

4.

O transporte eletrônico

O capítulo anterior oferece ferramentas para localizar na configuração eletrônica a transição envolvida no pico de fotocorrente que se está estudando. Uma vez se tenha o resultado dessa investigação, sabe-se qual a energia do elétron logo depois de absorver radiação infravermelha. O próximo passo é entender como se dá o transporte capaz de fazer com que esse elétron contribua para a fotocorrente.

4.1 Condições de contribuição

Os elétrons fotoexcitados só geram corrente se eles forem transportados predominantemente em direção a um ou ao outro contato elétrico. Isso pode acontecer de duas maneiras:

(a) Os elétrons chegam ao *continuum*, onde um pequeno *bias* é suficiente para fazer com que eles se movam em direção ao contato positivo. Alguns elétrons vão alcançar o contato positivo, outros vão decair energeticamente no caminho, ficando armadilhados até que entrem novamente em processo de emissão. Em ambos casos, contribuem para a fotocorrente.

(b) Embora não cheguem ao *continuum*, os elétrons se deslocam orquestradamente no próprio período onde estavam confinados. Um deslocamento no próprio período seria causado por uma assimetria estrutural na BC. A soma dos pequenos deslocamentos de um grande número de elétrons resultará na fotocorrente, que neste caso é chamada *corrente de deslocamento*.

4.2 Geração de fotocorrente

Aqui, foram reunidos os processos de transição eletrônica capazes de contribuir ao transporte eletrônico, para um dado pico de fotocorrente. São eles:

- Transições óticas

O processo que atravessa o elétron para gerar fotocorrente começa com uma transição ótica. Uma transição ***b-c*** realiza a emissão eletrônica de um só golpe e dispensa processos complementares (Figura 11). Transições ***b-b*** e ***b-qb*** necessitam processos complementares para gerar fotocorrente.

Quando a potência luminosa incidente sobre o fotodetector é alta o suficiente, pode haver duas ou até mais transições óticas, fazendo com que o elétron alcance o *continuum* ou, ao menos, chegue mais próximo. Para isso, também é preciso que haja uma combinação de transições consecutivas com força de oscilador relevante na estrutura e de frequências afins na radiação incidente. Fotodetectores capazes de gerar fotocorrente através de transições óticas sequenciais de mesma energia funcionam bem quando se usam como fonte lasers de infravermelho e seu estudo convencionou-se chamar *processos multifóton* [32] [33].

O processo eletrônico de uma transição ótica pode ser interferido por efeito Auger, favorecendo a ascensão a um estado de maior energia. À semelhança do que acontece com a absorção Auger em um átomo, na heteroestrutura um elétron é arrancado, por absorção de um fóton, de um estado profundo que é imediatamente preenchido por um elétron de maior energia, resultando em liberação de energia, que por sua vez é imediatamente absorvida pelo elétron arrancado no início do processo. Essa energia o ajuda a alcançar ou chegar mais próximo ao *continuum*, o que faz do efeito Auger um processo auxiliar no transporte eletrônico [34].

- Fônons

Em termos de detectividade, os fônons costumam ser um fator degenerativo, pois geram corrente de escuro por emissão termiônica e por tunelamento termicamente assistido. Mas também podem contribuir. É o que acontece quando um elétron fotoexcitado se encontra em um estado de energia logo abaixo da barreira que o separa do *continuum*, como depois de uma transição ***b-qb***. Em

geral, se a temperatura é mais alta do que $T_0 = E_A/6k_B$, onde E_A é a diferença de energia entre a barreira e o estado excitado, haveria energia térmica suficiente para completar o processo de emissão, mas cada caso deve ser apreciado nas suas especificidades. O gráfico da Figura 15 mostra como evolui essa emissão com a temperatura.

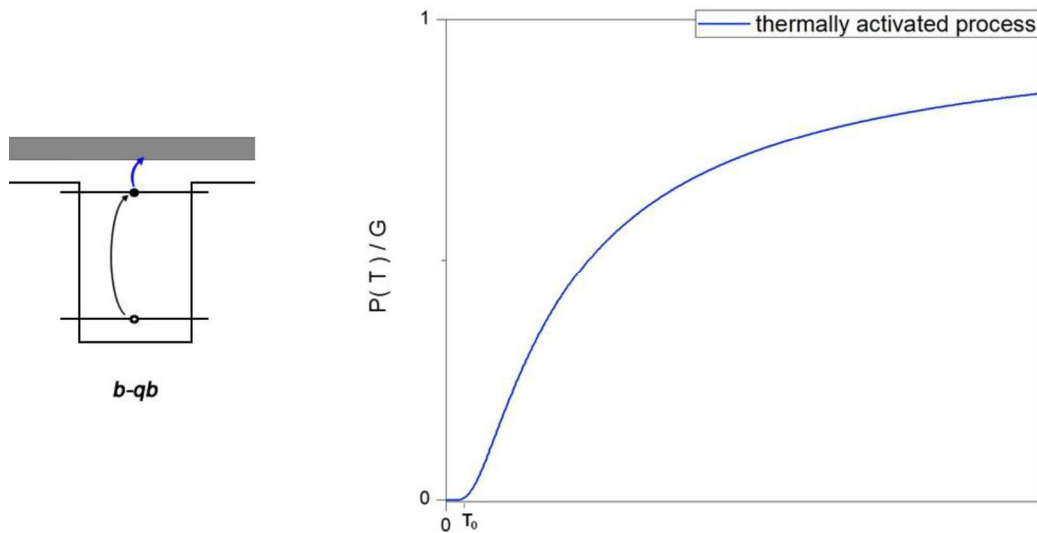


Figura 15: O diagrama mostra um elétron sendo termicamente transferido para o *continuum*, desde o estado final de uma transição $b-qb$. O gráfico mostra que há uma região de baixa temperatura na qual o processo termicamente ativado está inerte.

- Tunelamento

O tunelamento também pode ser um processo complementar na geração de fotocorrente. Elétrons fotoexcitados próximos à borda de uma barreira podem beneficiar-se do tunelamento através do "v" invertido da barreira (Figura 16, diagrama à esquerda). Em estruturas com barreiras finas de potencial, o elétron fotoexcitado pode tunelar através dessas barreiras, realizando transporte eletrônico (Figura 16, diagrama à direita).

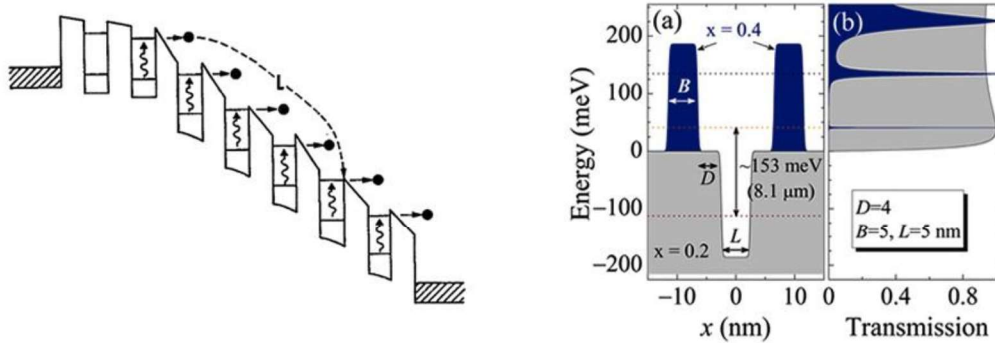


Figura 16: Exemplos de transporte eletrônico em que a emissão é feita por tunelamento. À esquerda, diagrama de banda de um fotodetector de múltiplos QWs, ao qual se aplica um bias externo, e em que o elétron fotoexcitado tunela através da borda da barreira. À direita, o diagrama de banda e o gráfico de transmissão por tunelamento através das barreiras finas de um QWIP de barreira dupla. Fontes: Levine [9]; Degani et al [33].

4.3 Alguns métodos de avaliação

A investigação do transporte eletrônico é muito particular para cada fotodetector intrabanda e este capítulo se propõe apenas a apontar uma gama de possibilidades conhecidas e indicar algumas direções no sentido de avaliá-las.

QWIPs de superredes são casos especiais, pois têm barreiras finas entre os poços para que o elétron fotoexcitado possa tunelar até atingir o *continuum*. Nesse caso, o transporte pode se dar por tunelamento a partir de um estado profundo, mas esse processo vai depender de que o *bias* aplicado cause uma ressonância entre estados de poços vizinhos. Quando não se trata desse caso, devemos avaliar se o estado final da transição ótica é um estado profundo ou próximo ao continuum. Se for profundo, há que se considerar a presença de mais de uma transição ótica ou de efeito Auger, pois são os processos físicos de emissão eletrônica conhecidos capazes de arrancar o elétron desse estado profundo, de modo a que possa contribuir para a fotocorrente [33] [34] [35].

Ao medir-se a fotocorrente a zero *bias* ou ao verificar-se a anulação de fotocorrente com um *bias* reduzido, estuda-se o comportamento fotovoltaico do dispositivo, uma característica de dispositivos com assimetrias estruturais na BC [28] [27] [36]. Esse comportamento indica a presença de uma corrente de deslocamento.

Se a fotocorrente intrabanda é intensificada por um *bias* elevado, isso indica a provável participação de tunelamento no transporte eletrônico. A presença de transporte eletrônico por excitação térmica pode ser avaliada realizando-se medidas de fotocorrente a diferentes temperaturas e conferindo se essa variação corresponde a um processo termicamente ativado, em que a energia de ativação é a diferença entre a energia da barreira e a energia do estado final da transição ótica.

Uma maneira de verificar a presença de um processo multifóton é medir a fotocorrente produzida ao incidir sobre o fotodetector potência variável de um laser de frequência igual à do pico que se está investigando. Se a variação da fotocorrente com a potência for supra-linear, trata-se de um processo multifóton [32]. A relevância do efeito Auger no transporte eletrônico de um pico de fotocorrente é evidenciada quando a relevância de outros processos é afastada, e desde que haja estados de alta energia (além de processos paralelos para populá-los) para mediar o processo Auger [34].

Em um dispositivo, pode haver uma combinação de mecanismos concorrentes de transporte eletrônico, embora provavelmente um deles seja predominante. Para cada dispositivo essa investigação deve ser objetivada de um modo diferente. A seguir, passamos ao estudo de um caso particular. A teoria descrita nos capítulos 2 e 3 será em grande parte aplicada, enquanto a deste capítulo, de caráter mais contextualizante do que específico, apenas uma pequena parte.