

Application Note AN-FET-001

# Charakterisierung und Leistungsstudien von Feldeffekttransistoren (FETs) mit $\mu$ Stat-i 400

In den letzten Jahren werden Feldeffekttransistoren (FETs) immer häufiger als Sensorplattform für eine Vielzahl elektrochemischer und biologischer Anwendungen eingesetzt. Bei diesen Halbleiterbauelementen handelt es sich um vielversprechende bioelektronische Wandler, die sowohl den Niederspannungsbetrieb als auch stabile potentiometrische Messungen ermöglichen. FETs werden in der Wissenschaft inzwischen als attraktive

Alternative zu herkömmlichen elektrochemischen Detektionssystemen angesehen. Diese Application Note enthält eine ausführliche Anleitung, wie Metrohm DropSens-Bipotentiostaten zur Charakterisierung von FETs und deren Verwendung als Transducer (Wandler) eingesetzt werden können. Zur Demonstration der folgenden Experimente wird der  $\mu$ Stat-i 400, ein kleiner und tragbarer Bipotentiostat/Galvanostat, verwendet.

## EINFÜHRUNG

Wenn Feldeffekttransistoren (FETs) mit geeigneten biologischen Erkennungselementen wie Antikörpern oder Enzymen funktionalisiert werden, bieten sie eine einzigartige Plattform für die spezifische und markierungsfreie Transduktion biochemischer Ereignisse in Echtzeit. Beispielsweise können richtig funktionalisierte FETs das Vorhandensein von Gasen, Ionen und Viren nachweisen und sogar das

Zellwachstum in Echtzeit überwachen. Diese FET-basierten Biosensoren arbeiten mit einem elektrischen Feld, das Ladungsträger durch ein Halbleitermaterial moduliert. Solche Biosensoren können spezifische biologische Interaktionen direkt in elektrische Signale umwandeln, ohne dass eine elektroaktive Markierung erforderlich ist.

## INSTRUMENTIERUNG UND SOFTWARE

Um zu zeigen, wie man erforderliches Zubehör anschließt und Experimente mit FETs durchführt, wurde der  $\mu$ Stat-i 400 von Metrohm DropSens verwendet. Bei diesem Messgerät handelt es sich um einen tragbaren Bipotentiostaten und Galvanostaten, der über Bluetooth oder über ein USB-Kabel an einen Computer angeschlossen werden kann. Der  $\mu$ Stat-i

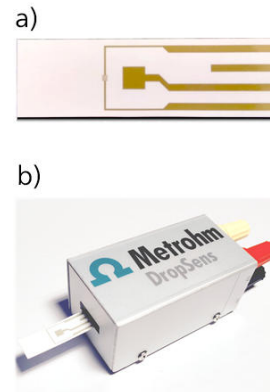
400 wird von der DropView 8400-Software gesteuert, einer speziellen und einfach zu bedienenden, intuitiven Software, die es dem Benutzer ermöglicht, elektrochemische Messungen durchzuführen und die entsprechenden Messsignale in Echtzeit zu betrachten.

Metrohm DropSens bietet als Zubehör den AUFET30-Sensor (**Abbildung 1a**) an, einen elektrochemischen Transducer aus Gold, der auf einem Kunststoffsubstrat aufgebracht ist. Diese Plattform ist in einer koplanaren Anordnung konzipiert, bei der alle Elektroden (Drain-Source-Kanal und Gate) auf einem einzigen Substrat integriert sind, um die Herstellung von FETs zu erleichtern. Diese Konfiguration gewährleistet, dass der Abstand zwischen den Elektroden immer gleichbleibt, und ermöglicht eine einfache Modifizierung des Kanals mit dem Halbleitermaterial. Der Drain-Source-Kanal ist ein interdigitierendes kammförmiges System aus sechs fingerförmigen Strukturen an jeder Elektrode mit einer Länge von 270 µm und einem Abstand zwischen den Fingern von 30 µm. Die Gate-Elektrode ist eine quadratische Elektrode (9 mm<sup>2</sup>) und befindet sich 2 mm vom Drain-Source-Kanal entfernt.

Die spezielle Anschluss-Box BIDSCFET (**Abbildung 1b**) wurde für den AUFET30-Sensor entwickelt, um eine einfache Verbindung mit einem beliebigen Messinstrument zu ermöglichen. Hier ist der AUFET30-Sensor im Steckplatz auf der Vorderseite dieser Anschluss-Box abgebildet, während sich auf der Rückseite vier Bananenbuchsen befinden, die den Farben der Bananenstecker des mitgelieferten Kabels des µSTAT-i 400 entsprechen und damit einen intuitiven Anschluss ermöglichen.

### FET-Anschluss

Dem Bipotentiostat/Galvanostat µStat-i 400 liegt ein I-BICABSTAT-Anschlusskabel bei. Dieses Kabel hat 5 Bananenstecker, die wie in **Abbildung 2** beschrieben, beschriftet sind. Für die Durchführung von Experimenten mit FETs werden je nach gewünschter experimenteller Anwendung verschiedene Anschlussanordnungen beschrieben.



**Abbildung 1** a) AUFET30-Plattform zur Herstellung von FETs. (b) BIDSCFET-Anschluss-Box.

- Red – (WE1)
- Red – (S)
- Yellow – (XWE2)
- Black – (A)
- Blue – (R)
- Green – ( $\equiv$ )

**Abbildung 2.** Beschriftungen für die 5 verschiedenen Bananenstecker

## Anschluss zur FET-Charakterisierung

Bei der FET-Charakterisierung wird der Drain-Source-Strom ( $I_{D-S}$ ) üblicherweise durch Abfahren der Drain-Source-Spannung ( $V_{D-S}$ ) über einen definierten Bereich bei verschiedenen Potentialstufen der Gate-Source-Spannung ( $V_{G-S}$ ) ermittelt. Daher ist die Anordnung der Anschlüsse wie folgt:

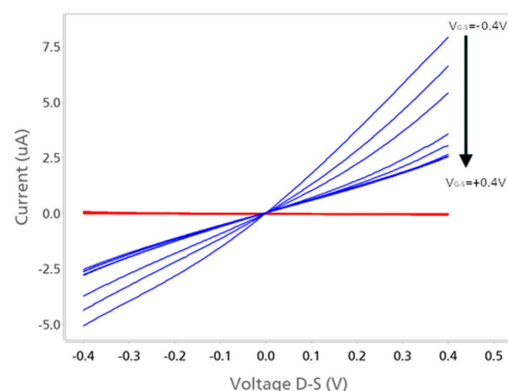
- Der Bananenstecker XWE2 (gelb) ist mit der **Gate**-Elektrode verbunden.
- Die Bananenstecker R (blau) und A (schwarz) sind mit der **Source**-Elektrode verbunden.

Für die Charakterisierung werden mehrere LSV+AD-Experimente durchgeführt, wobei die Fixwerte der Spannung  $V_{G-S}$  variiert werden. Während des Experiments werden in der Grafikanzeige zwei Messkurven simultan dargestellt: eine blaue Kurve, die  $I_{D-S}$  vs  $V_{D-S}$  darstellt, und eine rote Kurve, die  $I_G$  vs  $V_{D-S}$  entspricht. Nach der Durchführung der verschiedenen LSV+AD-Experimente weist die Grafikanzeige ein Diagramm ähnlich dem in **Abbildung 3** auf. Die blauen Linien zeigen den linearen Zusammenhang zwischen  $I_{D-S}$  und  $V_{D-S}$  bei den verschiedenen Potentialstufen  $V_{G-S}$  im Bereich von -0,40 V bis +0,40 V. Die lineare Abhängigkeit für das untersuchte Bauelement bestätigt, dass der ohmsche Kontakt zwischen den Goldelektroden des Drain-Source-Kanals und der darunter liegenden Halbleiterschicht erhalten bleibt.

- Die Bananenstecker WE1 (rot) und S (rot) sind mit der **Drain**-Elektrode verbunden..

Sobald die Verbindungen hergestellt sind, wird in der Software DropView 8400 die LSV+AD-Technik (Linear-Sweep-Voltammetrie + Amperometrische Detektion) ausgewählt. Die Parameter des Experiments können in den Parameterfenstern der Software eingestellt werden.

- **Ebegin:** Startspannung für  $V_{D-S}$
- **Eend:** Endspannung  $V_{D-S}$
- **E2:** Gate Spannung  $V_{G-S}$



**Abbildung 3.** Diagramm mit Darstellung von  $I_{D-S}$  (blau) und  $I_G$  (rot) vs.  $V_{D-S}$  bei verschiedenen  $V_{G-S}$ , erstellt mit der Software DropView 8400.

## Anschluss für Transferkurven I-V: Abfahren der Gate-Source-Spannung bei einer angelegten Fixspannung im Drain-Source-Kanal

Um die typischen Transferkurven zu erhalten, wird der Drain-Source-Strom ( $I_{D-S}$ ) bei einer fixen Spannung ( $V_{D-S}$ ) aufgezeichnet, während über einen definierten Bereich die Spannung  $V_{G-S}$  abgefahren wird. Nach der Charakterisierung (**Abbildung 3**) kann eine große Variation der  $I_{D-S}$ -Werte in Abhängigkeit von der angelegten Spannung  $V_{G-S}$  bei einer fest eingestellten Spannung  $V_{D-S}$  von +0,40 V beobachtet werden. Aus diesem Grund wurde der  $V_{D-S}$ -Wert von +0,40 V für die Durchführung des folgenden Transferkurven-Experiments gewählt. Die Arbeitsweise ist der vorhergehenden Beschreibung sehr ähnlich, allerdings müssen die Anschlüsse nun folgendermaßen hergestellt werden.

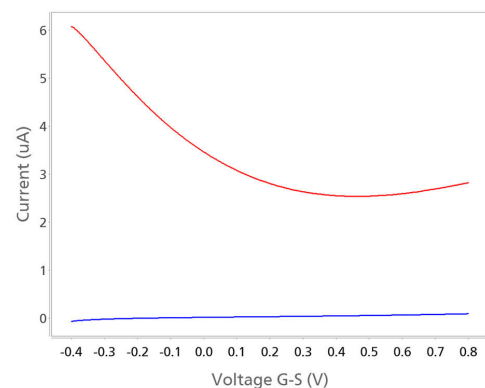
- Die Bananenstecker WE1 (rot) und S (rot) sind mit der **Gate**-Elektrode verbunden.

Nach dem Start des Experiments werden in der Grafikanzeige zwei Kurven simultan dargestellt: eine rote Messkurve, die der Transferkurve I-V ( $I_{D-S}$  vs.  $V_{G-S}$ ) entspricht, und eine blaue Messkurve, die dem Leckstrom entspricht ( $I_{G-S}$  vs.  $V_{G-S}$ ). (**Abbildung 4**).

- Die Bananenstecker R (blau) und A (schwarz) sind mit der **Source**-Elektrode verbunden.
- Der Bananenstecker XWE2 (gelb) ist mit der **Drain**-Elektrode verbunden.

Sobald die Verbindungen hergestellt sind, wird in der Software DropView 8400 die LSV+AD-Technik ausgewählt. Die Parameter des Experiments können in den Parameterfenstern der Software eingestellt werden.

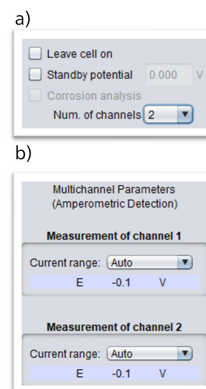
- **Ebegin**: Startspannung für  $V_{G-S}$
- **Eend**: Endspannung für  $V_{G-S}$
- **E2**: Drain-Source-Spannung ( $V_{D-S}$ )



**Abbildung 4.** Diagramm mit Darstellung der Transferkurve I-V ( $I_{D-S}$ , rote Linie) und des Leckstroms ( $I_{G-S}$ , blaue Linie) vs.  $V_{G-S}$ , erstellt mit der Software DropView 8400.

## Anschluss für kontinuierliche Messungen

Für einige Anwendungen ist es erforderlich, Messungen im kontinuierlichen Modus durchzuführen. Dabei wird nach Auswahl der optimalen Parameter eine Fixspannung zwischen Gate und Source, sowie eine weitere Fixspannung zwischen Drain und Source angelegt. In diesem Fall ist die Anschlussweise dieselbe wie bei den Transferkurven. Allerdings wird in diesem Fall eine andere Technik verwendet. In der Software DropView 8400 wird nun die Amperometrische Detektion (AD) ausgewählt. In den Parameterfenstern der Software wird "2" als Anzahl der Kanäle ausgewählt (**Abbildung 5a**). Anschließend wird im Parameterfenster der Multichannel-Parameter-Tab ausgewählt (**Abbildung 5b**) und die Gate-Source-Spannung in Kanal 1 sowie die Drain-Source-Spannung in Kanal 2 eingestellt. Nach dem Start des Experiments werden in der Grafikanzeige zwei Messkurven dargestellt: eine rote Kurve, entsprechend  $I_{D-S}$  vs Zeit und eine blaue Kurve entsprechend  $I_{G-S}$  vs Zeit.



**Abbildung 5.** (a) Ausschnitt des Parameterfensters in DropView 8400, in dem die Anzahl der Kanäle ausgewählt werden muss. (b) Der Multichannel-Parameter-Tab im Parameterfenster, wobei E von Kanal 1 der Spannung VG-S und E von Kanal 2 der Spannung VD-S entspricht.

## FAZIT

Mit den Bipotentiostaten von Metrohm DropSens können die Gate-Source- und Drain-Source-Ströme simultan in einem einzigen Diagramm dargestellt werden, so dass die Transferkurve I-V und der Leckstrom für jedes Experiment ermittelt werden können. Das gleiche Prozedere, das in dieser Application Note beschrieben wird, kann auch mit dem Bipotentiostaten/Galvanostaten µStat 400

durchgeführt werden. Darüber hinaus ist der AUFET30-Sensor ein elektrochemischer Transducer für die einfache Entwicklung von FETs. Zusammen mit der speziellen Anschluss-Box BIDSCFET erleichtert er den Anschluss an jeden beliebigen Bipotentiostaten, um zuverlässige Messungen mit höherer Empfindlichkeit durchzuführen, verglichen mit herkömmlichen elektrochemischen Drei-Elektroden-Zellen.

## CONTACT

Metrohm Deutschland  
In den Birken 3  
70794 Filderstadt

info@metrohm.de

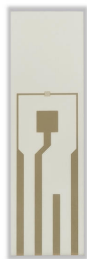
## KONFIGURATION



### μStat-i 400

#### Bipotentiostat/Galvanostat/Impedanzmessgerät (EIS)

Der  $\mu$ Stat-i 400 ist ein tragbarer Bipotentiostat/Galvanostat und ein Impedanzmessgerät (EIS), das sowohl in einer Ein- als auch in einer Zwei-Arbeits Elektroden-Konfiguration für voltammetrische, amperometrische oder potentiometrische Messungen verwendet werden kann. Er ist mit einer Lithium-Ionen-Batterie ausgestattet und kann einfach über USB oder Bluetooth® an einen PC angeschlossen werden.



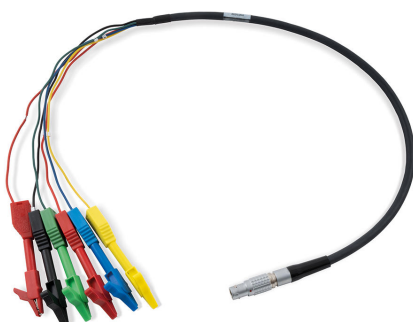
### Flexible Feldeffekttransistoren aus Gold mit koplanarem Gate

Flexible Einweggeräte für Feldeffekttransistoren (FET) bestehen aus Gold und sind auf einem Kunststoffträger aufgebracht. Diese Elektroden sind für die Bestimmung der sensorischen Phasen hilfreich.



### Connector for Field-effect transistor Electrodes

Boxed connector that acts as an interface between ref. AUFET30 electrodes and any kind of potentiostat



### Stat Kabelanschluss für Stat-i 400 und Zweifach-Dickfilmelektroden

$\mu$ Stat Kabelanschluss für  $\mu$ Stat-i 400 mit konventionellen Elektroden