

Bestimmung der Detektionseffizienz von Silizium Single-Photon Avalanche Dioden

Helmuth Hofer, Silke Peters, Waldemar Schmunk, Stefan Kück

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

<mailto:stefan.kueck@ptb.de>

Es wird ein Messaufbau zur rückgeführten Bestimmung der Detektionseffizienz von Silizium-basierten Einzelphotonendetektoren (Si-SPAD) vorgestellt. Die Standardmessunsicherheit beträgt derzeit $< 0,5\%$, wobei die Hauptbeiträge zur Messunsicherheit in der Bestimmung der Transmission der verwendeten Abschwächungsfilter und in der spektralen Empfindlichkeit des verwendeten Referenzdetektors liegen.

1 Einführung

Seit längerer Zeit gewinnen Silizium-Einzelphotonendetektoren (Si-SPAD) in vielen Anwendungsfeldern, so z. B. in der experimentellen Quantenoptik, in der Quantenkryptographie, im Quantencomputing, aber auch in der Biologie und Medizin zunehmend an Bedeutung. Trotz ihrer kommerziellen Verfügbarkeit existieren bis heute keine international verbindlichen Standards zur metrologischen Charakterisierung der technischen Parameter einer SPAD, von denen die Detektionseffizienz einer der wichtigsten ist. Anwender sind deshalb immer noch darauf angewiesen den Angaben der Hersteller zu vertrauen oder die Parameter selbst zu bestimmen.

In diesem Artikel wird die Bestimmung der Detektionseffizienz von Si-SPADs mittels eines neuen Messplatzes an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB), dem nationalen Metrologie-Institut Deutschlands, vorgestellt. Die Detektionseffizienz wird dabei aus der Messung der Photonen-zählrate am Si-SPAD und ihrem Vergleich mit der einfallenden Strahlungsleistung, gemessen mittels einer kalibrierten Silizium-Photodiode und kalibrierten Abschwächern, bestimmt. Die vollständige Rückführbarkeit zum nationalen Normal für optische Strahlungsleistung (Kryoradiometer) mittels einer ununterbrochenen Kalibrierkette ist damit gewährleistet. Die Standardmessunsicherheit bei der Bestimmung der Detektionseffizienz beträgt derzeit $< 0,5\%$. Vorgestellt wird außerdem eine umfassende Messunsicherheitsanalyse.

2 Kalibrierverfahren

Die Kalibrierung des Si-SPAD erfolgt mittels des Vergleichs mit einer kalibrierten Si-Diode, die als Referenzdetektor dient. Dieser Vergleich ist nicht direkt möglich, da stark unterschiedliche Photonenflüsse in den Messungen verwendet werden müssen. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 1 gezeigt. Zunächst wird die Leistung des als Strahlungsquelle dienenden Lasers der Wellenlän-

ge 770 nm mit der Si-Diode gemessen. Anschließend wird zunächst Filter 2 einzeln und anschließend Filter 3 einzeln in den Strahlengang gefahren und die jeweiligen transmittierten Leistungen mittels der Si-Diode gemessen. Auf diese Art wird in-situ die Transmission der Filter 2 und 3 bestimmt. Eine Bestimmung der Gesamtabschwächung mit einer Messung ist nicht möglich, da der Photonenfluss hinter beiden Filtern zu gering ist, um mit der Si-Diode gemessen werden zu können. In einem letzten Schritt werden dann beide Filter und der Si-SPAD in den Strahlengang gefahren und die Zählrate gemessen.

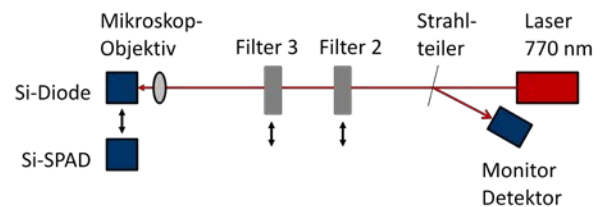


Abb. 1 Schematischer Aufbau zur Kalibrierung von Si-SPAD Detektoren.

Es ergeben sich die folgenden Signale V_1 bis V_4 für die jeweiligen Messungen:

$$\begin{aligned}
 V_1 &= A_1 \cdot s_{Si} \cdot \Phi_1 \\
 V_2 &= A_2 \cdot s_{Si} \cdot \Phi_2 = A_2 \cdot s_{Si} \cdot T_{F2} \cdot \Phi_1 \\
 V_3 &= A_3 \cdot s_{Si} \cdot \Phi_3 = A_3 \cdot s_{Si} \cdot T_{F3} \cdot \Phi_1 \\
 V_4 &= CR = \eta \cdot \frac{\Phi_4}{hc/\lambda} = \eta \cdot \frac{T_{F2} \cdot T_{F3} \cdot \Phi_1}{hc/\lambda} \\
 \Rightarrow \eta &= hc/\lambda \cdot \frac{A_2 \cdot A_3 \cdot CR \cdot V_1}{A_1 \cdot V_2 \cdot V_3} \cdot s_{Si}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Mit η : Detektionseffizienz, V_i : Signale, s_{Si} : spektrale Empfindlichkeit der Si-Diode, A_i : Verstärkungsfaktoren, Φ_1 : Strahlungsleistung des Lasers, T_{F2} , T_{F3} : Filtertransmissionen, CR : Zählrate des Si-SPAD, h : Planck-Konstante, c : Lichtgeschwindigkeit und λ : Wellenlänge.

Diese Gleichung setzt voraus, dass (i) die Empfindlichkeit der Si-Diode linear ist, d.h. sich mit der eingestrahlten Leistung nicht ändert und (ii) die Leistung des Lasers während der gesamten Messung konstant ist. (i) ist erfüllt, da die festgestellte Nichtlinearität kleiner als die angegebene Messunsicherheit für s_{Si} ist. (ii) wird dadurch Rechnung getragen, dass ein Monitorempfänger die Laserleistung während der gesamten Messung überwacht. D.h. es werden jeweils die Quotienten Q_i aus den Signalen der Si-Diode bzw. des Si-SPAD (V_i) und des Monitorempfängers ($V_{mon,i}$) gemessen. Zusammen mit weiteren Messunsicherheitskomponenten ergibt sich folgende Gleichung für die Detektionseffizienz und ihrer Messunsicherheit:

$$\eta = \frac{hc}{\lambda} \frac{A_2 A_3}{A_1} \frac{V_1/V_{Mon1}}{V_2/V_{Mon2}} \frac{CR/V_{Mon4}}{V_3/V_{Mon3}} s_{Si} F_{Filter} F_{Statistik} \quad (2)$$

$$= \frac{hc}{\lambda} \frac{A_2 A_3}{A_1} \frac{Q_1 Q_4}{Q_2 Q_3} s_{Si} F_{Filter} F_{Statistik}$$

Die einzelnen Komponenten sind in der Tabelle 1 erläutert, inklusive der Angabe der Einheit, des Wertes, der Standardmessunsicherheit, der Verteilung, des Sensitivitätskoeffizienten, des Unsicherheitsbeitrages und des Anteils an der Messunsicherheit (Index).

Um die Messunsicherheit der Gesamtfiltertransmission zu bestimmen, wurden Messungen an Filtern geringerer optischer Dichte durchgeführt, deren kombinierte Transmission sich noch mittels der Si-Diode bestimmen lässt.

Aus den Einzelmessungen ergab sich eine Gesamttransmission von $T_{einz} = T_{F2} \times T_{F3} = 0,1238 \pm 0,0002$; bei der kombinierten Messung (beide Filter

gleichzeitig) wurde ein Wert von $T_{komb} = 0,1234 \pm 0,0004$ gemessen. Die Diskrepanz beträgt $1 - T_{komb}/T_{einz} = 3 \times 10^{-3}$, womit die Messunsicherheit der Bestimmung der Gesamtfiltertransmission zu $u(F_{Filter}) = 5 \times 10^{-3}$ abgeschätzt wird. Der Einfluss der Photonenstatistik wurde bereits in [2] diskutiert und ist hier relativ gering. Allerdings ist zu beachten, dass der angegebene Wert für die Detektionseffizienz nur für die vorliegenden Messparameter gültig ist, d.h. bei der Verwendung kontinuierlicher Laserstrahlung bei 770 nm (d.h. Poisson-Statistik) und bei einer Zählrate der Si-SPAD von ca. 100000 Photonen pro Sekunde.

3 Zusammenfassung/Ausblick

Es wurde ein Messaufbau zur Kalibrierung der Detektionseffizienz von Einzelphotonendetektoren (Si-SPAD) vorgestellt. Die Standardmessunsicherheit in der Bestimmung der Detektionseffizienz ist derzeit $< 0,5 \%$. Zukünftige Arbeiten streben an, die Messunsicherheit weiter zu verringern und den Einfluss der Photonenstatistik auf die Bestimmung der Detektionseffizienz zu berücksichtigen. Der Schwerpunkt wird hierbei in einer genaueren Bestimmung des Filtertransmissionsgrades liegen. Weitere Schritte sind die Durchführung von (internationalen) Vergleichsmessungen sowie die Erweiterung auf weitere Wellenlängen mit dem Ziel, einen Kalibrierservice an der PTB zu errichten.

Literatur

- [1] W. Schmunk et al., "Photon number statistics of NV-centre emission", Metrologia **49**, S156-S160 (2012)
- [2] W. Schmunk et al., "Radiometric Calibration of Single Photon Detectors by a Single Photon Source based on NV-centers in diamond", Journal of Modern Optics **58**, 1252 (2011)

Größe	Einheit	Beschreibung	Wert	Standardmessunsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	Index
h	Js	Planckkonstante	$662.62000 \cdot 10^{-36}$ Js	$5.77 \cdot 10^{-39}$ Js	Rechteck	$960 \cdot 10^{30}$	$5.6 \cdot 10^{-6}$	0.0 %
c	m/s	Lichtgeschwindigkeit	$299.79 \cdot 10^8$ m/s					
λ	m	Wellenlänge	$770.0000 \cdot 10^{-9}$ m	$57.7 \cdot 10^{-12}$ m	Rechteck	$-830 \cdot 10^3$	$-48 \cdot 10^{-6}$	0.0 %
A_1	V/A	Verstärkungsfaktor	$1.0000000 \cdot 10^9$ V/A	57700 V/A	Rechteck	$640 \cdot 10^{-12}$	$37 \cdot 10^{-6}$	0.0 %
A_2	V/A	Verstärkungsfaktor	$1.0000000 \cdot 10^9$ V/A	57700 V/A	Rechteck	$640 \cdot 10^{-12}$	$37 \cdot 10^{-6}$	0.0 %
A_3	V/A	Verstärkungsfaktor	$1.0000000 \cdot 10^6$ V/A	57.7 V/A	Rechteck	$-640 \cdot 10^{-9}$	$-37 \cdot 10^{-6}$	0.0 %
Q_4	1/V/s	Quotient $CR/V_{MonSPAD}$	38973.0 1/V/s	14.1 1/V/s	Normal	$16 \cdot 10^{-6}$	$230 \cdot 10^{-6}$	1.0 %
Q_1	1	Quotient V_1/V_{Mon1}	0.7929810 1	$31.7 \cdot 10^{-6}$ 1	Normal	0.80	$25 \cdot 10^{-6}$	0.0 %
Q_2	1	Quotient V_2/V_{Mon2}	0.3642505 1	$52.7 \cdot 10^{-6}$ 1	Normal	-1.7	$-92 \cdot 10^{-6}$	0.2 %
Q_3	1	Quotient V_3/V_{Mon3}	0.01229298 1	$6.16 \cdot 10^{-6}$ 1	Normal	-52	$-320 \cdot 10^{-6}$	1.9 %
s_{Si}	A/W	Spektrale Empfindlichkeit der Si-Diode	0.357750 A/W	$716 \cdot 10^{-6}$ A/W	Normal	1.8	$1.3 \cdot 10^{-3}$	30.6 %
F_F	1	Faktor zur Berücksichtigung der Unsicherheit bei Verwendung von zwei Filtern	1.00000 1	$2.89 \cdot 10^{-3}$ 1	Rechteck	0.64	$1.8 \cdot 10^{-3}$	63.7 %
F_{Stat}	1	Faktor zur Berücksichtigung der Photonenstatistik	1.000000 1	$577 \cdot 10^{-6}$ 1	Rechteck	0.64	$370 \cdot 10^{-6}$	2.5 %
η	1	Detektionseffizienz	0.63700	$2.30 \cdot 10^{-3}$				

Tab. 1 Messunsicherheitsbudget zur Kalibrierung einer Si-SPAD.