

07;12

Преобразователь рентгеновского изображения в оптическое

© К.Т. Аветян, М.М. Аракелян, С.А. Анчаракян, А.Г. Патваканян

Ереванский государственный университет,
375049 Ереван, Армения

(Поступило в Редакцию 19 августа 1998 г.)

Разработан экран-преобразователь рентгеновского изображения в оптическое с высоким пространственным разрешением и большой эффективностью поглощения и преобразования рентгеновского излучения.

При использовании прямых методов рентгенодифракционных топографических исследований изображение структурных несовершенств кристаллов преобразуется в видеосигнал в передающей телевизионной трубке (видикон) с фотопроводящим слоем, чувствительным к рентгеновскому диапазону излучения. Однако по ряду причин чувствительность таких видиконов низка и они могут работать при очень больших интенсивностях рентгеновского излучения [1,2]. Видиконы с большой чувствительностью существуют для оптических диапазонов излучения. Для их использования в топографических исследованиях требуется промежуточное звено — экран-преобразователь рентгеновского изображения дефектов в видимое изображение. Однако основные требования, предъявляемые к экрану-преобразователю (большая эффективность поглощения и преобразования рентгеновского излучения и высокое пространственное разрешение деталей изображения) являются конкурентными факторами. Расчеты показывают, что для однородного прозрачного (для оптического диапазона) слоя люминофора (с учетом условий Рэлея) минимальное расстояние между двумя светящимися точками, изображения которых разрешаются, $\Lambda \approx 2z_0$ (z_0 — толщина слоя люминофора). При требовании $\Lambda \approx 10 \mu\text{m}$ толщина слоя $z_0 \approx 5 \mu\text{m}$ не обеспечивает достаточную эффективность поглощения рентгеновского излучения. Толщина реального слоя еще меньше. Например, согласно приведенным экспериментальным данным в [3], $\Lambda \approx (5 - 6)z_0$.

Нами создан экран-преобразователь, который обеспечивает требуемое пространственное разрешение при намного больших толщинах слоя. При этом обеспечивается большая эффективность преобразования и, следовательно, светосила. Одновременное увеличение двух конкурентных факторов достигается сочетанием плотного однородного слоя люминофора с волоконнооптическим диском (ВОД). При таком сочетании на выходе ВОД изображение светящейся точки формируется излучением внутри малого телесного угла

$$\Omega = \frac{\pi(n_c^2 - n_{ob}^2)}{n_l^2},$$

где n_c и n_{ob} — показатели преломления световедущей жилы и оболочки, n_l — показатель преломления слоя люминофора.

Излучение вне этого угла в ВОД не проникает, поскольку не выполняется условие полного внутреннего отражения на границе световедущей жилы и оболочки. Этим условием и определяется предельный угол падения на границе люминофор-ВОД

$$\sin \gamma = \frac{\sqrt{n_c^2 - n_{ob}^2}}{n_l}$$

и минимальное разрешаемое расстояние

$$\Lambda = \frac{z_0}{n_l} \sqrt{n_c^2 - n_{ob}^2}.$$

Поскольку световой поток, входящий в одну из световедущих жил, после многократного отражения на выходе будет распределен равномерно по сечению жилы, то распределение потока на выходе будет дискретным. В нашем случае это существенно, так как минимальное разрешаемое расстояние порядка диаметра жилы. Отметим еще одну особенность сочетания слоя люминофора с ВОД. Легко убедиться, что при любом расстоянии

$$z \leq z_0 = \frac{\Lambda n_l}{\sqrt{n_c^2 - n_{ob}^2}}$$

светящейся точки от поверхности ВОД распределение светового потока на выходе остается неизменным, поскольку число жил, участвующих в формировании изображения, и поток в каждой из них те же самые. Разрешающая способность ВОД определяется диаметром d жил и равна половине числа жил на единице длины [4], а минимально разрешаемое расстояние $\Lambda \approx 2d$. Таким образом, толщина слоя люминофора, обеспечивающая максимальное разрешение,

$$z_0 = \frac{2dn_l}{\sqrt{n_c^2 - n_{ob}^2}}.$$

Светосила сочетания слоев люминофора-ВОД определяется потоком света, проникающего в ВОД, и зависит от параметров люминофора: коэффициентов поглощения рентгеновского и оптического излучений μ_p , μ_o , коэффициента преобразования η , толщины слоя z и параметров ВОД n_c , n_{ob} .

Для выбора параметров, обеспечивающих максимальную светосилу (при заданной разрешающей способности), необходимо аналитическое выражение функции $\Phi(\eta, \mu_p, \mu_0, z, n_c, n_{ob}, n_l)$ — потоки света на выходе ВОД.

При нормальном падении на слой толщиной z_0 узкого параллельного пучка рентгеновского излучения в слое толщиной dz на глубине $z_0 - z$ (точка $z = 0$ выбрана на выходе слоя) поглощенное излучение будет $dI(z) = I_0 \mu_p \exp[-(z_0 - z)\mu_p] dz$, (I_0 — интенсивность падающего излучения). Поток оптического излучения, возникший в этом слое и приходящийся на телесный угол Ω , на входе слоя будет

$$d\Phi = I_0 \mu_p \eta \frac{\Omega}{4\pi} \exp[-(z_0 - z)\mu_p] \exp(-\mu_0 z) dz.$$

Интегральный поток света, проникающий в ВОД, будет

$$\Phi = I_0 \eta \frac{n_c^2 - n_{ob}^2}{4n_l} \frac{\mu_p}{\mu_p - \mu_0} [\exp(-\mu_0 z) - \exp(-\mu_p z)]$$

(в дальнейшем z — толщина слоя).

Максимальное значение функции (равное единице)

$$F(\mu_p, \mu_0, z) = \frac{\mu_p}{\mu_p - \mu_0} [\exp(-\mu_0 z) - \exp(-\mu_p z)]$$

достигается при полном поглощении рентгеновского излучения ($\mu_p z \gg 1$) и отсутствии поглощения оптического излучения ($\mu_0 = 0$).

Нецелесообразность прозрачных слоев обсудим ниже. Рассмотрим слои с $\mu_0 \neq 0$. Функцию $F(\mu_p, \mu_0, z)$ представим в виде

$$F(\mu, \Delta, \mu, z) = \mu z \exp(-\mu z) \frac{\text{sh } \Delta \mu z}{\Delta \mu z} \left(1 + \frac{\Delta \mu}{\mu} \right),$$

обозначая $\mu_p + \mu_0 = 2\mu$, $\mu_p - \mu_0 = 2\Delta\mu$. Множитель $\mu z \exp(-\mu z)$ имеет максимум при $\mu z = 1$. Множитель

$$\frac{\text{sh } \Delta \mu z}{\Delta \mu z} = 1$$

при $\Delta \mu z \ll 1$ и немного больше единицы при $\Delta \mu z \approx 1$ (заметим, что $\Delta \mu \leq \mu$). Значит, при $\mu z \approx 1$ значение функции $F(\mu, \Delta, \mu, z)$ определяется множителем $(1 + \Delta \mu / \mu)$, который может меняться от 1 до 2.

Эксперимент и результаты

Выбор параметров слоя люминофора ($\eta, n_l, \mu_p, \mu_0, z$) и волоконнооптического диска (n_c, n_{ob}, d) диктуется условиями максимума светосилы при заданном значении разрешающей способности. Мы уже установили, что при любой толщине слоя

$$z \leq \frac{2dn_l}{\sqrt{n_c^2 - n_{ob}^2}}$$

разрешающая способность одна и та же. Для ВОД с апертурой $A = \sqrt{n_c^2 - n_{ob}^2} = 0.54$, $d = 8 \mu\text{m}$, $n_l = 2.2$, $z \approx 60 \mu\text{m}$. При таких толщинах почти у всех массивных прозрачных люминофоров $\mu_p z < 1$ (для излучения $\text{Mo } K_\alpha$ $\lambda = 0.71 \text{ \AA}$). Кроме того, весьма существен тот факт, что для массивных люминофоров значение коэффициента преобразования η весьма низко (1–2%), η намного больше для порошкообразных активированных люминофоров с размерами зерен 3–5 μm (20–22%) [5]. Мы выбрали порошкообразный люминофор $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$, активированный тербием (Тб). Всем традиционным способам осаждения слоя из порошка присущ весьма нежелательный недостаток. При осаждении слоя в нем неизбежно возникает множество пор с рамерами, в несколько раз превышающими размеры зерен. Эти поры являются как бы слепыми областями экрана, и на изображение накладывается структура экрана. Это особенно заметно при малых толщинах. Кроме того, при рыхлом слое приходится увеличивать толщину слоя для обеспечения необходимого поглощения рентгеновского излучения.

Нами разработана методика осаждения люминофора с однородностью и плотностью, достаточной для наших целей [6]. Суть метода заключается в следующем. С порошком люминофора смешивается связывающее, жидкое, полимеризующее вещество в соотношении 1 : 10 (объемном). Смесь наносится на тщательно очищенную поверхность ВОД. Далее смесь подвергается вибрации с частотой 50–100 Hz. При этом плотность смеси существенно увеличивается и густая паста распространяется по поверхности ВОД. Критерием уплотнения смеси является выход на поверхность излишней жидкости. Толщина, при которой $\mu_p z = 1$, достигается механической полировкой после затвердевания слоя. Измерения показывают, что толщина слоя, изготовленного из порошка $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$, при котором $\mu_p z = 1$, $z \approx 50 \mu\text{m}$ (для $\text{Mo } K_\alpha$). Максимальная прозрачность получилась бы при значении показателя преломления связующего вещества, равного показателю преломления зерен люминофора (для $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ $n_l = 2.2$). Нам не удалось найти связующее вещество с таким показателем преломления. Подходящей считали эпоксидную смолу ОП-1; 0.28. Кроме того, не велик выбор ВОД. Несмотря на это, экран-преобразователь вполне удовлетворяет требованиям визуализации рентгенодифракционных топографических изображений структурных несовершенств кристаллов при сочетании с супервидиконом ЛИ-702.

Разрешающая способность измерялась веером вольфрамовых нитей диаметром 10 μm . При толщинах слоя 50–60 μm разрешающая способность составляет 30–35 пар линий на мм, что совпадает с расчетным значением. Плотность слоя $\rho_1 \approx (0.6 - 0.7)\rho_2$ ($\rho_2 = 7.2 \text{ g/cm}^3$ для $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$).

Осаждение люминофора на ВОД еще удобно тем, что оптическое изображение на выходе можно почти без потерь интенсивности и без искажений перевести на фотокадот супервидикона непосредственным оптическим

контактом с входным окном супервидикона (оно тоже волоконно-оптическое). При любом другом способе перевода изображения на фотокатод большие потери и искажения неизбежны.

Эксперименты были проведены с экранами, осажденными на ВОД, с апертурой $A = 0.54$. Поскольку светосила пропорциональна A^2 , а разрешающая способность $1/A$, то при замене ВОД с $A = 0.54$ на ВОД с $A = 1$ ожидалось увеличение светосилы в $1/(0.54)^2$ раз и уменьшение разрешающей способности в 0.54 раз. Однако при такой замене уменьшается и толщина слоя, при которой разрешающая способность максимальна, и нарушается условие $\mu z = 1$. Таким образом, для начальных условий $\lambda = 0.71 \text{ \AA}$ разрешающая способность 30 пар линий на мм оптимальными являются ВОД с апертурой $A = 0.54$ и люминофор $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ с толщиной $z \sim 50\text{--}60 \text{ \mu m}$.

Список литературы

- [1] *Chikawa J., Fujimoto I.* // Appl. Phys. Lett. 1969. Vol. 13. P. 387.
- [2] *Chester A.N., Koch F.B.* // Advances in X-ray Analysis. 1969. Vol. 12. P. 165.
- [3] *Лобанова И.И., Провоторов М.Б., Галактионов С.С.* А.С. СССР. № 1222129, кл. H01 J 9/22. ДСП. 1996.
- [4] *Вейнберг В.Б., Саттаров Д.К.* Оптика световодов. Л.: Машиностроение, 1977. 319 с.
- [5] *Гурвич А.М.* Рентгенолюминофоры и рентгеновские экраны. М.: Атомиздат, 1976. 153 с.
- [6] *Аветян К.Т., Мелконян Т.К., Джотян А.П.* и др. А.С. СССР. № 1697548, кл. H01 J 9/22. ДСП. 1991.