

Lerneinheit

[Nanotechnologie in Elektronik]

Name der Autor_innen: [Christopher Fischer, Andrea Deißberger, Peter Grambow]

Letztes Bearbeitungsdatum: [05.11.2021]

Die Nanotechnologie in der Elektronik hat eine Geschichte von etwa 56 Jahren.

Erste Einführung

Die Nanotechnologie in der Elektronik hat eine lange Geschichte. Einer der charakteristischen Meilensteine vor etwa 56 Jahren war eine wichtige Aussage von Gordon Moore. Als einer der Mitbegründer von Intel (eines der wichtigsten Halbleiterunternehmen weltweit) hat er seine Vorstellung vom industriellen Wachstum in diesem Bereich in einer einfachen Regel formuliert. Er rechnete damit, dass die Leistung eines IC (engl. integrated circuit = integrierter Schaltkreis, ein wichtiges elektronisches Bauteil) etwa alle zwei Jahre um den Faktor zwei zunehmen wird. Das war damals eine erstaunliche Aussage, denn die meisten Menschen hatten keine Ahnung, wie das möglich sein sollte. Die Randbedingungen für diese Regel bestimmen noch heute Elektronikindustrie weltweit. Die maximale Speicherkapazität und die Geschwindigkeit der Datenübertragung nehmen weiter zu. Ohne diese Entwicklungen gäbe es weder Smartphones noch Computer.

Praxisbezug - Hierfür benötigen Sie die Kenntnisse und Fähigkeiten

Moderne elektronische Produkte wie Smartphones und Tablets würden ohne das fundierte Wissen der Nanotechnologie nicht funktionieren. Daher ist es wichtig, die Bedeutung der Strukturgrößen in diesem Bereich zu verstehen.

Überblick über die Lernziele und Kompetenzen

Einer der wichtigsten Faktoren in der Elektronik ist heutzutage die Größe. Nur wenn die Strukturen so klein wie möglich sind, lassen sich große Datenmengen wie in einem Smartphone oder einem Tablet-Computer kontrollieren. Du wirst die wichtigsten Merkmale im Feld der Elektronik kennenlernen. Was sind die wichtigsten Entwicklungen heute und wo liegen die physikalischen Grenzen in der Zukunft?

Lernziele	Detailziele
LO_Beispiele aus der Elektronik 01	FO_Speicherkapazität vor 20 Jahren und heute_01_01 FO_Merkmale von Computern heute und vor 30 Jahren_01_02 FO_Smartphones und Telefonzellen_01_03 FO_Aktuelle Sensorbeispiele / phyphox_01_04
LO_Der Transistor, das magische Gerät 02	FO_Was ist ein Computer?_02_01 FO_Was ist ein IC?_02_02 FO_Was ist ein Transistor?_02_03
LO_Größe ist wichtig, besonders in der	FO_Kleinste mit bloßem Auge sichtbare

Elektronik 03	elektronische Strukturen_03_01 FO_Begrenzung von Lichtmikroskopen_03_02 FO_Eine der Herausforderungen in der Elektronik besteht heute darin, Strukturen so klein wie möglich zu bauen. Wie soll das funktionieren?_03_03 FO_Erläuterung des Mooreschen Gesetzes_03_04 FO_Wo sind die Grenzen? Was können wir von den Griechen lernen?_03_05
---------------	--

1. Beispiele aus der Elektronik

In diesem Abschnitt wollen wir verstehen, wie sich die Nanotechnologie auf elektronische Anwendungen auswirkt. Eine gute Möglichkeit, sich diesem Thema zu nähern, besteht darin, zu untersuchen, wie Computer in kurzer Zeit so leistungsfähig wurden. Der Computer besteht im Grunde aus mehreren "Chips", die auch als "integrierte Schaltkreise" bezeichnet werden. Wir werden später noch ausführlicher auf diese eingehen. Für den Moment müssen wir nur wissen, dass die Schlüsselemente dieser Chips "Transistoren" sind. Dies sind die Bausteine, mit denen wir kontrollieren können, ob ein elektrischer Strom durch eine bestimmte Leitung fließt oder nicht. Es gibt also zwei Fälle für den Computer: elektrischer Strom oder kein elektrischer Strom. Dies wird als 1 und 0 interpretiert - die **binären digits**, die so genannten "Bits". Diese beiden Zahlen kodieren alle Informationen, mit denen ein Computer arbeitet. Anders ausgedrückt: Ein Computer bricht jedes Problem soweit herunter, dass er nur noch die 1en und 0en verarbeiten muss.

Wichtig

Grundkonzept eines Computers

Ein Computer bricht jedes Problem soweit herunter, dass er nur noch mit 1en und 0en umgehen muss. Dies geschieht durch die Kontrolle, ob ein Strom fließt (1) oder nicht (0).

Nach diesem Einstieg können wir verstehen, dass eine steigende Anzahl von Transistoren auf dem Chip mit einer höheren Rechenkapazität oder allgemein einer schnelleren Datenverarbeitung einhergeht. Offensichtlich wurden diese Anforderungen in unserer modernen Welt immer wichtiger, was zu einer intensiven Forschung und Entwicklung dieser Chips führte. Das erscheint heute sehr logisch, aber früher war dieser Trend nicht so offensichtlich. Umso bemerkenswerter ist es, dass Gordon E. Moore nicht nur die steigende Zahl der Transistoren auf einem Chip vorausgesagt, sondern auch richtig quantifiziert hat. Er erklärte, dass sich die Anzahl der Transistoren auf einem integrierten Schaltkreis etwa alle zwei Jahre verdoppelt. Die nachstehende Abbildung zeigt, dass sich seine Vorhersage als richtig erwiesen hat.

Wichtig

Mooresches Gesetz

Die Anzahl der Transistoren verleiht einem Computerchip seine Verarbeitungsgeschwindigkeit. Die Anzahl dieser Transistoren auf einem Chip verdoppelt sich etwa alle zwei Jahre.

Moore's Law: The number of transistors on microchips doubles every two years

Moore's law describes the empirical regularity that the number of transistors on integrated circuits doubles approximately every two years. This advancement is important for other aspects of technological progress in computing – such as processing speed or the price of computers.

Transistor count

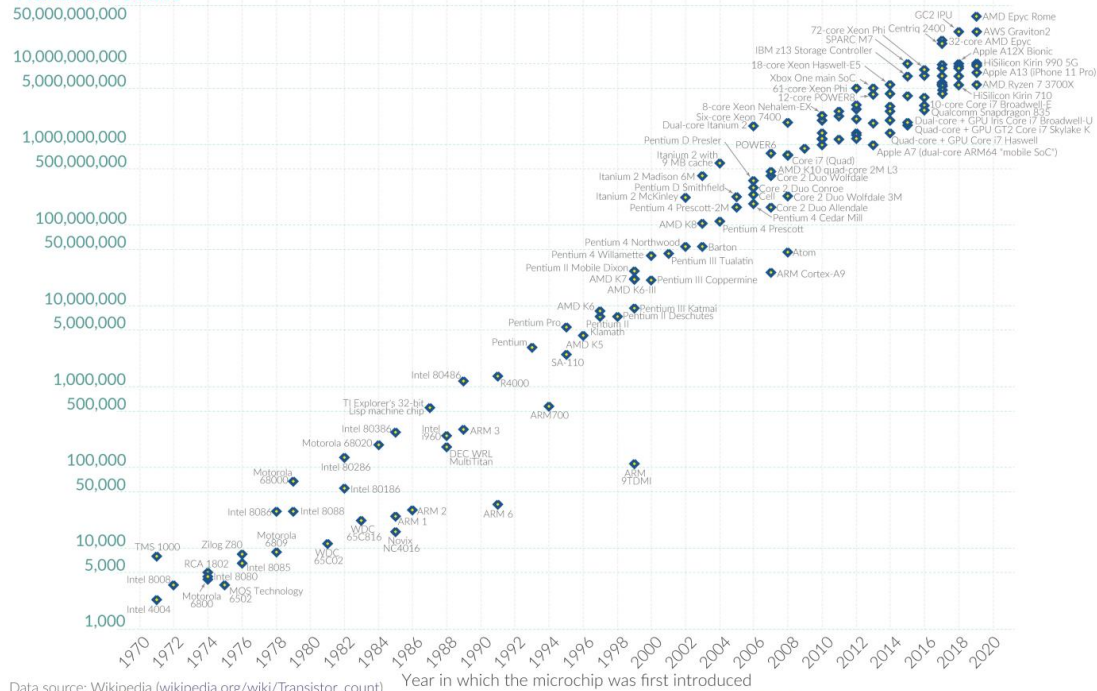


Figure 1: Das Bild zeigt die steigende Zahl der Transistoren in den letzten fünfzig Jahren.

Im Grunde genommen wird alles, was Sie gerade auf Ihrem Computer tun - den Cursor bewegen, durch diesen Text blättern - durch einfache Summierungen, Vergleiche von Daten und kurzfristige Speicherung von Daten erledigt. Die "CPU" (Central Processing Unit) ist der Baustein, der sich darum kümmert. Natürlich ist auch eine große Anzahl von Transistoren beteiligt. Werfen wir also einen Blick auf die Auswirkungen des Moore'schen Gesetzes in diesem Bereich und darauf, welche Art von Computerfunktionen in diesem Zusammenhang im Laufe der Jahre implementiert wurden. Der erste Chip wurde 1971 von Intel entwickelt. Der Intel 4004 mit 2300 Transistoren und einer Taktrate von 108 kHz konnte alle Probleme einer programmierbaren Rechenmaschine lösen. Die Taktrate gibt einen Hinweis auf die Geschwindigkeit, mit der die Daten verarbeitet werden. Später wirst du sehen, dass die kHz-Taktrate im Vergleich zu den heutigen Standards sehr niedrig ist. Doch in den folgenden Jahren verbesserte sich die Effizienz rasch. Im Jahr 1972 hatte der Intel 8008 3500 Transistoren und 200 kHz; der Intel 8080 zwei Jahre später hatte bereits 6000 Transistoren und eine Taktrate von 2 MHz. Der 5-MHz-Chip mit 6500 Transistoren auf dem Intel 8085 war 1976 der effizienteste. Bis zu diesem Zeitpunkt waren die Anwendungen meist Ampelschaltungen oder die Steuerung von Produktionsmaschinen. Im Jahr 1982 ermöglichte die Entwicklung von Computerchips mit einer Leistung von 25 MHz den Durchbruch der Desktop-PCs. Und wenn wir darüber nachdenken, dann beschreibt das Wort "Desktop" die wichtige Entwicklung zu diesem Zeitpunkt sehr gut: Nun war es möglich, auf so kleinem Raum so viel Leistung zu konzentrieren, dass die "Rechenmaschine" auf einen Schreibtisch passte. Dies war nicht immer üblich. Der nächste wichtige Zeitraum war 1990 bis 1999, als Intel Chips entwickelte, die die 1-GHz-Marke erreichten. In den Jahren 2000 bis 2008 kam eine neue Methode zur Steigerung der Chipleistung auf. Zusätzlich zu einer einer höheren Anzahl von Transistoren ist es möglich, mehr als einen "Core" (Kern) auf einem Chip zu implementieren. Ein Core kann an einer einzigen Aufgabe gleichzeitig mit einer bestimmten Taktrate arbeiten. Letztere wird durch die Anzahl der Transistoren definiert. Wenn du also einen weiteren Core hinzufügst, können mehrere Aufgaben gleichzeitig bearbeitet werden. Wir können dies mit einer Situation vergleichen, in der man an der Bar auf sein bestelltes Getränk wartet. Wenn sich nur ein Barkeeper um die gesamte Schlange kümmert, braucht er viel mehr Zeit als in der gleichen Situation mit zwei Barkeepern. Im Jahr 2006 erreichte Intel 3,33 GHz mit zwei Kernen. Die Anzahl der Kerne wurde zwischen 2008 und 2013 von zwei auf vier erhöht. Bis zu diesem Tag stieg die Corezahl im High-End-Segment der verfügbaren

Chips auf 16. Das erklärt zum Beispiel, warum all die großartigen und realistischen Videospiele von heute so flüssig und problemlos laufen.

Erinnere an

Merkmale von Computern im Laufe der Jahre

Die CPU verarbeitet im Hintergrund alle Daten, die deinen Computer zum Laufen bringen. Die Leistung dieser Chips verbesserte sich über die Jahre drastisch. Anfangs reichte es aus, um Ampeln zu steuern, heute können Computer Videospiele oder Filme problemlos flüssig abspielen.

Nun haben wir Erkenntnisse über die Miniaturisierung und Leistungsoptimierung von Hardware für Computer gewonnen. Doch dies ist keine Diskussion, die nur für Spezialisten interessant ist. Die enormen Auswirkungen auf unser tägliches Leben werden deutlich, wenn wir die Situation vor 30 Jahren und heute betrachten. Zumindest in Europa hatten die meisten Menschen ein Telefon in ihrem Haus. Aber manchmal war das Telefonieren eine schwierige Aufgabe, weil man zu Hause sein musste, um jemanden anzurufen, und man musste das Glück haben, zu Hause zu sein, wenn man einen Anruf erhielt. Zu diesem Zeitpunkt waren Telefonzellen eine Lösung für dieses Problem. So konnten sich die Menschen gegenseitig anrufen, wenn sie sich nicht Zuhause aufhielten. Es sei denn, die Telefonzelle war besetzt, du hattest kein Kleingeld, du hattest die Telefonnummer vergessen oder du konntest einfach keine Telefonzelle finden. Angesichts all dieser Nachteile ist es klar warum Smartphones heute nicht mehr wegzudenken sind. Der wichtige Aspekt hier ist, dass die Nutzung von Telefonen über das Telefonieren hinausgeht. Im Grunde ist die Entwicklung, die wir zu Beginn des Themas besprochen haben, so weit fortgeschritten, dass wir heute die millionenfache Rechenleistung früherer PCs in unseren Taschen tragen. Man kann also sagen, dass die Nanotechnologie es möglich gemacht hat, all diese Effizienz in Chips von der Größe einer Cent-Münze zu konzentrieren, mit denen man damals die Telefonzelle betätigt hat.

Neben der enormen Rechenleistung der modernen Miniaturgeräte finden sich mehrere Sensoren auf demselben kleinen Raum. Schauen wir uns also kurz an, welche Art von Sensoren es gibt und was sie tun. Positionssensoren teilen dem Smartphone seinen Standort mit. So zeigt das Magnetometer immer nach Norden, der Näherungssensor schaltet den Bildschirm schwarz, wenn du einen Anruf entgegennimmst, damit du nicht versehentlich etwas auf dem Display berührst, und das GPS (Global Positioning System) nutzt Satelliten, um dich zu orten. Eine andere Art von Sensoren analysiert deine Bewegungen, indem sie die Geschwindigkeit und die Rotation erfassen. Das Gyroskop sagt dem Gerät, wohin es in einem dreidimensionalen Raum zeigt. Beschleunigungssensoren erfassen die Vibration und die Neigung der Beschleunigung, wodurch es möglich ist, die Geschwindigkeit in Navigationsanwendungen anzuzeigen oder die Ausrichtung des Telefons zu ändern, wenn es gedreht wird. Außerdem sind in modernen Smartphones eine Reihe von Umgebungssensoren vorhanden. Ihre Funktion ist im Grunde selbsterklärend: Thermometer, Hygrometer, Barometer, Umgebungslichtsensorik. Wir können uns vorstellen, dass ein ziemlich klares Bild unseres täglichen Lebens entsteht, wenn diese Sensoren zusammenarbeiten. Dies bringt eine ganze Reihe an Vorteilen mit sich. Wenn beispielsweise das Gyroskop und das Magnetometer zusammenarbeiten, können den Karten Neigungen und Drehungen hinzugefügt werden, was uns in Zukunft eine bessere Navigation ermöglicht. Einen praktischen Einblick in alle Sensoren, die du bei dir trägst, gibt die App "phyphox". Die App ermöglicht es dir, physikalische Experimente direkt mit deinem Smartphone durchzuführen. Wenn du dich zum Beispiel in einem Aufzug schon einmal gefragt hast, wie schnell du dich eigentlich bewegst, hilft dir diese Anwendung dabei. Mit Hilfe des Barometers in deinem Smartphone können der Luftdruck und seine Schwankungen ermittelt werden, was einen Rückschluss auf die Geschwindigkeit zulässt. Die Durchführung verschiedener Experimente vermittelt einen Eindruck davon, wie genau dein Smartphone deine Umgebung erkennt und wie es in der Lage ist, eine Vielzahl von Dingen wie Karten und Fitness-Tracker auf einem einzigen Bildschirm zu vereinen.

Wichtig

Aktuelle Sensorbeispiele

Heutige Smartphones sind mit einer Vielzahl von nanoskaligen Sensoren ausgestattet, die die hohe Funktionalität der Geräte ermöglichen.

2. Der Transistor, das magische Gerät

Ganz am Anfang haben wir kurz erwähnt, wie ein Computer funktioniert. Lass uns dieses Konzept Schritt für Schritt untersuchen, beginnend mit dem gesamten Ensemble bis hin zum Transistor.

Natürlich kannst du mit deinem Computer Dokumente schreiben, E-Mails an deine Freunde schicken oder im Internet surfen. Aber was passiert eigentlich in dieser Maschine, damit diese Dinge funktionieren? Vereinfacht ausgedrückt, bearbeitet ein Computer Daten. In diesem Zusammenhang werden die Informationen gespeichert, abgerufen und verarbeitet. Doch um welche Art von Daten oder Informationen handelt es sich? Damals war sowohl die Eingabe als auch die Ausgabe auf Ziffern beschränkt, was auch der Grund dafür ist, dass sich der Name des Geräts von dem englischen Verb „compute“ zu Deutsch „rechnen“ ableitet. Obwohl moderne PCs auch Buchstaben oder Töne verarbeiten können, werden diese wiederum mit Ziffern codiert. Der Computer ist also bis heute eine "einfache" Rechenmaschine. An dieser Stelle sollten wir uns daran erinnern, dass wir für diese Kodierung das Binärsystem verwenden, das nur 1en und 0en verwendet. So ist beispielsweise jeder einzelne Buchstabe mit einer bestimmten Anzahl und einer Reihe dieser binären Ziffern codiert. So wird jeder Film, jedes Bild oder jeder Song zu einer Reihe von 0en und 1en für deinen PC.

Nachdem wir nun das grundlegende Funktionsprinzip eines Computers kennen, bleibt noch eine Frage offen: Wie erzeugen wir diese 0en und 1en? Dies kann man sich vorstellen, wenn man sich den Computer als eine Reihe von Schaltern vorstellt. Jedes einzelne dieser Elemente kann ein- oder ausgeschaltet werden, was als 0 oder 1 definiert ist. Wenn du die Anzahl der Schalter erhöhst, erhöht sich die Anzahl der 0en und 1en.

Definition

Was ist ein Computer

Ein Computer ist eine Rechenmaschine. Das Gerät arbeitet nur mit 0en und 1en. Letztere werden mit miniaturisierten Schaltern erstellt.

Um dem Verständnis der Funktionsweise eines Computers einen Schritt näher zu kommen, sollten wir uns die Frage stellen: Wie sehen diese Schaltkreise, welche die Schalter enthalten, aus? Was ist der Unterschied zu denen, die wir aus dem Physikunterricht in der Schule oder dem Sicherungskasten zu Hause kennen? Letztere sind aus separaten Bausteinen wie Transistoren, Dioden, Kondensatoren und Widerständen aufgebaut. Der Schaltkreis in deinem PC hingegen übernimmt alle separaten einfachen Funktionen aller Geräte und integriert sie auf einem einzigen Chip. Aus diesem Grund werden sie auch als integrierte Schaltungen (IC) bezeichnet. Wenn du jemals ein solches elektrisches Gerät geöffnet hast, wirst du sie als kleine schwarze Quadrate oder Rechtecke wie auf dem Bild unten gesehen haben.

Einer dieser schwarzen Kästen enthält im Wesentlichen einen einzigen Siliziumchip, auf den alle oben genannten Bausteine aufgedruckt sind. Die Tatsache, dass es heutzutage möglich ist, Milliarden von elektronischen Bauteilen auf diesen Halbleitern unterzubringen, hat den Weg dafür geebnet, dass Mikroprozessoren nicht größer als ein paar Quadratmillimeter sind. Du kannst dir vorstellen, dass mit der Miniaturisierung der ICs auch die Entwicklung innovativer physikalischer und chemischer Verarbeitungstechnologien immer interessanter wurde. Nur um das nebenbei erwähnt zu haben: Dies ist der Punkt, an dem die Nanotechnologie wieder auf die verschiedenen wissenschaftlichen

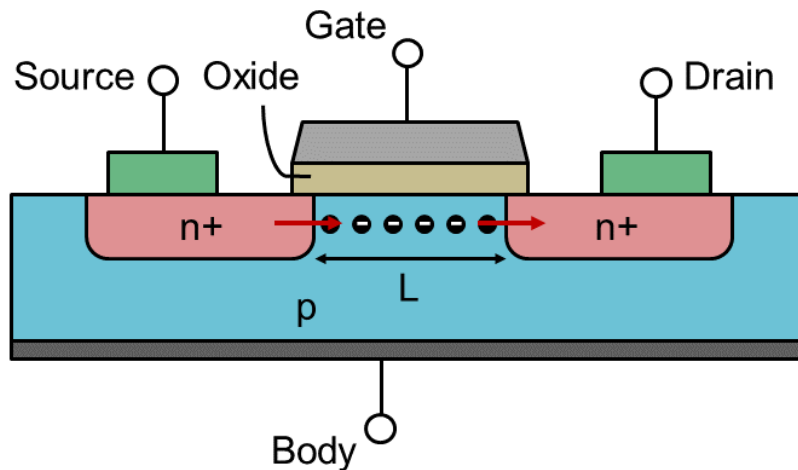
Disziplinen trifft, um solch großartige moderne Geräte herzustellen. Und wir wissen bereits, dass sich die Bemühungen vieler Entwickler gelohnt haben, wenn wir uns vor Augen führen, dass das Moorsche Gesetz bis heute gilt. In der Grafik haben wir gesehen, dass die Anzahl der Transistoren auf einem einzelnen Chip enorm gestiegen ist und bis heute weiter steigt. Jetzt sollten wir verstehen, dass Mikroprozessoren mit mehr dieser Strukturen auf dem Chip eine bessere Leistung erreichen können, weil sie mehr 0en und 1en gleichzeitig verarbeiten können. Und um immer mehr Komponenten auf einem gleich großen Chip unterzubringen, müssen die einzelnen Bausteine in ihrer Größe schrumpfen. Aus diesem Grund ist es ein guter Zeitpunkt, sich den Transistor, der als unser miniaturisierter Schalter verstanden werden kann, näher anzusehen.

Definition
Was ist ein IC?
Ein integrierter Schaltkreis besteht aus diskreten elektronischen Komponenten auf einem einzigen Siliziumchip.

Es gibt verschiedene Arten von Transistoren. Wir wollen die Struktur und das Funktionsprinzip des "MOSFET" verstehen. Der Name MOSFET steht für Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor) und verrät uns bereits die Struktur des Bauelements. Die Basis des Geräts ist ein flaches Silizium-Material, das beabsichtigte Verunreinigungen enthält. Letzteres wird als "Dotierung" bezeichnet. Dieses Material kann p-dotiert (NMOS) oder n-dotiert (PMOS) sein. Diese Materialtypen unterscheiden sich durch ihre Ladungsträger, die bei NMOSFETs Elektronen und bei PMOSFETs Löcher sind. Wir werden uns mit NMOSFETs befassen. In diesem Fall ist das p-dotierte Siliziumsubstrat (Du kannst es dir als einen leicht positiv geladenen Bereich vorstellen) in der Abbildung unten blau eingezeichnet. In diesem Material befinden sich zwei rote Bereiche, die mit einer anderen Art von Ionen dotiert sind. Dadurch entstehen Bereiche eines n-Typ-Materials (Du kannst sich das als leicht negativ geladenen Bereich vorstellen), die so genannten "Source" (deutsch: Quelle) und "Drain" (deutsch: Abfluss). Der Bereich dazwischen wird als "Kanal" bezeichnet und ist mit einer isolierenden Oxidschicht bedeckt. Auf dieser Oxidschicht befindet sich ein leitendes Metallmaterial, das so genannte "Gate" (deutsch: Tor oder Schranke).

Das grundlegende Konzept eines MOSFET besteht darin, den Elektronenfluss zwischen Source und Drain zu steuern, der durch eine Spannung zwischen Source und Gate angetrieben wird. Der Elektronenfluss wird dann durch Anlegen einer Spannung an das Gate gesteuert, was ein elektrisches Feld induziert und die Ladungsträger in unserem dotierten Material beeinflusst. Letzteres wirkt sich darauf aus, wie gut oder schlecht Elektronen von der Source zur Drain bewegt werden können. Lass uns dennoch Schritt für Schritt ein wenig tiefer in diese Prozesse eintauchen.

Zunächst einmal wollen wir den "Aus"-Zustand unseres Schalters beschreiben. Wenn keine Spannung am Gate anliegt, befinden sich keine freien Ladungsträger (in unserem Fall Elektronen) im Kanal. Daher bewegen sich keine Elektronen von der Source zum Drain und es fließt kein Strom. In diesem einfachen Fall haben wir bereits die 0 für den Computer definiert. Aber wie kommen wir an die 1? Was wir tun müssen, ist eine Spannung an das Gate anzulegen, die so genannte Gate-Spannung. Bei NMOSFETs ist diese Spannung immer positiv. Für moderne Prozessoren kann eine Gate-Spannung von etwa 0,2 V ausreichen, was sehr wenig ist. Um ein Gefühl zu bekommen: Eine normale Haushaltsbatterie arbeitet mit 1,5 V, eine Türklingel mit 8 V und eine Autobatterie mit 12 V. Wir brauchen also wirklich nicht viel Energie. Aber warum brauchen wir diese Gate-Spannung? Was mit dieser Spannung einhergeht, ist das elektrische Feld, das auch durch die Oxidschicht hindurch auf das p-dotierte Material wirkt. Dies führt dazu, dass Löcher im p-Typ-Substrat in der Nähe der Isolierschicht abgestoßen werden. Mit zunehmender Gate-Spannung gibt es also immer weniger Löcher an dieser Oberfläche. Es ist logisch, dass wir diesen Bereich als "Verarmungszone" bezeichnen. Danach werden Elektronen aus den n-Typ-Bereichen (Source und Drain) in dieser ehemaligen Verarmungszone angezogen, und wir haben einen Kanal mit einer großen Anzahl negativer Ladungsträger erzeugt. Wir nennen diese Schicht die "Inversionsschicht". Um den Überblick nicht zu verlieren, wird diese Situation in der folgenden Abbildung dargestellt.



Jetzt haben wir einen n-Kanal zwischen der ebenfalls n-leitenden Source und Drain. Dadurch können die Elektronen durch das Gerät fließen, was durch die roten Pfeile dargestellt ist. Damit haben wir unser Ziel erreicht und können die 1 für unseren Computer festlegen. Im Übrigen: Wir können uns vorstellen, dass höhere Gate-Spannungen mehr Ladungsträger anziehen, die Inversionsschicht wird breiter, und wir schaffen einen Kanal, der potenziell mehr Elektronen transportieren kann.

Definition

Was ist ein Transistor

Der häufigste Typ in ICs ist der MOSFET (Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor). Eine der Anwendungen dieser Transistoren ist die Erzeugung von 0en und 1en in Computern, wie wir bereits beschrieben haben.

3. Größe ist wichtig, besonders in der Elektronik

Nicht zuletzt wollen wir einen Eindruck davon bekommen, wie klein diese ICs und Transistoren tatsächlich sind und welche Herausforderungen damit verbunden sind. Nach der schematischen Betrachtung des MOSFETs, sollten wir uns einen solchen auf einem Chip ansehen. Zum besseren Verständnis: In der Lerneinheit „Was ist Nanotechnologie?“ haben wir gelernt, wie klein ein menschliches Haar (50 - 80 μm) ist, um die Nanoskala zu verstehen. Wenn wir zwei Haare übereinanderlegen, wird es sehr schwierig, den Querschnitt überhaupt zu erkennen. Tatsächlich stecken hinter diesem Querschnitt Tausende von MOSFETs.

Untersuchen wir weitere Möglichkeiten, um sehr kleine Strukturen z. B. mit einem Lichtmikroskop sichtbar zu machen. Dies wird auch zu den Problemen führen, auf die wir bei der Herstellung von MOSFETs stoßen. Grundsätzlich erzeugt in der Lichtmikroskopie ein spezifisch organisiertes Ensemble von Linsen das vergrößerte Bild eines kleineren Objekts. Dabei strahlt ein Lichtstrahl durch das Objekt und die Linsen ins Auge. Die Frage, die wir uns jetzt stellen können, lautet: Wie klein könnte ein Objekt sein um es noch mit einem Lichtmikroskop beobachten zu können? Um diese Frage zu beantworten, musst du wissen, dass Lichtmikroskope im sichtbaren Wellenlängenbereich arbeiten. Das bedeutet, dass es nur einen bestimmten Bereich gibt und die Hälfte der kürzesten Wellenlänge das kleinste Objekt ist, das man mit einem solchen Mikroskop sehen kann. Oder mit anderen Worten ausgedrückt: Zwei Linien müssen die Hälfte der kleinsten Wellenlänge voneinander entfernt sein, damit sie unterschieden werden können. Dieses Gesetz ist als Abbe-Grenze bekannt und wird durch die folgende Gleichung beschrieben:

$$d = \frac{1\lambda}{2NA}$$

In diesem Fall ist λ die Wellenlänge und NA die numerische Apertur (die den Brechungsindex und den Winkel des Lichts enthält). So kommt man zur Auflösungsgrenze d , die angibt, wie weit die Linien voneinander entfernt sein müssen, um unterscheidbar zu sein. Die Gleichung zeigt auch, wie die Leistung eines Mikroskops verbessert werden kann: Entweder durch Vergrößerung der numerischen Apertur oder durch Verwendung kürzerer Wellenlängen.

Die Wellenlänge des sichtbaren Lichts liegt zwischen 380 und 780 nm. Mit Hilfe der Abbeschen Gleichung kann man daher die kleinstmögliche Auflösung eines Lichtmikroskops auf 200 nm schätzen. Für diese Schätzung gehen wir davon aus, dass die kleinste Wellenlänge etwa 400 nm beträgt und die numerische Apertur (NA) von Luft etwa 1 ist.

Erinnere dich an

Begrenzung der Auflösung

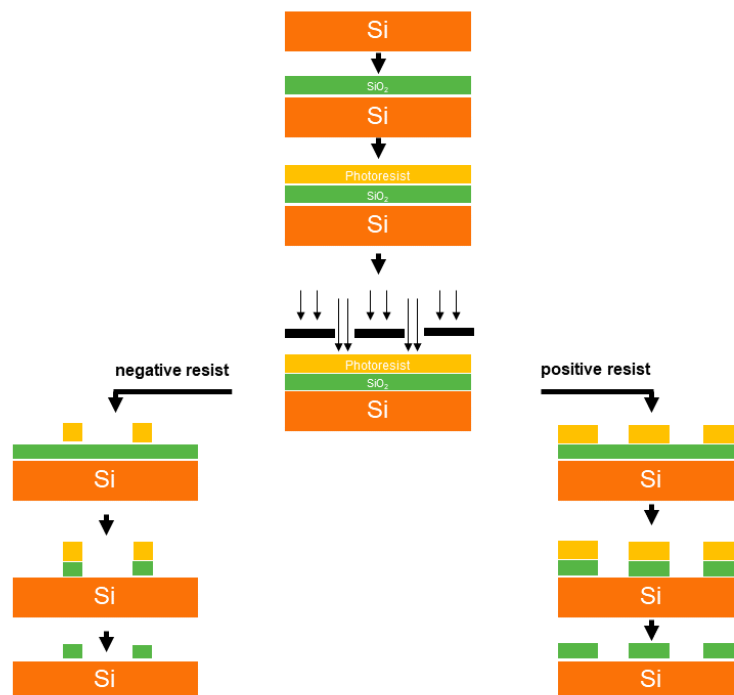
Die Abbe-Grenze ist die Formel für das Auflösungsvermögen in Abhängigkeit von der Wellenlänge: Das bedeutet, dass kleinere Wellenlängen eine höhere Auflösung ermöglichen.

An dieser Stelle können wir uns die Herstellung von Chips genauer ansehen. Wie können wir etwas entwickeln, das zu klein ist, um es zu sehen? Heutzutage wird hierzu ein Verfahren namens "Fotolithographie" verwendet. Bei diesem Verfahren wird ein Muster mit einer Maske auf die Oberfläche eines Siliziumwafers übertragen. Letzteres ist das Substrat für den MOSFET, das wir bereits in dem Schema zuvor gesehen haben. Das Konzept ist dem Funktionsprinzip eines Druckers zu Hause sehr ähnlich. Der Unterschied besteht darin, dass der Tintenstrahl durch einen Lichtstrahl ersetzt wird. Dies erweist sich bei der Herstellung unserer extrem kleinen Strukturen als sehr hilfreich, da die Farbstoffmoleküle die Wellenlänge des Lichts um ein Vielfaches übertreffen.

Definition

Fotolithografie

Das Verfahren zum Drucken sehr kleiner Strukturen auf eine Siliziumoberfläche. Die Wellenlänge von muss kurz sein, um eine höhere Auflösung zu erreichen.



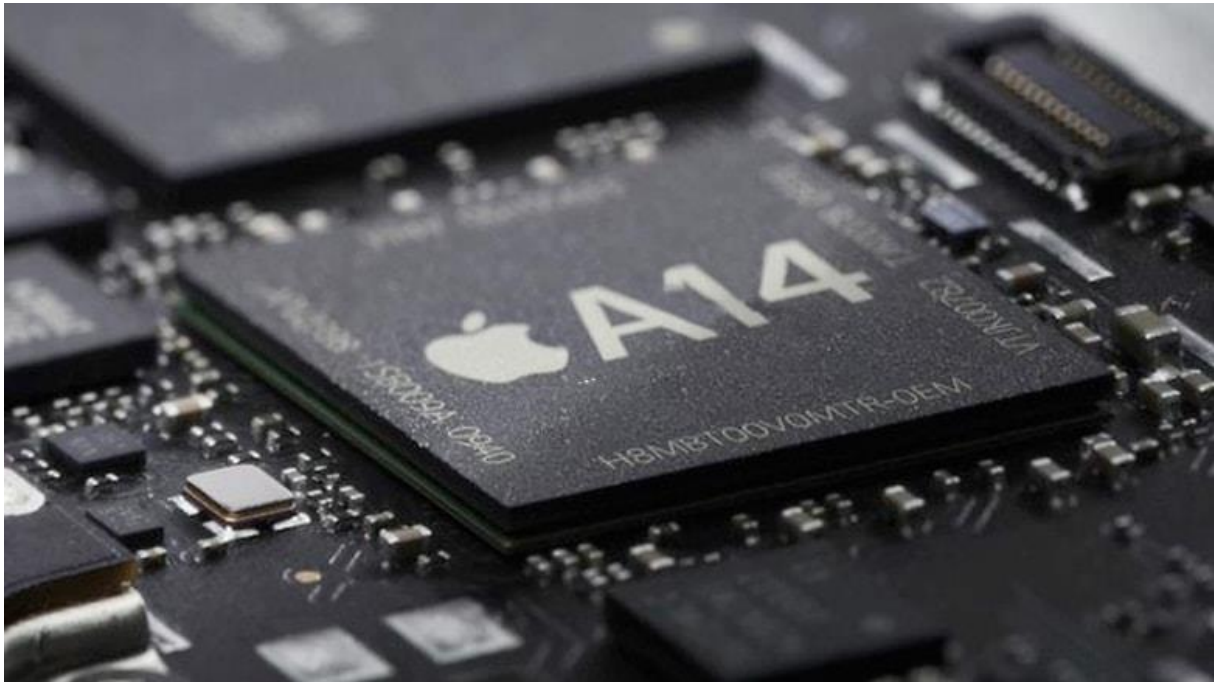
Die Schritte der Fotolithografie sind in dem obigen Schema dargestellt. Zu Beginn wird das Siliziumsubstrat mit einer Siliziumdioxidschicht bedeckt. Auf diese Schicht wird anschließend ein Fotolack (engl. Photoresist) in einem "Spin-Coating" genannten Verfahren aufgebracht. Jetzt kann der eigentliche Druckvorgang stattfinden: Eine Maske (vergleichbar mit einer Zeichenschablone) mit

einem bestimmten Muster wird über dem System angebracht und mit Lichtstrahlen bestrahlt. Daher trifft das Licht nur auf einige Stellen des Fotolacks, der Rest liegt sozusagen im Schatten der Maske. An diesem Punkt gibt es zwei verschiedene Arten von Fotolack: Die erste Option (linke Seite des Schemas) ist ein Negativlack (engl. negative resist). In diesem Fall verändert der Bereich, der dem Licht ausgesetzt ist, seine Struktur so, dass er gegenüber einem Lösungsmittel stabil wird. So können die maskierten Bereiche abgewaschen werden. Nun werden die ungeschützten Bereiche mit Chemikalien geätzt, und wir haben unser Muster bereits auf den Wafer übertragen. Der letzte Schritt ist ein Waschvorgang, bei dem der restliche Fotolack entfernt wird. Der Positivlack (engl. Positive resist) ist auf der rechten Seite des Schemas zu sehen. Hier werden die Bereiche, die dem Licht ausgesetzt sind, löslich und können abgewaschen werden, was beide Verfahren voneinander unterscheidet. Anhand dieses Beispiels können wir verstehen, wie wir das isolierende SiO_2 in die MOSFET-Struktur bringen, die wir zuvor gesehen haben.

Jetzt können wir die Puzzleteile zusammensetzen, so dass sich ein größeres Bild ergibt. Wir haben gesehen, dass die Länge der Isolierschicht ungefähr der Gate-Länge entspricht. Wir haben auch die Herstellung dieses Bauteils durch Fotolithographie gesehen. Das zeigt uns, dass die Leistung der Fotolithografie für den Aufbau sehr kleiner Oberflächenstrukturen bzw. unserer winzigen MOSFETs entscheidend ist. Um es zusammenzufassen: Wir müssen die Fotolithografie verbessern, um das Mooresche Gesetz mit mehr Transistoren auf weniger Fläche zu erfüllen. Die Begrenzung der Fotolithographie im Allgemeinen ist ebenfalls durch die Abbe-Grenze gegeben.

Der wichtigste Faktor ist daher die Wellenlänge. Wir stellen immer wieder fest, dass eine kürzere Wellenlänge ein wichtiger Faktor bei der Optimierung des Aufbaus von Nanostrukturen ist. Stand der Technik ist daher die Verwendung von "tief ultraviolettem" Licht, dessen Wellenlänge etwa 193 nm beträgt. In diesem Fall können wir also feststellen, dass es möglich ist, den sichtbaren Bereich im Vergleich zum Lichtmikroskop zu verlassen. Das Ziel für die Zukunft liegt bei einer Wellenlänge von 13,5 nm und wird als "extrem ultraviolettes" Licht bezeichnet. Dennoch ist das Mooresche Gesetz bis zum heutigen Tag gültig. Grundsätzlich ist bei allen Anwendungen integrierter Schaltkreise die Anzahl der Transistoren auf einem Chip schnell gestiegen.

Zu guter Letzt können wir uns in das Thema der "Technologieknoten" vertiefen. Dieser Begriff definiert den Stand der Technik in den Fertigungsprozessen. So beschreibt beispielsweise der "45-nm-Technologieknoten" ein bestimmtes Verfahren. In diesem Zusammenhang umfasst er die spezifische Art und Weise, wie der Fotolithograf mit all seinen Komponenten aufgebaut ist, wie z.B. die im System verwendete Wellenlänge. Die Zahl 45 nm beschreibt die "halbe Teilung". Letztere ist die Hälfte des Abstands zwischen zwei einzelnen Strukturen wie Kontakten oder Leiterbahnen. Es handelt sich also nicht um die Gatelänge (die Gatelänge kann sogar noch kleiner sein). Wenn wir kurz auf die Geschichte dieser Prozessentwicklung eingehen, bekommen wir eine Vorstellung davon, wie wichtig die Optimierung der Fertigungsprozesse bis heute ist: 1971 bis 1998 war die Zeit der 10- bis 0,25- μm -Knoten. Im Jahr 1999, gelang mit dem 180-nm-Knoten der Schritt vom Mikro- zum Nanometerbereich. In den folgenden Jahrzehnten gab es enorme Verbesserungen bis hin zum 5-nm-Knoten im Jahr 2020, der zum Apple A14 Bionic Chip (siehe unten) führte. In diesem Zusammenhang war nur der Hersteller TSMC in der Lage, 11,8 Milliarden Transistoren auf 88,45 mm^2 unterzubringen. Übrigens: Wenn du diesen Text auf einem iPhone 12 oder iPad der 4. Generation liest, arbeitet einer dieser Chips gerade in deiner Hand.



Und um mit der Vorhersage von Moore Schritt zu halten, ist TSMC bereit, den 4-nm-Knoten im Jahr 2022 einzuführen. IBM hingegen hat bereits im Mai 2021 einen Prototyp eines 2-nm-Chips vorgestellt, der der erste seiner Art ist.

Definition

Technologie-Knotenpunkte

Eine Beschreibung des Herstellungsprozesses von modernen Chips. Neue Generationen von Technologieknöten sind unerlässlich, um mit dem Moore'schen Gesetz Schritt zu halten.

Aber kann diese Miniaturisierung unendlich sein? Es ist interessant, dass die Antwort auf dieses äußerst moderne Thema in einer Ära gefunden werden kann, die sehr lange zurückliegt. Schon der griechische Philosoph Demokrit behauptete, dass sich nichts grenzenlos verkleinern lässt. Irgendwann landet man bei einer unteilbaren Einheit - dem Atom. Bei einem 2-nm-Chip gibt es nicht mehr als 20 Siliziumatome auf einem einzigen Transistor. Man könnte also meinen, dass das Ende des Mooreschen Gesetz nicht zu vermeiden ist.

Wichtig

Wo liegen die Grenzen des Mooreschen Gesetzes?

Eine Gatelänge, die der Größe eines einzelnen Siliziumatoms nahe kommt, kann nicht weiter verkleinert werden.

1. Wissen sichern

Zusammenfassung

Du hast das Ende der Inhaltseinheit über **Nanotechnologie in der Elektronik** erreicht. Da es viel zu lernen gab, bitten wir dich um eine kurze Wiederholung der wichtigsten Dinge, die du zu diesem Thema gelernt hast:

Computer bestehen im Wesentlichen aus mehreren "Chips", die auch als "integrierte Schaltkreise" bezeichnet werden. Die Schlüsselemente dieser Chips sind "Transistoren". Ein Computer bricht jedes Problem auf den Grad herunter, wo er nur 1en und 0en verarbeiten muss. Diese 1en und 0en werden dadurch ausgedrückt, dass in den Transistoren Strom fließt (1) oder nicht fließt (0).

In der jüngeren Geschichte haben sich die Speicherkapazität und die Geschwindigkeit von Computern extrem schnell entwickelt. Gordon Moore sagte dieses Phänomen bereits 1965 voraus. Er bezifferte den Anstieg sogar, indem er sagte, dass sich die Anzahl der Transistoren auf einem Chip und damit die Kapazität alle zwei Jahre verdoppeln wird. Bis heute lag er mit seinen Vorhersagen richtig.

Die Entwicklung kleinerer Strukturen ist eng mit der Nanotechnologie verbunden. Die Tatsache, dass das Mooresche Gesetz auch heute noch gilt, ist auf große technologische Anstrengungen, insbesondere im Bereich der Nanotechnologie, zurückzuführen.

Die Nanotechnologie wird eingesetzt, um die Computersysteme sehr klein zu halten, obwohl sie immer mehr Funktionen haben. Mit deinem Smartphone hast du einen sehr schnellen und hochfunktionalen Computer in der Tasche, mit dem du hochauflösende Filme ansehen, jederzeit und überall kommunizieren, Spiele spielen und andere Dinge tun kannst, die sich frühere Generationen vielleicht nicht hätten vorstellen können.