

HALBLEITERDIODEN

LEITFADEN FÜR ERWACHSENEN-QUALIFIZIERUNG UND AUSBILDUNG
IM VEB WERK FÜR FERNSEHELEKTRONIK

© Copyright by Dipl.-Phys. Heinz Hornung, Berlin – 1966; rescript – redakt. bearbeitet: Peter Salomon (2013)

Die vorliegende Publikation ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, Irrtum und Änderungen vorbehalten.
Eine auch auszugsweise Vervielfältigung bedarf in jedem Fall der Genehmigung des Herausgebers.

Die hier wiedergegebenen Informationen, Dokumente, Schaltungen, Verfahren und Programmmaterialien wurden sorgfältig erarbeitet, sind jedoch ohne Rücksicht auf die Patentlage zu sehen, sowie mit keinerlei Verpflichtungen, noch juristischer Verantwortung oder Garantie in irgendeiner Art verbunden. Folglich ist jegliche Haftung ausgeschlossen, die in irgendeiner Art aus der Benutzung dieses Materials oder Teilen davon entstehen könnte. Für Mitteilung eventueller Fehler ist der Autor jederzeit dankbar.

Es wird darauf hingewiesen, dass die erwähnten Firmen- und Markennamen, sowie Produktbezeichnungen in der Regel gesetzlichem Schutz unterliegen.

Inhaltsverzeichnis

	Seite (original)	eBook
<u>Vorwort</u>	3	6
1. Einleitung	5	7
1.1. <u>Allgemeines</u>	5	7
1.2. <u>Das Verhältnis der Halbleiterbauelemente zu den Elektronenröhren</u>	6	8
1.3. <u>Die Entwicklungsetappen der Halbleitertechnik</u>	7	10
1.4. <u>Unser Stand in der Halbleitertechnik</u>	8	11
2. <u>Die physikalischen Grundlagen der Halbleitertechnik</u>	11	15
2.1. <u>Das Atommodell und das periodische System der Elemente</u>	11	15
2.2. <u>Der Kristall</u>	13	17
2.3. <u>Leiter - Halbleiter - Nichtleiter</u>	15	20
2.4. <u>Die elektrische Leitfähigkeit</u>	15	21
2.5. <u>Das Bändermodell</u>	18	24
2.6. <u>Die Wirkungsweise der Halbleiterdiode</u>	20	26
2.7. <u>Die Parameter der Dioden</u>	24	30
3. <u>Grund- und Hilfsmaterial zur Fertigung von Dioden</u>	26	33
3.1. <u>Das Halbleitermaterial</u>	26	33
3.2. <u>Das Grundmaterial</u>	27	35
3.2.1. <u>Zinn (Sn)</u>	28	36
3.2.2. <u>Wolfram (W)</u>	29	38
3.2.3. <u>Gold (Au)</u>	29	38
3.2.4. <u>Aluminium (Al)</u>	30	39
3.2.5. <u>Bor (B), Indium (In), Antimon (Sb), Phosphor (P), Arsen (As), Halbzeuge, Aluminium-Silizium-Eutektikum, BleiZinn, Indium-Germanium-Gallium und Gold-AntimonSilizium</u>	30	39
3.2.6. <u>Finckhdraht</u>	31	41
3.2.7. <u>Glas</u>	32	41
3.3. <u>Das Hilfsmaterial zur Diodenfertigung</u>	33	43
3.3.1. <u>Platin (Pt)</u>	34	44
3.3.2. <u>Graphit (C)</u>	35	44
3.3.3. <u>Wasserstoff (H)</u>	35	45
3.3.4. <u>Getrocknete Luft</u>	36	45
3.3.5. <u>Säuren</u>	37	47

3.3.6.	Laugen	38	48
4.	Die Halbleiter-Einkristalle	39	50
4.1.	Herstellung von Germanium-Kristallen	39	50
4.1.1.	Gewinnung von Germanium	39	50
4.1.2.	Zonenreinigung von Germanium	40	51
4.1.3.	Züchten von Einkristallen	46	57
4.1.3.1.	Das Czochralski-Verfahren	46	57
4.1.3.2.	Der Aufbau der Ziehapparatur	48	59
4.1.4.	Das Zonen-Leveling-Verfahren	50	62
4.1.4.1.	Der Aufbau einer Leveling-Anlage	51	63
4.1.4.2.	Züchtungsbedingungen	51	63
4.1.5.	Die Dotierung	52	64
4.2.	Herstellung von Silizium-Kristallen	54	68
4.2.1.	Die Gewinnung von Silizium	54	68
4.2.2.	Zonenfloating-Verfahren	56	68
4.2.3.	Züchten von Silizium-Einkristallen	56	70
4.3.	Messungen und Meßwerte von Ge- und Si-Kristallen	57	71
4.3.1.	Die Zweispitzenmethode	57	71
4.3.2.	Die Vierspitzenmethode	57	72
4.3.3.	Orientierungsbestimmung	59	74
4.3.4.	Lebensdauermessung	60	75
4.3.5.	Leitungstypbestimmung	67	77
4.3.6.	Bestimmung der Versetzungsdichte	62	77
4.4.	Mechanische Bearbeitung der Kristalle	63	80
4.4.1.	Schneiden der Scheiben	63	80
4.4.2.	Trennen der Kristallplättchen	64	80
4.4.3.	Läppen	65	81
4.4.4.	Polieren	65	81
5.	Technologische Verfahren der Halbleitertechnik	66	83
5.1.	Das Formieren	66	83
5.2.	Das Legieren	67	85
5.2.1.	Legieren von Golddrahtdioden	68	86
5.2.2.	Legieren von Siliziumdioden	69	87
5.3.	Die Diffusion	69	89
5.3.1.	Diffusion von Fremdatomen in Halbleitermaterial	70	89

5.3.2.	Vorbereitung für die Diffusion	72	91
5.3.3.	Die Diffusionsanlage	72	93
5.4.	Die Epitaxietechnik	73	94
5.5.	Die Planartechnik	76	98
5.5.1.	Der Planarprozeß	76	99
6.	Halbleiterdioden kleiner Leistung	80	102
6.1.	Gleichrichterioden mit $I_F < 300$ mA	82	104
6.1.1.	Technologie der Klein-Leistungs-Gleichrichter	84	106
6.1.2.	Legierte Klein-Leistungs-Gleichrichter	85	107
6.1.3.	Diffundierte Klein-Leistungs-Gleichrichter	86	109
6.2.	Universaldioden mit einer Grenzfrequenz < 300 MHz	87	111
6.2.1.	Technologie der Germanium-Spitzendioden	88	111
6.2.2.	Kombinationsbauelemente	89	112
6.3.	Universaldioden für > 300 MHz und < 1000 MHz	89	114
6.3.1.	Richtdioden	90	114
6.3.2.	Mischdioden	91	115
6.3.3.	Beeinflussung der elektrischen Parameter	91	116
6.3.4.	Germanium-Richtdioden	94	119
6.4.	Schaltdioden	94	119
6.4.1.	Germanium-Golddrahtdioden	96	122
6.4.2.	Schaltdioden - Technologie der Spitzendioden ($t_{rr} = 1\mu s$)	96	122
6.4.3.	Epitaxie-Planar-Schaltdioden ($t_{rr} = 1$ ns)	99	124
6.5.	Zenerdioden kleiner Leistung	101	126
6.6.	Kapazitätsdioden	103	129
6.7.	Tunneldioden	107	134
6.8.	Photodioden	111	138
6.9.	Laser- und Lumineszenzdioden	112	139
6.9.1.	Konstruktion und Technologie eines GaAs-Injektions-Lasers	113	141
7.	Fertigungseinrichtungen der Diodenherstellung	115	143
7.1.	Produktionsmittel zur Gehäuseherstellung	115	143
7.2.	Einrichtungen zur Kristallzüchtung	119	148
7.3.	Anlagen zur Herstellung des pn-Überganges	121	151
7.4.	Meßmittel zur Prüfung und Kontrolle	123	152
7.5.	Montage- und Arbeitsräume	125	155
8.	Qualität und Zuverlässigkeit	128	160

9.	<u>Technologische Disziplin</u>	129	161
10.	<u>Fachwörterverzeichnis</u>	131	163
11.	Inhaltsverzeichnis	137 (nur im Original)	
12.	Anhang	141	167
	<u>Blatt 1: Periodensystem der Elemente</u>	141	167
	<u>Blatt 2: Gegenüberstellung der Parameter von GaAs mit Ge und Si</u>	143	168
	<u>Blatt 3: Gruppe: Richtdioden $I_F < 0,3 \text{ A}$</u>	145	169
	<u>Blatt 4a: Gruppe: Universaldioden $f = 300 \text{ MHz}$</u>	117	169
	<u>Blatt 4b: Gruppe: Universaldioden $f = 1000 \text{ MHz}$</u>	149	170
	<u>Blatt 5: Gruppe: Schaltdioden</u>	151	170
	<u>Blatt 6: Gruppe: Zenerdioden</u>	153	171
	<u>Blatt 7: Gruppe: Kapazitätsdioden</u>	155	171
	<u>Blatt 8: Gruppe: Tunnelioden und Photioden</u>	157	172

Vorwort

Schon lange besteht das Bedürfnis nach einem Leitfaden für die Qualifizierung und Information auf dem Gebiet der Halbleiterdioden in unserm Werk.

Durch die zunehmende Bedeutung der Halbleitertechnik wurde dieses Bedürfnis zu einer Notwendigkeit und unter dem Arbeitstitel „Dioden“ begannen 1964 die vorbereitenden Arbeiten dazu.

Die nunmehr vorliegende Zusammenstellung zu Problemen der Halbleiterdioden ist durch eine Gemeinschaftsarbeit entstanden.

Mit Teilbeiträgen hatten die Herren Ing. Zetzsche, Ing. Gruban, Ing. Seiffert, Dipl.-Phys. Obernick, Dipl.-Phys. Heise, Dipl.-Phys. Burkhardt und Dipl.-Chem. Keiler besonderen Anteil daran.

Die Arbeiten an diesem Buch wurden mit dem Ziel durchgeführt, einen möglichst breiten Kreis interessierter Kollegen anzusprechen. Vorrangig soll es die Ausbildungs- und Qualifizierungsbestrebungen an der Betriebsakademie unterstützen. Es wird aber auch für viele Mitarbeiter der Technologie und Produktion eine Quelle zusätzlichen Wissens sein. Besonders durch das umfangreiche Tabellenmaterial ist das Buch auch Hilfsmittel für die Mitarbeiter der Entwicklung.

Selbstverständlich kann und soll mit diesem Buch kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden. Insbesondere Abschnitte über Thyristoren, Gunn-Oszillatoren, Laufzeit-Effekte und oberflächengesteuerte Bauelemente müssen als Ergänzung bei einer späteren Überarbeitung berücksichtigt werden.

In dem gebotenen Stoff liegt die Ursache, daß der Versuch, eine möglichst für jeden verständliche Darstellung zu finden, nicht durchgehend in allen Abschnitten gelang. Deshalb wird der Leser zum vollen Verständnis bei einigen Abschnitten etwas Mühe aufwenden müssen.

Besonderen Fleiß und besondere Geduld bei der Vervollständigung und Erarbeitung dieses Buches zeigten Frau Staps und Herr Gräfe. Ihnen sei dafür gedankt.

Heinz Hornung - Dipl.-Physiker

1. Einleitung

1.1. Allgemeines

Obwohl erst 20 Jahre seit der Erfindung des Transistors vergangen sind, bilden die Erzeugnisse der Halbleitertechnik (Dioden, Transistoren, Thyristoren, mikroelektronische Bausteine) den Kernpunkt der technischen Weiterentwicklung auf den verschiedensten Gebieten. Beginnend mit der Anwendung auf dem Gebiet der Unterhaltungselektronik (z. B. bei den kleinen tragbaren Rundfunk- und Fernsehgeräten), führt der Einsatz über die Meß-, Steuer- und Regelungstechnik (z. B. Steuerung von Produktionsprozessen in der Chemieindustrie und von Werkzeugmaschinen) bis zu den elektronischen Datenverarbeitungsanlagen (u. a. elektronische Rechenmaschinen), wo in einem Gerät Zehn- oder Hunderttausende von Halbleiterbauelementen eingesetzt werden.

Es gibt wohl kaum ein weiteres Beispiel einer solchen stürmischen Entwicklung wie die der Halbleitertechnik. Fast laufend erscheinen neue Halbleiterbauelemente auf dem Weltmarkt. Diese neuen Bauelemente nutzen bisher unbekannte physikalische Erscheinungen aus oder bieten auf Grund der Anwendung neuer Technologien Vorteile gegenüber den bisher gefertigten.

Die Produktionszahlen klettern sprunghaft in die Höhe und liegen in den industriell am weitesten entwickelten Ländern bereits weit über 100 Millionen Stück pro Jahr. Diese Entwicklung zeichnet sich auch in unserer Republik ab. Es ist notwendig, alle Kraft auf den Aufbau einer im höchsten Grade mechanisierten und automatisierten Fertigung mit einer wissenschaftlich fundierten, stabilen Technologie zu konzentrieren und das Sortiment ständig zu ergänzen. Diese Aufgabe kann nur durch eine umfassende technische Gemeinschaftsarbeit unter Einbeziehung aller in Produktion, Entwicklung und Technologie Tätigen gelöst werden. Dies erfordert aber von jedem Mitarbeiter, ständig das vorhandene Wissen und Können zu ergänzen und zu erweitern.

Das vorliegende Buch soll diese Aufgabe unterstützen. Es soll jeden Mitarbeiter anleiten, die persönliche Arbeit im Zusammenhang mit der Gesamttechnologie zu betrachten und soll das Verständnis für die Einhaltung der technologischen Disziplin wecken. Es soll aber auch ein Helfer in der täglichen Arbeit sein und jedem Mitarbeiter konkrete Hinweise für seinen Arbeitsplatz vermitteln.

1.2. Das Verhältnis der Halbleiterbauelemente zu den Elektronenröhren

Vielfach ist bei der Einschätzung von Stellung und Bedeutung der Halbleiterbauelemente die Absicht zu spüren, Elektronenröhren und Halbleiterbauelemente einander gegenüberzustellen. Allzu oft wird davon gesprochen, daß die Halbleiterbauelemente den Elektronenröhren den Rang ablaufen! Ist das wirklich so?

Es gibt Eigenschaften der Halbleiterbauelemente, durch die sie unzweifelhaft den Röhren überlegen sind.

Dazu gehören:

- kleinste Abmessungen (einschließlich der Möglichkeit zur weiteren Miniaturisierung),
- geringes Gewicht, schnelle Betriebsbereitschaft,
- geringster Energiebedarf (der für die Heizung der Röhren erforderliche Energieaufwand entfällt),
- bessere mechanische Stabilität und höhere Lebensdauer.

Und es ist auch richtig, daß auf vielen Gebieten Elektronenröhren durch Halbleiterbauelemente ersetzt wurden und auch weiterhin ersetzt werden. Das ist aber nicht Ausdruck einer technischen Mode, sondern wird durch die Nutzung modernster wissenschaftlicher Erkenntnisse technisch und ökonomisch erzwungen.

Trotzdem verbleibt der Röhre ein weites Einsatzgebiet. Ebenso wie durch die Halbleiterbauelemente der Elektronik vollkommen neue Gebiete erschlossen wurden und auch in Zukunft neue Nutzungsbereiche hinzukommen werden, muß die Elektronenröhre technisch neue Lösungen anstreben.

Das gesamte Gebiet der elektronischen Datenverarbeitung, angefangen bei kleinen Tischrechnern bis zu großen Anlagen, durch die der Mensch erst in der Lage ist, die Experimente zur Erschließung des Weltalls zu kontrollieren, zu steuern und auszuwerten, wäre undenkbar, gäbe es keine Halbleiterbauelemente.

Für große elektronische Rechner wäre ein eigenes Kraftwerk erforderlich, wollte man sie mit Elektronenröhren aufbauen. Außerdem müßte die sehr große Anlage in einem riesigen Kühlhaus installiert werden, um die entstehende Wärme abführen zu können. Auf diesem Gebiet gibt es also keine Kontra-Stellung von Röhren und Halbleiterbauelementen. Die Ökonomie entscheidet für die Halbleiterbauelemente.

Auf einer für viele Vertreter der Elektronenröhre manchmal beängstigenden Breite wird auf dem Gebiet der Festkörperphysik - und dazu gehört die Halbleitertechnik - geforscht, um neue technische Lösungen auch für Gebiete zu finden, die heute noch der Röhre

vorbehalten sind. Diese wissenschaftlich-technische Entwicklung darf aber nicht Anlaß für eine polemische Standpunktfrage sein. Sie wird vielmehr die Vertreter der Elektronenstrahlphysik und der Festkörperphysik zusammenführen. Elektronenröhren und Halbleiterbauelemente müssen sich sinnvoll ergänzen und es sind für die Zukunft auch Projekte zu erwarten, an denen Spezialisten der Elektronenröhre und der Festkörperphysik gleichermaßen Anteil haben.

Dabei dürfen aber nicht die technischen Grenzen außer acht gelassen werden, die für Halbleiterbauelemente bestehen.

Für viele Anwendungen ist die typische Eigenschaft der Halbleiter, mit der Temperatur ihre elektrischen Parameter zu ändern, nachteilig. Ebenso werden höchste Frequenzbereiche (> 10 GHz) gepaart mit höchsten Leistungen durch Halbleiterlösungen nicht erschlossen.

1.3. Die Entwicklungsetappen der Halbleitertechnik

Einige wichtige Eigenschaften der Halbleiter wurden bereits im 19. Jahrhundert beobachtet. So fand Michael Faraday

1833 den negativen Temperaturkoeffizienten des Widerstandes gewisser Stoffe (der elektr. Widerstand eines Halbleiters nimmt bei Temperaturerhöhung ab, im Gegensatz zu dem eines Metalls)

und

1871 fand Braun, daß der Widerstand von einigen natürlichen Kristallen (Bleiglanz z. B.) von der Größe und der Polarität der angelegten elektrischen Spannung abhängt.

Die Ergebnisse der von Braun und Pierce

1904-1909 durchgeführten Untersuchungen an Halbleiterstoffen waren recht hoffnungsvoll, wurden aber übertroffen durch die

1906 von Lieben erfundene Elektronenröhre.

Die ersten Bauelemente aus Halbleiterwerkstoffen fanden

1928-1930 in die Technik Eingang, es waren die Selen- und Kupferoxydul-Gleichrichter. Gleichzeitig wurde wissenschaftlich dem Gebiet der festen Körper starkes Interesse entgegengebracht.

1935 Durch die Nutzung immer höherer Frequenzbereiche war die Leistungsgrenze der Röhrendiode erreicht und man besann sich wieder der Kristalldetektoren. Die inzwischen herangereiften wissenschaftlichen Erkenntnisse und die Entwicklung der Radartechnik im 2. Weltkrieg erzwangen die wissenschaftlich-technische Weiterentwicklung des Detektors. Es wurden Arbeiten zur gezielten Herstellung geeigneter Halbleiter durchgeführt.

1939 wurde die von Schottky und Matt entwickelte Theorie der *Sperrschicht*- und Spitzengleichrichter veröffentlicht. Während des 2. Weltkrieges nahmen verschiedene Elektrokonzerne die Entwicklung von Germaniumdioden auf.

1948 gelang es den Amerikanern Bardeen und Brattain, den ersten brauchbaren Kristallverstärker, den Spitzen-Transistor, technisch zu realisieren. Die theoretischen Grundlagen der modernen Halbleitertechnik wurden zur gleichen Zeit vom Amerikaner Shockley entwickelt.

Die revolutionäre Entwicklung der Halbleitertechnik begann und ermutigte gleichzeitig zu umfassenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem gesamten Gebiet der Festkörperphysik.