

物理与生物 辐射探测器进展

原子能出版社

物理与生物辐射探测器进展

国际原子能机构1970年11月座谈会文集

陈常茂 等译

李树德 校

原子能出版社

内 容 简 介

本文集选译自国际原子能机构出版的《物理和生物辐射探测器进展》(Advances in Physical and Biological Radiation Detectors, IAEA, Vienna, 1971), 共包括十九篇文献。内容主要涉及辐射剂量测量用的发光剂量计、外逸电子剂量计、热释光剂量计、中子剂量计等的性能及其应用; 有两篇文章专门谈到剂量计的校准问题; 最后两篇文章介绍了染色体畸变在测量组织吸收剂量方面的应用。

本文集可供放射防护仪器的研制和使用人员及大专院校有关专业师生参考。

物理与生物辐射探测器进展

国际原子能机构1970年11月座谈会文集

陈常茂 等译 李树德 校

原子能出版社出版

北京印刷二厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

(限国内发行)



开本 $787 \times 1092^{1/32}$ ·印张 $9^{3/8}$ ·字数 207 千字

1978年7月北京第一版·1978年7月北京第一次印刷

统一书号: 15175·114

定 价: 0.90 元

目 录

用于个人监测的发光剂量计和外逸电子剂量计	1
外逸电子专用正比计数管的研究	21
新的外逸电子剂量计	33
采用硅酸镁磷光体的新的高灵敏度的热释光剂量计	50
用于常规个人监测的硼酸锂和氟化锂联合热释光剂量计	63
用热氮气作加热介质的固体热释光剂量计读出仪器	81
钷和其他极低能量发射体的体内测量	98
γ 辐射硅探测器的剂量特性	111
辐射损伤型锗探测器的能谱仪特性	122
用于测量骨骼-组织交界面剂量分布的探测器	133
径迹探测器在中子剂量测量方面的应用	148
用辐射电池测定中子剂量的方法	160
直接充电探测器的物理特性	171
测定事故剂量用的新的中子探测器	184
不同屏蔽后面的慢中子、中能中子和快中子剂量分数的计 算以及若干剂量计的读数	220
中子校准源的能谱和转换系数	232
在全身测量系统中锗和碘化钠的比较	243
染色体畸变率在人体生物剂量学中的应用	257
辐射诱发的人体淋巴细胞染色体畸变在剂量学中的应用	280

用于个人监测的发光剂量计 和外逸电子剂量计*

阿蒂克斯 (F.H. Attix)**

摘 要

在许多企业中，正在日益广泛地采用发光剂量计（特别是热释光剂量计），用于 γ 和 β 射线的常规监测，而自动读数装置的发展，无疑将加速这个过程。现在已经有许多有用的磷光体用于这种剂量计，然而氟化锂仍然使用得最为广泛。由于发光剂量计对快中子不灵敏，所以它们在中子剂量学方面并不怎么成功。为了克服这种缺陷，曾试验了各种方法，本文对此进行了讨论。文中指出，只要调整热中子与 γ 射线响应比，就可以获得一种有用的发光剂量计，来记录混合的 γ 射线和中能中子的剂量。另外还讨论了旨在获得更满意的快中子响应的几种新的设想，其中包括外逸电子发射剂量计。

1. 引 言

我在撰写这篇论文时，面临着一种抉择，究竟是对几种主要的发光剂量计和外逸电子剂量计系统的优缺点给予稍微广泛而详细的评述，还是有选择地讨论某些方面的问题。我

* 原文献号 IAEA-SM-143/25

** 美国海军研究所

倾向于后一种叙述方法，因为前者已屡见不鲜，所以我认为在目前比较深入地讨论某些专门方面也许裨益较多。具体地说，我在这篇论文中将用大部分的篇幅来讨论中子剂量学问题，因为这是发光剂量计至今很少成功的一个领域。

2. 热释光剂量计

从1969年的《核科学文摘》所引述的热释光剂量计的文獻来看（见图1），其中约有一半的文獻是涉及氟化锂的，由此可见氟化锂^[1]在热释光磷光体中显然居于领先的地位。这一事实的一部分原因是因为氟化锂作为商品供售开始得较早，然而也还有其它的原因。表1扼要地列出了几种主要的热释光磷光体的某些重要特性。由此可以看出，只有氟化锂、硼酸锂^[2]和氧化铍^[3]在原子序数方面接近于组织，因而不需要使用屏蔽来避免对于100千电子伏以下 γ 射线的过高响应。当然，对于较高原子序数的热释光磷光体，设计屏蔽的技术是尽人皆知的，这种屏蔽从1.2兆电子伏一直到40千电子伏左右，可以提供按每伦琴计近于不变的响应。不过，这样的屏蔽对个人监测方面有如下缺点：（a）增加设备费用；（b）增加体积和重量；（c）增大了响应对辐射入射方向的依赖性，特别是在低能 γ 射线的情形下；（d）不管是否需要，都消除了 β 射线的响应。

再参照表1，这三种低 Z 磷光体用正常方法测量到低至10毫伦，都是足够灵敏的，而且它们的信号贮存稳定性通常也足以适合个人监测之用^[3-6]，尽管斯卡泊曾报道过^[7]一种特殊的热压型氧化铍在三天内有20%的衰退。

硼酸锂对热中子的响应很大，可以与氟化锂 TLD-100相

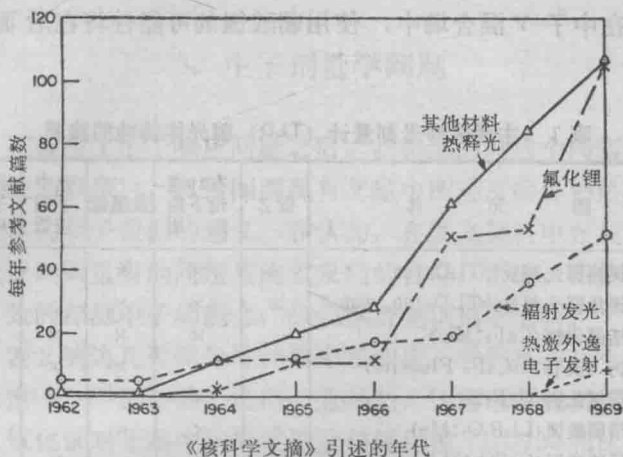


图1 《核科学文摘》题目索引1962—1969年所引述的热释光 (TL)、辐射发光 (RPL)、和热激外逸电子发射 (TSEE) 剂量学的科学文献篇数

图中特别注明氟化锂热释光 (LiF TL) 文献的曲线。其它的材料热释光的参考文献为一条曲线。

比拟。在有热中子存在时，用硼酸锂测量 γ 射线剂量，就会严重地夸大了热中子所造成的剂量，因为要制造出完全不含硼¹⁰的硼酸锂也许是不可能的。对于许多个人监测的应用来说，对热中子具有低的灵敏度是一个重要的条件^[8]，在这方面硼酸锂是不利的。然而，已有若干实验室^[6,9,10]对此进行过研究，发现硼酸锂一般可与氟化锂相匹敌，甚至有某些优胜之处：(a) 尽管市场上也能买到硼酸锂，然而由于这种磷光体在实验室里容易制造，从而比较经济；(b) 对X射线的能量依赖性比氟化锂小。因此，在没有显著的热中子场存在时，对于工作人员的 β - γ 剂量测定，可以期望硼酸锂将来会得到更广泛的采用，特别是在原材料费用要着重考虑的情况

下。在中子- γ 混合场中，使用硼酸锂的可能性将在后面讨论。

表 1 主要热释光剂量计 (TLD) 磷光体特性的摘要

磷 光 体	低 Z	在10毫 伦下的 应 用	衰退低	热中 子响 应低	热中 子响 应高
氟化锂热释光剂量计TLD-700	×	×	×	×	
氟化锂热释光剂量计TLD-100, 600	×	×	×		×
锰激活氟化钙($\text{CaF}_2:\text{Mn}$)		×	×	×	
氟化钙(萤石)(CaF_2 Fluorite)		×	×	×	
镝激活氟化钙($\text{CaF}_2:\text{Dy}$)		×		×	
锰激活硼酸锂($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mn}$)	×	×	×		×
锰激活硫酸钙($\text{CaSO}_4:\text{Mn}$)		×		×	
氧化铍(BeO)	×	×	×	×	
铽激活硅镁石($2\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2:\text{Tb}$)		×	×	×	

表 2 热释光剂量计磷光体的热中子响应

以拉德为单位的钴⁶⁰ γ 射线的组织剂量，使之给出与 4×10^{10} 热中子/厘米² (在一小块组织中约等于 1 拉德) 相同的热释光响应。

磷 光 体	托 奇 林 (Tochilim) ^{(9)*} 等	艾 扬 加 (Ayyangar)等 ^{(11)**}	斯 卡 泊 (Scarpa) ^{(7)***}
氟化锂TLD-700	4.0	3.8	4.0
氟化锂TLD-100	6.1×10^2	4.4×10^2	2.6×10^2
锰激活氟化钙	2.2	0.8	—
氟化钙萤石	—	—	0.64
镝激活氟化钙	—	2.8	—
锰激活硼酸锂	—	2.2×10^2	—
氧化铍	0.76	—	0.68—2.8

* 测量峰值的高度

** 直到300°C为止的光输出积分

*** 直到400°C为止的光输出积分

3. 中子剂量学问题

在提出了中子响应问题之后, 我将继而对这个问题稍稍详细地加以探讨, 以便阐明现有文献中所述及的各种热释光磷光体的中子数据的意义。我认为, 在发光材料中寻找中子剂量计, 最重要的问题是确定我们的目标。否则, 即使存在着有效的探测中子的能力, 我们也可能识别不出来。

表 2 摘述几种磷光体的热中子响应, 它们是在三个不同实验室^[3,7,11]测得的。值得注意的是, 锰激活氟化钙、萤石, 以及氧化铍对于热中子的灵敏度与氟化锂 TLD700 相比甚至更低。艾扬加及其同事^[11]清楚地论证了, 这种磷光体所含有的锂⁶的数量一般为制造者原来规定的 0.007% 的 5 倍左右, 这就是它的热中子灵敏度稍稍上升的原因。

		热释光响应		
		γ 射线	热中子	总计
混合场	4×10^{10} 热中子/厘米 ²	1	4	5
	+	1	440	441
	1.04 伦钴 ⁶⁰ γ 射线	1	1	2
	软组织	吸收剂量 (拉德)		
		1	1	2

图2A 在自由空间几何条件下, 热释光剂量计对 γ 射线和热中子的混合场的响应

仪器的读数装置对每一种剂量计加以刻度, 使它对于钴⁶⁰ γ 射线照射量 1.04 伦, 亦即对小块软组织中 100 尔格/克的比释动能 (Kerma) (在带电粒子平衡条件下, 等于 1 拉德), 在标度尺上给出一个单位的读数。

借助于图2A和2B,对表2中个人剂量测量数据的意义能看得更加清楚。图2A表示“小”块氟化锂 TLD-700, 氟化锂 TLD-100, 氧化铍和软组织在自由空气中受到 4×10^{10} 热中子/厘米² 和 1.04 伦钴⁶⁰ γ 射线混合场的照射。通常的带电粒子平衡的考虑在这里是适用的。

在软组织中, 由钴⁶⁰ γ 射线所引起的吸收剂量为 1 拉德。由热中子沉积的剂量也为 1 拉德, 这主要是由 $N^{14}(n, p)C^{14}$ 反应产生的次级质子所沉积的剂量。由 $H^1(n, \gamma)D^2$ 反应所产生的 2.2 兆电子伏 γ 射线基本上都逃逸出去, 没有局部能量沉积。于是总的组织剂量为 2 拉德。

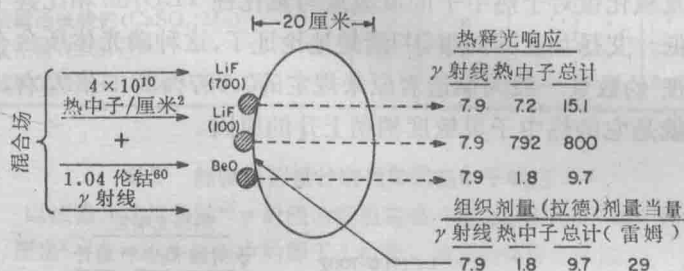


图2B 对于与图2A 相同的混合场, 热释光剂量计佩戴在人体前面时的响应

对于每种类型剂量计, 热释光剂量计读数器的刻度和图2A 中的刻度相同。在估算剂量当量 (DE) 时, 对于 $N^{14}(n, p)C^{14}$ 反应中的热中子俘获所产生的质子, 假设其平均线质系数为 $11.9^{(12)}$ 。钴⁶⁰ γ 射线在组织表面的剂量为 1.1 拉德。

在图2A 中的每个热释光剂量计, 假定都经过刻度, 使它对于 1.04 伦的钴⁶⁰ γ 射线 (即在自由空间中的组织剂量为 1 拉德) 给出一个标度单位的响应。从表 2 就可以推知, 这些热释光剂量计对热中子的响应如何, 从而亦可推知它们在混

合场中总的读数应当是多少（假定不发生协同作用）。表2中氟化锂 TLD-100 和氧化铍的热中子响应值的变化范围较大，这分别暗示自屏蔽程度和样品杂质含量的起伏很大。目前，我们假定氟化锂 TLD-100 的平均值为 4.4×10^2 ，而氧化铍的平均值为 1.0。由此可见，氧化铍剂量计给出的数值几乎等于组织中热中子和 γ 射线的总吸收剂量，氟化锂 TLD-700 要高达 2.5 倍，而氟化锂 TLD-100 则因含有 7% 的天然锂⁶，所以还要高出很多。另外也可以看出，只要有了 TLD-100 或 TLD-700 的读数，并且知道了它们对 γ 射线和热中子的相对灵敏度，就可以直接了当地用代数方法分别计算出组织中 γ 射线和热中子的剂量值。

其次，我们来考虑（在图 2B 中）这些剂量计佩戴在人体前面，受到同样的混合辐射场照射时，其读数应当是多少。从布特 (Boot) 和丹尼斯 (Dennis) [12] 的测试，获得热中子通量密度以及它所引起的 $H^1(n, \gamma)D^2$ 中子俘获反应所产生的 γ 射线场。对于每种类型剂量计，其热释光读数器的刻度都和图 2A 相同的。可以看出，组织表面的 γ 射线剂量约为小块组织样品剂量的 8 倍，这主要是中子俘获反应所产生的 γ 射线造成的。人体的反散射，使得表面上的热中子通量密度增加一倍，从而它们所产生的组织剂量也增加了一倍。

氧化铍剂量计仍能对组织中总的表面剂量给出直接的测量，而氟化锂 TLD-700 的读数，约为这个值的 3/2。两种磷光体对热中子的响应都不像萨克斯比 (Saxby) 和怀特 (White) [8] 所说的那样可以忽略；恰恰相反，它们的热中子响应是可与 γ 射线响应相比拟的。不过，倘若用氟化锂 TLD-100 之类的对热中子灵敏度很高的剂量计同时进行测量，则 γ 射线的剂量可以很容易地推算出来。

4. 测量中能中子和 γ 射线用的发光剂量计

我们现在来探索一下,有没有可能调整氟化锂中锂⁶/锂⁷的比例(例如在氟化锂 TLD-700 中混入一些 TLD-100 的粉末),以便制作一种个人剂量计,使其对入射在人体上的中子和 γ 射线混合场,能直接地读出混合剂量当量。首先为了简单起见,我们只限于如图2B所示的 γ 射线和热中子的混合辐射场。我们希望剂量计在图2B所示的条件下佩戴时,读数为29个标度单位,这个单位理解为雷姆。该数目是假定 $N^{14}(n,p)C^{14}$ 反应中的热中子的线质系数^[12]为11.9而得出的。所以

$$\begin{aligned} DE &= D_{\gamma} + 11.9 D_{\text{热中子}} \\ &= 7.9 \text{拉德} + 11.9 \times 1.8 \text{拉德} = 29 \text{雷姆} \end{aligned}$$

显然,如果我们在氟化锂 TLD-700 粉末中添加适当比例的 TLD-100 型粉末(约2%),使得 TLD-700 的热中子响应从4(见表2)上升到11.9,那末所得到的剂量计将直接读出以雷姆为单位的(γ + 热中子)剂量当量,假定标度单位是用 γ 射线组织拉德来刻度的。

在所见到的多数实际的($n + \gamma$)场中,热中子只构成较少部分^[13],这样就限制了这种剂量计的实际应用。氟化锂⁷对快中子和中能中子的直接响应,比它对 γ 射线的响应,按每雷姆计不到后者的3%^[14]。不过,这些中子在人体内可以慢化,而作为热中子扩散出去,或者由氢俘获产生 γ 射线,这两种次级辐射都可以测出。问题是对于防护目的来说,假定需要测量的最有意义的一个量是人体内的剂量当量的最大值,那末,上面所得到的剂量计读数能在多大程度上代表着这个最

大的剂量当量呢？

若干工作者探索了以人体对中子的慢化和中子反照率为基础的剂量计，获得了不同程度的结果^[15-18]。所得的结果总结起来是，这种设计对于直到10千电子伏的入射中子是相当成功的。但在高能时，它遭到了失败，因为氢的弹性散射迅速地成为组织中剂量沉积的主要方式，相比之下 $N^{14}(n, p)$ C^{14} 和 $H^1(n, \gamma) D^2$ 反应变得无关重要。人体表面上的热中子和 γ 射线探测器，直到10千电子伏能有效地指示出剂量当量，其原因是：

(a) 在这个能量范围内，每个入射中子在人体内产生的剂量当量的最大值稳定在 $\pm 13\%$ 以内^[19]；

(b) 在相同的能量范围内，人体前表面的 $(n, \gamma)\gamma$ 射线组织剂量对人体内最大剂量当量之比，稳定在 $\pm 10\%$ 以内^[19]；

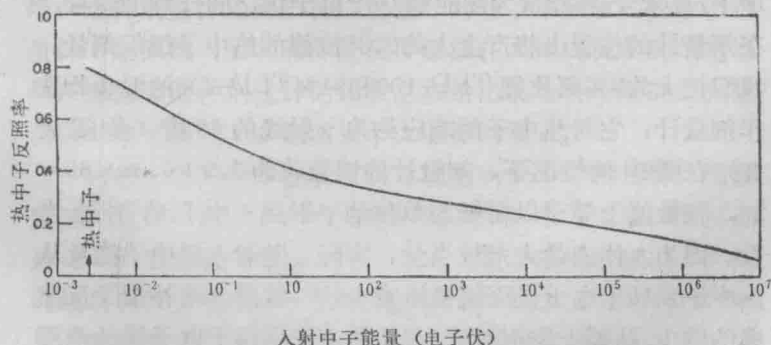


图3 依照哈维 (Harvey) ^[17]，来自人体的热中子反照率与入射中子能量的关系

(c) 如图3所示，热中子反照率（即每个任意能量的中子入射在人体的前面，而在人体前面发射出的热中子数）

作为入射中子能量的函数，其变化不太急剧^[17]。不过，入射中子本身是热中子的话，热中子探测器的响应当然要大于曲线所表示的数值（即， $\propto 1.8$ ，而不是 0.8 ）^[20]。

其次我们来考虑，鉴于上述情况，是否可能调整 ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$ 比例，以便获得一种氟化锂剂量计，使其直接读出整个 γ 射线和中子（从热中子到10千电子伏的中子）的剂量当量。首先，只在剂量计向外一侧覆盖着像氟化锂 6 -聚四氟乙烯圆片之类的热中子屏蔽，来消除对热中子的高响应。丹尼斯等^[15]指出过，对于直径6毫米的剂量计屏蔽，其结果是使得到达剂量计的热中子减少到五分之一。这样，入射热中子的有效反照率将和10千电子伏的中子大致相同（参阅图3），从而可取反照率值 0.35 作为从热中子到10千电子伏整个范围的代表值。

现在我们回到图2B，并注意到入射在人体上的 4×10^{10} 中子/厘米²，其能量为热能到10千电子伏之间任意的能量，在剂量计的位置上将产生大约 0.35 拉德的热中子组织剂量。我们把大约9%氟化锂 TLD-100和91%TLD-700的混合物选作剂量计，它对热中子的响应约为 γ 射线的60倍（参阅表2）。在图2B的情况下，剂量计的读数将为 $7.9 + 0.35 \times 60 = 29$ ，在数值上等于以雷姆为单位的 γ 射线+中子的剂量当量。因为人体内最大剂量当量，实际上随着入射中子能量从热中子到10千电子伏而缓慢地减少^[19]，就部分地补偿了反照率的减少，从而上述剂量计，在从热中子到10千电子伏的范围内，将在大约 $\pm 20\%$ 以内读出 $(\gamma + n)$ 剂量当量。

注意这类剂量计的重要特点是，（a）热中子响应对 γ 射线响应之比，约为60比1，（b）热中子屏蔽阻止人体外面的热中子直接射在剂量计上。氟化锂恰好能提供达到这种特

点的非常简单的途径，因为就热中子与 γ 的响应比率来说，既能获得比率大于60的磷光体材料，也能获得比率小于60的磷光体材料。然而，在这方面也许还可以扩充一些其它热中子响应低的磷光体，例如掺混研得很细的锂⁶化合物；另外，在制造硼酸锂时，也许不难把锂⁶和硼¹⁰的成分去净，使得硼酸锂的热中子与 γ 响应比减少到所要求的程度，即减少到四分之一。

同样，银激活磷酸盐玻璃辐射光致发光剂量计含有硼、锂，以及银，这种剂量计具有能与硼酸锂（表2）相比拟的热中子与 γ 响应比，所以同样的理论在这里也能成立。

由此可见，现有的许多发光剂量计，只要其成分与设计给以比较简单的调整，并且相应地改变一下我们对混合场剂量测定问题的思考方法，就能提供适合于个人监测的一种良好的雷姆计，用来测量 γ 射线和10千电子伏以下的中子的混合场。这种剂量计连同一种“理想”的对 γ 不灵敏的快中子剂量计一起佩戴（后者能测量反冲氢核在人体内沉积的剂量当量），那么这两种剂量计的读数之和给出混合 $n-\gamma$ 场的总剂量当量，这可满足大多数常规个人监测的要求。

目前，我们似乎还没有这样理想的快中子剂量计，当然发光剂量计中也没有，因为它们都对快中子不灵敏，其原因是（a）缺乏氢的含量，（b）对反冲质子的响应低，（c）把灵敏材料同含氢的 $n-p$ 转换器紧密配合起来，实际上有困难。目前在快中子个人剂量测定中最常用的核径迹照相乳胶，不能探测低于大约300千电子伏的中子。在核径迹计数技术中采用的硼¹⁰屏蔽中的赫斯特（Hurst）裂变箔系统，是庞大而且昂贵的，不过，它能允许计算出在截止能量大约10千电子伏之上的快中子剂量当量，恰好满足与上述 γ + 低能中子雷

姆计相配合的要求。

5. 用于快中子的发光剂量计和 热激外逸电子发射(TSEE)剂量计

利用发光材料或外逸电子发射材料,研究一种满意的快中子剂量计的前景是怎样呢?

我前面讲过,人体反照率的方案不可能达到这一目的。严格地讲,如果能对遇到的特殊的中子谱,对照人体进行剂量计刻度的话,也不一定如此。关于这一点,联合起来的氟化锂 TLD-700 + TLD-600,能够作为一种很简单事故剂量计来使用^[21]。对于裂变谱,以组织拉德为单位的中子剂量,大约为两个剂量计读数之差的七分之一,其读数器是用 γ 射线组织拉德来刻度的。对于其他的中子谱,必须把具体的事故情况模拟出来,以便获得合适的刻度,因为人体内的剂量和剂量计读数之间的关系是强烈地依赖于中子能量的。把中子剂量读数转换成剂量当量,当然需要一些中子谱的数据,或至少需要知道有效的线质系数(QF)。

科贝(Korba)和霍伊(Hoy)^[22]使用两对氟化锂 TLD-600和 TLD-700,分别安装在两个有镉屏蔽的慢化聚乙烯半球体中,戴在人的身体上,做了快中子剂量当量的测量,所得的结果对于各种中子谱都胜于核径迹乳胶的结果。可惜剂量计装置的大小约为 $3 \times 6 \times 9$ 厘米,重量为105克,戴在身上不太方便。

可以指出快中子个人剂量计的三种新的可能性,虽然要断言究竟哪一种最终能提供切合适用的装置还为时过早。这三种可能性是:

(a) 用氧化铍圆片与聚乙烯 (n-p) 转换器接触, 在受到快中子照射后, 从氧化铍圆片得到的热激外逸电子发射 (TSEE)。

贝克尔 (Becker) 和克雷斯 (Crase)^[23]指出, 在 0.1 至 16 兆电子伏的中子能量范围内, 1 拉德快中子组织剂量给出的热激外逸电子发射响应约为 1 组织拉德 γ 射线响应的四分之一 (图4)。在相同的剂量当量 (雷姆) 的基础上比较, 快中子响应只是 γ 射线响应的 2—5%。这些结果比之温盖特 (Wingate) 等^[14]用热释光所得的结果仅有微小的改善, 后者使用混入酒精中的氟化锂 TLD-700 型粉末并不断搅拌, 以免粉末沉淀。当然, 氧化铍圆片的几何排列更适合于工作人员的实际佩戴。然而, 快中子灵敏度低得使人失望, 因为人们本来指望在热激外逸电子发射装置中只有非常薄的一层 ($<100\text{\AA}$) 灵敏物质, 应该是很有利的。人们预期这样一种剂量计有利于测量短射程反冲质子所沉积的剂量, 除非由于线能量转移的依赖关系而不利于质子剂量的测量。据贝克尔 (个人通信) 报道, 这后一种情况对于直到 600°C 为止的热激外逸电子发射总计数来说, 确实如此。然而, 托奇林 (Tochilin) 等^[24]指出, 氧化铍在测量其热释光峰的高度时, 对于高线能量转移辐射的响应 (按磷光体中每拉德计算) 两倍于钴 $^{60}\gamma$ 射线的响应。因此需要进一步研究, 以便弄清楚为什么热激外逸电子发射对快中子的响应表现得不大, 从而对它未来的用途也许能获得进一步的认识。

(b) 利用某些磷光体的热释光, 这些磷光体按每拉德计算, 对反冲质子的响应大于对 γ 射线的响应。

如前所述氧化铍被认为就是其中之一的磷光体。库兹明 (Kuzmin) 和同事们^[25]讨论了设计这种快中子剂量计的一