



Technische  
Universität  
Braunschweig



LENA  
Laboratory  
for Energy  
Nanotechnology



Institut für  
Halbleitertechnik


**Grundlagen der Elektronik und Photonik**

**FETs: Typen und Schaltungssymbole**

Prof. Dr. Andreas Waag

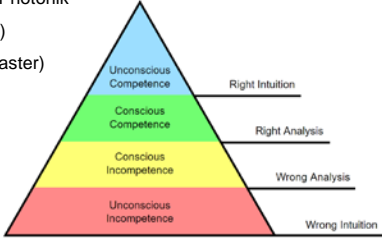
1

**Bänderschema von Halbleitern**

LENA Laboratory for Energy Nanotechnology  INSTITUT FÜR Halbleitertechnik

Die Inhalte dieses Clips entsprechen Level 2

- Level 1 Basiswissen Phase 1 (teilweise noch Schulwissen)
- Level 2 Basiswissen Phase 2 (Eingangskurse Bachelor)
- Level 3 Ziel-Niveau „Grundlagen der Elektronik und Photonik“
- Level 4 vertiefendes Wissen (Eingangskurse Master)
- Level 5 Expertenwissen (Fortgeschrittenen-Kurse Master)
- Level 6+ Wissensgrenze




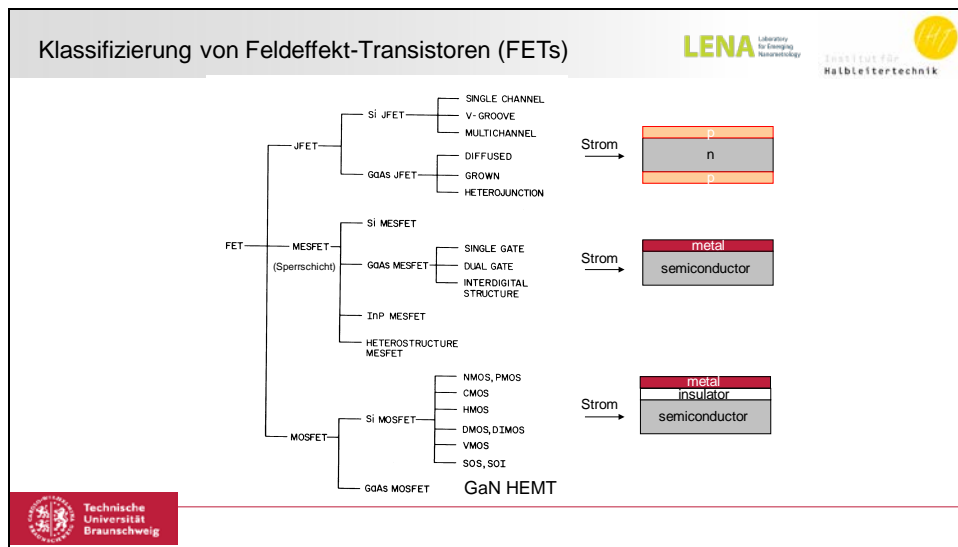
Unconscious Competence Right Intuition

Conscious Competence Right Analysis

Conscious Incompetence Wrong Analysis

Unconscious Incompetence Wrong Intuition

 Technische Universität Braunschweig



Feldeffekt-Transistoren nutzen den Feldeffekt, um die Leitfähigkeit zwischen zwei Anschlüssen (Source und Drain) zu steuern. In der Digitalelektronik sind meist nur 2 Zustände relevant: AN (leitfähig) und AUS (blockierend). Ein Transistor ist aber durch sein vollständiges Kennlinienfeld gekennzeichnet und kann deshalb auch in analogen Schaltungen zum Einsatz kommen (z.B. in Verstärker-Schaltungen).

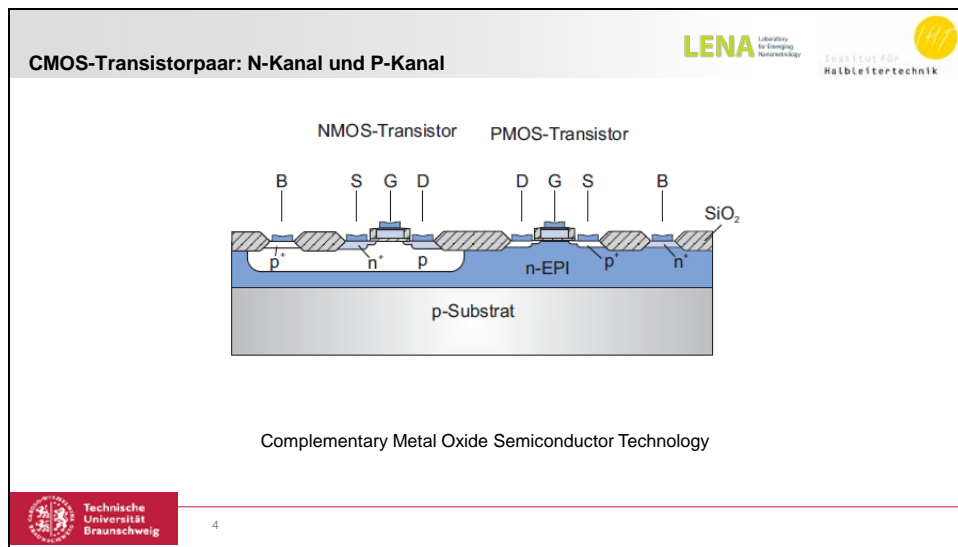
Spricht man von FETs, so meint man damit meist eine Spezialform: den Metal-Oxidie.-Semiconductor-FET (=MOSFET). Dieser ist der mit Abstand häufigste Transistortyp und bildet die Grundlage für die gesamte Digital- und einen Großteil der Analog-Elektronik.

Grundsätzlich kann ein FET allerdings auch ganz anders gebaut sein. Jeder Übergang zwischen 2 Materialien, z.B. zwischen p- und n-Bereich, zwischen SiO<sub>2</sub> und Halbleiter oder zwischen Metall und Halbleiter ist von einer Raumladungszone gekennzeichnet. Die Ausdehnung der RLZ ist abhängig von der von außen über die RLZ angelegten Spannung.

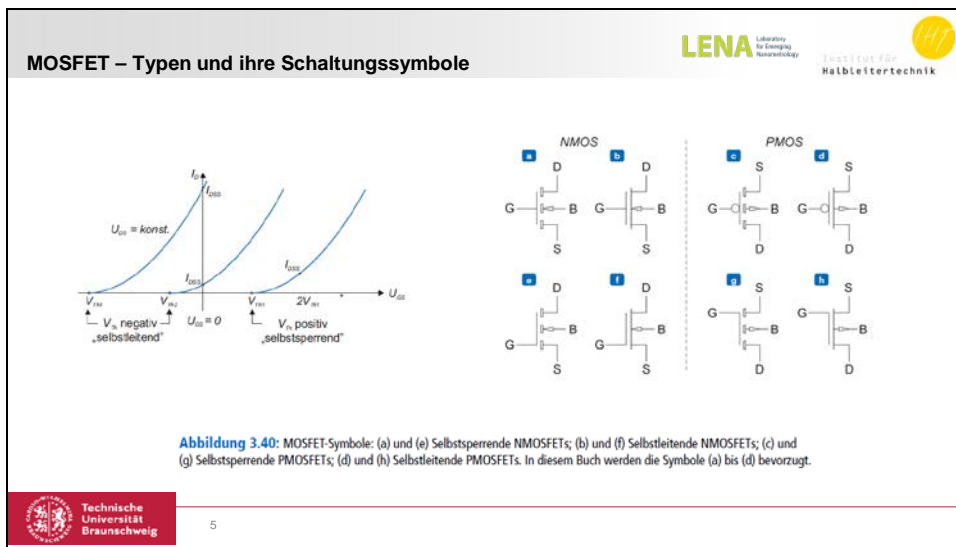
Bei einem Junction-FET wird der Strompfad über eine externe Steuerspannung, die den p-n-Übergang in Sperrrichtung polt, verkleinert und kann auch ganz abgeschnürt werden. Der Transistor schaltet dann ab.

Bei einem Metal-Halbleiter-Übergang kann man ebenfalls Sperrspannung anlegen und damit den Übergang zunächst in die Verarmung und dann in die Inversion treiben.

Am flexibelsten allerdings ist die Architektur eines MOS-FETs, bei dem zwischen Gate und Halbleiter auf Grund des Isolators gar kein Strom fließt. Auch von MOSFET gibt es diverse Bauformen, auf die hier aber nicht genauer eingegangen werden soll.



Die beiden Ausführungsformen eines MOSFETs mit n-Kanal und p-Kanal nennt man „komplementär“. Bei richtiger Ansteuerung kann komplementäres Verhalten erzeugt werden: wenn der eine Transistor öffnet, schließt gleichzeitig der andere. Auf diesem Grundmodell ist die gesamte CMOS-Elektronik aufgebaut. Ein CMOS-Pärchen ergibt – richtig verschaltet – die Funktion eines Inverters.

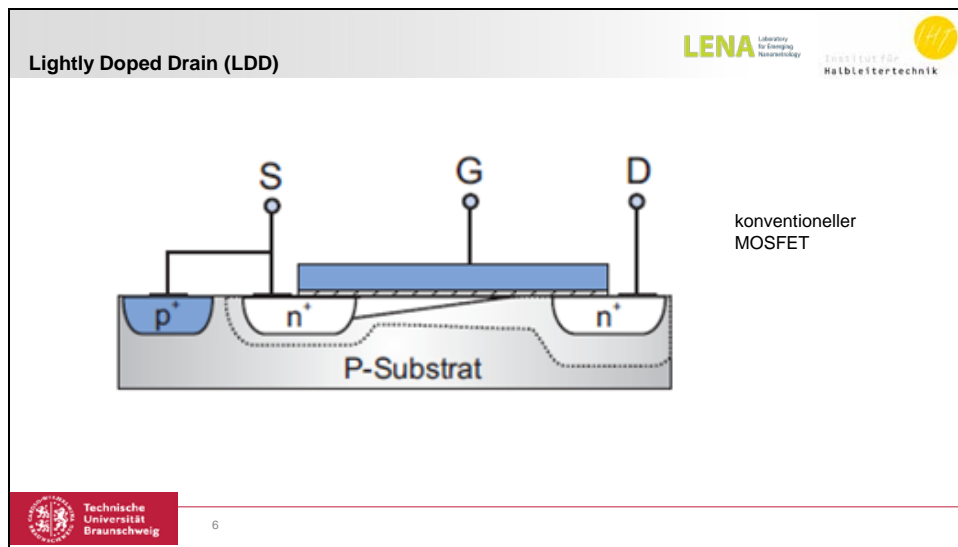


Beide MOSFET Typen (N-Kanal und P-Kanal) können wiederum in 2 unterschiedlichen Bauformen vorkommen: „normally on“ und „normally off“. Die typische Bauform ist „normally off“, d.h. der Transistor ist AUS (blockiert) wenn er nicht aktiv und richtig angesteuert wird. Ohne Ansteuerung besteht kein Kanal unter dem Gate. Die Bauform „normally off“ bezeichnet man auch als „selbstsperrend“. Im Gegensatz dazu kann man von vorne herein einen Kanal so dotieren, dass sich ohne Ansteuerung ein leitfähiger Kanal zwischen Source und Drain ergibt. Derartige MOSFETs werden als „normally on“ oder „selbstleitend“ bezeichnet. Wird der Transistor angesteuert, so muss der Kanal zerstört werden (abgeschnürt werden), um den Transistor auszuschalten.

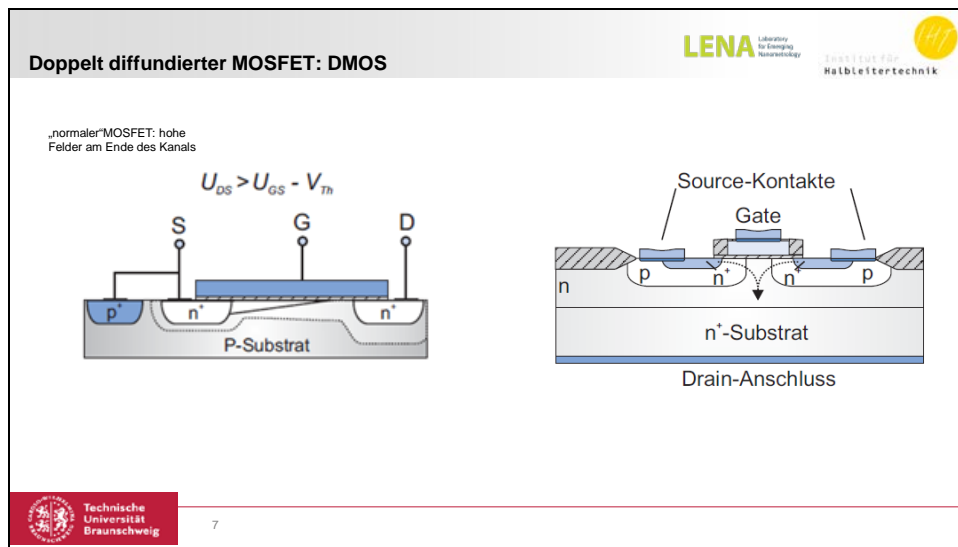
Selbstsperrende MOSFETs haben eine positive Threshold-Spannung. Diese muss von der Gate-Spannung überschritten werden, damit sich Inversion und damit ein leitfähiger Kanal ergibt.

Selbstleitende MOSFETs besitzen eine negative Threshold-Spannung. Eine negative Gate-Spannung muss hoch genug sein, um den Kanal zu zerstören.

Die jeweiligen Schaltungssymbole sind fast selbsterklärend: „selbstleitend“ wird durch einen durchgezogenen Strich gekennzeichnet, selbstsperrend durch eine gestrichelte Linie. Der Pfeil am Bulk-Anschluss bezeichnet den Typ des Kanals (n-Kanal oder p-Kanal). Dabei zeigt Pfeil in Durchlassrichtung der technischen Stromrichtung der gedachten Diode zwischen Bulk und Gate: von „p“ nach Gate im Fall eines n-Kanals, und von Gate nach „n“ im Fall eines p-Kanals.



Bei MOSFETs findet die Abschnürung zuerst am Drain-seitigen Ende des Kanals statt. Jede weitere Erhöhung der Source-Drain-Spannung  $U_{DS}$  fällt über dem abgeschnürten Bereich ab. Damit steigt jenseit des Pinch-Off die Feldstärke dort sehr stark an. Durch die hohe Feldstärke können Ladungsträger im Kanal sehr stark beschleunigt werden und sogar in das Oxid (den Isolator) hineingeschossen werden. Diese hochenergetischen Elektronen oder Löcher hinterlassen im Isolator Defekte und Ladung, die auf Dauer die Eigenschaften des MOSFET verändern. Deshalb greift man zu einem Trick: der Bereich am Drain wird niedrig dotiert. Damit wird die Pinch-Off Zone über einen größeren Bereich verteilt und die Feldstärken werden etwas reduziert, was einen stabileren Betrieb garantiert. Dies nennt man „Lightly Doped Drain“.



Die hohen Felder am Ende des Kanals sind vor allem für MOSFETs ein Problem, die hohe Spannungen schalten sollen. Damit einher gehen meist auch hohe Ströme. Der Kanal in einem konventionellen MOSFET ist aber nur 2-dimensional. Dessen Stromtragfähigkeit ist deshalb begrenzt.

Eine Lösung bilden vertikale Architekturen wie z.B. beim „doppelt diffundierten MOSFET“, dem DMOSFET. Dort wird eine konventionelle, planare Gate-Architektur gewählt, um das Schalten zu realisieren. Der Strompfad ist allerdings vertikal und geht durch das ganze Silizium-Substrat vertikal bis zum unteren Drain-Anschluss. Ist der DMOS Transistor abgeschaltet, so fallen die hohen Betriebsspannungen über der gesamten Waferdicke von ca. 500  $\mu\text{m}$  ab. Die elektrischen Felder sind dementsprechend klein. Anders als beim planaren, konventionellen MOSFET kommt es nicht so leicht zum Durchbruch. DMOS Transistoren werden vor allem in Schaltungen der Leistungselektronik eingesetzt.

Außerdem können DMOS Transistoren auf Grund ihrer vertikalen Architektur leicht vergrößert werden. Fast der volle vertikale Querschnitt dient dem Stromtransport.