

高感度イオン撮像素子 SCAPS-II のノイズ評価 Noise analysis of SCAPS-II ion imager

坂本 直哉^{1*}, 青山 聡², 川人 祥二³, 坂本 尚義⁴

Naoya Sakamoto^{1*}, Satoshi Aoyama², Shoji Kawahito³, Hisayoshi Yurimoto⁴

¹ 北大・創成, ² ブロックマン・テクノロジー, ³ 静大・電工, ⁴ 北大・理

¹CRIS, Hokudai, ²Brookman Technology Inc., ³Electronics, Shizuoka Univ., ⁴Natural History Sci., Hokudai

天然における元素や同位体比の存在度は6桁を超えるレンジに分布している。その分析には高感度な質量分析法が広く適用され、ほとんどの場合、信号としてイオンが用いられる。これらの二次元分布を定量的に測定するために、計数を蓄積して信号の統計的変動を小さくできる積分型のイオンイメージャSCAPSが開発され、投影型二次イオン質量分析装置と組み合わせてサブミクロンの空間分解能を保ったままパーミルオーダーの精度を実現している。SCAPSはイオンを直接検出可能な35万個の独立した画素で構成され、各画素が50000イオンを蓄積可能であり読み出しノイズ2~3イオン相当を達成している。しかし、1枚のイメージ取得に20秒かかり、1秒あたりの最大計数率は約1000イオン/画素であった。本研究では、高速に画素信号を読み出すことで時間あたりに計数可能なイオン数を向上させるイオンイメージャSCAPS-IIを開発してノイズの評価を行い、シングルイオンからの検出を試みた。

画素信号を高速に読み出すには、読み出し回路のノイズに打ち勝つように入射イオンにより画素キャパシタに蓄積する信号電荷を効率よく出力電圧に変換する必要がある。そのために、SCAPS-IIでは画素の信号電荷を複数回サンプリングして積分することで相対的にノイズを低減する多重サンプリング機構を組み込んだ。さらに、信号電荷Qを蓄積する画素キャパシタCの容量を14fFから3.5fFへと小さくすることにより、 $Q=CV$ の関係に従ってイオン1個が入射したときの出力電圧V(変換ゲイン)を増大させた。また、イメージのダイナミックレンジを向上させるために、蓄積した信号電荷が飽和レベルに達した画素だけを検出器内部でダイナミックにリセットするコンディショナルリセット機能も追加した。

SCAPS-IIのイオンに対する応答性を求めるために、二次イオン質量分析計Cameca ims-1270を用いて10keVで加速したSi⁺イオンを検出器中央部に均一に照射した。検出器は熱雑音を抑制するために液体窒素を用いて-100℃に冷却した。1画素あたりの入射イオン数が100イオン以上の時、入射イオン数が増えるにつれて画素からの出力電圧は高くなり10000イオン/画素で飽和した。この時、イオン照射領域の画素出力のノイズは傾き1/2で増大していき統計的変動に従う。画素出力とノイズの延長線が150マイクロボルトで交わることから、変換ゲインは150マイクロボルトと見積もられ、従来(30マイクロボルト)の5倍向上したことが分かった。読み出し速度は1回サンプリング時で12.5Hz、16回サンプリング時では8.3Hzを達成した。

しかし、1回サンプリング時のノイズが450マイクロボルトであるのに対し、16回サンプリング積分時で250マイクロボルト(1.7イオン相当)であった。統計的には4分の1まで低減されるべきであるため、統計に従わないノイズ源が存在することを示す。ノイズ源を特定する為に、画素を切り離して多重サンプリング機構に信号源として一定電圧を印可し、複数回サンプリングを行った所、サンプリング回数に応じて統計的にノイズが低減されたため、多重サンプリング機構そのものは理想的にノイズが低減させていた。そこで、多重サンプリングして得たイメージをさらに複数枚平均化してノイズを低減する事を試みた所、平均化するイメージ枚数を増やすにつれてノイズは減少していったが、ある枚数からは増加に転じた。これは時間に依存したノイズの存在を示す。CMOSセンサにおいて、時間に依存したノイズとして1/fノイズがノイズ源として考えられる。イメージを複数枚平均化する手法を用いて、イオン照射を行った。3.5フレーム/秒のイメージを50枚平均(合計14.4秒)した時、ノイズレベル50マイクロボルトであり、イオンが入射した部分のヒストグラムでは1イオンの信号を示す150マイクロボルトのピークを分離することができた。フレーム速度をより高速に行う事で、リアルタイムにシングルイオン検出が可能となると考えられる。