原 著

固体飛跡検出器を用いた中性子計測のための光学計測装置の開発

服 部 知 彦・本 間 光 彦*・渡 邊 令

名古屋大学医療技術短期大学部診療放射線技術学科

*名古屋大学医学部附属病院放射線部

(論文受理 1992年 6 月 8 日)

(最終論文受理 1993年 3 月19日)

(Code No. 890)

Key words: Optical device, Neutron, Fluence, Etch pits

DEVELOPMENT OF AN OPTICAL DEVICE FOR NEUTRON DOSIMETRY
USING SOLID STATE TRACK DETECTOR

TOMOHIKO HATTORI, MITSUHIKO HONMA* and TSUKASA WATANABE

Department of Radiological Technology, Nagoya University College of Medical Technology

*Department of Radiology, Nagoya University Hospital

Summary

An optical device, like a microscope phase-contrast, is described in this paper. It is theoretically explained that the properties regarding a perceptible transformation of a transparent image. The approximate analytic formula of these properties are compared with the experimental data in which a transparent image to a perceptible image using a correct spatial filter at montage de double diffraction. This optical device is able to compute the neutron fluences concerning etch pits which was originated by ^{252}Cf neutron beams' exposure, because the output illuminance of the etch pits due to this optical device were directly proportional to the concerned neutron fluence.

1. はじめに

生きた細胞, 組織などは無色透明で, 屈折率が周囲と異なる物体を多く含み, コントラストが極めて低い. また, 中性子フルエンスの測定に用いられる固体飛跡検出器 (エッチピット) も, 透明なベースに透明で微小な複

数の穴があいている. このような透明な物体を観察するための光学機器として, 1935年に Frits Zernike が考案した位相差顕微鏡がある. この位相差顕微鏡は, 観察物体の屈折率の増加に対して観察像の輝度が単調に変化せず, 明暗が反転する等の欠点を有している¹⁾. よって, エッチピットを位相差顕微鏡に入力し, その全個数を実時

固体飛跡検出器を用いた中性子計測のための光学計測装置の開発 (服部・他)

間で計測することは困難と思われる。

今回我々は、この欠点が生じないレーザー光源および二重回折装置²⁾を応用した光学計測装置を考案した。よってこの光学計測装置の理論的考察および基礎実験データを示すものである。

2. 方 法

Fig. 1 の如くレーザー光源を用いたコヒーレント結像系を設定する。 f_1 は凸レンズ SL_1 の焦点距離、 f_2 は凸レンズ SL_2 の焦点距離である。この装置の画像入力面 P_1 に種々の中性子フルエンスに当該するエッチピットを配置する。この状態で画像入力面 P_1 での直流成分を遮断するため、透明なアクリル板に $0.5\text{ mm}\phi$ の金属片を光軸に張り付けた、黒化銀粒子 (写真) により光軸より離れるにしたがい透明度が増すフィルターを、 P_2 面に配置する。

さらに、種々の固体飛跡検出器の P_1 面での入力に対する P_3 面での出力像の照度 (lx) を測定する。ただし、入力固体飛跡検出器は長瀬ラングウア株式会社により ^{252}Cf 中性子線を標準照射した TS-16N をそのフルエンスあたりそれぞれ 5 個使用した。そのフルエンスは 0.552×10^7 (n/cm²)、 1.104×10^7 (n/cm²)、 1.656×10^7 (n/cm²) であった。また中性子線を照射しなかった固体飛跡検出器も 3 個使用した。

Fig. 1 Experimental schematic of a new type optical microscope with a montage de double diffraction and laser beam.

3. 結 果

Fig. 2 の如く、入力エッチピットの中性子フルエンスとその出力像照度とは比例関係 ($y = 9.40 \times 10^{-9}x + 4.99 \times 10^{-2}$ 相関係数: 9.99×10^{-1}) であった。

4. 考 察

Fig. 2 An approximate line concerning illuminance (lx) at plane P_3 as a function of the neutron fluence of the etch pit chip at plane P_1 .

Fig. 3 の P_1 面に無色透明なエッチピットを有する固体飛跡検出器を入力した場合の P_3 面における出力像について考察する。この入力像は無色透明であり、またエッチングによる直径 D 深さ d の微細な円筒形のホールが存するものとする。**Fig. 4** の如く、厚さ d で直径 D の穴のあいた不透明物体を P_1 面に入力したときのその物体による光波の振幅透過分布を、 $g_A(x, y)$ とする。厚さ d で直径 D の不透明な円筒物体が存する屈折率が n_2 の無色透明物体を P_1 面に入力したときの、その物体による光波の振幅透過分布を $g_B(x, y)$ とする。ただし $g_A(x, y)$ の穴と $g_B(x, y)$ の不透明円筒物体とは同じ位置であるものとし、空気屈折率を n_1 とする。エッチピットのような透明物体の回折による光波の振幅分布 $U(\xi, \eta)$ は、バビネの原理により、 $g_A(x, y)$ と $g_B(x, y)$ により回折した光波の振幅分布 $U_A(\xi, \eta)$ と $U_B(\xi, \eta)$ を加算すればよい。ただし空気と固体飛跡検出器のプラスチックとは屈折率が異なるので、 $U_A(\xi, \eta)$ と $U_B(\xi, \eta)$ とでは $e^{i\frac{n_1 - n_2}{\lambda}d}$ の位相差が生じる。 P_2 面にフィルターがないとき P_3 面における光波の振幅分布 $g(x', y')$ は

Fig. 3 Montage de double diffraction for coherent processing.

Fig. 4 Schematics of the diffraction geometry of the etch pit as a result of the Babinet principle.

$$g(x', y') = \frac{-iAe^{ikf}}{\lambda f} \{g_A(-x, -y) + e^{\frac{n_1 - n_2}{\lambda} d} \cdot g_B(-x, -y)\} \dots \dots \dots (1)$$

である。ただし

$$g_A(-x, -y) + g_B(-x, -y) = 1$$

であり、

$$g_A(-x, -y) = 1 \text{ or } 0, \quad g_B(-x, -y) = 0 \text{ or } 1$$

であるから

$$g(x', y') = \frac{-iAe^{ikf}}{\lambda f} \text{ or } \frac{-iAe^{l(kf + \frac{n_1 - n_2}{\lambda} d)}}{\lambda f}$$

である。よって P_3 面の座標 (x', y') による光波の強度の変化はない。よって固体飛跡検出器面に垂直に透過光を当てた場合、そのエッチピットの肉眼による観察は困難と思われる。実際に300倍の光学顕微鏡によるエッチピットのホールの観察はしづらい。Fig. 5 は、Fig. 1 の光学系に対し、空間フィルタをはずした場合で、Fig. 6 は空間フィルタを付けた状態での P_3 面での写真像である。これから、この装置により完全に透明な固体飛跡検出器が可視像になることが分かる。 P_2 面での光波は

$$U(\xi, \eta) = \frac{-iAe^{ikf}}{\lambda f} \left\{ G_A\left(\frac{\xi}{\lambda f}, \frac{\eta}{\lambda f}\right) + e^{\frac{n_1 - n_2}{\lambda} d} \right.$$

Fig. 5 Output image of the etch pits at plane P_3 without a spatial filter.

Fig. 6 Output image of the etch pits at plane P_3 with a correct spatial filter.

$$\cdot G_A\left(\frac{\xi}{\lambda f}, \frac{\eta}{\lambda f}\right) \} \dots \dots \dots (2)$$

である。透過率分布が $T\left(\frac{\xi}{\lambda f}, \frac{\eta}{\lambda f}\right)$ であるフィルターを P_2 面におくと、 P_3 面における出力は

$$g(x', y') = \frac{iAe^{ikf}}{\lambda f} \left[F^{-1} \left\{ G_A\left(\frac{\xi}{\lambda f}, \frac{\eta}{\lambda f}\right) \cdot T\left(\frac{\xi}{\lambda f}, \frac{\eta}{\lambda f}\right) \right\} \right. \\ \left. + e^{\frac{n_1 - n_2}{\lambda} d} \cdot F^{-1} \left\{ G_B\left(\frac{\xi}{\lambda f}, \frac{\eta}{\lambda f}\right) \right. \right. \\ \left. \left. \cdot T\left(\frac{\xi}{\lambda f}, \frac{\eta}{\lambda f}\right) \right\} \right] \dots \dots \dots (3)$$

である。本装置においては、 $T\left(\frac{\xi}{\lambda f}, \frac{\eta}{\lambda f}\right)$ は直流成分をカットするハイパスフィルターであるので、エッチピットのホールのように微細で高い周波数成分を多く含むものは、その部分が、 $g_A(x, y)$, $g_B(x, y)$ とともに強調³⁾される。また P_1 面に、まったくホールがない無色透明なエッチピットを入力したときの P_2 面での光波の振幅は、光

固体飛跡検出器を用いた中性子計測のための光学計測装置の開発 (服部・他)

軸の付近のみに直流成分として存する。よってバビネの原理により、直流成分以外においては

$$G_A\left(\frac{\xi}{\lambda f}, \frac{\eta}{\lambda f}\right) + G_B\left(\frac{\xi}{\lambda f}, \frac{\eta}{\lambda f}\right) = 0 \quad \dots\dots\dots(4)$$

が成り立つ。よって

$$F^{-1}\left\{G_A\left(\frac{\xi}{\lambda f}, \frac{\eta}{\lambda f}\right) \cdot T\left(\frac{\xi}{\lambda f}, \frac{\eta}{\lambda f}\right)\right\} + F^{-1}\left\{G_B\left(\frac{\xi}{\lambda f}, \frac{\eta}{\lambda f}\right) \cdot T\left(\frac{\xi}{\lambda f}, \frac{\eta}{\lambda f}\right)\right\} = 0 \quad \dots\dots\dots(5)$$

である。式(3)に式(5)を代入すると、

$$g(x', y') = \frac{-iA}{\lambda f} F^{-1}\left\{G_A\left(\frac{\delta}{\lambda f}, \frac{\eta}{\lambda f}\right) \cdot T\left(\frac{\xi}{\lambda f}, \frac{\eta}{\lambda f}\right)\right\} \cdot \left\{e^{ikf} - e^{i(kf + \frac{n_1 - n_2}{\lambda} d)}\right\} \quad \dots\dots\dots(6)$$

これらの結果より、光波の強度は入力面 P_1 のエッチピットのホールの数に比例し、ホールの深さ、ホールの形状、エッチピットのプラスチックの屈折率や空間フィルターの振幅透過分布に依存することが分かる。実験結果の Fig 2 の中性子フルエンスの値が 0 のとき、 $d=0$ であるが、出力面照度は 0 でなかった。これは、固体飛跡検出器のエッチングの際のキズや、本装置の光学系の回折光がノイズとして現われている。この光学系の回折光を完全に取り除くことは光学理論上不可能であるが、それはわずかであることから、ほとんどはエッチングの際に生じるノイズと思われる。実際に Fig. 2 において、入射中性子フルエンスと出力像照度とは比例しているため、本装置でエッチピットの中性子フルエンスを計測するためには、出力面照度を測定すればよい。ただし、エネルギー分布の異なる中性子場では以下に述べる方法が有効と思われる。エネルギーの異なる中性子線によるエッチピットの穴の大きさはそのエネルギーにより変化する⁴⁾ので、本装置ではエッチピットの穴により回折したレーザー光がフィルター面 P_2 を通過する際、その光波の振幅分布は式(2)より、中性子線のエネルギーにより異なることになる。よって、面 P_2 のフィルターに関して、光軸からその周囲へ離れるにしたがい変化する光透過率の変化が異なる最低二種類のフィルターを用意する。このフィルターを使用した時のそれぞれの出力像照度の比の値と中性子線のエネルギー分布との関係を予め求めておくことにより、その比の値を実際に計測すれば、その中性子線のエネルギー分布を推定できる。よって該当するエネルギー分布の際の中性子フルエンスと出力照度との関係を予め求めておけば、該当するエネルギー分布の範囲であれば異なるエネルギー分布の中性子場でも対応でき

る。また本装置では多数のエッチピットを固体飛跡検出器の全面積を実時間で演算処理できるので、従来から行われている 300 倍の顕微鏡下で 3.363 mm^2 の面積を肉眼で数える方法よりも、統計的変動が少なく測定時間も短縮される。最近では固体飛跡検出器のエッチピットの自動計測をテーマとした報告も多く⁵⁻¹⁰⁾ 本法もその一法といえる。

5. 結 論

レーザー光源および二重回折装置を応用した本光学計測装置は、画像入力面に同一エネルギー分布での中性子照射された固体飛跡検出器のエッチピットを入力することにより映像出力面での固体飛跡検出器の出力像の輝度と、その中性子フルエンスとは比例関係である。また本装置に適切な最低 2 種類の空間フィルターを使用することにより固体飛跡検出器に検出された中性子のエネルギー分布情報も得られる。

なお、本論文の要旨の一部は第 24 回日本放射線技術学会中部部会において発表した。

謝 辞

本研究に使用しました、中性子照射後エッチング処理されたエッチピット (TS-16N) の貸与および技術上の助言をいただきました長瀬ラングウア株式会社、技術部長、安淵四郎氏に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Robert Barer: 世界理化学辞典, Vol. 1, 271, 講談社, (1977).
- 2) 服部知彦: コヒーレント結像系における光デバイスとしての液晶板の特異性, 21, 日本放射線医学会物理部会誌, 8(1), (1988).
- 3) 辻内順平: 応用画像解析, 146, 共立出版株式会社, (1982).
- 4) 鶴田隆雄, 磯部吟子: CR-39 プラスチック中の粒子飛跡のエッチング特性, 134, 保健物理, 19(2), (1984).
- 5) Trakowski, W., et al.: Automatic measuring system for particle tracks in plastic detectors. Nucl. Instr. meth. in Phys. Res. 225: 92-10, (1984).
- 6) Majborn B., et al.: Automated counting and analysis of etched tracks in CR-39 plastic. Rad. Protection Dosimetry. 17: 153-155, (1986).
- 7) Dreute J., et al.: The siegen automatic measur-

-
- ing system for nuclear track detectors status and new developments. Nuclear Tracks. 12: 261-264, (1986).
- 8) Birkhoz W., et al.: Computer aided evaluation of SSNTD. Nucl. Tracks Radiat. Meas. 15: 281-285, (1988).
- 9) Noll A., et al.: The siegen automatic measuring system for nuclear track detectors: New developments. Nucl. Tracks Radiat. Meas. 15: 265-268, (1988).
- 10) 藤元憲三, 他: 固体飛跡検出器のトラック計測における重なるの補正方法, 保健物理, 25: 129-133, (1990).