

Entwicklung einer neuartigen Compton-Kamera für Gamma-Strahlung auf Basis eines Spurdetektors aus Si-Streifenzählern

Förderkennzeichen: 50 TT 97389

Förderzeitraum: 1. 8. 1990 bis 31. 12. 1998

Projektleiter: Dr. G. Kanbach, Prof. V. Schönfelder, F. Schopper
Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik
Postfach 1603
85740 Garching

Einleitung und Aufgabenstellung

Die Abbildung von γ -Strahlung ist ein fundamentales und in vielen Bereichen anzutreffendes Problem. Nicht nur in der Kernphysik und Isotopenchemie werden γ -Strahlung und Kernlinienstrahlung häufig gemessen, sondern auch in der Astrophysik, Umwelanalytik und Medizin ist die Beobachtung von Gammastrahlung im MeV-Bereich von großem Interesse. Da in diesem Energiebereich (0,1 bis 10 MeV) Strahlung mit Materie am stärksten über Comptonstreuung wechselwirkt, kann man eine hohe Effizienz des Systems nur dann erreichen, wenn man diese Wechselwirkung nutzt. Compton-Detektoren zeichnen sich daher gegenüber Detektoren, welche mittels eines Kollimators abbilden, durch eine hohe Empfindlichkeit bei gleichzeitig guter Winkelauflösung und einem weiten Blickwinkel aus.

Herkömmlicherweise werden in einem Compton-Teleskop nur die Energie des Rückstoß-Elektrons und die Richtung und Energie des gestreuten Photons vermessen. Durch diese Messungen ist der Streuprozess aber nicht vollständig definiert und die Rekonstruktion eines nachgewiesenen Photons ist nicht eindeutig: Die Einfallsrichtung des Photons läßt sich nur auf einen Konus von möglichen Richtungen festlegen (Ereigniskreis im Gesichtsfeld). Quellen können daher nur indirekt identifiziert werden, indem man mit Hilfe statistischer Methoden viele Ereigniskreise überlagert, welche sich im wahren Ort der Quelle schneiden. Dieses Verfahren ist stark hintergrundlimitiert, da sich die Ereigniskreise über das gesamte Gesichtsfeld erstrecken.

Kann dagegen zusätzlich zu Energie und Position auch die Richtung des bei der Streuung beschleunigten Elektrons bestimmt werden (electron-tracking), so ist die Kinematik des Streuprozesses vollständig bestimmt: Die Richtung eines einzelnen Photons läßt sich eindeutig und direkt rekonstruieren. Die Comptonwechselwirkung wird ab 10 MeV zunehmend von der Paarerzeugung abgelöst. Im Spurdetektor wird das Paar der erzeugten Elektronen und Positronen zur Abbildung der hochenergetischen Photonen genutzt.

Durch den Fortschritt in der Technologie von Silizium-Streifenzählern in Verbindung mit VLSI-Elektronik ist es nun möglich geworden, relativ große, hochgenaue Spurdetektoren zu bauen und damit eine vollrekonstruierende Compton-Kamera zu realisieren.

Im Unterschied zu Vertex-Detektoren, wie sie in der Hochenergiephysik angewandt werden, sind die Anforderungen an die Positionsauflösung in diesem Fall geringer (etwa 0.5 mm) aber die Anforderungen an die Energieauflösung höher (etwa < 10 keV FWHM). Daher wurden die Streifendetektoren für MEGA darauf ausgelegt, bei vorgegebenem Streifenabstand (470 μ m) die geringstmögliche elektrische Kapazität und möglichst geringe Leckströme zu erreichen.

Vorraussetzungen und Vorarbeiten

Das MPE verfügt über eine ausgezeichnete Erfahrung in Entwicklung und Bau von Teleskopen der γ -Astronomie. Es wurden sowohl Compton-Teleskope (COMPTEL und verschiedene Ballontelekope) als auch Paarerzeugungs-Teleskope (COS-B, EGRET) entwickelt und erfolgreich im Orbit betrieben. Für Design und Test der Halbleiterdetektoren steht das MPI-Halbleiterlabor zur Seite.

Seit 1994 beschäftigt sich eine Gruppe am MPE mit Comptonkamas auf Basis von Silizium Streifendetektoren und CsI Kalorimetern. Dabei wurden vor allem durch die Entwicklung von miniaturisierter Elektronik (Kollaboration mit IDE Oslo) der Grundstein zu größeren Kamerasystemen mit vielen Tausenden von Verstärkerkanälen gelegt.

Planung und Ablauf des Projekts

Vor der Auftragsvergabe wurde eine Beschreibung des Projekts und die Spezifikation der Streifendetektoren an alle in Frage kommenden (5) Halbleiterwerke geschickt. Nach eingehender Beurteilung der Angebote fiel die Entscheidung zugunsten der Firma EURISYS (Frankreich) aus, da sie sich als einzige mit dem vorgeschlagenen Testverfahren für die produzierten Wafer einverstanden erklärte.

Mit der Firma EURISYS wurden vertraglich Grenzwerte für die Akzeptanz der Wafer durch das MPE festgelegt, so dass das Risiko bei Produktionsschwierigkeiten von EURISYS getragen wurde. Durch dieses Vorgehen verzögerte sich zwar insgesamt die Lieferung, jedoch konnte nur so ein befriedigendes Ergebnis sichergestellt werden.

Der Auftrag zu Simulation und Design der Detektoren wurde an das Halbleiterlabor des MPI (Firma KETEK) vergeben. Dort wurden auch die Testmessungen an den Wafern durchgeführt.

Auftragsvolumen	Zeitraumen geplant	Zeitraumen realisiert	Tests abgeschlossen	Produktion abgeschlossen
Design und Masken	Okt.1997 - Nov.1997	Okt. 1997- Nov. 1997		
Produktion 25 Wafer	Dez.1997 - Feb.1998	Dez.1997 - Juli 1998		
Test der Wafer	1 Monat	1 Monat	Juli 1998	21 Wafer akzeptiert
Produktion 75 Wafer	Juni 1998 - Nov. 1998	Juni 1998 - Juni 1999		
Test der Wafer	2 Monate	2 Monate	Juli 1999	89 Wafer akzeptiert

Simulation und Design:

Nach den Erfordernissen von MEGA wurden folgende Randbedingungen festgelegt:

- Detektortyp: doppelseitiger Streifendetektor mit um 90° gedrehten Streifen auf gegenüberliegenden Seiten.
- Material: Resistivität 5.. 14 kΩcm, n-typ
Dicke 500 μm
Orientierung des Einkristalls <111>
- Geometrie: Gesamtfläche 63 x 63 mm²
aktive Fläche 60 x 60 mm²
Streifenabstand 470 μm
Anzahl der Streifen 128 pro Seite
- Elektronik: Kapazität der Streifen $C_s \leq 15$ pF
AC-Kopplung der Streifen $C_c \geq 20 \cdot C_s$
Biaswiderstände punch through
Trennung der n-strips moderate p-spray

Die Simulationen mit TOSCA ergaben minimale Kapazitäten für Streifenbreiten von 300 μm (p-seitig) und 200 μm (n - seitig).

Das Design der Streifendetektoren (Abbildung 1) wurde nach den Ergebnissen der Simulation entwickelt und daraus die Photomasken gefertigt. Genaue Daten zu Simulation und Layout werden, wie unten angegeben, veröffentlicht und daher hier nicht angeführt.

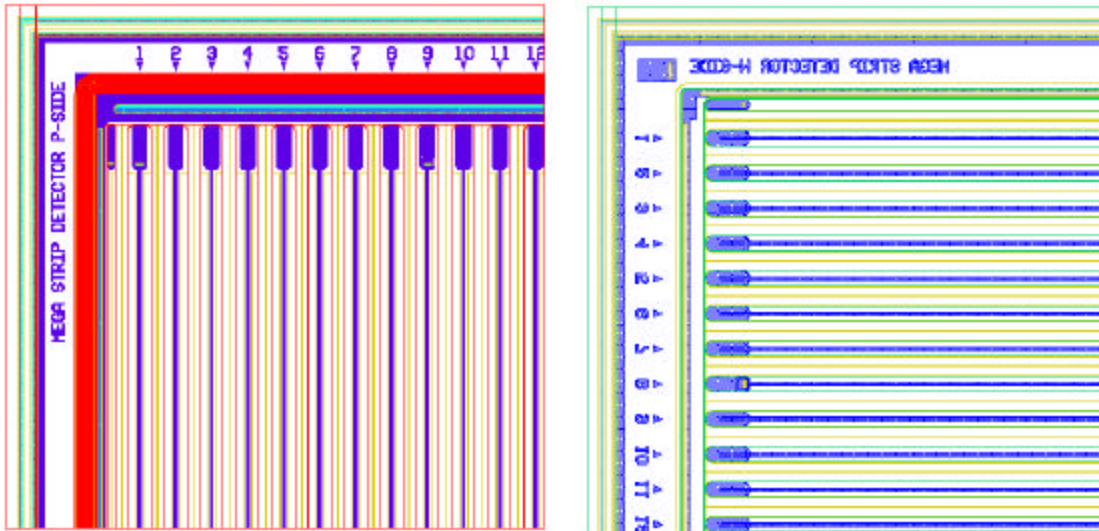


Abbildung 1: Design von Vorder- und Rückseite der Streifendetektoren.

blau: Metallisierung (Aluminium), rot: n+-Implantation, grün: p+-Implantation, gelb: Öffnung im Nitrid

Produktion:

Der Auftrag zur Produktion wurde in zwei Teilen zu 25 bzw 75 Wafer vergeben. Da EURISYS nicht über eine Nitrierungsanlage verfügt, wurde dieser Schritt der Prozessierung vom MPI Halbleiterlabor (HLL) übernommen bzw. an C.I.S. (Erfurt), einen Subkontraktor von EURISYS, vergeben.

Die Prozessierung des zweiten Auftrags fand vollständig bei C.I.S. statt. In Tabelle 2 sind die einzelnen Waferchargen zusammengefasst:

Tabelle2: Aufteilung der Produktion auf die verschiedenen Halbleiterfirmen und Vergleich der Ergebnisse:

Waferlieferung	Hersteller	prozessierte Wafer	getestete Wafer	nicht akzeptiert wegen:		akzeptierte Wafer
				Defekten	Leckstrom	
1.Auftrag 1.charge	EURISYS/HLL	10	10	0	1	9
1.Auftrag 2.charge	EURISYS/C.I.S	30	30	12	15	12
2.Auftrag	C.I.S.	$\geq 104^1$	104	25	19	62
Nachlieferung	C.I.S.	≥ 27	27	0	0	27
			171			110

Nach anfänglichen Schwierigkeiten, die zu einer geringen Akzeptanz seitens des MPE von $\leq 50\%$ führten, stabilisierten sich die Ergebnisse, so dass 64% der getesteten Wafer akzeptiert wurden. Die Prozessierung einer zusätzlichen Charge wurde nötig, nachdem mit der ursprünglich vorgesehen Anzahl Wafer die bestellte Anzahl an akzeptablen Wafern nicht erreicht werden konnte. Da bei Verhandlungen mit der Firma EURISYS für die Akzeptanz von Wafern mit etwas über der Spezifikation liegenden Leckströmen ein günstigerer Preis erreicht werden konnte, erhielten wir 110 statt der ursprünglich vorgesehenen 100 Wafer, ohne das Budget zu überschreiten.

Testverfahren und Testergebnisse:

Um die Einhaltung der Spezifikationen zu überprüfen, wurden umfangreiche Tests durchgeführt. Alle Tests an den Streifendetektoren wurden im Halbleiterlabor des MPI durchgeführt. Die Tests wurden nicht erst nach Beendigung der Produktion durchgeführt, sondern in chargen von 10 bis 40 Wafern, so dass bei negativem Testergebnis noch Fehlerquellen in der Produktion beseitigt werden konnten.

Die von EURISYS zugesicherten und vom HLL kontrollierten Spezifikationen waren folgende:

- Dynamischer Widerstand des punch-through Biasing:
spezifiziert: $> 100 \text{ M}\Omega$ gemessen: $>150 \text{ M}\Omega$
- Depletionsspannung:
spezifiziert: $< 80 \text{ V}$ gemessen: 60-70 V
- Kapazität der Auskoppelkondensatoren:
spezifiziert: $> 360 \text{ pF}$ gemessen: 370 pF
- Leckstrom maximal 1,5 μA bei Depletionsspannung:

¹ Es ist anzunehmen, dass für den zweiten Auftrag von EURISYS schon Vorsortierungen (nach Messung der Leckströme) durchgeführt wurden, bevor die Wafer ans Halbleiterlabor zu den Eingangstests geliefert wurden.

Der Leckstrom wurde bei schrittweiser Erhöhung der Vorspannung bis zur doppelten Depletionsspannung gemessen. Bis zur doppelten Depletionsspannung durfte kein Durchbruch (Ansteigen des Leckstroms auf Werte von mehreren 10 μA) auftreten.

Da es sich hierbei um ein wichtiges aber schwer zu erreichendes Kriterium handelt, wurden Leckstrommessungen an allen einzelnen Wafern vorgenommen. Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse aller Messungen bei voller Depletionsspannung. Wafer mit Leckströmen von 1,5 - 3,5 μA wurden zu reduziertem Preis akzeptiert. 24 Wafer wurden aufgrund von Leckströmen über 3,5 μA oder Durchbruch unterhalb von 100V zurückgewiesen.

Zusätzlich wurde die Langzeitstabilität an Teststrukturen (Dioden) auf einigen Wafern vermessen, wobei sich keine deutliche Erhöhung des Leckstroms, selbst nach mehreren Tagen, zeigte.

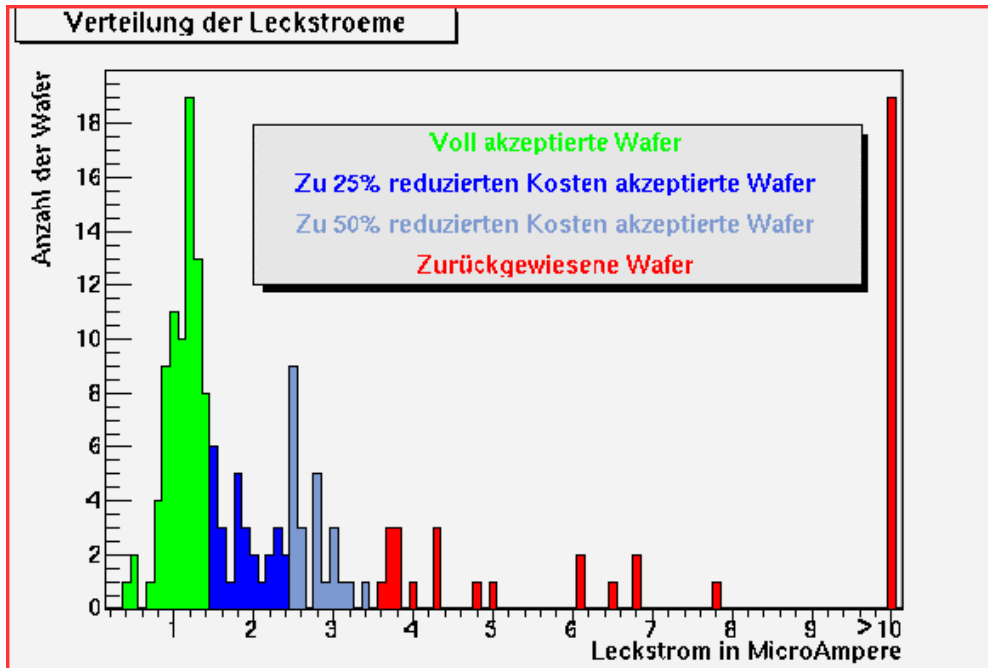


Abbildung 2: Zusammenfassung der Leckstrommessungen.

Grün markiert sind alle Wafer welche vollständig der Spezifikation entsprechen. Blau und gelb markierte Wafer haben höhere Leckströme als spezifiziert, diese sind aber niedrig genug, um nur unwesentlich zur Energieauflösung des Detektors beizutragen.

- Maximal 2 Streifen auf p- UND n-seite defekt:

Bei AC-gekoppelten Detektoren bildet eine isolierende Oxid/Nitridschicht zwischen Implantation und Aluminiumstreifen einen Kondensator, über den das Signal ausgekoppelt wird, aber kein Gleichstrom fließen kann.

Defekte entstehen meist durch Löcher in dieser Oxid/Nitridschicht und darauffolgendem Kurzschluss des entsprechenden Auskoppelkondensators. Der Kurzschluss kann leicht festgestellt werden, indem der Stromfluss zwischen der Aluminiumbahn und dem Biasring des Detektors gemessen wird. Die Durchbruchfestigkeit aller 128 Auskoppelkondensatoren jedes Wafers wurde auf einer automatischen Probestation bis zur doppelten Depletionsspannung getestet. Abbildung 3 zeigt die Verteilung der Anzahl defekter Streifen aller Wafer. Insgesamt wurden 38 Wafer aufgrund dieses Kriteriums zurückgewiesen.

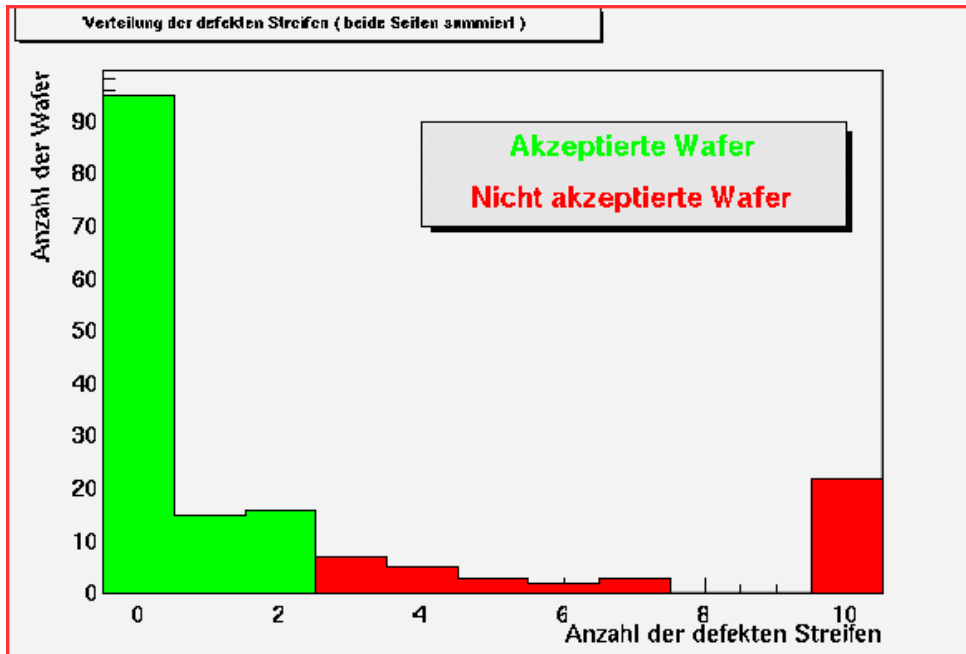


Abbildung 3: Zusammenfassung der Streifenmessungen aller 171 getesteten Wafer. Grün markiert sind alle Wafer bei denen, der Spezifikation entsprechend, maximal 2 Streifen defekt sind.

Integration der Silizium Streifenzähler in MEGA

Zur Integration der Wafer in die Layer wurden spezielle Träger aus dem Kunststoff PEEK gefertigt, auf die die Wafer geklebt und die Elektronikplatinen geschraubt werden.

Vor der Montage werden die Träger in zerlegbare, steife Rahmen aus Kunststoff gespannt und auf einer gefrästen Aluminiumplatte angesaugt. Ist der Träger auf diese Weise fixiert, werden die Wafer mit Epoxidharz eingeklebt und, nach Montage der Elektronikplatinen, auf beiden Seiten gebondet.

Endgültige Ergebnisse von MEGA können erst präsentiert werden, wenn die Kamera in Betrieb genommen wurde. Bislang liegen sowohl, teilweise veröffentlichte, Messergebnisse zu den einzelnen Detektoren vor, als auch Simulationsergebnisse zum gesamten System.

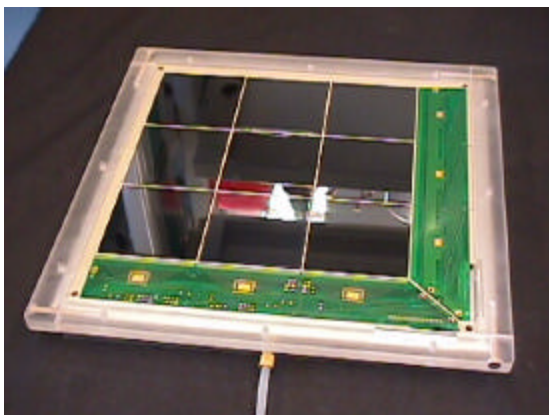


Abbildung 4: Eine Lage des Spurdetektors mit Elektronik. Der Schutzrahmen aus Kunststoff schützt die Detektoren vor Verunreinigungen und den Träger vor Verwindung bei der Handhabung.

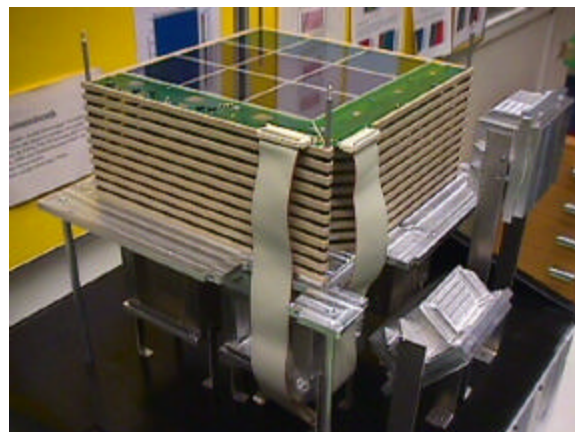


Abbildung 5: Der Stapel aus teilweise bestückten Trägerplatten.

Veröffentlichungen

Schopper F., Andritschke R., Zoglauer A., Nefzger C., Kanbach G., Schönfelder V.:
CsI calorimeter with 3-D position resolution.
Proceedings of "New developments in Photodetection", Beane (1999)

Schopper F., Andritschke R., Zoglauer A., Nefzger C., Diehl R., Kanbach G., Schönfelder V.:
Medium Energy Gamma Astronomy Camera
Proceedings of "5th Compton Symposium", Portsmouth, N.H., AIP (1999)

Kanbach G., Kemmer J., Lechner P., Lutz G., Richter R.H., Rohr P., Schopper F., Schönfelder V.,
Strüder L.
Development of Silicon Strip Detectors for the MEGA Satellite Mission
Eingereicht zu "Astronomical Telescopes and Instrumentation.", München SPIE (2000)