Тестування замкнених кіл класичного та модифікованого пристроїв ФАПЧ за однаково низьких ВСШ на їх входах показало, що імовірність бітових помилок у класичному пристрої становить близько 35 % посилань, а у модифікованому – менше 7 %.

Висновки

Аналізуючи результати досліджень та діаграми, отримані під час імітаційного моделювання, можна зробити висновок, що за допомогою модифікованого фазового детектора можливо виділити якісну зміну фази сигналу навіть за умов низького відношення сигнал/шум. Це, своєю чергою, надає можливість збільшити місткість систем передавання інформації, які використовують 8-позиційну фазову маніпуляцію.

1. Viterby A.J. The Orthogonal-Random Waveform Dichotomy for Digital Mobile Personal Communication // IEEE Personal Communications, First Quarter – 1994. – P. 18–24. 2. Стеклов В.К., Скляренко С.Н., Костик Б.Я. Системы фазовой автоподстройки с дифференциальными связями. – К.: Техніка, 2003. – 328 с. 3. Бондарєв А.П. Теоретичні засади аналізу завадостійкості пристроїв синхронізації // Вісник НУ "Львівська політехніка" "Радіоелектроніка та телекомунікації". – 2004. – № 508. – С. 3–18. 4. Бондарєв А.П., Мартинів М.С. Пристрій фазового автопідстроювання частоти // Патент України на винахід № 66435. – Бюлетень № 5, 2004.

УДК 621.385.832.82

А.Д. Педан, Б.І. Любинецька
Національний університет "Львівська політехніка"

ОСОБЛИВОСТІ ЮСТУВАННЯ СКАНУЮЧОГО ОПТИЧНОГО МІКРОСКОПА НА ОСНОВІ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ТРУБКИ

© Педан А.Д., Любинецька Б.І., 2009

Розглянуто питання юстування електростатичної фокусуючої лінзи електронно-променевої трубки скануючого оптичного мікроскопа. Запропоновано спосіб юстування з використанням квадрупольних магнітних полів. Наведено алгоритм процедури юстування.

The question adjustments an electrostatic focusing lens of an electron beam tube of a scanning optical microscope is considered. The way adjustment with use quadrupole magnetic fields is offered. The algorithm of procedure adjustment is resulted.

Вступ

Скануючий оптичний мікроскоп (СОМ) – це оптичний аналог растрового електронного мікроскопа (РЕМ) як структурного, так і алгоритмічного. У ньому, як і в РЕМ, є вакуум, електронно-оптична система, яка формує електронний зонд, електромагнітне поелементне сканування зондом досліджуваного об'єкта, давачі перетворення сигналу від об'єкта в електричний сигнал, обробка електричного сигналу та синтез зображення досліджуваного об'єкта на моніторі комп'ютера чи дисплеї. Принципова різниця полягає лише у тому, що в СОМ досліджуваний об'єкт розташовується поза межами вакууму, а вакуум не поновлюється.

Для здійснення сканування досліджуваного об'єкта поза вакуумом необхідно трансформувати кінетичну енергію корпускулярного електронного зонда в енергію електромагнітного випромінювання у світловому діапазоні, яке може через вакуумно щільне оптичне вікно безперешкодно вийти за межі герметизованого вакууму, в якому створюється і формується електронний зонд. Трансформацію енергії доцільно реалізовувати з використанням люмінес-

центного монокристала з огляду на його ідеальну просторову структуру та можливість штучно впливати на спектр та квантовий вихід люмінесценції.

Світлове випромінювання за допомогою оптичного мікроскопа формується у світловий зонд, який синхронно з електронним зондом сканує досліджуваний об'єкт на предметному столику оптичного мікроскопа. Світловий сигнал від кожного зісканованого елемента перетворюється в електричний сигнал, з якого поелементно синтезується зображення фрагмента. Така трансформація енергії дає змогу здійснити недосяжне в електронній мікроскопії – тривале дослідження живих біологічних об'єктів у природному для них середовищі. При цьому робочі значення коефіцієнтів збільшення СОМ завдяки поелементному скануванню та синтезу зображення сумірні з початковими значеннями таких у РЕМ і перевищують дифракційні обмеження в класичній оптичній мікроскопії, накладені хвильовою природою світла.

Оскільки тепер досліджуваний об'єкт знаходиться поза вакуумом, то відпадає необхідність відкачування та підтримування вакууму після кожної заміни об'єкта, як це відбувається в РЕМ, а також відпадає необхідність у спеціальній тривалій та затратній підготовці біологічних препаратів для їх дослідження у вакуумі під дією електронного бомбардування. Це докорінно змінює технічну конфігурацію апаратури: замість громіздкої вакуумної системи з форвакуумним та турбомолекулярним насосами камери зразків з дистанційно керованим робочим столиком препаратів, колони електронно-оптичної системи в СОМ використовується проекційна електронно-променева трубка (ЕПТ) високої роздільної здатності з катодолюмінесцентним монокристалічним екраном, габарити, маса та вартість якої на порядки менші від відповідної частини РЕМ.

ЕПТ відіграє в СОМ ту саму роль, що і колона електронно-оптичної системи в РЕМ, – формує електронний зонд. Для формування електронного променя в ЕПТ високої роздільної здатності переважно використовують, як і в РЕМ, осесиметричні фокусуючі електромагнітні лінзи з магнітопроводом [1].

1. Юстування магнітної осесиметричної лінзи

Основною умовою для одержання на екрані ЕПТ світної плями мінімальних розмірів є взаємна з'юстованість осі електронного променя з оптичною віссю лінзи. При цьому усувається вплив на траєкторії електронів аберацій третього порядку (кома, астигматизм, за винятком сферичної аберації) магнітного поля фокусуючої системи.

Процедура юстування електронного променя полягає в суміщенні його осі з віссю фокусуючої лінзи, тобто у суміщенні двох прямих. Якщо задати ці дві прямі у вигляді загальних рівнянь

$$A_1x + B_1y + C_1 = 0,$$
$$A_2x + B_2y + C_2 = 0,$$

то координати однієї спільної точки $M_0(x_{0,}y_0)$ за перетину прямих в площині, якій ці прямі належать, можна визначити шляхом спільного розв'язку їх рівнянь за формулами з визначниками другого порядку:

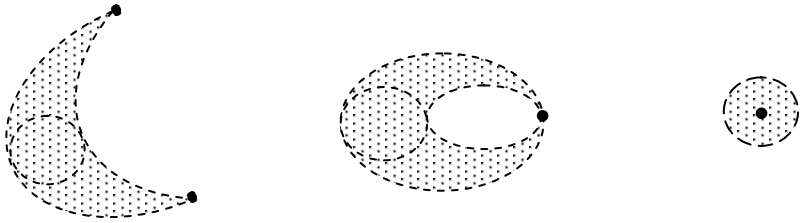
$$x_0 = \frac{\begin{vmatrix} B_1, C_1 \\ B_2, C_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} A_1, B_1 \\ A_2, B_2 \end{vmatrix}}, \qquad y_0 = \frac{\begin{vmatrix} C_1, A_1 \\ C_2, A_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} A_1, B_1 \\ A_2, B_2 \end{vmatrix}},$$

для випадку, коли $\begin{vmatrix} A_1, B_1 \\ A_2, B_2 \end{vmatrix} \neq 0$.

Якщо $\begin{vmatrix} A_1, B_1 \\ A_2, B_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} B_1, C_1 \\ B_2, C_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} C_1, A_1 \\ C_2, A_2 \end{vmatrix} = 0$ (тобто виконується умова $\frac{A_1}{A_2} = \frac{B_1}{B_2} = \frac{C_1}{C_2}$), то дві прямі мають безмежну множину спільних точок, тобто зливаються одна з одною. Іншими словами, для суміщення двох прямих достатньо, щоб вони мали принаймні дві спільні точки [2]. Тому процедура юстування повинна містити два критерії, які свідчать про суміщення осі променя з віссю фокусуючої лінзи.

У процесі юстування магнітну фокусуючу лінзу необхідно заживити змінним струмом, оскільки під час проходження змінного синусоїдального струму через обмотку лінзи кут повороту зображення на екрані ЕПТ зі зміною полярності струму за косого входження променя в магнітне поле лінзи змінює свій знак [3]. Крім того, за зміни амплітуди струму за період безперервно змінюється проективне збільшення лінзи. У результаті за деюстованої фокусуючої лінзи на екрані ЕПТ спостерігаються дві сфокусовані плями, що поєднані ореолом, найбільша ширина якого дорівнює діаметру перерізу несфокусованого променя в площині екрана, що відповідає моменту нульового значення струму в лінзі (рис. 1, *а*).

Процедура юстування полягає у суміщенні двох сфокусованих плям (перший критерій, який свідчить про те, що вісь електронного променя пройшла через центр фокусуючої лінзи, рис. 1, *б*), а потім у суміщенні шляхом поступових наближень суміщених сфокусованих плям з центром ореола (другий критерій, який свідчить про суміщення осей променя і лінзи, рис. 1, *в*).



а) *б)* *в)*

Рис. 1. Характерні фігури на екрані ЕПТ під час контролю юстування магнітної осесиметричної фокусуючої лінзи:
а – лінза деюстована; б – вісь променя проходить через центр лінзи;
в – лінза з'юстована

Суміщення осей електронного променя та фокусуючої лінзи можна здійснювати двома способами:

а) зміщенням фокусуючої магнітної лінзи стосовно променя за допомогою механічного пристрою, який забезпечує чотири ступені свободи переміщення та фіксацію;

б) зміною просторової орієнтації електронного променя за нерухомої фокусуючої лінзи.

Найбільш ефективний другий спосіб. Він полягає у тому, що фокусуюча лінза жорстко фіксується з ЕПТ, а перед нею (по ходу електронного променя) на горловині розташовують на деякій відстані одну від одної дві короткі анастигматичні відхиляючі системи, які живляться постійним струмом зі зміною полярності та величини. За зміни величини та полярності струмів електронний промінь у двох місцях вздовж осі фокусуючої лінзи змінює свою просторову конфігурацію так, щоб в області фокусуючого магнітного поля сумістится з його віссю симетрії.

З точки зору одержання вищої роздільної здатності магнітні фокусуючі лінзи порівняно з електростатичними мають переваги, проте вони мають великі габарити і масу, потребують прецизійних джерел живлення та конструктивних елементів кріплення. Для РЕМ, наприклад ZEISS EVO 40XVP [4], ширина якого 1930 мм за глибини 900 мм і ваги 750 кГ не створює жодних проблем, але для СОМ, який є лабораторним настільним приладом для біомедицини, магнітна фокусуюча лінза неприйнятна насамперед з конструктивних міркувань.

2. Проблеми юстування спіральної електромагнітної фокусуючої лінзи ЕПТ

У державному підприємстві НДІ приймальних електронно-променевих трубок "ЕРОТРОН" (м. Львів) розроблено проекційну ЕПТ високої роздільної здатності для скануючого мікроскопа для використання в біомедицині та нанотехнологіях. У цій ЕПТ головна електростатична фокусуюча лінза виконана у вигляді резистивної спіралі, нанесеної на внутрішню поверхню горловини ЕПТ, до кінців якої прикладено високу напругу. Розподілений вздовж спіралі електричний потенціал створює біпотенціальну електростатичну лінзу з малою сферичною аберацією, яка дає змогу одержати на прозорому катодолюмінесцентному монокристалічному екрані з дзеркальним металевим внутрішнім покриттям світну пляму великої інтенсивності діаметром 10 мкм, що забезпечує ефективне використання ЕПТ в скануючому оптичному мікроскопі.

Проте осесемитричне електростатичне фокусуюче поле фізично не має сил, які б діяли на електрони перпендикулярно до азимутальних площин, як це відбувається в магнітних лінзах і дає можливість одержати картини ступеня деюстування з двома чітко сфокусованими плямами, які можна точно сумістити [5]. Тому розглянуті вище критерії контролю юстування тут не можуть бути застосовані.

Можна намагатися оцінювати ступінь з'юстованості електростатичної фокусуючої лінзи зі зміщення плями за зміни сили лінзи. Але при цьому одночасно відбувається і розфокусуванння плями, причому недофокусована і перефокусована плями не можуть бути точно суміщеними (на відміну від суміщення двох чітко сфокусованих плям для випадку магнітної лінзи). Тому виникає потреба в розробленні оперативного способу юстування електронного променя в ЕПТ зі спіральною електростатичною фокусуючою лінзою.

Електронно-променеву трубку в сукупності з електромагнітними електронно-оптичними вузлами формування і керування електронним променем (фокусуюче-відхилювальний комплекс) показано на рис. 2.

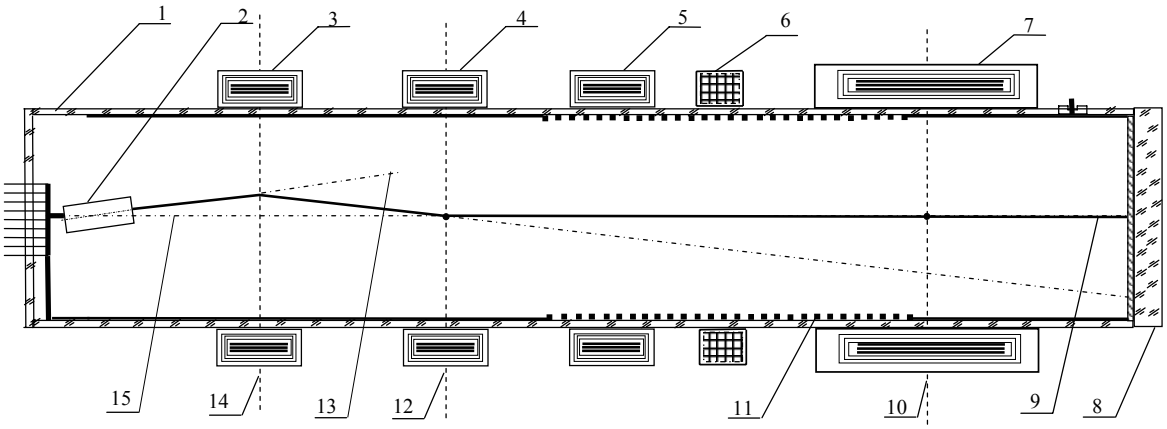


Рис. 2. Структурна схема фокусуючо-відхилювального комплексу: 1 – електронно-променева трубка; 2 – електронно-оптична система; 3, 4 – системи юстування; 5 – котушка корегування астигматизму; 6 – котушка динамічного фокусування; 7 – відхилювальна система; 8 – катодолюмінесцентний монокристалічний екран; 9 – з'юстований електронний промінь; 10 – середня площина відхилювальної системи; 11 – спіральна електростатична фокусуюча лінза; 12–- середня площина системи юстування 4; 13 – вісь електронно-оптичної системи; 14 – середня площина системи юстування 3; 15 – вісь горловини ЕПТ)

Згідно з технологією виготовлення спіральної лінзи її оптичною віссю можна вважати вісь циліндричної горловини ЕПТ, оскільки горловина виготовляється з каліброваної скляної трубки з жорстким допуском. Тому за базу юстування можна взяти зовнішню поверхню горловини. На ній концентрично розташовані та зафіксовані, зокрема, системи юстування (3, 4) та координатна відхилювальна система (10), геометричні центри яких знаходяться на осі горловини, а тим самим і на осі фокусуючої лінзи. Оскільки юстуючі та відхилювальна системи рознесені вздовж осі горловини, то їх геометричні центри можуть слугувати опорними точками, з якими необхідно сумістити вісь електронного променя. Проте магнітні поля відхилювальних систем не мають центральної симетрії чи антисиметрії. Таку симетрію мають, зокрема, квадрупольні магнітні лінзи.

3. Юстування магнітної квадрупольної лінзи

Квадрупольна магнітна лінза являє собою електронно-оптичну систему, утворену чотирма симетричними магнітними полюсами. Переріз такої лінзи середньою площиною, перпендикулярною до осі електронного променя, зображено на рис. 3, де пунктирними лініями відображено характер розташування силових ліній.

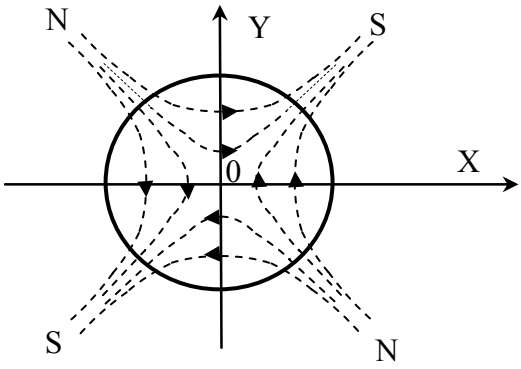


Рис. 3. Розташування силових ліній у магнітній квадрупольній лінзі

Магнітне поле квадрупольної лінзи має дві площини антисиметрії – XOZ та YOZ. Внаслідок цього напруженість магнітного поля на осі Z (точка 0) дорівнює нулю. Тому електрони, що рухаються вздовж осі, не підлягають дії магнітного поля. На електрони, що проходять за площину рисунка в площині XOZ, магнітне поле діє, як збираюча лінза, а в площині YOZ, – як розсіююча. У результаті такої деформації електронний пучок утворює на екрані ЕПТ (паралельному до площини рисунка) пляму продовгуватої форми, так званий штрих-фокус, витягнутий вздовж осі Y.

Для юстування електронного променя стосовно квадрупольної лінзи використовується така її властивість. Якщо в квадрупольній лінзі, яка збирає електронний пучок до площини YOZ, змінити напрям струму в обмотці, то вона збиратиме пучок до площини XOZ, тобто положення штрих-фокуса на екрані ЕПТ зміниться на 90˚. Отже, якщо заживити квадрупольну лінзу змінним струмом, то на екрані спостерігатиметься два взаємно перпендикулярні сфокусовані штрихи, які відповідають максимумам додатного та від'ємного напівперіодів струму, та своєрідний ореол від розфокусованого електронного пучка в проміжних значеннях струму. Якщо вісь електронного пучка не проходить через центр квадрупольної лінзи, то два штрих-фокуси розташовані несиметрично (рис. 4, *а*, *б*).

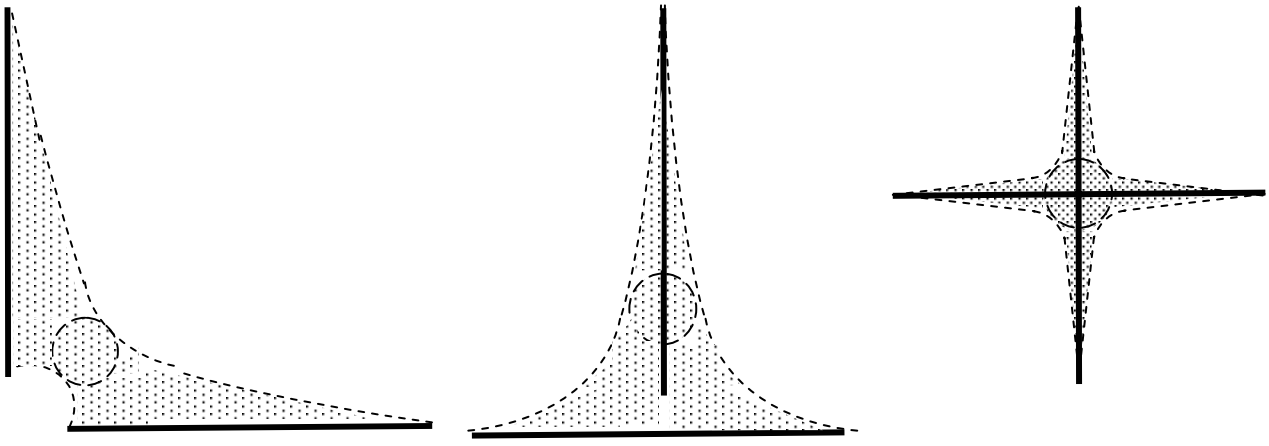


Рис. 4. Характерні фігури на екрані ЕПТ під час контролю юстування магнітної квадрупольної лінзи: а – електронний промінь, зміщений по діагоналі; б – електронний промінь, зміщений вгору; в – лінза з'юстована

Коли ж пучок проходить через центр, то на екрані спостерігається симетрична хрестоподібна фігура (рис. 4, *в*). Симетрична хрестоподібна фігура спостерігається і у разі, коли вісь пучка проходить через центр квадрупольної лінзи під кутом до її осі. Отже, симетрична хрестоподібна фігура є критерієм перетину осі електронного променя з центром квадрупольного магнітного поля.

Якщо квадрупольну магнітну лінзу розташувати концентрично стосовно зовнішньої поверхні горловини ЕПТ, то центр лінзи суміститься з віссю горловини (а заодно і з віссю спіральної

електростатичної фокусуючої лінзи). З'юстувавши промінь з квадрупольною лінзою за критерієм симетричної хрестоподібної фігури, вісь променя перетнеться з віссю фокусуючої лінзи в одній точці (перший критерій). Тепер, якщо далі по ходу променя на горловині ЕПТ розташувати другу квадрупольну лінзу і за таким самим критерієм з'юстувати промінь шляхом відхилення його з центром відхилення в точці попереднього перетину з віссю горловини, то вісь променя, пройшовши через центр другої лінзи (другий критерій), суміститься з віссю горловини. Іншими словами, вісь променя і вісь горловини збіглись у двох точках, значить вони сумістилися по усій довжині, тобто є з'юстовані.

Як зазначалося вище, на горловині ЕПТ розташовані магнітні системи юстування та відхилення. Конструктивно вони виконані у вигляді тороїдальних осесиметричних магнітних осердь з тороїдальними обмотками, секції яких симетрично розташовані по квадрантах. Секції з'єднані між собою так, щоб одержати два однорідних магнітних поля вздовж осей X та Y. Якщо ж обидві обмотки з'єднати послідовно, причому кожна секція має бути увімкнена зустрічно із сусідніми, то магнітне поле такої системи матиме чотири полюси та дві площини антисиметрії XOZ та YOZ, що притаманно квадрупольним лінзам. Отже, простою перекомутацією обмоток наявних і необхідних для роботи ЕПТ магнітних систем (4 та 7 на рис. 2) можна забезпечити процедуру юстування електронного променя стосовно спіральної електростатичної лінзи ЕПТ.

4. Алгоритм процедури юстування ЕПТ

Алгоритм процедури юстування фокусуючо-відхилювального комплексу такий:

1. Вихідне положення – усі електромагнітні системи вимкнено, електронно-оптична система ЕПТ працює в робочому режимі, анодна напруга ЕПТ знижена до одержання на екрані діаметра невідхиленої плями ≈ 5 мм.
2. Система юстування 4 перекомутовується на квадруполь і заживляється змінним струмом.
3. Амплітуда змінного струму регулюється до одержання на екрані чітких штрих-фокусів.
4. Вмикається система юстування 3 і регулюванням її струмів досягається на екрані симетрична хрестоподібна фігура.
5. Система юстування 4 відмикається від змінного струму і перекомутовується на відхилення.
6. Відхилювальна система 10 перекомутовується на квадруполь і заживляється змінним струмом.
7. Амплітуда змінного струму регулюється до одержання на екрані чітких штрих-фокусів.
8. Вмикається система юстування 4 і регулюванням її струмів досягається на екрані симетрична хрестоподібна фігура.
9. Відхилювальна система 10 відмикається від змінного струму і перекомутовується на відхилення.

На цьому процедура юстування електронного променя стосовно спіральної електростатичної фокусуючої лінзи закінчується.

Висновок

Запропонований спосіб юстування проекційної електронно-променевої трубки зі спіральною електростатичною фокусуючою лінзою дає змогу реалізувати гранично досяжні значення роздільної здатності скануючого оптичного мікроскопа загалом. Процедура юстування виконується за заміни ЕПТ та профілактичних робіт. Спосіб юстування не вимагає використання апаратних засобів та складних підготовчих робіт.

1. Сатановская О. Электронно-оптические системы ЭЛП для коллиматорных индикаторов // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. – 2003. – №4. – С. 66–68. 2. Краткий физико-технический справочник / Под ред. К.П. Яковлєва. – М.: Физ.-мат. лит., 1960. – 446 с. 3. Бонштедт Б.Э., Маркович М.Г. Фокусировка и отклонение пучков в электронно-лучевых приборах. – М.: Советское радио, 1967. – 272 с. 4. Сканирующий электронный микроскоп ZEISS EVO 40 XVP. Технический паспорт. 5. Страшкевич А.М. Электронная оптика электро-статических систем.– М.–Л.: Энергия, 1966. – 327 с.