

**Projektbericht zum Fortgeschrittenen
Praktikum B**
***Optimierung der Bedampfungsparameter
von Pentacen-Feldeffektransistoren***

Andreas Messer

28. April 2006

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Theoretische Grundlagen	4
2.1	Pentacen	4
2.2	Ladungsträgerbeweglichkeit	5
2.3	Der Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor (MOSFET)	5
3	Experimentelles	9
3.1	Probenherstellung	9
3.2	Elektrische Charakterisierung	10
3.3	Auswertung	11
3.3.1	Transferkennlinie im linearen Bereich	11
3.3.2	Transferkennlinie im Sättigungsbereich	12
3.3.3	Fehlerbetrachtung	12
4	Ergebnisse	16
4.1	Probe FO110d	16
4.2	Probe FO110c	17
4.3	Probe FO112	17
4.4	Probe FO113	18
4.5	Probe FO115	18
4.6	Probe FO116	20
4.7	Probe FO117	21
4.8	Zusammenfassung	21
A	Proben	26

1 Einleitung

Neben den klassischen Halbleitern wie Silizium und Germanium existieren auch organische Stoffe mit halbleitenden Eigenschaften. Diese bestehen aus Kohlenwasserstoff-Molekülen, deren Elektronenorbitale bei geeigneter geometrischer Anordnung überlappen. Je besser diese Anordnung, desto besser ist die Leitfähigkeit. Im Gegensatz zur starken kovalenten Bindung der klassischen Halbleiter sind die organischen Moleküle jedoch nur durch schwache van der Waals-Bindungen verbunden. Daher ist die Ladungsträgerbeweglichkeit organischer Halbleiter (OHL) etwa 10^3 mal kleiner. Dies schränkt die Nutzbarkeit auf Anwendungen mit kleinen Frequenzen und Leistungen wie z.B. RFID-Etiketten ein. Ein größeres Problem elektrischer Bauteile aus organischen Substanzen ist die schnelle Degeneration der organischen Dünnschichten wodurch sich die Leitfähigkeiten mit der Zeit verschlechtert und die elektronischen Schaltungen unbrauchbar werden. Es ist das Ziel aktueller Forschung diese Nachteile zu minimieren. Aber OHL haben auch Vorteile gegenüber klassischen Halbleitern: Sie sind sehr leicht prozessierbar. So können die organischen Schichten z.B. in kostengünstigen Druckverfahren aufgebracht werden. Außerdem kann man mit OHL Schaltungen auf flexiblen Trägermaterialien aufbauen. Ein vielversprechender OHL ist Pentacen, mit dem bereits Beweglichkeiten im Bereich von $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ erreicht wurden.

In der Arbeitsgruppe von Herrn Prof. J. Geurts wird bereits seit einiger Zeit an OHL geforscht. Als Referenzmaterial soll nun auch Pentacen genutzt werden. Ziel meines Praktikums war es, die Aufdampfparameter für Pentacen zur Herstellung von OFETs zu optimieren, um eine möglichst große Ordnung der Moleküle auf dem Substrat und somit eine große Feldeffekt-Ladungsträgerbeweglichkeit zu erhalten. Dazu wurden verschiedene Proben hergestellt, elektrisch charakterisiert und die Beweglichkeiten ermittelt. Meine Aufgabe bestand im Wesentlichen in der elektrischen Charakterisierung und Auswertung der gewonnenen Daten.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Pentacen

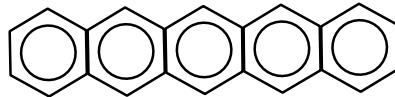
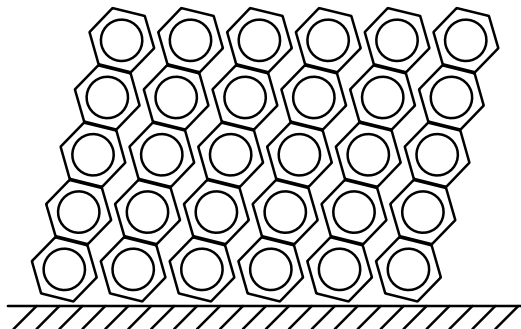


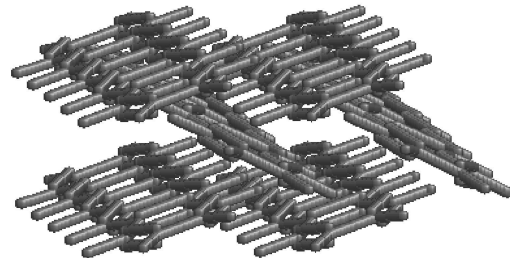
Abbildung 2.1: Chemische Struktur von Pentacen

Pentacen ist ein planares Molekül, das aus fünf Benzol-Ringen zusammengesetzt ist (Abb. 2.1). Seine Hauptachse ist 1,64 nm lang. Die halbleitenden Eigenschaften entstehen durch den Überlapp der Elektronenorbitale benachbarter Moleküle. Pentacen ist ein reiner Lochleiter, d.h. nur positive Ladungsträger tragen zur Leitfähigkeit bei.

Pentacen kann verschiedene Kristallstrukturen annehmen. Beim Bedampfen treten die Kristall- sowie die Dünnschichtphase auf (Abb. 2.2). Die Kristall-Phase ist thermodyna-



(a) Dünnschichtphase (Aufgrund der Verkippung beträgt die Höhe einer Monolage 1,54 nm)



(b) Einkristall

Abbildung 2.2: Kristallstrukturen von Pentacen

misch stabil, die Dünnschichtphase metastabil [1]. Bei hohen Aufdampfzeiten ordnen sich die Moleküle jedoch bevorzugt in der Dünnschichtstruktur an.

In der Dünnschichtphase ist der Überlapp der Elektronenorbitale benachbarter Moleküle am größten. Daher liegt hier die höchste elektrische Leitfähigkeit vor. Ziel ist es also beim Bedampfungsvorgang eine reine Dünnschicht-Phase zu erhalten.

2.2 Ladungsträgerbeweglichkeit

Die Ladungsträgerbeweglichkeit μ ist definiert als Proportionalitätskonstante von Driftgeschwindigkeit v_D der elektrischen Ladungsträger zu angelegtem elektrischen Feld E :

$$v_D = E \cdot \mu \quad (2.1)$$

Da Pentacen ein reiner Lochleiter ist, kann der Beitrag der negativen Ladungsträger zur Leitfähigkeit vernachlässigt werden. Daher ergibt sich die Leitfähigkeit σ zu

$$\sigma = q\mu_p n_p \quad (2.2)$$

wobei n_p die Konzentration und q die Ladung der positiven Ladungsträger bedeuten. Mit dem allgemeinen Ohmschen Gesetz folgt für den Strom I

$$I = \sigma E = q\mu_p n_p E. \quad (2.3)$$

In der folgenden Tabelle sind einige Beweglichkeiten zusammengestellt:

Material	Beweglichkeit [cm^2/Vs]
Silizium (monokristallin)	300 – 900 ^a
Silizium (polykristallin)	50 – 100 ^a
Silizium (amorph)	1 ^a
Pentacen (monokristallin)	0,85 – 3,2 ^b

^aJ. M. Shaw und P. F. Seidler, IBM J. Res. Dev. **45**, 3 (2001).

^bJ. H. Schön, Ch. Kloc und B. Batlogg, Phys. Rev. B. **63**, 245201 (2001).

2.3 Der Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor (MOSFET)

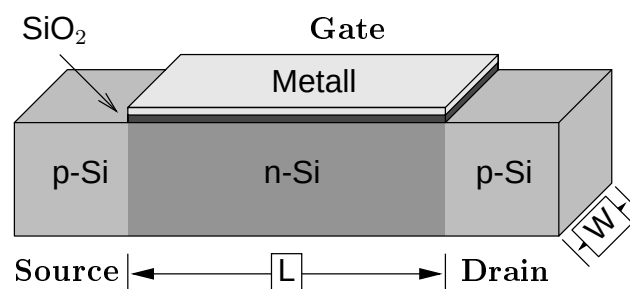


Abbildung 2.3: Schematischer Aufbau eines p-Kanal MOSFET

Der MOSFET ist ein feldgesteuertes elektronisches Bauelement. Der prinzipielle Aufbau eines p-Kanal Mosfets ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Im Strompfad von Source und Drain befinden sich zwei gegenpolig geschaltene pn-Übergänge. Es können also nur Leckströme fließen. Durch Anlegen einer genügend großen Spannung zwischen

Gate und Source, wird eine Inversionsschicht im n-Si entlang der Gateelektrode erzeugt (Kanal). Das bedeutet, dass die Konzentration der Minoritäts- größer der Majoritätsladungsträger ist. Es kann jetzt ein Strom zwischen Drain und Source fließen.

Organische FET (OFET) werden im Gegensatz zu MOSFET nicht in Inversion sondern in Akkumulation betrieben: Die am Gate angelegte Spannung bewirkt eine hohe Konzentration von Majoritätsladungsträgern entlang der Grenzschicht zwischen Isolator und Halbleiter. Diese Ladungsträger führen zu einer starken Zunahme der Leitfähigkeit. Trotzdem kann man die elektrischen Eigenschaften gut mit dem MOSFET-Modell beschreiben.

Im folgenden werden diese elektrischen Eigenschaften kurz dargestellt. Eine detaillierte Herleitung ist in [4] zu finden.

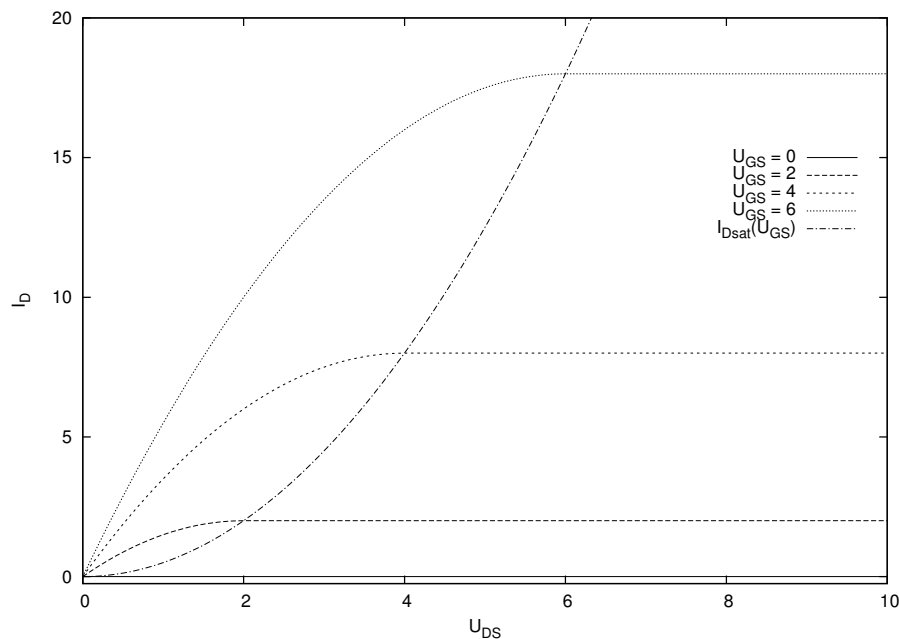


Abbildung 2.4: Idealisierte Ausgangskennlinien eines MOSFET (in willkürlichen Einheiten)

Die Ausgangskennlinien (Abb. 2.4) lässt sich mit Hilfe der Sättigungsspannung

$$U_{DSsat} = U_{GS} - U_{th} \quad (2.4)$$

U_{th} - Schwellspannung, bei der der Kanal zu leiten beginnt

in je zwei Bereiche einteilen:

(a) $U_{DS} < U_{DSsat}$:

Ohmsches Verhalten des Kanals: In diesem Bereich gilt für den Drainstrom näherungsweise

$$I_{Dlin} \approx \frac{W}{L} \mu_p C_i (U_{GS} - U_{th}) U_{DS} \quad (2.5)$$

mit der Kanalbreite W , der Kanallänge L und der Isolatorkapazität $C_i = \epsilon_i/d$ (pro Fläche). Diesen Abschnitt bezeichnet man auch als *linearen Bereich*.

(b) Für $U_{DS} \geq U_{DSsat}$:

Der MOSFET in Sättigung: In diesem Bereich bleibt der Drainstrom trotz steigender Drain-Source-Spannung konstant. Es gilt:

$$I_{Dsat} \approx \frac{W}{2L} \mu_p C_i (U_{GS} - U_{th})^2. \quad (2.6)$$

Eine weitere wichtige Kennlinie ist die sogenannte Transferkennlinie. Hier wird der Drainstrom I_D als Funktion der Gate-Source Spannung U_{GS} dargestellt. Sie bildet somit einen Querschnitt durch die Schar der Ausgangskurven. Aus der Transferkennlinie kann man mit Hilfe der oben genannten Formeln die Schwellenspannung und die Ladungsträgerbeweglichkeit bestimmen. Es wird zwischen zwei verschiedenen Transferkennlinien unterschieden:

1. Bei der Transferkennlinie im linearen Bereich nimmt der Drainstrom proportional zur Gate-Source Spannung zu, sobald die Schwellenspannung überschritten wurde (Abb 2.5).

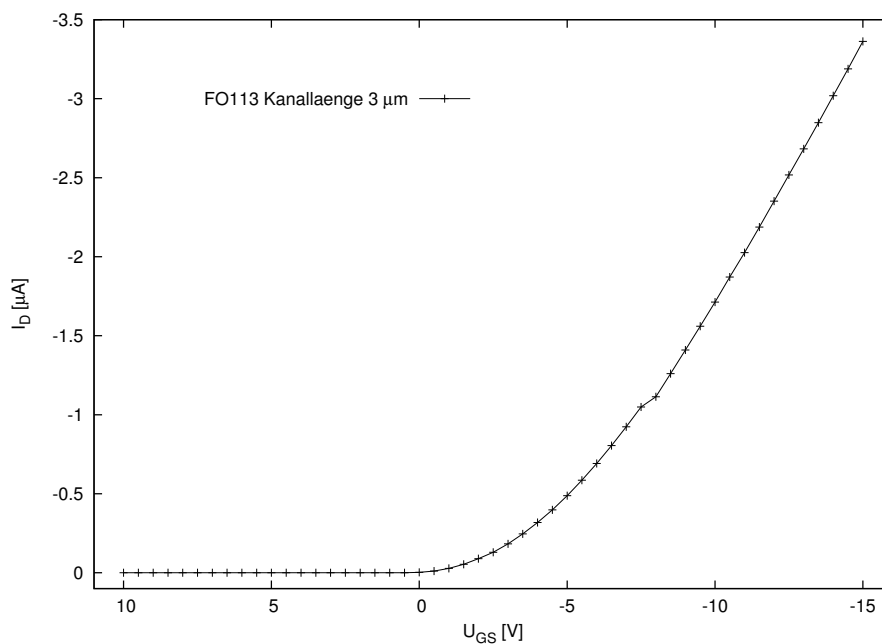


Abbildung 2.5: Transferkennlinie im linearen Bereich (Aufgenommen an einem OFET der Kanallänge $3 \mu\text{m}$ bei $U_{GS} = -1\text{V}$)

2. Bei der Transferkurve im Sättigungsbereich ist oberhalb der Schwellenspannung eine quadratische Abhängigkeit von I_D zu U_{GS} beobachten (Abb 2.6).

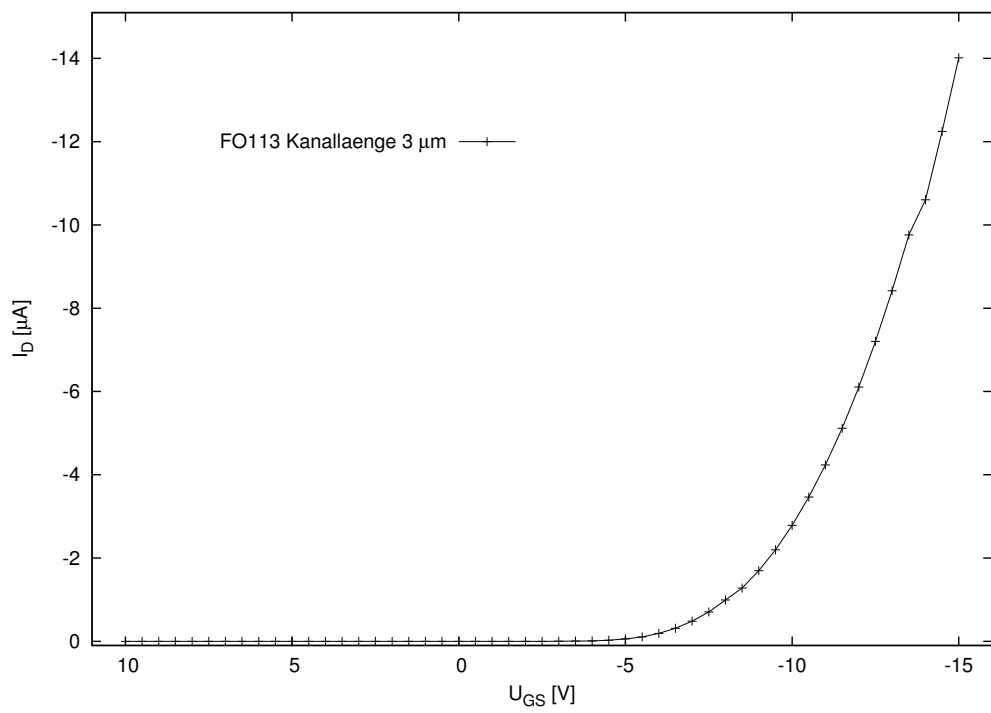


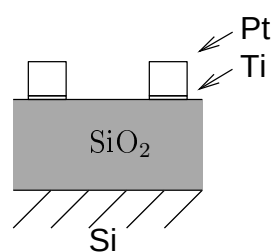
Abbildung 2.6: Transferkennlinie im gesättigten Bereich (Aufgenommen an einem OFET der Kanallänge 3 μm bei $U_G = -15\text{V}$)

3 Experimentelles

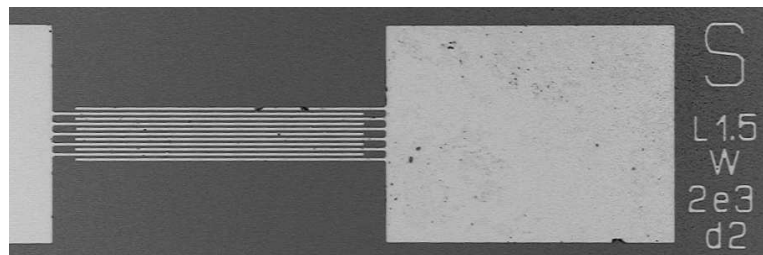
Um die Bedampfungsparameter zu optimieren wurden OFETs unter verschiedenen Bedingungen hergestellt und elektrisch charakterisiert. Anhand der erreichten Beweglichkeiten und Schwellspannungen wurde der Bedampfungsvorgang optimiert.

3.1 Probenherstellung

Der erste Schritt zur Herstellung der Proben bestand im Spalten eines hochdotierten Silizium-Wafers mit einer 50 nm Oxid-Schicht in etwa 1x1 cm große Stücke. Diese Stücke dienten als Gate-Elektrode und Isolatorschicht der Transistoren. Anschließend wurden auf diese Stücke die Source- und Drain-Elektroden in kammartigen Strukturen durch optische Lithographie aufgebracht (Abb. 3.1). Dazu wurden die Träger zunächst durch *Spin-Coating*-Verfahren mit Photoresist beschichtet und danach mit UV-Licht durch eine Maske (mit den gewünschten Strukturen) belichtet und entwickelt. Dadurch wird der Photoresist an den Stellen entfernt, an denen später das Metall verbleiben soll. Im nächsten Schritt wurde die komplette Probe zuerst mit einer 1 nm dicken Titan- und dann einer 9 nm dicken Platinschicht überzogen. Die Titanschicht diente dabei als Adhäsionsschicht um die Haftung des Platins zu verbessern. Nach der Metallisierung erfolgte der sogenannte *Lift-Off*: Die Probe wurde mit Aceton gewaschen wodurch der noch vorhandene Photoresist zusammen mit dem ungewünschten Metall entfernt wurde.



(a) Schematische Seitenansicht



(b) Lichtmikroskopische Aufnahme von oben

Abbildung 3.1: Aufbau einer Transistorstruktur

Zur Belichtung der Proben kamen drei verschiedene Masken zum Einsatz:

- (i) Maske für Fingerstrukturen mit $W = 2000 \mu\text{m}$; $L = 1 \dots 100 \mu\text{m}$, verwendet für Probe FO110d, FO110c, FO112 und FO113.
- (ii) Maske für Fingerstrukturen mit $W/L = 10^4$; $W = 10 \dots 200 \mu\text{m}$, verwendet für Probe FO115.
- (iii) Maske für Fingerstrukturen mit $W = 1200 \dots 50000 \mu\text{m}$; $L = 5 \mu\text{m}$ und $W = 10000 \mu\text{m}$; $L = 5 \mu\text{m}$; Fingerbreite $d = 1 \dots 10 \mu\text{m}$, verwendet für Probe FO116 und FO117.

Vor dem Bedampfen wurden die Proben für 30 Sekunden mit Piranha-Lösung (3 Teile H_2SO_4 , 1 Teil H_2O_2) gereinigt und viereinhalb Stunden in OTS-Lösung (Octadecyltrichlorosilan) silanisiert. Dadurch wurde die Oberfläche hydrophob und der organische Halbleiter kann besser anhaften. Die Transistor-Eigenschaften wurden dadurch stark verbessert [3].

Die Bedampfung der Proben mit Pentacen erfolgte in einer Ultrahochvakuumkammer bei einem Druck von etwa 10^{-7} mBar. Dabei konnte die Aufdampftrate durch die Temperatur der Pentacen-Zelle im Bereich von 170°C - 210°C und die Probentemperatur im Bereich von 20°C - 80°C variiert werden. Die Dicke der aufgedampften Schicht wurde mit Hilfe eines in der UHV-Kammer angebrachten Schwingquarzes kontrolliert. Durch das Bedampfen mit Pentacen wird die Resonanzfrequenz dieses Quarzes verändert und lässt somit Rückschlüsse auf die Dicke der aufgedampften Schicht zu. Leider konnte der Quarz jedoch bis zum Ende meines Praktikums nicht auf Pentacen geeicht werden. Sämtlichen Dickenangaben werden deshalb in Schwingquartzeinheiten (SQE) angegeben. Mit Hilfe einer vorhergehenden Eichung auf DH4T ist aber eine grobe Abschätzung der erzielten Schichtdicken möglich: Geht man davon aus, dass Pentacen in der Dünnschichtphase eine dem DH4T ähnliche Dichte hat, so ergibt sich durch den Vergleich der Höhen der Monolagen etwa 6-7 SQE pro Monolage Pentacen.

3.2 Elektrische Charakterisierung

Zur elektrischen Charakterisierung wurde zunächst mit einem Diamantkratzer das SiO_2 auf der Unterseite der Probe entfernt und diese dann mit Silberleitlack auf einen Probenträger aufgeklebt. Dadurch wurde das hochdotierte Silizium (Gate) leitend mit dem Probenträger verbunden. Der Probenträger wurde dann in einen Nadelmessplatz eingebracht. Dort wurde mit Hilfe fein justierbarer Nadeln zunächst die organische Schicht um den Transistor herum entfernt. Dadurch sollen Leckströme, die über der Probenrand fließen, vermieden werden. Danach wurde mit den Nadeln der elektrische Kontakt zu Source, Drain und Gate der einzelnen Transistoren hergestellt (Abb. 3.2).

Zur elektrischen Charakterisierung der Transistoren wurde ein HP 4145B Semiconductor Analyser benutzt. Dieser war direkt mit den Nadeln verbunden. Zuerst wurden Transferkennlinien im linearen Bereich aufgenommen. Dazu wurde eine Drain-Source-Spannung $U_{GS} = -1 \text{ V}$ eingestellt. Die Kennlinie wurde zunächst mit fallender U_{GS} (Kennlinien mit 'h' gekennzeichnet) und danach mit steigender U_{GS} (Kennlinien mit 'r'

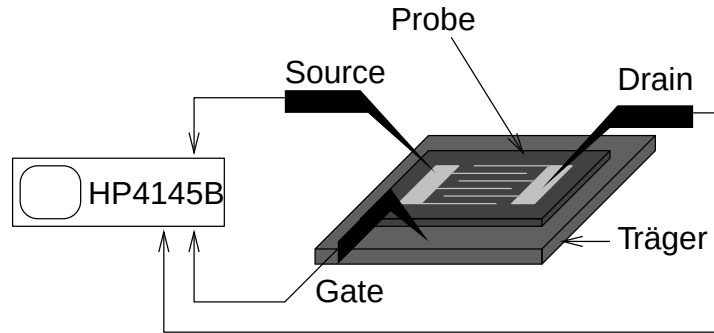


Abbildung 3.2: Nadelmessplatz schematisch

gekennzeichnet) gemessen. Im nächsten Schritt wurden die Drain-Source-Spannung auf -15 V gesenkt und die Transferkennlinien für den gesättigten Bereich aufgenommen. Abschließend wurden Ausgangskennlinien bei verschiedenen U_{GS} gemessen. Einige der Transistoren wiesen aufgrund von Problemen bei der Lithographie oder Verschmutzungen Kurzschlüsse auf.

3.3 Auswertung

Aus den Transferkennlinien wurden Beweglichkeit und Schwellspannung ermittelt. An zwei Beispielen soll hier stellvertretend die Auswertung erläutert werden:

3.3.1 Transferkennlinie im linearen Bereich

Um Beweglichkeit und Schwellspannung aus der linearen Transferkennlinie zu ermitteln, wird zunächst eine lineare Funktion

$$I_{DS} = a \cdot (U_{GS} - b) \quad (3.1)$$

an den linearen Bereich der Messdaten gefitted (Abb. 3.3). Ein Vergleich mit Gleichung (2.5) ergibt

$$\mu_{lin} = \frac{L}{WC_i U_{DS}} \cdot a \quad (3.2)$$

$$U_{th_{lin}} = b \quad (3.3)$$

Dieser Transistor hat eine Kanalbreite $W = 2000\text{ }\mu\text{m}$ und eine Kanallänge $L = 5\text{ }\mu\text{m}$. Die lineare Transferkennlinie wurde bei $U_{DS} = 1\text{ V}$ aufgenommen. Die Kapazität je Fläche von 50 nm dickem SiO_2 beträgt 66 nF/cm^2 . Als Ergebniss erhält man hier

$$\begin{aligned} \mu_{lin} &= 0,01066 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \\ U_{th_{lin}} &= -3,524\text{ V} \end{aligned}$$

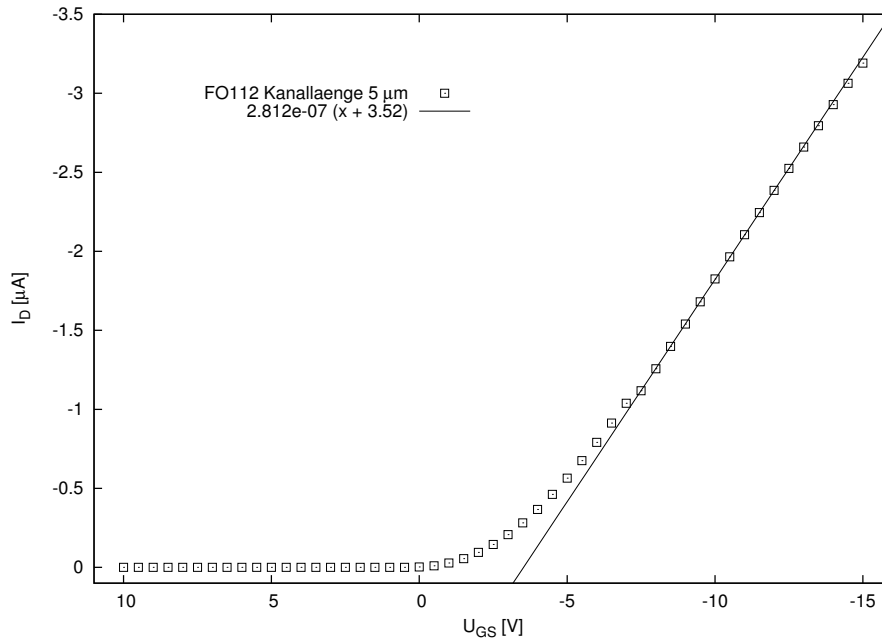


Abbildung 3.3: Transferkennlinie eines Transistors der Probe FO112 im linearen Bereich. Die Linie stellt die Fit-Funktion dar.

3.3.2 Transferkennlinie im Sättigungsbereich

Die Auswertung der Sättigungs-Transferkennlinie läuft ähnlich ab. Hier wird aber eine quadratische Funktion vom Typ

$$I_{DS} = a \cdot (U_{GS} - b)^2 \quad (3.4)$$

an die Kennlinie angepasst (Abb. 3.4). Ein Vergleich mit Gleichung (2.6) ergibt

$$\mu_{sat} = \frac{2L}{WC_i} \cdot a \quad (3.5)$$

$$U_{th_{sat}} = b \quad (3.6)$$

Nach Einsetzen der Geometriedaten erhält man:

$$\begin{aligned} \mu_{lin} &= 0,01342 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \\ U_{th_{sat}} &= -5,740 \text{ V} \end{aligned}$$

3.3.3 Fehlerbetrachtung

Eine genaue Angabe des Fehlers ist leider nicht möglich. Eine Abschätzung erfolgt durch die Variation des Fit-Bereiches.

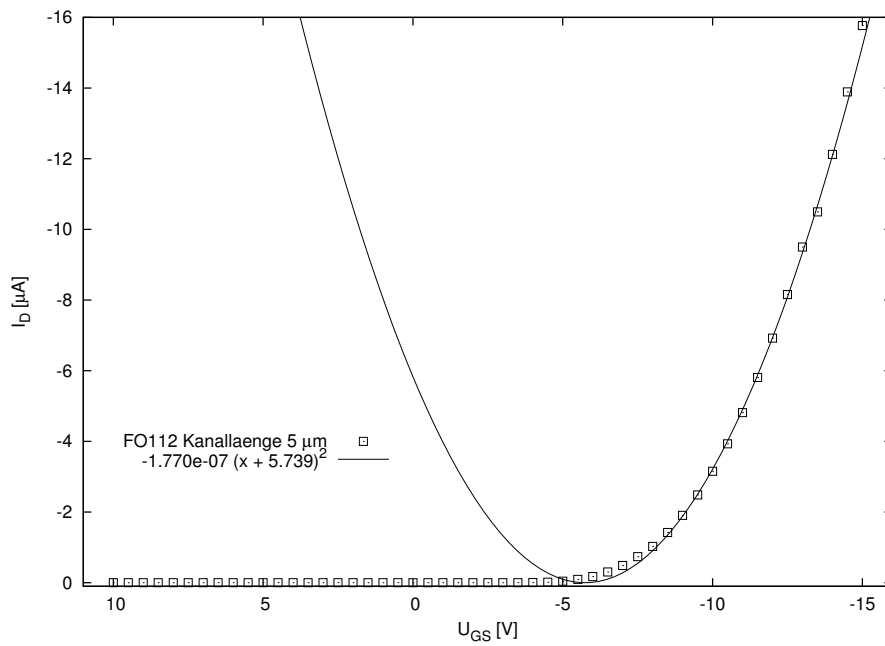


Abbildung 3.4: Transferkennlinie eines Transistors der Probe FO112 im gesättigten Bereich. Die Linie stellt eine Fit-Funktion dar.

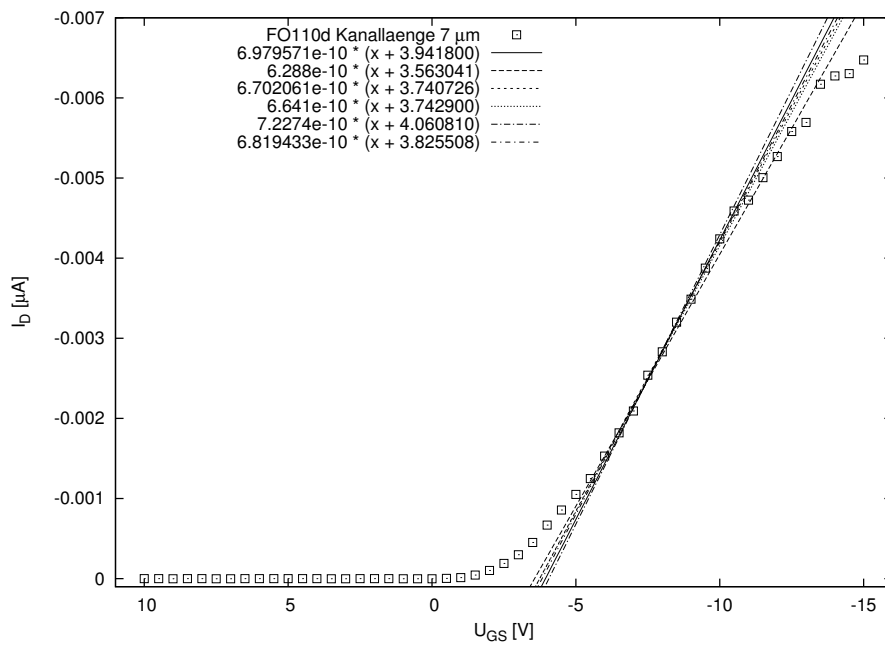


Abbildung 3.5: Transferkennlinie eines Transistors der Probe FO110d im linearen Bereich mit mehreren Fit-Funktionen

U_{th} [V]	μ_{lin} [cm^2/Vs]	Fitbereich U_{GS} [V]
-3,941800	$3,701288 \cdot 10^5$	$[-10 : -7]$
-3,563041	$3,334545 \cdot 10^5$	$[7,5 : -5,5]$
-3,740726	$3,554123 \cdot 10^5$	$[-10 : -5,5]$
-3,742900	$3,521742 \cdot 10^5$	$[-8 : -6]$
-4,060810	$3,832712 \cdot 10^5$	$[-8,5 : -7]$
-3,825508	$3,616366 \cdot 10^5$	$[-10 : -6]$
$(-3,81 \pm 0,17)$	$(3,59 \pm 0,17) \cdot 10^{-5}$	

Tabelle 3.1: Schwellspannung und Beweglichkeiten durch verschiedene Fit-Bereiche eines linearen Fits. Die letzte Zeile ist eine Mittelung der Werte

In Abbildung 3.5 sind mehrere sinnvolle Fit-Funktionen, bei denen der Fit-Bereich variiert wurde dargestellt. Daraus erhält man die in Tabelle 3.1 dargestellten Schwellspannungen und Beweglichkeiten. Durch Berechnung von Mittelwert und Standardabweichung lässt sich der Fehler von Schwellspannung und Beweglichkeit abschätzen: Für die Schwellspannung ergibt sich eine Standardabweichung von 0,17 V und für die Beweglichkeit $0,17 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{Vs}$.

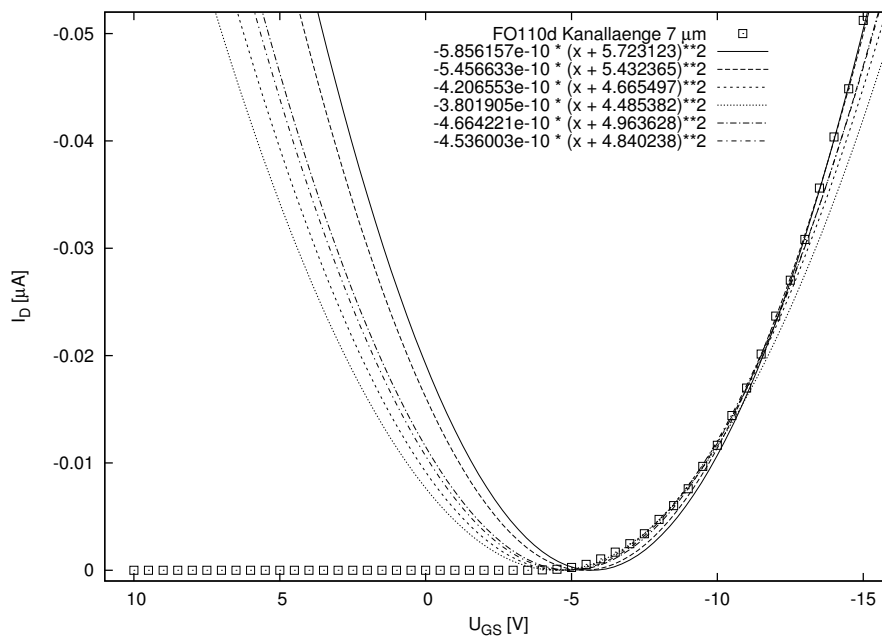


Abbildung 3.6: Transistor der Probe FO110d mit Kanallänge $7 \mu\text{m}$ mit mehreren Fit-Funktionen

Bei der Kennlinie für den Sättigungsbereich (Abb. 3.6) wird der Einfluss des Fit-Bereiches noch deutlicher. Hier beträgt die Standardabweichung bei der Schwellspannung 0,47 V und bei der Beweglichkeit $0,82 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{Vs}$. (Tab. 3.2)

Da es sehr aufwendig ist, für jede Kennlinie o.g. Prozedur durchzuführen, werde ich

U_{thr} [V]	μ_{sat} [cm^2/Vs]	Fitbereich U_{GS} [V]
-5,723123	$6,211075 \cdot 10^5$	$[-14,5 : -13]$
-5,432365	$5,787338 \cdot 10^5$	$[-14,5 : -11]$
-4,665497	$4,461496 \cdot 10^5$	$[-11,5 : -7]$
-4,485382	$4,032324 \cdot 10^5$	$[-10 : -7]$
-4,963628	$4,946901 \cdot 10^5$	$[-11,5 : -9]$
-4,840238	$4,810913 \cdot 10^5$	$[-12,5 : -7,5]$
$(-5,01 \pm 0,47)$	$(5,04 \pm 0,82) \cdot 10^{-5}$	

Tabelle 3.2: Schwellspannung und Beweglichkeiten durch verschiedene Fit-Bereiche eines quadratischen Fits. Die letzte Zeile ist eine Mittelung der Werte

bei den ermittelten Werten auf eine Angabe des Messfehlers verzichten.

4 Ergebnisse

Die elektrische Leitung findet bei OFETs hauptsächlich in der ersten und zweiten Monolage der organischen Schicht statt. Daher sind bei der Auswertung die Bedampfungsparameter der ersten Monolage Pentacen besonders interessant. Die vollständigen Bedampfungsprotokolle sind in Tabelle A.1 zusammengefasst. Ausführliche Details über die Transistoren der Proben und die erhaltenen Beweglichkeiten und Schwellspannungen sind in den Tabellen A.2 bis A.8 zu finden. Die Auswertung der einzelnen Proben erfolgt in chronologischer Reihenfolge.

4.1 Probe FO110d

Probe FO110d wurde mit einer Pentacen-Zellen-Temperatur von 178 °C bedampft. Die Probentemperatur konnte leider nicht kontrolliert werden, da das Thermoelement im Probenhalter defekt war. Die Heizung des Probenhalters wurde daher auch nicht benutzt. Die Aufdampftrate betrug 0,24 SQE/min. Die erreichten Beweglichkeiten im Bereich von $10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} \text{ V}^{-1}$ sind sehr klein.

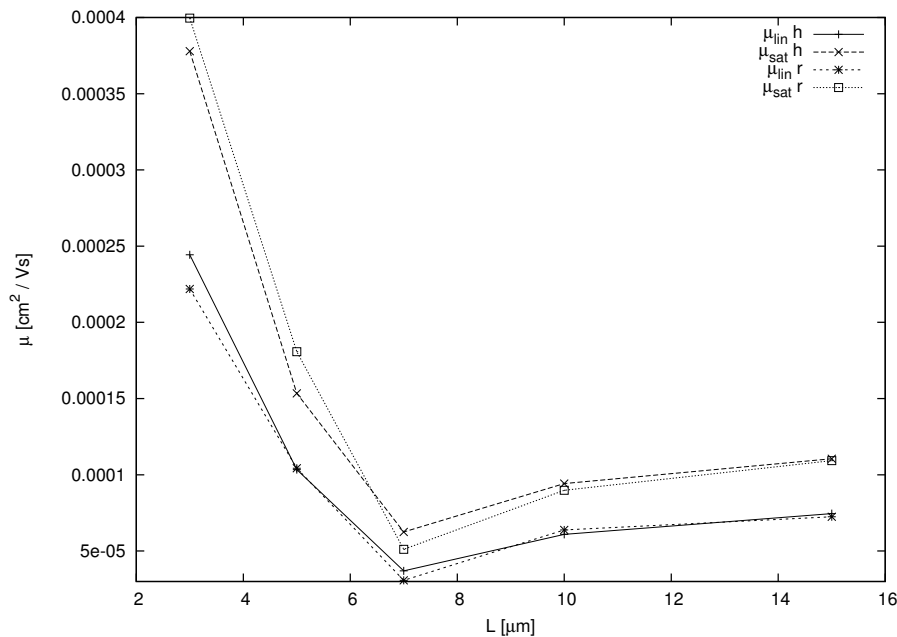


Abbildung 4.1: Beweglichkeiten der Probe FO110d über Kanallänge L

Abbildung 4.1 zeigt die Beweglichkeiten als Funktion der Kanallänge L . Deutlich ist eine Zunahme der Beweglichkeit bei kleinen L zu erkennen. Dies ist durch eine polykristalline Struktur der Pentacen-Schicht mit kleinen Kristalliten zu erklären. Die Korngrenzen zwischen diesen Kristalliten verringern die Beweglichkeit. Bei großen Kanallängen sind mehr Korngrenzen zwischen den einzelnen Fingern zu finden, die von den Ladungsträgern überwunden werden müssen.

4.2 Probe FO110c

Für die Bedampfung von Probe FO110c wurde die Temperatur der Pentacen-Zelle auf 182 °C erhöht. Die Probentemperatur war 80 °C. Dadurch wurde die Aufdampfrate der ersten 10 SQE dicken Schicht um 30% auf 0,31 SQE/min erhöht. Die erreichten Beweglichkeiten lagen ebenfalls im Bereich von $10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} \text{ V}^{-1}$. Es ist jedoch keine Abhängigkeit von der Kanallänge zu beobachten (Abb. 4.2).

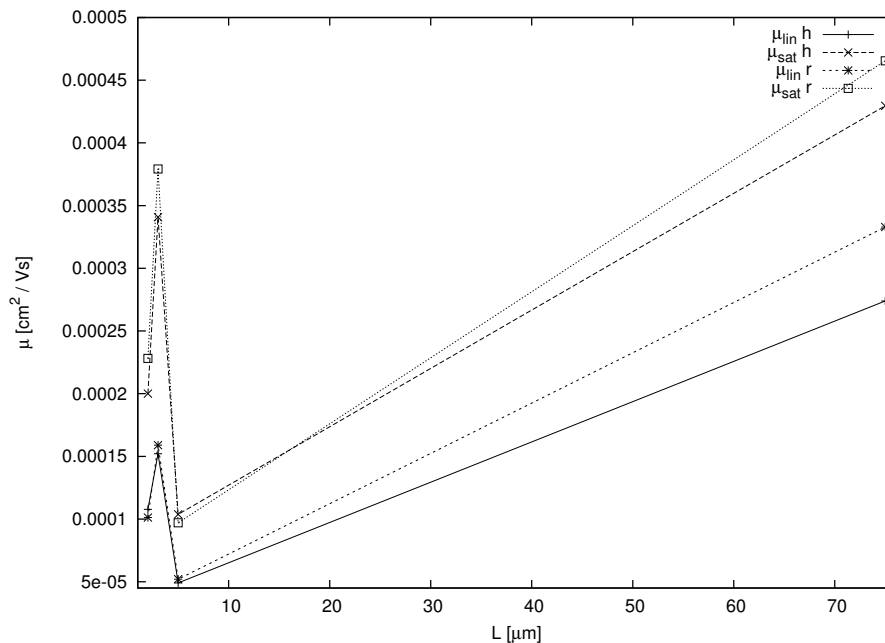


Abbildung 4.2: Beweglichkeiten der Probe FO110c über Kanallänge L

4.3 Probe FO112

Da die ersten beiden Proben nur geringe Beweglichkeiten aufwiesen wurde die Probe FO112 testweise mit sehr hoher Aufdampfrate beschichtet. Dazu wurde die Pentacen-Zelle auf eine Temperatur von 195 °C geheizt. Die Probentemperatur war 40 °C. Dadurch war die Aufdampfrate mit 0,95 SQE/min vier mal höher als bei Probe FO110d.

Die erreichten Beweglichkeiten waren im Bereich von $10^{-2} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}\text{V}^{-1}$ und somit um

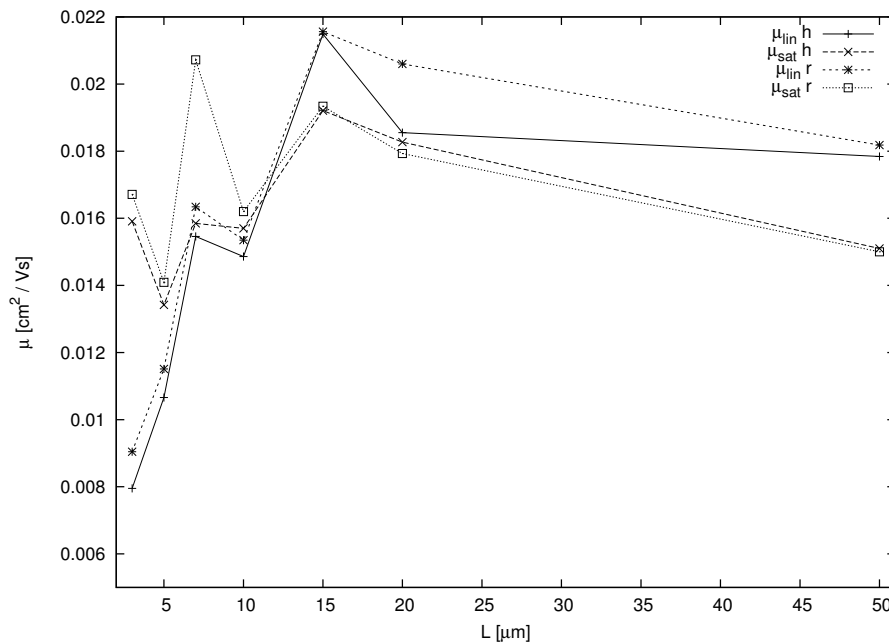


Abbildung 4.3: Beweglichkeiten der Probe FO112 über Kanallänge L

bis zu 50 mal größer als die der vorhergehenden Proben. In Abbildung 4.3 ist zu erkennen, dass die Beweglichkeit mit sinkender Kanallänge abnimmt. Dies ist durch das sogenannte Kurzkanalverhalten erklärbar.

4.4 Probe FO113

Wegen der stark erhöhten Beweglichkeiten von Probe FO112 wurde die Aufdampfrate bei Probe FO113 weiter auf 3,63 SQE/min gesteigert. (etwa das 15-fache wie bei Probe FO110d) Dazu wurde die Temperatur der Pentacenzelle auf 210 °C erhöht und die Probentemperatur auf 35 °C gesenkt.

Die erreichten Beweglichkeiten lagen wiederum im Bereich von $10^{-2} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}\text{V}^{-1}$, waren aber kleiner als die der Probe FO112. Außerdem sind sie nicht von der Kanallänge abhängig (Abb. 4.4).

4.5 Probe FO115

Probe FO115 ist die erste Probe, die mit einer anderen Maske hergestellt wurde. Das Verhältnis zwischen Kanalbreite W und Kanallänge L ist konstant 10^4 . Sie wurde mit den selben Parametern wie Probe FO112 bedampft. Die Aufdampfrate war 0,91 SQE/min

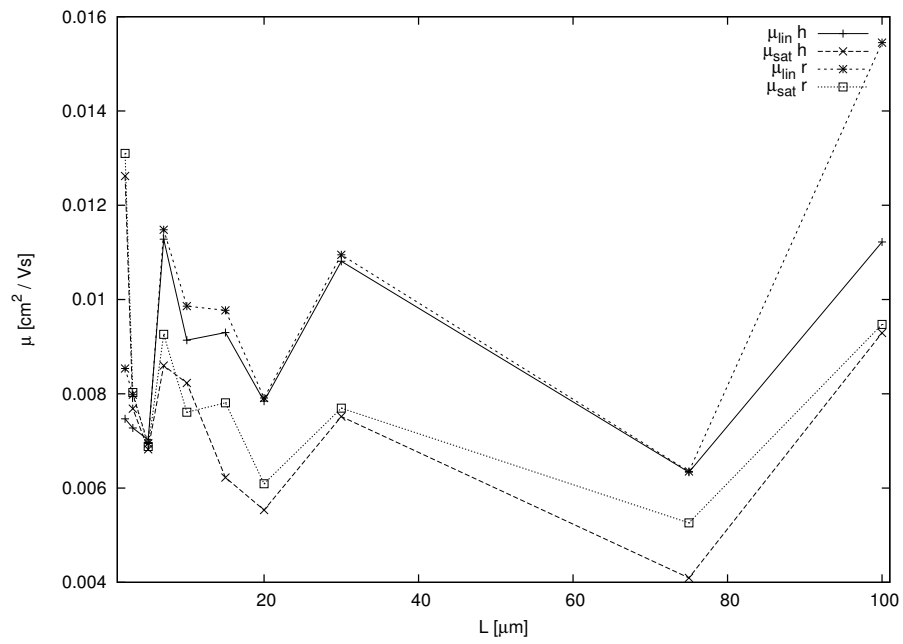


Abbildung 4.4: Beweglichkeiten der Probe FO113 über Kanallänge L

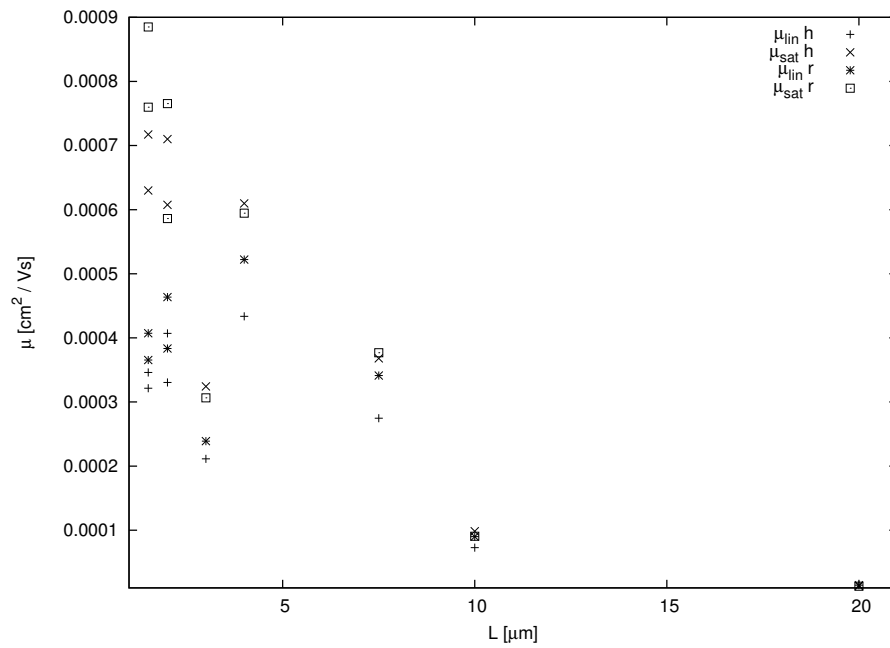


Abbildung 4.5: Beweglichkeiten der Probe FO115 über Kanallänge L . Da einige Transistoren doppelt vorhanden waren, wurden keine Verbindungslinien mit eingezeichnet.

Die erreichten Beweglichkeiten im Bereich von $10^{-4} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}\text{V}^{-1}$ lagen jedoch weit unter denen von Probe FO112. Bei genauerer Begutachtung der Probe mit dem Lichtmikroskop stellte sich heraus, dass bei vielen Transistoren ein großer Teil der Kammstrukturen defekt war. Die effektiven Kanalbreiten waren also wesentlich kleiner, als bei der Auswertung angenommen.

4.6 Probe FO116

Probe FO116 hatte wiederum andere Fingerstrukturen als FO115: Die Kanallänge aller Transistoren ist konstant $5 \mu\text{m}$. Bei einem Teil der Transistoren wurde die Kanalbreite, bei dem anderen die Fingerbreite variiert. Die Probe wurde bei einer Probentemperatur von 40°C mit einer Aufdampfrate von $1,48 \text{ SQE}/\text{min}$ (6-fache der Rate von Probe FO110d) bedampft. Die Pentacenzelle hatte dabei eine Temperatur von 200°C .

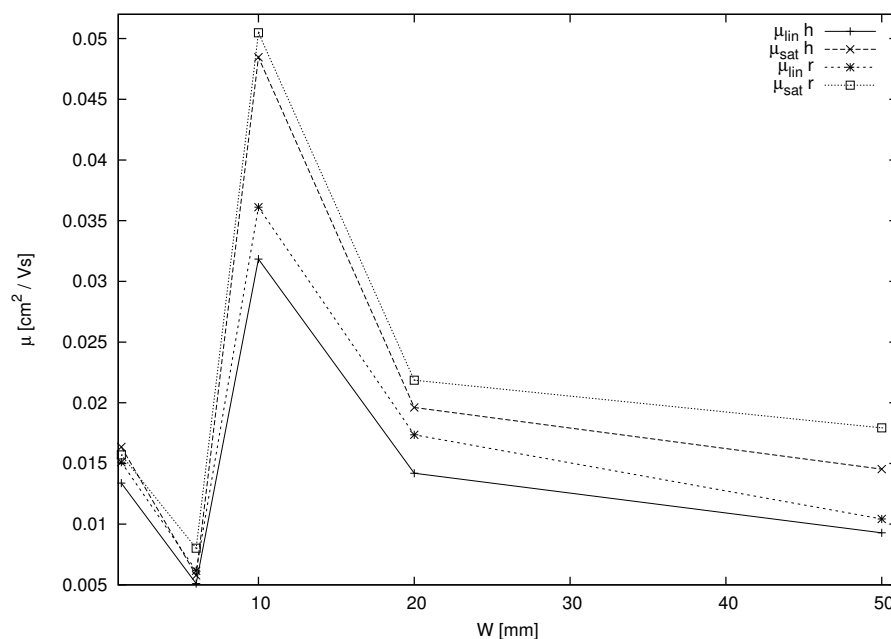


Abbildung 4.6: Beweglichkeiten der Probe FO116 über Kanalbreite W .

Die erreichten Beweglichkeiten waren die größten, die während meines Praktikums erreicht wurden und lagen im Bereich von $10^{-2} \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$. Eine Abhängigkeit von der Kanalbreite W ist nicht zu beobachten. (Abb. 4.6) Bei der Fingerdicke fällt auf, dass die Beweglichkeit für die Fingerdicke $d = 1 \mu\text{m}$ wesentlich kleiner als die übrigen Beweglichkeiten ist. (Abb. 4.7)

lithographie?
oder einfach
widerstand
der finger?

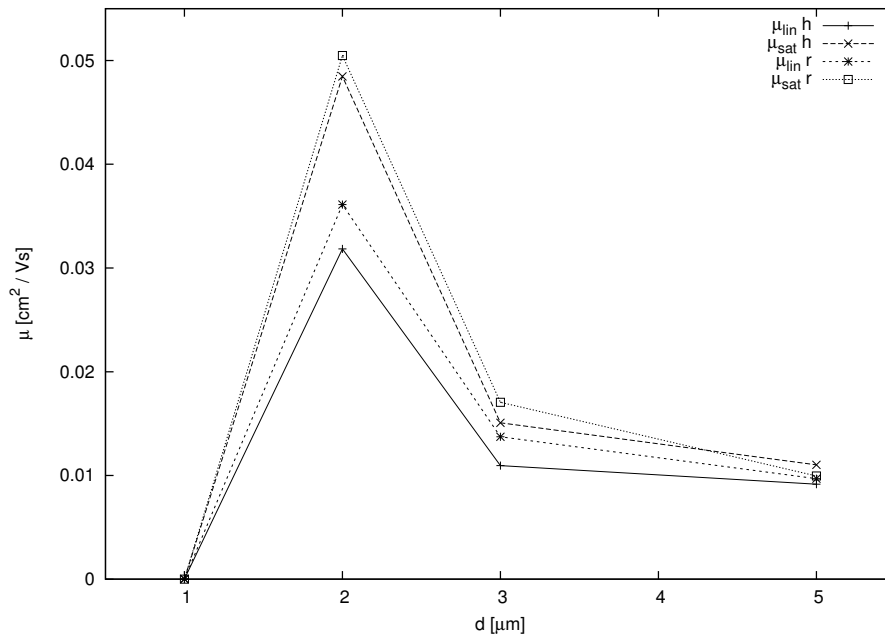


Abbildung 4.7: Beweglichkeiten der Probe FO116 über Fingerbreite d .

4.7 Probe FO117

Auf der letzten Probe FO117 befanden sich die selben Strukturen wie auf Probe FO116. Es wurden auch die gleichen Parameter verwendet. Die Aufdampftrate war 1,42 SQE/min.

Die Beweglichkeiten liegen ebenfalls im Bereich von $10^{-2} \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, sind aber geringer als bei Probe FO116. Dies liegt wahrscheinlich an Problemen mit den Metallstrukturen. (Beim Vermessen der Probe konnte die Metallschicht mit den Messnadeln abgekratzt werden.) Eine Abhängigkeit der Beweglichkeit von der Kanalbreite W ist auch bei dieser Probe nicht zu beobachten. (Abb. 4.8) In Abbildung 4.9 ist eine Zunahme der Beweglichkeit mit abnehmender Fingerdicke zu erkennen.

Woran kann das liegen.

4.8 Zusammenfassung

Ziel des Praktikums war es die Aufdampfparameter von Pentacen-Feldeffekttransistoren für große Beweglichkeiten zu optimieren. Dazu wurden OFETs mit verschiedenen Bedampfungsparametern hergestellt und charakterisiert.

Zunächst wurde mit geringen Aufdampfraten bedampft. Die resultierenden Beweglichkeiten war relativ klein (Probe FO110d und FO110c). Angeregt durch [1] und die schlechten Ergebnisse wurden die weiteren Proben bei wesentlich höheren Aufdampfraten und niedrigeren Probertemperaturen bedampft. Dadurch konnte die Beweglichkeit erheblich gesteigert werden. In Abbildung 4.10 sind die mittleren Beweglichkeiten der Proben in Abhängigkeit von Aufdampftrate dargestellt. Probe FO115 und FO117 wur-

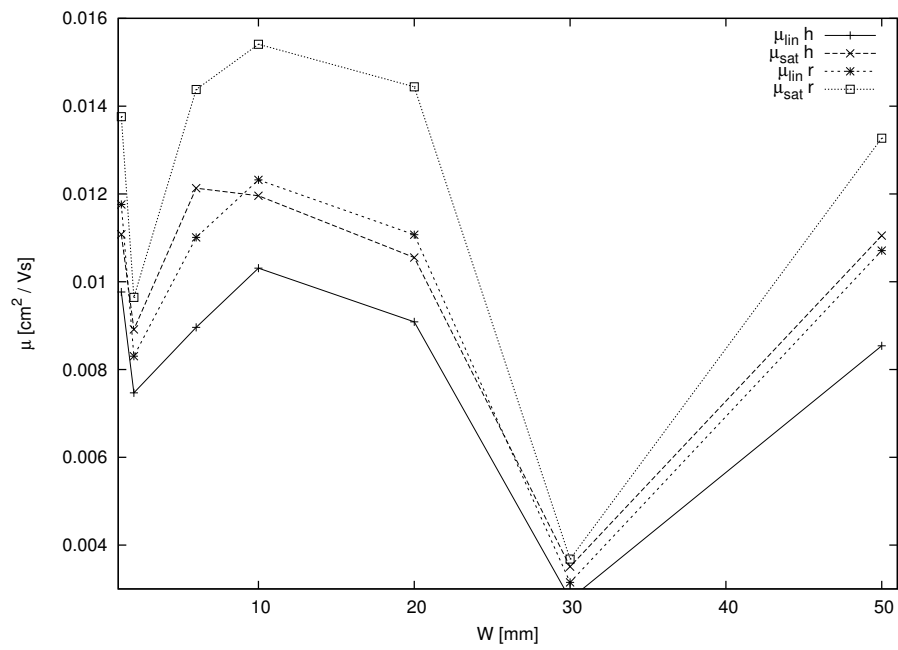


Abbildung 4.8: Beweglichkeiten der Probe FO17 über Kanalbreite W .

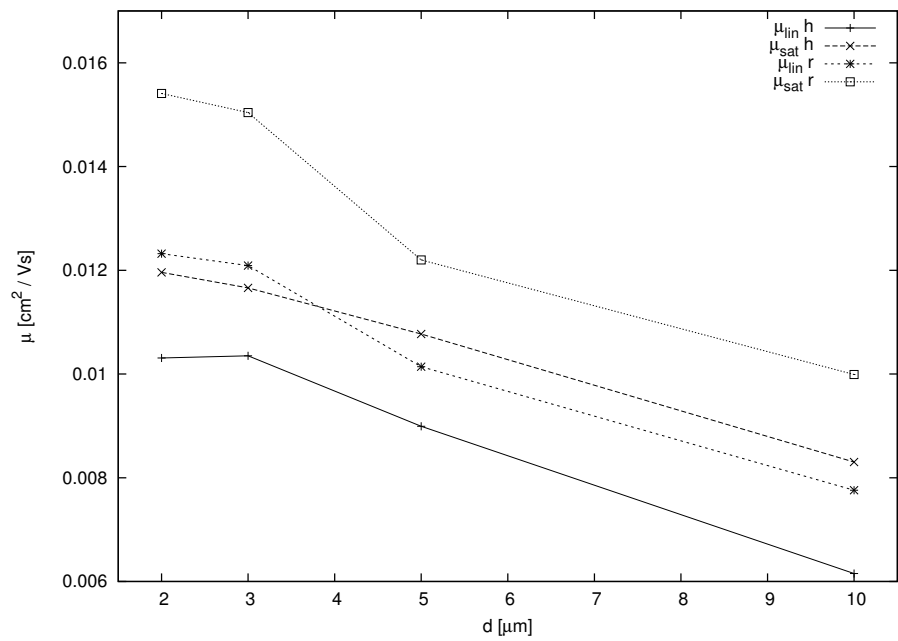


Abbildung 4.9: Beweglichkeiten der Probe FO17 über Fingerbreite d .

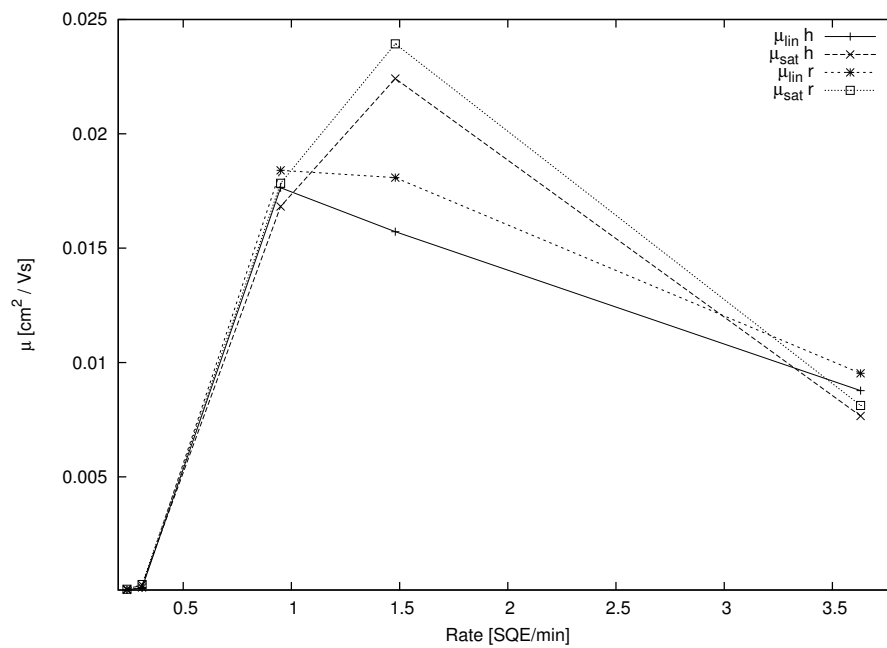


Abbildung 4.10: Mittlere Beweglichkeiten in Abhängigkeit über Aufdampfrate. Die Beweglichkeiten wurden durch Mittelung über Transistoren mit gleicher Aufdampfrate berechnet. Dabei wurden stark abweichende Beweglichkeiten nicht berücksichtigt.

den in diese Darstellung nicht mit einbezogen, da beide Proben von schlechter Qualität waren. Die höchsten Beweglichkeiten wurden bei einer Aufdampftrate von 1,5 SQE/min (etwa 4 min/Monolage) erreicht.

Ein Vergleich mit den Ergebnissen anderer Forschungsgruppen zeigt jedoch, dass die Beweglichkeiten durchaus noch weiter gesteigert werden können.

Hmm, weis nciht so recht wie ich das schreiben soll: Man sollte vielleicht noch Einfluss der Proben temperatur untersuchen.
Gereinigtes Pentacen verwenden

lithogrphie
war

schlecht
FO115: Fin-
ger, FO117:
Metallisie-
rung/Verschmut

Literaturverzeichnis

- [1] C. D. Dimitrakopoulos, A. R. Brown, and A. Pomp. Molecular beam deposited thin films of pentacene for organic field effect transistor applications. *J. Appl. Phys.*, 80:2501, Mai 1996.
- [2] Markus Michelfeit. *In-situ Transportuntersuchungen zum zeitabhängigen Verhalten organischer Feldeffekttransistoren aus α,ω -dihexyl-quaterthiophen*. Diplomarbeit, Universität Würzburg, Institut für Physik und Astronomie, Mai 2005.
- [3] Kyung Soo Pyo and Chung Kun Song. The effects of simultaneous treatment of SiO₂ gate and Au electrode with octadecyltrichlorosilane and charge transfer molecules on characteristics of pentacene thin film transistors. *thin solid films*, 485:230, August 2005.
- [4] S. M. Sze. *Physics of semiconductor devices*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 2 edition, 1981.

A Proben

Probenname	Druck [mBar]	T_P [°C]	Zeit [min]	T_Z [°C]	Schichtdicke [SQE]
FO110d	$< 2 \cdot 10^{-7}$	Thermoelement def.	42 105 61	178 185 190	10 58 63
FO110c	$< 8 \cdot 10^{-8}$	80	32 28 41 30 30	182 186 190 195 200	10 14 25 30 44
FO112	$< 1,6 \cdot 10^{-7}$	40	21 13	195 200	20 21
FO113	$< 4,5 \cdot 10^{-7}$	35	11	210	40
FO115	$< 1,4 \cdot 10^{-7}$	40	22 14	195 200	20 20
FO116	$< 1,3 \cdot 10^{-7}$	40	27	200	40
FO117	$< 1,2 \cdot 10^{-7}$	40	28	200	40

Tabelle A.1: Aufdampfprotokolle der Proben (T_P ist die Probentemperatur und T_Z die Temperatur der Pentacen-Zelle)

ID	L [μm]	W [μm]	d [μm]	$U_{th_{lin}}$ [V]	μ_{lin} [$\text{cm}^2\text{s}^{-1}\text{V}^{-1}$]	$U_{th_{sat}}$ [V]	μ_{sat} [$\text{cm}^2\text{s}^{-1}\text{V}^{-1}$]	Kommentar
h	3,0	2000	2	-3,731	$2,443 \cdot 10^{-04}$	-4,994	$3,779 \cdot 10^{-04}$	verrauscht
r	3,0	2000	2	-5,767	$2,219 \cdot 10^{-04}$	-5,578	$3,996 \cdot 10^{-04}$	
h	5,0	2000	2	-3,997	$1,034 \cdot 10^{-04}$	-5,378	$1,534 \cdot 10^{-04}$	
r	5,0	2000	2	-6,149	$1,043 \cdot 10^{-04}$	-6,173	$1,808 \cdot 10^{-04}$	
h	7,0	2000	2	-3,942	$3,701 \cdot 10^{-05}$	-5,800	$6,251 \cdot 10^{-05}$	
r	7,0	2000	2	-5,588	$3,073 \cdot 10^{-05}$	-5,025	$5,115 \cdot 10^{-05}$	
h	10,0	2000	2	-3,559	$6,088 \cdot 10^{-05}$	-5,768	$9,424 \cdot 10^{-05}$	
r	10,0	2000	2	-5,852	$6,380 \cdot 10^{-05}$	-5,913	$8,987 \cdot 10^{-05}$	
h	15,0	2000	2	-3,405	$7,457 \cdot 10^{-05}$	-5,283	$1,105 \cdot 10^{-04}$	
r	15,0	2000	2	-5,298	$7,249 \cdot 10^{-05}$	-5,608	$1,093 \cdot 10^{-04}$	

Tabelle A.2: Beweglichkeiten und Schwellspannung Probe FO110d

ID	L [μm]	W [μm]	d [μm]	$U_{th_{lin}}$ [V]	μ_{lin} [$\text{cm}^2\text{s}^{-1}\text{V}^{-1}$]	$U_{th_{sat}}$ [V]	μ_{sat} [$\text{cm}^2\text{s}^{-1}\text{V}^{-1}$]	Kommentar
h	2,0	2000	2	-2,465	$1,078 \cdot 10^{-04}$	1,301	$2,000 \cdot 10^{-04}$	
r	2,0	2000	2	-5,020	$1,012 \cdot 10^{-04}$	-2,022	$2,281 \cdot 10^{-04}$	
h	3,0	2000	2	-2,292	$1,521 \cdot 10^{-04}$	-2,994	$3,408 \cdot 10^{-04}$	
r	3,0	2000	2	-5,037	$1,590 \cdot 10^{-04}$	-4,684	$3,792 \cdot 10^{-04}$	
h	5,0	2000	2	-2,439	$4,904 \cdot 10^{-05}$	-4,859	$1,038 \cdot 10^{-04}$	
r	5,0	2000	2	-4,376	$5,203 \cdot 10^{-05}$	-5,071	$9,704 \cdot 10^{-05}$	
h	75,0	2000	2	-2,949	$2,739 \cdot 10^{-04}$	-7,033	$4,296 \cdot 10^{-04}$	
r	75,0	2000	2	-6,871	$3,329 \cdot 10^{-04}$	-7,479	$4,655 \cdot 10^{-04}$	

Tabelle A.3: Beweglichkeiten und Schwellspannung Probe FO110c

ID	L [μm]	W [μm]	d [μm]	U_{thlin} [V]	μ_{lin} [$\text{cm}^2\text{s}^{-1}\text{V}^{-1}$]	U_{thsat} [V]	μ_{sat} [$\text{cm}^2\text{s}^{-1}\text{V}^{-1}$]	Kommentar
h	3,0	2000	2	-2,918	$7,950 \cdot 10^{-03}$	-5,942	$1,591 \cdot 10^{-02}$	
r	3,0	2000	2	-7,030	$9,042 \cdot 10^{-03}$	-6,633	$1,671 \cdot 10^{-02}$	
h	5,0	2000	2	-3,524	$1,066 \cdot 10^{-02}$	-5,740	$1,342 \cdot 10^{-02}$	
r	5,0	2000	2	-6,936	$1,151 \cdot 10^{-02}$	-6,502	$1,409 \cdot 10^{-02}$	
h	7,0	2000	2	-3,856	$1,546 \cdot 10^{-02}$	-6,132	$1,585 \cdot 10^{-02}$	
r	7,0	2000	2	-7,212	$1,634 \cdot 10^{-02}$	-7,466	$2,072 \cdot 10^{-02}$	
h	10,0	2000	2	-4,464	$1,486 \cdot 10^{-02}$	-6,572	$1,570 \cdot 10^{-02}$	
r	10,0	2000	2	-7,346	$1,535 \cdot 10^{-02}$	-7,185	$1,620 \cdot 10^{-02}$	
h	15,0	2000	2	-4,830	$2,149 \cdot 10^{-02}$	-6,531	$1,921 \cdot 10^{-02}$	
r	15,0	2000	2	-7,371	$2,156 \cdot 10^{-02}$	-7,068	$1,934 \cdot 10^{-02}$	
h	20,0	2000	2	-4,201	$1,855 \cdot 10^{-02}$	-6,712	$1,827 \cdot 10^{-02}$	
r	20,0	2000	2	-7,476	$2,060 \cdot 10^{-02}$	-7,105	$1,793 \cdot 10^{-02}$	
h	50,0	2000	2	-4,543	$1,784 \cdot 10^{-02}$	-6,985	$1,510 \cdot 10^{-02}$	
r	50,0	2000	2	-7,486	$1,818 \cdot 10^{-02}$	-7,591	$1,500 \cdot 10^{-02}$	

Tabelle A.4: Beweglichkeiten und Schwellspannung Probe FO112

ID	L [μm]	W [μm]	d [μm]	$U_{th_{lin}}$ [V]	μ_{lin} [$\text{cm}^2\text{s}^{-1}\text{V}^{-1}$]	$U_{th_{sat}}$ [V]	μ_{sat} [$\text{cm}^2\text{s}^{-1}\text{V}^{-1}$]	Kommentar
h	2,0	2000	2	-4,197	$7,468 \cdot 10^{-03}$	-6,382	$1,262 \cdot 10^{-02}$	
r	2,0	2000	2	-7,621	$8,537 \cdot 10^{-03}$	-7,006	$1,310 \cdot 10^{-02}$	
h	3,0	2000	2	-4,626	$7,275 \cdot 10^{-03}$	-5,973	$7,684 \cdot 10^{-03}$	
r	3,0	2000	2	-7,763	$7,982 \cdot 10^{-03}$	-6,782	$8,028 \cdot 10^{-03}$	
h	5,0	2000	2	-5,403	$7,024 \cdot 10^{-03}$	-6,394	$6,823 \cdot 10^{-03}$	
r	5,0	2000	2	-7,634	$6,946 \cdot 10^{-03}$	-6,978	$6,882 \cdot 10^{-03}$	
h	7,0	2000	2	-5,958	$1,128 \cdot 10^{-02}$	-6,158	$8,599 \cdot 10^{-03}$	
r	7,0	2000	2	-8,088	$1,148 \cdot 10^{-02}$	-6,895	$9,262 \cdot 10^{-03}$	
h	10,0	2000	2	-5,126	$9,138 \cdot 10^{-03}$	-6,993	$8,229 \cdot 10^{-03}$	
r	10,0	2000	2	-8,155	$9,860 \cdot 10^{-03}$	-7,238	$7,608 \cdot 10^{-03}$	
h	15,0	2000	2	-5,106	$9,299 \cdot 10^{-03}$	-6,215	$6,223 \cdot 10^{-03}$	
r	15,0	2000	2	-8,031	$9,772 \cdot 10^{-03}$	-7,368	$7,809 \cdot 10^{-03}$	
h	20,0	2000	2	-5,647	$7,843 \cdot 10^{-03}$	-6,637	$5,535 \cdot 10^{-03}$	
r	20,0	2000	2	-8,170	$7,910 \cdot 10^{-03}$	-7,561	$6,091 \cdot 10^{-03}$	
h	30,0	2000	2	-5,632	$1,081 \cdot 10^{-02}$	-6,411	$7,517 \cdot 10^{-03}$	
r	30,0	2000	2	-7,992	$1,095 \cdot 10^{-02}$	-7,081	$7,696 \cdot 10^{-03}$	
h	75,0	2000	2	-5,487	$6,337 \cdot 10^{-03}$	-6,970	$4,094 \cdot 10^{-03}$	
r	75,0	2000	2	-8,148	$6,353 \cdot 10^{-03}$	-8,051	$5,261 \cdot 10^{-03}$	Stufen
h	100,0	2000	2	-4,977	$1,122 \cdot 10^{-02}$	-7,095	$9,291 \cdot 10^{-03}$	
r	100,0	2000	2	-9,006	$1,545 \cdot 10^{-02}$	-7,543	$9,473 \cdot 10^{-03}$	Stufen

Tabelle A.5: Beweglichkeiten und Schwellspannung Probe FO113

ID	L [μm]	W [μm]	d [μm]	$U_{th_{lin}}$ [V]	μ_{lin} [$\text{cm}^2\text{s}^{-1}\text{V}^{-1}$]	$U_{th_{sat}}$ [V]	μ_{sat} [$\text{cm}^2\text{s}^{-1}\text{V}^{-1}$]	Kommentar
6h	1,5	15000	2	-2,337	$3,215 \cdot 10^{-04}$	-6,413	$6,300 \cdot 10^{-04}$	
6r	1,5	15000	2	-7,548	$3,655 \cdot 10^{-04}$	-7,711	$7,598 \cdot 10^{-04}$	
7h	1,5	15000	2	-2,048	$3,461 \cdot 10^{-04}$	-6,519	$7,172 \cdot 10^{-04}$	
7r	1,5	15000	2	-7,248	$4,073 \cdot 10^{-04}$	-7,691	$8,850 \cdot 10^{-04}$	
4h	2,0	20000	2	-2,610	$4,071 \cdot 10^{-04}$	-7,161	$7,101 \cdot 10^{-04}$	
4r	2,0	20000	2	-7,618	$4,636 \cdot 10^{-04}$	-7,971	$7,654 \cdot 10^{-04}$	
5h	2,0	20000	2	-2,658	$3,305 \cdot 10^{-04}$	-7,390	$6,075 \cdot 10^{-04}$	
5r	2,0	20000	2	-7,800	$3,835 \cdot 10^{-04}$	-8,081	$5,862 \cdot 10^{-04}$	
h	3,0	30000	2	-3,578	$2,114 \cdot 10^{-04}$	-7,896	$3,242 \cdot 10^{-04}$	
r	3,0	30000	2	-7,906	$2,389 \cdot 10^{-04}$	-8,242	$3,065 \cdot 10^{-04}$	
h	4,0	40000	2	-3,000	$4,337 \cdot 10^{-04}$	-8,405	$6,098 \cdot 10^{-04}$	
r	4,0	40000	2	-8,222	$5,221 \cdot 10^{-04}$	-8,863	$5,946 \cdot 10^{-04}$	
h	7,5	75000	2	-3,420	$2,747 \cdot 10^{-04}$	-8,586	$3,681 \cdot 10^{-04}$	
r	7,5	75000	2	-8,374	$3,412 \cdot 10^{-04}$	-9,084	$3,768 \cdot 10^{-04}$	
h	10,0	100000	2	-3,214	$7,276 \cdot 10^{-05}$	-8,739	$9,827 \cdot 10^{-05}$	
r	10,0	100000	2	-8,352	$8,991 \cdot 10^{-05}$	-9,438	$9,053 \cdot 10^{-05}$	
h	20,0	200000	2	-3,245	$9,265 \cdot 10^{-06}$	-9,317	$1,288 \cdot 10^{-05}$	stark verrauscht
r	20,0	200000	2	-9,298	$1,412 \cdot 10^{-05}$	-9,782	$1,258 \cdot 10^{-05}$	

Tabelle A.6: Beweglichkeiten und Schwellspannung Probe FO115

ID	L [μm]	W [μm]	d [μm]	$U_{th_{lin}}$ [V]	μ_{lin} [$\text{cm}^2\text{s}^{-1}\text{V}^{-1}$]	$U_{th_{sat}}$ [V]	μ_{sat} [$\text{cm}^2\text{s}^{-1}\text{V}^{-1}$]	Kommentar
h	5,0	1200	2	-4,987	$1,388 \cdot 10^{-02}$	-6,727	$1,636 \cdot 10^{-02}$	
r	5,0	1200	2	-7,547	$1,510 \cdot 10^{-02}$	-7,030	$1,570 \cdot 10^{-02}$	
h	5,0	6000	2	-4,499	$5,107 \cdot 10^{-03}$	-5,912	$5,783 \cdot 10^{-03}$	
r	5,0	6000	2	-8,023	$6,160 \cdot 10^{-03}$	-7,420	$8,019 \cdot 10^{-03}$	
h	5,0	10000	1	-6,140	$2,085 \cdot 10^{-05}$	-7,429	$1,736 \cdot 10^{-05}$	
r	5,0	10000	1	-7,716	$2,093 \cdot 10^{-05}$	-7,023	$1,417 \cdot 10^{-05}$	
h	5,0	10000	2	-4,734	$3,184 \cdot 10^{-02}$	-4,737	$4,846 \cdot 10^{-02}$	
r	5,0	10000	2	-6,452	$3,611 \cdot 10^{-02}$	-5,020	$5,048 \cdot 10^{-02}$	
h	5,0	10000	3	-3,890	$1,095 \cdot 10^{-02}$	-6,662	$1,508 \cdot 10^{-02}$	
r	5,0	10000	3	-7,531	$1,373 \cdot 10^{-02}$	-7,450	$1,706 \cdot 10^{-02}$	
h	5,0	10000	5	-4,268	$9,165 \cdot 10^{-03}$	-6,617	$1,103 \cdot 10^{-02}$	
r	5,0	10000	5	-7,121	$9,696 \cdot 10^{-03}$	-6,811	$9,949 \cdot 10^{-03}$	
h	5,0	20000	2	-4,422	$1,419 \cdot 10^{-02}$	-6,554	$1,961 \cdot 10^{-02}$	
r	5,0	20000	2	-7,687	$1,736 \cdot 10^{-02}$	-7,126	$2,186 \cdot 10^{-02}$	
h	5,0	50000	2	-3,979	$9,286 \cdot 10^{-03}$	-6,379	$1,453 \cdot 10^{-02}$	
r	5,0	50000	2	-6,812	$1,043 \cdot 10^{-02}$	-7,356	$1,793 \cdot 10^{-02}$	Zacken bei pos. U_{GS}

Tabelle A.7: Beweglichkeiten und Schwellspannung Probe FO116

ID	L [μm]	W [μm]	d [μm]	$U_{th_{lin}}$ [V]	μ_{lin} [$\text{cm}^2\text{s}^{-1}\text{V}^{-1}$]	$U_{th_{sat}}$ [V]	μ_{sat} [$\text{cm}^2\text{s}^{-1}\text{V}^{-1}$]	Kommentar
h	5,0	1200	2	-4,318	$9,765 \cdot 10^{-03}$	-6,525	$1,108 \cdot 10^{-02}$	
r	5,0	1200	2	-8,214	$1,176 \cdot 10^{-02}$	-7,924	$1,376 \cdot 10^{-02}$	
h	5,0	2000	2	-4,027	$7,469 \cdot 10^{-03}$	-6,961	$8,912 \cdot 10^{-03}$	
r	5,0	2000	2	-7,714	$8,304 \cdot 10^{-03}$	-7,916	$9,643 \cdot 10^{-03}$	
h	5,0	6000	2	-3,427	$8,959 \cdot 10^{-03}$	-6,636	$1,213 \cdot 10^{-02}$	
r	5,0	6000	2	-7,682	$1,101 \cdot 10^{-02}$	-7,749	$1,438 \cdot 10^{-02}$	
h	5,0	10000	2	-4,249	$1,031 \cdot 10^{-02}$	-6,659	$1,196 \cdot 10^{-02}$	
r	5,0	10000	2	-8,091	$1,232 \cdot 10^{-02}$	-8,044	$1,541 \cdot 10^{-02}$	
h	5,0	10000	3	-4,204	$1,035 \cdot 10^{-02}$	-6,432	$1,166 \cdot 10^{-02}$	
r	5,0	10000	3	-7,829	$1,209 \cdot 10^{-02}$	-7,886	$1,504 \cdot 10^{-02}$	
h	5,0	10000	5	-6,527	$8,993 \cdot 10^{-03}$	-7,754	$1,077 \cdot 10^{-02}$	
r	5,0	10000	5	-9,104	$1,014 \cdot 10^{-02}$	-8,537	$1,220 \cdot 10^{-02}$	
h	5,0	10000	10	-3,125	$6,153 \cdot 10^{-03}$	-6,445	$8,303 \cdot 10^{-03}$	
r	5,0	10000	10	-7,866	$7,758 \cdot 10^{-03}$	-7,759	$9,991 \cdot 10^{-03}$	
h	5,0	20000	2	-3,606	$9,086 \cdot 10^{-03}$	-5,960	$1,055 \cdot 10^{-02}$	
r	5,0	20000	2	-7,631	$1,107 \cdot 10^{-02}$	-7,673	$1,444 \cdot 10^{-02}$	
h	5,0	30000	2	-3,358	$2,768 \cdot 10^{-03}$	-5,663	$3,507 \cdot 10^{-03}$	
r	5,0	30000	2	-7,027	$3,150 \cdot 10^{-03}$	-6,580	$3,680 \cdot 10^{-03}$	
h	5,0	50000	2	-3,571	$8,538 \cdot 10^{-03}$	-7,046	$1,105 \cdot 10^{-02}$	
r	5,0	50000	2	-8,012	$1,071 \cdot 10^{-02}$	-8,102	$1,327 \cdot 10^{-02}$	

Tabelle A.8: Beweglichkeiten und Schwellspannung Probe FO117