

УДК 539.1.07

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОВОГО ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ДЕТЕКТОРА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, НАПОЛНЕННОГО СМЕСЬЮ АРГОН + КСЕНОН

© 2011 г. Д. А. Гоганов\*, А. А. Шульц  
ООО ЭЛИОН

Россия, 195112, Санкт-Петербург, Малоохтенский просп., 68

\*E-mail: imwin@inbox.ru

Поступила в редакцию 22.12.2010 г.

Исследованы характеристики газового электролюминесцентного детектора (д.э.л.г.) рентгеновского излучения, наполненного смесью Ar + Xe в диапазоне содержаний Xe от 5 до 100%. Для смеси 80% Ar + 20% Xe обнаружено улучшение энергетического разрешения при повышении давления газовой смеси. Лучший достигнутый результат при давлении 3 ат. составляет 7.25% ( $MnK_{\alpha}$ , 5.9 эВ), что на 0.5% абс. выше известных литературных данных. Параметр пик/долина для этой же смеси достигает значения 650 для энергии 5.9 кэВ в сравнении со значением 200 для чистого Xe. По уровню достигнутого энергетического разрешения д.э.л.г. пригоден для использования в рентгеновской дифрактометрии для светосильного подавления  $K_{\beta}$ -линий характеристического излучения основных анодов рентгеновских трубок.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Газовый электролюминесцентный детектор (д.э.л.г. в литературе действует также обозначение ГСПС – газовый сцинтилляционный пропорциональный счетчик) рентгеновского излучения активно разрабатывается и находит применение в энергодисперсионном рентгенофлуоресцентном анализе, рентгеновской астрономии, ядерной физике.

Важнейшим параметром этого детектора является высокое энергетическое разрешение при большой площади входного окна (от единиц до десятков см<sup>2</sup>). Результат 8.5% для линии 5.9 кэВ был получен португальскими исследователями в 1972 г. [1] и привлек внимание ученых. За прошедшее время благодаря совершенствованию конструкции и технологии изготовления значительное разрешение было доведено до 8% [2, 3]. При этом использовался Xe высокой чистоты при давлении от 500 до 1000 Торр. В ряде случаев сообщалось о значении разрешения <8%.

Для удобства дальнейшего изложения остановимся коротко на описании конструкции и характеристиках д.э.л.г. В качестве примера на рис. 1 приведен разрез созданного нами детектора [4]. В керамическом корпусе 1 размещены электроды, делящие объем детектора на две части. Область I – область поглощения, формируемая фланцем входного бериллиевого окна 2 и сеткой 3, расстояние между которыми 30 мм. Область II – район электролюминесценции, ограниченный сетками № 1 (3) и № 2 (4), расстояние между которыми 10 мм. На

выходе корпуса размещен фланец с окном из  $MgF_2$  (5) для выпуска ультрафиолетового излучения, возникающего в районе II.

Конструкция собирается с помощью твердых припоев и лазерной сварки, а затем прогревается до 300°C при безмасляной откачке. Газовое наполнение – Xe при давлении от 500 до 1000 Торр.

Регистрируемое рентгеновское излучение попадает в объем детектора через входное бериллиевое окно. Облако первичных электронов, возникших при поглощении рентгеновских квантов, устремляется к сетке № 1 под действием потенциа-

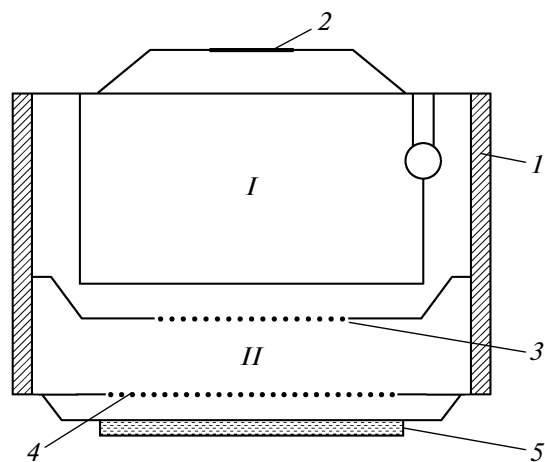


Рис. 1. Разрез детектора: 1 – керамический корпус; 2 – бериллиевое окно; 3 и 4 – сетки № 1 и № 2; 5 – окно из  $MgF_2$ .

ла  $\sim 2$  кВ. Далее эти электроны проникают в район  $II$  под действием высокого межсеточного потенциала ( $\sim 5$  кВ). При прохождении межсеточного промежутка электроны в процессе столкновений возбуждают атомы Хе. В процессе тройных столкновений возникают эксимерные молекулы  $\text{Xe}_2^+$ , при распаде которых возникают ультрафиолетовые кванты с длиной волны 173 нм (порядка 500 квантов на 1 электрон на пути 1 см). Напряженность поля между сетками такова, что ионизации молекул газа не возникает. Возникающий свет регистрируется с помощью фотоэлектронного умножителя (ф.э.у.).

Энергетическое разрешение д.э.л.г. записывается в следующем виде:

$$R, \% = 236 \frac{\sigma A}{\bar{A}} = 236 \sqrt{\frac{F\omega}{E} + \frac{C}{A}}, \quad (1)$$

где  $\sigma A/\bar{A}$  – относительная среднеквадратическая флуктуация амплитуды импульса  $\bar{A}$ ;  $F$  – фактор Фано, характеризующий процесс диссипации энергии в данном газе и определяемый из выражения  $(\sigma N/\bar{N})^2 \equiv F/\bar{N}$  ( $\sigma N/\bar{N}$  – относительная среднеквадратическая флуктуация числа первичных электронов  $N$  относительно среднего значения  $\bar{N}$ );  $\omega = E/\bar{N}$  – средняя энергия на пару носителей заряда;  $E$  – энергия измеряемого рентгеновского кванта;  $C$  – константа, не зависящая от  $A$  и определяемая шумами ф.э.у. и электронного тракта.

При этом под корнем в выражении (1) пренебрегли относительной среднеквадратической флуктуацией процесса генерации электролюминесценции из-за ее малости: эта величина примерно в 100 раз меньше в сравнении с флуктуацией коэффициента газового усиления в пропорциональном счетчике [5], именно поэтому энергетическое разрешение пары д.э.л.г. – ф.э.у. почти в два раза выше, чем для газового пропорционального счетчика.

За счет повышения светосилы сбора ультрафиолетового излучения при использовании новых фотосенсоров – микростриповых плат и фотодиодов большой площади – удалось достичь разрешения 7.8% [2]. Нами был создан и испытан электролюминесцентный детектор со встроенным и находящимся в вакуумном объеме непосредственно за окном  $\text{MgF}_2$  фотокатодом [6], что позволило получить энергетическое разрешение 7.5% за счет повышения светосилы устройства.

Ставя перед собой задачу создания высокоэффективного счетчика для использования в рентгеновском анализе, следовало вести дальше работу по повышению энергетического разрешения д.э.л.г. Уже имеющегося разрешения было достаточно для разделения характеристических линий

элементов  $Z, Z + 2$  в системе Менделеева при рентгенофлуоресцентном анализе. Для дискриминации  $K_{\beta}$ -линий в рентгеноструктурном анализе необходимо разрешение  $\sim 7\%$  для энергии 5.9 кэВ [7].

## 2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ Д.Э.Л.Г. С ГАЗОВОЙ СМЕСЬЮ $\text{Ar} + \text{Xe}$

С целью дальнейшего повышения энергетического разрешения д.э.л.г. была предпринята попытка по использованию газовой смеси  $\text{Ar} + \text{Xe}$ .

Из литературы известно, что смеси благородных газов, в частности  $\text{Ar} + \text{Xe}$ ,  $\text{Kr} + \text{Xe}$  и другие, при взаимодействии с ионизирующим излучением обеспечивают величину ионизации, большую, чем для каждой компоненты в отдельности. Так, из работы [8] следует, что для смеси  $\text{Ar} + \text{Xe}$  при малых содержаниях Хе (5–30%) число возникающих первичных зарядов возрастает в сравнении с данными для чистого Хе (возбуждение  $\alpha$ -частицами). Поскольку метастабильный процесс Пеннинга в данных смесях невозможен, автор объясняет возникающую дополнительную ионизацию как результат неметастабильного (короткоживущего [8]) пеннинговского процесса.

Возникновение дополнительной ионизации должно привести к повышению энергетического разрешения за счет роста числа первичных зарядов  $N$  и уменьшения фактора Фано. Именно за счет этих факторов в [9] удалось получить разрешение 12% для линии 5.9 кэВ вместо обычных 14% для пропорционального счетчика и смеси 20% Хе + 80% Аг. Следует отметить существенное улучшение энергетического разрешения, несмотря на маскирующий эффект статистики газового усиления и шумов электроники.

Смесь  $\text{Ar} + \text{Xe}$  уже использовалась при работе с д.э.л.г. Так, в работе [10] при изучении широкого набора составов смесей  $\text{Ar} + \text{Xe}$  были получены минимальные значения  $F$  для смесей с 5% и 20% Хе, однако эти значения были того же порядка, что и для чистого Хе. В недавних работах [11–13] были повторены эти результаты, лучшее значение разрешения для смеси  $\text{Ar} + \text{Xe}$  (20%) составило 7.8%.

Нами также была проведена работа по использованию смеси  $\text{Ar} + \text{Xe}$  в д.э.л.г. Использовался типичный д.э.л.г. нашей конструкции [4] с применением ФЭУ-39А с фотокатодом  $\varnothing 38$  мм. Обычно лучший результат такого блока детектирования с д.э.л.г. составлял  $\sim 8\%$  для линии 5.9 кэВ при давлении Хе 1 ат. Существенное отличие нашей конструкции состоит в возможности работы с давлением газа-наполнителя несколько атмосфер.

На рис. 2 приведена зависимость энергетического разрешения д.э.л.г. от содержания  $\text{Ar}$  и Хе при суммарном давлении 700 Торр. Измерения были выполнены при диаметре засветки входного окна 10 мм, каждое из значений было получено

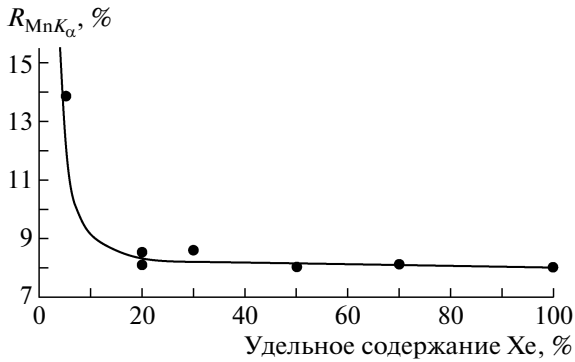


Рис. 2. Зависимость энергетического разрешения д.э.л.г. от содержания Xe в смеси Ag + Xe. Давление  $P = 700$  Торр, диаметр пучка 10 мм.

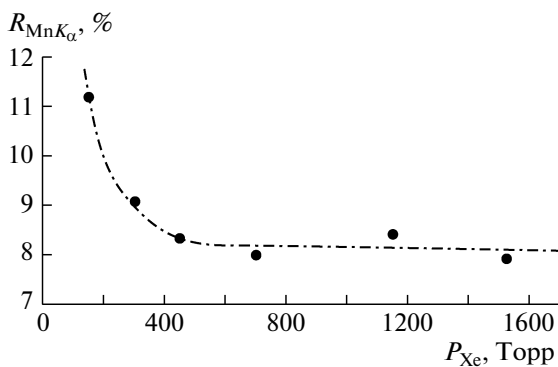


Рис. 3. Зависимость энергетического разрешения д.э.л.г. с ксеноновым наполнением от давления. Диаметр пучка 10 мм.

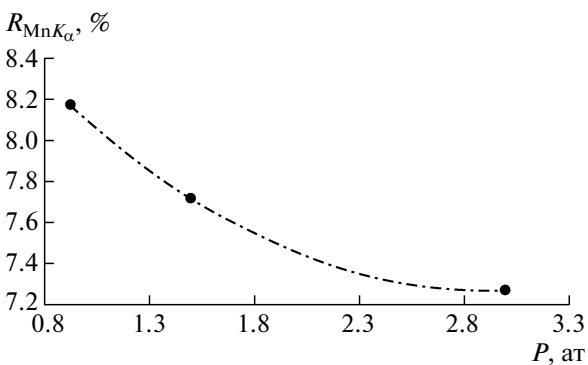


Рис. 4. Зависимость энергетического разрешения д.э.л.г. от давления смеси 20% Xe + 80% Ag. Диаметр пучка 2 мм.

после откачки и перенаполнения одного и того же детектора. Для чистого Xe разрешение составило 8%, а для смеси 20% Xe + 80% Ag — ~8.3%. Полученный результат близок к данным [11], по крайней мере, в случае больших содержаний Xe в смеси. Следует учитывать существенную разницу

в диаметре фотокатода — у нас 38 мм, в работе [11] 52 мм, что и должно приводить к несколько лучшим результатам в разрешении.

Ожидаемого улучшения разрешения не было получено, хотя по всем данным в зоне I детектора при использовании смеси Ag + Xe должен выделяться при поглощении рентгеновских квантов дополнительный заряд и должно улучшаться энергетическое разрешение. В зоне II, как уже говорилось, осуществляется генерация ультрафиолетовых квантов электролюминесценции, и интенсивность этого излучения зависит от количества высвечивающихся компонентов. В нашем случае мы можем регистрировать только линию Xe (кварцевое окно ф.э.у., некоторый воздушный зазор между окнами д.э.л.г. и ф.э.у. поглощают более жесткое излучение Ag), и от количества Xe зависят амплитуда сигнала и энергетическое разрешение. Следует учитывать уменьшение количества Xe при использовании смеси Ag + Xe, особенно при малых концентрациях Xe.

Для проверки вышесказанного была снята зависимость энергетического разрешения детектора для квантов 5.9 кэВ от давления чистого Xe. На рис. 3 видно, что насыщение графика энергетического разрешения достигается при давлении ~600–800 Торр, где обычно и реализуется разрешение ~8%. Ниже этого диапазона давления энергетическое разрешение заметно ухудшается, выше — плавно улучшается. Таким образом, должно быть минимально необходимое содержание Xe, чтобы добиться энергетического разрешения, основа которому заложена при поглощении рентгеновских квантов в зоне I, причем фактически при любых давлениях Xe выше ~100 Торр (для линии 5.9 кэВ).

На основании этого эксперимента был повторен опыт со смесью 20% Xe + 80% Ag с тем, чтобы парциальное давление Xe было не менее 600–800 Торр. Результат виден на рис. 4. По мере возрастания давления газовой смеси энергетическое разрешение улучшается от ~8.2 до 7.25%, измерения проводились при диаметре рабочего пучка 2 мм. Повторяемость измерений на уровне 0.1% абс. При давлении 3 ат было достигнуто парциальное давление Xe ~450 Торр, т.е. можно ожидать с ростом давления смеси и дальнейшего улучшения энергетического разрешения.

Если продемонстрированный результат и его объяснение справедливы, то в случае 5% Xe в смеси улучшение разрешения может быть достигнуто при еще более высоком давлении газовой смеси, конечно, при той же геометрии детектора (эксперимент с давлением можно вероятно заменить увеличением глубины зоны II). Следует отметить, что результат зависит от характеристик использованных фотосенсоров, и значение 7% для линии 5.9 кэВ кажется вполне достижимым.

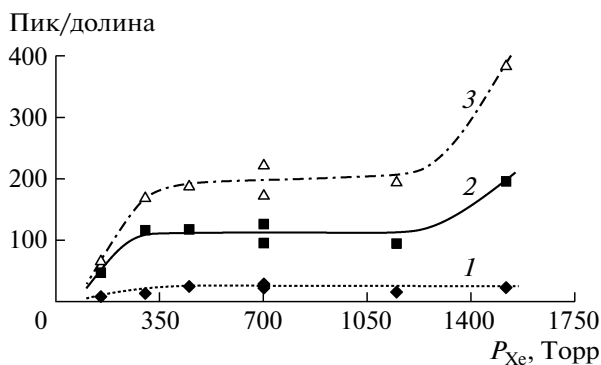


Рис. 5. Зависимость параметра пик/долина для д.э.л.г. с чистым ксеноном от давления: 1 – 0.9 от амплитуды, 2 – 0.7, 3 – высшее значение в интервале амплитуд. Диаметр пучка 2 мм.

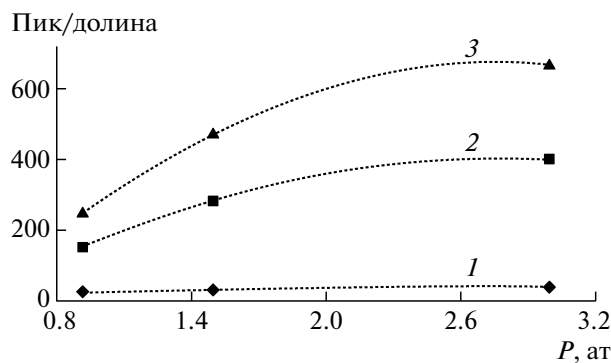


Рис. 6. Зависимость параметра пик/долина для д.э.л.г. со смесью 20% Xe + 80% Ag от давления смеси: 1 – 0.9 от амплитуды, 2 – 0.7, 3 – высшее значение в интервале амплитуд. Диаметр пучка 2 мм.

### 3. ПАРАМЕТР ПИК/ДОЛИНА

Одновременно было рассмотрено поведение параметра пик/долина в зависимости от состава и давления газовой смеси Ag + Xe. Из литературы известно [14] использование в д.э.л.г. смеси 20% Xe + 80% Ag вместо чистого Xe при регистрации рентгеновского излучения легких элементов. За счет увеличения среднего пробега квантов удалось уменьшить низкоэнергетический фон и зарегистрировать линии легких элементов, начиная от бериллия. Детальный анализ влияния состава смеси Ag + Xe на параметр пик/долина при наблюдении спектров легких элементов выполнен в [13].

По нашим данным [4] для д.э.л.г. с давлением газового наполнения Xe 1 ат значение пик/долина составляет для энергии 5.9 кэВ величину 200–250,

определяемую обратным рассеянием электронов при поглощении рентгеновских квантов вблизи входного окна. Для более жесткого излучения (~22 кэВ), как показано в [4], значение параметра пик/долина значительно ниже – 40–50. Причиной этого является поглощение части квантов больших энергий в межсеточном промежутке. В последнем случае недостаток можно устранить путем осуществления электронной селекции по фронтам нарастания – импульсы, отвечающие квантам, поглощенным в межсеточном пространстве, имеют более короткие фронты. При этом достигается значение пик/долина – 500.

На рис. 5 приведены зависимости пик/долина от давления чистого Xe. Максимальное полученное значение для давления 1000 Торр – 200, что соответствует ранее упомянутым данным [4]. Резуль-

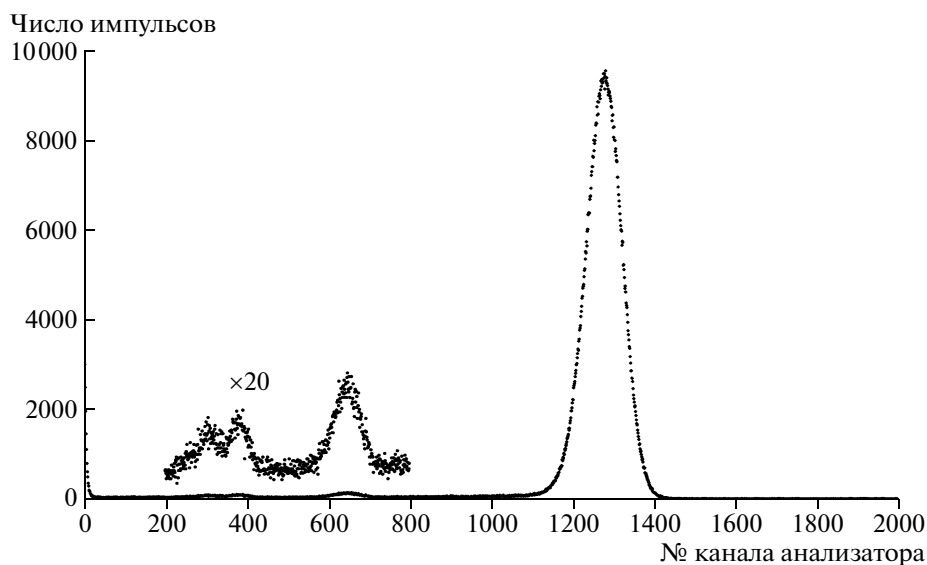


Рис. 7. Спектр д.э.л.г. со смесью 20% Xe + 80% Ag. Давление 3 ат, диаметр пучка с энергией 5.9 кэВ – 10 мм, использован В-фильтр. Отчетливо видны пики вылета Xe и Ag.

таты получены при диаметре входного окна 2 мм. При измерениях параметра пик/долина в зависимости от содержания смеси Ag + Xe при суммарном давлении 700 Торр максимальное значение было получено при 100% Xe. Наконец, на рис. 6 приведены зависимости пик/долина от давления газовой смеси 20% Xe + 80% Ag. Максимальное значение ~650 получено при давлении 3 ат и диаметре входного окна 2 мм.

Типичный спектр д.э.л.г со смесью 20% Xe + 80% Ag представлен на рис. 7, диаметр входного окна 10 мм, линия 5.9 кэВ, β-линия отфильтрована.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы характеристики д.э.л.г с наполнением газовой смесью Ag + Xe при содержаниях Xe от 5 до 100%. Для смеси 80% Ag + 20% Xe было получено повышенное энергетическое разрешение 7.25% при давлении 3 ат вместо 8% для чистого Xe. При этом параметр пик/долина достиг уровня 650. Имеется возможность дальнейшего улучшения энергетического разрешения за счет повышения давления газовой смеси, использования более светосильного фотосенсора, а также других пеннинговских смесей. По уровню достигнутых характеристик д.э.л.г уже пригоден для использования в рентгеновской дифрактометрии для светосильного подавления β-линий основных анодов рентгеновских трубок [7].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Policarpo A.J.P.L., Alves M.A.F., Dos Santos M.C.M., Corvalho M.J.T.* // Nucl. Instrum. and Methods. 1972. V. 102. P. 337.
2. *Dos Santos J.M.F., Lopes J.A.M., Veloso J.F.C.A. et al.* // X-ray Spectrometry. 2001. V. 30. P. 373.
3. *Conde C.A.N.* // X-ray Spectrometry: Recent Technological Advances / Eds Tsuji, J. Injuk and R. Van Grieken. John Wiley and Sons, Ltd, 2004. P. 195.
4. *Goganov D.A., Schultz A.A.* // X-ray Spectrometry. 2006. V. 35. P. 47; *Goganov D.A., Schultz A.A.* // Nucl. Instrum. and Methods. 1997. V. 394. P. 151.
5. *Policarpo A.J.P.L.* // X-ray Microscopy: Proc. Intern. Symp. Göttingen, FRG, Sept. 14–16, 1983. Berlin–Heidelberg–New York–Tokio: Springer Verlag, 1984. P. 172.
6. *Goganov A.D., Goganov D.A., Schultz A.A., Vazina A.A.* // Nucl. Instrum. and Methods. 2009. V. A603. P. 56.
7. *Рухтер К., Морас К., Кредо Е. и др.* // Кристаллография. 1990. Т. 35. Вып. 4. С. 816.
8. *Kubota S.* // J. Phys. Soc. Japan. 1970. V. 29. № 4. P. 1017.
9. *Heikki Sipilä* // Nucl. Instrum. and Methods. 1977. V. 140. P. 389.
10. *Lima E.P., Salete M., Leite S.C.P. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. 1982. V. 192. P. 575.
11. *Do Carmo S.J.C., Trindade A.M.F., Borges F.J.G.M.* // J. Instrum. March 2009. P. 1.
12. *Do Carmo S.J.C., Borges F.J.G.M., Vinagre F.L.R., Conde C.A.N.* // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 2008. V. 55. № 5. P. 2637.
13. *Do Carmo S.J.C., Borges F.J.G.M., Conde C.A.N.* // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 2009. V. 56. № 2. P. 437.
14. *Inoue M., Koyama K., Mazuoka M. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. 1978. V. 157. P. 295.