V18 – Hochreine Germaniumdetektoren in der Gamma-Spektrometrie

Ziel des Versuchs

Hochreine Germaniumdetektoren sind wegen ihres hohen Energieauflösungsvermögens im Vergleich zu anderen Detektoren, z.B. Szintillationsdetektoren oder Proportionalzählrohren, das wichtigste Messinstrument in der Gamma-Spektrometrie. Im Versuch sollen zunächst die Energiekalibration des Detektors sowie eine Messung der Vollenergienachweiswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Energie vorgenommen werden. Mit den so gesammelten Daten sollen dann Spektren unbekannter Strahler in Hinblick auf die Energie und die Aktivität ausgewertet werden.

Vorbereitung

Für die erfolgreiche Bearbeitung des Versuchs ist eine Einarbeitung in die elementaren Grundlagen des Germaniumdetektors notwendig. Die Beantwortung ausgewählter Fragen soll Sie auf den Versuch vorbereiten. Die benötigten Informationen finden Sie in der Literatur. Die Wechselwirkung von Strahlung mit Materie werden z.B. in den Referenzen [1] (Kap. 2), [2] (Kap. 2) und [3] (Kap. 3) dargestellt. Die Grundlagen von Halbleiterinstrumenten ist ausführlich in Ref. [5] beschrieben. Halbleiterdetektoren für die Messung von ionisierender Strahlung sind in Referenzen [1] (Kap. 11), [2] (Kap. 3), [3] (Kap. 8) und [4] (Kap. 4–6) dargestellt, die konkrete Anwendung von Germaniumdetektoren wird in Ref. [1] (Kap. 12), [2] (Kap. 3.4), und [3] (Kap. 8.12.1) diskutiert. Für die Auslese wichtige Aspekte der Elektronik können in Referenzen [2] (Kap. 4) und [4] (Kap. 7) nachgelesen werden, praktische Aspekte der Gamma-Spektrometrie finden sich in Ref. [2] (Kap. 5–9). Emissionsenergien und –wahrscheinlichkeiten können in einschlägigen Datenbanken eingesehen werden, z.B. in Ref. [6] oder [7].

Folgende Fragen sollten Sie nach Ihrer Vorbereitung beantworten können:

1. Mittels welcher Prozesse wechselwirken Photonen mit Materie? Welche Prozesse dominieren bei kleinen bzw. bei sehr großen (kernphysikalisch relevanten) Energien? Welche Materialeigenschaften haben einen Einfluss auf die Wechselwirkungswahrscheinlichkeit? Wie hängt diese mit dem Extinktionskoeffizienten zusammen? Wie hängt dieser von der Energie ab?

2. Wie lautet die Vorhersage für den differentiellen Wirkungsquerschnitt als Funktion der Energie für die Compton-Streuung?

3. Durch welche physikalische Größe des Halbleiters ist die Linienbreite von Gammalinien begrenzt? Vergleichen Sie direkte und indirekte Halbleiter. Welche experimentellen Effekte führen zu einer weiteren Linienverbreiterung?

4. Wie werden die Signale aus einem Germaniumdetektor verstärkt? Was ist der Unterschied zwischen Ladungs- und Stromverstärker?

5. Wie werden energiemessende Detektoren kalibriert?

6. Wie kann die Vollenergienachweiswahrscheinlichkeit von Germaniumdetektoren mithilfe einer punktförmigen Quelle in großem Abstand bestimmt werden?

7. Welche charakteristischen Strukturen können in einem monochromatischen Gammaspektrum beobachtet werden?

8. Welches ist die Photonenenergie mit der größten Emissionswahrscheinlichkeit für ^{152}Eu, ^{137}Cs, ^{133}Ba und ^{125}Sb?

Versuchsdurchführung

Der hier verwendete sogenannte koaxiale Ge-Detektor hat die Gestalt eines Zylinders (∅ = 45 mm, l = 39 mm, siehe Abb. 1). Die Oberfläche ist durch Eindiffusion von Li-Atomen *n*-dotiert und damit gut leitend. Sie dient zum Anschluss des Pluspols der Sperrspannung. Im Innern des Detektorkristalles befindet sich eine koaxiale Bohrung, deren (innere) Oberfläche mit Gold bedampft ist. Dieser Metall-Halbleiterkontakt entspricht einer starken *p*-Dotierung, sodass es zur Ausbildung einer ausgedehnten Verarmungszone kommt, da die Akzeptorendichte im Ge-Kristall sehr klein ist. Der gesamte Detektorkristall ist noch mit einer Schutzhaube aus Al-Blech umgeben, sodass die einfallenden Gammaquanten sowohl die Al-Schicht als auch Li-dotierte Oberfläche durchdringen müssen, um nachgewiesen werden zu können. Das hat zur Folge, dass eine untere Nachweisgrenze für die Gammaenergie existiert. Sie liegt bei dem hier verwendeten Detektor bei 40 bis 50 keV. Für die Bestimmung der Vollenergienachweiswahrscheinlichkeit sollten aus diesem Grund sogar nur Energien größer als 150 keV betrachtet werden.

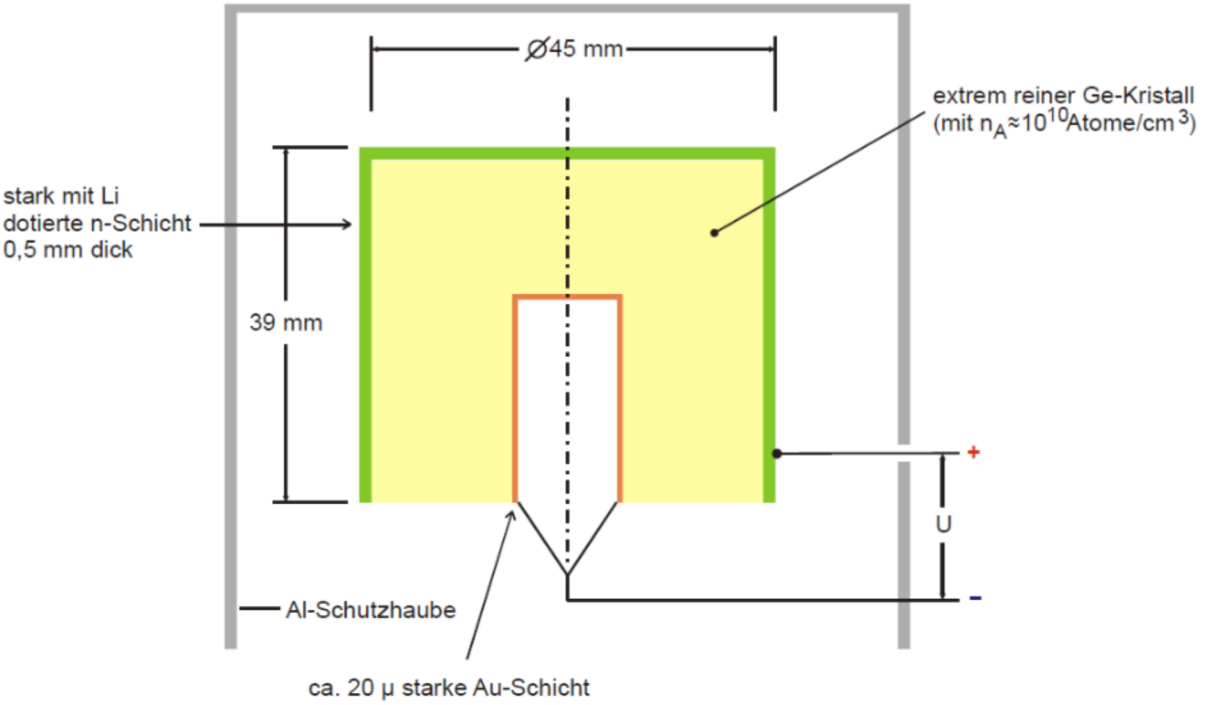

Abbildung 1: Querschnitt eines koaxialen Germaniumdetektors.

Führen Sie folgende Messungen durch, die Sie anschließend auswerten:

1. Nehmen Sie das Spektrum eines kalibrierten ^{152}Eu-Strahlers auf, um damit eine Energiekalibration der Apparatur sowie eine Messung der Vollenergienachweis-wahrscheinlichkeit des Detektors durchzuführen. Es müssen sowohl die Lage der Linien als auch ihr Inhalt bestimmt werden.

2. Zeichnen Sie das Spektrum eines ^{137}Cs-Strahlers zur Bestimmung von Detektoreigenschaften auf und bestimmen Sie die Aktivität.

3. Nehmen Sie das Spektrum einer ^{125}Sb- oder einer ^{133}Ba-Quelle auf und bestimmen Sie die Aktivität.

4. Anwendungsfalls: Zeichnen Sie das Spektrum eines unbekannten Strahlers auf. Identifizieren Sie die aktiven Nuklide und bestimmen Sie deren Aktivität.

Messprogramm und Auswertung

Werten Sie die Daten unter folgenden Gesichtspunkten aus:

1. Energiekalibration und Bestimmung der Vollenergienachweiswahrscheinlichkeit: Nehmen Sie das Spektrum eines kalibrierten ^{152}Eu-Strahlers auf, um damit eine Energiekalibration der Apparatur sowie eine Messung der Vollenergienachweiswahrscheinlichkeit des Detektors durchzuführen. Es müssen sowohl die Lage der Linien als auch ihr Inhalt bestimmt werden. Stellen Sie dazu die bekannten Gammaenergien des ^{152}Eu-Spektrums sowie die zugehörigen Emissionswahrscheinlichkeiten zusammen. Führen Sie dann mit den Daten eine lineare Ausgleichsrechnung zur Energiekalibration des Spektrometers durch.

Die ^{152}Eu-Quelle hatte am Tag ihrer Herstellung (01.10.2000) eine Aktivität von 4130±60 Bq. Berechnen Sie daraus die Aktivität der Quelle am Messtag. Errechnen Sie den vorliegenden Raumwinkel aus dem Versuchsaufbau. Achten Sie bei der Berechnung auf den Abstand von Detektor und Al-Schutzhaube, welche 1,5 cm beträgt. Weiterhin entnehmen Sie aus dem Spektrum die Linieninhalte der einzelnen Linien und berechnen daraus die Vollenergienachweiswahrscheinlichkeit der Linien des ^{152}Eu-Spektrums.

Tragen Sie die Vollenergienachweiswahrscheinlichkeit als Funktion der Energie auf und passen Sie eine Potenzfunktion an.

Bestimmen Sie den Linieninhalt der Spektrallinie und berechnen Sie die Aktivität der vermessenen Quelle am Tag der Messung

2. Untersuchung eines monochromatischen Gamma-Spektrums: Bestimmen Sie aus dem Spektrum die Energie des Strahlers, die Halbwertsbreite und die Zehntelwertsbreite der Vollenergielinie, die Lagen der Compton-Kante

und der Rückstreulinie sowie die Inhalte der Vollenergielinie und des Compton-Kontinuums.

Der Inhalt des Compton-Kontinuums ist durch den Rückstreulinien und im Bereich niedriger Energien eventuell durch andere Einflüsse verfälscht. Für eine genauere Bestimmung ist es sinnvoll, ihn durch eine Funktion gemäß des differentiellen Wirkungsquerschnitts anzupassen. Ein konstanter Faktor kann aus Messergebnissen etwas unterhalb der Compton-Kante gewonnen werden, denn in diesem Energiebereich wird die Compton-Kurve weitgehend unverfälscht gemessen.

Vergleichen Sie die gemessenen Werte für die Compton-Kante und die Rückstreulinie mit den aus der Energie berechneten Werten. Prüfen Sie, ob die gemessene Halbwertsbreite der Photolinie mit der Zehntelwertsbreite konsistent ist (Welcher Zusammenhang gilt zwischen diesen beiden Größen für eine Gaußverteilung?).

Bestimmen Sie aus der Länge des Detektorkristalls und dem Extinktionskoeffizienten für Photo- und Compton-Effekt die Absorptionswahrscheinlichkeit der ^{137}Cs-Quanten für den hier vorliegenden Detektor. Vergleichen Sie Ihre Ergebnisse mit den Inhalten der Photolinie und des Compton-Kontinuums. Welchen Schluss muss man aus dem Vergleich ziehen? Wie kommt vermutlich die „Photolinie“ zustande?

3. Aktivitätsbestimmung: Bestimmen Sie die Linieninhalte der einzelnen Spektrallinien und berechnen Sie die Aktivität der vermessenen Quelle am Tag der Messung. Beachten Sie auch hier die unterschiedlichen Emissionswahrscheinlichkeiten.

4. Anwendungsfall: Nuklididentifikation und Aktivitätsbestimmung: Bestimmen Sie die Position und den Inhalt der einzelnen Spektrallinien. Identifizieren Sie anhand der angegebenen Datenbanken, welche aktiven Isotope vorkommen. Falls diese aus den natürlichen Zerfallsreihen bekommen, bestimmen Sie die auftretenden Glieder der Zerfallsreihe. Bestimmen Sie die Aktivität der einzelnen Isotope.

Literatur

[1] G. Knoll, Radiation Detection and Measurement, 4th edition, 2010, Wiley. Online: https://www.ub.tu-dortmund.de/katalog/titel/HT016539332

[2] G. Gilmore, Gamma-ray Spectrometry, 2nd edition, 2008, Wiley. Online: https://www.ub.tu-dortmund.de/katalog/titel/ocn264615349

[3] H. Kolanoski, N. Wermes, Teilchendetektoren, 2016, Springer. Online: https://www.ub.tu-dortmund.de/katalog/titel/HT018883605

[4] G. Lutz, Semiconductor Radiation Detectors, 2007, Springer. Online: https://www.ub.tu-dortmund.de/katalog/titel/TT050004850

[5] S.M. Sze, Physics of semiconductor devices, 3rd edition, 2007, Wiley. Online: https://www.ub.tu-dortmund.de/katalog/titel/HT014916162

[6] Laboratoire National Henri Becquerel: http://www.nucleide.org/Laraweb/index.php; letzter Zugriff 12.02.2019.

[7] National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory: https://www.nndc.bnl.gov/nudat2/; letzter Zugriff: 12.02.2019.

Letzte Überarbeitung: 15.02.2019