

# Prototyp eines Siliziumphotomultipliers

*L. Long, E. Hiller, W. John, R. Röder, A. Winzer und Th. Ortlepp*  
 CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH, Konrad-Zuse-Str. 14, 99099  
 Erfurt, email: llong@cismst.de

## Kurzfassung

Ein neuer Prototyp eines Siliziumphotomultipliers wurde entwickelt. Die SiPM-Chips haben eine Fläche von  $1\text{mm}^2$  mit bis zu 1024 Mikrozellen. Die Mikrozellen sind mit Polysiliziumwiderständen verbunden und arbeiten im Geiger-Lawinen-Modus, so dass der SiPM eine interne Verstärkung besitzt und sich automatisch erholt. Eine Antireflexschicht wurde eingefügt, um die Photondetektionseffizienz zu erhöhen. Eine systematische Evaluation wurde durchgeführt. Die Messergebnisse (IV-Kennlinie, Verstärkung, Dunkelrate und Photoelektronenspektrum) für den Prototyp werden präsentiert. Eine Systemarchitektur für die Fluoreszenzlebensdauermessung wird entworfen und analysiert.

## 1 Einführung

Die Siliziumphotomultiplier (SiPM) haben eine hohe interne Verstärkung und eine gute Zeitauflösung [1]. Sie können schwache Lichtsignale, bis hin zu einzelnen Photonen, detektieren. Deswegen finden die SiPM Anwendungen in medizinischer Diagnostik (wie Positronen-Emissions-Tomographie, PET) und biochemischer Fluoreszenzanalyse.

In den letzten Jahren hatten die Forschung an und die Entwicklung von SiPMs große Fortschritte erzielt. Aber die Dunkelrate, das optische Übersprechen und die Zeitpräzision müssen verbessert werden. In diesem Artikel wird ein SiPM Prototyp und die Maßnahmen gegen die erwähnten unerwünschten Effekte präsentiert. Der Sensorentwurf, die Bauelementsimulation, die Messergebnisse (IV-Kennlinie, Verstärkung, Dunkelrate und Photoelektronenspektrum), eine SPICE-Modellierung und eine ASIC-Entwicklung für die SiPM-Anwendung in der Fluoreszenzanalyse werden vorgestellt und diskutiert.

## 2 Simulation und Herstellung der Detektoren

Obwohl meiste SiPM auf der PET-Anwendung gezielt sind, können sie gut auf einer Fluoreszenzanalyse angewandt werden. Dabei ist die Zeitpräzision sehr wichtig. Ferner muss die Photondetektionseffizienz (PDE) erhöht werden. Dazu wurde ein passendes Antireflexschichtsystem auf Silizium, das kompatibel zu unserer Technologie ist, entworfen. Die spektrale Empfindlichkeit soll Wellenlänge von  $400\text{nm}$  bis  $800\text{nm}$  befassen. Eine numerische Simulation zeigt, dass  $150\text{nm}$  Siliziumoxid plus  $150\text{nm}$  Siliziumnitrid diesen Zweck erfüllen können (Abb. 1).

Der SiPM ist in p-epi-Silizium-Wafern hergestellt worden. Ein flacher n+-p-Übergang können eine gute Zeitpräzision ermöglichen, eine gute PDE ist durch einen besseren Füllfaktor zu optimieren. Weil der SiPM im Geiger-Modus arbeitet, ist ein möglichst homogen verteiltes elektrisches Feld im aktiven

Gebiet des Sensors sehr wichtig. Abb.2 ist eine simulierte Feldverteilung bei der Durchbruchspannung, wobei ein Schutzring neben dem Rand des PN-Übergangs dazu beigetragen hat, die elektrische Feldstärke am Rand zu reduzieren. Flachgräben zwischen den Mikrozellen können die Nachimpulsrate minimieren.

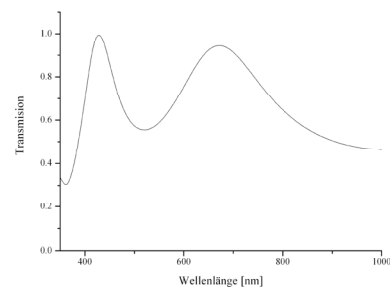


Abb. 1 Transmissionsspektrum von  $150\text{nm}$   $\text{SiO}_2$  plus  $150\text{nm}$   $\text{Si}_3\text{N}_4$  auf Silizium

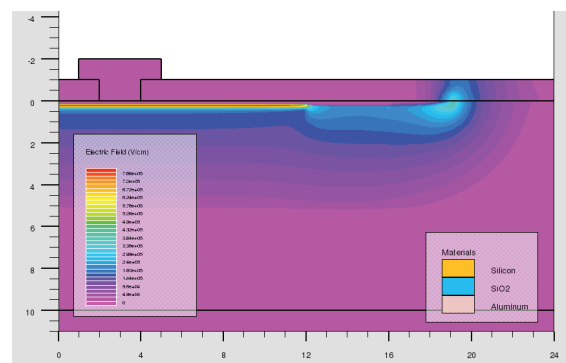


Abb. 2 Feldverteilung bei der Durchbruchspannung (Einheit um)

Ein Phosphorgetter bei der Anfertigung war eingefügt, um die Defektzentren zu reduzieren.

Flache Gräben sind zwischen die Mikrozellen eingätzt, das kann das optische Übersprechen reduzieren. SiPM-Sensoren mit unterschiedlichen Mikrozellengeometrien sind entworfen. Die Chips haben eine Fläche von 1mm<sup>2</sup> und beinhalten eine Matrix von bis zu 1024 Mikrozellen. Jede Mikrozelle besteht aus einem n+-p-Übergang und einem in Serie geschalteten Polysilizium-Quenchwiderstand. Die Mikrozellen sind durch einen Aluminiumbus parallel angeschlossen.

**3. Charakterisierung der SiPM**

Eine systematische Charakterisierung ist durchgeführt und die Durchlass- und Sperrkennlinien der SiPMs sind getestet worden. Die Kennlinien zeigen, dass die Durchbruchspannung bei 22V liegt (Abb. 3). Aus der Kennlinie kann man den Quenchwiderstand errechnen, der im MOhm-Bereich liegt. Die Dunkelrate wird durch einen Diskriminator und einen Zähler bestimmt, welcher ausgelöst wird, sobald der Signalimpuls den Schwellwert überschreitet. Die Dunkelrate als eine Funktion der Überspannung für einen SiPM bei Raumtemperatur ist in Abb. 4 dargestellt. Sie liegt unter 100kHz. Die Dunkelrate hängt von den Materialeigenschaften und den Prozessbedingungen ab. Die kleine Dunkelrate des SiPM-Chips weist darauf hin, dass die Defektdichte im Lawinengebiet klein gehalten wurde. Unter einer blauen LED wurde ein Photoelektronenspektrum für den SiPM gemessen, Abb. 5 zeigt, dass bis zu 7 Photonen aufgelöst werden können. Die Verstärkung ist proportional zum Abstand des ersten Photoelektronen-Peaks zum Pedestal.

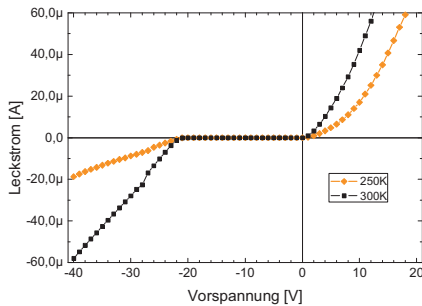


Abb. 3 Kennlinie vom SiPM bei 250K und 300K

**4 Modellierung der SiPM**

Um die Anwendung der SiPM optimal zu planen, und eine Ausleseschaltung passend zu entwerfen, sollen die SiPM genau modelliert werden. Abb.6 ist ein Spice-Modell für den SiPM. Hier kann der Photonenimpuls eine Lawine durch die spannungskontrollierte Schaltung vcr1 auslösen, die Lawine wird durch die stromkontrollierte Schaltung icr2 erhalten. Rq und Cq sind die passive Quenchschaltung für die Lawinen. Abb. 7 ist das

simulierte Ausgangssignal. Das Spicemodell zeigt, dass das Signal von der Mikrozellenkapazität, der Überspannung, dem Quenchwiderstand und weiteren Parametern abhängt. Weitere Simulationen können die erwünschten Parameter für die gezielte Applikation finden und optimieren.

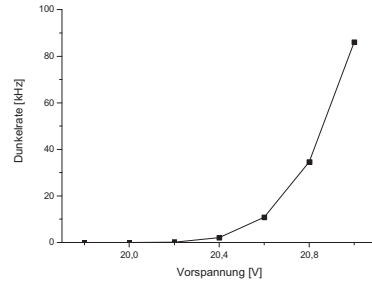


Abb. 4 Dunkelrate vom SiPM bei Raumtemperatur

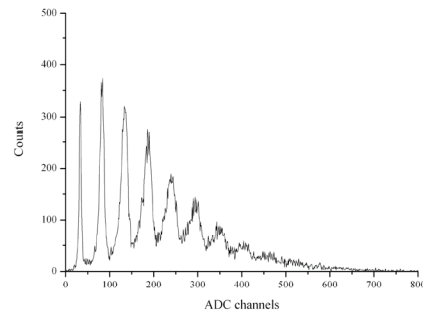


Abb. 5 Das Photoelektronen-Histogramm-Spektrum von einem SiPM-Chip bei blauer LED (λ=430nm) mit 3V Überspannung

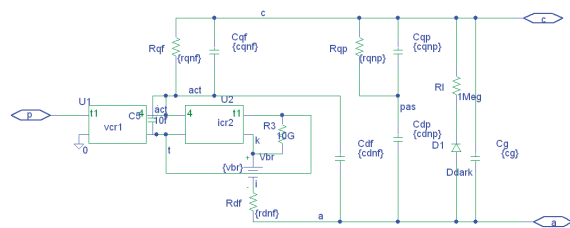


Abb. 6 Spice-Modell für den SiPM

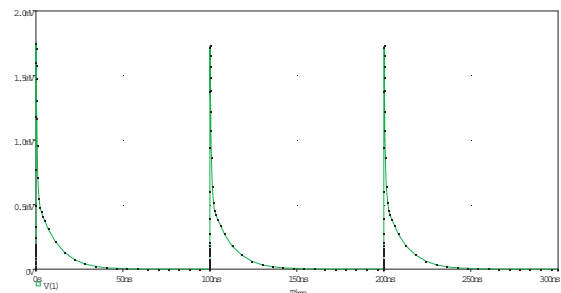


Abb. 7 Simulationsergebnis für das Ausgangssignal

## 5 Entwicklung einer ASIC für die Fluoreszenzlebensdauermessungen

In Lebenswissenschaftsforschung wird häufig die Fluoreszenz, besonders ihre Lebensdauer, analysiert, um Information in biochemischem Vorgang zu erzielen. Weil die Fluoreszenz schwach und kurz ist, eignet sich die zeitkorrelierte Einzelphotonenzählung (TCSPC) als die Messmethode. Dazu werden mittels einer sehr kurzen und schnell wiederholenden gepulsten Lichtquelle die Fluorophore angeregt. Durch Fluoreszenzphotonenemission kehren die angeregten Fluorophore in den Grundzustand zurück. Der Zeitabstand zwischen dem Anregungsimpuls und der Photonemission wird genau gemessen. Die Messung wird vielfach wiederholt und die einzelnen zeitlich korrelierten Photonen (in Bezug zum Anregungspuls) werden entsprechend ihrer gemessenen Zeit in ein TCSPC-Histogramm einsortiert. Dadurch wird der Fluoreszenzabfallvorgang rekonstruiert und die Lebensdauer ermittelt.

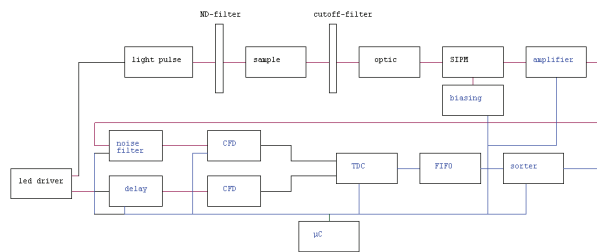


Abb.8 Systemarchitektur der Lebensdauerermessung

Für die Lebensdauerermessung wird eine Systemarchitektur (Abb.8) konzipiert. Extrakurze Hochfrequenzlichtimpulse sind als die Anregungsquelle eingesetzt. Der Neutraldichtfilter sorgt dafür, dass die Lichtintensität so schwach ist, dass die Wahrscheinlichkeit zwei Photonenergebnisse in einer Wiederholung sehr klein wird. Ein Vorverstärker mit ausreichender Bandbreite soll die Signale vergrößern. Der Constant-Fraktion-Discriminator (CFD) gewährleistet eine minimale Zeitwanderung. Die TDC Einheit muss alle Ereignisse genau und rechtzeitig messen und in Digit umwandern. Eine ASIC-Schaltung ist geplant, um alle Funktionen zu integrieren, den Zeitabstand schnell und genau zu messen und ins Histogramm einzusortieren. Weil die Fluoreszenzlebensdauer bei der DNA-Sequenzierung im einigen Nanosekund liegt, soll eine Zeitgenauigkeit von unter 100ps realisiert werden.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass der Prototyp Single-Photoelektron-Auflösung hat und eine kleine Dunkelrate aufweist. Ein Spicemodell ist für den SiPM weiterentwickelt worden. Das Modell kann

benutzt werden, um die optimalen Arbeitsbedingungen zu finden, und um mögliche technologische Verbesserungen der Sensoranfertigung zu analysieren. Die SiPM können für eine Fluoreszenzlebensdauerermessung eingesetzt werden, dazu ist eine Systemarchitektur konzipiert und eine ASIC-Entwicklung geplant.

Diese Arbeit ist durch ein INNOKOM Projekt von BMWi (MPSPM, Registriernummer MF120078) und ein Verbundprojekt von BMBF (BiaoSam Registriernummer 03WKCL01D) unterstützt worden.

### Literatur

- [1] D. Renker, Geiger-mode avalanche photodiodes, history, properties and problems, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, vol. A567, 2006, pp. 48-56