

Ge(Li)探测器系统的绝对全能峰探测效率计算

蔺锡类 张文华 汤乃勋

(北京有色金属研究总院)

Ge(Li)半导体探测器的全能峰绝对效率是探测器-样品系统的函数。本工作将有效立体角概念的半经验方法应用于双开端同轴 Ge(Li) 探测器,对其适用性进行了实验验证;计算了样品有效立体角,刻度了探测器在 50~3000keV 范围内对距离约 20cm 处的点源的效率,从而可计算样品的绝对效率。本方法应用于活化分析,提高了分析准确度和测量的灵活性。

关键词: Ge(Li)半导体探测器 绝对全能峰效率 γ 射线测量

探测器的绝对全能峰探测效率(ϵ_p)与 γ 射线能量(E_γ)的关系不仅依赖于探测器和测量位置,而且与被测样品的几何形状、组成、样品容器和托盘等有关。事实上, $\epsilon_p \sim E_\gamma$ 关系必须看作探测器-被测样品这一系统的函数。因此,使用一系列标准源测定的 $\epsilon_p \sim E_\gamma$ 曲线无法满足实际工作的需要。

基于有效立体角概念的半经验方法^[1]准确度高($\sim 3\%$)、通用性强,是解决实际样品的绝对探测效率计算的较好方法。

一、原 理

被测样品中发射出来的 γ 光子,若以全能峰计数的方式被记录下来,须满足下述条件:(1)该光子在进入探测器活性区之前,不应有能量损失;(2)进入活性区的光子必须同探测器相互作用;(3)该光子必须将全部能量转移给探测器。

上述(1)、(2)两个条件涉及探测器的“虚拟”总探测效率 ϵ_T^* ,它可以表达为

$$\epsilon_T^* = \frac{1}{4\pi} \int F_{att} \cdot F_{eff} \cdot d\Omega \quad (1)$$

(探测器-样品系统)

式中, $d\Omega$ 为微分几何立体角; F_{att} 为衰减因子,它描述 γ 光子流在被测样品内以及处于样品-探测器活性区之间的各种阻挡层中的衰减,例如空气、样品容器和托盘、探测器入射窗、死层等; F_{eff} 为吸收因子,它描述 γ 光子在探测器活性区的吸收。因此,探测器活性区对样品所张有效立体角 $\bar{\Omega}$ 可以表达为

$$\bar{\Omega} = \int F_{att} \cdot F_{eff} \cdot d\Omega \quad (2)$$

(探测器-样品系统)

应用 $\bar{\Omega}$, (1)式可改写为

$$\epsilon_T^* = \frac{1}{4\pi} \bar{\Omega} \quad (3)$$

如果定义 $(P/T)^* = \epsilon_p / \epsilon_T^*$ (峰-全比),那么全能峰探测效率 ϵ_p 可以表达为

$$\epsilon_p = \epsilon_T^* \cdot (P/T)^* \quad (4)$$

从(3)式和(4)式得到

$$\epsilon_p = \frac{1}{4\pi} \cdot (P/T)^* \cdot \bar{\Omega} \quad (5)$$

显然,只要 $(P/T)^*$ 是常数,从(5)式即可得到计算绝对全能峰效率的半经验公式

$$\epsilon_{p,x} = \epsilon_{p,ref} \cdot (\bar{\Omega}_x / \bar{\Omega}_{ref}) \quad (6)$$

式中,下标 x 表示实际样品在实测位置, ref 表示点源在远离探测器的一个参考位置。

用实验直接证明 $(P/T)^*$ 是常数很难,因为不易排除周围环境的影响。尽管如此,由于(6)式可以重写为

$$\varepsilon_{p,x}/\varepsilon_{p,ref}=\overline{Q}_x/\overline{Q}_{ref} \quad (7)$$

(7)式可以实验验证,从而可以间接证实上述假设。这种实验在单开端同轴 Ge(Li)探测器上已经完成^[1]。类似的工作已推广到高纯锗探测器^[2]。

现在,不同组成、不同几何形状的样品在不同位置处测量时,其绝对效率的计算转化为:(1)用实验方法准确刻度点源在远离探测器的参考位置处的绝对全能峰效率 $\varepsilon_{p,ref}$; (2)分别计算探测器对实测位置处的样品和参考位置处的点源的有效立体角 $\overline{Q}_x$ 和 $\overline{Q}_{ref}$ 。

二、参考效率曲线($\varepsilon_{p,ref}$)的刻度

本工作使用的 COSYNUS- γ 谱仪性能如下: 双开端同轴 Ge(Li)探测器: DGL35E n° C185; 活性体积: 185cm³; 相对效率(1332keV): 34%; FWHM(1332keV): 2.8keV; γ 谱分析程序: PREX- γ 10。

为了使可能存在的真实符合效应的影响小于 0.5%, 参考位置选择在距入射窗 20cm 处。

效率刻度中使用了已知放射性强度(准确度 1.5~3.0%)的标准源(²⁴¹Am、¹⁰⁹Cd、⁵⁷Co、¹³⁹Ce、¹³⁵Ba、¹³⁷Cs、⁵⁴Mn、⁶⁵Zn、⁶⁰Co)和相对多能源(¹⁵²Eu、⁷²Ga及与子体处于平衡态的²²⁶Ra)。¹⁵²Eu 适宜于低能和中能区,其主要 γ 射线的发射率数据比较准确。⁷²Ga 和²²⁶Ra 适用于高能区(1500~3000keV)。⁷²Ga 的 γ 射线发射率取自文献[3]; ²²⁶Ra 源的 γ 射线发射率取自文献[4]。

由于不知道相对源的放射性强度,因此实验数据必须归一。为提高准确度,归一处理基于 600~1200keV 区间实验测定的 $\varepsilon_p \sim E_\gamma$ 关系。因为经验表明,Ge(Li)探测器在 600~1200keV 区间的 $\varepsilon_p \sim E_\gamma$ 具有良好的线性关系。本工作使用的标准源¹⁵⁷Cs(661.6keV)、⁵⁴Mn(834.8keV)和⁶⁵Zn(1115.5keV)均有较高的准确度(~1.5%),用它们测得的 $\varepsilon_p \sim E_\gamma$ 曲线在相应能区是可靠的,并具有良好的线性关系(实验数据的线性相关系数为 0.9986)。¹⁵²Eu、⁷²Ga 和²²⁶Ra 的下述 γ 射线用作参考线,进行归一:¹⁵²Eu 的 778、964、1086、1112(keV); ⁷²Ga 的 630、787、834、894、1051(keV); ²²⁶Ra 的 609、768、1120(keV)。这个方法可以减少全能峰计数和 γ 发射率误差的影响。

实验测定的 $\varepsilon_p \sim E_\gamma$ 数据示于图 1。

为便于袖珍计算器和计算机程序使用, $\varepsilon_p \sim E_\gamma$ 实验数据在 TAXAS-58C 计算器上进行了分段多项式曲线

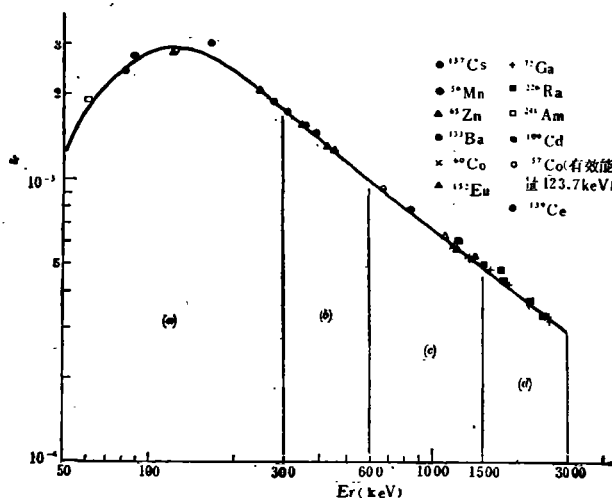


图 1 参考效率曲线

(距探测器入射窗20cm)

$$(a) \lg \varepsilon_p = a_0 + a_1 \lg E_\gamma + a_2 (\lg E_\gamma)^2 + a_3 (\lg E_\gamma)^3$$

$$a_0 = -24.32102837 \quad a_1 = 27.39421974$$

$$a_2 = -11.2334051 \quad a_3 = 1.489980916$$

$$(c) \lg \varepsilon_p = a_0 + a_1 \lg E_\gamma + a_2 (\lg E_\gamma)^2$$

$$a_0 = 0.211142959 \quad a_1 = -1.489583416$$

$$a_2 = 0.1204347182$$

$$(b) \lg \varepsilon_p = a_0 + a_1 \lg E_\gamma + a_2 (\lg E_\gamma)^2$$

$$a_0 = -1.037422183 \quad a_1 = -0.5887182029$$

$$a_2 = -0.0418520133$$

$$(d) \lg \varepsilon_p = a_0 + a_1 \lg E_\gamma$$

$$a_0 = -0.67748493$$

$$a_1 = -0.82702338$$

拟合。拟合公式、参数以及分段点均示于图1。图中曲线由拟合公式计算而得，与实验数据符合甚好。在低能区(50~300keV)和高能区((1500~3000keV)，除个别点外，偏离均在2%以内；在中能区(300~1500keV)，所有实验点的偏差均在1%以内。低能区的误差主要来自峰面积计算，高能区偏差主要来自计数统计误差和 γ 发射率的误差。

三、有效立体角 $\bar{\Omega}$ 计算

从(2)式出发，设计了计算有效立体角的程序SOLANG^[1]。为了使该程序能够在任何具有标准FORTRAN IV编译程序的计算机上运行，以利推广使用，本工作对SOLANG进行了少量修改，命名为SOLANGP，已在UNIVAC1100/10计算机上通过和运行。

程序SOLANGP要求的输入数据包括：图2所示探测器各参数；样品的半径、高度；样品容器的壁和底厚；样品底部距探测器活性区表面的距离；样品与探测器之间空气层厚度；托盘厚度；有关物质的窄束 γ 射线线性吸收系数(包括探测器晶体、入射窗、样品、容器、空气、托盘等)。

SOLANGP可用于计算置于圆柱型探测器中轴线上测量的点源、面源或圆柱型样品的 $\bar{\Omega}$ 。样品直径不能大于探测器活性区的直径。其它形状样品可作近似处理。

下式用于计算多元素物质的 γ 射线线性吸收系数：

$$\mu(E_\gamma) = \sum [\rho_i(E_\gamma) \cdot W_i\%] \cdot d \quad (8)$$

式中， $\mu(E_\gamma)$ 为物质对能量为 E_γ 的光子的平均总线性吸收系数； $\rho_i(E_\gamma)$ 为所考虑的物质中，第 i 种元素对能

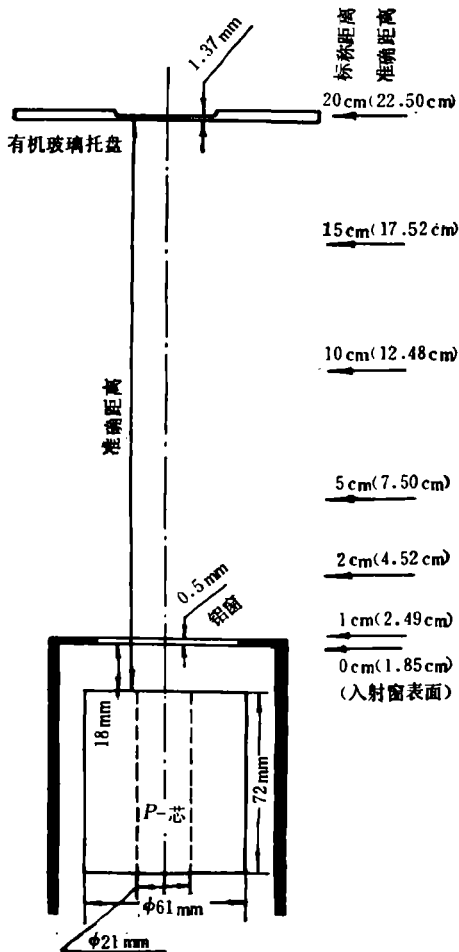


图2 与 $\bar{\Omega}$ 计算有关的探测器系统示意图

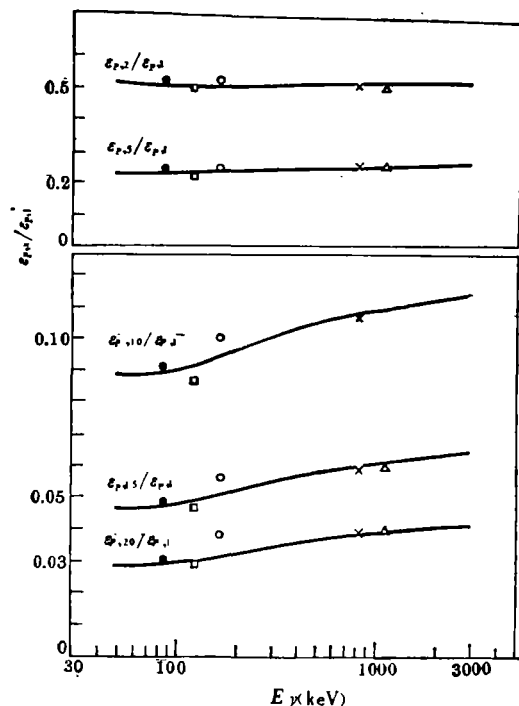


图3 点源在双开端Ge(Li)探测器六个位置的全能峰探测效率比

(图中曲线根据 $\bar{\Omega}$ 计算而得)

●²⁴¹Am ○¹³⁷Ce △⁶⁰Zn □⁵⁷Co ×⁵⁴Mn

量为 E_γ 的光子的总质量吸收系数(不包括相干散射); $W_i\%$ 为物质中第 i 种元素的百分含量; d 为物质的密度。各元素的总质量吸收系数可取自文献[5]。

四、在双开端同轴 Ge(Li) 探测器上的方法验证

迄今未见上述方法应用于双开端同轴 Ge(Li) 探测器的报道, 有必要检验其适用性。

本工作中与 $\bar{Q}$ 计算有关的探测器-样品系统, 包括结构数据和测量几何位置等示于图 2。

一系列单能源(^{241}Am 、 ^{139}Ce 、 ^{137}Cs 、 ^{65}Zn)和 ^{57}Co 源在图 2 所示六个位置(1、2、5、10、15、20cm)分别进行了测量, 从而得到不同几何位置处探测效率比 $\varepsilon_{P,X}/\varepsilon_{P,1}$, 并与计算结果 $\bar{Q}_X/\bar{Q}_1$ 进行比较。实验与计算结果示于图 3。该图表明, 在实验误差范围内($\sim 5\%$), (7) 式成立, 从而间接证实 $(p/T)^*$ 为常数的假设在双开端同轴 Ge(Li) 探测器上也是成立的。

五、在半导体硅材料不破坏中子活化分析中的应用及其它

在相对法中子活化分析中, 为保证分析结果准确可靠, 样品和标准的辐照与测量必须完全相同。前者与本文无关, 后者意味着样品与标准应具有相同的几何形状和组成, 相同的测量几何位置和测量死时间, 否则会引入测量误差。实际工作中常忽略这点。

在半导体硅的不破坏中子活化分析中, 为提高分析灵敏度, 样品取样量一般较大(5—10g, 甚至 20—30g), 加之测量时总是紧贴探测器入射窗表面, 致使样品与标准的测量效率相差甚大, 必须予以校正。

定义 $\varepsilon_{P,\text{标}}/\varepsilon_{P,\text{样}} = \bar{Q}_{\text{标}}/\bar{Q}_{\text{样}}$ 作为活化分析中的探测效率校正因子, 样品中待测元素的含量按下式计算:

$$W_{\text{样}} = W_{\text{标}} \cdot \left[\left(\frac{N_P}{D \cdot C \cdot t_m} \right)_{\text{样}} / \left(\frac{N_P}{D \cdot C \cdot t_m} \right)_{\text{标}} \right] \cdot \left[\bar{Q}_{\text{标}} / \bar{Q}_{\text{样}} \right] \quad (9)$$

式中, 下标“样”、“标”分别代表样品和标准; W 为样品或标准的重量; N_P 为全能峰净面积; t_m 为测量时间; $D = e^{-\lambda t_d}$ 为衰变因子; λ 为衰变常数, t_d 为自某公共起点时刻起算的衰变时间; $C = (1 - e^{-\lambda t_m}) / \lambda t_m$ 为测量因子。

几何尺寸不同的硅样品在使用硅片标准^[6]和酚醛树脂标准^[7]时的效率校正因子示于图 4。图 4 表明, 尽管标准与样品均在同一位置测量, 但由于标准和样品的几何形状与组成不同带来的测量误差相当严重。例如 I 号样品使用硅片标准时, 测量误差为 13% (^{198}Au , 411.8keV) 和 11% (^{24}Na , 1368keV)。不言而喻, 硅样品取样量越大, 这项校正越大。

有时为了获得最佳测量条件, 根据放射性强弱, 样品与标准在不同位置测量。这种情况下, 不能简单地使用 (9) 式, 因为测量位置不同导致被测 γ 射线可能存在的真实符合效应不同; (9) 式需改写为

$$W_{\text{样}} = W_{\text{标}} \left[\left(\frac{N_P}{D \cdot C \cdot t_m} \right)_{\text{样}} / \left(\frac{N_P}{D \cdot C \cdot t_m} \right)_{\text{标}} \right] \cdot \left[\bar{Q}_{\text{标}} / \bar{Q}_{\text{样}} \right] \cdot [COI_{\text{标}} / COI_{\text{样}}] \quad (10)$$

式中, COI 为 γ 射线符合效应因子; COI 的测定、计算和使用将另文讨论。

除相对法活化分析外, 本方法可在诸如活化箔法测反应堆中子参数、单比标法和绝对法活化分析, 绝对放射性测量等工作中使用, 计算探测器对被测样品的效率。

石油部北京石油化工科学研究院 16 室为作者提供了使用 UNIVAC 1100/10 计算机的便利条件; 原子能研

(下转 70 页)

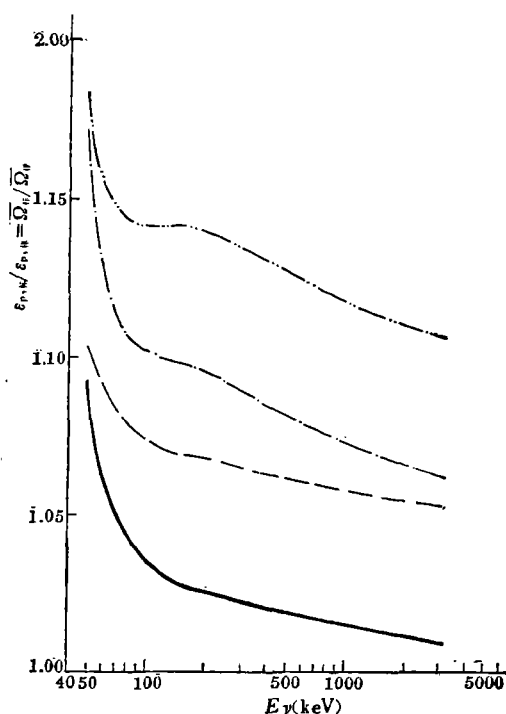


图4 硅样品的 γ 测量效率校正曲线
(样品与标准均在入射窗表面测量)

I 号硅样品 $12 \times 12 \times 1(\text{mm})$ 硅片标准 $7 \times 7 \times 0.4(\text{mm})$
II 号硅样品 $\phi 30 \times 3(\text{mm})$ 树脂标准 $\phi 8 \times 2(\text{mm})$

— I 号硅样品-硅片标准 - - - II 号硅样品-硅片标准
- · - I 号硅样品-树脂标准 · · · II 号硅样品-树脂标准

Parks 等人最近试验了一种 *SIRIS* 装置^[2], 图 3 是其示意图。概括而言, 仪器可分三个组成部分: 第一部分是离子溅射装置, 一般使用 Ar 离子, 能量在 5~30 keV 范围内可变。也可用脉冲束, 脉冲宽度为 0.25~10.0 μ s, 重复频率在 0~10000Hz 之间。离子束与样品表面法线成 60° 角入射, 束流斑点为 2.6×3.3mm。第二部分是激光装置, 由钕钇铝石榴石激光和染料激光两部分组成。除可见光之外, 通过二次波和混频组成的非线性过程, 可以产生短到 2000Å 的紫外光。第三部分是质量分析装置, 所使用的是双聚焦磁谱仪, 分析的质量范围为 0~300a.m.u, 在 300a.m.u 时其分辨能力为 440, 丰度灵敏度可大于 10⁶。

在常规的 *SIRIS* 分析中, 其灵敏度为 10¹² 分之一, 也就是说在 10¹² 个其它本底原子中有一个待测原子时可

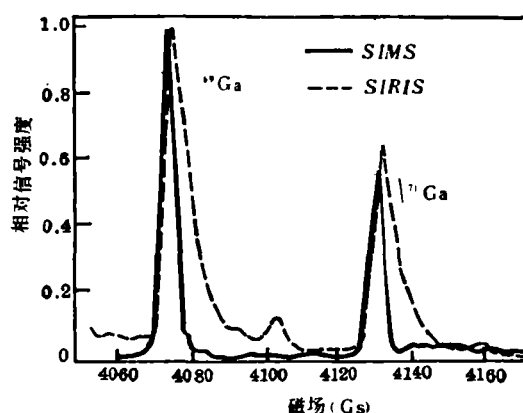


图2 *SIRIS*与SIMS测量结果的比较

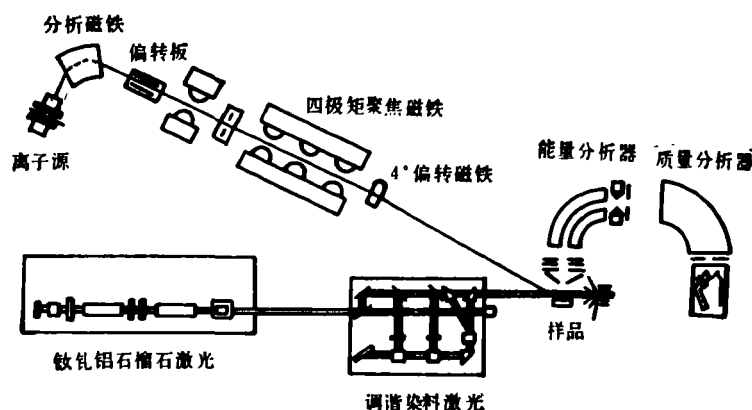


图3 *SIRIS* 装置示意图

以被探查出来。但在特殊情况下, 还可以达到更高的灵敏度。另外, 由于对共振解离方式合适地选取, 可以对待测原子达到唯一选择, 因而这种装置不仅有极高的灵敏性, 同时还具备极高的选择性。可以预计, *SIRIS* 谱仪将会由于它在固体表面和表层分析中的巨大优越性而得到迅速发展。

参 考 文 献

- [1] G. S. Hurst *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **35**, 82 (1975).
- [2] J. E. Parks *et al.*, *Thin Solid Films*, **108**, 69 (1983).

(上接23页)

究所七室、卫生部工业卫生所和北京五所六室尹鸿歧同志提供了所需的标准源, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] L. Moens *et al.*, *Nucl. Instr. Meth.*, **187**, 451 (1981).
- [2] L. Moens *et al.*, *Inter. J. Appl. Radiat. Isotopes*, **34**, 1104 (1983).
- [3] Gerhard Erdtmann, *The gamma rays of the radionuclides*, Verlag Chemie, 1979.
- [4] V. Zobel *et al.*, *Nucl. Instr. Meth.*, **141**, 329 (1977).
- [5] E. Storm and H. I. Isreal, *USAEI Rept LA-3753*, 1967.
- [6] 周云鹿等, 单晶硅片作为标准衬底在堆中子活化分析中的应用, 有色金属研究总院工作报告(1981)
- [7] 陆蕙娟等, *核技术*, **4**, 72(1982).

(1983年4月20日收到)

Keywords: Monte Carlo method X-ray fluorescence analysis
scattering correction

Calculation and application of absolute full-energy peak efficiency for Ge(Li) detector-counted sample system

Lin Xilei Zhang Wenhua Tang Naixun
(General Research Institute for Nonferrous Metals)

Full-energy peak efficiency of a Ge(Li) detector is a function of the detector-sample system. The semi-empiric method based on the concept of solid-angle was successfully applied to a double open-ended coaxial Ge(Li) detector with large volume. The validity of this method was examined experimentally. The solid-angles of the samples were calculated, the efficiency curve of the point source counted at the distance about 20cm from the detector was calibrated in the energy range of 50—3000keV and the polynomial fitting of the experiment data was carried out. The absolute peak efficiencies to the measured samples was given. This method provides efficiency corrections for the samples and standards. Consequently, the analytical accuracy and the counting flexibility are improved.

Keywords: Ge(Li) semiconductor detector absolute full-energy peak efficiency
 γ -ray measuring

A hardware interface connecting a TP-801 single card microcomputer

Zhang Renbo Sun Peifen
(Shanghai Institute of Nuclear Research, Academia Sinica)

A hardware interface connecting a TP-801 single card microcomputer with a $\mu 80$ general purpose printer and the associated program were introduced. The development capability of the single card microcomputer has been enhanced and the EPROM programming and text printing and saving have been made much easier. The circuit of the interface is simple, easy to use and suitable for common use. The interface can also be used to connect other types of Z-80 single card microcomputers with other types of line-printers with a parallel interface.

Keywords: single card microcomputer hardware program

Quantitative detection of bacteria by radiorespirometric technique

Chen Qi Zhang Limin He Guangcai Sun Jie
(The Second Military Medical College)
Fu Zekun Zuo Zhengbin
(The Naval Medical Institute)

This paper describes a radiorespirometric method for the quantitative detection of