IR焦点面技術を超える アモルファスシリコンボロメータ

チャールズ・ハンソン

アモルファスシリコンボロメータ技術は性能改善が多少遅れがちであった。しかし、材料の改良と画素サイズの縮小によって次世代の非冷却赤外線画像処理ではおそらく首位を行くであろう。

35年前、熱画像は近代戦に欠かせない実現技術として登場した。しかし、当初、撮像装置のコスト、サイズ、重量によって、商用および民生用のアプリケーションからの関心は得られなかった。その後、1990年代の中期に入って、米テキサス・インスツルメンツ社（TI）は、感知材料の組成によって名付けられた強誘電体デバイス、チタン酸バリウムストロンチウム（BST）センサを投入して商業市場を開いた。当初の市販製品は自動車用ナイトビジョンシステム、警察用の車載ルーフトップ熱探知カメラ、消防士向けハンドヘルド式熱探知カメラ、熱防犯カメラなどである。

あいにく、BST技術は性能に限界があり、スケーリングも困難であった。この技術は後継技術に勝る画質で画像を形成するものの、感度向上の競争にはついて行くことができなかった。さらに、BST検出器は、製造時に一つの検出器アレイを個別の読み出し集積回路へボンディングする必要があるハイブリッドデバイスのため、画素サイズを縮小する能力に限界があった。エレクトロニクスは小型化が可能かもしれないが、システムサイズは結局、オプトメカニカルチョッパの必要性によって決まってしまう。

マイクロボロメータの登場

これらの諸制約の結果として、酸化バナジウム（VO_x）マイクロボロメータがBST検出器に置き換わり始めた。マイクロボロメータ焦点面アレイ（FPA）は、小型のVO_x抵抗素子もしくは画素のアレイであり、微細加工された構造によって、各々が環境および互いから熱的に分離されている（図1）。これらの素子（画素）の一つが赤外（IR）放射を吸収したとすると、その温度はそれに応じて変化する。一定の光束変化に対する温度変化が最大になるように、細長い脚が熱的分離を実現する。温度が変化すると画素の抵抗が変化し、この抵抗変化を読み出し集積回路（ROIC）が読み込む。

マイクロボロメータは、米ハネウェル社（Honeywell）が最初に開発し、その後、他の多数のメーカーにライセンスが供与された。BSTの限界を踏まえて、TIはVO_xの代わりにアモルファスシリコン（*a*-Si）に基づく独立したマイクロボロメータの開発に着手した。TIは、BSTの限界を克服するための単純なアップグレードとしての薄膜強誘電体（TFFE）技術も開発した。しかし、BST製品は米レイセオン社（Raytheon）がTIの国防部門を買収した後も市場をリードしたものの、急成長している分野ではマイクロボロメータがかなりの占有率を獲得した。2004年に、レイセオン社はBST、TFFE、マイクロボロメータなどの一連のTIの非冷却IR技術を米L-3コミュニケーションズ社（L-3 Communications）に売却した。L-3社は、結局、2009年にBST生産を中止し、ほぼ同時にTFFE技術も製造困難を理由に開発を中止した。

期待以上の*a*-Si

現在はL-3社の製品である*a*-Siマイクロボロメータも、イメージングを意図しないニッチ技術としてスタートした。その性能可能性の当初の評価も控え目であった。しかし、開発が進むにつれ、抵抗の温度係数（TCR）がVO_xで達成可能なそれよりもはるかに大きくなり得ること、1/*f*雑音が適切な蒸着プロセスを使うことによって抑制できることが明らかになった。さらに、*a*-Siボロメータ画素に使われているすべての材料が標準CMOS処理を使って容易にエッチングできるため、熱的分離も競合するVO_xデバイスのそれに比べてはるかに改善することができた。

L-3社の*a*-Siボロメータが競争力のある性能をもつために残る障害は動作モードであった。VO_xマイクロボロメータは、CMOSが揺籃期にあった頃に開発されたため、画素単位セルごとの信号積分は不十分なキャパシタンスにより選択肢に入らなかった。さらに、定電流源を使って画素にバイアスをかけ、行をアドレスして読み出される列を選択する一対の直交マルチプレクサを使

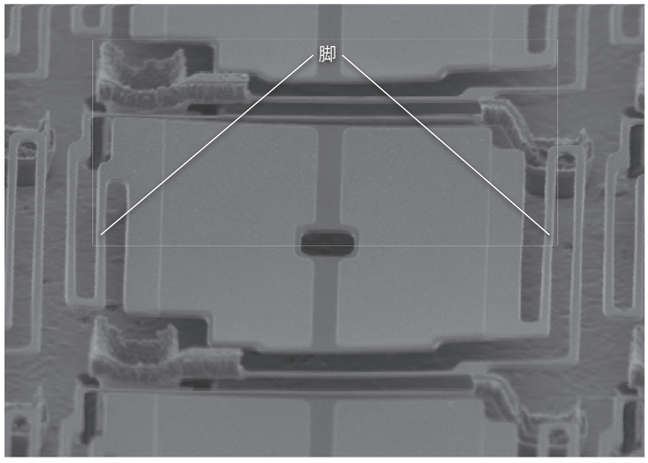

図1　顕微鏡写真はマイクロボロメータ焦点面アレイ（FPA）における典型的な微細加工構造を示す。画素はROIC上に懸垂され、細長い脚が画素の熱的分離を実現している。

って信号電圧をサンプリングする方式は比較的容易であった。ワット損を最小化するために、電力は一定の行が選択されている時間帯にだけ適用、つまりパルスバイアスを適用した。これは、単位セルごとの増幅器の必要性を排除し、かつワット損を避ける賢明な方式であった。増幅器は単位セルごとの代わりに列回路内の各列に一つ配置され、その結果、低雑音と直線性の要求の実現に必要な大きなスペースが確保された。VO_x画素の低インピーダンスはこの動作モードに良く適合していた。

TIが *a*-Siマイクロボロメータの開発を開始したのはかなり遅かったが、すでに最先端CMOS技術を所有していた。また、*a*-Siのインピーダンスはパルスバイアス印加を安易に実施するには大きすぎた。結果として、今や、L-3社の*a*-Siマイクロボロメータは定電圧バイアスが連続的に印加され、信号電流が単位セルごとに積分される。高密度CMOS回路を使ったとしても、キャパシタンス密度は高効率で積分するには不十分であった。この限界を簡単に解決する方法は、単極抵抗コンデンサフィルタ（R-Cフィルタ）を模倣したスイッチドキャパシタ（S-C）フィルタであった。

ROICの単位セルでの動作は次の通りである。電流は、スイッチS_1が開いている短かい時間の間コンデンサC_{int}上に積分される。電荷を交換し、電圧がC_{avg}と等価になるようにS_1を短時間閉じ、それからC_{xfr}が電荷を交換し、電圧がC_{avg}と等価になるようにスイッチS_2を短時間閉じ、最終的に積分コンデンサC_{int}をリセットし、このプロセスを画素読取りの間に一般に数千回反復する（図2）。

信号対雑音（SN）比は、信号が読出しの間の全時間にわたり積分された場合と同程度に大きいが、フィルタは信号と雑音の両方を抑制する。この利点は、小型コンデンサが集積回路の電圧制限を越えることなしに長時間にわたり信号を高効率で積分できるということである。適切に動作させれば、C_{int}上の積分はS-Cフィルタに対する理想的な

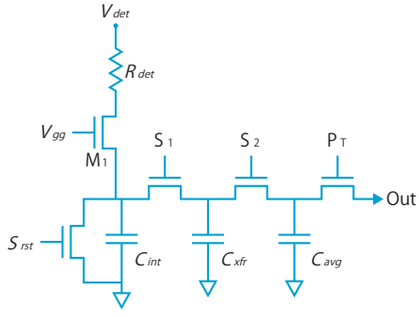

図2　*a*-Siボロメータ用の典型的なROIC。

アンチエイリアシング前置フィルタとして機能し、雑音は出力コンデンサC_{avg}のkTCだけになる。C_{avg}上の画素信号サイトは数kHzの速度で連続的に更新され、それと同一速度での読み出しに利用することができる。

S-Cフィルタの利用は単位セルにおける高効率の積分を可能にしたが、多数のVO$_x$競争相手と同じ性能を実現するには当初不十分であった。ボロメータはすべて、ボロメータ抵抗器を通る背景電流が典型的な信号電流に比べて非常に大きいという性質をもつ。これはバイアス電圧の大きさを制限し、結果として、ボロメータ性能を制限する。パルスバイアスされたボロメータの列に基づく読み出し回路は信号処理に利用可能なエリアが広いため、その電流を容易に除去できた。しかし、連続的にバイアスされたアレイの場合は、同じタスクを単位セルにおいて実行しなければならなかった。すべての単位セルにおける電流減算を同時に実行する、一つの革新的だが単純な回路によって、この状況はドラマチックに変化し、L-3社の*a*-SiマイクロボロメータはVO$_x$デバイスの最良の性能と競合する性能を獲得した。

a-Siアレイの優れた均一性は、全域的な電流減算が適正であること、すなわち単位セルにおける均一性の補正は不要であることを意味している。つまり、C_{avg}上の信号が事実上連続的に有効であるということが重要な点であり、これはL-3社に特有のものである。まず、そのノードでの信号の高速更新は、極めて高いフレームレートでの読み出しが可能であることを意味している。標準ROICは、標準レートをはるかに超えてフレームレートを増大させるのに適した帯域幅によって設計されてはいないが、部分画像はkHzのフレームレートで読み出すことができる。このことは短期間イベントの検出に有用であり、そのイベントの位置が分かる。必要な位置の精度はイベントの持続時間に依存し、非常に高速なイベントの検出は、十分に高速で読み出せるのは視野の小さな部分にすぎないということを意味する。

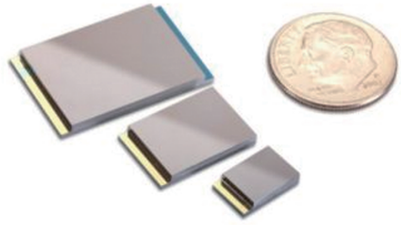

図3　パッケージされたボロメータは小さな画素サイズの恩恵を受ける。

次に、興味深いことは、連続バイアスボロメータ技術の能力がスナップショット撮像に適していることである。標準動作モードでは、すべての画素が信号を同時に積分し、すべての画素のS-Cフィルタが同調して動作する。したがって、すべての信号はROIC画素単位セルにおけるC_{avg}コンデンサ上で同時に取得できる。標準動作においては、全アレイを読み出すには積分間の時間が不足するため、信号はライン毎に読み出される。しかし、各単位セルで二重のC_{int}コンデンサを利用し、一つの画素上の信号蓄積を他の画素が読み出されている間に実行できるスイッチを利用すれば、同時に収集されたデータによって全アレイの読み出しが可能になるであろう。この機能はわれわれの定バイアスマイクロボロメータ技術を使えば一意的に可能である。

われわれの*a*-Si技術は小型、軽量、低価格のIR撮像装置に対する要望から生まれた。サイズ、重量、コストに大きく貢献するのはパッケージングだということは早くから認識されていた。従来のパッケージングはシリコン（Si）ウエハからカットされた個々の検出器アレイを取扱う必要があった。これらの個々のアレイはパッケージ内にそれぞれ搭載され、IR透過窓がパッケージの上部に取付けられた。このパッケージは加熱排気され、最終的に封止される。L-3社のアプローチは、ウエハレベルでパッケージングすることによってこの過程を簡素化した。Siウエハ上のアレイはすべて一度に封止される。アレイウエハと同サイズの2番目のSiウエハに長方形のキャビティがエッチングされ、それらのウエハは真空中で一括してボンディングされ、そして組合わされて厚みが2倍になったウエハはパッケージ済みのアレイへとダイシングされる（図3）。

マイクロボロメータアレイ技術は他のIR撮像技術と同様に画素サイズの縮小と全パッケージサイズの縮小の道を進んでいる。そして、この傾向は確実に続くであろう。その他のトレンドとしては、より優れた性能を得るための熱的分離や、より速い応答を実現するための熱質量の低減などがある。熱的分離を改善するには、より微細なリソグラフィ解像度が必要になるが、製造機器が極端に高コストなため、いくつかのメーカーはそれらのデバイスの組立てを半導体プロセスファウンドリに依頼せざるを得ない。性能改善へのもう一つのアプローチは活性材料のTCRをさらに高めることである。*a*-Si技術は、他の優れた性質を維持しながら5%/℃以上のTCRが可能なため、特に効果的である。この利点によって、*a*-Siマイクロボロメータは非冷却IRイメージング用の高性能技術としてまもなく定着するであろう。

著者紹介
チャールズ・ハンソン（Charles Hanson）はL-3コミュニケーションズEOS社（L-3 EOS）の赤外製品担当のCTOである。
e-mail：charles.hanson@l-3com.com

LFWJ