

1. Soichi Otsuki, Kimihiro Adachi and Takahisa Taguchi; *A Novel Fiber-Optic Gas Sensing Arrangement Based on an Air Gap Design and an Application to Optical Detection of Humidity; Analytical Sciences; June 1998, Vol. 14 633-635.K.*

2. C.A. Millar, M.C. Brierley, S.R. Mallinson; *Exposed-core single-mode-fiber channel-dropping filter using a high-index overlay wave guide; Opt. Lett. 12 (1987) 284-286.*

3. C. Bariain, I.R. Matias, F.J. Arregui and M. Lopez-Amo; *Experimental results towards development of humidity sensors by using a hygroscopic material on bucolically tapered optical fibre; Universidad Publica de Navarra (UPNA).*

4. W. Proszak, *Fibreoptic humidity sensor based on active layer of CoCl₂ and prospects of its application for humidity measurements, Proceedings of SPIE Vol 5576, pp. 290-293.*

УДК 621.315

І. А. Большакова, Р.Л. Голяка, В.Е. Єрашок
Національний університет “Львівська політехніка”
Лабораторія Магнітних Сенсорів, Центр “Кристал”

ПРИСТРІЙ КАРТОГРАФУВАННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЦИКЛОТРОННИХ МАГНІТІВ НА ОСНОВІ МАТРИЦЬ ХОЛЛІВСЬКИХ СЕНСОРІВ

© Большакова І. А., Голяка Р.Л., Єрашок В.Е., 2005

Проаналізовано задачу картографування магнітного поля в циклотронних магнітах. Особливістю цієї задачі є високопрецизійне вимірювання неоднорідного магнітного поля багатоканальними магнітометрами на основі матриць радіаційностійких холлівських сенсорів (похибка – не більше 0.01%). Розкриті нові рішення щодо побудови таких вимірювальних пристроїв, а також структура та результати апробації розробленого картографа Mapper-MSL.

The task of magnetic field mapping in cyclotron magnets is discussed. The feature of this task is the high precision measurement of non-uniform magnetic field by multi-channel magnetometers on the base of a matrix of radiation stable Hall sensors (error – less than 0.01%). New solutions toward developing such measurement devices, as well as, structure and approbation results of developed Mapper-MSL device are shown in article.

Вступ. Формулювання та аналіз проблеми

Однією з прогресивних методик лікування ракових пухлин вважається імплантація в пухлину іонів, зокрема кремнію. Беручи до уваги, що глибина проникнення іонів у тіло пацієнта повинна бути достатньо великою, необхідно використовувати достатньо потужні прискорювачі. Під час експлуатації таких прискорювачів виникають значні дози проникаючого випромінювання, що обумовлює проблему погіршення надійності функціонування вимірювальної апаратури, зокрема для магнітного поля систем відхилення та сепарації іонів.

Особливої актуальності ця проблема набуває під час створення прискорювачів на компактних циклотронних магнітах. Необхідною умовою успішної експлуатації циклотронних

магнітів є періодичні картографування в них магнітного поля, що дає змогу здійснювати необхідну корекцію цього поля. При цьому потрібно забезпечувати високу стабільність сенсорів магнітного поля в радіаційних умовах та дуже високу точність вимірювання поля (сумарна похибка картографування високоградієнтного магнітного поля матрицею сенсорів не повинна перевищувати 0.01%) [1].

Аналізуючи вказану проблему, необхідно розглянути два принципово різних підходи. Перший з них базується на ЯМР зондах (ЯМР – ядерний магнітний резонанс) і забезпечує дуже високу точність вимірювання. Однак ЯМР зонди не можуть функціонувати в неоднорідних магнітних полях. Другий підхід базується на перетворювачах Холла (ПХ), які не мають обмежень щодо однорідності магнітного поля, однак точність вимірювання магнітного поля за їх допомогою є нижчою. Причиною низької точності вимірювання є притаманна всім напівпровідниковим ПХ деяка нестабільність характеристики перетворення (чутливості, off-set напруги) та наявність деяких паразитних ефектів (наприклад, планарний ефект). Особливо проблеми недостатньої точності вимірювання виникають в багатоканальних картографах на матриці ПХ. Неузгодженість між характеристиками окремих ПХ матриці обумовлює значну девіацію результатів вимірювання розподілу магнітного поля.

У роботі подані нові оригінальні рішення щодо реалізації пристрою картографування магнітного поля циклотронного магніту, який на відміну від існуючих магнітометрів характеризується унікальним поєднанням високої прецизійності (похибка вимірювання не більше 0.01%), багатоканальністю (48 каналів вимірювання магнітного поля та 4 канали вимірювання температури) та можливістю функціонування в неоднорідних високоградієнтних магнітних полях [2–5].

Новизна рішення

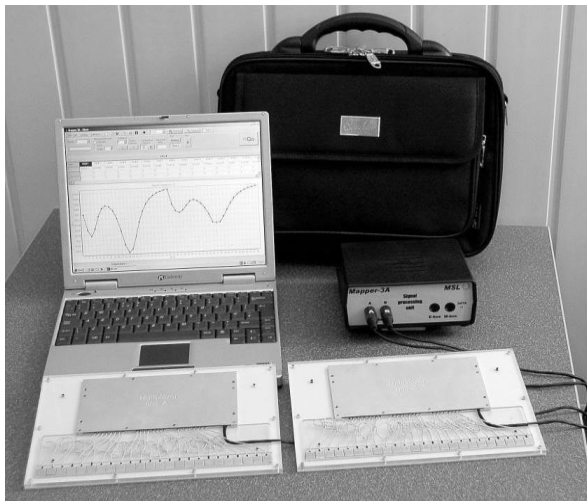
Новизною розробленого пристрою картографування магнітного поля (надалі – картограф Mapper-MSL) є те, що:

- по-перше, картограф на основі комплекту ПХ-зондів та еталонного магнітометра на основі ЯМР-зонда об'єднуються в єдину вимірювальну систему для картографування магнітного поля та періодичного калібрування ПХ-зондів, причому калібрування здійснюється безпосередньо в досліджуваному циклотронному магніті;
- по-друге, мультиплексор-драйвер ПХ-зондів з електронними компонентами (мікросхемами, конденсаторами, резисторами) знаходиться безпосередньо між полюсами досліджуваного магніту, однак, віднесено від зондів (області вимірювання) на певну відстань, наприклад, не менше 100 мм;
- по-третє, в комутаторі передбачені спеціальні заходи з забезпечення високої точності перетворення сигналів – періодичне вимірювання завад, робочого струму через ПХ-зонди тощо.

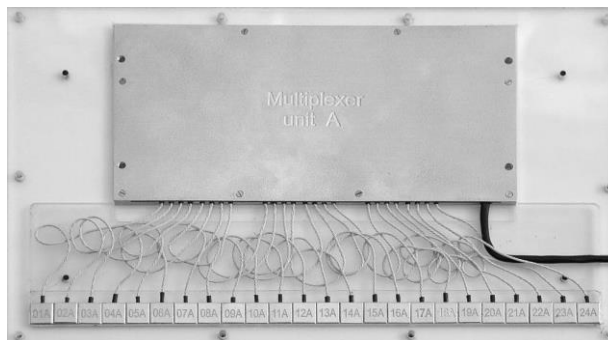
Картограф Mapper-MSL містить дві матриці з 24 зондів квадратної форми (10 мм × 10 мм × 5 мм; сумарно – $24 \times 2 = 48$ зондів) на високоякісних радіаційностійких ПХ [6, 7], які з'єднуються з комутатором короткими проводами (приблизно 150 мм), причому просторове положення зондів може бути довільним.

Фотографії картографа Mapper-MSL зображені на рис. 1,а, мультиплексор-драйвер з однією матрицею зондів – на рис.1,б, а спосіб кріплення зондів в матриці – на рис.2. Для калібрування ПХ-зондів їх розміщують з певним кроком на диску по колу (див. рис.3,а). ЯМР-зонд розміщують поряд з одним ПХ-зондом, причому зона розміщення ЯМР-зонда повинна задовольняти вимогу високої однорідності магнітного поля: це може бути або середина одної з “hill”, або середина одної з “valley” досліджуваного магніту (“hill” та “valley” – зони циклотронного магніту, відповідно з підвищеним та пониженим магнітним полем). Під час калібрування вимірюють точне значення

поля в цій зоні за допомогою ЯМР-зонда та вихідний сигнал розташування поряд ПХ-зонда.



а)



б)

Рис. 1. Фотографія картографа Mapper-MSL

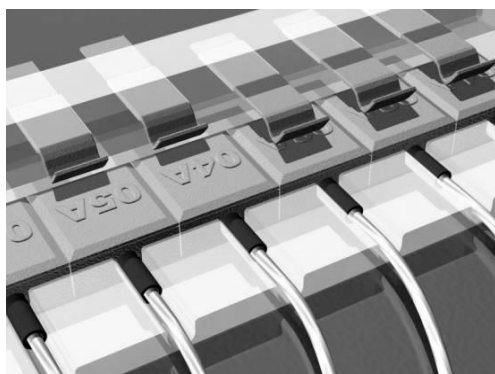
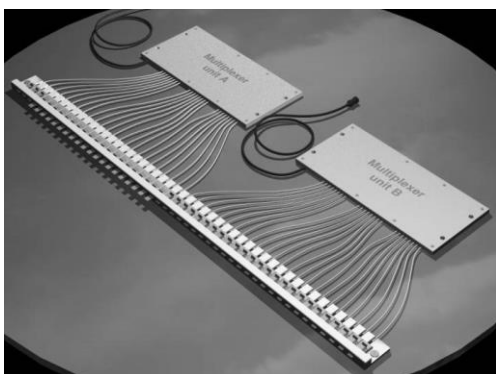


Рис. 2. Спосіб формування матриці зондів

Під час калібрування диск повертають, що дозволяє сумістити з ЯМР-зондом всі ПХ-зонди картографа по черзі. Таку процедуру здійснюють послідовно в зонах “hill” та “valley”, що дозволяє отримати принаймні дві точки поля, в яких буде забезпечено максимально високу точність калібрування. Для забезпечення точного вимірювання в картографі Mapper-MSL використовується апроксимація функції перетворення поліномом другого степеня, для чого калібрування здійснюють у третій точці поля. Цю третю точку поля, яка знаходиться в проміжку між мінімальним та максимальним полями, утворюють, змінюючи ширину зазору між полюсами магніту.

Під час картографування ПХ-зонди розміщують за радіусом диску (див. рис.3,б). Для картографування всього магніту відразу зонди розміщуються рівномірно по всій довжині радіуса диску. Можна розглянути також можливість перестановки зондів у два чи більше рядів. У такому разі одна і та сама зона магніту буде вимірюватися декількома ПХ-зондами (під час повороту диску через цю зону проходять декілька зондів), що дозволить додатково підвищити точність вимірювання поля.

Як вище відзначено, подальше підвищення точності вимірювання забезпечується просторовим рознесенням комутатора від зони вимірювання (не буде проявлятися впливу корпусів електронних компонентів комутатора на магнітне поле в зоні його вимірювання), а також спеціальними схемними рішеннями з забезпечення високої точності передачі сигналу. Зокрема під час кожного вимірювання корисного сигналу (вихідної напруги ПХ-зонда) вимірюється струм через даний зонд, а також паразитні складові сигналів, які зумовлені залишковою напругою на

ключах, завадами, шумами тощо. Серед важливих складових досягнення поставленої задачі необхідно також відзначити використання новітньої елементної бази, зокрема інтегральних схем фірми Analog Devices (USA) та сучасних підходів перетворення сигналу [8].

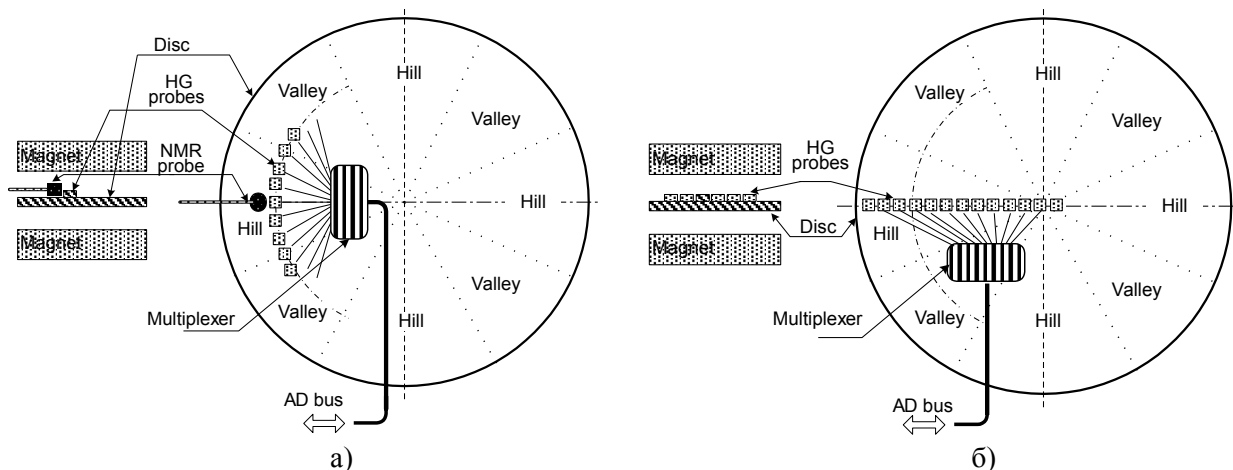


Рис.3. Розміщення ПХ-зондів під час калібрування зондів (а) та під час картографування циклотронного магніту (б)

Структура та схема картографа

У склад Mapper-MSL входять: блок обробки сигналу <Signal processing unit>, мультиплексор-драйвер <Multiplexer unit> та набір <set> ПХ-зондів <HG probes> (рис.4). Блок обробки сигналу забезпечує високопрецизійне аналого-цифрове перетворення та обмін інформацією з комп'ютером. Мультиплексор-драйвер забезпечує стабілізацію режимів живлення набору зондів, підсилення та комутацію сигналів 24 зондів магнітного поля та двох давачів температури. Mapper-MSL укомплектований двома мультиплексорними блоками, які працюють синхронно з одним блоком обробки сигналу. Набір зондів та мультиплексорний блок розміщують на диску в зазорі досліджуваного магніту.

Блок обробки сигналів містить п'ять шин передачі даних: AD-bus-1, AD-bus-2 – з мультиплексорними блоками; D-bus – з комп'ютером; M-bus – з контролером крокового двигуна (step motor controller); E-bus – з енкодером кута повороту (angle encoder). Mapper-MSLA живиться постійною напругою 9V від блока живлення Supply unit.

Мультиплексор-драйвер містить (рис.5):

- джерело опорної напруги V_0 ;
- стабілізатор струму на операційному підсилювачі ОА (R_{11} – струмовимірювальний резистор, R_{12} – резистор зміщення, R_{13} – струмозадаючий резистор);
- коло комутації струму на діоді D та польовому транзисторі VT;
- комутатори кіл живлення перетворювачів Холла на аналогових мультиплексорах MX7÷MX9;
- комутатори кіл сигналів перетворювачів Холла на аналогових мультиплексорах MX1÷MX6;
- підсилювачі сигналів перетворювачів Холла та струмовимірювального кола на диференційних підсилювачах K_v та резисторах R_k ;
- кола формування температурних сигналів на термодіодах D_{T1} , D_{T2} ;
- вихідний комутатор на аналоговому мультиплексорі MX10;
- цифрові схеми керування мультиплексорами – Counter 24, Counter 8, Reset.

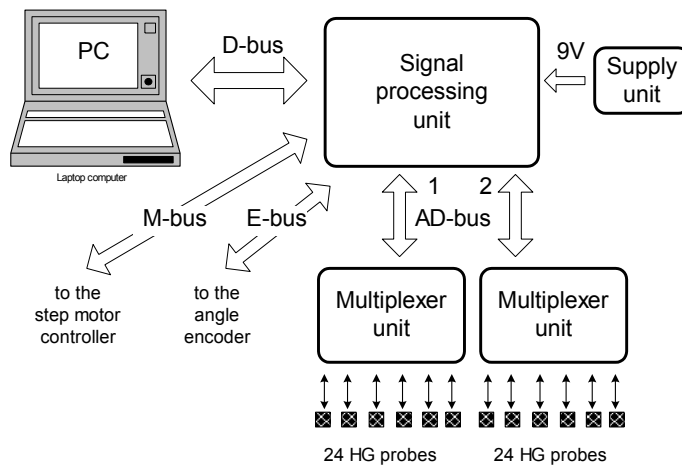


Рис. 4. Блок-схема Mapper-MSL

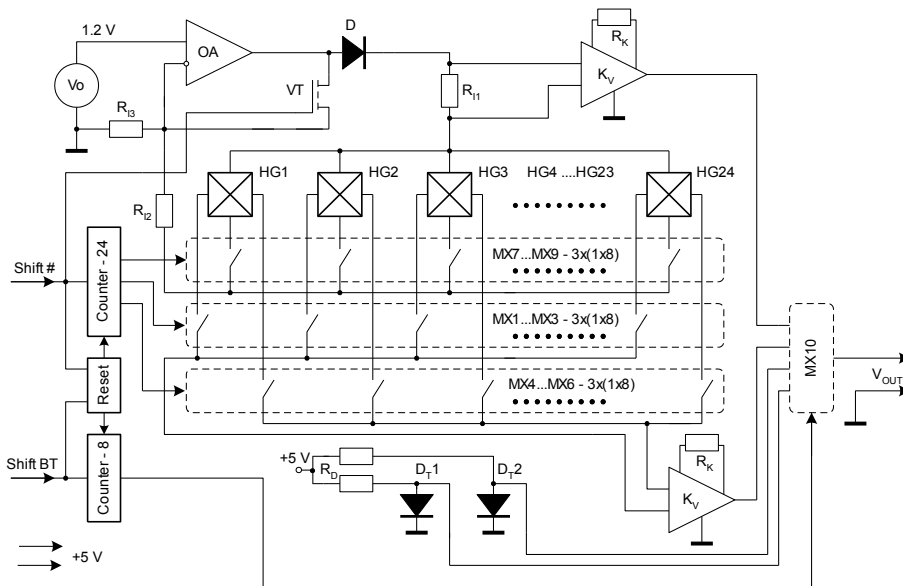
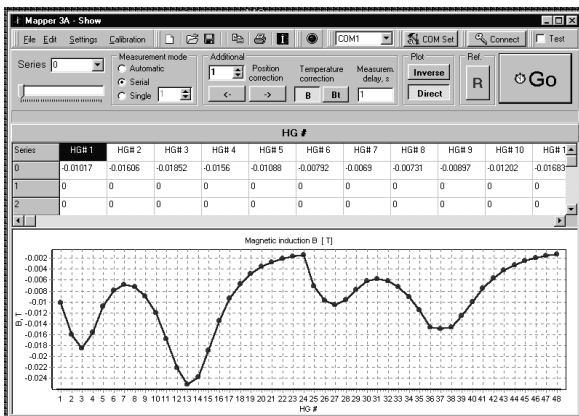
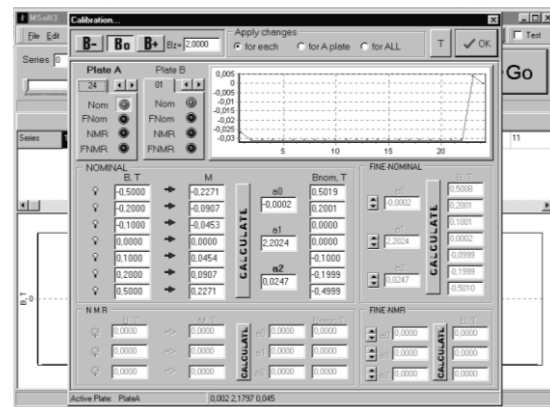


Рис. 5. Схема мультиплексора-драйвера

Для керування картографом розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє встановити режими роботи, формувати команди, розраховувати та виводити результати вимірювань, здійснювати калібрування тощо. При встановленні певних режимів роботи в основному вікні (рис.6,а) з'являються допоміжні вікна, наприклад, вікно для калібрування картографу (рис.6,б).



а)



б)

Рис. 6. Видяг вікон програмного забезпечення

Дослідження параметрів та апробація картографа

З метою дослідження роздільної здатності розробленого картографа вимірювали магнітне поле Землі в кімнаті лабораторії. Розкид результатів вимірювання між каналами картографа (рис.7), а також між двома послідовно проведеними серіями не перевищує $\pm 0.00002\text{T}$ ($20\ \mu\text{T}$), тобто $\pm 0.002\%$. Надалі здійснювали вимірювання при поворотах зондів картографа. Серії #3, #4 відповідають повороту зондів у горизонтальній площині, а серії #5, #6 – у вертикальній площині. Проведені експерименти свідчать, що зміни результатів вимірювання магнітного поля Землі при поворотах зондів суттєво перевищують відносний розкид між каналами картографа, а отже, реальна роздільна здатність картографа становить $20\ \mu\text{T}$.

Принципи, які закладені в основу картографа Mapper-MSL і реалізовані в деяких його експериментальних прототипах, пройшли успішну апробацію в численних експериментах з картографування магнітного поля циклотронних магнітів у Національному інституті радіологічних досліджень Японії.

Ілюстрацією на рис. 8 є один з експериментальних прототипів картографа Mapper-MSL в робочому зазорі компактного циклотронного магніту (рис. 8, а) та результати картографування його поля (рис. 8, в). Зокрема на рис. 8, б можна бачити, що під час картографування виявлено розкид магнітного поля в вершинах досліджень магніту. Ці вимірювання дозволили покращити якість розроблюваних циклотронних магнітів.

Отже, функціональні та точнісні характеристики розробленого картографа Mapper-MSL на основі матриць перетворювачів Холла, в сукупності з оригінальною методикою його калібрування безпосередньо на досліджуваному магніті, роблять цей картограф унікальним вимірювальним інструментом високоточного дослідження розподілу магнітних полів циклотронних магнітів.

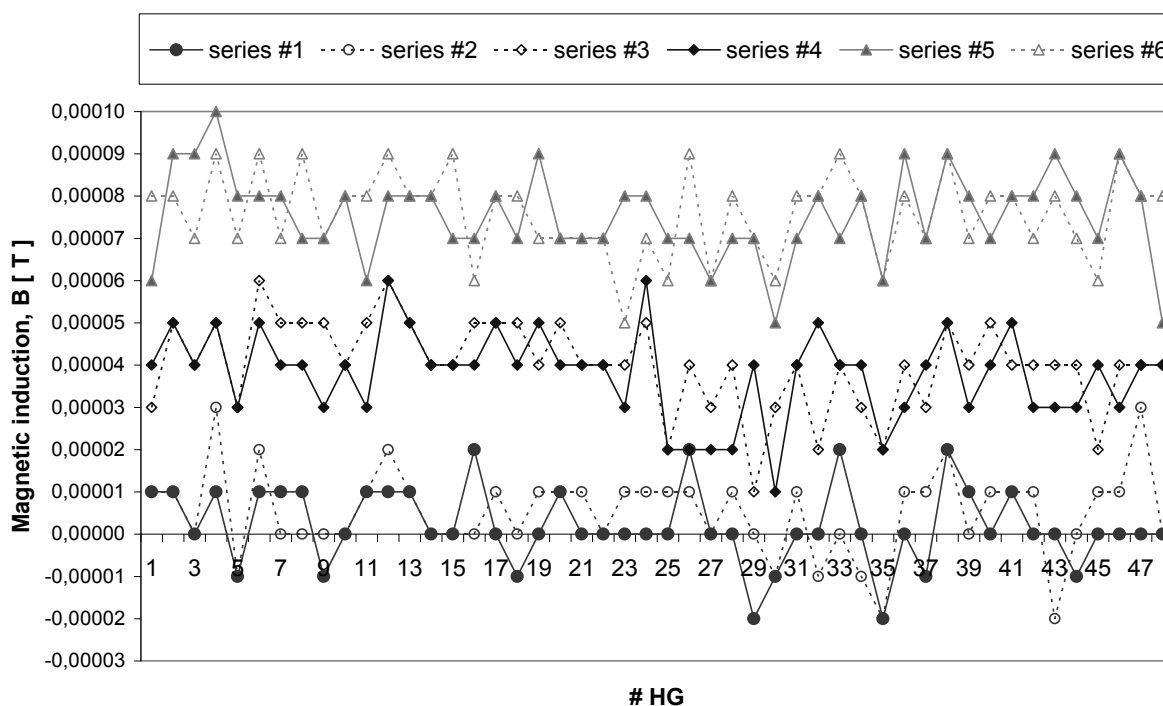


Рис. 7. Вимірювання магнітного поля Землі

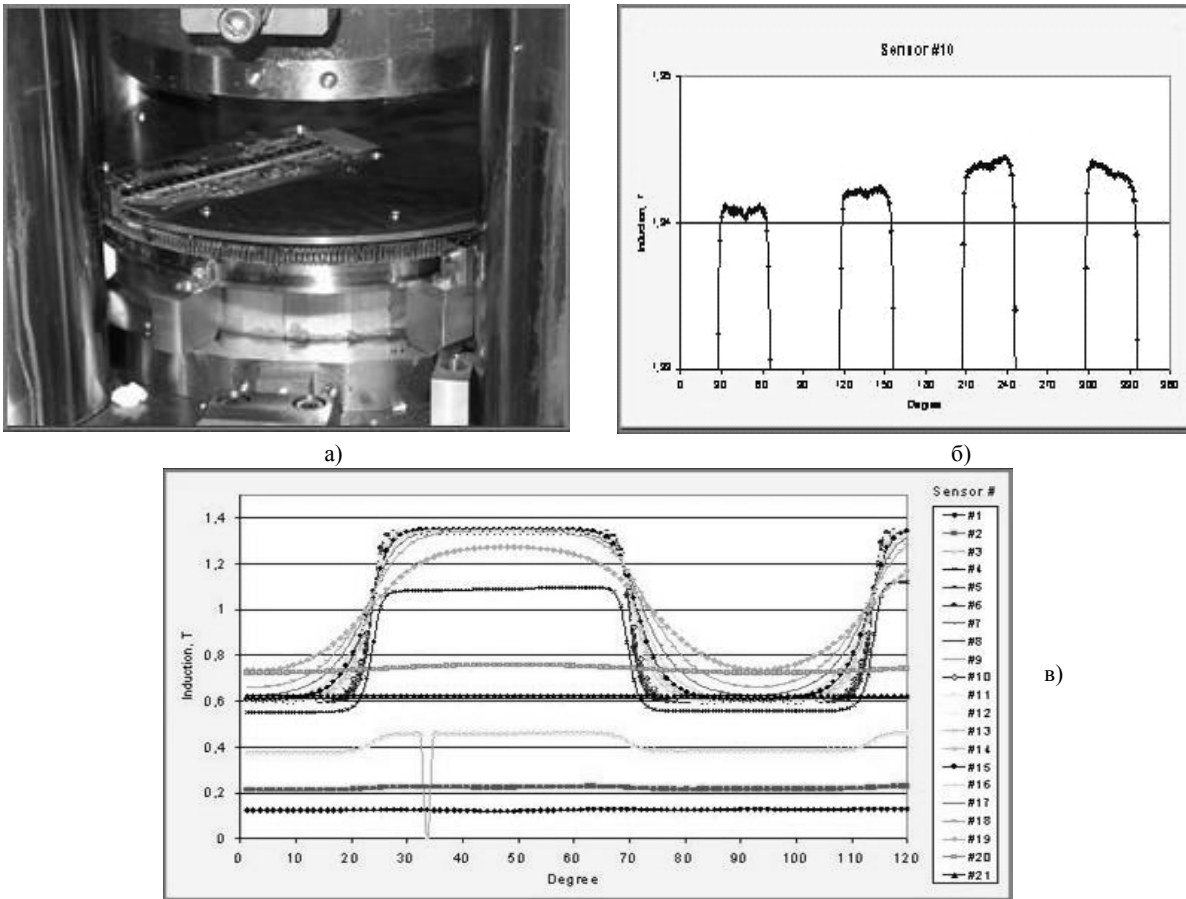


Рис. 8. Mapper-MSL у робочому зазорі магніту (а) та приклади результатів вимірювання

Висновки

У статті розкриті нові підходи до розробки багатоканального картографу магнітного поля циклотронних магнітів. Новизною розробленого картографу Mapper-MSL є поєднання багатоканальних матриць перетворювачів Холла з еталонним ЯМР-зондом, розміщення мультіплексора-драйвера безпосередньо в зазорі досліджуваного циклотронного магніту, спеціальні заходи з забезпечення високого перетворення сигналів тощо. Реальна роздільна здатність картографу становить 20 μT при вимірюванні неоднорідних магнітних полів до 5 Т. Принципи, які закладені в основу картографу Mapper-MSL і реалізовані в низці його експериментальних прототипів, пройшли успішну апробацію в численних експериментах з картографування магнітного поля циклотронних магнітів в Національному інституті радіологічних досліджень Японії.

1. Bolshakova I., Holyaka R. *Magnetic Fields Measurements Under Extreme Conditions In Charged Particle Accelerators // Abstract of 18th International Conference on High Energy Accelerators (HEACC2001)*. – Tsukuba (Japan). – 2001. – P.68.

2. Bolshakova I., Holyaka R., M. Kumada. *High-resolution Gradient Magnetometer // Abstract of 18th International Conference on High Energy Accelerators (HEACC2001)*. – Tsukuba (Japan). – 2001. – P.68.

3. Bolshakova I., Holyaka R., Leroy C. *Novel approaches towards the development of Hall sensor-based magnetometric devices for charged particle accelerators // Abstract of 17th International Conference on Magnet Technology MT-17. Geneva, Switzerland, September 24 – 28, 2001*.

4. M. Kumada, T. Fujisawa, M. Endo, M. Aoki, I. Bolshakova, R. Holyaka. *Development of 4 Tesla permanent magnet. Himac-044. Papers Contribution during the fiscal year of 2001 by the members of*

the Department of Accelerator Physics and Engineering. National Institute of Radiological Sciences. Chiba-shi, Japan. 2001. – PP.9–11.

5. M. Kumada, T. Fujisawa, Y. Hirao, Y. Iwashita, M. Endo, M. Aoki, T. Kohda, I. Bolshakova, R. Holyaka. *Challenge to a high field permanent magnet of variable field strenght. Himac-044. Papers Contribution during the fiscal year of 2001 by the members of the Department of Accelerator Physics and Engineering. National Institute of Radiological Sciences. Chiba-shi, Japan. 2001. – PP.63–65.*

6. Bolshakova I., Krukovskii S., Holyaka R., Matkovskii A., Moroz A. *Ways of providing radiation resistance of magnetic field semiconductor sensors // Radiation Physics and Chemistry. – 2001. – Vol.61. – P. 743–745.*

7. Bolshakova I., Holyaka R., Leroy C. *Novel approaches towards the development of Hall sensor-based magnetometric devices for charged particle accelerators // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2002. – Vol.12, №1. – P. 1655–1658.*

8. *Аналогова мікросхемотехніка вимірювальних та сенсорних пристроїв / За ред. Готри З., Голяки Р. – Львів: Вид-во Державного університету "Львівська політехніка", 1999. – 364с.*

УДК 621.3.049.77:621.396.6

Л.М. Смеркло, Д.Т. Дячок, Г.Л.Кучмій*

Львівський науково-дослідний радіотехнічний інститут

*Національний університет "Львівська політехніка",

кафедра електронних приладів

КОМБІНОВАНИЙ СПОСІБ ВИГОТОВЛЕННЯ ТОВСТОПЛІВКОВИХ НВЧ ПЛАТ

© Смеркло Л.М., Дячок Д.Т., Кучмій Г.Л., 2005

Розглянуто спосіб виготовлення товстоплівкових плат на основі металоорганічної пасти 4783 з гальванічно нарощеним поверх впаленої пасти шаром міді для мікроелектронних пристроїв НВЧ діапазону. Запропоновано склад селективного травника срібного шару із пасти 4783.

The thick-film production technology based on metalloorganic 4783 ink with copper layer galvanically grown above annealed ink for microelectronic devices of UHF range is considered. Selective etchant formulation made from 4783 ink for silver layer is proposed.

Вступ

Серед сучасних мікроелектронних технологій наукова і виробнича зацікавленість товстоплівковою технологією не зменшується. За нашими дослідженнями кількість серверів (сайтів) з товстоплівкової тематики за останні три роки на поширених в СНД інтернетівських серверах "Мета"(Україна) і "Яндекс"(Росія) зросла на порядок. Доповіді по товстоплівковій технології є популярними на відомих міжнародних наукових конференціях [1,2]. Зацікавленість розробників МЕА викликає застосування товстоплівкової технології для виготовлення НВЧ мікроелектронних пристроїв. Хороші параметри пристроїв отримують під час застосування провідникових металоорганічних паст на основі дорогоцінних металів [3,4]. Однак для цих паст за один технологічний цикл нанесення-впалення отримується порівняно тонкий шар пасти. Для зменшення втрат НВЧ сигналу потрібно зменшити його опір, а для цього наносять не один, а декілька шарів (рис.1). Це спричиняє збільшення витрат дорогоцінних металів. Відомо, що