

1. Дементьев Е.Г. *Элементы общей теории и расчета шумящих линейных цепей*. М., 1963.
2. Ван-дер-Зил А. *Шум: источники, описание, измерение*. М., 1973.
3. Суходоев И.В. *Шумы электрических цепей (теория)*. М., 1975.
4. P. Dub, V. Nichoga, L. Mizuk, *On a New Approach to an Evaluation of Noise Parameters of Amplifiers for Signal Preliminary Processing // Proceedings of the EURASIP Conference on DSP for Multimedia Communications and Services (ECMCS'99) (CD-ROM, paper 14), Krakow, 1999.*
5. Дуб П.Б., Ничога В.А. О шумовом согласовании индукционного магнитоприемника с предварительным усилителем при трансформаторной схеме входной цепи // *Отбор и передача информации*. 1980. Вып.61. С. 79-86.
6. Крейнгель Н. С. *Шумовые параметры радиоприемных устройств*. Л., 1969.
7. Галкин В. Н. *Полевые транзисторы в чувствительных усилителях*. Л., 1974.
8. Мизюк Л.Я. Преобразование эквивалентных шумовых схем активного четырехполюсника и взаимосвязь их шумовых параметров // *Отбор и передача информации*. 1984. Вып.69. С. 71-79.
9. Мизюк Л.Я., Мизюк Г.Л. *Шумовые параметры усилителя* // *Отбор и передача информации*. 1981. Вып.63. С.60-72.
10. Мизюк Г.Л. О сравнении двух вариантов эквивалентной шумовой схемы усилителя // *Отбор и передача информации*. 1980. Вып.61. С. 73-79.
11. Мизюк Л.Я. *Шумовое согласование в резонансном усилителе* // *Отбор и передача информации*. 1983. Вып.67. С.61-70.
12. Мизюк Г.Л. Сравнение условий шумового согласования источника сигнала с усилителем для двух вариантов его эквивалентной шумовой схемы // *Отбор и передача информации*. 1983. Вып.67. С. 71-76.
13. Громов В.И., Мошинский А.Е. Измерение первичных шумовых параметров усилителей различных типов // *Отбор и передача информации*. 1985. Вып.71. С. 93-99.
14. T. Ken Matsudaira *Noise Behavior of Pralleled Linear Amplifiers // Journal of the audio engineering society, October, Vol. 22, Number 8, 1974, P. 602-613.*
15. *Analog Divices linear product databook: April 1998, Analog Devices Inc., 1998.*

УДК 621.385; 681.4

Педан Анатолій, Березіна Мирослава

ДУ “Львівська політехніка”, кафедра радіотехнічних пристроїв

АНАЛІЗ СПЕЦИФІКИ СКАНУВАННЯ ОБ'ЄМНИХ МІКРООБ'ЄКТІВ БІКОНІЧНИМ СВІТЛОВИМ ЗОНДОМ

© Педан Анатолій, Березіна Мирослава, 2000

У статті розглядаються засоби геометричної оптики передання границь тестових непрозорих об'ємних мікрооб'єктів в скануючому оптичному мікроскопі.

This work is dedicated to analyse the process of opaque volume microobject edges reproducing in a scanning optical microscope by means of geometrical optics.

У скануючому оптичному мікроскопі [1] об'єкт опромінюється рухомим точковим джерелом світла, потік якого формується об'єктивом у біконічний зонд для роботи мікроскопа на провіт. Об'єкт розташовується в площині фокусування зонда, тобто біля

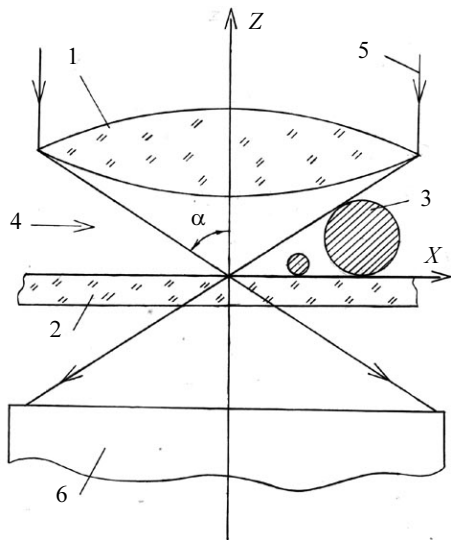


Рис.1. До сканування об'єкта біконічним зондом: 1 - об'єктив; 2 - підкладка; 3 - фрагмент об'єкта; 4 - напрям сканування; 5 - проєкційний промінь; 6 - світлоперетворювач.

фрагмента об'єкта, товщина якого навіть близько кількох десятків мікрметрів, примушують трактувати його як просторовий з порівняно значною товщиною.

Розглянемо в межах геометричної оптики спрощену модель взаємодії світлового зонда з тестовим об'єктом у вигляді протяжного непрозорого циліндра. Для оцінкового

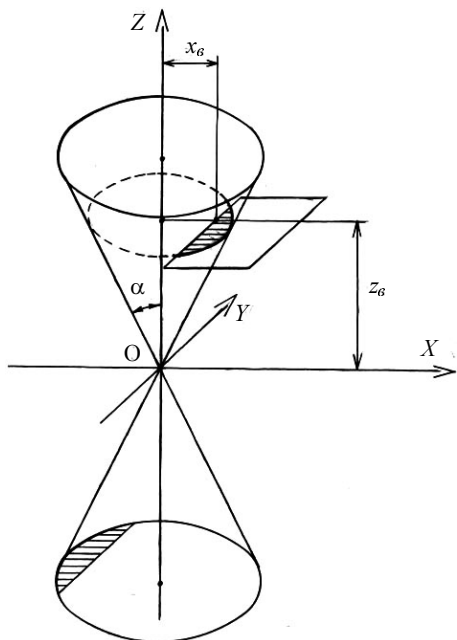


Рис.2. До розрахунку затінення біконічного світлового зонда півплощиною.

вершини світлового конуса, що сходиться. Після проходження через об'єкт світловий конус розходиться і сприймається світлоперетворювачем. Такий біконічний світловий зонд поточно сканує об'єкт, що приводить до модуляції світлового потоку та появи відповідного електричного сигналу, на базі якого формується просвітне зображення об'єкта на дисплеї. Кут α між твірною біконічного зонда (рис.1) та його віссю визначається об'єктивом мікроскопа і при великих кратностях збільшення є порівняно великим (наприклад, у об'єктива планapoхромат ОПА-4 зі збільшеннями $60\times$ $\alpha=58^\circ$, тобто конус має при вершині тупий кут). Під час сканування об'єкта таким зондом фрагмент з більшою товщиною буде починати затінювати світловий потік раніше, ніж фрагмент меншої товщини, що призведе до більшого розмивання границь. Якщо роздільна здатність скануючого оптичного мікроскопа дорівнює половині довжини світлової хвилі (наприклад, 0,27 мкм), розміри

фрагмента об'єкта, товщина якого навіть близько кількох десятків мікрметрів, примушують трактувати його як просторовий з порівняно значною товщиною. Розглянемо в межах геометричної оптики спрощену модель взаємодії світлового зонда з тестовим об'єктом у вигляді протяжного непрозорого циліндра. Для оцінкового математичного описання затінення біконічного зонда циліндричним об'єктом (як, наприклад, при калібруванні масштабу збільшення скануючого мікроскопа скануванням ортогональної сітки з мікродроти, геометричні параметри якої відомі) скористаємося геометричними побудовами перерізу конуса ортогональною півплощиною (рис.2), яка знаходиться на висоті z_0 від вершини конуса з кутом при вершині 2α і на відстані x_0 від осі конуса. На цій висоті переріз конуса утворює круг, сегмент якого затінюється півплощиною. Площа цього круга визначається через z_0 і α як, $S_0 = \pi \cdot z_0^2 \cdot \tan^2 \alpha$, а сегмента [2]

$$S_{\text{сегм}} = \frac{\pi \cdot z_0^2 \cdot \tan^2 \alpha}{180^\circ} \cdot \arccos \frac{x_0}{z_0 \cdot \tan \alpha} - x_0 \sqrt{z_0^2 \cdot \tan^2 \alpha - x_0^2}.$$

При рівномірному розподілі світлового потоку по площі перерізу конуса затінена півплощиною частка потоку може бути записана так:

$$\frac{S_{\text{зат.г.}}}{S_0} = f_0 = \frac{1}{180^\circ} \cdot \arccos \frac{x_0}{z_0 \cdot \tan \alpha} - \frac{x_0 \sqrt{z_0^2 \cdot \tan^2 \alpha - x_0^2}}{\pi z_0^2 \tan^2 \alpha}.$$

При затіненні біконічного зонда циліндром з радіусом r , вісь якого ортогональна до осі зонда, положення границі уявної півплощини x_6 буде залежати від r , який також однозначно визначає і z_6 як висоту точки дотику твірної конуса до поверхні циліндра (рис.3). Якщо циліндр симетрично затіняє верхній і нижній конуси, то частка затінення світлового потоку подвоїться.

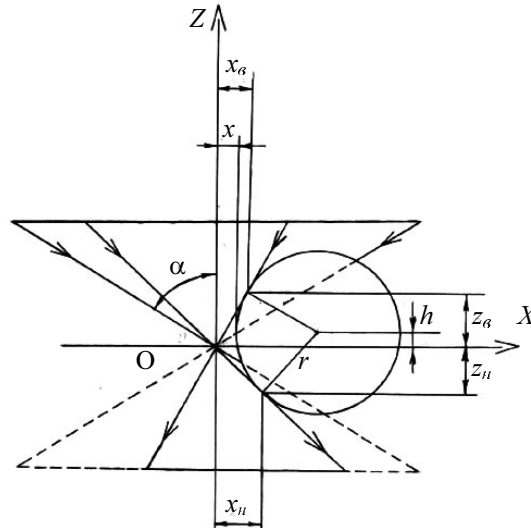


Рис.3. До розрахунку затінення біконічного світлового зонда циліндром.

Якщо вісь циліндра зміщена вздовж осі Z на відстань h , верхній і нижній затінені сегменти (для спрощення розрахунків доцільно скористатися наближеними формулами визначення площі сегмента [3]) будуть різними і відповідно їх частки затінення f_6 і f_H теж відрізнятимуться:

$$f_6(x) = \frac{\sqrt{7z_6^2 \operatorname{tg}^2 \alpha - 8x_6 z_6 \operatorname{tg} \alpha + x_6^2}}{\sqrt{3\pi z_6 \operatorname{tg} \alpha}} - \frac{x_6 \sqrt{z_6^2 \operatorname{tg}^2 \alpha - x_6^2}}{\pi z_6^2 \operatorname{tg}^2 \alpha},$$

$$f_H(x) = \frac{\sqrt{7z_H^2 \operatorname{tg}^2 \alpha - 8x_H z_H \operatorname{tg} \alpha + x_H^2}}{\sqrt{3\pi z_H \operatorname{tg} \alpha}} - \frac{x_H \sqrt{z_H^2 \operatorname{tg}^2 \alpha - x_H^2}}{\pi z_H^2 \operatorname{tg}^2 \alpha},$$

$$\text{де } z_6 = \frac{1}{p} \left[r(r+x) \sqrt{p-r^2} + h(p-r^2) \right], \quad z_H = \frac{1}{p} \left[r(r+x) \sqrt{p-r^2} - h(p-r^2) \right],$$

$$x_6 = \sqrt{p-r^2-z_6^2}, \quad x_H = \sqrt{p-r^2-z_H^2}, \quad p = (r+x)^2 + h^2.$$

Сумарна частка затінення зонда складатиме $f_\Sigma = f_6 + f_H$, оскільки затінення верхнього і нижнього конусів створює тіні на фотоприймачі з двох протилежних сторін. Оскільки в даному випадку використовується непрозорий об'єкт, то доцільно розглядати частку затінення f_Σ параметром зображення об'єкта, який при повному перекритті зонда дорівнює одиниці.

Якщо вибрані об'єкти (тобто задане значення α) та радіус циліндра r , практичне значення має зміщення h , яке змінюється під час оптичного фокусування до одержання найчіткішого зображення. Аналіз побудови на рис.3 показує, що при зближенні зонда і об'єкта найменша відстань x між ними, при якій ще відсутнє затінення, спостерігається при $h = 0$, тобто точка фокусування зонда повинна лежати в ортогональній до нього площині,

яка проходить через вісь циліндра. Оскільки об'єкти різного діаметра знаходяться на поверхні підкладки (рис.1), то для одержання найчіткішого зображення границь об'єктів різного розміру необхідно змінювати положення точки фокусування по висоті.

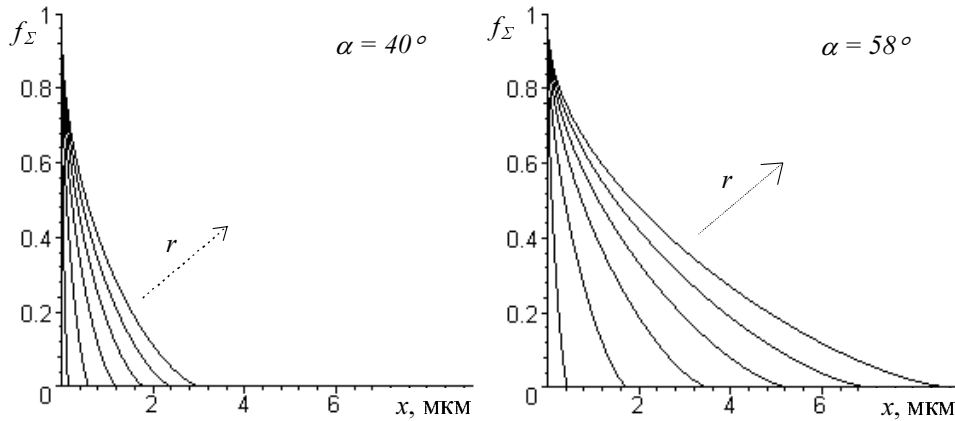


Рис.4. Затінення біконічного зонда циліндрами різних радіусів ($r = 0,5; 2; 4; 6; 8; 10$ мкм).

За наведеними вище формулами проведено розрахунки сімейства кривих f_{Σ} для різних діаметрів об'єкта та числових апертур об'єктивів за умови, що $h = 0$. Одержані результати, які адекватно співвідносяться з експериментальними спостереженнями, подані на рис.4.

Аналіз наведених кривих показує, що при скануванні об'ємних мікрооб'єктів, в даному випадку протяжного циліндра біконічним світловим зондом спостерігається виразна залежність розмиття границі об'єкта від його товщини, проте сама лінія границі чітко означена великою крутизною спадання освітленості. Це явище обумовлене одночасним затіненням верхньої і нижньої конічних частин зонда та пересуванням границь затінення при скануванні в переріз зонда з різною інтенсивністю світлового потоку. На зростання розмиття границь зображення об'єкта суттєво впливає і збільшення апертури об'єктива. Тому тестові об'єкти для калібрування граничних значень роздільної здатності скануючого оптичного мікроскопа при роботі на просвіт мають мати товщину, меншу від діаметра світлового зонда в точці фокусування. Найпридатнішими видаються тестові об'єкти, виконані напilenням металу на оптичні підкладки.

1. Дюков В.Г., Кудяров Ю.А. *Растровая оптическая микроскопия*. М., 1992. 2. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. *Справочник по математике* М., 1965. 3. *Краткий физико-технический справочник* / Под ред. К.П. Яковлева. М., 1960.