

# FI204 - Física de Semicondutores

Prof. José Antônio Brum

7 de março de 2012

## Resumo

**“Über Halbleiter sollte man nicht arbeiten, das ist eine Schweinerei, wer weiss, ob es überhaupt Halbleiter gibt”** (Não se deve trabalhar com semicondutores, isso é uma porcaria; quem pode dizer se eles realmente existem? **Wolfgang Pauli**, 1931, em carta para Rudolf Peierls, NY, em 1931. *1930-1939 Scientific Correspondence with Bohr, Einstein, Heisenberg and others*, vol II, p. 94, Springer (Berlin), 1985.

# 1 Introdução

Os semicondutores começaram como um material “sujo”, com alto grau de descrédito e foram ganhando sua proeminência aos poucos até atingirem a importância que têm hoje, sendo o material fundamental no desenvolvimento tecnológico das últimas décadas. Nesse curso vamos estudar os fundamentos dos semicondutores, principalmente dos semicondutores blenda-de-zinco, que dominam a maior parte das aplicações, avançando até os problemas mais recentes, ainda em investigação, tanto sob os aspectos de aplicação como fundamentais.

O curso não seguirá a estrutura usual que pode ser encontrada na maior parte dos livros dedicados ao tema. Vamos dividir o curso em duas partes. A primeira parte utilizará o desenvolvimento histórico dos semicondutores como guia para estudarmos os seus fundamentos. A partir da compreensão ou, muitas vezes, da incompreensão sobre o que se media, vamos usar os conhecimentos atuais para entendermos os problemas colocados na época. Com isso, desenvolveremos a teoria dos semicondutores, embora não de forma linear. Avançaremos e retornaremos aos diversos tópicos, na medida que o conhecimento mais profundo se fizer necessário e que o conhecimento já desenvolvido permita avançar. O objetivo é que, uma vez chegando ao nosso tempo, teremos desenvolvido os conhecimentos básicos sobre a estrutura eletrônica, a estrutura mecânica, propriedades de transporte e óptica dos semicondutores mais tradicionais, em particular os de estrutura blenda-de-zinco e diamante. Dividiremos a nossa história dos semicondutores em quatro partes: a primeira envolve os primórdios dos semicondutores - na verdade dos sólidos - e vai até o início da proeminência do Si e Ge, pouco antes da 2ª. Guerra Mundial. A segunda parte descreve o desenvolvimento dos primeiros dispositivos semicondutores e a competição entre o Si e o Ge. A terceira parte considera o desenvolvimento do laser de semicondutores e da optoeletrônica. Finalmente, na quarta parte consideramos o desenvolvimento dos semicondutores mais complexos, em particular as heteroestruturas de semicondutores e sistemas similares.

A segunda parte do curso aborda a atualidade dos semicondutores. Ela será dividida em quatro partes, possivelmente interligadas. A primeira, considera os novos materiais semicon-

dutores que são investigados com o objetivo de avançar as propriedades dos semicondutores em relação aos tipo-diamante e tipo-blenda-de-zinco. A segunda parte considera os estudos dos fundamentos da física que utilizam os semicondutores como plataforma para seu desenvolvimento. Em outras palavras, a alta qualidade, a possibilidade de manipular suas propriedades, faz com que os semicondutores sejam utilizados para estudos de fundamentos da física. Vamos considerar alguns desses problemas, pela sua importância e também por sua atualidade. A terceira parte considera os novos tipos de dispositivos semicondutores e as soluções que se procura para avançar na tecnologia associada a eles, contornando as limitações físicas que começam a se impor. Finalmente, na quarta parte vamos analisar o status-quo das pesquisas atuais sob o ponto de vista industrial, tanto a nível mundial como nacional.

As duas partes serão igualmente divididas no curso, com previsão de dois meses para cada uma.

O curso utilizará três livros como referências básicas:

- Peter Yu e Manuel Cardona, *Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties*, Springer, 4a. ed., 2010. (YC)

- Marius Grundmann, *The Physics of Semiconductors: An Introduction Including Devices and Nanophysics*, Springer, 2006. (G)

- W. Schäfer e M. Wegner, *Semiconductor Optics and Transport Phenomena*, Springer, 2002.- (SW) (texto mais avançado)

que serão referenciados daqui pra frente apenas pelas iniciais entre parênteses. Ao longo das notas, referências específicas serão introduzidas. A Tabela seguinte resume a proposta do curso.

<b>Parte I - História dos Semicondutores</b>	Tópicos a serem estudados
I-1 Primórdios dos Semicondutores	<ul style="list-style-type: none"> <li>- primeiras teorias de transporte: modelos de Drude, de Sommerfeld e a introdução da equação de Boltzman</li> <li>- primeiras teorias de bandas: modelo LCAO, modelo de Kronig-Penney</li> <li>- estados de superfície: estados de Tamm, barreira Schottky</li> </ul>
I-2 Silício versus Germânio e o semicondutor moderno	<ul style="list-style-type: none"> <li>- cálculo da estrutura eletrônica: modelo qualitativo para compreensão das ligações químicas, LCAO, <i>ab-initio</i></li> <li>- vibrações mecânicas-fônons e propriedades térmicas</li> <li>- propriedades de transporte</li> </ul>
I-3 Lasers e a opto-eletrônica	<ul style="list-style-type: none"> <li>- propriedades ópticas</li> </ul>
I-4 Heteroestruturas de semicondutores e sistemas similares	<ul style="list-style-type: none"> <li>- dimensionalidade</li> <li>- modelo de massa efetiva e da função envelope</li> </ul>

1

<b>Parte II</b>	
<i>II-1 Novos materiais</i>	- A ênfase será na descrição das propriedades que os diferenciam dos semicondutores blenda-de-zinco e diamante e em suas estruturas eletrônicas e como essas relacionam-se com as primeiras
II-1.a) Materiais formados por C: bucky-balls, nanotubos e grafeno	- Fermions de Dirac (grafeno)
II-1.b) Semicondutores orgânicos: polímeros e pequenas moléculas orgânicas	
II-1.c) Nanopartículas, sistemas coloidais	
II-1.d) Semicondutores magnéticos	- propriedades magnéticas - potencial do campo cristalino
II-1.e) Nitretos	

<i>II-2 Novos efeitos</i>	
II-2.a) Efeito Hall Quântico Inteiro e Fracionário e de Spin	- argumento topológico de Laughlin - estatística fracionária, ânions
II-2.b) Isolante topológico	- fase de Berry
II-2.c) Spintrônica	- coerência de spins em semicondutores
II-2.d) Fermions de Majorana	
<i>II-3 Novas aplicações</i>	
II-3.a) Novas arquiteturas para os dispositivos semicondutores	
II-3.b) Eletrônica de um único elétron	- transporte quântico
II-3.c) pontos quânticos como marcadores	
II-3.d) Lasers de <i>quantum dots</i>	
II-3.e) Fotônica	- optoeletrônica

<i>II-4 Pesquisa Industrial</i>	
II-4.a) Laboratórios industriais	- os grandes laboratórios de pesquisa da segunda metade do século XX (Bell Labs, IBM, Bellcore, Phillips, Sony,...) e o consórcio Semantech do final do século XX
II-4.b) Esforço brasileiro	- Lei de informática (anos 1980s), CIENTEC, etc...

Esse programa é extenso demais para um semestre. Exceto pela primeira parte, o programa da segunda parte é flexível e escolhas dos tópicos terão de ser feitas.

A avaliação do curso prevê duas provas (cujo modelo será decidido mais tarde), uma para cada parte, e listas de exercícios.

## Referências

- [1] Sílvio R. A. Salinas, **Introdução à Física Estatística**, EdUSP, 1997.
- [2] Walter Greiner, Ludwig neise, Horst Stöcker, **Thermodynamics and Statistical Mechanics**, Springer, 1997.
- [3] Federik Reif, **Fundamentals of Statistical and Thermal Physics**, McGraw-Hill, 1965.
- [4] Sylvie Vaclair, **Éléments de physique statistique: Hasard, organisation, évolution**, InterEditions, 1993.
- [5] Harvey Gould e Jan Tobochnik, **Statistical and Thermal Physics**, Princeton University Press, 2010 e <http://www.compadre.org/stp> (Statistical and Thermodynamic Project, apoiado pela National Science Foundations – EUA).
- [6] Marc Mézard, Notas do curso de “**Physique Statistique**”, Ecole Polytechnique, Paris, 2010.
- [7] Jean-Philippe Bouchaud e Marc Potters, **Theory of Financial Risks: from statistical physics to risk management**, Cambridge University Press, 2000.