

Zeitschrift: Helvetica Physica Acta

Band: 32 (1959)

Heft: I

Artikel: Experimentelle Untersuchungen über den Einfluss und die Erzeugung von Gitterstörzellen in Flächentransistoren

Autor: Baldinger, E. / Bilger, H. / Nicolet, M.-A.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-112997>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 15.01.2025

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

Experimentelle Untersuchungen über den Einfluss und die Erzeugung von Gitterstörungen in Flächentransistoren

von **E. Baldinger, H. Bilger** und **M-A. Nicolet**

(Institut für angewandte Physik, Universität Basel)

(19. I. 59)

Summary. It will be shown for Si-transistors that the influence of lattice defects can be recognized in the behaviour of the static collector potential $V_0 = V_{ec}(I_e)_{I_c=0}$ and of the current transmission factor $\alpha = (I_c/I_e)_{V_{cb}=0}$ below 150° C. The same effects are also present in Ge-transistors at sufficiently low temperatures (ca. 0° C). As a check the number of lattice defects was raised by fast neutron radiation until their influence became measurable at room temperature. The measurements can be interpreted when the results of the theory of Sah et al.⁶⁾ are suitably introduced into Shockley's model of junction transistors. On the other hand thermal neutrons create essentially only such changes in the characteristics which are explainable by the Shockley model alone.

The influence of fast and thermal neutron radiation on some differential parameters and on the noise of Ge-transistors was also investigated. The results correspond to the expectations. Further, these experiments with fast neutrons support the theory that low frequency noise is mainly due to surface effects.

In den klassischen Arbeiten von SHOCKLEY *et al.*^{1) 2)} wurde die Grundlage zu einer Beschreibung der Vorgänge in *pn*-Übergängen gelegt, welche in vielen Fällen das wirkliche Verhalten von Flächendioden und -Transistoren in befriedigender Art und Weise beschreibt. Bei Si-Dioden und -Transistoren sind jedoch Erscheinungen beobachtet worden³⁻⁵⁾, die erst seit kurzem mit Hilfe einer erweiterten Theorie von SAH *et al.*⁶⁾ gedeutet werden können. In dieser Theorie wird der Einfluss von Rekombinationszentren im *pn*-Übergang in erster Näherung mitberücksichtigt.

Die folgenden Experimente sind mit dem Ziel unternommen worden, diesen Einfluss in Si- und Ge-Transistoren eingehender zu untersuchen.

1. Das Temperaturverhalten der statischen Collectorspannung V_0 und des Stromübertragungsfaktors α

Schickt man durch die Emitter-Basis-Diode eines Transistors einen Strom in Leitrichtung, so sollte nach SHOCKLEY²⁾ die Spannung V_0 zwischen dem Emitter und dem stromlosen Collectoranschluss einen charak-

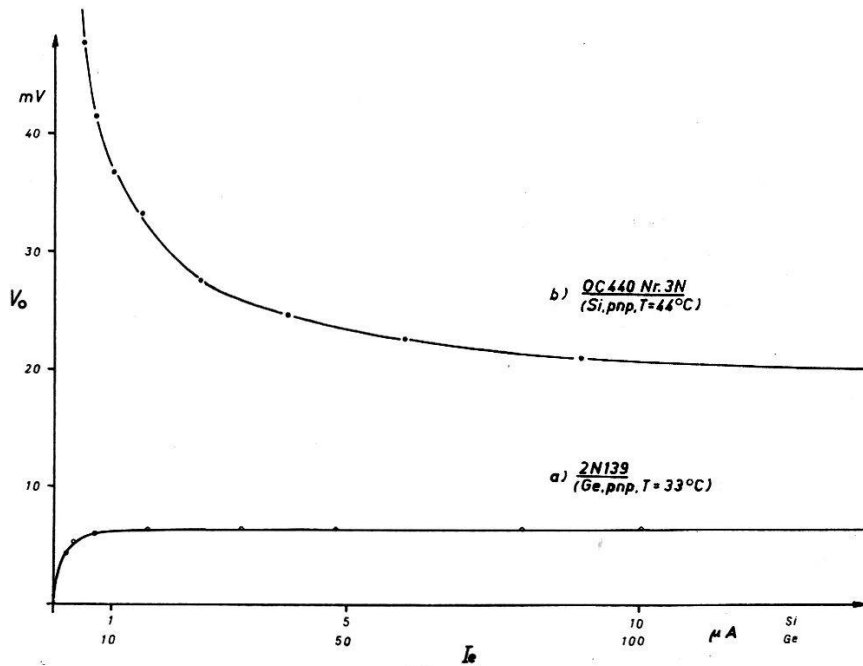


Fig. 1

Die statische Collectorspannung $V_0 = V_{ec}(I_e)_{I_c = 0}$ eines Ge-Transistors (Kurve a) und eines Si-Transistors (Kurve b). Kurve a ist unter Annahme des Shockleyschen Modells berechnet⁵⁾.

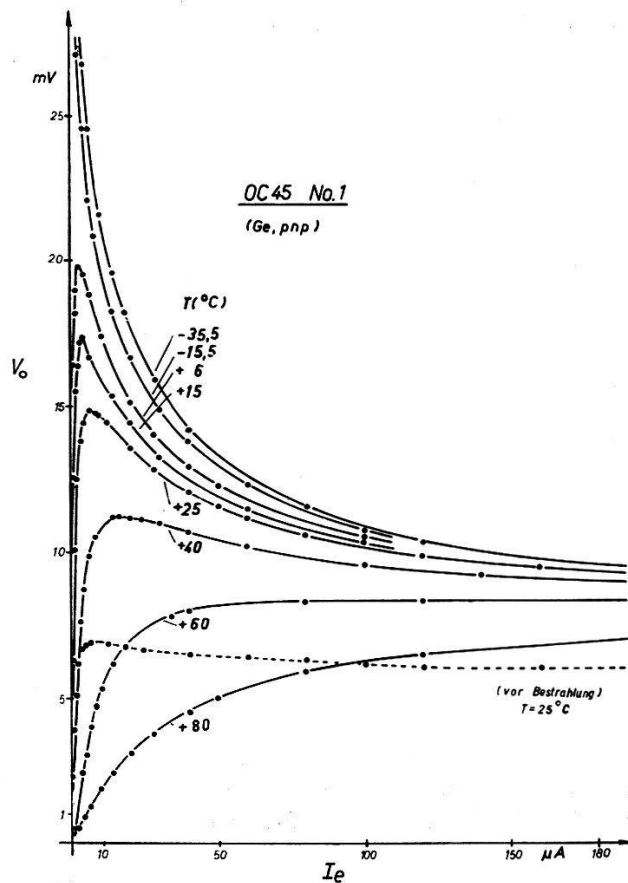


Fig. 2

Die statische Collectorspannung V_0 eines Ge-Transistors bei verschiedenen Temperaturen. Unterhalb von ca. $50^\circ C$ sind Abweichungen vom charakteristischen Verhalten nach Fig. 1 (Kurve a) zu erkennen.

teristischen Verlauf aufweisen. Figur 1 zeigt eine solche an einem Ge-Transistor gemessene Kurve, welche mit der erwähnten Theorie in befriedigender Übereinstimmung steht.

Bei tieferen Umgebungstemperaturen lassen sich jedoch, wie Figur 2 zeigt, starke Abweichungen erkennen.

(Zur Vergrößerung des Effektes ist das Exemplar vor der Ausmessung bei Raumtemperatur mit 15-MeV-Neutronen der (d, Li)-Reaktion und einer Gesamtintensität von ca. 10^{13} n/cm² bestrahlt worden. Qualitativ lässt sich dies an der erhöhten Temperatur erkennen, bei welcher die Abweichungen vom Shockleyschen Verhalten auftreten. Der Verlauf von V_0 vor der Bestrahlung ist gestrichelt eingetragen.)

Im Falle der von uns untersuchten unbestrahlten Ge-Transistoren (Philips pnp -Transistoren Typ OC44, 45, 71, 73 und 76; CBS nnp -Transistoren Typ 2N182) lag der Temperaturbereich, in welchem diese Abweichungen bemerkbar wurden, zwischen 0°C und 30°C.

Wird dieselbe Messung an einem Si-Transistor ausgeführt, so treten bereits bei Zimmertemperatur starke Abweichungen vom Shockleyschen Verhalten auf (vgl. Figur 1, Kurve b), welche erst bei Temperaturen um 150°C verschwinden (vgl. Figur 3).

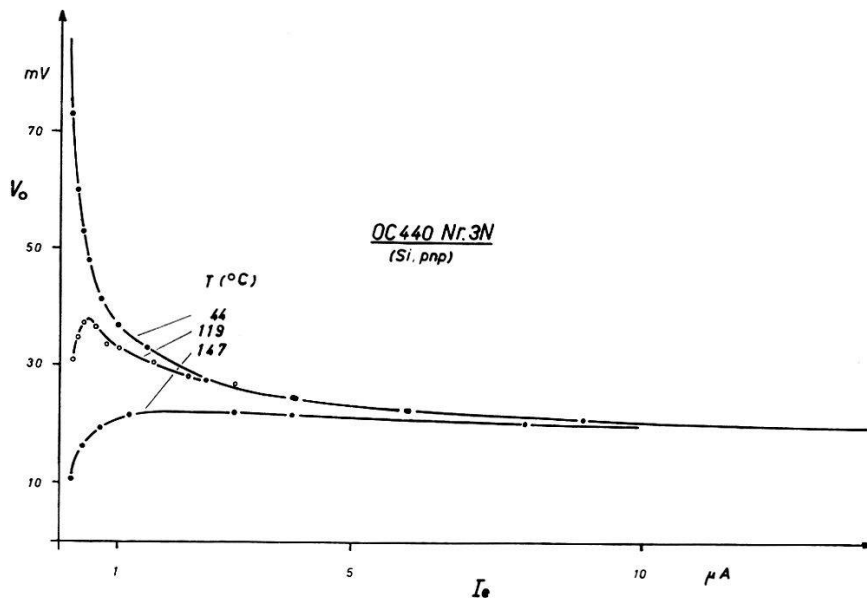


Fig. 3

Die statische Collectorspannung $V_0 = V_{ce}(I_e)_{I_c=0}$ des Si-Transistors von Fig. 1 bei verschiedenen Temperaturen. Die Abweichungen vom charakteristischen Verhalten nach Fig. 1 (Kurve a) verschwinden erst bei ca. 150°C.

Ein Vergleich der Figuren 2 und 3 lässt erkennen, dass Si- und Ge-Transistoren ein durchaus ähnliches Verhalten zeigen. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass die erwähnten Abweichungen bei Si-

Transistoren verglichen mit Ge-Transistoren bis zu viel höheren Temperaturen merkbar sind.

In diesem Zusammenhang ist es von Interesse, ebenfalls den Stromübertragungsfaktor $\alpha = (I_c/I_e)_{V_{cb}=0}$ und sein Temperaturverhalten zu untersuchen*). Wie Figuren 4 und 5 zeigen, ist α bei kleinen Strömen (im Gegensatz zur Shockleyschen Theorie) nicht konstant. Die Temperaturbereiche, in welchen die Abweichungen im Verlauf von α und V_0 auftreten, stimmen im wesentlichen miteinander überein.

Die Resultate der vorliegenden Untersuchungen legen es nahe, die beobachteten Diskrepanzen dem Einfluss von Gitterstörungen zuzuschreiben. Mit den Ergebnissen der Theorie von SAH lassen sich die Shockleyschen Gleichungen des Transistors zu folgendem System ergänzen⁵⁾:

$$\begin{aligned} I_e &= a_{11}(e^{AV_{cb}} - 1) + b_1(e^{1/2 AV_{cb}} - 1) - a_{12}(e^{AV_{cb}} - 1) \\ I_c &= -a_{21}(e^{AV_{cb}} - 1) + a_{22}(e^{AV_{cb}} - 1) + b_2(e^{1/2 AV_{cb}} - 1) \end{aligned} \quad (1)$$

($A = q/kT$, q = Einheitsladung, k = Boltzmannkonstante, T = absolute Temperatur). Dabei ist im allgemeinen eine Aussteuerungsabhängigkeit von b_1 und b_2 zuzulassen. Für die Berechnung von α ist $V_{cb} = 0$ zu setzen. Eine mit dem Gleichungssystem (1) und mit konstantem b_1 berechnete Kurve ist in Figur 4 eingetragen. Innerhalb der Messgenauigkeit stimmen die berechnete und gemessene Kurve überein.

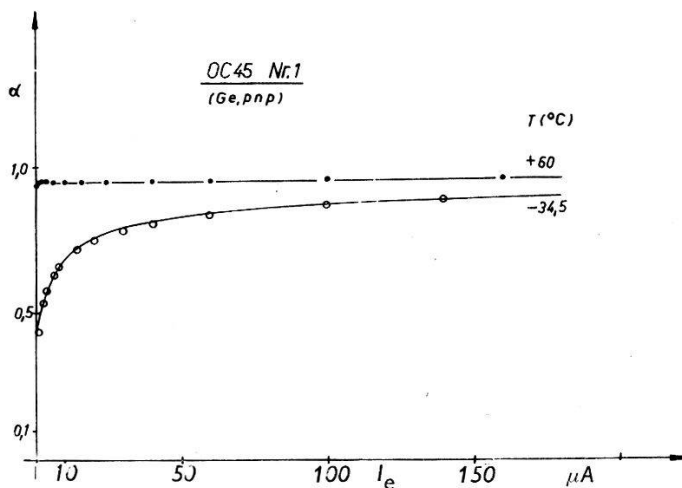


Fig. 4

Der Stromübertragungsfaktor $\alpha = (I_c/I_e)_{V_{cb}=0}$ des Ge-Transistors von Fig. 2 bei zwei verschiedenen Temperaturen. Der Verlauf bei $-34,5^\circ\text{C}$ ist auf Grund von (1) berechnet ($a_{11} = 0,113 \mu\text{A}$, $b_1 = 0,441 \mu\text{A}$, $a_{21} = 0,112 \mu\text{A}$; vgl. Text).

Auch die übrigen Ergebnisse der obigen Messungen lassen sich zumindest qualitativ durch die Annahme von Gitterstörungen deuten.

*) Vgl. auch die soeben erschienene Mitteilung von GÄRTNER *et al.*⁷⁾.

Nach SAH⁶⁾ sollten b_1 und b_2 aus Gleichung (1) zu n_i proportional sein (n_i = Inversionsdichte des Halbleiters), das heisst $b_{1,2} \sim e^{-\frac{1}{2}\Delta E/kT}$, während nach SHOCKLEY²⁾ die a_{ik} aus Gleichung (1) proportional zu n_i^2 sind, das heisst $a_{ik} \sim e^{-\Delta E/kT}$ (ΔE = Energiedifferenz zwischen Valenz- und Leitungsband im Bändermodell des Halbleiters). Bei ausreichend hoher

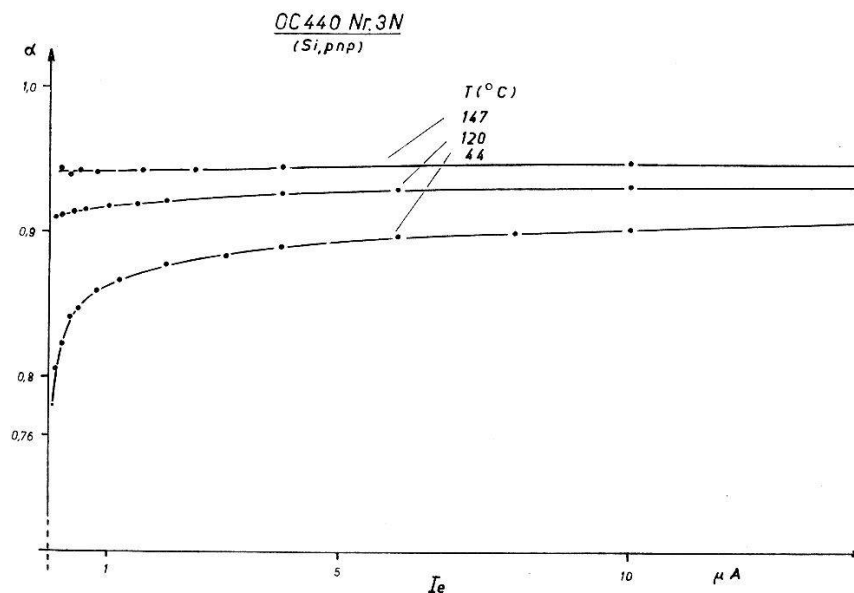


Fig. 5

Der Stromübertragungsfaktor $\alpha = (I_c/I_e)_{V_{cb}=0}$ des Si-Transistors von Fig. 3 bei variabler Temperatur.

Temperatur wird somit das Shockleysche Modell zur Beschreibung genügen ($b_{1,2} \ll a_{ik}$), während mit abnehmender Temperatur der Einfluss der Gitterstörungen immer stärker merkbar wird und zu berücksichtigen ist. Das unterschiedliche Temperaturverhalten von Ge- und Si-Transistoren erklärt sich zwanglos durch die sehr viel kleinere Inversionsdichte des Siliziums.

2. V_0 und α bei Bestrahlung mit Neutronen

Um zu einer unabhängigen Prüfung der soeben entwickelten Vorstellungen zu gelangen, wurde in weiteren Experimenten der Einfluss schneller und thermischer Neutronen auf α und V_0 an Ge-Transistoren untersucht. Dabei ist zu erwarten, dass beim Bestrahlen mit thermischen Neutronen vorzugsweise die Dotierungsverhältnisse der Basis verändert werden, während schnelle Neutronen vor allem Fehler im Gitteraufbau erzeugen, welche als Rekombinationszentren und als Traps wirken können⁸⁾.

Der Einfluss einer Bestrahlung mit schnellen Neutronen bei Zimmertemperatur ist in den Figuren 2 und 4 vorweggenommen. Ein nachträgliches dreistündiges Tempern bei 100°C veränderte die Messwerte

nur unwesentlich. Wie die Auswertung von Figur 4 zeigt, lassen sich die derart erzeugten Abweichungen vom Shockleyschen Verhalten durch das Gleichungssystem (1) gut beschreiben.

Die Bestrahlung mit schnellen Neutronen eröffnet die Möglichkeit, bereits vorhandene Gitterstörungen in kontrollierbarer Art und Weise zu vermehren. Man darf hoffen, dass durch solche Experimente der Einfluss von Traps, Rekombinationszentren usw. genauer erfasst werden kann.

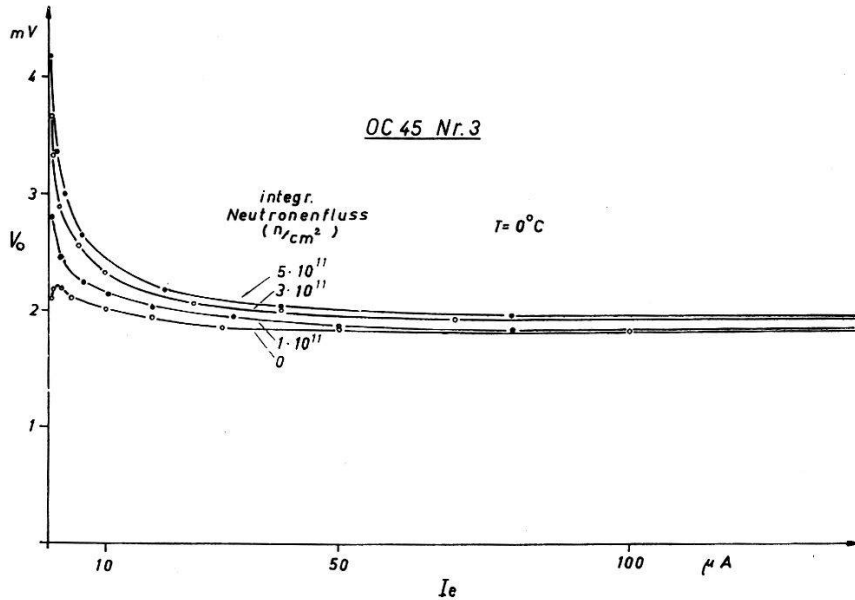


Fig. 6

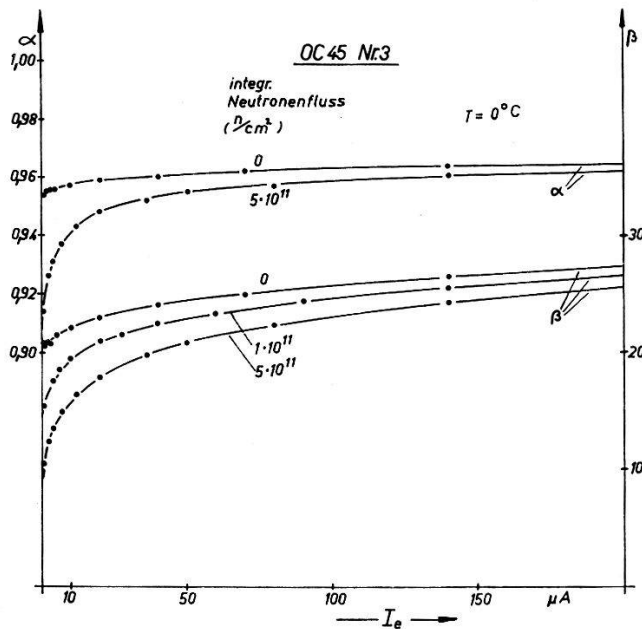


Fig. 7

Bei der Betrachtung der Figuren 6 bis 9 fällt auf, dass die Bestrahlung beim HF-Transistor OC45 auf die asymptotischen Werte von V_0 und α

nur einen schwachen, beim NF-Transistor OC71 hingegen einen wesentlich stärkeren Einfluss ausübt. Dieses unterschiedliche Verhalten lässt sich auf die verschiedenen Basisdicken W der beiden Exemplare zurückführen ($W_{OC71} : W_{OC45} \sim 5$). Im oberen Teil des Strombereiches der Figuren 6–9 sind die Werte von V_0 und α auf die Volumen-Rekombination

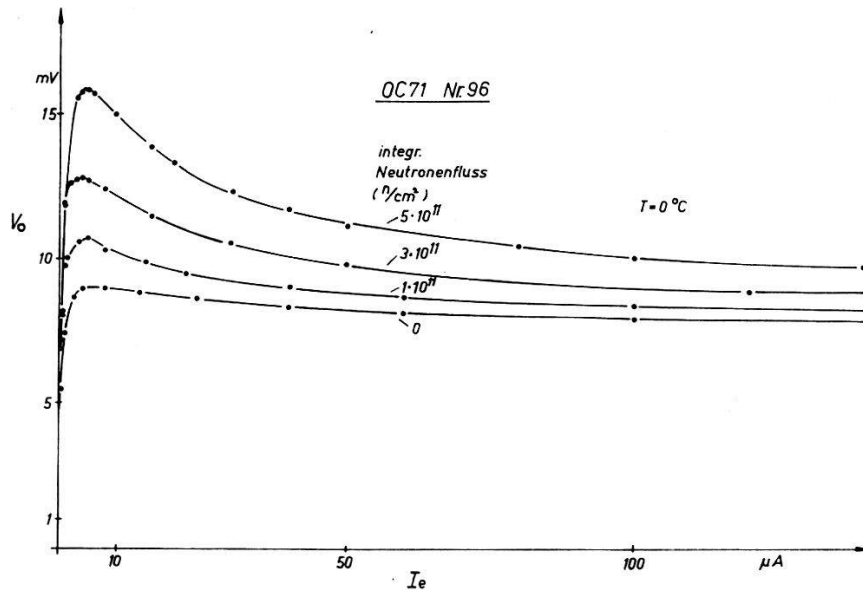


Fig. 8

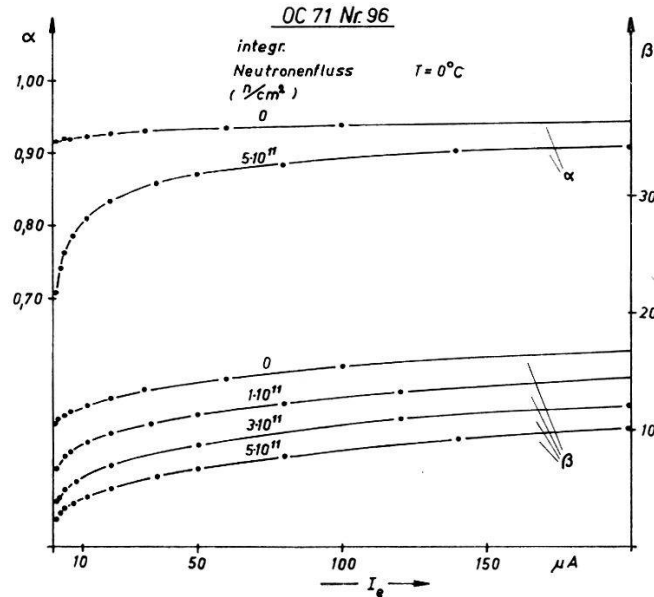


Fig. 9

Fig. 6 bis 9

Der Einfluss schneller Neutronen auf den Verlauf der statischen Collectorspannung V_0 und den Stromübertragungsfaktor $\alpha = (I_c/I_e)_{V_{cb}=0}$ bzw. $\beta = \alpha/(1-\alpha)$, gemessen an zwei charakteristischen NF- und HF-Transistoren. Bestrahlung bei Zimmertemperatur mit Neutronen der $d-d$ -Reaktion von $3,5 \pm 0,5$ MeV.

in der Basis empfindlich. Unter der Annahme einer gleichförmigen Erzeugung von Gitterstörungen ist dann zu erwarten, dass bei dicker Basis die Werte von V_0 und α mehr beeinflusst werden als bei dünner Basis. Dagegen handelt es sich im unteren Teile des wiedergegebenen Strombereiches um den Einfluss von Rekombinationszentren des pn -Überganges und somit um einen Randeffect.

Eine weitere Prüfung der oben entwickelten Vorstellungen ist durch Bestrahlung mit thermischen Neutronen möglich. Ihre Wirkung besteht vor allem in der Veränderung der Endwerte von V_0 und α bei höheren Strömen (vgl. Figur 10), während die Erzeugung von Gitterstörungen kaum merkbar ist (vgl. Verhalten bei kleinen Strömen in den Figuren 8 und 10). Zum mindesten sind praktisch keine zusätzlichen Rekombinationszentren nachzuweisen.

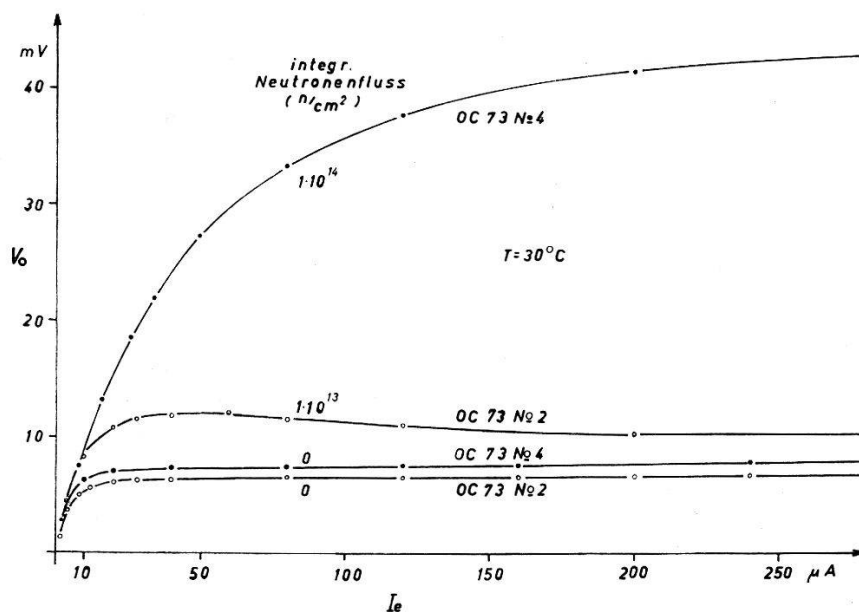


Fig. 10

Der Einfluss thermischer Reaktorneutronen auf die statische Collectorspannung zweier Ge-Transistoren (Bestrahlung bei Zimmertemperatur).

3. Die differentiellen Parameter und das Rauschen von Ge-Transistoren bei Bestrahlung mit Neutronen

Die Erweiterung des Shockleyschen Modelles nach SAH *et al.* führt nur bei sehr kleinen Strömen zu wesentlich neuen Aussagen. Bei grösseren Strömen sind keine prinzipiellen Veränderungen der Wirkungsweise des Transistors zu erwarten. Zur Prüfung dieser Vorstellungen sind jeweils vor und nach der Bestrahlung mit schnellen und thermischen Neutronen die Werte einiger Parameter des hybrid- π -Ersatzschemas*) ermit-

*) Vgl. zum Beispiel M-A. NICOLET, Helv. phys. Acta (dieses Heft, S. 60 Fig. 2).

telt worden. Das Resultat dieser Messungen an den Transistorexemplaren von Figur 6–10 ist in der Tabelle 1 zusammengestellt.

Aus dieser ist zu ersehen, dass erwartungsgemäss bei den angewendeten Neutronendosen S und $C_{b'e}$ unverändert bleiben. Dagegen wurde stets eine leichte Zunahme von $r_{bb'}$ festgestellt, was auf eine Verkleinerung der spezifischen Leitfähigkeit der Basis hinweist. Die bei den NF-Transistoren OC73 und 71 beobachtete, starke Abnahme von $r_{b'e}$ lässt auf eine erhöhte Rekombinationsrate in der Basis schliessen. Infolge der dünneren Basis der HF-Transistoren spielt diese Zunahme beim Typ OC45 eine viel kleinere Rolle. Diese Aussage steht in Übereinstimmung mit den Ergebnissen von Figur 6–9 und ist für praktische Anwendungen von Bedeutung.

Tabelle 1

Der Einfluss der Bestrahlung von Transistoren mit thermischen und schnellen Neutronen auf einige wichtige Parameter des π -Ersatzschemas. Die Änderungen sind ausgedrückt in Prozenten der Werte vor der Bestrahlung.

Messbereich: $1 \text{ mA} \leq I_c \leq 8 \text{ mA}$; $V_{ce} = -3,0 \text{ V}$; Zimmertemperatur.

Messgenauigkeit ca. $\pm 3\%$.

Gesamter Neutronenfluss pro cm^2	Transistor	$\Delta S/S$	$\frac{\Delta C_{b'e}}{C_{b'e}}$	$\frac{\Delta r_{bb'}}{r_{bb'}}$	$\frac{\Delta r_{b'e}}{r_{b'e}}$
ca. 10^{14} thermisch	OC73 No 4	wegen sehr starker Abnahme der Stromverstärkung nicht gemessen			
ca. 10^{13} thermisch	OC73 No 2			ca. + 2%	- 40%
ca. $5 \cdot 10^{11}$; $3,5 \pm 0,5 \text{ MeV}$	OC71 No96	$< \pm 3\%$	$< \pm 3\%$	ca. + 5%	- 30%
	OC45 No 3			ca. + 3%	$< \pm 3\%$

In diesem Zusammenhang ist es ferner von Interesse, den Einfluss von Gitterstörungen auf das Rauschen von Transistoren zu studieren. Bei der Bestrahlung mit schnellen Neutronen werden gleichzeitig verschiedenartige Störungen des Kristallgitters erzeugt. Während sich im pn -Übergang vor allem Rekombinationszentren bemerkbar machen, wird das Rauschen bei tiefen Frequenzen (Excess noise) durch die Anwesenheit von Traps stark beeinflusst. Aus diesem Grunde wurde das Rauschspektrum der beiden Transistoren von Figur 6–9 vor und nach der Bestrahlung mit schnellen Neutronen ausgemessen. Das Ergebnis ist in Tabelle 2 zusammengefasst. Es ist zu erkennen, dass bei der verwendeten

Neutronendosis das Rauschen nur wenig vergrössert und in seiner spektralen Verteilung praktisch nicht verändert worden ist. Beachtet man, dass die Zahl der Gitterstörungen durch die Bestrahlung stark erhöht

Tabelle 2

Der Einfluss schneller Neutronen ($3,5 \pm 0,5$ MeV, gesamter Neutronenfluss ca. $5 \cdot 10^{11}$ n/cm²) auf die Rauschzahl F zweier Transistoren in Basisschaltung. $I_e = 2,0$ mA; $V_{cb} = -3,0$ V; äusserer Lastwiderstand des Collectors: 39 kOhm; Frequenzbereich: 500 Hz bis 10 kHz; Zimmertemperatur.

Transistor	Frequenzabhängigkeit der Grösse $F \cdot (4kT \cdot 500 \Omega)$ ausgedrückt in der Form $a + b \cdot f^{-n}$					
	vor der Bestrahlung			nach der Bestrahlung		
	a 10^{-17} V^2/Hz	b 10^{-12} V^2/Hz^{1-n}	n	a 10^{-17} V^2/Hz	b 10^{-12} V^2/Hz^{1-n}	n
OC71 Nr. 96	3,8	4,1	1,52	4,5	4,7	1,52
OC45 Nr. 3	2,0	0,018	1,0	2,3	0,021	1,0

wurde, so stützt dieses Ergebnis die bereits früher geäusserte Vermutung, dass der sogenannte «excess noise» weitgehend durch Oberflächeneffekte bedingt wird⁹⁻¹²).

Weitere Experimente sind im Gange. Ihre vorläufige Auswertung hat gezeigt, dass das Gleichungssystem (1) mit konstanten Parametern a und b nicht in der Lage ist, gleichzeitig sämtliche ausgeführten Versuche mit der wünschbaren Genauigkeit wiederzugeben. Ergänzende Untersuchungen zur Verfeinerung des hier entworfenen Bildes sind deshalb notwendig.

Abschliessend möchten wir den Herren Prof. Dr. P. HUBER und F. SEILER für die wertvolle Hilfe bei den Bestrahlungsexperimenten danken.

Besonderer Dank gebührt der Stiftung Hasler-Werke, Bern, welche die vorliegende Arbeit finanziell unterstützte.

Literaturverzeichnis

- 1) SHOCKLEY, W., «The theory of $p-n$ junctions in semiconductors and $p-n$ junction transistors», Bell Syst. Techn. Journ. 28, 435-489 (1949).
- 2) SHOCKLEY, W., SPARKS, M. und TEAL, G. K., « $p-n$ -junction transistors», Phys. Rev. 83, 151-162 (1951).
- 3) TANENBAUM, M. und THOMAS, D. E., «Diffused emitter and base silicon transistors», Bell Syst. Techn. Journ. 35, 1-34 (1956).
- 4) MOLL, J. L., TANENBAUM, M., GOLDEY, J. M. und HOLONYAK, N., « $p-n-p-n$ -transistor switches», Proc. I.R.E. 44, 1174-1182 (1956).

- 5) NICOLET, M-A., «Experimentelle und theoretische Untersuchungen über das Verhalten von Flächentransistoren», Dissertation, Basel 1958.
 - 6) SAH, C. T., NOYCE, R. N. und SHOCKLEY, W., «Carrier generation and recombination in p - n -junctions and p - n -junction characteristics», Proc. I.R.E. *45*, 1228-1243 (1957).
 - 7) GÄRTNER, W. W., HANEL, R., STAMPFL, R. und CARUSO, F., «The current amplification of a junction transistor as a function of emitter current and junction temperature», Proc. I.R.E. *46*, 1875-1876 (1958).
 - 8) LARK-HOROVITZ, K., «Nucleon-bombarded semi-conductors», Semi-conducting materials, Butterworth Scientific Publ., London 1951, S. 47-77.
 - 9) KINGSTON, R. H., «Review of germanium surface phenomena», Journ. Appl. Phys. *27*, 101-114 (1956).
 - 10) VAN DER ZIEL, A., «Noise in junction transistors», Proc. I.R.E. *46*, 1019-1038 (1958).
 - 11) VAN VLIET, K. M., «Noise in semiconductors and photoconductors», Proc. I.R.E. *46*, 1004-1018 (1958).
 - 12) WATKINS, T. B., «1/f noise in germanium devices» Proc. Phys. Soc. *73*, 59-68 (1959).
-