金属表面での中速電子の散乱の角度分布*

石岡久道**・小栗多計夫**

(昭和58年12月16日 受理)

Angular Distribution of Scattering of Medium-Energy
Electrons by Metals

Hisamichi ISHIOKA and Takeo OGURI

(Department of Physics, Faculty of Science, Tokyo Metropolitan University
Setagaya-ku, Tokyo 158)

(Received December 16, 1983)

1. 緒 言

金属内部の電子構造を直接調べる手段として、電子分光法は非常に有効である^{1,2)}。中でも入射電子のエネルギー E_p が $10 \sim 300$ eV である角度分解型中速電子分光法 (AR-MEES) は、価電子バンドや浅い内殻レベルの観測に適している。価電子バンドの情報は、主に電子エネルギー損失スペクトル (EEL-S) に含まれているが、その理論的解釈は研究者によって異なっている。従来の一般的解釈はエネルギー損失をバンド間遷移の結果とみなし、EEL-S を誘電体理論や光学測定から導かれたエネルギー損失関係 $[I_m 1/\epsilon = -\epsilon_2/(\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2)]$ ($\epsilon = \epsilon_1 + i\epsilon_2$ は複素誘電率) との対応をさせるものである。しかし実際の EEL-S では、 $-I_m 1/\epsilon$ とのピーク位置のずれが認められている³⁾。また金属のように終状態が一定でない場合には、始状態からの遷移の総数が EEL-S になるとすると、観測された始状態 (基底状態) に近い EEL-S とは大きく異なるはずである。このように、バンド間遷移によってバルクの電子状態を解釈することは困難である。

われわれは、バンド間遷移という概念にとらわれず、EEL-S はバルクの価電子状態密度 (基底状態) (DOS) をそのまま示しているという解釈をしている。それを明確にする研究、すなわち中速領域の電子の金属表面層での弾性、非弾性散乱の角度分布の測定を行った。

2. 実 験

実験装置は $400 \text{ mm}\phi$ のステンレス鋼製ベルジャーとオイルフリーな排気系からなっている。Cu-シールの到達真空度は $6.5 \times 10^{-8} \text{ Pa}$ ($5 \times 10^{-10} \text{ Torr}$) であるが、本実験はパイトンシールを用い、 $2.5 \times 10^{-8} \text{ Pa}$ ($2 \times 10^{-8} \text{ Torr}$) で行った。

分光器はベルジャー内に鉛直に配置されている、Fig. 1. エネルギー選別器と分析器は、いずれも軌道半径 40 mm の 127° 共軸円筒型を用い、幾何学的分解能は $1/200$ である。分析器は、電子受け入れ角は約 $\pm 0.5^\circ$ であり、試料面の中央を中心として選別器と同一平面内で $5^\circ \sim 80^\circ$ まで連続的に回転可能である。角度は回転板の目盛を直読した。

試料は多結晶の Ti, Fe, Ni, Au 板を用い、化学研磨を

Fig. 1 Schematic diagram of the apparatus.

* 昭和58年10月31日 第24回真空に関する連合講演会で講演 (31Bp-4)

** 東京都立大学理学部物理学教室 (東京都世田谷区深沢2-1-1)

ほどこした後、真空中で1300℃まで加熱した。その時の定常圧は 4×10^{-6} Paであった。表面の清浄度は、 $M_{23}VV$ や $O_{3}VV$ のオージェピークで確かめてから測定した。

3. 結 果

Fig. 2 は $E_p=300$ eV のときの Ti の AR-MEES スペクトルの全体図である。エネルギー損失、プラズマ損失及びオージェピーク強度は、バックグラウンドを差し引いて求めた。

Fig. 2 Angle-resolved MEES spectrum for Ti.

Fig. 3 は弾性散乱ピーク (ESP) 強度の角度分布である。いずれも鏡面反射方向以外にも分布が見られる。さらに E_p 依存性があり、物質によっても異なる。Fe, Ni の場合、 $E_p=50$ eV では鏡面方向以外にも鋭いピークがある。

Fig. 4 は Ni の $M_{23}VV$ オージェピークと純二次電子ピーク強度分布である。どちらも特別な構造は持っていない。

Fig. 5 は Au の ESP と特性エネルギー損失ピーク (ELP) ($EL=3.0$ eV)、プラズマ損失ピーク (PLP) 強度分布を比較したものである。どちらも ESP の分布と相似形である。これは Au だけでなく、実験したすべての物質、及び入射エネルギーで共通した事がらであった。

4. 考 察

入射電子の固体 (金属) 内での弾性散乱理論は、高速であれば核によるラザフォード散乱が用いられる^{4,5)} が、中速領域については満足な説明は出来ていない。そこで、角度分布の実験に基づいて考える。中速電子は核まで入り込めず、また弱い周期ポテンシャルによる影響も少ないと考えられ、その中間の、内殻電子の作るポテ

Fig. 3 Polar diagrams of the angular distribution of elastically scattered electrons.

Fig. 4 Polar diagram of the angular distribution of $M_{23}VV$ Auger peak and true secondary electrons for Ni.

Fig. 5 Polar diagram of the angular distribution of elastically and inelastically scattered electrons by Au.

ンシャルによる散乱と考 えている。Fig. 3 の E_p 依存は、散乱に関与するポテンシャルの違いを示しており、Table 1 は、実験した原子の電子の束縛エネルギーをまとめたものである。測定した角度分布を調べると、s 電子の作るポテンシャルからの散乱では、分布はなめらかで、p, d 電子からの散乱は構造を持つと言える。

Bronshtein ら^{6,7)} は、数種類の金属蒸着膜から弾性散乱した電子の角度分布を測定しており、やはり鏡面方向以外にも分布の大きい処がある。Au 蒸着膜から弾性散乱した $E_p=400\sim500$ eV の電子の角度分布は、蒸発した Au 原子による散乱を測定した Reichert の結果⁸⁾ と一致している。このことは、弾性散乱が原子の内殻ポテンシャルによる散乱であるという説を裏づけている。われわれの実験結果と比較すると、Bronshtein らの結果とはよく合わない。これは蒸着膜の Au と多結晶 Au との違いによるものと考えられる。

本実験結果から導かれた、内殻電子のポテンシャルの構造は、金属内で統計的に平衡に達したものを観測して

Table 1 Core levels relating to the elastic scattering.

E_p	50 eV	100 eV	300 eV
Ti	$3 s_{1/2}$ 59 eV	$2 p_{3/2}$ 455 eV	$2 p_{3/2}$ 455 eV
Fe	$3 p_{1/2} 3/2$ 56 eV	$2 p_{3/2}$ 710 eV	$2 p_{3/2}$ 710 eV
Ni	$3 p_{1/2} 3/2$ 68 eV	$3 s_{1/2}$ 112 eV	$2 p_{3/2}$ 855 eV
Au	$5 p_{3/2}$ 54 eV	$5 s_{1/2}$ 178 eV	$4 d_{5/2}$ 394 eV

いると考 えている。

同じ遷移金属で Fe, Ni と Ti の分布が異なるのは、強磁性性に関係があるものと予想されるので、現在 Fe, Ni の温度依存及び Cu の測定を行っている。

ELP, PLP の角度分布が、入射エネルギー、物質によらず ESP の分布と相似形である事が確かめられた。Bronshtein ら⁹⁾ によっても同様の結果が得られている。このことは、エネルギー損失過程が弾性散乱過程に類似していることを示している。エネルギー損失過程は二通りある。一つは入射電子が内殻電子のポテンシャルで散乱し価電子状態密度に比例した束縛電子と方向を変えない直衝突 (knock-on) を起こし、入射電子が束縛準位にとどまり束縛電子がエネルギー $E_p - E_B$ (E_B : 束縛エネルギー) を受け取って固体 (金属) 外へ放出される電子交換であり、他の一つは、束縛電子が入射電子による knock-on で交換電子となって、内殻のポテンシャルで反射して、方向を変えずに固体 (金属) 外に放出される。このエネルギー損失過程を knock-on electronic process と呼ぶことにし、EEL-S は DOS (基底状態) を忠実に示していると言える。

5. 結 論

数種類の金属表面での中速電子の弾性、非弾性散乱の角度分布を測定した結果、次のような事がわかった。

- (1) 弾性散乱とは、入射電子が金属内原子の内殻ポテンシャルによるエネルギーを失わない散乱であり、その際ポテンシャルの形により、散乱される方向が異なる。
- (2) エネルギー損失過程は、束縛電子と入射電子の直衝突による電子交換と内殻ポテンシャルによる散乱との結果 (knock-on electronic process と呼ぶことにする) であり、EEL-S は固体 (金属) 内電子の状態密度 (DOS) をそのままあらわす。

〔文 献〕

- 1) 小栗多計夫, 他: 真空 **25** (1982) 281.
- 2) 福田 永, 小栗多計夫: 真空 **25** (1982) 287.
- 3) E. Colavita, et al: Phys. Rev. **B25** (1982) 2490.
- 4) T. E. Everhart: J. Appl. Phys. **31** (1960) 1483.
- 5) G. D. Archard: J. Appl. Phys. **32** (1961) 1505.
- 6) I. M. Bronshtein, et al: Sov. Phys. Solid state. **16** (1975) 1374.
- 7) I. M. Bronshtein and V. P. Pronin: Sov. Phys. Solid state. **17** (1976) 1363, 1610.
- 8) E. Reichert: Z. Phys. **173** (1963) 392.
- 9) I. M. Bronshtein and V. P. Pronin: Sov. Phys. Solid state. **23** (1981) 349.