

CCD 解体新書 その4

「CCD における電荷の転送」

上野 宗孝

〈東京大学教養学部宇宙地球科学 〒153 東京都目黒区駒場 3-8-1〉

E-mail: ueno@chianti.c.u-tokyo.ac.jp

今回はいよいよ CCD での電荷転送に関して話を進めます。今回取り上げる電荷転送に関する話は、実際に CCD カメラを取り扱っている方が、最終的にもっとも頭を痛める問題の一つでしょう。そのうえ低温時の CCD の振る舞いについては適当な文献も見当たらないため、十分な理解がされていない問題ではないかと思えます。このためいささか話が細かくなりますが、CCD での電荷転送とその低温時の動作についてまとめさせて頂こうと思えます。

CCD の中では、この特集の第一回目でも紹介したように、半導体中の電気的なポテンシャルの井戸を移動させることによって電荷の転送（移動）を行っています。この際に最も重要な事は、きちんと電荷を運ぶことができるのかどうかということです。この指標となる言葉として転送効率という言葉がよく用いられます。しかし天体観測を行う際には、一般に用いられている転送効率という言葉がそのまま当てはめることができないように思えます。

典型的な CCD のデータシートを見てみると、感度のレスポンスの波長依存性や、読みだし雑音などの電気的な特性と並んで転送効率という文字が書かれているものがあります。通常のデータシート中で現れる転送効率という数字は極めて 1 に近い値で書かれているのが普通で、パーセンテージスケールで例えば 99.999 % などと定義されています（この数字は Five nine と呼ばれたりします：さらに高い効率を持つものも存在します）。通常、転送効率という数字は、CCD を 1 段転送する際の効率に換算されて定義されています。従って例えば 100 段 CCD が並んでいると、100 段を経た

後のトータルな転送効率は 0.99999 の 100 乗で約 99.9 % となります。この場合転送効率の定義に従えば 1 万個の電子を 100 段転送すると、10 個程度の電子が確率的に後ろのピクセルに転送遅れとして取り残されるか、又は転送損失として失われることを意味しています（通常は前者が支配的です）。

この例のように Five nine の転送効率を持つ CCD は、テレビカメラなどの通常のイメージを取得する世界では、転送効率に起因する問題が全く無視できるレベルと言えます。通常の風景などの撮像を普通の CCD カメラで行う際には、コントラストの小さな信号がある程度の大きさのレベル（暗電流や背景光の明るさなどによる“下駄”）の上に乗っていますので、転送損失がこの程度の小ささであれば、見掛け上の S/N の範囲で全く問題が生じる心配がありません。

同じ性能の CCD を天体観測に用いた場合にはどうなるでしょうか。非常に背景光のフラックスが小さく、特定のピクセルにだけ明るい天体がある場合には、得られたデータは後ろのピクセルに 0.1 % の電荷が取り残される事になります。しかしこの場合でも測光精度に高々 0.1~0.2 % の誤差を生じさせる程度の問題なので、それほど深刻な状況とは言えないでしょう。

しかしこの例だけを元に、この CCD は天体観測時に何の問題もないと言えるのでしょうか？ 先程も触れたように、一般的に転送効率は扱う電荷量が大きな領域で定義されています。従ってこの転送効率という値が電荷量の小さな領域においてもそのまま単なる確率過程的な数字として成立するとは限りません。例えば極端なケースとして、

何らかの理由により各段の CCD において常に 10 個程度の電子が転送の際に後ろのピクセルに取り残される場合を考えます。この CCD を用いて電荷転送効率を測定すると 10 万個の電子を用意した場合には転送効率は先程と同じレベルで Five nine になりますが、100 個の電子しか転送しないケースでは転送効率は 90% まで低下してしまいます。一段当たりの転送効率が 90% となってしまうと、とても 100 段の CCD を転送することなど不可能となってしまいます。もちろん現実にはここまでひどいケースは存在しませんが、しかしながらこの効果は無視できるほどにも小さくありません。天体観測時には非常に小さな量の電荷を扱うことがしばしばあるからです。

そこでまず今回の最初の標語として「CCD の電荷転送効率は電荷量に依存する」と言うことを掲げておきます。

それでは実際に電荷を転送する際にはどのようなことが起こっているかを考えていきます。最初に触れたように電荷を転送する際に生じる損失に関しては扱う電荷量が変わると、異なった振る舞いをするという点を考える必要があります。また本特集の第 1 回で触れたように、天文観測に CCD を用いる際には、転送効率の温度依存性という問題もあります。そこでまず最初に CCD の転送の温度依存性から話を進めていきます。

CCD の温度依存性に関しては、PtSi 赤外線検出器の開発を行っている三菱電機株式会社の本股雅章氏らのグループが、世界的にも数少ない、極低温下における CCD の転

送効率に関するデータを系統的に取得された報告を出されていますので、そのデータを引用することで話を進めさせていただきます^{1),2)}。

電荷転送の問題を考える際に最初に引き合いに出される言葉が電子の（又はホール）のモビリティ（移動度）という言葉です。移動度とは半導体中の電子（またはホール）のしやすさを示した言葉で、この値には大きな温度依存性があることが知られています。この移動度が極端に低くなると CCD チャンネル部分での電荷転送がスムーズに行えなくなり、転送効率が悪化すると考えられます。

ところでここからは文章中での煩雑さを避けるために、転送にかかわる電荷は電子が担うとします。電子とホールでは移動度などの特性に差がありますが、温度に対する依存性などは同様の性質

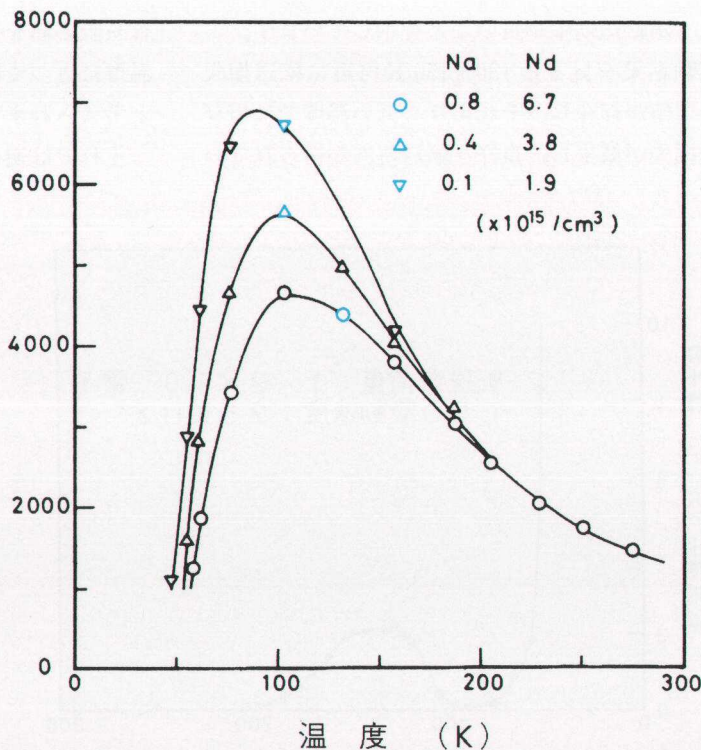


図1 電子の移動度の温度依存性

Na は基板の不純物濃度、Nd はチャンネル中の不純物濃度を示す。

を持つため、CCDの転送に関して電子で話を代表させることにします。

図1に測定された電子の移動度の温度依存性を示します。この図から明らかなように、電子の半導体中での移動度は室温から温度が低下するとともに向上し、100 Kよりも少し温度の高い領域で極大値を取り、それ以下の温度では減少に転じているものの、液体窒素温度(77 K)でも室温よりは高い値を保っていることが判ります。したがって電子の移動度に関するかぎり、液体窒素温度(77 K)から室温の範囲においては電荷転送の本質的な問題になる可能性は無いということが理解されます(この観点だけで考えれば冷却時の方が室温よりも好特性が得られるように見えます)。

それでは実際の転送効率はどうのような温度依存性を持つのでしょうか。図2に測定された転送損失のグラフを示します。このグラフは電荷転送時の転送の損失を示すグラフなので、この値が小さいほうが転送効率が良いことを示しています。この実験結果を見ると130~150 K付近に転送損失の最悪値が存在し、それよりも低い温度では再び転送損失が減少し、良好な転送特性が得られてい

ることが理解されます。このグラフは先ほど示した移動度の温度依存性では説明のできない性質を示しています。

この原因について木股氏らの論文から要点を切り出しますと、転送損失が最悪値を示す温度帯では半導体中に存在する不純物順位への電子の捕捉と放出の時定数が、転送効率測定時のCCDの駆動速度の時定数に近づき、このため転送効率が悪化しているのではとのことです。捕捉と放出の時定数が動作速度の時定数に近づくと、電子はCCDのチャンネル中である確率で一つ後の『バケツ』へ取り残されることとなり、このため転送効率が悪化します。これよりも高い温度では捕捉一放出の時定数が十分に短くなる(電子の持つ熱エネルギーが捕捉エネルギーよりも十分に大きくなる)ため、転送速度の時定数の範囲でほぼ平衡状態に到達することができるため、転送損失が小さくなります。しかし厳密には捕捉一放出の時定数は有限の値を持っているため、室温から最悪値の温度に近づくにつれて徐々に転送効率が悪化すると考えられます。

それでは逆にこの最悪値より低温側で急速に転送損失が低下する要因は何でしょうか。これも先ほどと同じ理由により、今度は捕捉一放出の時定数がCCDの転送速度の時定数よりも十分に大きくなり、転送時に影響を与えなくなるためであると考えられます。つまり極端な言い方をすれば一度埋まった不純物順位の『トラップ』は埋まりっぱなしになってしまうため、転送時に影響するトラップが見掛け上無くなってしまふと考えられるからです。木股氏らの測定によると転送損失が最悪値を示す温度よりもさらに低温側の90~100 Kにおいては常温時を上回る転送効率を得

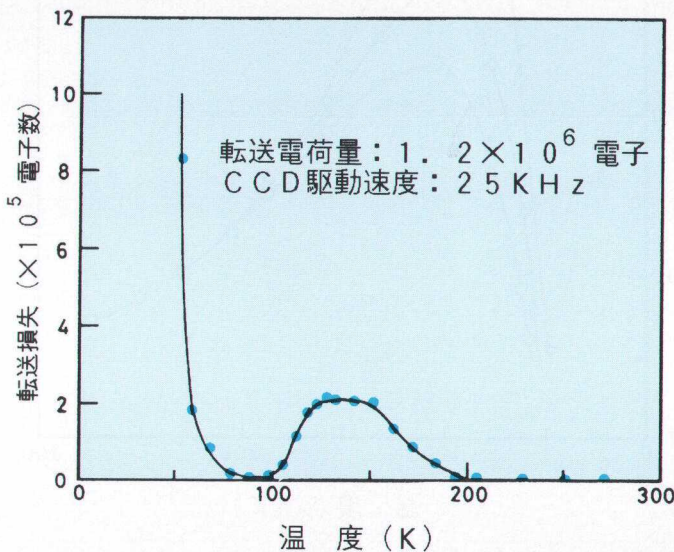


図2 電荷転送損失の温度依存性

られる場合もあるようです。このように、低温下における CCD の電荷転送には半導体中にドーブされた不純物のつくるトラップが大きな影響を持っていることが判ります。

しかしながらこの結果は我々が天文観測に CCD を用いる際には十分な注意が必要であることを示しています。例えば最悪値の温度ですが、これは当然ながら CCD の駆動速度に大きく依存します。転送速度の時定数に捕捉-放出の時定数が近付くときに転送効率が悪くなる状況なので、CCD の転送速度が変ればこの温度も変化するはずで、さらにこの転送損失の最悪値を示す温度よりも高い温度で CCD を駆動する場合には、駆動速度を遅くしたほうが転送効率が向上することが期待されます。

またこのトラップの効果の非常に注意を要する点は、電荷量が小さな範囲でも有限のトラップが存在し、この効果のために電荷量が小さくなるに従って一般的に転送効率が悪化するという事です。

但し電荷転送時にかかわるトラップの数は扱う電荷量に対して一定ではなく、一般的には転送電荷量が大きくなると増加すると考えられます。これは電荷量が大きくなるに従って、電荷転送時に電子が占める部分の物理的な体積が増加する（パケツの大きさが膨張する）ためです。

次に最悪値よりも温度が低い領域で、天体観測用に CCD を用いるとどのようなことが起こるでしょうか。木股氏らは通常の民生用のカメラと同じような条件、すなわち大きな電荷量を繰り返し転送するという条件下で評価を行なわれたわけですが、天文観測用の CCD ではこれとかなり違った状況に直面します。

ビデオカメラのような駆動方式では、常に CCD が駆動されていますから、時定数の非常に長いトラップは確率的に非常に低く、見掛け上ランダムな（特定の『パケツ』間の相関の小さな）電子の捕捉-放出源が CCD チャンネル中に存在すると

考えておけば大丈夫です。一方、天文観測に CCD カメラを用いると、CCD は非常に間欠的な動作を強いられることになります。また扱う電荷量も非常に小さな場合が多くなります。

CCD が間欠動作となってしまうのは、天文観測用の CCD カメラでは、露出時間を長く取るためですが、この長い露出時間が曲者になります。この露出時間の中にトラップ中に捕捉されている電子が徐々に放出され、最終的には多数のトラップが空き状態になってしまう可能性があります。このような状態に露出が終わった後の非常に少量の電荷が流し込まれると、埋まっていないトラップは容易に電子を捕捉してしまい、電荷転送効率が非常に悪化する状況が生じます。実際に我々が評価を行った PtSi 赤外線検出器の CCD チャンネルではこのような傾向が現れています。

これを防ぐ方法としては、インターライン方式の CCD では電荷転送を行う前に疑似的に CCD の転送部分に大量の電荷を流し込み、問題となるトラップを埋めつくしておく方法が考えられます。しかし可視光の観測装置で標準的に用いられているフレーム転送型の CCD においては、垂直転送の CCD が検出器自身を兼ねているため、このように電荷を注入するという操作を行うことは不可能です。但し水平 CCD のみはフレーム転送方式の CCD においても、このような動作を実現させることは可能であり、水平側の CCD の転送に問題が生じる場合にはこの方法が有効に働くことが期待されます。

話が前後しますが、上記で取り上げている問題点は、CCD チャンネルにドーブされている不純物の種類によって、現象の現れる温度帯が変化します。これは不純物によってつくられるエネルギー順位が不純物の種類によって異なるためです。

また先の段落で説明をしていませんでしたが、CCD の転送損失がさらに低温側で急速に悪化してしまうのは、電荷転送に寄与できる自由電子自体が急速に減少し、正常な電荷転送が行えなくな

るためです。この現象はフリーズアウトと呼ばれる現象で、文字通り電子が凍結されてしまうと理解して頂ければよいと思います。フリーズしてしまう温度も先ほどと同様に不純物の種類に依存します。

また同じ不純物を用いた際には不純物濃度が低いほど転送損失の悪化が改善されることが、木股氏らの実験により確認されています。これは不純物濃度が下がることにより、トラップの数も減少することから理解されます。

従って冷却することを前提に CCD 素子を設計する場合には、CCD チャンネル部分にドーピングする不純物の種類とその濃度を最適化することにより、転送効率に関する問題点を大幅に改善することが可能です。

さらにこのトラップによる電子の捕捉—放出現象を電荷転送以外の領域に拡張すると、天文観測用の CCD カメラでしばしば問題となる、残像現象についても説明することができます。一般的に半導体中の不純物順位には、捕捉—放出の確率は低いものの、高いエネルギーバンドを持つ順位が存在しており、この順位に電子が捕捉されると、捕獲された電子の放出現象が非常に長い時定数で起こります。例えば CCD のある画素に非常に強い光が照射され、この高い順位を満たす状況が起こると、次の露出時間中に徐々に放出現象が生じ、次のフレームやさらにその後のフレームに影響を起す可能性があります。このような残像現象は通常のビデオカメラのように、常に高いレベルの信号を扱っている場合には問題とならない現象です。CCD を一度常温に戻すとこのようなトラップの捕捉—吸収の時定数が非常に短くなり、全てのトラップが平衡状態になるため、熱サイクル後に残像現象が保存されないことは、この点からも理解されると思います。

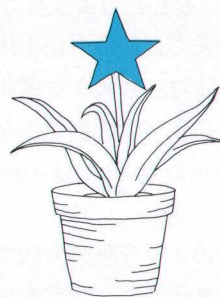
しかし冷却した状況でこの問題を取り除くためには、通常の CCD の駆動を複数回行った程度では、十分な改善（残像の除去）は期待できません。

十分な改善のためには、CCD 画面全体に強い光を照射し、全ての画素を対等にしてしまうか、強制的に電荷を注入し強い光が全面に照射されたのと同じ状況を実現する方法が考えられます。後者の方法がもっとも効果的だと思われませんが、CCD の駆動のみでこの問題を解決したい場合には、通常の駆動と比較して CCD チャンネル部に加える電圧振幅を（保証されている範囲で）大きくし、CCD チャンネル部に大きな電界を与えることにより、この現象を除去できる可能性があります。これは強い電界によってトラップ内の電子の放出時定数を短くすることができるためです。

今回は CCD の中での電荷転送という問題に関してかなり細かく話を進めましたので、CCD を専門的に扱われない方にはほとんど興味が持てない部分も多々あったと思います。しかし電荷の転送に関する問題は CCD カメラを扱っていく上で、非常に重要な問題ですので、敢えて細かなところまで話をさせていただきました。

参考文献

- 1) M. Kimata, M. Denda, N. Yutani, N. Tsubouchi and S. Uematsu, 1983 Jpn. J. Appl. Phys., vol. 22, 975-980
- 2) M. Kimata, M. Denda, N. Yutani, S. Iwade and N. Tsubouchi, 1986 Electronics and Communication in Japan, Part 2, vol. 69, 30-39



杵鞭充千男（神奈川県）