

7ª LISTA DE EXERCÍCIOS

**Disciplina:** TE069 - Física de Semicondutores

**Professor:** César Augusto Dartora<sup>1</sup>

---

1 A fórmula de Landauer para a condutância de dois terminais é expressa abaixo:

$$G = \frac{e^2}{2\pi\hbar} \sum_{j\sigma} T_{j\sigma}$$

onde a soma se faz sobre o índice  $j = 1, 2, \dots, N$  e  $\sigma = +1, -1$ , correspondendo ao spin up e spin down e  $T_{j\sigma}$  é a transmissividade do  $j$ -ésimo canal de spin  $\sigma$ . Um modelo empírico simplista considera a transmissividade abaixo:

$$T_{j\sigma} = \frac{1}{e^{\beta(\varepsilon_j + \mu_B \sigma B - E_F - eV_g)} + 1}$$

onde  $\beta = 1/(k_B T)$ ,  $\varepsilon_j$  é a energia do nível  $j$ -ésimo,  $E_F$  é o nível de Fermi e  $V_g$  é um potencial de gate que controla a condutividade do canal.  $B$  é um campo magnético aplicado e  $\mu_B$  é o magneton de Bohr.

Considere um poço quântico com apenas um nível de energia relevante  $\varepsilon_1$ . a) Para  $T \rightarrow 0$  esboce graficamente a transmissividade do canal de spin  $\sigma$  em função de  $V_g$  para um valor de  $B$  fixo e em função de  $B$  para a situação  $E_F + eV_g < \varepsilon_0$ .

b) Faça um gráfico da condutância em função do campo magnético aplicado para alguns valores de  $V_g$ . Considere que  $\varepsilon_0 - E_F = 0$ .

c) Faça um gráfico de condutância para  $B = 1T$  em função de valores de  $V_g$ . Qual é o potencial de gate limite para que o canal de spin  $\sigma = +1$  passe a conduzir?

d) O que ocorre com o aumento da temperatura?

2 Considerando-se o modelo de gás de elétrons livres, determine o comprimento de onda de Fermi, a velocidade de Fermi e o livre caminho médio para o sódio e para o alumínio em regime de volume (3D).

3 Descreva de maneira simples o efeito Aharonov-Bohm.

4 Consideremos um nanofio hipotético (situação 1D) com parâmetro de rede  $a = 0.3\text{nm}$ , ou seja tem um átomo a cada  $0.3\text{nm}$ , e que cada átomo contribui com um único elétron para a banda de condução. Se o nanofio tem dimensão  $L = 30\text{nm}$ , determine a expressão para densidade de estados bem como o nível de Fermi e a densidade de estados por unidade de comprimento ao nível de Fermi.

---

<sup>1</sup>cadartora@eletrica.ufpr.br

**5** O que é o efeito de bloqueamento de Coulomb? Estime a ordem de grandeza da separação dos níveis de energia de uma esfera metálica de raio a)  $r = 1\mu\text{m}$ , b)  $r = 100\text{nm}$ , c)  $r = 10\text{nm}$ , d)  $r = 2\text{nm}$ . Assumindo-se por simplicidade que a densidade de carga de um elétron fique distribuída de modo homogêneo sobre a superfície da esfera, determine a energia de repulsão coulombiana entre 2 elétrons se a esfera tem raio  $r$ . Obtenha valores quantitativos para os casos a) e d). O que se pode inferir?

**6** A energia térmica pode ser medida pelo valor  $E_T = k_B T$ . O bloqueio de Coulomb somente é observado se a energia de repulsão coulombiana é muito maior do que a energia de excitação térmica. Determine o valor de capacitância para que a energia térmica seja igual à repulsão coulombiana expressa como  $U = e^2/(2C)$  em termos da temperatura.

Para  $T = 10\text{K}$ , qual deve ser o valor de  $C$ ?

Determine a capacitância de uma esfera metálica de raio  $r$  sobre um plano condutor aterrado. (Você pode procurar a solução deste problema em livros de Eletromagnetismo clássico).

Determine o raio máximo da esfera metálica para que seja observado o efeito de bloqueamento de Coulomb em  $T = 10\text{K}$ , assumindo-se a constante dielétrica do vácuo. E se a constante for a do silício?

**7** Demonstre que uma expressão aproximada para  $MR$  em uma estrutura multicamada  $FM - NM - FM$  é dada em termos da polarização das bandas de spin, na forma:

$$MR = \frac{P^2}{1 - P^2}, \quad (1)$$

que é uma expressão similar à expressão de Julliere para o estudo de junções de tunelamento ferromagnéticas.

Determine o valor de  $MR$  se o ferromagneto é o Cobalto, com  $P \approx 0.45$ .

Qual o valor de  $P$  para MR de 100%?

**8** Quais fenômenos devem ser levados em consideração em um Transistor SET (single electron transistor)?

**9** Descreva qualitativamente o efeito Hall de spin. Explique por que uma corrente polarizada em spin pode gerar um campo elétrico, assim como uma corrente de cargas é capaz de gerar campo magnético.

**10** O que é o grafeno? Qual a sua estrutura? Quais são as aplicações potenciais?