二次電子増倍板付き LEED 装置の歪補正に 用いる非球面グリッドの解析

岡野達雄*・大崎明彦**・桜井 誠*・本田 融*・辻 泰*

(昭和59年9月1日 受理)

Analysis of non-Spherical Grid Geometry for Distortion-Free
LEED Apparatus with Micro Channel Plate

Tatsuo OKANO*, Akihiko OHSAKI**, Makoto SAKURAI*,
Tohru HONDA* and Yutaka TUZI*

(Institute of Industrial Science, University of Tokyo,
Roppongi, Minato-ku, Tokyo)

(Received September 1, 1984)

A design of non-spherical grid structure for the distortion-free LEED apparatus with a micro channel plate (MCP) is described. The grid structure is assumed as an interface of two electrostatic potentials. The potential interface refracts the diffracted electrons and the LEED patterns can be projected on the MCP just like those observed on a spherical fluorescent screen. The shape of the potential interface is described by a differential equation and numerically calculated for several conditions. The most appropriate geometry is determined by the easiness of the mechanical construction. The effect of energy distribution of diffracted electrons is numerically estimated and the deviation is proved to be negligibly small for most applications.

1. はじめに

低速電子線回折 (LEED) は、固体表面構造を解析する基本的手段として今日広く利用されているが、対象によっては一次電子線の照射に起因する表面状態の変化を無視することのできない場合がある¹⁾。電子線による照射効果としては、吸着分子の電子励起脱離や解離反応、あるいは極低温での表面の局所的昇温などが考えられるが、吸着エネルギーの小さな物理吸着分子層の LEED 観察の場合には、一次電子線の強度を微弱化することがとりわけ重要となる。Fain ら²⁾ は、チャンネル型二次電子増倍板 (MCP) による回折像の輝度増幅を行うことにより、3 nA 程度の一次電子線強度で低温希ガス凝縮層の LEED 観察が可能であることを報告している。彼

らの MCP 付 LEED 装置は、通常の 4 枚グリッド LEED 装置の球面蛍光スクリーンの替りに MCP を取付けたもので、十分な輝度増幅能 (2×10^4) を有するものである。しかしながら、通常の LEED 装置において、球面スクリーンに投影された回折像の目視により逆格子の直接観察が可能であるのと比較すると、このような球面グリッドと MCP によって構成される LEED 装置の場合には、回折像の歪みを避けることができない。我々は非球面状のグリッドを用いることにより、球面蛍光スクリーン上で観測されるのと同じの歪のない LEED 像を MCP によって観測することが可能であることを示すことができた。ここでは、その非球面グリッドの形状解析について報告する。

2. 非球面グリッド形状の解析

球面スクリーンを用いた通常の LEED 装置と、球面

* 東京大学生産技術研究所 (東京都港区六本木)

** 東京大学生産技術研究所 (現在 三菱電機(株) LSI 研究所)

(a)

(b)

Fig. 1 Schematic diagram of LEED apparatus. (a) Spherical fluorescent screen type. (b) Conventional MCP type.

グリッドの背面に MCP を付加したものについて、観測される回折像の比較を Fig. 1 によって行う。装置の中心軸から角度 θ の方向に回折された電子が、蛍光板上に投影される位置を $r(\theta)$ とすると、Fig. 1(b) に示す通常の LEED 装置の場合には

$$r(\theta) = L \sin \theta \quad (1)$$

となる。ここで L は試料と蛍光面との距離である。また、MCP 付 LEED 装置の場合には、Fig. 1(b) に示すように R を試料と MCP の間の距離として

$$r(\theta) = R \tan \theta \quad (2)$$

となる。本研究の目的は、適切な形状をもったグリッドにより回折電子線を屈折させ、MCP 上で $r(\theta) \propto \sin \theta$ の関係を満足させるようにすることである。

電子線が電位 V_1 の領域と V_2 の領域の界面を通過する際、光学における snell の法則と同様に、電位界面に対する電子線の入射角 φ_1 と出射角 φ_2 に次の関係がなりたつ。

$$\frac{\sin \varphi_2}{\sin \varphi_1} = \sqrt{\frac{V_1}{V_2}} = n. \quad (3)$$

ここで n は屈折率である。この電位界面は実際には、電位 V_1 , V_2 をもつ 2 枚のグリッドで実現されるが、本研究では 2 枚のグリッドの間隙を無限小とした理想的電位界面について考察をすすめる。MCP 上の回折像の投影位置 $r(\theta)$ を $\sin \theta$ に比例するように変換する電位界面の形状は、 $\theta=0$ の軸に関して対称であり、Fig. 2 に示すように極座標 (r, θ) で表わせるものとする。中心軸 ($\theta=0$) に対して θ の方向に回折された電子線が

Fig. 2 Schematic diagram of the potential interface for the distortion-corrected LEED system with MCP. Potential interface $r(\theta)$ and electron trajectory are shown in the figure.

MCP 上で $\sin \theta$ に比例する位置に達するための条件は、簡単な幾何学的考察から次のように表わされる。

$$r \sin \theta + (R - r \cos \theta) \tan (\theta + \varphi_1 - \varphi_2) = C \sin \theta. \quad (4)$$

ここで R は試料と MCP 間の距離、 C は比例定数であり、この MCP 付 LEED 装置で観察した場合と同じ大きさの LEED 像を与える、通常の LEED 装置における

Fig. 3 Potential interfaces for various (C/R) values numerically calculated from eq. (6). All dimensions are normalized by sample-to-MCP distance, R . (a) $(r_0/R)=0.7$. (b) $(r_0/R)=0.9$.

球面スクリーンの半径である。一方、界面上の点 (r, θ) における入射角 φ_1 は次のように表わされる。

$$\tan \varphi_1 = \frac{1}{r} \frac{dr}{d\theta} \quad (5)$$

従って式(4)中の φ_1, φ_2 を(3), (5)を用いて消去することにより, $r(\theta)$ に関する次の微分方程式が得られる。

$$\frac{dr}{d\theta} = \frac{r \sin \alpha}{n - \cos \alpha} \quad (6)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left\{ \frac{(C-r) \sin \theta}{R-r \cos \theta} \right\} - \theta. \quad (7)$$

(6), (7)を数値的に解くことにより, (4)式の関係満足するような界面形状を求めることができる。Fig. 3は, 中心軸上の点 $(r_0, 0)$ を出発点とし $dr/d\theta|_{\theta=0}=0$ の初期条件で 0.1° きざみに $\theta=60^\circ$ まで計算した結果である。Fig. 3(a)は $r_0/R=0.7$, (b)は $r_0/R=0.9$ の場合で, 屈折率 n は0.129すなわち $V_2/V_1=60$ である。 r_0 が増すに従って, 中心軸近傍における曲率が増すこと, C が減少するに従って傾きが緩やかになるとともに, θ 大の領域で上方に湾曲する傾向が強くなることわかる。非球面グリッドの成形方法として, テフロン治具に極細金網を張り, メッキによって固定する方法³⁾を我々は最適と考えた。この方法を用いる場合は, Fig. 3(a)の $C/R=1$ の曲線のように途中に変曲点をもつ形状は不適当である。また, 非球面グリッドと試料の間に, 通常のLEED装置におけるのと同様な球面グリッドを置く必要があるため, 非球面グリッドと試料の間の空間が広いことが望ましい。従ってMCPを用いたLEED装置に使用する非球面グリッドの形状としては, $r_0/R=0.9$, $C/R=1.5$ 程度が適当と考えられる。Fig. 4は $r_0/R=0.9$, $C/R=1.5$, $n=0.129$ のとき, 色々な θ に対する電子線の軌道を示した

Fig. 4 Electron trajectories passing through the potential interface of $(r_0/R)=0.9$ and $(C/R)=1.5$. This figure shows that LEED pattern observed by the present MCP-LEED system coincides with the pattern on the spherical fluorescent screen of radius C . All dimensions are normalized by R .

ものである。各軌道がMCPと交わる点からLEED像観察方向に平行に, 半径 C の円に向かって延した破線と, 領域1における軌道をそのまま延長した破線は円周上で交差しており, Fig. 4の電位界面を用いることによってMCP上で歪みのないLEED像が得られることがわかる。

通常のLEED装置では, 鮮明なLEED像を得るため

Fig. 5 Variation of ΔW with energy difference $\Delta V/V_1$.

2次電子や非弾性散乱電子を阻止し、弾性散乱から1～2 eV 低いエネルギーまでの電子を蛍光スクリーン上に投影させている。従って弾性散乱電子に対して計算された電位界面に、エネルギーが数 eV だけ低い電子線が入射したとき、MCP 上にどの程度のずれをもって到達するかを求めなければならない。試料面で弾性散乱された電子が、Fig. 2 の電位界面を通過する前後のエネルギーをそれぞれ eV_1 , eV_2 であるとすれば、 $e\Delta V$ だけエネルギーの低い電子の場合には、通過前後のエネルギーはそれぞれ $e(V_1 - \Delta V)$, $e(V_2 - \Delta V)$ である。従って ΔV だけエネルギーの低い電子に対する界面の屈折率は

$$n' = \sqrt{\frac{V_1 - \Delta V}{V_2 - \Delta V}} \quad (8)$$

で表わされる。いまエネルギー eV_1 で試料から放出された電子が MCP 上で中心から W の位置に到達するとき、エネルギー $e(V_1 - \Delta V)$ をもつ電子の到達する位置を W' とする。 W および W' は θ および n (または n') の関数であるから、それぞれ $W(\theta, n)$, $W'(\theta, n')$ と表わし、エネルギー幅 ΔV による到達位置のずれを次のように定義する。

$$\Delta W(\theta) = \frac{W(\theta, n) - W'(\theta, n')}{W(\theta, n)} \quad (9)$$

Fig. 5 は $C/R=1.5$ および $r_0/R=0.9$ の場合について、 θ をパラメータとし $\Delta V/V_1$ に対する ΔW の変化を求めた結果である。電位界面に対する電子の入射角 (Fig. 2 における ϕ_1) が 0 に近い $\theta=50^\circ$ 付近で最も ΔW が小さくなり、入射角が増すに従って ΔW が増加している。実際の LEED 像観察の場合、 $eV_1=20$ eV, $e\Delta V=2$ eV と

して $\Delta V/V_1=0.1$ であるから ΔW は最大値を与える $\theta=10^\circ$ においても 0.003 程度である。この値は既に報告されている LEED 像の測定精度⁴⁾と同等以上であり、実用上問題にならないと考えられる。他の r_0 および C の組合せに対して、 $0.7 \leq r_0/R \leq 0.9$, $1.3 \leq C/R \leq 1.5$ の範囲内で ΔW を求めたところ $\Delta V/V_1=0.1$ における ΔW の最大値は 0.003 程度であり、 r_0 および C に殆んど依存しないことがわかった。

3. 結 論

チャンネル型二次電子増倍板 (MCP) を用いた LEED 装置において、歪みのない回折像を得るための電位界面の形状を解析し、得られた数値解のなから治具を用いたメッキ法で成形が可能な形状を求めることができた。また、色収差による LEED 像のぼけの効果について検討したが、格子定数測定等にも十分適用できる程、その影響は少ないことがわかった。本報告では V_1 , V_2 の電位界面を仮定して形状を解析したが、実際には界面は V_1 , V_2 の電位をもつ 2 枚のグリッドによって形成される。この 2 枚のグリッド間隙が有限の場合には当然、間隙が 0 であるような理想的電位界面で偏向を受けると考えた場合に対し、LEED 像の位置ずれが生じる。しかしながら、この間隙の影響について定量的評価を行ったところ、グリッド間隙が試料と MCP 間の距離の 4% であっても、本研究で求めた無限小間隙の界面と比較した回折像の位置ずれは 1% 以下であり、実用上差しつかえないことが明らかになっている。実際の MCP 付 LEED 装置は、今回解析を行った非球面グリッドと試料の間に

通常の4枚グリッドLEED装置と同様の，非弾性散乱電子を阻止するための球面グリッドシステムを配置して構成される。

〔文 献〕

- 1) H. H. Farrell, M. Strongin and J. M. Dickey:
Phys. Rev. **B6** (1972) 4703.
- 2) M. D. Chinn and S. C. Fain, Jr.: J. Vac. Sci.
Technol. **14** (1977) 314.
- 3) 小野雅敏, 朴 淳: 真空 **15** (1972) 450.
- 4) C. G. Shaw and S. C. Fain, Jr.: Surface Sci.
83 (1979) 1.