

الباب السادس

الأجهزة الإلكترونية الملحقة بالكشافات الإشعاعية

Electronic Instrumentation for Radiation Detectors

1- تقديم.

2- أنبوب التضاعف الفوتوني.

3- المعالجة الإلكترونية للنبضة.

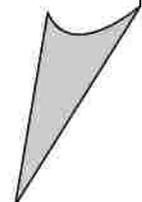
4- القدرة التحليلية.

5- التمييز (التحليل).

6- المحول التمثيلي - الرقمي ADC.

7- أبواب أشعة المهبط.

* * *



1- تقديم

يتناول المريض جرعة من مادة مشعة للأغراض التشخيصية (أو العلاجية). تُمتص هذه المادة المشعة بواسطة العضو الهدف داخل الجسم وتنتشر فيه. تنطلق فوتونات جاما من هذه المادة المشعة الموزعة داخل العضو ولقدرتها على اختراق أنسجة الجسم يمكن رصدها من الخارج بواسطة كشاف نووي مناسب. داخل الكشاف، تتحول طاقة فوتون جاما إلى نبضة ضوئية، وتلك بدورها تتحول إلى إشارة (نبضة) كهربية داخل أحد الأجهزة المعاونة، أنبوب التضاعف الفوتوني (PM) tube. النبضة في صورتها الأولية هذه غالباً ما تكون صغيرة ومشوهة، ومن ثم غير مفيدة في حالتها الخام تلك، وعلى هذا يجب معالجتها إلكترونياً، ويتم ذلك من خلال عمليات ثلاث:-

أ- التكبير amplification: فغالباً ما تكون الإشارة الكهربية التي تم الحصول عليها ضعيفة، ومن ثم يلزم تكبيرها حتى يمكن قياسها، ويتم ذلك من خلال المكبر المتقدم preamplifier والمكبر amplifier.

ب- التصنيف والتمييز selection: بقياس سعة (ارتفاع) هذه النبضة يمكن تحديد طاقة الفوتون الممتص ومن خلال المعالجة الإلكترونية بتخير مدى محدد من الطاقة narrow energy range يمكن التمييز بين النبضات التي تأتي نتيجة حدث نووي حقيقي، وتلك التي قد تأتي من مصادر أخرى كالتشتت، مثلاً. تتم عملية الاختيار هذه من خلال مميزات النبضة pulse height analyzer.

ج- العد counting: حيث يتم حصر النبضات من الارتفاعات المختلفة خلال فترة زمنية ومن ثم يمكن حساب معدل العد count rate.

1-1 عرض النتائج

هناك عدة طرق لعرض النتائج:

العداد scalar: وسيلة لتجميع عدد من النبضات باستخدام بعض الدوائر الإلكترونية العددية digital electronics، وباستخدام دائرة زمنية timer يُسجل عدد النبضات في فترة زمنية محددة؛ ومن ثم يحسب معدل العد (عدد النبضات في وحدة الزمن).

الطباعة السريعة fast printout: آلات الطباعة السريعة التي صاحبت التطور الهائل لتقنيات الحاسوب تقدم وسيلة فعالة ودقيقة لعرض النتائج بصورة بيانات مكتوبة. كما أن هناك وسائل سهلة للحصول على تلك البيانات على صورة منحنيات باستخدام بعض البرمجيات.

شاشات العرض Monitors: والتي تطورت كثيرا فأمكن الحصول على صور ذات جودة وقدرة تحليلية عالية في ظل تقنيات التصوير الرقمي. في النهاية، تؤدي بنا الخطوات السابق إلى إمكانية إجراء عمليات المسح والتصوير النووي.

المسح والتصوير scanning and Imaging: تلك هي الوسيلة الأهم حيث يتم إجراء مسح لتوزيع المادة المشعة الممتصة التي يمتصها العضو البشري والتي تتمركز في منطقة ما داخل جسم المريض (المخ brain، الغدة الدرقية thyroid، الرئتان lungs، الكبد liver، الطحال spleen، الكليتان kidneys،.....)، ويتم ذلك بطرق سيتم تناولها تفصيلاً ولأهميتها فلسوف تشغل حيزاً كبيراً في هذا الكتاب.

بعد أن استعرضنا بصفة عامة للمكونات الأساسية لوحدة قياس الإشعاع (المسح والتصوير النووي) وتناولنا تفصيلاً الكشافات النووية في الباب السابق نعالج هنا أهم هذه المكونات تفصيلاً:

2- أنبوب التضاعف الفوتوني

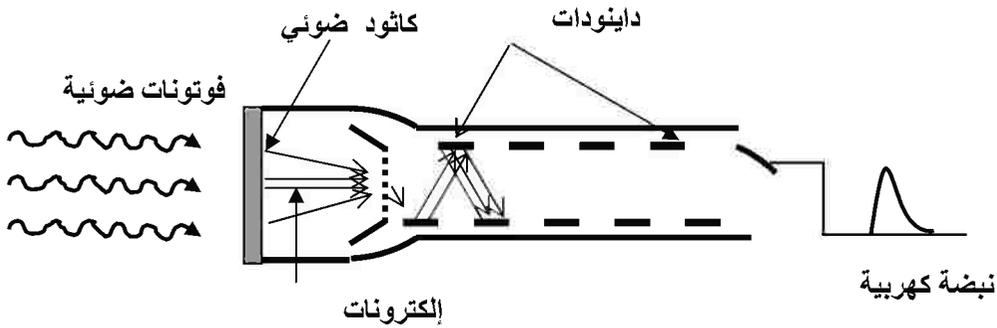
Photomultiplier Tube (PMT)

عند سقوط الأشعة المؤينة على المادة الومضية، بلورة أيوريد الصوديوم المطعمة بالثاليوم NaI(Ti) تستثار ذرات المواد النشطة هذه وعند اقتناصها بواسطة مراكز النشاط تنبعث نبضة (فوتونات) من الضوء ذات أطوال موجية في المدى $3300 - 5000 \text{ \AA}$.

الخطوة التالية لتفاعل الأشعة المؤينة مع البلورة في عملية الكشف هي تحويل الفوتونات المنبعثة من البلورة إلى نبضة كهربية (إلكترونات). يتم ذلك من خلال أنبوب التضاعف الفوتوني PMT والموضحة أجزاءه الرئيسية في شكل (1-6).

يتكون أنبوب التضاعف الفوتوني من عدة عناصر رئيسة، الكاثود الضوئي photocathode - مجموعة من الأقطاب (الألواح) تُسمى دينودات dynodes - القطب المجمع (الأنود). هذه الأجزاء جميعها موضوعة داخل غلاف زجاجي مفرغ من الهواء تفريغاً جيداً.

الكاثود الضوئي عبارة عن مادة فوتوضوئية شبه منفذة semitransparent كسبيكة السيزيم والانتيموني cesium - antimony alloy تغطي السطح الداخلي لطرف الأنبوب الملاصق للبلورة الومضية. عند سقوط الفوتونات الضوئية الصادرة من البلورة على هذا السطح تتحرر وتنطلق منه إلكترونات فوتونية photoelectrons، ذلك بفعل التأثير الكهروضوئي. تُعجل الإلكترونات الفوتونية المنطلقة من الكاثود نحو اللوح



شكل (6-1). الأجزاء الرئيسية لأنبوب التضاعف الفوتوني

(الدينود) الأول، وذلك لوجود فرق للجهد بينه وبين الكاثود ومن ثم تكتسب طاقة حركة عالية. وبسقوط هذه الإلكترونات السريعة على سطح اللوح الأول يتحرر المزيد من الإلكترونات الفوتونية حيث يتسبب كل فوتون سريع قادم من الكاثود في تحرير بضعة من الإلكترونات، ثم تنطلق جل هذه الإلكترونات مجتمعة نحو اللوح (الدينود) الثاني لوجود فرق للجهد بينه وبين اللوح الأول حيث يتزايد الجهد على هذه الألواح في خطوات على التتابع، ويتم ذلك باستخدام مصدر للجهد العالي وموزع للجهد. يتم نفس الشيء بالنسبة للوح الثالث، وهكذا تتضاعف الإلكترونات الفوتونية في كل مرحلة بين لوحين وصولاً للوح الأخير (الأنود)، الدينود رقم 10 في الشكل (6-1) حيث تتجمع لتكون مصدراً للنبضة الكهربائية.

خلال تلك الرحلة يتضاعف عدد الإلكترونات تضاعفًا هائلًا فإذا كان كل إلكترون يسقط على دينود يؤدي إلى انبعاث n من الإلكترونات الثانوية، فإنه خلال المراحل التسع (ما بين الدينود رقم 1 والدينود رقم 10) تكون قيمة التضاعف n^9 multiplication، فإذا فرضنا أن $n=4$ ؛ فهذا يعطينا تضاعفا قدره حوالي 2.6×10^5 . ومن ثم يعمل أنبوب التضاعف الفوتوني كمكبر للتيار ذي محصول $gain$ عال، ويكون خرج $output$ الأنبوب عبارة عن نبضة كهربية تعتمد قيمتها أصلا على طاقة الإشعاعات النووية الساقطة على البلورة الوميضية وعلى معامل التضاعف الفوتوني للأنبوب الذي يعتمد بدوره على معامل الانبعاث الثانوي لكل دينود، وهذا يتوقف على فروق الجهد. وبصفة عامة يمكن الحصول على محصول إلكتروني $electron\ gain$ لكل دينود قيمته 4 وتضاعف شامل لكل الأنبوب $overall\ gain$ في حدود 10^6 وتلك ميزة خاصة بالعدادات الوميضية، وذلك بدوره يسهل عملية تكبير التيار. وباستخدام جهد تشغيل للأنبوب في حدود 2000 فولت يمكن الحصول على نبضة قيمتها بضع فولتات. تلخص القائمة (1-6) خواص خرج مجموعة من الكشافات من حيث قيمة الفولتية $output\ voltage$ ودورتها الزمنية $pulse\ duration$.

ثمة تحذيرات يجب الالتفات إليها:

- بعض الإلكترونات الفوتونية يمكن أن تنطلق من الكاثود الضوئي أو من الدينودات بصورة تلقائية، وذلك نتيجة بعض التأثيرات الخارجية مثل: وجود مصادر ضوئية محيطية بالأنبوب، أو نتيجة تأثير الأشعة الكونية $cosmic\ rays$. تلك الإلكترونات تؤدي إلى ظهور نبضات تشويه إلكترونية $noise\ pulse$. هذه النبضات تكون أصغر من النبضة الحقيقية الصادرة من المادة المشعة القابعة في جسم المريض. لقد أمكن التخلص من كثير من مصادر الإزعاج هذه باستخدام أجيال أحدث من أنابيب التضاعف الفوتوني، مثل: $Bialkalide\ Tubes$ ، حيث يُعطى سطح الكاثود الضوئي فيها بمادة أكثر حساسية للأطوال الموجية للفوتونات المنبعثة من بلورة $NaI(Tl)$ ، ومن ثم أمكن تحسين نسبة النبضة إلى التشوه (نبضة / تشوه) $signal\ to\ (S/N)\ noise\ ratio$.

القائمة (1-6): الملامح العامة لبعض الكشافات الإشعاعية من حيث قيمة فولتية النبضة والزمن الذي تستغرقه (دورتها الزمنية)

الدورة الزمنية للنبضة (ميكروثانية)	فولتية النبضة (فولت)	الكشاف
0.25	0.5 – 2 V	وميضي Nal(Tl) مع أنبوب تضاعف فوتوني
0.01	0.05 – 0.2 V	وميضي سائل مع أنبوب تضاعف فوتوني
0.001	0.05 – 0.2 V	وميضي بلاستيك مع أنبوب تضاعف فوتوني
0.1 - 1	0.001 V	أشباه موصلات
0.1 - 1	0.001 – 0.01 V	تناسبي
50 - 300	0.5 - 10 V	جيجر

المصدر: J. A. Sorenson and M. E. Phelps, Physics in Nuclear Medicine, Grune & Stratton, NY, 1980.

- يجب أن يكون مصدر الجهد العالي لأنبوب التضاعف الفوتوني عالي الجودة high quality؛ ذلك لأن أي اضطرابات ripples في خرج هذا المصدر تكون مصدرا لتشوهات الإلكترونيات، وتلك تؤثر على النسبة: (نبضة / تشوه) ومن ثم على جودة الصورة.

- يجب حماية الأنبوب من تأثيرات المجالات الكهربائية والمغناطيسية الخارجية التي قد تسبب انحرافاً للإلكترونات أثناء رحلتها من الكاثود حتى الأنود.

ملاحظة أخيرة، وهي أنه لا يستخدم أنبوب مفرد مع البلورة الوميضية في أجهزة التصوير (كاميرات) النووي، ولكن تُستخدم منظومة من الأنابيب PMT array، ذلك لتغطية كل مجال الرصد (الرؤية) ونرجى الخوض في تفاصيل أكثر لحين الحديث عن أجهزة التصوير النووي.

3- المعالجة الإلكترونية للنبضة

pulse Processing

يتم ذلك على مراحل ثلاث، التكبير amplification والتمييز discrimination والعمليات الحسابية computation، نتناول هنا التكبير والتمييز، أما العمليات الحسابية فسوف يأتي الحديث عنها في ثنايا موضوعات أخرى في مواقع مختلفة، لن نتناول هنا التفاصيل الإلكترونية لدوائر التكبير فيمكن الرجوع في ذلك إلى كتب مبادئ الإلكترونيات، لكننا قبل الولوج في موضوع التكبير نلمس وبإيجاز بعض المفاهيم التي تؤسس له، كما نتناول بالدراسة بعض الدوائر والمفاهيم الإلكترونية ذات العلاقة بعملية تشكيل النبضة .pulse shaping

1-2 الثابت الزمني Time Constant

اعتبر الدائرة الكهربية البسيطة في شكل (6-2) والتي تمثل تفريغ شحنة مكثف سعته C خلال مقاومة R. شدة التيار المار في الدائرة I هو المعدل الزمني لتغير الشحنة، أي تفاضل الشحنة Q بالنسبة للزمن t،

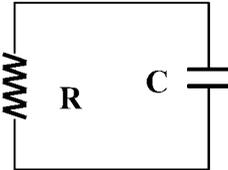
$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (6-1)$$

بالتعويض من العلاقة بين سعة المكثف C وشحنته Q وفرق الجهد على لوحيه V (في الواقع تعريف سعة المكثف) في العلاقة (6-1) نحصل على:

$$I = \frac{d}{dt}(CV) = C \frac{dV}{dt} \quad (6-2)$$

بتطبيق قانون كيرتشوف على الدائرة في الشكل (6-2) نحصل على:

$$C \frac{dV}{dt} = I = -\frac{V}{R} \quad (6-3)$$



شكل (6-2). دائرة مكثف ومقاومة لتعريف الثابت الزمني

وهذه معادلة تفاضلية عادية من الرتبة الأولى.

بفصل المتغيرات:

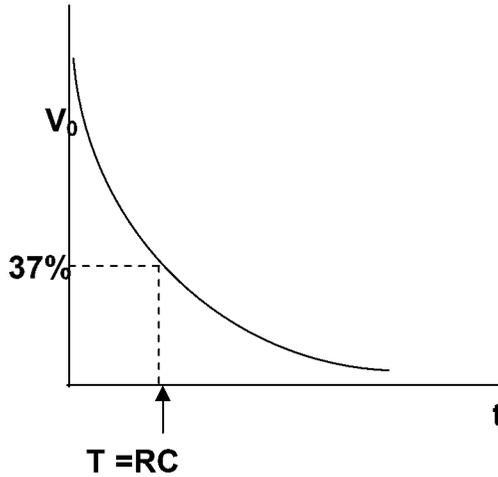
$$\frac{dV}{V} = -\frac{dt}{RC}$$

وبالتكامل، نحصل على:

$$V = V_0 e^{-t/RC} \quad (6-4)$$

حيث V_0 هي فرق الجهد عند $t = 0$. يُسمى حاصل الضرب RC بالثابت الزمني time constant، فإذا كانت R بالأوم و C بالفاراد كان حاصل الضرب RC بالثانية.

المعادلة (6-4) تقرر أن تفريغ شحنة المكثف خلال المقاومة يُمثل بدالة اضمحلال أسية (الشكل (6-3)) حيث يضمحل فرق الجهد (الخروج) إلى 37% من قيمته عند $t = 0$ خلال فترة زمنية t تساوي الثابت الزمن $t = RC$.



الشكل (6-3) تفريغ شحنة مكثف خلال مقاومة

لنعتبر الآن الدائرة الكهربائية المعطاة في شكل (6-4). بفرض توصيل المصدر (البطارية)، أي غلق الدائرة، عند الزمن $t = 0$ ، تكون معادلة الدائرة إذن:

$$I = C \frac{dV}{dt} = \frac{V_s - V}{R} \quad (6-5)$$

حيث V_s جهد المصدر V جهد الخرج. بحل المعادلة التفاضلية (6-5) نحصل على:

$$V = V_s + Ae^{-t/RC} \quad (6-6)$$

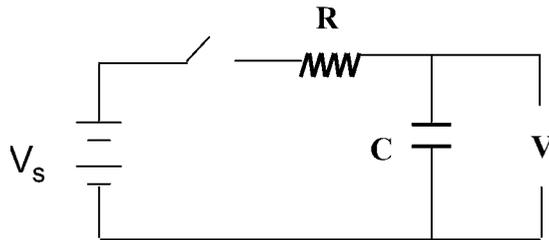
ويمكن تعيين الثابت A في المعادلة السابقة باستخدام الشرط الأول:

$$V = 0 \text{ عند } t = 0$$

$$0 = V_s + A, \quad A = -V_s$$

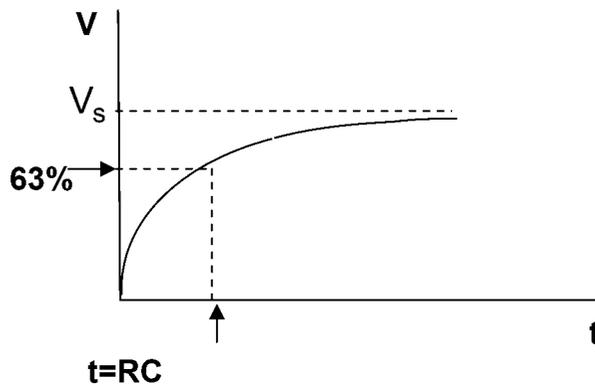
وعلى هذا تصير المعادلة (6-6) إلى:

$$V = V_s(1 - e^{-t/RC}) \quad (6-7)$$



الشكل (6-4) شحن مكثف وتفريره

تقرر المعادلة السابقة أنه بعد فترة طويلة نسبياً، $t \gg RC$ ، تنمو V حتى تصل إلى V_s (الشكل (6-5)). عند فتح الدائرة (الشكل (6-4)) فإن الشحنة (ومن ثم التيار وفرق الجهد) تضمحل خلال المقاومة R أسياً، $e^{-t/RC}$ (أي يُفْرغ المكثف - المعادلة (6-4)).

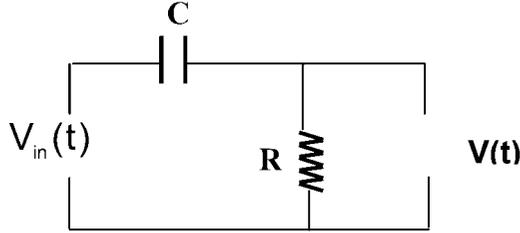


شكل (6-5) نمو فرق جهد الخرج للدائرة المثلة في شكل (6-4)

2-2 دائرة المفاضل The Differentiator

اعتبر الدائرة الكهربائية في الشكل (6-6) والتي تمثل دائرة مفاضل. فرق الجهد على لוחي المكثف هو $V_{in} - V$ ، حيث V_{in} هو الجهد المدخل (input voltage) (فرق الجهد الداخلة للدائرة) وأن V هو الجهد الخارج output voltage لهذه الدائرة. إذن:

$$I = C \frac{d}{dt} (V_{in} - V) = \frac{V}{R} \quad (6-8)$$



شكل (6-6) دائرة مفاضل

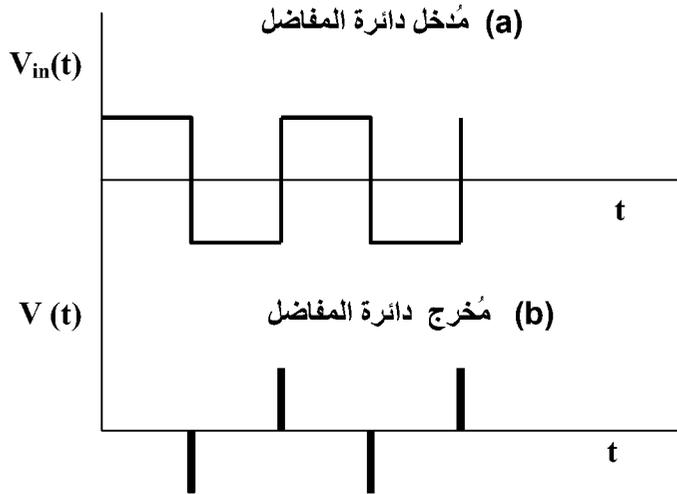
لو أختيرت قيم كل من C و R لتجعل حاصل الضرب RC من الصغرى بحيث يتحقق $\frac{dV}{dt} \ll \frac{dV_{in}}{dt}$ لصارت المعادلة (6-8) إلى:

$$C \frac{dV_{in}}{dt} \approx \frac{V}{R}$$

أي:

$$V(t) = RC \frac{dV_{in}}{dt} \quad (6-9)$$

أي أننا حصلنا على خرج للدائرة $V(t)$ كمية تتناسب مع معدل (تفاضل) الجهد المدخل، أي يتناسب مع $\frac{dV_{in}}{dt}$ ، ومن هنا جاء المسمى «المفاضل differentiator».

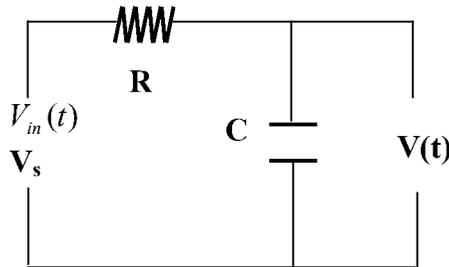


الشكل (6-7) تفاضل موجة مربعة

الشكل (6-7) يوضح مثالا لعمل دائرة المفاضل، مُدخل الدائرة (الشكل a) هو نبضة مربعة square – wave pulse وخرجها نبضة حادة (مثلة بخطوط رأسية- الشكل b). علينا أن نتذكر أن تفاضل الثابت (الجزء الأفقي من الموجة المربع حيث الميل يساوي الصفر) يساوي الصفر وأن التفاضل عند نقطة القفز jump في الموجة المربعة يبلغ أقصاه.

3-2 دائرة المكامل The Integrator

اعتبر الدائرة الكهربائية في الشكل (6-8) والتي تمثل دائرة مكامل. فرق الجهد على المقاومة هو $V_{in} - V$ ، حيث V_{in} هو الجهد المُدخل input voltage وأن V هو جهد الخرج output voltage لهذه الدائرة. وعلى هذا يكون



الشكل (6-8) دائرة مكامل

$$I = C \frac{dV}{dt} = (V_{in} - V)/R \quad (6-10)$$

باختيار قيم كل من C و R ليكون حاصل الضرب RC من الكبر بحيث تجعل $V \ll V_{in}$ لصارت المعادلة (6-10) إلى:

$$C \frac{dV}{dt} \approx \frac{V_{in}}{R}$$

وبفصل المتغيرات والتكامل، نحصل على:

$$V(t) = \frac{1}{RC} \int V_{in}(t) dt \quad (6-11)$$

أي أننا حصلنا على خرج للدائرة $V(t)$ ككمية تتناسب مع تكامل المُدخل، أي يتناسب مع $\int V_{in}(t) dt$ ، ومن هنا جاء المسمى «المكامل Integartor». وهو يقوم بعكس وظيفة المفاضل (تماماً كما أن عملية التكامل هي عكس عملية التفاضل). لاحظ أن الفرق بين دائرة المكامل (الشكل (6-8)) ودائرة المفاضل (الشكل (6-6)) هو تبادل موقعي كل من المكثف والمقاومة.

بعد تناولنا لبعض مبادئ الإلكترونيات ذات الصلة أصبح في إمكاننا تناول موضوع التكبير وتشكيل النبضة.

4-2 التكبير Amplification

ويتم على مرحلتين، إحداهما باستخدام مكبر متقدم (□) preamplifier والأخرى باستخدام مكبر أساسي amplifier.

المكبر المتقدم:

بالرغم من أن أنبوب التضاعف الفوتوني يقوم بمضاعفة هائلة لأعداد الإلكترونات المنبعثة من المهبط (مضاعفة التيار داخل الأنبوب يصل إلى ملايين المرات) فإن خرج الأنبوب يظل ضعيفاً (في حدود الميكروأمبيرات microamperes). فضلاً عن ذلك، تكون ممانعة impedance الكشاف كبيرة نسبياً، وعليه يؤدي الربط المباشر بين أنبوب التضاعف وباقي

(1) المكبرات amplifiers هي دوائر إلكترونية عنصراها الأساسي ترانزستور تستخدم لتكبير إشارة كهربية electric signal.

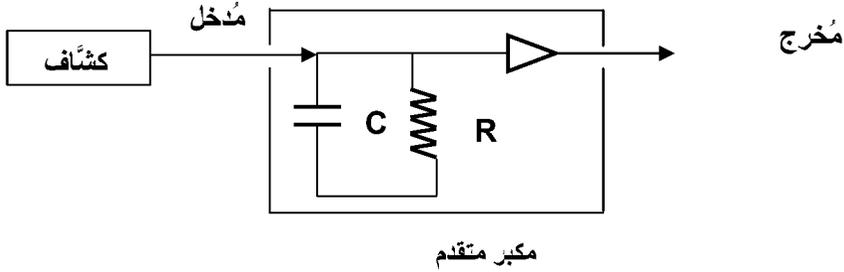
الأجهزة الإلكترونية من خلال أسلاك التوصيل واختلاف الممانعة بين هذه المركبات المختلفة للملحقات الكشاف إلى اضمحلال النبضة وضياع معالمها فيكون دور المكبر المتقدم هو إذن:

- تكبير النبضة.

- موائمة ممانعة \square impedance matching أنبوب التضاعف الفوتوني بممانعة المكبر الذي يليه؛ فيحد ذلك من اضمحلال النبضة ومن ضياع معالمها، وبالتالي يقوم المكبر المتقدم بتجهيز النبضة لرحلتها إلى باقي الأجهزة التي تليه.

يوضح الشكل (6-9) دائرة كهربية لمكبر متقدم. الرمز \blacktriangleright يشير إلى عنصر التكبير (ترانزاستر) في الدائرة أما المكثف والمقاومة فدورهما هو تشكيل النبضة pulse shaping .

النبضة التي تخرج من الكشاف (في الواقع من أنبوب التضاعف الفوتوني الذي يلي الكشاف) تكون حادة الصعود (أقل من $1 \mu \text{ sec}$ ، ما عدا في حالة عداد GM).



الشكل (6-9) الدائرة الكهربية لمكبر متقدم

(1) يصاحب مرور التيار الكهربي في أي دائرة كهربية تولد مجال مغناطيسي في المنطقة التي تحيط بالتيار، وإذا حدث تغير في شدة التيار لأي سبب صاحبه تغير في المجال المغناطيسي نتج عنه تولد قوة دافعة كهربية تتناسب مع معدل تغير التيار di/dt ، وتكون هذه القوة الدافعة معاكسة للتغير في التيار الذي تسبب في وجودها، وثابت التناسب يُسمى معامل الحث الذاتي self inductance ويُرمز له بالرمز L وهو ثابت هندسي، بمعنى أنه يعتمد على شكل وحجم عنصر الدائرة الذي يتغير خلاله التيار. وعلى سبيل المثال، في حالة الدائرة التي تتكون من ملف حثه L ومقاومة قيمتها R يكون فرق الجهد على طرفيه $V = RI + L(di/dt)$ وحل هذه المعادلة التفاضلية يؤدي إلى صيغة عامة لقانون أوم، $V = (R + j\omega L)I$ حيث $j = \sqrt{-1}$ و ω هي التردد الزاوي ($\omega = 2\pi f$) و f هي التردد. الكمية $(R + j\omega L)$ التي تظهر في معادلة الجهد تُسمى الممانعة المركبة complex impedance وتساوي المقاومة فقط في حالة التيار المستمر. ويمكن بالطبع، بطريقة مماثلة، التوصل لتعبير للممانعة في حالة مركبات إلكترونية أخرى كمكثف ومقاومة مثلاً.

بمرور التيار الخارج من الكشاف في دائرة المكبر المتقدم يُشحن المكثف بشحنة Q ليتولد فرق جهد عبر لوحيه $V_0 = Q/C$. فرق الجهد هذا هو بمثابة خرج output للمكبر المتقدم هو دخل للمكبر.

يتناسب التيار المتولد مع طاقة الإشعاعات الساقطة ومن ثم الشحنة و فرق الجهد أيضا. تسرب شحنة المكثف Q عبر المقاومة R فيضمحل فرق الجهد على المكثف، ومن ثم المدخل إلى المكبر أسياً :

$$V = V_0 e^{-t/RC}$$

طبقاً لخواص الدالة الأسية ينخفض الجهد إلى 63% من قيمته الابتدائية V_0 خلال فترة زمنية τ تساوي الثابت الزمني، $\tau=RC$. القيمة النمطية للثابت الزمني لمكبر متقدم يُستخدم في أجهزة الطب النووي تقع في المدى $20 - 200 \mu \text{ sec}$.

مقدار التكبير الذي يوفره المكبر المتقدم يختلف باختلاف الكشاف، ففي حالة الكشاف الومضي يقوم أنبوب التضاعف الفوتوني بقدر معتبر من التكبير ولهذا يكفي أن يقوم المكبر المتقدم بقدر إضافي صغير من التكبير، يكفي معدل تحصيل gain factor (نسبة الخرج إلى المدخل) في حدود 5 - 10، حتى أن بعض الكشافات الومضية لا تحتاج إلى تكبير من خلال المكبر المتقدم أصلاً (أي معامل تحصيل يساوي 1) ويستخدم المكبر المتقدم حيثئذ بغرض مواءمة الممانعة. لكن هناك بعض الكشافات الأخرى ذات النبضة الصغيرة مثل كشافات أشباه الموصلات تحتاج إلى قدر كبير من التكبير (معامل تحصيل في المدى $10^3 - 10^4$). بيد أن الحصول على هذه الغاية دونها مشاكل، فغالبا ما يصاحب ذلك التقاط بعض التشوهات الإلكترونية وعدم استقرار في التكبير مرتبط بارتفاع درجة حرارة الكشاف temperature - related gain instability.

في حالة الكشافات الحساسة، يجب أن يعمل المكبر المتقدم بالنمط الخطي linear mode، بمعنى أن تتناسب سعة النبضة مباشرة مع كمية الشحنة التي تصل المكبر المتقدم، العلاقة بينها علاقة خطية، وهذا بدوره يحفظ العلاقة بين سعة نبضة الخرج وطاقة الحدث الإشعاعي. ومن ثم يمكن إجراء عمليات تحليل الطاقة energy analysis للنبضات.

من أجل تأمين أداء أفضل للمكبر المتقدم يجب وضعه أقرب ما يمكن من المركبة التي تسبقه والمركبة التي تليه، أي أنبوب التضاعف الفوتوني والمكبر حتى يتسنى الحصول على نسبة أعلى من النبضة إلى التشويه، أي النسبة S/N حيث يمكن تكبير النبضة قبل التقاط تشوهات إلكترونية نتيجة استخدام كابلات توصيل طويلة، خاصة في حال استخدام كشاف ضعيف النبضة كما في حالة كشاف أشباه الموصلات أو عند استخدام الكشاف لرصد حدث إشعاعي ذي طاقة منخفضة. عموماً، يعد تعظيم النسبة S/N مطلب أساسي للحصول على قدرة تحليلية عالية للطاقة high energy resolution. للأسباب سالفة الذكر، غالباً ما يأتي الكشاف مع المكبر المتقدم كوحدة واحدة one unit. نفس الاحتياطات يتم الأخذ بها في حالة وحدات التصوير النووي، ذلك من أجل الحصول على قدرة تحليلية مكانية عالية high spatial resolution، أيضاً.

المكبر The Amplifier:

للمكبر في أجهزة العد والتصوير النووي وظيفتان:

1- تكبير النبضات التي مازالت صغيرة بعد خروجها من المكبر المتقدم (عادة من مستوى الملي فولت إلى الفولت) حتى يمكن تشغيل باقي مركبات وحدة العد (أو التصوير النووي) مثل محلل ارتفاع النبضة pulse – hight analyzer والمقاييس المختلفة.

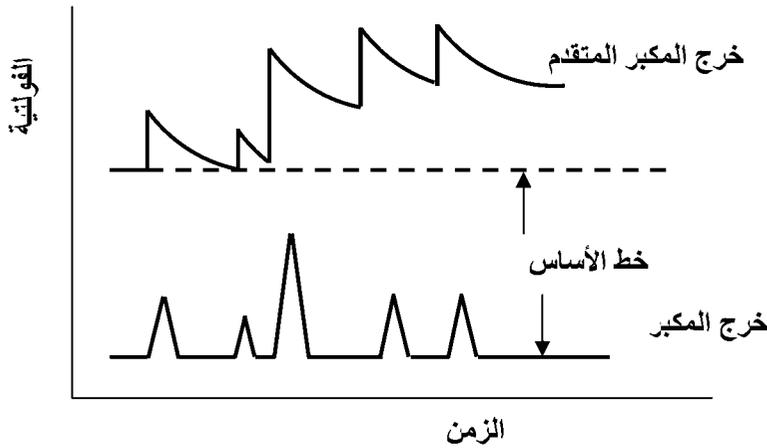
2- إعادة تشكيل النبضة التي تخرج من المكبر المتقدم، تلك التي تعاني من ذيل تمتد slowly decaying pulse لجعلها نبضة حادة قصيرة narrow pulse، مما يمكن من إجراء عملية العد بدقة في حالة التتابع السريع للنبضات وتجنب تداخل النبضات، واختلاطها وبالحصول على نبضة قصيرة يمكن تحسين النسبة S/N.

يقع معامل التحصيل للمكبر في المدى 1-1000، وعادة ما يُصمم بحيث يمكن ضبطه للحصول على قيم متغيرة لمعامل التحصيل حتى يمكن تخير القيمة الأنسب لكشافات ومكبرات متقدمة مختلفة، ومن ثم الحصول على القيمة العظمى للخروج.

5-2 تشكيل النبضة Pulse Shaping

أحد أهم وظائف المكبر هو تشكيل النبضة، تخرج النبضة من المكبر المتقدم، وهي حادة الصعود بطيئة الهبوط، توضع بثابت زمني في حدود $50\mu\text{sec}$ وتأخذ حوالي $500\mu\text{sec}$ حتى تصل خط الإسناد (الشكل (6-10)) وعلى هذا إذا ظهرت نبضة تالية في غضون هذه الفترة فإنها تتركب على ذيل سابقتها، مما يؤدي إلى خطأ في قيمة سعة النبضة (تقاس سعة النبضة من خط الأساس حتى قممها) فتبدو السعة أكبر من حقيقتها، وقد لا يمر إلا بضع مئات من العدات حتى تتشوه النبضة وتفقد معالمها (الشكل (6-10)).

تؤمّن دائرة تشكيل النبضة الملحقة بالمكبر (الشكل (6-10)) الحصول على نبضات منفصلة حتى في حالة تراكب النبضات الخارجة من المكبر المتقدم، ويجب أن تفعل ذلك دون تشويه للخواص الفيزيائية التي تصاحب نبضات خرج المكبر المتقدم وخواص النبضة (المعلومات) هذه التي يجب الإبقاء عليها :



الشكل (6-10) خرج المكبر المتقدم (الشكل العلوي) حيث النبضات حادة الصعود بطيئة الهبوط ومن ثم تراكبت. (الشكل السفلي) خرج المكبر وقد تم التخلص من ذلك العيب بالتخلص من الذيل البطيء للنبضة دون فقد ملحوظ في المعلومات الخاصة بسعة النبضة وزمن صعودها.

1- سعة النبضة: حيث تتناسب مع طاقة الإشعاع الذي تفاعل مع الوسط داخل الكشاف.

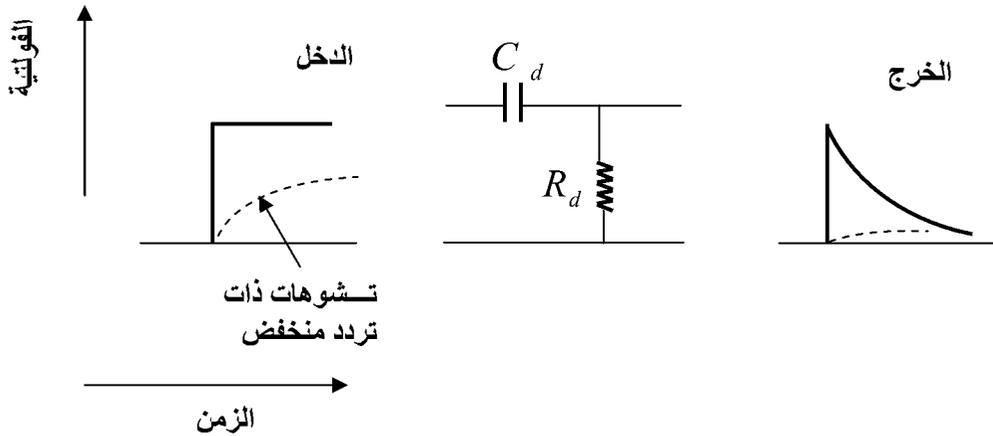
2- زمن الصعود rise time: ويمثل الزمن الذي رُصد عنده الحدث الإشعاعي (امتصاص فوتون مثلاً) - راجع الشكل (10-6).

هناك طرق عدة لتشكيل النبضة، من أكثرها انتشاراً طريقة المقاومة - المكثف resistor - capacitor ، والتي يُشار إليها اختصاراً بطريقة RC وتبنى على إلحاق دائرتي مفاضل ومكامل بدائرة التكبير.

2-5-1 تشكيل النبضة بطريقة RC RC-Pulse shaping

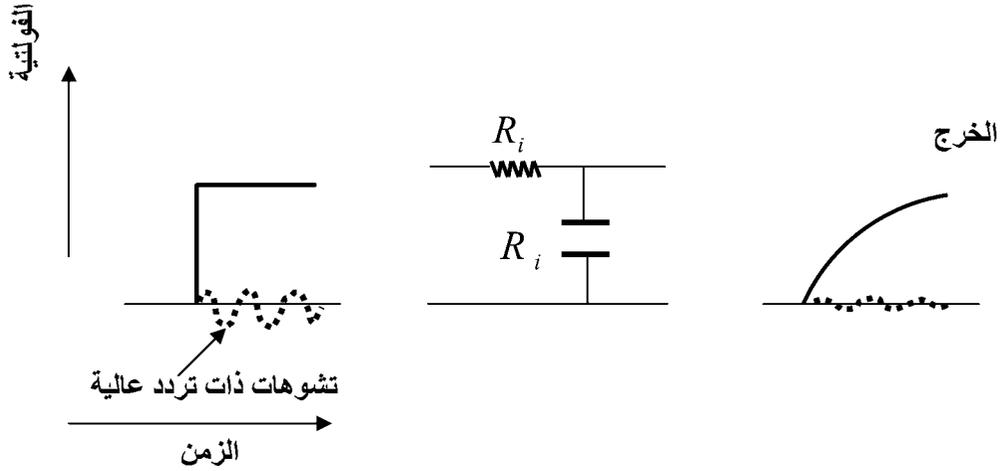
عند إدخال نبضة حادة الارتفاع بطيئة الهبوط ذات زمن دوري طويل نسبياً، كتلك التي تخرج من المكبر المتقدم، إلى دائرة المفاضل في المكبر (الشكل (11-6)) فإن الخرج يكون نبضة سريعة الارتفاع تضمحل بثابت زمني τ_d يتحدد بحاصل الضرب RC. سعة نبضة الخرج هذه تتوقف على ارتفاع الجزء الحاد من نبضة الدخل، ولا تتأثر بالذيل الممتد للنبضة السابقة لها، علينا أن نتذكر أن الثابت الزمني في حالة دائرة المفاضل يكون صغيراً.

لاحظ أن دائرة المفاضل تلحق أيضاً بالمكبر المتقدم، ويمكن استخدامها لتشكيل محدود للنبضة في هذه الحالة غير أنه عند استخدامها في حالة المكبر تكون قيمة الثابت الزمني RC أصغر كثيراً. هذه الخواص تمكن دائرة RC من أن تقوم بالتخلص من إشارات التشويه الإلكترونية ذات الترددات المنخفضة (أي ذات زمن دوري طويل، راجع الشكل (11-6)).



شكل (11-6) دائرة تشكيل نبضة (باستخدام مفاضل). الخرج نبضة حادة الصعود تضمحل بثابت زمني $\tau_d = R_d C_d$. لاحظ أنه تم التخلص (تقريباً) من التشوهات الإلكترونية ذات الترددات المنخفضة (المنحنى المنقطع).

قد يُطرح السؤال، لماذا لا تتم عملية تشكيل النبضة برمتها في مرحلة المكبر المتقدم؟ إذن، للإجابة يجب أن نتذكر أن عملية التكبير تتم على مرحلتين، المكبر المتقدم والمكبر



شكل (6-12) دائرة تشكيل نبضة (باستخدام مكامل). الخرج نبضة تصعد بثابت زمني $\tau_i = R_i C_i$. لاحظ أنه تم التخلص (تقريباً) من التشوهات الإلكترونية ذات الترددات العالية (المنحنى المتقطع).

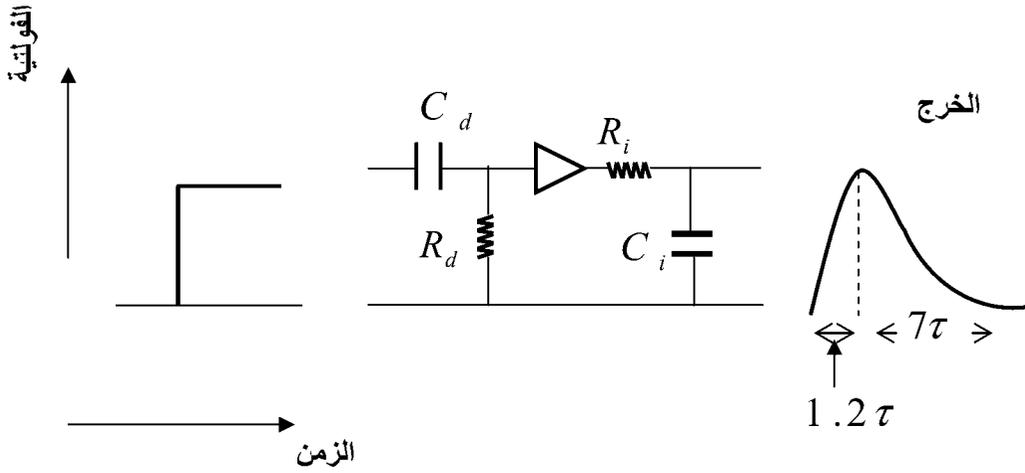
(فضلاً عن التكبير الذي يحدث داخل أنبوب التضاعف الفوتوني) وأن قيمته تحكمها الظروف الإلكترونية لمواءمة الممانعة.

عند إدخال نبضة حادة الارتفاع بطيئة الهبوط ذات زمن دوري طويل نسبياً، كتلك التي تخرج من المكبر المتقدم، إلى دائرة المكامل في المكبر (الشكل (6-12)) فإن الخرج يكون عبارة عن نبضة موصوفة بالمعادلة (6-7):

$$V = V_s (1 - e^{-t/RC})$$

V_s هنا تمثل سعة النبضة المدخل وأن $\tau_i = RC$ هي الثابت الزمني لدائرة المكامل. لاحظ أنه تم التخلص من التشوهات الإلكترونية ذات الترددات العالية، علينا أن نتذكر أن الثابت الزمني في حالة دائرة المكامل يكون كبيراً.

دائرة تشكيل النبضة في صورتها الأخيرة تتكون من مرحلتين؛ تفاضلية وتكاملية (الشكل (6-13)) عندما يتساوى ثابتا الزمن للدائرتين، التفاضلية والتكاملية $\tau_h = \tau_i = \tau$ ، تأخذ نبضة الخرج زمناً قدره 1.2τ حتى تبلغ أقصى صعودها وتأخذ 7τ في اضمحلالها حتى تقترب من الصفر.



شكل (6-13) دائرة تشكيل نبضة تجمع بين مرحلتين؛ تفاضلية وتكاملية

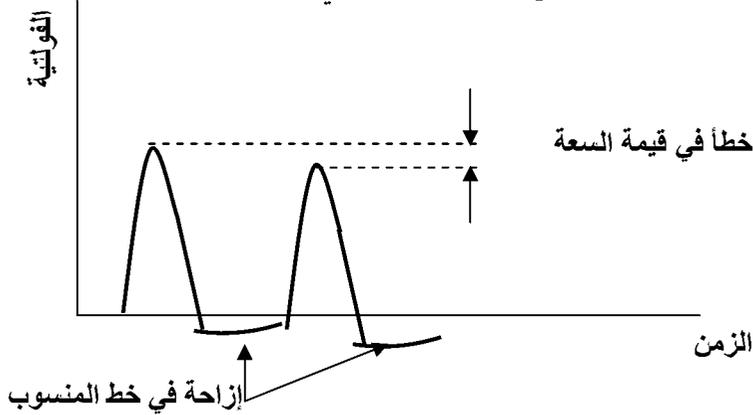
أقصى قيمة لفولتية النبضة الخارج (أي سعتها) تتوقف على سعة النبضة المدخل. بالنسبة للكشاف الوميضي وكشاف أشباه الموصلات تُختار τ في المدى $0.25 - 5.0 \mu \text{sec}$ ، وعلى هذا تضيق النبضة التي تخرج من المكبر كثيراً عن تلك التي تخرج من المكبر المتقدم $(50 - 500 \mu \text{sec})$. خرج هذه الدائرة (الشكل (6-13)) موحد القطبية unipolar output (أي موجبة). هناك بعض دوائر تشكيل النبضة التي تؤدي إلى وجود جزء سالب في نبضة الخارج، وتسمى النبضة في هذه الحالة نبضة ثنائية القطبية bipolar pulse.

تجدر الملاحظة أن سبب تكرار استخدامنا لنبضة مُدخل مربعة الشكل square wave يرجع لأن زمن صعود نبضة المدخل التي نتعامل معها صغير جداً ($\approx 1 \mu \text{sec}$)، بينما تأخذ زمناً طويلاً نسبياً حتى تضمحل (قد يصل إلى $500 \mu \text{sec}$) وعلى هذا إذا ركزنا على مقدم النبضة، فإنه يبدو كما لو كان جزءاً من نبضة مربعة، فضلاً عن سهولة المعالجة الرياضية الإلكترونية (تفاضل وتكامل) لنبضة بهذا الشكل.

6-2 إزاحة خط المنسوب وتراكم النبضات Baseline Shift and Pulse Pileup

مشكلتان عمليتان تظهران نتيجة استخدام المكبر عند معدلات العد العالية، إزاحة خط المنسوب وتراكم النبضات. تحدث الأولى نتيجة وجود مركبة (جزء) سالب في نهاية النبضة

فإذا ما تبعتها أخرى تظهر وكأنها أقل سعة (ارتفاعاً) من الحقيقة (الشكل (14-6)) وهذا يؤدي بدوره إلى رصد طاقة أقل للحدث الإشعاعي.

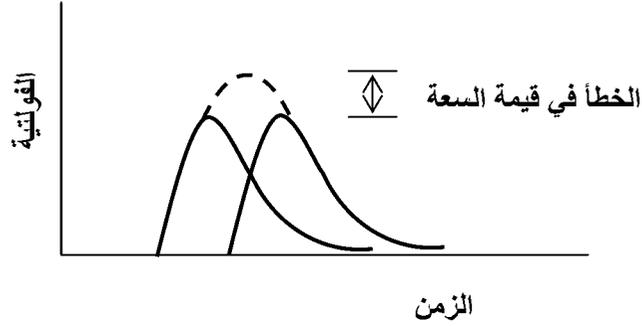


شكل (14-6). شكل تخطيطي لإزاحة خط الإسناد يأتي نتيجة ركوب نبضة على ذيل سالب لنبضة سابقة

صُممت دوائر كهربية لإعادة تصحيح خط الأساس baseline restoration، ومن ثم الحد من هذه المشكلة.

تظهر المشكلة الثانية، تراكم النبضات نتيجة لوجود معدلات عالية للعد - high counting rates حيث تتلاحق النبضات، وقد تتراكم نبضتان لينتجا نبضة لا تمثل الحدث الإشعاعي لأي منها وهذا بدوره يؤدي إلى خلل في المعلومات الخاصة بطاقة الحدث، فضلاً عن نقص في معدل العد (الشكل (15-6)).

يمكن التقليل من أثر هذين المشكلتين بجعل عرض نبضة المكبر أقل، أي بجعل الثابت الزمني للمكبر أقل. لكن تقصير عرض النبضة إلى حد كبير قد يؤدي إلى خفض النسبة S/N (حيث يمكن التقاط بعض التشوهات الإلكترونية ذات الترددات العالية) وهذا بدوره يؤدي إلى ضعف القدرة التحليلية للطاقة، إنها قاعدة عامة: العوامل التي تؤدي إلى رفع معدل العد في المكبر تؤدي إلى خفض القدرة التحليلية للطاقة.



الشكل (6-15) تراكب نبضتين يؤدي إلى خلل في ارتفاع (السعة) ونقص في معدل العد

عندما يُستخدم كشاف حساس ومكبر يعمل بالنمط الخطي، يتناسب ارتفاع (سعة) نبضة خرج المكبر مع طاقة الفوتون (أو الجسيم) التي انتقلت إلى مادة الكشاف. بتفحص وتحليل النبضة إذن يمكن تحديد طاقة الفوتون الممتص. بقصر العد على النبضات التي تقع ارتفاعاتها في مدى معين يتحدد مدى معين للطاقة تمييزاً لهذه النبضات عنما قد يأتي من مصادر غير مرغوب في رصدها كالخلفية **background** أو التشتت، مثلاً.

توطئة لمعالجة موضوع تمييز النبضات ورفض غير المرغوب فيه منها، لابد من التعرض لبعض المفاهيم المهمة ذات الصلة مثل طيف البلورة الوميضية NaI(Tl) والقدرة التحليلية **resolution power**.

3- أطياف بلورة NaI(Tl) Sodium Iodide Spectroscopy

بسبب الأداء الجيد لبلورة NaI(Tl) كبلورة وميضية فكشافها هو الأكثر شيوعاً في الطب النووي، ومن ثم ستقتصر دراستنا لأطياف ارتفاع النبضة لهذه البلورة، ونظراً لأنها تُستخدم أساساً لرصد الفوتونات فسنعبر تفاعل الفوتونات مع مادة البلورة.

يُقصد بالمصطلح «طيف» **spectrum** بالمفهوم الدارج في علم الأطياف قياس شدة الانبعاث (أو الامتصاص) للموجات الكهرومغناطيسية كدالة في الطول الموجي (التردد، العدد الموجي - بالطبع يمكن ترجمة هاتين الكميتين إلى طاقة) وهنا في مجال الطب النووي

نعني بالمصطلح شيئاً مماثلاً حيث يُقصد به النظر إلى عدد النبضات (العد counts) كدالة في الطاقة.

للتعرف من قرب على المركبات المختلفة لطيف بلورة NaI(Tl) نعود قليلاً للوراء، لموضوع تفاعل فوتونات جاما مع المادة (الباب الرابع).

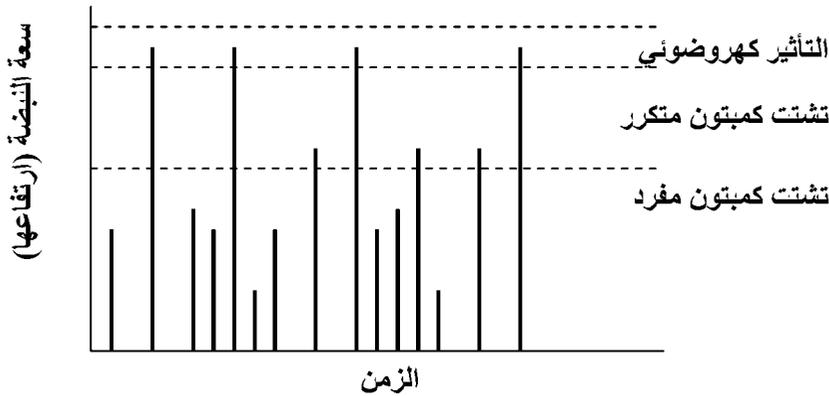
الطاقة التي يتم التعامل معها في مجال الطب النووي تقع في المدى 30keV - 1MeV عند تحليل أطياف بلورة NaI(Tl)، هناك تأثيران أساسيان يجب أخذهما بعين الاعتبار في هذا المدى من الطاقة، التأثير الكهروضوئي photoelectric effect وتأثير كمبتون Compton effect (scattering). في التأثير الأول يتم امتصاص فوتون جاما تماماً بواسطة إلكترون يقع في مدار داخلي inner shell للذرة وينطلق هذا الإلكترون تاركاً الذرة بطاقة تساوي طاقة الفوتون الممتص مطروحاً منها طاقة الربط binding energy لهذا الإلكترون ويتبع ذلك انبعاث للأشعة السينية.

نظراً لأن مساحة المقطع cross-section (كمية فيزيائية تعبر عن احتمال حدوث عملية ما وليس بالضرورة أن يكون المقصود هو المعنى الهندسي لمساحة مقطع) لحدوث عملية امتصاص فوتون (التأثير الكهروضوئي) تتناسب مع مكعب العدد الذري Z^3 ، ونظراً لكبر قيمة Z المكافئة لبلورة NaI(Tl)، فإن هذا النوع من التأثير يكون مهتماً حتى طاقة قدرها 1MeV ويسود حتى حوالي 300keV ، ولكن ينبغي أن نذكر أنه بالنسبة للمواد ذات القيمة المنخفضة للعدد الذري (مثل الأنسجة الرخوة soft tissues) تتراجع أهمية التأثير الكهروضوئي بينما يتقدم تأثير آخر، تأثير كمبتون، لكننا هنا نتحدث عن بلورة أيوديد الصوديوم.

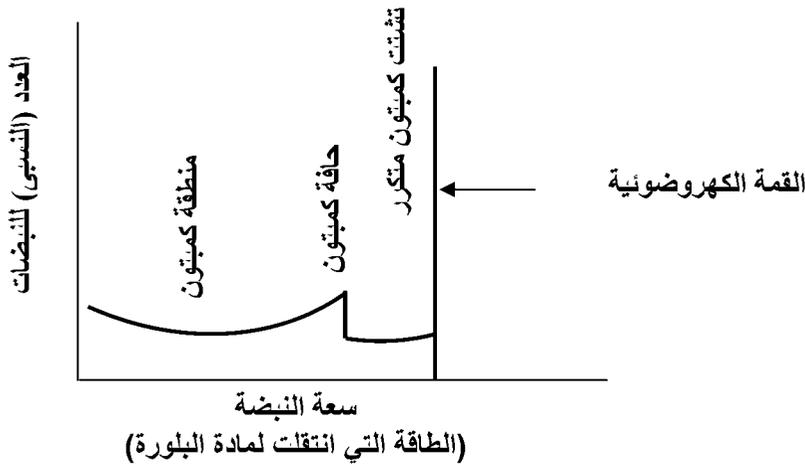
في تأثير كمبتون يتشتت الفوتون الساقط معطياً جزءاً من طاقته لإلكترون ضعيف الارتباط بالذرة، ويعتمد هذا الجزء من الطاقة على زاوية تشتت الفوتون، وتبلغ قيمته أقصاها عندما يرتد الفوتون المشتت إلى مسار السقوط، ويسمى التشتت في هذه الحالة بالتشتت الخلفي back scatter (راجع الباب الرابع). ولا يعتمد تشتت كمبتون على Z ، ولذلك إذا كان ظهور التأثير الكهروضوئي واضحاً في المواد ذات الأعداد الذرية الكبيرة، فإن تشتت كمبتون تظهر أهميته للمواد ذات القيمة المنخفضة للأعداد الذرية (كالأنسجة الرخوة) وتزداد هذه الأهمية كلما زادت طاقة فوتونات جاما الساقطة، ولذلك يمثل تشتت كمبتون عاملاً مهماً عند التعاطي مع عمليات التصوير النووي.

بفرض وضع مصدر لفوتونات جاما ووحيدة الطاقة monoenergetic gamma source أمام الكشاف، وبفرض أن طاقة الفوتون المنطلق من هذا المصدر E_γ وأن هذه الطاقة أقل من 1.02MeV حتى نستثني إنتاج الزوج وتقتصر آليات التفاعل على التأثير الكروموسوي وتشتت كمبتون.

التفاعلات الفوتوكهربية تؤدي إلى إيداع كامل لطاقة (امتصاص) فوتونات جاما داخل البلورة الومضية. سعة النبضة التي تنتج تتناسب مع طاقة الفوتون E_γ (الشكل 6-16A). باستخدام كشاف مثالي ينتج عن امتصاص هذا الفوتون خط واحد في طيف ارتفاع النبضات pulse height spectrum، يُسمى هذا الخط القمة الكهروضوئية photopeak. هذه القمة تمثل كمية الطاقة التي انتقلت من الفوتون الساقط إلى البلورة.



الشكل (6-16A) النبضات التي تنتج عن التأثيرات المختلفة



الشكل (6-16B). توزيع النبضات كدالة في السعة (الطاقة التي انتقلت لمادة البلورة)

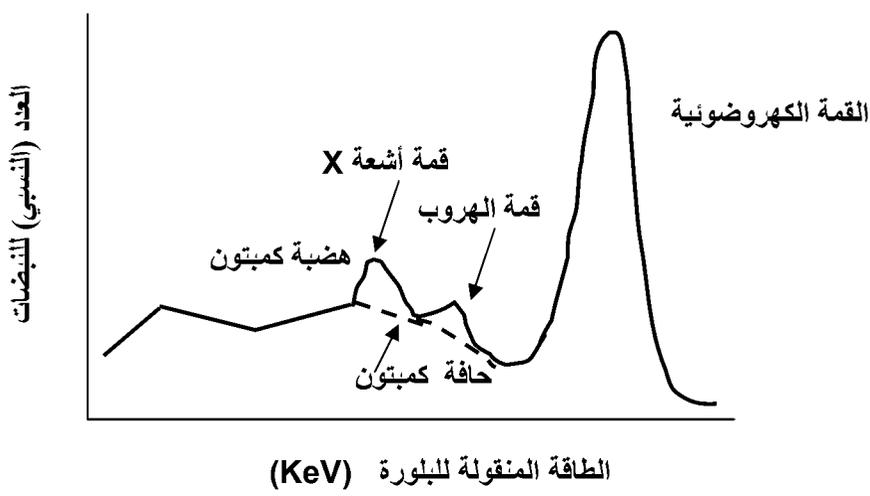
يمكن امتصاص فوتون جاما الذي يسقط على البلورة في عملية امتصاص كهروضوئي واحد كما يمكن امتصاص فوتون يكون قد تم تشتته في عملية تشتت كمبتون.

في تشتت كمبتون ، فقط جزء من طاقة فوتون جاما الساقط هو الذي ينتقل إلى البلورة من خلال الإلكترون المرتد. إذا تم امتصاص فوتون كمبتون المشتت أدى هذا الحدث إلى نبضة ضمن القمة الكهروضوئية، أما إذا هرب الفوتون المشتت دون تفاعل فإن الطاقة المنقولة لمادة البلورة أقل من E_γ . الطاقة التي تنتقل إلى الكشاف خلال تشتت كمبتون مفرد تدرج من قيمة قريبة من الصفر (تشتت بزواوية صغيرة) إلى قيمة قصوى E_{re}^{max} ، تقابل الطاقة القصوى للإلكترون المرتد (تشتت بزواوية 180°)

$$E_{re}^{max} = E_\gamma^2 / (E_\gamma + 0.2555)$$

وبهذا يحتوي الطيف المثالي على توزيع للنبضات يمتد مدى سعتها من قرابة الصفر إلى قيمة قصوى تعبر عنها المعادلة السابقة (الشكل (6-16)). هذا الجزء من الطيف يُسمى منطقة كمبتون **compton region** وتسمى هذه المنطقة أيضًا بهضبة كمبتون **plateau compton**. والجزء الحاد في نهايتها يُسمى حافة كمبتون **compton edge**، وهي تقابل الفوتونات المشتتة بزواوية مقدارها 180° ، ثمة احتمال آخر، وهو أن فوتون كمبتون المشتت قد يعاني تشتتاً آخر، وهذا الأخير بدوره يتفاعل مع مادة الكشاف، وقد يتكرر ذلك لنحصل على تشتت كمبتون المتكرر **multiple compton scattering**. تقع هذه المنطقة من الطيف ما بين حافة كمبتون وقمة التأثير الكهروضوئي.

الطيف الحقيقي الذي نتج عن امتصاص فوتونات وحيدة الطاقة، والذي يتم الحصول عليه باستخدام البلورة الوميضي **NaI(Ti)** (الشكل (6-17)) يختلف عن الطيف المثالي لفوتونات وحيدة الطاقة، والذي يظهر في (الشكل (6-16)). لم تعد قمة التأثير الكهروضوئي خطأً حاداً، ولكنها صارت قمة عريضة نوعاً ما، وأن حافة كمبتون قد استدارت قليلاً كما أن هناك مناطق أخرى ظهرت ضمن مركبات الطيف:



الشكل (17-6) الشكل العام للتركيب البنائي لطيف NaI(Tl)

قمة الهروب escape peak:

ففضلا عن فوتونات تشتت كمبتون سالفة الذكر فإن هناك المزيد من الفوتونات التي تأتي من مصادر أخرى قد تتمكن من الهرب دون المشاركة في المزيد من التفاعلات داخل البلورة، فعلى سبيل المثال، فوتونات الأشعة السينية التي تصاحب عملية التأثير الكهروضوئي يتم امتصاص أغلبها داخل البلورة، غير أنه إذا ما حدث التفاعل بالقرب من حافة البلورة فإن بعض هذه الفوتونات قد يهرب دون أن تمتص داخل البلورة مسببة قمة الهروب تلك، وتظهر هذه القمة كمركبة للطيف عندما تكون طاقة فوتونات جاما المنبعثة من المصدر المشع داخل الجسم منخفضة نسبياً (أقل من 100keV)، إنها الظروف المواتية لحدوث التأثير الكهروضوئي.

قمة أشعة X:

تلك التي تصدر من الرصاص lead x rays الذي يحيط بالكشاف كدروع، وهذه تظهر نتيجة امتصاص الرصاص لبعض فوتونات جاما ليحدث التأثير الكهروضوئي، فيتبع ذلك انبعاث فوتونات أشعة X المميزة للرصاص، وتلك بدورها تمتص بواسطة الكشاف، وإذا تصادف وجود مادة أخرى قريباً من البلورة الوامضية فمن المحتمل أن ترصد أشعة X المميزة لهذه المادة.

4- القدرة التحليلية Resolution Power

يكتسب المصطلح «القدرة التحليلية Resolution Power» أهمية كبيرة عند الحديث عن جودة الصور النووية التي يتم الحصول عليها، وعند تناول هذه الصور بالتحليل لاستخلاص النتائج. هناك مصطلحات ثلاث في هذا الإطار، القدرة التحليلية المكانية spatial resolution، القدرة التحليلية الزمنية time resolution والقدرة التحليلية للطاقة energy resolution. نذكر هنا تعريفا موجزا للمصطلحين، الأول والثاني، بينما نتناول القدرة التحليلية للطاقة بالتفصيل.

1-4 القدرة التحليلية المكانية

Spatial Resolution

تعني هنا القدرة على إظهار التفاصيل في صورة للتوزيع الإشعاعي في عضو ما، وللتوضيح إذا كان لدينا خطان (أو موضعان لحدثين) على مسافة قريبة من بعضهما واستطعنا التمييز، بينهما كخطين (أو بقعتين) مهما صغرت المسافة بينهما، وذلك باستخدام ما هو متاح من وسائل قيل: إن القدرة التحليلية لهذه الوسيلة عالية وإلى أي مدى يمكن أن تكون المسافة بين الخطين (أو الموضعين) صغيرة، ويظل من الممكن رصدهما كخطين (أو كنقطتين). صغر المسافة هذا هو الذي يعبر عن جودة القدرة التحليلية المكانية.

2-4 القدرة التحليلية الزمنية

Time Resolution

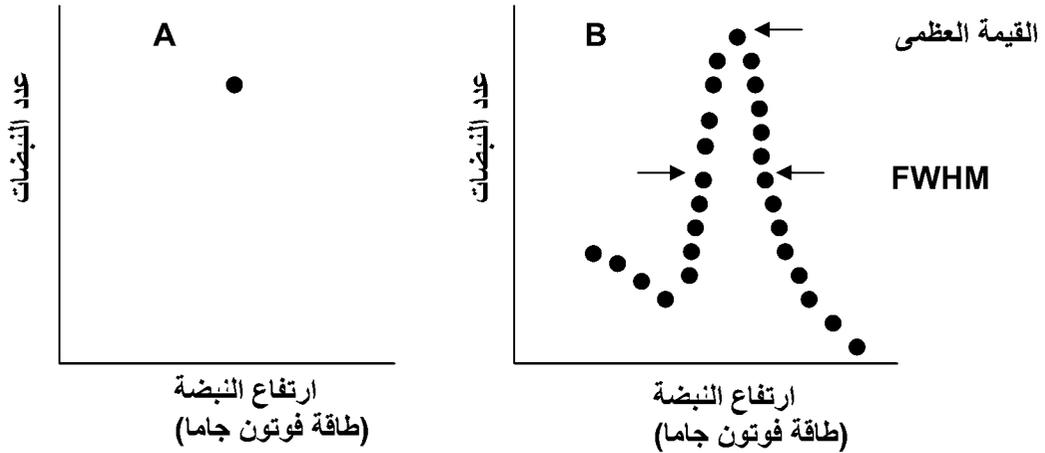
تعبر عن الفترة الزمنية بين تتابع حدثين (تفاعل فوتونين (جسمين) متتابعين مع مادة الكشف) على أن يرصدا كحدثين منفصلين، وكلما صغرت الفترة الزمنية بينهما وظل بالإمكان رصدهما كحدثين كانت القدرة التحليلية لوسيلة الرصد أفضل، وفي حالة البلورة الويضية يكون هذا الزمن محكوما بالزمن اللازم لعودة الإلكترون المقتنص إلى فجوة في المنطقة التساهمية، وتمثل 10^{-8} sec قيمة نمطية لهذا الزمن، كما تتوقف القدرة التحليلية الزمنية على زمن الرحلة التي تقطعها الإلكترونات الفوتونية بين الدينودات داخل أنبوب التضاعف الفوتوني وصولا إلى الأنود، وتلك الرحلة تستغرق ما بين 10^{-8} sec إلى 10^{-7} sec، ذلك تبعا لنوع وحجم الأنبوب وقيمة الجهد الكهربائي الواقع عليه.

3-4 القدرة التحليلية للطاقة

Energy Resolution

كما تقدم، لا تستغرق عملية امتصاص فوتون جاما وتفاعله داخل البلورة الومضية ورحلة الإلكترونات الفوتونية داخل أنبوب التضاعف أكثر من جزء من الميكروثانية. عدد الإلكترونات الفوتونية التي تنبعث من الهبط (الكاثود) يتناسب مع طاقة فوتون جاما، كما يتناسب عدد الإلكترونات التي تتولد داخل أنبوب التضاعف مع عدد الإلكترونات الفوتونية، ومن ثم يتناسب ارتفاع النبضة (قيمة تيارها أو جهدها) مع طاقة فوتون جاما الساقط على البلورة.

سبق أن ذكرنا أنه عند استخدام مصدر مشع تنطلق منه فوتونات جاما بطاقات متساوية، أي فوتونات وحيدة الطاقة *monoenergetic*، فإنه نظرياً يجب أن يكون ارتفاع كل نبضة كهربية نحصل عليها واحد، ولكن واقع الحال يختلف عن هذا الوضع الفرضي (الذي يعبر عنه الشكل (6-18A)). عند امتصاص فوتونات جاما وحيد الطاقة تنتج نبضات كهربية يختلف ارتفاعها (ومن ثم طاقاتها) اختلافاً طفيفاً، وحينئذ نقول: إنه لدينا توزيعاً للطاقة *energy distribution*. أي أنه عند رصد (عد) عدد كبير من الفوتونات وحيدة الطاقة مع حفظ الجهد على أنبوب التضاعف ثابتاً، فإننا نحصل على توزيع لارتفاعات (طاقات) النبضات كالذي يظهر في الشكل (6-18B).



الشكل (6-18) عدد النبضات التي يسجلها عداد وميض عند تعرضه لمصدر جاما وحيد الطاقة. A: الوضع المثالي حيث كل النبضات لها نفس الارتفاع. B: الوضع الفعلي حيث يختلف ارتفاع النبضات المتتالية، ويصبح لدينا توزيعاً (لاحظ أن هذا الشكل هو جزء من الشكل (6-16) أعيد عرضه في صورة نقاط تعبر عن النبضات لتوضيح فكرة التوزيع توطئة لتقديم مفهوم القدرة التحليلية للطاقة)

هذا التوزيع الإحصائي للطاقة مرده إلى:

- التغيرات الإحصائية statistical variations في عدد الفوتونات الضوئية داخل البلورة نتيجة امتصاص كامل لفوتون جاما، بمعنى أن امتصاص أي من فوتونات جاما وحيدة الطاقة لا ينتج عنه بالضرورة نفس العدد بالضبط من الفوتونات الضوئية.
- تغير عدد الفوتونات الضوئية التي تصل إلى سطح المهبط الحساس لأنبوب التضاعف الفوتوني في كل مرة يمتص فيه فوتون جاما وحيد الطاقة.
- التغير في عدد الإلكترونات التي تنطلق في المراحل المختلفة داخل أنبوب التضاعف في كل مرة يمتص فيه فوتون جاما وحيد الطاقة.
- عدم ثبات الجهد العالي المستخدم على أنبوب التضاعف وحدوث اضطرابات fluctuations في قيمته.

- تشوهات إلكترونية electrical noise تظهر في أنبوب التضاعف الفوتوني.

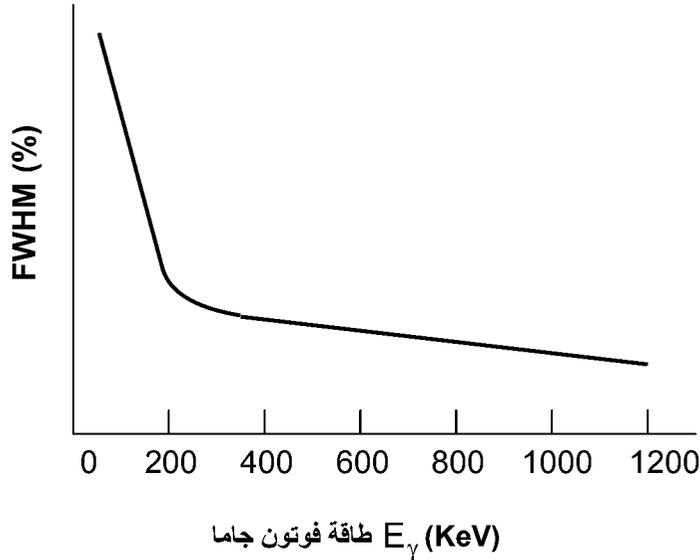
بسبب هذه العوامل، هناك فروق في ارتفاع النبضات التي تخرج من الكشاف بالرغم من أنها نتجت عن امتصاص فوتونات وحيدة الطاقة (أي جاءت نتيجة إيداع نفس القدر من الطاقة في كل مرة يمتص فيها فوتون).

يمكن التعبير عن القدرة التحليلية للطاقة بطريقة كمية quantitative، وذلك باستخدام اتساع قمة التأثير الكهروضوئي عند منتصف القيمة القصوى لها (FWHM) Full Width at Half Maximum (شكل (18B-6))، ويتم التعبير عنها في صورة نسبة مئوية من القمة الكهروضوئية E_γ وعلى ذلك تعرف القدرة التحليلية للطاقة R_e :

$$R_e = FWHM\% = (FWHM/E_\gamma) \times 100\%$$

حيث E_γ هي طاقة فوتون جاما الممتص بواسطة البلورة الوميضية.

بالطبع، كلما صغرت قيمة R_e كانت القدرة التحليلية أفضل حيث يؤدي ذلك إلى التعرف (رصد) على النبضات فرادًا وعدم تداخلها، وكما يتضح من التعريف الرياضي السابق تكون القدرة التحليلية أفضل في حالة فوتونات جاما ذات الطاقات الأعلى. أيضا، بتزايد عدد الإلكترونات الفوتونية photoelectrons التي تنطلق من كاثود أنبوب PM مع زيادة طاقة فوتونات جاما تتناقص نسبة التغيرات الإحصائية، تلك التي تسبب في زيادة عرض القمة الكهروضوئية. يعبر (الشكل (6-19)) عن تغير القدرة التحليلية للطاقة R_e لبلورة NaI(Tl) نمطية الحجم (5 cm x 5 cm) كدالة طاقة فوتون جاما (لاحظ الحصول على قيم مختلفة من E_γ باستخدام مصادر مختلفة، كلها وحيدة الطاقة).

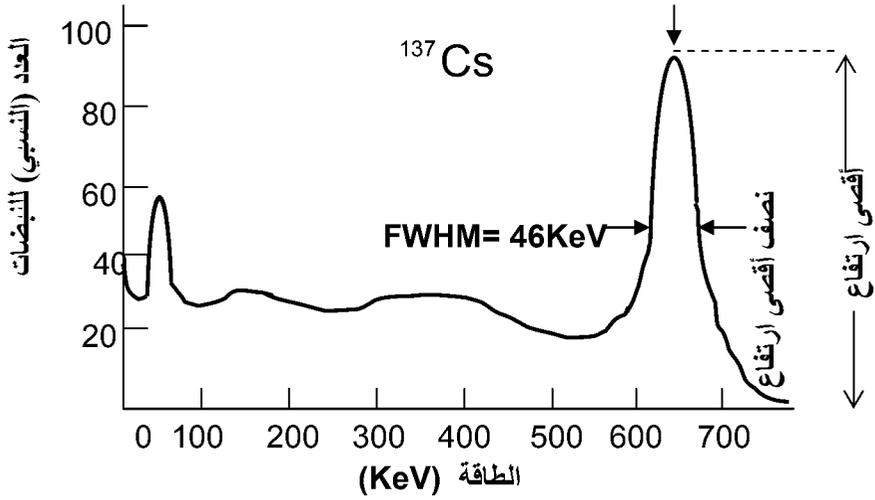


الشكل (6-19) كدالة FWHM (%) في طاقة فوتون جاما

عادةً ما يُستخدم فوتون جاما ذو الطاقة 662 keV المنبعث من النظير ^{137}Cs لتقدير القدرة التحليلية لكشاف NaI(Tl) حيث يُعطى 7% كقيمة نمطية للقدرة التحليلية. الشكل (6-20) يوضح كيفية حساب هذه النسبة:

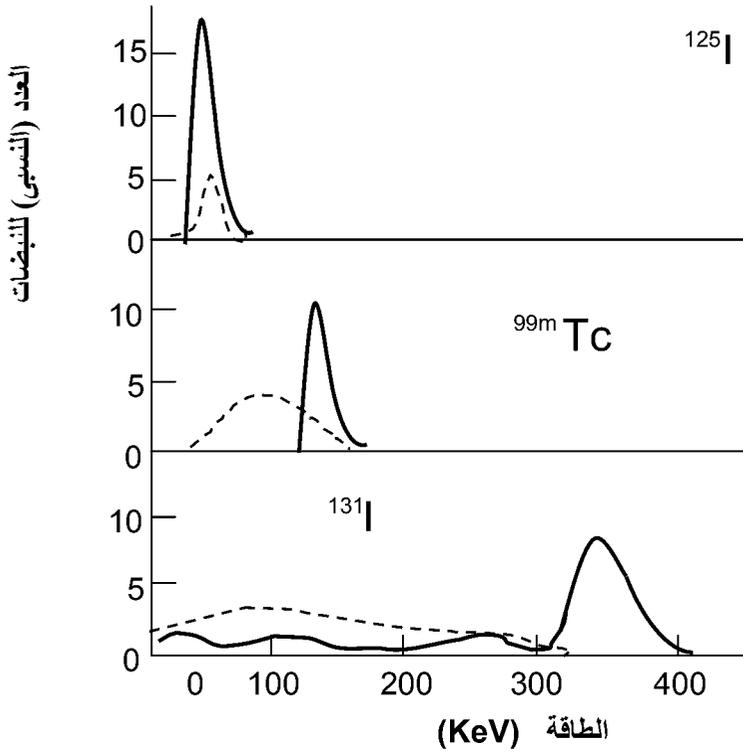
$$R_e = (\text{FWHM} / E_\gamma) \times 100\%$$

$$= \frac{46}{662} \times 100 = 7\%$$



الشكل (20-6). كيفية حساب القدرة التحليلية للطاقة لبلورة NaI(Tl) باستخدام فوتونات طاقتها 662KeV تنطلق من السيزيوم.

من المفيد أن نعرض لأمثلة لأطياف ارتفاع النبضة pulse - height spectra لبعض الأنوية المشعة شائعة الاستخدام في الطب النووي. الشكل (21-6) يوضح الطيف المسجل باستخدام كشاف NaI(Tl) للنظائر ^{125}I ، $^{99\text{m}}\text{Tc}$ و ^{131}I . المنحنى المتصل يعبر عن الطيف الأساسي لفوتونات جاما (ناتج عن فوتونات تقع على الكشاف مباشرة) بينما يعبر المنحنى المتقطع عن طيف الفوتونات المشتتة على جسم آخر قبل أن تترد إلى الكشاف rays object-scattered γ . هذا الجسم الآخر قد يكون أنسجة لعضو قريب من العضو الذي تتوزع داخله المادة المشعة. يُلاحظ من الشكل أنه كلما زادت طاقة الفوتونات كلما أمكن الفصل بين قمة التأثير الكهروضوئي والطيف الناتج عن التشتت.



الشكل (21-6) طيف ارتفاع النبضة لبعض الأنوية المشعة شائعة الاستخدام في الطب النووي. يعبر المنحنى المتقطع عن طيف الفوتونات المشتتة على جسم آخر قبل أن ترتد إلى الكشاف.

بالرغم من العديد من المميزات المهمة لبلورة NaI(Tl) من إمكانية الحصول عليها بأحجام كبيرة وأشكال مختلفة والانخفاض النسبي في سعرها، فضلا عن إمكانية الحصول عليها بأحجام الكبيرة وكبر مساحة مقطع التفاعل الفوتوني high photon interaction cross section (ذلك الذي يعبر عن احتمال حدوث التفاعل) والذي يرفع من حساسية الكشاف لرصد فوتونات جاما، فإن ثمة عيوب ترتبط بالقدرة التحليلية لهذه البلورة:

إن الاتساع النسبي للقمة الضوئية photopeak يجعل من الصعب على الكشاف الفصل بين نبضات متقاربة فضلا عن أن الكشاف يعاني من ارتفاع الخلفية background الناتجة عن تشتت كمبتون عند الطاقات المنخفضة.

5- التمييز (التحليل)

ويعني العمل على رصد النبضة الحقيقية الصادرة من الموضع المراد متابعته أو تصويره فقط والتخلص من النبضات الأخرى التي قد تأتي من مصادر مختلفة. من تلك المصادر التي يجب العمل على فصلها والتخلص منها إلكترونياً: الخلفية الإشعاعية - التشتت - تشوهات إلكترونية مصدرها أنبوب التضاعف الفوتوني.

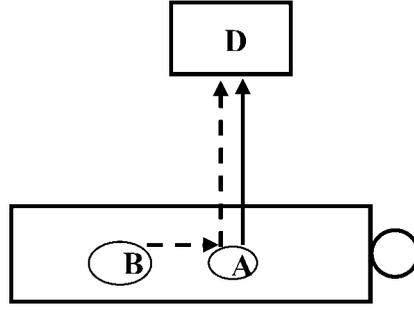
الخلفية الإشعاعية background:

من الواجب استخدام أقل الجرعات التي تنجز الغرض المطلوب تشخيصياً كان أم علاجياً، وهذا بالضرورة يستوجب الحد من تأثير الخلفية الإشعاعية حتى يمكن تتبع ورصد مواقع هذه الجرعات الصغيرة داخل عضو الجسم البشري دون تشويه من مصادر أخرى. تأتي الخلفية الإشعاعية من مصادر مختلفة، الأشعة الكونية أو مصادر إشعاعية طبيعية أو مصادر إشعاعية معملية قريبة أو من الأشعة السينية، وسيأتي حديث في موضع آخر عن وسائل الحد من الخلفية الإشعاعية.

التشتت scattering:

فضلا عن تشتت كمبتون الذي أسهبنا في شرحه، فإنه عند فحص موضع معين من جسم المريض يحتوي على مادة مشعة في أكثر من موضع فيه لا يقتصر استقبال الكشاف للأشعة الصادرة من هذا الموضع فقط، ولكن قد تسقط أشعة تأتي من موضع آخر، وتشتت على ذلك العضو متجهة إلى الكشاف، ففي الشكل (22-6) الجزء المراد فحصه في المريض هو الموضع A، لكن الكشاف D يرصد الأشعة الصادرة منه (السهم المتصل)، وكذلك تلك التي تصل من موضع آخر B وتشتت عليه متجهة إلى الكشاف (السهم المتقطع).

قد تمثل مسألة التشتت هذه خطورة على دقة القياس، فإن عددا قليلا من الفوتونات عالية الطاقة ينتج عنه الكثير من الفوتونات المشتتة (راجع تأثير كمبتون - الباب الرابع) والأمر يصير أخطر إذا ما رُصدت كلها أو أغلبها، ولكن يمكن الحد من هذا الخطر بضبط المميز discriminator بحيث يرفض تلك النبضات الناتجة عن التشتت،



شكل (6-22). رصد إشعاعات صادرة من عضو وأخرى مشتتة عليه آتية من عضو آخر

وذلك بضبطه بحيث لا يسمح بمرور نبضات ذات طاقة أقل من قيمة معينة، فإن طاقة فوتون كمبتون المشتت أقل من طاقة الفوتون الأساسي (الساقط). وقد يُضبط المميز لرصد طاقة أكبر من قيمة معينة أيضاً، ذلك في حالة وجود أكثر من مصدر مشع أو وجود مصدر متعدد الطاقة، وغالباً ما يُضبط لرصد نبضة ذات طاقة بين قيمتين معينتين (نافذة)، ومن ثم الإبقاء على النبضة المراد رصدها، عادة ما تضبط النافذة بحيث يتم رصد تلك النبضات التي تمثل قمة التأثير الكهروضوئي photopeaks فقط.

تشوهات إلكترونية مصدرها أنبوب التضاعف الفوتوني

فضلاً عما ذكر من قبل بخصوص التشوهات التي مصدرها أنبوب التضاعف الفوتوني يُعتبر الانبعاث الحراري thermonic emission للإلكترونات من سطح المهبط الحساس للأنبوب، وكذلك الانبعاث الحراري الناتج من بقايا غازية داخل الأنبوب (مهما فُرغ) من مصادر التشوهات الأساسية.

1-5 مميزات (محلل) النبضة

Pulse – Height Analyzer (PHA)

يستقبل المميز النبضات الآتية من المكبر فيقبل منها التي تقع في مدى واحد مختار selected، تلك التي تمثل حدث إشعاعي ويرفض ما عدا ذلك من النبضات التي قد تأتي من الخلفية background أو مصادر أخرى كالتشعير وحيث يكون المميز المستخدم وحيد القناة SCA single channel analyzer أما إذا كان الجهاز مهيباً ومعدداً لتمييز نبضات في أكثر من مدى للطاقة فحيث نتحدث عن مميز متعدد القنوات Multi -

linear amplifier (أي Channel Analyzer MCA في حال استخدام مكبر خطي NaI(Tl) الومضي فإن ارتفاع النبضة (قمة نبضة الجهد voltage pulse) يتوقف على طاقة الفوتون الذي يتفاعل مع البلورة. لهذا يكون ميمز ارتفاع النبضة ميمزاً للطاقة فيهيى adjusted سلفاً لرصد النبضات ذات القيمة (الفولتية voltage) المطلوبة. فعلى سبيل المثال، إذا تولدت ثلاث نبضات نتيجة لتفاعل ثلاثة فوتونات داخل البلورة الومضية، وكانت طاقة الفوتون الأول 200 KeV، وطاقة الثاني 360 KeV وطاقة الثالث 1000 KeV. قد يكون الفوتون الأول ناتجاً عن عملية تشتت والثاني مصدره النظير ^{131}I ، وقد يكون الفوتون الثالث مصدره نظير الراديوم. في حالة استخدام كشاف وميضي مرتفع الكفاءة ينتج عن الفوتونات الثلاث ثلاث نبضات قيمتها على الترتيب 20 ملي فولت، 36 ملي فولت و 100 ملي فولت، وباستخدام مكبر له القدرة على التكبير ألف مرة يصير ارتفاع النبضات 20، 36، و 100 فولت على الترتيب. وبفرض أن المميز قد أعد سلفاً لرفض النبضات ذات الارتفاع الأقل من 30 فولت والأكبر من 40 فولت فلن تُسجل إلا النبضة التي سببها الفوتون الذي طاقته 360 KeV والمنطلق من النظير ^{131}I وهكذا.

1-1-5 محلل النبضة وحيد القناة

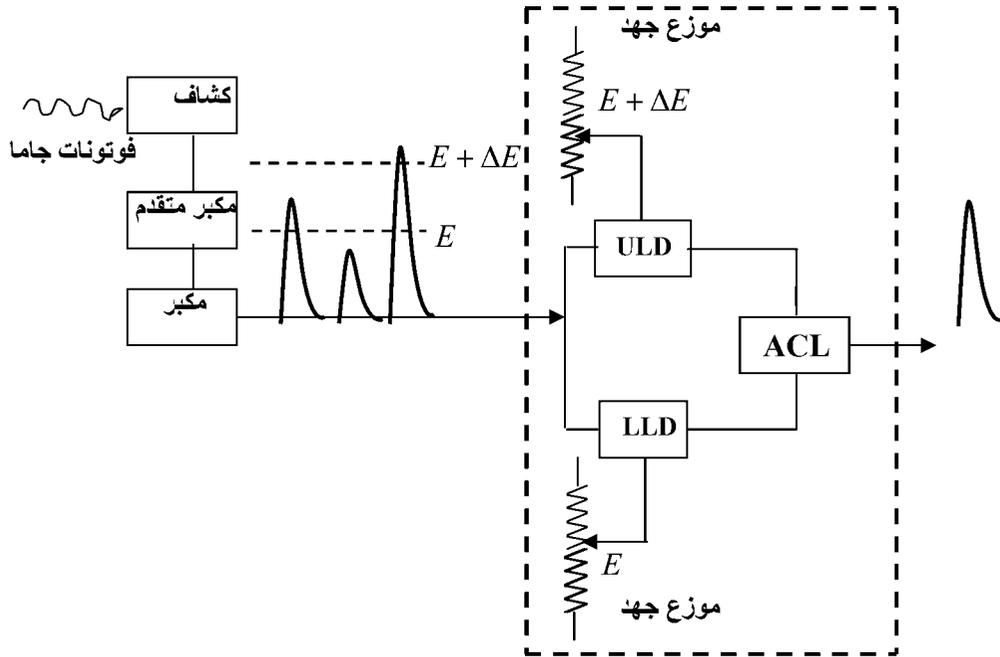
Single Channel Analyzer SCA

يقع خرج (فولتية) المكبرات الحديثة في المدى 10 – 0 فولت، وعلى هذا يقع المدى الذي يعمل خلاله ميمز النبضة وحيد القناة SCA.

يتكون SCA من ثلاث مركبات (دوائر) رئيسة:

ميمز للمستوى الأدنى Lower Level Discriminator (LLD)، ميمز للمستوى الأعلى Uper Level Discriminator (ULD) ودائرة منطقية لرفض النبضات المتطابقة anticoincidence Logic circuit (ACL) (الشكل (23-6)).

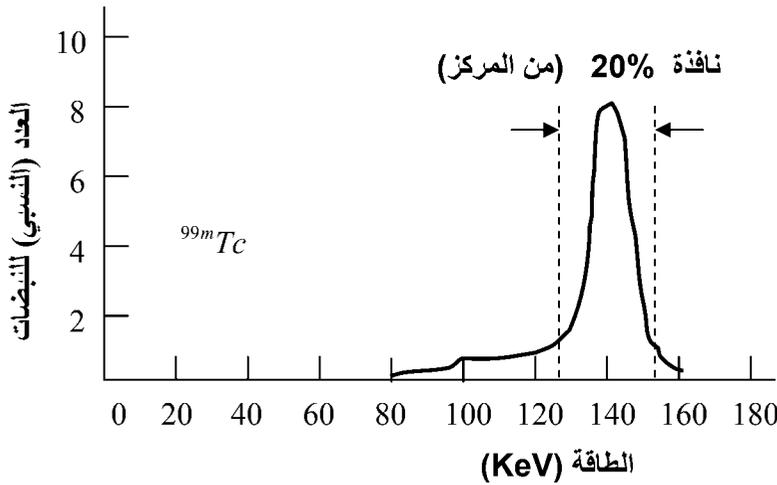
تقوم دائرة LLD بتحديد الحد الأدنى (العتبة) لفولتية النبضة المراد رصدها threshold voltage V (ومن ثم طاقة العتبة E) وتقوم دائرة ULD بتحديد الحد الأعلى، أي $V + \Delta V$ (ومن ثم $E + \Delta E$). يسمى الفرق ΔV (أو ΔE) عرض النافذة window width وهي المنطقة المختارة للرصد. عادة ما تُستخدم دائرة موزع جهد \square potentiometer لتحقيق ذلك كما تُستخدم دوائر تُسمى المقارنات comparator لمقارنة ارتفاع نبضة المُدخل مع فولتية LLD وفولتية ULD حيث تتولد نبضة خرج فقط إذا وقع ارتفاع النبضة المُدخل بين قيمتي الفولتية التي حددتها LLD و ULD. تُرسل النبضة التي تمر هذا الاختبار إلى دوائر رفض التطابق المنطقية التي تُؤمن عدم التكرار.



الشكل (6-23) المركبات الأساسية لمحلل النبضة وحيد القناة. تتولد نبضة خرج فقط إذا وقع ارتفاع النبضة المرصودة بين القيمتين اللتين تحددهما ULD و LLD.

(1) دائرة بسيطة تتكون من مقاومة متصلة على التوالي بمصدر للجهد ويقدر ما يؤخذ من المقاومة (بواسطة زالق) يُوزع الجهد طبقاً لقانون أوم، فرق الجهد يساوي حاصل ضرب شدة التيار والمقاومة، $V=IR$

تتضمن مميزات النبضة المتاحة تجارياً لוחتي تحكم إحداهما لضبط المستوى الأدنى (لجهود V أو للطاقة E) والأخرى لعرض النافذة (ΔV أو ΔE). يُسمى المستوى الأدنى في بعض النظم بالمستوى الأساس $base\ level$ ، ويُحدد المستوى الأعلى بإضافة عرض النافذة إلى المستوى الأدنى $V + \Delta V$ (أو $E + \Delta E$). في بعض النظم، يكون عرض النافذة نسبة مئوية $percentage\ window$ من مركز (منتصف) النافذة، ومركز النافذة عبارة عن مجموع المستوى الأساس ونصف عرض النافذة، أي $V + \Delta V/2$ ، وغالباً ما يكون عرض النافذة ما بين 15% إلى 20% من قيمة مركز النافذة (الشكل (6-24)).



الشكل (6-24): نافذة تميز النبضة وحيد القناة لطيف ارتفاع النبضة للفوتونات الصادرة من ^{99m}Tc باستخدام كشاف $NaI(Tl)$ الوميضي

يُضبط المميز لرفض النبضة التي يقل ارتفاعها عن قيمة معينة (حد أدنى) ورفض ما هو أعلى من قيمة معينة فتكون لدينا النافذة التي تسمح بمرور ومن ثم رصد النبضة الحقيقية المتوقعة من فوتونات النظير المستخدم.

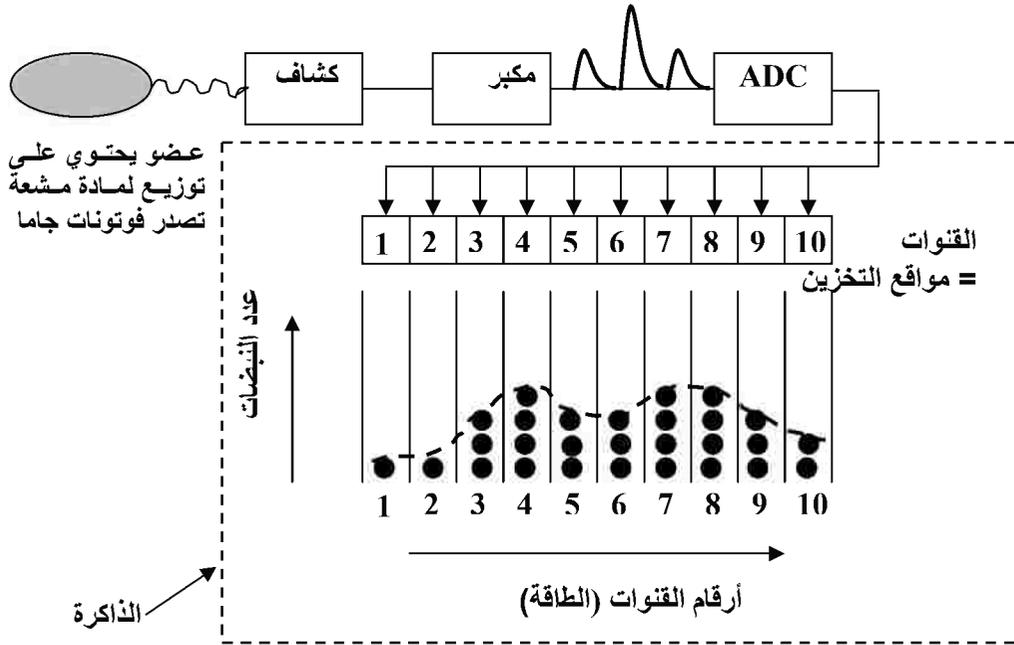
بالرغم من أن بعض المميزات يُحدد لها القيمة الدنيا للطاقة E_1 و القيمة العظمى لها E_2 كما أوضحنا إلا أن الأكثر شيوعاً هو التحكم في قيمة النافذة ΔE ذلك بالنسبة لقيمة خط الأساس. وغالبا ما تتمركز نافذة الطاقة في المدى 15 - 20 % من موقع قمة التوزيع photopeak على محور الطاقة كما أوضحنا، فإذا كانت النبضة تحقق الشروط المحددة بخط الأساس وعرض النافذة مرت ورُصدت وإلا فلا.

2-1-5 محلل النبضة متعدد القنوات

Multichannel Analyzer MCA

في بعض التطبيقات، نتعامل مع نظائر مشعة تصدر فوتونات متعددة الطاقة كما في حالة ^{67}Ga . هذا يستوجب التسجيل الآني لعدة حوادث إشعاعية (امتصاص فوتونات) في آن واحد. أحد الحلول، استخدام عدة مميزات وحيدة القناة SCA كل له نافذته الخاصة فبعض أجهزة التصوير النووي تشمل على مميزين أو ثلاثة، كل يعمل بصورة مستقلة عن الآخر، غير أن هذا الحل غير عملي، خاصة أنه في بعض الأحيان يحتاج الأمر استخدام عشرات، بل آلاف النوافذ. إن استخدام المميزات وحيدة القناة، فضلا عن أنه مكلف فإن ضبط الأجهزة والتعامل مع العديد منها يمثل مشكلة فنية، الحل إذن في استخدام مميز النبضة متعدد القنوات.

يمثل (الشكل (25-6)) الأجزاء الأساسية لمميز متعدد القنوات. المكون الأساس هو المحول التمثيلي - الرقمي (ADC) analog-to digital converter والذي يقيس ويصنف النبضات طبقاً لسعتها (ارتفاعها). تُقسم سعة النبضة بواسطة هذا المحول إلى فترات صغيرة (قنوات)، يتراوح عددها من 100 في حالة المحولات الصغيرة إلى 8192 ($= 2^{13}$) في النظم الكبيرة، فعلى سبيل المثال، يُقسم مدى الفولتية (0 - 10V) في المحلل ذي الألف قناة إلى ألف قسم، كل يقابل $10V/1000 = 0.01V$. تغطي القناة الأولى المدى 0.01 V - 0 والثانية تغطي المدى 0.01 - 0.2 V، وهكذا.



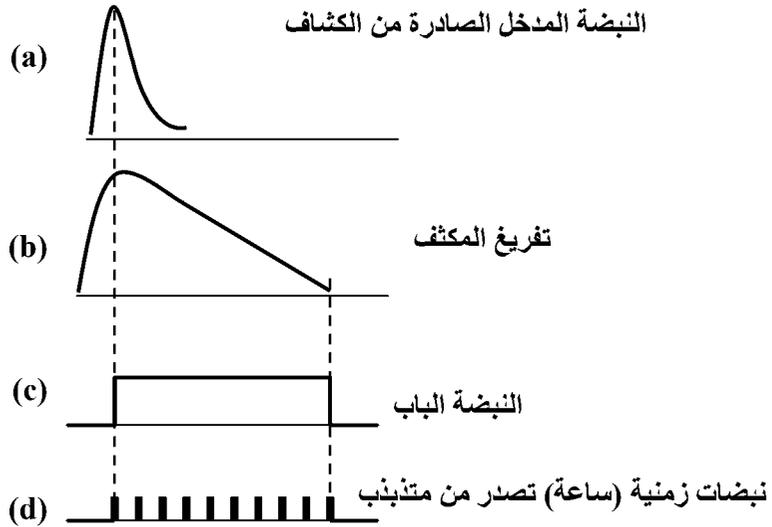
الشكل (25-6) المركبات الأساسية للمحلل متعدد القنوات وكيفية عمله

يقوم المحول ADC بتحويل النبضة التمثيلية (الفعلية، وهي في هذه الحالة فولتية ارتفاع النبضة) إلى قيمة عددية (= رقم القناة). يُخصص لكل قناة موقع تخزين في ذاكرة المميز متعدد القنوات MCA. الذاكرة المستخدمة في المميز هي نفس الذاكرة المغناطيسية magnetic core أو ذاكرة أشباه الموصلات الموجودة في الحاسبات الرقمية. يقوم هذا الموقع بعدد وتسجيل عدد النبضات في كل قناة (عدد مواقع التخزين = عدد القنوات). تستخدم معلومات الطاقة energy information في إنشاء طيف ارتفاع النبضات puls height spectrum -، وهو عدد النبضات لكل قناة كدالة في رقم القناة (الطاقة). يعرض عدد الحوادث الإشعاعية (امتصاص الفوتونات) لكل قناة على جهاز عرض (مثل شاشة عرض تلفازية أو أنبوب أشعة الكاثود (Cathode Ray Tube (CRT)، كما يمكن أيضا طبعا على صورة رقمية.

6 - المحول التمثيلي - الرقمي Analog-to-Digital Converter (ADC)

أكثر المحولات استخداماً مع الكاميرات الومضية، من خلال استخدام المميز متعدد القنوات، محول يسمى محول Wilkinson أو محول Ramp. (الشكل (6-26)) يوضح الخطوات الأساسية التي يبنى عليها التحول من الطور التمثيلي (فولتية النبضة) إلى الطور الرقمي (رقم القناة في المحلل متعدد القنوات). تستخدم النبضة المتولدة في الكشاف والتي تخرج من المكبر والذي يقع في مدخل المحول في شحن مكثف (أحد مركبات المحول). تتوقف شحنة المكثف على ارتفاع النبضة، ومن ثم على طاقة الفوتون مسبب الحدث الإشعاعي. يتم تفريغ المكثف في مقاومة حيث تسمح قيمتي المقاومة وسعة المكثف بتأمين ثابت زمني مناسب (شكل (6-26)).

عند بداية تفريغ المكثف تقوم نبضة باب gate pulse بتنشيط متذبذب زمني (ساعة) clock oscillator لدفع قطار من النبضات يمكن عدّها باستخدام دائرة عد counting circuit. بانتهاء تفريغ المكثف تنتهي النبضة الباب ويتوقف المتذبذب.



شكل (6-26) الخطوات الأساسية للتحول من الطور التمثيلي للطور الرقمي

يتوقف عدد نبضات الساعة إذن على شحنة المكثف، وبالتالي على فولتية النبضة المدخل ومن ثم على طاقة الفوتون. بإتمام هذه العملية، تقوم دائرة للتحكم ملحقة بالمحلل متعدد القنوات MCA بزيادة عدد النبضات التي تقابل طاقة النبضة المدخل بمقدار الوحدة ثم تُمسح دائرة المدخل ليتأهب المميز متعدد القنوات MCA لاستقبال نبضة أخرى، وهكذا.

كل من الخطوات السابقة تأخذ فترات زمنية لإنجازها، وغالبا ما يكون مجموع الفترات الزمنية لمحول نمطي بضع ميكرونات من الثانية، وعموما يُعتبر المميز متعدد القنوات MCA من المركبات البطيئة في وحدة قياس إشعاعي، ذلك مقارنة بالمحلل وحيد القناة .SCA.

7- أنبوب أشعة المهبط

Cathode Ray Tube (CRT)

الوسيلة الأكثر شيوعاً كجهاز عرض فهو يُستخدم مع آلة التصوير الوميضية، المساحات، الحاسوب، المميز متعدد القنوات، العداد البثري، كما يمثل العنصر الأساس في كاشف الذبذبات Oscilloscope، جهاز المراقبة monitors وشاشات العرض التلفازية عموماً. لذا فستتناوله بشيء من التفصيل، ونعرج باختصار على بعض الأجهزة التي يمثل فيها المركبة الأساس والتي ذكرنا.

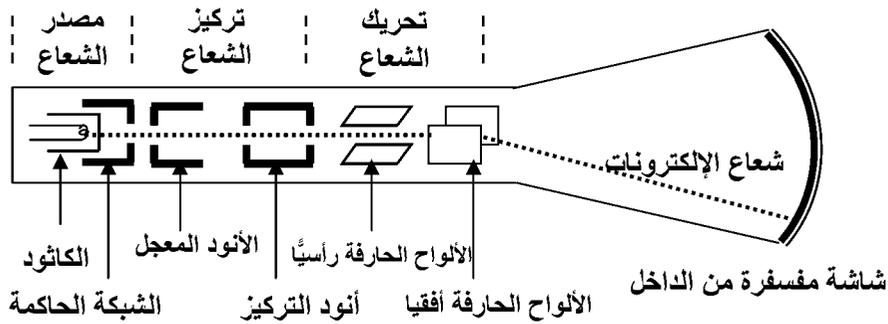
أنبوب أشعة الكاثود عبارة عن أنبوب مفرغ من الهواء يحتوي على المركبات الرئيسة الآتية (شكل (27-6)):

قاذف الإلكترونات Electron Gun:

هو الذي يمد الجهاز بشعاع الإلكترونات، ويتكون من كاثود Cathode وشبكة حاكمة Control Grid وأنود لتعجيل وتركيز شعاع الإلكترونات accelerating and focusing anode.

تنبعث الإلكترونات من فتيل يقع في مقدمة الكاثود، يسخن بواسطة تيار كهربي ومن ثم تنطلق الإلكترونات بتأثير الانبعاث الحراري thermionic emission.

يلي الكاثود الشبكة الحاكمة، والتي تأخذ شكل طاقة (كاب) تحيط بالكاثود، بها فتحة ضيقة تنفذ منها الإلكترونات. يوصل بالشبكة جهد سالب متغير بواسطته يمكن رد البطيء من الإلكترونات والتحكم في عدد الإلكترونات التي تمر من خلال الشبكة. يلي الشبكة الحاكمة الأنود المعجل accelerating anode والذي يشبه الشبكة الحاكمة في الشكل، ولكنه في وضع معكوس بالنسبة لها. يوصل جهد موجب بهذا الأنود لتعجيل الإلكترونات



شكل (6-27) المركبات الأساسية لأنبوب أشعة الكاثود

إلى سرعات عالية تصطدم بالوجه الأمامي للأنود، ينفذ من فتحته شعاع ضيق من الإلكترونات المنبعثة من الفتيل، يلي الأنود المعجل أنود آخر يسمى أنود تركيز الشعاع focusing anode حيث يقع عليه جهد سالب متغير لهذا الغرض، حيث يمكن الوصول بقطر مقطع شعاع الإلكترونات إلى حوالي 0.1 mm. وعلى هذا يستخدم قاذف الإلكترونات للحصول على شعاع إلكترونات مُركز متغير الشدة، ومن ثم فهو يعمل كعدسة كهروإستاتيكية.

الألواح الحارفة Deflection Plates:

تقوم الألواح الحارفة بتحريك شعاع الإلكترونات خلال الشاشة (الشكل (6-27)). هناك نوعان من هذه الألواح، نوع يبني عمله على أسس كهربية، ألواح كهروإستاتيكية electrostatic، والآخر يبني عمله على أسس مغناطيسية، إلكترونات مغناطيسية electromagnetic.

في النوع الأول، يستخدم زوجان من الألواح، كل يتكون من لوحين متوازيين، يتعامد الزوجان على بعضهما البعض، زوج رأسي vertical، والآخر أفقي horizontal. يُوصل بكل زوج فرق جهد متغير. فرق الجهد على أي من اللوحين يوفر قوة كهربية حارفة F_e (القوة تساوي حاصل ضرب شدة المجال الكهربائي والشحنة $F = -eE$ وشدة المجال تساوي فرق الجهد مقسوماً على المسافة بين اللوحين، $E = V/d$).

في الألواح الكهرومغناطيسية، تستبدل الألواح الرأسية والأفقية بملفات يمر بها تيار كهربائي ينتج عنه مجال مغناطيسي ينتج عنه قوة حارفة $F_m = -e(\vec{v} \times \vec{B})$ ، \vec{v} هي سرعة الإلكترون عند دخوله المجال المغناطيسي و \vec{B} هي شدة المجال المغناطيسي المتولد من مرور تيار كهربائي في الملف). يستخدم المجال الكهروإستاتيكي في حالة ما إذا كان مجال العرض صغيراً نسبياً (قطر 25cm) ويستخدم المجال المغناطيسي في حالة الحاجة إلى مجال عرض أكبر.

شاشة عرض مفسفرة Phosphorus Screen:

عبارة عن شاشة زجاجية مغطاة من الداخل بإهادة فسفورية. عند تصادم الإلكترونات السريعة بذرات المادة الفسفورية تسبب استثارتها، ومن ثم ينبعث ضوء فسفوري phosphorescent light تتوقف شدة وميضه ولونه على طاقة وكثافة الإلكترونات، وعلى طبيعة المادة الفسفورية. الزمن العمري life time للضوء المنبعث يختلف من مادة فسفورية لأخرى، ويقع ما بين بضع ميكروثوان إلى بضع دقائق ولكبره النسبي يشار إليه بزمن الإصرار persistence time. إذا وقع الزمن العمري في الجزء القصير من المدى وجب إعادة تنشيط البيانات على الشاشة باستخدام ذاكرة مناسبة. بعض أنابيب CRT المستخدمة في الطب النووي تتمتع بزمن إصرار طويل، وتسمى هذه الأنابيب حيثند Persistence Scope، وغالباً ما تستخدم كوسيلة مراقبة مرئية مع مُصور (كاميرة) جاما.

ولجعل أنبوب أشعة الكاثود ملوناً يستخدم ثلاثة قوادف إلكترونية بدلاً من واحد، حيث تتجمع الأشعة الثلاثة المنطلقة منها على حاجز به ثقب صغيرة لتخرج منها مرتبة بطريقة معينة. تسقط الأشعة الثلاثة على شاشة مفسفرة تتكون من عدد كبير من النقاط الفسفورية المرتبة في مجموعات كل يضم ثلاث نقاط من مواد فسفورية مختلفة، وترتب هذه النقاط بحيث يتمكن كل شعاع من الثلاثة من مسح النقاط الخاصة به (أي الخاصة بلون معين)،

حيث ينبعث من كل نقطة من الثلاث أحد الألوان الثلاثة، الأحمر ، الأخضر والأزرق (تذكر أن الطول الموجي، ومن ثم لون الشعاع المنبعث يتوقف على التركيب الذري للمادة الفسفورية). يمكن تشغيل قاذف واحد للحصول على لون واحد أو تشغيل القواذف الثلاثة للحصول على خليط من الألوان الثلاثة، حيث يمكن إنتاج 64 لوناً يمكن للعين البشرية التعرف عليها باستخدام خليط من الألوان الثلاثة بنسب مختلفة. نظراً لأن عدد النقاط الفسفورية كبير ومتقارب، فإنه يمكن الحصول على صورة ملونة متجانسة.

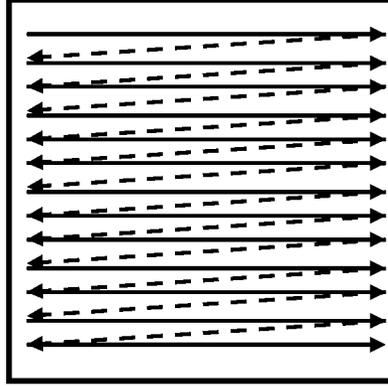
ثمة جهازان يُستخدمان على نطاق واسع كوسيلة عرض للنتائج في مجالات مختلفة بها فيها الطب النووي، كاشف الذبذبات والمراقب. المكون الأساس في كلٍّ هو أنبوب أشعة الكاثود CRT.

كاشف الذبذبات (CRO) Catode Ray Oscilloscope:

تظهر على شاشة كاشف الذبذبات فولتية النبضة كدالة في الزمن، ويُستخدم على نطاق واسع في اختبار واصلا الأجهزة الإلكترونية وهو في الأساس عبارة عن أنبوب أشعة الكاثود ملحق به مكبر للنبضة signal amplifier، تلك التي تُدخل على زوج الألواح الرأسية vertical plates. يُوصل زوج الألواح الأفقي بمولد للمسح الزمني time-sweep generator يُستخدم لتمكين شعاع الإلكترونات من مسح الشاشة المفسفرة بسرعة ثابتة ومعدل تكرار repetition rate ثابت. يوجد ذر على لوحة الكاشف لتغير هذا المعدل من قيم صغيرة في مدى النانوثانية إلى قيم كبير تصل حتى الثوان لكل سنتيمتر على تدرج شاشة الكاشف التي تم معايرتها.

المراقب The Monirot:

الأكثر استخداماً كوسيلة عرض، خاصة مع أجهزة الحواسيب وأجهزة التصوير النووي ولأغراض لا حصر لها ومكونه الأساس هو أنبوب أشعة الكاثود CRT. يتصل بكل زوج من اللوحين الحارفين مولد لمسح زمني يعمل بتردد ثابت-constant frequency time-sweep generator.



شكل (6-28) مسارات مسح شعاع الإلكترونات عبر شاشة المراقب

بموجب ذلك يقوم شعاع الإلكترونات بمسح الشاشة في مسار أفقي والذي يُسمى المسح النشط active sweep، حيث يمثل التغير في كثافة وطاقة الشعاع عند كل نقطة على مسار المسح بيانات الصورة. عند نهاية هذا الخط الأول يعود الشعاع أفقيًا (وبإزاحة صغيرة رأسياً - انظر الشكل (6-28)) دون نقل معلومات (بيانات) عن الصورة في مسار عودة retrace sweep (المسار المتقطع في الشكل) ليبدأ مسارًا أفقيًا نشطًا آخر. كل مسار أفقي مزاح قليلاً أسفل الآخر، وغالباً ما يكون عدد الخطوط اللازمة لملاء الشاشة 525 أو 625، وقد تكون أكثر، وتتوقف القدرة التحليلية للصورة على عدد الخطوط الرأسية.

* * *

- Paul B. Zbar, Basic Electronics, Third Ed., McGraw- Hill Book Company, NY,1967.
- Len Jones, Basic Electronic for tomorrow's world, Cambridge University Press, 1993.
- S. Ramabhadran, Electronics, Principles and Techniques, S. Chand & CO(pvt) LTD, N. Delhi, 1974.
- Edmund Kim, Nuclear Diagnostic Imaging, Practical Clinical Applications, Thomas P. Haynie, 1987.
- James A. Sorenson and Michael E. Phelps, Physics in Nuclear Medicine, Grune & Stratton, NY (1980).

* * *