

アバランシェ・フォトダイオードによる原子核励起現象の観測

岸本 俊二 (物構研)

放射光利用研究ではサブナノ秒時間分解能を持つ X 線時間検出器として各種のアバランシェ・フォトダイオード (APD) 検出器の開発が行なわれてきた。特に放射光 X 線による原子核共鳴散乱現象への応用は開発当初から進められている。本講演では APD の X 線検出器としての特徴と核共鳴散乱実験を中心とする開発の経緯、現在進められている内殻電離に伴う原子核励起現象の研究への応用の紹介と今後の時間分光実験での APD の可能性について述べる。

(1) アバランシェ・フォトダイオード (APD) X 線検出器

X 線検出器として実用的な APD 素子としてはシリコン製のものしかない。APD に X 線を直接入射することによって最もよい時間応答特性を与えることができる。図 1 に APD (リーチスルー型) の構造を示す。他の構造 (beveled edge 型) のものもあるが、時間応答はこちらのほうがよい。X 線が電荷キャリア (電子 - 電子空孔対) に変換される空乏層の厚みは数 μm から $200 \mu\text{m}$ 程度である。検出効率を考えると厚いほうが有利だが、空乏層が厚いほど電荷キャリアの発生する位置が広がり時間ジッターが増すことになる。その大きさは信号形成に関わる電荷キャリア (シリコン APD の場合、電子) の移動速度に比例する。十分な逆バイアス電圧が印加されている場合、 10^7cm/s に達する。その場合、 $100 \mu\text{m}$ 移動するのに 1ns かかる。X 線検出の際の時間分解能 (FWHM) はほぼこの関係で計算される値となる。

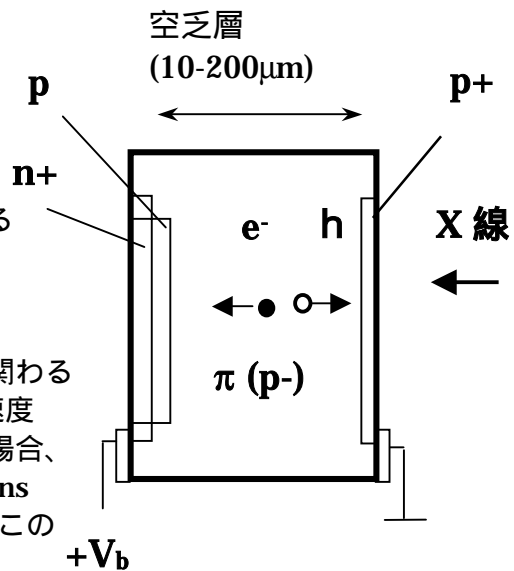


図 1 APD (リーチスルー型) の構造

APD 検出器は内部増幅 (電子衝突による電離) により素子自体が増幅機能をもつことが大きな特徴である。これによりただのフォトダイオードでは X 線 (10keV 以下) 1 光子による高速パルスがえられなかったのが APD 素子を使うことによって初めて可能になった。ただし内部増幅度は数 10 倍から 100 倍程度のため、十分な波高を持つパルスを得るには通常、高周波アンプと組み合わせて使う。このときに得られる出力パルス幅は APD 素子およびアンプをつなぐケーブルなどによって与えられる電気容量、そして抵抗値 (インピーダンス、 50Ω) によって決まる。受光部の面積が小さく空乏層の厚い APD 素子ほど電気容量が小さくなり時間幅が狭くなる。たとえば 1mm 径、 $10 \mu\text{m}$ 厚の素子では 15pF で APD 素子以外の電気容量が無視できるとき、CR 時定数は約 0.8ns である。

(2) 核共鳴散乱実験への応用

APD 検出器の持つサブナノ秒時間分解能とノイズの少なさ (3mm 径、 $150 \mu\text{m}$ 素子で 100 秒に 1 個程度) 高計数率 (10^8cps) まで計数できるダイナミックレンジの大きさ (10 桁) を利用すると、電子散乱による強烈的な即発放射線の中から共鳴励起した原子核から寿命に従って遅れて放出される核共鳴放射線を選択的に検出することができる。APD 検出器の核共鳴散乱実験への応用は開発当初から考えられ、これまでいくつかの APD 素子が使用されてきた [1-3]。立体角を

必要とする非弾性散乱実験では1素子で大きな受光面積をもつものが好まれてきた。均一な特性を得るにはAPD素子の大きさは数mmという限界があるため、最近では素子をいくつか並べたアレイタイプも使われるようになってきている[4,5]。

(3) 軌道電子遷移による原子核励起現象 (NEET)

最近、我々が行っている研究としてNEETがある。ある原子の内殻電子が電離される時、外殻の電子が軌道に移り空孔を埋める。その際に、蛍光X線やオージェ電子が放出されるのが普通だが、ある条件が満たされるとわずかな確率ながら原子核も励起される。これがNEETである。NEETの条件は、外殻電子が内殻電子の空孔を埋める軌道電子遷移のエネルギーと原子核励起のためのエネルギーとの差 (E) が小さいこと、電子遷移と原子核の遷移において同じ多重極度を持つ電磁放射遷移が存在する (光子を介して角運動量とパリティが保存される) ことである。我々が実験を行った金-197の場合ではK - M₁レベル間の軌道電子遷移(1S_{1/2} : 80.725keV 3S_{1/2} : 3.425keV、E_A=77.30keV)と原子核が基底状態 (3/2+) から第1励起準位 (1/2+) へと遷移するエネルギー(E_N=77.351keV)との差 E が51eVと小さい。M₁ (磁気双極子)放射が共通の電磁放射遷移としてある。金-197はNEETが起きうると考えられていたが原子核励起準位の半減期は1.9nsと短い、普通のガンマ線検出器を使う方法では励起後の放射線強度がすぐに減衰してしまうので核励起現象の検出は困難であった。内殻電離によって蛍光X線やオージェ電子が発生し強烈なバックグラウンドとなる。その中でわずかな確率で生ずる原子核励起をいかにして検出するか、電離させるために照射する電子や光子によるNEET以外の原子核励起 (クーロン核励起や核共鳴) とNEETとをどうやって区別するかが問題であった。電離に対する原子核励起の大きさも正確に見積もる必要がある。我々はAPDを電子検出器として使うこと ("アバランシェ・ダイオード電子検出器") でこれらの問題を解決した[6]。

(4) 今後の研究

- 短寿命 (サブナノ秒) 核種の励起現象。
- 検出器出力パルス幅を短くする
(小さなCR時定数の検出器開発)。
- サブナノ秒幅パルス処理できる回路系の開発など。

参考文献

- [1] S.Kishimoto, Rev. Sci. Instrum. **63** (1992) 824-827.
- [2] A.Q.R.Baron and S.L.Ruby, Nucl. Instr. and Meth. **A343** (1994) 517-526.
- [3] A.Q.R.Baron, Nucl. Instr. and Meth. **A352** (1995) 665-667.
- [4] S.Kishimoto, *Proceedings of the International Workshop on High Flux X-ray Detectors*, (1998) p.259-270.
- [5] A.Q.Baron, SPring-8 Research Frontiers 2000/2001, p.96-98.
- [6] S.Kishimoto et al., Phys. Rev. Lett. **85** (2000) 1831-1834.