

MAPLE

Monolithic Active Pixel Sensor for Lepton Collider Experiments

Programm / Ausschreibung	FORPA, Dissertationen 2024, Industrienahe Dissertationen 2025	Status	laufend
Projektstart	01.10.2025	Projektende	30.09.2028
Zeitraum	2025 - 2028	Projektaufzeit	36 Monate
Keywords	CMOS; Chip Development; Teilchendetektor;		

Projektbeschreibung

Das Projekt MAPLE (Monolithic Active Pixel Sensors for Lepton Experiments) zielt darauf ab, monolithische Teilchendetektoren der nächsten Generation zu entwickeln, die für den Einsatz in den Vertex-Detektoren zukünftiger Lepton-Collider-Experimente optimiert sind, insbesondere für den FCC-ee und die dort vorgeschlagenen Detektorkonzepte wie IDEA. Diese Detektoren müssen eine extreme hohe räumliche Auflösung ($\leq 3 \mu\text{m}$), ein schnelles Timing ($\leq 5 \text{ ns}$), eine ultradünnen Sensordicke ($\leq 50 \mu\text{m}$) und eine niedrige Leistungsaufnahme ($\leq 50 \text{ mW/cm}^2$) erreichen, und das alles in einer Umgebung mit hohen Teilchenraten und Alterung durch Strahlenschäden.

Um diese Herausforderungen zu meistern, stellt MAPLE eine neuartige Sensorarchitektur vor, die auf einem 65-nm-CMOS-Bildgebungsprozess basiert und die vollständige Integration von Sensor- und Ausleseelektronik in einem einzigen, ultrakompakten Chip ermöglicht. Diese Technologie reduziert den Materialverbrauch, vereinfacht die mechanische Integration und verbessert die Signalintegrität, während sie gleichzeitig eine höhere Leistung und Skalierbarkeit als hybride Alternativen bietet.

Eine Schlüsselinnovation liegt in der Entwicklung von Mixed-Mode-ASICs, die analoge Front-End-Schaltungen mit geringem Rauschen mit fortschrittlichen digitalen Funktionen für Hit-Verarbeitung, Zeitstempel und Datenreduktion kombinieren. Das Pixeldesign unterstützt eine hohe Granularität bei gleichzeitig hoher zeitlichen Auflösung, und einem Datendurchsatz, der für Umgebungen mit kontinuierlichem Teilchenstrahl optimiert ist. Im Rahmen des Projekts werden auch adaptive Pixelarchitekturen erforscht, die eine Rekonfiguration der Pixelgranularität in Echtzeit ermöglichen, um sie an hohe Hit-Raten anzupassen und die Effizienz in verschiedenen Detektorbereichen zu verbessern.

Neben der Hochenergiephysik haben MAPLE-Sensoren ein großes Potenzial für Anwendungen in der Medizintechnik. Ihr Einsatz ist in Ionentherapiezentren zur Strahlenüberwachung, Protonen-Computertomographie und Hochdosis-Dosimetrie in der FLASH-Krebstherapie vorgesehen. Diese Anwendungen erfordern skalierbare, hochauflösende und stromsparende Detektionssysteme - Kriterien, die die MAPLE-Architektur erfüllt.

Das Projekt nutzt einen simulationsgesteuerten Entwicklungsansatz, bei dem TCAD- und Monte-Carlo-Frameworks eingesetzt werden, um die Designparameter vor der Fertigung zu optimieren. Es legt außerdem Wert auf Herstellbarkeit und Nachhaltigkeit, indem es den Energie- und Materialverbrauch minimiert, die Integration ohne aktive Kühlung unterstützt und eine langfristige Systemeffizienz ermöglicht.

Das MAPLE-Projekt ist eine technologische Innovation und eine strategische Investition in die europäische Detektorforschung. Es stärkt das akademische Fachwissen in der Mikroelektronik, unterstützt die Ausbildung von Nachwuchskräften und bietet eine Grundlage für die künftige industrielle Umsetzung durch kommerziellen Transfer oder Spin-off-Strukturen.

Abstract

The MAPLE (Monolithic Active Pixel Sensors for Lepton Experiments) project aims to develop next-generation monolithic pixel detectors optimized for use in the vertex detectors of future lepton collider experiments, particularly the FCC-ee and its proposed detector concepts such as IDEA. These detectors must achieve extreme spatial resolution ($\leq 3 \mu\text{m}$), fast timing ($\leq 5 \text{ ns}$), ultra-thin sensor thickness ($\leq 50 \mu\text{m}$), and low power consumption ($\leq 50 \text{ mW/cm}^2$), all within a high-rate and radiation-constrained environment.

To meet these challenges, MAPLE introduces a novel sensor architecture based on a 65 nm CMOS imaging process, enabling full integration of sensing and readout electronics in a single, ultra-compact chip. This technology reduces material usage, simplifies mechanical integration, and improves signal integrity, while offering higher performance and scalability than hybrid alternatives.

A key innovation lies in developing mixed-mode ASICs combining low-noise analog front-end circuitry with advanced digital functionality for hit processing, time stamping, and sparse readout. The pixel design supports high granularity with timing precision and data throughput optimized for continuous beam environments. The project also explores adaptive pixel architectures, allowing real-time reconfiguration of pixel granularity to match spatial or occupancy requirements, enhancing efficiency across varied detector regions.

Beyond high-energy physics, MAPLE sensors have strong potential for medical technology applications. Their use is envisaged in ion therapy centers for beam monitoring, proton computed tomography, and high-dose-rate dosimetry in FLASH cancer therapy. These applications require scalable, high-resolution, and low-power detection systems—criteria the MAPLE architecture meets.

The project leverages a simulation-driven development approach, using TCAD and Monte Carlo frameworks to optimize design parameters before fabrication. It also emphasizes manufacturability and sustainability by minimizing power and material consumption, supporting integration without active cooling, and enabling long-term system efficiency.

The MAPLE project is a technological innovation and a strategic investment in European detector R&D. It reinforces academic expertise in microelectronics, supports early-career training, and offers a foundation for future industrial translation via commercial transfer or spin-off structures.

Projektpartner

- Österreichische Akademie der Wissenschaften