

Halbleitertechnologie von A bis Z

Bauelemente

Die Tunnelodiode	3
<i>Extreme Dotierung erzeugt einen entarteten Übergang</i>	3
<i>Negativer differentieller Widerstand</i>	3
<i>Nischenanwendungen trotz Verdrängung</i>	4

Die Tunneldiode

Extreme Dotierung erzeugt einen entarteten Übergang

Die Tunneldiode, benannt nach ihrem Entdecker auch Esaki-Diode genannt, wird auf beiden Seiten des pn-Übergangs außergewöhnlich hoch dotiert – typischerweise im Bereich von 10^{19} bis 10^{20} cm^{-3} , also um mehrere Größenordnungen stärker als bei gewöhnlichen pn-Dioden, bei denen Dotierkonzentrationen im Bereich von 10^{15} bis 10^{17} cm^{-3} üblich sind. Bei derart hoher Dotierung werden beide Halbleiterbereiche entartet: Das Fermi-Niveau liegt dann nicht mehr, wie bei normal dotierten Halbleitern, innerhalb der verbotenen Bandlücke, sondern rückt bereits in das Leitungsband auf der n-Seite beziehungsweise in das Valenzband auf der p-Seite hinein.

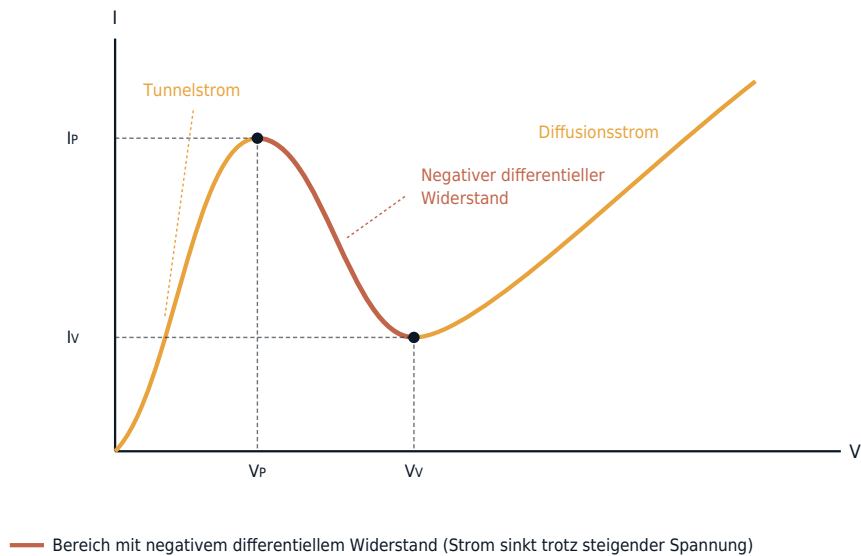
Die dadurch entstehende, extrem dünne Raumladungszone von nur wenigen Nanometern Breite – deutlich schmaler als bei jeder gewöhnlichen Diode – ermöglicht direktes quantenmechanisches Tunneln von Ladungsträgern zwischen den Bändern, ohne dass diese die Bandlücke im klassischen Sinn energetisch überwinden müssten. Dieser Tunnelmechanismus tritt bereits bei sehr kleinen angelegten Spannungen im Bereich weniger zehn bis einiger hundert Millivolt auf, weit unterhalb der üblichen Schwellspannung einer normalen pn-Diode.

Negativer differentieller Widerstand

Bei kleiner Flussspannung fließt zunächst ein mit der Spannung wachsender Tunnelstrom, da sich besetzte Zustände im Leitungsband der n-Seite und unbesetzte, freie Zustände im Valenzband der p-Seite energetisch überlappen und Elektronen ungehindert hindurchtunneln können. Mit weiter steigender Spannung verschieben sich die Energiebänder auf beiden Seiten jedoch zunehmend gegeneinander, sodass sich der Bereich energetischer Überlappung – und damit die Zahl der für das Tunneln verfügbaren Zustandspaare – wieder verringert, obwohl die angelegte Spannung weiter zunimmt.

Kennlinie einer Tunneldiode

Negativer differentieller Widerstand zwischen Peak- und Valley-Strom



In diesem mittleren Spannungsbereich sinkt der Strom also bei wachsender Spannung: Die Diode zeigt einen negativen differentiellen Widerstand, ein in der Halbleitertechnik seltenes und für viele Anschaltungen sehr nützliches Verhalten, das üblicherweise nur mit aktiven Verstärkerbauelementen oder rückgekoppelten Schaltungen erreichbar ist. Erst bei noch höherer Spannung, wenn die Bänder so weit gegeneinander verschoben sind, dass keine energetische Überlappung mehr besteht, übernimmt der gewöhnliche thermische Diffusionsstrom über die verbleibende Restbarriere, und die Kennlinie geht in das übliche, exponentiell ansteigende Diodenverhalten über. Insgesamt ergibt sich dadurch eine charakteristische, N-förmige Strom-Spannungs-Kennlinie mit einem lokalen Maximum (Peak-Strom) und einem anschließenden lokalen Minimum (Valley-Strom), wie sie kein anderer gewöhnlicher Diodentyp aufweist.

Nischenanwendungen trotz Verdrängung

Die Tunneldiode war historisch von großer Bedeutung als eines der ersten Halbleiterbauelemente mit negativem differentiellem Widerstand und ermöglichte dadurch extrem schnelle Schalt- sowie besonders einfache Oszillatorschaltungen: Da eine Induktivität oder ein Schwingkreis in Kombination mit dem negativen differentiellen Widerstand bereits ohne zusätzliche aktive Verstärkerelemente ungedämpfte Schwingungen erzeugen kann, ließen sich mit Tunneldioden sehr einfache und potenziell sehr schnelle Oszillatoren realisieren. Ihr Erfinder Leo Esaki erhielt für diese 1957

veröffentlichte Entdeckung 1973 den Nobelpreis für Physik.

Da transistorbasierte Schaltungen die Tunneldiode in den meisten klassischen Anwendungen – Verstärker, Schalter, digitale Logik – inzwischen vollständig verdrängt haben, vor allem weil Transistoren eine echte Leistungsverstärkung bieten, während die Tunneldiode als reines Zweipolbauelement nur passiv wirkt, findet die Tunneldiode heute nur noch in wenigen Nischenanwendungen der Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik Verwendung. Dort wird ihr negativer differentieller Widerstand weiterhin für besonders einfache, robuste Oszillatoren und Verstärkerstufen im Gigahertz- bis in den Terahertz-Bereich genutzt, wo ihre extrem kurze Tunnelzeit im Bereich weniger Pikosekunden anderen Bauelementen nach wie vor überlegen sein kann.