

# Der Nachweis von Strahlung über den CCD-Detektor

Ramona Pielenhofer, WS 07/08

## Gliederung

1	Das Bänder-Modell.....	1
2	n-Dotierung, p-Dotierung und pn-Übergang .....	1
2.1	n-Dotierung.....	2
2.2	p-Dotierung.....	2
2.3	pn-Übergang .....	3
3	Aufbau von Pixel und CCD.....	3
4	Funktionsprinzip .....	4
4.1	Ladungsentstehung.....	5
4.2	Ladungstransport.....	5
4.3	Ladungsverstärkung.....	6

**Einstieg:** Will man sich eine Digital-Kamera kaufen, steht man vor der Entscheidung: Kaufe ich mir ein relativ günstige Digital-Kamera für 200 Euro oder doch lieber eine Digitale Spiegelreflex-Kamera die man ab 600 Euro (2007) erhält. Man überlegt sich dann: Welche ist die bessere? Wo ist da der Unterschied? Und: Wie funktioniert eine Digital-Kamera?

Das entscheidende Bauteil in einer Kamera ist der CCD-Detektor. CCD steht für Charge Coupled Devices; dt. soviel wie ladungsgekoppeltes Bauelement [6].

## 1 Das Bänder-Modell

Das Bänder-Modell ist ein quantenmechanisches Modell zur Beschreibung von elektronischen Energie-Zuständen in einem idealen Einkristall, bei dem die Atom-Rümpfe in einem strengen periodischen Gitter vorliegen. Mit Hilfe des Energie-Bändermodell kann man erklären bei welchem Festkörper es sich um einen Leiter, Isolator oder Halbleiter handelt [5].

## 2 n-Dotierung, p-Dotierung und pn-Übergang

CCDs bestehen aus Silizium. In reiner Form ist Silizium ein Halbleiter. Durch die so genannte Dotierung wird die Leitung möglich, man spricht von „Dotierten Halbleitern“. Man unterscheidet:

## 2.1 n-Dotierung

Silizium besitzt in der äußersten Schale 4 Elektronen. Wird in die Kristall-Struktur von Silizium ein Element eingebaut, das in der äußersten Schale 5 Elektronen besitzt (z. B. Phosphor) so ist im Gitter ein Elektron zuviel dieses Elektron ist nur schwach an dem Phosphor gebunden. Das Elektron kann leicht von der Valenz ins Leitungsband gelangen und dort zur Ladung beitragen.

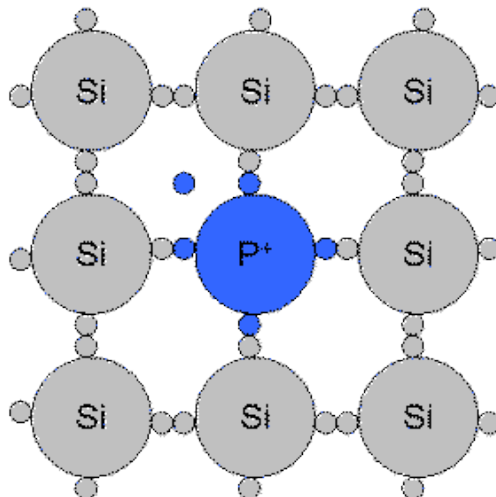


Abb. 1: n-Dotierung

Im Energie-Bändermodell liegen die Energie-Niveaus der Donator-Atome in der verbotenen Zone dicht unter dem Leitungsband. Durch eine geringe Zufuhr an Energie werden Elektronen ins Leitungsband überführt. Das Fremd-Atom ist also ein Elektronen-Donator.

## 2.2 p-Dotierung

Hier wird ein Fremd-Atom eingebaut, das in der äußersten Schale 3 Elektronen besitzt (z. B. Bor). Im Gitter fehlt jetzt ein Elektron. Bohr kann leicht ein Elektron aus dem Valenzband anlagern. Am Silizium entsteht eine Elektronen-Leerstelle, ein Defekt-Elektron. Das Fremd-Atom ist ein Elektronen-Akzeptor.

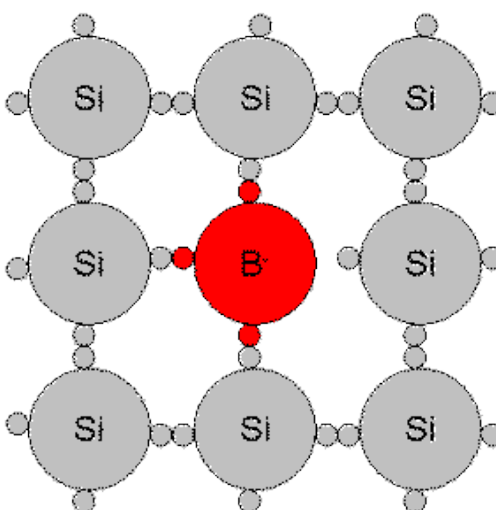


Abb. 2: p-Dotierung

Im Energie-Bändermodell liegen die Energie-Niveaus der Akzeptor-Atome dicht oberhalb des Valenzbandes. Elektronen des Valenzbandes können durch eine geringe Zufuhr an Energie die Akzeptor-Niveaus besetzen.

## 2.3 pn-Übergang

Eine pn-Übergangszone entsteht, wenn man einen p-Halbleiter und einen n-Halbleiter zusammenbringt. Im n-dotierten Halbleiter sind überschüssige Elektronen vorhanden, im p-dotierten Halbleiter dagegen Elektronen-Löcher, die positiv geladen sind. Die Elektronen aus dem n-Gebiet diffundieren also ins p-Gebiet. Die Elektronen-Bilanz stimmt jetzt für einzelne Atom-Bindungen auf beiden Seiten. Allerdings fehlen in der Gesamt-Bilanz dem n-Halbleiter Elektronen: der n-Halbleiter lädt sich positiv auf. Der p-Halbleiter nimmt die Elektronen des n-Halbleiters auf und hat in seiner Gesamt-Bilanz zu viele Elektronen: der p-Halbleiter lädt sich damit negativ auf. Zwischen dem positiv geladenen n-Halbleiter und dem negativen p-Halbleiter kommt es zur Ausbildung einer Grenzschicht. In der Grenzschicht ist jedes Atom „zufrieden“, jedes Atom geht vier Bindungen ein.

## 3 Aufbau von Pixel und CCD

Ausgangsmaterial bei der Herstellung von CCDs ist p-dotiertes Silizium. Durch Oxidationsprozesse wird eine sehr dünne Siliciumdioxid-Schicht auf das Substrat aufgebracht. Diese dient als Isolationsschicht. Während der Belichtungsphase sammelt sich die entstehende Ladung an einer bestimmten Stelle im Pixel. Dies ist das so genannte „Gate“. Als Gate wird ein Metall, z. B. Aluminium aufgebracht. An das Metallgate wird eine positive Spannung angelegt, so dass sich die Elektronen dort sammeln. Auf der Licht zugewandten Seite befindet sich eine sehr dünne n-dotierte Schicht. Darunter liegt eine deutlich dickere p-dotierte Schicht. Zwischen diesen beiden Schichten eine Grenzschicht aus.

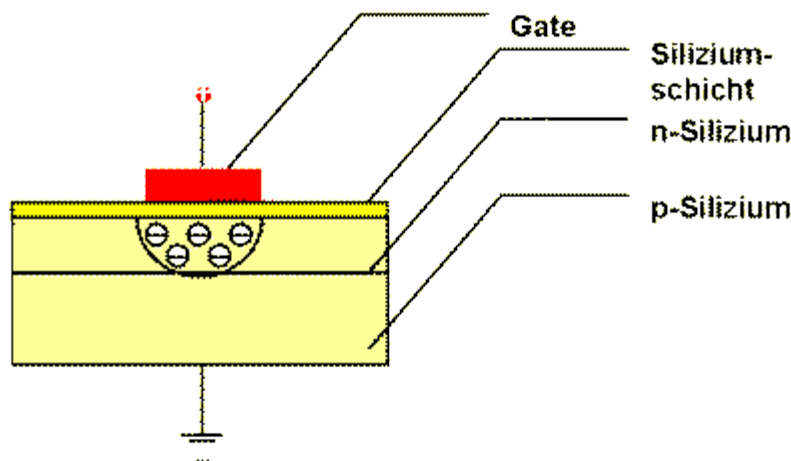


Abb. 3: Aufbau eines Pixels

Die Pixel sind in Zeilen und Spalten organisiert und ergeben ein CCD. Die Pixel sind wenige Mikrometer große, lichtempfindliche Photoelemente. Ein CCD ist also ein Array aus vielen Pixeln, die zweidimensional angeordnet sind. Die n-Schicht ist so dünn gehalten, dass ein Photon genau auf der Grenzschicht eintrifft. Aus der Grenzschicht kann dann die Energie dieses Photons ein Elektron heraus schlagen. Es entsteht durch den photoelektrischen Effekt Elektronen-Loch-Paare. Um zu verhindern, dass sich Elektronen und Löcher rekombinieren, legt man an das Gate eine positive Spannung an. Das Elektron wird von der negativ geladenen p-Schicht abgestoßen und wandert zur n-Schicht, die positiv geladen ist. Die positiv geladenen Löcher werden ins Innere gedrückt. Die Siliciumdioxid-Schicht ist isolierend, das heißt die Elektronen sammeln sich am Gate, das ja positiv geladen ist. In einem CCD-Sensor wird also Licht in elektrische Ladung umgewandelt. Photonen werden im dotierten Siliziumkristall absorbiert und erzeugen dort eine elektrische Ladung. Dies beruht auf dem Inneren Photoeffekt: Photonen die auf einer Metalloberfläche auftreffen, können aus dieser Elektronen herauslösen [4].

## 4 Funktionsprinzip

Das Funktionsprinzip des CCDs lässt sich in drei Schritte gliedern:

- Ladungsentstehung
- Ladungstransport
- Ladungsverstärkung

Es gibt verschieden CCD-Varianten [4]:

- Zeilendetektor (eindimensional): die lichtempfindlichen Pixel liegen nebeneinander; diese Variante ist allerdings selten.
- Array (zweidimensional): die Pixel sind als Fläche zweidimensional angeordnet

Beispiel: Interline CCDs bestehen aus:

- einer empfindlichen Sensoroberfläche (der Belichtungsbereich)
- Schieberegister, das lichtundurchlässig ist
- einem Ausleseregister

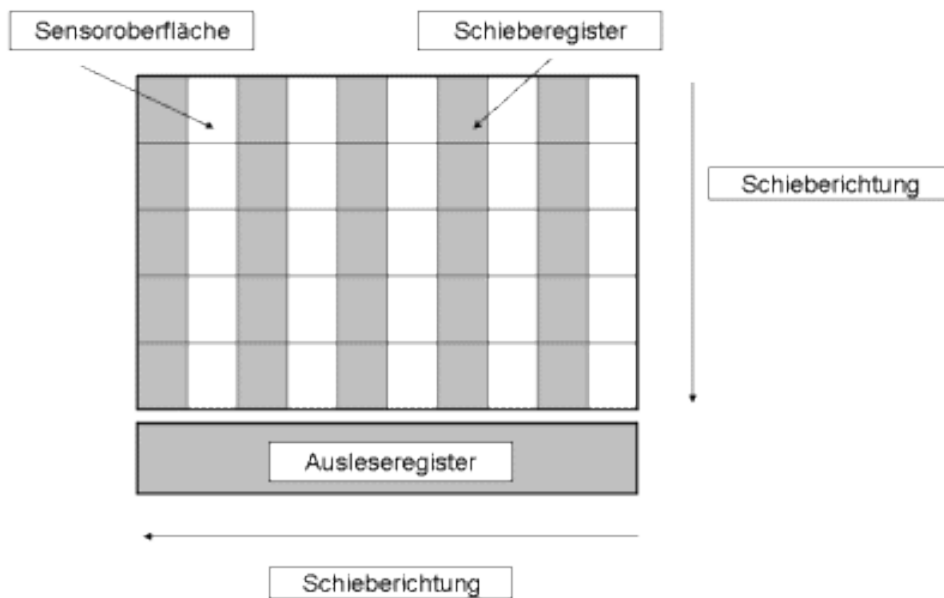


Abb. 4: Aufbau eines CCDs

## 4.1 Ladungsentstehung

Ein Pixel wird beispielsweise aus 3 Elektroden gebildet. An den einzelnen Elektroden ist eine positive Spannung angelegt. Unterhalb der Elektroden entstehen Potentialmulden mit unterschiedlicher Tiefe. Durch den Inneren Photoeffekt entstehen Elektronen: Diese sammeln sich in Potentialmulden. Das Energiepotential hat die Form einer Treppe. Die Elektronen sammeln sich auf der energetisch tiefsten Stufe. Die oberste Stufe wirkt als Barriere, so dass die Elektronen eines Pixels nicht in ein anderes Pixel überlaufen können. In den einzelnen Pixeln entstehen durch den inneren Photoeffekt Ladungspakete. Die entstehende Ladung hängt dabei linear von den einfallenden Photonen ab. Diese Sammlung von Ladungen erfolgt über eine gewisse Zeit. Da die Potentialmulden nur ein beschränktes Aufnahmevermögen haben, müssen die Ladungen rechtzeitig vor dem Überlaufen ausgelesen werden.

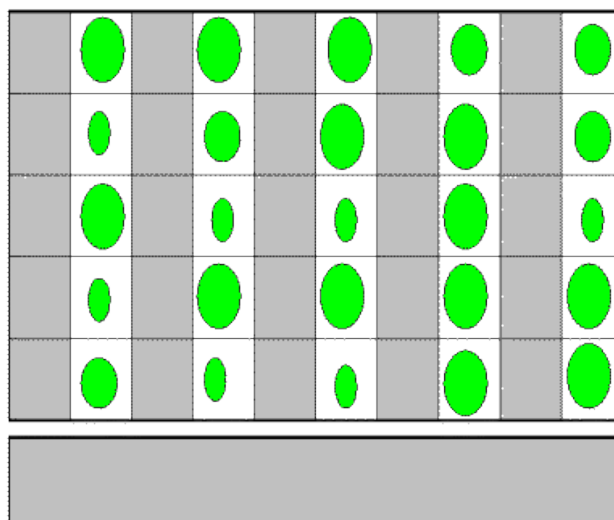


Abb. 5: Ladungsentstehung

## 4.2 Ladungstransport

Nach der Belichtung werden die entstandenen Ladungspakete durch eine periodische Potentialänderung an der Elektrodenstruktur durch den Siliziumkristall geschoben: An die Elektroden ist eine positive Spannung angelegt. Die Spannung ist impulsförmig geschaltet und von Pixel zu Nachbarpixel versetzt. Da die Elektroden so dicht gepackt sind, dass sich ihre Potentialmulden überschneiden, fließen die Elektronen immer im Takt in die energetisch tiefer liegende Mulde. Dadurch gelingt es, die Ladungspakete in einer Richtung zu schieben.

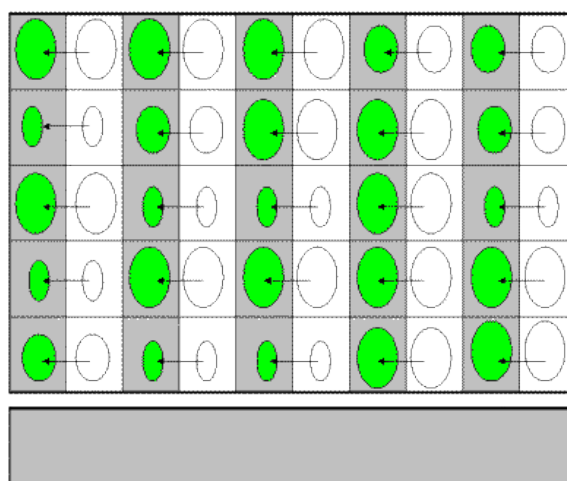


Abb. 6: Ladungstransport

Die Elektronen der letzten Position gelangen in eine Auslesezeile. Ist die Auslesezeile wieder leer, werden die Elektronen um eine Pixelposition weiterbewegt.

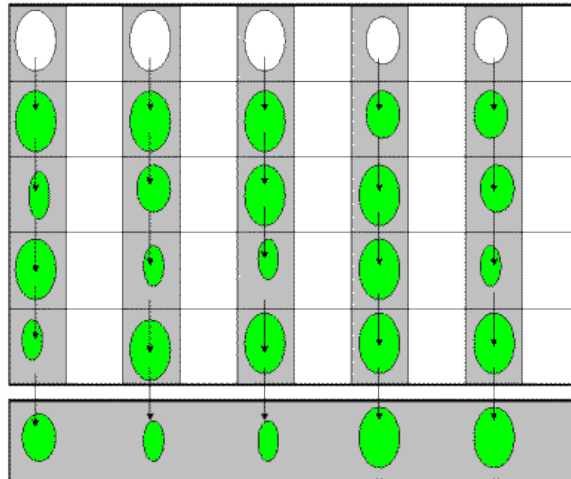


Abb. 7: Weitertransport der Ladung in die Auslese-Zeile

### 4.3 Ladungsverstärkung

Jetzt werden die Ladungen am Ausleseregister an einem Verstärker in Spannungssignale umgewandelt und ausgelesen. Zum Schluss kommt ein A/D-Wandler (Analog/Digital-Wandler) zum Einsatz, der den analogen Strom in ein digitales Signal umwandelt.

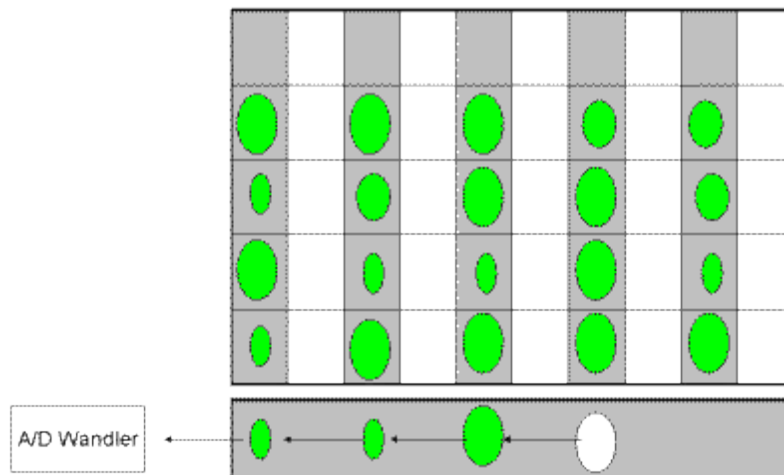


Abb. 8: Ladungsverstärkung

**Zusammenfassung:** fehlt

**Abschluss:** fehlt

**Quellen:**

1. E. Riedel, Anorganische Chemie, 6. Auflage, Walter de Gruyter-Verlag, Berlin, New York 2004.
2. C.E. Mortimer, U. Müller, Das Basiswissen der Chemie, 8.Auflage, Thieme Verlag, Stuttgart 2003.
3. D.F. Barbe, Topics in Applied Physics, Volume 38, Charge-Coupled Devices, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1980.
4. Gerald C. Holst, CCD Arrays, Cameras and Displays, 2. Auflage, JCD Publishing, Winter Park & Spie Press, Bellingham, 1998.
5. <http://de.wikipedia.org/wiki/B%C3%A4ndermodell>; (05.02.2008).
6. [www.ccd-sensor.de](http://www.ccd-sensor.de); (29.12.2007) (Quelle verschollen, 28.07.2020)