

## ESPECTRÔMETRO DE ELÉTRONS DE HEMISFÉRIOS CONCÊNTRICOS

V.E. de Carvalho - Departamento de Física - UFMG

M. Prutton e S.P. Tear - University of York - Inglaterra

Dois hemisférios concêntricos de raio de 45mm associados a um conjunto de lentes na entrada e outro na saída dos hemisférios foram usados para a construção de um espectrômetro de elétrons com alta resolução. Dois modos de operação podem ser usados: em um deles a energia de passagem dos elétrons através do espaço entre os hemisférios (região de análise) é constante, mas os elétrons sofrem retardação nas lentes de entrada à medida que a energia de análise é variada. No outro modo de operação os elétrons estão sujeitos a uma retardação constante nas lentes de entrada e a energia de passagem é variada de acordo com a energia de análise.

Espectros Auger e de Perda de Energia de ótima qualidade, usando a face (110) de InSb foram obtidos com este instrumento.

## 1. Introdução

Em espectroscopia de elétrons as entidades que contêm informações sobre as propriedades da superfície são elétrons. É portanto necessário que estes elétrons sejam analisados em energia para que se possa extrair estas informações da curva de distribuição em energia dos elétrons emitidos. O uso de um espectrômetro é necessário e a escolha entre os diferentes tipos depende da aplicação específica.

Em qualquer espectrômetro de elétrons é desejável que a resolução e a sensibilidade de detecção sejam as mais altas possíveis. Entretanto estes são requerimentos conflitantes desde que ambas não podem ser aumentadas simultaneamente e em geral o aumento de uma leva à diminuição da outra. Assim, o projeto de um analisador deve basear-se em

princípios que levem à construção de um instrumento onde um balanço entre resolução e sensibilidade possa ser atingido.

A resolução em energia ( $R$ ) de um analisador de elétrons é definida pela razão entre a largura de linha à meia-altura ( $\Delta E$ ) pela energia  $E_0$  na qual a linha é centrada isto é,  $R = \Delta E/E_0$ . O inverso da resolução é muitas vezes usado para caracterizar um espectrômetro e é chamado de poder de resolução:  $\rho = E_0/\Delta E$ . A sensibilidade é um parâmetro de definição menos precisa porque depende de vários fatores, sendo os mais importantes os seguintes: a) a área útil definida pela fenda de entrada do espectrômetro; b) o ângulo sólido útil "visto" pelo espectrômetro; c) a transmissão, isto é, a razão entre o fluxo de partículas emergente e incidente em função da energia. A sensibilidade pode ser descrita em termos da luminosidade definida como o produto da área ( $A$ ), pelo ângulo sólido ( $\Omega$ ) e pela transmissão ( $T$ ), isto é,  $L = A.\Omega.T$ . Mas, algumas vezes a sensibilidade é definida somente pelo produto  $A.\Omega$ , uma quantidade chamada "alcance" do espectrômetro.

Um dos métodos usados para medir a energia de partículas carregadas baseia-se na deflexão por um campo elétrico e/ou magnético, tal que partículas de diferentes velocidades são mais ou menos defletidas e podem ser separadas por um sistema de fendas. Analisadores baseados neste princípio são espacialmente dispersivos. A configuração do campo faz as partículas seguirem uma trajetória que é uma função de sua energia. A faixa de energia transmitida consiste de uma região estreita em torno da trajetória central, selecionada pelas fendas de entrada e saída do analisador.

Analisadores dispersivos podem ser classificados em magnéticos e eletrostáticos dependendo da natureza do campo utilizado. Este artigo descreve a montagem e teste de um analisador do tipo eletrostático usando hemisférios concêntricos como elementos dispersivos. Na próxima seção os princípios de funcionamento dos hemisférios como analisador de ener

gia são apresentados. Na seção 3 é feita uma descrição do instrumento e na seção 4 os resultados dos testes realizados com o espectrômetro são apresentados e discutidos.

## 2. Hemisféricos Concêntricos como Elemento dispersivo

O uso de um condensador esférico como um sistema capaz de focar partículas carregadas foi, pela primeira vez, estudado em detalhes por Purcell em 1938/1/. Posteriormente ele foi usado como um monocromador de elétrons e também como analisador para baixas energias /2,3/.

O campo defletor (proporcional à  $r^{-2}$ ) é produzido pela diferença de potencial  $V$  entre as duas superfícies hemisféricas concêntricas de raios  $r_2 > r_1$  (Fig. 1). Um feixe de elétrons entrando na região livre entre os dois hemisférios através de uma fenda de largura  $S_1$  pode ser focado (em duas dimensões) sobre uma fenda  $S_2$ , diretamente oposta, depois de uma deflexão de  $180^\circ$ . Para uma certa energia de passagem  $E_0 = qV_0$ , as partículas de carga  $q$  seguem uma órbita circular de raio médio

$$r_0 = \frac{r_2 + r_1}{2} \quad (1)$$

quando a diferença de potencial entre os dois hemisférios for ajustada para

$$V = V_0 \left( \frac{r_2}{r_1} - \frac{r_1}{r_2} \right). \quad (2)$$

Nestas condições a resolução dos hemisférios, para foco em primeira ordem, pode ser escrita na forma /2/

$$R_h = \frac{1}{\rho_h} = \frac{S}{2r_0} + \frac{a^2}{r_1^2} \quad (3)$$

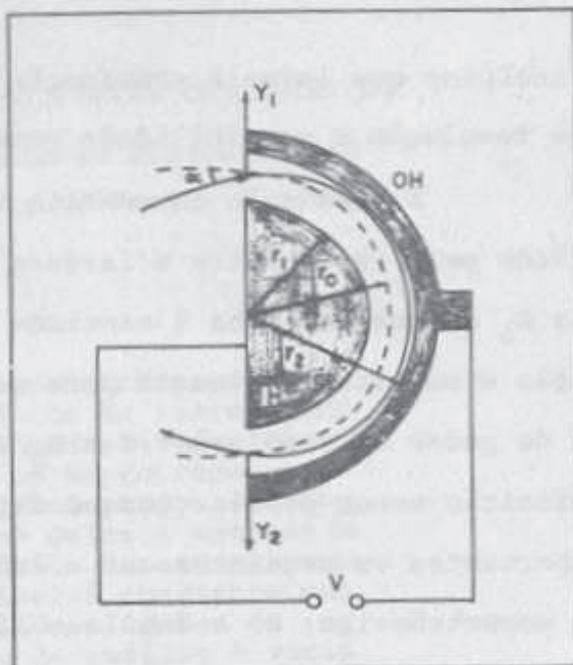


Fig.1 - Corte transversal através de um condensador esférico. Os eletrodos hemisféricos interno (IH) e externo (OH) têm raios  $r_1$  e  $r_2$ , respectivamente.

onde  $S$  é a largura das fendas de entrada e saída, (supostas iguais) e  $\alpha$  é o semi-ângulo sob o qual o feixe entra no analisador. A eq. 3 mostra que uma redução em  $S$  e  $\alpha$  aumenta a resolução mas isto deve ser feito com cuidado, pois variações em ambos fatores afetam a sensibilidade. Assim, um ganho em resolução pode na realidade significar uma piora nas características do espectrômetro.

Existe contudo uma maneira de aumentar a resolução sem afetar a sensibilidade; que é pré-retardando os elétrons, isto é, reduzindo sua energia antes de serem analisados nos hemisférios. Para um dado valor da largura de linha  $\Delta E$  uma redução na energia de um valor  $E_0$  para um valor  $E_1$  corresponde a um aumento na resolução por um fator

$$D = E_0/E_1, /4,5/$$

### 3. Descrição do Instrumento

O espectrômetro descrito nesse trabalho é uma versão modificada dos instrumentos usados por Browning /6/ e Peacock /7/. Consiste ba

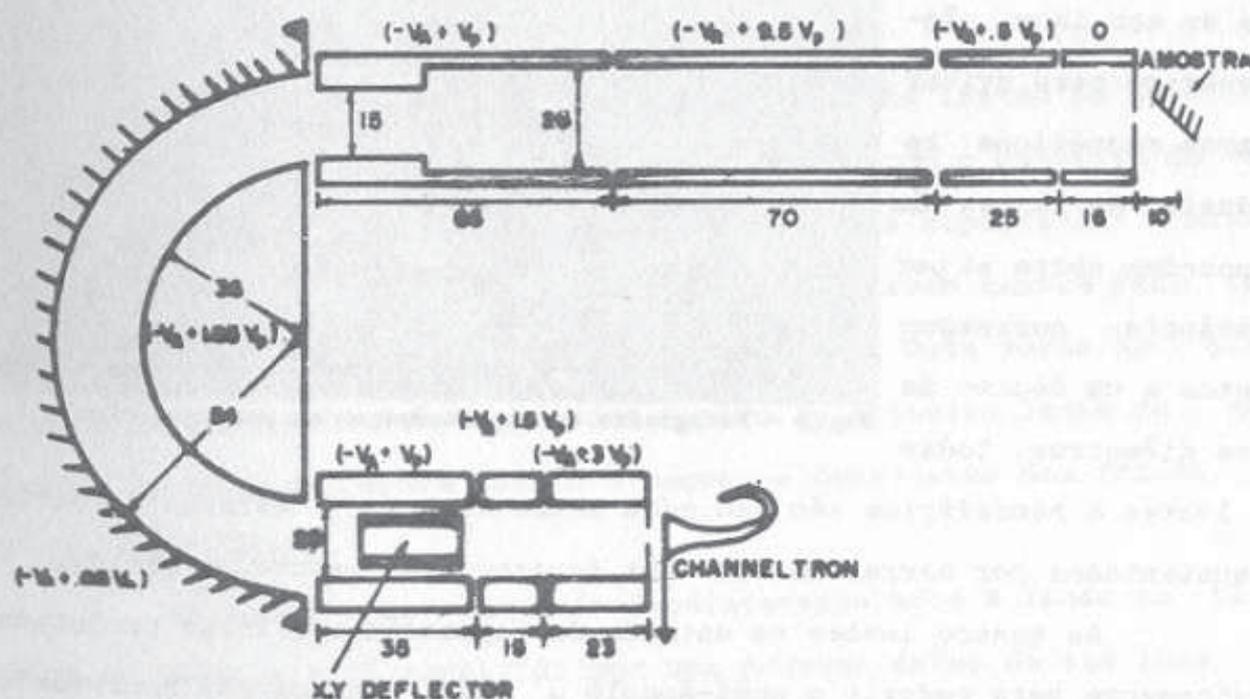


Fig. 2 - Representação esquemática do espectrômetro mostrando suas dimensões (em mm) e os potenciais.  $V_A$  = voltagem de análise;  $V_P$  = voltagem de passagem entre os hemisférios.

sicamente : 1) de um sistema de quatro lentes cilíndricas na entrada, 2) dois hemisférios concêntricos de raio médio de 45mm 3) um sistema de três lentes na saída e 4) um "channeltron" para detecção dos elétrons analisados. A Fig. 2 mostra esquematicamente a estrutura e dimensões do espectrômetro. Os hemisférios e lentes são construídos em aço inox não-magnético para evitar campos magnéticos residuais. As lentes são separadas entre si por distâncias correspondentes a um décimo de seus diâmetros. Todas

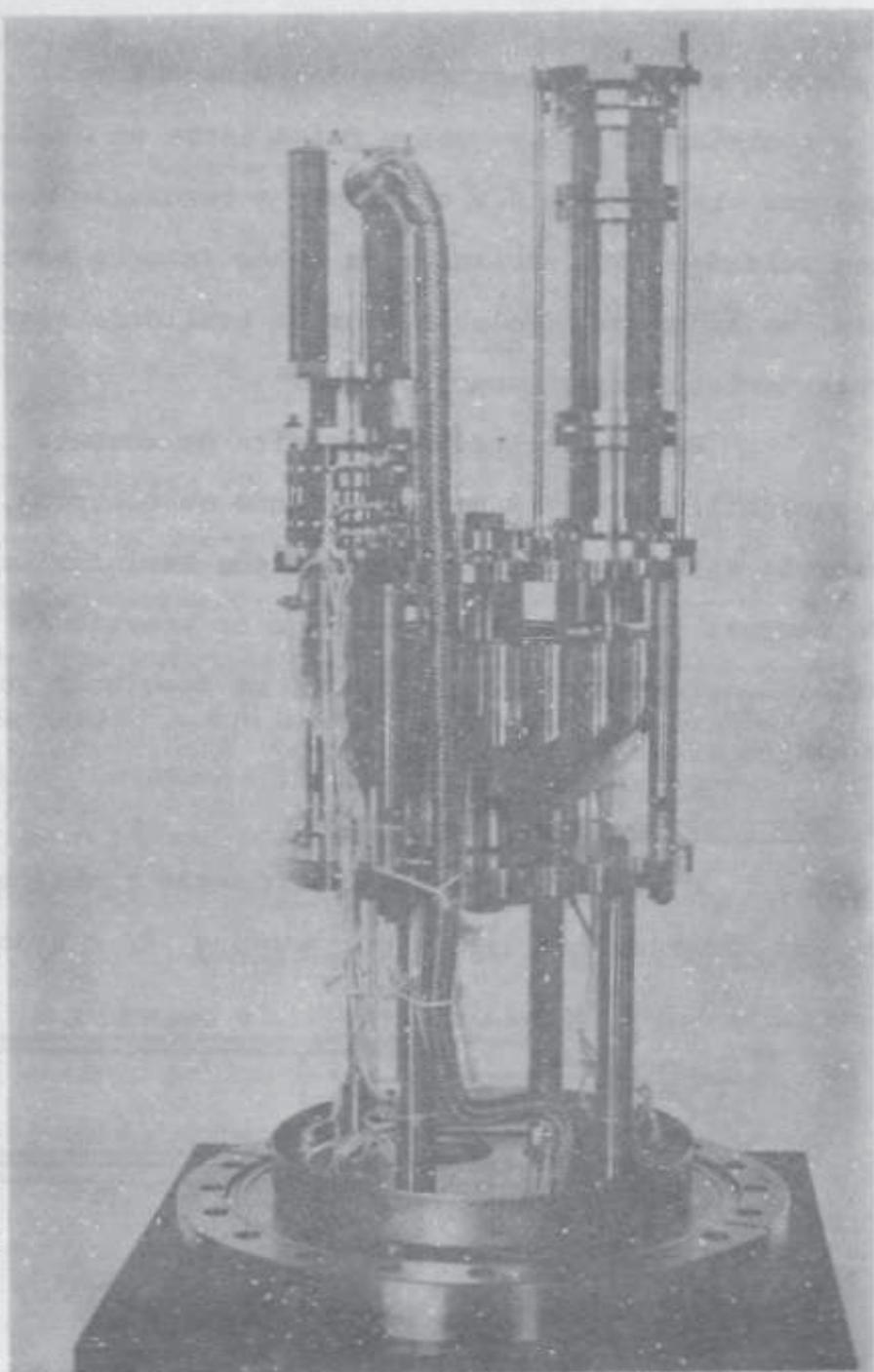


Fig.3 - Fotografia do espectrômetro na montagem final

as lentes e hemisférios são isolados entre si por esferas de safira e sustentados por barras de aço inox formando uma estrutura rígida.

As quatro lentes na entrada do espectrômetro foram projetadas basicamente para reduzir o semi-ângulo  $\alpha$  na entrada dos hemisférios e aplicar uma desaceleração  $D$  aos elétrons antes deles serem analisados em energia nos hemisférios. O poder de resolução efetivo do instrumento



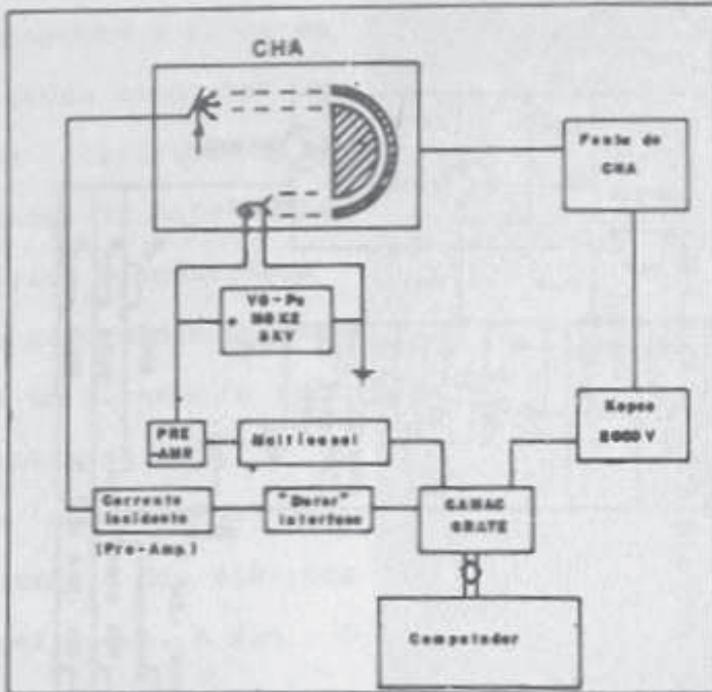


Fig.5 - Diagrama de blocos da eletrônica usada para controle do espectrômetro e aquisição de dados.

ção simples cujo circuito é apresentado na Fig. 4. Estes potenciais são definidos com referência à voltagem de análise  $V_A$ . Esta fonte permite dois modos de operação para o instrumento: o modo de energia de passagem constante onde os potenciais dos hemisférios variam de maneira a manter constante a energia com que os elétrons passam por eles. Este modo é apropriado para operação em baixas energias  $\leq 300$  eV e dá uma largura de linha aproximadamente constante. O segundo modo é aquele em que a retardação nas lentes de entrada é mantida constante. Este modo é útil para energias mais altas ( $\geq 300$  eV) e dá um poder de resolução constante em todas

tagem na parede da câmara de ultra-alto-vácuo.

O espectrômetro foi montado num flange de aço inox ("Conflat") de 8 polegadas de diâmetro, e coberto com um cilindro de "mu-metal". Uma visão mais completa do instrumento em sua montagem final é fornecida pela fotografia da figura 3.

Os potenciais das lentes e hemisférios são fornecidos por uma fonte de alimenta

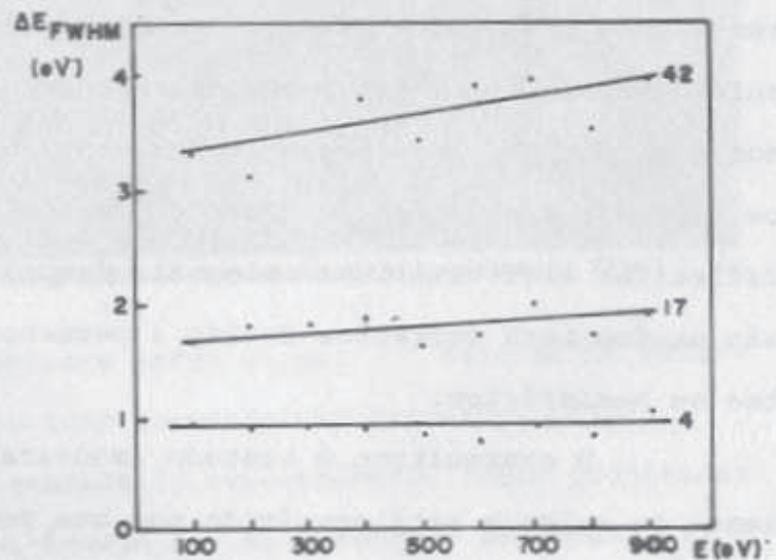


Fig. 6 - Largura de linha à meia-altura ( $\Delta E_{FWHM}$ ) do pico elástico em função da energia incidente, para espectrômetro operando em três energias de passagem: 4eV (modo 3), 17 eV (modo 2) e 42 eV (modo 1).

energias /8/. Para os testes apresentados neste artigo a fonte de alimentação foi ajustada para operar no modo de energias de passagem constantes em três valores diferentes: 4 eV, 17 eV e 42 eV, e referidos aqui como Modo 3, 2 e 1 respectivamente.

A eletrônica associada ao controle do instrumento e à aquisição de dados é mostrada esquematicamente na Fig. 5.

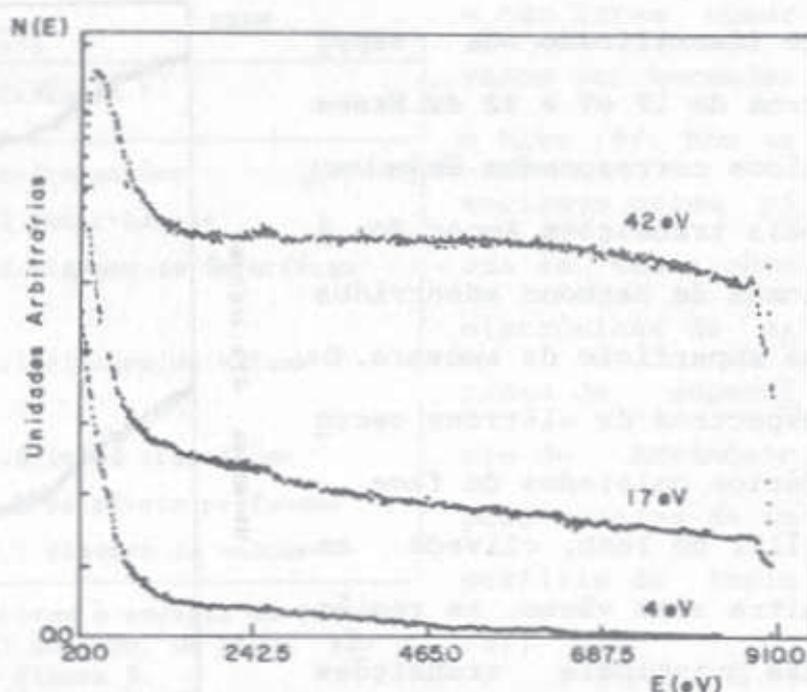


Fig. 7 - Espectros de elétrons secundários de uma superfície "suja" do InSb. Espectrômetro operando em três energias de passagem: 4, 17 e 42 eV.

#### 4. Teste do instrumento:

O espectrômetro foi inserido numa camera de ultra alto vácuo para teste e ajustado para ser operado com a amostra à 60mm da primeira lente de entrada. Nesta geometria o ângulo sólido útil é de 0,3% de 2 $\pi$  Sterad.

Os potenciais do analisador foram ajustados através do exame da forma do pico elástico em 500 eV, para as três energias de passagem 4 eV, 17 eV e 42 eV. Depois de obtidos os potenciais apropriados, a largura de linha à meia-altura dos picos elásticos foram medidas para os três modos de operação para energia do feixe incidente variando de 100 a 900 eV. A Fig. 6 mostra estes resultados. A largura de linha é aproximadamente constante para os modos 1 e 2 e valem respectivamente 0.9 e 1.8 eV.

Os espectros, na forma  $N(E)$  obtidos de uma superfície "suja" de InSb, com o espectrômetro operando nas três energias de passagem, estão apresentados na Fig. 7. Um largo pico em torno de 270 eV é claramente

te identificado nos espectros de 17 eV e 42 eV. Esses picos correspondem às principais transições Auger dos átomos de carbono adsorvidos na superfície da amostra. Os espectros de elétrons secundários coletados da face (110) do InSb, clivado em ultra alto vácuo, na região das principais transições Auger de Índio e Antimônio,

são apresentados na Figura 8. Estes espectros após subtração do "background" revelaram-se de ótima qualidade /8/.

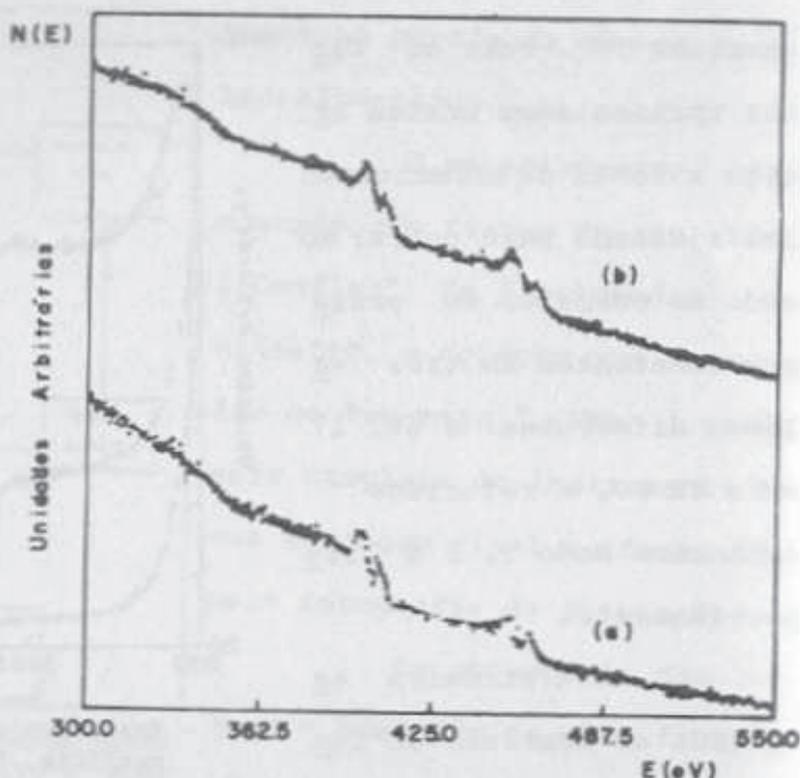


Fig. 8 - Espectros de elétrons secundários da face (110) do InSb, clivado em ultra alto vácuo. Espectrômetro ajustado para: a) modo 2, b) modo 1. Energia incidente  $E_p = 4$  keV. Os picos nos espectros são as transições Auger principais de In e Sb.

Espectros de perda de energias de elétrons da face (110) do

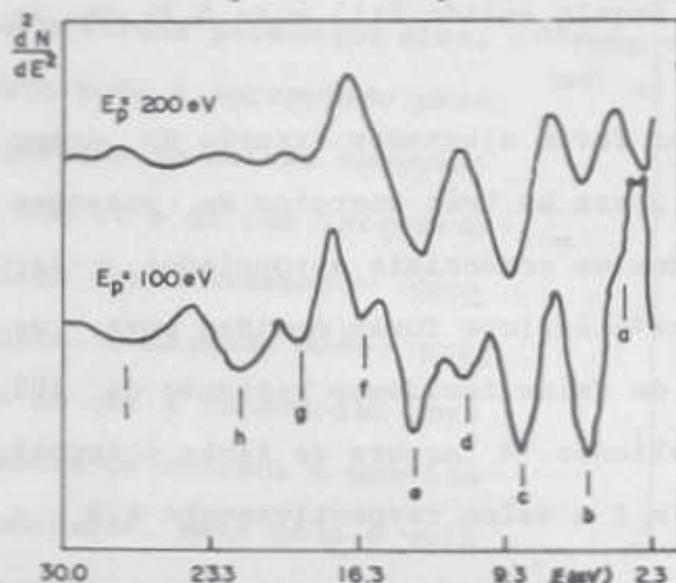


Fig. 9 - Derivada segunda dos espectros de perda de energia de elétrons da face (110) do InSb. Espectrômetro operando no modo 3. Energia incidente  $E_p = 4$  keV. Os picos nos espectros são as transições Auger principais de In e Sb.

InSb obtidos com o espectrômetro quando no modo 3 e feixe incidentes de 100 e 200 eV, foram também analisados. A figura 9 mostra estes espectros na forma da derivada segunda. Uma comparação entre os resultados deste trabalho com aqueles publicados na literatura mostra um excelente acordo,

(veja tabela I) exceto para os picos de 11 e 16 eV que estão presentes no espectro da figura 9

Pico	Energia (eV)	
	Deste trabalho ( $\pm 0.13$ eV)	Referência 9
a	3.3	2.6 Transições
b	5.5	5.1 inter-bandas
c	8.3	8.3 Plasmon de Superfície
d	11.0	-
e	13.5	13.5 Plasmon de volume
f	16.0	
g	19.1	19.0 In-4d transições
h	21.3	21.4 de níveis profundos
i	27.0	27.0 Plasmon de volume

Tabela I - Perdas de energia, relativas à energia do feixe incidente, da face (110) do InSb. Os picos são numerados de acordo com figura 9.

e não foram observados por Bermudez e Ritz /9/. Nós associamos estes picos às transições eletrônicas de estados de superfície do Antimônio para estados de superfície do Índio /8/.

A ótima qualidade dos resultados apresentados acima nos leva a conclusão de que o espectrômetro usado neste trabalho possui excelentes características que podem ainda serem melhoradas através de pequenas modificações na fonte de alimentação das lentes, com o objetivo de otimizar todos os modos de operação do instrumento. Além disso, este tipo de espectrômetro tem uma grande vantagem que é sua versatilidade para diferentes espectroscopias de elétrons.

#### Referências:

- 1) Purcell E.M. Phys. Rev. 54 (1938), 818
- 2) Kuyatt C.E. and Simpson J.A., Rev. Sci. Instrum. 38 (1967) 103
- 3) Simpson J.A., Rev. Sci. Instrum. 35 (1964) 1698
- 4) Helmer J.C. and Weichert N.H., Appl. Phys. Lett. 13 (1968) 266
- 5) Heddle D.N.O., J. Phys. E: Sci. Instrum. 4 (1971) 587
- 6) Browning R., J. Phys. E: Sci. Instrum. 14 (1981) 58
- 7) Peacock D.C., em "Surface Chemical Analysis in the Scanning Auger Microscope", D. Phil. Thesis. University of York, U.K. (1983)
- 8) de Carvalho V.E. em "LEED Studies of the Structures of the InSb (110) and CdTe (110) Surfaces" D. Phil. Thesis - University of York, U.K. (1986)
- 9) Bermudez, V.M. and Ritz V.H., Phys. Rev. B 26 (1982) 3297.