

電磁場解析光学シミュレーションとコリメータ測定による CCD光学特性評価 —シミュレーション技術開発とスミアの解析—

高橋 周*, 岩田 充**, 谷 武晴***, 永瀬 正規*, 納谷 昌之***

Optical Characteristic Evaluation of a CCD by Electromagnetic Field Analysis Optical Simulation and Collimator Measurement — Development of Simulation Technology and Smear Analysis —

Shu TAKAHASHI*, Mitsuru IWATA**, Takeharu TANI***,
Masanori NAGASE*, and Masayuki NAYA***

Abstract

Today, various simulation technologies are used for device development. But, many phenomena difficult to simulate still remain unanalyzed, among which simulation technology for future development of a CCD has been expected. We have developed a new simulation technology by combining a device simulator "SPECTRA" with an electromagnetic field analysis optics simulator "FOREST". With this combination, it has become possible for the first time to precisely analyze the optical as well as device characteristics by simulation. Such characteristics include sensitivity dependence on circuit board voltage, charge leakage to adjacent photodiodes, image smear, etc. In this paper our analytical result on smear is reported in which the simulation results were compared with collimator measurement results.

1. はじめに

CCDやCMOSなどの撮像素子は微細化が進み、2005年現在、画素サイズが $2\mu\text{m}$ もしくはそれ以下の製造、開発が行なわれている。CCDの構造上、このような画素サイズの開口サイズは $1\mu\text{m}$ 以下となり、その大きさは光の波長（可視光 $400\text{nm} \sim 700\text{nm}$ ）を無視できない領域に達している。つまり、光の波長を無限小近似して解く光線追跡計算では説明できない領域に達している。

2004年、この問題解決のために、上記微小なCCDにおける光の集光を電磁場解析手法の一つであるFDTD法

で高精度に解析する、3D電磁場解析光学シミュレータ「FOREST」（FORESTについては、4節で説明する）を開発した。「FOREST」を開発したことによって、厳密にCCDの光の集光、伝播を解くことが可能になり、この精度の高い集光結果を光学特性解析のみに限らず、他撮像素子特性解析に活用できる方法を考えた。その一つとしてわれわれは、CCD開発に広く利用されている、リンクリサーチ社製の3Dデバイスシミュレータ「SPECTRA」(1)と、「FOREST」を連結したシミュレーション技術の開発に着手した。このシミュレー

本誌投稿論文（受理2006年1月19日）

*富士写真フイルム（株）電子映像事業部
電子デバイス研究所
〒981-3493 宮城県黒川郡大和町松坂平1-6

*Electronic Device Laboratories, Electronic Imaging
Products Division, Fuji Photo Film Co., Ltd.
Matsusakadaira, Taiwa-cho, Kurokawa-gun, Miyagi
981-3493, Japan

**富士写真フイルム（株）電子映像事業部
商品開発センター
〒351-8585 埼玉県朝霞市泉水3-11-46

**Products Research & Development Center, Electronic
Imaging Products Division, Fuji Photo Film Co., Ltd.
Senzui, Asaka, Saitama 351-8585, Japan

***富士写真フイルム（株）R&D統括本部
先進コア技術研究所
〒258-8538 神奈川県足柄上郡開成町宮台798

***Advanced Core Technology Laboratories,
Research & Development Management Headquarters,
Fuji Photo Film Co., Ltd.
Miyanodai, Kaisei-machi, Ashigarakami-gun, Kanagawa
258-8538, Japan

シミュレーション技術は、「FOREST」によって解かれた光の伝播、強度分布を「SPECTRA」に光入力として受け渡し、半導体基板内の正確なキャリア発生分布とそのキャリアの移動を計算するものである。この計算は、例えば、CCD特有のノイズであるスミアや、Si基板に加える電極電圧を変化させた時の感度変化などの、光学特性とデバイス特性を切り離せないCCD特性を解析することが目的である。われわれは、このようにして得られる計算結果とコリメータ測定による実測との比較を行ない、その信頼性を確認した。

本稿では、新シミュレーション技術の開発と、計算精度検証のためのコリメータ測定（コリメータ測定については3節で説明する）との比較結果、また、新シミュレーション技術を用いたスミア解析結果について報告する。

2. スミア

スミアとは、電荷転送中の垂直電荷転送路（VCCD）に、電荷蓄積部から一定の比率で電荷が混入することによって発生するノイズである。この現象は、特に、高輝度な被写体を撮影した時に現れやすく、高輝度な部分の上下に白っぽい筋や帯状に発生するノイズである。スミアの発生例をFig. 1に示す。静止画撮影の場合、電荷転送中にメカニカルシャッターで電荷蓄積部（フォトダイオード：PD）への露光がさえぎられるため、スミアは大きな問題にならない。しかし、動画モードの場



Fig. 1 Smear occurrence example.

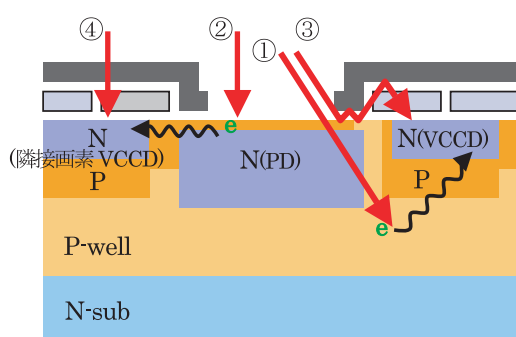


Fig. 2 Possible mechanisms of smear occurrence.

合はメカニカルシャッターを使用できないため、スミアの比率を小さくすることが重要となる。また、CCDの微細化が進むことで、CCD基板内を構成するN層とP層間の距離や、開口とVCCD間の距離が絶対的に短くなり、転送路への電荷混入が起り易くなるため、よりスミアが大きな問題となる。

一般的に、スミア成分がPDからVCCDへ流入するメカニズムは、Fig. 2に示すような4つの原因によるものと考えられている。

- ① フォトダイオード（PD）外で光電変換したキャリアが垂直転送路（VCCD）へ流れ込む。
- ② 半導体基板表面のP層を伝う拡散電流によってVCCDへ流れ込む。
- ③ 開口端での光の回折、多重反射によってVCCDへ光が入り込む。
- ④ 光が遮光膜を透過してVCCDに入り込む。

しかし、これらのスミア発生メカニズムが明確に示された例、解析手段は少なく、スミア発生原理を解くために新たな解析手法が必要になった。

3. コリメータ測定

撮像素子は、光の入射角度によって特性が変化することがわかっている。この性質は、撮像素子の微細化が進むにつれて顕著に現れる。コリメータ測定とは、光の入射角度によって変化する特性を評価するために、撮像素子に任意の角度で平行光を入射させる手法である。

コリメータ測定の概略図をFig. 3に示す。通常の方法では、さまざまな入射角度の光が撮像素子に照射するため、光の入射角度依存性について解析ができない。コリメータ測定では、従来の光源の光を平行光にして撮像素子に入射させる。また、撮像素子へ入射する平行光の角度を自由にできるようにしており、撮像素子の光入射角度依存性を解析できる測定方法である。

また、平行光を任意の角度で撮像素子に入射させることができる点で、コリメータ測定は、シミュレーション解析に近い条件で測定でき、実測とシミュレーションの比較を行なう手法としても有用な測定方法である。

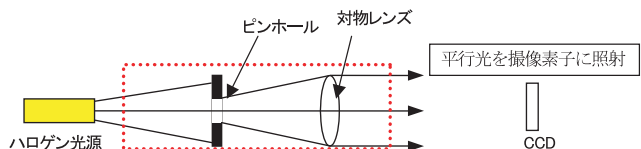


Fig. 3 Collimator measurement equipment.

4. 光学シミュレータ「FOREST」

「FOREST」は、CCDの集光状態などの光学特性を解析するために当社で独自に開発した3D光学シミュレータである。CCDのSi基板上に形成する光学層形状を、3D形状のまま正確に計算に取り込み、CCD内部の

多重反射，散乱，吸収などの現象を，電磁場の振舞いとして正確に求めることができる。Fig. 4に，「FOREST」による電場強度分布の計算例を示す。

本シミュレータでは，電磁場の数値解析手法の一種である，有限差分時間領域法(FDTD法)をベースとし，CCDの解析に特化させることでパラメータ設定などの利便性を高め，また，高速な計算を可能にしている。これまで，われわれは，本シミュレータをCCDの光利用効率を高めることに役立っているが，それだけに限らず，計算領域にSi基板を含めることでSi内の正確な光吸収の分布を計算することが可能である。

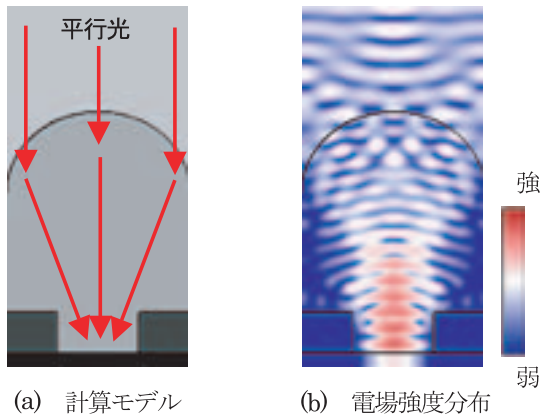


Fig. 4 Schematics of electromagnetic field optical simulation "FOREST".

5. 光学シミュレータ「FOREST」ーデバイスシミュレータ「SPECTRA」統合シミュレーション

「FOREST」-「SPECTRA」統合シミュレーション（以下，統合SIMと表記）は，Fig. 5に示すように，FORESTで厳密に計算したSi基板内の光強度分布をSi基板内の電位を計算するSPECTRAに光入力として受け渡し，正確なキャリア発生分布と発生したキャリアの挙動（感度成分，スミア成分，基板抜け成分，etc...）を計算するものである。

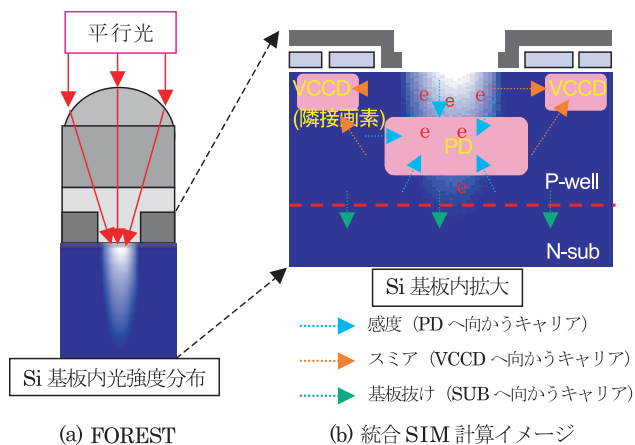


Fig. 5 Schematics of the "FOREST-SPECTRA" combined simulation.

統合SIMの計算フローを，以下に示す。

- ① FORESTで，光学層によって集められた光のSi基板内光強度分布を計算する。
- ② ①の結果を，半導体基板内のキャリア発生濃度分布に変換する（光電変換）。
- ③ ②の結果をSPECTRAへ受け渡し，キャリアの移動を計算する（電流計算）。

電流計算では，キャリアの移動先となるPD，VCCDへの電荷の流入量を検知するために，SPECTRA上で以下のように電極設定を行なっている。

- ・ 空乏領域に適切な擬フェルミ準位を設定し，その空乏領域内に設定した擬フェルミ準位と同じ電圧を印加した点電極を設置する（この点電極が各空乏層へ流入する電流を検知する電極である）。

こうして計算された結果，PDへの電流値が感度，VCCDへの電流値がスミア，隣接画素PDへの電流値が隣接PDへの電荷混入となる。

統合SIM結果の信頼性を確認するために，コリメータ測定によるスミアの実測定結果との比較をFig. 6に示す。

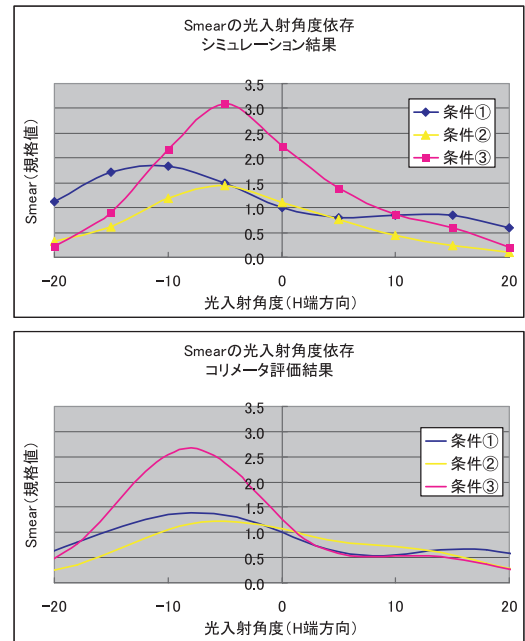


Fig. 6 Reliability verification of the "FOREST-SPECTRA" combined simulation. Comparison of smear analytical result with collimator measurement.

Fig. 6中の解析モデル条件①～③は，それぞれSi基板内を同条件とし，CCD光学層構造を大きく変化させた時のスミア信号量の光入射角度依存である。実測定したサンプルの形状ばらつきや，ある一つの形状についてシミュレーション解析していることを考慮すれば，これらの特性はコリメータ測定結果と統合SIM結果の傾向がほぼ一致しているといえる。故に，この統合SIMの計算が十分に信頼できるもので，FOREST-SPECTRA統合SIM技術開発に成功したといえる。これらの結果は，従来のFORESTとSPECTRAを分けていた技術では計算できないものである。

6. まとめ

「FOREST」-「SPECTRA」統合シミュレーションとコリメータ測定によってスミアの解析を可能にした。これらの手法を用いて、スミアがCCD光入射角度に依存することがわかった。

今後、統合SIMで理論的にスミア現象を解析し、コリメータ測定で得られる実物の特性の理解を深めることで、スミア特性に優れたCCDの開発が期待できる。また、統合SIMを用いることによって、これまでシミュレーション解析ができなかったさまざまな特性の解析にも大いに役立てることができると考える。

参考文献

- 1) H.Mutoh (Link Research Corporation). A device Simulator for 3-Dimensional Transient Analysis of CCD-SPECTRA. ITEC'92 : 1992 ITE Annual Convention.
- 2) T.Yamada et al. A Progressive Scan CCD Image Sensor for DSC Applications. IEEE Journal of Solid-State Circuits. **35** (12), 2044-2054 (2000).
- 3) M.Oda et al. A 1/4.5"3.1MPixel FT-CCD with 1.56 μ m Pixel Size for Mobile Applications. IEEE Solid-State Circuits. **48** (2005).
- 4) M.Kasano et al. A 2.0 μ m Pixel-Pitch MOS Image Sensor with an Amorphous Si Film Color Filter. IEEE Solid-State Circuits. **48** (2005).
- 5) N.Karasawa et al. A 2.20 μ m square pixel IT-CCD constructed from single-layer electrode. IEEE Electron Devices. (2005).