



Single-photon counting and picosecond-accurate measurements for research in quantum technology

The SPAD-EvalKit developed in QuantumHub Thüringen is based on the method of time-correlated single-photon counting and enables measurements with a temporal resolution of 20 picoseconds. This allows quantum-based applications to be researched and new solutions for in-vitro diagnostics or medical technology to be developed. Photograph: IMMS.

For quantum technology from Thüringen, Germany, IMMS is researching CMOS-based single-photon detectors

www.imms.de/qhub

Quantum technology is considered to be a key technology of the future. It enables the development of highly efficient technology that can far surpass the performance of conventional systems. By controlling individual quanta, i.e. the smallest light and energy building blocks, disruptive applications are made possible, for example quantum computers, tap-proof communications or quantum sensor technology. For this purpose, IMMS is researching the use of commercially available, silicon-based single-photon detectors, so-called SPADs (single-photon avalanche diode). They can be produced cost-effectively in a standard semiconductor technology (CMOS) and therefore enable highly integrated, miniaturised solutions. The SPADs are used to convert single photons into electrical signals and allow operation at room temperature without large and complex cooling systems.

www.imms.de/modtest

IMMS has developed a SPAD evaluation kit in collaboration with X-FAB. The low-cost, hand-sized USB device called SPAD-EvalKit requires no additional power supply and is illustrated in Figure 1. It is based on the time-correlated single-photon counting

Annual Report
© IMMS 2022

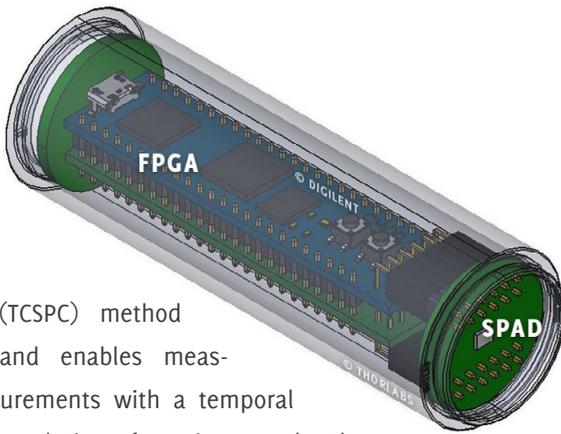


Figure 1:

Structure of the SPAD-EvalKit: The SPAD (single-photon avalanche diode) can be used to detect single photons. Their signals are measured in many cycles and evaluated by the field programmable gate array (FPGA) as the impulse response of the light source.

Diagram: IMMS/Digilent/Thorlabs.

(TCSPC) method and enables measurements with a temporal resolution of 20 picoseconds. The

TCSPC method used for this purpose and presented in this article makes it possible to assess the temporal course of the intensity of light pulses. It can be used to set up single-photon sources, characterise light pulses with very small light powers or distances and thus lay the foundations for quantum-based applications. Among other things, the method can be used to develop new solutions for in-vitro diagnostics or medical technology, such as miniaturised luminescence and fluorescence measurement technology.

To interpret the sensor signals statistical evaluation is required. For the first SPAD evaluation kit, this is taken over by a programmable logic device (FPGA). This component is an intermediate step for later chip development. The FPGA can be used to specify the processes for sensor signal processing, but primarily to map the desired circuit structure, which can still be flexibly adapted for tests and optimisations.

This laid the foundation for the integration of such an optical sensor element in conjunction with the necessary evaluation electronics in a microelectronics chip, which will flow into application developments of other research projects.

Very fast light pulses cannot be characterised adequately with conventional methods

Fast light pulses are necessary for many applications down to the nano- or picosecond range. Light sources that generate these pulses must therefore be characterised. Without certainty about the nature of the excitation signal, a meaningful evaluation of the reaction of an optical system to it is often only possible with

considerable limitations or no longer possible at all. This knowledge is essential, especially for fluorescence-based bioanalytical methods in medical technology or for time-of-flight applications such as in the automotive sector. For measurements where a very fast light source is used, the light source itself must therefore first be characterised.

Fast photodiodes are traditionally used for this purpose. The signal then recorded with an oscilloscope allows pulse widths down to the nanosecond range to be evaluated in the temporal amplitude progression. However, the basic noise of the oscilloscope greatly limits the achievable dynamic range. Therefore, the impulse response of the photodiode is often distorted non-linearly.

Time-correlated single-photon counting technique avoids undesired effects

To avoid these effects, the SPAD-EvalKit developed at IMMS in cooperation with X-FAB uses a fundamentally different method – time-correlated single photon counting (TCSPC). Here, the impulse response of the light source is not considered to be continuous, but discrete. Furthermore, the impulse response is not measured in a single run, but accumulated through repeated excitation and statistical evaluation of the results of many measurement runs. The TCSPC method is fundamentally based on the fact that the light emission of any light source is by no means a continuous and deterministic process, but is instead the stochastically distributed emission of individual photons. The impulse response of the light source is simply the probability density of the times at which photons are released from the light source. The measurement – or more correctly from a statistical point of view: estimation – of a probability density is carried out by means of a histogram of the times at which photons are released from the light source.

Characterisation of fast pulsed light sources using FPGA and SPADs

A system for measuring a light source by means of TCSPC therefore requires a single-photon detector, which collects the photons emitted from the light source. Secondly, it needs a sufficiently accurate time-to-digital converter (TDC). This measures the time difference between the excitation and the incidence of the first photon and increments the corresponding histogram class. After a sufficient number, i.e. several hundred thousand, of TDC values have been accumulated, the histogram

Excitation

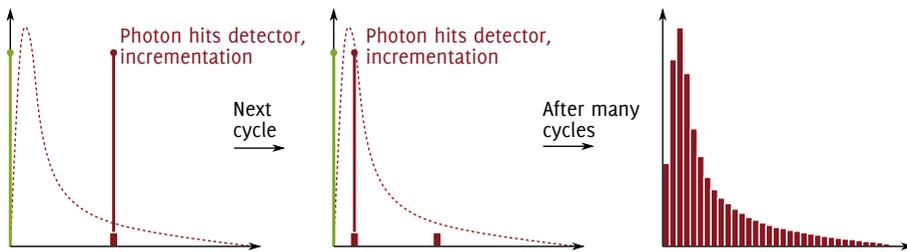


Figure 2: Cycles of the TCSPC procedure to create the histogram. Diagram: IMMS.

corresponds to the actual impulse response of the light source. This method is not a recent invention, but was described in the form used today as early as 1961.¹ For a long time, however, very bulky equipment was required to put such a setup into operation. At IMMS, with the help of the now commercially available silicon-based single photon detectors (so-called single-photon avalanche diode, SPAD) in X-FAB technology, it was possible to develop an extremely compact device that performs TCSPC measurements. The time-to-digital converter (TDC) is currently implemented in a field programmable gate array (FPGA). This programmable logic device maps all the structures of the envisaged integrated circuit, with which the system consisting of SPAD sensor and evaluation electronics can be further miniaturised and thus opened up for new quantum-based applications.

Gate delays allow cost-effective FPGA application

Since the highest reasonable clock frequency of current FPGAs is in the range of a few hundred megahertz, it is not possible to implement a TDC with a temporal resolution of about 20 picoseconds using simple counter logic. However, the following approach offers a solution that achieves this accuracy: certain basic hardware components of the reconfigurable FPGA logic are used as dead time elements, i.e. digital structures with a known propagation delay. The number of delay elements the start signal could pass through before the stop signal was set is measured. Thus, the time resolution of the TDC is not dictated by the reference clock, but by the propagation delay of these hardware components serving as delay elements.

Results

This enables the system to measure the impulse response of the light source, i.e. the intensity distribution over time. With a temporal resolution of approximately

> Integrated sensor systems
> Distributed measurement + test systems
> Mag6D nm direct drives

> Contents

* Funding

www.imms.de/

modtest

Annual Report

© IMMS 2022

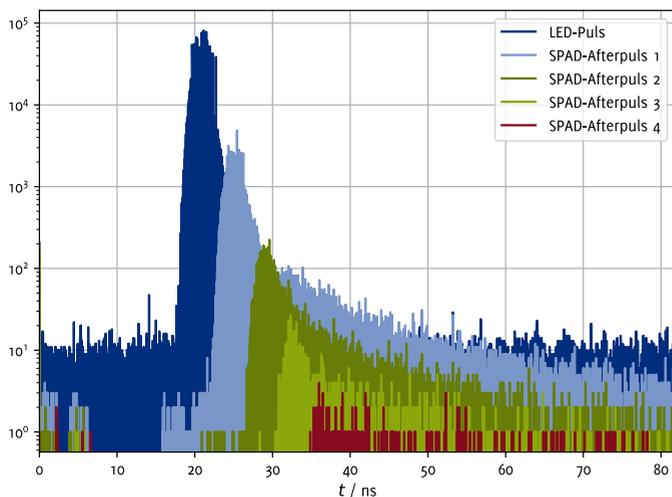


Figure 3:

Example histogram for the measurement of impulse responses of an LED light source by the TCSPC method. The unwanted effect of SPAD afterpulsing can be filtered out. It is shown here separately for SPAD afterpulses 1 to 4.

Diagram: IMMS.

20 picoseconds, even very short light pulses in the nanosecond range can be characterised. The dynamic range of the accumulated histogram is 80 dB after a moderate integration time and is thus significantly better than the dynamic range of a GHz oscilloscope – the latter is at most 40 dB at a typical resolution of 7 bits (ENOB) due to noise. To be able to exploit the high dynamic range, the ordinate axis of a TCSPC histogram is usually scaled logarithmically.

With the developed SPAD-EvalKit, unwanted effects of the light source and the detector can also be observed and quantified. For example, the afterpulsing of the SPAD can be filtered out by suitable correlation, see figure 3. This unwanted effect is caused by the detector: After it has sensed a photon, further pulses can be emitted immediately due to the charge carriers enclosed in a semiconductor layer, but these pulses cannot be assigned to a photon. This effect is called afterpulsing. With the SPAD-EvalKit, this afterpulsing can either be suppressed for normal operation or specifically extracted for characterising the detector.

In addition, interference effects of the light source can be investigated that are significantly below 1% of the peak value of the impulse response. One effect is the spontaneous emission of a stimulated laser diode. When measuring with a fast photodiode and an oscilloscope, this effect would only be measurable to a limited extent due to the limited dynamic range of the oscilloscope. This is especially critical for in-vitro diagnostic applications in which the laser diode is to be used to excite a biologically or chemically induced fluorescence. The reuse and further development

of the system in the FluoResYst project already showed that this can also be characterised with the SPAD-EvalKit.

Cost-Effective, hand-sized USB device with the potential of further miniaturisation

The TCSPC method is excellent for characterising fast light sources and reveals effects that would not be visible when measuring the impulse response through means of a photodiode and oscilloscope. The system developed together with X-FAB allows the measurement of <1 nanosecond wide light pulses with a dynamic range of 80 dB. The combination of FPGA TDC and CMOS SPAD allowed the TCSPC measurement setup to be scaled down from what was previously an extremely bulky measurement setup to a low-cost, hand-sized USB device that requires no external power supply. The system is fully housed in a one-inch diameter lens tube. This also allows it to be complemented by a variety of commercially available optical components (e.g. lenses, filters).

The measurement system has already been used to characterise fast laser light sources as part of the FluoResYst research project. Through this, a feasibility evaluation for the development of a SPAD-based ASIC for the detection of tuberculosis could be successfully provided.

Contact person: Jakob Hampel, M.Sc., jakob.hampel@imms.de



Hier hat Zukunft Tradition.

The Quantum Hub Thüringen research project is funded by the German Land of Thüringen via the Thüringer Aufbaubank under the reference 2021 FGI 0042.

- 76

- > *Integrated sensor systems*
- > *Distributed measurement + test systems*
- > *Mag6D nm direct drives*
- > *Contents*
- * *Funding*

www.imms.de/fluoresyst

www.imms.de/modtest

www.imms.de/qhub

1 L. M. Bollinger, G. E. Thomas. Measurement of the Time Dependence of Scintillation Intensity by a Delayed-Coincidence Method. Rev. Sci. Instrum., Jan. 1961.



Einzelphotonenzählung und pikosekundenschnelle Messungen für die Forschung an Quantentechnologien

Das in QuantumHub Thüringen entwickelte SPAD-EvalKit basiert auf dem Verfahren der zeitkorrelierten Einzelphotonenzählung und ermöglicht Messungen mit einer zeitlichen Auflösung von 20 Pikosekunden. Damit lassen sich Quanten-basierte Anwendungen erforschen und neue Lösungen für die In-vitro-Diagnostik bzw. Medizintechnik erschließen. Foto: IMMS.

www.imms.de/

qhub

Für Quantentechnologien aus Thüringen erforscht das IMMS CMOS-basierte Einzelphotonendetektoren

Quantentechnologien werden als eine der Schlüsseltechnologien der Zukunft betrachtet. Sie ermöglichen die Entwicklung hocheffizienter Technologien, die die Leistungsfähigkeit konventioneller Systeme weit übertreffen können. Durch die Kontrolle einzelner Quanten, also kleinster Licht- und Energiebausteine, werden disruptive Anwendungen ermöglicht, zum Beispiel für Quantencomputer, abhörsichere Kommunikation oder Quantensensorik. Das IMMS erforscht hierfür den Einsatz von kommerziell erhältlichen, siliziumbasierten Einzelphotonendetektoren, sogenannter SPADs (Single-Photon Avalanche Diode). Sie lassen sich in einer Standard-Halbleitertechnologie (CMOS) kostengünstig herstellen und ermöglichen daher hochintegrierte, miniaturisierte Lösungen. Die SPADs werden zur Wandlung einzelner Photonen in elektrische Signale eingesetzt und erlauben einen Betrieb bei Raumtemperatur ohne große und aufwändige Kühlsysteme.

www.imms.de/

modtest

Das IMMS hat in Zusammenarbeit mit der X-FAB ein SPAD-Evaluations-Kit entwickelt. Das kostengünstige, handflächengroße USB-Gerät namens SPAD-EvalKit benötigt keine zusätzliche Spannungsversorgung und ist in Abbildung 1 illustriert. Es basiert auf dem Verfahren der zeitkorrelierten Einzelphotonenzählung (engl. Time-Correlated Single

Jahresbericht

© IMMS 2022

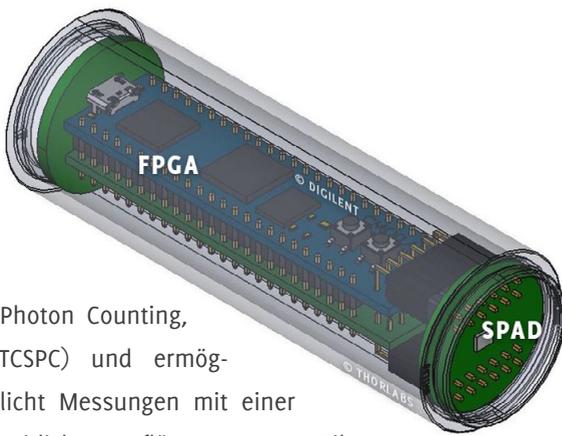


Abbildung 1:

Aufbau des SPAD-EvalKits: Mit der SPAD (Single-Photon Avalanche Diode) lassen sich einzelne Photonen detektieren. Deren Signale werden in vielen Durchläufen gemessen und vom freiprogrammierbaren Logikbaustein (FPGA) als Impulsantwort der Lichtquelle ausgewertet.

Grafik: IMMS/Digilent/Thorlabs.

Photon Counting, TCSPC) und ermöglicht Messungen mit einer zeitlichen Auflösung von 20 Piko-

sekunden. Das hierfür genutzte und in diesem Artikel vorgestellte TCSPC-Verfahren ermöglicht es, den zeitlichen Verlauf der Intensität von Lichtpulsen zu beurteilen. Damit lassen sich Einzelphotonenquellen aufbauen, Lichtpulse mit sehr kleinen Lichtleistungen charakterisieren oder Abstände messen und somit Grundlagen für Quanten-basierte Anwendungen legen. Mit dem Verfahren können u.a. neue Lösungen für die In-vitro-Diagnostik bzw. Medizintechnik erschlossen werden, wie z.B. miniaturisierte Lumineszenz- und Fluoreszenz-Messtechnik.

Zur Interpretation der Sensorsignale ist eine statistische Auswertung erforderlich. Für das erste SPAD-EvalKit wird diese durch einen programmierbaren Logikbaustein (FPGA) übernommen. Dieses Bauelement ist ein Zwischenschritt für die spätere Chip-Entwicklung. Per FPGA kann man die Abläufe für die Sensorsignalverarbeitung vorgeben, aber vor allem die gewünschte Schaltungsstruktur abbilden, die für Tests und Optimierungen noch flexibel anpassbar ist.

Damit wurde die Basis für die Integration eines solchen optischen Sensorelements in Verbindung mit der erforderlichen Auswertelektronik in einen Mikroelektronikchip gelegt, die in Anwendungsentwicklungen anderer Forschungsprojekte einfließt.

Schnelle Lichtimpulse mit klassischen Verfahren nicht ausreichend charakterisierbar

Schnelle Lichtimpulse sind für viele Anwendungen bis in den Nano- oder Pikosekundenbereich notwendig. Lichtquellen, die diese Impulse erzeugen, müssen daher charakterisiert werden. Denn ohne Gewissheit über die Beschaffenheit des anregenden Signals ist eine sinnvolle Bewertung der Reaktion eines optischen Systems darauf oft nur mit beträchtlichen Einschränkungen oder gar nicht mehr möglich. Insbesondere bei fluoreszenzbasierten Bioanalytikverfahren in der Medizintechnik oder bei Time-of-Flight-Anwendungen wie im Automotive-Bereich ist dieses Wissen essenziell. Für

Messungen, bei denen eine sehr schnelle Lichtquelle verwendet wird, muss deshalb zunächst die Lichtquelle selbst charakterisiert werden.

Hierfür werden klassischerweise schnelle Photodioden verwendet. Das dann mit einem Oszilloskop aufgenommene Signal erlaubt es zwar, im zeitlichen Amplitudenverlauf Pulsbreiten bis herunter in den Nanosekundenbereich zu bewerten. Das Grundrauschen des Oszilloskops beschränkt jedoch den erreichbaren Dynamikbereich sehr. Oft wird daher die Impulsantwort der Photodiode nichtlinear verzerrt.

Prinzip der zeitkorrelierten Einzelphotonenzählung vermeidet unerwünschte Effekte

Um diese Effekte zu vermeiden, benutzt das am IMMS in Zusammenarbeit mit der X-FAB entwickelte SPAD-EvalKit ein grundlegend anderes Verfahren – die zeitkorrelierte Einzelphotonenzählung (engl. Time-Correlated Single Photon Counting, TCSPC). Hierbei wird die Impulsantwort der Lichtquelle nicht als wertekontinuierlich, sondern als wertediskret angesehen. Des Weiteren wird die Impulsantwort nicht in einem einzigen Durchgang gemessen, sondern durch wiederholte Anregung und statistische Bewertung der Ergebnisse vieler Messdurchläufe akkumuliert. Das TCSPC-Verfahren baut grundlegend darauf auf, dass das Leuchten der Lichtquelle keineswegs ein kontinuierlicher und deterministischer Prozess ist, sondern es sich dabei um die stochastisch verteilte Emission einzelner Photonen handelt. Die Impulsantwort der Lichtquelle ist nichts weiter als die Wahrscheinlichkeitsdichte der Zeitpunkte, an welchen Photonen aus der Lichtquelle ausgelöst werden. Die Messung – oder aus statistischer Sicht richtiger: Schätzung – einer Wahrscheinlichkeitsdichte erfolgt mittels Histogramm über die Zeitpunkte, zu welchen Photonen aus der Lichtquelle ausgelöst werden.

Charakterisierung schneller Pulslichtquellen mittels FPGA und SPADs

Ein System zur Messung einer Lichtquelle mittels TCSPC benötigt also erstens einen Einzelphotonendetektor, welcher die aus der Lichtquelle emittierten Photonen aufängt. Zweitens braucht es einen hinreichend genauen Zeit-Digital-Wandler (engl. Time-to-Digital Converter, TDC). Dieser misst die Zeitdifferenz zwischen Anregung und Auftreffen des ersten Photons und inkrementiert die zugehörige Histogrammklasse. Nachdem hinreichend viele, d.h. mehrere Hunderttausend, TDC-Werte im Histogramm akkumuliert wurden, entspricht das Histogramm der tatsächlichen Impulsantwort der Lichtquelle. Dieses Verfahren ist keine Erfindung der jüngeren Jahre, sondern wurde in der heute verwendeten Form bereits im Jahre 1961 beschrieben.¹ Lange Zeit benötigte es jedoch äußerst sperrige Geräte, um einen derartigen Aufbau

> Integrierte

Sensorsysteme

> Intelligente ver-

netzte Mess- u.

Testsysteme

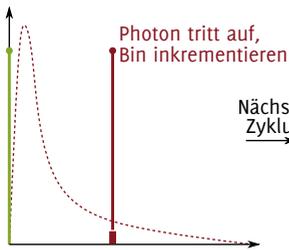
> Mag6D-nm-

Direktantriebe

> Inhalt

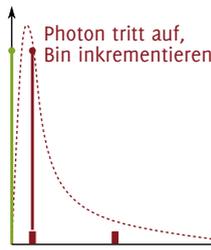
* Förderung

Anregung



Nächster
Zyklus →

Anregung



Nach vielen
Zyklen →

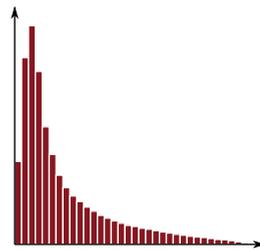


Abbildung 2: Zyklen des TCSPC-Verfahren zur Erstellung des Histogramms. Grafik: IMMS.

in Betrieb zu nehmen. Am IMMS konnte mithilfe der jetzt kommerziell erhältlichen, siliziumbasierten Einzelphotonendetektoren (sog. Single-Photon Avalanche Diode, SPAD) in X-FAB-Technologie ein äußerst kompaktes Gerät entwickelt werden, welches TCSPC-Messungen durchführt. Der Zeit-Digital-Wandler (TDC) ist derzeit in einem Field Programmable Gate Array (FPGA) implementiert. Dieser programmierbare Logikbaustein bildet alle Strukturen der angestrebten integrierten Schaltung ab, mit der sich das System aus SPAD-Sensor und Auswerteelektronik weiter miniaturisieren und somit für neue Quanten-basierte Anwendungen erschließen lässt.

Idee der Totzeitglieder ermöglicht preiswerten FPGA-Einsatz

Da die höchste sinnvolle Taktfrequenz gegenwärtiger FPGAs im Bereich einiger Hundert Megahertz liegt, ist es nicht möglich, einen TDC mit einer zeitlichen Auflösung von ca. 20 Pikosekunden durch eine einfache Zählerlogik zu implementieren. Eine Lösung, die diese Genauigkeit erreicht, bietet allerdings der folgende Ansatz: Es werden bestimmte Hardware-Grundbausteine der rekonfigurierbaren FPGA-Logik als Totzeitglieder, d.h. Digitalstrukturen mit einer bekannten Laufzeitverzögerung, verwendet. Es wird gemessen, wie viele dieser Totzeitglieder das Startsignal durchlaufen konnte, bevor das Stoppsignal gesetzt wurde. Damit ist die Zeitauflösung des TDC nicht durch den Referenztakt, sondern durch die Gatterlaufzeit dieser als Totzeitglieder dienenden Hardware-Bausteine diktiert.

Ergebnisse

Damit ist das System in der Lage, die Impulsantwort der Lichtquelle, also die Intensitätsverteilung über der Zeit, zu messen. Mit einer zeitlichen Auflösung von ca. 20 Pikosekunden können auch sehr kurze Lichtpulse im Nanosekunden-Bereich charakterisiert werden. Der Dynamikbereich des akkumulierten Histogramms liegt nach moderater Integrationszeit bei 80 dB und ist damit deutlich besser als der Dynamikbereich eines GHz-Oszilloskops – letzterer liegt bei einer typischen Auflösung von

www.imms.de/

modtest

Jahresbericht

© IMMS 2022

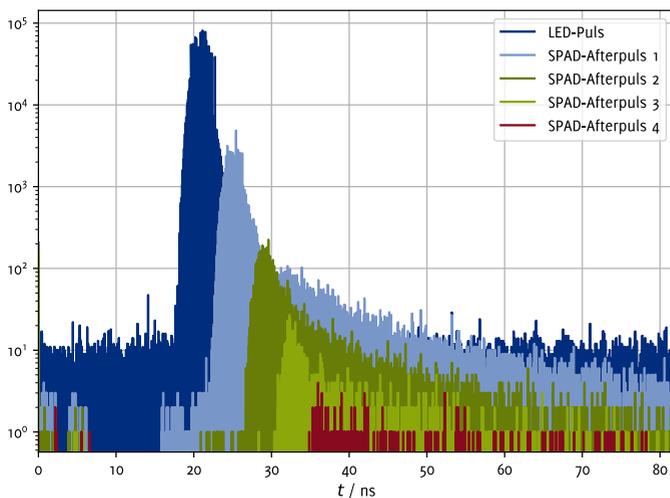


Abbildung 3:

Beispiel-Histogramm für die Messung von Impulsantworten einer LED-Lichtquelle per TCSPC-Verfahren. Der unerwünschte Effekt des Afterpulsings der SPAD kann herausgefiltert werden. Er ist hier getrennt dargestellt für SPAD-Afterpuls 1 - 4.

Grafik: IMMS.

7 Bit (ENOB) rauschbedingt bei höchstens 40 dB. Um den hohen Dynamikbereich ausnutzen zu können, wird die Ordinatenachse eines TCSPC-Histogramms sinnvollerweise mit einer logarithmischen Skalierung versehen.

Mit dem entwickelten SPAD-EvalKit können auch unerwünschte Effekte der Lichtquelle und des Detektors beobachtet und quantifiziert werden. So kann z.B. das Afterpulsing der SPAD durch geeignete Korrelation herausgefiltert werden, vgl. Abbildung 3. Dieser unerwünschte Effekt wird durch den Detektor verursacht: Nachdem dieser ein Photon erfasst hat, können aufgrund der in einer Halbleiterschicht eingeschlossenen Ladungsträger unmittelbar weitere Pulse emittiert werden, die allerdings keinem Photon zuordenbar sind. Dieser Effekt wird als Afterpulsing (Nachpulsen) bezeichnet. Mit dem SPAD-EvalKit kann dieses Afterpulsing entweder für den normalen Betrieb ausgeblendet oder zur Charakterisierung des Detektors gezielt extrahiert werden.

Zudem lassen sich Störeffekte der Lichtquelle untersuchen, die deutlich unter 1% des Spitzenwertes der Impulsantwort liegen. Ein Beispiel sind spontane Emissionen einer angeregten Laserdiode. Bei der Messung mit einer schnellen Photodiode und einem Oszilloskop wäre der Anteil dieser unerwünschten spontanen Emissionen aufgrund des begrenzten Dynamikbereichs des Oszilloskops nur sehr eingeschränkt messbar. Dies ist insbesondere für In-vitro-Diagnostikanwendungen, in welchen die Laserdiode zur Anregung einer biologisch oder chemisch verursachten Fluoreszenz verwendet werden soll, kritisch. Die Wiederverwendung und Weiterentwicklung des Systems im Projekt FluoResYst zeigte bereits, dass dies mit dem SPAD-EvalKit ebenfalls charakterisiert werden kann.

www.imms.de/

ivd

Jahresbericht

© IMMS 2022

Kostengünstiges, handflächengroßes USB-Gerät mit Potenzial zu weiterer Miniaturisierung

Das TCSPC-Verfahren ist zur Charakterisierung schneller Lichtquellen hervorragend geeignet und zeigt u.a. Effekte auf, die bei der Messung der Impulsantwort durch Photodiode und Oszilloskop nicht sichtbar wären. Das gemeinsam mit der X-FAB entwickelte System erlaubt die Messung von <1 ns breiten Lichtpulsen mit einem Dynamikbereich von 80 dB. Die Kombination aus FPGA-TDC und CMOS-SPAD erlaubte die Verkleinerung des TCSPC-Messaufbaus von einem zuvor äußerst sperrigen Messaufbau zu einem kostengünstigen, handflächengroßen USB-Gerät, welches ohne externe Spannungsversorgung auskommt. Das System ist vollständig in einem Objektivtubus mit einem Durchmesser von einem Zoll untergebracht. Dadurch kann es auch durch eine Vielzahl kommerziell erhältlicher optischer Komponenten (z.B. Linsen, Filter) ergänzt werden. Im Forschungsprojekt FluoresYst kam das Messsystem bereits zur Charakterisierung schneller Laserlichtquellen zum Einsatz. Hierdurch konnte die Machbarkeit zur Entwicklung eines SPAD-basierten ASICs zur Detektion von Tuberkulose erfolgreich bewertet werden.

Kontakt: Jakob Hampel, M.Sc., jakob.hampel@imms.de



Hier hat Zukunft Tradition.

Die Arbeiten im Forschungsvorhaben Quantum Hub Thüringen werden durch den Freistaat Thüringen über die Thüringer Aufbaubank unter dem Kennzeichen 2021 FGI 0042 gefördert.

1 L. M. Bollinger, G. E. Thomas. Measurement of the Time Dependence of Scintillation Intensity by a Delayed-Coincidence Method. Rev. Sci. Instrum., Jan. 1961.