



Rad-icon Imaging Corp

3193 Belick Street, Unit 1
Santa Clara, CA 95054-2404

tel 408-486-0886
fax 408-486-0882

AN09: RadEye EVセンサーのDQE測定値

はじめに

RadEyeセンサーのEVシリーズは、拡張されたエネルギー反応だけでなく、高い空間分解能を固有の低ノイズ検出プロセスに結合するという、エックス線イメージングシステム向けの独自の機能をいくつか備えている。これらの特性は、このセンサーのシグナル対ノイズ比と解像度を研究する一連のDQE(検出量子効率)の測定によって明らかになっている。DQE性能規格は、主に医療産業に使用されるが、提供される情報は、ほかのさまざまなアプリケーションにおけるイメージング性能を予測するために気軽に適用することができる。

ラドアイコンイメージング社によって製造されているRadEye1センサーは、24.6 X 49.2mmの広い有効面積と48 μ mのピクセルピッチの512 x 1024ピクセルCMOSフォトダイオードアレイである。これは特に、デジタルエックス線イメージング(レントゲン)アプリケーションにおけるダイレクト結合シンチレーターとともに使用するように設計されている。RadEye1デバイスは3面ブツプルで、複数のデテクターを1次元または2次元にタイル状に配列することによって、より大きいイメージングモジュールに組み立てることができる。直接蒸着、接着、または単にデテクター表面に圧着でき、種々のシンチレーターとともに使用することができる。RadEye1センサーとともにごく一般に使用されるシンチレーターはLanex FineやMin-R MediumのようなGd₂O₂S (Gadox)スクリーンである。

RadEye製品ラインのEVシリーズは、デテクター表面に接着されてパッケージと統合される光ファイバー前面板(FOFP)を備えているという点で独自のものである。一般的な前面板は厚さ3mmで、直径6 ~ 10 μ mのファイバーからなっている。ファイバーサイズはピクセルサイズと比べて十分小さいので、ファイバーとピクセルの間の空間的アライメントは不要である。FOFPの機能は、蛍光スクリーンからの出力画像を最大カップリング効率(>50%の転送)と最小損失の空間分解能でセンサー内のフォトダイオードに結合することである。さらにFOFPは、シンチレーターを超えて入り込んでCMOSデテクター自体に吸収されることもあるエックス線光子の吸収装置としても機能する。フォトダイオードによって直接吸収されるエックス線光子は、シンチレーターに吸収されるものよりもシグナルがはるかに高くなる。このプロセスは画像内の追加ノイズとして表れ、より高い空間周波数でシグナル対ノイズ比がかなり低下するのでDQEが減少する。

我々は以前のアプリケーションノート(AN05: 高解像度CMOSイメージングデテクター)で標準RadEyeセンサー(FOFPなし)のDQEの結果をすでに提示した。以下の報告は、デテクターDQEを決定するのに使用される理論と測定技術を詳細に説明して、特に様々なエックス線エネルギーとシンチレータースクリーンでのRadEye EVセンサーの結果を提示するものである。これらの測定値が、同数以上のデテクター/スクリーンの組み合わせと測定条件を再現するのに十分な情報であることを望む。

DQE理論

検出量子効率は、出力シグナル対ノイズ比と入力シグナル対ノイズ比の比率の2乗と定義される:

$$DQE = \text{SNR}_{\text{out}2} / \text{SNR}_{\text{in}2}.$$

入力シグナルがエックス線光子(一般にポアソン統計に従う)からなる場合は、入力シグナル対ノイズ比はデテクターに入射するエックス線量子の数にのみ依存する:

$$\text{SNR}_{\text{in}2} = q.$$

出力シグナル対ノイズ比は、一般にデテクター出力でシグナルとノイズのパワースペクトルを観察することによって測定される。また、入力シグナルとデテクターゲインでシグナルを表すこともできる:

$$\text{SNR}_{\text{out}2} = S_{\text{out}2} / \text{NPS} = (q \cdot G)^2 / \text{NPS}.$$

上の式を結合すると以下が得られる

$$\text{DQE} = q \cdot G^2 / \text{NPS}.$$

デテクターゲインとノイズパワースペクトルは一般に空間周波数に応じて変化する。変調伝達関数(MTF)は、空間周波数の増加でゲインが相対的に減少するのを表すのに使用される。最終的にDQEは以下のように表される:

$$\text{DQE}(f) = q \cdot G^2 \cdot \text{MTF}(f)^2 / \text{NPS}(f).$$

上の方程式の4つのパラメーターのうち3つは、デテクターから十分な数の画像を取り込むことによって容易に測定される。4番目の入力シグナルはより難しく、通常は変換表と参照値の使用を必要とする。入射エックス線光子には異なったエネルギーがあるためにqとGを正確に決めることはさらに複雑になり、変換ゲインはせいぜい特定の入力スペクトルについてのデテクターの平均ゲインと推定される。

測定技術

デテクターDQEを決めるのに必要な基本的測定はかなり簡単であり、わずかの画像を取り込むだけですぐに最初の結果が得られる。けれども、結果に影響を及ぼす実験誤差を避けるために特別の注意を払うことは非常に重要である。このセクションは、DQEを計算するために測定する必要がある3つの性能評価基準である、変調伝達関数、ノイズパワースペクトル、デテクターゲインについて説明する。またその都度、測定結果に影響することがある潜在的な落とし穴についても説明する。

MTF

MTFの測定にはいくつかの手法を使用できる。筆者は、数学的に簡単で測定が容易であるためにエッジメソッドを好んでいる。けれども、オーバーサンプリングと平均化を利用する場合はコンピュータのアルゴリズムが少し複雑になる。

エッジMTF手法では、吸収の強い素材の薄片で作成された「ナイフエッジ」がデテクター上に直接置かれて、行か列の方向にわずかな角度(通常5-10°)だけ傾けられる。エッジは、(ピクセルサイズの何分の1かの単位で)できるだけまっすぐでなければならず、オフ軸測定でのシャドーイングとより高いエネルギーでのエッジ素材からの散乱が最小になるようにできるだけ薄くなければならない。我々の実験では厚さ0.5mmのタングステン片を使用した。正確な測定のためには、画像の隠蔽されていない部分とブロックされた部分のコントラストが1000:1以上であるのが望ましい。より低いコントラストを使用すると、エッジ反応の細部があいまいになり結果が不正確になることがある。

測定自体は、ソースkV、mA、積算時間を適切に組み合わせてオフセット補正とゲイン補正を適用したエッジの画像を取り込むだけで簡単である。画像内のショットノイズを減少させるために複数のフレームを平均化するのが役立つことがある。測定は、デテクターを横切る変動と水平および垂直方向の変動を決定するために、エッジをいくつか異なった位置に置いて繰り返さなければならない。

画像を取り込んだら、解析の第1ステップはエッジに垂直な行または列の方向に沿って微分することである。その方向に沿ったシグナル値のプロットによって、その特定の行または列の線広がりに関数(LSF)が明らかになる。これで画像内のエッジの正確な位置は、LSF最大の位置をたどって最小2乗法による計算で決定することができる。これは、次のステップ-オーバーサンプリング-でエッジの位置をサブピクセルの精度で知る必要があるので重要である。

オーバーサンプリングは、最大値の半分のレベルで数ピクセルの幅しかないこともあるLSFの真の形状を決定するのに必要である。エッジが列方向に沿って配列されていると仮定することにする。そして各行について、エッジはわずかに異なった位置でデテクターピクセルに交差している。結果として、その行で測定されたLSFは隣接している行からわずかに位相がシフトした「本当の」連続したLSFをサンプリングしている。多くの行にわたって異なった位相のシフトを考慮に入れることによって、連続したLSFをまとめあげることができる。実際には、各ピクセルを多くのサブピクセルに細分して、エッジが各行でどのサブピクセルと交差するかを決定するほうが簡単である。次に、各行からのデータを1つの特定のサブピクセルに合わせて、多くの行のサブピクセルを平均することによってオーバーサンプリングLSFが得られる。

エッジはある特定の位置でピクセルと交差すると仮定しているため、エッジと列の角度を最小限に保つことは重要である。角度が大きいとLSFがぶれる結果としてMTFが減少することになる。

測定の最終ステップは、デテクターのMTFを得るためにLSFのフーリエ変換を行うことである。オーバーサンプリングのために、デテクターのナイキスト限界を超えたところまでMTF情報が得られるが、それは破棄できる。結果のMTFは、サンプリングデテクター反応の効果(エイリアシングなど)を取り除いたものなので、デテクターの「事前サンプリングMTF」と呼ばれることもよくある。もちろん実際のコントラストは、オブジェクトとデテクターの間有位相シフトに強く依存するので、かなり弱いこともある。

NPS

ノイズパワースペクトルは、デテクターからのオフセット補正およびゲイン補正をした画像に2次元フーリエ変換を適用することによって得られる。けれども、固定パターン変動は得られたスペクトルに影響を及ぼしやすいので、画像から固定パターン変動を除去することは非常に重要である。これを行う簡単な方法は、デテクターから2枚の連続した画像を得て、それらを減算することである。これを行うと2枚の画像のノイズ変動が加わるので、結果として生じるNPSは2倍にしなければならない。

NPSデータは本来、ノイズが多いので、かなり滑らかな曲線を得るには数百のデータセットを平均化する必要がある。2次元NPSが左右対称である場合は、解析は1次元フーリエ変換を適用してほかの方向を平均化することによって行または列の方向のどちらかに制限されることがある。この方法によって1組の画像から使用可能なNPS曲線が得られる。NPSのゼロ周波数あるいはDC値は差分画像の平均した信号レベルに比例しているため注意が必要である。画像間にはわずかなDC変動が常にあるので、この値は破棄しなければならない。

X線流束とデテクターゲイン

デテクターDQEを計算するのに最も難しい要素は、デテクターに入射するエックス線量子流束を決定することである。エックス線源のエネルギースペクトルを特徴付けるのに使用できるエックス線分光計を利用する手段がない場合は、通常は一般的なエックス線管からのエックス線スペクトルの物理的モデルをよりどころにする必要がある。文献やオンラインでエックス線スペクトルに関する情報を見つけることができる。本研究では、UC Davis³⁻⁵でジョン・ブーンによって開発されたモデルに基づくジーマンズ・エックス線ツールボックス²を利用した。

エックス線源の出力スペクトルは、ソースとデテクターの間空気量やビームを強化するフィルターレイヤーなどのエックス線経路における吸収材料について調整する必要がある。次に、結果の量子流束の大きさは、実験でのデテクターの位置で行われた実測に対して較正する必要がある。これを行う一般的な方法は、簡単な電離箱デテクターを使用して露光を(レントゲンの単位で)測定することである。次に、測定が空気中で行われたことを考慮して、必要に応じてこれをグレーまたは空気カーマに変換することができる。

入射量子流束が得られたら、ピクセルあたりの入射エックス線光子の数を測定するために、エックス線スペクトルを積分してピクセル領域に合わせて調整することができる。デテクターゲインは、NPSを計算するのに使用された画像の平均信号レベルを光子の数で割ったものである。このゲインは実際、入射光子のエネルギーだけでなくピクセルごとにも変動するので注意しなければならない。けれども実用上は、平均したゲイン値を使用することができる。このゲイン値は、シンチレーターの検出効率(吸収された光子の数)、シンチレーター/デテクターの組み合わせの変換効率(光子あたりの集められた電子)、デテクターの変換ゲイン(ADU/電子)を結び付ける。出力シグナル(と変換ゲイン)は同じ画像から測定されるので、NPSと同じ単位になる。

実験結果

測定はすべて、シャドスナップ1024EVカメラを使用して行った。このカメラは1000行X1024列のCMOSデテクターのRadEye2 EVセンサーモジュールを備えている。センサーモジュールは様々なシンチレーターに合わせることができる。ここでは我々は標準のMin-R MediumシンチレーターとオプションのLanex Fineスクリーンを使用して測定を行った。カメラの電子回路は様々なゲイン設定をするために変更することができる。シャドスナップカメラのスタンダードモデルはセンサー出力とA/Dコンバータの間に5xの電子ゲインがある。我々は22xのゲインがある「ハイゲイン」型のカメラの電子回路もテストした。ハイゲインカメラの読み出しノイズは約150エレクトロンrms(デテクターピクセルに対して)で、標準のカメラの読み出しノイズは250エレクトロンrms(ADCの量子化ノイズの影響)である。

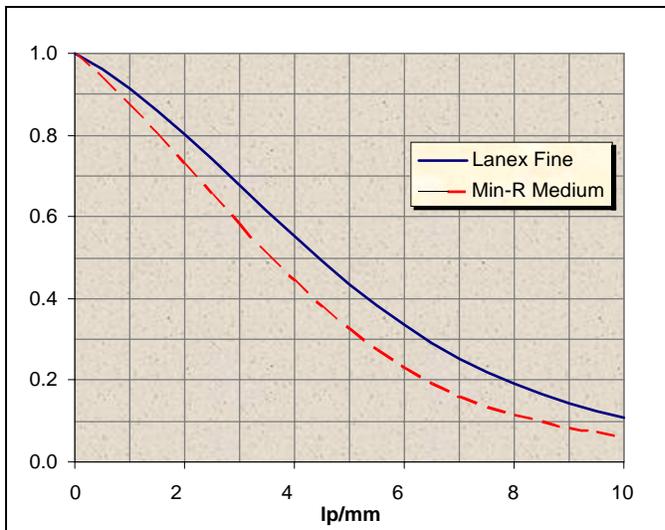


図1 - RadEye EV MTF.

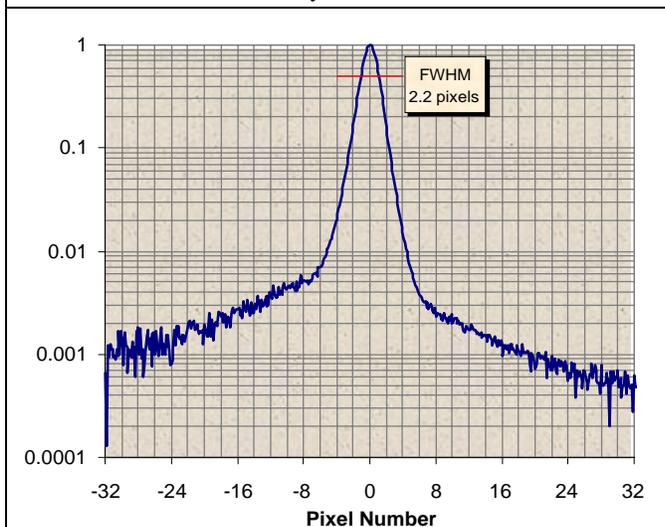


図2 - 典型的な線広がり関数(LSF).

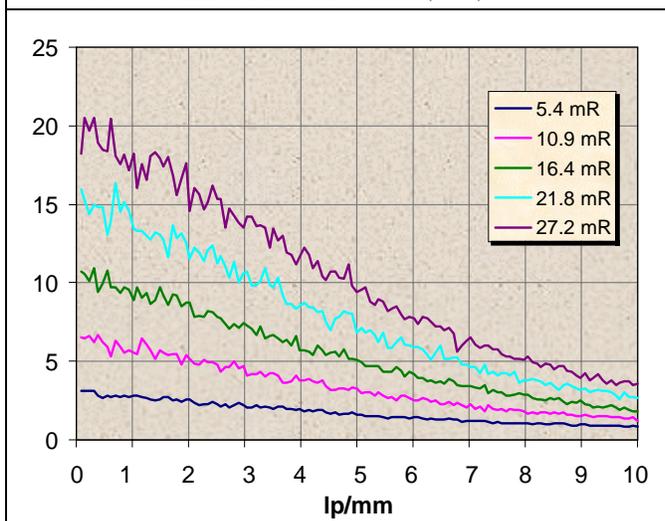


図3 - 典型的なノイズパワースペクトル(NPS).

測定はすべてタングステンターゲットと0.125mmベリリウム流出ウィンドウを備えたOxford XTC5010ソースを使用して行った。ビームを強化するためにソースの下に0.5mmアルミニウムフィルターを置いた。ソースとデテクターの上に350mmの空気経路を設けてさらにビームを強化した。180cc電離箱とRadCal 2026C線量計を使用して量子流束の較正を行った。

RadEye EVセンサーのMTFを、両方のタイプのシンチレーターについて図1に示す。測定されたMTFはデテクター面にわたって数パーセント変動することがあるので、表示された曲線はデテクター上の様々な位置での複数の測定値の平均を表す。列方向と行方向のMTFには有意差はない。図2は、Min-R Mediumを使用して得られたエッジ画像の1つについて典型的な線広がり関数を示す。エッジの「明るい」側(グラフの左側)のシグナルは画像内のエックス光線ショットノイズのために比較的ノイズが多い。

ノイズパワースペクトルは、前のセクションで説明した手順に従って様々な露光レベルとkV設定で測定した。図3はNPS曲線の典型的な組を示す。NPS曲線の一般的な形状はデテクターMTFの曲線に従う。図4は、512×512ピクセル画像セグメントについて得られた2次元NPSを示し、ノイズスペクトルの基本的な対称性を表す。ノイズは、行方向と列方向の両方に沿って本質的に非相関である。

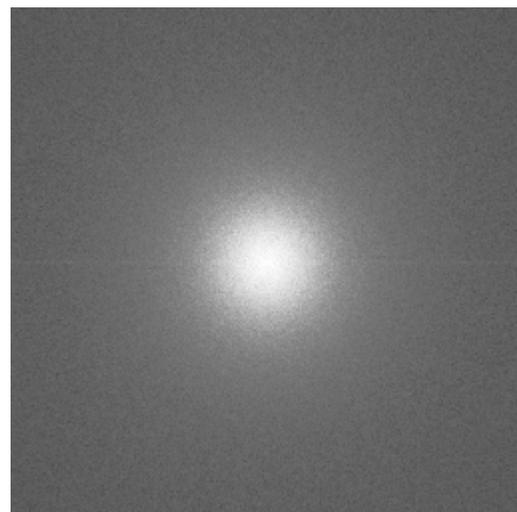


図4 - 2Dノイズパワースペクトル.

結果のDQE曲線を右に示す。図5は24～38kVp範囲のDQEのエネルギー依存性を示す。これらの測定値は、センサーがある程度の量子ノイズ (~40 mR)を確保するのに十分高い露光レベルでMin-R Mediumスクリーンを使用して得られた。デテクターは、シンチレーターがほとんどあらゆる光子を吸収する低エネルギーにおいて完全に近いDQEがあり、スクリーンの吸収効率はエックス線エネルギーの増加に比例する。

図6は、2つのシンチレータースクリーンを24kVpと30kVpのソース設定で比較したものである。いずれの場合も、データの視認性を改善するために複数の制限された光子ノイズ曲線を平均化した。グラフは、Lanex FineはMin-R MediumよりもMTFが高いが、薄いシンチレーターの吸収効率が低いために、6～10 lp/mmの範囲にわずかな利点があることは除いて、全体的にDQEが低くなることを示している。

最後に、実験のパラメーターを表1にまとめる。これらのデータを集めるのに5～50mRの露光を使用した。我々は、この範囲で露光に対するDQEの著しい変化を測定することができなかった。これはカメラノイズが測定に影響を及ぼしていないことを表す。さらに、カメラの読み出しノイズが影響を及ぼし始める非常に低い露光は除いて、標準の電子回路と比べてハイゲインのカメラ電子回路を使用しても著しい利点はないように思われる。

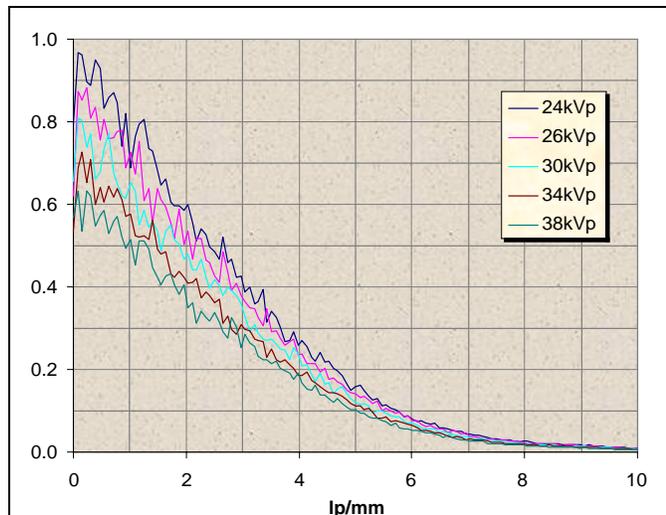


図5 - DQE対エックス線エネルギー。

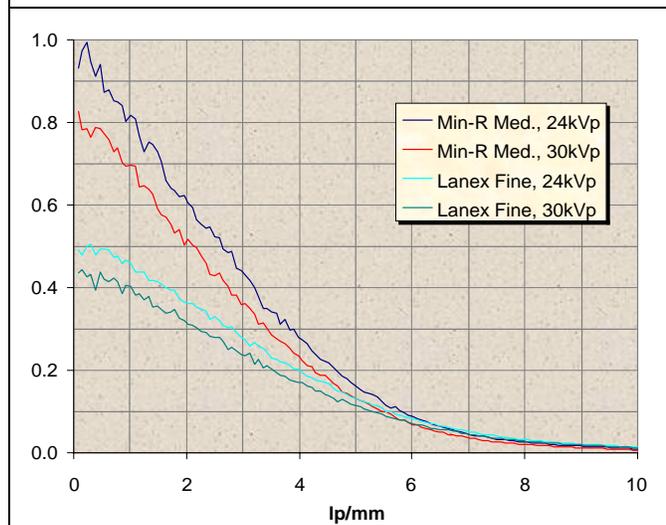


図6 - Min-R MediumとLanex FineのDOE.

エックス線エネルギー(kVp)	24	30	38	24	30	24
露光(mR)	44.6	39.0	32.7	29.8	32.6	29.8
光子数(N)	6537	7299	7902	4358	6121	4358
シンチレータータイプ	Min-R	Min-R	Min-R	Lanex	Lanex	Min-R
カメラ電子回路	standard	standard	standard	hi gain	hi gain	hi gain
平均シグナル(ADU)	264	303	307	328	519	715
rmsノイズ(ADU)	1.90	2.27	2.49	4.45	6.36	6.05
ゲイン(ADU/photon)	0.040	0.040	0.040	0.075	0.085	0.164

表1 - 実験パラメーター

結論

前のセクションで示した実験結果は、Lanex FineよりもMin-R Mediumなどのより厚いシンチレーターの使用が望ましいことを示している。この特定のデテクターのピクセルサイズにはLanex FineよりもMin-R Mediumスクリーンがよく適合するということが、これを理解する手がかりになる。Lanex Fineは、RadEye1デテクターのナイキスト限界をかなり超えて20 lp/mmまで良好なコントラストを提供するのに十分なほど薄い(~34 mg/cm²)。他方、Min-R Mediumは10lp/mmまでの使用に向けて設計されている。これはエックス線断面がほとんど2倍で(50-60mg/cm²)、低エックス線エネルギーで>90%のDQEを達成することができ、吸収効率が減少し始めるより高いエネルギーでLanex FineよりもDQEがかなり高い。MTFが低くても、改善された吸収効率が空間周波数のほとんど全範囲にわたって低下した解像度を補っている。

それほど明白でない結論であるが、FOFPを追加するとDQEでかなりの改善がもたらされる。けれども、フォトダイオードにおけるエックス線の直接吸収に起因するシグナル対ノイズ比の減少がDQEをかなり低下させるならば、この見解は意外ではない。FOFPを追加すると、ノイズパワーはナイキスト限界で10倍近く減少する。シンチレーターからの光出力が50%まで減衰して、MTFが最大5%減少するにもかかわらず、これは改善される。また、さらなる利点として、FOFPはCMOS回路のエックス線直接吸収の有害な副作用を減少させることによってセンサーの平均寿命を延ばす。

これらの結果は、使用されるエックス線管のタイプに多少関係するので注意が必要である。モリブデンターゲットを備えたエックス線発生器は、平均エネルギーがわずかに低いスペクトルを生成するので、Lanex Fineスクリーンに利点がある。けれども我々は、この違いがこれらの結果に影響するほど重要であるとは考えない。より柔らかいエックス線スペクトルがある非フィルタービームを使用する場合にも同じ注意が必要とされる。

我々の最終的な指摘として、これらの実験のほとんどについて、デテクターにはある程度の量子ノイズがある。この主な理由は、この条件を達成するのに数10個のエックス線光子しか要しないためである。けれども我々は、5~10 mRより下の露光レベルでDQEがわずかに減少することに気付いた。この現象を調査して、RadEye EVセンサーの低シグナルの制限を完全に特徴付けるにはさらなる実験が必要とされる。

参考文献

1. T. Graeve, G.P. Weckler, "High-resolution CMOS imaging detector", *Proc. SPIE* **4320**, 68-76, 2001.
2. <http://www.healthcare.siemens.com/med/rv/toolbox/default.asp>.
3. John M. Boone, Anthony Seibert, "An accurate method for computer-generating tungsten anode X-ray spectra from 30 to 140 kV", *Medical Physics* **24**(11), 1661-1670, 1997.
4. John M. Boone, Thomas R. Fewell, Robert J. Jennings, "Molybdenum, rhodium, and tungsten anode spectral models using interpolating polynomials with application to mammography", *Medical Physics* **24**(12), 1863-1874, 1997.
5. John M. Boone, "Spectral modeling and compilation of quantum fluence in radiography and mammography", *Proc. SPIE* **3336**, 592-601, 1998.