

Таблицы стандартных справочных данных по характеристикам распада и излучений радионуклидов, используемых для калибровки полупроводниковых спектрометров фотонного излучения в диапазоне энергии 5—140 кэВ

В. П. ЧЕЧЕВ

В качестве проекта стандартных справочных данных представлены рекомендуемые значения энергии и абсолютной вероятности эмиссии характеристического рентгеновского и низкоэнергетического гамма-излучения и периода полураспада радионуклидов $^{44}\text{Tl} + ^{44}\text{Sc}$, ^{54}Mn , ^{55}Fe , ^{57}Co , ^{65}Zn , ^{109}Cd , ^{207}Bi и ^{241}Am . Рекомендуемые значения получены на основе анализа и отбора опубликованных оцененных и экспериментальных данных по состоянию информации на январь 2003 г.

Ключевые слова: стандартные справочные данные, распад, радионуклиды, спектрометр, фотонное излучение.

The recommended values of energy and absolute emission probability of X-rays and low energy gamma-rays in the decays of radionuclides $^{44}\text{Tl} + ^{44}\text{Sc}$, ^{54}Mn , ^{55}Fe , ^{57}Co , ^{65}Zn , ^{109}Cd , ^{207}Bi and ^{241}Am as well as their half-lives are presented as the draft of the Certified Reference Data. The recommended values have been obtained using an analysis and selection of the evaluated and experimental data published to January 2003.

Ключевые слова: certified reference data, decay, radionuclides, spectrometer, photon emission.

Радионуклиды $^{44}\text{Tl} + ^{44}\text{Sc}$, ^{54}Mn , ^{55}Fe , ^{57}Co , ^{65}Zn , ^{109}Cd , ^{207}Bi , ^{241}Am широко используются для калибровки полупроводниковых спектрометров фотонного излучения в диапазоне энергии 5—140 кэВ. В 1987 г. для указанных радионуклидов сотрудниками ВНИИФТРИ и Радиового института им. В. Г. Хлопина были разработаны таблицы стандартных справочных данных (ССД), утвержденные в качестве ГСССД 108—87 [1]. При разработке таблиц [2] были использованы экспериментальная и теоретическая информация, которая была опубликована к началу 1986 г. В частности, основными литературными источниками для создания ГСССД 108—87 стали справочники оцененных данных [3, 4]. Однако эти данные к настоящему времени в значительной степени устарели и возникает необходимость создания новых таблиц по ядерно-физическим характеристикам (ЯФХ) рассматриваемых радионуклидов. Необходимо также согласовать значения ЯФХ с таблицами ГСССД 120—2000 [5], в которых даны значения периода полураспада и характеристика γ -излучения только для ^{54}Mn , ^{57}Co , ^{65}Zn , ^{109}Cd и ^{241}Am . В настоящей статье рассмотрено решение этой задачи, а также представлен проект новых таблиц ССД, которые должны заменить ГСССД 108—87.

В проекте новых таблиц номенклатура радионуклидов соответствует ГСССД 108—87 и выбрана на основе изве-

стного состава стандартных образцов «Источники рентгеновского излучения», разработанных в 80-е годы во ВНИИФТРИ [1]. Характеристики включенных радионуклидов следующие: период полураспада, энергии и абсолютные вероятности эмиссии характеристического рентгеновского и низкоэнергетического γ -излучения. В проект таблиц ССД включены также характеристики дискретного фотонного излучения с энергией 5—140 кэВ и абсолютной вероятностью эмиссии больше 0,1 % числа распадов.

Рекомендуемые в качестве ССД значения получены в основном с использованием оценок международной кооперации Decay Data Evaluation Project (DDEP) [6], одним из участников которой является автор статьи. Таблицы DDEP опубликованы в 1999 г. [7, 8] и представлены в Интернете (Recommended data by the Decay Data Evaluation Project Working group. <http://www.bnm.fr/bnm-lnhb/NuclData.htm>). В некоторых случаях были использованы также оцененные данные международного файла ENSDF-2003 [9]. Кроме того, в необходимых случаях выполнен анализ дополнительной экспериментальной информации, опубликованной после соответствующих оценок DDEP и ENSDF, и скорректированы некоторые значения ЯФХ с учетом новых данных.

Ниже представлены литературные источники, на которых основаны оцененные данные DDEP, и дана процедура

получения рекомендуемых значений ЯФХ по отдельным группам характеристик.

Значения энергии (E_{XK}) и относительной вероятности эмиссии компонентов KX -излучения радионуклидов $^{44}\text{Ti} + ^{44}\text{Sc}$, ^{54}Mn , ^{55}Fe , ^{57}Co , ^{65}Zn , ^{109}Cd и ^{207}Bi приняты из [10, 11].

Значения энергии [11] основаны на результатах измерений длин волн характеристического рентгеновского излучения, приведенных в [12]. Принятая погрешность E_{XK} (в большинстве случаев 0,5 эВ) соответствует систематической погрешности измерений энергий связи атомных электронов. Значения относительной вероятности эмиссии KX -излучения [10, 11] основаны на совокупности имеющихся экспериментальных данных и теоретических оценках [13]. При оценке значений энергии γ -излучения (E_γ) в качестве исходной энергетической нормали принята γ -линия с энергией $411,80205 \pm 0,00017$ кэВ (^{198}Au) [14].

Значения абсолютной вероятности эмиссии компонентов KX -излучения (P_{XK}) приведены в процентах от числа распадов радионуклида, т. е. представляют собой число квантов характеристического излучения, испускаемых на 100 распадов. В большинстве случаев они вычислены из суммарной абсолютной вероятности эмиссии KX -излучения на основе значений относительной интенсивности компонентов, взятых из [10, 11].

Абсолютная вероятность эмиссии γ -излучения (P_γ) дана в процентах от числа распадов радионуклида, т. е. представляет собой число γ -квантов данной энергии на 100 распадов. Большинство значений P_γ рассчитано на основе данных об относительной интенсивности γ -излучения с использованием или баланса интенсивностей переходов, или непосредственно измеренной на опыте абсолютной интенсивности какой-либо одной γ -линии.

Периоды полураспада ($T_{1/2}$) рассмотренных радионуклидов оценены посредством статистической обработки конкретных экспериментальных данных. Технология оценки описана в [15]. В тех случаях, когда значения периодов полураспада представлены в ГСССД 120—2000 [5], они взяты из этих таблиц.

Конкретные источники и способы получения рекомендуемых значений $T_{1/2}$, E_γ , P_γ , E_{XK} , P_{XK} по каждому рассмотренному радионуклиду были следующими (для ^{207}Bi и ^{241}Am даны также значения энергии и абсолютной вероятности эмиссии компонентов LX -излучения $L1$, $L\alpha$, $L\eta$, $L\beta$, $L\gamma$):

1. Радионуклиды $^{44}\text{Ti} + ^{44}\text{Sc}$. Период полураспада ^{44}Sc составляет 3,97(4) ч [16] и равновесие $^{44}\text{Ti} + ^{44}\text{Sc}$ устанавливается через 40 ч, поэтому активность ^{44}Sc в источниках рентгеновского излучения $^{44}\text{Ti} + ^{44}\text{Sc}$ убывает с периодом полураспада материнского радионуклида ^{44}Ti .

^{44}Sc имеет жесткое γ -излучение, не попадающее в рассматриваемый интервал энергий. Низкоэнергетическое (4 кэВ) KX -излучение в распаде $^{44}\text{Ti} + ^{44}\text{Sc}$ также не попадает в выбранный интервал энергий. Поэтому для $^{44}\text{Ti} + ^{44}\text{Sc}$ в качестве ЯФХ, рекомендуемых для ССД, приведены лишь значения периода полураспада ^{44}Ti и характеристик его

γ -излучения (E_γ , P_γ). Они приняты из оценки ENSDF [16], энергии E_γ — по [14].

2. Радионуклид ^{54}Mn . Значение периода полураспада ^{54}Mn принято из ГСССД 120—2000 [5]. Значения энергии и абсолютной вероятности эмиссии компонентов KX -излучения (P_{XK}) приняты из оценки DDEP [17]. Энергия γ -излучения в распаде ^{54}Mn (834,8 кэВ) выходит за пределы рассматриваемой области энергий фотонного излучения.

3. Радионуклид ^{55}Fe . Значение периода полураспада, энергии и абсолютной вероятности эмиссии компонентов KX -излучения приняты для ^{55}Fe из оценки DDEP [7, 8].

4. Радионуклид ^{57}Co . Для ^{57}Co значения периода полураспада, энергии и абсолютной вероятности эмиссии γ -излучения приняты из ГСССД 120—2000 [5]. Полная абсолютная вероятность эмиссии KX -излучения P_{XK} вычислена с использованием значения $\omega_K(\text{Fe}) = 0,352(4)$ [10] и оцененных полных абсолютных вероятностей эмиссии K -конверсионных электронов и K -захвата. Значения абсолютной вероятности эмиссии компонентов KX -излучения определены из $P_{(XK)}$ на основе значений относительной интенсивности компонентов, взятых из [10, 11].

5. Радионуклид ^{65}Zn . Значение периода полураспада ^{65}Zn представлено в ГСССД 120—2000 [5]. Оно получено согласно оценке DDEP [7, 8] и принято в настоящей работе в качестве рекомендуемого $T_{1/2}(^{65}\text{Zn}) = 244,06(10)$ суток. Значения энергии и абсолютной вероятности эмиссии компонентов KX -излучения Cu в распаде ^{65}Zn приняты также согласно оценкам DDEP [7, 8].

6. Радионуклид ^{109}Cd . Значение периода полураспада ^{109}Cd [$T_{1/2}(^{109}\text{Cd}) = 461,4(12)$ сут.] принято из ГСССД 120—2000 [5]. При его оценке учтен результат измерения [18]. Значения энергии и абсолютной вероятности эмиссии компонентов KX -излучения Ag и низкоэнергетического γ -излучения в распаде ^{109}Cd также приняты из ГСССД 120—2000.

7. Радионуклид ^{207}Bi . Значения энергии и абсолютной вероятности эмиссии компонентов KX - и LX -излучений Pb в распаде ^{207}Bi приняты из оценки DDEP [7, 8]. При оценке значения периода полураспада [$T_{1/2}(^{207}\text{Bi}) = 32,9(14)$ лет] учтен новый результат измерения [18].

8. Радионуклид ^{241}Am . Для ^{241}Am значения периода полураспада [$T_{1/2} = 432,2(7)$ лет], энергии и абсолютной вероятности эмиссии компонентов LX -излучения и низкоэнергетического γ -излучения приняты по ГСССД 120—2000 [5].

Проект ССД по характеристикам радионуклидов $^{44}\text{Ti} + ^{44}\text{Sc}$, ^{54}Mn , ^{55}Fe , ^{57}Co , ^{65}Zn , ^{109}Cd , ^{207}Bi , ^{241}Am представлен в таблице. В круглых скобках в единицах последней значащей цифры приведены значения погрешности для доверительной вероятности $P = 0,68$ (стандартные отклонения σ). При использовании доверительной вероятности $P = 0,95$ приведенные погрешности необходимо увеличить вдвое.

СТАНДАРТНЫЕ СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ

Радионуклиды: $^{44}\text{Ti} + ^{44}\text{Sc}$, ^{54}Mn , ^{55}Fe , ^{57}Co , ^{65}Zn , ^{109}Cd , ^{207}Bi , ^{241}Am . Энергия, абсолютная вероятность эмиссии характеристического рентгеновского и низкоэнергетического γ -излучения и период полураспада

$^{44}\text{Ti} + ^{44}\text{Sc}$ $T_{1/2} (^{44}\text{Ti}) = 60,1(8)$ лет $[2,20(3) \cdot 10^4$ сут.]		
Вид излучения	$E_\gamma (\Delta E_\gamma)$, кэВ	$P_\gamma (\Delta P_\gamma)$, % числа распадов
γ_1	67,8688(17)	93,0(15)
γ_2	78,3236(17)	96,4(11)

^{54}Mn $T_{1/2} = 312,16(5)$ сут.		
Вид излучения	$E_{\text{ХК}} (\Delta E_{\text{ХК}})$, кэВ	$P_{\text{ХК}} (\Delta P_{\text{ХК}})$, % числа распадов
Cr $K\alpha_2$	5,4056(5)	7,65(14)
Cr $K\alpha_1$	5,4148(5)	15,0(3)
Cr $K\beta$	5,9468(5)	3,05(7)

^{55}Fe $T_{1/2} = 2,741(6)$ лет $[1001(2)$ сут.]		
Вид излучения	$E_{\text{ХК}} (\Delta E_{\text{ХК}})$, кэВ	$P_{\text{ХК}} (\Delta P_{\text{ХК}})$, % числа распадов
Mn $K\alpha_2$	5,8877(5)	8,45(14)
Mn $K\alpha_1$	5,8988(5)	16,56(27)
Mn $K\beta$	6,4905(5)	3,40(7)

^{57}Co $T_{1/2} = 271,80(5)$ сут.		
Вид излучения	$E_{\text{ХК}, \gamma} (\Delta E_{\text{ХК}, \gamma})$, кэВ	$P_{\text{ХК}, \gamma} (\Delta P_{\text{ХК}, \gamma})$, % числа распадов
Fe $K\alpha_2$	6,3909(5)	16,8(3)
Fe $K\alpha_1$	6,4039(5)	33,2(5)
Fe $K\beta$	7,0581(5)	7,1(2)
γ_1	14,41295(30)	9,15(17)
γ_2	122,06065(12)	85,51(6)
γ_3	136,47356(30)	10,71(15)

^{65}Zn $T_{1/2} = 244,06(10)$ сут.		
Вид излучения	$E_{\text{ХК}} (\Delta E_{\text{ХК}})$, кэВ	$P_{\text{ХК}} (\Delta P_{\text{ХК}})$, % числа распадов
Cu $K\alpha_2$	8,0279(5)	11,76(13)
Cu $K\alpha_1$	8,0479(5)	22,91(23)
Cu $K\beta$	8,9055(5)	4,82(7)

^{109}Cd $T_{1/2} = 1,263(3)$ лет $[461,4(12)$ сут.]		
Вид излучения	$E_{\text{ХК}, \gamma} (\Delta E_{\text{ХК}, \gamma})$, кэВ	$P_{\text{ХК}, \gamma} (\Delta P_{\text{ХК}, \gamma})$, % числа распадов
Ag $K\alpha_2$	21,9906(2)	29,0(3)
Ag $K\alpha_1$	22,16317(5)	54,7(4)
Ag $K\beta_1$	24,933(1)	15,14(8)
Ag $K\beta_2$	25,457(1)	2,63(10)
γ	88,036(4)	3,626(20)

^{207}Bi $T_{1/2} = 32,9(14)$ лет $[1,20(5) \cdot 10^4$ сут.]		
Вид излучения	$E_\gamma (\Delta E_\gamma)$, кэВ	$P_{\text{ХК}} (\Delta P_{\text{ХК}})$, % числа распадов
Pb $L1$	9,19(2)	0,75(7)
Pb $L\alpha$	10,54(2)	14,3(10)
Pb $L\eta$	11,35(2)	0,24(2)
Pb $L\beta$	12,70(2)	13,7(10)
Pb $L\gamma$	14,91(2)	4,2(3)
Pb $K\alpha_2$	72,8049(8)	21,69(24)
Pb $K\alpha_1$	74,9700(9)	36,5(4)
Pb $K\beta_1$	84,775(4)	12,46(23)
Pb $K\beta_2$	87,404(12)	3,76(10)

^{241}Am $T_{1/2} = 432,2(7)$ лет $[1,5786(26) \cdot 10^5$ сут.]		
Вид излучения	$E_{\text{ХЛ}, \gamma} (\Delta E_{\text{ХЛ}, \gamma})$, кэВ	$P_{\text{ХЛ}, \gamma} (\Delta P_{\text{ХЛ}, \gamma})$, % числа распадов
Np $L1$	11,89(2)	0,848(10)
Np $L\alpha$	13,90(2)	13,03(10)
Np $L\eta$	15,86(2)	0,31(4)
Np $L\beta$	17,81(2)	18,55(15)
Np $L\gamma$	20,82(2)	4,81(5)
γ	26,3446(2)	2,40(3)
γ	59,5409(1)	35,78(9)

Литература

1. ГСССД 108—87. Радионуклиды: $^{44}\text{Ti} + ^{44}\text{Sc}$, ^{54}Mn , ^{55}Fe , ^{57}Co , ^{65}Zn , ^{109}Cd , ^{207}Bi , ^{241}Am . Энергия, абсолютная интенсивность характеристического рентгеновского и низкоэнергетического гамма-излучения и период полураспада.

2. Бахши-заде В. А. и др. // Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра / Тез. докл. XXXVIII совещ. — Л.: Наука, 1988. — С. 539.

3. Хольнов Ю. В. и др. Характеристики излучений радиоактивных нуклидов, применяемых в народном хозяйстве. Оцененные данные: Справ. пособие. — М.: Атомиздат, 1980.

4. Хольнов Ю. В. и др. Оцененные значения ядерно-физических характеристик радиоактивных нуклидов, применяемых в народном хозяйстве: Справ. пособие. — М.: Энергоиздат, 1982.

5. Чечев В. П. Период полураспада, энергия и абсолютная вероятность эмиссии гамма-излучения. ГСССД — 120—2000. — М., 2000. — Деп. во ВНИЦ СМВ Госстандарта 14.03.2000 № 780-00 кк.

6. Helmer R. G., Browne E. Be M.-M. // J. Nucl. Sci. Techn. — 2002. — Supl. 2. — V. 1. — P. 455.

7. Be M.-M. e. a. // Table de Radionuclides. CEA-ISBN 2-7272-0200-8, 1999.

8. **Be M.-M. e. a.** // Table de Radionucleides. Comments on Evaluations. — CEA-ISBN 2-7272-0211-3, 1999.

9. **Evaluated** Nuclear Structure Data File (ENSDF). — Brookhaven Nat. Lab. (USA). — ENSDF-2003.

10. **Schönfeld E., Janssen H.** // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. — 1996. — V. A369. — P. 527.

11. **Schönfeld E., Rodloff G.** // PTB-6.11-1999-1. — Braunschweig, 1999.

12. **Bearden J. A.** // Rev. Mod. Phys. — 1967. — V. 39. — P. 78.

13. **Scofield J. H.** // At. Data Nucl. Data Tables. — 1974. — V. 14. — P. 121.

14. **Helmer R.G., van der Leun C.** // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. — 2000. — V. A450. — P. 35.

15. **Чечев В. П.** // Измерительная техника. — 1998. — № 8. — P. 47.

16. **Cameron John A., Singh Balraj.** // Nucl. Data Sheets. — 1999. — V. 88. — N 3. — P. 299.

17. **Schönfeld E., Rodloff G.** // PTB-6.11-97-1. — Braunschweig, 1997.

18. **Martin R. H., Burns K. I. W., Taylor J. G. V.** // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. — 1997. — V. A390. — P. 267.

19. **Unterweger M. P.** // Appl. Rad. Isot. — 2002. — V. 56. — P. 125.

Дата одобрения 25.07.2003 г.