

CCD の原理と透過型電子顕微鏡への応用

Principle of CCD and Application in Transmission Electron Microscope

木村吉秀

Yoshihide Kimura

大阪大学大学院工学研究科

要旨 CCD 検出器は、光子 1 個の検出にせまる高感度と低ノイズ性があり、出力信号が光強度に比例する直線性の良さをもち合わせている。顕微鏡や天体望遠鏡、民生品の動画や静止画撮影に広く使われている。CCD は Charge Coupled Device の略語で、電荷を転送する方式を表すのが本来の意味であるが、現在では CCD を用いた撮像素子を単に CCD と言うようになっている。半導体中で光により電子正孔対が生成され、この電荷を CCD 電荷転送という方式で外部に取り出すことにより画像信号を得る撮像素子である。光以外に、X 線や電子線によって電荷生成することができるため、透過型電子顕微鏡において直接電子を照射して画像を得ることも可能である。本講座では CCD の動作原理と構造について説明し、透過型電子顕微鏡において電子を直接検出した場合の様子について述べる。

キーワード：CCD、電荷転送、撮像素子、透過型電子顕微鏡、単電子検出

1. はじめに

画像を電気信号として得る方法には、光電効果や光導電効果を用いた撮像素子¹⁾が用いられていた。これらは電子線を用いた真空管であるため、取り扱いや消費電力の面で欠点が多く、半導体を用いた固体撮像素子の開発が求められた。半導体による固体撮像素子はフォトダイオードによる光電変換が用いられ、入射光により生成した電荷を電気信号として外部に取り出す方式である。当初は二次元に配置したフォトダイオードより XY アドレス型で各画素の電荷量を取り出す方式が開発されていたが、微細化技術や周辺処理技術が十分に育っていなかったため、実用にはならなかった²⁾。しかし現在では半導体技術の進歩により C-MOS イメージセンサーとして携帯電話には必須の素子となっている。フォトダイオードにより生成された電荷を取り出すもう一つの方法に、1970 年に Bell 研究所の Boyle らによって CCD³⁾ という電荷転送方式が発表され、これより CCD の実用化が行われることとなった。高感度、低ノイズ、直線性を併せ持った CCD 撮像素子は天体観測や顕微鏡の分野で多用されることとなり、一般にも CCD カメラとして広く普及することとなった。本稿ではこの CCD の原理ならびに構造を述べる。また、光ではなく電子を直接検出することもできるため、高感度な透過電子顕微鏡撮影装置として用いることができ、イメージングプレートと異なり撮影位置が固定される CCD を用いることで、CT 等における画像の位置合わせ精度の向上や低ドーズ下での透過電子顕微鏡の調

整等に用いることが出来る。そのための基礎的な実験結果についても紹介する。

2. CCD における電荷転送の原理と方式

CCD の基本構造は図 1 のように、p 型半導体基板の上に絶縁層を介して電極が多数配置された構造をしている。図 1 (a) に示したように、各電極に正の電圧 (+0.5 V) を印加することにより p 型半導体中のホールが追い出され、空乏層が形成されるが、B の電極にだけ他の電極より高い正の電圧 (+5 V) を印加すると、この電極下により深いポテンシャルの領域ができる。基板に形成されたポテンシャルの等高線を引くと、図中の点線のように描くことができ、いわゆるポテンシャル井戸が形成された状態になる。この点線は等ポテンシャル面を表しており、空乏層の領域を表したものではないことに気をつけていただきたい。空乏層は CCD 素子によってはシリコン基板のほぼ全域が空乏層になるものもある。この空乏層領域にキャリアがあった場合、基板の表から裏へ向かう深さ方向の電界によりホールは下方向に、電子は基板表面方向に移動する。表面方向に移動した電子は絶縁膜近傍までくると、先程の電極 B により形成されたポテンシャル井戸の領域に集まってくるようになる。

次に C の電極にも +5 V を印加すると、図 1 (b) に示したようになる。ポテンシャル井戸は電極 B、C の両電極下に形成され、電子はこの広がったポテンシャル井戸に対応して C の電極下にも分布するようになる。ここで、B の電極の電圧を少し上げて、+3 V にした場合の様子を図 1 (c) に示した。電極 B の下のポテンシャル井戸は少し浅くなり、この電極の下に分布していた電子は電極 C の方向へ移動する。最後に電極 C にのみ +5 V の電圧を印加し、他の電極は +0.5 V に

〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1
TEL: 06-6879-7841; FAX: 06-6879-7843
2010 年 10 月 15 日受付

してみると、図 1 (d) のように電極 C の下に形成されたポテンシャル井戸の部分に電子が集まっている状態となる。これで電極一つ分だけ横方向に電子が運ばれたこととなる。

このように電極に順次電圧を印加することで電荷転送が行われるが、転送電極すべてを外部に引き出すと膨大な配線になるため、3 電極毎あるいは 4 電極毎に同じ電圧を印加することで電荷転送を行う。図 2 は 3 電極毎に同じ電圧を加える 3 相駆動方式で、電極毎に位相のずれた電圧を印加することで、右向きに順次電荷を転送している様子を示している。電荷を保持する最少の幅は 1 つの電極と同じ幅であるため、この部分に蓄積できる電荷量が転送できる最大の電荷量となる。これを図 3 に示したように、4 電極毎に同じ電圧を印加する 4 相駆動方式にすることで、転送できる電荷量は全体の半分の面積となるため、取り扱える電荷量が多くなる。この場合、ポテンシャル井戸を移動させると考えるよりも、印加電圧の低い電極下をポテンシャル障壁と考え、この障壁を移動させると考える方が理解が容易になる。

4 相駆動方式の場合、画素当たりの電極数や配線は増えるため画素サイズを大きくする必要があるのであるように思われる。しかし、CCD の画素サイズは結像レンズの分解限界となる光の波長よりも大きく、最少でも $1 \mu\text{m}$ 程度になるため、現在の半導体技術であれば、十分作成可能であり、解像度を落とすことなく取り扱える電荷量の増える 4 相駆動方式が広く採用されている。

これらの転送は、電極に印加した電圧でポテンシャル井戸を形成し、このポテンシャル井戸、あるいは障壁を順次移動させることにより電荷を転送しているが、不純物濃度を高めた p^+ 領域を形成し、この領域によるポテンシャルを

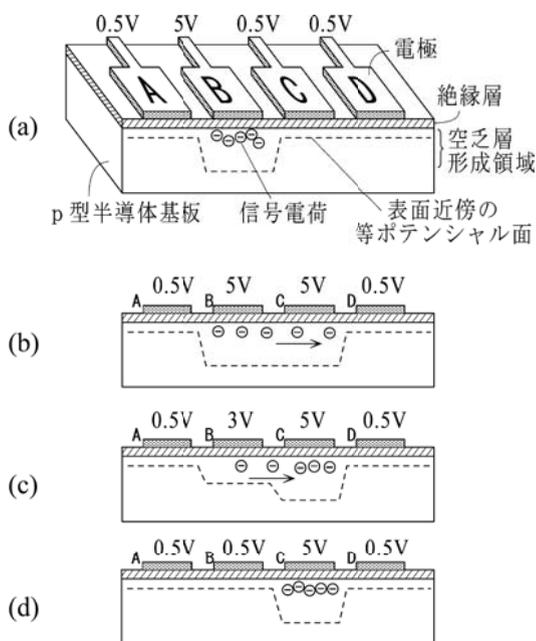


図 1 CCD 電荷転送の原理。(a) 電極 B の下にある電荷を、(d) 電極 C の下に転送。

用いて、2 電極毎に同じ電圧を印加する 2 相駆動方式がある。図 4 (a) はこの 2 相駆動に用いられる CCD 断面図で、各電極の右半分領域に、 p^+ 領域によるポテンシャル井戸が形成されている。ここに、電極 A_n には 0.5 V を、電極 B_n には 5 V を印加した状態が図 4 (b) である。不純物濃度を適当に設定することで、 p^+ 領域によるポテンシャルを合わせて 2 電極毎に鋸波状のポテンシャルを形成することができる。この状態で、電荷は電極 B_n の右側に集められた状態になる。次に電極に印加した電圧を反転させる途中が図 4 (c) で、 p^+ 領域によるポテンシャルにより電荷の移動は生じていない。印加電圧が反転し、 A_n に 5 V 、 B_n に 0.5 V を印加した場合を図 4 (d) に示した。鋸波状のポテンシャルが (b) に対して右に 1 電極分移動した状態になり、電極 B_n 右側の下に集まっていた電荷は右隣の電極 A_{n+1} の右下にあるポテンシャルの底の位置へ移動する。右端の電極下にあった電荷は、図の外にある次の電極下へ移動する。駆動波形を図 4 (e) に示した。対称的な波形をそれぞれの電極に印加するだけで順次電荷が転送できるため高速動作に適しており、後に述べる水平転送に用いられることが多い。なお、CCD 素子は画像を扱うため、二次元画像を基準に横方向を水平方向、縦方向を垂直方向、また素子基板の表から裏へ向かう方向を深さ方向と呼ぶことにする。

3. 表面入射型 CCD と裏面入射型 CCD

表面入射型 CCD は、CCD 表面（電極のある側）から入射する光を検出する CCD で、図 5 にその受光部の一例を示し

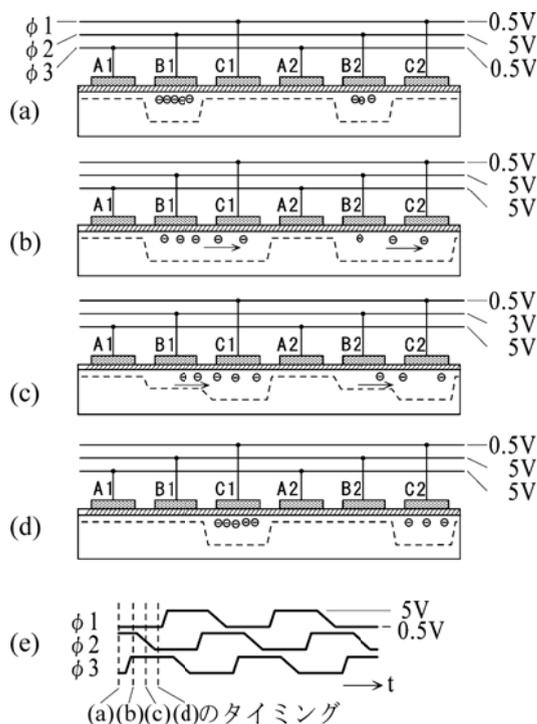


図 2 3 相駆動方式による電荷転送。(a) 電極 B_n 下にある電荷を、(d) 電極 C_n 下へ電荷を転送する様子。(e) 3 相の印加電圧波形。1 周期で 3 電極分転送する。

た。CCD 転送路の部分でも光により電荷が生成されてしまうため、受光部のみを開け、それ以外の部分を遮光する遮光膜が設けられている。そのため、効率よく光電変換を行うために、受光部上部にマイクロレンズが画素毎に設置されている。また、カラーフィルターが受光部上に設置されており、赤緑青の三原色フィルターやシアン、マゼンダ、イエローの減色フィルターを交互に並べて、1枚の CCD 素子でカラー画像を得ることができるカラー CCD 素子もある。画素サイ

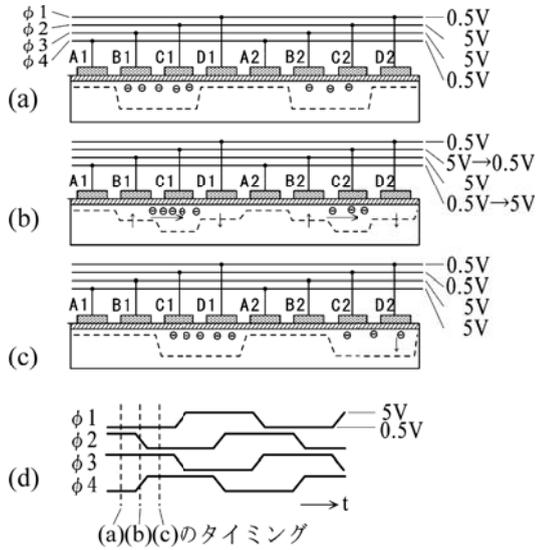


図3 4相駆動方式による電荷転送. 電荷転送中の最少保持幅は2電極分でCCD転送路の半分の領域に電荷を保持することができる。(d)各電極への印加電圧波形.

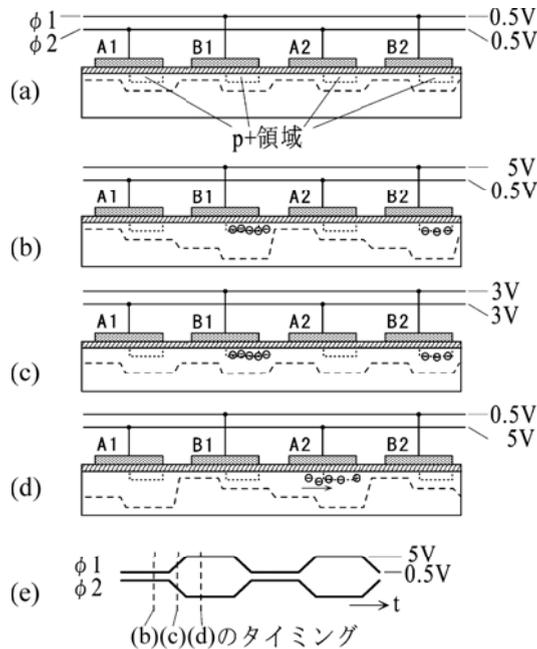


図4 2相駆動方式による電荷転送. p+領域によるポテンシャルと電極よりのポテンシャルが加算され、2相の電圧波形による電荷転送を実現。(e)各電極への印加電圧波形.

ズは、一眼レフカメラに用いられるような35mmフィルムサイズの1000万画素の場合では1辺がおよそ9μm、コンパクトカメラや携帯電話に用いられる小型のものでは、1辺が1.4μm程度、受光部の開口率が50%程度のももある。

n基板上にp-well層を形成し、この部分とn+層によって形成されるpn接合でフォトダイオードが形成される。フォトダイオード表面側にあるp+層はフォトダイオードのpn接合界面が空乏層化しないように不純物濃度が設定されている。界面に存在する生成再結合中心からの暗電流発生が抑えられ、固定ノイズの少ないCCDを実現することができる。転送電極はCCD垂直転送電極の一部を兼ねており、この電極下を電荷が転送されることとなる。フォトダイオードで生成された電荷は図5(b)に示したように、電荷蓄積時にはp+の電荷転送ゲートによるポテンシャル障壁で垂直転送CCDレジスタへ流入しないようになっている。フォトダイオードで蓄積された電荷を読み出す際は、CCD転送電極に正の電位をもったフィールドシフトパルスと呼ばれる電圧を与えることで電荷転送ゲートのポテンシャル障壁を下げ、電荷を垂直転送CCDレジスタへ移動させる。

CCDのフォトダイオード部分のCCD表面から裏面へ向かう深さ方向のポテンシャルを図5(c)に示した。n+領域にたまっている電荷の量が増えるとp-well層部分に形成されているオーバーフローバリア(OB)を越えて電荷がn基板側へ流れてゆく。これは、強度の強い光を受光した場合に生成される過剰な電荷が隣接画素に染み出すことを防ぎ、電灯等

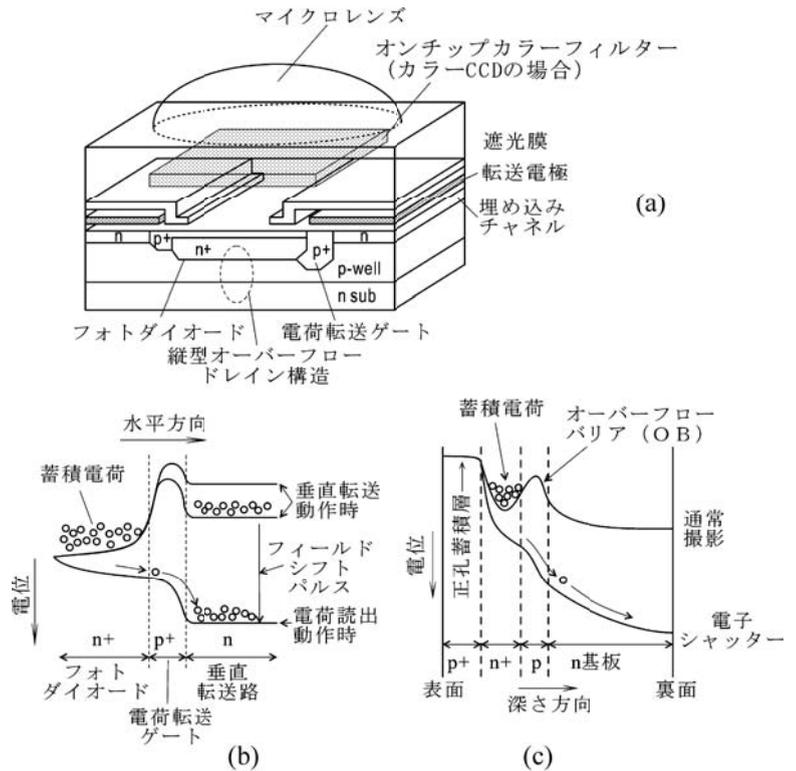


図5 CCD画素。(a)画素の構造。(b)水平方向のポテンシャル図。(c)深さ方向のポテンシャル図.

を撮影した場合に垂直方向に白い線が走るスミア現象や、輝点の周辺画素が白くなってしまうブルーミング現象を抑制することができる。また、 n 基板に高い正の電位を与えると、このオーバーフローバリアが無くなり、生成された電荷はすべて基板に流れてしまう。これを用いて CCD では電子シャッターを実現している。

裏面入射型 (Back Illuminated: BI) CCD は CCD の裏側 (転送電極の無い側) から光を入射させるものであり、ゲート酸化膜、ポリシリコン電極、保護膜といった入射面に存在する膜の影響を受けない特徴がある。通常の表面入射型 CCD の裏面には Si 基板の不感層が存在するため、表面の電極まで電荷を運ぶことができない。さらに、表面順位や酸化膜によりバックサイド井戸とよばれる部分が生じ、裏面で発生した電荷は表側へ移動できなくなっている。そのため裏面入射型 CCD では、図 6 に示したように裏面から表面側へ電荷が移動するような内部ポテンシャルを形成するようにイオン打ち込み等を行ったアキュムレーション層が形成される。軟 X 線、紫外線、電子線が入射したときに電子正孔対が生成されるのは入射面から数 nm ~ 数 μm の非常に浅い領域であるが、裏面入射型 CCD ではこれらの生成電荷も収集できるようになる。また、電荷収集時に電荷が面内方向に拡散してしまい、他の画素にまで広がってしまうことで解像度を落とすため、CCD 基板の厚さを 20 μm 程度まで薄くして用いる。この裏面入射型入射面に存在する膜が酸化膜だけとなるため、表面型では保護膜や透明電極などで吸収されてしまうような微弱な信号を検出することができ、天文分野などの科学計測で用いられている。

4. CCD 撮像デバイス

CCD 転送路とフォトダイオードを組み合わせると、二次元画像を撮影する CCD 撮像デバイスとなる。その画像転送方式を図 7 に示した。(a) は Full Frame CCD (FF-CCD) と呼ばれる方式で、CCD 転送路で光電変換を行い画像電荷を得るもので、まず得られた電荷を垂直方向に 1 段下方向に転送

し、最下段の横一列分の電荷を水平転送路へ転送する。水平転送路は左方向へ電荷を転送し、出力回路を通して外部へ出力される。1 段分の転送を終了すると再び垂直方向へ転送を行い、元画像での下から 2 段目の画像を出力する。このように順次電荷を転送して 1 枚の画像情報を得る方式である。画素当たりの構造が簡単であるため、高密度化や高画素数化が可能であり、また受光効率が高い利点があるが、転送中の CCD への光の入射を遮蔽する機械的な機構が必要となるため、動画の撮影には向いていない。静止画の撮影としては広く用いられており、ペルチェ素子等で冷却を行って暗電流の発生を押さえ込み天体観測等に用いられている。

(b) は Frame Transfer CCD (FT-CCD) と呼ばれる方式で、FF-CCD 同様に垂直転送路で光電変換を行う受光部と、遮光されている蓄積部に分かれている。受光部で一定時間の受光後に得られた電荷を垂直方向に画像一枚分を一度に蓄積部に転送する。その後、蓄積部からの電荷読み出しは FF-CCD と同様に 1 段ずつ垂直転送して水平転送することを画像一枚分繰り返すと同時に、受光部では次の画像を受光する。受光部から蓄積部への転送を高速に行い、転送中の受光による電荷生成量を少なくすることで動画の撮影にも適用することが可能となる方式である。FF-CCD と FT-CCD ではいずれも転送電極を光が透過するため、透明電極を用いたり裏面入射型にして受光効率を上げる工夫がされている。

図 7 (c) は Interline Transfer CCD (IT-CCD) で受光するフォトダイオードとその電荷を転送する垂直転送 CCD を分離した構造である。フォトダイオードにより光電変換された電荷

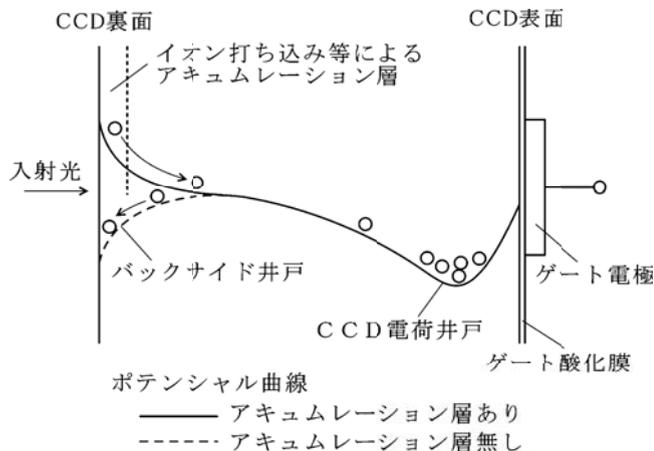


図 6 裏面入射型 CCD における深さ方向ポテンシャル図。

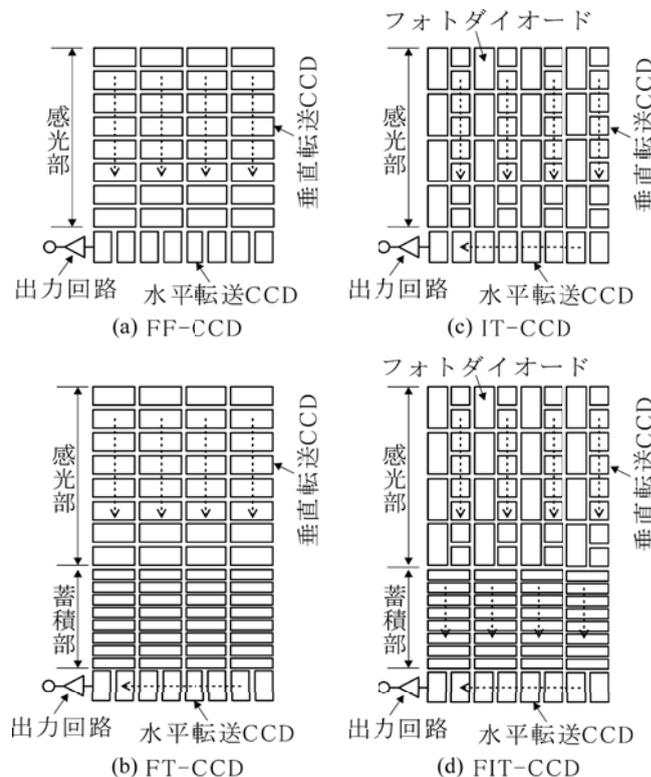


図 7 各種 CCD 撮像デバイスの転送方式。

はフィールド転送パルスにより垂直転送路に移動する。垂直転送路は遮光されており、一段ずつ水平転送 CCD へ垂直転送され画像信号として出力される。この間フォトダイオードでは次の画像の受光を行うことができる。垂直転送路の遮光により受光効率が下がるため、各フォトダイオード毎にマイクロレンズを設置し感度を上げたり、カラーフィルターを設置してカラー画像を得ることが出来る。(d) は Frame Interline Transfer CCD (FIT-CCD) で、(c) の IT-CCD に画像蓄積部を設けた構造になっている。高強度の光により IT-CCD では垂直転送路へ迷光、あるいは電荷の拡散によりスマアブルーミングが生じるが、FT-CCD 同様に受光部から蓄積部への転送を高速に行うことで、これらの現象を更に低減することができる。高画質の動画撮影に用いられている。

いずれの図でも左下が二次元画像のうち最初に出力される画素となっているが、TV 画像のモニター上では左上が最初の画素として送信されている。これは、CCD カメラでは撮影画像をレンズにより倒立像を CCD 上に結像させていることと、結像されている画像を受光面の裏側から見る像がモニター画面に映し出される画像であることより考えてみていただきたい。また、垂直転送電極が各画素に対して 2 電極ずつ設置されているが、これはテレビ画像の伝送方式がインターレース方式という水平方向のラインを 1 段飛ばしに表示することに起因している。日本では 1/60 秒の間にまず奇数段を 1 枚分表示し、次の 1/60 秒で偶数段を表示している。この方式により、荒い解像度ではあるが動画に対応でき、静止画にたいしては動画の倍の解像度で表示できるようになっている。CCD において 4 相駆動方式を行う場合、1 段あたりに 4 つの電極が必要となるが、このインターレース方式に対応して撮影するため、2 段あたりに 4 電極、すなわち 1 段あたりに 2 電極の配置となっている。

これらの CCD 以外にも、垂直転送路を各画素毎に設け、ここに高速転送することにより超高速撮影のできる CCD カメラ⁴⁾や、電荷転送時のポテンシャル差を大きく取り、転送中に電荷を増幅する電子増倍作用を用いた超高感度 EM-CCD 等がある。

5. 透過型電子顕微鏡への応用

CCD 素子を用いたカメラは透過型電子顕微鏡 (TEM) における撮像装置として広く使われるようになってきている。その多くは、カメラ室下部にシンチレーターを設置し、電子の照射により発光した光をチャンネルプレートを用いたイメージインテンシファイヤーにより増倍し、これを CCD 素子で撮影するものである。しかしながらシンチレーションによる発光強度は大きくばらつき、イメージインテンシファイヤーによりさらに強度の揺らぎが追加され、電子 1 個に対する検出信号強度は数倍の開きがあるため、像質が劣化してしまっているのが実情である。そこで CCD 素子へ直接透過電子を照射し、その電子により生成された電子・正孔対の電荷を TEM 像として得ることを試みた。電子が CCD 内に入射すると、入射エ

ネルギーに比例した数の電子正孔対を生成する。半導体中で電子正孔対を生成するのに必要なエネルギーはバンドギャップエネルギーの 3 倍程度となり、温度によらず Si の場合は平均すると約 3.6 eV であるため、100 keV 電子の入射でおよそ 2.8×10^4 個の電子正孔対を生成することになる。また、熱励起により生成される電子正孔対を冷却を行うことにより減少させることができるため、バックグラウンドの少ない状態で、入射電子の個数を計測することが可能であると考えられる。

浜松ホトニクス製の素子厚さ 200 μm の裏面入射型 CCD 素子を用い、これに電子を照射する実験を行った。画素サイズは 15 $\mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ である。加速電圧 60 kV、試料はカーボンマイクログリッド上 Au 微粒子を用い、CCD 素子はバルチェ素子により約 -60°C に冷却して撮影を行った。まず、高画素数直接電子検出型 CCD でも単電子検出が可能であることを確認するために、少ない電子線照射量での撮影を行った。図 8 に撮影した画像の一部を 512 \times 512 画素の領域で抜き出したものを示した。画像内でスポットが散らばって検出できており、ビームストップで電子を遮っている画像中央部分にはスポットがほとんど無く、電子入射によって生成された電荷が CCD でスポット状に検出されていることがわかる。遮蔽部分で検出されているスポットは、迷走した電子や X 線ではないかと考えている。図 8 (b) にその一部を拡大したものを示したが、スポットは数画素に広がっており、入射電子が CCD 内で数画素にわたって電子正孔対を生成していることがわかる。このように、透過電子を一つずつ検出した単電子による像を得ることができた。

このような単電子検出像から暗電流像の平均画像を減算し、スポットを形成する画素のなかで最大値を持つ画素を中心とした 9 \times 9 画素の信号を加算して単電子検出信号とした。この単電子検出信号の統計分布をプロットしたものが図 9 である。加速電圧を変化させ、入射電子のエネルギーを変えて得られたもので、ピーク値をそろえて規格化している。ピークの幅は検出信号のばらつきを示しており、各 CCD 画素での暗電流値の変動や感度むら、また信号読出し時に混入する

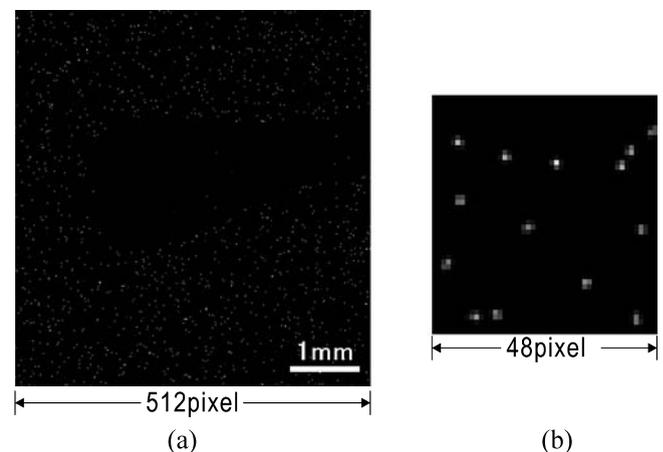


図 8 CCD へ直接透過電子を照射して撮影。(a) 512 \times 512 画素分の画像。(b) 拡大図。

ノイズ、そして単電子入射により生成した電子正孔対の数のポアソン分布、等が含まれている。20 kV の電子に対して 100 kV の電子によるピークの方が分布が広がっており、ポアソン分布による広がりや影響していることがわかる。なお、規格化前のピーク面積は単電子検出個数に相当する。それぞれの加速電圧でピークがみられ、入射電子のエネルギーが高くなるにつれてピーク位置が右側にシフトしていることがわかる。このピーク位置と入射電子のエネルギーの関係を図 10 に示したが、入射電子のエネルギーに直線的にしていることがわかる。CCD に入射した電子が生成した電荷を全て収集することができているならば、この直線は原点を通ることになるが、裏面にある保護膜や不感層で生成した電荷が収集されないため原点を通らないと結果となった。

入射した透過電子は、CCD 内で電子正孔対生成により電荷を生成してエネルギーを減らしながらシリコン中を進行し、やがてエネルギーを失って止まる。この間に走行した位置で電荷を生成するが、100 kV の電子ではこの間に数十 μm もの距離を走行する。入射電子が CCD 裏側から表側へ向けて直進していれば、生成した電荷は深さ方向の電界によりほぼ単一の画素に集まることとなるが、進行方向はランダムに変わるため、近隣の画素の電荷収集範囲にも侵入し、生成した電荷が幾つかの画素に振り分けられて集まることとなる。これらを合計して計測すると、図 9 及び図 10 の結果を得ることが出来るが、より多くの電子を照射して画像を得る場合には、解像度が低下してしまうことになる。

そこで、CCD に直接電子を照射した場合に得られる画像の解像度を調べた。解像度の調べ方には幾つかあるが、細かな情報を持った像の位置を少しずらして 2 枚撮影し、クロスコリレーションを取る方法を行った。マイクログリッドを張った銅メッシュを低倍率で投影し、CCD に直接照射して撮影した画像と、試料を少しずらした画像を 2 枚撮影し、クロスコリレーションを求めた。100 kV と 20 kV でそれぞれ実験を行った結果が図 11 である。移動量の整数分の 1 の周期の情報、すなわち空間周波数が整数倍の情報は位相情報を保ったまま現れ、空間周波数が (整数 +0.5) 倍の情報は位

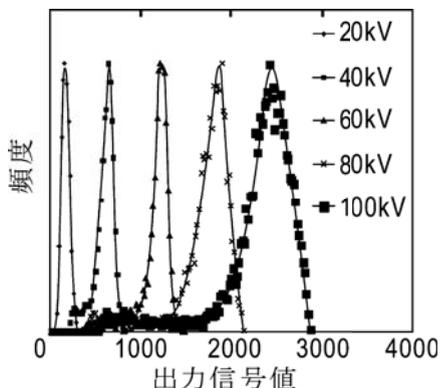


図 9 直接検出による出力信号の分布. 単電子検出スポット近辺の電荷量を合計して電子検出信号とし、その信号量の統計分布を各エネルギー毎に集計し、各分布のピークを規格化して表示した。

相が反転して現れる。その結果、解像できている空間周波数領域では移動方向に垂直な縞模様が得られるが、解像していない空間周波数領域はノイズしか現れないことになる。明らかに 20 kV の加速電圧の方が良好な分解能を示していることがわかり、100 kV の加速電圧では入射電子の広がりにより CCD の画素数を有効に使えていないことがわかる。

解像度の低下はあるものの、透過電子 1 個を検出できる CCD 素子を用いて、 4096×4096 画素の CCD カメラを試作し、TEM 像の観察を行った。図 12 はそのカメラで、 2048×4096 画素の CCD 素子を 2 枚併設した構造になっており、加速電圧 100 kV、観察倍率 50 万倍で撮影した金微粒子の画像を図 13 に示した。この時に用いた電子線量は試料上に換算して 0.04 C/cm^2 である。また CCD 画素においては、平均しておよそ 3 個の電子入射になる。この値より換算すると検出器側ではおよそ $2 \times 10^{-13} \text{ C/cm}^2$ という値になり、イメージングプレートと同等の高感度を実現できているが、感度のみではなく、解像度も含めた総合的な性能の評価をする必要がある。

6. 照射ダメージ

直接透過電子を CCD に照射した場合、素子に損傷を与えることが懸念される。このため、CCD 素子におよそ 200 万枚の撮影に相当する電子線量となるように、100 kV 50 nA の

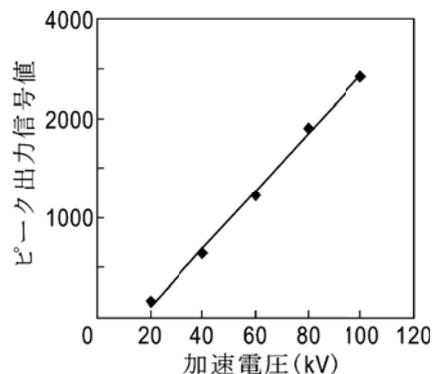


図 10 入射電子のエネルギーに対する検出信号出力値の関係。

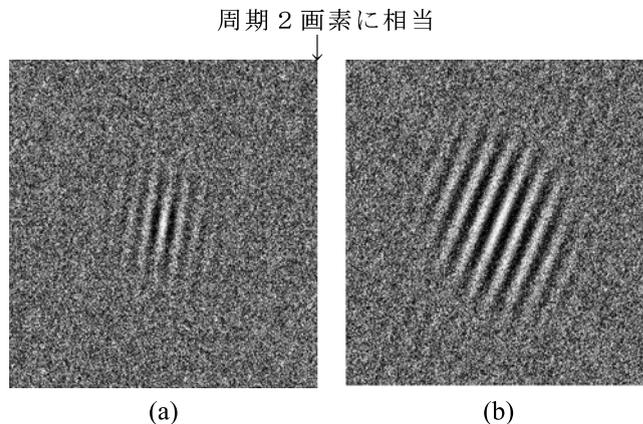


図 11 試料移動前後のクロスコリレーションによる解像度比較. (a) 加速電圧 100 kV. (b) 加速電圧 20 kV.

電子線を絞って2秒間照射した影響を調べた。図14はその結果で、(a)が照射直後の画像、(b)は155秒後、(c)は533秒後の画像のコントラスト強調したものである。いずれも電子線は照射せずに冷却した状態で撮影している。照射領域に残っているのは暗電流によるコントラストと考えられ、照射から10分程度経過するとかなり少ない量となっていることがわかる。しかしながら、この暗電流増加領域は2ヶ月後にも確認することができ、高強度の電子線により、電荷が



図12 直接電子検出 CCD カメラ。画素ピッチ $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$ 、画素数 4096×4096 (2048×4096 CCD を2枚併設)。

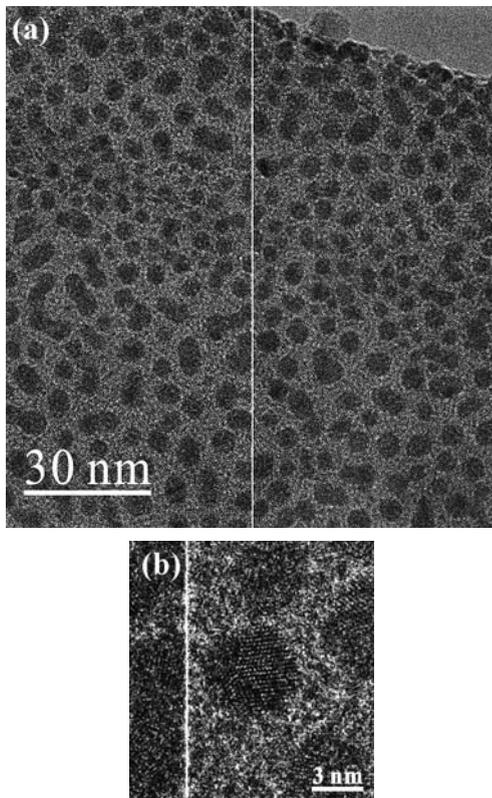


図13 直接電子検出 CCD カメラによる金微粒子像 (a) と一部拡大像 (b)。

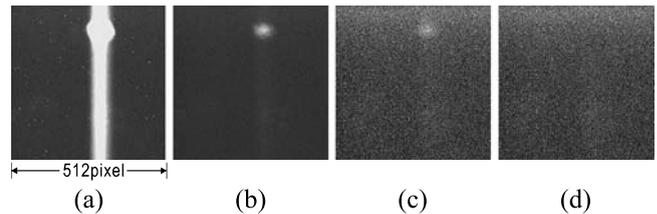


図14 電子線照射によるダメージ。(a)照射直後。(b)155秒後。(c)533秒後。(d)加熱後。(c),(d)は同じコントラスト強調を行っている。

寿命の長いトラップ準位に励起され、そこより少しずつ電荷を放出しているものではないかと考えられる。フォトダイオードで作製された同様の検出素子である Active Pixel Sensor (APS) でも同様の損傷が報告されており⁵⁾、これを加熱することにより修復できることが報告されているため、CCD でも同様に加熱を行って見た。80°Cの加熱で3時間加熱を行った後に冷却して得られた結果が図14(d)である。図14(c)と同じコントラスト強調を施したものであるが、照射により暗電流の増えた領域が確認できない状態にまで回復することができた。加速電圧が高い場合には基板 Si の結晶を壊すようなダメージが入るため高エネルギーによる損傷の場合には適用できるか不明であるが、直接電子照射 CCD カメラは 100 kV 以下の加速電圧では透過電子顕微鏡用撮像デバイスとして実用に耐えるものであると考えられる。

7. 最後に

撮像デバイスとして広く用いられている CCD について述べた。また、透過電子を直接 CCD で検出するという TEM への応用について述べた。CCD 素子内での電子広がりが大きいものの、高感度検出が可能であることがわかる。画素数を有効に使うためには、低加速における応用に期待することが出来ると考えられる。高感度を有する CCD は X 線の画像検出にも広く用いられており、写真フィルムやイメージングプレートに匹敵する大面積化や高画素数化を目指した今後の発展にも期待したい。

文 献

- 1) Kubota, M., Kato, T., Suzuki, S., Maruyama, H., Shidara, K., Tanioka, K., Sameshima, K., Makishima, T., Tsuji, K., Hirai, T. and Yoshida, T.: *IEEE Transaction on Broadcasting*, 42, 251–258 (1996)
- 2) Weckler, G.P.: *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2, 65–73 (1967)
- 3) Boyle, W.S. and Smith, G.E.: *Bell Syst. Tech. J.*, 49, 587–593 (1970)
- 4) 江藤剛治：顕微鏡, 39, 129–132 (2004)
- 5) Matisa, H.S., Biesera, F., Chenb, Y., Gareusa, R., Kleinfelderb, S., Oldenburga, M., Retierea, F., Rittera, H.G., Wiemana, H.H., Wurzel, S.E. and Yamamoto, E.: *Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. A*, 549, 130–136 (2005)