

Zeitschrift:	Helvetica Physica Acta
Band:	36 (1963)
Heft:	IV
Artikel:	Ionisation von Si-Rückstosskernen in Si-Zähldioden bei Bestrahlung mit Neutronen von 3,0 bis 3,9 MeV
Autor:	Bilger, H. / Baldinger, E. / Czaja, W.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-113380

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 18.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Ionisation von Si-Rückstosskernen in Si-Zähldioden bei Bestrahlung mit Neutronen von 3,0 bis 3,9 MeV

von H. Bilger, E. Baldinger und W. Czaja*)

(1. XI. 62)

Summary: Measurements of Si-recoil spectra were performed in Si-detector diodes which are irradiated with monoenergetic fast neutrons. In the same experiment we compared the mean energy ε to create an electron-hole pair of α -particles with the ε of the recoil ions. In the case of Si-ions the results indicated a much higher value of ε .

A simple model is suggested to account for the measured defects. This model gives also a rough estimate for the ionisation defects of other ions in semiconductors.

Einleitung

Die Verwendung von Halbleiterdioden als Festkörperionisationskammern ist bereits allgemein bekannt¹⁾. Es zeigt sich (siehe ¹⁾), dass die von einem ionisierenden Teilchen erzeugte Ladung proportional ist zu dem im Zählvolumen der Diode verbrauchten Energieanteil. Diese Feststellung gilt für alle untersuchten Teilchensorten, wie Elektronen, Protonen, Deuteronen, Heliumkerne, Stickstoff- und Kohlenstoffionen, in einem sehr grossen Energiebereich. Eine Ausnahme bilden Spaltprodukte, bei denen gewisse Abweichungen zu existieren scheinen⁸⁾.

Verschiedenen theoretischen Betrachtungen zufolge (zum Beispiel ²⁾³⁾⁴⁾) sollte für Ionen mit kleiner Geschwindigkeit, insbesondere für schwere Teilchen kleiner Energie, ein wachsender Anteil elastischer Stöße mit den Atomen der Target auftreten, so dass der Quotient Ladung/Energie mit abnehmender Energie kleiner wird.

Mit der vorliegenden Arbeit sind zwei Ziele verfolgt worden:

1. Untersuchung der Möglichkeit, Rückstoßspektren in Halbleiterdioden bei Bestrahlung mit monoenergetischen Neutronen zu erhalten.

2. Messung der von den Rückstossionen erzeugten Ladung. Bei Rückstossionen vermeidet man Fensterprobleme, die beim Einschiessen von langsamen Ionen von aussen auftreten.

Experimentelles

a) Neutronen. Die monoenergetischen Neutronen mit den Energien 3,0, 3,54 und 3,9 MeV werden mit Hilfe der $D(d, n)He^3$ -Reaktion aus einem Kaskadengenerator**) erhalten. Die Targetdicke betrug bei allen Messungen etwa 50 keV; der Deuteronenstrom war von der Grössenordnung 10 μ A. Der intergrierte Neutronenfluss wurde mit einem geeichten Multiplier mit Hornyak-Scintillator (Helv. Phys. Acta 28, S. 227, 1955) gemessen.

*) Institut für angewandte Physik, Universität Basel.

**) Wir danken Herrn Prof. Dr. P. Huber für die Überlassung der 1-MeV-Anlage des Physikalischen Institutes und auch für die Möglichkeit zur Aktivierung von γ -Präparaten, sowie den Herren ELLGEHAUSEN, EXTERMANN und LEIMGRUBER für ihre Mithilfe bei der Bestrahlung.

b) Zur Messung der Impulsspektren. Die Rückstoßspektren wurden in einer diffundierten ϕ -Basis-Diode von RCA (Typ C-3-250-2,0) mit 20 mm^2 Fläche, $10^3 \Omega \text{cm}^2$ Basismaterial und einer maximalen Sperrspannung von 250 Volt erzeugt. Die Diode ist in einem Metallgehäuse gefasst und mit einer etwa 0,6 mm starken Nickelhaube vollständig abgeschirmt. Der Abstand Diode-Target beträgt etwa 5 bis 20 cm.

Der Vorverstärker ist mit der Röhre E810F bestückt. Optimales Verhältnis von Signal zu Rauschen wird mit einem RC-RC-Verstärker gleicher Zeitkonstante (0,25 μs) erzielt. Die Spektren sind in einem 128-Kanal-RCL-Impulsspektrographen registriert worden. Zur Ladungseichung siehe Helv. Phys. Acta 26, S. 145—180, 1953.

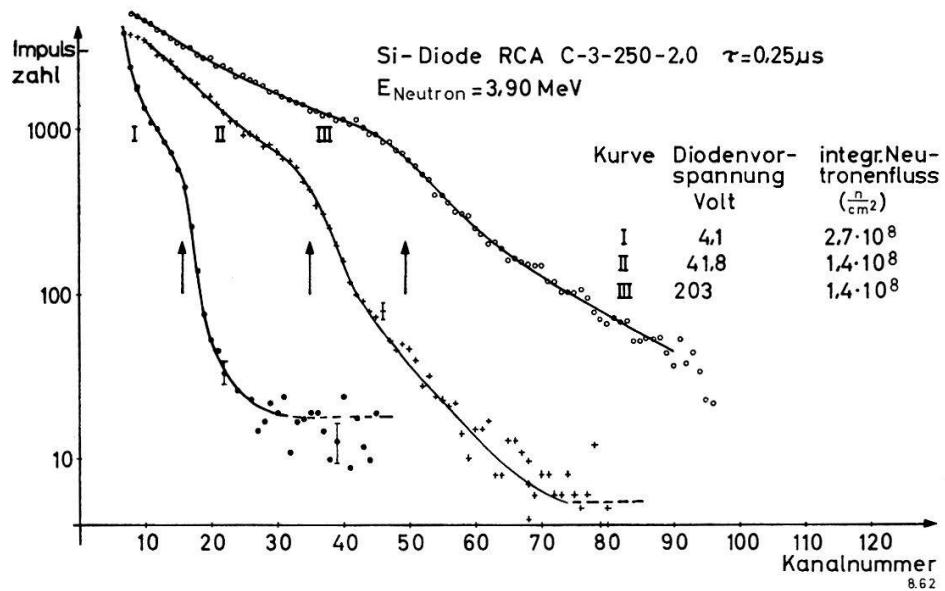


Fig. 1

Impulsspektrum bei Bestrahlung einer RCA-Diode mit 3,9-MeV-Neutronen. Die eingezeichneten Fehler sind die statistischen. Die Pfeile zeigen die Lage der in einer linearen Darstellung auftretenden Wendetangente an

c) Rückstoßspektren. Figur 1 zeigt die Impulsverteilung für Neutronen von 3,90 MeV. Die Spektren wurden bei 5 Vorspannungen gemessen. (Die Messungen bei $V_{Diode} = 16,5$ Volt und 108 Volt haben wir der Übersichtlichkeit halber weggelassen.) Ohne Neutronenstrahl wurde kein Impuls registriert.

Bei $E_n = 3,54$ MeV und 3,0 MeV ist je ein weiteres Impulsspektrum mit $V_{Diode} = 42$ Volt aufgenommen worden. Alle Messkurven zeigen einen charakteristischen Knick*).

Die in Figur 1 durch Pfeile angezeigten Punkte betrachten wir als Energiegrenze der elastischen (n, Si)-Stöße. Bei allen Messungen ist die Apparatur durch Eichladungen kalibriert und bezüglich Linearität geprüft worden.

Zur Kontrolle des Untergrundes haben wir das Impulsspektrum mit und ohne Neutronenabsorption durch einen Polyäthylenzyylinder von 15 cm Länge aufgenommen (Fig. 2)**).

*) (n, a)- oder (n, p)-Reaktionen kommen zur Erklärung nicht in Frage, da hierfür die Wirkungsquerschnitte (siehe AWRE-Report Nr. 0-28/60) um mehr als 2 Größenordnungen kleiner sind.

**) Die mittlere freie Weglänge für 3,9-MeV-Neutronen beträgt nach unseren Messungen 4,0 cm.

Ergebnisse

a) Auswertung der Rückstoßspektren

Impulszahl. Die gesamte Stosszahl lässt sich abschätzen aus dem gemessenen Neutronenfluss, dem totalen Wirkungsquerschnitt und dem aktiven Volumen der Diode.

$$S = \Phi_n \cdot \sigma_{tot} \cdot N \cdot F \cdot W, \quad (1)$$

S = gesamte Stosszahl,

Φ_n = integrierter Neutronenfluss (cm^{-2}),

σ_{tot} = totaler elastischer und inelastischer (cm^2) Wirkungsquerschnitt von Si für Neutronen,

N = Atomdichte von Si (cm^{-3}),

F = effektive Fläche der Diode (cm^2),

W = effektive Dicke der aktiven Zone (cm).

Die Bestimmung der Dicke der aktiven Schicht ist am unsichersten, da sie aus der Formel für die Raumladungszone W_{RL} einer «abrupten» Diode bestimmt wurde,

$$W_{RL} = \left(\frac{2 \cdot \epsilon \epsilon_0 \cdot (V + V_0)}{q \cdot N_e} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

$\epsilon \epsilon_0 = 12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \text{ As/Vcm}$,

$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$,

N_e = Konzentration der freien Elektronen in der hochohmigen Schicht (cm^3),

V_0 = «Diffusionsspannung», $\simeq 0,4$ Volt,

V = angelegte Spannung (Volt).

wobei die zusätzliche Sammelzone durch Diffusion der erzeugten Ladungsträger vernachlässigt ist.

Die experimentell ermittelten totalen Stosszahlen sind etwa proportional zu $\sqrt{V_{Diode}}$, das heisst proportional zum Volumen. Die Abschätzung ergibt Stossraten

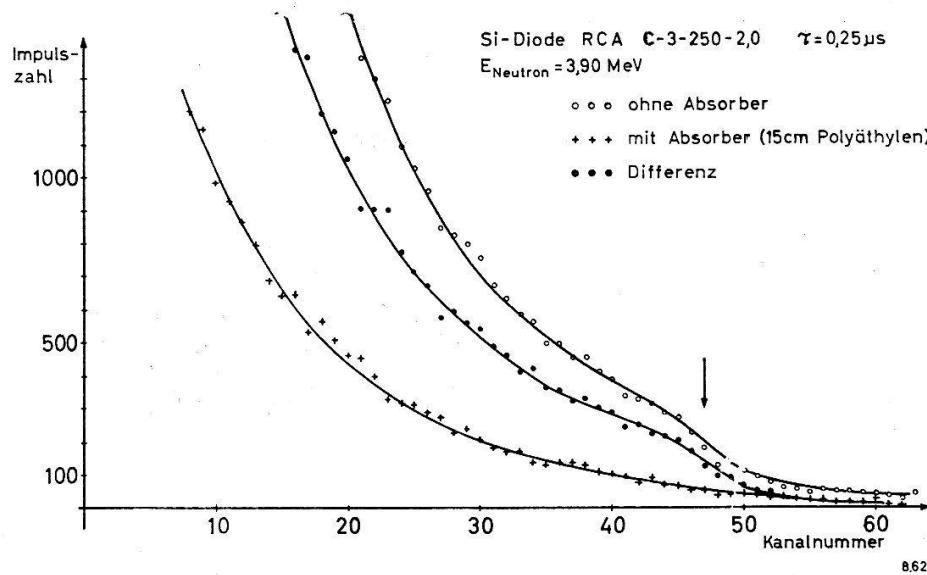


Fig. 2

Impulsspektrum ohne und mit einem 15-cm-Polyäthylenabsorber. Die freie Weglänge von 3,9-MeV-Neutronen in Polyäthylen beträgt 4,0 cm. Die beiden experimentellen Kurven wurden durch Bestrahlung mit der gleichen (unabgeschwächten) Neutronendosis erhalten. Der Pfeil zeigt die Lage der Wendetangente an

von der gleichen Größenordnung wie die Messung, die jedoch durchwegs um einen Faktor $2 \div 3$ zu klein sind. Wir führen dies auf die Unsicherheit der Abschätzung einerseits zurück, sowie auf einen Anteil von «falschen» Impulsen in den unteren Kanälen, zum Beispiel erzeugt durch γ -Strahlen aus der Umgebung der Diode (siehe Absorbermessung, Fig. 2).

Grenzenergie der Impulse, Rekombinationsverluste. Die für verschiedene Diodenvorspannungen erhaltenen maximalen Ladungen (vergleiche Pfeile in Figur 1) sind noch mit Rekombinationsverlusten behaftet. Zu ihrer Eliminierung tragen wir die reziproke Ladung als Funktion der reziproken Feldstärke auf⁵⁾, siehe Figur 3. Es lässt sich eine Sättigungsgerade einzeichnen, deren Schnittpunkt mit der $1/Q$ -Achse

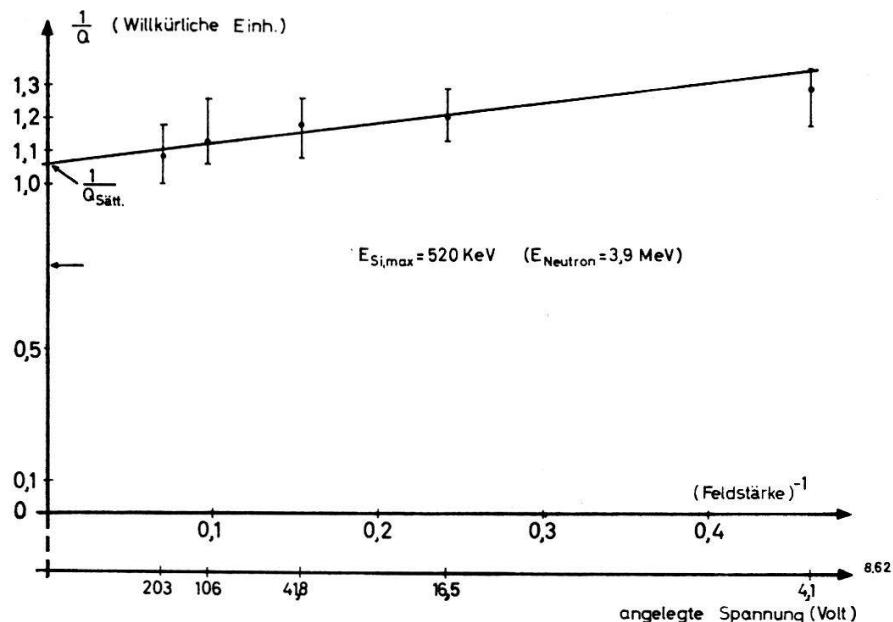


Fig. 3

Sättigungskurve für die aus Figur 1 erhaltenen Impulshöhen (Ladungen). In den eingezeichneten Fehlern wurde das stark verschmierte Impulsspektrum berücksichtigt. Auf der Abszisse sind die Werte $(V_{Diode} + 0.4)^{-1/2}$ aufgetragen, welche proportional zur reziproken Feldstärke sind.

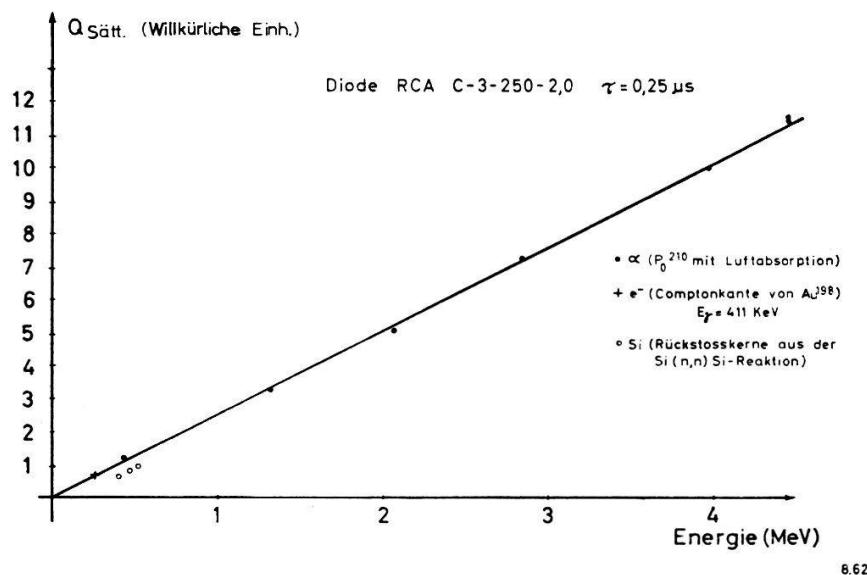


Fig. 4

Energieabhängigkeit der Sättigungsladung in Si. Die Punktgrösse bedeutet gleichzeitig die Messfehler

die Sättigungsladung Q_s liefert. Q_s liegt weit ausserhalb der aus der maximalen Rückstossenergie E_{max}

$$E_{max} 4 = \frac{m_{Si} \cdot m_n}{(m_{Si} + m_n)^2} \cdot E_n , \quad (3)$$

m_{Si} = Masse des Si-Kerns, m_n = Masse des Neutrons, E_n = Energie des Neutrons, mit Hilfe von $\epsilon = 3,5$ eV/Elektron-Lochpaar¹⁾ bestimmten Ladung (siehe horizontaler Pfeil auf der $1/Q$ -Achse). Figur 3 zeigt das Ergebnis einer Messung mit 3,9 MeV-Neutronen.

Abhängigkeit von der Neutronenenergie. Bei $E_n = 3,0$ und 3,54 MeV sind Impulsspektren nur mit einer Diodenvorspannung von 42 Volt gemessen worden. Zur Extrapolation auf die entsprechenden Sättigungsladungen wurde die Neigung der Sättigungsgeraden aus Figur 3 verwendet. Die so erhaltenen Werte sind in Figur 4 als Funktion der maximalen Rückstossenergie aufgetragen.

b) Kontrollversuche

α -Teilchen. Nach der Bestrahlung wurde mit der verwendeten Diode die Sättigungsladung für α -Teilchen von Po^{210} in derselben Anordnung bestimmt, wobei die Energie der α -Teilchen mit Hilfe der Luftabsorption zwischen Quelle und Diode variiert wurde. Die Umrechnung geschah nach der Reichweite-Energie-Beziehung von BETHE (7), S. 180). Die Fensterdicke wurde zu 2μ bestimmt und der entsprechende Energieverlust in Figur 4 berücksichtigt. Innerhalb der Messgenauigkeit beobachtet man bei den α 's Proportionalität zwischen Q_s und E . Es konnte auch gezeigt werden, dass die gemessene Sättigungsladung innerhalb 3% unabhängig von der gewählten RC-Zeitkonstanten des Verstärkers $0,25 \div 1 \mu s$ ist.

Elektronen. Die Diode wurde mit einer $Au^{198*}-\gamma$ -Quelle ($E\gamma = 411$ keV) bestrahlt und die Energieverteilung der Comptonelektronen gemessen*). Die der Comptonkante entsprechende Ladung ist in Figur 4 aufgetragen. Sie liegt sehr gut auf der durch die α 's bestimmten Geraden.

Diskussion

Zur Verdeutlichung des gemessenen Effektes ist in Figur 5 noch einmal der Energieverlust pro Elektron-Lochpaar für Si-Rückstosskerne und e^- relativ zu demjenigen von α -Teilchen aufgetragen. Er ist für Elektronen und α 's derselbe, während er für Si-Ionen weit ausserhalb des Fehlers grösser ist.

Im folgenden soll gezeigt werden, dass dieser Effekt weder durch Randeffekte in der Diode (Abschnitt a), noch durch Rekombinationsverluste (Abschnitt b) hervorgerufen wurde. In Abschnitt c wird ein einfaches Modell zur Erklärung dieser Erscheinung vorgeschlagen.

a) Reichweite

Die Reichweite der Si-Ionen ist ein wichtiger Parameter für die Bestimmung eines eventuellen Randeffektes in der Diode. Da experimentelle Werte für Si-Ionen in Si fehlen und das Problem unseres Wissens auch theoretisch nicht behandelt worden ist, wird die Reichweite durch Vergleich mit α -Teilchen abgeschätzt.

*) Die theoretische Comptonverteilung wurde durch Verschmieren an die gemessene Verteilung angepasst. Man erhält daraus für das Rauschen der Gesamtapparatur 30 keV (Halbwertsbreite eines δ -Stosses).

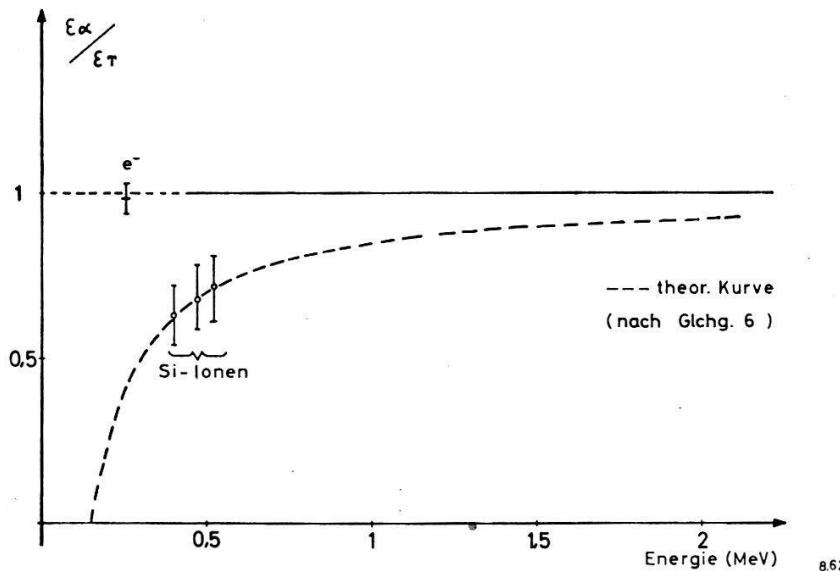


Fig. 5

$\epsilon_\alpha/\epsilon_{\text{Si}}$ bzw. $\epsilon_\alpha/\epsilon_{e^-}$ als Funktion der Teilchenenergie (ϵ = Energieverlust pro Elektron-Lochpaar)

Die Stopping power ergibt sich nach ⁷⁾, S. 167 zu

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4 \pi Z^2 e^4 N_e}{m v^2} \ln \frac{2 m v^2}{I} \quad (4)$$

(Energieverlust nur durch Ionisation, keine relativistische Korrektur, Rutherford-Streuung sei vernachlässigbar).

Z = Ladung des ionisierenden Teilchens,

N_e = Dichte der Elektronen in der Target (cm^{-3}),

m = Elektronenmasse (g),

v = Geschwindigkeit des ionisierenden Teilchens (cm/s),

I = Ionisierungspotential der Targetatome (erg).

Nach Gleichung (4) hängt die Stopping power ausser von den Eigenschaften der Target nur von der Ladung und der Anfangsgeschwindigkeit des Ions ab.

Bei langsamem Ionen wird das Problem allerdings durch Anlagerung von Elektronen an das Ion komplizierter. Wir berücksichtigen dies näherungsweise durch Einführen der effektiven Ladung Z_{eff} (⁷⁾, S. 229) für Z

$$Z_{\text{eff}} = Z^{1/3} \cdot \frac{\vartheta_{\text{Si}}}{e^2/\hbar}, \quad (5)$$

$e^2/\hbar = 2,18 \cdot 10^8 \text{ cm/s}$,

$\vartheta_{\text{Si}} = 1,4 \cdot 10^9 \sqrt{\frac{E \text{ (MeV)}}{28}} \text{ cm/s}$,

$Z = 14$.

Aus (5) erhält man für 500-keV-Si-Ionen

$$Z_{\text{eff}} \simeq 2 \text{ Elementarladungen},$$

das heisst man erwartet bei der Integration von (4) etwa dieselbe Reichweite für Si-Ionen und α -Teilchen gleicher Anfangsgeschwindigkeit.

Es ergibt sich (⁷⁾, S. 180 und ¹⁾, S. 259)

$$R_{\alpha, v_0} = 0,5 \mu \simeq R_{\text{Si}, v_0}.$$

Die kleinste Dimension der aktiven Schicht der Diode beträgt bei 4 Volt Vorspannung nach Gleichung (2) 15μ und ist somit 30mal grösser.

Ferner beobachtet man bei sehr verschiedenen Diodenvorspannungen mit entsprechend grossen Änderungen des aktiven Volumens keinen Einfluss auf die Form des Spektrums, hingegen eine Zunahme der totalen Stosszahlen proportional zu \sqrt{V} (S. 5), was auf das Fehlen eines Randeffektes hinweist.

b) Sättigungsdefizit

Wie Figur 3 zeigt, sind die Rekombinationsverluste genügend klein und die Extrapolation auf die primär erzeugte Ladung ausreichend sicher, da die Sättigungskurve von 4 Volt bis 200 Volt gemessen wurde. Im übrigen existieren Messungen mit N^{14} -Ionen von 2 bis 26 MeV⁹), für welche ausgezeichnete Linearität der verwendeten Diode festgestellt wurde (siehe auch ⁶), was uns als weiteres Indiz für das Fehlen eines grossen Sättigungsdefizites erscheint.

c) Energieverlust durch elastische Stösse Si-Si

Nach ²⁾³⁾⁴⁾ existiert für jedes auf eine Target auftreffende Teilchen eine untere Geschwindigkeitsgrenze, unterhalb derer das Teilchen nicht mehr ionisieren kann. In einer ersten Näherung nehmen wir folgendes an:

1. Unterhalb einer kritischen Geschwindigkeit, die für alle Teilchen dieselbe sei, werden keine Elektron-Lochpaare erzeugt.

2. Solange $v > v_{krit}$ ($\rightarrow E_{krit}$), sei der ganze Energieverlust auf Ionisation zurückzuführen, bei welcher, unabhängig von Energie und Teilchensorte, eine konstante Energie pro Elektron-Lochpaar benötigt werde.

Aus diesen Annahmen erhält man

$$\frac{\left(\frac{Q_{\text{Sätt}}}{E}\right)_{\text{Si}}}{\left(\frac{Q_{\text{Sätt}}}{E}\right)_{\alpha}} = \frac{\varepsilon_{\alpha}}{\varepsilon_{\text{Si}}} = 1 - \frac{E_{\text{krit}}}{E} \quad E \geq E_{\text{krit}} \quad (6)$$

(Die kritische Energie der α -Teilchen wird hier vernachlässigt.)

Mit $E_{\text{krit, Si}} = 150 \text{ keV}$ erhält man nach Gleichung (6) die in Figur 5 eingezeichnete Kurve. Dieser Wert $E_{\text{krit, Si}}$ wurde durch Anpassung an die Messung bei $E_n = 3,54 \text{ MeV}$ bestimmt.

Im folgenden sei eine rohe Abschätzung für E_{krit} gegeben. Nach ⁷), S. 167, gelte für die kritische Energie

$$E_{\text{krit}} = \frac{M}{m} E_{el}, \quad (7)$$

M = Masse des ionisierenden Teilchens.

E_{el} sei die mittlere im Halbleiter Si zur Bildung eines Elektron-Lochpaars nötige Energie, also 3,5 eV (S. 5).

So erhält man

Tabelle I

Ion	Si	Atommasse	28	E_{krit} (keV)	180
	p		1		6,4
	α		4		26
	schw. Fiss.prod. U ²³⁵		~ 138		890

Diese Abschätzung liefert die richtige Größenordnung für $E_{krit, Si}$ und gibt einen Hinweis auf die Energiebereiche für andere Teilchen, wo Abweichungen von der Proportionalität zwischen gesammelter Ladung und Energie zu erwarten sind. Insbesondere stehen die Messungen von EWING⁶⁾ an Protonen von 25 bis 250 KeV, unter Berücksichtigung der Messfehler, nicht im Widerspruch zu den obigen Abschätzungen. Für Spaltprodukte erhält man einen Energiedefekt von etwa 1 MeV, zu dessen experimenteller Bestätigung allerdings sehr viel genauere Messungen, als sie bis jetzt gemacht werden konnten⁸⁾, vorliegen müssen.

Weiterhin ist zum Verständnis des Verhaltens langsamer Ionen in Halbleitern ein weit detaillierteres Bild der Vorgänge notwendig, als es bis jetzt in der Literatur vorhanden ist.

Immerhin zeigen die in dieser Arbeit besprochenen Experimente einen Weg zur experimentellen Behandlung des Ionisationsvorganges bei langsamem Teilchen. Obwohl bei unseren Rückstossmessungen noch ein relativ grosser Untergrund vorhanden war, hoffen wir, dass eine Verbesserung dieser Methode und speziell ihre Ausdehnung auf andere Halbleiterdioden neue und genauere Resultate liefern wird*).

Wir möchten es nicht unterlassen, der Stiftung Hasler-Werke für die uns gewährte Unterstützung zu danken.

Literaturzitate

- 1) W. CZULIUS, H. D. ENGLER und H. KUCKUCK, *Halbleitersperrschichtzähler*, Ergeb. exakt. Naturw. 34, 236–348 (1962).
- 2) F. SEITZ und J. S. KOEHLER, *Displacement of atoms during irradiation*, Solid state physics 2, 305–448 (1956).
- 3) W. S. SNYDER und J. NEUFELD, *Disordering of solids by neutron radiation*, Phys. Rev. 97, 1636–1646 (1955).
- 4) G. H. KINCHIN und R. S. PEASE, *The displacement of atoms in solids by radiation*, Rep. on progr. in Phys. 18, 1–51 (1955).
- 5) E. BALDINGER, W. CZAJA und A. Z. FAROOQI, *p-n-Übergänge als Festkörper-Ionisationskammern*, Helv. Phys. Acta 33, 551–557 (1961).
- 6) R. I. EWING, *Response of silicon surface barrier detectors to hydrogen ions of energies 25–250 keV*, IRE Trans. on Nucl. Science 9, 207–210 (1962).
- 7) H. A. BETHE und J. ASHKIN in E. SEGRÈ, *Experimental nuclear physics I*, 166–357, John Wiley and Sons, Inc., New York (1953).
- 8) W. T. JOYNER, H. W. SCHMITT, J. H. WEILER und R. J. SILVA, *Energy spectra of correlated fragment pairs from the spontaneous fission of Cf²⁵²* IRE Trans. on Nucl. Science 8, Nr. 1, 54–58 (1961).

Vergleiche aber auch:

- S. S. FRIEDLAND, J. W. MAYER und J. S. WIGGINS, *The solid-state ionization chamber*, IRE Trans. on Nucl. Science 7, Nr. 2–3, 181–185 (1960).
 G. L. MILLER, W. L. BROWN, P. F. DONOVAN und I. M. MACKINTOSH, *Silicon p-n-junction radiation detectors*, IRE Trans. on Nucl. Science 7, Nr. 2–3, 185–189 (1960).
 sowie Diskussionsbemerkungen in J. W. MAYER, *Pulse formation in semiconductor diodes*, in *Semiconductor nuclear particle detectors*, Nuclear Science Series, Report Nr. 32, 1–8 (1961).
 9) M. L. HALBERT und J. L. BLANKENSHIP, *Response of semiconductor surface-barrier counters to nitrogen ions and alpha particles*, Nuclear Instruments and Methods 8, 106–116 (1960).

*) Um den asymptotischen Verlauf der theoretischen Kurve in Figur 5 zu bestätigen, ist ein weiteres Experiment mit 14-MeV-Neutronen geplant.