

# CCD の現状と展望

川 上 肇\*

## 1. CCD の構造と動作

CCD 撮像素子は、量子効率が大きく、測光精度が高く、ダイナミックレンジが広く、読出し雑音が小さいことから、ここ 10 年間、天文学者から最も期待されている光検出器である。CCD は、絶縁体 ( $\text{SiO}_2$ ) を金属板 (電極) と半導体 (Si) とではさみ (MOS)、それらをずらっと並べたもので構成されている。電極に Si より高い電位を加えると Si 中の電子は電極に引き寄せられ、絶縁体との境界付近に集まる。ポテンシャルの観点からは、半導体中の絶縁体境界近傍にポテンシャルの井戸が形成されていることになる。(図 1 参照) 光が Si に入射・吸収され電子・ホール対が生じると、電子はポテンシャルの井戸中に移動し、ホールは Si から追い出される。井戸に貯まった電子は隣の電子からそのまた隣りへと転送されていき、最後には出力ダイオードから外部へ取り出される。電極の電位を上げ下げすると井戸の深さが深くなったり浅くなったりするので、隣接する電極の電位を適当な順序で上げ下げしてやると井戸に貯められた電子を隣の井戸へと運ぶことができる。図 2 には 3 相、4 相、2 相クロックでの転送方法が示してある。3 相クロックの特長は 3 個の電極で 1 ピクセルを構成でき、実

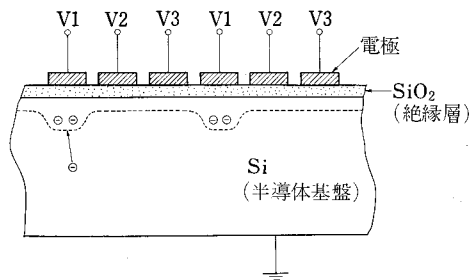


図 1 CCD の構造とポテンシャルの井戸

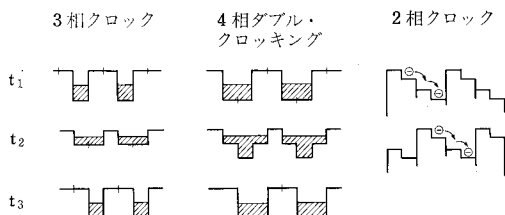


図 2 電荷の転送

装密度を高くできるという点である。図に示した 4 相クロックはダブル・クロッキングという方法で、常に 2 つの電極が井戸を作っているので運べる電子の数が普通の方法の 2 倍になる。4 相クロックの場合、4 個の電極で 1 ピクセルが構成される。半導体に不純物を多く混ぜると局部的にポテンシャルが高くなる。不純物を多くしてポテンシャルの段差を周期的に植え込んでおけば、電子を 2 相のクロックで転送することができる。TI では 1 相クロックで転送する CCD も製作している。1 相、2 相クロックの場合、植え込めるポテンシャルの段差は 4 V 以下なので、上下する井戸の深さに制限が生じ運べる電荷の数が少なくなるという短所もある。

Si 中の絶縁層との境界近傍に井戸を作ったものを表面チャンネルという。一方、絶縁層近傍に不純物を多めに混ぜポテンシャルの井戸を Si の内側に移動させたものを埋め込みチャンネルという。表面チャンネルは電子を多く貯められる ( $10^6$  個) という長所がある反面、転送速度が遅く低照度時の転送効率が悪いという短所がある。転送効率を改善するには  $10^5$ – $10^4$  個のバイアス電子を各ピクセルに流し込んでやらなければならない。しかし、バイアス電子の数を完全に制御できるわけではなく 100 個くらいの変動が出てしまい、これらが誤差になる。転送効率の良さ、転送速度の速さ (10 ns) から、現在では埋め込みチャンネルが主流になっている。

## 2. 暗電流・読み出し雑音・転送効率

熱的なゆらぎで Si のエネルギー・ギャップを越えて生じた電子・ホール対のうち、電子の方はポテンシャルの井戸に引き込まれ蓄積される。これが暗電流となる。暗電流の量は温度に依存し、 $7^\circ\text{C}$ – $8^\circ\text{C}$  の降下で 2 分の 1 に減少する。CCD を  $-150^\circ\text{C}$  まで冷やしてしまえば 1000 秒に 1 電子の割合しか暗電流が生じなくなるので、あまり問題ではない。読出し雑音は他の固体撮像素子 (CID, MOS) に比べて小さい (電子数換算 10 個)。雑音の量は、CCD の出力ダイオードとその直後の増幅器でほとんど決められる。CCD から流し出された光電子は出力ダイオードのコンデンサーに貯められる。光電子が流れ込む前と後のコンデンサーの電位の変化から光電子の数を知ることができる。出力ダイオードの容量が小さいほど電位の変化が大きくなるので精度も高くなる。転送効率は、良いものでは 99.999% に達している。2 次元 CCD の場合、最も遠いピクセルの電子は 1000 回

\* 東大理 Hajime Kawakami: The Current Characteristics and the Future Development of CCD

近く転送されたのちに出力されるので、1回あたりの転送効率が99.9%ではお話にならない。転送中に前のピクセルの電子が後のピクセルに混じり込むということは入射光が後のピクセルに混じったことと同等なので、画像がぼける原因となる。埋め込みチャンネルであっても、微弱光の場合には転送効率が落ちる。対策としては各ピクセルに100個程度のバイアス電子を流し込むという方法がある。バイアス電子による誤差は電子10個分だから、読出し雑音と同程度である。天文用に使う場合は、わざわざバイアス電子を流し込まなくても暗電流が100電子以上貯まるまで積分時間を伸ばせば良い。その他、暗電流を減らそうとして $-160^{\circ}\text{C}$ まで冷却したら転送効率が劣化したという報告もある。

3. 画面転送と行間転送

2次元 CCD には、受光部と CCD シフトレジスター部の配置法に2つの型がある。それぞれの型について、電子を運ぶ行路が図3に示してある。画面転送の場合はシフトレジスター部が感光部を兼ねているために、光電子は感光部を通して運び出される。一方、行間転送の場合は感光部とシフトレジスター部とが別々の場所に配置されているので、光電子は感光部からシフトレジスター部へ移された後、シフトレジスターという専用道を通して運び出される。また、行間転送にはシフトレジスターに並行してオーバーフローラインが配置されている。これは特定のピクセルに強い光が当たってあふれ出した光電子を棄てるためのものである。明るい天体の近傍にある微弱光天体を詳しく観測する場合とか、輝線に隣接している暗線を観測する場合に威力を発揮する。画面転送の場合には棄て場がないので、あふれ出した光電子は上下に広がり1列を汚染してしまう。解像度は行間転送の方が高い。また、行間転送の場合 TV 用ということでインターレースを行なうことを前提にしているならば、2受光部に対して垂直 CCD レジスター1ピクセルの構造をとることができる。これにより CCD の運べる電子数をふやせるだけでなく、転送回数も2分の1に減らすことができる。受光部はPN接合のフォトダイオードでできているので感光波長域は400nm-900

nm までである。しかし、TV 用に作られた CCD では、解像度を良くするためと分光特性を肉眼に近づけるために、赤色部の感度を積極的に落としてしまっている。垂直 CCD にはマスクをして光に感じなくしてある。受光部の面積は全体の30%程度なので、光を検知する効率はフォトダイオードの量子効率の3分の1になってしまう。また、星のような点光源を観測する場合には、像が不感光部上にできてしまう場合も出てくる。画面転送の場合には、CCD 転送部が同時に感光部になっているので開口率が大きい。但し、Si の上には電極がのっているので、すべての光が検知されるわけではない。電極には透明度の良いポリシリコンが使われているが、青い光に対しては透明度が低下するので CCD の感度は赤い方に偏っている。また、電極と絶縁層とで内面反射があるので、分光感度特性が波打っている。電極・絶縁層を薄くするとか電極の面積を小さくするという努力の結果、検出効率が50%に達している CCD もある。光を表面(電極側)からではなく裏面(Si側)から照射すれば、開口率を100%にすることができ、感度特性の波打ちもなくなることができる。但し、光がポテンシャル井戸の近くまで到達するように、Si 基盤を $10\mu\text{m}$ の厚みまで研削しなければならない。Si の厚みが薄くなってくると、光の吸収率が厚みに強く依存してくる。従って、厚みの非一様性がそのままピクセル間の感度ムラになってしまう。TI 500×500 や RCA 320×512 といった裏面照射 CCD では、近傍のピクセルだけをとり出せば感度ムラは1%以下しかないのに、遠くのピクセル間の感度差を比べると10%も異なっている。RCA については、電極と Si 裏面での内面反射のために干渉縞が生じるという報告もある。夜空を撮像すると、輝線によって夜空の明るさの3%の干渉縞が生じる。干渉縞のパターンがそのまま Si 層の等厚線になっているのは印象的である。直接撮像では、夜空より暗い天体を浮かび上がらせたいことがある。この場合ピクセル間の感度ムラはできるだけ少ないことが望ましい。そこで CCD に様な光を当てて各ピクセルの感度を較正することになる。ピクセル間の感度ムラは波長依存性を持っているので、CCD を照らす光源が夜空と同じスペクトルをもっていないと誤差の原因になる。夜空から放たれる輝線については、方向や時刻によって強度が変わるので較正が難しい。その結果、人工光を使って較正した場合には夜空の3%の明るさの天体までしか検出できない。夜空そのものを使ってピクセル間の感度差を較正するのが最も好ましいのだが、C. D. マッケイは2次元 CCD を1次元 CCD のように使うことによりこれを可能にした。マッケイは垂直シフトレジスターの転送クロックに同期して CCD チップを1ピクセル分ずつずらし、1列分出力し終わった時には CCD チップ

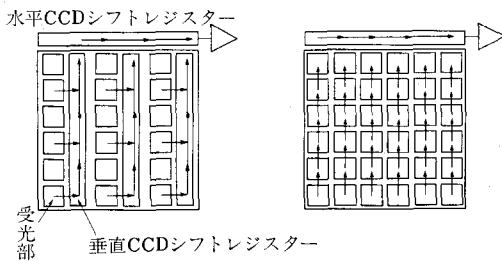


図3 行間転送(左)と画面転送(右)

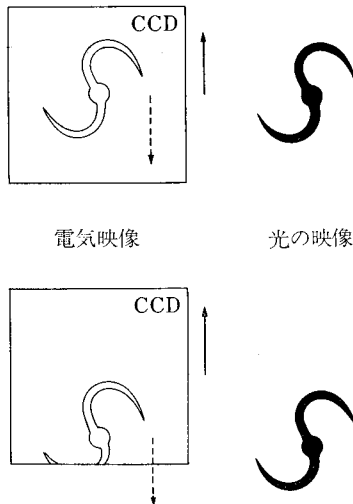


図 4 C. R. マッケイにより考案されたドリフト・スキャン

が 1 画面分だけ移動しているという操作を行なった。クロックを送ると CCD 内の映像電気信号は全体に 1 ピクセル分だけ移動する。ところが CCD チップも 1 ピクセル分だけ移動するので、電気信号の画像と光の画像とは常に一致している。この操作をすることにより同じ列に属

すピクセル間の感度を補正する必要がなくなる。異なる列間の感度差は補正しなければならないが、それぞれの列で観測した夜空の部分の電気出力値を比べることにより較正することができる。観測開始から 1 画面分のデータはこの較正方法が使えないので、スキャン長を 2×(チップ長)にしたときには較正できるデータの率が 50% しかない。しかし、スキャン長を 10×(チップ長)にすれば 90% になる。この方法はドリフト・スキャンとよばれているが、夜空の 0.5% の明るさの天体まで検出することができる。しかも、各ピクセルの感度をすべて記憶させておく必要はないのではなはだ便利である。

4. 宇宙線の影響

宇宙線が Si 基盤に飛び込んで吸収されると多数の電子を作り出し画像を汚染する。Si の厚みが薄い方が宇宙線を吸収しにくく有利である。RCA の薄型を例にとれば、0.06 回/cm<sup>2</sup>・sec の率で宇宙線が受かる。CCD の撮像領域は 1 cm<sup>2</sup> くらいだから、20 sec の積分で 1 回の宇宙線を浴びる計算になる。通常の宇宙線は 1 発で 300 個の電子を発生させる。1 ピクセルだけを汚染する宇宙線が全体の 80% を占める。3 ピクセル以上を汚染するものは 10% に満たない。数枚の画像を比べて宇宙線に汚

表 1 各社の CCD 一覧

メーカー	TI	TI	TI	GEC	RCA	FAIRCHILD	東芝	NEC	NEC
画素数	800×800	500×500	800×800	385×576	320×512	380×488	380×490	384×490	768×490
撮像領域 (mm)	12.19 × 12.19		12.19 × 12.19	6.34 × 8.47	7.31 × 9.75	11.4 × 8.8	8.36 × 6.37	8.8 × 6.6	8.8 × 6.6
飽和電子数	3 × 10 <sup>4</sup> 以上	4 × 10 <sup>4</sup>	1 × 10 <sup>5</sup>	3 × 10 <sup>5</sup>	1 × 10 <sup>5</sup>		4 × 10 <sup>5</sup>	3 × 10 <sup>5</sup>	1 × 10 <sup>5</sup>
読み出し雑音(電子数)	15 以下	25 (13)	18	6-10	73 (40)	50 (30)		66	66
暗電流 (25°C)(電子数/ピクセル・sec)	1.0 × 10 <sup>-1</sup>		10 以下	3.0 × 10 <sup>-4</sup>	4.0 × 10 <sup>-2</sup>		3.4 × 10 <sup>4</sup>	1.7 × 10 <sup>4</sup>	8.3 × 10 <sup>3</sup>
(動作温度)	(-95°C)		(-70°C)	(-170°C)	(-120°C)		(25°C)	(25°C)	(25°C)
暗電流 (25°C)(電子数/ピクセル・sec)	6.6 × 10 <sup>8</sup>		6.5 × 10 <sup>4</sup> 以下	2.0 × 10 <sup>4</sup>	2.6 × 10 <sup>4</sup>		3.4 × 10 <sup>4</sup>	1.7 × 10 <sup>4</sup>	8.3 × 10 <sup>3</sup>
ピクセル間の感度ムラ									
局所広域	1% 以下	0.6% 10%	1%	0.5%	0.8% 9%				
直線性(入射光 vs 出力電圧)	0.5%		0.2%						
検出効率(最大値)			55%	36%	85%	25%	20%	30	
検出効率最大波長 (nm)			600	800	700	750	900	500	
転送効率			99.997%	99.995% 以上			99.999%	99.999%	
転送方式	画面	画面	画面	画面	画面	行間	行間	行間	行間
照射面	薄型, 裏面	薄型, 裏面	表面	表面	表面	薄型, 裏面	表面	表面	表面
クロック	3相	3相	1相	3相	3相	2相	4相	4相	
ユザー	ST	ガリレオ・ミッション	ガリレオ・ミッション		グリニッチ天文台	キット・ピーク			

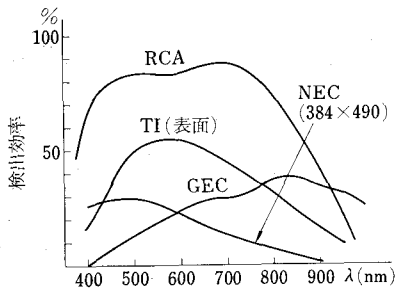


図5 各社 CCD の感度特性

染されたと思われる部分のデータを棄てるという手続きをすれば、宇宙線による汚染は取り除ける。

### 5. 商品になっている CCD

各社の CCD の特性を表1に示した。ユーザーによる使用報告がある場合には、そのデータを使った。ユーザー欄が抜けているものは、メーカーの仕様書に基づいた値が記入してある。暗電流については、“7.5°C 上昇で2倍に増加する”と仮定して換算した25°Cでの値も示した。転送効率は光量が十分ある場合の値が示してある。低照度時には効率は劣化する。ピクセル間の感度ムラについては、近傍のピクセルだけを取り出した場合のばらつき、遠く離れたピクセル間の感度差とが示してある。読み出し雑音については、外付けのアンプも含めた雑音値が報告されている。これよりも小さな値を報告している文献が他にある場合には、その値も括弧を付けて示した。4個の CCD について検出効率の波長特性を図5に示した。行間転送 CCD は受光部の開口率が小さいために値が小さくなっている。

### 6. Si-CCD の今後の発展

天文学者は撮像領域が広く、画素数が多く、量子効率が高く、感光波長域が広い CCD を要望するわけであるが、これらについて5年くらいの時間尺度で発展を展望してみる。TV カメラ用の CCD について言えば、今後も行間転送方式が用いられる見込みである。画素数はさらに増大して1000×1000のものが登場し、撮像管なみの解像度が得られるようになるであろう。撮像領域は現状の1cm<sup>2</sup>からさほど大きくなることはないだろう。なぜなら、大きな Si ウエハーを作るのが難しく大きなものを作ろうと思えば歩留まりが低下するということがあり、TV カメラは小さい方がよいから CCD の大きさも大きくない方がよいということがあるからである。従って、一つ一つのピクセルは小さくなる。CCD の分解能力をいっぱいに使おうと思えば天体のイメージサイズをあまり大きくしてはならなくなる。もし広い範囲の画像を撮りたいのなら、CCD をモザイクにしてドリフトスキヤ

ンをするという方法が考えられる。一方、GEC では画素数 1500×1500、撮像域面積 30mm×30mm 程度の CCD を開発中である。これが使えるようになればかなりの要求は満足されるであろう。現在の行間転送 CCD は、不感光部が表面に露出しているために検出効率が落ちている。5年後には、シフトレジスター部を受光部の下側に埋め込んだ2階建て構造の CCD が完成しているかもしれない。これは、青い方から赤い方まで検出効率が100%に近く、しかもピクセル間の感度ムラの少ないものになるはずである。

### 7. 赤外 CCD

Si を半導体基盤の材料として使っている限り、入射光の波長が長くなるにつれて吸収率が低下し、1.1μm 以上になると全く吸収しなくなる。従って、それより長い光に対しては Si 以外の材料を使わなければならない。InSb は 5.4μm まで、HgCdTe なら 14μm まで感度を有している。赤外 CCD にはモノリシック型とハイブリッド型とがある。ハイブリッド型というのは赤外受光素子列と Si-CCD とを別々に作り、受光素子1個々々を CCD のピクセル1個々々につないだものである。CCD は受光素子からの信号の積分と、位置の違いを時間系列に変換する仕事を担っている。モノリシック型というのは同一材料の半導体基盤の上に受光部とシフトレジスター部を作ってしまうものをいう。赤外光に感じる InSb, HgCdTe を基盤に使った狭エネルギーギャップ半導体 CCD と、受光部に PtSi-Si ショットキーバリアを用いシフトレジスター部には Si-CCD を用いるショットキーバリア型 CCD とがある。ハイブリッド型は Si-CCD の技術を使える有利さがある反面、受光素子と CCD の入力ダイオードを正確につながなければならないという困難さがある。一方、狭エネルギーギャップ CCD の場合には、Si 以外の材料で CCD を作らなければならないという困難さがある。HgCdTe については、高品質結晶を得ること自体が難しいという問題もある。ショットキーバリア型はピクセル間の感度ムラが少なく、既製の Si-CCD 技術で作れるという長所をもつが、量子効率が 3μm で 0.1% から 1% しかないのが短所である。

赤外撮像一般について言える困難として、1) 受光素子に狭エネルギーギャップの材料を使っているために、Si に比べて暗電流の発生量が多い。2) 室温 300K の輻射は波長 10μm で最大になるので、赤外域では背景光が大きい。2) 1度の温度変化に対する輻射エネルギーの変化は小さく、例えば 3-5μm では 3.7%/K、8-14μm では 0.5%/K なので、ピクセル間の感度ムラを小さくしておかないと画像のコントラストが感度ムラの中に埋もれてしまうということがある。暗電流や背景光の多さは

表2 赤外 CCD, CID の画素数

	モノリシック	ハイブリッド
HgCdTe	16×4 CCD	50×1 CCD
	32×32 CID	32×32 CID
InSb	20×1 CCD	32×32 CCD
	32×32 CID	32×32 CID

すさまじく、短時間で CCD をあふれさせてしまう。窒素温度 77K まで冷却したとしても、暗電流によって InSb-CCD なら 2 sec, HgCdTe-CCD なら 1 msec であふれさせられてしまう。しかも、77K まで冷却したのでは転送効率が劣化するという問題もある。そこで、ハイブリッド型では CCD の入力部に電荷足切り回路を設けたり、検光素子と CCD と AC を結合してコントラストの信号のみを CCD に送り込むという対策が試みられ

ている。狭エネルギーギャップ CCD では、電荷転送に寄与する部分には広エネルギーギャップの材料（ダブルヘテロ接合結晶）を使うということも試みられている。一方、CCD の代わりに、電荷転送の必要のない CID を使い 20K 以下に冷却するという解決策もある。

表2に現在までに作られた赤外 CCD を掲げてある。検出効率を公表しているものは少ないが、32×32 InSb-CID について 3.6 $\mu$ m で 11%, 4.7 $\mu$ m で 5% という値が報告されている。赤外センサーの場合、光のにじみ出しを防ぐためにピクセルの間隔を離さなければならない。三菱 64×32 PtSi-Si ショットキーの場合、ピクセルの間隔は 133 $\mu$ m×80 $\mu$ m、撮像領域の大きさは 8.5mm×2.6mm である。ピクセル数を可視光 CCD なみにしようとすれば 10cm くらいの単結晶を作らなければならないわけで、大量生産向きではない。

わが国唯一の天体観測雑誌

# 天文ガイド

定価380円(〒70)'84-3月号・2月5日発売!

## 3月号のおもな内容

- ★いよいよカノープスの季節。今年もまた観測北限を更新した情報が入りました。月山で観測したグループの報告です。
- ★クローンメリン彗星が観測の好期です。今回は9等級の暗い彗星の撮影法、彗星の写真術です。
- ★昨年秋行なわれたアマ天で発表し、下保賞を受賞した「屋久島における星の民俗調査」を誌上発表します。
- ★さりん座で発見された「ブラックホールの伴星？」とは何か、その発見事情や、天文衛星「てんま」のこと、X線新星のことなどを、発見に携わった松岡勝先生より。
- ★ほかに観測ガイド、マイコン教室、テレスコープエンジニアリング、アストロレター、トビックスなど満載

# STAR WATCHING

スター・ウォッチング

天文ガイド2月号臨増/定価580円

## 大特集 天体写真術

冷却法公開/水素増感法...など天体写真新情報

- ▶大集合!全国自作ドブソニアン▶冬の装備は完璧に!
- ▶天文用フィルム(53本)を考える▶天文現象ハイライト



## マイコンが解く天体の謎

《PCシリーズ版》定価1800円《FM版》定価1600円

誠文堂新光社

〒101 東京都千代田区神田錦町1-5  
 振替東京7-6294 電話03(292)1221