Matthias Böcker

Entwicklung und Aufbau eines DEPFET-Detektorsystems und erste Resultate

Diplomarbeit im Fachbereich Physik
der Universität Dortmund

Inhaltsverzeichnis

Einleitung

Halbleiterdetektoren, die seit den fünfziger Jahren in der Hochenergiephysik verwendet werden, bekommen aufgrund ihrer guten Orts- und Energieauflösung zunehmende Bedeutung in Biologie und Medizin. Es hat sich gezeigt, daß Halbleiterdetektoren mit guter Ortsauflösung in speziellen Systemen für Radiographie und Autoradiographie, einer speziellen Technik in der Bio-Medizin zum Nachweis radioaktiver Isotope in dünnen Untersuchungsobjekten, eingesetzt werden können [Ov98]. Die Verwendung von Halbleiterdetektoren in einem solchen System ermöglicht Echtzeit-Messungen, die mit den sonst üblichen Nachweismedien – photographische Platten, Filme und Emulsionen – nicht möglich sind.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und der Aufbau eines Detektorsystems, in dem ein spezieller Halbleiterdetektor – der DEPFET (**DEP**letierter **F**eld**e**ffekt-**T**ransistor) – betrieben wird. In diesem Bauelement sind die bisher getrennten Komponenten Detektor und erste Signalverstärkungsstufe zusammengefaßt. Ein solcher DEPFET-Detektor besitzt eine gute Ortsauflösung und sehr gute Energieauflösung und eignet sich im gepulsten Betrieb [Kl96] für langsame Signalauslese (zum Beispiel in der Autoradiographie).

In dieser Arbeit werden verschiedene DEPFET-Detektoren untersucht und in einem Detektorsystem betrieben. Diese Detektoren wurden in den Jahren 1993 und 1998 im Halbleiterlabor des Max-Planck-Instituts in München produziert und lagen als Einzelpixel-DEPFETs vor. Zunächst werden die Eigenschaften der verwendeten Strukturen studiert, um die für den Betrieb als Detektor notwendigen Arbeitspunkte zu finden. Anschließend werden DEPFET-Detektoren in einem hierfür entwickelten System mit speziellen Steuerchips (SWITCHER, [Au97]) zusammengeführt und als Detektor zum Nachweis von Photonen eingesetzt.

Kapitel 1

Autoradiographie

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die Autoradiographie gegeben. Autoradiographie ist ein in Biologie, Medizin und Pharmazie häufig verwendetes Verfahren zur Analyse verschiedenster bio-medizinischer Proben [Fi71]. Zunächst soll kurz auf Definition und geschichtliche Entwicklung der Autoradiographie eingegangen werden. Anschließend werden Methoden der filmlosen Autoradiographie vorgestellt.

1.1 Definition und Geschichte

Der Begriff Autoradiographie beschreibt ein bildgebendes Verfahren zum Nachweis von Radioaktivität in bio-medizinischen Proben [Ps98]. Das mit Hilfe der Autoradiographie aufgenommene Autoradiogramm – in der Regel eine Photographie – spiegelt die Häufigkeit und lokale Verteilung radioaktiver Isotope in dem zu untersuchenden Objekt wider. Im Gegensatz zur Radiographie, bei der das zu untersuchende Objekt Röntgen- oder γ-Strahlung ausgesetzt wird, enthält also bei der Autoradiographie das Untersuchungsobjekt selbst radioaktive Isotope und es sind keine zusätzlichen Strahlungsquellen erforderlich. Ihre medizinische Anwendung findet die Autoradiographie unter anderem in der histologischen Untersuchung von Geweben nach Speicherung eines für das Gewebe selektiven Isotops. Dies erlaubt funktionelle histologische Aussagen und die Untersuchung von Stoffwechselvorgängen nach Applikation tritiummarkierter Substanzen. In der Autoradiographie muß der Abstand des zu untersuchenden Objektes und des bildgebenden Systems (eine photographische Platte oder ein anderes System zur Detektion radioaktiver Strahlung) so klein wie möglich gehalten werden. Ist dieser Abstand zu groß, so nimmt man Verluste in der räumlichen Auflösung hin, denn die vom Objekt ausgesendete radioaktive Strahlung wird dadurch in einiger räumlicher Entfernung vom Entstehungsort detektiert. Dieser hier nicht erwünschte Effekt wird auch Parallaxen-Effekt genannt.

Die Entwicklung der Autoradiographie geht auf die Entdeckung der Radioaktivität durch Henri Becquerel und Niepce de St. Victor zurück [Ro97]. Beide beobachteten, daß photographische Platten in der Nähe uranhaltiger Mineralien geschwärzt werden. Die Forschung auf dem Gebiet der Radioaktivität wurde in den folgenden Jahren intensiviert und besonders durch die Eheleute Marie und Pierre Curie vorangetrieben und wird auch heute noch in erster Linie mit dem Namen Curie verbunden. Aber erst als man gegen Ende des zweiten Weltkrieges die Radioaktivität genauer verstand, radioaktive Präparate besser isoliert werden konnten und die Meßapparaturen empfindlicher und präziser wurden, entwickelte sich die Autoradiographie und wurde immer mehr zu einer weit verbreiteten Untersuchungsmethode. Dies nicht zuletzt aufgrund der Tatsache, daß nun auch radioaktive Präparate mit Anwendungsmöglichkeiten in der Biologie und Medizin zur Verfügung standen.

1.2 Filmlose Autoradiographie

Aufgrund der historischen Entwicklung und in Ermangelung geeigneter Alternativen wurde Autoradiographie lange Zeit ausschließlich mit Hilfe photographischer Platten, Filme oder Emulsionen betrieben. Obwohl auf diesem Gebiet große Fortschritte gemacht wurden, vor allem in bezug auf Körnung der Filme und Entwicklungstechniken, stößt diese Art der Autoradiographie immer mehr an ihre Grenzen. Einige Nachteile der Autoradiographie unter Verwendung photographischer Platten, Filme oder Emulsionen werden hier aufgeführt:

- Die Energie, ab der ein radioaktives Teilchen nachgewiesen werden kann, hängt stark von der Körnung des verwendeten Filmmaterials und der Güte des Entwicklungsprozesses ab.

- Ab einer bestimmten Größe der deponierten Energie erreicht das Filmmaterial seinen Sättigungsbereich und der Nachweisbereich wird eingeschränkt.

- Die Energie ionisierender Strahlung kann in der Regel nicht gemessen werden.

- Inhomogenitäten des Filmmaterials führen zu Verfälschung der Messungen.

- Zahlreiche Arbeitsschritte sind notwendig, um das fertige Autoradiogramm zu erhalten (verschiedene Entwicklungsschritte). Dadurch wird das Verfahren relativ zeitaufwendig.
- Es besteht keine Möglichkeit während einer Messung eine Vorschau auf das Resultat zu erhalten. Erst nach der Entwicklung des Films ist ein Blick auf das Resultat möglich. Eine Echtzeit-Messung ist nicht möglich.

Der letztgenannte Nachteil der Autoradiographie mit photographischen Platten, Filmen oder Emulsionen wiegt besonders schwer. Werden für eine Messung falsche Parameter gewählt (zum Beispiel eine zu kurze Meßzeit), so erkennt man diesen Fehler erst spät und das bedeutet, daß ein ganze Messung solange wiederholt werden muß, bis der richtige Meßparameter gefunden wird – ein sehr zeitaufwendiges und mitunter teures Verfahren.

1.2.1 Phosphor Imaging Plates

Eine mögliche Alternative sind bildgebende Phosphorplatten (phosphor imaging plates) [Mi86]. Anfang der 80er Jahre wurde diese Technik entwickelt. Die Platten besitzen im Kristall Fehlstellen, die mit Elektronen besetzt werden, wenn ionisierende Strahlung dort Energie deponiert. Diese angeregten Zustände sind langlebig (die Halbwertszeit beträgt ca. 21 Tage bei 20° C Temperatur). Ein mit diesen Platten aufgenommenes Autoradiogramm ist im Kristall gespeichert. Durch Bestrahlung der Platte mit Licht einer bestimmten Wellenlänge können die Elektronen wieder aus den Fehlstellen entfernt werden und emittieren dabei Licht einer anderen Wellenlänge. Dieses Licht kann mit Hilfe von Elektronenvervielfachern (photomultiplier) detektiert werden. Ein Laser kann also die Platte abtasten und das gespeicherte Bild mit Hilfe von Elektronenvervielfachern und spezieller Elektronik in ein digitales Bild umgewandelt werden.

1.2.2 Digitale Autoradiographie

Verfahren, die Echtzeit-Messungen erlauben, werden mit Hilfe digitaler Elektronik realisiert und deshalb häufig unter dem Begriff digitale Autoradiographie zusammengefaßt. Die vorgestellten Verfahren basieren auf ortsempfindlichen Detektoren, die häufig ihren Ursprung in der Elementarteilchenphysik haben.

Ein für die Autoradiographie sehr wichtiger Detektortyp ist die Vieldrahtproportionalkammer. Sie wurde Ende der 60er Jahre für ein Experiment der

Teilchenphysik am CERN (europäisches Labor für Teilchenphysik) entwickelt [Ch68].

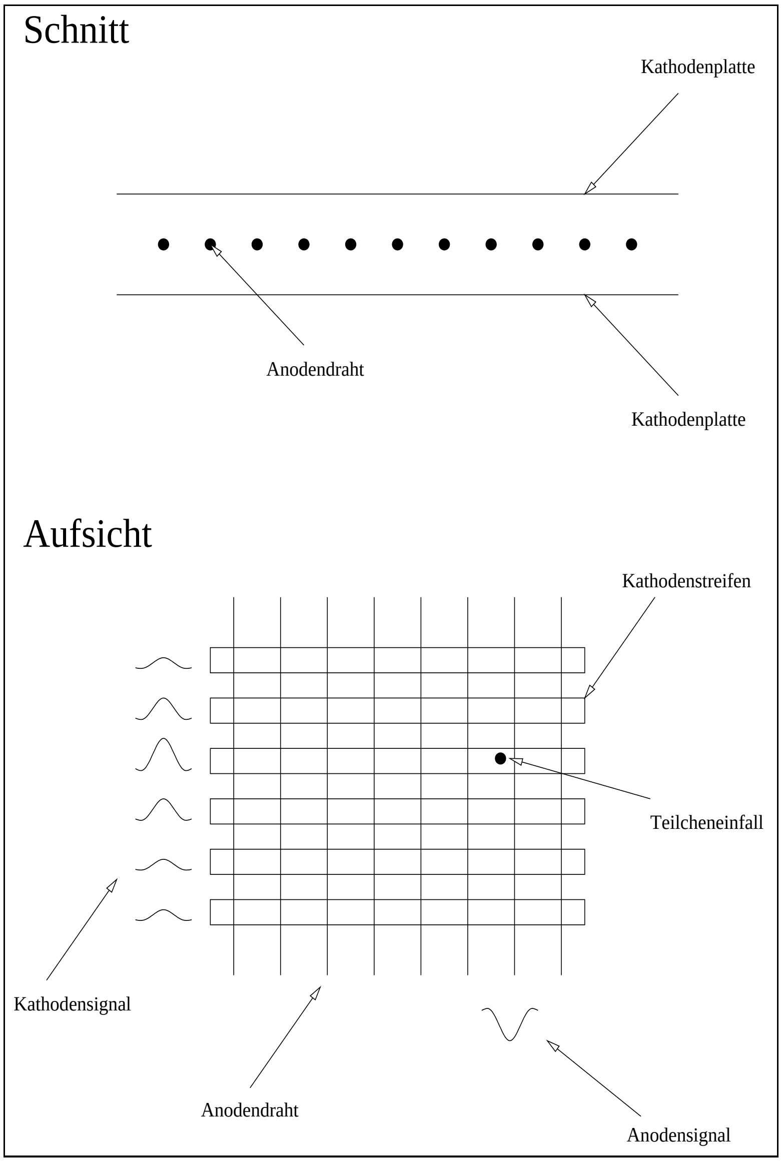


Abbildung 1.1: Prinzipieller Aufbau einer Vieldrahtproportionalkammer

Dieser Detektor besteht aus zwei Kathodenplatten zwischen denen in gleichmäßigen Abständen Anodendrähte gespannt sind. Die Kammer ist mit Gas gefüllt. Zwischen den Anodendrähten und den Kathodenplatten wird Gleichspannung angelegt. Wird nun ein Gasmolekül durch radioaktive Strahlung ionisiert, so driften die Elektronen zu den Anodendrähten und influenzieren durch ihre Bewegung im elektrischen Feld einen meßbaren Strom in den

Elektroden. In der Nähe der Anodendrähte können die Elektronen genug Energie erhalten, um andere Gasmoleküle zu ionisieren. Durch Messung des Stromsignals kann man auf den Ort des Einfalls der ursprünglichen ionisierenden Strahlung schließen. Um nicht nur eindimensionale Auflösung zu erhalten, werden die Kathoden in gleichgroße Segmente aufgeteilt und zwar senkrecht zur Richtung der Anodendrähte. Dadurch erhält man zweidimensionales Ortsauflösungsvermögen. Einige Experimente zur Autoradiographie basieren auf dem Konzept einer Vieldrahtproportionalkammer und den aus ihr entwickelten Detektortypen [Do89].

Auch Halbleiterdetektoren werden in der Autoradiographie zum Nachweis radioaktiver Strahlung eingesetzt. Die in den Halbleiterkristall einfallende Strahlung verliert dort Energie und hebt Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband des Halbleiters. Es entstehen freie Ladungsträger – Elektronen und Löcher. Werden diese Ladungsträger in der sogenannten Verarmungszone im Halbleiter erzeugt, so werden sie durch ein Driftfeld getrennt und influenzieren durch ihre Bewegung einen Strom. Eine detaillierte Erläuterung der Strahlungsdetektion mit Halbleiterdetektoren findet sich im Kapitel 2.

Seit den 60er Jahren werden Halbleiterdetektoren immer wichtiger für den Nachweis radioaktiver Strahlung und die Röntgenspektroskopie. In den 80er Jahren gelang es durch Fortschritte bei der Herstellung von Halbleiterbauelementen (Planartechnologie), Halbleiterdetektoren mit unterteilten Anoden und Kathoden herzustellen und somit zweidimensionale Ortsauflösung zu erhalten. Anfang der 90er Jahre wurden solche Halbleiterdetektoren auch für die Autoradiographie interessant [Sa93] [Sc90]. Ein spezielles, kommerziell erhältliches Autoradiographiesystem soll im folgenden vorgestellt werde.

1.3 Beispiel: kommerzielles Autoradiographiesystem

Das hier vorgestellte Beispiel für ein kommerzielles Autoradiographiesystem – das *Bioscope*^{TM}-System[1] basiert auf Silzium-Mikrostreifendetektoren und selbsttriggernden Auslesechips. Es kann sowohl für Radiographie als auch für filmlose Autoradiographie verwendet werden. Dieses System wurde in einer europäischen Kollaboration entwickelt unter Mitwirkung von:

- CERN, Genf, Schweiz,

---

[1] Trademark der Firma IDE AS, Oslo, Norwegen

- IDE AS, Oslo, Norwegen,
- Physikalisches Institut, Universität Bonn, Deutschland,
- Insitut für Nuklearphysik, Universität Krakau, Polen,
- Institut für Zellbiologie, Universität Bonn, Deutschland und
- dem Insitut für Strahlenphysik, Universität Lund, Schweden.

1.3.1 Aufbau des Autoradiographiesystems

Das Autoradiographiesystem besteht aus sechs verschiedenen Komponenten:

- einem Hybrid, auf dem sich der Silizium-Mikrostreifen-Detektor und Halbleiterchips zur Auslese und Steuerung des Detektors befinden,
- zwei Analog-Transceiver-Cards (ATC),
- Opto-Kopplern,
- einer Digital-Transceiver-Card (DTC),
- einem System auf PC-Basis zur Datennahme und
- einer Spannungsversorgung.

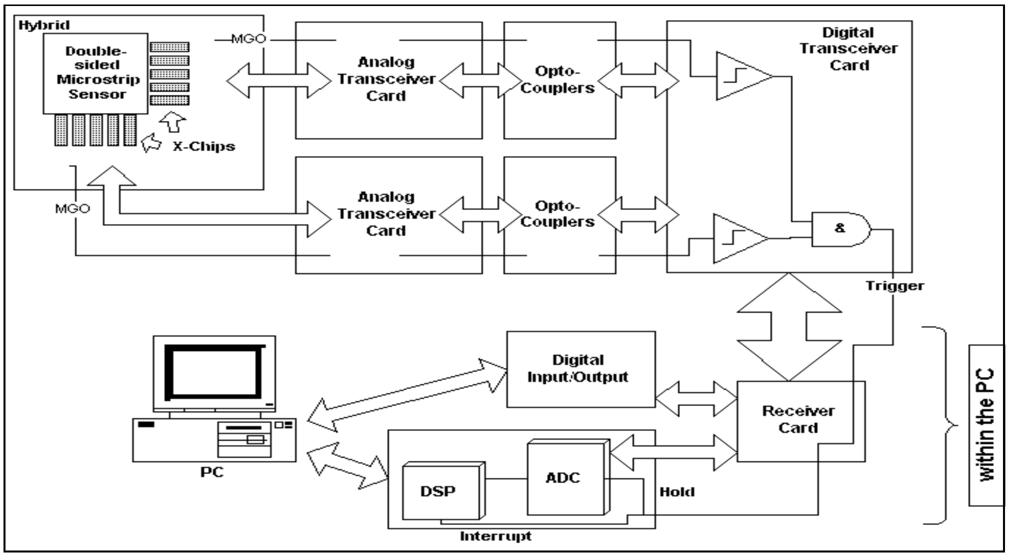


Abbildung 1.2: Blockdiagramm des Bioscope-Systems [Ov98]

Das Hybrid ist ein eine spezielle Leiterplatte mit einer Aussparung, in die der Detektor geklebt werden kann. Das ermöglicht Kontaktierungen auf beiden Seiten des Detektors. Die Verbindungen zwischen Detektor und Steuer- und Auslesechips sind mit Hilfe feinster Drähte, sogenannter wire bonds, direkt von Chip zu Chip realisiert. Die Kontaktflächen (pads) der Auslese- und Steuerchips sind via wire bonds mit auf dem Hybrid aufgebrachten Leiterbahnen verbunden. Diese Leiterbahnen haben einen Abstand von 170 μm und müssen in einem speziellen Prozeß hergestellt werden. Die ATCs bestehen aus:

- einem Spannungsteiler, der ±6 V einer externen Spannungsversorgung in ±2V für die Versorgung der Steuer- und Auslesechips umwandelt,
- regelbaren Spannungsquellen für die Einstellung der Betriebsparameter,
- einigen Strom-Spannungs-Wandlern für die Verstärkung und Umwandlung der Ausgangssignale und
- einem Multiplexer zur Beobachtung ausgewählter Versorgungs- und Kontrolleitungen.

1.3.2 Arbeitsweise des Autoradiographiesystems

Jede ATC wird über drei digitale Leitungen angesteuert und liefert sieben analoge Ausgangssignale (sechs Ausgangssignale der Steuer- und Auslesechips und einen Monitor-Ausgang). Diese und andere für die Steuer- und Auslesechips notwendigen Signale werden über Opto-Koppler zwischen den ATCs und der DTC ausgetauscht. Aufgabe der DTC ist es, zeitliche Koinzidenzen zu bestimmen, d.h. ob Signale auf beiden Seiten des Halbleiterdetektors gleichzeitig in einem bestimmten Zeitintervall (zum Beispiel innerhalb von 0,5 μs) detektiert werden. Die hierfür notwendigen Signale sind die Ausgangssignale der Steuer- und Auslesechips. Ferner kann die DTC Ereignisse verwerfen, bei denen auf jeder Seite mehr als ein Streifen des Detektors ein Signal produziert hat. Die DTC erzeugt dann ein Triggersignal, welches zusammen mit den analogen Signalen von den ATCs zu einem Datennahmesystem auf PC-Basis geleitet wird. Empfängt das Datennahmesystem ein Triggersignal von der DTC, so werden die zwölf analogen Signale der ATCs mit Hilfe eines Analog-Digital-Konverters in digitale Signale umgewandelt. Nach Verarbeitung der Daten durch einen digitalen Signal-Prozessor (DSP), welcher die Adressen der getroffenen Streifen dekodiert, werden diese in einem

Ringspeicher abgelegt. Von dort werden die Daten in einen PC übertragen.

Im folgenden wird am Beispiel einer Genlisea-Pflanze beschrieben, wie man mit Hilfe dieses Systems ein Autoradiogramm erstellen kann:

Die Genlisea-Pflanze ist eine seltene in den tropischen Regionen Afrikas und Südamerikas vorkommende Pflanze, die keine Wurzeln besitzt. Sie ernährt sich von Mikroorganismen (Einzellern). Die Genlisea besitzt y-förmige Blätter, die im Boden verankert sind und eine komplizierte Struktur aufweisen, um Mikroorganismen aufzunehmen. Obwohl es zahlreiche Indizien dafür gab, daß die Mikroorganismen in der Pflanze festgehalten werden, so existierte kein wissenschaftlicher Nachweis, daß diese Mikroorganismen tatsächlich von der Genlisea-Pflanze verwertet werden [Ov98].

Für das an der Universität Bonn durchgeführte Experiment wurden Einzeller (tetrahymena thermophila) mit ^{35}S-Methionin radioaktiv markiert. Mit diesen markierten Einzellern wurde das Wasser einer Hydrokultur, in der die Genlisea-Pflanzen im Botanischen Garten der Universität Bonn wuchsen, versetzt. Nach zwei Tagen wurden die Pflanzen in eine andere Kultur überführt, in der sie weitere zwölf Tage belassen wurden. Anschließend wurden die Pflanzen getrocknet und zwischen einer Pappe und einer 3 μm dicken Mylar-Folie fixiert. So verpackt wurde die Genlisea-Pflanze auf den Mikrostreifendetektor gelegt und ein Autoradiogramm erstellt. Die Aufnahmezeit betrug zehn Minuten.

Die Aufnahme (Abbildung 1.3) zeigt im unteren Bereich das y-förmige Blatt, welches sich in der Regel unter der Erdoberfläche befindet. Im oberen Bereich erkennt man die Genlisea-Pflanze mit ihren zehn Blättern. Im Bild erkennt man, daß das im Boden verankerte y-förmige Blatt die höchste Konzentration an Einzellern besitzt (blau). Eine Reusenstruktur mit fünf horizontalen Linien ist ebenfalls zu erkennen. Die Aufnahme zeigt, daß digitale Autoradiographie mit Hilfe von Halbleiterdetektoren sehr gute Ergebnisse liefert und den hohen Anforderungen in bezug auf Ortsauflösung und Minimierung der Meßzeit gerecht wird.

Eine ausführlichere Beschreibung des Systems findet sich in [Ov98], in der auch die verschiedenen Aspekte der Autoradiographie detailliert dargelegt werden.

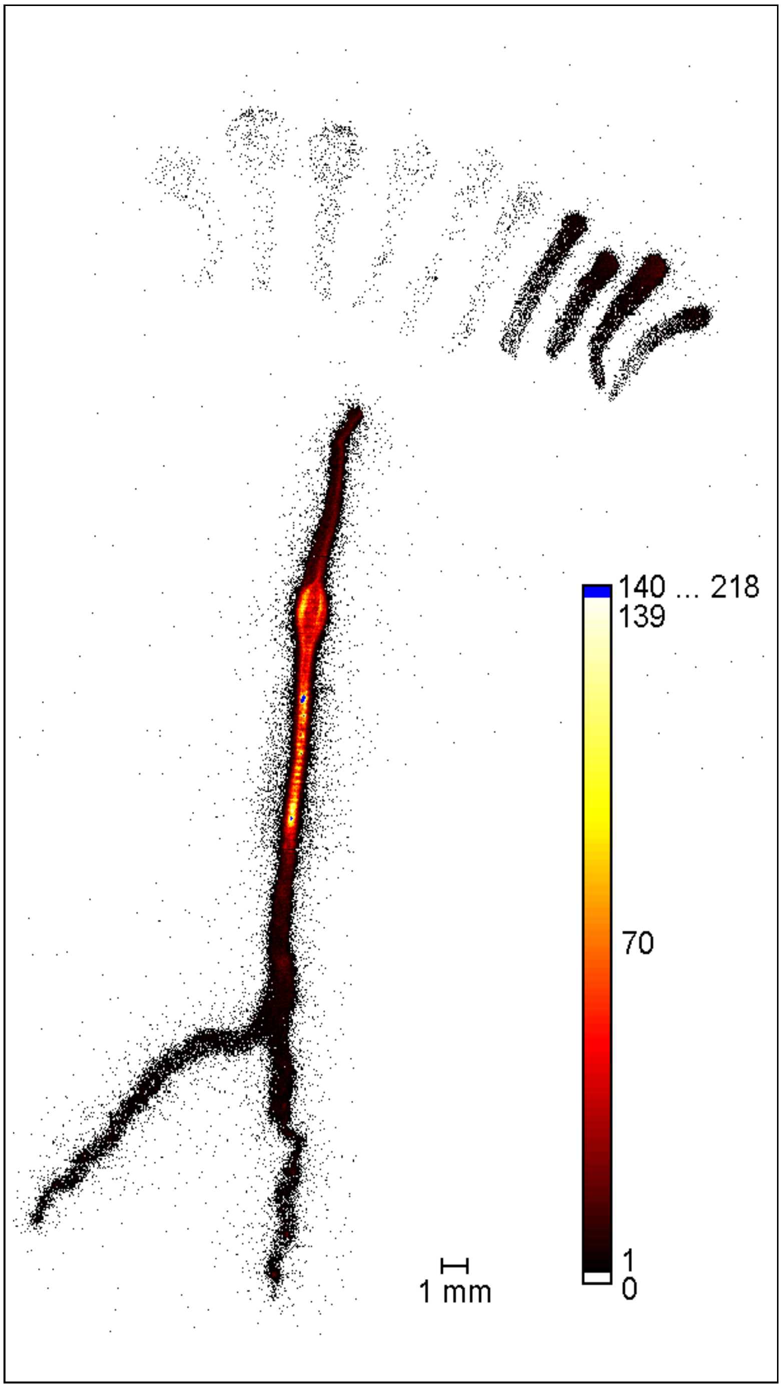


Abbildung 1.3: Autoradiogramm einer Genlisea-Pflanze [Ov98]

Kapitel 2

Der DEPFET-Detektor

In diesem Kapitel wird ein spezieller Halbleiterdetektor – der DEPFET-Detektor – vorgestellt. Die Abkürzung DEPFET steht für vollständig **DEP**-letierter **F**eld**e**ffekt-**T**ransistor. Die in bisherigen Nachweissystemen getrennten Komponenten Detektor und erste Signalverstärkungsstufe sind hier in einem Bauelement zusammengefaßt. Ein solcher DEPFET-Detektor besitzt eine gute Ortsauflösung und sehr gute Energieauflösung.

2.1 Grundlagen der Halbleiterphysik

Wie bereits in Kapitel 1 beschrieben, beruht das Prinzip der Strahlungsdetektion mit Halbleiterdetektoren auf der Wechselwirkung der einfallenden Strahlung mit einem Halbleiter.

In einem Halbleiterkristall bilden sich durch Überlagerung der Wellenfunktionen der Elektronen Energiebänder aus – das Valenzband und das Leitungsband. Diese beiden Energiebänder sind durch eine Bandlücke voneinander getrennt, die die elektrischen und optischen Eigenschaften des Halbleiters im wesentlichen bestimmt. Zur Leitfähigkeit des Halbleiters tragen sowohl Elektronen im Leitungsband als auch fehlende Elektronen im Valenzband, sogenannte Löcher, bei. Damit ein Elektron vom Valenzband in das Leitungsband gelangen kann, muß es genug Energie aufnehmen, um die Bandlücke überwinden zu können. Dies kann zum Beispiel durch thermische Anregung geschehen. Die Energie kann aber auch von geladenen Teilchen oder Photonen, die den Halbleiter durchfliegen, auf ein Valenzelektron übertragen werden. Geladene Teilchen oder Photonen mit hinreichend hoher Energie können also im Halbleiterkristall Elektronen-Loch-Paare erzeugen. Die mittlere Energie, die hierzu notwendig ist, beträgt für Silizium bei Raumtemperatur 3,6 eV. Dieser Wert für Silizium ist um eine Größenordnung kleiner als bei herkömmlichen Gasdetektoren. Bei gleichgroßer Energiedeposition entstehen im Silizium also wesentlich mehr Elektronen-Loch-Paare und das gemessene Signal ist wesentlich größer. Zur Erzeugung solcher Ladungsträgerpaare führen verschiedene Effekte. Photonen mit einer Energie oberhalb von $1,12$ eV (dies entspricht einer Wellenlänge von $\lambda \approx 1107$ nm) können in Silizium (Bandlücke: $1,12$ eV) Elektronen vom Valenzband in das Leitungsband heben [Sz81]. γ-Strahlung kann über den Photoeffekt, den Comptoneffekt und Paarproduktion Ladungsträgerpaare erzeugen. Geladene Teilchen können durch Bremsstrahlung, inelastische Stöße und elastische Streuung einen Teil ihrer Energie im Halbleiterkristall deponieren. Die Bethe-Bloch-Formel beschreibt den mittleren Energieverlust eines geladenen Teilchens wie folgt [Be30]:

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = \frac{4\pi e^4 z^2 N Z}{m_e c^2 \beta^2} \left[\ln \left(\frac{2 m_e c^2 \beta^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right) \right] \tag{2.1}$$

mit:

c = Lichtgeschwindigkeit,
β = Geschwindigkeit der einfallenden Teilchen in Einheiten von c,
z = Ladung des einfallenden Teilchens,
m_e = Ruhemasse des Elektrons,
e = Elementarladung,
Z = Ordnungszahl des Mediums,
N = Atomzahldichte des Mediums,
I = mittleres Ionisationspotential des Mediums,
δ = Dichteeffekt-Korrektur.

Teilchen mit einer Energie von $E \geq 3,5mc^2$ bezeichnet man als minimal ionisierende Teilchen (MIP), denn trägt man den mittleren Energieverlust eines Teilchens gegen die Gesamtenergie auf, so durchläuft die Kurve bei $E = 3,5mc^2$ ein Minimum und steigt zu höherer Energie hin nur noch leicht an. Der wahrscheinlichste Energieverlust eines solchen MIPs, welches eine 300 μm dicke Siliziumschicht (eine übliche Dicke von Siliziumscheiben) durchfliegt, beträgt ca. 84 keV und das MIP erzeugt dabei ungefähr 23300 Elektronen-Loch-Paare, also etwa 4 fC Ladung.

2.2 Strahlungsdetektion mit Halbleiterdioden

2.2.1 Der pn-Übergang

Das Prinzip aller heute bekannten Halbleiterdetektoren beruht auf der Ausbildung von pn-Übergängen. Diese pn-Übergänge sind Zonen, an denen sich unterschiedlich dotierte Halbleitergebiete berühren. Dies sind Gebiete, in die gezielt fremde Atome in das Silizium-Kristallgitter eingebracht sind. Wird mit Elementen der V. Hauptgruppe des Periodensystems der Elemente dotiert, so entsteht ein n-dotierter Halbleiter, werden Elemente der III. Hauptgruppe verwendet, so entsteht ein p-dotierter Halbleiter. Elemente der V. Hauptgruppe werden in diesem Zusammenhang Donatoren genannt, da sie ein Valenzelektron mehr besitzen, als für den Einbau in das Kristallgitter notwendig ist, Elemente der III. Hauptgruppe werden Akzeptoren genannt, da sie ein Valenzelektron zu wenig besitzen. An der Kontaktfläche von p-dotiertem und n-dotiertem Halbleiter entsteht ein sogenannter pn-Übergang. Aufgrund der unterschiedlichen Konzentration der Elektronen und Löchern in den verschieden dotierten Gebieten, diffundieren zunächst die Löcher in die n-dotierte, die Elektronen in die p-dotierte Zone und rekombinieren dort. Durch diese Diffusion und die entsprechenden, fest in das Kristallgitter eingebauten Atomrümpfe der Fremdatome wird die n-dotierte Zone positiv und die p-dotierte Zone negativ geladen und es entsteht ein elektrisches Feld, welches der Diffusion der Elektronen und Löcher entgegenwirkt. Das die Diffusion hemmende Potential U ist abhängig von der Konzentration der Fremdatome in den dotierten Gebieten und der Temperatur [Sz81]:

$$U = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) \tag{2.2}$$

mit:

N_A = Konzentration der Akzeptoren,
N_D = Konzentration der Donatoren,
n_i = intrinsische Ladungsträgerdichte,
k = Boltzmann-Konstante,
T = Temperatur,
e = Elementarladung.

An der Kontaktfläche bildet sich so eine von freien Ladungsträgern verarmte Zone aus, die Depletionszone, auch Raumladungszone genannt. Verändert man nun durch Anlegen einer äußeren Spannung das elektrische Feld am pn-Übergang, so kann man die Größe der Depletionszone variieren und bei einem

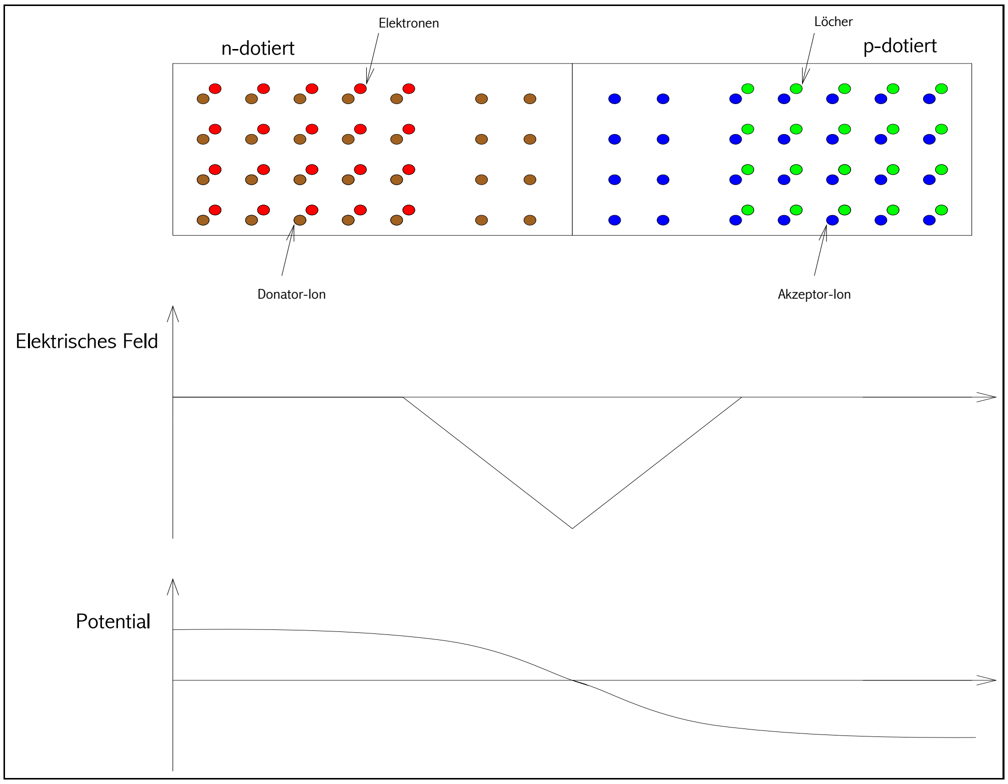


Abbildung 2.1: Der pn-Übergang nach [Le93]

Halbleiterdetektor fast auf das gesamte Detektormaterial ausdehnen. Ist die von außen angelegte Spannung der die Diffusion hemmenden Spannung gleichgerichtet, so berechnet sich die Weite der Depletionszone zu [Sz81]:

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_r}{e}\left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D}\right)(U + U_{DEP})} \tag{2.3}$$

mit:

N_A = Konzentration der Akzeptoren,
N_D = Konzentration der Donatoren,
e = Elementarladung,
U = Diffusionsspannung,
U_{DEP} = angelegte Sperrspannung (Depletionsspannung),
ϵ_0 = Dielektrizitätskonstante,
ϵ_r = Dielektrizitätszahl.

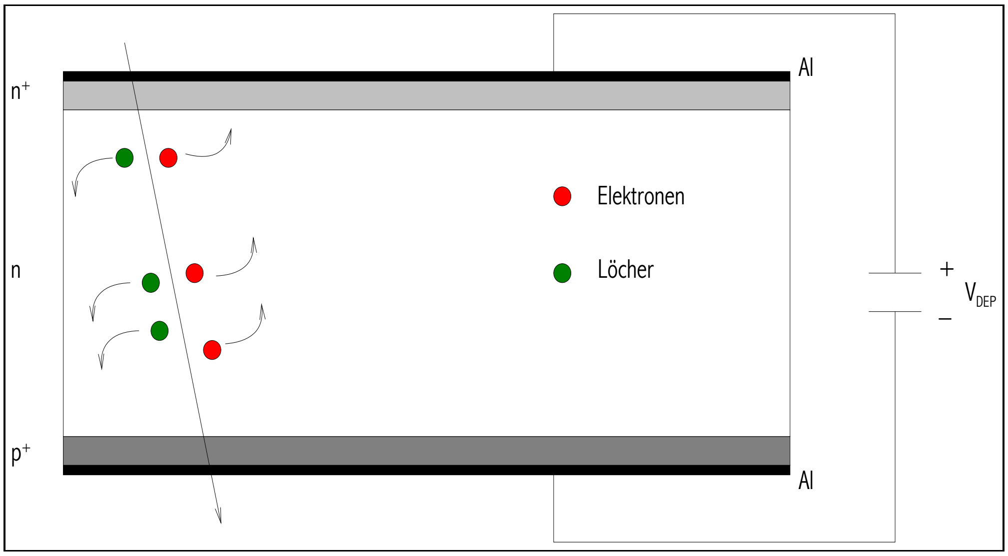


Abbildung 2.2: Die Halbleiterdiode als Detektor

Werden in dieser Depletionszone Ladungsträgerpaare erzeugt, so werden sie durch das elektrische Feld an der Rekombination gehindert und driften zu den jeweiligen Elektroden. Dort erzeugen sie ein negatives bzw. positives Signal. Dieses Signal kann mit Hilfe eines ladungsempfindlichen Vorverstärkers ausgelesen werden.

2.2.2 Die Seitwärtsdepletion

Die Seitwärtsdepletion [Ga84] erlaubt es, einen Halbleiterdetektor mit einer kleineren als der bei herkömmlicher Bauweise notwendigen Depletionsspannung vollständig zu verarmen. Dies erreicht man durch zwei gegenüberliegende pn-Dioden.

Wie in Abbildung 2.3 zu sehen wird die beiden Dioden gemeinsame n-Schicht über eine seitliche n^+-Implantation kontaktiert. Die Depletion erfolgt in dieser Bauweise von beiden Seiten des Detektors. Vollständige Verarmung wird schon bei einem Viertel der Depletionsspannung eines einfachen pn-Übergangs erreicht. Abhängig von der angelegten Spannung an den beiden p-dotierten Gebieten bildet sich ein Potentialminimum zwischen diesen aus. Wählt man als x-Richtung die Richtung senkrecht zur Oberfläche des Detektors, so erhält man mit Hilfe der Poisson-Gleichung für das Potential φ:

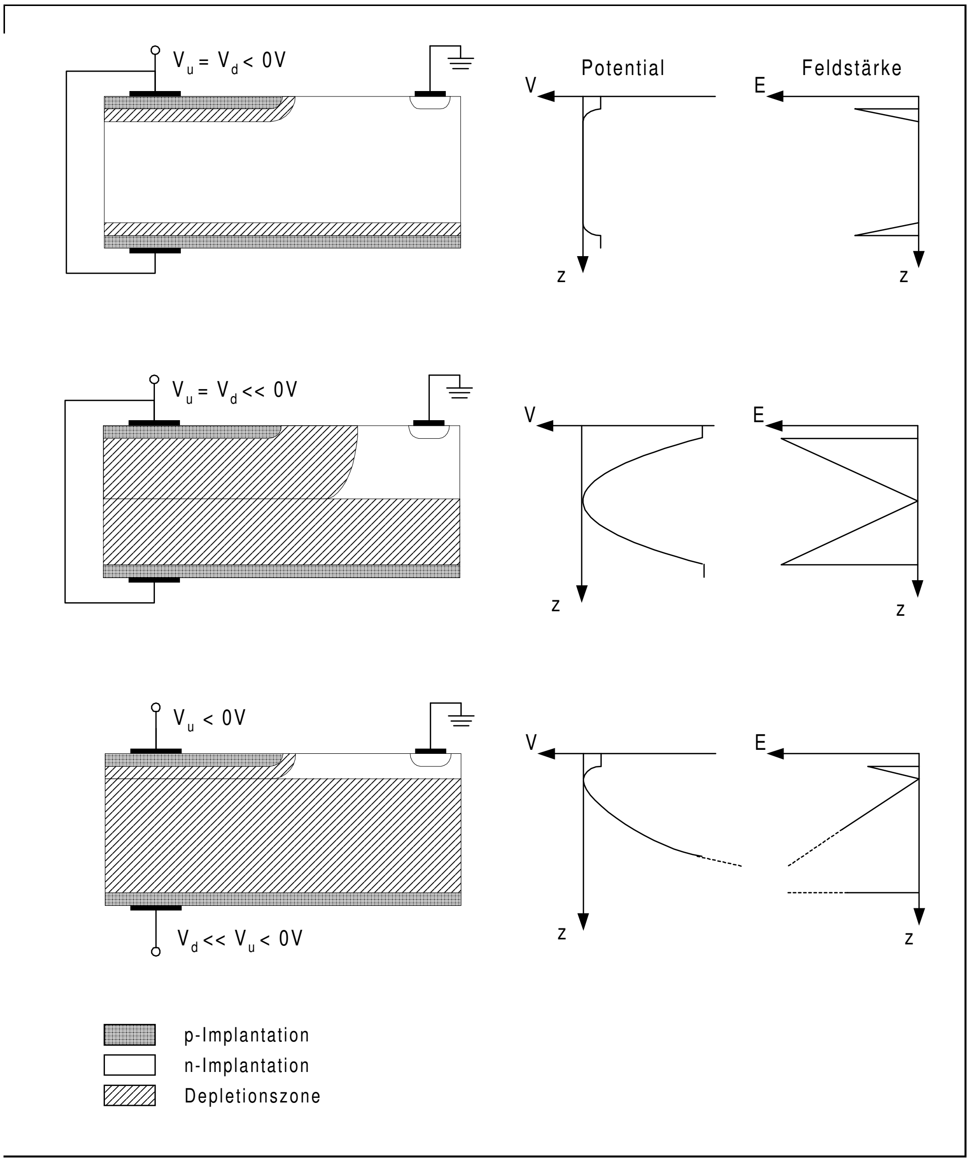


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der Seitwärtsdepletion [Kl91] (hier: $V_u = U_{oben}, V_d = U_{unten}$)

$$\varphi(x) = \frac{\rho}{2\epsilon_0\epsilon_r} x(d-x) + \frac{x}{d}(U_{unten} - U_{oben}) + U_{oben}. \tag{2.4}$$

Das Potentialminimum liegt bei:

$$x_{Minimum} = \frac{d}{2} + \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\rho d}(U_{unten} - U_{oben}) \tag{2.5}$$

mit:

ρ = Ladungsträgerdichte,
U_{oben} = Sperrspannung an der Oberseite des Detektors,
U_{unten} = Sperrspannung an der Unterseite des Detektors,
d = Dicke des Detektors,
ϵ_r = Dielektrizitätszahl,
ϵ_0 = Dielektrizitätskonstante.

Werden die beiden p-Implantationen des Detektors in verschiedene Segmente geteilt und die nun getrennten p-Implantationen auf verschiedene Potentiale gebracht, so kann man das elektrische Feld im Detektor in einer speziellen Weise formen. Die Silizium-Drift-Kammer [Ga84] arbeitet nach diesem Prinzip. Die p-Implantationen werden mit zunehmendem Abstand von der n-Implantation auf höheren Potentialen gehalten. Dadurch entsteht zusätzlich zu dem durch die Seitwärtsdepletion erzeugten elektrischen Feld ein diesem überlagertes Driftfeld, in dem Elektronen zur Anode getrieben werden.

2.3 Aufbau eines JFETs

In der Meßelektronik haben **F**eld**e**ffekt-**T**ransistoren (FETs) eine herausragende Bedeutung. Signale müssen in der Regel zunächst verstärkt werden, bevor sie weiterverarbeitet werden können. Meist werden diese Signale noch zusätzlich durch die verwendeten Kabel abgeschwächt. Die erste Verstärkerstufe, der Vorverstärker, ist oft aus FETs aufgebaut. Eine spezielle Bauform des FET ist der sogenannte Sperrschicht-FET (Junction-FET, kurz: JFET). Am Beispiel eines p-Kanal-JFET wird das Funktionsprinzip im folgenden erläutert.

Wie in Abbildung 2.4 dargestellt besitzt der p-Kanal-JFET insgesamt vier Kontakte. An der Ober- und Unterseite befindet sich je ein Gate-Kontakt, an den Seiten zwei niederohmige Kontakte namens Source und Drain. Wird nun an der Drain ein negatives Potential angelegt, während das Potential an der Source auf $U_S = 0$ V gehalten wird, fließt ein Strom I_{DS} positiver Ladungsträger (Löcher) von der Source zur Drain (siehe Abbildung 2.5). Dieser Strom ist proportional zur Spannungsdifferenz U_{DS} zwischen Drain-und Source-Kontakt und hängt von den geometrischen Abmessungen des p-Kanals ab. Dieser Bereich der Ausgangskennlinie (I_{DS} wird gegen U_{DS} aufgetragen) wird linearer Bereich genannt. Der Strom I_{DS} hängt aber auch vom Einfluß der Gate-Kanal-Dioden – also auch vom Potential am Gate – ab. Wird das Drain-Potential stärker negativ, so dehnen sich die Raumladungszonen der Gates aus. Dies führt zu einer mit dem Drain-Potential zunehmenden Sperrpolung der Gate-Kanal-Dioden und zu einer Verringerung des Querschnitts des Kanals. Der Widerstand des Kanals wird dadurch größer und die Ausgangskennlinie weicht von ihrem ohmschen Verhalten ab. Bei Erreichen der sogenannten Sättigungsspannung $U_{D,sat}$ zwischen Drain- und Source-Kontakt berühren sich die Raumladungszonen der Gates und schnüren somit den Kanal des JFETs vollständig ab. Der Strom wird nahezu unabhängig von der angelegten Drainspannung. Der JFET ist in Sättigung. Mit weiterer Erhöhng der Spannung an der Drain steigt der Strom I_{DS} nur noch langsam. Wird die Spannungsdifferenz U_{DS} allerdings so groß, daß eine Gate-Kanal-Diode durchbricht, so steigt der Strom I_{DS} sehr stark an.

Will man den Strom im p-Kanal variieren, so kann dies zum einen durch Erhöhung der Spannungsdifferenz U_{DS} erreicht werden, zum anderen aber auch durch Änderung der Potentiale an den Gate-Kontakten, um so den Einfluß der Gate-Kanal-Dioden auf den Strom zu erhöhen oder zu verringern. Die Gate-Spannung, bei der sich die Raumladungszonen im Transistor berühren, nennt man Abschnürspannung (Pinch-Off-Voltage). Abbildung 2.4 zeigt anschaulich den Einfluß des Drain-Potentials auf den Kanalstrom I_{DS}. Mit einem hohen positiven Potential an den Gates kann der Stromfluß im Transistor vollständig abgeschaltet werden.

Die Herstellung solcher JFETs erfolgt mit Hilfe der Planartechnologie [Ke84]. Die dotierten Halbleitergebiete werden durch Einschießen der Fremdatome in einen Halbleiter erzeugt. Das gewünschte Dotierungsprofil erhält man mit Hilfe von Masken aus Fotolack, die auf das Silizium aufgebracht werden und somit an den nicht zu dotierenden Stellen die eingeschossenen Fremdatome absorbieren. Auch durch Variation der Einschußenergie und der Dosis der Fremdatome wird das Profil beeinflußt.

2.4 Der DEPFET

Moderne Experimente der Elementarteilchenphysik verwenden ausgefeilte Elektronik zur Verarbeitung von Detektorsignalen. Wie bereits früher erwähnt müssen diese Signale in der Regel verstärkt werden, damit sie wei-

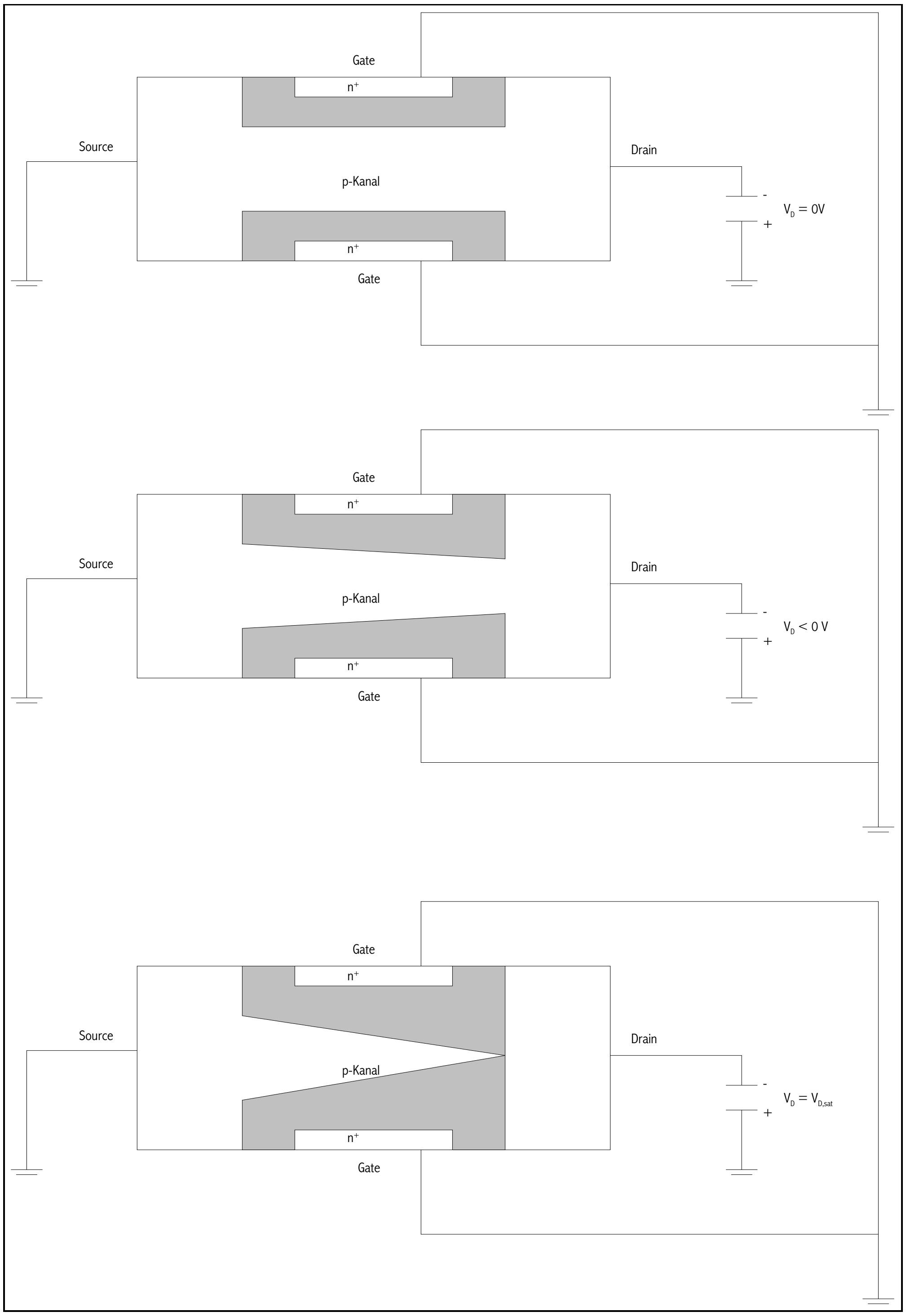


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung eines JFETs

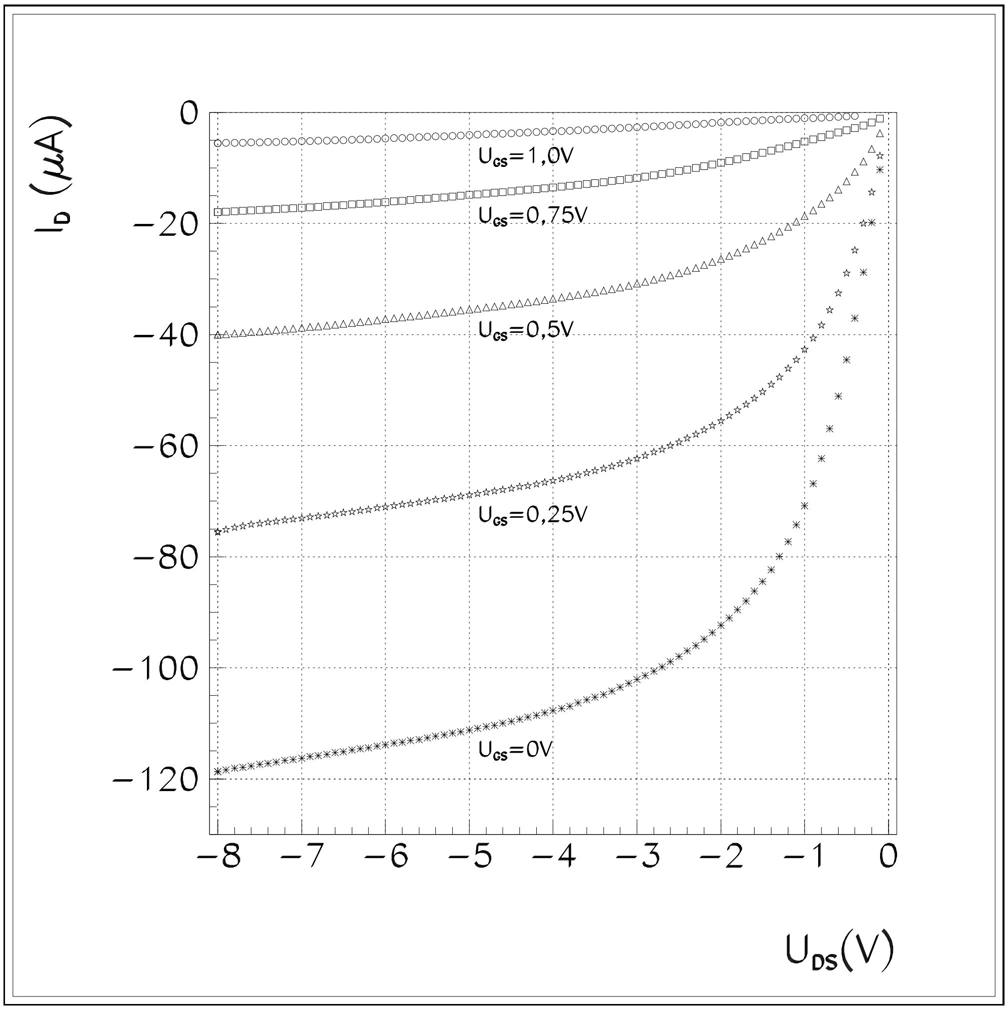


Abbildung 2.5: Ausgangskennlinienfeld eines Feldeffekt-Transisitors

terverarbeitet werden können. Um Störungen durch Streukapazitäten und Abschwächung in Kabeln gering zu halten, sollte die Zahl der Verbindungen und die Distanz zwischen Signalentstehung und erster Verstärkerstufe möglichst klein gehalten werden. Dies ist bei heutigen Hochenergieexperimenten leider nicht immer möglich. Eine Lösung dieses Problems besteht darin, die erste Verstärkerstufe direkt in den Detektor zu integrieren. Dies ist im DEPFET (**DEP**letierter **F**eldeffekt-**T**ransistor) realisiert. In ihm ist ein seitwärtsdepletierter Halbleiterdetektor mit einem JFET vereint [Ke90]. Häufig wird dieser Detektor auch als DEPJFET bezeichnet. In dieser Arbeit wird im folgenden nur noch die Bezeichnung DEPFET und FET verwendet. Gemeint ist stets ein DEPJFET bzw. ein JFET.

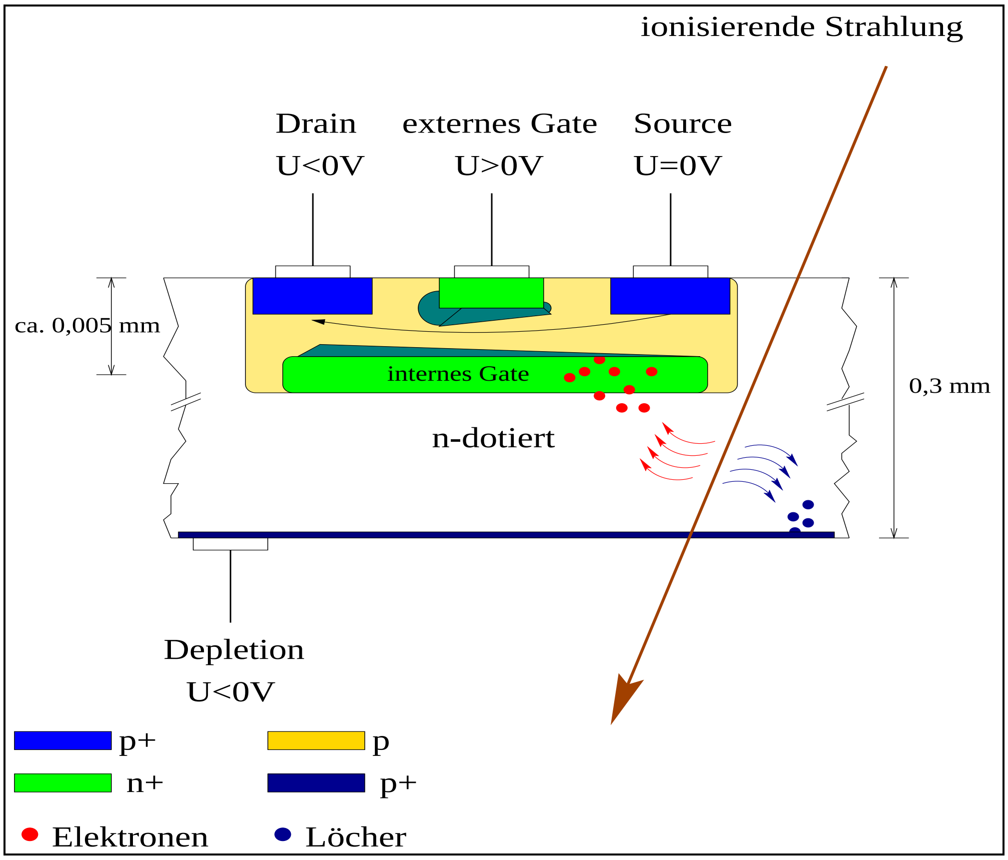


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung eines DEPFETs

Das Funktionsprinzip eines solchen DEPFET-Detektors veranschaulicht Abbildung 2.6. Der DEPFET-Detektor besteht aus n-dotiertem Silizium. Von der Rückseite ist eine hochdotierte p-Implantation eingebracht, die man mit p^+-dotiert bezeichnet. Auf dieser p^+-dotierten Rückseite ist ein Aluminiumkontakt realisiert, über den man den Detektor durch Anlegen einer Depletionsspannung U_{DEP} vollständig verarmen kann. Auf der Vorderseite des Detektors ist mit verschiedenen p- und n-Implantationen ein p-Kanal-JFET realisiert. Die Abbildung zeigt die geometrische Anordnung der Implantationen. Auf der Oberseite sind drei Kontakte zu erkennen. Dies sind zum einen zwei p^+-dotierte Gebiete – die Source und die Drain – und zum anderen ein n^+-dotiertes Gebiet – das Gate. Diese Implantationen sind umschlossen von einer p-Implantation, dem p-Kanal. Unter dem Kanal befindet sich eine n^+-Implantation, die mit deep-n bezeichnet wird. Diese deep-n-Implantation fungiert im DEPFET als zweites Gate und wird internes Gate genannt. Im Gegensatz zum Standard-JFET gibt es beim DEPFET also nur ein Gate, das von außen kontaktierbar ist. Wird der DEPFET-Detektor nun durch Anlegen einer Depletionsspannung vollständig verarmt, so bildet sich im Bereich des FET eine spezielle Feldkonfiguration aus.

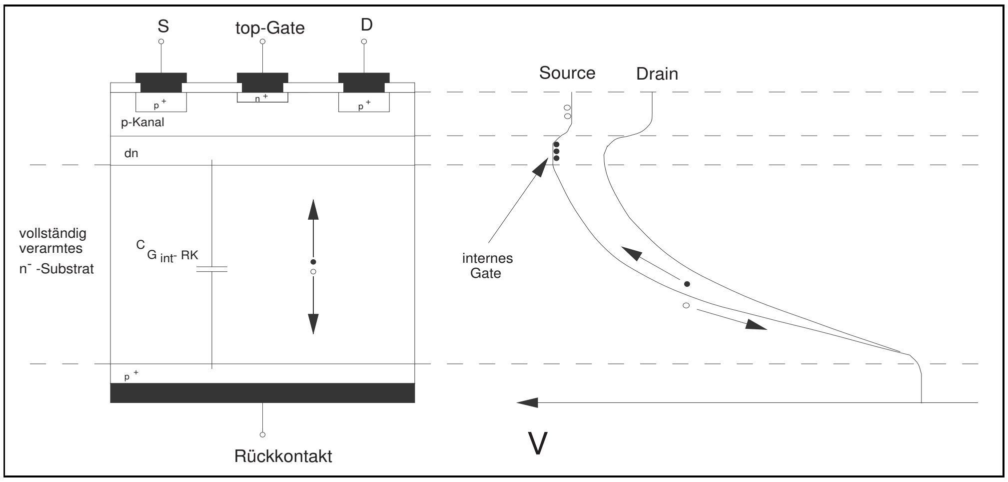


Abbildung 2.7: Potentialverhältnisse im DEPFET [Ho96]

Für freie Elektronen, die zum Beispiel durch Ionisation im Detektor erzeugt werden, ensteht ein Potentialminimum im internen Gate (Abbildung 2.7). Die im Detektor erzeugten Elektronen-Loch-Paare werden durch das elektrische Feld getrennt, die Löcher werden zur Rückseitenelektrode abgezogen, und die Elektronen sammeln sich im internen Gate. Das Potential des internen Gates wird somit negativer, durch den oben beschriebenen Einfluß der Gate-Kanal-Diode (internes Gate – p-Kanal) wird der Kanalquerschnitt vergrößert, und der Strom im Transistor nimmt bei angelegter Drain-Source-Spannung zu. Dieser Stromanstieg kann mit Hilfe einer angeschlossenen Ausleseelektronik nachgewiesen werden. Mit Hilfe einer positiven Spannung am externen Gate kann der Stromfluß im Transistor von außen gesteuert und auch vollständig abgeschaltet werden.

Werden beim Durchgang ionisierender Teilchen Ladungsträgerpaare erzeugt, so füllt sich das interne Gate mit Elektronen. Bei einer bestimmten, im internen Gate befindlichen Ladungsmenge nimmt die Steuerwirkung des internen Gates auf den Transistorstrom ab. Hat das interne Gate ein so negatives Potential, daß der Kanal seinen maximal möglichen Querschnitt erreicht hat, so haben zusätzliche ins interne Gate gelangende Elektronen keinen Einfluß mehr auf den Transitorstrom. Diesen Vorgang bezeichnet man auch als Vollaufen des internen Gates, wodurch der Detektor insensitiv wird. Aus diesem Grund muß das interne Gate in regelmäßigen Abständen geleert werden. Hierfür wurden zwei verschiedene Typen DEPFETs mit unterschiedlichen Löschverfahren entwickelt: der Continuous-Clear-DEPFET und der Pulsed-Clear-DEPFET.

Beim Continuous-Clear-DEPFET (Abbildung 2.8) wird, wie der Name schon sagt, das interne Gate kontinuierlich geleert. Dazu ist eine vertikale n^+pn-Struktur in den DEPFET im Bereich des JFETs integriert. Die n^+-Implantation ist von außen kontaktierbar; dies ist der Clear-Kontakt. Legt man nun an diesem Kontakt ein festes positives Potential an, so werden kontinuierlich Elektronen aus dem internen Gate abgesaugt. Der Continuous-Clear-DEPFET besitzt keinen externen Gate-Kontakt. Dieser kann im nicht depletierten Zustand über einen Substrat-Kontakt (InBulk) und das interne Gate auf das gewünschte Potential gelegt werden.

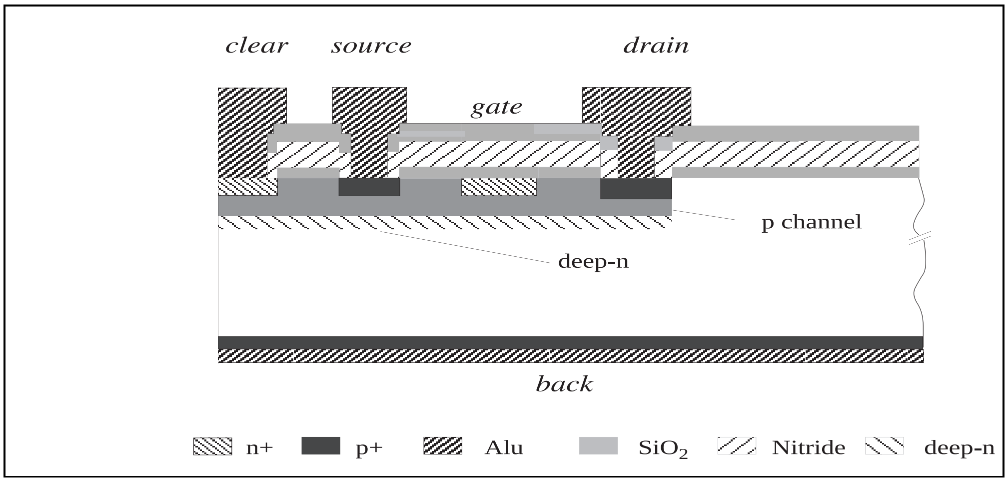


Abbildung 2.8: Schnitt durch einen Continuous-Clear-DEPFET [Ce96]

Beim Pulsed-Clear-DEPFET (Abbildung 2.9) wird hingegen in regelmäßigen

Abständen das interne Gate geleert. Hier ist eine n^+-Implantation außerhalb des Bereichs des JFETs eingebracht. Diese Implantation ist von außen kontaktierbar. Legt man an diesen Clear-Kontakt ein hohes positives Potential an, so wird die Potentialbarriere zwischen internem Gate und Clear-Kontakt so klein, daß Elektronen aus dem internen Gate diese Barriere überwinden können und über den Clear-Kontakt abfließen können.

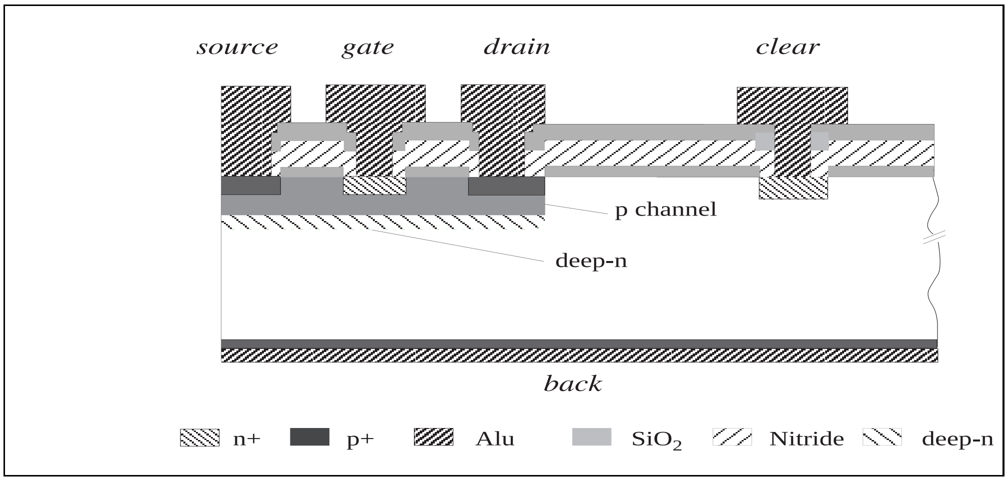


Abbildung 2.9: Schnitt durch einen Pulsed-Clear-DEPFET [Ce96]

Während der Continuous-Clear-DEPFET permanent sensitiv ist und keine Totzeit besitzt, so ist der Pulsed-Clear-DEPFET insensitiv solange die Clear-Spannung anliegt. Der Continuous-Clear-DEPFET ist aus diesem Grunde bei Experimenten mit hohen Ereignisraten (zum Beispiel in der Elementarteilchenphysik) dem Pulsed-Clear-DEPFET vorzuziehen. Für Messungen wie sie bei der Autoradiographie durchgeführt werden müssen, besitzt der Pulsed-Clear-DEPFET allerdings den Vorteil, daß eine Art Zwischenspeicherung der Signale möglich ist. Da die Signalelektronen solange im internen Gate gespeichert werden, bis von außen die Clear-Spannung angelegt wird, kann man den Zeitpunkt der Messung des Transistorstroms in bestimmten Grenzen frei wählen und die im DEPFET gespeicherten Informationen mehrmals auslesen. Der zeitliche Abstand zwischen zwei Löschvorgängen wird dadurch begrenzt, daß die Messungen durch im Detektormaterial thermisch erzeugte Elektronen, die sich ebenfalls im internen Gate sammeln, verfälscht werden. In dieser Arbeit wurden ausschließlich Pulsed-Clear-DEPFETs, die im Halbleiterlabor des Max-Planck-Institut in München produziert werden, untersucht. Es ist möglich, nicht nur einzelne DEPFET-Pixel-Strukturen zu produzieren, sondern auch Matrixanordnungen von bis zu 64 mal 64 DEPFET-Pixeln[1]. Sol-

---

[1] Pixel = Bildpunkt

che Einzelpixel-DEPFETs und DEPFET-Matrizen sind zu Testzwecken in verschiedenen Formen realisiert, so daß es zum Beispiel DEPFET-Matrizen gibt, bei denen die einzelnen Clear-Kontakte untereinander oder bei denen alle Kontakte der externen Gates einer Zeile und alle Drain-Kontakte einer Spalte der Matrix miteinander verbunden sind.

Die Produktion solcher DEPFETs erfordert eine spezielle, sehr aufwendige Prozeßtechnologie, die sich von Standard-Planartechnologien unterscheidet. Da sich diese spezielle Prozeßtechnologie noch in der Entwicklung befindet, wird jeder Prozeßschritt ständig überwacht und laufend optimiert. Dies macht das Verfahren zeitaufwendig und teuer.

Kapitel 3

Das Steuer- und Auslesesystem

Um einen DEPFET-Detektor in einem auf die speziellen Anforderungen der Autoradiographie zugeschnittenen System betreiben zu können, muß dieser mit Systemkomponenten für die Steuerung und die Auslese des DEPFETs zusammengeführt werden. In diesem Kapitel werden die hierzu notwendigen Komponenten vorgestellt und ihre Funktionsweise erläutert.

3.1 Der Steuerchip SWITCHER

Für die Ansteuerung eines DEPFET-Detektors wurde ein spezieller ASIC (**a**pplication **s**pecific **i**ntegrated **c**ircuit) – der sogenannte SWITCHER – entwickelt, mit dem die externen Spannungen an den DEPFET angelegt werden. Dieser Steuerchip wurde in dieser Arbeit zur Ansteuerung von Pulsed-Clear-DEPFETs verwendet und ist ausführlich beschrieben in [Au97] und [Sc98].

Da beim Pulsed-Clear-DEPFET für den Löschvorgang Spannungen von bis zu 25 V benötigt werden, wurde ein Teil des SWITCHERs in einem speziellen Hochspannungsprozeß[1] gefertigt, da die Standard-CMOS[2]-Technologie so hohe Spannungen nicht zuläßt. Wesentlicher Bestandteil des SWITCHERs sind zwei 64 Bit tiefe Schieberegister im Logikteil, die voneinander unabhängig arbeiten können. Jeder der 64 Kanäle des SWITCHERs enthält für jede Stufe eines Schieberegisters einen Zwischenspeicher und einen Multiplexer. Über den Multiplexer wird bestimmt, ob die Daten der Schieberegister oder die der Zwischenspeicher an einen Dekoder weitergeleitet werden. Jeder Kanal des SWITCHERs besitzt einen solchen Dekoder, der mit jedem Schieberegister bzw. Zwischenspeicher verbunden ist. Der Dekoder wertet für

---

[1] AMS 2.0 μm HV-CMOS

[2] **c**omplementary **m**etal **o**xide **s**ilicon

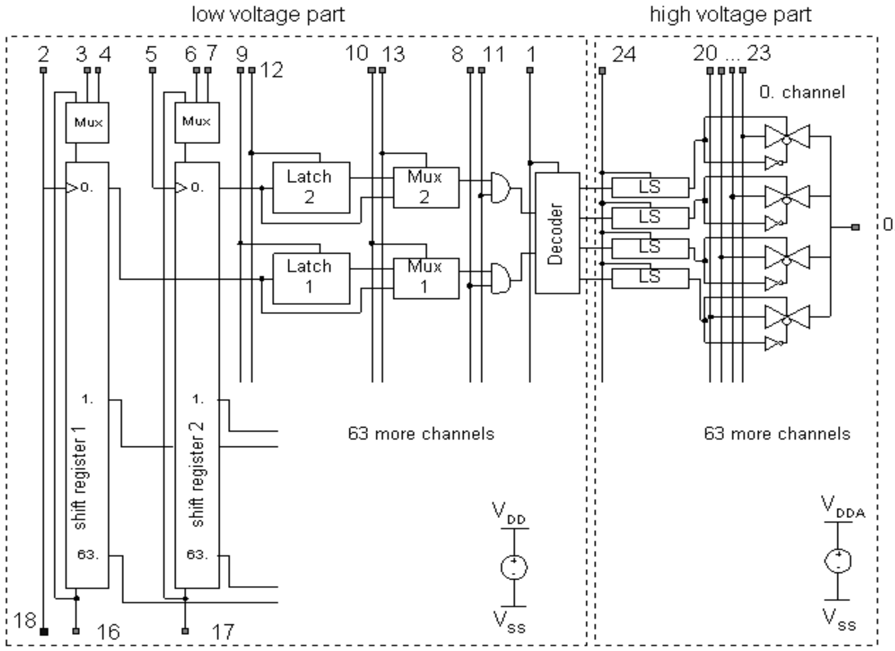
jeden Kanal die Daten aus den beiden Schieberegistern bzw. den Zwischenspeichern aus und gibt in Abhängigkeit davon ein Steuersignal weiter an den Hochspannungsteil des SWITCHERs. Diese Signale, umgewandelt und durch eine Folge von Invertern verstärkt, steuern Transmissiongates[3]. An diesen Transmissiongates liegt jeweils eine Eingangsspannung an, die je nach Steuersignal vom Transmissiongate auf seinen Ausgang durchgeschaltet oder gesperrt wird. Somit ist es über eine bestimmte logische Sequenz, die man in die Schieberegister eingibt, möglich, jeweils eine von insgesamt vier Eingangsspannungen auf insgesamt 64 Ausgänge des SWITCHERs zu geben. Abbildung 3.1 zeigt schematisch den Aufbau des SWITCHER-Steuerchips und die Belegung der 24 Eingangspads.

Im endgültigen DEPFET-Autoradiographiesystem werden zwei SWITCHER ihren Einsatz finden. In diesem System werden DEPFET-Matrizen verwendet, bei denen die externen Gates einer Zeile miteinander verbunden und über ein Pad kontaktierbar sind. Auch die Clear-Kontakte einer Zeile und die Drain-Kontakte einer Spalte sind auf diese Weise zusammengeschaltet. Ein SWITCHER übernimmt dann die zeilenweise Steuerung der externen Gates und der zweite SWITCHER die zeilenweise Ansteuerung der Clear-Kontakte. Im Betrieb des Autoradiographiesystems legt der Gate-SWITCHER in einer Zeile i das sogenannte Gate_{on} – Potential (U = 0 V) an und schaltet somit alle Transistoren dieser Zeile ein. Über eine an die Drains (die Drains einer Spalte sind untereinander verbunden) angeschlossenen Ausleseelektronik können die Ströme in den Transistoren dieser Zeile parallel gemessen werden. Ist dies geschehen, so schaltet der SWITCHER die Transistoren dieser Zeile durch Anlegen einer positiven Spannung (Gate_{off} – Potential) wieder aus. Die Höhe dieser Spannung ist von DEPFET zu DEPFET unterschiedlich und liegt in der Größenordnung von wenigen Volt. Diese Arbeitsschritte wiederholen sich nun für jede Zeile. Sind die Transistorströme der letzten Zeile der Matrix vermessen worden, so setzt sich der Vorgang in der ersten Zeile der Matrix fort. Der Clear-SWITCHER hat hierbei die Aufgabe nach Messung der Ströme einer Zeile durch Anlegen einer hohen positiven Spannung an die zeilenweise verbundenen Clear-Kontakte, die internen Gates aller Transistoren dieser Zeile zu leeren. Sind also durch den Gate-SWITCHER alle Transistoren der Zeile i eingeschaltet, legt der Clear-SWITCHER zum Beispiel an alle Clear-Kontakte der Zeile (i - 3) das für diese DEPFETs notwendige Clear-Potential (in der Größenordnung von +20 V) an.

In dieser Arbeit wurde der SWITCHER ausschließlich zur Ansteuerung von

---

[3] transmit = engl. für übersenden; gate = engl. für Tor



1.	enable_dec	13.	$\overline{\text{select\_latch2}}$
2.	clk1	14.	V_{DD}
3.	serial_in1	15.	V_{SS}
4.	select_serial_in1	16.	serial_out1
5.	clk2	17.	serial_out2
6.	serial_in2	18.	monitor_clk1
7.	select_serial_in2	19.	V_{DDA}
8.	enable_2	20.	in_voltage 0
9.	$\overline{\text{load\_latch1}}$	21.	in_voltage 1
10.	$\overline{\text{select\_latch1}}$	22.	in_voltage 2
11.	enable_1	23.	in_voltage 3
12.	$\overline{\text{load\_latch2}}$	24.	I_biasLS

Abbildung 3.1: Schematische Darstellung des SWITCHERs [Ne99]

Einzelpixel-DEPFETs verwendet. Details zu den verwendeten Betriebsmodi finden sich im Kapitel zu dynamischen Messungen (Kapitel 5) an DEPFET-Einzelpixel-Strukturen.

3.2 Der Auslesechip CARLOS

Speziell für die Auslese einer Pulsed-Clear-DEPFET-Matrix (64 x 64 Pixel) wird ein Auslesechip entwickelt [Ne99]. Dieser Auslesechip CARLOS (**c**urrent **a**mplifying **r**eadout **c**hip for **l**ow n**o**ise **s**ensors) muß hohen Anforderungen genügen. Er soll:

- die Drainspannung für 64 Spalten der DEPFET-Matrix unabhängig vom fließenden Drainstrom I_D liefern,
- den Strom aus 64 Kanälen der DEPFET-Matrix parallel verarbeiten,
- 64 parallel eintreffende Signale (Drainströme der Spalten der Matrix) mit mindestens 4 MHz zu einem Signal serialisieren,
- Ströme in Spannungen umwandeln,
- sehr rauscharm sein und unter dem Kanalrauschen einer DEPFET-Matrix mit einer Transkonduktanz von 100 μS bei einem Strom von 100 μA bleiben und
- Stromschwankungen der DEPFET-Matrix von bis zu 5 % tolerieren.

Für eine detaillierte Beschreibung des Aufbaus und der Funktionsweise des noch in der Entwicklung befindlichen CARLOS-Auslesechips wird auf [Ne99] verwiesen.

3.3 Steuerung und Auslese

In dieser Arbeit wurden DEPFET-Einzelpixel-Strukturen untersucht. Da der CARLOS-Chip sich noch im Entwicklungsstadium befindet, besteht das hier verwendete Steuer- und Auslesesystem aus:

- einem CAMAC-Crate mit Modulen,
- einem NIM-Crate mit Modulen,
- einem PC,
- einer Trägerplatine für einen in eine Keramikhalterung gebondeten SWITCHER-Steuerchip,
- einer Trägerplatine mit integrierter Ausleseelektronik für den DEPFET,

- externen Spannungsquellen und
- einem Oszilloskopen.

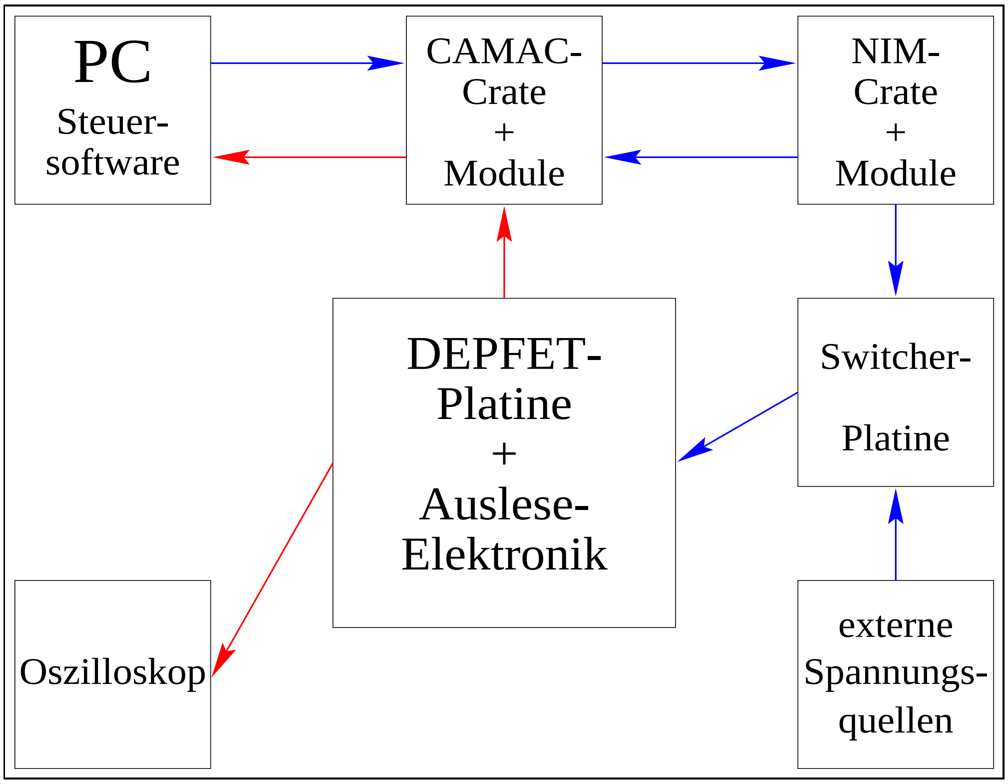


Abbildung 3.2: Steuer- und Auslesesystem [Sc98]

Der Aufbau dieses Steuer- und Auslesesystems war Thema einer anderen Arbeit [Sc98]. Im folgenden werden nur die wesentlichen Aspekte dargestellt. Das Gesamtsystem ist in Abbildung 3.2 schematisch dargestellt. Die Gesamtkoordination der Arbeitsschritte übernimmt ein PC mit einem C-Programm. Ein CAMAC-Crate-Controller erhält von diesem PC Arbeitsanweisungen und steuert ein OUTPUT-Register. Dieses OUTPUT-Register steuert einen Gate-Generator der Spannungspulse definierter Länge und Höhe liefert. NIM-Logik-Signale, die ebenfalls vom OUTPUT-Register erzeugt werden, wandelt ein NIM-TTL-Wandler in TTL-Signale um. Diese TTL-Signale steuern den auf einer Trägerplatine angeschlossenen SWITCHER-Steuerchip. In dieser Konfiguration ist es mit Hilfe des SWITCHERs möglich, bis zu vier verschiedene Spannungen an einen Clear- und bis zu neun Gate-Kontakte anzulegen. Die Ausgänge des SWITCHERs sind über die Trägerplatine für den DEPFET-Chip an die Eingänge des DEPFET und die auf die Platine integrierte Elektronik angeschlossen. Auf der Platine sind insgesamt vier Auslesekanäle realisiert, die an die Drains des DEPFET angeschlossen sind und für jeden Kanal den im DEPFET fließenden Transistorstrom I_D in eine Spannung umwandeln. Detailliert wird diese DEPFET-Trägerplatine in Kapitel 5 beschrieben.

Kapitel 4

Statische Messungen an Einzelpixel-DEPFETs

In diesem Kapitel werden statische Messungen an Continuous-Clear-DEPFETs vorgestellt. Das Layout dieser Strukturen ist in den Abbildungen 4.1 und 4.2 dargestellt. Durch Messung der Ausgangskennlinien wird der Bereich der Drain-Source-Spannung U_{DS} bestimmt, in dem der Transistor in Sättigung betrieben werden kann. Ferner wird die Abhängigkeit der Ausgangskennlinien von der Gate-Source-Spannung U_{GS} überprüft. Über die Messung der Eingangskennlinie wird die Abschnürspannung $U_{\text{pinch,off}}$ und für verschiedene Werte I_{DS} die Steilheit (Transkonduktanz) g_m bestimmt. Diese Transkonduktanz ist wichtig für die Berechnung der Verstärkung und der Bandbreite einer Schaltung.

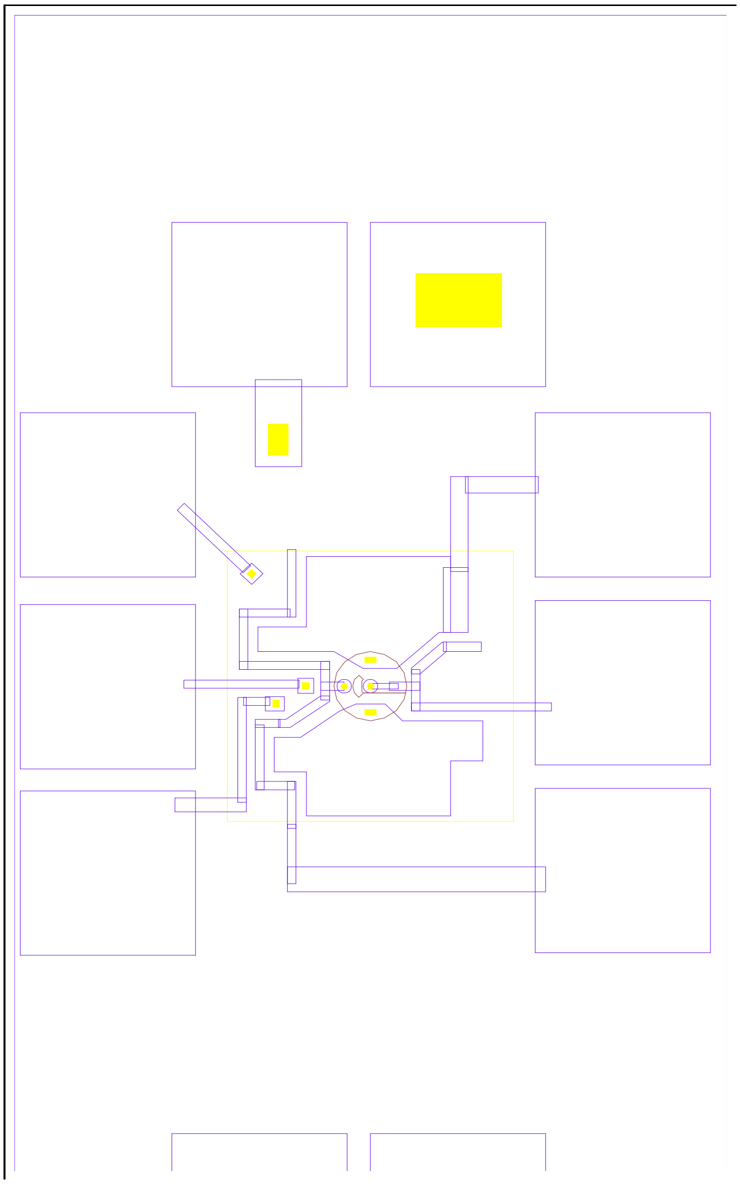
4.1 Ausgangs- und Eingangskennlinien

Feldeffekt-Transistoren werden durch unterschiedliche Kennlinien charakterisiert. Die Ausgangskennlinie beschreibt die Abhängigkeit des Drain-Source-Stroms von der Drain-Source-Spannung,

$$I_{DS} = f(U_{DS})\big|_{U_{GS}}$$

während die Eingangskennlinie den Verlauf des Drain-Source-Stroms in Abhängigkeit von der Gate-Source-Spannung wiedergibt.

$$I_{DS} = f(U_{GS})\big|_{U_{DS}}$$



mit:

$$\begin{aligned} e &= \text{Elementarladung}, \\ p &= \text{Kanaldotierung}, \\ \mu_h &= \text{Löchermobilität}, \\ W &= \text{Weite des Transistorkanals}, \\ L &= \text{Länge des Transistorkanals}, \\ a &= \text{Tiefe des Transistorkanals}, \\ U_{\text{pinch,off}} &= \text{Abschnürspannung des JFETs}, \\ U &= \text{Diffusionsspannung der Gate-Kanal-Dioden}, \\ U_{GS} &= \text{Gate-Source-Spannung}. \end{aligned}$$

Wählt man ein geeigenetes Koordinatensystem mit der z-Achse senkrecht zur Oberfläche des Detektors so bezeichnet man mit Tiefe des Transistorkanals die Abmessung des p-Kanals in Richtung der z-Achse, mit Länge des Transistorkanals die Abmessung des Kanals parallel zur Verbindungsachse von Drain und Source und mit Weite des Transistorkanals die Abmessung des Kanals senkrecht zur Verbindungsachse Drain-Source.

Messungen der Ausgangs- und Eingangskennlinien wurden an ungebondeten Chips an einer Probestation durchgeführt. An einer solchen Probestation können die Pads des DEPFETs über Probenadeln kontaktiert werden. Der DEPFET-Chip wird hierzu auf einen Teller (chuck) aus Teflon gelegt. Dieser Teflon-Chuck besitzt ringförmige Vertiefungen, durch die mit einer Vakuumpumpe Luft angesaugt werden kann. Legt man einen Halbleiterchip auf diesen Chuck und schaltet die Vakuumpumpe ein, so wird der Chip angesaugt und fixiert. Der Chuck selbst ist auf einer in drei Richtungen verstellbaren Halterung befestigt. Rechts und links dieser Halterungen sind halbkreisförmige Vorrichtungen angebracht, auf denen die Probenadelhalter festgeschraubt werden können. An den Probenadelhaltern befinden sich mehrere kleine Stellschrauben mit denen die Nadeln in drei Richtungen verstellbar sind. An einer weiteren Schraube kann der Anpreßdruck der Nadeln eingestellt werden. Die einzelnen Probenadeln werden über Lemo- und BNC-Kabel an die benötigten Meßgeräte angeschlossen.

Die Messungen der Ausgangskennlinien wurden mit folgenden Einstellungen durchgeführt:

Continuous-Clear-DEPFETs (Wafer D46)						
Parameter	Pixel 1	Pixel 2	Pixel 3	Pixel 4	Pixel 5	Pixel 6
Kanalweite W	42 μm	42 μm	28 μm	11μm	42 μm	42 μm
Kanallänge L	4 μm	4 μm	4 μm	4 μm	4 μm	4 μm

Tabelle 4.1: Parameter der gemessenen Einzelpixel-DEPFETs

$$\begin{aligned} U_{Drain} &= \{0, -9\}\, V, \\ U_{Gate} &= U_{InBulk} = \{0, 1\}\, V, \\ U_{Source} &= \text{GND}, \\ U_{OutBulk} &= \text{nicht kontaktiert (Substrat-Kontakt)}, \\ U_{Depletion} &= U_{Clear} = \text{nicht kontaktiert.} \end{aligned}$$

Da es bei einem Continuous-Clear-DEPFET keine Möglichkeit gibt, das externe Gate von außen zu kontaktieren, wird das interne Gate über einen Substrat-Kontakt, den InBulk-Kontakt, gesteuert. Das interne Gate ist in nicht depletiertem Zustand leitend mit dem InBulk-Kontakt verbunden und besitzt über eine Lücke in der Dotierung des p-Kanals eine Verbindung zum externen Gate.

Wie in den Abbildungen 4.3 und 4.4 zu erkennen, erreichen die Transistoren der Einzelpixel-DEPFETs von Wafer D46 den Sättigungsbereich der Ausgangskennlinie bei einer Drain-Source-Spannung $U_{DS} \approx -1$ V . Bei fester Gate-Source-Spannung U_{GS} und fester Drain-Source-Spannung U_{DS} ist der Sättigungsstrom I_{DSS} für die verschiedenen Pixel unterschiedlich groß. Dies ist auf unterschiedliche Kanalweiten der mit gleicher Kanallänge L produzierten DEPFETs zurückzuführen (siehe Tabelle 4.1). Nach Gleichung 4.1 ergibt sich für feste Gate-Source-Spannung U_{GS} und feste Drain-Source-Spannung U_{DS} unter der Annahme, daß DEPFETs, die auf der gleichen Siliziumscheibe (wafer) prozessiert wurden, in bezug auf Löchermobilität μ_h, Kanaldotierung p, Kanaltiefe a, Diffusionsspannung U der Gate-Kanal-Dioden und Abschnürspannung $V_{\text{pinch,off}}$ (siehe Abbildungen 4.5 und 4.6) übereinstimmen:

$$I_{DSS} \sim W \tag{4.2}$$

mit:

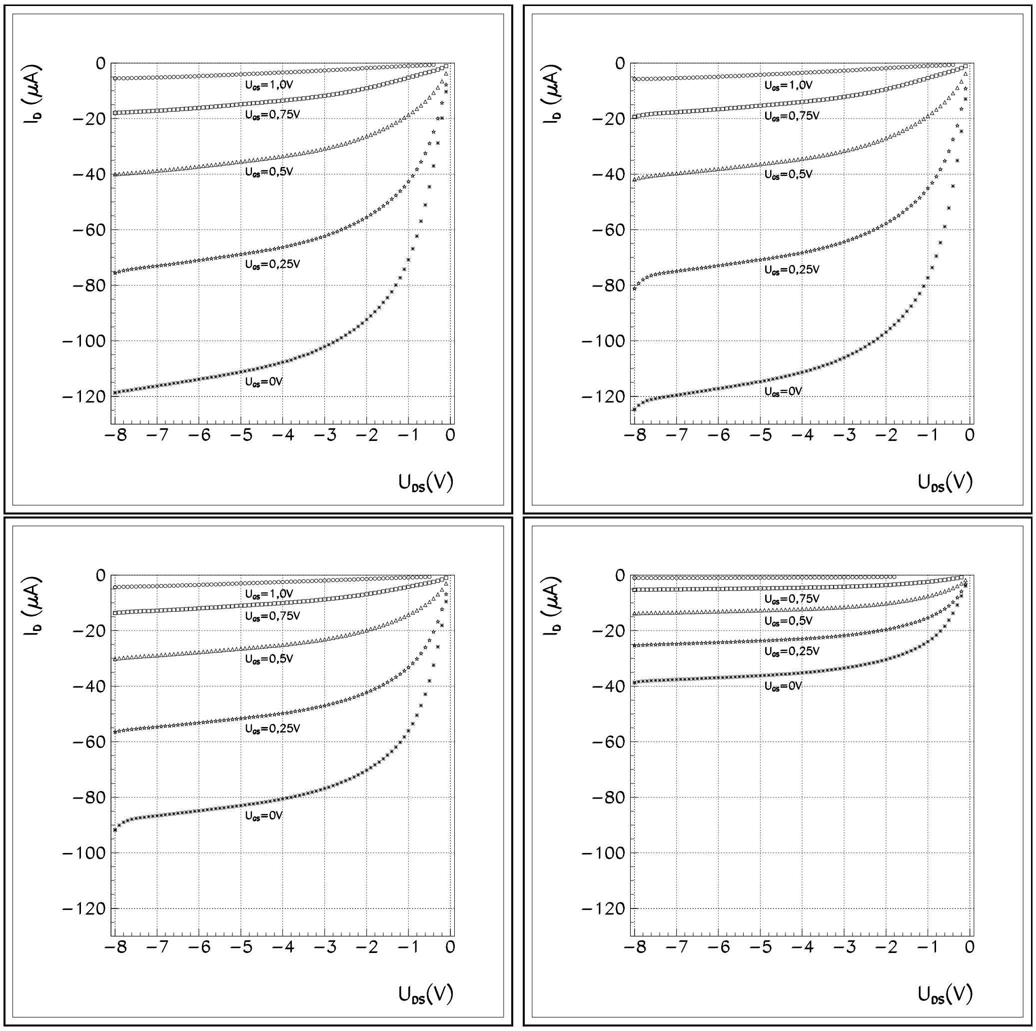


Abbildung 4.3: Ausgangskennlinien verschiedener Einzelpixel-DEPFETs: Wafer D46 Pixel Nr.1 (oben links: W = 42 μm), Nr.2 (oben rechts: W = 42 μm), Nr. 3 (unten links: W = 28 μm), Nr.4 (unten rechts: W = 11 μm)

$$\begin{aligned} I_{DSS} &= \text{Drain-Source-Strom im Sättigungsbereich,} \\ W &= \text{Weite des Transistorkanals.} \end{aligned}$$

Setzt man die Sättigungsströme I_{DSS} von Pixel 1 und Pixel 4 bei Gate-Source-Spannung $U_{GS} = 0$ V und Drain-Source-Spannung $U_{DS} = -7$ V ins Verhältnis, so ergibt sich daraus für das Verhältnis der Kanalweiten:

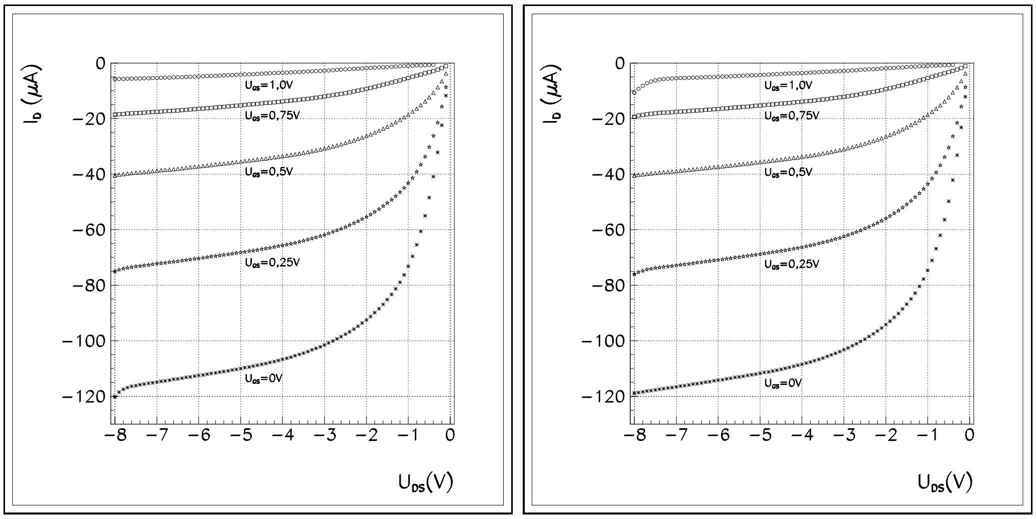


Abbildung 4.4: Ausgangskennlinien verschiedener Einzelpixel-DEPFETs: Wafer D46 Pixel Nr.5 (links:W = 42 μm), Nr.6 (rechts: W = 42 μm)

$$\frac{I_{DSS}^{\text{Pixel 1}}}{I_{DSS}^{\text{Pixel 4}}} = \frac{W^{\text{Pixel 1}}}{W^{\text{Pixel 4}}} \tag{4.3}$$

mit

$$\begin{aligned} I_{DSS}^{\text{Pixel 1}} &= (116,3 \pm 0,1)\ \mu A \text{ (Sättigungsstrom in Pixel 1)}, \\ W^{\text{Pixel 1}} &= 42\ \mu m \text{ (Layout)}, \\ I_{DSS}^{\text{Pixel 4}} &= (37,36 \pm 0,01)\ \mu A \text{ (Sättigungsstrom in Pixel 4)}, \\ W^{\text{Pixel 4}} &= 11\ \mu m \text{ (Layout)}. \end{aligned}$$

$$\boxed{\frac{I_{DSS}^{\text{Pixel 1}}}{I_{DSS}^{\text{Pixel 4}}} = 3,113 \pm 0,003}$$

Der Sollwert nach Layout der Einzelpixel-DEPFETs (siehe Tabelle 4.1) liegt bei:

$$\frac{W^{\text{Pixel 1}}}{W^{\text{Pixel 4}}} = \frac{42\ \mu m}{11\ \mu m} = 3,818$$

Setzt man die Sättigungsströme I_{DSS} von Pixel 1 und Pixel 3 bei Gate-Source-Spannung $U_{GS} = 0$ V und Drain-Source-Spannung $U_{DS} = -7$ V ins Verhältnis, so ergibt sich daraus für das Verhältnis der Kanalweiten mit

$$
\begin{aligned}
I_{DSS}^{\text{Pixel 1}} &= (116,3 \pm 0,1)\ \mu A \text{ (Sättigungsstrom in Pixel 1)},\\
W^{\text{Pixel 1}} &= 42\ \mu m \text{ (Layout)},\\
I_{DSS}^{\text{Pixel 3}} &= (86,64 \pm 0,01)\ \mu A \text{ (Sättigungsstrom in Pixel 3)},\\
W^{\text{Pixel 3}} &= 28\ \mu m \text{ (Layout)}.
\end{aligned}
$$

$$\boxed{\frac{I_{DSS}^{\text{Pixel 1}}}{I_{DSS}^{\text{Pixel 3}}} = 1,342 \pm 0,001}$$

Der Sollwert nach Layout liegt bei:

$$\frac{W^{\text{Pixel 1}}}{W^{\text{Pixel 3}}} = \frac{42\ \mu m}{28\ \mu m} = 1,5$$

Die hier angegebenen Fehler ergeben sich aus Rundungen durch das automatische Auslesesystem. Systematische Fehler durch Temperaturschwankungen im klimatisierten Labor oder Lichteinfall in die Abschirmbox der Probestation wurden hier nicht berücksichtigt.

Die Differenzen zwischen den gemessenen und den theoretischen Werten zeigen, daß einer oder mehrere der Parameter Kanalweite W, Kanaldotierung p, Kanaltiefe a und Kanallänge L innerhalb des Wafers nicht konstant sind. Unter der Annahme, daß die Parameter bei Pixel Nr. 1 den Werten des Layouts entsprechen, kann abgeschätzt werden, wie stark die einzelnen Parameter bei Pixel Nr. 3 bzw. Pixel Nr. 4 von den Werten im Layout abweichen müssen, um die gemessene Differenz zu erklären. Für diese Abschätzung wurden folgende Werte angenommen:

$$
\begin{aligned}
W_{\text{Sollwert}}^{Pixel3} &= 28\ \mu m\\
W_{\text{Sollwert}}^{Pixel4} &= 11\ \mu m\\
a &= 0,5\ \mu m\\
L &= 4\ \mu m\\
p &= 1 \cdot 10^{17}\ cm^3
\end{aligned}
$$

Der mit den Layoutwerten berechnete Wert I_{DSS} von Pixel Nr. 3 bei Gate-Source-Spannung $U_{GS} = 0$ V und Drain-Source-Spannung $U_{DS} = -7$ V beträgt:

$$I_{DSS}^{\text{Pixel 3}} = 77,53\ \mu A$$

Die Differenz zum gemessenen Wert beträgt:

$$\Delta I_{DSS}^{\text{Pixel 4}} = 9,11\ \mu A$$

Dies kann durch Abweichung der einzelnen Parameter von den Layoutwerten um:

$$\begin{aligned}
\Delta W &= \pm 3,21\ \mu m\ (11,75\%)\\
\Delta a &= \pm 0,06\ \mu m\ (12\%)\\
\Delta L &= \pm 0,47\ \mu m\ (11,75\%)\\
\Delta p &= \pm 0,12 \cdot 10^{17}\ cm^3\ (12\%)
\end{aligned}$$

verursacht werden, oder durch Zusammenspiel dieser Faktoren.
Der mit den Layoutwerten berechnete Wert I_{DSS} von Pixel Nr. 4 bei Gate-Source-Spannung $U_{GS} = 0$ V und Drain-Source-Spannung $U_{DS} = -7$ V beträgt:

$$I_{DSS}^{\text{Pixel 4}} = 30,46\ \mu A$$

Die Differenz zum gemessenen Wert beträgt:

$$\Delta I_{DSS}^{\text{Pixel 4}} = 6,90\ \mu A$$

Analog zu Pixel Nr. 3 kann dies durch Abweichung der einzelnen Parameter von den Layoutwerten um:

$$\begin{aligned}
\Delta W &= \pm 2,49\ \mu m\ (22,64\%)\\
\Delta a &= \pm 0,11\ \mu m\ (22\%)\\
\Delta L &= \pm 0,91\ \mu m\ (22,75\%)\\
\Delta p &= \pm 0,22 \cdot 10^{17}\ cm^3\ (22\%)
\end{aligned}$$

verursacht werden, oder durch Zusammenspiel dieser Faktoren.
Die Messung der Eingangskennlinie wurde mit folgenden Einstellungen durchgeführt:

$$\begin{aligned} U_{Drain} &= -1V, \\ U_{Gate} &= U_{InBulk} = \{0,4\}\,V, \\ U_{Source} &= \mathrm{GND}, \\ U_{OutBulk} &= \text{nicht kontaktiert (Substrat-Kontakt)}, \\ U_{Depletion} &= U_{Clear} = \text{nicht kontaktiert.} \end{aligned}$$

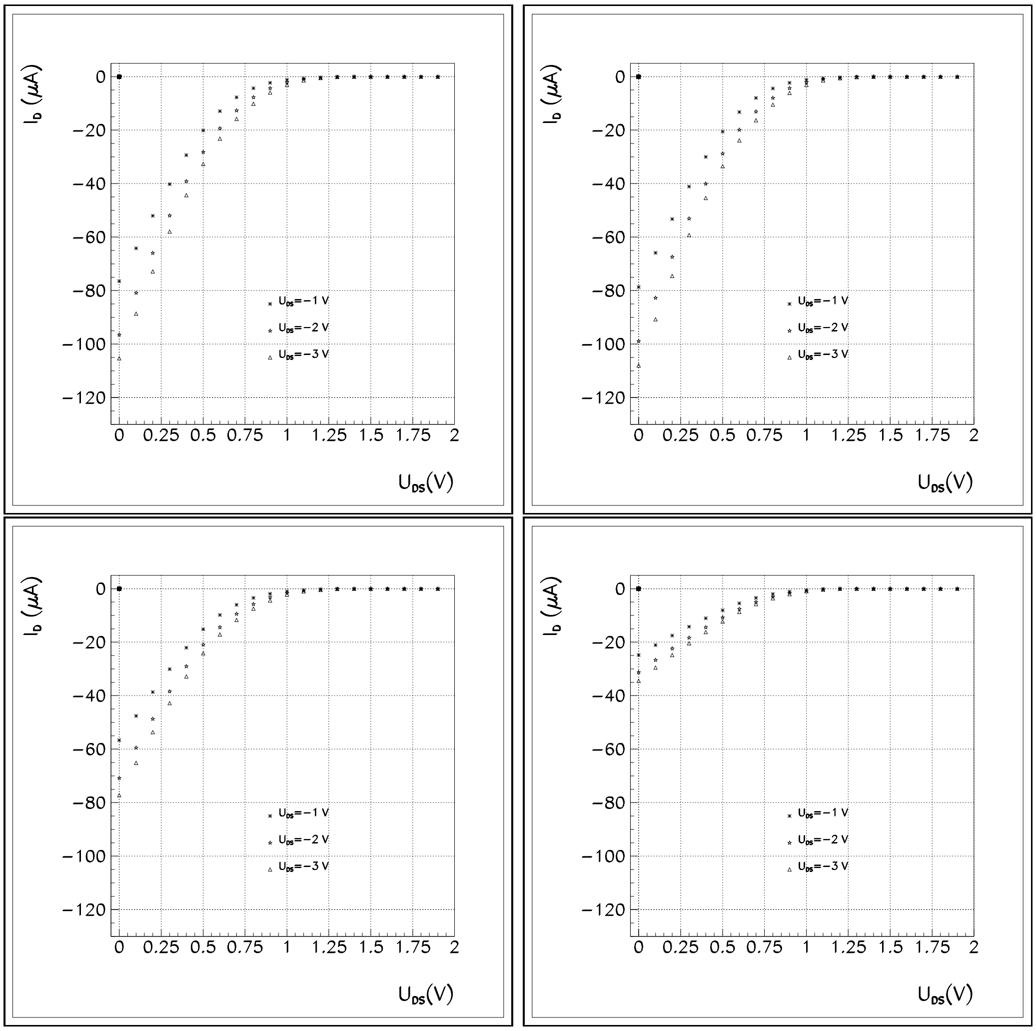


Abbildung 4.5: Eingangskennlinien verschiedener Einzelpixel-DEPFETs: Wafer D46 Pixel Nr.1 (oben links: W = 42 μm), Nr.2 (oben rechts: W = 42 μm), Nr. 3 (unten links: W = 28 μm), Nr.4 (unten rechts: W = 11 μm)

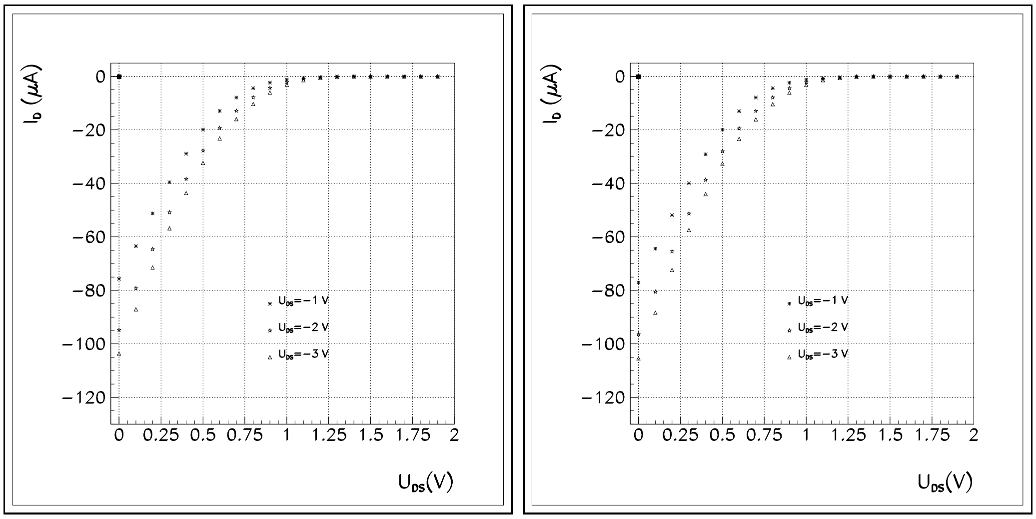


Abbildung 4.6: Eingangskennlinien verschiedener Einzelpixel-DEPFETs: Wafer D46 Pixel Nr.5 (links:W = 42 μm), Nr.6 (rechts: W = 42 μm)

In den Abbildungen 4.5 und 4.6 sind Eingangskennlinien des Wafers D46 für verschiedene Drain-Source-Spannungen U_{DS} zu sehen. Man erkennt, daß bei einer Gate-Spannung $U_{GS} \approx +1,2$ V der Drain-Strom auf $I_D \approx 0$ μA absinkt. Die Abschnürspannung (Pinch-Off-Voltage) beträgt also für diesen Wafer:

$$\boxed{U_{\text{pinch,off}} = (+1,2 \pm 0,1)\ \text{V}}$$

Angegeben ist der Ablesefehler. Aus der Eingangskennlinie kann man die Steilheit (Transkonduktanz) g_m eines Transistors bestimmen. Sie ist definiert als:

$$g_m = \left.\frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}}\right|_{U_{DS}} \tag{4.4}$$

Für einen in Sättigung betriebenen Feldeffekt-Transistor ist dies:

$$g_{m_{Sättigung}} = -2ep\mu_h \frac{Wa}{L}\left[1 - \sqrt{\frac{U + U_{GS}}{U_{\text{pinch,off}}}} - 1\right] \tag{4.5}$$

mit:

$$
\begin{aligned}
e &= \text{Elementarladung,}\\
p &= \text{Kanaldotierung,}\\
\mu_h &= \text{Löchermobilität,}\\
W &= \text{Weite des Transistorkanals,}\\
L &= \text{Länge des Transistorkanals,}\\
a &= \text{Tiefe des Transistorkanals,}\\
U_{\text{pinch,off}} &= \text{Abschnürspannung des JFETs,}\\
U &= \text{Diffusionsspannung der Gate-Kanal-Dioden,}\\
U_{GS} &= \text{Gate-Source-Spannung.}
\end{aligned}
$$

Für Pixel 1 auf Wafer D46 ergibt sich aus der gemessenen Eingangskennlinie (Abbildung 4.5) für $U_{DS} = (-3,00 \pm 0,01)$ V und $I_D = (88,63 \pm 0,01)$ μA über den Mittelwertsatz der Differentialrechnung eine Abschätzung für die Transkonduktanz zu:

$$\boxed{g_m \approx (162,5 \pm 16,3)\ \mu S}$$

Für $U_{DS} = (-3,00 \pm 0,01)$ V und $I_D = (1,403 \pm 0,001)$ μA ergibt sich:

$$\boxed{g_m \approx (12,7 \pm 1,3)\ \mu S}$$

Man erkennt, daß die Transkonduktanz eines DEPFET-Detektors vom Drain-Source-Strom abhängig ist. Für die Berechnung der Verstärkung einer Schaltung mit DEPFET-Detektoren ist es also wichtig, den Arbeitspunkt des Transistors zu kennen.

Kapitel 5

Dynamische Messungen an Einzelpixel-DEPFETs

5.1 Die DEPFET-Trägerplatine

Für Messungen an DEPFET-Detektoren wurde im Rahmen dieser Arbeit eine DEPFET-Trägerplatine entwickelt. Diese Platine genügt folgenden Anforderungen:

- Positionierung eines DEPFET-Chips mit frei zugänglicher Rückseite,
- Positionierung eines Steuer- und eines Auslesechips,
- Kontaktflächen (Bondpads) mit an die verschiedenen Layouts angepassten Abständen für die Anschlüsse der Chips via wire bonds,
- Spannungsversorgung der Chips und
- Zuleitung der Steuersignale.

Das Layout der DEPFET-Trägerplatine befindet sich in Anhang A und wird dort detailliert beschrieben. Auf der Platine ist eine elektronische Schaltung implementiert, in der insgesamt vier Auslesekanäle realisiert sind. Der Schaltplan befindet sich ebenfalls im Anhang. Die vier Kanäle sind als zweistufige Verstärkerschaltung aufgebaut. Das Stromsignal des DEPFETs (gemessen wird I_D) wird in der ersten Stufe in ein Spannungssignal umgewandelt. Um zu verhindern, daß der Operationsverstärker aufgrund einer zu hohen Spannung am Ausgang in Sättigung geht, kann über die Widerstände R17, R18, R19 und R20 ein Teil des fließenden Stromes abgezogen werden. Die Drains der zu untersuchenden Strukturen werden an die invertierenden Eingänge der Operationsverstärker angeschlossen. Der Operationsverstärker legt das am nichtinvertierenden Eingang anliegende Potential an die Drain des angeschlossenen DEPFETs. Der Transistorstrom fließt über den jeweiligen Widerstand in der Gegenkopplung (R1, R5, R9 oder R13) ab und definiert so das Potential am Ausgang des Operationsverstärkers.

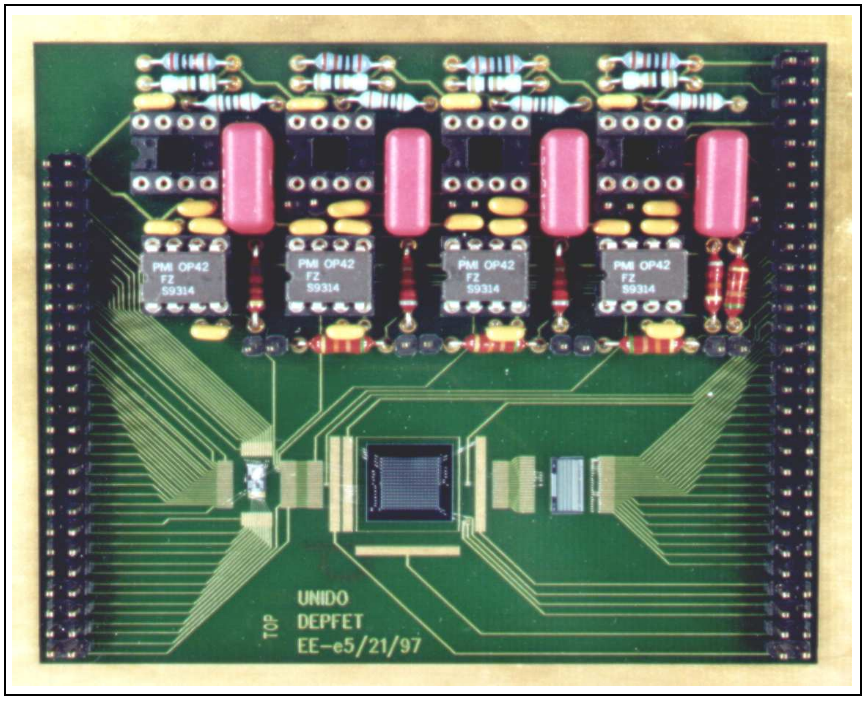


Abbildung 5.1: Foto einer bestückten DEPFET-Trägerplatine (Oberseite) mit einer DEPFET-Matrix (Mitte), einem SWITCHER-Steuerchip (rechts) und einem CARLOS-Auslesechip (links). Oben im Bild ist die Ausleseelektronik zu sehen.

5.2 Der Laserstand

Weitere Untersuchungen an Einzelpixel-DEPFETs wurden an einem Laserstand[1] durchgeführt. Kernbestandteil dieses Laserstandes ist eine Laserdiode, die Licht der Wellenlänge $\lambda = 904$ nm erzeugt. Die Spezifikationen der Laserdiode und des angeschlossenen Lasertreibers sind in Tabelle 5.2 aufgeführt. Bei dieser Laserdiode handelt es sich um einen Single-Heterostruktur GaAs-Halbleiterlaser, der erst bei einem hohen Strom von 6 A einen Laserpuls abgibt. Dieser Ansteuerstrom wird von einem Treibermodul in sehr

---

[1] freundlicherweise vom Lehrstuhl Experimentelle Physik IV zur Verfügung gestellt

kurzer Zeit zur Verfügung gestellt. Über einen Lichtleiter und ein System optischer Linsen wird der Lichtstrahl auf einen Mikrometertisch gegeben. Dieser Mikrometertisch kann über einen PC gesteuert werden und ist in zwei Dimensionen mit einer Genauigkeit von $\Delta s = 1\ \mu$m verfahrbar. Das System optischer Linsen ist in der Höhe verstellbar. Auf dem Mikrometertisch kann eine Halterung für die DEPFET-Trägerplatine befestigt und der Laserspot auf den Detektor fokussiert werden. Dies kann auf einem an eine infrarotsensitive CCD-Kamera angeschlossenen Monitor beobachtet werden. Das optische System, der Mikrometertisch und die CCD-Kamera sind in einem lichtdichten Aluminiumgehäuse untergebracht, um Störungen durch elektromagnetische Strahlung weitestgehend auszuschließen.

Laserdiode LD62 (Laser Diode, Inc.)	
Wellenlänge	904 nm
Spektrale Breite	3,5 bis 12 nm
Threshold Strom	6 A
Pulsbreite	$\approx$ 30ns (200 ns max.)
Schutzklasse	IIIb

Lasertreibermodul LDM275-501N16 (DEI)	
Strom	40 A ($\prec$ 10 A bis $\approx$ 50 A)
Anstiegszeit	4 ns ($\approx$ 6 ns max.)
Pulsbreite	14 ± 2 ns ($\approx$ 6 ns bis $\leq$ 50 ns)
Pulsfrequenz	10 kHz ($\approx$ 20 kHz max.)
Trigger: Eingang	5 V bei 50 Ω
Trigger: Anstiegszeit	$\leq$ 20 ns
Trigger: Dauer	50 ns + Pulsdauer

Tabelle 5.1: Spezifikationen des verwendeten Lasers [Ot97]

Durch Bestrahlung der Rückseite des DEPFET-Detektors mit Licht dieses Lasers können Ladungsträgerpaare erzeugt werden. Dies geschieht jedoch fast ausschließlich in Oberflächennähe, da die Intensität des Laserlichts exponentiell mit der Eindringtiefe abnimmt und in Silizium in 100 μm Tiefe auf ca. 1 % des ursprünglichen Wertes absinkt.

5.3 Messungen an einem Einzelpixel-DEPFET (93er Produktion)

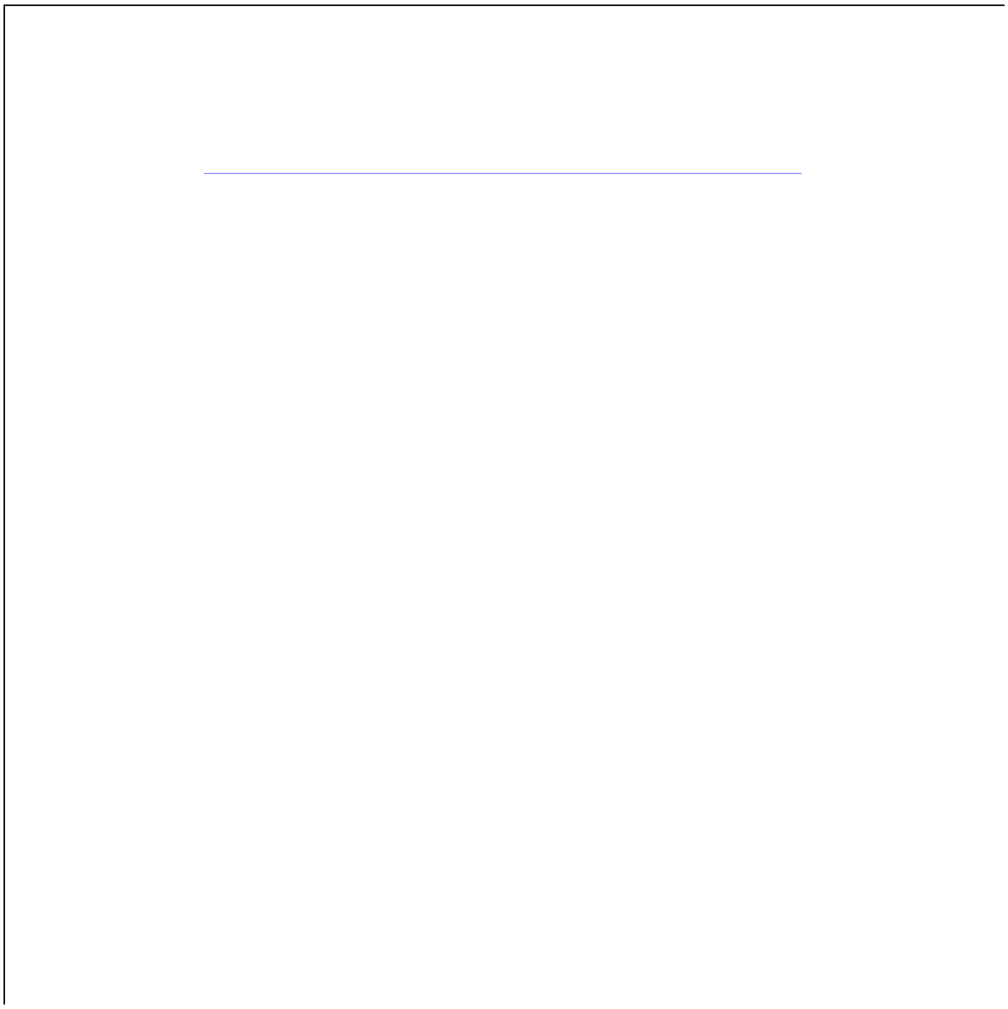
Die hier vorgestellten Messungen wurden an Einzelpixel-DEPFETs, die im Jahr 1993 im Halbleiterlabor des Max-Planck-Insituts München produziert wurden, durchgeführt. Es handelt sich hierbei um Transistoren mit der Kanalweite $W = 314\ \mu$m und der Kanallänge $L = 11\ \mu$m. Das Layout der Struktur ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Der Einzelpixel ist in zylindrischer Form aufgebaut. Im Zentrum des Pixels befindet sich die Source-Implantation. Sie ist umschlossen von einer kreisförmigen Gate-Implantation. Dieser Gate-Ring ist umgeben von der Drain-Implantation, die außen quadratisch ist und eine Seitenlänge von 200 μm besitzt. Den Einzelpixel umgibt ein quadratischer Guard-Ring einer Seitenlänge von 820 μm. Dies ist eine zusätzliche p^+-Implantation im Transistorbereich des DEPFETs. Legt man an diesen Guardring negatives Potential an, so kann im Substrat unterhalb des Guardrings eine Potentialbarriere für Elektronen erzeugt werden. Dies verhindert, daß Elektronen, die außerhalb des Guardrings erzeugt werden, in das interne Gate des Transistors gelangen. Zwei zusätzliche n^+-Implantationen bilden die Substratkontakte. Ein Substratkontakt liegt außerhalb (OutBulk) und einer innerhalb (InBulk) des Guardrings. Über diese Kontakte kann das Substrat auf definiertem Potential (in der Regel $U_{\mathrm{Substrat}} = 0V$) gehalten werden.

5.3.1 Arbeitspunktbestimmung

Zunächst müssen die für den Betrieb des DEPFETs als Detektor richtigen Parameter gefunden werden. Zur Messung der Ausgangskennlinie wurden folgende Einstellungen gewählt:

$$\begin{aligned}
U_{\pm} &= \pm 15\ V (Operationsverstärker),\\
U_{DDA} &= +7\ V,\\
U_{DD} &= +5\ V,\\
U_{Clear} &= U_{Depletion} = U_{SS} = 0\ V,\\
U_{Guardring} &= U_{InBulk} = U_{OutBulk} = U_{Source} = GND,\\
U_{Stromabzug} &= U_{DS},
\end{aligned}$$

Die Messung (Abbildung 5.3) zeigt, daß der Transistor dieses Einzelpixel-DEPFETs bei $U_{DS} \approx -5$ V den Sättigungsbereich erreicht. Für Drain-Source-Spannungen kleiner als U_{DS} = -1 V folgt die Ausgangskennlinie ohmscher Strom-Spannungs-Charakteristik.



Der angegebene Fehler beruht auf der Genauigkeit des verwendeten Meßgerätes[2].

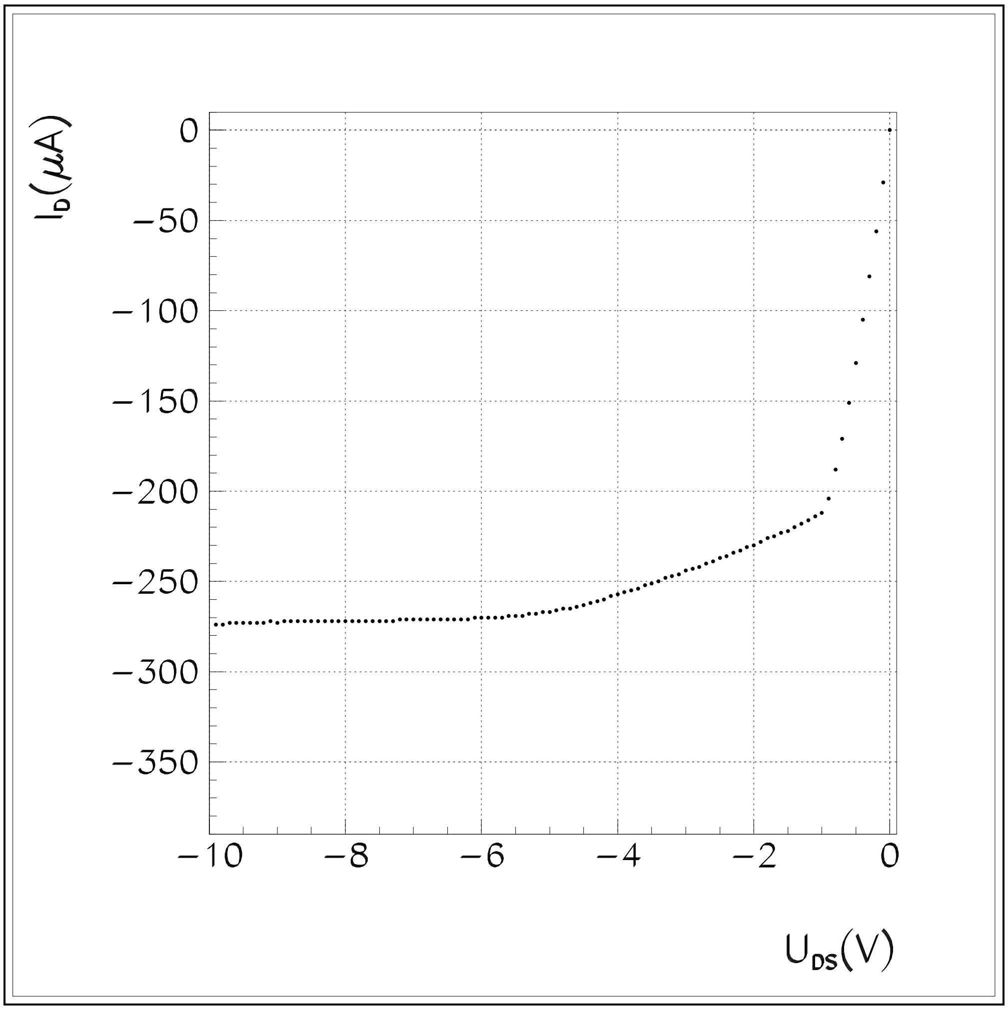


Abbildung 5.3: Ausgangskennlinie

Der Messung der Eingangskennlinie (Abbildung 5.4) kann man entnehmen, daß der Transistorstrom bei $U_{GS} \approx +2$ V auf $I_D \approx 0$ μA absinkt. Die Abschnürspannung für diesen DEPFET beträgt also:

$$\boxed{U_{\text{pinch,off}} = (+2,0 \pm 0,1)\ \text{V}}$$

Hier ist der Ablesefehler angegeben.
Für die folgenden Messungen wurden

---

[2] Wavetek 15 XL

$$\boxed{\begin{aligned} U_{\text{gate,on}} &= 0\ V \\ U_{\text{gate,off}} &= +2,5\ V \end{aligned}}$$

verwendet, um den Transistor ein- und auszuschalten.

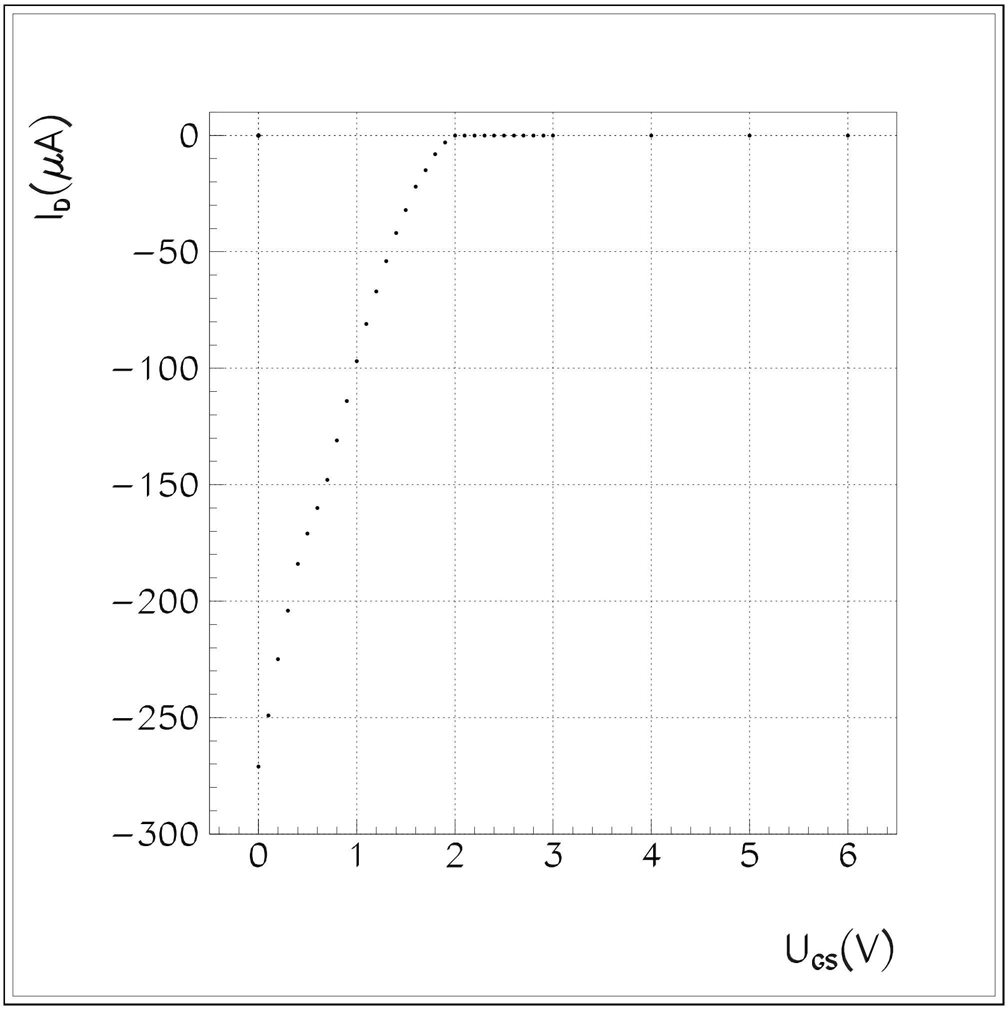


Abbildung 5.4: Eingangskennlinie

Um den Operationsverstärker im Arbeitsbereich betreiben zu können, muß der einzustellende Stromabzug gemessen werden. Hierzu wird der Transistor mit Hilfe des Steuersystems und einem SWITCHER-Steuerchip ein- und ausgeschaltet. Der Wert des Widerstandes in der Gegenkopplung ist:

$$\boxed{R_{\text{GK}} = 56\ k\Omega}$$

Auf dem Oszilloskop[3] wird die Differenz der Spannungen bei eingeschaltetem und ausgeschaltetem Transistor in Abhängigkeit von der am Stromabzug angelegten Spannung gemessen. Abbildung 5.5 zeigt, daß diese Differenz im Bereich $U_{\text{Stromabzug}} = \{-15, -24\}$ V maximal ist. Für diese Werte ist der Operationsverstärker im Arbeitsbereich. Die Spannung am Stromabzug wird auf

$$\boxed{U_{\text{Stromabzug}} = -18,0\ \text{V}}$$

eingestellt, um maximale Pulshöhe zu erhalten und zu verhindern, daß durch eine zu negative Spannung am Stromabzug zusätzlicher Stromfluß im Transistor erzeugt wird.

Um den Einfluß der Depletionsspannung $U_{\text{Depletion}}$ auf den Transistorstrom zu messen, wird die Differenz der Spannungen bei eingeschaltetem und ausgeschaltetem Transistor für verschiedene Depletionsspannungen gemessen. Abbildung 5.6 zeigt, daß diese Differenz unabhängig von der angelegten Depletionsspannung ist. Der Strom im Transistor ist abhängig von den Potentialen der Gates und von der Drain-Source-Spannung. Diese werden durch Depletion des Detektors nicht verändert. Wird der Detektor vollständig verarmt, so ist das interne Gate isoliert, sein Potential ändert sich nicht. Die Depletion hat also keine Auswirkung auf den Transistorstrom. Der Detektor ist vollständig verarmt ab einer Depletionsspannung $U_{\text{Depletion}} = -120$ V [Kl98]. Um den Detektor vollständig zu verarmen wird die Depletionsspannung eingestellt auf:

$$\boxed{U_{\text{Depletion}} = -130\ \text{V}}$$

Die Parameter zum Betrieb dieses Einzelpixel-DEPFETs als Detektor sind folgende:

---

[3] LeCroy LC534M

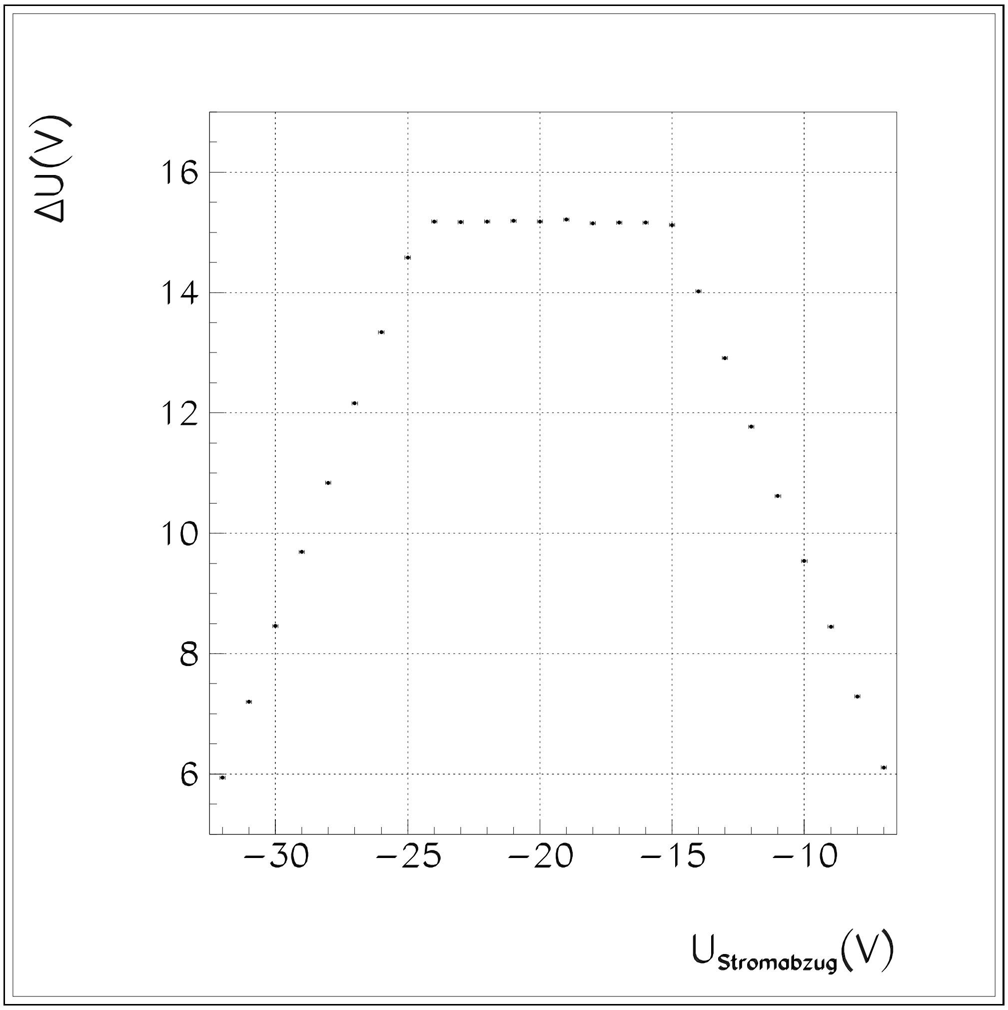


Abbildung 5.5: Messung der Pulshöhe in Abhängigkeit von der Spannung am Stromabzug

$$\begin{aligned} U_{\pm} &= \pm 15\ V, \\ U_{DDA} &= +7\ V, \\ U_{DD} &= +5\ V, \\ U_{Gate,off} &= +2,5\ V, \\ U_{Clear} &= U_{Gate,on} = U_{SS} = 0\ V, \\ U_{Guardring} &= U_{InBulk} = U_{OutBulk} = U_{Source} = GND, \\ U_{Depletion} &= -130\ V, \\ U_{Stromabzug} &= -18\ V, \\ U_{DS} &= -7\ V. \end{aligned}$$

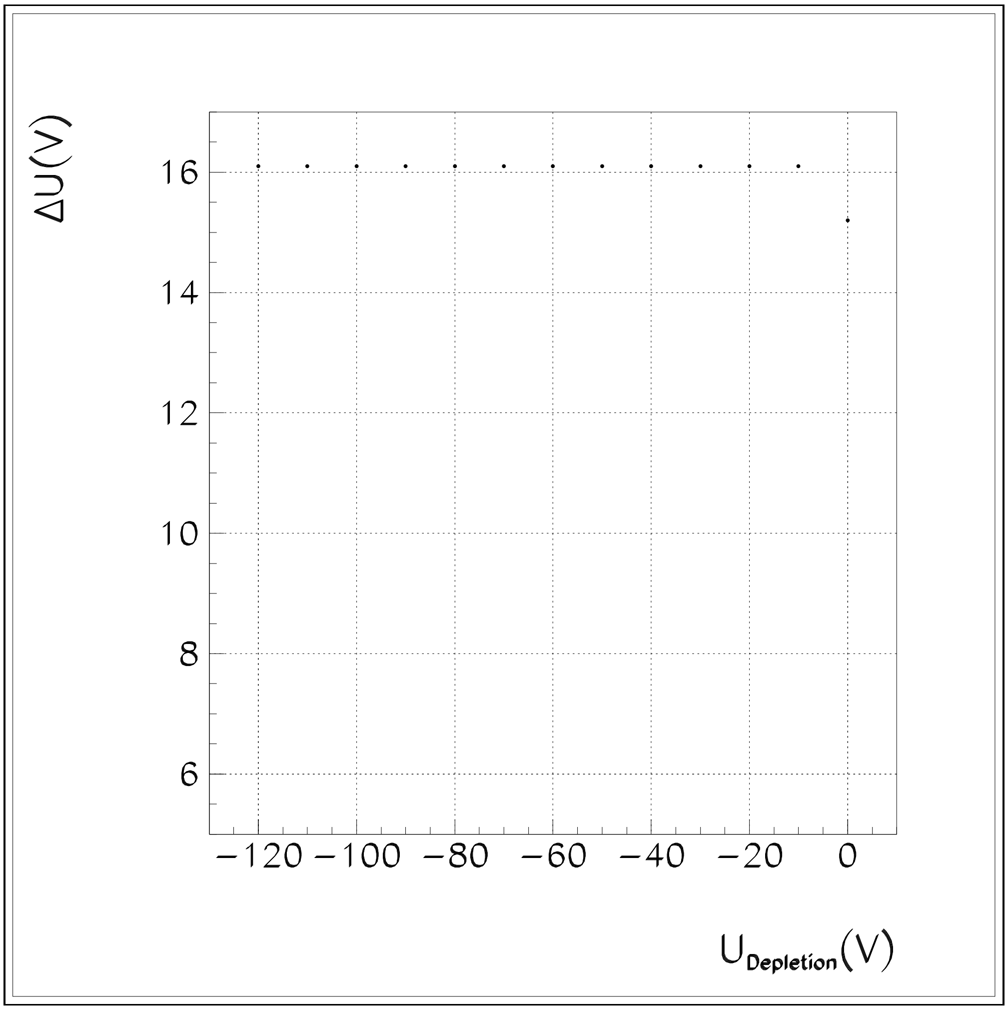


Abbildung 5.6: Messung der Pulshöhe in Abhängigkeit von der Depletionsspannung

5.3.2 Laserscan

Mit den Einstellungen aus Abschnitt 5.3.1 wurde der Einzelpixel-DEPFET als Strahlungsdetektor im oben beschriebenen Laserstand betrieben. Der Laserspot wurde auf der Rückseite des DEPFETs fokussiert und mit einer Schrittweite von $\Delta s = 50\ \mu m$ in zwei Richtungen (x- und y-Richtung) verfahren. Der Laser wurde bei eingeschaltetem DEPFET-Transistor gefeuert. Die Spannung am Ausgang des Operationsverstärkers wurde bei eingeschaltetem Transistor vor und nach dem Laserpuls gemessen. Trifft der Laser den sensitiven Bereich des Detektors, so ändert sich das Potential des internen Gates und der Transistorstrom wird größer.

In Abbildung 5.7 ist die Differenz der Spannungen vor und nach dem Laserpuls graphisch aufgetragen. Auf der Rückseite des DEPFET-Chips ist eine Metallisierung aufgebracht, die der Kontaktierung der Rückseitendiode dient. Der mit dem Laser abgetastete Bereich wird hierdurch bei y = 0 begrenzt. Man erkennt, daß die gemessene Spannungsdifferenz (im folgenden Pulshöhe genannt) in einem Bereich von ca. 350 μm in x-Richtung und

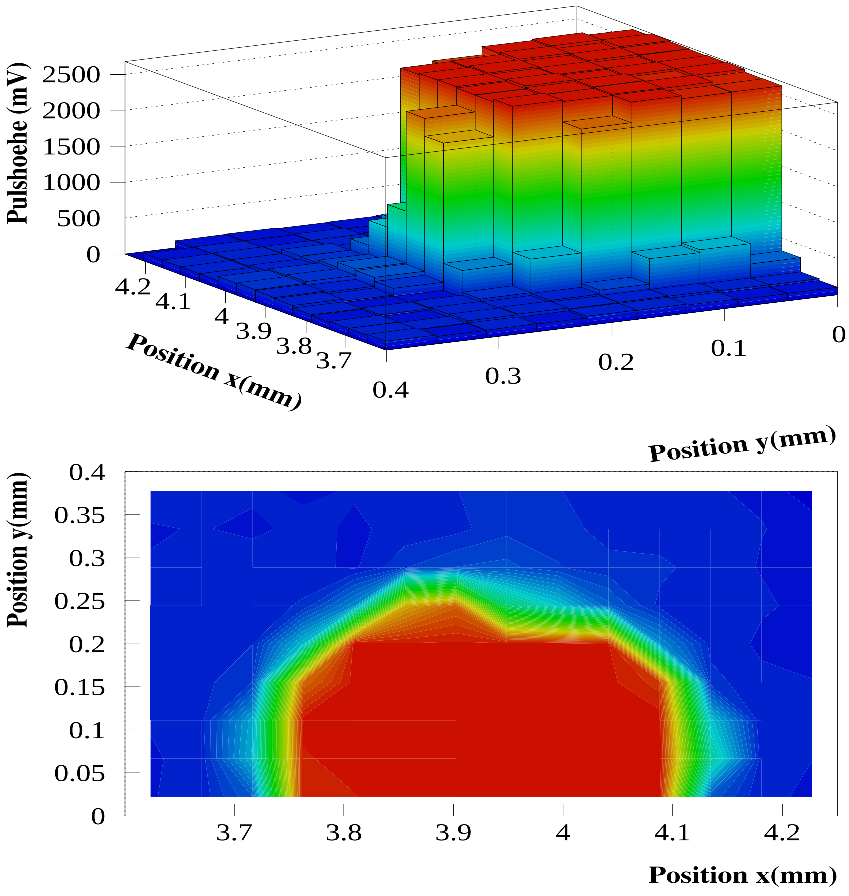


Abbildung 5.7: Laserscan

200 μm in y-Richtung größer als ΔU = 2500 mV ist (roter Bereich). Die dort erzeugten Elektronen werden im internen Gate gesammelt und erhöhen den Transitorstrom. Der sensitive Bereich des Detektors ist größer als der Einzelpixel. Dies hat die folgenden Gründe: Das in dieser Arbeit verwendete Laserlicht wurde nicht abgeschwächt und besitzt hohe Intensität. Das Laserlicht erzeugt im Detektor so viele Elektronen, daß diese sich aufgrund der Abstoßung durch ihre gleichnamige Ladung stark lateral ausbreiten. Ein Teil der außerhalb des Pixelbereichs erzeugten Ladungen kann so in diesen gelangen und im internen Gate gesammelt werden. Da in diesem Betriebsmodus auf das Löschen des internen Gates verzichtet wird und in diesem somit immer eine gewisse Ladungsmenge deponiert ist, reicht dieser Teil der erzeugten Ladungen aus, das interne Gate vollständig mit Elektronen zu besetzen. Ferner führt die Schrittweite von 100 μm zu einem systematischen Fehler. Der an einer Position gemessene Wert wird einer Fläche von 100 μm $\times$100 μm zugeordnet. Der sensitive Bereich kann hierdurch in beiden Richtungen bis zu 50 μm größer erscheinen als er ist. Abbildung 5.7 zeigt, daß der sensitive Bereich nicht vollständig mit dem Laser abgetastet werden konnte. Ein Teil des sensitiven Bereichs wird durch die Metallisierung verdeckt, da bei der Produktion Prozessierungsmasken 100 μm von ihrer Sollposition versetzt aufgebracht wurden [Kl98].

Im Bereich mit Pulshöhen unterhalb von ΔU = 200 mV ist der Detektor nicht sensitiv auf einfallendes Laserlicht. Elektronen, die in diesem Bereich des Detektors erzeugt werden, sammeln sich nicht im internen Gate, sondern fließen über die Substrat-Kontakte InBulk und OutBulk ab. Diese Elektronen haben keinen Einfluß auf den Strom im Transistor. Die Spannungsdifferenzen von bis zu 200 mV vor und nach dem Laserpuls sind auf thermisch generierte Elektronen zurückzuführen, die im Zeitintervall zwischen den Spannunsgmessungen im internen Gate gesammelt werden.

5.4 Messungen an einem Einzelpixel-DEPFET (98er Produktion)

Messungen wurden auch an Einzelpixel-DEPFETs der 98er Produktion durchgeführt. Diese Transistoren haben eine Kanalweite von $W = 53$ μm und eine Kanallänge von $L = 5$ μm. Das Layout der Struktur ist in den Abbildungen 5.8 und 5.4 dargestellt. Auch hier ist der Pixel zylindrisch aufgebaut. Im Zentrum des Pixels befindet sich die Source-Implantation. Eine kreisförmige Gate-Implantation umschließt diese. Der Gate-Ring ist umgeben von der Drain-Implantation, die außen rechteckig mit den Seitenlängen 53 μm und 64 μm ist. Den Einzelpixel umgibt ein Guard-Ring mit den Seitenlänge 850 μm (Höhe), 610 μm (Breite oben) und 750 μm (Breite unten).

$$\begin{aligned}
U_{\pm} &= \pm 15\ V (Operationsverst\ddot{a}rker),\\
U_{DDA} &= +15\ V,\\
U_{DD} &= +5\ V,\\
U_{Clear} &= U_{Depletion} = U_{SS} = 0\ V,\\
U_{Guardring} &= U_{InBulk} = U_{OutBulk} = U_{Source} = GND,\\
U_{Stromabzug} &= U_{DS}.
\end{aligned}$$

Der Transistor dieses Einzelpixel-DEPFETs erreicht bei $U_{DS} \approx -3$ V den Sättigungsbereich (Abbildung 5.10). Für Drain-Source-Spannungen größer als U_{DS} = -1,5 V folgt die Ausgangskennlinie ohmscher Strom-Spannungs-Charakteristik. Die Ausgangskennlinie zeigt bei U_{DS} = - 5 V eine zusätzliche Stromstufe. Diese ist auf den Einfluß der Drain auf das interne Gate zurückzuführen. Durch die negative Drain-Source-Spannung wird der Bereich des Transistors von der Oberseite her verarmt. Bei einer Drain-Source-Spannung U_{DS} = - 5 V wird das interne Gate durch die Verarmunsgzone isoliert und bekommt leicht negatives Potential. Dies führt zu einem etwas höheren Strom im Transistor.

Als Drain-Source-Spannung für die folgenden Messungen wurde

$$\boxed{U_{DS} = -7\ \mathrm{V}}$$

gewählt, um im Sättigungsbereich des Transistors zu arbeiten. Der Transistorstrom für diesen Wert beträgt:

$$\boxed{I_D = (-356 \pm 1)\ \mu\mathrm{A}}$$

Der angegebene Fehler beruht auf der Genauigkeit des Meßgerätes.
Der Transistorstrom sinkt in der Eingangskennlinie bei $U_{GS} \approx +4$ V auf $I_D \approx 0$ μA ab. Die Abschnürspannung für diesen DEPFET beträgt also:

$$\boxed{U_{\mathrm{pinch,off}} = (+4,0 \pm 0,1)\ \mathrm{V}}$$

Angegeben ist der Ablesefehler.
Für die folgenden Messungen wurden

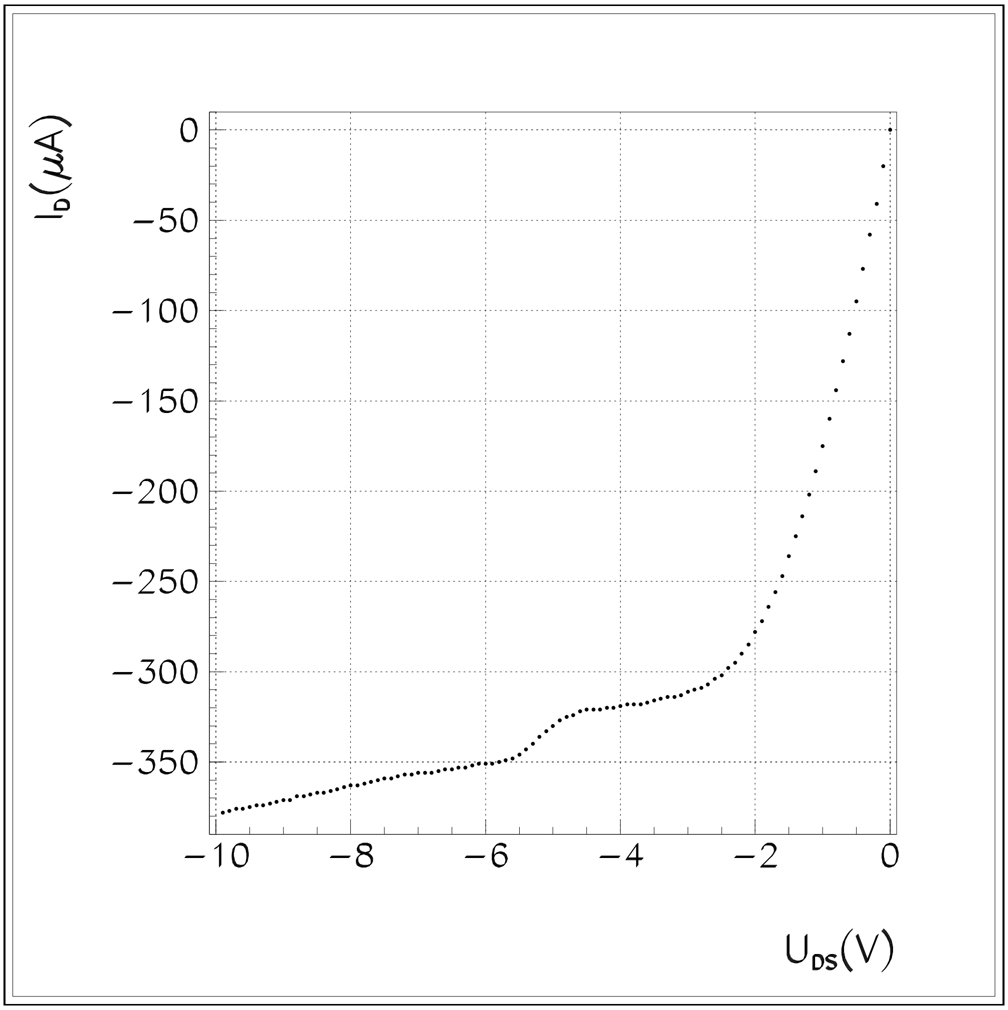


Abbildung 5.10: Ausgangskennlinie

$$\boxed{\begin{aligned} U_{\text{gate,on}} &= 0\ V \\ U_{\text{gate,off}} &= +4,5\ V \end{aligned}}$$

verwendet.
Der Wert des Widerstandes in der Gegenkopplung ist hier:

$$\boxed{R_{\text{GK}} = 56\ k\Omega}$$

Zur Bestimmung des Stromabzuges wird auf dem Oszilloskop die Differenz der Spannungen bei eingeschaltetem und ausgeschaltetem Transistor in Ab-

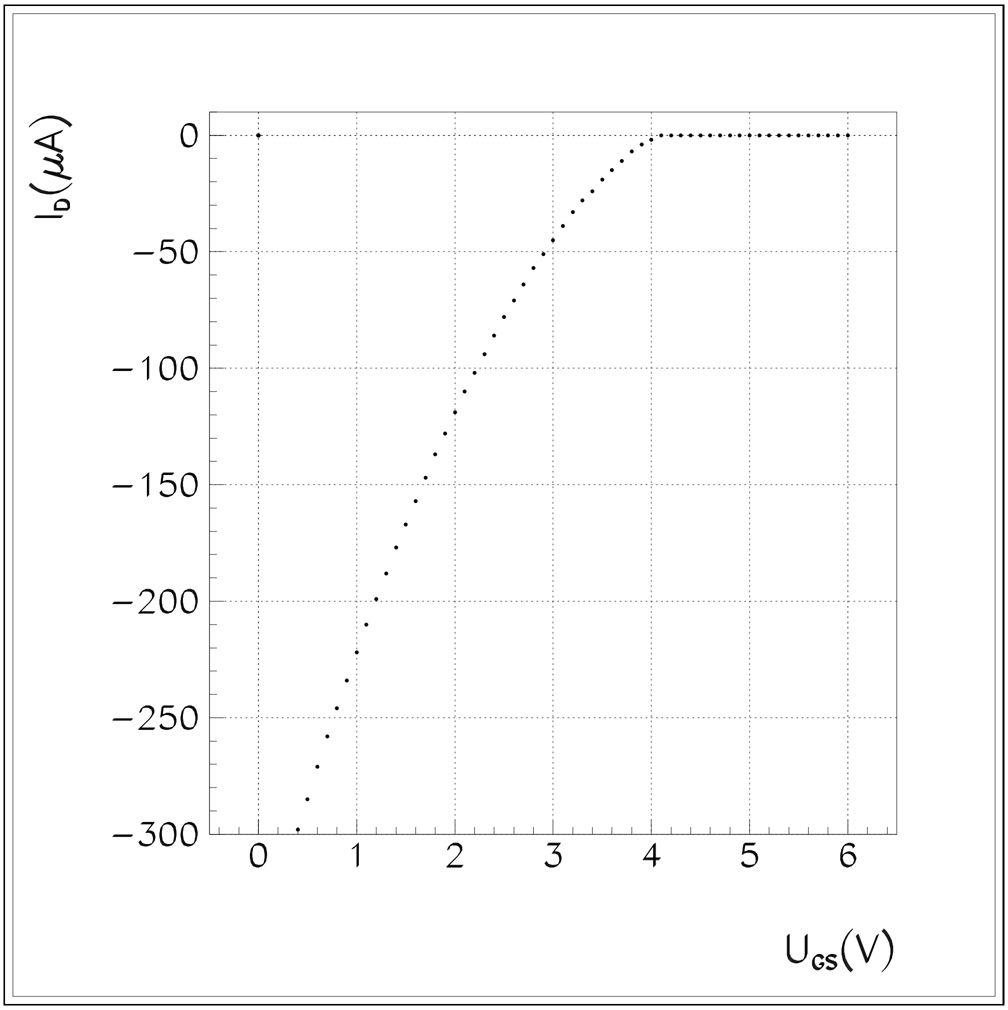


Abbildung 5.11: Eingangskennlinie

hängigkeit von der am Stromabzug angelegten Spannung gemessen. Abbildung 5.12 zeigt, daß diese Differenz im Bereich $U_{\text{Stromabzug}} = \{-10, -55\}$ V maximal ist, der Operationsverstärker ist im Arbeitsbereich. Die Spannung am Stromabzug wird auf

$$\boxed{U_{\text{Stromabzug}} = -18,0 \text{ V}}$$

eingestellt, um maximale Pulshöhe zu erhalten und keinen zusätzlichen Strom im Transistor durch zu negative Spannung am Stromabzug zu erzeugen.

Um den Einfluß der Depletionsspannung $U_{\text{Depletion}}$ auf den Transistorstrom zu messen, wird die Pulshöhe für verschiedene Depletionsspannungen gemes-

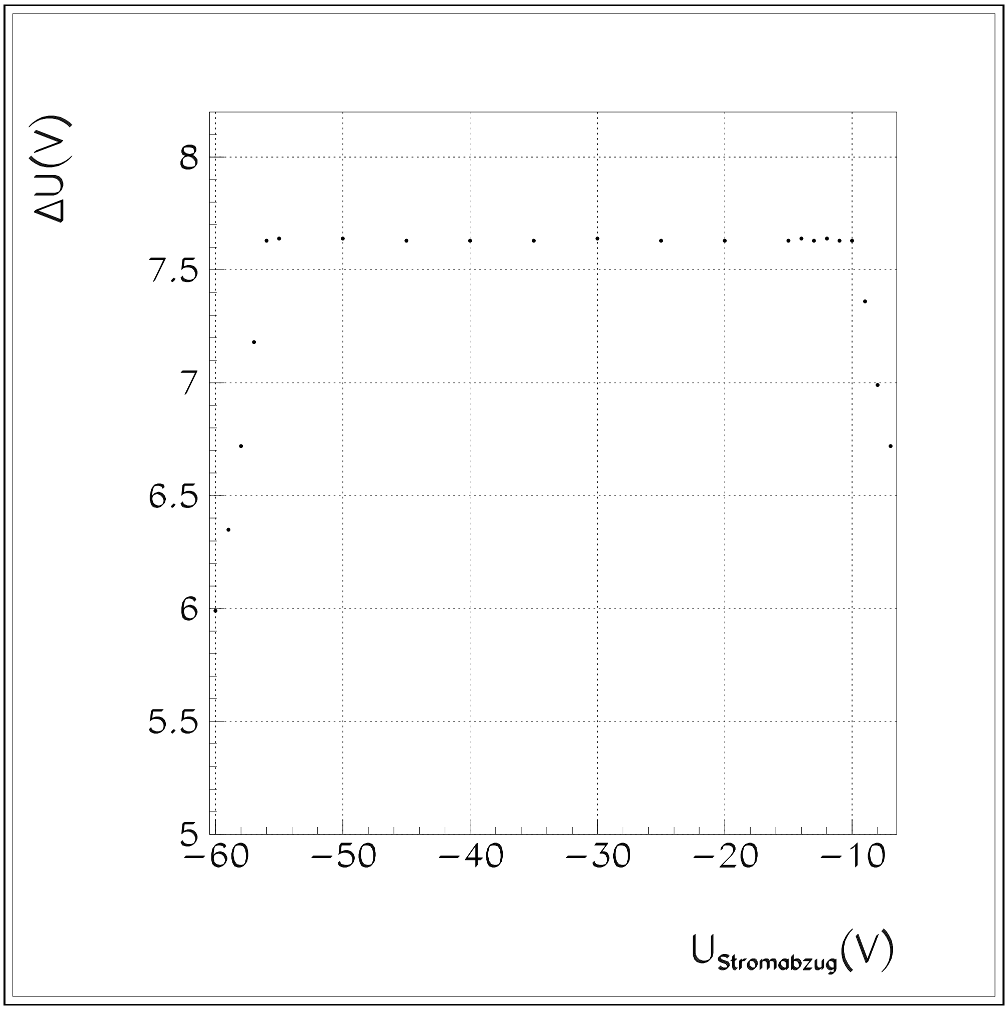


Abbildung 5.12: Messung der Pulshöhe in Abhängigkeit von der Spannung am Stromabzug

sen. Abbildung 5.13 zeigt, daß die Pulshöhe unabhängig von der angelegten Depletionsspannung ist. Die Depletion hat also keine Auswirkung auf den Transistorstrom, das Potential des internen Gates ändert sich nicht durch Depletion. Der Detektor ist vollständig verarmt ab einer Depletionsspannung $U_{\text{Depletion}} = -95$ V [Kl98]. Um den DEPFET in vollständig depletiertem Zustand zu betreiben, wird die Depletionsspannung eingestellt auf:

$$\boxed{U_{\text{Depletion}} = -110 \text{ V}}$$

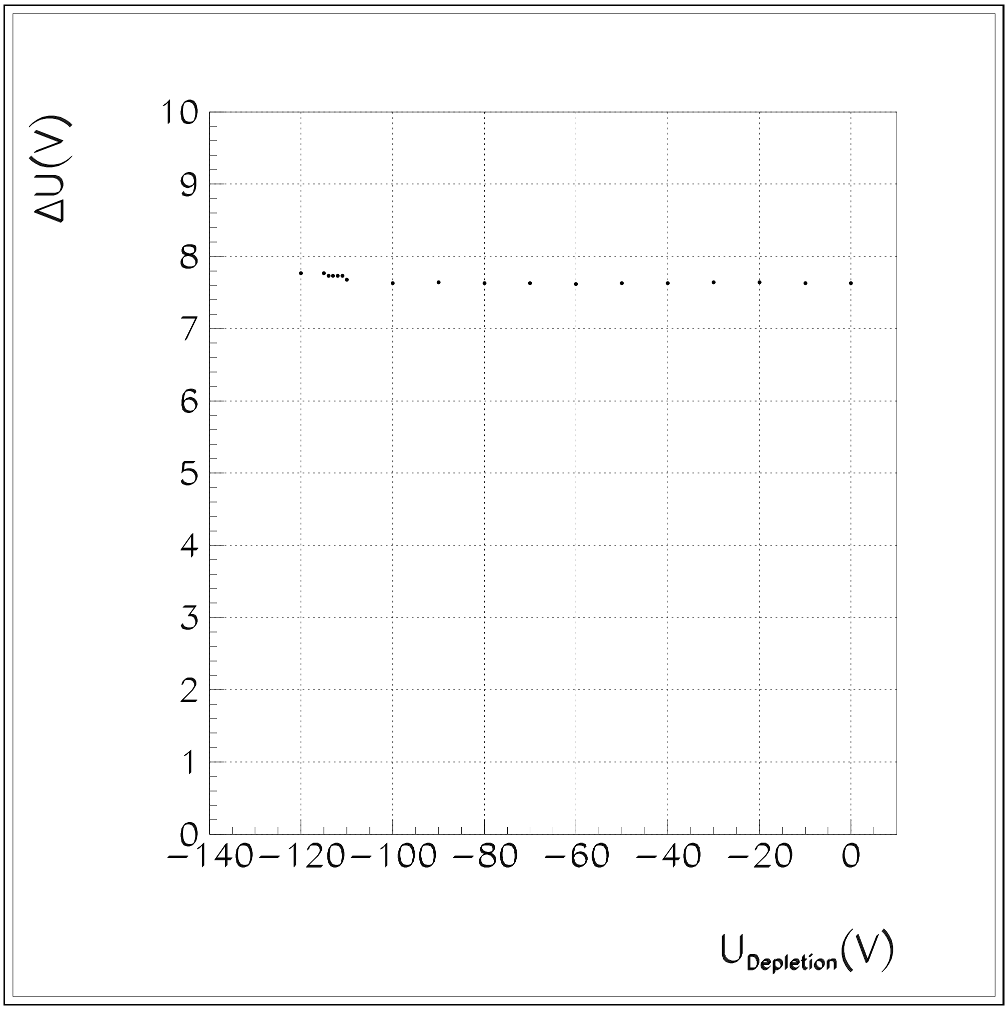


Abbildung 5.13: Messung der Pulshöhe in Abhängigkeit von der Depletionsspannung

5.4.2 Laserscan

Mit den Einstellungen aus Abschnitt 5.4 wurde der Einzelpixel-DEPFET als Strahlungsdetektor im oben beschriebenen Laserstand betrieben. Der Laserspot wurde auf der Rückseite des DEPFETs fokussiert und mit einer Schrittweite von $\Delta s = 100\ \mu$m in zwei Richtungen verfahren. Der Laser wurde bei eingeschaltetem Transistor gefeuert. Die Spannung am Ausgang des Operationsverstärkers wurde bei eingeschaltetem Transistor vor und nach dem Laserpuls gemessen. Trifft der Laser den sensitiven Bereich des Detektors, so ändert sich das Potential des internen Gates und der Transistorstrom wird größer.

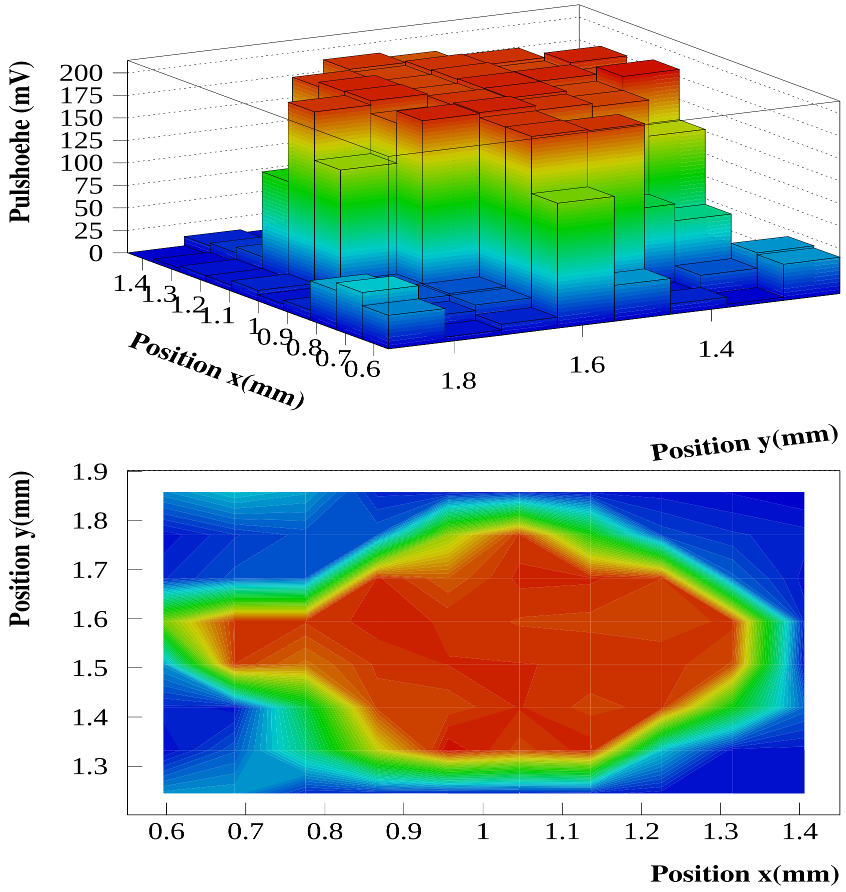


Abbildung 5.14: Laserscan

In Abbildung 5.14 ist die Differenz der Spannungen vor und nach dem Laserpuls graphisch aufgetragen. Man erkennt, daß die gemessene Spannungsdifferenz (im folgenden Pulshöhe genannt) in einem Bereich von ca. 350 μm in x-Richtung und 200 μm in y-Richtung größer als ΔU = 200 mV ist (roter Bereich). Die dort erzeugten Elektronen werden im internen Gate gesammelt und erhöhen den Transitorstrom. Der sensitive Bereich des Detektors ist größer als der Einzelpixel. Dies findet seine Ursache in der lateralen Ausbreitung der durch den nicht abgeschwächten Laser im Detektor erzeugten Ladungswolke. Somit gelangen außerhalb des Pixels erzeugte Elektronen in das interne Gate. Der systematische Fehler durch die gewählte Schrittweite ist ebenfalls zu berücksichtigen. Hierdurch kann der sensitive Bereich bis zu 50 μm größer erscheinen.

Im Bereich mit Pulshöhen unterhalb von ΔU = 50 mV ist der Detektor nicht sensitiv auf einfallendes Laserlicht. Elektronen, die in diesem Bereich des Detektors erzeugt werden, sammeln sich nicht im internen Gate, sondern fließen über die Substrat-Kontakte InBulk und OutBulk oder über den Guard-Ring-Kontakt ab. Sie haben keinen Einfluß auf den Strom im Transistor. Die Pulshöhe von bis zu 50 mV ist auf im Substrat thermisch erzeugte Elektronen zurückzuführen.

5.4.3 Verbesserter Laserscan

Abbildung 5.14 zeigt, daß die maximale Pulshöhe $\Delta U \approx 200$ mV beträgt. Der sensitive Bereich des Detektors besitzt in Richtung der x-Achse eine größere Ausdehnung als in y-Achse, obwohl der Pixel nach Layout in beiden Richtungen gleich groß ist. Der sensitive Bereich ist hier viel größer als der Pixel.

Um einen bessere Messung des sensitiven Bereichs zu erhalten, wurde ein veränderter Betriebsmodus gewählt. Da das Ein- und Ausschalten des Transistors im vorigen Laserscan keine Auswirkung auf die Messung der Pulshöhe hat, wird auf das Schalten des Gates verzichtet und dieses wird auf konstantem Potential $U_{GS} = 0$ V gehalten. Zwischen zwei Messungen wird ein Clear-Puls ($V_{\text{Clear,on}} = +15$ V) angelegt, um das interne Gate in festen zeitlichen Abständen zu leeren. Hierdurch wird der Ruhestrom im Transistor vor dem Lichteinfall minimiert und die Pulshöhe maximiert, denn die Ladungsmenge, die zusätzlich zur bereits im internen Gate befindlichen Ladung erzeugt werden muß, um das interne Gate vollständig zu besetzen, ist größer. Da ein hohes negatives Potential an der Drain bei diesem DEPFET-Einzelpixel dem Löschen des internen Gates entgegenwirken kann, wurde eine kleinere Drain-Source-Spannung U_{DS} gewählt:

$$\boxed{U_{DS} = -4 \text{ V}}$$

Wie Abbildung 5.10 zeigt, arbeitet der DEPFET auch für diese Drain-Source-

Spannung im Sättigungsbereich. Der Transistorstrom für diesen Wert beträgt:

$$\boxed{I_D = (-319 \pm 1)\ \mu\mathrm{A}}$$

Der angegebene Fehler beruht auf der Genauigkeit des Meßgerätes.
Um zu verhindern, daß außerhalb des Guard-Rings erzeugte Ladungen in den Pixelbereich gelangen, wurde am Guard-Ring eine Spannung

$$\boxed{U_{Guard} = -5\ \mathrm{V}}$$

angelegt. Für den zweiten Laserscan wurden folgende Einstellungen gewählt:

$$\begin{aligned}
U_{\pm} &= \pm 15\ V (Operationsverstärker),\\
U_{DDA} &= +25\ V,\\
U_{Clear,on} &= +15\ V,\\
U_{DD} &= +5\ V,\\
U_{Clear,off} &= U_{SS} = U_{GS} = 0\ V,\\
U_{InBulk} &= U_{OutBulk} = U_{Source} = GND,\\
U_{DS} &= -4\ V,\\
U_{Guardring} &= -5\ V,\\
U_{Stromabzug} &= -18\ V,\\
U_{Depletion} &= -110\ V.
\end{aligned}$$

In Abbildung 5.15 ist die Differenz der Spannungen vor und nach dem Laserpuls graphisch aufgetragen. Man erkennt, daß die gemessene Pulshöhe in einem Bereich von ca. 300 μm in x-Richtung und 200 μm in y-Richtung größer als ΔU = 3000 mV ist (roter Bereich). Dies ist eine deutliche Verbesserung gegenüber dem ersten Scan über diesen Einzelpixel mit einer maximalen Pulshöhe von ΔU = 200 mV. Der sensitive Bereich des Detektors ist hier deutlich kleiner als beim ersten Laserscan dieser Struktur (siehe Abbildung 5.14), aber etwas größer als der DEPFET-Pixel. Die Schrittweite von 100 μm führt zu einem systematischen Fehler. Der an einer Position gemessene Wert wird einer Fläche von 100 μm $\times$100 μm zugeordnet. Der sensitive Bereich kann hierdurch in beiden Richtungen bis zu 50 μm größer erscheinen als er ist.

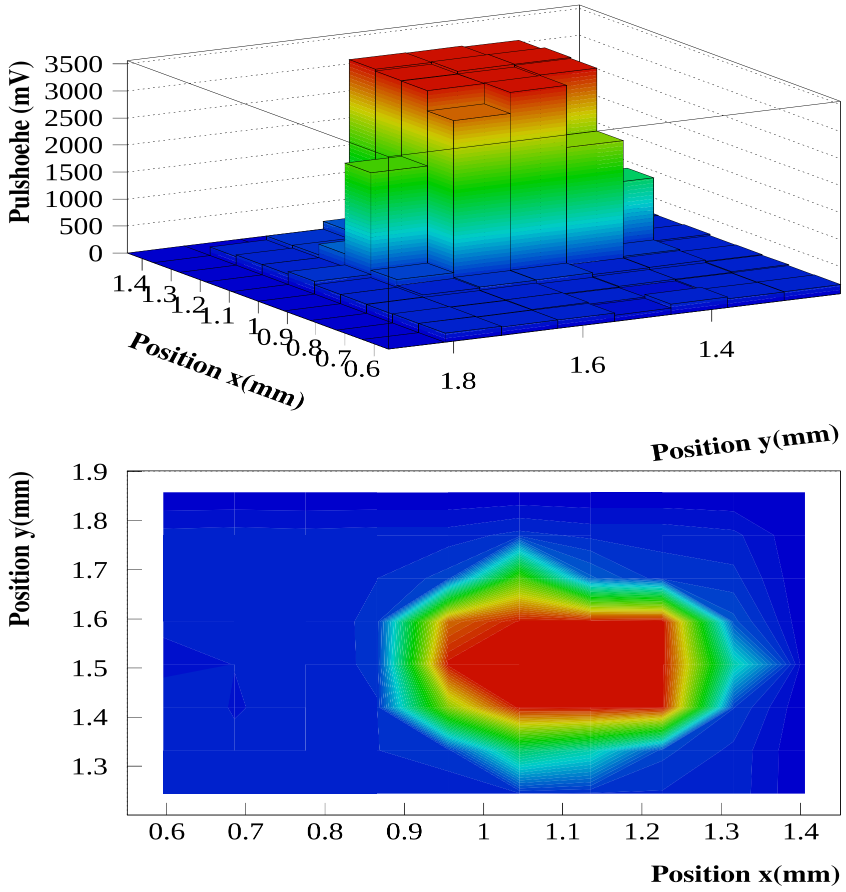


Abbildung 5.15: verbesserter Laserscan

Kapitel 6

Systementwicklung

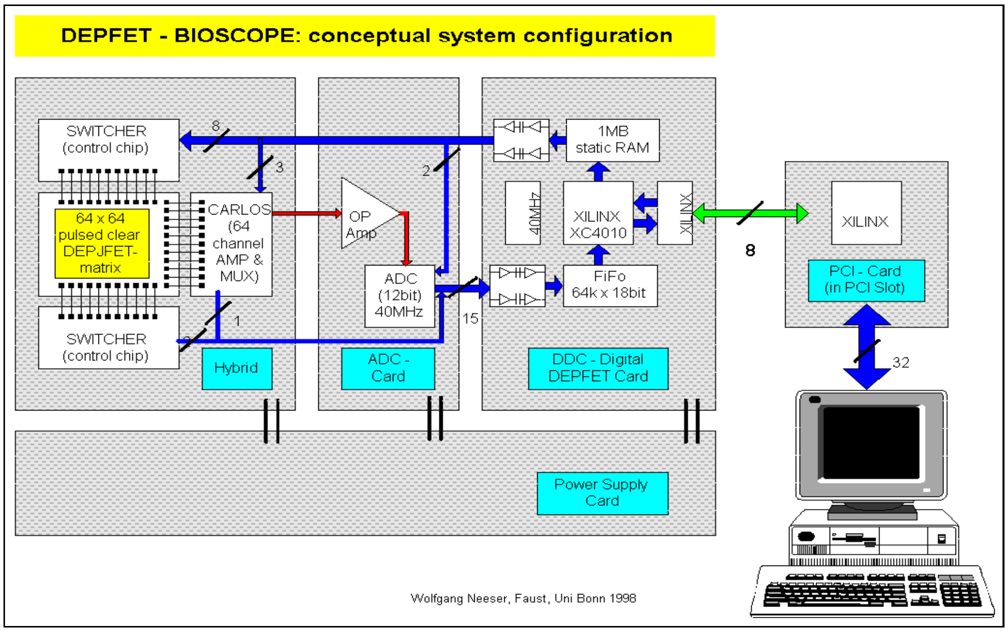
In Zusammenarbeit mit der Universität Bonn wird an der Entwicklung eines Autoradiographiesystems auf der Basis von DEPFET-Detektoren gearbeitet. Dieses DEPFET-Autoradiographiesystem soll es ermöglichen, radioaktive Quellen wie zum Beispiel Tritium zu detektieren. Das System soll kompakt und einfach in der Bedienung sein. Im folgenden werden die einzelnen noch in der Entwicklung befindlichen Systemkomponenten beschrieben.

6.1 Das Autoradiographiesystem

Das DEPFET-Autoradiographiesystem besteht aus insgesamt fünf Komponenten:

- einem Hybrid, auf dem sich der DEPFET-Detektor, der Auslesechip CARLOS und zwei SWITCHER-Steuerchips befinden,
- einer ADC-Platine (ADC-Card) mit einem Operationsverstärker und einem ADC,
- einer digitalen DEPFET-Karte (DDC),
- einer Platine zur Spannungsversorgung der einzelnen Komponenten (Power Supply Card) und
- einem PC mit einer speziellen PCI-Einsteckkarte für die Steuerung

Abbildung 6.1 zeigt schematisch das DEPFET-Autoradiographiesystem. Die Hybrid-Platine (oben links in der Abbildung) wird im Abschnitt 6.2 detailliert beschrieben. Die Daten, die der Auslesechip CARLOS liefert, werden auf der ADC-Platine nach Verstärkung durch einen Operationsverstärker in einem 12-bit ADC (40 MHz) digitalisiert. Die digitalen Daten werden an die DDC übergeben und dort in einem Speichersystem mit FIFO-Logik zwischengespeichert. Von dort werden sie über XLINXS-Steuerchips und Opto-Koppler auf die PCI-Karte im PC übertragen und dort gespeichert. Steuersignale vom PC werden über die Opto-Koppler auf die DDC und von dort über die ADC-Platine zu den beiden SWITCHER-Chips und dem CARLOS-Chip auf der Hybrid-Platine geleitet.



Wolfgang Neeser, Faust, Uni Bonn 1998

Abbildung 6.1: Konzeption des DEPFET-Autoradiographiesystems [Ne99]

6.2 Die Hybrid-Platine

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine DEPFET-Hybrid-Platine entwickelt, die im DEPFET-Autoradiographiesystem eingesetzt werden soll.

Die DEPFET-Hybrid-Platine ist $53,3$ mm × $69,9$ mm groß. Sie ist aus zwei Keramiken mit jeweils 300 μm Dicke zusammengesetzt (Sandwich-Struktur). Das Layout der Hybrid-Platine ist in Abbildung 6.2 wiedergegeben. In der Mitte der Platine ist die Position des DEPFET-Detektors zu erkennen. Dort ist eine $7,2$ mm × $6,6$ mm große Aussparung vorgesehen, um die Rückseite des Detektors nicht zu verdecken. Rechts und links des DEPFETs sind die Plätze für die SWITCHER-Chips. Der SWITCHER für die Ansteuerung der Clear-Kontakte der DEPFET-Matrix wird links, der SWITCHER für die Ansteuerung der Gate-Kontakte rechts auf einer Metallfläche aufgeklebt. Unterhalb des DEPFET-Detektors ist eine Metallisierung für den Auslesechip CARLOS aufgebracht. Alle Leiterbahnen und Metallflächen bestehen aus einer Silber-Palladium-Verbindung, auf die im Bondbereich eine spezielle Goldpaste aufgebracht wird. Die Leiterbahnen oberhalb des DEPFETs und rechts und links des CARLOS' dienen der direkten Kontaktierung einiger Kontakte des DEPFETs (InBulk, OutBulk, Source). Die Leiterbahnen rechts und links vom Auslesechip und die erste Leiterbahn oberhalb des DEPFETs sind mittels Durchkontaktierungen mit der Rückseite der unteren Keramik verbunden. Diese ist zur Hälfte als V_{Source}-Ebene (GND-Potential, nicht eingezeichnet) ausgelegt und über eine weitere Durchkontaktierung mit Anschluß Nr. 36 (die Anschlüsse sind oben links beginnend entgegen dem Uhrzeigersinn durchnumeriert) leitend verbunden. Die gelb markierte Leiterbahn (Anschluß Nr. 1) befindet sich ebenfalls auf der Rückseite der zweiten Keramik und dient dem Anschluß des Rückseitenkontaktes am DEPFET. Die Anschlußbelegung der Hybrid-Platine befindet sich in Anhang B.

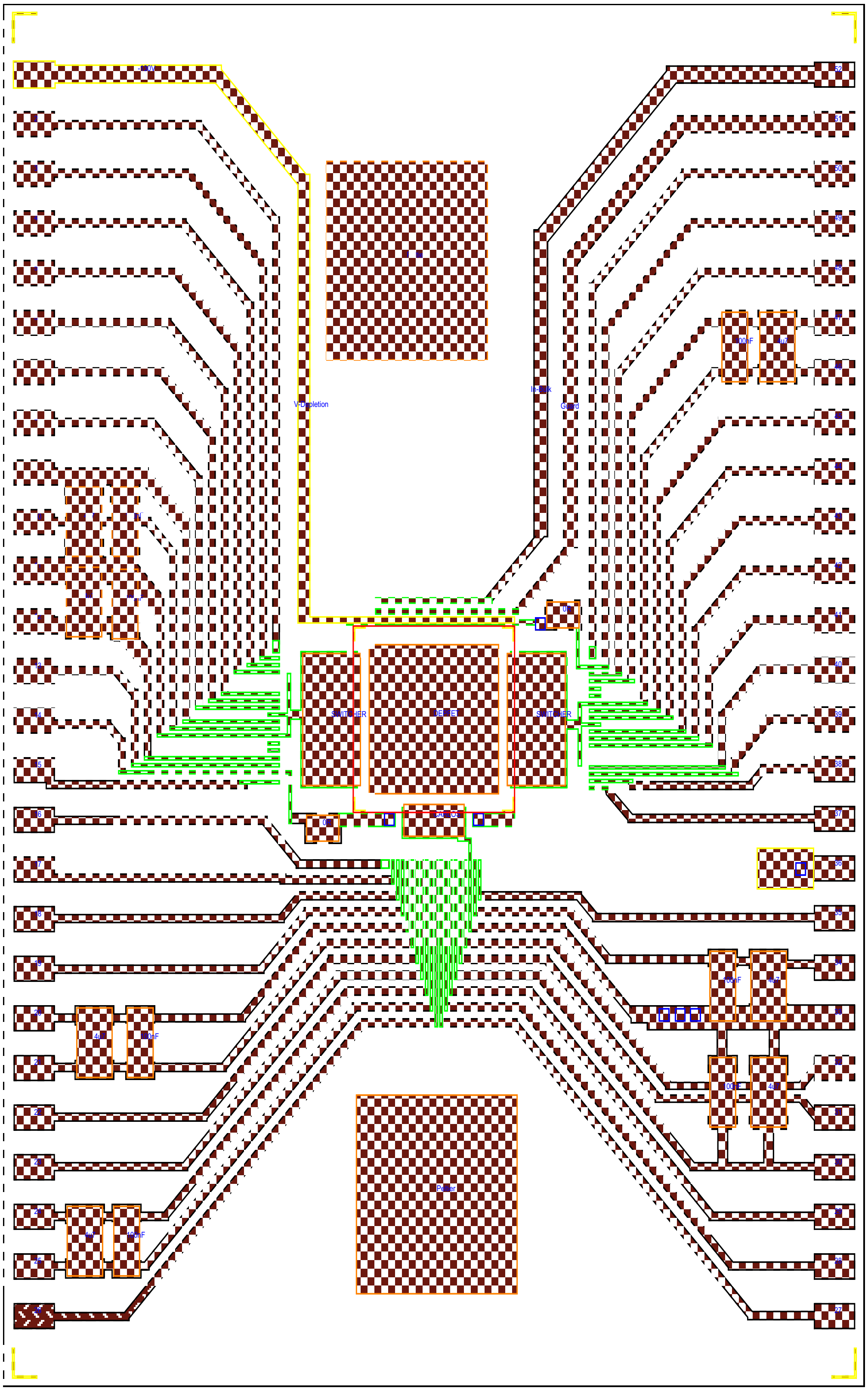


Abbildung 6.2: Layout der DEPFET-Hybrid-Platine

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden verschiedene DEPFET-Einzelpixel-Strukturen untersucht. Anhand ihrer Kennlinien wurden Continuous-Clear-DEPFETs charakterisiert. Der Sättigungsbereich und die Abschnürspannung verschiedener DEPFET-Detektoren wurden bestimmt und für einen Einzelpixel-DEPFET für verschiedene Arbeitspunkte die Steilheit (Transkonduktanz) g_m ermittelt. Für dynamische Messungen an Einzelpixel-DEPFETs wurde eine DEPFET-Trägerplatine mit integrierter Ausleseelektronik entwickelt und erfolgreich mit einem SWITCHER-Steuerchip in einem Steuer- und Auslesesystem zusammengeführt. Anhand ihrer Kennlinien wurden die Arbeitspunkte von Pulsed-Clear-DEPFETs aus den Jahren 1993 und 1998 bestimmt und diese erfolgreich als Detektoren zum Nachweis von Photonen in Betrieb genommen. In verschiedenen Betriebsmodi wurde die Sensitivität dieser Pulsed-Clear-DEPFETs gemessen. Eine DEPFET-Hybrid-Platine wurde entwickelt, die in einem speziellen DEPFET-Detektorsystem für Autoradiographie eingesetzt werden soll. Diese Hybrid-Platine wird den Betrieb einer DEPFET-Matrix mit zwei angeschlossene SWITCHER-Steuerchips und einem CARLOS-Auslesechip in einem kompakten System ermöglichen und zur Realisierung eines DEPFET-Autoradiographiesystems beitragen.

In weiteren Schritten müssen hierzu DEPFET-Matrizen untersucht werden und in einem System aus SWITCHER-Steuerchips und CARLOS-Auslesechip als Detektor in Betrieb genommen werden. Darüberhinaus müssen weitere Systemkomponenten wie rauscharme Spannungsversorgungen, eine ADC-Platine, eine Platine zur digitalen Datenverarbeitung, ein System zur optischen Datenübertragung und ein Steuerprogramm entwickelt oder an die Anforderungen in einem solchen DEPFET-System angepaßt werden. Diese Komponenten befinden sich schon in der Entwicklung oder in ersten Tests.

Anhang A

Die DEPFET-Trägerplatine

Die Platine ist insgesamt 8,9 cm × 10,1 cm groß. Im Layout der Oberseite erkennt man auf der linken Seite eine 50-polige und auf der rechten Seite eine 60-polige Steckerleiste. Im unteren Drittel in der Mitte befindet sich eine 0,8 cm × 0,8 cm große Aussparung (Cut out). Diese Aussparung umgibt ein quadratischer Rahmen mit 1,2 cm Seitenlänge. Dies ist der Bereich, in den der DEPFET-Chip geklebt wird. Die Aussparung ermöglicht hierbei Zugang zur Rückseite des Detektors, über die im Betrieb des Detektors Strahlung einfällt. Links von der Aussparung ist eine 0,38 cm × 0,17 cm große und rechts eine 0,66 cm × 0,37 cm große Metallfläche aufgebracht. Dort werden CARLOS (links) und SWITCHER (rechts) positioniert. Die Leiterbahnen rechts und links der beiden Flächen dienen als Kontaktflächen für wire bonds. Dadurch wird es möglich, defekte Chips auszutauschen, ohne auch den DEPFET-Chip austauschen zu müssen. Die Rückseite der Platine besitzt insgesamt drei Kontaktflächen (bond pads), die dem Anschluß der Rückseitendiode dienen.

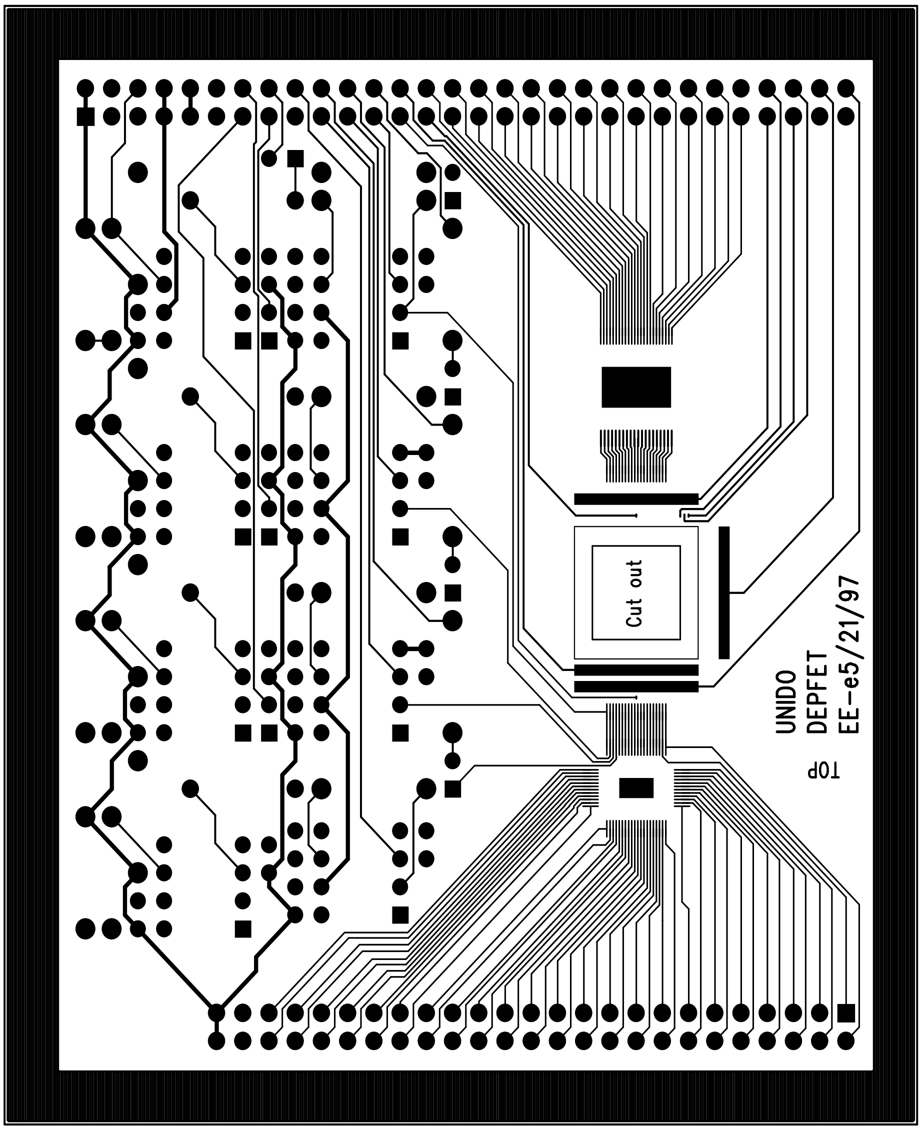


Abbildung A.1: Oberseite der DEPFET-Trägerplatine

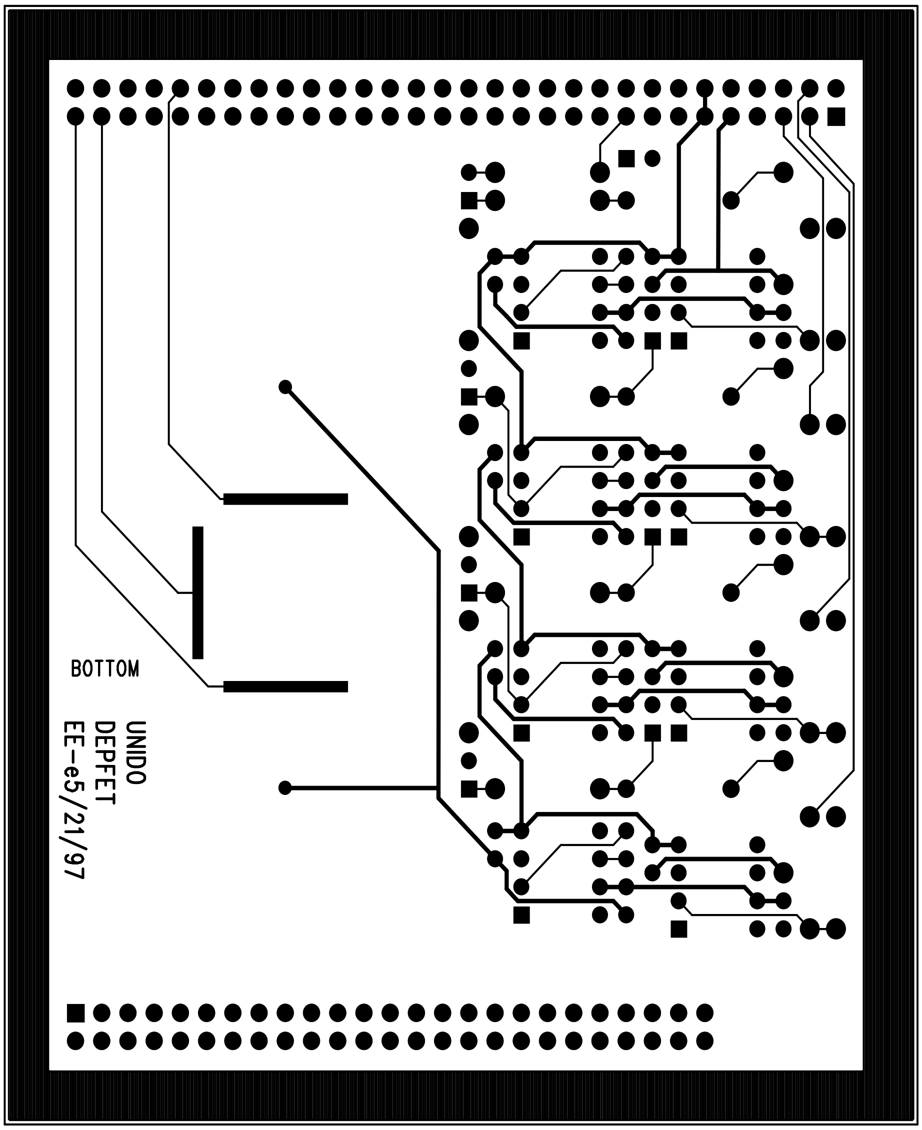


Abbildung A.2: Unterseite der DEPFET-Trägerplatine

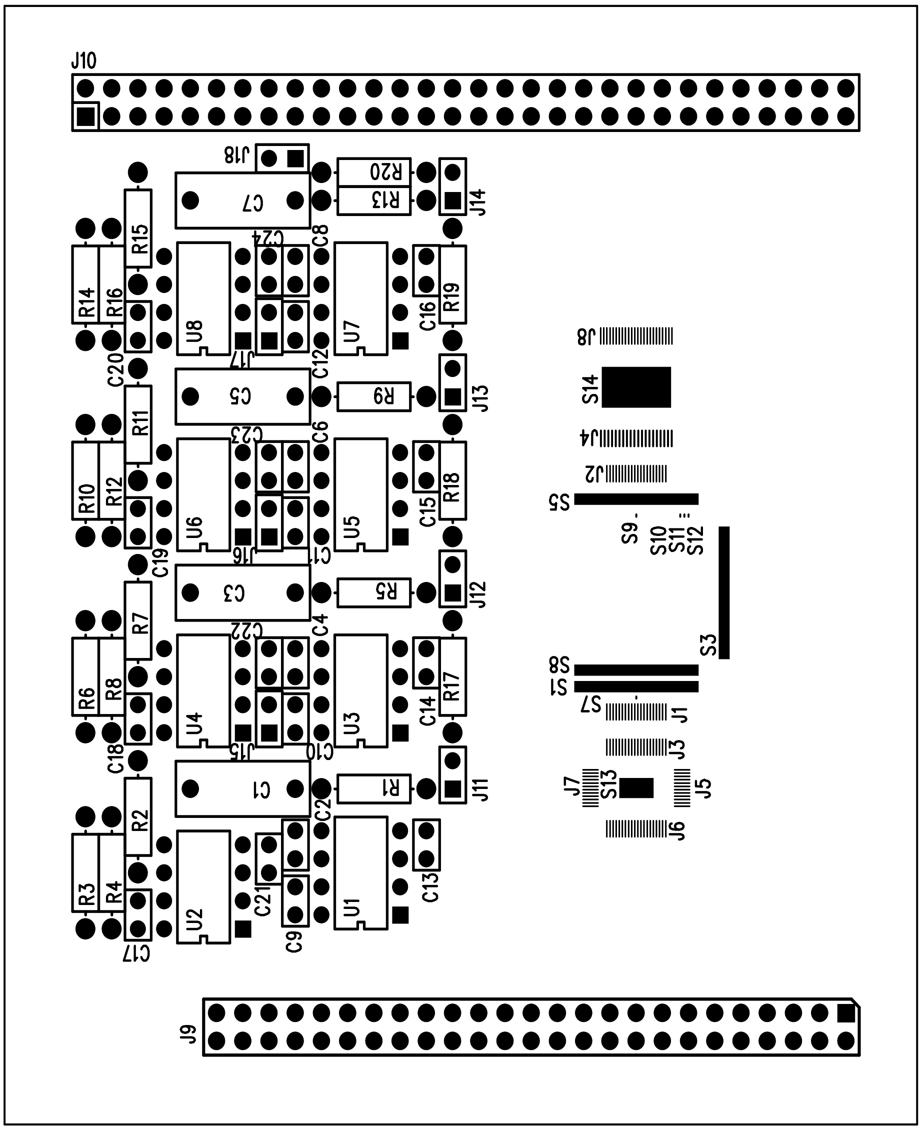


Abbildung A.3: Aufdruck der DEPFET-Trägerplatine

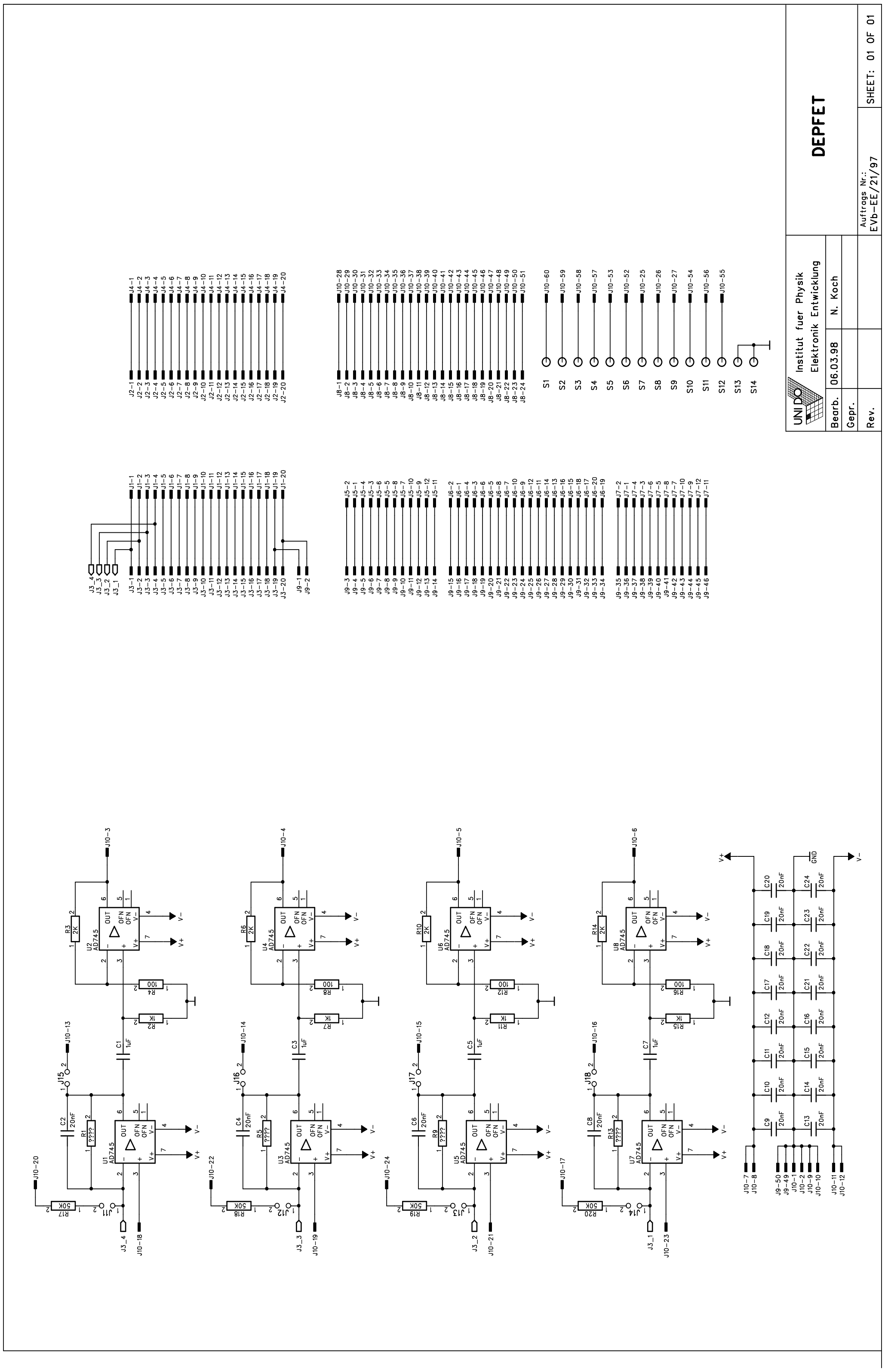


Abbildung A.4: Schaltplan der DEPFET-Trägerplatine (hier: V = U)

Steckerleiste J10			
Nr.	Belegung	Nr.	Belegung
1	GND	31	
2	GND	32	
3	Kanal 4: Auslese 2. Stufe	33	
4	Kanal 3: Auslese 2. Stufe	34	
5	Kanal 2: Auslese 2. Stufe	35	
6	Kanal 1: Auslese 2. Stufe	36	
7	U_+ Operationsverstärker	37	Clear
8	U_+ Operationsverstärker	38	
9	GND	39	
10	GND	40	
11	U_- Operationsverstärker	41	
12	U_- Operationsverstärker	42	
13	Kanal 4: Auslese 1. Stufe	43	
14	Kanal 3: Auslese 1. Stufe	44	
15	Kanal 2: Auslese 1. Stufe	45	
16	Kanal 1: Auslese 1. Stufe	46	
17	Kanal 1: Stromabzug	47	
18	Kanal 4: U_{DS}	48	
19	Kanal 3: U_{DS}	49	Gate
20	Kanal 2: Stromabzug	50	
21	Kanal 2: U_{DS}	51	
22	Kanal 3: Stromabzug	52	$U_{Depletion}$
23	Kanal 1: U_{DS} (gebondet)	53	
24	Kanal 4: Stromabzug	54	
25	Source	55	
26	InBulk	56	
27		57	
28		58	
29		59	
30		60	Guardring

Tabelle A.1: Anschlußbelegung der DEPFET-Trägerplatine Nr. 1

Steckerleiste J9			
Nr.	Belegung	Nr.	Belegung
17	Source B6	42	
18		43	
19		44	
20		45	
21	Source B5	46	

Steckerleiste J10			
Nr.	Belegung	Nr.	Belegung
1	GND	31	
2	GND	32	
3	Kanal 4: Auslese 2. Stufe	33	
4	Kanal 3: Auslese 2. Stufe	34	
5	Kanal 2: Auslese 2. Stufe	35	
6	Kanal 1: Auslese 2. Stufe	36	
7	U_+ Operationsverstärker	37	
8	U_+ Operationsverstärker	38	
9	GND	39	
10	GND	40	
11	U_- Operationsverstärker	41	
12	U_- Operationsverstärker	42	Gate B5
13	Kanal 4: Auslese 1. Stufe	43	
14	Kanal 3: Auslese 1. Stufe	44	Clear B5
15	Kanal 2: Auslese 1. Stufe	45	
16	Kanal 1: Auslese 1. Stufe	46	
17	Kanal 1: Stromabzug	47	
18	Kanal 4: U_{DS} (gebondet, B6)	48	Gate B6
19	Kanal 3: U_{DS} (gebondet, B5)	49	
20	Kanal 2: Stromabzug	50	Clear B6
21	Kanal 2: U_{DS}	51	
22	Kanal 3: Stromabzug	52	$U_{Depletion}$
23	Kanal 1: U_{DS}	53	
24	Kanal 4: Stromabzug	54	Guardring B5 & B6
25		55	
26	InBulk B5	56	InBulk B6
27	OutBulk B5 & B6	57	
28		58	
29		59	$U_{Depletion}$
30		60	

Tabelle A.2: Anschlußbelegung der DEPFET-Trägerplatine Nr. 2

Anhang B

Die DEPFET-Hybrid-Platine

Nr.	Belegung	Nr.	Belegung
1	$U_{Depletion}$	52	InBulk
2	Enable Decoder 1	51	Guard
3	Clock 1 (Clear-Switcher)	50	I_{BIAS} (Gate-Switcher)
4	Serial In 1 (Clear-Switcher)	49	InUoltage 1 (Gate-Switcher)
5	Select Serial In 1 (Clear-Switcher)	48	InUoltage 0 (Gate-Switcher)
6	Clock FF 1 (Clear-Switcher)	47	U_{DDA} (Gate-Switcher)
7	Select FF 1 (Clear-Switcher)	46	U_{SS} (Gate-Switcher)
8	Enable 1 (Clear-Switcher)	45	Serial Out 1(Gate-Switcher)
9	U_{DD} (Clear-Switcher)	44	U_{DD} (Gate-Switcher)
10	Serial Out 1 (Clear-Switcher)	43	Enable 1 (Gate-Switcher)
11	U_{SS} (Clear-Switcher)	42	Select FF 1 (Gate-Switcher)
12	U_{DDA} (Clear-Switcher)	41	Clock FF 1 (Gate-Switcher)
13	InVoltage 0 (Clear-Switcher)	40	Select Serial In 1 (Gate-Switcher)
14	InVoltage 1 (Clear-Switcher)	39	Serial In (Gate-Switcher)
15	I_{BIAS} LS (Clear-Switcher)	38	Clock 1 (Gate-Switcher)
16	Out (Carlos)	37	Enable Decoder 1 (Gate-Switcher)
17	DigMon (Carlos)	36	U_{Source}-Plane
18	Clock (Carlos)	35	$U_{Pulldown}$ (Carlos)
19	Reset (Carlos)	34	U_{DDA} (Carlos)
20	U_{DD} Buffer (Carlos)	33	GNDA (Carlos)
21	GND Buffer (Carlos)	32	U_{Diode} (Carlos)
22	I_{BIAS} Out (Carlos)	31	U_{BIAS} Load (Carlos)
23	Turbo (Carlos)	30	$U_{DD}Kaskode$ (Carlos)
24	GNDD (Carlos)	29	I_{BIAS} Kaskode (Carlos)
25	U_{DDD} (Carlos)	28	I_{BIAS} SF 2 (Carlos)
26	Sample (Carlos)	27	I_{BIAS} SF 1 (Carlos)

Tabelle B.1: Anschlußbelegung der DEPFET-Hybrid-Platine

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Literaturverzeichnis

[Au97] Aurisch, T.: **Untersuchungen an den DEPFET-Matrizen mit gepulstem und kontinuierlichem Löschvorgang**
Diplomarbeit, Universität Bonn, 1997

[Be30] Bethe, H.A.:
Annalen der Physik (1930) 325

[Ce96] Cesura, G.; Klein, P.; Kemmer, J.; Lutz, G.: **New pixel detector concepts based on JFETs on high resistivity silicon**
Nucl. Instr. and Meth. A (1996) No. 1-3

[Ch68] Charpak, G. et al.: **The use of multiwire proportional counters to select and localize charged particles**
Nucl. Instr. and Meth. 62 (1968) 262-268

[Do89] Dominik, W. et al.: **A gaseous detector for high-accuracy autoradiography of radioactive compounds with optical readout of avalanche positions**
Nucl. Instr. and Meth. A278 (1989) 779-787

[Fi71] Fischer, H.A.; Werner, G.: **Autoradiographie**
de Gruyter, Berlin, 1971

[Ga84] Gatti, E.; Rehak, P.: **Semiconductor drift chamber: an application of a novel charge transport scheme**
Nucl. Instr. and Meth. A225 (1984) 608

[Ho96] Hörnel, N.: **Test, Inbetriebnahme und Weiterentwicklung von Silizium-Pixel-Detektoren**
Diplomarbeit, Ludwig-Maximilians-Universität, München, 1996

[Ke84] Kemmer, J.: **Improvement of detector fabrication by the planar process**
Nucl. Instr. and Meth. A226 (1984) 89

[Ke90] Kemmer, J.; Lutz, G.: **New detector concepts**
Nucl. Instr. and Meth. A253 (1990) 92

[Kl96] Klein, P.: **Entwicklung, Bau und Test eines Halbleiter-Bildzellendetektors für den Einsatz in der Teilchenphysik**
Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität, München, 1996

[Kl91] Klein, P. et al.: **Design and performance of semiconductor detectors with integrated amplification and charge storage capability**
Nucl. Instr. and Meth. A305 (1991) 517

[Kl98] Klein, P.: **persönliche Mitteilung**

[Le93] Leo, W.R.: **Techniques for nuclear and particle physics experiments**
Springer-Verlag, 2. Auflage, 1993
und Referenzen darin

[Mi86] Miyahara, J. et al.: **A new type of x-ray area detector utilizing laser stimulated luminescence**
Nucl. Instr. and Meth. A246 (1986) 572-578

[Ne99] Neeser, W.: **N.N.**
Dissertation (in Vorbereitung), Universität Bonn, 1999

[Ot97] Otterbach, R.; Willemsen, J.: **Betriebsanleitung zum Signalmeßstand zur Charakterisierung von Siliziumdetektoren**
Universität Dortmund, 1997

[Ov98] Overdick, M.: **Digital autoradiography using silicon strip detectors** Dissertation, Universität Bonn, BONN-IR-98-05

[Ps98] Pschyrembel et al.: **Klinisches Wörterbuch** de Gruyter, Berlin, 258. Auflage, 1998

[Ro97] Rogers, A.W.: **Techniques of autoradiography**
Elsevier 3^{rd} Edition, Amsterdam (1979)

[Sa93] Sanghera, B.; Ott, R.J.: **Preliminary studies using silicon strip detectors in digital autoradiography**
IEEE Trans. on Nuclear Science 40 (1993) 992-995

[Sc98] Schäfer, I.: **Das Auslesesystem eines DEPFET-Detektorsystems und erste Messungen**
Diplomarbeit, Universität Dortmund, 1998

[Sc90] Schooneveld, E.M. et al.: **A silicon strip detector for β-radiochromatography**
Nucl. Instr. and Meth. A288 (1990) 250-253

[Sz81] Sze, S.M.: **Physics of semiconductor devices**
John Wiley and Sons, New York (1981)
und Referenzen darin

Erklärung
Ich erkläre, daß ich diese Arbeit selbständig verfaßt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Diese Arbeit wurde am Lehrstuhl Experimentelle Physik V des Fachbereichs Physik der Universität Dortmund erstellt. Sie wurde im Rahmen des Forschungsverbundes ≪Halbleiter-Mikrosensorik≫ der Universitäten Bochum, Bonn, Dortmund, Siegen und Wuppertal vom Ministerium für Schule und Weiterbildung, Wissenschaft und Forschung (MSWWF) und von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Projekt ≪Strahlungssensorik mit DEPFET-Pixelmatrizen≫ gefördert.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich während des Studiums begleiteten und zum Gelingen dieser Arbeit beitrugen.

Herr Prof. Dr. P. Buchholz stellte mir dieses interessante Thema bereit und hatte immer ein offenes Ohr für die großen und kleinen Probleme bei der Fertigstellung dieser Arbeit. Herr Dr. Peter Klein stand mir stets mit Rat und Tat zur Seite und wußte auf viele Fragen eine schlüssige und kompetente Antwort. Er opferte einige Stunden seiner Freizeit mit dem notwendigen Korrekturlesen dieser Arbeit. Herr Markus Adams tat dies ebenso und war wie auch Herr Carsten Cruse und Herr Björn Schwenninger stets hilfsbereit. Bei der Entwicklung der Platinen unterstützten mich Herr Norbert Koch und Herr Dieter Gebauer sehr.

Herr Prof. Dr. C. Gößling und seine Mitarbeiter stellten freundlicherweise Labors und Meßplätze zur Verfügung. Besonders hervorheben möchte ich hier Frau Dr. Renate Wunstorf, Herrn Jens Wüstenfeld und Herrn Fabian Hügging, die mir mit ihrem fachmännischen Rat halfen und auch kurzfristig Messungen ermöglichten.

Sehr zum Verständnis des Themas trug Herr Wolfgang Neeser mit seinem Wissen bei, er war stets ein angenehmer Diskussionspartner. Für das Bonding der Chips sorgte Herr Walter Ockenfels und behielt auch dann einen kühlen Kopf, wenn die Bonding-Maschine mal nicht so funktionierte wie sie sollte.

Nicht zuletzt möchte ich meinen Eltern danken, die mir dieses Studium ermöglichten. Mein Vater verbrachte manche Stunde beim Korrekturlesen. Die umfangreiche Bibliothek und das 24 Stunden Notruf-Telefon meines Bruders waren mir eine wesentliche Stütze. Besonders bedanke ich mich bei Bärbel Anders. Sie begleitete mich während des Studiums und ertrug geduldig das wachsende Chaos im Arbeitszimmer.