

Holographie Electronique Off-Axis: Applications, limites, et perspectives.

Cyril Ailliot ^{a,*}, François Bertin ^a, David Cooper ^a, Pierrette Rivallin ^a

^a LETI, CEA, 17 rue des Martyrs, 38054 Grenoble Cedex 9

Résumé L'Holographie Electronique est une technique de caractérisation séparant la phase et l'amplitude d'une onde porteuse. La phase change selon le potentiel rencontré par l'onde, ainsi que le champ magnétique, qu'ils soient dans un matériau ou à distance. En particulier, on peut caractériser la concentration de dopants en sites actifs. Cette technique possède une résolution spatiale théorique sub-nanométrique et une sensibilité au potentiel excellente ; qui ne sont pas atteints en raison de difficultés dans la préparation d'échantillons. Cette présentation s'intéressera aux limites de la technique, ainsi qu'à ses avantages et inconvénients.

1. Principe de l'Holographie Electronique Off-Axis

L'Holographie Electronique est une technique de caractérisation par Microscopie Electronique. Contrairement à l'imagerie TEM classique, cette technique permet de séparer la phase et l'amplitude de l'onde porteuse. On obtient cette information par l'interférence d'une onde électronique de référence avec une onde porteuse. L'Holographie électronique nécessite une source la plus cohérente possible afin d'obtenir une plage d'interférence étendue. On utilise un Biprisme, un fil de très faible épaisseur porté à un potentiel pour dévier les faisceaux autour de lui, ce qui crée deux sources secondaires. La première est la source de référence, la seconde celle de l'onde porteuse du signal.

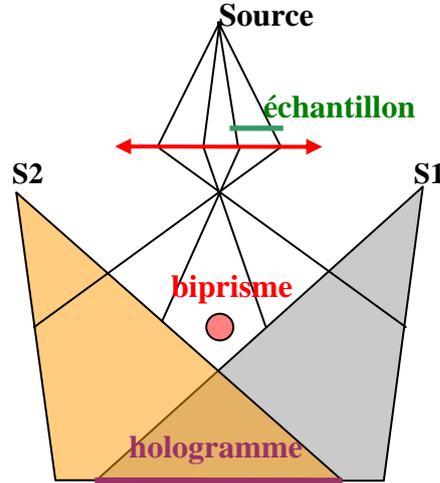


Figure 1 : Schéma de principe de l'Holographie Electronique Off-Axis

Soit r le vecteur des coordonnées d'un point de la projection de la surface de l'échantillon sur l'écran ou se forme l'hologramme. On se place dans l'hypothèse d'une lame ultramince. L'onde de référence quant à elle est une onde plane caractérisée par un vecteur d'onde q relatif à la position des deux sources. On obtient le signal dans le plan de l'écran en sommant les deux ondes, et son intensité par la norme du signal.

$$S(\vec{r}) = A(\vec{r}) \times e^{i\varphi(\vec{r})} + e^{iq \cdot \vec{r}} \quad (1)$$

$$I(\vec{r}) = S(\vec{r}) \times \overline{S(\vec{r})} = 1 + A(\vec{r})^2 + A(\vec{r}) \times 2 \cos(2\Pi\vec{q} \cdot \vec{r} + \varphi(\vec{r})) \quad (2)$$

Où $A(r)$ est l'amplitude et $\varphi(r)$ la phase de l'onde porteuse en r . La transformée de Fourier de l'intensité se compose de trois termes : un pic central et deux bandes latérales. Le pic central est deux fois plus étendu qu'une bande latérale.

$$F(I(\vec{r})) = \delta(\vec{u}) + F(A(\vec{r})^2) + \delta(\vec{u} - \vec{q}) \otimes F(A(\vec{r}) \times e^{i\varphi(\vec{r})}) + \delta(\vec{u} + \vec{q}) \otimes F(A(\vec{r}) \times e^{-i\varphi(\vec{r})}) \quad (3)$$

Les informations concernant la phase sont contenues dans les bandes latérales. En isolant une des bandes qu'on centre sur la fréquence nulle (simple translation dans l'espace de Fourier), puis en réalisant une transformée de Fourier inverse ; on obtient une image complexe dont l'amplitude et la phase sont celles du signal [1].

2. Caractérisation par Holographie Electronique

L'Holographie Electronique permet de conserver l'information sur la phase de l'échantillon. Dans l'approximation d'une lame mince, la phase est reliée au potentiel V et au champ magnétique B rencontrés par l'onde. Ici, on considère que r défini plus haut se projette sur un repère par x et y .

* Auteur à contacter : cyril.ailliot@cea.fr

$$\varphi(x, y, z) = CE \int_{Ez} V(x, y, z) d(z) - \frac{e}{h} \iint_{S_{norm}} B(x, y) d(s) \quad (4)$$

Où CE est une constante dépendant de l'énergie des électrons, e la charge de l'électron, et h la constante de Planck. Ez est le parcours d'intégration selon le trajet de l'onde, S_{norm} est une surface d'intégration normale au faisceau.

On utilise l'Holographie Electronique pour caractériser soit le champ magnétique, soit le potentiel ; dans un matériau, ou autour dans le vide. On peut donc caractériser les champs électrique et magnétiques autour d'un dispositif (une pointe MFM par exemple), le profil de dopants, et la présence de particules magnétiques [2].

Si on se place en absence de champs magnétique, et dans l'hypothèse d'un potentiel du au matériau seul et indépendant de l'épaisseur, on obtient

$$\varphi(x, y, z) = CeV_m(x, y) \times t(x, y) \quad (5)$$

Avec V_m le potentiel moyen aux coordonnées (x, y) , t l'épaisseur du matériau. Dans le cas de la détection de dopants, le potentiel est lié à la concentration de sites dopés actifs, l'Holographie Electronique permet de caractériser le dopage d'un échantillon.

3. Limites de l'Holographie Electronique

La limite de résolution spatiale théorique de l'Holographie est liée à la formation de l'hologramme. Des considération sur la transformé de Fourier, on trouve une résolution de trois fois l'interfrange de l'hologramme [1]. En théorie, on peut obtenir une résolution sub-nanométrique et une excellente sensibilité en potentiel. Néanmoins, celles-ci sont dominées par les artefacts de préparation (couche amorphe lors de préparation FIB des échantillons, parallélisme et planéité des faces de l'échantillon), Les franges de Fresnel réalisées par la diffraction de l'onde par le biprisme, les effets d'illumination et de charge de l'échantillon (qui modifient la structure électronique de l'échantillon), Les artefacts induits par la diffraction dynamique de l'échantillon (dans le modèle utilisé, l'onde directrice de l'échantillon n'est pas déviée, alors que la diffraction produit plusieurs ondes secondaires selon les directions du cristal).

4. Conclusion

Lors de cette présentation seront montrés les limites de l'Holographie Electronique Off-Axis pour la caractérisation des profils de dopants. L'Holographie sera également comparée au autres techniques alternatives de caractérisation, afin de déterminer ses avantages et inconvénients, et de montrer la pertinence et les possibilités celle-ci.

5. Références

- [1] P.A Midgley, *An introduction to off-axis electron holography*, Micron. **32** (2001) 167-184
- [2] R.E Dunin-Borowski, M.R McCartney et. D.J Smith, *Electron Holography of nanostructured Materials*, Encyclopedia of nanoscience and nanotechnology. **10** (1-59)