

半导体 α 谱仪和 α 粒子能量损失

实验目的

1. 了解金硅面垒半导体探测器、 α 谱仪的工作原理和特性。
2. 利用 α 谱仪测量未知 α 源的能量，辨识未知源。
3. 了解 α 粒子通过物质时的能量损失及其规律。

实验原理

1. 半导体能谱仪的基本工作原理

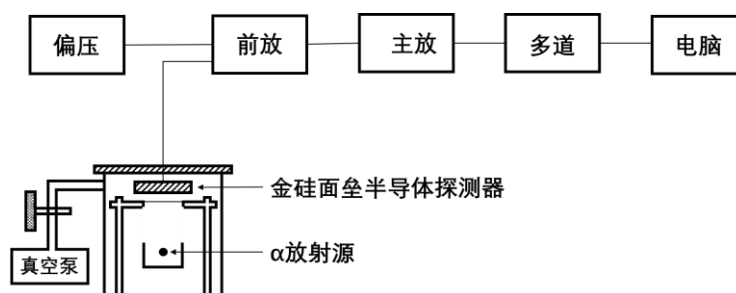


图 17-1 半导体 α 谱仪原理示意图

金硅面垒探测器是用一片 N 型硅，蒸上一层薄金层(100-200Å)，接近金膜的那一层硅具有 P 型硅的特性，这种方式形成的 PN 结靠近表面层，结区即为探测粒子的灵敏区。探测器工作时加反向偏压，粒子在灵敏区内损失能量转变为与其能量成正比的电脉冲信号，经放大并由多道分析器测量脉冲信号按幅度的分布，从而给出带电粒子的能谱。偏置放大器的作用是当多道分析器的道数不够用时，利用它切割，展宽脉冲幅度，以利于脉冲幅度的精确分析。为了提高谱仪的能量分辨率，探测器最好放在真空室中。另外金硅面垒探测器一般具有光敏的特性，在使用过程中，应有光屏蔽措施。

金硅面垒型半导体 α 谱仪具有能量分辨率好，能量线性范围宽，脉冲上升时间快，体积小和价格便宜等优点。带电粒子进入灵敏区，损失能量产生电子空穴对。形成一对电子空穴所需的能量 W 和半导体材料有关，与入射粒子类型和能量无关。对于硅在300K时， W 为3.62 eV，77K时为3.76 eV。对于锗，在77K时 W 为2.96 eV。若灵敏区的厚度大于入射粒子在硅中的射程，则带电粒子的能量 E 全部损失在其中，产生的总电荷量 Q 等于 $(E/W)e$ 。 E/W 为产生的电子空穴对数， e 为电子电量。当外加偏压时，灵敏区的电场强度很大，产生的电子空穴对全部被收集，最后在两极形成电荷脉冲。它在持续时间内的积分等于总电荷量 Q 。通常在半导体探测器设备中使用电荷灵敏前置放大器。它的输出信号与输入到放大器的电荷成正比。

当探测器输出回路时间常数 \gg 电子空穴对收集时间时，输出电压脉冲幅度：

$$V_o = \frac{Q}{C_o} = \frac{Q}{C_d + C_i + C'} = \frac{Q}{C_1 + C_i}, \quad C_1 = C_d + C' \quad (1)$$

其中 C_d 是探测器结电容， C_i 是前置放大器的输入电容， C' 是分布电容。当 C' 不变时 $V_o \propto Q$ ，但 C_d 与所加反向偏压有关，任何偏压的微小变化或实用中有时要根据被测粒子射程而对偏压进行适当的调节，都会使输出脉冲幅度（对同一个 Q ）变化，这对能谱测量不利，因此半导体探测器都采用电荷灵敏前置放大器。图17-2表示探测器和电荷灵敏放大器的等效电路。其中 K 是放大器的开环增益， C_f 是反馈电容，放大器的等效输入电容为 $(1+K)C_f$ 。只要 $KC_f \gg C_1$ ，就有

$$V_o = -\frac{KQ}{C_1 + (1+K)C_f} \approx -\frac{Q}{C_f}$$

这样一来，由于选用了电荷灵敏放大器作为前级放大器，它的输出信号与输入电荷 Q 成正比，而与探测器的结电容 C_d 无关。但是结电容的大小直接影响噪声，结电容大噪声就大。只要探测器结区厚度大于 α 粒子在其中的射程，输出幅度就与入射粒子能量有线性关系。

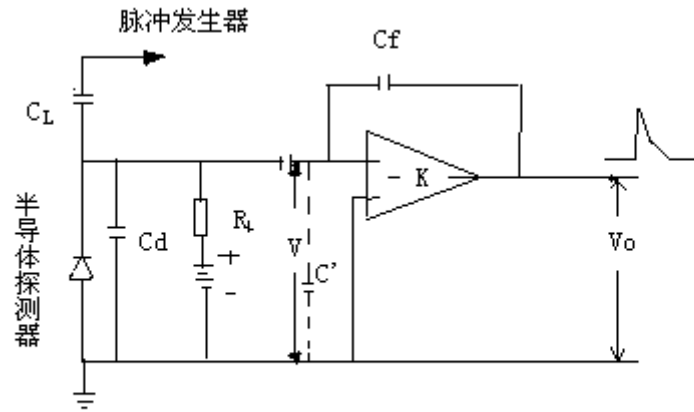


图 17-2 探测器等效电路和前置放大器

2. 确定半导体探测器的偏压

对 N 型硅，探测器灵敏区的厚度 d_n 和结电容 C_d 与探测器偏压 V 的关系如下：

$$d_n = 0.5(\rho_n V)^{1/2} (\mu m) \quad (2)$$

$$C_d = 2.1 \times 10^4 (\rho_n V)^{-\frac{1}{2}} (\mu F / cm^2) \quad (3)$$

其中 ρ_n 为材料电阻率($\Omega \cdot cm$)。因灵敏区的厚度和结电容的大小决定于外加偏压，所以

偏压的选择首先要使入射粒子的能量全部损耗在灵敏区中和由它所产生的电荷完全被收集，电子空穴复合和“陷落”的影响可以忽略。其次还要考虑到探测器结电容对前置放大器来说还起着噪声源的作用。电荷灵敏放大器的噪声水平随外接电容的增加而增加，探测器的结电容就相当于它的外接电容。因此提高偏压，降低电容相当于减少噪声，增加信号幅度，提高了信噪比，从而改善探测器的能量分辨率。从上述观点来看，要求偏压加得高一点，但是偏压过高，探测器的漏电流也增大而使分辨率变坏。因此为了得到最佳分辨率，探测器的偏压应选择最佳范围。实验上可通过测量不同偏压下的 α 能谱求得，如图17-3（a）所示。并由此实验数据，分别作出一组峰位和能量分辨率对应不同偏压的曲线，如图17-3（b）、17-3（c）所示。分析以上结果，并考虑到需要测量的 α 粒子的能量范围，确定出探测器最佳偏压值。

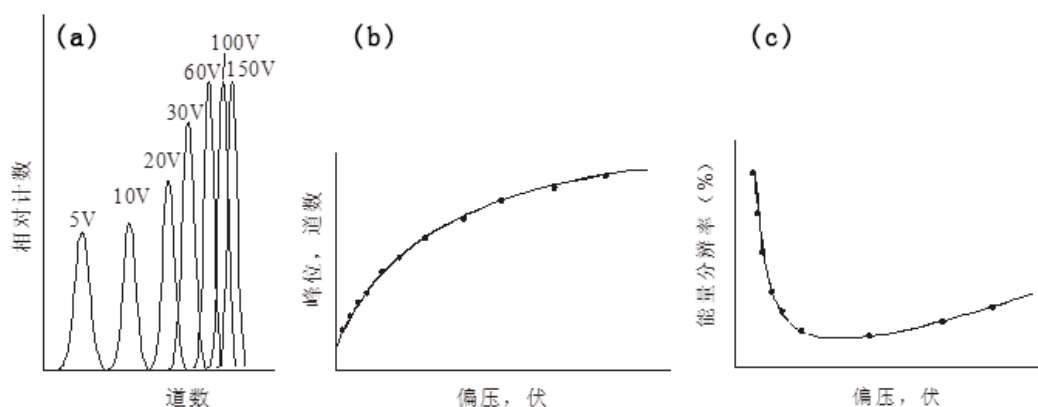


图17-3 半导体 α 谱仪：（a）不同偏压的 α 谱曲线；（b）峰位曲线；（c）能量分辨率偏压曲线

3. α 谱仪的能量刻度和能量分辨率

谱仪的能量刻度就是确定 α 粒子能量与脉冲幅度之间的对应关系。脉冲幅度大小以谱线峰位或多道分析器中的道址来表示。 α 谱仪系统的能量刻度有两种方法：

(1) 用一个 ^{239}Pu 、 ^{241}Am 、 ^{244}Cm 混合的 α 刻度源，已知各核素 α 粒子的能量，测出该能量在多道分析器上所对应的谱峰位道址，作能量对应道址的刻度曲线，并表示为：

$$E = Gd + E_0 \quad (4)$$

其中： E 为 α 粒子能量(keV)， d 为对应能谱峰位所在道址（道）。 G 是直线斜率（ keV/每道 ），称为能量刻度常数。 E_0 是直线截距(keV)，它表示出由于 α 粒子穿过探测器金层表面所损失的能量。

(2) 用一个已知能量的单能 α 源，配合线性良好的精密脉冲发生器来作能量刻度。这是在 α 源种类较少的实验条件下常用的方法。一般谱仪的能量刻度线性可达0.1%左右。常用谱仪的刻度源能量可查常用核素表。

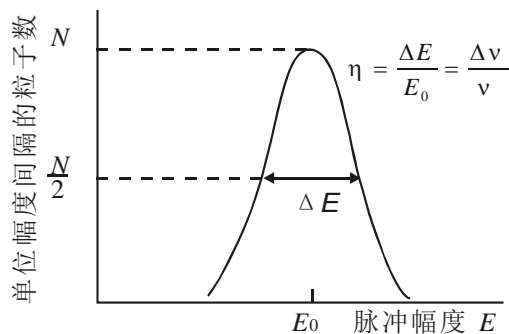


图 17-4 α 谱仪的能量分辨

在与能量刻度相同的测量条件下（如偏压、放大倍数、几何条件等），测量未知α源的脉冲谱，由谱线峰位求得对应α粒子能量，从而确定未知α源成份。

α谱仪的能量分辨率也用谱线的半宽度 *FWHM* 表示。*FWHM* 是谱线峰最大计数一半处的宽度，以道数表示，还可由谱仪的

能量刻度常数转换为能量 ΔE ，以 *keV* 表示。在实用中，谱仪的能量分辨率还用能量展宽的相对百分比表示，如图17-3所示。例如，本实验采用金硅面垒探测器，测得²⁴¹Am源的5.48 *MeV* 的α粒子谱线宽度为17 *keV* (0.31%)。半导体探测器的突出优点是它的能量分辨好，影响能量分辨率的主要因素有：(1)产生电子空穴对数和能量损失的统计涨落(ΔE_n)；(2)探测器噪声(ΔE_d)；(3)电子学噪声，主要是前置放大器的噪声(ΔE_e)；(4)α粒子穿过的探测器的窗厚和放射源厚度的不均匀性所引起的能量展宽(ΔE_s)。实验测出的谱线宽度 ΔE 是由以上因素所造成的影响的总和，表示为：

$$\Delta E = (\Delta E_n^2 + \Delta E_d^2 + \Delta E_e^2 + \Delta E_s^2)^{1/2}$$

4. α粒子的能量损失

天然放射性物质放出的α粒子，能量范围是3—8*MeV*。在这个能区内，α粒子的核反应截面很小，因此可以忽略。α粒子与原子核之间虽然有可能产生卢瑟福散射，但几率较小。它与物质的相互作用主要是与核外电子的相互作用。α粒子与电子碰撞，将使原子电离、激发而损失其能量。在一次碰撞中，具有质量为 *m*，能量为*E*的带电粒子，转移给电子（质量为 *m*₀）的最大能量约为 $4Em_0/m$ ，α粒子的质量比电子大得多，所以每碰撞一次，只有能量的一小部分转移给电子。当它通过吸收体时，经过多次碰撞后，才损失较多能量。每一次碰撞后，α粒子的运动方向基本上不发生偏转，因而它通过物质的射程几乎接近直线。带电粒子在吸收体内单位路程上的能量损失即能量损失率 $-dE/dx$ ，称为线性阻止本领 *S*，

$$S = -\frac{dE}{dx} \quad (5)$$

它的单位是 *erg/cm*，实用上常换算成 *keV/μm* 或 *eV/μg·cm⁻²*。把*S*除以吸收体单位体积内的原子数 *N*，称为阻止截面，用 Σ_e 表示，并常取 *eV/10¹⁵ atom·cm⁻²* 为单位。

$$\Sigma_e = -\frac{1}{N} \frac{dE}{dx} \quad (6)$$

对非相对论性 α 粒子 ($v \ll c$)，线性阻止本领用下面式子表示

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4 N Z}{m_0 v^2} \ln \frac{2m_0 v^2}{I} \quad (7)$$

(7)式中的 z 为入射粒子的电荷数， Z 为吸收体的原子序数， e 为电子的电荷， v 为入射粒子的速度， N 为单位体积内的原子数， I 是吸收体中的原子的平均激发能。(7)式中，对数项随能量的变化是缓慢的，因此(7)式可近似表示为

$$\frac{dE}{dx} \propto -\frac{\text{常数}}{E} \quad (8)$$

当 α 粒子穿过厚度为 ΔX 的薄吸收体后，能量由 E_1 变为 E_2 ，可以写成

$$\Delta E = E_1 - E_2 = -\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{平均}} \Delta X \quad (9)$$

$(dE/dx)_{\text{平均}}$ 是平均能量 $(E_1 + E_2)/2$ 的能量损失率。这样测定了 α 粒子在通过薄箔后的能量损失 ΔE ，则利用(9)式，可以求薄箔的厚度，即

$$\Delta X = \frac{\Delta E}{-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{平均}}} \approx \frac{\Delta E}{(-dE/dx)_{E_1}} \quad (10)$$

当 α 粒子能量损失比较小时，(10)式中的阻止本领可用入射能量 E_1 时之值；当箔比较厚时， α 粒子的能量在通过箔后能量损失大时，(10)式就应表为

$$\Delta X = \int_{E_2}^{E_1} \frac{dE}{(-dE/dx)_E} \approx \sum_{E_1}^{E_2} \frac{\delta E}{-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{E_i}} \quad (11)$$

(11)式中 δE 可取 10 keV，在这范围内，将看 S 作常量。

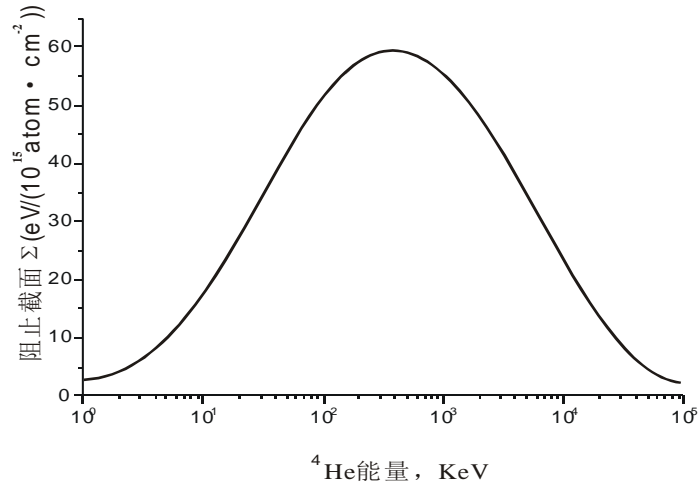


图17-5 α 粒子在铝中的阻止截面与能量关系

图17-5表示 α 粒子在铝中的阻止截面与能量关系的实验结果。能量在 1keV—10MeV 之间的 α 粒子在铝中的阻止截面，可用曲线拟合得到的经验公式表示为

$$\Sigma_e = \frac{A_1 E^{A_2} \left\{ \frac{A_3}{E/1000} \ln \left[1 + \frac{A_4}{E/1000} + \frac{A_5 E}{1000} \right] \right\}}{A_1 E^{A_2} + \frac{A_3}{E/1000} \ln \left[1 + \frac{A_4}{E/1000} + \frac{A_5 E}{1000} \right]} \quad (12)$$

式中A1、A2、A3、A4、A5为常数，见表17-1。 ^4He 离子的能量E以keV为单位，得到的 Σ_e 以 $\text{eV}/10^{15}\text{atom}\cdot\text{cm}^{-2}$ 为单位。对于化合物，它的阻止本领可由布拉格相加规则，将化合物的各组成成份的阻止本领 $(\frac{dE}{dx})_i$ 相加得到，即

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_c = \frac{1}{A_c} \sum Y_i A_i \left(\frac{dE}{dx}\right)_i \quad (\text{keV} / \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}) \quad (13)$$

表17-1 低能氦离子阻止本领的系数（固体）

靶	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅
H[1]	0.9661	0.4126	6.92	8.831	2.582
C[6]	4.232	0.3877	22.99	35	7.993
O[8]	1.776	0.5261	37.11	15.24	2.804
Al[13]	2.5	0.625	45.7	0.1	4.359
Ni[28]	4.652	0.4571	80.73	22	4.952
Cu[29]	3.114	0.5236	76.67	7.62	6.385
Ag[47]	5.6	0.49	130	10	2.844
Au[79]	3.223	0.5883	232.7	2.954	1.05

其中 Y_i 、 A_i 分别为化合物分子中的第i种原子的数目、原子量， A_c （等于 $\sum_i Y_i A_i$ ）是化合物的分子量。

利用已知的阻止截面,通过 α 粒子在薄箔中能损的测量,可以快速无损的测定薄箔的厚度. α 粒子的能量可用多道分析器测量,峰位可按最简单的重心法得到。图17-6及图17-7分别表示 ^{241}Am 的 α 粒子在通过铝箔($638 \mu\text{gcm}^{-2}$)及Mylar($302 \mu\text{gcm}^{-2}$)以后的能谱。

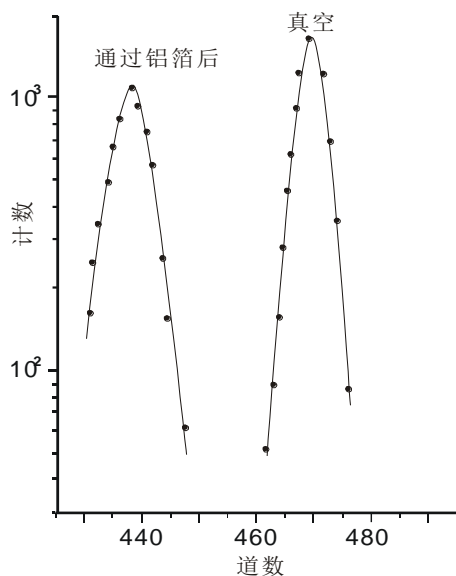


图17-6 ^{241}Am 的 α 粒子在通过铝箔后的能谱

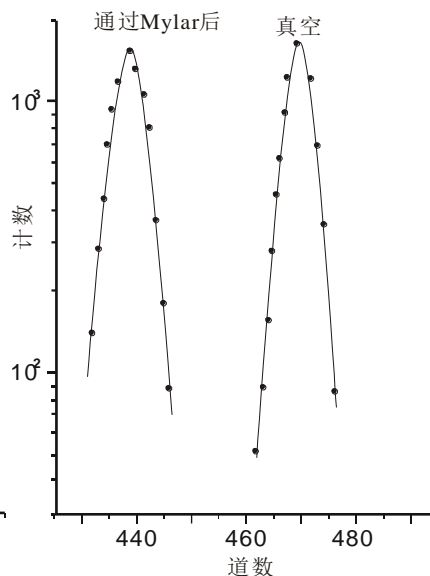


图17-7 ^{241}Am 的 α 粒子在通过Mylar薄箔后的能谱

实验内容

1. 调整谱仪参数, 测量不同偏压下的 α 粒子能谱, 并确定探测器的工作偏压。
2. 测定谱仪的能量分辨率, 并进行能量刻度。
3. 测量未知 α 源的能谱, 并确定 α 粒子能量。
4. 测量 ^{241}Am 的 α 粒子通过铝箔及Mylar薄箔后的能谱。
5. 从所测各条能谱, 确定峰位、半宽度、及 α 粒子通过待测样品后的能量损失, 计算阻止本领 (dE/dx) 平均 及薄箔的厚度 $(\mu\text{g}/\text{cm}^2)$ 。

实验装置

- α 谱仪, 1套
- 金硅面垒半导体探测器, 1个
- 机械泵, 1台
- 微机多道分析器, 1个
- 300伏电源, 1个
- 放射源 ^{239}Pu 、 ^{241}Am , 各1个
- 待测样品: 铝箔及Mylar膜, 数片

实验步骤

1. 按图17-1联接仪器。用 ^{241}Am 源调整谱仪, 如果在真空室中做实验时, 将 α 源(^{241}Am)放入真空室抽真。

2. 选择多道分析器参数,测量 α 谱。改变偏压分别测量不同偏压下的 α 谱仪能谱,从能量分辨率两方面确定最佳偏压。
3. 用多道分析器测量 ^{239}Pu 、 ^{241}Am 刻度源的能谱,作能量刻度曲线。在同样条件下测出未知 α 源的能谱。
4. 在源和探测器之间安放待测薄箔样品,测量能谱(峰面积下的计数约 5×10^4)。
5. 应用(12)式计算铝的阻止截面,应用(10)式计算铝箔的厚度($\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)。(^{241}Am 的 α 粒子能量见附录5)。

注意事项

1. 在停止抽真空,打开真空室盖之前,必须先关掉金硅面垒高压,再关掉NIM机箱电源,以免探测器见光损坏。
2. 严禁手拿 α 源,用镊子时注意别划伤源表面。
3. 为保护前放场效应管,偏压升降速度小于 20 V/sec 。

实验结果分析及数据处理

1. 以在半导体探测器上所加各点的偏压值为横坐标,以各偏压值下测出能量分辨率和峰位为纵坐标,画出它们的对应曲线,确定半导体探测器的最佳偏压。
2. 以放射源 ^{241}Am 、 ^{239}Pu 等放射源的 α 粒子能量为横坐标,以峰位为纵坐标作能量刻度曲线,并用最小二乘法直线拟合求出 G 、 E_0 和未知 α 源的能量。
3. 根据放置吸收体后 α 粒子的能谱,计算待测样品对 α 粒子的阻止本领和厚度。

思考题

1. 解释脉冲幅度和能量分辨率随偏压变化曲线的特征,并说明选择探测器偏压应考虑哪些因素?
2. 为什么测量 α 谱线的道宽比 γ 谱仪选的道宽小得多?
3. 影响谱仪的能量分辨率有哪些因素?
4. 设阻止本领为 S ,薄箔厚度为 ΔX ,试计算 α 粒子倾斜入射,与表面法线交角为 4° 、 6° 时能量损失为多少?
5. 探测器金层厚 100 \AA ,试计算 ^{241}Am 的 α 粒子进入灵敏区时的能量。已知金的密度为 $19.31 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,阻止本领 $dE/dx = 0.22 \text{ keV}/\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

参考资料

- [1] 徐克尊等编, 粒子探测技术, § 4-1, 上海科技出版社, 1981.
- [2] 复旦大学、清华大学、北京大学合编, 原子核物理实验方法(上册修订本), 第五章, 原子能出版社, 1985.
- [3] 陈恒良. 金-硅面垒型半导体 α 谱仪. 原子能科学技术, 1977, 11(002):118-118.
- [4] 丁卫撑, 王义, 王敏, 黄洪全. 金硅面垒型半导体探测器在 α 能谱测量中的应用研究. 核电子学与探测技术, 2012, 032(007):844-847.
- [5] 清华大学物理实验教学中心高等物理教学实验室编, 高等物理实验讲义--核物理部分, 2000年.
- [6] 北京大学. 核物理实验. 原子能出版社, 1984.
- [7] Alencar M A V. Development of a alpha spectrometer system with the surface barrier detector. 1994, Thesis, Federal University of Rio de Janeiro, Brazil.
- [8] Ahmad I. High sensitivity alpha-particle and electron spectroscopy. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1986, 242(3): 395-398.
- [9] Bakhlanov S V, Bazlov N V, Chernobrovkin I D, et al. Influence of α -particles irradiation on the properties and performance of silicon semiconductor detectors, Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2103(1): 012139.