

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ УХУДШЕНИЯ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ШУМ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ ЭКРАНАМИ

А. П. ШПАГИН, Г. А. КУЧЕР

(Представлена научным семинаром НИИ электронной интроскопии)

Приводятся результаты оценки ухудшения отношения сигнал/шум монокристаллическими экранами толщиной 0,5 мм.

В работе [1] нами были рассчитаны энергетические эффективности нескольких монокристаллических экранов в диапазоне энергий 10 Кэв ÷ 10 Мэв.

На рис. 1 приведены значения энергетической эффективности $\varphi_E(E)$, для различных монокристаллических экранов. По рисунку видно, что лучшим по энергетической эффективности является экран из сернисто-

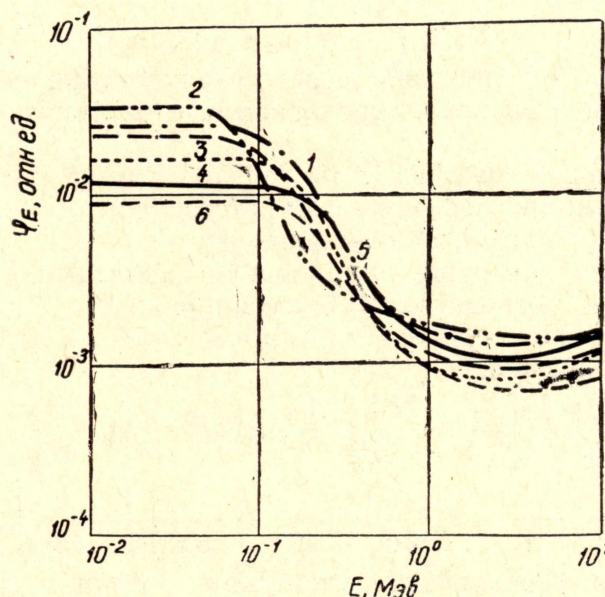


Рис. 1. Энергетические эффективности монокристаллических экранов толщиной 0,5 см: 1 — CdS, 2 — ZnS, 3 — NaJ(Tl), 4 — CsJ(Tl), 5 — CdWO₄, 6 — CaWO₄

го цинка ZnS, за ним следуют экраны из сернистого кадмия CdS и вольфрамата кадмия CdWO₄.

Далеко не всегда энергетическая эффективность является решающей при оценке качества экранов. Иногда экраны следует сравнивать по степени ухудшения отношения сигнал/шум.

Так, например, в экранах, имеющих практическое значение, при поглощении одного гамма-кванта с энергией, большей килоэлектрон-вольт, излучается большое число фотонов, поэтому отношение сигнал/шум на выходе интроскопа при достаточно эффективной оптике будет определяться только отношением сигнал/шум на выходе экрана. Этот же эффект может быть получен при повышении энергии излучения даже при обычной оптике. Поэтому в таких случаях выбирать экраны необходимо, исходя из того, чтобы они по возможности меньше изменяли отношение сигнал/шум.

Изменение отношения сигнал/шум в экране можно характеризовать формулой

$$\varphi_{\psi}(E) = \frac{\Pi(E)}{\sqrt{\Pi_{\Delta}(E)}},$$

где $\Pi(E)$ — средняя энергия, поглощаемая в преобразователе при нормальном падении на его поверхность кванта излучения с энергией E , $\Pi_{\Delta}(E)$ — дисперсия этой энергии.

Точный расчет функций $\Pi(E)$ и $\Pi_{\Delta}(E)$ в настоящее время не представляется возможным, но с достаточной для практического применения точностью эти функции можно вычислить приближенно, учитывая, что применяемые экраны имеют малую толщину. В данной статье функции $\Pi(E)$ и $\Pi_{\Delta}(E)$ были рассчитаны с точностью второго столкновения с учетом вклада аннигиляционных квантов по формулам [2]:

$$\Pi(E) = \Pi_1(E) + \Pi_2(E) + \Pi_a(E)$$

$$\Pi_{\Delta}(E) = \Pi_{1\Delta}(E) + \Pi_{2\Delta}(E) + \Pi_{a\Delta}(E),$$

где

$$\begin{aligned} \Pi_1(E) &= \frac{1}{\mu(E)} (\tau E + \sigma E_{\sigma} + \kappa E_x) \{1 - \exp[-\mu(E) x_0]\} = \\ &= T(E) \{1 - \exp[-\mu(E) x_0]\} \end{aligned}$$

это функция $\Pi(E)$ с точностью первого столкновения, здесь

$T(E)$ — средняя энергия, передаваемая электрону при одном столкновении;

τ, κ, σ — линейные коэффициенты ослабления за счет фотоэффекта, образования пар, комптонэффекта соответственно;

μ — суммарный линейный коэффициент;

$E_x = E - 2mc^2$ — энергия, оставленная квантами, поглощенными в преобразователе посредством образования пар;

mc^2 — энергия покоящегося электрона;

x_0 — толщина экрана.

$$\begin{aligned} E_{\sigma} &= \frac{mc^2 \pi r_0^2}{\sigma_e} \left[\left(1 - \frac{2E_{\gamma} + 3}{E_{\gamma}^2} \right) \ln(2E_{\gamma} + 1) + \frac{6}{E_{\gamma}} - \frac{5}{6} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2E_{\gamma} + 1} - \frac{1}{2(2E_{\gamma} + 1)^2} + \frac{1}{3(2E_{\gamma} + 1)^3} \right], \end{aligned}$$

E_{σ} — энергия, передаваемая электрону отдачи, в среднем при одном комптоновском столкновении;

σ_e — сечение комптоновского рассеяния на одном электроны;

$E_{\gamma} = \frac{E}{mc^2}$ — энергия кванта в единицах mc^2 .

Аналогично

$$\begin{aligned} \Pi_{1\Delta}(E) &= \frac{1}{\mu(E)} (\tau E^2 + \kappa E_x^2 + \sigma f_e) \{1 - \exp[-\mu(E) x_0]\} = \\ &= T_{\Delta}(E) \{1 - \exp[-\mu(E) x_0]\}, \end{aligned}$$

где

$$f_e = \frac{(mc^2)^2 \pi r_0^2}{\sigma_e} \left\{ \left[E_\gamma - \frac{2(2 + E_\gamma)}{E_\gamma} \right] \ln(2E_\gamma + 1) - \frac{17}{12} E_\gamma + 6,6(6) + \right. \\ \left. + \frac{1,16(6)}{1 + 2E_\gamma} + \frac{0,5}{(1 + 2E_\gamma)^2} - \frac{11}{24(1 + 2E_\gamma)^3} + \frac{1}{8(1 + 2E_\gamma)^4} \right\}$$

дисперсия энергии, передаваемой электрону отдачи при комптоновском рассеянии квантов с энергией E .

Энергия, оставляемая квантами после второго столкновения, рассчитывалась по формуле

$$\Pi_2(E) = \int_{E_r}^E \frac{d\sigma}{d\varepsilon} T(\Sigma) \{1 - \exp[-\mu(E) x_0]\} d\varepsilon + \\ + \int_{E''}^E \frac{d\sigma}{d\varepsilon} T(\Sigma) \frac{1}{\frac{\mu(\varepsilon)}{\cos \Theta} - \mu(E)} \times \left\{ \exp \left[\frac{-\mu(\varepsilon) x_0}{\cos \Theta} \right] - \exp[-\mu(E) x_0] \right\} d\varepsilon + \\ + \int_{E_r}^{E''} \frac{d\sigma}{d\varepsilon} T(E) \frac{1 - \exp \left\{ x_0 \left[\mu(E) - \frac{\mu(\varepsilon)}{\cos \Theta} \right] \right\}}{\mu(\varepsilon)/\cos \Theta - \mu(E)} d\varepsilon,$$

где

ε — энергия кванта, претерпевшего одно столкновение;
 E'' и E_r — энергии квантов, рассеянных соответственно на 90° и 180° :

$$E'' = \frac{mc^2 E}{mc^2 + E}, \quad E_r = \frac{mc^2 E}{mc^2 + 2E}.$$

Вклад аннигиляционных квантов учитывался по формуле

$$\Pi_a(E) = \frac{2x(E) T^+}{\mu(E)} \{1 - \exp[-\mu(E) x_0]\} - \\ - x(E) mc^2 T^+ \left\{ \int_{E''}^E \frac{\exp(-\mu^+ x_0 / \cos \Theta) - \exp[-\mu(E) x_0]}{\varepsilon^2 [\mu^+ / \cos \Theta - \mu(E)]} d\varepsilon + \right. \\ \left. + \int_{E_r}^{E''} \frac{1 - \exp \{x_0 [\mu(E) - \mu^+ / \cos \Theta]\}}{\varepsilon^2 [\mu^+ / \cos \Theta - \mu(E)]} d\varepsilon \right\},$$

где

$$T^+ = T(0,511), \quad \mu^+ = \mu(0,511).$$

Формулы, учитывающие вклад второго столкновения и аннигиляционных квантов, для $\Pi_\Delta(E)$, аналогичны $\Pi_2(E)$ и $\Pi_a(E)$, только вместо $T(E)$ надо поставить $T_\Delta(E)$ и $T_\Delta^+(0,511)$.

На рис. 2 приведены функции $\varphi_\phi(E)$ для всех исследуемых экранов. Как видно из рис. 2, наилучшим экраном с точки зрения получения максимального отношения сигнал/шум во всем исследуемом диапазоне энергией (0,01 Мэв до 30 Мэв) является экран из вольфрамата кадмия CdWO_4 , а вторым — вольфраMAT кальция CaWO_4 .

Экраны, лучшие по энергетической эффективности ZnS, CdS, по отношению сигнал/шум оказываются наоборот наихудшими. Третьим по отношению сигнал/шум будет CsI(Tl), а NaI(Tl) в области низких энергий совпадает с CdS, в области средних энергий иодистый натрий хуже всех по отношению сигнал/шум, при энергии выше 10 Мэв он поднимается чуть выше ZnS.

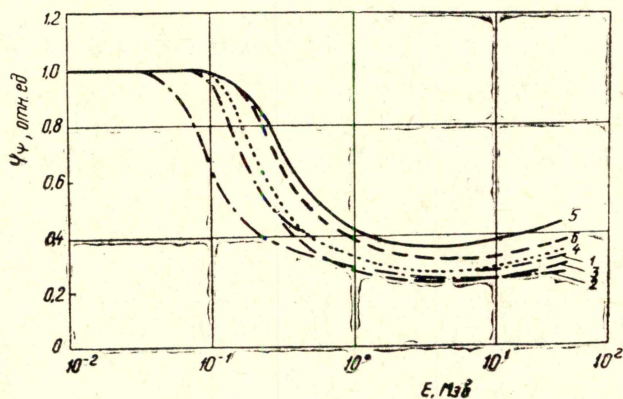


Рис. 2. Изменение отношения сигнал/шум монокристаллическими экранами толщиной 0,5 см: 1 — CdS, 2 — ZnS, 3 — NaJ(Tl), 4 — CsJ(Tl), 5 — CdWO₄, 6 — CaWO₄

Так как лучшие по энергетической эффективности экраны являются худшими по отношению сигнал/шум, то можно сделать вывод о том, что в интроскопах с малыми оптическими потерями, т. е. когда число световых квантов, попадающих на фотокатод, при поглощении одного кванта излучения много больше единицы, например, при использовании в качестве источника излучения бетатрона или при использовании волоконной оптики, для повышения контрастной чувствительности необходимо применять именно экраны типа CaWO₄, CdWO₄, что позволит заметно повысить чувствительность интроскопов.

Используемой методике присущи следующие погрешности: 1) погрешность вычислений; 2) погрешность, обусловленная неточным знанием сечений взаимодействия; 3) погрешность при расчете функций $\Pi(E)$, $\Pi_{\Delta}(E)$, обусловленная тем, что при расчете не учитывались третьи и все последующие столкновения; 4) погрешность при расчете $\Pi(E)$, $\Pi_{\Delta}(E)$, обусловленная тем, что не учитывалась энергия, выносимая из экрана быстрыми электронами.

Общая погрешность для различных экранов не превышает 10%, но она сильно увеличивается при высоких энергиях за счет выноса электронами энергии, так, например, при энергии, равной 10 Мэв, суммарная ошибка достигает 50%.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. П. Шпагин, Г. А. Кучер. Сравнение эффективности монокристаллических экранов. «Дефектоскопия», № 1, 112, 1971.
2. А. П. Шпагин, Г. А. Кучер, В. А. Мальцев. Оценка эффективности монокристаллического экрана. «Изв. ТПИ», т. 156, 1968.