

met een groot geleidingsvermogen, zoals Schottky- en germaniumdioden en dikke gelijkrichtdioden, een veel grotere sper-lekstroom dan signaaldioden, maar dat is doorgaans geen probleem.

Hebt u een diode met een zeer lage lekstroom nodig? Gebruik dan de collector-basis-overgang van een transistor in plaats van een “discrete” diode (literatuur 1). De populaire 2N930 en 2N3707 bieden typisch een lage lekstroom. Dat geldt ook voor sommige 2N3904-tjes, maar bepaalde exemplaren zijn met goud gedoteerd en die vertonen een grotere lekstroom. Transistoren in plastic behuizing zijn minstens even goed als exemplaren in hermetisch gesloten TO-18-behuizing. Het is geen probleem zulke “dioden” te selecteren met een lekstroom van minder dan 1 pA, zelfs bij 7 V — of 10 pA bij 50 V. Hoewel die lekstroom niet wordt gegarandeerd, is die doorgaans tamelijk consistent. De CB-diode schakelt echter over het algemeen niet snel AAN en UIT.

Een andere “bron” van dioden met een extreem lage lekstroom wordt gevormd door de 2N4117A en de PN4117A, -18A en -19A. Dit zijn JFET's met bijzonder kleine juncties, zodat lekstromen “typisch” ruim onder 0,1 pA blijven, met een gegarandeerde maximumwaarde van 1,0 pA — niet gek voor een halfgeleider die nog geen gulden kost. Bovendien hebben ze een kleine capaciteit.

Snelheidsduivels

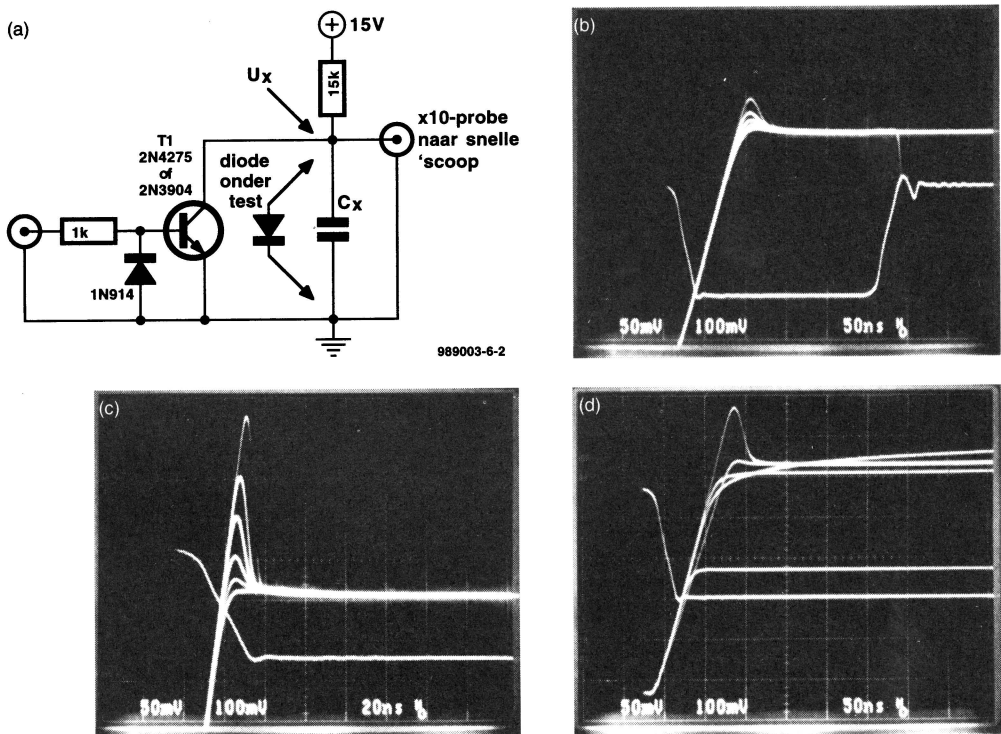
Hoe lang heeft een stroomvoerende diode nodig om uit te schakelen? Dat is ook weer een eigenschap die een grote spreiding vertoont. Trage dioden kunnen tientallen tot honderden microseconden nodig hebben om uit te schakelen. Bij de collector-basis-overgang van een 2N930 kan het 30 μ s duren om de stroom van 10 mA tot minder dan 1 mA te knippen, en nog langer om het nA-gebied te bereiken. Dit is voornamelijk de schuld van de recombinatietijd van de ladingsdragers die in de collector-regio van de transistor zijn opgehoopt. Andere dioden, vooral de met goud gedoteerde typen, schakelen *veel* sneller uit — in de orde van grootte van nanoseconden. Schottky-dioden zijn nog weer veel sneller. Een van mijn vrienden wees me er echter op dat wanneer je een Schottky-diode hebt die lekker snel uitschakelt, die desondanks parallel staat aan een PN-overgang die bij kleine stromen nog altijd traag in de spertoestand overgaat. Als een Schottky binnen 1 ns van 4 mA uitschakelt, kunnen er nog altijd een paar micro-ampères overblijven die pas na een microseconde zijn uitgeschakeld. Als u dus een Schottky-diode wilt gebruiken als een precisie-klemdiode die erg snel uitschakelt, bijvoorbeeld in een schakeling om insteltijden te meten (literatuur 2), moet u niet verbaasd zijn als u een kleine maar lange “staart” ziet.

Schakelende voedingen hebben zonder uitzondering behoefte aan dioden en “zwarte” gelijkrichters en transistoren die *snel* uitschakelen. Als de herhalingsfrequentie hoog is en de stroom groot, kan een traag sperrende diode defect raken ten gevolge van oververhitting. U wilt *echt* geen 1N4002 bij 20 of 40 kHz gebruiken, omdat die daar slecht functioneert — *als* hij het al doet. In sommige gevallen kunt u, wanneer u een niet al te grote stroom nodig hebt bij hoge snelheden, een aantal 1N914's parallel zetten. In een noodgeval heb ik dat zelf ook wel eens gedaan, en het leek goed te functioneren, maar ik weet niet zeker of dat wel een “goede” oplossing is waar het de betrouwbaarheid op lange termijn betreft. De juiste oplossing is natuurlijk voldoende snelle componenten in uw schakeling in te bouwen. Er zijn voldoende *high-speed* dioden, dioden met snelle hersteltijd en ultrasnelle dioden verkrijgbaar. Schottky-gelijkrichtdioden zijn zelfs nog sneller, maar die zijn niet verkrijgbaar met een hoge doorslagspanning. Wanneer u zulke snelle schakelende voedingen gaat ontwerpen, moet u echt weten wat u doet. Of tenminste een veiligheidsbril opzetten zodat u niet het licht in uw ogen verliest wanneer de boel in de lucht vliegt.

Aan en uit — aan en uit...

“Computerdioden” als de 1N914 genieten grote populariteit omdat ze snel UITschakelen — binnen een paar nanoseconden — veel sneller dan dioden met een lage lekstroom. Minder bekend is het feit dat deze snellere dioden niet alleen snel UITschakelen, maar dat ze doorgaans ook snel INSchakelen. Wanneer u bijvoorbeeld een stroom van 1,0 mA in de anode van een 1N914 stuurt waar een capaciteit van 40 pF aan parallel staat (20 pF aan parasitaire capaciteiten plus een oscilloscoopprobe of iets dergelijks), zal de 1N914 doorgaans in minder dan 1 ns INSchakelen. Zodoende vertoont U_F slechts een paar mV doorschot.

Maar bij sommige dioden — zelfs 1N914's of 1N4148's van bepaalde fabrikanten — kan de voorwaartse spanning gedurende 10—20 ns *blijven* stijgen tot voorbij het verwachte DC-niveau voordat de diode INSchakelt; deze mate van doorschot van



Figuur 6.2 In deze diode-testschakeling (a) doet transistor T_1 niets anders dan U_x periodiek aan massa leggen. Zodra de transistor UITschakelt, neemt U_x tot ongeveer 0,6 V toe; op dat moment begint de diode te geleiden. In (b), met $dU_x/dt = 8 \text{ V}/\mu\text{s}$, schiet deze 1N4148 maar liefst 140 mV door bij ingangsfrequenties beneden 10 kHz, alvorens IN te schakelen. Bij hogere frequenties — 120, 240, 480, 960 en 1920 kHz — neemt deze doorschot af en verdwijnt uiteindelijk naarmate de herhalingsnelheid toeneemt. De maximale doorschot treedt op bij $f_{in} < 7 \text{ kHz}$. In (c), waar dU_x/dt is opgevoerd tot 20 V/ μs , schiet dezelfde 1N4148 zelfs 450 mV door bij 7 kHz, maar slechts 90 mV bij 480 kHz, terwijl de doorschot bij frequenties boven 2 MHz verwaarloosbaar is. In (d) blijkt dat verschillende typen dioden een verschillende inschakelkarakteristiek bezitten. De over elkaar gelegde golfvormen bij 120 kHz variëren niet met de frequentie (met uitzondering van de slechte 1N4148).

50—200 mV is heel verrassend (figuur 6.2, vorige bladzijde). Nog verbazingwekkender is dat de U_F -doorschot slechter (groter) kan worden bij lagere herhalingsfrequenties, en bij hoge herhalingsfrequenties kan verdwijnen (figuur 6.2b-d).

Het heeft me heel wat uurtjes gekost voordat ik deze bijzonderheid ontdekte, toen een frequentie-naar-spanning-omzetter plotseling een raadselachtige niet-lineariteit vertoonde. Het lastigste aspect van het probleem met de dioden in deze schakeling was dat dioden die uit een eerdere partij afkomstig waren, dit gedrag absoluut niet vertoonden. Bovendien bleken sommige dioden uit een partij van 100 stuks van een bepaalde leverancier zo slecht als de dioden van figuren 6.2b en 6.2c. Andere dioden uit die partij en dioden van andere leveranciers vertoonden vrijwel geen doorschot.

Toen ik de fabrikanten van deze rottige dioden met deze feiten confronteerde, probeerden ze eerst het afwijkende gedrag te ontkennen, maar uiteindelijk gaven ze toch toe dat ze enkele diffusieprocessen hadden aangepast om het product te “verbeteren”. Een “verbetering” voor de één is gif voor de ander. Moraal: u moet altijd verdacht zijn op veranderingen in de productiemethode die problemen kunnen veroorzaken. Als fabrikanten het diffusieprocédé of de maskers veranderen, denken ze zelf wellicht dat het slechts kleine wijzigingen betreft; die kunnen echter grote gevolgen hebben voor uw schakeling.

Uiteraard zijn er talloze schakelingen waar u een diode nodig hebt die INschakelt en een spanning kan vastklemmen die in een veel groter tempo dan $20 \text{ V}/\mu\text{s}$ verandert. Als u dus prijs stelt op een consistent gedrag van een schakeling met snelle pulsdetectoren (om maar een voorbeeld te noemen), dient u uitsluitend fabrikanten van dioden te kwalificeren en goed te keuren waarvan de dioden een consistent inschakelgedrag vertonen. Net als met elke andere niet-gespecificeerde eigenschap het geval is, dient u zich tegen “slechte” onderdelen te beschermen door eerst het gewenste gedrag te evalueren en te testen en vervolgens te specificeren. En wanneer u een diodeschakeling snel wilt zien inschakelen met geringe doorschot, moet u de zelfinductie van de layout zo laag mogelijk houden. Er is maar een printspootje of draadje van een paar centimeter voor nodig om een goede en snelle gelijkrichter in een kwaad daglicht te stellen, met een forse doorschot.

Een transistor kan als “diode” worden aangesloten die snel IN en UITschakelt. De emitterdioden van een typische 2N3904 kan binnen 0,1 ns met verwaarloosbare doorschot IN en UITschakelen, met een lekstroom van minder dan 1 pA bij 1 V of minder dan 10 pA bij 4 V. (Bij deze “diode” is de basis natuurlijk met de collector doorverbonden.) Deze diode is echter slechts tegen een sperspanning van 6—8 V bestand. Maar als u uw schakeling zo kunt ontwerpen dat de sperspanning slechts een paar volt bedraagt, verzekert u zich met een op die manier aangesloten transistor van een alleraardigste, snelle diode met geringe lekstroom. De capaciteit ervan is iets groter dan de 1 pF van een 1N914.

Andere vreemde stunts die dioden kunnen uithalen...

Wanneer u een LED niet aan licht blootstelt, gedraagt die zich als een diode met een indrukwekkend lage lekstroom (ten gevolge van de hoge bandgap-spanning van het halfgeleidermateriaal). Zo’n LED kan een lekstroom bezitten van minder dan 0,1 pA indien met 100 mV voorwaarts of met 1 V in sperrichting ingesteld.

Natuurlijk hoeft u een diode niet in sperrichting in te stellen om toch een probleem met lekstromen te krijgen. Ik was ooit een hybride opamp aan het ontwerpen; ik had aangegeven dat, als gebruikelijk, twee dioden antiparallel moesten worden aangesloten over de ingang van de tweede versterkertrap om ernstige oversturing daarvan te voorkomen (zie figuur 6.3). Ik besteedde verder geen aandacht aan deze dioden tot we de schakeling aan de praat hadden — de spanningsversterking van de opamp liep bij