

50: PHOTOVOLTAIK

INHALTSVERZEICHNIS

1. Zielsetzung	1
2. Verwendete Materialien	1
3. Reflexionsmessung	2
3.1. Auswertung	2
3.2. Fragen	3
4. U-I Kennlinien	4
4.1. Auswertung	4
4.2. Fragen	4
5. Lock-In-Verstärker	6
6. Spektral aufgelöste Quanteneffizienz	6
6.1. Auswertung	6
6.2. Fragen	7

1 ZIELSETZUNG

Die direkte Umwandlung von Licht in elektrische Energie (Photovoltaik) ist eine der interessantesten Möglichkeiten, regenerative Energien zu nutzen, da eine Anlage mit Solarzellen kompakt aufgebaut werden kann (z.B. zur Versorgung von autonomen Meßstationen) und im Vergleich zu z.B. Wasserkraftwerken praktisch wartungsfrei ist.

Deshalb ist es sinnvoll, sich mit verschiedenen Typen von Solarzellen, ihrer Wirkungsweise und ihren Vor- und Nachteilen auseinanderzusetzen.

2 VERWENDETE MATERIALIEN

Es kamen drei Typen von Solarzellen zum Einsatz:

- Kristallines Silizium, 'c-Si'
- Amorphes Silizium, 'a-Si', hinter einem Glas-Träger (aus Sicht des einfallenden Lichts);
- $CuInGaSe_2$, 'CIGS', auf einem metallisierten Glas-Träger;

Dazu noch ein Stück Silizium-Wafer, auf der einen Seite poliert und auf der anderen rauh.

3 REFLEXIONSMESSUNG

Da einer der Faktoren, die den Wirkungsgrad einer Solarzelle begrenzen, die Reflexion an der Oberfläche ist, – Energie, die nie in die Zelle eindringt kann auch nicht verwertet werden – wurde zuerst eine Reflexionsmessung an allen vier Materialien durchgeführt. Bei dem Wafer auf beiden Seiten, bei den Solarzellen natürlich nur an der Oberseite; Der Reflexionsgrad wurde direkt (mit Hilfe des Meßprogramms) in Prozent im Vergleich zu einem weißen Eich-Reflektor (=100%) gemessen. Die Ergebnisse (graphische Darstellung) findet sich im Anhang. (1 und 2)

3.1 Auswertung

3.1.1 Wellenlängenabhängiger Brechungsindex.

Aus der Optik ist bekannt, daß der Reflexionsgrad eines Übergangs von einem Medium (n_1) zum anderen (n_2) folgendem Gesetz folgt: ($n_1 = n_{Vak} = 1$, $n = n_2$)

$$R(n) = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2$$

Daraus ergibt sich, wenn R und n Funktionen der Wellenlänge sind:

$$n(\lambda) = \frac{1 + \sqrt{R(\lambda)}}{1 - \sqrt{R(\lambda)}}$$

Das Ergebnis zeigt Plot 3 im Anhang. Der Brechungsindex liegt im Bereich von 4 und steigt bei kurzen Wellenlängen zu ca. 8 – 9 an.

3.1.2 Eigenheiten der a-Si Reflexionskurve.

In der Kurve für a-Si zeigt sich deutlich eine Reihe von Minima und Maxima in regelmäßiger Abfolge. Da es sich bei dem amorphen Silizium um eine dünne Schicht handelt, die auf den Glasträger aufgebracht ist, kann davon ausgegangen werden, daß es sich um Dünnschichtinterferenzen handelt, wobei der Strahl einmal am Glas – a-Si – Übergang und einmal an der Rückseite der a-Si – Schicht gebeugt wird. Geht man von einem Einfall im 90°-Winkel aus (im Experiment nicht genau gegeben, aber hinreichend nah dran), so erhält man unter Berücksichtigung des Brechungsindex aus dem letzten Punkt und einem Phasensprung um π an der Si-Luft-Grenzfläche folgende Bedingungen für Interferenz:

$$\text{destruktiv : } 2d \cdot n = k\lambda; \quad \text{konstruktiv : } 2d \cdot n = (k + 1/2)\lambda;$$

Aus folgenden Werten konnten wir k_{745} auf ungefähr 4 berechnen (wobei der Wert bei $\lambda = 673\text{nm}$ keine vernünftigen Ergebnisse erbrachte). Mit diesem k und den obigen Formeln konnten wir an einigen Punkten Werte für d bestimmen.

Typ	λ in nm	n	λ/n in nm	k	d in nm
Minimum	598	4,094	146,1	6	438,2
Maximum	639	4,013	159,2	5	437,8
Minimum	673	3,925	171,5	5	428,8
Maximum	745	3,836	194,3	4	437,2

Aus den Werten für d kann man ablesen ($\lambda = 673nm$ vernachlässigt!), daß das amorphe Silizium der Solarzelle eine Schichtdicke von $d \approx 438nm$ haben muß.

3.2 Fragen

Wie Plot 1 zeigt, ist die Reflexion an der rauhen Waferseite um etwa 5-10% niedriger als die an der glatten Seite. Dies liegt daran, daß Licht, das an einer Unebenheit der rauhen Waferseite reflektiert wurde eventuell noch ein zweites Mal auf die Zelle auftrifft. Dieses Licht hat damit noch ein zweites Mal die Gelegenheit, absorbiert zu werden.

Silizium hat nicht nur seine typische indirekte Bandlücke bei etwa 1,1 eV (1130 nm) sondern auch eine direkte bei ca. 3,4 eV. Dies entspricht einer Wellenlänge von 366 nm. Licht mit dieser oder höherer Energie kann nun nicht nur Elektronen über die indirekte Bandlücke heben sondern auch über die direkte. Das heißt, Licht höherer Energie wird besser absorbiert, und bei Wellenlängen von weniger als 366nm bricht die (zu kleinen Wellenlängen hin) ansteigende Reflexionskurve noch einmal ein.

Da der Reflexionsgrad des kristallinen Siliziums im sichtbaren Bereich nahezu konstant ist, zeichnet sich das reflektierte Licht, das von der Intensität schon einmal wesentlich schwächer ist als das einfallende, nicht durch einen besonderen $I(\lambda)$ -Verlauf ("Farbe") aus, die Oberfläche sieht schwarz aus.

Neben der schon angesprochenen Reduzierung der Reflexion durch Oberflächentexturierung (Schleifen, Ätzen, Laser-Interferenz-Texturierung) werden reflexionsreduzierende Beschichtungen ($1 < n_B < n_{Si}$) eingesetzt, bevorzugt solche, die auch noch leitfähig sind und somit als Kontakt dienen.

Im Plot der Reflexion zeigt sich für Bereiche mit $\lambda < 1000nm$ und $\lambda < 860nm$ extremes Rauschen, das allerdings zu kürzeren Wellenlängen beide Male schnell abnimmt. Ein dritter Bereich, der allerdings nicht ganz so ausgeprägt ist, sondern sich hauptsächlich durch einen einzelnen systematischen Ausreißer nach oben auszeichnet, liegt bei Wellenlängen um die 300 - 325 nm. Dieses Rauschen ist so extrem, daß sogar Werte *negativer* Reflexion gemessen wurden. Da bei ca. 860 und 325 nm aus der Meßapparatur ein Geräusch zu hören war, daß wir als Wechsel des Gitters gedeutet haben, liegt nahe, daß das jeweilige Gitter am langwelligen Ende seines Einsatzbereiches nur schlechte Ergebnisse liefert. Zudem handelt es sich bei 'Licht' von 800 - 1000 nm bereits um Infrarot- bzw. Wärmestrahlung, die auch von allen Bauteilen des Systems abgestrahlt wird. Hier wäre es durchaus interessant, Messungen mit einem gepulsten Lichtstrahl und einer Lock-In-Schaltung durchzuführen oder den Meßaufbau zu kühlen, um die eine oder andere Fehlerquelle auszuschließen.

4 U-I KENNLINIEN

Im zweiten Teil des Praktikums wurden die Diodenkennlinien (Strom I in Abhängigkeit der angelegten Spannung U) der verschiedenen Photozellen aufgenommen. Der Begriff Diodenkennlinie ist hier bewußt gewählt, da sich die unbeleuchtete Photozelle (erste Meßreihe) elektrisch nicht von einer Diode unterscheidet. Verwendet wurde eine hochpräzise Spannungsquelle mit integrierter Strommessung, das für die eigentliche Aufnahme der Kennlinie vom Rechner angesteuert wurde. Allerdings mußte zuerst die Polarität der Zelle überprüft werden, wozu die Spannung vorsichtig von Hand durchfahren wurde, bis sich der typische Anstieg des Stroms (Durchlaßrichtung) zeigte. Das Ergebnis findet sich mit linearer I-Achse in (4) und logarithmisch aufgetragen in (5 und 6)

Um die Kennlinien bei Beleuchtung aufzunehmen sollte auf der beleuchteten Fläche eine Lichtleistung von realistischen $100\text{mW}/\text{cm}^2$ auftreten. Bei einer runden Blende mit einem Öffnungsdurchmesser von 3mm entspricht das einer Einfallenden Leistung von $P_{\text{Licht}} = 7,068\text{ W}$. Diese wurde (auf $\pm 10\%$) eingestellt, indem der Abstand der Blende von der verwendeten Halogenlampe variiert wurde. Die sich ergebenden Kennlinien finden sich in (7).

4.1 Auswertung

Aus den Kennlinien lassen sich folgende Werte bestimmen:

Typ	R_P in $k\Omega$	R_S in Ω	U_{OC} in V	I_{SC} in mA	FF	Wirk. η [%]
c-Si	5,2	16	0,46	-3,65	0,63	15,0
a-Si	13,3	99	0,83	-1,05	0,65	8,01
CIGS	13,0	30	0,60	-3,21	0,66	18,0

Dabei bestimmt man die Widerstände aus den Steigungen der Plots 4-6, d.h. $\partial U/\partial I \approx \Delta U/\Delta I$. Wobei man R_S bei $I=0\text{A}$ und R_P bei $U=0\text{V}$ ausliest. Die Open-Circuit-Spannung kann man bei $I=0\text{A}$ und den Kurzschlußstrom bei $U=0\text{V}$ aus (7) auslesen.

Den Füllfaktor berechnet man über

$$FF = \frac{P_m}{U_{OC} I_{SC}}$$

Dabei muß man noch die minimale, bzw. betragsmäßig größte, Leistung $P_m = U_m I_m$ ($P_m < 0\text{W}$) im Bereich $0\text{V} \leq U \leq U_{OC}$ bestimmen. Dies haben wir aus (8) abgelesen. Den Wirkungsgrad kann man schließlich über

$$\eta = \frac{P_m}{P_{\text{Licht}}}$$

berechnen.

4.2 Fragen

Unserem Messwert von $5,2k\Omega$ für den Parallelwiderstand der c-Si Zelle steht eine Herstellerangabe von mindestens $100k\Omega$ gegenüber. Möglicherweise machen sich hier Degradationerscheinungen mit zunehmender Lebensdauer der Zelle bemerkbar. (Defekte am pn bzw. pi/ni – Übergang)

In die Berechnung des Wirkungsgrades gehen neben den sehr genau gemessenen elektrischen Größen (I , U von der integrierten Spannungsquelle/Meßgerät) auch solche ein, die nur schlecht

zu fassen sind: Die Lichtleistung, die durch die erste Blende fällt, wird eingestellt, indem man den Abstand der Blende von der Lampe von Hand verstellt, eine bessere Genauigkeit als $\pm 10\%$ ist hier nicht zu erwarten. Des weiteren geht die Annahme ein, daß das ganze Licht auch auf die Zelle trifft. Minimale Abweichungen des Blendendurchmessers des Solarzellegehäuses sowie deren Orientierung (durch Variation der x- und y-Koordinate optimiert) dürften sich massiv auf die Ergebnisse auswirken. Der elektrische Widerstand der BNC-Anschlußkabel kann vermutlich vernachlässigt werden. Der Punkt optimaler Leistungsabgabe (vgl. Füllfaktor) ist natürlich auch nur mit einem angepaßten Verbraucher gegeben, was in der Praxis selten der Fall sein wird.

Für die Leerlaufspannung (U_{oc}) ist vermutlich die Potentialdifferenz zwischen den Bändern (Valenz- und Leitungs-) im n- und p-dotierten Bereich des jeweiligen Halbleiters ausschlaggebend, da der jeweilige Ladungsträger beim durchlaufen dieses Bereichs die Energie aufnimmt, die nachher als Spannung zur Verfügung steht. Die Leerlaufspannung hängt - soweit eine gewisse Grenze überschritten ist - praktisch nicht mehr von der Intensität des eingestrahnten Lichts ab. Die Leerlaufspannung der a-Si Zelle weist eine gewisse Besonderheit auf, sie ist fast doppelt so hoch wie die von c-Si. Das liegt daran, daß es sich um eine Tandem-Zelle handelt, bei der letztlich zwei komplette Strukturen in Serie geschaltet arbeiten.

Der Kurzschlußstrom hängt in erster Linie von zwei Faktoren ab:

Zum einen von der Zahl der erzeugten freien Ladungsträger. Hier kommen die spektrale Verteilung des Lichts und die Energielücke zum tragen - Photonen, deren Energie kleiner ist als die Energielücke können keine Elektron-/Loch-Paare erzeugen.

Des weiteren muß man die Ladungsträger abgreifen, bevor sie von alleine rekombinieren und somit verloren wären. Dazu muß die Raumladungszone aus dem Übergang möglichst weit in den optisch aktiven Teil des Halbleiters hineingreifen. Die geringe Beweglichkeit der Elektronen im intrinsischen Bereich der a-Si Zelle dürfte z.B. für den vergleichsweise geringen Kurzschlußstrom verantwortlich sein.

5 LOCK-IN-VERSTÄRKER

Ein Lock-In-Verstärker ist immer dann nützlich, wenn man ein stark verrauschtes (schwaches) Signal (sogar viele Größenordnungen unter dem Rauschpegel) messen will. Dies wird durch eine phasenempfindliche gemittelte Gleichrichtung erreicht (über mehrere Wellenlängen). D.h. man nimmt sowohl das Signal wie auch das Referenzsignal (meist eine Rechteckspannung) auf und mißt nur Signale, die die gleiche Frequenz haben wie das Referenzsignal. Das Rauschen wird dabei weggemittelt.

Signale die nicht in Phase mit dem Referenzsignal sind, werden geschwächt. Z.B. wird ein Signal mit einer Verschiebung von 90° (genauso wie 270°) herausgefiltert, da über aneinandergereihte Sinuswellen zwischen $-\pi/2$ und $\pi/2$ gemittelt wird. Ein Signal mit einer Verschiebung von 180° hat hingegen die gleiche Potentialdifferenz, das Vorzeichen der Gleichspannung ist aber gedreht.

6 SPEKTRAL AUFGELOSTE QUANTENEFFIZIENZ

In der letzten Versuchsreihe sollte untersucht werden, mit welchem Wirkungsgrad die Solarzellen jeweils das einfallende Licht in elektrische Leistung umwandeln, und das abhängig von der Wellenlänge des einfallenden Lichtes. Dazu wurde ein Gittermonochromator (Oberwellen durch Filterfolie weggefiltert) verwendet, der das Spektrum einer Halogen-Lampe zwischen 300 und 1150 nm durchfährt. Da die spektrale Leistung der Lampe natürlich nicht konstant ist, wurde zuerst mit einem Pyrodetektor eine Eichkurve aufgenommen. Mit dem Photosstrom (Über einen Widerstand R als Spannung gemessen) läßt sich dann eine relative Quantenausbeute berechnen, die allerdings noch in willkürlichen Einheiten herauskommt und mit dem Plateau der CIGS-Zelle zu normieren ist.

6.1 Auswertung

Die Quantenausbeute läßt sich durch

$$\frac{n_e}{n_{Ph}} = \frac{2878V/W \cdot E_{Ph} \cdot I_{Photo}}{e \cdot U_{Pyro} \cdot C} = \frac{2878V/W \cdot E_{Ph} \cdot U_{Photo}}{e \cdot U_{Pyro} \cdot C \cdot R}$$

berechnen. Dabei ist C die Normierungskonstante. Bei einer Wellenlänge von 520nm - 700 nm wird die CIGS-Zellen-Quantenausbeute maximal, und da bei diesem Plateau/Maximum n_e/n_{Ph} gleich 0,9 sein soll, läßt sich C kann auf 1,145 bestimmen. Dadurch kann man die Quanteneffizienz spektral aufgelöst darstellen (siehe (9)).

Um den zu erwartenden Kurzschlußstrom bei Sonnenlicht (AM1) angeben zu können, muß noch das Sonnenspektrum, gewichtet mit der Quanteneffizienz, aufintegriert werden. Numerisch führt man die Integration durch folgende Summation durch, wobei $S(\lambda)$ das Sonnenspektrum, A die beleuchtete Fläche und natürlich $Q(\lambda)$ die Quantenausbeute ist. $\Delta\lambda$ ist der Abstand zwischen zwei Meßpunkten, hier stets 10nm.

$$I_{SC} = - \sum \left(\frac{A \cdot e}{h \cdot c} \cdot Q(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot \lambda \cdot \Delta\lambda \right)$$

Dadurch kommt man auf folgende Werte für den erwarteten Kurzschlußstrom:

	c-Si	a-Si	CIGS
I_{SC} [mA]	1,29	0,60	2,16

Es ergeben sich andere Werte als in 4.1, da durch die Faltung mit dem Sonnenspektrum Sonnenlicht simuliert wird, aus dem die Zellen anscheinend bei gleicher Gesamtleistung des einfallenden Lichts weniger Energie nutzen können als bei dem Spektrum der Halogenlampe. Des weiteren fällt auf, daß die a-Si und CIGS Zelle bei weitem nicht so stark einbrechen (auf 55-70%) wie die c-Si Zelle (35%), also wohl schon auf reale Bedingungen 'getrimmt' sind.

6.2 Fragen

Für die Frage, warum die Quantenausbeute bei ca 350nm fast auf Null fällt, gibt es verschiedene Ansätze, die sich je nach Zelltyp mehr oder weniger stark auswirken. Bei der a-Si Zelle etwa liegt das optisch aktive Medium hinter einer Platte aus gewöhnlichem Glas, das für UV-Licht nur begrenzt durchlässig ist. Außerdem dürfte die Schichtdicke des Siliziums ($< 500nm!$) nicht mehr dick genug sein, um höherenergetische Photonen vollständig zu absorbieren. Für c-Si dürfte der ausschlaggebende Faktor die starke Dispersion sein - blaues bzw. ultraviolettes Licht wird an der Oberfläche deutlich stärker reflektiert (vgl. Plot (3)), was man auch sehen kann: Aus dem richtigen Winkel betrachtet hat kristallines Silizium einen blauen Schimmer. Für sehr kleine Wellenlängen steigt die Ausbeute dann wieder an, hier kommt dann die direkte Bandlücke zum tragen. Bei der verwendeten CIGS-Zelle hat das Fenstermaterial (ZnO) eine Energielücke von 3,3 eV, das heißt Photonen mit einer Wellenlänge von weniger als 376 nm werden bereits zum Teil absorbiert, bevor sie auf den elektro-optisch wirksamen Bereich treffen.