., 5000, Hirakuchi, Hamakita 434

#### 1. はじめに

宇宙誕生の瞬間に、光は宇宙に満ち満ちていたといわれ、現在でもいたるところに光がある。この光と物質は切っても切れない深い関係にあり、万物の基本構成要素である原子は光を吸収し、放出する。そこでこのような光と物質の相互作用が研究されて、1960年にレーザーが発明された。

現在では光を利用した種々の極限域計測<sup>1)</sup>、例えば極微弱光を検出して極微小領域の極微量分析や計測<sup>2)</sup>、超短光パルスを利用して超高速量子現象の計測や解析<sup>3)</sup>、さらにはエバネッセント光を利用して原子や分子寸法域の超高空間分解計測<sup>4)</sup>などが可能になった。利用される光の波長は、可視光域から近赤外線、紫外線、さらにはX線域などに拡大されてきている。また、特殊な状態の光であるスクイズド光の研究も進展し<sup>5)</sup>、電子波のような物質波を利用する計測技術も開発されている<sup>6)</sup>。

このような極限域の光計測は、「サイエンスと光は表裏一体の関係にある」と考えると理解し易く、またその将来展望もはっきりしてくる。つまり、光は物質との相互作用があるがゆえに、サイエンスの目的である真理の追究に必須となる各種の計測に、さまざまな意味で大きな役割を果たし、上記のような光計測の発展とあいまって、サイエンスが発展すると考えられる。したがって、究極の光計測は单一フォトン(光子)を吸収、発生する単一原子の計測になるといえるだろう。

元来、微弱光域の画像化計測技術は、暗くて見えないもの、レーザー励起蛍光やラマン光、生物発光や化学発光、望遠鏡による天体観測像などのように、もともと微

弱な光現象や微弱なスペクトル情報の計測に不可欠なものとして発展してきた。しかし最近では、前述のような極微小領域の極微量成分の高精度で迅速な計測、あるいは極微量成分の高時間分解計測などのニーズが、ますます強くなってきた。これらでは、いずれの場合にも、計測精度を向上すると、計測に利用できる光子数が減少して、SN(信号対雑音)比が低下するという基本的な問題が生じる。また、3次元の計測対象を考慮すると、2次元計測機能が必要になる。したがって、極微弱光計測では、これらの課題が同時に解決される必要がある。

以下では、最近の極微弱光域画像化計測について、基本要素技術であるフォトン検出、計測システム、および実際の応用について概説し、その将来を展望する。

#### 2. フォトン検出

光計測には光を測るものと光で測るものがあるが、いずれの場合も、光検出に光電効果を利用している。ところが、極微弱光現象や超高速光現象の計測、極微小領域の高精度光計測、広ダイナミックレンジ計測などでは、計測に利用できる単位精度当たりのフォトン数が減少するため、計測精度が量子限界によって制限される。

電磁波である光は、波動性と粒子性を同時にもつていて、光電検出されるとき粒子性が現れ、 $h\nu$ なるエネルギーをもつ微粒子、つまりフォトンの空間的、時間的分布として検出される。ここで、 $\hbar$ はプランク定数、 $\nu$ は光波の振動数である。光電効果は、物質がこのような光を吸収して光電子を生成する現象であり、通常は1個の光電子が1個のフォトンによって生成される。したがって、フォトン検出では、1個の光電子からなる極微弱

信号を低雑音で増幅して、所定の強度の電気信号に変換することが最重要技術になる。また以上から、フォトン検出が破壊型の検出であること、光検出の下限が単一フォトンの検出にあること、計測の SN 比が光検出器の性能、あるいは光子数雑音（光子数のゆらぎ）、つまり量子限界で制限されることなどが理解される。

通常、光検出の量子限界は検出可能最小パワー  $P_{\min}$  で表され、

$$P_{\min} = h\nu B/\eta \quad (1)$$

となる。ここで  $B$  は帯域幅、 $\eta$  は量子効率である。

以上から、量子限界を実現する究極のフォトン検出器は、 $\eta=1$  で高速応答性をもち、かつ 1 個の光電子を所定の強度の信号に低雑音で増倍する機能をもつ必要があることがわかる。

### 3. 極微弱光域画像化計測装置

冷却型 CCD (charge coupled device) が 1981 年ごろから天文観測に利用されている<sup>7)</sup>。また、光子 1 個 1 個を検出して画像化計測する光子計数型の画像計測装置 (PIAS, photon-counting image acquisition system) が実用化されてから<sup>8,9)</sup>、既に 10 年以上が経過した。現在では、研究分野から産業分野に至る広い領域で、各種の極微弱光域画像化計測装置が使用されている。

これらの装置では、①単一フォトン（厳密には単一光電子）の 2 次元検出、②約 100 fs の時間分解能<sup>10)</sup>、③波長と同程度の空間分解能、④0.1 nm 程度の波長分解能、⑤X 線～近赤外線域での検出、⑥上記のほぼリアルタイム計測などが、個別の装置で実現されている。

#### 3.1 光電子放出効果を利用した装置

図 1 は PIAS の動作原理を示す<sup>8,9)</sup>。入射フォトンは光電面で電子に変換され、この光電子は 3 段接続の MCP (microchannel plate) で約 10<sup>7</sup> 倍 (2.7 kV 印加時)、さらに位置敏感型の半導体位置検出器 (PSD) で電子衝撃効果によって約 10<sup>2</sup> 倍 (3 kV 加速時) に増倍される。3 段接続 MCP のパルス波高分布は急峻なピークを示すため<sup>11)</sup>、増倍率ゆらぎが小さくなり、後段のパ

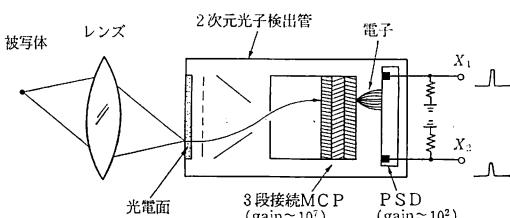


図 1 PIAS の動作原理

ルス波高弁別回路による雑音除去処理とあいまって、高い光子計数精度、さらには高い SN 比が得られる。

PSD に発生する電荷は、表面の抵抗層を経て 4 個の周辺電極に分配されるから、それら 4 個の信号を演算して PSD に入射する電子流の重心、つまりフォトンの入射位置が求められる。そこで、この信号を画像メモリで各位置ごとに計数し、結果をテレビ方式で読み出せば、光子計数画像 (photon-counting image) が得られる。

通常、光電面は、暗電流雑音を減らすために -20°C 程度に冷却する。また、光電面の材質を選択したり、MCP の入射面を検出面として用いるなどの方法により、X 線、真空紫外線、紫外線、可視光線、さらには、電子やイオンなどの荷電粒子の画像化計測ができる。

図 2 は PIAS の入出力特性を示す<sup>8,9)</sup>。極微弱光照明下のテストチャートを撮像し、階調の異なる二つの部分 A と B (16 × 16 画素) の信号 (カウント/画素) と SN 比の関係を求めた。直線は、光子数雑音の理論値であり、実験値と理論値とがよく一致することがわかる。

VIM (video intensified microscopy camera. 超高感度顕微鏡 テレビカメラ)<sup>12,13)</sup> は、超高感度画像増倍管 (II, image intensifier)<sup>14)</sup> と CCD カメラなどの撮像装置を接続したもので、テレビ方式の光子計数画像が得られる。この超高感度 II は、前記フォトン検出管の PSD の部分に蛍光面を配置したものである。

また、ピコ秒域の時間分解機能をもつ装置として、光子計数型ストリーカカメラがある<sup>15)</sup>。超高速ストリーカカメラは、超高速光現象をサブピコ秒という超短時間分解能で直接計測できる唯一の装置であり<sup>3)</sup>、MCP による高ゲインの電子増倍 (>10<sup>3</sup> 倍) によって、数少ないフォトンを検出することができる。上記の光子計数型ス

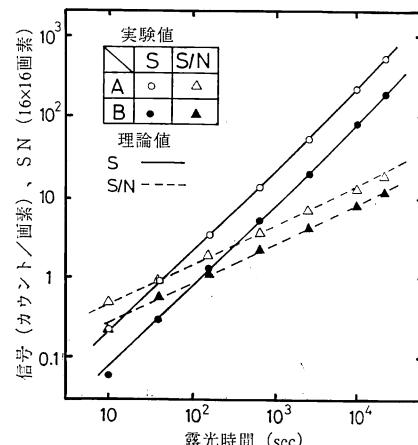


図 2 PIAS の入出力特性

トリーカカメラは、急峻なパルス波高分布特性を示す2段接続のMCPを内蔵したストリーカ管を使用しているため、電子増倍ゆらぎが改善され、より確実に単一光電子を検出することができる。

### 3.2 冷却型CCDカメラ

冷却型CCDカメラは、冷却によってCCDの暗電流が減少することを利用し、極微弱光情報をCCDチップの中で積算して画像化するものである。CCDの雑音は読み出しに伴う雑音、暗電流雑音 $N_d^{1/2}$ 、暗電流 $N_d$ の $1/4 \sim 1/10$ 倍の固定パターン雑音などがある。固体撮像デバイスに特有のスイッチング雑音は、相関2重サンプリング法によって大幅に低減できるため、読み出しに伴う雑音の主なものはアンプ雑音になる。

暗電流 $N_d$ は、絶対温度を $T$ 、Siのエネルギーギャップを $E_g$ (eV)としたとき、

$$N_d = CT^{3/2} \exp(-E_g/2\kappa T)$$

$$E_g = 1.1557 - \frac{7.021 \times 10^{-4}}{1108 + T} T^2 \quad (2)$$

で表される<sup>7)</sup>。ここで、 $C$ は定数、 $\kappa$ はボルツマン定数(eV)である。この式を用いると、ある温度における暗電流の実測値から、任意の冷却温度のときの暗電流値を推定することができる。

図3は2/3インチIT-CCD(interline transfer CCD, 510×492画素)を冷却したときの暗電流特性を示す<sup>2)</sup>。図中の○印は実測値、実線は $T = -21.7^\circ\text{C}$ のときの暗電流の実測値 $N_d = 18.6$ 電子/画素・sを(2)式に代入して求めた曲線である。このCCDを $-30^\circ\text{C}$ に冷却すると、暗電流は $N_d \approx 7$ 電子/画素・sとなるから、暗電流が飽和レベル(80,000電子)に達するまでに約3時間かかることがわかる。

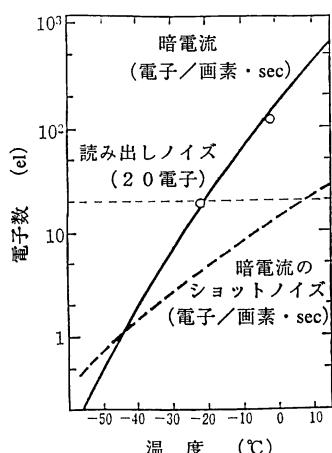


図3 冷却型CCDカメラの暗電流の温度特性

この冷却型CCDカメラで分光器のスペクトルを計測する場合、ビニング(binning)と呼ばれる機能によって、信号をCCDチップの中でスリット方向に積分して読み出す方法がある。このビニングはSN比の改善に効果があり、ビニング範囲は可変である。また、画面の中の一部分のみを高速に読み出す方法もある<sup>16)</sup>。光の利用率はCCDの開口率に比例し、インターライン転送CCDでは25%程度であるが、フレーム転送CCDでは100%になる。

以上のような冷却型CCDカメラは、量子効率 $\approx 1$ 、開口率 $\approx 100\%$ 、およびショット雑音レベルの2次元光検出ができるが、信号に対する增幅率が足りないため単一フォトンの検出はできない。

## 4. 応用例

表1は、極微弱光域画像化計測の主な応用例を示す。以下では、これらの中の代表例について述べる。

### 4.1 光子の挙動の画像化計測

PIASを用いて、フォトンのもつ粒子と波動の二重性を端的に示す画像化実験ができる。最初の実験は1981年に行われ、図4に示す結果が得られた<sup>8,9,17)</sup>。計測を開始するとモニタ画面のランダムな位置に輝点が次々に現れ(図4(a)), 時間の経過とともに干渉縞がしだいに明瞭になってくる(図4(b))。二重スリットの片方を閉じると干渉縞は現れず、輝点の数が半分になる。この様子は、ビデオに撮ると効果的に見える。

PIASでは、位置精度 $\approx 30\text{ }\mu\text{m}$ 、時間精度 $\approx 10\text{ }\mu\text{s}$ が得られ、読み出し回路を工夫すればns域の時間精度も得られる。PIASを用いた実験としては、このほかに、200cps程度の極微弱光情報を形成するフォトンの到達確率がポアソン分布になることを確認した実験<sup>9)</sup>、個々の単一フォトンが色情報をもつことを確認したカラーフォトンカウンティングイメージング<sup>8,9)</sup>、単一光子領域におけるホログラフィー作成<sup>18)</sup>などの実験例がある。また最近、単一光子状態におけるフレネル・アラゴの干渉実験が行われ、1個1個のフォトンが直交した二つの偏光子を同時に通過することが確認された<sup>19)</sup>。なお、これらの詳細は参考文献を参照されたい。

### 4.2 超短時間域の光子統計

光子計数型ストリーカカメラを利用して、ピコ秒領域の光子相関(厳密には光電子相関)計測ができる。これは、光源から飛来するフォトンの到達時間差を計測するもので、ほぼリアルタイムで量子放射場の時間・空間コーヒーリンスが計測できる。筆者らの実験では、單一モード

表 1 極微弱光域画像化計測の主な応用分野

分 野	計 測 対 象	計 測 手 法 な ど
理 工 学	光子挙動／統計 冷却イオンの結晶 量子効果 陽子崩壊、宇宙線 荷電粒子 プローブマ 表面解析 天文、宇宙観測	光子計数画像化、超高速時間分解計測 蛍光の光子計数画像化など 光子計数画像化、超高速時間分解計測 チエレンコフ光による3次元計測 荷電粒子の直接画像化計測 プローブ光による3次元計測 光子、電子、荷電粒子の画像化計測 超高感度画像化、分光画像計測など
分 析	発光、吸収など	光子計数画像化、時間分解分光計測など
半導体	信頼性、故障 材料の品質や物性	ラッチアップ、絶縁破壊、キャリヤ再結合による極微弱発光の画像化計測 蛍光寿命マッピング
バイオ／医用	細胞内イオン分布 DNA配列 脳などの生体機能	蛍光試薬による超高感度画像化計測 蛍光試薬による超高感度画像化計測 ポジトロン核種（標識）による画像化計測

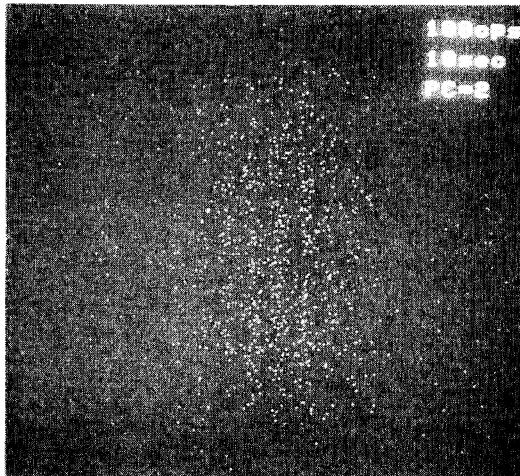
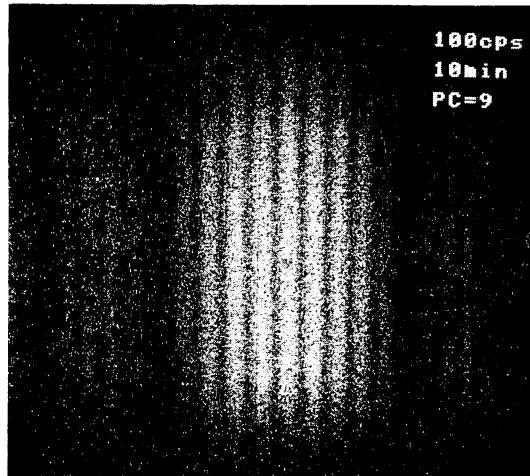
(a) 計測開始 10 秒後、フォトン数は約  $10^3$  個(b) 計測開始 10 分後、フォトン数は約  $6 \times 10^4$  個

図 4 フォトンがつくるヤングの干渉縞

ド He-Ne レーザーから発するフォトンの時間分布が、最短 10 psまでの領域でポアソン分布に従うことが確認されている<sup>2,3,20</sup>。

実験や結果についての詳細は参考文献<sup>20</sup>に譲るが、この方法は、第 2 高調波、和・差周波、スクイズド光などの光子統計計測にも有効であると考えられる。

#### 4.3 トランプされたイオンの相転移観測

電磁場でトランプしたイオンを冷却して熱エネルギーを弱めていくと、個々のイオンがトランプ力とクーロン力のつり合う場所に停止し、これらが規則正しく並んだ結晶状態になる。ここでトランプ条件を少し変えると、

イオンはすぐに動きだして雲のようになり、しばらくすると再び結晶化する。

Walther らは、ポールトラップでトランプしたイオンをレーザー冷却し、イオンが吸収した光を再放射する際の極微弱蛍光を、PIAS あるいは VIM で画像化することにより、この相転移を初めて可視化した<sup>21</sup>。この実験では、7 個の 1 価の Mg イオンが平均間隔 23 μm で規則正しく結晶状に並ぶことなども観測された。

#### 4.4 VLSI の内部のホットエレクトロン計測

半導体デバイスの内部に生じる高電界が電子の離脱現象を引き起こし、そのとき発生するエネルギーの高いホ

ットな電子や正孔がMOSゲート絶縁膜などに注入・捕獲され、絶縁膜の破壊や特性の経時変化を生じさせる現象をホットキャリヤ効果と呼び、VLSI(very large scale integrated circuit)などで大きな問題になっている。従来は、このようなホットキャリヤ効果を電気的に測定していたが、最近、ホットキャリヤが急減速、あるいは再結合するときの極微弱発光を計測する手法が開発され、これを利用した専用装置が開発された<sup>22)</sup>。

この装置は先に述べたVIMを応用したもので、ホットキャリヤのほかに、マイクロプラズマリークの発光や少数キャリヤの再結合による発光などの動的変化を計測することができる。

図5はバイポーラトランジスタの少数キャリヤの再結合による発光、また図6はFETのゲート酸化膜の微少リーキによるマイクロプラズマ発光の計測例を示す<sup>23)</sup>。このような計測は、VLSI、高速FET、高速メモリIC

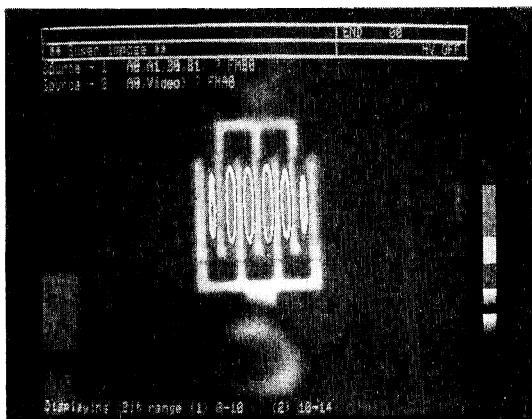


図5 バイポーラトランジスタ内の少数キャリヤの再結合による極微弱発光（電極画像に重畳表示）

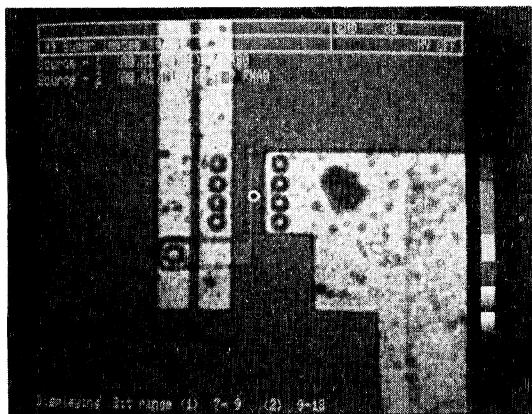


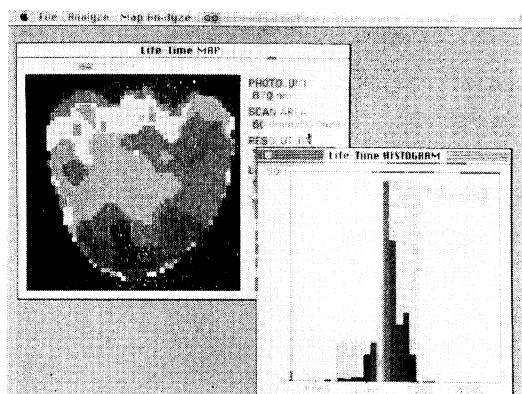
図6 FETゲート酸化膜の微少リーキによる極微弱マイクロプラズマ発光（電極画像に重畳表示）

などの信頼性設計、故障解析、検査などに広く使用されている。

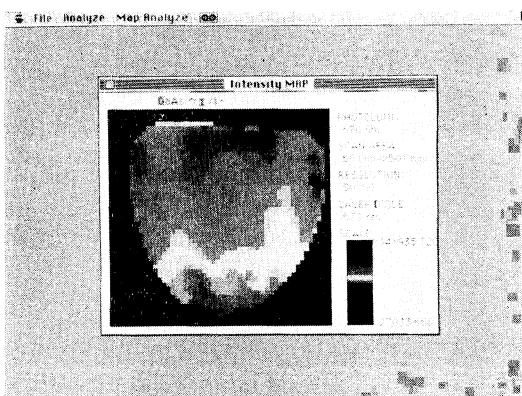
#### 4.5 蛍光寿命マッピング

GaAsウェハなどのレーザー励起蛍光を超高速ストリーケカメラで計測して、その蛍光寿命の2次元分布をマッピングする装置が開発されている<sup>23)</sup>。従来の半導体ウェハの評価試験では、蛍光強度分布のみを測定していたが、蛍光寿命分布と蛍光強度分布との間には、図7(a), (b)に示すような顕著な差があることが明らかになり、蛍光寿命分布を計測する方法が新しい評価、測定、解析法として注目されている。

図7のデータは、波長670 nm、パルス幅約40 psの半導体レーザー光でGaAsウェハを励起したときに得られる870 nmの蛍光を計測したもので、図(a)から、蛍光寿命は2.0~3.2 nsの範囲にあることがわかる。このような計測法は、半導体や固体材料だけでなく、バイオ試料などにも適用でき、今後の応用が期待される。



(a) 蛍光寿命マップと蛍光寿命のヒストグラム



(b) 蛍光強度マップ

図7 GaAsウェハの蛍光寿命分布と蛍光強度分布

#### 4.6 細胞内 Ca イオンなどの計測

顕微鏡に極微弱光域画像化計測装置を結合すると、従来は不可能であった種々の新しい計測が可能になる。最近では、蛍光試薬を巧みに利用して、生きた細胞の中の Ca イオンや Mg イオンの挙動計測、細胞内のタンパク質や抗体タンパクの挙動計測、細胞質の pH の測定、さらには、バイオ発光による細胞レベルでの生体機能の計測などが盛んになった<sup>24)</sup>。これらの計測では、主として蛍光顕微鏡が用いられるが、その出力像は極微弱である。また、励起光による試料の損傷や光退色の問題があるため、高検出感度かつ計測時間の短い計測手段が必要である。

蛍光試薬としては、Ca イオン測定では Fura-2、また Mg イオン測定では mag-Fura-2 がよく使用される。これらは、Ca イオンや Mg イオンと結合すると、励起波長に対する蛍光スペクトル（励起スペクトルと呼ばれる）が変化する。したがって、波長の異なる二つの励起光に対する蛍光強度の比から、Ca イオンや Mg イオンの濃度を求めることができる<sup>25)</sup>。

VIM は、レシオイメージングと呼ばれる画像間演算によって、波長の異なる二つの励起光に対する蛍光画像の比を演算し、各画素ごとに上記の比、つまり各部のイオン濃度を計測することができる<sup>26)</sup>。図 8 は、細胞内 Mg イオン分布の計測結果の例を示す<sup>27)</sup>。

上記のほかにも種々の蛍光試薬が利用されており、個々の分子の検出や計数が可能になり<sup>28)</sup>、遺伝子配列解読への応用も試みられようとしている<sup>29)</sup>。また、発芽根からの極微弱バイオ発光が計測され<sup>30)</sup>、最近では、バイオ発光などを研究対象にした稲場生物フォトンプロジェクトが実施された<sup>31)</sup>。バイオ分野では、多種、多量の成分

の中に混在する極微量の特定成分を計測することが多いため、背景光や散乱光などの雑音を効果的に低減する技術が、特に重要になる。

## 4.7 その他の応用例

化学発光を利用して、超微量分子の薄膜透過を画像化して計測する方法が開発されている<sup>32)</sup>。これは、超微量分子が薄膜を透過して、発光性分子と触媒を混合した液に入るときに生じる極微弱発光を、超高感度テレビカメラで撮像して計測する。この方法は、毎秒  $10^{-12}$  モル程度までの極微量透過の空間・時間分解計測ができ、均一膜のピンホール、気体透過のバリヤー性、膜の均一性などが評価できる。今後は、塗膜や保護膜、絶縁膜、食品包装膜、薬品容器、薬剤包装膜、生体膜、皮膚、LB 膜、蒸着膜などへの応用が期待されている。

また、光磁気材料、超電導材料などは極微弱光を発するといわれている。極微弱光域画像化計測技術は、このような新材料、物性研究などの分野にも広がると考えられる。

## 5. おわりに

以上のように、極微弱光域の画像化計測は、さまざまな分野の計測、実験、評価、分析、解析、試験などに利用されている。新しいものを求めて計測が行われ、その結果がさらに新しい高度な計測を要請するという道理によって、計測性能は今後も向上していく。

ところが、極微弱光域の画像化計測では、極限域の性能、すなわち単一フォトンの検出が実現されている。また、超高速ストリークカメラを用いた時間分解分光計測では、時間分解能と波長分解能は不確定性の関係に抵触する<sup>3)</sup>。このように考えると、計測機能の複合化や同時化など、従来とは異なった観点からの研究開発も必要になろう。

要素技術であるフォトン検出では、今後、次の研究開発が必要であろう。

### (1) 量子効率の向上

光電面をもつフォトン検出器では、可視域の量子効率が高々 0.3 であるから、量子効率の高い光電面の開発が不可欠である。これは特に、非古典光の計測で重要になる。この場合、誘導放出を利用する光増幅との得失比較から、まず量子効率  $n > 0.5$  の達成が強く望まれる。

## (2) 光電子増倍雑音の低減

フォトン検出の精度向上には、電子増倍過程の雑音（利得のゆらぎ）低減が不可欠であり、MCP のような 2 次電子放出効果を利用する電子増倍部では、増倍部の

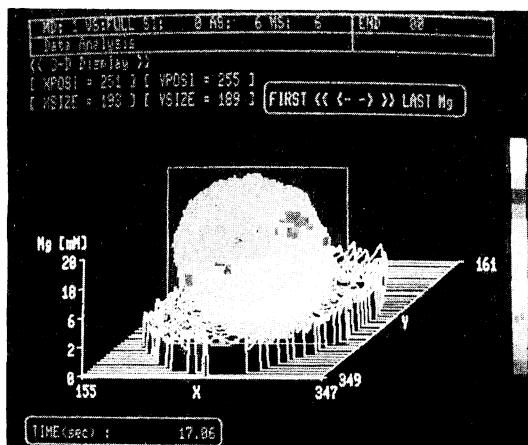


図 8 細胞内の Mg イオン分布の 3D 表示例

初段に用いる2次電子放出比 $\delta$ の大きい材料を開発する必要がある。初段の $\delta$ が大きくなると、パルス波高分布特性は鋭いピークを示すようになり、理想状態( $\delta=\infty$ )では利得ゆらぎのない無雑音電子増倍が実現される。

また、CCDなどの半導体光検出器では、アバランシェ効果などを利用して、半導体内部に得られる光電子を効率よく増倍する必要がある。このとき、増倍部の構造などを工夫して、初期過程の増倍率を大きくすることが最も重要である。

### (3) 赤外線域の單一フォトン検出

現在の半導体赤外線検出器は、ショット雑音レベルの赤外光検出ができるが、單一フォトン検出はできない。また、量子効率も小さい。

### (4) 時間分解能の改善

人類が制御できる最短の光パルス幅は 6 fs であり、光波の約3周期分に相当する。他方、光電子放出過程は、光電面の厚さなどを考慮すると、10 fs 程度であると推定されるが、確かではない。最近報告された 100 fs 域の時間分解能をもつ超高速ストリークカメラ<sup>10)</sup>では、ストリーク管内の空間電荷密度が問題になる。つまり、管内を飛行する電子パケットがクーロン力によって広がるため、時間分解能が制限される。そこで、光電面の直後に 91 kV/cm の超高加速電界を印加して電子広がりの影響を低減しているが、蛍光面上の掃引速度は光速を超えた  $7 \times 10^8$  m/s になる<sup>10)</sup>。今後この手法がどこまで進展するか興味深い。

さらに、遠い将来を考えると、量子限界を超える新しい計測法の研究開発が必要になる。ここでは、光子数確定状態のスクイズド光<sup>5)</sup>など、非古典的な光をプローブとして使用することが考えられる。また、微小信号のキャリヤであるフォトンを量子非破壊計測<sup>33)</sup>によって多重回計測して、SN 比を改善する試みもなされよう。さらに、この種の新しい原理を応用した無雑音光子数増倍が実現されるかも知れない。この無雑音光子数増倍は、スクイズド状態の低雑音性が光学的損失によって失われることを克服する意味で、特に重要である。これらを実現するには、透明で非線形光学定数の大きい材料の探索が急務である。

最後に、筆者は 21 世紀に向けて、單一フォトンを扱う “Single Photon Photonics” を推進していくたいと考えているので、これを機会に読者諸兄のご教示、ご支援をお願いしたい。

## 文 献

- 1) 例えば、土屋 裕：“極限域光現象の画像化計測”，レーザー研究，13 (1985) 52-68；“微弱光および超高速撮像技術”，テレビ学誌，41 (1987) 415-422.
- 2) 例えば、土屋 裕：“極微弱光計測”，計測と制御，29 (1990) 49-55；“微弱光計測”，オプトロニクス，104 (1990) 63-70；“微弱光計測”，次世代光テクノロジー集成（オプトロニクス社、東京、1992）pp. 387-396.
- 3) 例えば、土屋 裕：“ストリークカメラによる超短光パルス計測”，レーザー研究，15 (1987) 896-904；“超高速光検出技術”，超高速光エレクトロニクス，末田 正，神谷 武志 編（培風館、東京、1991）pp. 216-239；“Streak cameras for ultrafast time resolved photon detection,” Proc. SPIE, 1599 (1992) 244-270.
- 4) 例えば、蔣 曙東，富田直幸，大津元一：“フォトン走査トンネル顕微鏡”，光学，20 (1991) 134-141；大津元一，堀 裕和：“フォトン STM の実験と理論”，光学，21 (1992) 780-788.
- 5) 例えば、山本喜久：“非古典的光子—スクイズド状態、光子数状態、サブポアソン状態—”，応用物理，54 (1985) 671-676；北川勝浩，山本喜久：“光のスクイジング”，レーザー研究，15 (1987) 753-763.
- 6) 例えば、外村 彰：“電子線ホログラフィ”，計測と制御，29 (1990) 41-46.
- 7) M. M. Blouke, J. R. Janesick, J. E. Hall, M. W. Cowens and P. J. May：“800×800 Charge-coupled device image sensor,” Opt. Eng., 22 (1983) 607-614.
- 8) Y. Tsuchiya, E. Inuzuka, T. Kurono and M. Hosoda：“Photon-counting imaging and its application,” Adv. Electron. Electron. Physics, 64A (Academic Press, London, 1985) pp. 21-31.
- 9) Y. Tsuchiya, E. Inuzuka, T. Kurono and M. Hosoda：“Photon-counting image acquisition system and its applications,” J. Imaging Technol., 11 (1985) 215-220.
- 10) 高橋 聰，西沢充哲，稻垣善則，小石 結，木下勝之：“超高速時間分解能ストリークカメラの開発”，電気通信会，第5回超高速量子エレクトロニクス研究会シンポジウム資料（Nov. 6~7, 1992）.
- 11) 大庭弘一郎：“マイクロチャンネルプレートとその応用”，テレビ学誌，36 (1982) 962-969.
- 12) 早川 肇：“超高感度 VIM システム”，生物物理，24 (1984) 173-178.
- 13) 早川 肇，藤分秀司：“光学顕微鏡システム最近の進歩”，物理学会誌，40 (1985) 47-55.
- 14) 木下勝之，木下正雄，鈴木義二：“2 次元微弱光検出管”，テレビ学誌，40 (1986) 1232-1238.
- 15) T. Urakami, Y. Takiguchi, K. Kinoshita and Y. Tsuchiya：“Characterization of photon-counting streak camera,” Proc. SPIE, 693 (1986) 98-104.
- 16) 浜松ホトニクス：カタログ，デュアルモード冷却 CCD カメラ C4880 (1992).
- 17) 土屋 裕，犬塚英治，杉山 優，黒野剛弘，堀口千代春：“フォトンカウンティング領域における「ヤングの干渉実験」”，テレビ誌，36 (1982) 1010-1012.
- 18) I. Hirano and N. Hirai：“Holography in the single-photon region,” Appl. Opt., 25 (1986) 1741-1742.
- 19) 高橋宏典，青島紳一郎，浦上恒幸，竹森民樹，平野伊助，土屋 裕：“單一光子状態における偏光干涉実験”，光学，21 (1992) 165-168.
- 20) M. Ueda, M. Kuwata, N. Nagasawa, T. Urakami, Y. Takiguchi and Y. Tsuchiya：“Picosecond time-

- resolved photoelectric correlation measurement with a photon-counting streak camera," *Opt. Commun.*, **65** (1988) 315-318.
- 21) F. Diedrich, E. Peik, J. M. Chen, W. Quint and H. Walther: "Observation of a phase transition of stored laser-cooled ions," *Phys. Rev. Lett.*, **59** (1987) 2931-2934.
- 22) 犬塚英治: "透過・発光による半導体の故障解析", 第3回産業における画像センシング技術シンポジウム論文集(1988) pp. 125-130.
- 23) M. Watanabe, M. Koishi, H. Kan, K. J. Kaufmann, Y. Tsuchiya: "Picosecond fluorescence microscopy," *Proc. SPIE*, **1209** (1990) 157-164.
- 24) 例えば、平野憲一、平本幸男: "超高性能顕微鏡による生物学の新展開", *パリティ*, **01** (1986-11) 24-32.
- 25) 早川 肇: "バイオ画像", *テレビジョン画像情報工学ハンドブック*, 16編, 6.2節 (1990) pp. 1094-1096.
- 26) 浜松ホトニクス: カタログ, ARGUS-100/VEC&VIM (1988).
- 27) 浜松ホトニクス: カタログ, ARGUS-100/Mg (1989).
- 28) T. Hayakawa: "Single photon imaging," *Image Analysis in Biology*, ed. D. P. Haeder (CRC Press, London, 1991) pp. 75-86.
- 29) 日経産業新聞: "分子レベルで色素測定" (Feb. 17, 1993).
- 30) M. Hiramatsu, H. Fujiwake, I. Hirano, T. Hayashi and M. R. Ishida: "The phenomenon of ultra-weak photon emission from the root of seedlings," *3rd International Congress on Cell Biology*, Tokyo (Aug. 1984) p. 561.
- 31) 稲場文男: 創造科学技術推進事業 稲場生物フォトンプロジェクト研究概要集 (新技術事業団, 東京, 1991).
- 32) M. Hiramatsu, H. Muraki and T. Ito: "A new method to characterize film inhomogeneities: Permeation of matter followed by a combination of chemiluminescence with photodetectors," *J. Polym. Sci. Part C: Polym. Lett.*, **28** (1990) 133-139.
- 33) 井元信之: "光の量子非破壊測定", *光学*, **19** (1990) 762-768.