

ДОДАТОК Б. Презентація

Харківський національний університет радіоелектроніки
факультет ЕЛБІ
кафедра МЕЕПП

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА НА ТЕМУ: «Дослідження розподілу електромагнітного поля в датчику скануючого зондового мікроскопа»

Виконав: ст. гр. ЕППМ-22-1 Пономаренко Р.І.
Науковий керівник: проф. каф. МЕЕПП
д.ф.-м.н. Грицунов О. В.



АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ

- Прогресу розвитку напівпровідникової електроніки значною мірою визначається метрологічним забезпеченням контролю якості вихідного матеріалу (пластини, зливки, структури). З цього погляду розвиток безконтактних НВЧ методів вимірювання електрофізичних параметрів напівпровідників є перспективним напрямом, що найбільш повно задовольняє вимоги, що пред'являються сучасним рівнем виробництва мікроелектронних приладів.
- Серед неруйнівних безелектродних безконтактних методів контролю набувають широкого поширення радіохвильові методи сантиметрового та міліметрового діапазонів. Їхніми перевагами є незначний час і витрати на сам процес (відпадають проміжні технологічні операції на формування контактів та виводів), а також стовідсотковий контроль вихідних напівпровідникових матеріалів. При цьому максимально може бути задоволена вимога до повної автоматизації процедури вимірювань.

2

Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Дослідження розподілу електромагнітного поля в датчику скануючого зондового мікроскопа	
Розроб.	Пономаренко		9.12	ГЮІК 433263.000 ПЗ	
Перев.	Грицунов		10.12		
Н. контр.	Шевченко			ЕППМ-22-1	Аркуш 1
Затв.	Бондаренко			ХНУРЕ, каф. МЕЕПП	Аркушів

Мета роботи – розробка методики моделювання розподілу електромагнітних полів в робочому об’ємі коаксіального резонатора квазістаціонарного типу шляхом розв’язання рівняння Гельмгольца

Об’єкт дослідження – пристрої для неруйнуючого контролю та вимірювання параметрів різноманітних шаруватих структур

Предмет дослідження – коаксіальний датчик для неруйнуючого та безконтактного вимірювання параметрів напівпровідників

Метод дослідження – чисельне моделювання на ЕОМ

Принцип дії вимірювальної апаратури

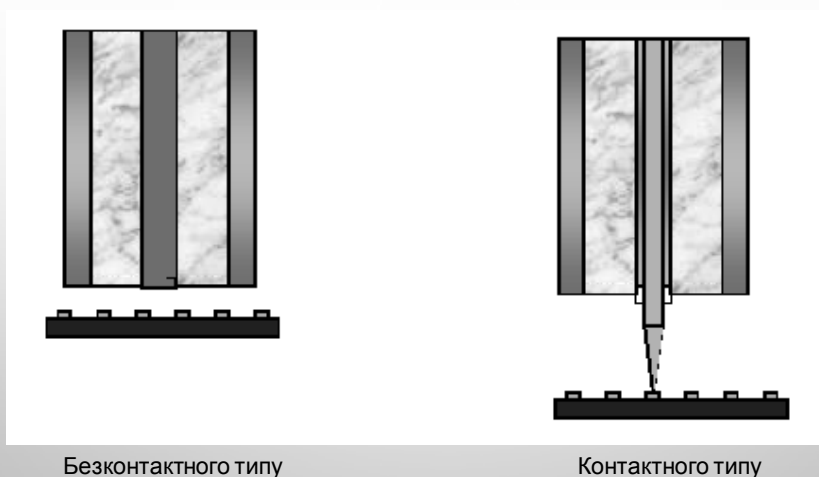
Принцип дії безконтактної вимірювальної апаратури заснований на тому, що зразок, який вимірюється, будучи поміщеним в електромагнітне поле НВЧ резонатора або хвилеводу, змінює його параметри (власну частоту, критичну довжину хвилі, добротність, коефіцієнт загасання і т.п.). В результаті виявляється можливим, встановивши попередньо зв’язок між вказаними величинами та властивостями напівпровідникового матеріалу, визначити характеристики речовини, виходячи зі ступеня зміни перерахованих параметрів електродинамічної системи. Зрозуміло, при цьому необхідно чітко усвідомлювати, як відбувається взаємодія електромагнітної хвилі з досліджуванним напівпровідниковим матеріалом (тобто, фізику процесів у напівпровіднику)

Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Дослідження розподілу електромагнітного поля в датчику скануючого зондового мікроскопа	
Розроб.	Пономаренко		9.12	ГЮІК 433263.000 ПЗ	
Перев.	Грицунов	<i>Грицунов</i>	10.12		
Н. контр.	Шевченко			ЕППм-22-1	Аркуш 2
Затв.	Бондаренко			ХНУРЕ, каф. МЕЕПП	Аркушів

Типові конструкції датчиків

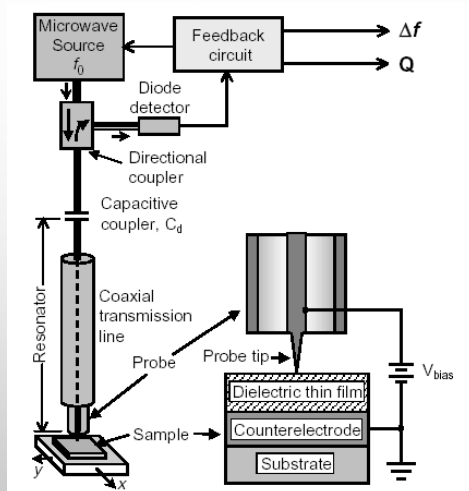
Найважливішою складовою вимірювальної установки є вимірювальний НВЧ резонатор або хвилевід (датчик). Від точності його виготовлення та стабільності параметрів (робочої частоти, геометричних розмірів тощо) значною мірою залежить якість і надійність всієї установки. Конструкції датчиків відрізняються різноманіттям. Зазвичай використовуються одновидові порожнисті резонатори та хвилеводні вимірювальні перетворювачі. Великий інтерес представляють варіанти датчиків із зовнішнім розташуванням зразка, тому що в цьому випадку менше вимог до попередньої підготовки матеріалу. З ряду причин є перспективними, зокрема, коаксіальні резонатори.

Коаксіальні датчики



Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Дослідження розподілу електромагнітного поля в датчику скануючого зондового мікроскопа	
Розроб.	Пономаренко		9.12	ГЮІК 433263.000 ПЗ	
Перев.	Грицунов	<i>[Signature]</i>	10.12		
Н. контр.	Шевченко			ЕППМ-22-1	Аркуш 3
Затв.	Бондаренко			ХНУРЕ, каф. МБЕПП	Аркушів

Схема вимірювальної установки



ОСНОВНІ РІВНЯННЯ МОДЕЛІ

Рівняння Гельмгольца для векторів електричного \mathbf{E} та магнітного \mathbf{B} полів:

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k_0^2 \mathbf{E} = 0; \quad \nabla^2 \mathbf{B} + k_0^2 \mathbf{B} = 0$$

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_m e^{i\omega t}; \quad \mathbf{B} = \mathbf{B}_m e^{i\omega t}$$

Поля в комплексному вигляді

$$k_0^2 = \omega^2 \varepsilon' \varepsilon_0 \mu \mu_0$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r B_\phi) \right) + \frac{\partial^2 B_\phi}{\partial z^2} + k_0^2 B_\phi = 0$$

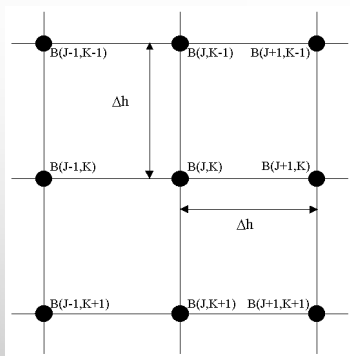
Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Дослідження розподілу електромагнітного поля в датчику скануючого зондового мікроскопа	
Розроб.	Пономаренко		9.12	ГЮІК 433263.000 ПЗ	
Перев.	Грицунов	<i>[Signature]</i>	10.12		
Н. контр.	Шевченко			ЕППМ-22-1	Аркуш 4
Затв.	Бондаренко			ХНУРЕ, каф. МЕЕПП	Аркушів

Перерахунок азимутальної складової магнітного поля в складові електричного поля

$$E_r = -\frac{1}{ik_0 (\varepsilon' \varepsilon_0 \mu \mu_0)^{1/2}} \frac{\partial B_\phi}{\partial z};$$

$$E_z = -\frac{1}{ik_0 (\varepsilon' \varepsilon_0 \mu \mu_0)^{1/2}} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r B_\phi)$$

МЕТОД СКІНЧЕННИХ РІЗНИЦЬ



Апроксимації першої та другої похідних:

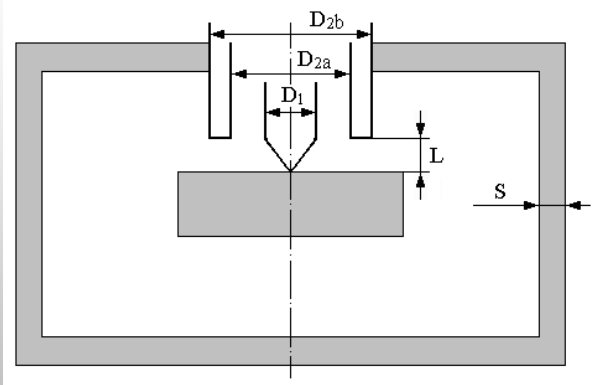
$$\frac{\partial B_i}{\partial x} \approx \frac{B_{i+1} - B_{i-1}}{2\Delta h}; \quad \frac{\partial^2 B_i}{\partial x^2} \approx \frac{B_{i-1} - 2B_i + B_{i+1}}{\Delta h^2}$$

Ітераційна формула для скінченно-різницевого виду рівняння Гельмгольца:

$$B_{j,k} = \frac{(2j-1)B_{j-1,k} + (2j+1)B_{j+1,k} + 2j(B_{j,k-1} + B_{j,k+1})}{2[(4 - k_0^2 \Delta h^2)j^2 + 1]} j$$

Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Дослідження розподілу електромагнітного поля в датчику скануючого зондового мікроскопа	
Розроб.	Пономаренко		9.12	ГЮІК 433263.000 ПЗ	
Перев.	Грицунов		10.12		
Н. контр.	Шевченко			ЕППМ-22-1	Аркуш 5
Затв.	Бондаренко			ХНУРЕ, каф. МЕЕПП	Аркушів

ГЕОМЕТРІЯ ТА РОЗМІРИ СИСТЕМИ, ЩО МОДЕЛЮЄТЬСЯ



$$D_1 = 1,0 \text{ мм};$$

$$D_{2a} = 4,5 \text{ мм};$$

$$D_{2b} = 5,0 \text{ мм};$$

$$L = 1,0 \text{ мм};$$

$$S = 1,5 \text{ мм};$$

$$f = 9375 \text{ МГц}$$

ГРАНИЧНІ УМОВИ

На вертикальних поверхнях:

$$E_z = 0; \quad \frac{\partial}{\partial r}(rB_\phi) = 0;$$

$$B_\phi(j+1, k) = B_\phi(j-1, k) - \frac{2\Delta h}{r} B_\phi(j, k)$$

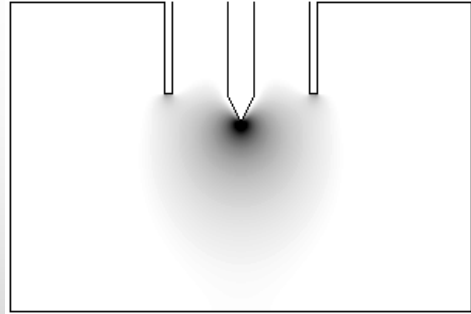
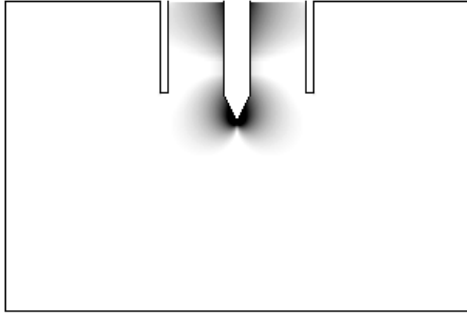
$$E_r = 0; \quad \frac{\partial B_\phi}{\partial z} = 0;$$

$$B_\phi(j, k-1) = B_\phi(j, k); \quad B_\phi(j, k+1) = B_\phi(j, k)$$

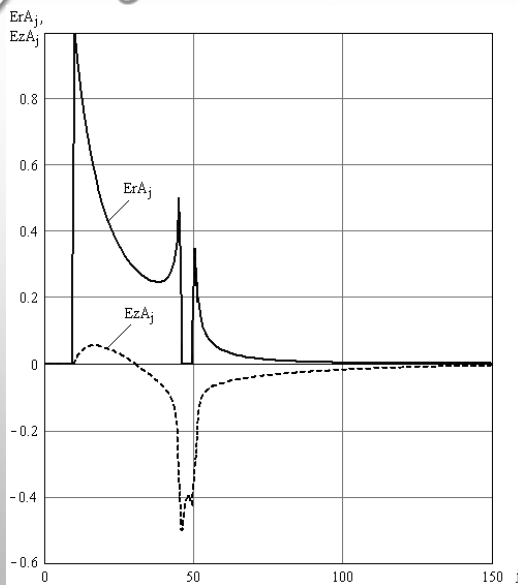
$$B_\phi(0, k) = 0$$

Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Дослідження розподілу електромагнітного поля в датчику скануючого зондового мікроскопа	
Розроб.	Пономаренко		9.12	ГЮІК 433263.000 ПЗ	
Перев.	Грицунов	<i>Грицунов</i>	10.12		
Н. контр.	Шевченко			ЕППМ-22-1	Аркуш 6
Затв.	Бондаренко			ХНУРЕ, каф. МЕЕПП	Аркушів

РОЗПОДІЛ ПОЛЯ ЗА ВІДСУТНОСТІ ОБ'ЄКТА



13

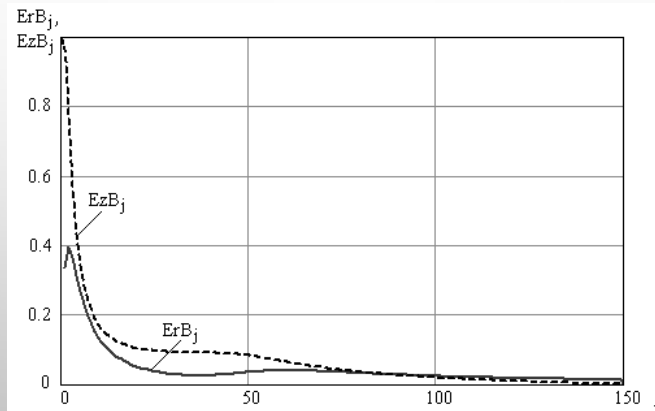


Радіальні розподіли
радіальної $E_r A_j$ та аксіальної
 $E_z A_j$ складових напруженості
електричного поля на рівні
торця зовнішнього циліндра
(i – номер вузла сітки)

14

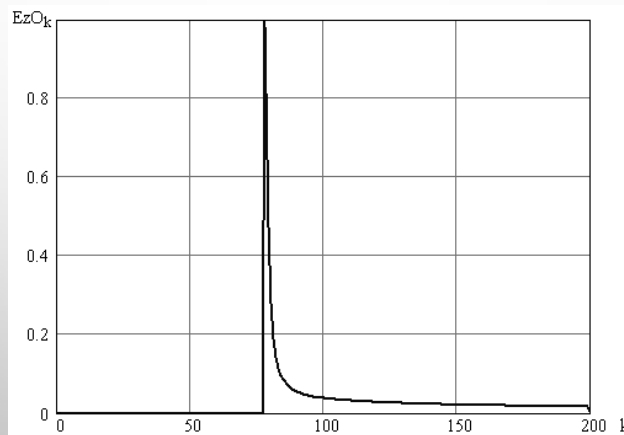
Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Дослідження розподілу електромагнітного поля в датчику скануючого зондового мікроскопа	
Розроб.	Пономаренко		9.12	ГЮІК 433263.000 ПЗ	
Перев.	Грицунов	<i>[Signature]</i>	10.12		
Н. контр.	Шевченко			ЕППМ-22-1	Аркуш 7
Затв.	Бондаренко			ХНУРЕ, каф. МЕЕПП	Аркушів

Радіальні розподіли радіальної ErB_j та аксіальної EzB_j складових напруженості електричного поля на рівні кінця вістря



15

Аксіальний розподіл аксіальної EzO_k складової напруженості електричного поля на осі системи (k – номер вузла сітки)

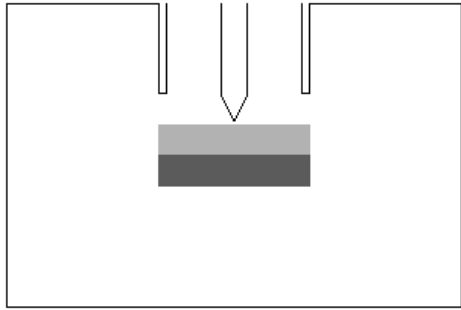


16

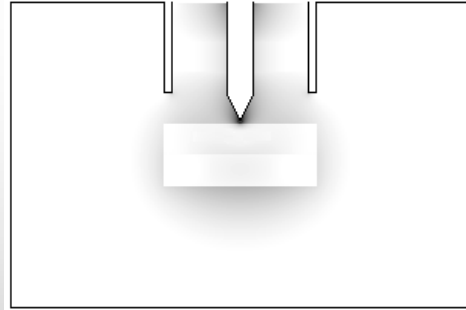
Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Дослідження розподілу електромагнітного поля в датчику скануючого зондового мікроскопа	
Розроб.	Пономаренко		9.12	ГЮІК 433263.000 ПЗ	
Перев.	Грицунов	<i>[Signature]</i>	10.12		
Н. контр.	Шевченко			ЕППМ-22-1	Аркуш 8
Затв.	Бондаренко			ХНУРЕ, каф. МЕЕПП	Аркушів

РОЗПОДІЛ ПОЛЯ ЗА НАЯВНОСТІ ОБ'ЄКТА

Діаметр двохшарового зразка 5 мм; товщина кожного шару 1 мм; $\epsilon_{\text{верх}}/\epsilon_{\text{низ}} = 3/6$

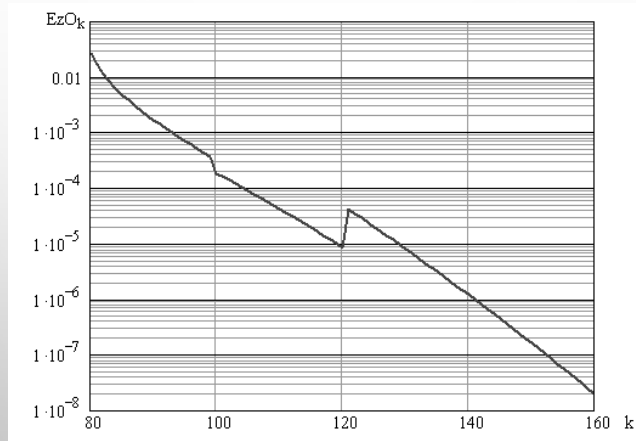


Розташування зразка в системі,
що моделюється



Розподіл напруженості
електричного поля

Аксіальний розподіл аксіальної E_z складової напруженості електричного поля на осі системи



Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Дослідження розподілу електромагнітного поля в датчику скануючого зондового мікроскопа	
Розроб.	Пономаренко		9.12	ГЮІК 433263.000 ПЗ	
Перев.	Грицунов	<i>[Signature]</i>	10.12		
Н. контр.	Шевченко			ЕППМ-22-1	Аркуш 9
Затв.	Бондаренко			ХНУРЕ, каф. МЕЕПП	Аркушів

ВИСНОВКИ

- У кваліфікаційній роботі розроблено методику моделювання розподілу надвисокочастотних полів у вимірювальному датчику установки для аналізу параметрів напівпровідникових матеріалів технологічного призначення.
- На основі чисельних методик розв'язане завдання безпосереднього вирішення рівняння Гельмгольца у просторі зі складними граничними умовами та неоднорідним заповненням. Для цього обраний метод кінцевих різниць, який поряд з методом кінцевих елементів є основою розв'язання еліптичних рівнянь, які широко використовуються в електродинаміці та електроніці.
- Промодельовано розподіл НВЧ полів в азимутально-симетричній системі, у тому числі з шаруватим заповненням. Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок, що запропонована методика розрахунку полів є достатньо точною та надійною, отже, її має сенс використовувати у реальних програмних системах

19

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!



20

Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Дослідження розподілу електромагнітного поля в датчику скануючого зондового мікроскопа	
Розроб.	Пономаренко		9.12	ГЮІК 433263.000 ПЗ	
Перев.	Грицунов	<i>Handwritten signature</i>	10.12		
Н. контр.	Шевченко			ЕПМ-22-1	Аркуш 10
Затв.	Бондаренко			ХНУРЕ, каф. МЕЕПП	Аркушів