Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 53 (1962)

Heft: 3

Artikel: Umwandlung von Licht in elektrische Energie

Autor: Winiger, F.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916907

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

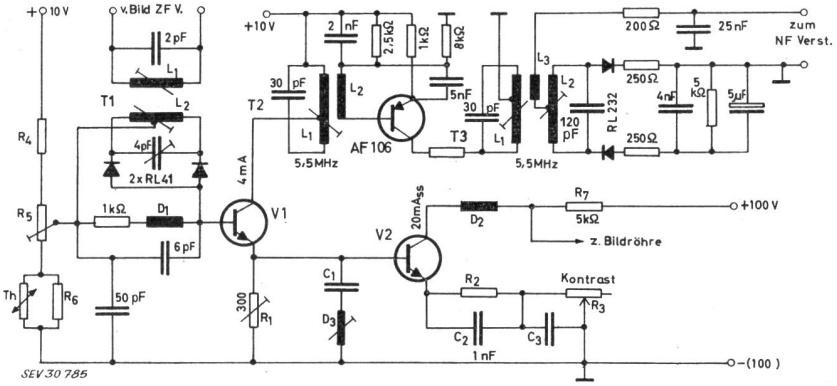
Download PDF: 10.07.2025

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

Fig. 12

Videoverstärker und Ton-ZF-Verstärker

$R_1 \ldots R_8$ Teiler und Arbeitswiderstände; $L_1 \ldots L_3$ Kreis- und Koppelinduktivitäten; $T_1 \ldots T_3$ Hochfrequenztransformatoren; $D_1 \ldots D_3$ Drosselspulen; *Th* Heissleiter



AM-Unterdrückung u. U. zu gering, so kann zusätzlich noch eine Begrenzerdiode mit der zugehörigen Schaltung an den Ratio-Primärkreis angeschlossen werden. Der Video-Verstärker mit den Transistoren V1 und V2 erhält sein Signal von den in Gegentakt arbeitenden Dioden RL 41. Die Video-Gleichspannung erscheint zunächst am Lastwiderstand von 1 kΩ. Sie liegt auch am Eingang des ersten Video-Transistors. Diese Stufe arbeitet für die Bildfrequenzen 0...5 MHz in Kollektorschaltung, also als Impedanzwandler. Der so verstärkte Bildsignalstrom teilt sich nun; er fliesst über R_1 und die Basis des Video-Endtransistors. Dieser arbeitet in Emitterschaltung und hat im Emitter sowie im Kolsektor Korrekturglieder, die den Frequenzgang bei hohen Frequenzen geringfügig verbessern. Mit dem Kontrastregler R_3 wird die Steilheit des Endstufentransistors geregelt. Die Summe der Widerstände R_2 und R_3 beträgt etwa 100 Ω. Der Serienkreis C_1 und D_3 dient zum Aussieben der störenden Ton-ZF von 5,5 MHz. Die für einen brauchbaren Video-Verstärker erforderliche Spannung ist gleich oder grösser 100 V. Die Drosselspule D_1 mit dem Widerstand R_1 ermöglicht bei hohen Frequenzen eine Lastübernahme durch den Eingang des Transistors V1, der bei hohen Frequenzen einen absinkenden Eingangswiderstand aufweist. Damit kann der Frequenzgang nochmals verbessert werden. Der hier besprochene Video-Verstärker erfordert am Eingang für Vollaussteuerung eine Eingangsspannung von 0,7 V, gemessen am Lastwiderstand 1 kΩ. Gleichstromverstärker sind in bezug auf Temperaturgang des Kollektorstromes empfindlich, und so musste auch hier eine Kompensation des Temperaturganges mit dem Heissleiter *Th* (links im Bild) vorgenommen werden.

Die in dieser Arbeit angeführten Fernseh-Schaltungen sind Versuchsaufbauten und z. T. Entwürfe. Hiemit soll natürlich nicht der Eindruck erweckt werden, dass nunmehr die gut ausgereifte Fernseh-Technik mit Röhren sehr bald durch die Transistor-Technik ersetzt wird.

Adresse des Autors:
W. Hirschmann, Siemens & Halske AG, München (Deutschland).

Umwandlung von Licht in elektrische Energie [1])

Von *F. Winiger*, Zürich

621.383

Der Artikel beschreibt die grundsätzliche Wirkungsweise und das elektrische Verhalten der p-n-Silizium-Sonnenzelle. Die Faktoren, welche den Wirkungsgrad einer solchen Zelle beeinflussen, werden analysiert und in ihrer Grösse abgeschätzt, wobei der Diskussion das Spektrum der Sonne auf der Erdoberfläche zu Grunde gelegt ist. Die technologische Herstellung solcher Zellen wird ebenfalls kurz beschrieben, und es wird in einem Ausblick gezeigt, dass der damit erreichte Wirkungsgrad der direkten Umwandlung von Licht in elektrische Energie, in der Grössenordnung von 10 %, in nächster Zukunft kaum erheblich verbessert werden kann.

Description du principe de fonctionnement et du comportement électrique de la pile solaire au silicium p-n. L'auteur analyse les facteurs qui conditionnent le rendement d'une telle pile. Il en estime la grandeur, en se basant sur le spectre de la lumière solaire à la surface de la terre. Il décrit brièvement la construction technologique de ces piles et montre qu'il n'est guère possible, pour le moment, d'augmenter le rendement de la transformation directe de la lumière en énergie électrique, qui est de l'ordre de 10 % seulement.

1. Einleitung

Die indirekte Umwandlung von Licht, besonders der Sonnenenergie in elektrische Energie, wurde schon lange angestrebt. Durch die neuen Erkenntnisse der letzten Jahrzehnte auf dem Gebiet der Halbleiter, ist die direkte Umwandlung in das unmittelbare Interesse gerückt.

Schon länger verwendet man Elemente auf diesem Prinzip für Signalzwecke, z. B. Lichtschranken, Beleuchtungsmesser, usw. Als Strahlungsquelle steht für die eigentliche Energieumwandlung natürlich die Sonne im Vordergrund.

Im Folgenden sollen die prinzipielle Wirkungsweise einer Sonnenzelle und ihre elektrische Charakteristik, sowie die Faktoren, welche den Wirkungsgrad bestimmen, etwas näher besprochen werden. Als Beispiel wird die Siliziumzelle gewählt, welche heute immer noch die grösste Bedeutung hat. In einem Ausblick soll die Möglichkeit der Verwendung anderer Halbleitermaterialien, Methoden der Verbesserung des Wirkungsgrades und andere Prinzipien für die Umwandlung von Strahlungsenergie in elektrische Energie kurz beleuchtet werden.

[1]) Vortrag, gehalten an der Elektronik-Tagung im Rahmen der Schweiz. Ausstellung für Fernsehen, Elektronik, Radio/Phono am 1. September 1961 in Zürich.

2. Wirkungsweise und elektrisches Verhalten einer Sonnenzelle

Strahlung der Frequenz ν mit der Energie $h\nu$ erzeugt in einem Halbleiter ein Loch-Elektronenpaar, sofern die genannte Energie grösser ist als die Bandlücke E_g des Halbleiters (Fig. 1). Durch Rekombination der Löcher und Elektronen werden diese Überschussladungsträger wieder abgebaut. Befindet sich im Halbleiter, wie es Fig. 3 zeigt, ein sog. p-n-Übergang (p-n-Junction), so besitzt dieser ein Kontaktpotential der Grösse:

$$V_D = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$

(worin h Plancksche Konstante;
k Boltzmannsche Konstante;
T Temperatur in °K;
q Ladung des Elektrons;
N_A Akzeptorenkonzentration der p-Seite;
N_D Donatorenkonzentration der n-Seite;
n_i Elektronenkonzentration des Eigenhalbleiters)

welches die Minoritätsträger in seinem Einflussbereich beschleunigt und die Diffusion der Majoritätsträger verhindert.

Jedes auftretende Photon mit einer Energie $h\nu > E_g$ erzeugt je ein Loch und ein Elektron, d. h. eine gleiche Zahl von Minoritäts- und Majoritätsträgern, so dass auf der p-Seite die Elektronen und auf der n-Seite die Löcher durch das Potential des Überganges beschleunigt werden. Bei kurz geschlossenen äusserm Stromkreis fliesst dadurch ein Photostrom

$$I_l = Kq\, n_{ph}$$

K ist eine Proportionalitätskonstante, q ist die Ladung des Elektrons, n_{ph} die Zahl der auftretenden Photonen. K berücksichtigt, dass nicht alle von den Photonen erzeugten Löcher oder Elektronen in den Einflussbereich des Überganges gelangen. Fig. 2 zeigt den eigentlichen Aufbau einer solchen Sonnenzelle. Ist der äussere Stromkreis nicht geschlossen, kann der Strom I_l nicht fliessen und er muss durch den Strom der Majoritätsträger über die p-n-Junction kompensiert werden. Dadurch wird das Potential V_D kleiner und der p-n-Übergang in der Durchlassrichtung vorgespannt. Die Abnahme von V_D erscheint als Klemmenspannung über der Zelle, woraus sofort ersichtlich ist, dass die Leerlaufspannung V_0 immer kleiner als V_D, also damit auch kleiner als E_g bleiben muss. Liegt über der Zelle der Belastungswiderstand R_l fliesst ein Teil des Stromes I über die Junction-Diode und der Rest über R_l, so dass man zu einem Ersatzschema kommt, wie dies Fig. 4 zeigt. Mit der bekannten Junctiongleichung erhält man daraus auch sofort die Strom-Spannungscharakteristik einer solchen Zelle (Fig. 5), und eine Leerlaufspannung, für welche $I = 0$ sein muss. Für eine Siliziumsonnenzelle mit einem p-n-Übergang in 1...2 µm Tiefe und einer aktiven Fläche von 1 cm² erhält man in der Praxis bei intensiver Sonnenbestrahlung einen Kurzschlußstrom von etwa 25 mA und eine Leerlaufspannung von etwa 0,5 V. Die von dieser Zelle maximal abgegebene Leistung erhält man bei der Belastung, für die das Produkt $I\,V = I_m\,V_m$ am grössten ist, d. h. für das in die Charakteristik der Fig. 5 maximal eingeschriebene Rechteck.

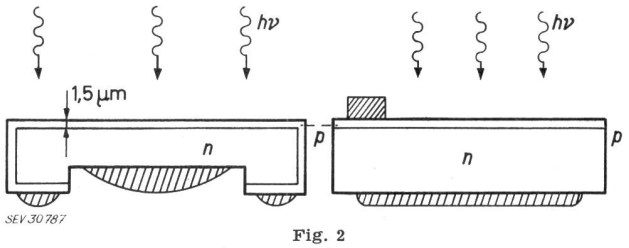


Fig. 2
Schnitt durch Si-Sonnenzellen
n n-Silizium; p diffundierte p-Schicht; $h\nu$ Lichtquant

In dieser Darstellung wurden bis jetzt nicht berücksichtigt die unvermeidlichen Seriewiderstände, die einerseits bei der Herstellung der Kontakte entstehen und anderseits durch die sehr dünne diffundierte p-Schicht bedingt sind. Man kann ihre Summe im Ersatzschema durch einen Widerstand R_s andeuten. Durch den Einfluss des Widerstandes wird die äussere Charakteristik der Zelle stark verändert, wie es in Fig. 5 dargestellt ist. Es ist sofort ersichtlich, dass die maximal abgegebene Leistung stark reduziert wird. Fig. 6 zeigt die Abnahme der maximalen Ausgangsleistung in Abhängigkeit von R_s. Dabei wurde wieder eine Zelle von 1 cm² Fläche und einem Kurzschlußstrom von 25 mA/cm² vorausgesetzt. Ist die Fläche nicht 1 cm², so ist R_s durch $R_s \times$ cm² zu ersetzen um das gleiche Bild zu bekommen.

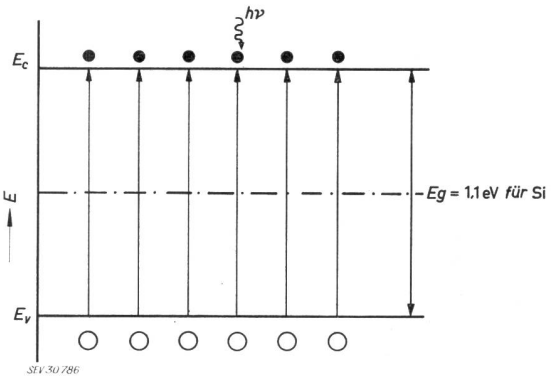


Fig. 1
Paarerzeugung im Halbleiter
E Energie [eV]; E_g Bandlücke; E_c Leitungsband; E_v Valenzband; $h\nu$ Lichtquant; ○ Löcher; ● Elektronen

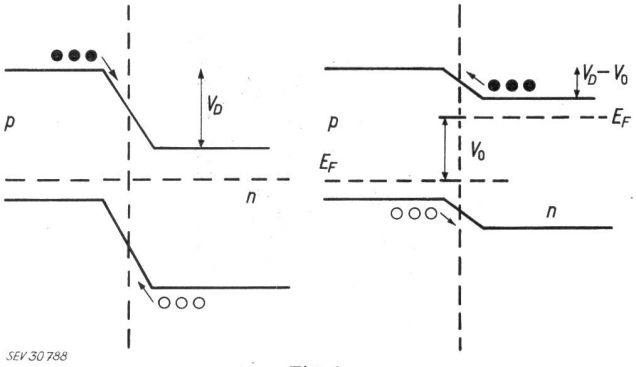
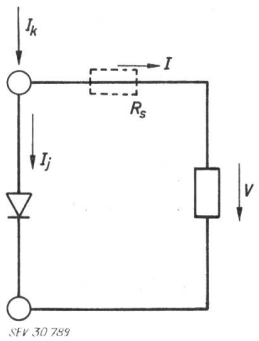


Fig. 3
Bestrahlter p-n-Übergang bei geschlossenem bzw. offenem äusserem Stromkreis
E_F Ferminiveau; V_D Kontaktpotential; V_0 Leerlaufspannung der Zelle bei Belichtung; p p-Halbleiter; n n-Halbleiter;
○ Löcher; ● Elektronen



I_k durch Licht erzeugter Kurzschlußstrom; I_j Strom über p-n-Junction; I Strom im äusseren Kreis; I_0 Nullstrom der p-n-Junction; V Klemmenspannung; V_0 Leerlaufspannung; R^s Serienwiderstand; kT/q Temperaturspannung

$$I_k = I + I_j$$

$$I_j = I_0\left[\exp\left(\frac{Vq}{kT}\right) - 1\right]$$

$$I - I_k - I_0\left[\exp\left)\frac{Vq}{kT}\right) - 1\right]$$

$$V_0 = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{I_k}{I_0} + 1\right)$$

Fig. 4
Ersatzschaltbild einer p-n-Sonnenzelle

Da die Zelle sehr niederohmig ist (die optimale Last beträgt 18 Ω), wird sich ein Leckwiderstand an der Oberfläche nicht stark auswirken, so dass im Gegensatz zu Gleichrichterdioden zusätzliche und veränderliche Leckströme an der Oberfläche der Zelle keine grosse Bedeutung haben. Aus diesem Grunde ist es auch nicht nötig, die Sonnenzellen in hermetisch verschlossenen Gehäusen einzukapseln.

3. Die Sonnenenergie

Bei wolkenlosem Himmel und direkter Einstrahlung liefert die Sonne eine Energie von etwa 100 mW/cm². Sie ist ausser von den atmosphärischen Verhältnissen (Wasserdampf-Ozongehalt) auch von der Höhe der Meßstation und vom Zenitwinkel abhängig (in Zürich zwischen 24° und 71°). Bei bewölktem Himmel nimmt die Strahlung stark ab, was sich auf die Sonnenzelle um so ungünstiger auswirkt, weil ihr Wirkungsgrad mit abnehmender Intensität ebenfalls kleiner wird. Die spektrale Verteilung der Sonnenenergie zeigt Fig. 7 im Wellenlängenbereich von 0,3...2 µm. Das Maximum der Strahlung findet man bei etwa 0,5 µm, was einer Farbtemperatur von etwa 6000 °K entspricht.

Zur Messung der Sonnenenergie verwendet man einen sog. Pyrheliometer, das ist eine speziell konstruierte sehr empfindliche Thermosäule. Die Nachbildung des Sonnenspektrums im Messlaboratorium ist ziemlich kompliziert. Als Lichtquelle kommt z. B. eine Xenonhochdruckklampe, unter Zwischenschaltung geeigneter Filter in Frage.

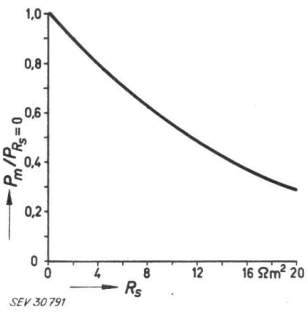


Fig. 6
Abnahme der abgegebenen Leistung in Abhängigkeit vom Serienwiderstand

P_m optimal abgegebene Leistung; R_s Serienwiderstand

4. Verluste bei der Energieumwandlung, Wirkungsgrad der Zelle

4.1 Reflexionsverluste

Ein Teil der Strahlung, die auf die Zellenoberfläche auftrifft, wird sofort reflektiert und trägt damit für die Paarerzeugung von Löchern und Elektronen nicht bei. Für eine reine Siliziumoberfläche findet man im interessierenden Wellenlängenbereich von 0,4...1 µm einen Reflexionskoeffizienten von etwa 30 %. In der Praxis hat sich jedoch herausgestellt, dass die Oberfläche des Siliziums nach den nötigen technologischen Prozessen bei der Herstellung der Zelle nur noch eine geringe Reflexion aufweist, nämlich etwa 10...20 %. Es ist nicht selten, dass man durch Behandlung mit einem Antireflexionsmittel den Wirkungsgrad einer Zelle um 10...20 % steigern kann.

4.2 Spektrumverluste

Es wurde bereits erwähnt, dass nur Licht mit einer Energie grösser E_g bzw. einer Wellenlänge von λ kleiner λ_g (λ_g für Silizium ≈ 1,15 µm) zur Paarerzeugung beiträgt, während Photonen mit einer grösseren Wellenlänge verlorene Energie bedeuten. Ferner darf angenommen werden, dass jedes Photon nur 1 Loch-Elektronenpaar erzeugt. Hat nun ein Photon eine Energie grösser E_g, d. h. eine Wellenlänge kleiner λ_g, so kann nur der Anteil E_g ausgenützt werden. Das heisst, die Energie ist mit dem Faktor λ/λ_g zu multiplizieren, um den ausnützbaren Anteil zu bekommen. Für Silizium mit einer Grenzwellenlänge von 1,15 µm ist in Fig. 7 der ausnützbare Anteil des Sonnenspektrums eingezeichnet. Der entsprechende Anteil ist natürlich ausser von der Grösse E_g, d. h. vom Bandabstand des verwen-

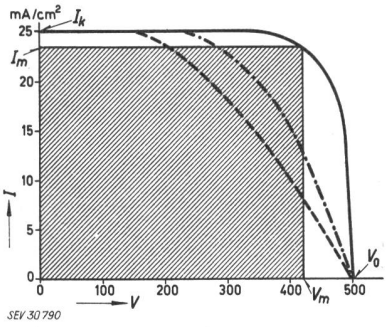


Fig. 5
Elektrische Charakteristik einer Sonnenzelle

V_m Spannung bei optimaler Belastung; I_m Strom bei optimaler Belastung

—— $R_s = 0$ —·—· $R_s = 5$ Ω cm² — — — $R_s = 10$ Ω cm²

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 4

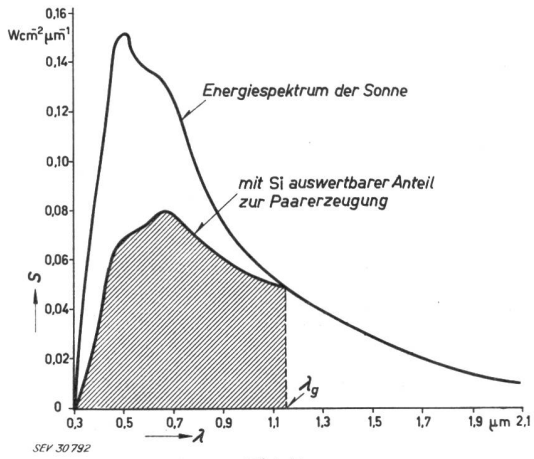


Fig. 7
Sonnenspektrum

λ Wellenlänge; λg Grenzwellenlänge (Si : 1,15 µm); S Spektrale Intensität

deten Halbleiters, auch von der spektralen Verteilung der Strahlung abhängig, deshalb muss hier von Spektrumverlusten gesprochen werden.

Die totale Zahl der Photonen für die Paarerzeugung n_{ph} erhält man durch Division der Spektralfunktion durch $h\nu = hc/\lambda$ und Integration bis zur Grenze λ_g. Die Energieausnützung η_s ist demzufolge:

$$\eta_s = \frac{n_{ph}\, q\, E_g}{P_i}$$

wobei P_i die Gesamtstrahlungsintensität der Quelle bedeutet. Fig. 8 zeigt η_s als Funktion der Bandlücke E_g. Man findet, dass Silizium mit $E_g \approx 1{,}1$ eV sehr günstig liegt und eine spektrale Ausnützung von etwa 45 % ergibt. Es ist sofort einzusehen, dass die spektrale Ausnützung physikalisch bedingt ist und durch technologische Massnahmen nicht beeinflusst werden kann.

4.3 *Junctionsverluste*

Während das Photon eine Spannung von E_g eV benötigt, damit eine Paarerzeugung stattfindet, gibt die Zelle nur eine Spannung von V V ab oder bei optimaler Belastung V_mV. Man kann demzufolge einen Junctionwirkungsgrad η_j angeben:

$$\eta_j = \frac{V_m}{E_g}$$

V_m ist natürlich immer kleiner als die Leerlaufspannung der Zelle, welche in erster Näherung proportional dem Logarithmus aus dem Verhältnis des Lichtstromes I_l und dem Sättigungsstrom des p-n-Überganges I_0 ist. Nimmt man weiter näherungsweise an, dass V_m wieder proportional der Leerlaufspannung ist, folgt daraus sofort, dass η_j und damit auch der Gesamtwirkungsgrad der Zelle bei abnehmender Intensität kleiner wird, wobei jetzt gesagt werden kann, dass der Wirkungsgrad proportional dem Logarithmus der Strahlungsintensität verläuft. Bei unendlich starker Bestrahlung einerseits oder bei einer idealen Junction mit $I_0 = 0$ anderseits, würde die Spannung über der Zelle gerade E_g betragen, d. h. der Junctionswirkungsgrad würde 1. Es ist daraus ersichtlich, dass man p-n-Übergänge mit möglichst kleinen Nullströmen verwenden muss. Geht man vom einfachsten Shockleyschen p-n-Übergang aus, dessen Gleichung in Fig. 4 angegeben wurde, ist bekanntlich der Nullstrom um so kleiner:

a) je höher die Dotation an Akzeptoren auf der p-Seite und an Donatoren auf der n-Seite ist;
b) je höher die Lebensdauer der Minoritätsträger ist und
c) je breiter die Bandlücke E_g ist.

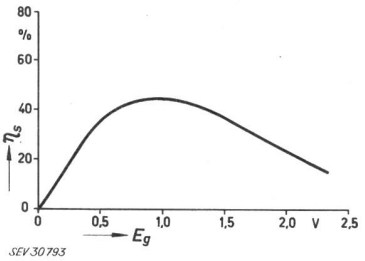


Fig. 8
Anteil der ausnutzbaren Energie des Sonnenspektrums in Abhängigkeit vom Bandabstand des Halbleiters
E_g Bandabstand; γ_s Sprekrale Ausnützung

Die Bedingungen in a) und b) laufen sich entgegen, so dass in dieser Hinsicht ein günstiger Kompromiss gemacht werden muss. Die Verwendung von Materialien mit höheren E_g-Werten als Silizium ist wohl möglich, jedoch sind p-n-Übergänge in solchen Materialien meist weniger «ideal» und es nimmt, wie dies Fig. 8 zeigt, auch die Spektralausnützung wieder ab. Die Junctionverluste sind deshalb in ihrer Art ebenfalls

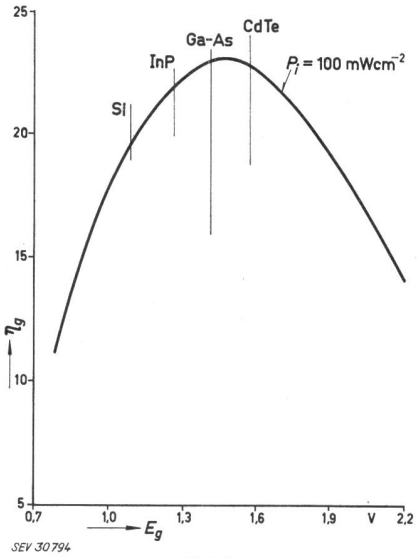


Fig. 9
Grenzwirkungsgrad einer p-n-Sonnenzelle in Funktion des Bandabstandes des Halbleiters
E_g Bandabstand; η_g Grenzwirkungsgrad; P_i eingestrahlte Leistung der Sonnenenergie

physikalisch bedingt, obwohl ihr genauer Wert über die Lebensdauer vom verwendeten Ausgangsmaterial und dem Herstellungsprozess noch leicht abhängig ist. Bei einem unzulänglichen Herstellungsverfahren kann natürlich η_j einen katastrophal kleinen Wert annehmen.

Unter Vernachlässigung der Reflexion kann man auf Grund der Spektrum- und Junctionsverluste ihrer prinzipiellen Herkunft wegen, für die Sonnenzelle einen Grenzwirkungsgrad angeben, etwa vergleichbar in seiner Art mit dem Carnotwirkungsgrad einer Wärmemaschine. Es ist:

$$\eta_g = \eta_s\, \eta_j = \frac{n_{ph}}{P_i}\, q V_m$$

Unter Annahme einer Shockley-Junction zeigt Fig. 9 den Verlauf des Grenzwirkungsgrades als Funktion der Bandlücke E_g. Man sieht daraus, dass für Halbleiter mit einer grösseren Bandlücke wie z. B. Indiumphosphid, Galliumarsenid, oder Kadmiumtellurid höhere Grenzwirkungsgrade erhalten werden als bei Silizium. In der Praxis hat jedoch bis heute das Silizium noch immer die besten Ergebnisse gezeigt, da seine Technologie am besten bekannt ist und der p-n-Übergang am wenigsten vom Idealen abweicht.

4.4 *Kollektorwirkungsgrad*

Bis anhin wurde immer angenommen, dass jedes erzeugte Loch-Elektronenpaar zum Kurzschlußstrom beiträgt. Tatsächlich geben nur die im Einflussbereich der Junction entstehenden Löcher oder Elektronen einen Strom, während die restlichen rekombinieren ohne äussere Arbeit geleistet zu haben. Es ist möglich,

diesen Anteil theoretisch zu berechnen, wobei jedoch die numerische Auswertung auf Schwierigkeiten stösst, da die einzelnen Parameter nur ungenügend bekannt sind. Es ist zunächst festzuhalten, dass nach Massgabe der Absorbtionskonstante, das Licht in das Silizium eindringen kann, besonders im langwelligen Bereich in der Nähe der Absorbtionskante λ_g. Es entstehen also in jeder Tiefe der Zelle Löcher und Elektronen. Legt man eine Zelle aus n-Materialien mit einer p-Schicht zu Grunde, so wird das kurzwellige Licht nur bis in die p-Schicht eindringen, die aber ihrer hohen Dotierung wegen eine kleine Lebensdauer der Minoritätsträger (Elektronen) τ_n und damit eine kleine Diffusionslänge $L_n = \sqrt{\tau_n D_n}$ aufweist. Das langwellige Licht vermag in das tiefer liegende n-Gebiet einzudringen um dort Löcher zu erzeugen, welche eine grössere Lebensdauer τ_p im niederdotierten Material und damit eine grössere Diffusionslänge L_p aufweisen. Die n-Schicht gibt einen namhaften Beitrag zum Lichtstrom I_l. Man sieht daraus sofort, dass der Kollektorwirkungsgrad, definiert als Quotient der zum Strom beitragenden Photonen und der Gesamtheit der Photonen, eine Funktion der Wellenänge ist. Für ein bestimmtes Spektrum lässt sich ein gemittelter Wert von η_q über das Gesamtspektrum angeben. Für den genannten Fall einer p-Schicht erhält man beim Sonnenspektrum Werte von 60...70 %. Aus den gemachten qualitativen Überlegungen ist sofort klar, dass η_q um so grösser wird, je dünner die p-Schicht ist. Mit abnehmender Dicke der p-Schicht nimmt aber der Seriewiderstand R_s zu, was Verluste auf der elektrischen Seite bedeutet. Ein günstiger Kompromiss liegt bei Schichtdicken von 1...2 µm.

Aus der Spektralverteilung des Kollektorwirkungsgrades ergibt sich auch sofort das Spektralverhalten des Photostromes, indem man sich nicht auf eine konstante Photoneneinstrahlung, sondern auf eine konstante Energieeinstrahlung pro Wellenlängeneinheit festlegt.Man erhält also die Spektralverteilung des Photostroms sofort durch Division des Kollektorwirkungsgrades durch $h\nu$. Die spektrale Verteilung einer Siliziumzelle zeigt Fig. 10. Die grösste Empfindlichkeit liegt bei $\lambda \approx 0{,}8$ µm, während das Sonnenspektrum sein Maximum etwa bei 0,5 µm aufweist, was eine sehr schlechte Anpassung bedeutet.

Mit einer n-Schicht auf p-Material lassen sich etwas höhere Werte von η_q erhalten, nämlich gemittelt 70...90 %. Dies hat seinen Grund in der höheren Diffusionslänge der Elektronen in p-Material, während die Diffusionslänge in der sehr hoch dotierten äusseren Schicht in jedem Fall nur gering bleibt.

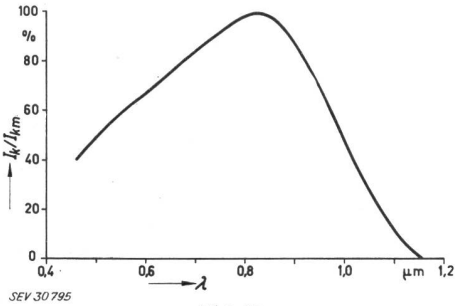


Fig. 10

Spektrales Verhalten des Kurzschlußstromes einer *p-n*-Sonnenzelle

Wellenlänge des eingestrahlten Lichtes; I_k Kurzschlußstrom der Zelle; I_{km} Maximalwert des Kurzschlußstromes

4.5 Gesamtwirkungsgrad

Rechnet man für Silizium mit einem Grenzwirkungsgrad von 19 %, einem Kollektorwirkungsgrad von 60 % und je 10 % Verluste durch Reflexion und im Seriewiderstand, ergibt sich ein totaler Wirkungsgrad von etwa 10 %. Das heisst, man erhält bei einer Sonnenenergie von 100 mW/cm² eine Leistung von 10 mW/cm². Es ist dies der beste Wert, der bei direkter Umwandlung von Sonnenenergie in elektrische Energie bis anhin gefunden wurde. Praktische Zellen zeigen tatsächlich Wirkungsgrade dieser Grössenordnung, wobei im Laboratorium bei sehr sorgfältiger Technologie schon ein Wirkungsgrad bis 15 % erreicht werden konnte.

5. Herstellung von Siliziumsonnenzellen

Als Grundmaterial verwendet man niederohmiges (0,1...0,5 Ω cm), d. h. stark dotiertes monokristallines Material von n- oder p-Typ, je nach Art der Zelle, die man herstellen will. Dieses Material ist in Form von runden Stäben erhältlich. Das Material muss zunächst getrennt werden, so dass kreisrunde oder rechteckige Scheiben entstehen (vgl. Fig. 2). Bei der rechteckigen Form ist für kleine R_s eine lange und schmale Form vorzuziehen. Die Fläche beträgt in den häufigsten Fällen etwa 2 cm² und die Dicke der Scheiben etwa 0,5 mm. Auf einer Läppmaschine werden diese Platten so lange geläppt bis sie parallel sind und keine Spuren des Sägevorganges mehr aufweisen. Es ist bei der Bearbeitung dieser Platten äusserst wichtig die Schnitte dünn zu machen und so zu legen, dass der Abfall minimal wird, was bei der runden Form einfacher ist. Anschliessend werden die Platten gut gewaschen, entfettet und in einem Gemisch von Flussäure und Salpetersäure so lange geäzt bis die von der mechanischen Behandlung herrührende zerstörte Schicht auf der Oberfläche abgetragen ist.

Für die Herstellung der dünnen p- oder n-Schicht wird das Diffusionsverfahren angewendet. Dabei lässt man das Akzeptor- oder Donatorelement von der Oberfläche her bei hoher Temperatur eindringen. Es müssen dazu solche Elemente und Verfahren gewählt werden, die eine hohe Oberflächenkonzentration garantieren. Es ist dies Bor für eine p-Schicht auf n-Silizium oder Phosphor für eine n-Schicht auf p-Silizium.

Bei der Bordiffusion wird die Siliziumscheibe in einem Quarzrohr zunächst auf eine Temperatur von 800...1000 °C gebracht in einer Atmosphäre von sehr trockenem Stickstoff. Sobald das Silizium die genannte Temperatur angenommen hat, wird dem Stickstoff während einigen Minuten eine geringe Menge Bortrichloriddampf beigemengt. Bortrichlorid reagiert mit dem Silizium unter Bildung von Bor, das auf der Oberfläche des Siliziums haften bleibt. Nun ist es am zweckmässigsten die Scheiben aus dem Ofen zu entfernen und eine grosse Zahl zusammen in einem andern Rohrofen bei 1050...1100 °C zu diffundieren, wobei durch den Ofen wieder getrockneter Stickstoff strömt. Die Diffusionszeit beträgt bei 1050 °C etwa 2 h um die gewünschte p-Schicht von etwa 1,5 µm zu erhalten.

Will man Phosphor in eine p-Platte diffundieren, benötigt man einen Quarzrohrofen mit 2 Heizzonen, durch den extrem getrockneter Stickstoff strömt. Die vorbereiteten Siliziumplatten werden in die heissere Zone von 1100 °C gebracht und in die kältere Zone bringt man ein mit Phosphorpentoxyd gefülltes Schiff-

chen, das auf einer Temperatur von etwa 250...300 °C liegt. Der Phosphorpentoxyddampf reagiert auf dem Silizium unter Bildung von Phosphorsilikatglas auf der Oberfläche. Aus dieser Schicht wird anschliessend in analoger Weise wie beim Bor der p-n-Übergang diffundiert.

Die fertig diffundierten Platten müssen nun von etwaigen Schichten von Bor oder Phosphorsilikatglas gereinigt werden, was meist mit Ätzen geeigneter Zusammensetzungen geschieht, welche das Silizium selbst nicht angreifen dürfen. Als nächstes muss auf die diffundierte Schicht und an das Grundmaterial ein elektrischer Kontakt mit sehr geringem Übergangswiderstand angebracht werden. Um auf das Grundmaterial zu gelangen, wird auf der Rückseite der Zelle die diffundierte Schicht ganz oder teilweise abgeläppt.

Für die Herstellung der Kontakte können verschiedene Methoden angewendet werden, wobei die grössten Schwierigkeiten bei der dünnen diffundierten Schicht entstehen, die unter den Kontakten nicht verletzt werden darf, ansonst Kurzschlüsse entstehen. Die bekannteste und am meisten verwendete Methode ist das stromlose Vernickeln in einem selbstkatalysierenden Bad mit reduzierenden Komponenten. Für eine einwandfreie Haftung der Schicht ist eine gute Badkontrolle äusserst wichtig. Die belichtete Fläche, sowie der Übergang von n auf p darf natürlich nicht mit Nickel bedeckt sein. Man erreicht dies durch selektives Abdecken mit geeigneten Lacken oder Scotch-Tape während des Vernickelns oder durch selektives Abätzen des Nickels nach beendigtem Vernickeln. Die Nickelschichten werden anschliessend mit Lot verzinnt und der Übergang von n auf das p-Material (d. h. oberhalb der Junction) mit einem Flußsäure-Salpetersäuregemisch sauber geäzt und gewaschen.

Oft kann man mit langsamwirkenden Siliziumätzen durch leichten Materialabtrag auf der belichteten Fläche die Qualität der Zellen erheblich verbessern. Dies gilt besonders bei der Herstellung mit Phosphordiffusion, bei der zuäusserst auf der Oberfläche eine wohl leitende, jedoch völlig degenerierte Schicht von Silizium und Phosphor entsteht, die jedoch praktisch keine Lebensdauer für die Minoritätsträger aufweist.

Durch den genannten Ätzvorgang wird damit der Kollektorwirkungsgrad stark erhöht. Die dabei entstehende glänzende Oberfläche hat wohl den Vorteil einer kleinen Rekombinationsgeschwindigkeit, sie besitzt jedoch einen hohen Reflexionskoeffizienten. Das Ätzen muss in jedem Falle eingestellt werden, sobald der Seriewiderstand stark zunimmt.

6. Ausblick

Es stellt sich abschliessend die Frage, ob in nächster Zukunft mit Elementen zu rechnen ist, welche einen höheren Wirkungsgrad bei der Umsetzung von Sonnenenergie in elektrische Energie erlauben. In Bezug auf rein technologische Massnahmen sucht man nach Oberflächeüberzügen, die die Reflexion herabsetzen und nach einer Verbesserung des Kollektorwirkungsgrades durch dünnere Schichten mit besseren Kontakten. Mit diesen Massnahmen kann man wohl bei relativ hohem Aufwand noch einige Prozente gewinnen. Weiter kann man durch Verbesserung der Technologie bei den Compoundhalbleitern mit Materialien mit hohen E_g-Werten kleinere Spektrumverluste und eine bessere Anpassung an das Sonnenspektrum erreichen. Es wurde auch die Verwendung einer Multilayerzelle oder eines geeigneten Trapniveaus innerhalb des verbotenen Bandes vorgeschlagen, was eine empfindliche Reduktion der Spektrumverluste bringen könnte. Allerdings hat Shokley auf Grund einer rein theoretischen Arbeit das Gelingen dieses «Trickes» bezweifelt, so dass allgemein betrachtet für die p-n-Junctionsonnenzellen keine revolutionären Verbesserungen zu erwarten sind.

Man kann an dieser Stelle auch noch die Umwandlung von Strahlungsenergie über Wärme in Elektrizität kurz diskutieren unter Anwendung von thermoelektrischen Generatoren.

Es wurden in den letzten Jahren halbleitende Verbindungen gefunden (Bi_2Te_3, Bi_2Se_3, Sb_2Te_3 mit Zusätzen), die einen sehr hohen Thermokoeffizienten bei schlechter Wärmeleitung zeigen. Durch die entgegengesetzte Richtung der Thermospannung im p- und n-Material, lassen sich damit leicht Säulen zusammenstellen, die bei einer Temperaturdifferenz von 400...500 °C, ebenfalls einen Wirkungsgrad bis über 10 % aufweisen. Durch die Sonnenenergie lassen sich aber nicht ohne weiteres solche Temperaturen erreichen, so dass der Wirkungsgrad nur klein, in der Grössenordnung von 1 % bleibt. Praktische Bedeutung haben diese Elemente in umgekehrter Betriebsart zur Erzeugung von Kälte erlangt.

Literatur

[1] *Kleinman, D. A.:* Considerations on the Solar Cell. Bell Syst. techn. J. 40(1961)1, S. 85...115.

[2] *Wysocki, J. J.:* The Effect of Series Resistance on Photovoltaic Solar Energy Conversion. RCA Rev. 22(1961)1, S. 57...70.

[3] *Shockley, W.* und *H. J. Queisser:* Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells. J. appl. Phys. 32(1961)3, S. 511...519.

Adresse des Autors:

F. Winiger, dipl. Ingenieur, Philips AG, Postfach Zürich 27.