



中华人民共和国国家标准

GB/T 16639—2008/ISO/ASTM 51607:2004
代替 GB/T 16639—1996

使用丙氨酸-EPR 剂量测量系统的 标准方法

**Standard method
for use of an alanine-EPR dosimetry system**

(ISO/ASTM 51607:2004, Standard practice
for use of an alanine-EPR dosimetry system, IDT)

2008-09-19 发布

2009-08-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 发布
中国国家标准化管理委员会

前 言

本标准等同采用 ISO/ASTM 51607:2004《使用丙氨酸-EPR 剂量测量系统的标准实践》(英文版)。为便于使用,本标准做了下列编辑性修改:

a) 按照汉语的习惯对一些编写格式进行了修改。

b) 对于 ISO/ASTM 51607:2004 引用的其他国际标准中有被等同采用为我国标准的,本标准引用我国的这些国家标准或行业标准代替对应的国际标准,其余未有等同采用为我国标准的国际标准,在本标准中均被直接引用。

本标准代替 GB/T 16639—1996《辐射加工用丙氨酸-EPR 剂量测量系统》。

本标准与 GB/T 16639—1996 相比主要变化如下:

- 标准名称改为“使用丙氨酸-EPR 剂量测量系统的标准方法”;
- 辐射能量范围由“ ≤ 30 MeV”改为“0.1 MeV~28 MeV”(1996 版的第 1 章;本版的 1.2.3);
- 重新规定了标准的“意义与用途”,并增加了“4.3 注”的内容(1996 版的第 4 章;本版的第 4 章);
- 调整了“剂量计制备”一章的正文内容。将 1996 版中的 6.3.3 改为本版的 6.1 注。
- 在“仪器”要求中增加了对分析天平仪器进行校准的技术要求(1996 版的 7.1.3;本版的 7.1.2);
- 删除了“建立校准曲线”的技术要求;并增加了“8.1.4 注 1”、“8.1.4 注 2”的内容(1996 版中的 8.5;本版的第 8 章);
- 调整了“EPR 波谱测量”的要求;增加了“9.1.5 注”,给出了对 EPR 波谱进行修正的三个方法;
- 调整了“测量不确定度”一章的内容;删除了 1996 版中的 13.4 和 13.5 的内容。

本标准由中国核工业集团公司提出。

本标准由全国核能标准化技术委员会归口。

本标准起草单位:中国计量科学研究院。

本标准主要起草人:张彦立、刘智绵、夏滢、张辉。

本标准所代替标准的历次本版发布情况为:GB/T 16639—1996。

使用丙氨酸-EPR 剂量测量系统的 标准方法

1 范围

1.1 本标准规定了使用丙氨酸-EPR 剂量测量系统测定光子和电子照射下被照射材料中的吸收剂量所涉及的剂量计材料的选择、剂量计制备、仪器设备和剂量测量程序。该系统依赖于电子顺磁共振谱仪对丙氨酸中氨基酸衍生的自由基的测量。该系统被定为参考标准级剂量系统(见 GB/T 16640)。

1.2 本标准适用于在下述条件下测量吸收剂量的丙氨酸-EPR 剂量测量系统:

1.2.1 吸收剂量范围:1 Gy~10⁵ Gy。

1.2.2 吸收剂量率:≤10² Gy·s⁻¹(连续辐射场)。
≤5×10⁷ Gy·s⁻¹(脉冲辐射场)^[1-3]。

1.2.3 辐射能量范围:0.1 MeV~28 MeV^[1,2,4]。

1.2.4 辐照温度范围: -60 °C~90 °C^[2,5]。

1.3 以国际单位制给出的值作为标准值,括号内的量值仅供参考。

1.4 本标准不涉及与使用相关的安全问题。本标准的使用者负责建立适用的安全和健康标准,并在使用前确定其适用的限制范围。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本标准,然而,鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本标准。

GB/T 16509 辐射加工剂量测量不确定度评估导则(GB/T 16509-2008,ISO/ASTM 51707:2005, IDT)

GB/T 16510 辐射加工吸收剂量学校准实验室的能力要求(GB/T 16510-2008,ISO/ASTM 51400:2002, IDT)

GB/T 16640 辐射加工剂量测量系统的选择和校准导则(GB/T 16640-2008,ISO/ASTM 51261:2002, IDT)

ISO 文件 测量不确定度表示指南

ISO/ASTM 51204 γ辐照装置食品加工实用剂量学导则

ISO/ASTM 51431 电子和韧致辐射辐照装置食品加工剂量学实践

ASTM E 170 辐射测量与剂量学术语

ASTM E 668 使用热释光(TLD)剂量测量系统确定电子设备辐射损伤试验中吸收剂量的实践

ICRU 第 14 号报告 辐射剂量学:最大光子能量为 0.6 MeV~25 MeV 的 X 射线和 γ 射线

ICRU 第 17 号报告 辐射剂量学:管电压为 5 kV~150 kV 的 X 射线发生装置

ICRU 第 34 号报告 脉冲辐射剂量学

ICRU 第 35 号报告 初始能量为 1 MeV~50 MeV 的电子束辐射剂量学

ICRU 第 37 号报告 电子和正电子的阻止本领

ICRU 第 44 号报告 辐射剂量学与测量中的组织等效

ICRU 第 60 号报告 电离辐射基本量和单位

3 术语和定义

GB/T 15446 和 ICRU 第 60 号报告确立的以及下列术语和定义适用本标准。

3.1

丙氨酸剂量计 alanine dosimeter

用辐射敏感材料丙氨酸与惰性物质(例如:粘合剂)制成的具有规定量和确定物理形状的测量吸收剂量的元件。辐照后产生稳定的自由基,其数量与吸收剂量有确定的关系。

3.2

丙氨酸-EPR 剂量测量系统 alanine-EPR dosimetry system

由丙氨酸剂量计、电子顺磁共振谱仪(EPR)、相关的标准物质、校准曲线以及系统所用程序组成的,用于测量吸收剂量的系统。

3.3

EPR 信号幅度 EPR signal amplitude

EPR 波谱中心线的峰-峰幅度。该信号幅度正比于丙氨酸剂量计中丙氨酸自由基浓度。

3.4

EPR 波谱学 EPR spectroscopy

在磁场存在情况下,将射频加在顺磁物质上,测量未成对电子在不同能级之间跃迁时所产生的射频电磁能共振吸收谱的一种技术方法。

3.5

EPR 波谱 EPR spectrum

用 EPR 谱仪测得的作为磁场函数的电子顺磁吸收谱的一次微分谱。

3.6

零剂量信号 zero dose amplitude

为确定最低可测吸收剂量值,用相同的 EPR 谱仪参数测得的未辐照丙氨酸剂量计的信号。

4 意义和用途

4.1 丙氨酸-EPR 剂量测量系统提供了一种可靠的吸收剂量测量方法。它依赖于丙氨酸晶体受电离辐射照射后产生的特有的稳定自由基。

4.2 剂量计含有丙氨酸晶体,并由生成的丙氨酸自由基记录吸收剂量。用 EPR 波谱法进行丙氨酸自由基的鉴别和测量。

4.3 用 EPR 波谱法测量自由基的浓度是一种非破坏性的分析方法。丙氨酸剂量计能反复测读,可用于剂量档案保存。

注:本标准涉及与应用辐射类型和能量有关的剂量学测量方法和材料的详细规定见 GB/T 16640、GB/T 16510、ASTM E 668、ISO/ASTM 51204、ISO/ASTM 51431 和 ICRU 第 14 号、ICRU 第 17 号、ICRU 第 34 号、ICRU 第 35 号、ICRU 第 37 号、ICRU 第 44 号和 ICRU 第 60 号报告。

4.4 丙氨酸-EPR 剂量测量系统可作为参考标准和传递标准。也可作为辐射应用中(包括:医疗保健产品和药品的灭菌消毒、食品辐照、聚合物改性、医学治疗和材料的辐射损伤研究等方面)的工作剂量测量系统。

4.5 辐照过的丙氨酸-EPR 剂量计的 EPR 信号表明:使用光子与电子照射产生的自由基的信号相同^[4]。

5 丙氨酸特性

5.1 剂量计用多晶粉末状 α -丙氨酸($\text{CH}_3-\text{CH}(\text{NH}_2)\text{COOH}$)制备。

- 5.1.1 所有 α -丙氨酸异构体均可用于剂量测量,但最常用的是 L 型丙氨酸。
- 5.1.2 丙氨酸的纯度应为分析纯(不小于 99%),这种纯度的丙氨酸可从市场购买。

6 剂量计的制备

6.1 丙氨酸粉末可直接作剂量计使用,或者加入粘合剂压制成固体使用。

注:制备固体剂量计所用的粘合剂和润滑剂不应引入显著的固有或辐射感生 EPR 信号。适宜作粘合剂的材料有:纤维素、乙丙橡胶、明胶、石蜡、聚乙烯、聚乙烯-醋酸乙烯酯、聚苯乙烯、聚乙烯吡咯烷酮、聚乙烯基丙烯酸以及三硬脂酸甘油酯等。适宜作润滑剂的材料有硬脂酸。

6.2 粉末剂量计

6.2.1 可以直接使用生产商供应的丙氨酸粉末。

注:为改善 EPR 信号的复现性,应优选颗粒大小为数十至数百微米范围的丙氨酸粉末。

6.2.2 丙氨酸粉末应装在小袋或胶囊中使用。每个剂量计中粉末的质量一般为 50 mg~200 mg。

6.3 固体剂量计

6.3.1 可用压制、浇铸或挤压等工艺将丙氨酸、粘合剂和润滑剂的混合物制成固体丙氨酸剂量计。

6.3.2 剂量计可以制成圆片、薄膜、圆柱或线缆状,几何尺寸取决于 EPR 谱仪微波谐振腔的内径、样品内径以及所需测量精度。

6.3.3 粘合剂和润滑剂的软化熔点必须高于辐照温度。

6.3.4 丙氨酸的含量依粘合剂的不同而不同。聚乙烯吡咯烷酮:95%^[6];聚乙烯:60%~95%^[2,7~10];聚苯乙烯:70%^[11];乙丙橡胶:67%^[12]。

6.3.5 制备过程涉及多种操作,例如过筛、加入粘合剂和润滑剂、均匀混合、熔融、压制或挤压。

6.4 制备质量保证

6.4.1 制备剂量计时应仔细慎重。应该在清洁的实验室条件下以高标准的制造方法制备剂量计^[7,13]。制备过程中应该避免混入顺磁物质引起的以及由机械压力产生的自由基。参考文献^[10]和^[14]陈述了几种制备技术。制备过程的每一步骤均可影响测量重复性、样品批次间的辐照灵敏度和相关的变化。

6.4.2 影响测量精度的主要因素是剂量计的均匀性、剂量计的质量、密度、尺寸以及形状的复现性。

6.4.3 应对每批剂量计采用典型抽样法进行质量控制检查,例如:目视检查、称量和尺寸的检查。

6.4.4 对每批剂量计的剂量学性能进行质量控制,是指控制该批次剂量计的平均灵敏度及其零剂量信号的样品间分散程度。

6.4.5 为了满足 13.3 不确定度要求,每批剂量计样品间辐射感生 EPR 信号的变化值应小于 $\pm 1\%$ 。

7 仪器

7.1 使用一台工作在 X 波段的 EPR 谱仪测量丙氨酸剂量计的 EPR 信号。为了满足 13.3 不确定度要求,EPR 谱仪应进行如下设置:微波功率 9 Hz~10 Hz,并带有自动锁频(AFC)装置;在中心磁场附近扫描范围 20 mT 时,对应 g 值为 2.0 时的磁场(在频率为 9.8 Hz 时该值对应于 350 mT,见注);磁场调制幅度 0.1 mT~1.5 mT;微波功率 0.1 mW~10 mW;可按吸收剂量大小改变扫描时间、时间常数和接收器增益;谱仪的灵敏度至少为 2×10^{11} 自旋数(mT);共振腔应有一个样品通道,其直径至少比被分析剂量计的直径大 1 mm。

注:微波频率与磁场间的关系可用式(1)给出:

$$h\nu = g\mu_B B \dots\dots\dots (1)$$

式中:

- h ——普朗克常数;
- ν ——微波频率;
- g ——谱线裂距因数(典型值为 2.0);
- μ_B ——波尔磁子;
- B ——磁场。

7.1.1 剂量计样品管通常由质地良好、清洁透明、无干扰 EPR 信号的熔融石英制作。应采用机械方法使剂量计可准确、重复、垂直地位于谐振腔内的中心位置。

7.2 剂量计系统的精度可采用 EPR 信号对剂量计质量归一的方法进行改善。为了满足 13.3 规定的不确定度要求,应使用一台分辨率为 $\pm 0.1 \text{ mg}$ 的分析天平。该分析天平应按产品说明书的规定进行校准。

8 校准方法

8.1 剂量测量系统的校准

8.1.1 使用剂量测量系统(包括特定批次的剂量计和特定的测量仪器)前应按照用户的校准程序和质量保证要求中的特别操作文件进行校准。该校准应在规定的周期内进行,以确保在要求的时间内保持吸收剂量测量的准确。校准方法见 GB/T 16640。

8.1.2 辐照是校准剂量测量系统的关键环节。校准辐照应在认可的校准实验室或在满足 GB/T 16510 要求自有的校准装置中进行,并证明已测吸收剂量(或剂量率)溯源到国家或国际认可的标准。

8.1.3 丙氨酸剂量计作为工作剂量计使用时,辐照校准可按 8.1.2 的规定在生产厂或研究用辐照装置中进行。该装置应与参考、传递标准剂量计一起溯源到国家或国际认可的标准。

8.1.4 测量仪器性能的验证:谱仪的性能可用适当的自旋标准进行检测(例如:贮存在可控条件下辐照过的丙氨酸剂量计、烟煤样品、 Al_2O_3 (红宝石)中的 $\text{Cr}(\text{III})$ 、 CaO 或 MgO 中的 $\text{Mn}(\text{II})$)。EPR 自旋标准可以置于剂量计的表面^[15],也可以与剂量计合并^[16]。如果自旋标准值与所建标准值在认可的范围内不一致,应查明错误的来源,例如:样品定位不准等。可用剂量计的响应相对自旋标准值的归一进行修正。

注 1:目前自旋标准材料还不能溯源到国家计量院。应通过出版物、制造商的数据和测量,建立适于验证和谱仪操作补偿的自旋标准材料。可接受的自旋标准材料的测量范围,依赖所用设备的测量精度,通常该值为 $\pm 0.5\%$ 。如果变化大于测量精度的要求,需对某一特有的性能变化进行补偿。

注 2:如果丙氨酸剂量计易受湿度的影响,则当丙氨酸剂量计贮存的湿度条件与测量时的湿度条件明显不同时,测量会引起明显的误差^[17]。在这种情况下,可用自旋标准材料来补偿测量丙氨酸剂量计期间环境湿度带来的影响^[15,16]。如果选用丙氨酸剂量计作为自旋标准材料,并采用恒定测量时间(从贮存环境湿度取出后)、减小或控制贮存与环境湿度的差异的方法可以减少环境湿度的影响。

9 EPR 波谱测量

9.1 应按如下方法获得和评价辐照过的丙氨酸剂量计 EPR 波谱。

9.1.1 将丙氨酸剂量计放在 EPR 谱仪微波谐振腔内的石英样品管中。

注:剂量计应精确定位于微波腔谐振模式的最大值处。同一剂量计重复定位检验应在 $\pm 0.5\%$ 内一致。检查剂量计绕圆柱轴线顺时针或逆时针旋转 90° 以及剂量计倒置时响应的变化,该响应小于 0.5% 。

9.1.2 EPR 波谱测量。

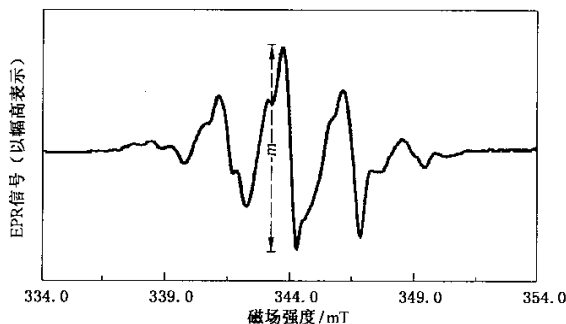


图 1 丙氨酸剂量计辐照 1 kGy 吸收剂量的 EPR 波谱,用中心峰幅高(m)表征剂量值

9.1.3 用手动或自动方式以任意单位测量 EPR 波谱的 EPR 信号幅度(m),见图 1。测量的幅度可为任意单位。

注:采用峰-峰方法比二重积分方法的测量更快、更准确^[2]。

9.1.4 在用校准剂量计建立校准曲线以及测量未知剂量计时,EPR 谱仪的微波功率、调制幅度设定值应相同,并保持不变。

9.1.5 除非 EPR 谱仪具有自动调制功能,否则幅度值(m)应对扫描时间、接收器增益、扫描数的变化进行归一。

注:有必要进行其他的修正,例如:1) 鉴于剂量计类型和测量准确度的要求,应该建立幅度值(m)与剂量计质量的线性关系,对其进行质量修正。2) 鉴于相对幅度值 m 和测量准确度的要求,可以扣除零剂量幅度值。3) 当 EPR 谱仪的灵敏度变化大于 1% 时,应使用归一剂量计 EPR 信号的方法将其补偿到自旋标准材料的值。

10 通则

10.1 按照制造商推荐的方法贮存丙氨酸剂量计。

10.2 取放剂量计时应小心,避免损坏。

10.3 根据批号和编号正确识别每个剂量计。

10.4 依据剂量测量系统的精度和应用要求,来确定测量材料表面或其内部吸收剂量所需的剂量计数目。确定剂量计数目的方法见 ASTM E 668 附录 A 的 A.3。

10.5 按照第 8 章和第 9 章的程序辐照并测量剂量计。

10.6 监测辐照温度,必要时修正其对剂量计响应的影响(见 11.1)。

10.7 测定每个已辐照丙氨酸剂量计的 EPR 信号,根据其归一信号和校准曲线计算吸收剂量。

10.8 记录吸收剂量值及第 12 章中所列各有关参数。

11 环境影响

11.1 辐照温度影响丙氨酸剂量计的 EPR 信号幅度。

注:对含有粘合剂的丙氨酸剂量计,粘合剂的种类会影响辐照温度对剂量计 EPR 信号幅度的响应。温度系数 $R(\%/^{\circ}\text{C})$ 用 $(\Delta m/m)/\Delta T$ 关系表示, m 是 EPR 信号幅度(任意单位), T 是辐照温度($^{\circ}\text{C}$)。辐照温度从 -10°C 到 50°C 的范围内,其温度系数为 $0.1\%/^{\circ}\text{C}\sim 0.2\%/^{\circ}\text{C}$ ^[5]。参考文献^[16]列表给出了温度系数。

11.2 辐照过程中以及辐照前后的贮存和测量期间,湿度可能影响剂量计 EPR 信号幅度的响应。将剂量计密封在不透水的材料中可降低湿度的影响。测量期间,可使用测量丙氨酸信号幅度与自旋标准测量信号幅度比值的方法进行湿度影响的补偿。

注:有关丙氨酸剂量计湿度效应见参考文献^[17]。

11.3 光照对于多数丙氨酸剂量计辐射感生 EPR 信号幅度影响很小。如果其影响不明,建议不要对剂量计长时间光照。

11.4 在整个分析阶段,应对 EPR 实验室的环境温度和相对湿度进行监测和控制。

12 基本文件要求

12.1 校准

12.1.1 记录丙氨酸剂量计型号、批号和生产厂家。

12.1.2 记录或注明辐照日期、辐照温度、剂量范围、辐射源以及校准丙氨酸剂量测量系统所用的相关仪器。

12.2 应用

12.2.1 记录每个剂量计辐照日期和 EPR 测量日期。

12.2.2 记录每个剂量计的辐照温度、采用的温度修正以及获得的吸收剂量值。注明获得吸收剂量值所用的校准曲线。

- 12.2.3 记录或注明辐射源的种类和特征。
- 12.2.4 记录 EPR 信号及相应的 EPR 谱仪参数设定值(微波频率、微波功率、磁通密度、扫描范围、扫描时间、调制幅度以及增益因子)。
- 12.2.5 记录或注明吸收剂量的测量不确定度(见第 13 章的规定)。
- 12.2.6 记录或注明用于丙氨酸-EPR 剂量测量系统而建立的测量质量保证方案。
- 12.2.7 记录或控制贮存期间、辐照期间和分析时的温度和相对湿度条件。使用带有自旋标准材料对湿度条件进行补偿的仪器时,应记录所选的相对湿度。

13 测量不确定度

- 13.1 在测量吸收剂量时,应给出不确定度的评定。
- 13.2 不确定度的分量应按下列类别给出:
 - 13.2.1 A 类:通过对重复性条件测量所得量值的统计方法评定的分量。
 - 13.2.2 B 类:通过采用非统计分析方法评定的分量。
- 13.3 如果遵从本标准,在使用丙氨酸-EPR 剂量测量系统确定吸收剂量的扩展不确定度应接近 3% ($k=2$ 或 95% 置信度)。

注 1: A 类和 B 类不确定度的分类,是基于由 1995 年出版的 ISO 测量不确定度表示指南中评估不确定度的方法^[20]。使用这种方法的目的,是促进对国际比对中测量结果不确定度表述的理解。

注 2: GB/T 16509 给出了辐射加工装置剂量测量中不确定度的来源,提供了在使用该剂量测量体系测量吸收剂量时估计不确定度大小的程序。该文件规定和阐述了测量(包括测量量值的评价)、真值、误差和不确定度的基本概念。阐述了不确定度分量,并提供了评价这些量值的方法。也提供了用于计算合成标准不确定度和估计扩展不确定度的方法。

14 关键词

- 14.1 吸收剂量;丙氨酸剂量学;剂量测量;剂量计;剂量测量系统;电子束;电子自旋共振;电子顺磁共振;EPR 剂量计; γ -射线;电离辐射;辐照;光子;辐射;辐射加工;参考标准剂量计;X-射线;ICS 17.240。

参 考 文 献

- [1] McLaughlin, W. L. , Boyd, A. W. , Chadwick, K. H. , McDonald, J. C. , and Miller, A. , *Dosimetry for Radiation Processing*, Taylor and Francis, London, U. K. , 1989.
- [2] Regulla, D. F. , and Deffner, U. , “Dosimetry by ESR Spectroscopy of Alanine”, *Trends in Radiation Dosimetry*, W. L. McLaughlin, Ed. , Pergamon Press, Oxford, U. K. ; *Applied Radiation and Isotopes*, Vol 33, 1982, p. 1101.
- [3] Hansen, J. W. , and Olsen, K. J. , “Theoretical and Experimental Radiation Effectiveness of the Free Radical Dosimeter Alanine to Irradiation with Heavy Charged Particles”, *Radiation Research*, Vol 104, 1985, p. 15.
- [4] Onori, S. , Bartolotta, A. , Caccia, B. , Indovina, P. L. , Milano, F. , Renzi, R. , Scarpa, G. , Caporali, C. , and Moscati, M. , “Dosimetric Characteristics of Alanine-Based ESR Detectors in Electron Beams Used in Radiotherapy”, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 34, 1990, p. 287.
- [5] Desrosiers, M. F. , Cooper, S. L. , Puhl, J. M. , McBain, A. L. , and Calvert, G. W. , “A Study of the Alanine Dosimeter Irradiation Temperature Coefficient in the -77°C to $+50^{\circ}\text{C}$ Range”, *Radiation Physics and Chemistry*, Vol 71, 2004.
- [6] Hansen, K. W. , Olsen, K. J. , and Wille, M. , “The Alanine Radiation Detector for High and Low LET Dosimetry”, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 19, 1987, p. 43.
- [7] Arber, J. M. , and Sharpe, P. H. G. , “Fading Characteristics of Irradiated Alanine Pellets: The Importance of Pre-irradiation Conditioning”, *Applied Radiation and Isotopes*, Vol 44, 1993, p. 19.
- [8] Bartolotta, A. , Indovina, P. L. , Onori, S. , and Rosati, A. , “Dosimetry for Cobalt-60 Gamma Rays with Alanine”, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 9, 1984, p. 277.
- [9] Kojima, T. , Ranjith, H. L. A. , Haruyama, Y. , Kashiwazaki, S. , and Tanaka, R. “Thin Film Alanine-Polyethylene Dosimeter”, *Applied Radiation and Isotopes*, Vol 44, 1993, p. 41.
- [10] Regulla, D. F. , Scharmann, A. , and McLaughlin, W. L. , Eds. , *ESR Dosimetry and Applications*, Pergamon, Oxford, U. K. ; *Applied Radiation and Isotopes*, Vol 40, 1989.
- [11] Kojima, T. and Tanaka, R. , “Polymer-Alanine Dosimeter and Compact Reader”, *Applied Radiation and Isotopes*, Vol 40, 1989, p. 851.
- [12] Coninckx, F. , and Schönbacher, H. , “Experience with a New Polymer-Alanine Dosimeter in a High-Energy Particle Accelerator Environment”, *Applied Radiation and Isotopes*, Vol 44, 1993, p. 67.
- [13] Nichiporov, D. , Kostjuchenko, V. , Puhl, J. , Bensen, D. , Desrosiers, M. , Dick, C. , McLaughlin, W. , Kojima, T. , Coursey, B. , and Zink, S. , “Investigation of Applicability of Alanine and Radiochromic Detectors to the Dosimetry of Proton Clinical Beams”, *Applied Radiation and Isotopes*, Vol 46, 1995, p. 1355.
- [14] Desrosiers, M. F. , and Skinner, A. F. , Eds. , *ESR Dosimetry and Applications*, Pergamon, Oxford, U. K. ; *Applied Radiation and Isotopes*, Vol 44, 1993.
- [15] Nagy, V. Yu. , Sleptchonok, O. F. , Desrosiers, M. F. , Weber, R. T. , and Heiss, A. H. , “Advancements in Accuracy of the Alanine Dosimetry System. Part 3. Usefulness of an adjacent reference sample”, *Radiation Physics and Chemistry*, Vol 59, 2000, p. 429.
- [16] Yordanov, N. D. , Gancheva, V. , and Pelova, V. A. “Studies on some materials suitable for

use as internal standards in high energy EPR dosimetry”, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol 240,1999, p. 619.

[17] Sleptchonok, O. F. ,Nagy, V. Yu. , and Desrosiers, M. F. , “Advancements in Accuracy of the Alanine Dosimetry System. Part 1. The Effects of Environmental Humidity”, *Radiation Physics and Chemistry*, Vol 57,2000, p. 115.

[18] Nagy, V. Yu. ,Puhl, J. , and Desrosiers, M. F. , “Advancements in Accuracy of the Alanine Dosimetry System. Part 2. The Influence of Irradiation Temperature”, *Radiation Physics and Chemistry*, Vol 57,2000, p. 1.

[19] Wieser, A. , Lettau, C. , Fill, U. , Regulla, D. F. , “The Influence of Non-radiation Induced ESR Background Signal from Paraffin-Alanine Probes for Dosimetry in the Radiotherapy Dose Range”, *Applied Radiation and Isotopes*, Vol 44,1993, p. 59.

[20] ISO “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement”, International Organization for Standardization, 1995 ISBN 92-67-10188-9.
