

A computer model of channel multiplier plate performance

Un modèle mathématique pour l'étude par ordinateur du fonctionnement d'une galette de microcanaux

A.J. GUEST

MULLARD RESEARCH LABORATORIES
REDHILL, SURREY, ENGLAND

Summary

A computer model has been developed as part of a study of the performance of channel electron multiplier plates in imaging devices.

The various statistical processes which determine the behaviour of the multipliers in channel plates have been simulated by Monte Carlo methods. In this way, the performance of the microchannel plate can be studied for a wide range of operating conditions. It has also been possible to use the model to predict quite accurately the **behaviour** of channel plates before the actual experiments were carried out.

In this paper, the structure of the computer model is described and examples of the results are given. In most cases, it is now possible to compare the predicted results with experimental measurements.

Sommaire

Un modèle mathématique a été mis au point dans le cadre de l'étude du fonctionnement des galettes de microcanaux dans les tubes images.

A l'aide de la méthode de Monte Carlo, on a simulé les différents processus statistiques qui régissent le comportement des multiplificateurs formant la galette. On peut ainsi étudier la galette dans une large gamme de conditions d'emploi. Ce modèle a également permis de prévoir avec précision le comportement des galettes avant même la réalisation d'expériences réelles.

Dans cet article, on décrit la structure du modèle mathématique et l'on donne des exemples des résultats obtenus. Il est maintenant possible, dans la plupart des cas, de comparer les valeurs prévues par le calcul aux résultats expérimentaux.



Introduction

The principle of the single channel **electron multiplier** and its development into microchannel plates have already been described [1, 2].

The gain of the channel multiplier is the result of a complicated cascade of statistical processes, and so the gain of individual pulses will fluctuate considerably. These fluctuations degrade the performance of the device as unwanted noise. However, the mean gain and variance may be used to define a noise factor which can be used to represent the loss of information introduced by the multiplier.

The computer model described in this paper was developed originally to assist in the analysis of channel plate performance. In particular, it has been used to study the relative fluctuations in gain to discover if it is possible to minimize their effect by choosing the most favourable operating conditions. Once the model has been developed it was possible to extend its scope to study the transit time characteristics, the output energy distribution of electrons, and the resolution performance of channel plates.

Several attempts had already been made to study the behaviour of channel multipliers analytically [3 to 6], but the agreement with practice was not always very good. This may have resulted from the simplifications used in the various analyses.

Although J.M. Grant [3] tried a Monte Carlo approach to channel multiplier simulation, the secondary emission function he used did not vary with collision angle and he assumed a linear relationship between secondary yield and collision energy. In fact, most of the collisions in a channel multiplier take place at large angles to the surface normal, and the secondary emission function is not linear with respect to impact energy, so this was an important omission.

The other analyses use average values for various parameters to derive expressions for the mean gain in terms of the operating conditions, but these methods exclude the statistical fluctuations which have such an important effect on the behaviour of a practical device.

The present model was designed to reduce the number of simplifying assumptions as far as possible, and includes a synthesis of much experimental evidence in its structure. Although some additional results on the secondary emissive behaviour of channel multiplier materials have appeared since the model was developed in 1967, they do not invalidate the basic assumptions included in the model.

If actual channel multipliers are operated at very high gains, a gain limiting process is observed [5, 7, 8]. The present model is only applicable to a channel whose performance is hardly modified by space

Introduction

Nous ne reviendrons pas ici sur les principes du multiplicateur canalisé et de la galette de microcanaux, déjà décrits par ailleurs [1, 2].

Le gain d'un tel multiplicateur est l'aboutissement d'une suite complexe de phénomènes statistiques. Ceux-ci introduisent sur l'amplitude de chaque impulsion fournie, des fluctuations importantes ayant pour conséquence la création d'un bruit nuisant au fonctionnement du multiplicateur. Cependant, on peut utiliser les notions de gain moyen et de variance pour définir un facteur de bruit qui représente la perte d'information introduite par le multiplicateur.

Le modèle mathématique décrit ici a été mis au point d'abord pour permettre une analyse plus complète du comportement des galettes de microcanaux. On s'est attaché, en particulier à étudier les fluctuations relatives du gain, de façon à essayer de minimiser leurs effets en optimisant les paramètres de fonctionnement. Puis, lorsque le modèle a été rodé, on a pu étendre son domaine d'application à l'étude du temps de transit, de la distribution en énergie des électrons à la sortie et des caractéristiques de résolution des galettes de microcanaux.

Plusieurs tentatives avaient déjà été faites pour étudier analytiquement le fonctionnement des multiplicateurs canalisés [3 à 6] mais il existait en général un écart important entre la théorie et les résultats expérimentaux: ce désaccord peut être vraisemblablement imputé aux hypothèses simplificatrices introduites dans les différentes méthodes d'analyse.

J.M. Grant, par exemple, employa la méthode de Monte Carlo [3] pour simuler le fonctionnement du multiplicateur; cependant la fonction qu'il utilisa pour l'émission secondaire était indépendante de l'angle d'incidence des électrons et d'autre part, il supposa que le rendement en électrons secondaires était une fonction linéaire de l'énergie d'impact. Ces deux hypothèses, en contradiction avec l'expérience, ne pouvaient que conduire à des conclusions erronées.

Les autres méthodes d'analyse utilisent les valeurs moyennes de différents paramètres pour en déduire une expression du gain moyen en fonction des conditions de fonctionnement, mais elles laissent de côté l'aspect statistique du problème qui a pourtant une influence primordiale sur le comportement du multiplicateur.

Le modèle employé ici a été conçu de manière à ne s'appuyer que sur le minimum d'hypothèses simplificatrices. De plus, on y a introduit une synthèse d'un grand nombre de données confirmées par l'expérience. Bien que de nouvelles connaissances sur l'émission secondaire des matériaux utilisés dans les multiplicateurs canalisés aient été acquises depuis la concep-

charge and wall charging effects, i.e. at gains less than 10^6 . These conditions occur in most typical imaging applications in which gains of less than 10^5 are usually required.

The computer model

The computer model uses a random number generating procedure to sample the various distributions which may be used to represent the statistical processes of electron multiplication. These processes include the emission energy and direction of each secondary electron, and the distribution of the actual yield of secondaries after a collision about the mean yield given by the secondary emission function.

In a channel multiplier, the secondary electrons tend to collide with the wall at rather large angles of incidence. The cylindrical geometry also produces a considerable spread in the energy with which the electrons strike the wall. These facts mean that it is important to represent accurately the form of the variation of the secondary emission yield function with impact energy and angle. It has been possible to derive an expression which is used in the computer model to represent this yield function. It contains several experimentally determined results (see appendix p. 95).

Whenever a collision is simulated, this *secondary emission function* is used to determine the average yield of electrons corresponding to the particular impact energy and angle of inclination of the electron striking the wall. The value is then used as the mean of a Poisson distribution, and the actual number of secondaries generated by the particular collision is a random sample taken from this distribution. Each secondary electron is assigned two emission angles chosen from a cosine distribution and an energy sampled from a Rayleigh distribution with a modal energy which can be controlled by the input data to the programme. The trajectory of every electron is calculated in three dimensions from the ballistic equations and so the position, energy and angle of the subsequent collision are determined. The result of each collision is calculated as before and the process is repeated for every secondary electron generated. Both the length of channel available to each secondary for multiplication and the total time that has elapsed since the pulse was initiated

tion du modèle en 1967, elles n'ont pas infirmé les hypothèses de base formulées alors.

Lorsque les multiplicateurs canalisés fonctionnent à des gains élevés, un effet de limitation du gain apparaît [5, 7, 8]. Notre modèle n'est applicable qu'aux canaux dont le fonctionnement n'est pratiquement pas modifié par les effets de charge d'espace et de charge de paroi, c'est-à-dire pour les gains inférieurs à 10^6 . On rencontre ces conditions dans la plupart des applications pour les tubes images, dans lesquels les gains nécessaires sont habituellement inférieurs à 10^5 .

Le modèle mathématique

Le modèle mathématique utilise une méthode de génération de nombres aléatoires qui assure un échantillonnage des valeurs des différentes distributions valables pour représenter les processus statistiques intervenant dans la multiplication électronique. Ces processus s'appliquent à la vitesse initiale (en module et en direction) de chaque électron secondaire; ils interviennent également, lors d'un choc sur la paroi, dans la distribution du coefficient réel d'émission secondaire autour de la valeur moyenne de ce coefficient donnée par la fonction d'émission secondaire.

Dans un multiplicateur tubulaire, la collision des électrons secondaires avec les parois a lieu la plupart du temps sous forte incidence. D'autre part, la géométrie cylindrique favorise la dispersion des énergies des électrons secondaires frappant les parois. Ces deux conditions mettent en valeur l'importance d'une représentation précise des variations de l'émission secondaire en fonction de l'énergie et de l'angle d'impact. Nous avons pu trouver une expression qui est utilisée dans le modèle mathématique pour représenter cette fonction d'émission secondaire. Elle contient d'ailleurs plusieurs résultats obtenus expérimentalement (voir annexe p. 95).

A chaque fois que l'on simule une collision, cette fonction d'émission secondaire permet de déterminer le rendement moyen en électrons qui correspond aux conditions particulières d'énergie et d'angle associées à l'électron incident lors de l'impact. Le nombre obtenu est ensuite utilisé en tant que valeur moyenne d'une distribution de Poisson, le nombre réel d'électrons secondaires créés lors de ce choc étant un échantillon pris aléatoirement dans cette distribution.

On attribue à chaque électron secondaire deux angles d'émission choisis dans une distribution en cosinus, ainsi qu'une énergie initiale tirée d'une distribution de Rayleigh dont l'énergie modale peut être ajustée d'après les données introduites dans le programme. La trajectoire de chaque électron est calculée dans l'espace à l'aide des équations de la balistique et on déduit ainsi la position, l'énergie et l'angle de

are stored in the computer and this information is updated at every collision. The total number of electrons which have left the output of the channel is accumulated continually, so that, when all the electrons are calculated to have emerged from the channel, the yield of the individual pulse is known. The process is repeated many times to produce a series of output pulses. The performance of a uniform channel plate is equivalent to a large number of independent channels acting in parallel, so that the results from the computer simulation represent the performance accurately.

If all the other parameters which can be varied in the programme are kept constant, it is possible to study the effects of independent variation of the applied voltage and the length to diameter ratio on the following properties :

1. The mean gain G and the variance σ^2 . These values can be obtained directly from the simulated series of pulses.
2. The noise factor F , which is a measure of the loss of available information caused by the statistical fluctuations in the gain of the channel plate. In practice information is also lost because a fraction of the area of the channel plate face is closed so that primary electrons striking the region fail to start electron cascades ;

$$F = \left[\frac{\text{Input signal-to-noise ratio}}{\text{Output signal-to-noise ratio}} \right]^2 = \frac{1}{\gamma} \left[1 + \frac{\sigma^2}{G^2} \right]$$

where γ is the fraction of the plate whose area is effectively open to multiplication.

3. If sufficient pulses are obtained for one set of conditions, a pulse height distribution can be plotted. This indicates the relative frequency with which output pulses of a particular size occur.
4. The transit time and transit time spread can be obtained from a modified version of the programme.

In addition, it is possible to study the effect of primary electron energy and angle on the behaviour of the multiplier as well as the effect of variations in the secondary emission characteristics of the first collision. Modified versions of the model can produce the distribution of collision energy of electrons within the channel or the energy and directional distributions of the electrons leaving the end of the multiplier. The latter information can then be used to determine the spatial resolution capabilities of a channel plate when the output electrons are accelerated onto a fluorescent screen in an imaging device.

la collision suivante. On effectue pour chaque collision le calcul précédent, et le processus est répété pour chaque électron secondaire émis. D'autre part, on met en mémoire la longueur du canal correspondant à la trajectoire de chaque électron secondaire, ainsi que le temps total écoulé depuis le début de la séquence de multiplication; ces informations sont remises à jour après chaque collision. On additionne continuellement le nombre d'électrons sortant du canal, de sorte que, quand on sait par le calcul que tous les électrons ont émergé, le rendement de chaque impulsion est immédiatement connu.

Le processus est répété un grand nombre de fois de façon à obtenir une série d'impulsions de sortie: comme une galette de microcanaux uniforme est équivalente à un grand nombre de canaux travaillant en parallèle, les résultats provenant de la simulation à l'ordinateur représentent avec précision le fonctionnement d'une telle galette.

En maintenant constants les autres paramètres disponibles dans le programme, il est possible d'étudier les effets des variations indépendantes de la tension appliquée et du rapport longueur/diamètre sur les caractéristiques suivantes:

1. *Le gain moyen G et la variance σ^2 : ces deux valeurs peuvent être obtenues directement à partir de la simulation des séries d'impulsions.*

2. *Le facteur de bruit F : il représente la perte d'information due aux fluctuations statistiques du gain dans la galette de microcanaux. En réalité, il y a également perte d'information à l'entrée de la galette: en effet la surface utile de celle-ci ne représente qu'une partie de la surface totale, et une certaine proportion d'électrons primaires ne donnera pas naissance à une séquence de multiplication;*

$$F = \left[\frac{(\text{Signal/Bruit}) \text{ à l'entrée}}{(\text{Signal/Bruit}) \text{ à la sortie}} \right]^2 = \frac{1}{\gamma} \left[1 + \frac{\sigma^2}{G^2} \right],$$

où γ est la proportion de la surface de la galette effectivement ouverte à la multiplication.

3. *Si l'on arrive à obtenir suffisamment d'impulsions pour un ensemble de conditions déterminées, on peut en tracer la distribution en amplitudes : celle-ci permet de connaître la fréquence relative d'apparition d'une impulsion d'amplitude donnée.*

4. *Le temps de transit et sa dispersion peuvent être obtenus à partir d'une version modifiée du programme.*

De plus, il est possible d'étudier l'influence de l'énergie et de l'angle d'incidence des électrons primaires sur le comportement du multiplicateur, ainsi que les effets, lors de la première collision, des variations des caractéristiques de l'émission secondaire. Des versions modifiées

The approximate values of the parameters which control the form of the secondary emission yield function of the channel multiplier material can be deduced from published experimental results. However, the gain of a channel multiplier plate is very sensitive to small changes in the secondary emission characteristics of the wall material and it is one of the major triumphs of channel plate technology that plates consisting of thousands of parallel channels can be manufactured with uniform gain.

Originally the model was calibrated by adjusting certain parameters so that the computed results agreed with a typical set of experimental gain measurements. Since that time, the gains of channel plates have gradually risen so that a recalibration of the model was carried out. This required only small adjustments to the appropriate parameters in the programme. A comparison of the two sets of results showed that although both the gain and the variance increase rapidly when the secondary emission yield increases slightly, the noise factor, shape of the pulse height distribution and transit time are hardly changed.



Channel plate performance : experimental and computed results

Numerous measurements of channel plate performance have been made in various demountable systems and also in sealed off envelopes containing trialkali photocathodes. Some of these experimental results can be compared directly with the computer results. However, the advantage of the computer model is that its results can be generalized to cover a wide range of operating conditions. It is possible then to summarize these results in single diagrams which are called *universal curves*.

fiées du modèle de simulation permettent d'obtenir la distribution de l'énergie d'impact des électrons à l'intérieur du canal, ou la distribution en énergie et en direction des électrons à la sortie du multiplicateur. On peut utiliser cette dernière information pour déterminer les caractéristiques de résolution spatiale d'une galette de microcanaux placée devant un écran luminescent sur lequel on accélère les électrons sortant de la galette.

On peut déduire, à partir de résultats expérimentaux déjà publiés, les valeurs approchées des paramètres qui régissent la forme de la fonction d'émission secondaire du matériau constituant le multiplicateur. Malgré tout, le gain d'une galette de microcanaux est extrêmement sensible aux faibles variations qui peuvent apparaître dans les caractéristiques d'émission secondaire du matériau des parois, et c'est une des plus belles victoires de la technologie des galettes que d'être arrivé à fabriquer, à partir de milliers de canaux mis en parallèle, un composant ayant un gain uniforme.

A l'origine, on avait calibré le modèle en ajustant certains paramètres de façon que les résultats obtenus à l'ordinateur fussent en accord avec des gains types mesurés expérimentalement. Depuis cette époque, le gain des galettes s'est progressivement amélioré, et il a été nécessaire de calibrer à nouveau le modèle, en modifiant légèrement, dans le programme, les paramètres correspondants. En comparant les deux séries de résultats, on a constaté que, si le gain et la variance augmentent rapidement pour un faible accroissement du rendement en électrons secondaires, en revanche le facteur de bruit, la forme de la distribution en amplitudes et le temps de transit ne sont pratiquement pas affectés par cette variation.

Fonctionnement de la galette de microcanaux : résultats expérimentaux et calculés

De nombreuses mesures ont été faites sur le fonctionnement des galettes de microcanaux, tant sur divers systèmes démontables que dans des enceintes scellées contenant des photocathodes trialkalines. On peut comparer directement certains des résultats expérimentaux avec ceux obtenus à l'ordinateur. Cependant le modèle mathématique présente l'avantage d'une généralisation possible des résultats à un large domaine de conditions d'emploi. On peut alors les représenter globalement sur un diagramme unique appelé courbes universelles.

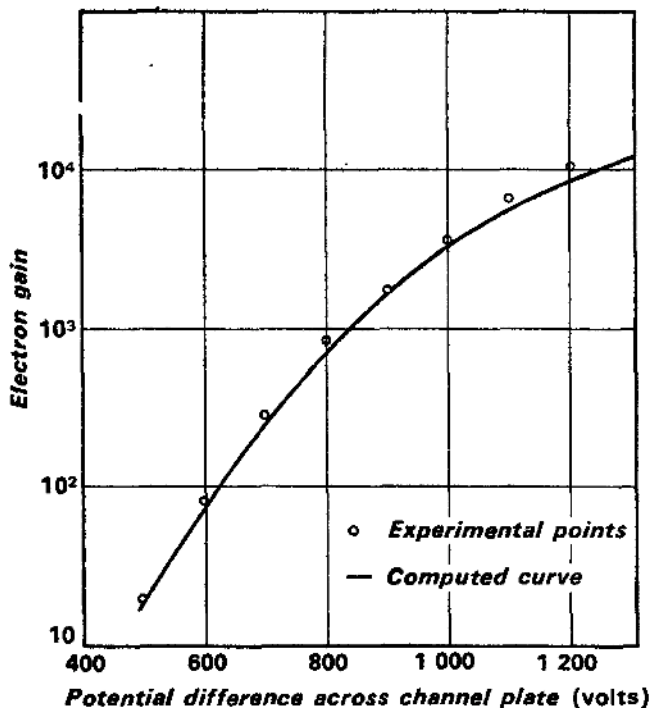
Gain

The precise gain of any one channel plate is determined by the detailed processing schedule used in its manufacture. Individual plates made by the same basic process do not have exactly identical gains because of the inevitable slight variations which occur in practice. The computer model represents the ideal case in which only one parameter is varied at a time.

Figure 1 shows the computed variation of electron gain with the applied voltage across a channel plate with a length to diameter ratio α of 40. On the same diagram a series of experiment points are plotted for comparison. These were measured on a 4 mm thick channel plate composed of 100 μm diameter channels. The agreement in the shape of the curve between experiment and computation is close. The gain rises from a value of about a hundred at 600 V to ten thousand at 1 200 V.

From the computer results, a *universal gain curve* can be plotted for a particular set of input conditions for the primary electron. Figure 2 is the curve for a primary electron with 2 000 eV energy striking the channel surface at an angle of 13° to the channel axis. This curve is a summary of the following sets of information :

- the variation of electron gain with voltage across the plate for constant values of the length to diameter ratio α from 10 to 120 ;
- the variation of electron gain with length to diameter ratio α for constant applied voltage ;



Gain

La valeur exacte du gain de toute galette de micro-canaux est le résultat des nombreux traitements employés au cours de sa fabrication. Cependant, du fait des légères variations qui apparaissent inévitablement dans la pratique, les galettes élaborées selon la même méthode de base n'ont pas exactement le même gain. Le modèle mathématique représente le cas idéal dans lequel on ne fait varier qu'un paramètre à la fois.

La figure 1 donne les variations du gain en électrons, calculées en fonction de la tension appliquée à la galette, pour un rapport longueur/diamètre α égal à 40. A titre de comparaison, on a fait apparaître sur la même figure une série de points expérimentaux obtenus avec une galette de 4 mm d'épaisseur réalisée en canaux de 100 μm de diamètre. On peut constater l'étroite concordance entre le calcul et l'expérience: le gain, égal à 100 environ pour 600 V, augmente jusqu'à 10 000 pour 1 200 V.

A partir des résultats obtenus à l'ordinateur, on peut tracer une courbe universelle de gain correspondant à des conditions bien définies pour l'électron primaire frappant l'entrée du multiplicateur. La figure 2 donne cette courbe pour un électron primaire de 2 000 eV, qui frappe la paroi du canal en faisant un angle de 13° avec l'axe du canal. Cette courbe, ou plutôt ce réseau, est, sous forme graphique, la synthèse des informations suivantes :

- la variation du gain en électrons en fonction de la tension appliquée à la galette, pour différentes valeurs du rapport longueur/diamètre α allant de 10 à 120 ;
- la variation du gain en électrons en fonction du rapport longueur/diamètre α , pour différentes valeurs de la tension appliquée ;
- les variations du gain en électrons en fonction du rapport α pour différentes valeurs de la tension normée. (on obtient la tension normée W en divisant la tension totale appliquée par le rapport α : c'est en fait la différence de potentiel qui existe entre deux points séparés par une distance axiale égale au diamètre du canal).

Pour chaque tension appliquée, il y a une valeur optimale de α à laquelle correspond le gain maximal: c'est autour de cette valeur que le gain est le moins sensible aux légères variations qui apparaissent en pratique sur le diamètre du canal. Il en résulte qu'une

Fig. 1. Gain as a function of voltage with l/d constant. $\alpha = l/d = 40$; primary electron energy = 2 000 eV.

Variations du gain en fonction de la tension.

$\alpha = l/d = 40$; énergie de l'électron primaire = 2 000 eV.

— The variation of electron gain with length to diameter ratio α when the normalized voltage is kept constant (the normalized voltage W is the applied voltage divided by the length to diameter ratio and is the potential difference which exists between two points along the channel separated by an axial distance equivalent to one channel diameter).

For each particular applied voltage, there is an optimum value of α which gives the maximum gain and near this value the gain is least sensitive to the small variations in channel diameter which occur in practice. If the channel plate is designed to operate in this region its spatial uniformity will be best. The optimum value of α occurs when the applied potential is approximately 22α volts. For normal imaging applications suitable values of the length to diameter ratio α lie between 40 and 60.

Current transfer characteristics

The computer simulation of gain is applicable to circumstances in which the maximum output current from any particular channel is substantially less than the conduction current flowing through its walls. As the individual multipliers in the channel plate are nearly independent of each other, the gain performance of a channel plate uniformly illuminated with electrons can be represented by the model provided the maximum output current from the plate is a lot less than the total conduction current. This conduction or standing current is determined by the plate resistance and the applied voltage.

Figure 3 represents the measured current transfer characteristic of a channel plate with a resistance of $10^9 \Omega$. The characteristic is linear and the gain is constant until the output current reaches about 10 % of the standing current. With higher input currents, the plate begins to show saturation effects. The characteristic starts to curve over towards the horizontal and the effective gain drops.

If the resistance of the plate remained constant, the output current would saturate at a value close to that of the conduction current. However, the effective resistance of the plate changes slightly when operated in this way because the cascade of electrons forms a parallel resistive path. This causes the standing current to rise and the saturation effect is more gradual than might otherwise be expected. In this way, an output current can be drawn which exceeds the nominal conduction current.

The onset of saturation determines the maximum linear light output that can be obtained from an image intensifier which uses a channel plate in combination with a phosphor screen.

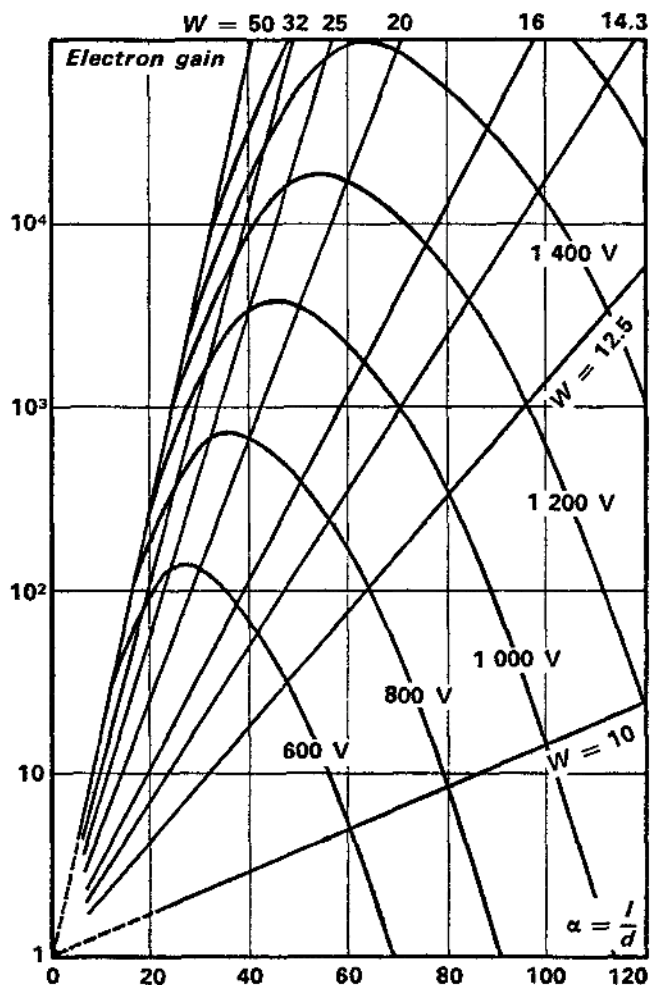


Fig. 2. Universal gain curve for a channel plate.
 $W = V/\alpha$; primary electron energy = 2 000 eV.

Courbe universelle de gain pour une galette de micro-canaux.

$W = V/\alpha$; énergie de l'électron primaire = 2 000 eV.

galette conçue pour fonctionner dans ce domaine présentera les meilleures caractéristiques d'uniformité spatiale. La valeur optimale de α correspond à une tension appliquée d'environ 22α volts. Pour les galettes utilisées dans les tubes images, α est choisi entre 40 et 60.

Caractéristiques de transfert de courant

La simulation à l'ordinateur est applicable au domaine de fonctionnement correspondant, pour chaque canal, à un courant de sortie maximal très nettement inférieur au courant de conduction circulant dans ses parois. Comme, dans une galette, tous les canaux sont pratiquement indépendants les uns des autres, on peut se servir du modèle pour obtenir les caractéristiques de

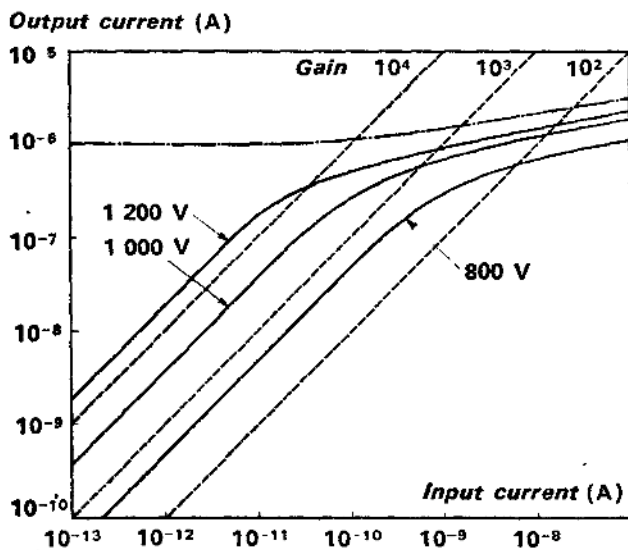


Fig. 3. Current transfer characteristics of a channel plate.

Channel plate resistance = $10^9 \Omega$.

----- Channel plate standing current at 1 000 V.

Caractéristiques de transfert de courant d'une galette.

Résistance de la galette = $10^9 \Omega$.

----- Courant de conduction de la galette à 1 000 V.

Pulse height distribution

In the preceding sections, the average gain has been implied whenever gain has been mentioned. In fact the gain varies from pulse to pulse because of the statistical nature of the multiplication process. The pulse height distribution is a measure of this variation. It is possible to measure the pulse height distribution of a channel plate by several different methods. Each experiment shows that the distribution has a nearly negative exponential form. When the computer model is used to simulate the usual operating conditions for a channel plate, the result is also a distribution which has a nearly negative exponential form; figure 4 shows the measured distribution from a channel plate and compares it with a computed distribution.

However, the precise form of the computed distribution is determined to a considerable extent by the conditions which apply to the first collision of the primary electron with the channel wall. In the most favourable case when a primary electron with about 800 eV energy strikes the wall at a glancing

gain d'une galette éclairée uniformément par un faisceau d'électrons, pourvu que l'on fixe au courant de sortie une valeur maximale très inférieure au courant de conduction total. Ce courant de conduction, appelé encore courant de pont, est défini par la résistance de la galette et la tension appliquée.

La figure 3 donne la courbe de transfert de courant mesurée sur une galette ayant une résistance de $10^9 \Omega$. La caractéristique est linéaire, donc le gain est constant, jusqu'au moment où le courant de sortie atteint environ 10 % de la valeur du courant de conduction. Pour des courants d'entrée plus élevés, la galette présente un effet de saturation, qui se traduit par un fléchissement de la courbe vers l'horizontale et par une chute du gain.

Si la résistance de la galette demeurait constante, le courant de sortie aurait un niveau de saturation qui serait très proche du courant de conduction. En réalité, lorsque la galette travaille en saturation, sa résistance équivalente change légèrement en raison de la résistance créée en parallèle par le faisceau d'électrons multipliés. Cet effet entraîne un accroissement du courant de conduction, et la saturation apparaît plus graduellement qu'on ne pouvait l'escompter. Dans ces conditions, le courant de sortie peut être supérieur au courant de conduction nominal.

Le début de sa saturation détermine le niveau maximal de lumière, en régime linéaire, que l'on pourra obtenir sur un intensificateur d'images comprenant une galette de microcanaux combinée à un écran luminescent.

Distribution en amplitudes des impulsions

Dans tout ce qui précède, le terme de gain a toujours été employé au sens de gain moyen. En fait, le gain varie d'une impulsion à une autre à cause de la nature statistique du processus de multiplication. La distribution en amplitudes des impulsions est une mesure de cette variation.

Pour une galette de microcanaux, on peut la mesurer expérimentalement de plusieurs façons, et ces mesures, d'ailleurs, concluent toutes à une distribution de forme pratiquement exponentielle à coefficient négatif. On arrive à la même conclusion en simulant le fonctionnement d'une galette à l'aide du modèle mathématique; la figure 4 permet de comparer la courbe expérimentale obtenue avec une galette à la courbe calculée par ordinateur.

Cependant, la forme précise de la distribution donnée par l'ordinateur dépend dans une très large mesure des conditions selon lesquelles intervient la première collision de l'électron primaire avec la paroi du canal. Dans le cas le plus favorable, lorsqu'un électron primaire ayant une énergie de 800 eV frappe la paroi

angle of 6° to the surface, the relative number of small pulses is less than would occur in a perfect negative exponential distribution. Similarly, if the energy and angle of the first collision are sufficiently unfavourable, the pulse height distribution has a higher relative number of small pulses than a negative exponential distribution.

The computer model has also been used to study the effect of a considerable enhancement of the secondary emission yield function for the first collision. In conventional electron multipliers the effect of improving the gain of the first dynode is to improve the pulse height distribution from the multiplier [9]. Similarly, as the yield function for the first collision in the channel multiplier is enhanced, the computer predicts that the pulse height distribution will gradually change from a negative exponential form towards a peaked distribution. If this change can be achieved in practice, it will improve the performance of the channel plate by reducing its noise factor.

The noise factor

Whenever a practical electron multiplier is used in a device, some of the information which is potentially available is lost. The noise factor F is a means of defining this loss of information. In a channel plate, there are three ways in which information can be lost. The first two involve the effective loss of primary electrons and the third a degradation of the signal.

1. If primary electrons strike the closed area of the channel plate, they will not start electron cascades.
2. The primary electrons may successfully enter the channels and either fail to start an electron cascade or else start a pulse which dies out after a few stages. The detection efficiency of a channel multiplier is defined as the ratio of output pulses to input electrons.
3. The pulse height distribution contributes to the loss of information, by introducing some uncertainty about the number of input electrons which have actually produced a particular output pulse. The uncertainty produced by a negative exponential distribution is greater than that from a peaked pulse height distribution.

The noise factor F is :
$$\frac{1}{\gamma} \left[1 + \frac{\sigma^2}{G^2} \right],$$

where γ , σ^2 and G have been defined earlier ; the value of γ , the effective open area, is related to the physical open area of the channel plate ; this is normally greater than 60 % of the area of the face ; the term in brackets combines the effect of the pulse height distribution and the detection efficiency of the multipliers in the channel plate ; this term is obtained directly from the computer simulation.

sous une incidence rasante c'est-à-dire un angle de 6° avec la surface, le nombre relatif de petites impulsions est plus faible que celui correspondant à une distribution parfaitement exponentielle à coefficient négatif. Dans le cas contraire (énergie et angle de la première collision mal choisis), ce nombre est plus élevé.

On s'est également servi du modèle mathématique pour étudier l'influence d'une forte augmentation du coefficient d'émission secondaire correspondant à la première collision. Il est en effet connu que, pour les multiplicateurs conventionnels d'électrons, l'augmentation du gain de la première dynode apporte une amélioration à la distribution en amplitudes de la chaîne de multiplication [9]. De même, pour le multiplicateur canalisé, l'ordinateur prévoit que si l'on augmente le rendement en électrons de la première collision la distribution en amplitudes se modifiera et passera graduellement d'une exponentielle négative à un type gaussien. Si cette modification peut être réalisée dans la pratique, elle améliorera le fonctionnement de la galette en réduisant son facteur de bruit.

Le facteur de bruit

L'utilisation d'un multiplicateur réel d'électrons dans un équipement entraîne inévitablement la perte d'une partie de l'information potentielle disponible. Le facteur de bruit F permet de définir cette perte d'information qui intervient de trois façons dans une galette de microcanaux : les deux premières mettent en jeu la perte effective d'électrons primaires, la dernière est due à une dégradation du signal.

1. Les électrons primaires qui frappent l'entrée de la galette en dehors de la surface ouverte correspondant aux canaux, ne donnent pas naissance à un processus de multiplication.

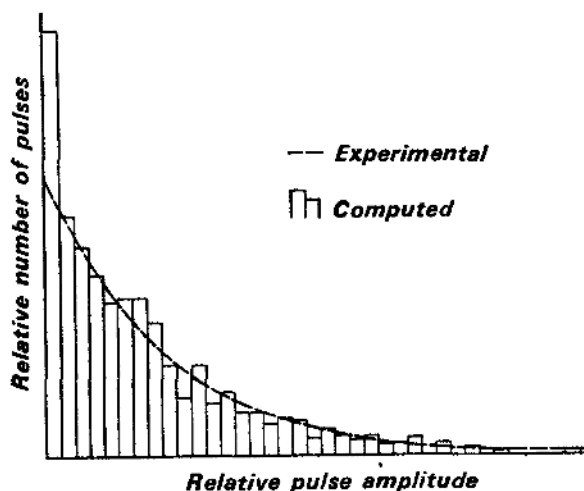


Fig. 4. The pulse height distribution.

Distribution en amplitudes des impulsions de sortie.

Noise factor

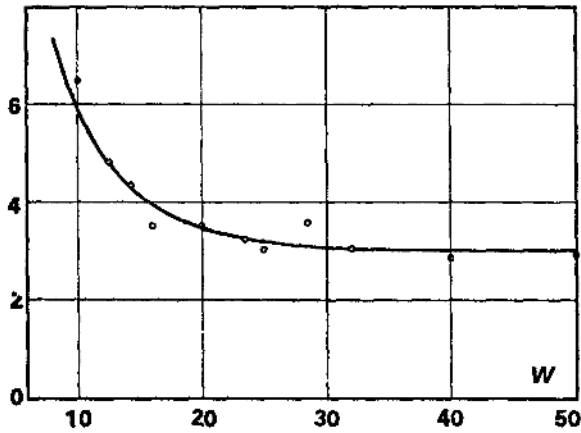


Fig. 5. Predicted variation of noise factor as a function of normalized voltage $W = V/\alpha$.

Primary electron energy = 2 000 eV ; $\gamma = 0.6$.

Variations du facteur de bruit calculées en fonction de la tension normée $W = V/\alpha$.

Energie des électrons primaires = 2 000 eV ; $\gamma = 0.6$.

Figure 5 illustrates the predicted variation of the noise factor with the normalized voltage W on the channel plate. The effective open area has been taken to be 0.6. If α is constant, the curve shows how the noise factor is expected to vary with channel plate voltage. As the applied voltage increases, the noise factor drops asymptotically toward a value of about 3.

Figure 6 compares the measured and computed variation in noise factor as the energy of the incident electrons is increased. The computed curve shows more variation than the experimental result and has a minimum at a primary electron energy of about 1 000 eV. In the simulation, the angle of incidence of the primary electrons was fixed at 13° to the channel axis, while in the experiment the angle varied from 0° to 30° . The practical results represent the average of a series of computed curves covering this whole range of incident angles.

The variation of noise factor with primary electron energy results from the change in secondary emission yield at the first collision. Figure 7 shows the way in which the detection efficiency of the open area of a channel plate is expected to vary with primary energy. Similar curves have been observed with single channel electron multipliers [10, 11] although the operating conditions are somewhat different. The maximum detection efficiency corresponds to the peak in the secondary emission yield curve for the particular angle of incidence of the primary electrons.

2. Les électrons primaires qui pénètrent dans les canaux peuvent, soit ne pas amorcer de multiplication, soit en amorcer une qui s'arrête au bout de quelques étages dans le canal. L'efficacité de détection d'un multiplicateur canalisé est définie comme le rapport du nombre d'impulsions de sortie au nombre d'électrons à l'entrée.

3. La distribution en amplitudes contribue à la perte d'information en introduisant une incertitude sur le nombre d'électrons primaires qui ont réellement produit une impulsion de sortie déterminée. L'incertitude due à une distribution exponentielle négative est plus importante que celle causée par une distribution présentant un maximum.

Le facteur de bruit F est :
$$\frac{1}{\gamma} \left[1 + \frac{\sigma^2}{G^2} \right];$$

γ , σ^2 , et G^2 ont été définis plus haut ; la valeur de γ , surface ouverte utile, est liée à la surface ouverte géométrique de la galette de microcanaux ; celle-ci représente habituellement plus de 60 % de la face d'entrée de la galette ; le terme entre crochets est une combinaison de l'influence de la distribution en amplitudes et de l'efficacité de détection des multiplicateurs dans la galette ; il est obtenu directement à partir de la simulation par ordinateur.

La figure 5 donne la variation calculée du facteur de bruit en fonction de la tension normée W appliquée à la galette, pour une surface ouverte utile de 0,6. En gardant α constant, on obtient ainsi par le calcul les variations du facteur de bruit en fonction de la tension sur la galette ; lorsque cette tension augmente,

Noise factor

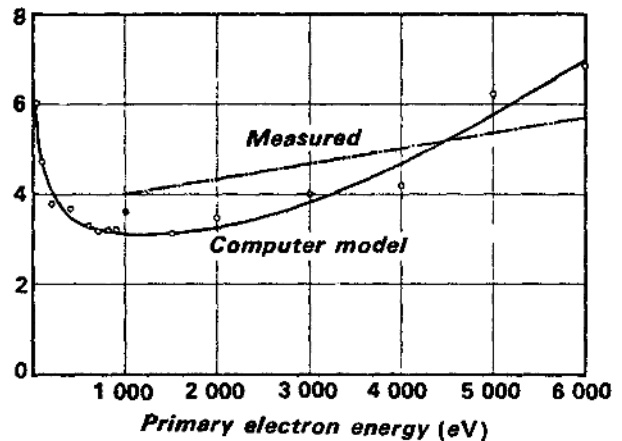


Fig. 6. The variation of noise factor with primary electron energy.

$\gamma = 0.6$; $\alpha = 60$; $V_{channel} = 1\ 000$ V.

Variations du facteur de bruit en fonction de l'énergie de l'électron primaire.

$\gamma = 0.6$; $\alpha = 60$; $V_{galette} = 1\ 000$ V.

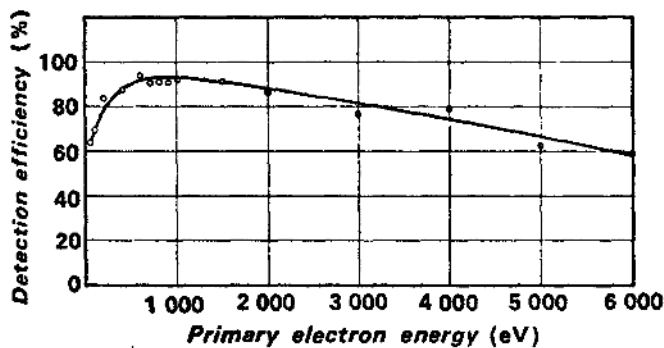


Fig. 7. Predicted variation of detection efficiency with primary electron energy.

$\alpha = 60$; $V_{\text{channel}} = 1\,000\text{ V}$; collision angle = 13° to channel axis.

Variations de l'efficacité de détection calculées en fonction de l'énergie de l'électron primaire.

$\alpha = 60$; $V_{\text{galette}} = 1\,000\text{ V}$; angle d'impact = 13° par rapport à l'axe du canal.

Collision energy distribution

The quasi-negative exponential form of the pulse height distribution from the channel plate is produced by the spread of collision energies and impact angles of the secondary electrons in the cascade. One version of the computer model is able to produce the collision energy distribution of the secondary electrons.

This is shown in figure 8 for a channel plate with a length to diameter ratio of 50 and with 1 000 V applied between the faces of the plate. The energy distribution rise rapidly to a peak at about 35 eV and then falls away with a long tail which stretches out to almost

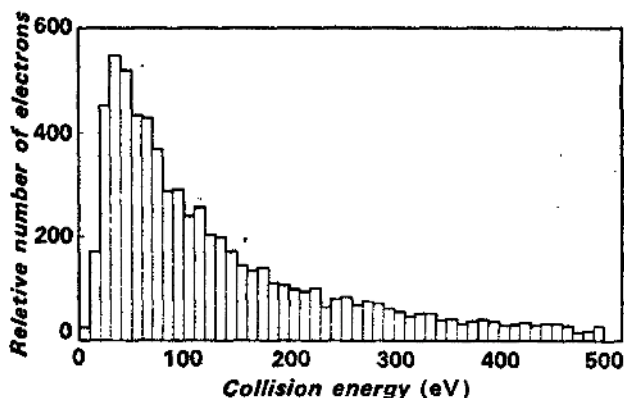


Fig. 8. Computed collision energy distribution for the electrons in a channel.

$\alpha = 50$; $V_{\text{channel}} = 1\,000\text{ V}$;
when they strike the wall

25 % of electrons have energies less than 54 eV

50 % of electrons have energies less than 110 eV

75 % of electrons have energies less than 245 eV.

Courbe calculée de la distribution de l'énergie de collision des électrons dans un canal.

$\alpha = 50$; $V_{\text{galette}} = 1\,000\text{ V}$;

au moment de la collision sur la paroi

25 % des électrons ont une énergie inférieure à 54 eV

50 % des électrons ont une énergie inférieure à 110 eV

75 % des électrons ont une énergie inférieure à 245 eV

le facteur de bruit diminue pour atteindre asymptotiquement une valeur voisine de 3.

Sur la figure 6 sont portées simultanément les variations calculées et mesurées du facteur de bruit lorsqu'on augmente l'énergie des électrons incidents. La courbe calculée présente une variation plus accentuée que celle mesurée, et a un minimum pour une énergie d'électrons primaires voisine de 1 000 eV.

Dans la simulation, on avait choisi pour les électrons primaires un angle d'impact de 13° avec l'axe du canal, alors que les mesures expérimentales correspondent à un angle variant de 0° à 30° . Le résultat pratique est en réalité la moyenne d'une série de courbes obtenues à l'ordinateur, et couvrant toute cette gamme d'angles d'impact.

Les variations du facteur de bruit en fonction de l'énergie des électrons primaires proviennent de la modification du coefficient d'émission secondaire au moment de la première collision. La courbe de la figure 7 montre les variations de l'efficacité de détection de la partie ouverte d'une galette, calculées en fonction de l'énergie des électrons primaires: des courbes semblables ont été obtenues sur des multiplicateurs uniques [10, 11], bien que les conditions de fonctionnement fussent sensiblement différentes.

Le maximum de l'efficacité de détection correspond au maximum de la courbe d'émission secondaire, pour l'angle d'impact considéré des électrons primaires.

Distribution de l'énergie de collision

La forme très proche d'une exponentielle négative que présente la distribution en amplitudes d'une galette est due à la dispersion des énergies de collision et des angles d'impact des électrons secondaires au cours du processus de multiplication. On peut obtenir, avec l'une des versions du modèle mathématique, la distribution de l'énergie de collision des électrons secondaires.

La figure 8 donne la distribution calculée pour une galette de rapport $l/d = 50$, à laquelle est appliquée une tension de 1 000 V. La distribution présente un maximum correspondant à une énergie de 35 eV, puis

1 000 eV. For this type of distribution, the quartiles or deciles are more useful values than the mean energy. The quartiles are the energy values which divide the electron distribution in quarters. The deciles are the corresponding values which divide the distribution into tenths.

The curve shows that half the electrons collide with the wall with energies less than 110 eV. The spread of collision energies indicates the limitations inherent in attempting to analyse the performance of the channel multiplier in terms of a number of individual stages.

Output energy distribution

Another version of the computer model is able to produce the energy distribution of electrons leaving the output of the channel plate. It is important to know the form of this distribution as it has a considerable effect on the performance of the channel plate when it is used in an imaging device.

Figure 9 illustrates the computed energy distribution of the electrons leaving a channel plate. With the electron energy divided into 10 eV intervals, the distribution has a continuously decreasing form. Again, the quartiles or deciles are useful for specifying the distribution and for comparing experimental results with the computer model's predictions.

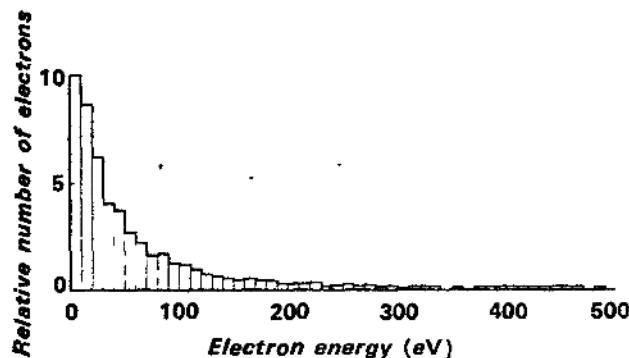


Fig. 9. Calculated distribution of electrons leaving the channel plate.

$\alpha = 60$; $V_{\text{channel}} = 1\,000\text{ V}$;
 25 % of electrons have an exit energy less than 13.5 eV
 50 % of electrons have an exit energy less than 32.5 eV
 75 % of electrons have an exit energy less than 77 eV.

Courbe calculée de la distribution en énergies des électrons à la sortie de la galette.

$\alpha = 60$; $V_{\text{galette}} = 1\,000\text{ V}$;
 25 % des électrons ont une énergie de sortie inférieure à 13,5 eV
 50 % des électrons ont une énergie de sortie inférieure à 32,5 eV
 75 % des électrons ont une énergie de sortie inférieure à 77 eV.

décroit lentement en présentant une queue de caractéristique qui s'étend jusqu'à 1 000 eV. Pour ce type de distribution, les quartiles ou les déciles sont des valeurs plus utiles à exploiter que l'énergie moyenne. Les quartiles sont les valeurs d'énergie correspondant à une division de la distribution en quatre parties ; de même les déciles sont celles qui correspondent à une division en dixièmes.

La courbe montre que la moitié des électrons heurtent les parois avec une énergie inférieure à 110 eV. Cette dispersion des énergies de collision est l'obstacle majeur rencontré lorsqu'on essaie d'analyser le fonctionnement d'un multiplicateur canalisé comme s'il présentait un nombre déterminé d'étages de multiplication.

Distribution en énergies des électrons à la sortie de la galette

A l'aide d'une autre version du modèle mathématique, on peut obtenir la distribution en énergies des électrons qui sortent de la galette. Il est important de connaître la forme de cette distribution, car elle joue un rôle primordial dans les caractéristiques de la galette lorsque celle-ci est employée dans un tube à images.

La figure 9 donne la distribution en énergies des électrons émergents, obtenue par le calcul. En choisissant des intervalles de 10 eV sur l'axe des énergies, on voit que la distribution présente une décroissance continue. Là encore, l'emploi des quartiles ou des déciles permet aisément de caractériser la distribution et de comparer les résultats expérimentaux à ceux qui ont été prévus par l'ordinateur.

La figure 10 permet de comparer les résultats calculés et les résultats obtenus à l'aide d'une expérience préliminaire destinée à mesurer la distribution des électrons à la sortie de la galette [12]. Pour cette mesure, on a placé une grille polarisée entre la sortie de la galette et un écran luminescent. Les électrons qui possèdent une énergie suffisante traversent la grille et sont ensuite accélérés sur l'écran où l'on mesure la quantité de lumière produite. On constate sur la courbe que les énergies mesurées par cette méthode sont légèrement inférieures aux énergies calculées par ordinateur, mais que, excepté pour les valeurs les plus basses du potentiel retardateur, la concordance des résultats est très satisfaisante.

La distribution en énergies et la distribution angulaire des électrons sortant de la galette ont toutes les deux une importance considérable sur la qualité de l'image que la galette est apte à transmettre lorsqu'on l'utilise avec un écran luminescent dans un tube à images. Afin d'étudier ce point particulier, on simule les électrons sortant de la galette à l'aide du modèle mathématique :

Figure 10 is a comparison of the results from a preliminary experiment to measure the output energy distribution [12] with the results from the model. In the experiment, a retarding grid was used to cut off a proportion of the output electrons. The electrons which have sufficient energy to pass through the grid were accelerated onto a fluorescent screen and the light output was monitored. The experimental results have slightly lower energies than the computed values but, except at the lowest values of the retarding potential, the agreement between experiment and computation is quite good.

The energy and angular distributions of the electrons leaving the channel plate have a considerable effect on the resolution capabilities of the device when it is used in conjunction with a phosphor screen in an image tube. In order to study this effect, the computer model is used to simulate the output electrons from the channel plate. The data from the model is then used in another programme which is able to represent the electric fields at the channel plate output and between channel plate and screen. Using this programme it is possible to determine the shape of the spot from a single channel in the plate when it is imaged onto the screen.

Modulation transfer function and resolution

The concept of *modulation transfer function* is rather complex, especially when it is used to specify the performance of a channel plate in an imaging system. A good introduction to the subject is given in reference [13].

When the output electrons from an individual channel are imaged onto the phosphor screen of an imaging device, the point spread function is represented by the shape of spot formed on the screen. With a channel multiplier, this spot may appear as a bright ring with a less bright centre. The point spread function is the basic unit of the image from a channel plate.

For mathematical convenience it is usual to work in terms of the line spread function which is equivalent to a point spread function integrated in one direction or, alternatively, to the point spread function scanned with a very narrow slit.

The modulation transfer function is equivalent to the Fourier analysis of the line spread function and represents the way the contrast of the image of a sinusoidally varying pattern depends on the spatial frequency of the pattern (fig. 11).

The value of the concept of the modulation transfer function (MTF) is that the individual MTF's of various independent parts of a system can be combined by simple multiplication. With a channel plate, the

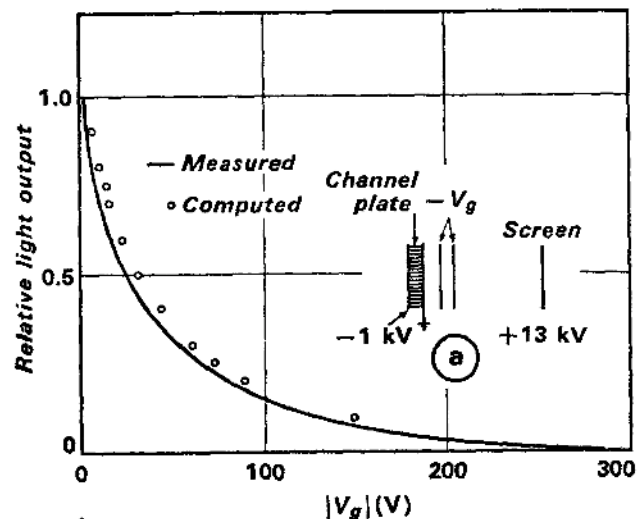


Fig. 10. Proportion of output electrons whose energy exceeds the retarding potential (V_g).

a. Experimental arrangement

Proportion des électrons de sortie dont l'énergie est supérieure au potentiel retardateur (V_g).

a. Dispositif expérimental.

les données acquises ainsi sont ensuite introduites dans un autre programme qui représente les champs électriques existant à la sortie de la galette et entre la galette et l'écran. On peut ainsi déterminer la forme du point lumineux obtenu sur l'écran et correspondant à un seul canal de la galette.

Fonction de transfert de modulation et résolution

La notion de fonction de transfert de modulation est assez complexe, surtout lorsqu'elle s'applique à la détermination des caractéristiques d'une galette de microcanaux dans un tube à images. On trouvera dans l'article de R.L. Lamberts [13] une bonne introduction à ce sujet.

Lorsque l'on forme sur l'écran luminescent l'image des électrons provenant d'un canal de la galette, la fonction d'élargissement du point est donnée par la forme de la tache obtenue. Avec un multiplicateur canalisé, cette tache peut apparaître sous la forme d'un anneau brillant dont le centre est plus sombre. La fonction d'élargissement du point représente l'unité élémentaire de l'image donnée par une galette de microcanaux.

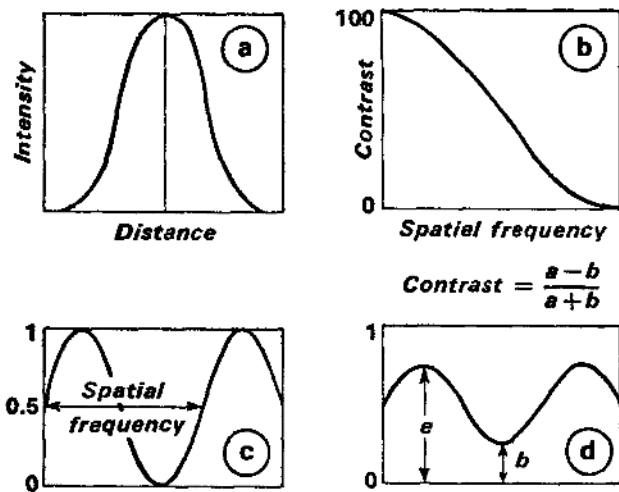


Fig. 11. Concepts related to the modulation transfer function.

The line spread function (a) is Fourier analysed to give the MTF (b). The input sinusoidal pattern (c) after passing through a linear system becomes the output sinusoidal pattern (d).

Les principes de la fonction de transfert de modulation.

La fonction d'élargissement de ligne (a) donne par analyse de Fourier la FTM (b).

La mire sinusoidale d'entrée (c) donne après passage dans un système linéaire la mire sinusoidale de sortie (d).

input to each channel also makes a contribution to the overall MTF as it acts as an independent sampling aperture. In addition, the fact that a channel plate consists of a hexagonal packed array of identical devices complicates the concept of limiting resolution. Limiting resolution is usually defined as the spatial frequency at which the contrast on the MTF has dropped to 3%. This definition cannot always be used with channel plates in imaging devices. Once the spots corresponding to individual channels are visible, ambiguities can begin to occur (moiré effect). In some positions, patterns of high spatial frequency are clearly visible, while in others the true lines vanish and false lines and patterns appear. For this reason, it is useful to define a resolution at which genuine lines are just visible for all orientation of the array.

For a hexagonal array, with D the centre to centre separation of the channels measured in microns, the limit is at a spatial frequency of $\frac{1\ 000}{1.732D}$ cycles \cdot mm $^{-1}$. In

certain orientations, it may be possible to see patterns

with frequencies up to $\frac{1\ 000}{D}$ cycles \cdot mm $^{-1}$.

Pour la commodité de l'analyse mathématique, on travaille plus volontiers sur la fonction d'élargissement de ligne : celle-ci est équivalente à une fonction d'élargissement de point intégrée suivant un axe, ou encore à une fonction de point analysée par balayage à l'aide d'une fente très fine.

La fonction de transfert de modulation est la transformée de Fourier de la fonction d'élargissement de ligne : elle représente les variations du contraste observées sur l'image d'une mire sinusoidale en fonction de la fréquence spatiale de cette mire (fig. 11).

L'intérêt du principe de la fonction de transfert de modulation (FTM), réside dans la possibilité de combiner par simple multiplication les FTM de chacune des parties composant un système. Dans une galette, l'entrée de chaque canal intervient aussi dans la FTM globale, puisqu'elle joue le rôle d'un diaphragme d'analyse indépendant. De plus, la structure hexagonale de la galette, due à l'empilement de rangées de canaux identiques, rend encore plus délicate la notion de limite de résolution. Habituellement on appelle résolution limite la fréquence spatiale pour laquelle le contraste mesuré sur la FTM est égal à 3%. Cette définition n'est pas toujours applicable aux tubes images comportant une galette de microcanaux. En effet, si la qualité du tube est suffisante pour que l'on puisse discerner les points lumineux correspondant à chaque canal,

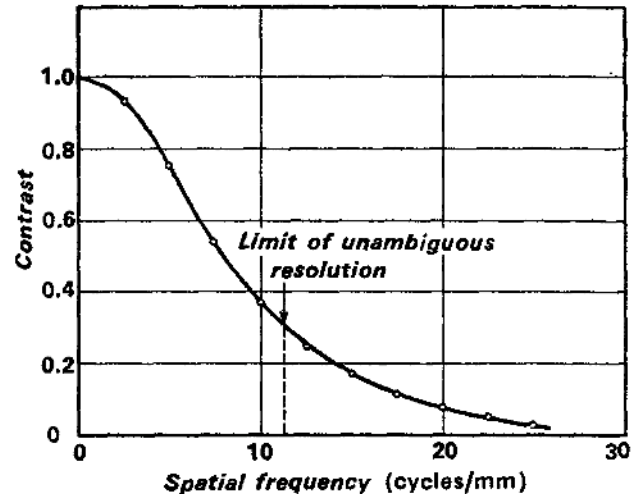


Fig. 12. The MTF of a channel plate containing 40 μ m channels.

$\alpha = 40$; $V_{\text{channel}} = 800$ V.

There is a 1 mm gap between channel plate output and screen with a potential difference of 5 kV across it.

FTM d'une galette ayant des canaux de 40 μ m de diamètre.

$\alpha = 40$; $V_{\text{galette}} = 800$ V.

Distance galette — écran = 1 mm

Tension galette — écran = 5 kV.

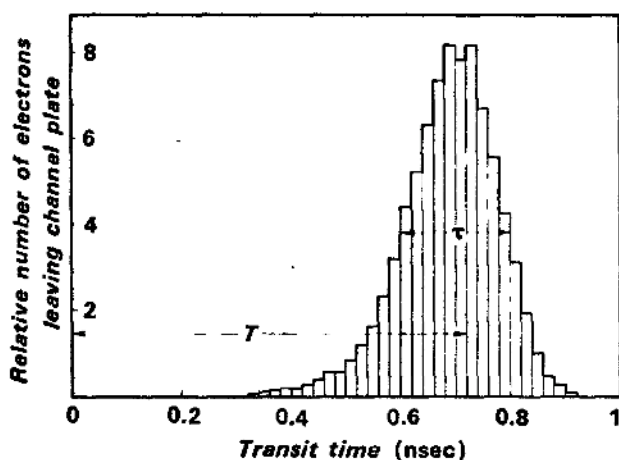


Fig. 13. Transit time distribution for electrons leaving a channel plate.

Channel diameter = 40 μm ; channel length = 2 mm ;
 $V_{\text{channel}} = 1\,300\text{ V}$.
 Transit time $T = 0.71\text{ nsec}$; transit time spread $\tau = 0.2\text{ nsec}$.

Distribution du temps de transit des électrons sortant d'une galette.

Diamètre des canaux = 40 μm ; longueur = 2 mm ;
 $V_{\text{galette}} = 1\,300\text{ V}$;
 Temps de transit $T = 0.71\text{ ns}$; dispersion du temps de transit $\tau = 0.2\text{ ns}$.

Figure 12 shows the expected MTF of a plate made from 40 μm channels with $D = 50\ \mu\text{m}$ separated from a phosphor screen by a gap of 1 mm with 5 kV across it. With this configuration, the spots from individual channels should be easily visible and the contrast of patterns with spatial frequencies just below the limit of unambiguous resolution will be in excess of 30 %. The computer can be used to simulate the effects of changing the field strength across the gap, the gap spacing and the operating conditions of the channel plate. The experiments which have been undertaken since the MTF's were calculated have agreed quite well with the computed results.

Transit time and transit time spread

The final modification to the computer model has been used to study the transit time and transit time spread of the electron pulses through the channel plate. This has direct relevance to the use of channel plate in high speed photomultipliers [14]. In the computer model, the time that has elapsed since the primary electron initiated the pulse is stored for each electron, and is continually updated until the electron emerges from the channel output.

Figure 13 illustrates the results of the simulation of

on peut voir apparaître des ambiguïtés quant à la fréquence spatiale vraie discernable (effet de moiré) : dans certaines positions, les mires ayant une fréquence spatiale élevée sont parfaitement visibles, alors qu'une orientation différente fait disparaître la mire réelle pour donner naissance à une mire « fantôme » de fréquence différente. Pour cette raison, il est nécessaire de définir une résolution limite qui corresponde à la fréquence spatiale réelle la plus élevée que l'on puisse discerner, quelle que soit l'orientation de la mire par rapport à la structure de la galette.

Pour une structure hexagonale, si l'on appelle D la distance centre à centre des canaux, exprimée en microns, la limite se situe à une fréquence spatiale

de $\frac{1\,000}{1,732D}$ cycles $\cdot\text{mm}^{-1}$. Pour certaines orientations

privilegiées, on peut arriver à distinguer des mires ayant

une fréquence atteignant $\frac{1\,000}{D}$ cycles $\cdot\text{mm}^{-1}$.

La figure 12 donne la FTM théorique d'une galette ayant des canaux de 40 μm de diamètre et une distance D de 50 μm : cette galette est placée à 1 mm d'un écran, la tension entre galette et écran étant de 5 kV. Dans une telle structure, on pourrait aisément distinguer les points lumineux correspondant à chaque canal ; d'autre part on atteint un contraste supérieur à 30 % pour la mire dont la fréquence spatiale est juste inférieure à celle pour laquelle il y a ambiguïté. On peut utiliser l'ordinateur pour observer l'influence de modifications du champ électrique dans l'espace galette-écran, de la distance interélectrode et des conditions de fonctionnement de la galette. Les mesures expérimentales entreprises après le tracé de la FTM théorique sont en excellent accord avec les résultats obtenus par ordinateur.

Temps de transit et dispersion du temps de transit

La version finale du modèle mathématique a permis d'étudier le temps de transit et la dispersion du temps de transit des impulsions électroniques dans la galette de microcanaux. Cette étude est directement liée à l'utilisation des galettes dans des photomultiplicateurs ultra-rapides [14].

Lors de la simulation par ordinateur, on met en mémoire pour chaque électron le temps qui s'est écoulé depuis le moment où l'électron primaire a déclenché la cascade de multiplications : cette information est continuellement remise à jour jusqu'à ce que l'impulsion électronique résultante sorte du canal.

On trouvera figure 13 le résultat de la simulation correspondant à un choix de conditions de fonctionnement. Pour des canaux de 40 μm formant une galette

one set of operating conditions. For channels of 40 μm diameter in a plate 2 mm thick with 1 300 V applied across it, the computed transit time T is 0.71 nsec and the transit time spread T is 0.2 nsec. With a constant channel diameter, these values increase if the channel length is increased and decrease when the applied potential difference across the plate is raised. The low values of the transit time and transit time spread of the channel plate make it attractive for use in very high speed photomultipliers. The results measured in actual devices [14] give $T \sim 1$ nsec and $\tau \sim 0.3$ nsec for the complete tube and so the agreement and calculation is very satisfactory.

Conclusion

The computer model described in this paper was developed originally to give some insight into the gain processes and the cause of the negative exponential form of the pulse height distribution from the channel multiplier plate. Once these objects were achieved, it was possible to extend the model to simulate results which had not been measured at that time. This extension placed heavier demands on the accuracy of the representations of physical processes included in the model.

It is over-optimistic to imagine that the computer model gives a precise picture of the operation of channel multiplier plates. The nature and properties of the secondary emissive surface are still not known in detail; the effect of contaminants on the surface may be significant. It is also likely that some of the secondary electrons are elastically scattered when they strike the wall at near glancing incidence.

In practice, the computer model gives information about the performance of an ideal channel plate in which all the statistical processes can be accurately defined, and whose surface acts in an entirely homogeneous way. Even the secondary emission yield function used in the model, which is designed to fit experimental results, may have no physical significance.

In fact, the general agreement between prediction and experiment is very pleasing. It indicates that the various assumptions made in the model are not too inaccurate. However, computer simulation is not a substitute for experiment; both are equally important.

The value of the computer model lies in its ability to generalize results and produce concise summaries of performance in *universal curves*. It also allows the

de 2 mm d'épaisseur alimentée sous 1 300 V, le temps de transit T est égal à 0,71 ns et la dispersion du temps de transit τ vaut 0,2 ns. Pour un diamètre constant de canal, ces valeurs augmentent si l'on augmente la longueur du canal; par contre elles diminuent si la galette est soumise à une tension plus élevée.

Les faibles valeurs du temps de transit et de sa dispersion dans une galette de microcanaux sont particulièrement intéressantes pour l'emploi de celle-ci dans des photomultiplicateurs ultra-rapides. Les résultats obtenus sur des photomultiplicateurs réels [14] donnent $T \sim 1$ ns et $\tau \sim 0,3$ ns pour le tube complet, ce qui prouve, là encore, un excellent accord entre la théorie et l'expérience.

Conclusion

Le modèle mathématique que nous avons décrit dans cet article avait été conçu à l'origine pour donner un aperçu des processus de gain et savoir pourquoi, dans une galette de microcanaux, la distribution en amplitudes, est une exponentielle négative. Une fois cet objectif atteint, nous avons pu élargir le domaine d'utilisation du modèle pour obtenir, par simulation, des résultats qui n'avaient pas, jusqu'alors, été mesurés. Cette extension a nécessité une description beaucoup plus précise des processus physiques utilisée dans le modèle.

Il serait présomptueux de croire que le modèle mathématique est une représentation exacte du fonctionnement des galettes de microcanaux. La nature et les propriétés de la surface à émission secondaire ne sont pas encore connues de manière détaillée: les effets de contamination de la surface peuvent être déterminants sur ses caractéristiques. Il est d'autre part probable qu'une partie des électrons secondaires sont diffusés élastiquement lorsqu'ils frappent les parois sous incidence rasante.

Pratiquement, le modèle mathématique donne des renseignements sur le fonctionnement d'une galette idéale, dans laquelle tous les processus statistiques peuvent être définis de manière précise et dont la surface présente une homogénéité parfaite. Même la fonction d'émission secondaire utilisée dans le modèle, qui a été conçue pour s'adapter aux résultats expérimentaux, peut n'avoir aucune signification physique. En fait, sur un plan général, l'accord entre le calcul et l'expérience est très satisfaisant. Il prouve que les diverses hypothèses formulées dans le modèle ne sont pas trop erronées. Malgré tout, la simulation à l'ordinateur ne remplace pas l'expérimentation: elles se complètent l'une l'autre.

reasons why the channel plate behaves as it does to be more easily understood and indicates which parameters are critical for satisfactory performance.

L'intérêt du modèle mathématique réside dans le fait qu'on peut généraliser les résultats et résumer les caractéristiques sous forme de courbes universelles. Par ailleurs, ce modèle permet une meilleure compréhension du comportement des galettes et montre quels sont les paramètres déterminants pour obtenir un fonctionnement satisfaisant.

APPENDIX

The function used in the computer model to represent the variation of the secondary emission coefficient as a function of both the energy V and angle of impact θ with respect to the surface normal of the incident electron must satisfy the following results which have been determined by experiment :

— the curve for normal incidence should be a close approximation to the published experimental curves ;

$$— \quad V_m(\theta) = \frac{V_m(0)}{\sqrt{\cos \theta}} ; \quad (1)$$

$$— \quad \delta_m(\theta) = \delta_m(0) \exp [\alpha(1 - \cos \theta)] ; \quad (2)$$

where V_m is the collision energy in eV which is equivalent to δ_m , the maximum secondary emission yield. Both V_m and δ_m are functions of the collision angle θ ($\theta = 0$ at normal incidence) ; α is a constant of the channel multiplier surface [6, 15].

To normalize the expressions let :

$$V' = V/V_m(0) ,$$

$$\delta' = \delta/\delta_m(0) .$$

Now δ' is a function of both V' and θ , so it is assumed that δ' may be taken to be the product of two functions, one of which is a function of θ alone. That is :

$$\delta' = f(V', \theta) F(\theta) .$$

Differentiating with respect to V' :

$$\left(\frac{\partial \delta'}{\partial V'} \right)_\theta = F(\theta) \left(\frac{\partial f}{\partial V'} \right)_\theta .$$

ANNEXE

Nous avons utilisé dans le modèle mathématique une fonction destinée à représenter les variations du coefficient d'émission secondaire en fonction de l'énergie V et de l'angle d'impact θ (repéré par rapport à la normale à la surface) de l'électron incident. Cette fonction doit être en accord avec les résultats suivants, qui ont été déterminés expérimentalement :

— la courbe représentative pour l'incidence normale doit être une très bonne approximation des courbes expérimentales de la bibliographie ;

$$— \quad V_m(\theta) = \frac{V_m(0)}{\sqrt{\cos \theta}} ; \quad (1)$$

$$— \quad \delta_m(\theta) = \delta_m(0) \exp [\alpha(1 - \cos \theta)] ; \quad (2)$$

V_m est l'énergie de collision en eV, qui correspond à δ_m , le coefficient d'émission secondaire maximum. V_m et δ_m sont tous deux fonction de l'angle de collision θ , ($\theta = 0$ pour une incidence normale), α est une constante caractérisant la surface du multiplicateur canalisé [6, 15].

Afin de normer les équations, posons :

$$V' = V/V_m(0) ,$$

$$\delta' = \delta/\delta_m(0) ,$$

δ' est une fonction de V' et de θ ; on suppose que δ' peut être représenté par le produit de deux fonctions, dont l'une ne dépend que de θ :

$$\delta' = f(V', \theta) F(\theta) .$$

En différentiant par rapport à V' , il vient :

$$\left(\frac{\partial \delta'}{\partial V'} \right)_\theta = F(\theta) \left(\frac{\partial f}{\partial V'} \right)_\theta .$$

As the observed secondary emission curves have a single maximum, it is assumed that a possible representation of the function f is :

$$f = A(V')^n \exp(-\beta V' \sqrt{\cos \theta}) ,$$

where A , β and n are constants.

Differentiating with respect to V' :

$$\left(\frac{\partial f}{\partial V'}\right)_\theta = A(nV'^{(n-1)} - \beta V'^n \sqrt{\cos \theta}) \exp(-\beta V' \sqrt{\cos \theta}) \quad (3)$$

When $V' = V'_m$, $\left(\frac{\partial f}{\partial V'}\right)_\theta = 0$ and so :

$$V'_m = \frac{n}{\beta \sqrt{\cos \theta}} .$$

To satisfy equation (1) we must have $n = \beta$ and :

$$\delta' = AV'^\beta F(\theta) \exp(-\beta V' \sqrt{\cos \theta}) . \quad (4)$$

But at the maximum, from equation (2) :

$$\delta'_m = A \left[\frac{1}{\sqrt{\cos \theta}} \right]^\beta F(\theta) \exp(-\beta) = \exp[\alpha(1 - \cos \theta)] \quad (5)$$

so that :

$$F(\theta) = \frac{1}{A} (\sqrt{\cos \theta})^\beta \exp[\alpha(1 - \cos \theta) + \beta] \quad (6)$$

and so, substituting in (4) :

$$\delta' = (V' \sqrt{\cos \theta})^\beta \exp[\alpha(1 - \cos \theta) + \beta(1 - V' \sqrt{\cos \theta})] . \quad (7)$$

The value of β is chosen to fit the published secondary emission curves at normal incidence. In practice it was found better to use two values of β to match the curve over its entire range.

For $V' < 1$, β lies in the region between 0.55 and 0.65. This is the value used to simulate the secondary emission cascade in the channel.

For $V' \gg 1$, β is approximately 0.25. This value is used to simulate the first collision when the primary electron has more than 1 keV of energy.

Comme les courbes expérimentales d'émission secondaire ne présentent qu'un seul maximum, on suppose que la fonction f est de la forme :

$$f = A(V')^n \exp(-\beta V' \sqrt{\cos \theta}) ,$$

où A , β et n sont des constantes.

En différentiant par rapport à V' , on obtient :

$$\left(\frac{\partial f}{\partial V'}\right)_\theta = A(nV'^{(n-1)} - \beta V'^n \sqrt{\cos \theta}) \exp(-\beta V' \sqrt{\cos \theta}) \quad (3)$$

Lorsque $V' = V'_m$, $\left(\frac{\partial f}{\partial V'}\right)_\theta = 0$ donc :

$$V'_m = \frac{n}{\beta \sqrt{\cos \theta}} .$$

Pour satisfaire l'équation (1), il faut que $n = \beta$, donc :

$$\delta' = AV'^\beta F(\theta) \exp(-\beta V' \sqrt{\cos \theta}) . \quad (4)$$

Mais au maximum, d'après l'équation (2) :

$$\delta'_m = A \left[\frac{1}{\sqrt{\cos \theta}} \right]^\beta F(\theta) \exp(-\beta) = \exp[\alpha(1 - \cos \theta)] , \quad (5)$$

il en résulte :

$$F(\theta) = \frac{1}{A} (\sqrt{\cos \theta})^\beta \exp[\alpha(1 - \cos \theta) + \beta] , \quad (6)$$

et en remplaçant $F(\theta)$ par sa valeur dans l'équation (4), il vient :

$$\delta' = (V' \sqrt{\cos \theta})^\beta \exp[\alpha(1 - \cos \theta) + \beta(1 - V' \sqrt{\cos \theta})] . \quad (7)$$

On choisit la valeur de β de façon que la fonction émission secondaire s'adapte aux courbes connues sous incidence normale. En pratique on a trouvé préférable d'utiliser deux valeurs de β de façon à garder la validité de la courbe sur tout son domaine d'application.

Pour $V' < 1$, β est compris entre 0,55 et 0,65. C'est la valeur qui est choisie pour simuler le processus d'émission secondaire dans le canal.

Pour $V' \gg 1$, β est sensiblement égal à 0,25. On utilise cette valeur pour simuler la première collision, lorsque l'électron primaire a une énergie supérieure à 1 keV.

The two forms of the function are approximately equal when $V = 1.5$.

The value of the constant a has been determined by experiment [16] and the value $a = 0.62$ was used throughout the simulation. The function used to simulate the secondary emission characteristics was chosen because its shape fits the experimental curves. It may have no direct physical significance.

The gain of the channel in the model is determined by the precise value of the low energy value of β . When the computer model was first used β was set to 0.65. When the model was recalibrated to take into account the improvement in gain which had occurred in practice, β was changed to 0.60.

Les deux variantes de la fonction sont approximativement égales pour $V = 1,5$.

La constante a a été déterminée expérimentalement [16], et la valeur $a = 0,62$ a été utilisée pour toute la simulation. La fonction permettant de simuler les caractéristiques d'émission secondaire a été choisie en raison de la forme de sa courbe représentative, qui correspond à celle des courbes expérimentales; elle peut n'avoir aucune signification physique réelle.

Le gain du canal dans le modèle est déterminé par la valeur de β correspondant aux faibles énergies. Dans la première utilisation du modèle, on avait pris $\beta = 0,65$. Lorsque, par la suite, le modèle a été recalibré pour tenir compte de l'amélioration du gain obtenu en pratique, la valeur de β a été ramenée à 0,60.

References - References

- 1 ESCHARD (G.) and MANLEY (B.W.). — Principle and characteristics of channel electron multipliers. *Acta Electronica*, vol. 14, n° 1, 1971, pp. 19-39.
- 2 ESCHARD (G.) and WOODHEAD (A.W.). — MicroChannel plates and their applications. *Acta Electronica*, vol. 14, n° 2, 1971, pp. 181-200.
- 3 GRANT (J.M.). — Proc. of the Image Intensifier Symposium, Fort Belvoir, Virginia, U.S.A., Oct. 24-26th, 1961, pp. 63-72.
- 4 BAUMGARTNER (W.) und UNDER (J.). — Über einen Sekundärelektronen-Vervielfacher mit kontinuierlichverteilten Stufen. *Z. angew. Math. Phys.*, Schweiz, vol. 13, n° 5, pp. 514-517.
- 5 ADAMS (J.) and MANLEY (B.W.). — The mechanism of channel electron multiplication. *I.E.E.E. Trans. nucl. Sci.*, U.S.A., vol. NS 13, n° 3, June 1966, pp. 83-99.
- 6 YAKOBSON (A.M.). — Estimation of the multiplication coefficient of a secondary electron multiplier with a continuous dynode [en russe]. *Radiotekh. i Electron.*, U.S.S.R., vol. 11, n° 10, 1966, pp. 1813-1825.
- 7 EVANS (D.S.). — Low energy charged-particle detection using the continuous channel electron multiplier. *Rev. sci. Instrum.*, U.S.A., vol. 36, n° 3, 1965, pp. 375-382.
- 8 SCHMIDT (K.C.) and HENDEE (C.F.). — Continuous channel electron multiplier operated in the pulse saturated mode. *I.E.E.E. Trans. nucl. Sci.*, U.S.A., vol. NS 13, n° 3, June 1966, pp. 100-111, (Tenth Scintillation and Semiconductor Counter Symposium, Washington, 1966).
- 9 MORTON (G.A.), SMITH (H.M.) and KRALL (H.R.). — The performance of high gain first-dynode photomultipliers. *I.E.E.E. Trans. nucl. Sci.*, U.S.A., vol. NS 16, n° 1, Feb. 1969, pp. 92-95, (15th Nuclear Science Symposium, Montreal, Canada, 23-25 oct. 1968).
- 10 BOSQUED (J.M.) and REME (H.). — Caractéristiques des multiplicateurs d'électrons sans fenêtre; utilisation en fusée comme détecteur d'électrons auroraux de faible énergie. *Nucl. Instrum. Methods*, Netherl., vol. 57, 1967, pp. 6-12.
- 11 FRANK (L.A.), HENDERSON (N.K.) and SWISHER (R.L.). — Degradation of continuous channel electron multiplier in a laboratory operating environment. *Rev. sci. Instrum.*, U.S.A., vol. 40, n° 5, 1969, pp. 685-689.
- 12 JOHANNIS (J.H.M.). — Philips Research Laboratories, Eindhoven, Netherl. Private communication.
- 13 LAMBERTS (R.L.). — Application of sine-wave techniques to image forming systems. *J. Soc. Motion Pict. TV Engrs*, U.S.A., vol. 71, n° 9, 1962, pp. 635-640.
- 14 CHEVALIER (P.) et BOUTOT (J.P.). — Photomultiplicateur ultra-rapide. *Acta Electronica*, à paraître.
- 15 BRUINING (H.). — Physics and applications of secondary electron emission. Pergamon Press, 1954.
- 16 CHUIKO (G.) and YAKOBSON (A.M.). — Basic characteristics of lead rich glass as material for secondary electron multipliers with a continuous dynode [en russe]. *Radiotekh. i Elektron.*, U.S.S.R., vol. 11, n° 9, 1966, pp. 1682-1686.