

Halbleitertechnologie von A bis Z

Bauelemente

Zener- und Avalanche-Diode	3
<i>Gezielter Durchbruch als Funktionsprinzip</i>	<i>3</i>
<i>Der Zener-Effekt versus der Avalanche-Effekt</i>	<i>4</i>
<i>Anwendungen: Referenzspannung und Überspannungsschutz</i>	<i>4</i>

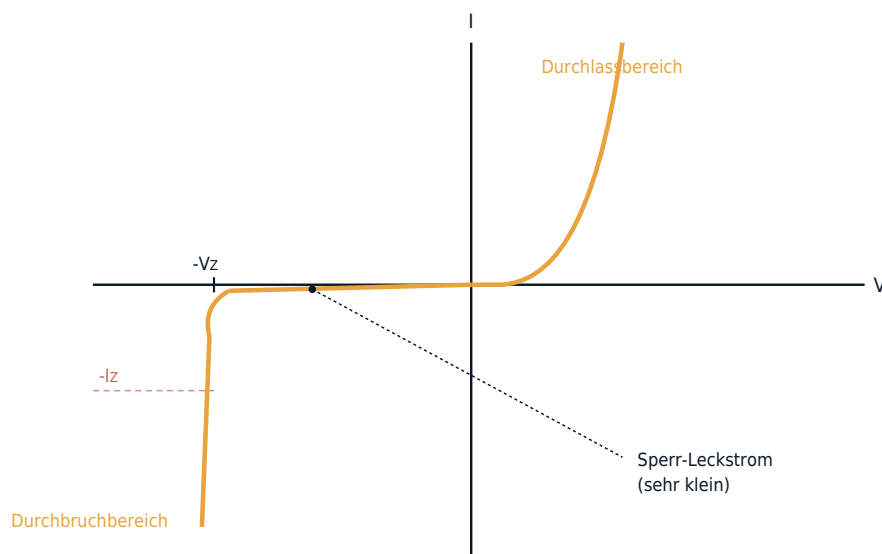
Zener- und Avalanche-Diode

Gezielter Durchbruch als Funktionsprinzip

Während normale Dioden stets so betrieben werden, dass ein Durchbruch in Sperrrichtung unter allen Umständen vermieden wird – ein solcher Durchbruch würde bei einer gewöhnlichen Gleichrichterdiode meist zur thermischen Zerstörung führen –, sind Zener- und Avalanche-Dioden gezielt dafür ausgelegt, kontrolliert, reversibel und zerstörungsfrei im Durchbruchbereich zu arbeiten. Die Diode wird bewusst in Sperrrichtung betrieben, und die charakteristische, sehr steile Kennlinie im Durchbruchbereich macht sie zu einem nahezu idealen Spannungsbegrenzer: Über einen weiten Strombereich bleibt die Spannung am Bauelement nahezu konstant.

Kennlinie einer Zener-/Avalanche-Diode

Steiler, reversibler Durchbruch bei der Spannung V_Z



V_Z : Durchbruch-/Zener-Spannung – I_Z : Teststrom zur Spezifikation von V_Z

Je nach Dotierungshöhe des pn-Übergangs liegen dabei zwei unterschiedliche physikalische Mechanismen zugrunde, die sich in ihrer Feldstärkeabhängigkeit deutlich unterscheiden: Bei stark dotierten Übergängen mit Durchbruchspannungen unterhalb von etwa 5 V dominiert der Zener-Effekt, bei schwächer dotierten Übergängen mit höheren Durchbruchspannungen von einigen Volt bis zu mehreren hundert Volt der Avalanche-Effekt. Verwirrenderweise werden nahezu alle kommerziell erhältlichen Bauteile

unabhängig vom tatsächlich dominierenden Mechanismus als "Zener-Diode" verkauft und bezeichnet – die meisten Typen oberhalb von etwa 6 V arbeiten trotz des Namens tatsächlich über den Avalanche-Mechanismus, während echte Zener-Dioden im eigentlichen physikalischen Sinn nur den unteren Spannungsbereich abdecken.

Der Zener-Effekt versus der Avalanche-Effekt

Beim Zener-Effekt erzeugt die extrem hohe Dotierung auf beiden Seiten des Übergangs (typischerweise über 10^{18} cm^{-3}) eine sehr schmale Raumladungszone von oft nur wenigen Nanometern Breite. Bereits bei moderater Sperrspannung treten darin Feldstärken von mehr als 10^6 V/cm auf – stark genug, damit Valenzelektronen die schmale Bandlücke direkt quantenmechanisch durchtunneln können, ohne dass sie dafür zusätzliche kinetische Energie aus einer Beschleunigung im elektrischen Feld aufnehmen müssten. Dieser Zener-Tunneleffekt ist im Wesentlichen derselbe quantenmechanische Mechanismus, der auch der im folgenden Kapitel behandelten Tunnelodiode zugrunde liegt, nur hier im Sperrbetrieb statt im Flussbetrieb genutzt.

Beim Avalanche-Effekt dagegen sorgt die geringere Dotierung für eine breitere Raumladungszone, in der freie Ladungsträger über eine längere Strecke im elektrischen Feld beschleunigt werden können. Erreichen sie dabei ausreichend kinetische Energie, lösen sie beim Stoß mit Gitteratomen weitere Elektron-Loch-Paare aus (Stoßionisation); diese neu erzeugten Ladungsträger werden ihrerseits beschleunigt und erzeugen wiederum weitere Paare, sodass sich der Strom lawinenartig vervielfacht, ähnlich einer Kettenreaktion.

Die beiden Mechanismen unterscheiden sich zusätzlich grundlegend im Temperaturverhalten: Der Zener-Effekt besitzt einen negativen Temperaturkoeffizienten – die Durchbruchspannung sinkt mit steigender Temperatur, da die Bandlücke des Halbleiters mit der Temperatur abnimmt und das Tunneln dadurch erleichtert wird –, während der Avalanche-Effekt einen positiven Temperaturkoeffizienten aufweist, da die mittlere freie Weglänge der Ladungsträger zwischen Stößen mit steigender Temperatur sinkt und daher eine höhere Feldstärke für die gleiche Stoßionisationsrate nötig wird. Dioden mit einer Durchbruchspannung um 5 bis 6 V, in denen beide Mechanismen etwa gleich stark beitragen, heben sich in ihren gegenläufigen Temperaturkoeffizienten daher gegenseitig nahezu auf und erreichen einen weitgehend temperaturunabhängigen Durchbruch – ein Effekt, der gezielt in Präzisionsspannungsreferenzen ausgenutzt wird, bevor moderne Schaltungen dafür meist auf die im vorherigen Kapitel behandelten Bandgap-Referenzen übergegangen sind.

Anwendungen: Referenzspannung und Überspannungsschutz

Kommerzielle Zener- und Avalanche-Dioden decken Durchbruchspannungen von etwa 2,4 V bis zu 200 V ab, bei Verlustleistungen von wenigen hundert Milliwatt in kleinen Gehäusen bis zu mehreren Watt in Leistungsausführungen. Mit einem einfachen Vorwiderstand zur Strombegrenzung lässt sich daraus ein einfacher Shunt-Spannungsregler aufbauen: Der Laststrom variiert, doch solange ein Mindeststrom durch die Diode fließt, bleibt die Ausgangsspannung annähernd konstant. Für höhere Präzisionsanforderungen bevorzugen moderne integrierte Schaltungen jedoch die Bandgap-Referenz, die neben besserer Temperaturstabilität auch geringere Rauschbeiträge und eine niedrigere, chipkompatiblere Betriebsspannung bietet.

Größere praktische Bedeutung haben Avalanche-Dioden heute vor allem im Bereich des Überspannungsschutzes: Speziell für hohe Pulsleistung ausgelegte Avalanche-Dioden, die unter der Bezeichnung Transient Voltage Suppressor (TVS) vertrieben werden, können kurzzeitige Energiepulse im Bereich einiger hundert Watt bis zu mehreren Kilowatt aufnehmen und klemmen dabei Spannungsspitzen – etwa durch elektrostatische Entladung, induktives Abschalten von Motoren und Relais oder Blitzeinwirkung auf lange Leitungen – innerhalb von Nanosekunden auf einen sicheren Pegel. Dadurch schützen sie nachgeschaltete, empfindlichere integrierte Schaltungen, deren eigene ESD-Schutzstrukturen für derart hohe Energien nicht ausgelegt sind.