

GRZEGORZ DEPTUCH

Monolityczne detektory pikselowe w zastosowaniu do obrazowania z wykorzystaniem niskoenergetycznych elektronów i miękkiego promieniowania X

Streszczenie

Praca poświęcona jest monolitycznym krzemowym detektorom pikselowym, nazywanym MAPS (ang. *Monolithic Active Pixel Sensors*), w wybranym zastosowaniu do obrazowania przy użyciu niskoenergetycznych elektronów i miękkiego promieniowania X. Główną zaletą monolitycznych detektorów pikselowych jest możliwość ich projektowania jako układów scalonych przy użyciu standardowych narzędzi komputerowego wspomagania procesu projektowego i ich wytwarzania w całkowicie standardowym lub nieznacznie zmodyfikowanym typowym procesie używanym do produkcji układów scalonych. W ten sposób koszt wytwarzania detektorów monolitycznych jest niższy, szczególnie w porównaniu z kosztem wytwarzania detektorów hybrydowych. Te ostatnie wymagają specjalistycznych technik łączenia detektora z elektronicznym układem odczytowym, które są kosztowne i nie pozwalają na bardzo małe rozmiary pikseli. Jednak, mimo że w sposób naturalny detektory hybrydowe oferują znacznie szersze spektrum możliwości adaptacyjnych, np. wynikających z użycia materiałów innych niż krzem na detektor, to dla klasy zastosowań rozważanych w pracy detektory monolityczne stanowią wybór optymalny. Detektory monolityczne mogą mieć duże rozmiary i łatwiej niż detektory hybrydowe mogą być poddawane przystosowaniu mechanicznemu, co zostało wykorzystane w opisanych badaniach.

Szczególnie ważne w detekcji niskoenergetycznych elektronów, ze względu na dążenie do osiągnięcia wysokiej wydajności detekcji i wysokiej rozdzielczości przestrzennej, jest ścienienie detektora. Prace nad ścienianiem umotywowane były celami wyznaczonymi przez budowę urządzenia wykorzystującego elektrony wtórne, emitowane przez cienką folię aluminiową umieszczoną na drodze wiązki jonów, do monitorowania w czasie rzeczywistym dawki hadronowej w terapii nowotworów. Takie były cele projektu SUCIMA, prowadzonego w ramach Piątego Programu Ramowego Unii Europejskiej. Pierwszy ścienny detektor MAPS został zbudowany przy wykorzystaniu platformy jednomegapikselowego układu MIMOSA V. Detektor ten miał wymiary pełnej retykuły i był wytworzony w procesie CMOS o minimalnej długości bramki $0,6\ \mu\text{m}$. Detektor MIMOSA V, ścienny do grubości warstwy epitaksjalnej, został poddany dokładnym testom, które w szczegółach zostały przedstawione w monografii.

Do kalibracji wzmocnienia konwersji ładunku na napięcie detektora MIMOSA V wykorzystano metodę bazującą na niskoenergetycznych fotonach promieniowania X, emitowanych ze źródeł radioaktywnych. Z kolei niskoenergetyczne fotony promieniowania X z wiązki promieniowania synchrotronowego zostały wykorzystane do obrazowania przy użyciu detektora MIMOSA V. W wyniku ekspozycji uzyskano obrazy obiektów o wysokim kontraście i wysokiej rozdzielczości przestrzennej. Następnie ścienny detektor MIMOSA V został poddany testom w następujących zastosowaniach: do obrazowania w wyniku bezpośredniej detekcji elektronów przyspieszanych w polu elektrycznym w testowym sys-

temie hybrydowej fotodiody, do autoradiografii źródła próbki radioaktywnej nasyconej trytem oraz do uzyskiwania w czasie rzeczywistym obrazów w wyniku bezpośredniej detekcji elektronów w skaningowym i transmisyjnym mikroskopie elektronowym. Wszystkie te testy były pionierskie i pozwoliły na uzyskanie eksperymentalnego potwierdzenia przydatności detektorów MAPS w tych zastosowaniach.

Korzystając z sukcesu ścienienia i uzyskanych zadowalających wyników z testów układu MIMOSA V, zaprojektowano i zbudowano detektor MIMOTERA, który miał parametry dobrane do wymagań monitora wiązki w terapii hadronowej. Ze względu na konieczność uwarunkowaną pracą układu MIMOTERA opracowano do jego projektu nowe struktury diod zbierających ładunek, które charakteryzowały się obniżonym prądem upływu. Detektor MIMOTERA, po ścienieniu, został poddany dokładnym testom. W te testy włączone były eksperymenty obrazowania profilu wiązki pierwotnej w cyklotronie przy użyciu elektronów o energii 20 keV pochodzących z emisji wtórnej i rzutowanych na płaszczyznę detektora przez system elektrostatyczny w prototypowym monitorze wiązki hadronowej. Szczegóły przeprowadzonych testów i ich pozytywne wyniki zostały przedstawione w monografii.

Istotną część pracy poświęcono budowie detektorów MAPS w zaadaptowanych technologiach CMOS. W części tej skupiono się na technologii SOI i przedstawiono szczegóły zaawansowanych struktur układowych i detektorowych. Opisano również wypracowane ulepszenia do procesu wyjściowego, które pozwalają na usunięcie pierwotnie istniejących sprzężeń pomiędzy częścią zawierającą elektroniczny układ odczytowy a detektorem. Ta część monografii poświęcona jest niepodlegającemu dyskusji, ze względu na liczne korzyści, ukierunkowaniu prac na projekt struktury pikselu wyposażonego w układ przedwzmacniacza ładunkowego, w dyskryminatory oraz w liczniki do zliczania pojedynczych uderzeń cząstek. W pracy zamieszczono opis projektu w pełni funkcjonalnego detektora MAMBO, wykonanego w technice CMOS SOI z uwzględnieniem specyfiki sposobu projektowania układów scalonych w tej technologii, i prezentację wyników obrazowania z wykorzystaniem niskoenergetycznych fotonów promieniowania X. Jest to jednocześnie podsumowanie rozwoju pikselowych detektorów monolitycznych, które od stosunkowo prostych trójtranzystorowych architektur układowych ewoluowały do struktur zawierających ponad 1000 tranzystorów w każdym pikselu.

Przyszłość prac nad detektorami pikselowymi została nakreślona przez krótką prezentację techniki budowy układów zintegrowanych trójwymiarowo. Jest to kierunek rokujący duże nadzieje, który łączy w sobie zalety techniki monolitycznej i nowej generacji hybrydyzacji.

Monografia została zredagowana w sposób przedstawiający szczegółowo i chronologicznie przebieg badań nad możliwościami konstruowania i fizycznej realizacji detektorów pikselowych w technologii monolitycznej z uwzględnieniem wymagań ich praktycznego zastosowania.

GRZEGORZ DEPTUCH

Monolithic Active Pixel Sensors in Application for Imaging of Low-Energy Electrons and Soft X-Ray Photons

Summary

This work is dedicated to monolithic, silicon pixel detectors, called MAPS (Monolithic Active Pixel Sensors) in selected applications to imaging by using low-energy electrons and soft X-rays. The main advantage of monolithic detectors is the possibility of designing these devices as integrated circuits using standard tools for computer assisted design and their fabrication in a fully standard or slightly modified typical processes used for high-volume manufacturing of integrated circuits. The production cost of monolithic detectors is lower, particularly in comparison with hybrid detectors. The latter require specialized techniques for assembling a sensor part with an electronic readout circuit, which are expensive and do not allow for pixels of very small sizes. However, despite of the fact that hybrid detectors offer naturally a much wider range of adaptability and flexibility, for example, resulting from the use of materials other than silicon for a sensing part, monolithic detectors are the best choice for the class of applications that are under consideration in this work. Monolithic detectors can also be large area devices, and, easier than hybrid detectors, may be subjected to post-foundry processing including mechanical grinding and other adjustments which intrinsically bring not negligible mechanical stresses that often cannot be handled by hybrid options. The latter feature was exploited in the detector research included and described in this work.

Particularly important in the detection of low energy electrons, is thinning of a detector and providing an entrance window that will be as thin as possible in order to achieve high detection efficiency and high spatial resolution. The actual work on precise thinning of MAPS detectors down to the epitaxial layer was motivated by the construction of a device for the real-time beam monitoring in hadrontherapy of cancer. The concept was based on using secondary electrons emitted by a thin aluminum foil placed in the path of the beam used in treatments. These were the goals of the SUCIMA project that was carried out under the Fifth Framework Program funded by the European Union. First, thinned MAPS detector was built using a test platform of the one-megapixel MIMOSA V device. This detector had a size of a full reticle and was manufactured in a CMOS process with a minimum gate length of 0,6 μm . The MIMOSA V detector, which was thinned to the thickness of the epitaxial layer, was extensively tested, and its performances were compared to a device before post-processing. The results of tests are shown in detail in the monograph. A method based on low-energy X-ray photons, emitted from radioactive sources, was used for the calibration of a charge-to-voltage-conversion gain of a detector and is described in the monograph. The analysis proving correctness of this method is given too. Low energy X-ray photons from the beam of synchrotron radiation were used for tests of imaging capabilities of the MIMOSA V detector. Images of objects were obtained with high contrast and high spatial resolution as a result of exposures. Then, the thinned MIMOSA V detector was tested in such applications as: imaging by the direct detection of electrons accelerated by an

electric field in a hybrid photodiode test system, autoradiography of a radioactive sample containing tritium and to obtain real time images by the direct detection of electrons in a scanning and transmission electron microscope. All the tests were pioneering and led to the experimental confirmation of usefulness of the MAPS detectors in these applications.

Based on the success of thinning and on the equally satisfactory results of tests of the MIMOSA V detector, the MIMOTERA detector was designed and built. Its specification was matched to the performance requirements of the beam monitor in hadrontherapy. New structures of the charge collecting diodes, which were characterized by low leakage currents, were developed for the design of the MIMOTERA device due to the need conditioned by the environment and the way of how MIMOTERA had to work. The MIMOTERA device was thoroughly tested after completion of its thinning. Imaging experiments of a profile of a primary cyclotron beam were included in these tests using 20 keV electrons of the secondary emission from an Al foil. The electrons were projected on the plane of the detector by an electrostatic system in a prototype of a hadron beam monitor system. Details of the tests and positive results are presented in the monograph.

An important and extensive part of the monograph is devoted to the MAPS detectors built in adapted CMOS technologies. This culminative section focuses on the SOI technology and provides advanced details on the technology process that was used for the designs as well as it discusses unique features of the developed detector structures. A comprehensive description of the ongoing project of a family of fully functional detectors, called MAMBOs that are made in the SOI CMOS technology with emphasis on how to approach designing of mixed-mode integrated circuit the SOI technology is provided. As SOI processes exhibited sensitivity to detrimental coupling between the part containing the readout electronics and detector, improvements proposed to the process are also discussed in details. The changes to the process are presented starting from a general description and motivation through device physics simulation to the actual implementation as a part of the process. Not only the proposal of the process modification is presented but also the actual results obtained in testing of the circuits that were designed in the modified process are given. The detailed analyses of circuit blocks, like: a charge preamplifier with pole-zero cancellation, a shaping filter that is AC-coupled to a discriminator and counters to count individual particles hits are provided. The paragraph discussing monolithic detectors realized in the SOI technology gives a presentation of the results of imaging using low-energy X-ray photons and at the same time is a summary of the development of monolithic pixel detectors, which started with a relatively simple three-transistor architectures and evolved into structures containing over 1000 transistors in each pixel.

Future work on the pixel detector has been outlined by a brief presentation of the construction techniques of three-dimensional integrated circuits. This is the direction for future pixel detectors. It combines the advantages of the monolithic approach and hybridization, leading to a new generation of pixel detectors.

The monograph was drafted in a manner showing in detail and chronologically the course of research on the possibilities of design and of physical implementations of pixel detectors in monolithic technologies with regard to meeting the requirements of practical application.