

·综述·

玻璃电子自旋共振剂量学特性的研究进展

刘玉连 赵徵鑫 张文艺 焦玲

300192 天津, 中国医学科学院北京协和医学院放射医学研究所, 天津市放射医学与分子核医学重点实验室

通信作者: 焦玲, Email: ljiao.irm@163.com

DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2018.02.015

【摘要】 辐照后的玻璃可经电子自旋共振(ESR)波谱仪检测出 ESR 信号, 包括本底信号、机械信号和辐射信号。ESR 信号的大小与受照剂量基本成正比。当发生核事故或突发辐射意外时, 可以通过对受照人员随身携带物品或事故区域内的玻璃进行 ESR 测量, 快速估算事故剂量, 评价事故的严重程度, 并对受照人员进行及时的医学救治。玻璃具有廉价、化学惰性、刚度好、易于处理、普遍易得等特点, 是一种很有前景的剂量估算物理剂量计。笔者主要对玻璃构成、剂量估算原理、ESR 信号组成及其剂量学特性进行了探讨。

【关键词】 玻璃; 电子自旋共振谱学; 剂量学特性

基金项目: 天津市自然科学基金(16JCZDJC36100); 中国医学科学院医学与健康科技创新工程(2017-I2M-1-016)

Electron spin resonance dosimetric properties of glass Liu Yulian, Zhao Zhixin, Zhang Wenyi, Jiao Ling

Tianjin Key Laboratory of Radiation Medicine and Molecular Nuclear Medicine, Institute of Radiation Medicine, Chinese Academy of Medical Science, Peking Union Medical College, Tianjin 300192, China

Corresponding author: Jiao Ling, Email: ljiao.irm@163.com

【Abstract】 Electron spin resonance(ESR) signals, such as background, mechanically-induced, radiation-induced signals, can be detected in irradiated glass by ESR spectroscopy. ESR signals are set proportional to the dose. When a nuclear accident or sudden radiation accident occurs, the ESR measurement of the glass can quickly estimate the dose. Then the severity of the accident can be evaluated, and the medical treatment of the injured can be effectively performed. The use of glass samples as radiation detectors has several advantages, such as chemical inertness, rigidity, insolubility, small size, low cost, and ripeness, that make them especially attractive. In this paper, the composition of glass, the principle of dose estimation, and the composition of the ESR signal and its dosimetry characteristics are discussed.

【Key words】 Glass; Electron spin resonance spectroscopy; Dosimetric properties

Fund programs: Tianjin Municipal Natural Science Foundation(16JCZDJC36100); Medical and Health Technology Innovation Project of Chinese Academy of Medical Sciences (2017-I2M-1-016)

电子自旋共振(electron spin resonance, ESR)光谱技术被认为是分析电离辐射与物质相互作用产生顺磁性物质(自由基、空穴等)的一种强有力的技术。由于顺磁性物质的浓度与吸收剂量有关, 通过测量被辐照后物质的 ESR 信号可以进行剂量评估。在过去的几十年中, ESR 技术被大量应用于对辐射事故或长期暴露于电离辐射的人员的剂量重建研究。例如, 对牙釉质、骨等身体组织的 ESR 测量研究深入广泛, 其已成为吸收剂量物理重建方法的

“金标准”。但因样本采集具有创伤性^[1], 研究者开始寻找其他可以替代的、易于获得的、无创的材料。为更好地进行个人剂量估算, 研究材料最好是属于个人随身之物, 例如指甲、头发、衣物、眼镜、糖果等^[2-4]。玻璃因具有廉价、化学惰性、刚度好、易于处理、普遍易得等特点, 逐渐获得研究者的青睐。通过测量放置在可能被辐照人员身上的物品(手机、手表、眼镜、MP3 播放器等)或辐射事故范围内的生活材料(窗玻璃、汽车挡风玻璃

等)在辐射后引起的物理变化,进而估算辐射剂量^[1]。玻璃的辐射信号可通过光释光、热释光^[5-9]和 ESR 等方法测得。笔者综述了玻璃作为剂量重建材料的 ESR 特性,为研究者提供了参考。

1 玻璃的构成

在日常生活中,随处可见各式玻璃,如窗玻璃、手表玻璃、手机屏幕等。玻璃的主要化学成分是二氧化硅,在矿物学上属于石英族,为了商业应用,在玻璃中掺入了少量金属等物质,使之呈现不同颜色和不同特性^[10-12]。例如,铅,增加亮度和重量;硼,降低导热和增加电阻;钡,增加折射率;铈,增加红外线吸收;金属氧化物可以着色;锰则为脱色^[13]。

玻璃并不是晶体,理论名称叫玻璃态,玻璃态在常温下的特点是:短程有序,即在数个或数十个原子范围内,原子有序排列,呈现晶体特征;长程无序,即增加原子数量后,便成为一种无序的排列状态,其混乱程度类似于液体。因此,玻璃的固有性质较为复杂,尚未明确。

2 玻璃剂量估算原理

辐射射线在传播过程中遵循扩散衰减规律和吸收衰减规律。扩散衰减:对于均匀介质中的辐射源在空间各个方向辐射时,若不考虑介质的吸收,与普通点光源一样,在半径不同的球面上,辐射射线的减弱遵守反平方规律,即: $I_1/I_2 = r_2^2 / r_1^2$, 式中 I_1 、 I_2 分别为半径 r_1 和 r_2 的球面上射线的强度。吸收衰减:辐射射线通过物质时,与物质发生相互作用,在这个过程中由于吸收和散射导致入射方向射线强度减小。单能窄束辐射射线在物质中的衰减 $I = I_0 e^{-\mu x}$, 其中, I_0 是射线的初始强度, I 是经过衰减后的强度。根据这两个规律可以用窗玻璃或车挡风玻璃等大致估算人的全身照射剂量,而手表镜面、手机屏幕等贴身使用之物则可直接用于局部照射剂量的估算。通过综合局部和全身估算剂量数据,可以帮助研究者获取辐照源异质性和暴露时间延迟等附加信息。

3 玻璃 ESR 信号组成

3.1 本底信号(background signal, BKG)

研究报道,90%的玻璃制品在 $g = 2$ (g 值代表 ESR 波谱图中信号出现的位置)附近存在一个复杂

的、稳定的宽 BKG,与照射后产生的辐射诱导信号(radiation-induced signal, RIS)重叠,可能是因玻璃生产过程中引入杂质或金属而造成的^[14-16],也有人推测是由于紫外线照射累积引起的^[17]。另外,照射前后的玻璃都能在 $g = 4.25$ 附近检测到一个由过渡金属离子 Fe^{3+} 引起的宽波信号。这个信号不能用作剂量估计,因为它的剂量响应依赖于玻璃的组成成分,不随照射剂量的增加而变化^[15-16,18]。因此,应该重点研究 $g = 2$ 附近的信号来探索玻璃的辐射特性。

3.2 机械信号(mechanically-induced signal, MIS)

MIS 是指处理样品过程中所产生的信号。玻璃样品需要处理成小颗粒或者粉末状,以便放入直径为 5 mm 或是更小的石英管中进行测量。在 Trompier 等^[19]的研究中,3 种玻璃分别被处理成 3 种大小 (<315 μm 、>800 μm 和介于二者之间),结果只有一种玻璃显示出随着样品直径变小而有新信号产生,即 MIS。MIS 可以通过长时间放置而衰减(室温条件下,10 h 后 MIS 信号衰减 30%),或使用无水乙醇清洗消除^[19]。Bassinet 等^[16]在最小尺寸(<315 μm)的玻璃中观察到一个显著的 MIS 信号,而 315~800 μm 和更大尺寸的样本中则没有观察到同样的现象。在 Ranjbar 等^[10]的研究中也发现了研磨后的高纯度石英粉末比块状的样本 BKG 高。

目前,很少有研究系统地探讨各种玻璃经不同处理后是否产生 MIS,日后应深入研究此问题。如果有些研究者想暂时略过 MIS 问题而研究其他方面,建议处理后的玻璃用无水乙醇清洗,消除可能存在的 MIS 信号。另外,建议将玻璃处理成 2~3 mm 大小,并记下颗粒数目,这样在实验过程中可最大程度地避免质量的损失。虽然颗粒变大后各向异性也会随之增大,但可以通过多角度测量或晃动石英管改变玻璃位置的多次测量来解决。

3.3 RIS

ESR 的主要研究对象是自由基和过渡金属离子及其氧化物两大类^[20]。在之前的相关研究中,辐照后的玻璃在 $g=2$ 附近显示有信号变化,即 RIS^[1,18-19]。文献显示,观察到的 ESR 信号($g=2$ 附近)可能来自被称为石英家族的 E' 中心^[10]。此缺陷(E' 中心)被认为是空穴型 ESR 中心,由电子轰击 Si-O 键断裂而产生。E' 中心是一种三价硅,是一个空穴陷入 Si-O 断键处时,二氧化硅中的硅原子上便产生

了一个悬空键^[10];还有一些研究者则将此信号归因于交换耦合的 Fe³⁺离子对^[13]。在玻璃中, Fe³⁺离子可以存在于取代位置或空隙位置。在 g=4.25 处出现的信号就是指替代四面体中硅位置的 Fe³⁺离子,是由附近补偿阳离子(碱金属)引起的正交畸变而产生的。空隙 Fe³⁺离子经热处理或辐照便可产生上述的正交畸变,从而形成交换耦合 Fe³⁺离子^[13]。

随着照射剂量的增加, RIS 信号也逐渐增强。不同玻璃呈现出的 ESR 信号曲线(RIS 和 BKG)也不尽相同,这与它的化学成分有关^[1,15,19]。玻璃中掺入不同的成分,则自旋哈密顿参量(包括 g 因子和超精细结构常数 A)等略有变化,这可以归因于顺磁离子配位场的畸变,或是玻璃网络结构的变化^[11]。

4 玻璃的 ESR 剂量学特性

4.1 剂量响应特性

玻璃的种类不同,其 ESR 信号与微波功率的关系也不相同。在有些研究中,玻璃归一化后的 ESR 信号与微波功率的平方根呈线性相关,且没有出现饱和现象^[15]。有些玻璃仅在小于 1 mW 的微波功率范围内, ESR 信号与微波功率的平方根呈线性相关,而大于 1 mW 时则开始出现饱和状态^[19]。微波功率是影响 ESR 信号检测的重要参数之一,在一定范围内,微波功率越大,光谱信噪比越大。为了最大程度地增强 ESR 信号,在开始实验前,必须检测出最适合某种玻璃的微波功率。

Marralle 等^[21]在对不同射线源照射手表玻璃的研究中发现,在 0~20 Gy 范围内,剂量响应拟合曲线均呈二次方程式,而在 10 Gy 以内则为一次曲线。在 Gancheva 等^[15]的研究中,5 种成分不同的玻璃在照射剂量为 50~500 Gy 范围内的 ESR 信号与照射剂量均呈一次线性相关。以上研究得出的剂量响应校准曲线虽有不同,但都反映出 RIS 的量与玻璃吸收的剂量大致成正比。在 0.5~2 Gy 的低剂量范围内,剂量响应拟合曲线呈非线性,可能是由于 ESR 机器的自由基最小检测数量限制或玻璃的低敏感性造成的^[10]。

另外,粉末状样本较块状样本的校准曲线斜率小很多^[10]。通过大量研究得出一个或几个适用性非常强的校准曲线,是研究玻璃辐射属性最主要的内容。校准曲线应考虑待分析样品的特异性,为主要类型的玻璃预先设置曲线是快速评估的一种方法,

但对于精确剂量测定,应优选与待评估样品相同起源的玻璃建立起的校准曲线。

4.2 玻璃 RIS 信号衰退特性

有研究者认为,辐照后的玻璃会产生两部分信号,一部分为稳定信号,另一部分则为不稳定信号^[22]。后者暴露在光照下 5 d 后就会完全消退,但当样品被储存在黑暗中时,这种信号成分至少能稳定存在一年。故 Fattibene 等^[22]建议将受照后的玻璃在光照下存放至少 5 d,然后再进行检测。但这种信号衰退机制并没有得到进一步的研究证明。

虽然比液体慢,但玻璃中的自由基重组现象依然存在。自由基的平均寿命可以介于几个小时至数年之间。重组率随着温度的升高而增高。大量研究表明,在不同存储温度下,玻璃的 ESR 信号衰退速度也不同^[16,21-22]。在常温下放置 24~48 h 后,透明玻璃 ESR 信号衰减 10%~35%,并在 300 h 后趋于稳定^[14,16,18,21-22]。在 Teixeira 等^[13]的实验中也得出了类似的结果,辐照后的 24 h,透明、青铜色、棕色和绿色玻璃样品的 ESR 信号分别降低了约 14%、21%、17%和 19%,14 d 后的信号衰减逐渐放缓并趋于一个定值。相较于其他玻璃,透明玻璃对辐射的敏感性最强。在 40℃下,信号于 1 h 后即可衰减 20%~35%^[10]。样品储存在低温条件下,可以减慢顺磁中心的再结合。通过对玻璃 ESR 信号随时间衰减特性的研究,可以总结出时间衰减校正因子,这对于剂量估算十分重要。但对于低剂量照射玻璃的剂量估算,ESR 信号的时间衰减校正因子对正确估算剂量影响较大,这是因为低剂量照射产生的 RIS 可能被 BKG 覆盖,从而当作没有曝光或未照射而误使用衰减校正因子导致错误的结果等。不同玻璃的衰退速度不同,有些甚至在衰退过程中的信号形状也会发生变化。

4.3 玻璃退火特性

Wu 等^[14]研究结果得出辐照后的玻璃在 200℃下加热 1 h, RIS 彻底衰退,只剩下 BKG。基于此,他们提出了一个方法来提取出 RIS 信号:记录照射后样品的 ESR 谱(有 RIS 和 BKG 信号)和退火后样品的 ESR 谱(只剩 BKG 信号),将两者相减即可得到 RIS 信号谱。Engin 等^[23]的研究结果发现,低于 200℃的加热不能彻底使 RIS 衰退,而 200℃以上加热 5 min 即可退火完全。但在 Tromprier 等^[19]的研究中却没有得到相似的结果,其中一种玻璃(照射后)

经过 200°C 加热 20 min 后获得的信号曲线, 与未经退火处理的未照射玻璃的 ESR 信号形状不同; 另两种玻璃经同样处理后, 不但没有衰退成与未照射未退火样本相似的曲线, 还产生了一个额外的信号。

从分子结构上讲, 给予一定时间的加热处理, 玻璃内部的缺陷(自由基、电子、空穴等)部分从“冻结状态”逐渐松弛, 并重新结合, 进而 RIS 被消除。退火处理使玻璃的 RIS 信号加速衰退, 但是多高温、多长时间的退火处理才能使 RIS 信号全部衰减, 仍需参考玻璃的种类和特性, 以及进行大量的实验, 优化温度和时间, 才能得出较为可靠的结论。

由上可知, 玻璃的 BKG 除了可以通过模拟计算或去卷积等技术得到(类似于牙釉质剂量学方法), 也可以采用热处理(退火)去除 RIS, 然后估算 BKG^[16], 此方法还可以很好地解决 BKG 缺失的问题。

5 存在的问题及展望

目前, ESR 测量使用最广泛的是 X 波段, 需要样品质量为数十毫克或几百毫克。根据文献报道, X 波段检测玻璃的最低剂量是 2~10 Gy^[1,24], 最高可达数千戈瑞(Gy), 而在逐渐推广的 Q 波段中, 只需样品 1~3 mg, ESR 波谱的敏感性更强, 光谱分辨率更高, 最低检测剂量低至 0.5~1 Gy, 可以很好地从 BKG 中区分出 RIS 信号。玻璃常用于高剂量的估算, 低剂量的相关研究很少。1 Gy 是确定性生物效应开始的剂量^[2], 因此低剂量区的研究十分必要。

玻璃的非 RIS(BKG 和 MIS)、RIS 以及影响信号稳定的各参数尚未被完全了解。在实验室条件下, 均质样品的剂量估计具有非常好的结果, 但暴露在阳光下则增加了 ESR 信号分析的复杂性。紫外线诱导的物质具有类似于辐射引起的特征, 并会导致一些辐射信号的衰变, 包括电子和空穴的重新组合^[17,21]。因此, 暴露于不同条件下不同来源的样品, 剂量响应具有差异性, 在未来的研究中有必要对不同的信号分量进行探索, 建立实用性强大的剂量估算校正曲线。

旨在提高大型辐射事故剂量评价能力的研究和开发方案, 主要是

基于生物测定(血液学、细胞学、遗传学或生物化学等剂量估算方法), 特别是细胞遗传学技术开展的^[20]。目前, 物理剂量测定方法(如指甲、玻璃 ESR 检测等)正在被积极探索和研究中, 这些方法并没有与生物分析法一样的标准化水平, 仍处于开发阶段。但其具备一些重要优势, 例如, 存放多年的样本依然可以探测到有用的信息。在众多物理剂量测定材料中, 玻璃具有独特的性质, 表 1 列举了玻璃及其他物质的一些辐射特性, 通过对比更能直观体现玻璃作为剂量估算剂量计的优缺点。

玻璃的 ESR 测量也有一些局限性。由于玻璃是基于从生活用品(手机、眼镜等)中收集的材料, 相关剂量测定方法在未来的适用性完全取决于玻璃制作技术的演进。与之相比, 建筑用玻璃的制作技术相对稳定, 成本更为低廉, 也更易于处理, 并能广泛应用于各个生活场所中, 因此对玻璃的研究可以侧重在建筑玻璃的方向上。

对于玻璃的剂量学性质的研究, 不仅仅应用于辐射事故的剂量重建, 在消毒、净水、巴氏杀菌和食品灭菌等辐射过程中的剂量测定方面也发挥着重要的作用^[13]。

综上所述, 在物理剂量估算材料中, 玻璃的剂量估算原理明了、ESR 信号较稳定、剂量响应呈线性相关, 且具有廉价、化学惰性、刚度好、易于处理、普遍易得等特点, 因此, 玻璃是一种很有前景的物理剂量计。在未来的研究中, 应将重点放在不同的信号分量的探索上, 进一步克服玻璃样品和剂量响应的差异性, 建立一个适用性强大的剂量响应曲线。

表 1 各种物理剂量计的对比

Table 1 Comparison of various physical dosimeters

材料	RIS	BKG	UV-信号	最低检测剂量	普遍性	取样难度	信号稳定性	全身或局部剂量
玻璃	有	有	有	2 Gy	高	易	24 h 后稳定	全身和局部
糖	有	-	有	0.2 Gy	低	中	较稳定	全身和局部
塑料	有	有	有	-	高	易	不稳定	全身和局部
棉花	有	有	-	10 Gy	中	中	-	全身和局部
羊毛	有	有	有	-	中	中	400 h 后稳定	全身和局部
指甲	有	有	-	2 Gy	高	易	高度可变	局部
头发	有	有	有	-	高	易	高度可变	局部
骨头	有	有	否	2 Gy	高	难	稳定	局部
牙齿	有	有	有	2 Gy	高	难	稳定	局部

注: 表中, RIS: 辐射信号; BKG: 本底信号; UV-信号: 紫外线产生的信号; “-”代表此项未知。

利益冲突 本研究由署名作者按以下贡献声明独立开展, 不涉及任何利益冲突。

作者贡献声明 刘玉连负责文献的检索、命题的提出和设计、论文的撰写与修订; 赵微鑫负责文献的检索、论文的修订; 张文艺、焦玲负责命题的提出和设计, 论文的审阅。

参 考 文 献

- [1] Trompier F, Bassinet C, Wieser A, et al. Radiation-induced signals analysed by EPR spectrometry applied to fortuitous dosimetry[J]. *Ann Ist Super Sanita*, 2009, 45(3): 287–296.
- [2] Trivedi A, Greenstock CL. Use of sugars and hair for ESR emergency dosimetry[J]. *Appl Radiat Isot*, 1993, 44(1–2): 85–90. DOI:10.1016/0969–8043(93)90201–k.
- [3] Wang L, Wang X, Zhang WY, et al. Determining dosimetric properties and lowest detectable dose of fingernail clippings from their electron paramagnetic resonance signal[J]. *Health Phys*, 2015, 109(1): 10–14. DOI: 10.1097/HP.0000000000000277.
- [4] Zhang T, Zhang W, Zhao Z, et al. Two factors influencing dose reconstruction in low dose range: the variability of BKG intensity on one individual and water content[J]. *Radiat Prot Dosimetry*, 2016, 171(3): 297–303. DOI: 10.1093/rpd/ncv382.
- [5] Pascu A, Vasiliniuc S, Zeciu-Dolha M, et al. The potential of luminescence signals from electronic components for accident dosimetry[J]. *Radiat Meas*, 2013, 56: 384–388. DOI: 10.1016/j.radmeas.2013.03.013.
- [6] Lee JI, Chang I, Pradhan AS, et al. On the use of new generation mobile phone (smart phone) for retrospective accident dosimetry[J]. *Radiat Phys Chem*, 2015, 116: 151–154. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2015.05.004.
- [7] Bassinet C, Trompier F, Clairand I. Radiation accident dosimetry on electronic components by OSL[J]. *Health Phys*, 2010, 98(2): 440–445. DOI: 10.1097/01.HP.0000346335.56701.93.
- [8] Bassinet C, Woda C, Bortolin E, et al. Retrospective radiation dosimetry using OSL of electronic components: results of an inter-laboratory comparison[J]. *Radiat Meas*, 2014, 71: 475–479. DOI: 10.1016/j.radmeas.2014.03.016.
- [9] Eakins JS, Hager LG, Kouroukla E, et al. The PHE fortuitous dosimetry capability based on optically stimulated luminescence of mobile phones[J]. *Radiat Prot Dosimetry*, 2016, 170(1/4): 412–415. DOI: 10.1093/rpd/ncv520.
- [10] Ranjbar AH, Randle K. Hyper pure quartz as a promising material for retrospective and radiation processing dosimetry using ESR technique[J]. *Appl Radiat Isot*, 2008, 66(9): 1240–1244. DOI: 10.1016/j.apradiso.2008.01.016.
- [11] Teixeira MI, Caldas LV. Dosimetric properties of various colored commercial glasses[J]. *Appl Radiat Isot*, 2002, 57(3): 407–413. DOI: 10.1016/S0969–8043(02)00127–6.
- [12] Upender G, Babu JC, Mouli VC. Structure, glass transition temperature and spectroscopic properties of $10\text{Li}_2\text{O}-x\text{P}_2\text{O}_5-(89-x)\text{TeO}_2-1\text{CuO}$ ($5 \leq x \leq 25$ mol%) glass system[J]. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc*, 2012, 89: 39–45. DOI: 10.1016/j.saa.2011.12.047.
- [13] Teixeira MI, Ferraz GM, Caldas LV. EPR dosimetry using commercial glasses for high gamma doses[J]. *Appl Radiat Isot*, 2005, 62(2): 365–370. DOI: 10.1016/j.apradiso.2004.08.012.
- [14] Wu K, Sun CP, Shi YM. Dosimetric properties of watch glass: a potential practical ESR dosimeter for nuclear accidents[J]. *Radiat Prot Dosimetry*, 1995, 59(3): 223–225. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a082654.
- [15] Gancheva V, Yordanov ND, Karakirova Y. EPR investigation of the gamma radiation response of different types of glasses[J]. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc*, 2006, 63(4): 875–878. DOI:10.1016/j.saa.2005.10.019.
- [16] Bassinet C, Trompier F, Clairand I. Radiation accident dosimetry on glass by TL and EPR spectrometry[J]. *Health Phys*, 2010, 98(2): 400–405. DOI: 10.1097/01.HP.0000346330.72296.51.
- [17] Trompier F, Burbidge C, Bassinet C, et al. Overview of physical dosimetry methods for triage application integrated in the new European network RENE[B]. *Int J Radiat Biol*, 2017, 93(1): 65–74. DOI: 10.1080/09553002.2016.1221545.
- [18] Longo A, Basile S, Brai M, et al. ESR response of watch glasses to proton beams[J]. *Nucl Instrum Methods Phys Res B*, 2010, 268(17–18): 2712–2718. DOI: 10.1016/j.nimb.2010.05.073.
- [19] Trompier F, Della Monaca S, Fattibene P, et al. EPR dosimetry of glass substrate of mobile phone LCDs[J]. *Radiat Meas*, 2011, 46(9): 827–831. DOI: 10.1016/j.radmeas.2011.03.033.
- [20] Lund A, Shiotani M. *Applications of EPR in Radiation Research* [M]. Heidelberg: Springer International Publishing, 2014: 255–298.
- [21] Marrale M, Longo A, D'Oca MC, et al. Watch glasses exposed to 6 MV photons and 10 MeV electrons analysed by means of ESR technique: A preliminary study[J]. *Radiat Meas*, 2011, 46(9): 822–826. DOI: 10.1016/j.radmeas.2011.05.003.
- [22] Fattibene P, Trompier F, Wieser A, et al. EPR dosimetry inter-comparison using smart phone touch screen glass[J]. *Radiat Environ Biophys*, 2014, 53(2): 311–320. DOI: 10.1007/s00411–014–0533–x.
- [23] Engin B, Aydaş C, Demirtaş H. ESR dosimetric properties of window glass[J]. *Nucl Instrum Methods Phys Res B*, 2006, 243(1): 149–155. DOI: 10.1016/j.nimb.2005.08.151.
- [24] Trompier F, Bassinet C, Della Monaca S, et al. Overview of physical and biophysical techniques for accident dosimetry[J]. *Radiat Prot Dosimetry*, 2011, 144(1/4): 571–574. DOI: 10.1093/rpd/ncq341.
- [25] Narayan P, Vaijapurkar SG, Senwar KR, et al. Accidental gamma dose measurement using commercial glasses[J]. *Radiat Prot Dosimetry*, 2008, 130(3): 319–324. DOI: 10.1093/rpd/ncn051.
- [26] Ainsbury E, Badie C, Barnard S, et al. Integration of new biological and physical retrospective dosimetry methods into EU emergency response plans—joint RENE[B] and EURADOS inter-laboratory comparisons[J]. *Int J Radiat Biol*, 2017, 93(1): 99–109. DOI: 10.1080/09553002.2016.1206233.

(收稿日期: 2017–12–15)