イメージセンサ技術の 最新動向

今回の小特集「イメージセンサ技術の最新動向」は、昨年6月に開催されたInternational Image Sensor Workshop (IISW) の内容を中心に、最新のイメージセンサに関する技術動向をまとめた内容となっています。IISWは隔年開催のイメージセンサに関する唯一の国際会議であり、イメージセンサの技術動向を何ううえでは欠かすことのできない会議です。世界的な景気低迷にもかかわらず、ノルウェーの古都ベルゲンで開催された会議には各地より多くの研究者が集い、活発な議論が交わされました。IISWの報告に関しては、運営委員である寺西様はじめ、今回参加された方々に分担してご執筆を頂きました。またIISW以外の最新動向として3DレンジファインダとHARPの現状についてまとめて頂きました。

お忙しい中原稿をご執筆頂きました著者の方々にはこの場をお借りしてお礼申し上げます。

なお、本小特集は、蚊野 浩，堀井洋史，神野英樹各編集幹事と私が担当いたしました。

編集幹事 太田 淳

Special edition

60

小特集 イメージセンサ技術の最新動向

Special edition

1. 2009 IISWレビュー

1-1. 2009 IISW報告 ～概要、裏面照射型、CCD～

(正会員) 寺西 信一†

キーワード イメージセンサ、裏面照射型、CMOSセンサ、CCD

1. ま え が き

2009 International Image Sensor Workshop (IISW) が2009年6月25～28日に、ノルウェー第2の都市Bergenから南へ30kmのフィヨルドの保養地Solstrand Hotelで開催された。その概要と発表された技術的内容について報告する。

IISWの目的は、イメージセンサ分野に特化して、最新の研究開発成果を持ち寄り、深く技術討論を行い、将来の方向を探ろうということにある。十分に議論を尽くすという雰囲気を保つために、参加者数に上限を設け、合宿形式で行うことを特徴としている。

2009年の投稿件数は94件で、前回2007年の米国開催の110件を15%下回った。投稿数の減少を反映し、発表数も、図1に示すように、71件と前回を下回った。発表者の地域別の分布は、ヨーロッパ37件(対前回+7件)、北米14件(対前回比-12件)、アジア20件(対前回比-12件)であり、北米、アジアからの発表件数が大幅にダウンしている。ヨーロッパの発表件数が増加したのは、地元開催というだけでなく、古くからイメージセンサに携わってきたST Microelectronics社やDALSA社が、新しい技術や基礎的な技術を発表し、新興のベンチャが、特定用途にチューニングしたカスタムセンサを開発するという土壌ができてきた結果と言える。参加者数は、不況の影響を受けるのではと心配されたが、受付開始3日で満員になった。北米やアジアからの参加者の一部には、所属機関から出張が認められず、自費参加をしている熱烈参加者もいた。発表数の減少とともに、不況の影響は小さくなかった。

IISW期間中にWalter Kosonocky賞贈呈が行われる。過去2年間、2007年1月から2008年12月までに発表された、イメージセンサに関する論文、製品を対象としている。コダックのStevensらが2008 ISSCCに発表した、"Low-Crosstalk and Low-Dark-Current CMOS Image-Sensor Technology Using a Hole-Based Detector"¹⁾が受賞した。現在、電子を信号電荷とするN型が主流であるが、正孔を信号電荷とするP型の方が、埋込フォトダイオードの形成

図1 IISWの投稿数の推移

が容易であり、クロストークと暗電流の低減に有効であることを実験的に示したことが認められた。

以下、IISWでの技術内容を裏面照射/CCD(寺西、パナソニック)、低ノイズ/高感度センサ(中村、アプティナジャパン)、高速/WDRセンサ(溝渕、日本TI)、高機能センサ(川人、静岡大学)の順に概説する。

なお、次回のIISWは、2011年に日本での開催を予定している。ご協力をお願いする。

2. 裏面照射型

今回の大きなトピックは、裏面照射型(BSI, Back Side Illumination)であった。ノーベル賞の対象となったBoyleとSmithとによる1960年のCCD論文²⁾において、すでに裏面照射型は提案されていた。古くから研究されており、天文用等の用途では実用になってきた。2005年ころから、微細セルを対象とした裏面照射型の発表が活発になり、2009年には製品化された。裏面照射型の著しい進歩を受け、初日の25日は、Backside Illumination of Solid-State Image Sensors (BSI Symposium)とし、裏面照射型をテーマとした7件の招待講演を集めた。前半3件は天文、宇宙、科学用途であり、大きな画素サイズを扱っているのに対して、後半4件は1.75 μm 、さらには1.4 μm サイズの微細な画素サイズに対する技術を紹介している。

Lesserは、アリゾナ大学の天文部門に所属し、主に天文

† パナソニック株式会社

"Review on 2009 IISW; Report on 2009 IISW; outline, backside illumination, CCD" by Nobukazu Teranishi (Panasonic Corporation, Kyoto)

用裏面照射型センサを作成してきた。講演では、シリコン(Si)ウェハの薄膜化、裏面界面の安定化、反射防止膜の形成などの工程を手作りの装置の写真を含めて説明した³⁾。UCバークレーローレンスバークレー研究所のHollandは、10k Ω cm程度の高抵抗基板を用い、厚さ100～250 μ mの基板全体を空乏化させ、特に近赤外線領域の量子効率を高めたり、荷電粒子に対する検出感度を大きくさせたセンサを紹介した⁴⁾。JPLのNikzadは、分子線エピタキシャル技術を用いて、裏面にボロンの高濃度層を原子層制御で形成する、“デルタドーブ”技術を紹介した。裏面の界面安定化が厚さの小さいボロン層で達成でき、特に紫外線感度の向上に有効であることを示した⁵⁾。元JPLのPainは、2005年の本ワークショップにて、裏面照射型センサ作成におけるSOI基板を用いたプロセス優位性を提唱した⁶⁾。その後の発展、試作結果、特性などを紹介している⁷⁾。

センサメーカーであるOmniVisionとファンダリーであるTSMCとは、共同でバルクウェハを用いた裏面照射型センサの量産化技術を立ち上げ、TSMCのWuuがプロセスの立場から、OmniVisionのRhodesがセンサ設計の立場から、1.4 μ mセルのセンサ技術を紹介した^{8) 9)}。微細セルにおいて、表面照射に比較して裏面照射は開口率が大きくできること、カラーフィルタからフォトダイオードまでの距離が小さくできることから優位であり、1.4 μ m画素サイズ以細では裏面照射型になると主張した。裏面照射型では、ウェハ拡散工程完了後、Si基板の厚さを数百 μ mから数 μ mへ薄くする必要がある。薄膜化後のSi基板厚均一化のためには、Painらの提唱のように、高価ではあるがSOIウェハを用いると考えられてきたが、両社は安価なバルクウェハで $\pm 0.1\mu$ m以内(200mmウェハ内において)の均一性を実現でき、量産性に耐えることを示した。その他の裏面照射型製造での重要工程を以下のように説明した。支持基板との張り合わせ工程に、プラズマによる表面活性化法を用いること、薄膜化したSiウェハ裏面の結晶性を回復させ、裏面側界面を安定化させる目的で、レーザアニールによりシリコン融点の直上まで加熱していることなどを示した。さらに、1.1 μ m画素サイズへの微細化が可能になったと主張している。両社の発表は、バルクウェハを使用するという実用性の高さ、技術情報の開示量から大いに注目されていた^{8) 9)}。

ST MicroelectronicsのRoyは、SOIを用いた微細な画素サイズである1.4 μ m画素の裏面照射型について説明した。従来の画素サイズの大きな科学用センサとの比較、表面照射型での微細画素化がクロストークで特に苦しいことを示した。さらに、裏面付近で発生した信号電子を表面の蓄積部へ集める画素設計、バルクウェハに比較してSOIウェハが薄膜化の精度が優れていること、裏面界面の安定性のためのレーザアニールをチップ単位で一括露光し、かつ、融点直下に設定することなどを説明した¹⁰⁾。

以上説明したBSI Symposiumの他にも、IISW本体においても、セッション1～3は裏面照射と微細画素に割当てられており、多くの裏面照射技術の発表があった。東芝のKohyamaらは300mmのSOIウェハを使用し、65nmという微細プロセスで1.4 μ m画素サイズの裏面照射型センサを試作し、裏面界面安定化の重要性を示した結果などを発表した¹¹⁾。

ST MicroelectronicsのCoudrainらは、フォトダイオードとトランスファゲートをSOIウェハ上に形成し、別のウェハを張り合わせ薄膜化し、そのSi薄膜層にトランスファゲート以外の各種回路を形成する構造の裏面照射型センサを提案した。フォトダイオード面積を大きく取れ、飽和を大きくできるという長所があるが、張り合わせ構造が耐えうる低温で、各種回路を構成するトランジスタを形成する必要があるという短所がある¹²⁾。IMECのRaoらは、CMOSセンサと同じような走査回路を形成したウェハと、フォトダイオードアレイを形成したウェハとを、インジウムバンブアレイで電気接続する構造を、25 μ m画素サイズで試作した¹³⁾。DongbuのKimらは、インジウムバンブではなく、プラズマによる表面活性化を利用した直接接合を行い、微細な2.2 μ m画素サイズにおいても実現できることを実証した¹⁴⁾。

ST MicroelectronicsのHirigoyenらは、光学シミュレーションによって、感度、光学クロストークを調べ、1.1 μ m画素サイズにおいても、裏面照射型が有望であることを示した¹⁵⁾。AptinaのAgranovらは、プロセスでは表面照射型の1.4 μ m画素サイズの試作結果を提示していた。発表では、表面照射型の試作結果とともに裏面照射型の試作結果も示し、1.1 μ m画素サイズ以細は裏面照射型を用いると発言した¹⁶⁾。

3. CCD

CCDに関するセッションは一つであった。

近畿大の江藤は、裏面照射型で、かつ、電子増幅(CCM)機能を持たせた高感度な高速度カメラ用センサについての招待講演を行った¹⁷⁾。DalsaのPetersらは、CCDが停止中はすべての転送ゲートをピンニング状態に保持するAGP(All Gate Pinning)において、埋込チャンネルの不純物分布を工夫することによって、60℃で3.4電子/s/画素の非常に小さい暗電流を達成したと報告した¹⁸⁾。ソニーのTakedaらは、1.55 μ m画素サイズのインタライン転送型CCDを実現するために、垂直オーバフロードレイン構造のドレインの閾値を決める基板電圧をコントロールすることによって、飽和電子数の減少を防止する技術と、垂直CCDの転送電極を金属で裏打ちし、パルス鈍りを防止し、読出電圧の低減を図る技術を開発したことを報告した¹⁹⁾。日本TIのKobayashiらは、30MHz高速動作の電子増幅出力を4つ持つカラーリニアセンサを開発し、0℃以下で1電子以下のノイズを達成したことを示した²⁰⁾。

(2009年12月7日受付)

〔文 献〕

- 1) Eric Stevens, et al.: "Low-Crosstalk and Low-Dark-Current CMOS Image-Sensor Technology Using a Hole-Based Detector", ISSCC Dig. Tech. Papers 2.9 (2008)
- 2) W.S. Boyle and G.E. Smith: "Charge Coupled Semiconductor Devices", the Bell System Technical Journal, **49**, pp.587-593 (1970)
- 3) M. Lesser: "Back-side Illumination: History and Overview", 2009 Symposium on Backside Illumination of Solid-State Image Sensors, Norway, pp.1-32 (2009)
- 4) S. Holland: "Fully Depleted, BSI CCDs on High-Resistivity Silicon", 2009 Symposium on Backside Illumination of Solid-State Image Sensors, Norway, pp.33-82 (2009)
- 5) S. Nikzad: "Delta-Doping Technology for BSI CMOS and CCD Imagers", 2009 Symposium on Backside Illumination of Solid-State Image Sensors, Norway, pp.83-100 (2009)
- 6) B. Pain et al.: "Fabrication and Initial Results for a Back-Illuminated Monolithic APS in a Mixed SOI/Bulk CMOS Technology", IEEE Workshop on CCD & AIS, pp.102-104 (2005)
- 7) B. Pain: "Back-Side Illumination Technology for SOI-CMOS Image Sensors", 2009 Symposium on Backside Illumination of Solid-State Image Sensors, Norway, pp.101-123 (2009)
- 8) S.G. Wu: "BSI Technology with Bulk Si Wafer", 2009 Symposium on Backside Illumination of Solid-State Image Sensors, Norway, pp.124-153 (2009)
- 9) H. Rhodes: "Mass Production of BSI Image Sensors: Performance Results", 2009 Symposium on Backside Illumination of Solid-State Image Sensors, Norway, pp.154-178 (2009)
- 10) F. Roy: "BSI: Technical Challenges", 2009 Symposium on Backside Illumination of Solid-State Image Sensors, Norway, pp.179-199 (2009)
- 11) Y. Kohyama et al.: "A 1.4 μ m Pixel Backside Illuminated CMOS Image Sensor with 300 mm Wafer Based on 65 nm Logic Technology", 2009 International Image Sensor Workshop, Session 02, Norway (2009)
- 12) P. Coudrain et al.: "Towards a Three-Dimensional Back-Illuminated Miniaturized CMOS Pixel Technology using 100nm Inter-Layer Contacts", 2009 International Image Sensor Workshop, Session 02, Norway (2009)
- 13) P. R. Rao et al.: "Monolithic and Fully-Hybrid Backside Illuminated CMOS Imagers for Smart Sensing", 2009 International Image Sensor Workshop, Session 02, Norway (2009)
- 14) S. Kim et al.: "New Integration Technology of CIS for High Sensitivity Small Pixel", 2009 International Image Sensor Workshop, Session 03, Norway (2009)
- 15) F. Hirigoyen et al.: "1.1 μ m Backside Imager vs. Frontside Imager: an optics-dedicated FDTD approach", 2009 International Image Sensor Workshop, Session 02, Norway (2009)
- 16) G. Agranov et al.: "Pixel continues to shrink... Pixel Development for Novel CMOS Image Sensors", 2009 International Image Sensor Workshop, Session 03, Norway (2009)
- 17) T. G. Etoh et al.: "Backside Illuminated Image Sensors manufactured with Graded Double Epitaxial Layers: an Application to a High-speed High-sensitivity Image Sensor", 2009 International Image Sensor Workshop, Session 06, Norway (2009)
- 18) I. M. Peters et al.: "Very-low Dark Current in FF-CCDs", 2009 International Image Sensor Workshop, Session 06, Norway (2009)
- 19) T. Takeda et al.: "High saturation output 1.55 (m square pixel IT-CCD with metal wiring line structure in a pixel", 2009 International Image Sensor Workshop, Session 06, Norway (2009)
- 20) I. Kobayashi et al.: "High Speed Impactron CCD Line Sensor with Color Sensing Capability", 2009 International Image Sensor Workshop, Session 06, Norway (2009)

寺西 信一 1978年～2000年、日本電気(株)にて、2000年より、パナソニック(株)にて、イメージセンサの研究開発、ビジネスに従事。埋込型フォトダイオード発明などにより、全国発明表彰特別賞、科学技術庁長官賞研究功績者、当学会業績賞を受賞。IEEEフェロー。IISWのGeneral Chair。情報センシング研究会主査、IEEE Trans. EDのGuest Editorを務めた。正会員(フェロー認定会員)。