

V18

Der Germanium-Detektor

Fritz Agildere
fritz.agildere@udo.edu

Amelie Strathmann
amelie.strathmann@udo.edu

Durchführung: 22. April 2024
Abgabe:

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	2
2 Theorie	2
2.1 Die Wechselwirkung von Strahlung mit Materie	2
2.1.1 Der Photoeffekt	3
2.1.2 Der Compton Effekt	3
2.1.3 Die Paarerzeugung	5
2.2 Grundlagen eines Halbleiter-Detektors	5
3 Aufbau	5
4 Durchführung	5
5 Auswertung	5
6 Diskussion	5
Literatur	5
Anhang	7

1 Zielsetzung

Ziel des Versuches ist es die Funktionsweise eines hochreinen Germaniumdetektors zu untersuchen. Zunächst wird die Energiekalibration und die Vollenergienachweiswahrscheinlichkeit des Detektors bestimmt. Anschließend wird anhand der gesammelten Daten über die Eigenschaften des hochreinen Germaniumdetektors ein Spektrum eines unbekannten Strahlers aufgenommen und hinsichtlich dessen Energie und Aktivität ausgewertet.

2 Theorie [1]

Zum Verständnis des hochreinen Germaniumdetektors werden die theoretischen Grundlagen dessen im Folgenden erläutert.

2.1 Die Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

Bei der Gamma-Strahlungs-Detektion werden Elektronen des Detektor-Materials von den Gamma-Photonen angeregt und damit werden die Atome ionisiert. Daher bilden sich Elektronen-Loch-Paare. Die Primärelektronen ionisieren wiederum weitere Atome des Detektor-Mediums und erzeugen somit weitere Elektron Loch Paare. Die Anzahl der Elektronen-Loch Paare ist direkt proportional zur Energie des Elektrons aus der primären Wechselwirkung.

Da der Absorptionskoeffizient für Gamma-Strahlung bei Gasen sehr niedrig ist, werden Gamma-Strahlen-Detektoren aus Festkörpern gebaut. Das Material des Detektors muss so gewählt werden, dass die Anzahl Elektronen-Loch-Paare gesammelt und als elektrisches Signal wiedergegeben werden kann. Zusätzlich ist der Grad der Interaktion von Gamma-Strahlung mit Materie abhängig von der Energie der Strahlung. Der Intensitätsverlust eines γ -Strahls in Materie ist abhängig von der jeweiligen Schichtdicke des Materials d , der Elektronendichte und dem Wirkungsquerschnitt σ . Dabei ist der Wirkungsquerschnitt ein Maß für die Wahrscheinlichkeit einer Teilchenreaktion. Dieser lässt sich als effektive Wirkungsfläche interpretieren

In Abbildung 1 ist der Dämpfungskoeffizient von Germanium, welcher die Reduktion der Strahlungsintensität bei bestimmter Energie verursacht durch den Absorber misst, gegen die Gamma-Strahlen Energie aufgetragen.

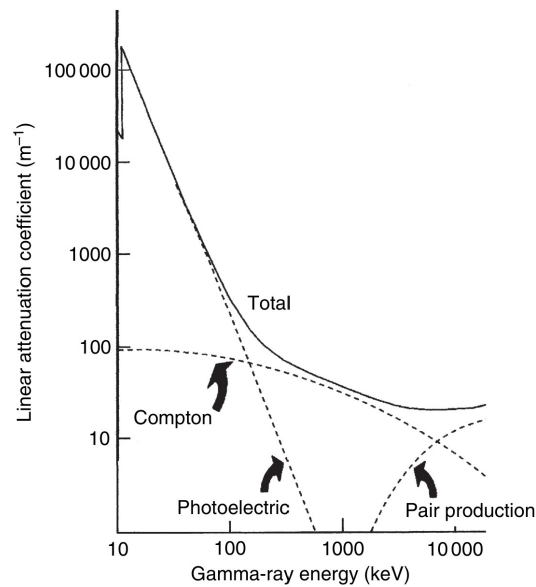


Abbildung 1: [2]

Die totale Kurve setzt sich aus verschiedenen Komponenten zusammen: Der Photoeffekt, der Compton Effekt und die Paarerzeugung. Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten erläutert.

2.1.1 Der Photoeffekt

Der Photoeffekt beschreibt den Prozess bei dem ein ein Gamma-Quant mit einem Hüllenelektron wechselwirkt. Das Photon wird absorbiert, daher gibt es seine gesamte Energie an das Atom ab, und ein Elektron wird emittiert. Das Atom nimmt dabei den Rückstoßimpuls auf und wird ionisiert. Anhand der Abbildung 1 lässt sich ablesen, dass für Energie im Bereich bis zu 100 keV Absorption durch den Photoeffekt dominiert. Der Wirkungsquerschnitt des Photoeffekts fällt für große Energien ab. Bei konstanter Photonen-Energie nimmt σ stark zu für wachsende Z . Demnach ist der Wirkungsquerschnitt abhängig von Energie der γ -Quanten und der Kernladungszahl Z .

2.1.2 Der Compton Effekt

Der Compton-Effekt ist die Streuung eines Photons an einem quasi-freien oder freien Elektron. Die Hüllenelektronen eines Atoms werden hier als quasi-frei betrachtet unter der Bedingung, dass die Energie des Photons viel größer als die Bindungsenergie der Elektronen ist. Dieser Prozess dominiert in Materie um 1 MeV. Die Kinematik der Compton Streuung ist in Abbildung 2 zu sehen.

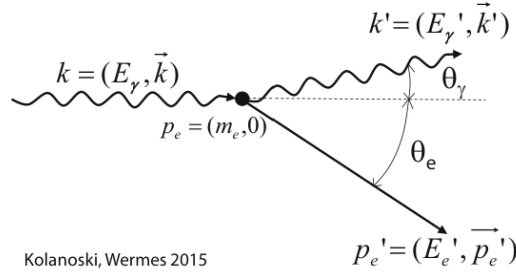


Abbildung 2: Die Kinematik des Compton Effekts, wobei das Elektron als quasi-frei betrachtet wird.[3]

Um den Zusammenhang zwischen der Energie und des Winkels des gestreuten Photons zu brechenen, werden Viererimpulse verwendet. Diese wurden in der Abbildung 2 definiert. Dabei bezeichnen k und p_e die Viererimpulse des Photons und des Elektrons vor dem Stoß. k' und p_e' bezeichnen die Viererimpulse nach dem Stoß. Aus Impulserhaltung und Energieerhaltung folgt der Zusammenhang

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \epsilon (1 - \cos \theta_\gamma)} \quad (1)$$

für die Energie des gestreuten Photons.

Den Wirkungsquerschnitt der Compton Streuung ergibt sich aus der Integration der Klein-Nishina-Formel über den Raumwinkel

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2 \left[1 + \epsilon (1 - \cos \theta_\gamma) \right]^2} \left(1 + \cos^2 \theta_\gamma + \frac{\epsilon^2 (1 - \cos \theta_\gamma)^2}{1 + \epsilon (1 - \cos \theta_\gamma)} \right). \quad (2)$$

Der totale Compton-Wirkungsquerschnitt pro Elektron lautet

$$\sigma_{\text{Compton}} = 2\pi r_e^2 \left[\frac{1 + \epsilon}{\epsilon^2} \left(\frac{2(1 + \epsilon)}{1 + 2\epsilon} - \frac{1}{\epsilon} \ln(1 + 2\epsilon) \right) + \frac{1}{2\epsilon} \ln(1 + 2\epsilon) - \frac{1 + 3\epsilon}{(1 + 2\epsilon)^2} \right]. \quad (3)$$

Für den Wirkungsquerschnitt pro Atom kommt es zu einer linearen Abhängigkeit

$$\sigma_{\text{Compton}}^{\text{Atom}} = Z \sigma_{\text{Compton}}. \quad (4)$$

Die Linearität gilt für die Annahme von freien Elektronen, also für Energien oberhalb der Bindungsenergie des Elektronen. Für kleinere Energien der Compton Wirkungsquerschnitt in Materie ab.

2.1.3 Die Paarerzeugung

Eine weitere Wechselwirkung ist die Paarerzeugung, wobei ein Photon mit dem ganzen Atom interagiert. Das γ -Quant kann in dem Coulomb Feld einer Ladung in ein Elektron-Positron-Paar umgewandelt werden. Aufgrund der Impulserhaltung kann Paarerzeugung nur auftreten, wenn ein Stoßpartner in Form eines Atoms oder eines Hüllenelektrons gegeben ist. Damit Paarbildung auftreten kann, muss für Energie der Photonen die Bedingung

$$E_\gamma \approx 2m_e c^2 \quad (5)$$

erfüllt sein. Zusammen mit der Abbildung 1 folgt, dass die Paarerzeugung für Energien größer als 1 MeV dominiert.

2.2 Grundlagen eines Halbleiter-Detektors

Halbleiterdetektoren aus Silizium oder Germanium eignen sich für den Nachweis von Gammastrahlung und die Bestimmung derer Energie mit einer hohen Genauigkeit. Die zentrale Komponente des Detektors ist die Halbleiterdiode. In diesem Versuch wird ein Germaniumdetektor verwendet. Die Diode besteht aus zwei angrenzenden Germaniumbereichen, welche unterschiedlich dotiert sind. Es kommt zur Ausbildung einer ausgedehnten Verarmungszone. Wenn nun die Gammastrahlung bei einer Energie E_γ oberhalb der Bandlücke, eintrifft, wird ein Primärelektron von dem Photon angeregt. Sodass das Elektron von dem Valenzband in das Leitungsband angehoben wird. Die Energie dieses Elektrons ist sehr hoch, daher kommt es zu Anregung von Sekundärteilchen. Dieser Prozess wird in Abschnitt 2.1 genauer erläutert.

3 Aufbau

4 Durchführung

5 Auswertung

6 Diskussion

Literatur

- [1] *Anleitung zu Versuch 18, Der Germanium-Detektor*. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2024.
- [2] G.Gilmore. *Practical Gamma-ray Spectrometry*. 2. Aufl. Wiley, 2008.

- [3] Hermann Kolanoski und Norbert Wermes. *Teilchendetektoren. Grundlagen und Anwendungen*. Springer, 2016.

Anhang