

**В.П. Сидоренко, О.І. Радкевич, Ю.В. Прокоф'єв,  
Ю.В. Таякін, В.М. Єременко**

Державне підприємство «Науково-дослідний інститут мікроприладів»,  
Науково-технологічний комплекс «Інститут монокристалів» НАН України,  
вул. Північно-Сирецька, 3, Київ, 04136, Україна,  
+380 44 434 7277, info@imd.org.ua

## ІННОВАЦІЙНА РОЗРОБКА КООРДИНАТНО-ЧУТЛИВОГО ДЕТЕКТОРА СФОКУСОВАНИХ ІОННИХ ПУЧКІВ ДЛЯ СПЕКТРОСКОПІЇ



**Вступ.** Актуальним завданням для сучасної аналітичної апаратури, призначеної для кількісного аналізу багатоеlementних за складом речовин, є створення багатоканальних координатно-чутливих детекторів (КЧД) заряджених частинок для спектроскопії, які працюють в реальному масштабі часу.

**Проблематика.** В Інституті мікроприладів (ІМП) НАНУ було розроблено велику інтегральну схему (ВІС) для КЧД, на базі якої та з використанням мікроканальних пластин (МКП) було спроектовано й виготовлено експериментальні зразки приладів КЧД. Виконані в Інституті прикладної фізики (ІПФ) НАНУ дослідження показали позитивні характеристики приладу, зокрема його високу чутливість. Було підтверджено доцільність подальшого проведення робіт.

**Мета.** Створення багатоканальних приладів КЧД нового покоління з розширеним полем аналізу та покращеними технічними характеристиками.

**Матеріали й методи.** В розробленому приладі КЧД використано МКП F4772-01 фірми *Hamamatsu*, Японія. ВІС виготовлено за КМОН-технологією з проектними нормами 1 мкм, кишнями n-типу, 384 електродами-датчиками і 218603 транзистора на кристалі розміром 9,8 × 8,9 мм. Мікросхему виконано в бескорпусном варіанті на гнучких носіях типу алюміній-поліімід (модифікація 2).

**Результати.** Створення п'ятикристального КЧД нового покоління з покращеними технічними характеристиками забезпечило розширення поля одночасного аналізу просторового розподілу іонних пучків довільного складу та, відповідно, діапазон елементів, які аналізуються одночасно, дозволило підвищити швидкодію при аналізі і при зчитуванні інформації в 5 і 2,5 рази відповідно.

**Висновки.** Використання схемотехнічного рішення, яке захищено патентом України № 117788, значно зменшило залежність чутливості детектора від розбіжностей конструктивних параметрів транзисторів підсилювача-формувача, що дало можливість створити п'ятикристальний прилад КЧД нового покоління і забезпечило розширення діапазону елементів, які одночасно аналізуються. Використання для виготовлення кристалів ВІС сучасної КМОН-технології, оптимізація схемотехнічних і топологічних рішень дозволили одержати високі технічні характеристики приладу КЧД.

Ключові слова: координатно-чутливий детектор, мас-спектрометрія, велика інтегральна схема, КМОН-технологія.

Актуальним завданням для сучасної аналітичної апаратури, призначеної для кількісного аналізу багатоеlementних за складом ре-

човин є створення багатоканальних координатно-чутливих детекторів (КЧД) заряджених частинок для спектроскопії, які працюють в реальному масштабі часу [1]. Метод фотореєстрації та метод послідовного вимірювання

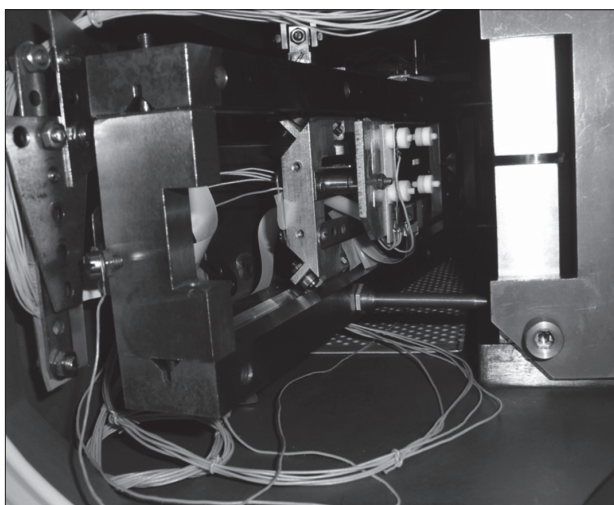


Рис. 1. КЧД в камері мас-спектрометра

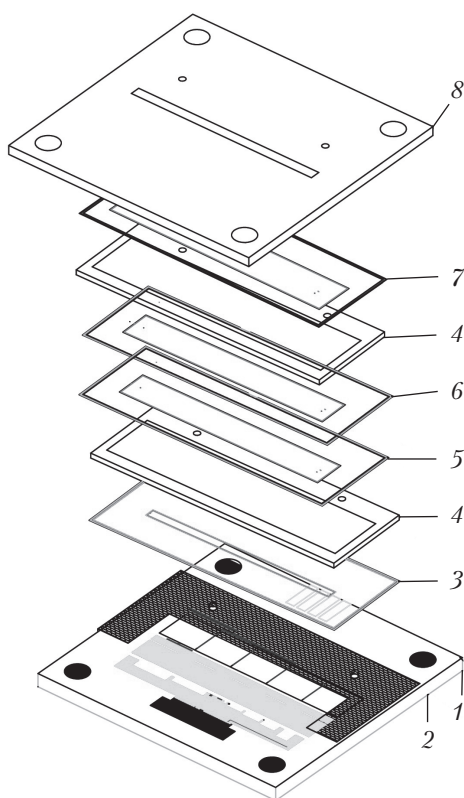


Рис. 2. Будова приладу КЧД: 1 – основа; 2 – тримач шевронного вузла; 3 – контактний електрод до МКП; 4 – рамка-тримач мікроканалних пластин; 5–7 – контактні електроди до МКП різних конструктивних моделей; 8 – екран

по кожному каналу із застосуванням циліндрів Фарадея є повільними і витратними й не дають можливість здійснювати аналіз в реальному часі. Багатоканальні прилади КЧД, за допомогою яких можна одночасно отримувати інформацію про весь елементний склад шляхом аналізу спектру в масштабі реального часу і з високою точністю без спеціальної підготовки проб, дозволяють оперативно керувати процесом аналізу, виконуючи юстування мас-спектрометра за конкретними ізотопами домішкових елементів. Внаслідок цього підвищується точність і чутливість аналізу, значно скорочуються час його виконання і витрати досліджуваного матеріалу, що особливо важливо при створенні наноматеріалів чи отриманні надчистих матеріалів. Важливим є і те, що аналіз елементного складу матеріалів в реальному масштабі часу дає можливість оперативно керувати процесами створення матеріалів.

В Інституті мікроприладів НАНУ було розроблено велику інтегральну схему (ВІС) УБ5709ІК01-2.11 для мікроелектронного координатно-чутливого детектора приладів елементного аналізу речовин [2, 3]. Надалі на базі цієї ВІС і мікроканалних пластин (МКП) було спроектовано й виготовлено експериментальні зразки приладів КЧД з використанням односантиметрових МКП [4]. В Інституті прикладної фізики (ІПФ) НАНУ проведено адаптацію мас-спектрометра МС3103 для роботи з експериментальними зразками розроблених приладів КЧД [4, 5]. На рис. 1 показано детектор, встановлений в камері мас-спектрометра в фокальній площині магнітного аналізатора.

Виконані в ІПФ НАНУ дослідження функціонування експериментального зразка КЧД в складі лазерного мас-спектрометра показали високі характеристики приладу, зокрема, його високу чутливість – зафіксовано ізотопи сурми  $^{121}\text{Sb}$  і  $^{123}\text{Sb}$  [4], атомна концентрація яких становила всього 0,0008 % і 0,0006 % відповідно.

У 2017–2018 рр. в Державному підприємстві «Науково-дослідний інститут мікроприла-

дів» «Науково-технологічного комплексу «Інститут монокристалів» НАН України відповідно до «Програми наукового приладобудування НАН України» виконано наукову роботу «Розробка багатоканального сенсорного приладу на основі спеціалізованої великої інтегральної схеми (ВІС) для мас-спектрометрії».

Метою роботи було створення багатоканальних приладів КЧД нового покоління з розширеним полем аналізу й покращеними технічними характеристиками.

Мету досягнуто за рахунок побудови п'ятикристального приладу КЧД, використання для виготовлення кристалів ВІС сучасної КМОН-технології з мінімальними проектними нормами 1 мкм, а також оптимізації схематичних і топологічних рішень.

Основними функціональними вузлами приладу КЧД є (рис. 2):

- ✦ вхідна апертурна щілина, яка обирає ділянку для аналізу у фокальній площині;
- ✦ іон-електронний перетворювач — помножувач вторинних електронів (іон — лавина електронів), який складається з двох мікроканальних пластин у шевронній збірці;
- ✦ п'ять спеціалізованих ВІС, що містять 1920 рахункових каналів;

- ✦ багат шарова керамічна основа, на якій розміщено вузли приладу й інтерфейсні роз'єми;
- ✦ роз'єми для підключення контролера приладу, напруги живлення ВІС і високих напруг живлення МКП;
- ✦ металевий немагнітний екран для захисту від потрапляння іонів на елементи конструкції приладу, крім фокальної площини;
- ✦ тестові виводи для перевірки працездатності без іонних пучків.

Прилад КЧД забезпечує одночасне детектування іонів ізотопів елементів в широкому спектрі мас досліджуваної речовини і в широкому діапазоні їх концентрацій — від  $10^{-7}$  до 100 %.

Протокол обміну інформацією приладу КЧД з периферією — послідовний.

Основні параметри приладу КЧД наведено в табл. 1.

#### ПРИНЦИП РОБОТИ ПРИЛАДУ

Координатно-чутливий детектор — це пристрій для одночасного детектування розділеного в просторі спектра заряджених частинок, який розміщено у фокальній площині спектрометра, розміри якого визначаються кількістю детекторів і кроком періодичної структури КЧД, та який виконано на напівпровідниковому кристалі.

На рис. 3 наведено схему електричну функціональну ВІС, а на рис. 4 — часову діаграму роботи ВІС в складі приладу КЧД.

Електрод-датчик *EL* детектора (рис. 3) є смужкою алюмінію на поверхні кристала ВІС, з'єднаною з входом підсилювача-формувача *DIF*. Кількість таких смужок визначається кількістю детекторних каналів на кристалі. Підсилювач-формувач *DIF* є зарядочутливим пристроєм, чутливим до заряду потоку електронів, що потрапляють на поверхню алюмінієвої смужки. Отже, для того, щоб іон, що знаходиться в фокальній площині мас-спектрометра, було зареєстровано як одиничну подію (один іон — один рахунковий імпульс лі-

Таблиця 1

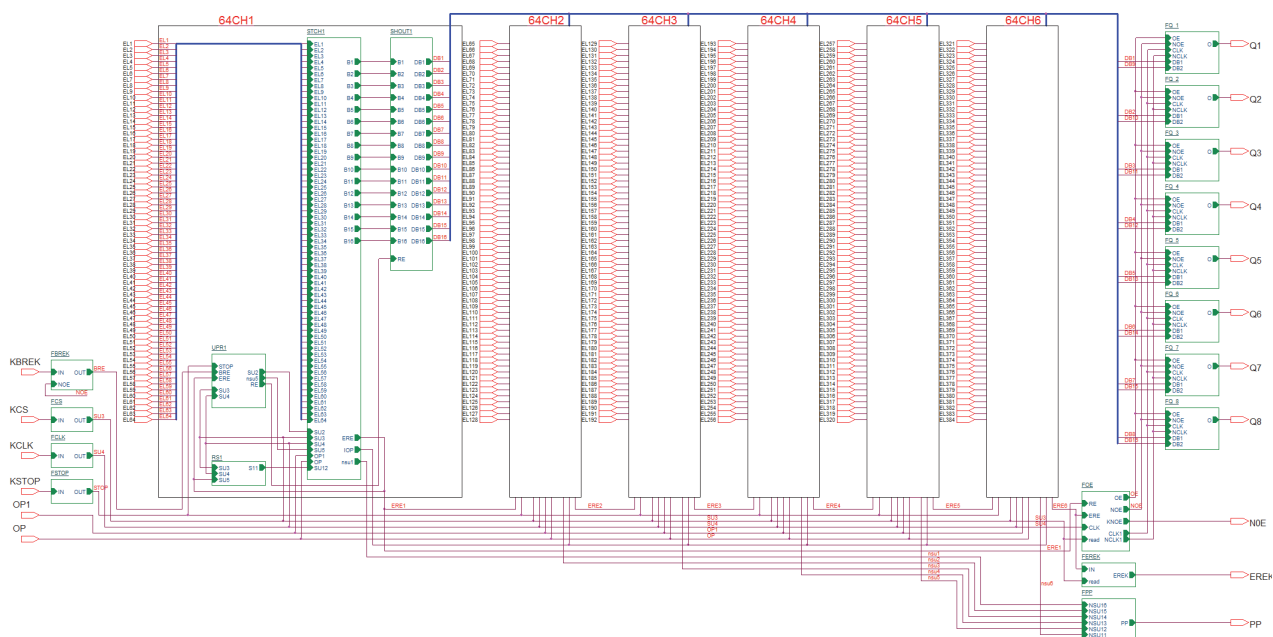
#### Технічна характеристика приладу КЧД

Параметри	Значення
Ділянка фокальної площини, на якій одночасно детектуються іони, мм	50,0
Кількість одночасно працюючих каналів прийому й обробки інформації	1920
Максимальна частота прийому інформації, МГц	не менше 15
Максимальна частота обміну при зчитуванні інформації, МГц	не менше 10
Напруга живлення ВІС, В	+5
Споживана потужність КЧД при номінальній напрузі живлення +5 В, Вт	не більше 0,25
Напруга живлення МКП, В	-2000
Загальні габарити КЧД, мм	66 × 63 × 5

чильника), необхідно, по-перше, встановити перед детектором перетворювач іон — лавина електронів, по-друге, лавина електронів повинна змінити потенціал конкретного електрода-датчика *EL*, проти якого іон знаходиться, до напруги, нижчої за поріг реакції підсилювача-формувача *DIF*. Тільки в такому випадку він переключиться, сформує одиничний рахунковий імпульс для конкретного лічильника і за рахунок зворотнього зв'язку встановить його вхід в початковий стан. Причому, цей процес повинен відбуватися достатньо швидко, до надходження наступного іона на детектор, щоб уникнути пропусків у підрахунку іонів детектором.

### ІОН-ЕЛЕКТРОННИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ НА МІКРОКАНАЛЬНИХ ПЛАСТИНАХ

Типова МКП [6] — це скляна пластина з стільниковою структурою з великою кількістю (500–1 000) регулярно розташованих і спечених разом шестикутних мікроканалних стільників, кожен з яких, у свою чергу, складається з великої кількості (5 000–10 000) регулярно розташованих і спечених разом мініатюрних трубчастих каналів, діаметр яких може становити від 2 до 12 мкм, а щільність порядку —  $(0,5–5) \times 10^6/\text{см}^2$ . Конструктивно у складі МКП можна виділити активний елемент — мікроканалну вставку й монолітне обрамлення.



**Рис. 3.** Схема електрична функціональна ВІС: *KBREK* — вхід сигналу початку зчитування *BREK*; *KCS* — вхід сигналу Вибір кристала *CS*; *KCLK* — вхід тактового сигналу *CLK*; *KSTOP* — вхід сигналу зупинки лічильника *STOP*; *OP1* — вхід джерела опорної напруги *OP1*; *OP* — вхід джерела опорної напруги *OP*; *Q1* — вихід інформації *Q1/Q9*; *Q2* — вихід інформації *Q2/Q10*; *Q3* — вихід інформації *Q3/Q11*; *Q4* — вихід інформації *Q4/Q12*; *Q5* — вихід інформації *Q5/Q13*; *Q6* — вихід інформації *Q6/Q14*; *Q7* — вихід інформації *Q7/Q15*; *Q8* — вихід інформації *Q8/Q16*; *NOE* — вихід сигналу Видача інформації *OE*; *EREK* — вихід сигналу Кінець зчитування *EREK*; *PP* — вихід сигналу Переповнення лічильника *PP*; *EL1...EL384* — електрода-датчики; *64CH1...64CH6* — блоки з 64 каналів обробки, накопичення і видачі інформації; *FOE* — формувач вихідного сигналу *OE*; *FEREK* — формувач вихідного сигналу *EREK*; *FPP* — формувач вихідного сигналу *PP*; *FQ1...FQ8* — формувачі сигналів вихідної інформації *Q*; *UPR* — схема керування процесами прийому, обробки і накопичення інформації; *RS* — додатковий однорозрядний регістр

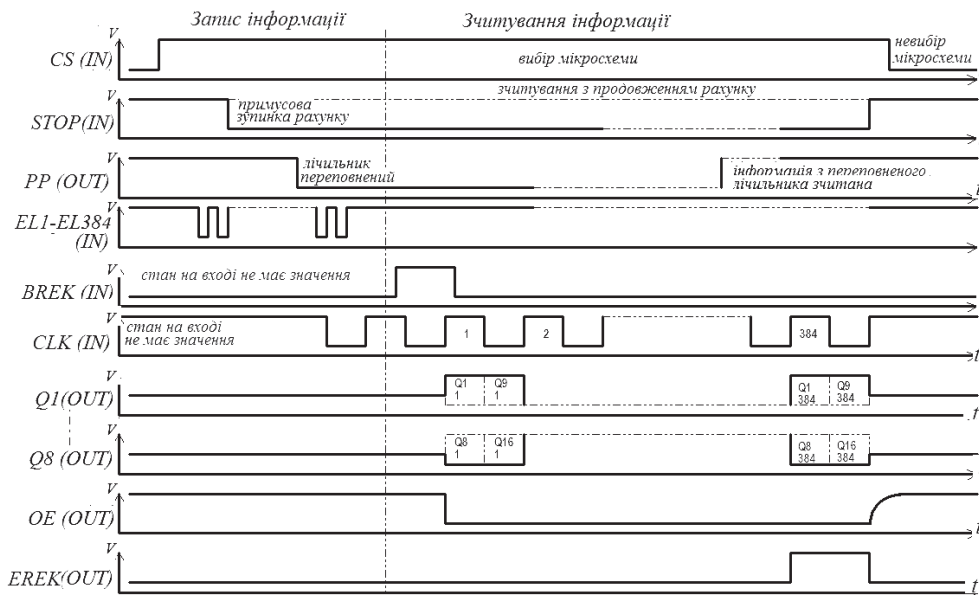


Рис. 4. Часова діаграма роботи ВІС

Основним матеріалом МКП є свинцево-силікатне скло (ССС). До гладкості й чистоти поверхонь торців та каналів висуваються жорсткі вимоги. Паралельне електричне з'єднання всіх каналів досягається термічним випаровуванням у вакуумі контактного металевого покриття (зазвичай ніхром, хрому або сплаву «Inconel») з обох сторін МКП, які слугують електродами. Товщина контактної покриття становить приблизно 0,2–0,4 мкм. Покриття заглиблюють на певну величину на вході й виході каналів, які зазвичай нахилені під певним кутом (4–13°) щодо нормалі до торців. Вся конструкція повинна бути механічно міцною, з максимально-досконалою геометричною структурою каналів та мінімальною кількістю структурних дефектів.

Сумарний опір між електродами становить близько  $10^8$ – $10^9$  Ом і визначається хімічним складом ССС, а також опором резистивно-емісійного шару (РЕШ) на поверхні стінок каналів. Формування РЕШ здійснюється шляхом термоводневого відновлення на етапі виробництва МКП.

Сучасні мікроканалні пластини, що використовуються окремо або в збірці, дозволяють

досягти коефіцієнта електронного множення  $10^4$ – $10^7$  разом з високою часовою роздільною здатністю ( $<100$  пс) і просторовою роздільною здатністю, обмеженою лише розмірами каналу й кроком стільникової структури.

Базовим елементом МКП є трубочастий канал діаметром  $d$ , довжиною  $l$  і калібром  $a = l/d$ . Особливістю мікроканалної структури МКП є те, що коефіцієнт множення не є ані функцією довжини каналу, ані його діаметра, важливим є виключно співвідношення  $l/d$ .

При виготовленні МКП на поверхні каналу формується резистивно-емісійний шар товщиною 0,2–0,3 мкм, що складається, в першому наближенні, з двох шарів: верхнього – дуже тонкого (близько 100 Å), емісійного (забезпечує вторинну електронну емісію), майже діелектричного, на основі кремнезему  $\text{SiO}_2$ , і нижнього – більш товстого, резистивного, в якому зосереджено відновлений свинець і який має електропровідність.

На канал подається напруга живлення  $U$ , і по РЕШ проходить струм провідності  $I_p = U/R$ . Струм спричиняє падіння напруги, і в каналі виникає однорідне електричне поле з лінійно наростаючим потенціалом  $\phi(x) = (U/l) \cdot x$ , на-



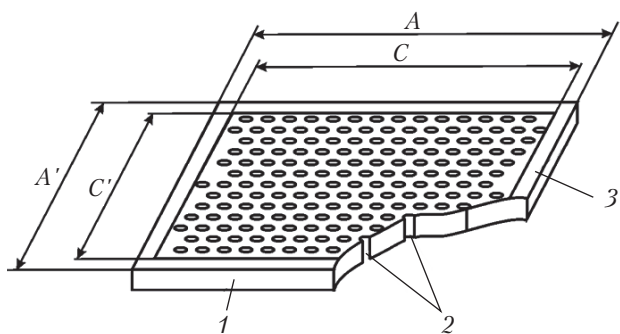


Рис. 5. Будова МКП фірми *Hamamatsu* F4772-01: 1 – склоподібна структура; 2 – канали; 3 – область електродів;  $A, C$  – зовнішні розміри;  $A', C'$  – робоча область

пруженість якого  $E = U/l$  спрямована по осі каналу. Електрон, що влітає в канал, поблизу входу здійснює перше зіткнення з поверхнею. При цьому, в середньому, вибивається більше одного вторинних електронів. Потрапивши в електричне поле, вторинний електрон під дією осьової сили  $F$  збільшує осьову складову своєї швидкості  $V_x$ , і переміщуючись уздовж каналу набирає енергію, а під впливом поперечної складової початкової швидкості  $V_0y$ , на яку поле в каналі не діє, він одночасно зміщується і поперечно. У загальному випадку траєкторією руху вторинного електрона є парабола, вигляд якої визначається початковими умовами (енергією і кутом вильоту електрона) і напруженістю поля в каналі. В результаті вторинні електрони знову стикаються зі стінкою і знову генерують електрони. Цей процес повторюється неодноразово, і по каналу, збільшуючись в кількості, швидко рухається електронна лавина, яка за час порядку  $10^{-9}$  с з'являється на виході каналу.

Коефіцієнт множення  $G$  каналу МКП довжиною  $L$  і внутрішнім діаметром  $d$  в припущенні, що електрони вилітають перпендикулярно стінок каналу, розраховують за формулою:

$$G = \left( \frac{A \cdot V}{2\alpha \cdot V_0^{1/2}} \right) \frac{4V_0\alpha^2}{V},$$

де  $V$  – напруга на МКП;  $\alpha = \frac{L}{d}$ ;  $A = \frac{\delta}{V_0^{1/2}}$ ;  $V_0$  – початкова енергія вторинного електрона,

$\sim 1-2$  eV;  $\delta$  – коефіцієнт вторинної емісії;  $V_0$  – енергія електрона до зіткнення зі стінкою каналу.

Аналіз показує, що коефіцієнт множення  $G$  залежить від напруги живлення (напруженості поля в каналі), калібру каналу, вторинно емісійних властивостей РЕШ та деяких інших факторів.

Використання двох МКП в шевронній збірці дозволяє усунути іонний зворотний зв'язок і отримати достатнє множення електронів для роботи в режимі прямого рахунку іонів.

В розробленому приладі КЧД використано МКП F4772-01 фірми *Hamamatsu*, Японія. Ця МКП, будову якої проілюстровано на рис. 5, має розміри, оптимальні для розміщення над зарядочутливою ділянкою кристалу ВІС, а досить малий діаметр каналу (менше ширини одного зарядочутливого електрода ВІС) дозволяє забезпечити високу роздільну здатність приладу.

Іон-електронний перетворювач складається з двох таких пластин, встановлених назустріч спрямованими каналами (шевронна збірка), проміжок між ними становить  $100 + 5$  мкм. Шевронна збірка формує окремий функціональний і конструктивний вузол.

З огляду на крихкість і високу вартість мікроканальних пластин, вжито низку конструктивних заходів, спрямованих на захист від можливих механічних навантажень, критич-

Таблиця 2

Технічна характеристика МКП F4772-01

Параметри	Значення
Зовнішні розміри $A-A'$ , мм	$61,9 \times 13,9$
Робоча область $C-C'$ , мм	$61 \times 13$
Товщина, мм	0,48
Діаметр каналу, мкм	12
Крок комірок, мкм	15
Кут нахилу каналів	$8^\circ$
Коефіцієнт робочої поверхні, %	60
Матеріал електродів	«Inconel»

них для МКП, які виникають при установці в конструкцію та при експлуатації в складі приладу в температурному діапазоні 0–150 °С.

Для цього кожну з МКП в складі детектора розміщено в керамічному оздобленні — спеціальній рамці з вакуумної кераміки ВК-96 з отвором під розміри МКП плюс 100 мкм, товщиною 0,48 мм з допуском мінус 10 мкм. Рамки для МКП виготовлено аналогічно елементам корпусу. Електричний контакт в МКП забезпечується двома шарами металізованого полііміду, товщиною 50 мкм кожен, з якого виготовлено гнучкі електроди для підведення високої напруги до МКП. Нижній проміжний електрод, встановлений металеву стороною донизу, забезпечує подачу потенціалу на верхню поверхню нижньої МКП, верхній проміжний електрод, розміщений металізацією вгору, забезпечує подачу потенціалу на нижню поверхню верхньої МКП [7].

Кінці електродів приєднують до металізованих доріжок на керамічній основі корпусу методом ультразвукового зварювання. Така конструкція за рахунок полііміду забезпечує «м'якість» посадки МКП при притисканні.

Керамічні елементи корпусу виготовлено з кераміки ВК-96 шляхом лазерного різання й подальшого шліфування для забезпечення необхідної точності розмірів.

Всі операції зі складання елементів приладу виконували під мікроскопом типу МБС-9 для оптичного позиціонування деталей. З'єднання елементів корпусу проводили шляхом склеювання кераміки компаундом СІЕЛ 159-322А з подальшим висушуванням при температурі 150 °С протягом трьох годин. Товщина компаунда при таких операціях зазвичай становить 10 мкм, а його висока плинність забезпечує рівномірне розтікання по поверхні склеюваних деталей.

Рамки з МКП і проміжні електроди послідовно укладають в утримувач шевронного вузла — спеціальну виїмку на корпусі. Вхідна поверхня верхньої МКП, куди потрапляє іонний пучок, утворює фокальну площину детектора.

### ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА МІКРОСХЕМИ

ВІС в складі КЧД забезпечує одночасне детектування іонів ізотопів елементів в широкому спектрі мас досліджуваної речовини і в широкому діапазоні її концентрацій — від  $10^{-7}$  до 100 %.

ВІС виготовляється за КМОН-технологією з проектними нормами 1 мкм, кишеньками *n*-типу і містить 384 електроди-датчики і 218603 транзистора на кристалі розміром  $9,8 \times 8,9$  мм.

ВІС містить 384 канали прийому й обробки інформації та забезпечує прийом електронів електродними-датчиками, перетворення заряду електронів в рахункові імпульси, підрахунок їх 16-розрядними двійковими лічильниками і зчитування результатів рахунку.

Чутливість ВІС по кожному входу становить  $10^6$  електронів/імпульс.

Мікросхему виконано в безкорпусном варіанті на гнучких носіях типу алюміній-поліімід (модифікація 2). Конструкція мікросхеми забезпечує її монтаж на керамічну плату, розварювання та герметизацію зовнішніх виводів, монтаж мікроканальних пластин над областю електродів-датчиків і дозволяє створювати багатокристалні КЧД.

ВІС зберігає електричні параметри, необхідну стійкість до механічних і кліматичних чинників, а також функціонування в умовах тиску  $10^{-5}$  Па.

### ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА І РЕЖИМИ РОБОТИ ВІС

Схема електрична функціональна ВІС (рис. 3) включає 384 канали прийому і обробки інформації про розподілені в просторі пучки іонів. Конструктивно канали розділені на шість блоків 64СН1...64СН6 по 64 канали.

На рис. 6 наведено функціональну схему одного блоку каналів ВІС. Кожен канал містить електрод-датчик *EL*, що приймає імпульс електронів від помножувача електронів на МКП, підсилювач-формував *DIF*, 16-розрядний лічильник *SH*, розряд *RS* 384-розрядного послідовно-паралельного регістру зсуву.

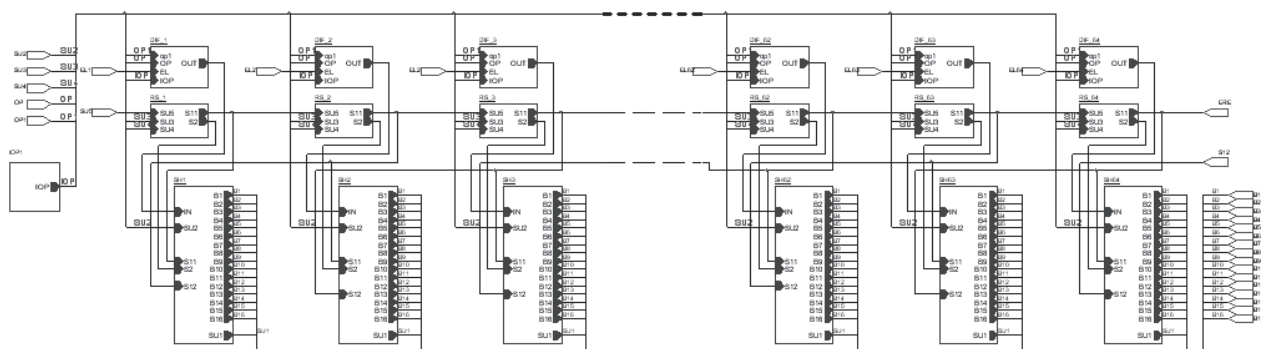


Рис. 6. Схема електрична функціональна одного блоку каналів ВІС

Імпульс електронів, що падають на електроди-датчики від мікроканальних помножувачів, надходить на вхід підсилювача-формувача *DIF* (рис. 6), на виході *OUT* останнього формується рахунковий імпульс, який подається на вхід 16-розрядного лічильника *SHB*.

В процесі підрахунку, коли кількість одиниць рахунку хоча б одного з лічильників досягає 65 529, на зовнішньому виводі *PP* (рис. 3, 4) формується напруга низького рівня (ознака переповнення хоча б одного з лічильників). При цьому, вхід переповненого лічильника *SHB* блокується, а інші (непереповнені) лічильники можуть продовжувати рахувати. Після завершення зчитування інформації з переповнених лічильників на зовнішньому виводі *PP* знову формується напруга високого рівня. Рахунок також може бути зупинено споживачем шляхом подачі напруги низького рівня на зовнішній вивід *STOP*. При цьому блокуються входи всіх лічильників ВІС.

Для початку зчитування інформації на вхід *KBREK* (рис. 3) подається імпульс *BREK* високого рівня (рис. 4) (початок зчитування), який повинен перебивати низький рівень як мінімум одного тактового імпульсу (*CLK*). На виході *OE* з'являється сигнал низького рівня, яким визначається початок і кінець інформаційного потоку. Під час першого тактового імпульсу на виходах *Q1...Q8* видається інформація, накопичена в лічильнику першого каналу. За наступними тактовими імпульсами відбувається зчитування інформації з лічиль-

ників наступних каналів. У ВІС для зменшення кількості виводів застосовано мультиплексування інформаційних виходів *Q1...Q8*. Для зчитування інформації з 16-розрядного лічильника використовується вісім виводів, при цьому, при високому рівні тактових сигналів, видається інформація молодших розрядів, а при низькому рівні – старших. Під час останнього тактового імпульсу зчитування інформації на виході *EREK* видається сигнал, який може бути використано як сигнал *BREK* для початку зчитування інформації наступної мікросхеми в багатокристальних приладах КЧД.

На початку роботи мікросхеми необхідно очистити внутрішній регістр та лічильники. Для очищення регістру спочатку треба подати на вхід *KCS* сигнал *CS* низького рівня тривалістю не менше одного тактового імпульсу, потім для обнулення лічильників необхідно провести цикл зчитування інформації.

У проміжках між циклами зчитування інформації та в режимі «невибір» мікросхеми виходи *Q1...Q8* знаходяться в третьому стані – в стані нескінченно великого опору, коли обидва вихідні транзистори закриті, що дозволяє об'єднувати однойменні виходи кількох мікросхем в багатокристальних приладах КЧД.

В ВІС реалізовано три варіанти зчитування. У першому випадку зчитування виконується без припинення підрахунку. При цьому рахунок блокується тільки в тому лічильнику, інформація з якого зчитується. Після закінчення процедури зчитування з лічильника (під



час зчитування інформації з наступного лічильника) відбувається його обнулення та знімається блокування підрахунку в ньому. У другому варіанті — за командою *STOP* блокується рахунок у всіх лічильниках і виконується послідовне зчитування інформації з усіх лічильників з подальшим їх обнуленням після зчитування. Після закінчення зчитування знімається блокування і рахунок поновлюється. У третьому варіанті зчитування здійснюється після появи ознаки переповнення (низький рівень напруги на виводі *PP*) хоча б одного з лічильників. При цьому процес власне зчитування реалізується за першим або другим варіантом.

У зв'язку зі специфікою приладу (робочий режим можна реалізувати тільки у складі спектрометра) для тестування ВІС, зокрема і у складі приладу, передбачено спеціальний тестовий режим, при якому імітується імпульс електронів, які при роботі в складі спектрометра надходять від мікроканальних помножувачів. Для цього в ВІС введені спеціальні тестові входи *TEST1* і *TEST2*, які через ємнісний зв'язок підключені до вхідних електродів-датчиків *EL*: *TEST1* — до непарних, *TEST2* — до парних. При подачі на зазначені тестові входи негативних імпульсів по передньому фронту імпульсів на вхідних електродах наводиться негативний заряд, що імітує імпульс електронів від мікроканальних помножувачів. Величина заряду визначається амплітудою негативного імпульсу і величиною ємності зв'язку між тестовим електродом і входом підсилювача-перетворювача. Шляхом зміни напруги на зазначених виводах можна проконтролювати працездатність кристала й оцінити чутливість та швидкодію підсилювача.

#### **ПІДСИЛЮВАЧ-ФОРМУВАЧ РАХУНКОВИХ ІМПУЛЬСІВ І ОБРОБКА ПРИЙНЯТОЇ ІНФОРМАЦІЇ**

Найбільш функціонально важливим вузлом ВІС, що визначає параметри мікроелектронного координатно-чутливого детектора, є

вхідний підсилювач-формуваць, схема електрична принципова якого наведена на рис. 7.

Робота підсилювача-формувача та його чутливість в раніше розробленій ВІС УБ5709ІК01-2.11 [3, 8] базується на різниці крутизни вхідних транзисторів диференційного каскаду, яка при однакових напругах на їх затворах створюється за рахунок конструктивних параметрів. Величина чутливості при однакових напругах на їх затворах визначається конструктивними параметрами цих транзисторів, які можуть мати різні відхилення в процесі виготовлення кристалів в різних каналах одного кристала, і, особливо, в різних ВІС в багатокристалічних КЧД, в підсилювачі-формувачі також була відсутня можливість регулювання чутливості схеми для оптимізації її при виконанні дослідження.

Оскільки проектована ВІС розрахована на використання в багатокристалічних приладах КЧД, питання відтворюваності параметрів підсилювачів-формувачів в різних каналах і різних ВІС є особливо важливим. Тому в підсилювачі-формувачі було використано нове схемотехнічне рішення, захищене патентом України [9].

В інноваційній ВІС в схемі підсилювача-формувача вхідні транзистори диференційного каскаду конструктивно виконано однаково, а робота схеми ґрунтується на різниці напруг на затворах вхідних транзисторів диференційного каскаду, для чого в схему введено додаткове джерело опорної напруги *OP1* [9, 10]. Це значно знижує проблему відтворюваності конструктивних параметрів транзисторів, а також дає можливість регулювати чутливість підсилювачів залежно від умов експерименту шляхом зміни напруги *Uop1*.

Аналогова частина підсилювача-формувача містить диференційний каскад з активним навантаженням у вигляді струмового дзеркала на транзисторах *M3–M7* і інвертор на транзисторах *M8, M9*. Перший вхід диференційного каскаду (затвор транзистора *M4*) підключено до відповідного електроду датчика *EL*, а

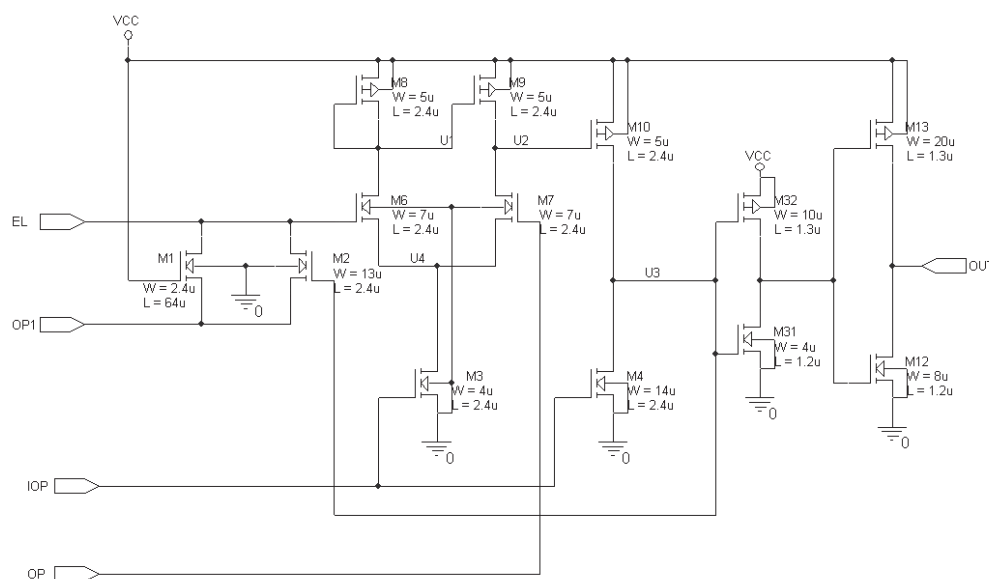


Рис. 7. Схема електрична принципова підсилювача-формувача ВІС

на другий (затвор транзистора  $M7$ ) подається напруга  $U_{op}$  від джерела опорної напруги  $OP$ . Перший вхід диференційного каскаду також через паралельно'єднані  $n$ -канальні транзистори  $M1$  і  $M2$  підключено до джерела опорної напруги  $OP1$ . При цьому на затвор транзистора  $M1$  подається напруга від джерела живлення  $V_{cc}$ , а затвор транзистора  $M2$  підключено до виходу інвертора на транзисторах  $M8, M9$ .

У початковому стані вхідна ємність підсилювача-формувача через транзистор  $M1$  заряджається від джерела опорної напруги  $OP1$ , і на затворі транзистора  $M4$  встановлюється напруга  $U_{op1}$ . Крутизна транзистора низька, і тому він не впливає на процес формування рахункових імпульсів, але запобігає можливого натікання позитивних зарядів на вхід підсилювача-формувача. Конструктивно транзистори  $M4$  і  $M7$  виконано однаковими, а напруга  $U_{op1}$  обирається вищою, ніж напруга  $U_{op}$ . Тому струм в ланцюзі транзистора  $M4$  більший, ніж в ланцюзі транзистора  $M7$ , і тому, доки транзистор  $M6$  знаходиться в насиченні, він працює в режимі струмового дзеркала транзистора  $M3$ , і його струм перевищує струм транзистора  $M7$ . Тому напруга на виході ди-

ференційного каскаду зростає до того часу, доки транзистор  $M6$  не вийде з насичення і струми транзисторів  $M6$  і  $M7$  не зрівняються. При цьому на стоці транзистора  $M6$  утвориться висока напруга, близька до напруги  $V_{cc}$ . Тому  $p$ -канальний транзистор  $M8$  буде закрито, і на виході інвертора  $M8, M9$ , і на виході підсилювача-формувача  $OUT$  встановиться низький рівень напруги.

Імпульс електронів, що надходить з виходу МКП на відповідний електрод-датчик, розряджає вхідну ємність підсилювача-формувача. Напруга на затворі транзистора  $M4$  падає, і його струм знижується, а струм транзистора  $M7$  при цьому зростає. Якщо падіння напруги на затворі транзистора  $M4$  перевищить поріг чутливості підсилювача-формувача, то струм транзистора  $M7$  перевищить струм в ланцюзі транзисторів  $M4, M3$ , і, відповідно, струм транзистора  $M6$ . Напруга на стоках транзисторів  $M6, M7$  падає до тих пір, доки транзистор  $M6$  не ввійде в насичення, а транзистор  $M7$  не вийде з насичення, і струми транзисторів  $M6$  і  $M7$  не зрівняються. При цьому, у вузлі стоків транзисторів  $M6$  і  $M7$  встановиться низька напруга,  $p$ -канальний транзистор  $M8$  відкри-

ється, і на виході інвертора  $M8$ ,  $M9$  і на виході  $OUT$  підсилювача-формувача встановиться висока напруга, близька до напруги живлення  $V_{cc}$ , завершуючи формування переднього фронту рахункового імпульсу.

У початковий стан схема повертається за рахунок зворотнього зв'язку через транзистор  $M2$ . Коли потенціал вузла стоків транзисторів  $M4$  і  $M10$  перевищить потенціал на затворі транзистора  $M6$  на величину більшу, ніж порогова напруга транзистора  $M2$ , останній відкриється і почнеться зворотний процес. Вузол затвора транзистора  $M6$  почне заряджатися до рівня опорної напруги  $U_{op1}$ , і відбувається повернення схеми в початковий стан, завершуючи цикл формування рахункового імпульсу.

Таким чином, в результаті падіння іонів на мікроканальную пластину і створення лавин електронів, які заряджають відповідні електроди-датчики  $EL1-EL384$  на виходах  $OUT$  відповідних підсилювачів-формуваців  $DIF1-DIF384$  формуються рахункові позитивні імпульси. Отримані імпульси приймаються на входи відповідних лічильників  $SHB1-SHB384$ . Кожен канал прийому та обробки інформації (рис. 6) містить підсилювач-формуваців  $DIF$ , 16-ти розрядний лічильник  $SHB$  з відповідною схемою очищення та керування, а також розряд регістра  $RS$ .

При проектуванні підсилювача-формувача було розв'язано завдання пошуку компромісу між величинами струмів, чутливістю та швидкістю підсилювача, зменшенням габаритів (необхідність узгодити розмір по осі  $X$  з кроком електродів), забезпеченням передачі рахункових імпульсів на далеко розташовані лічильники, відхід від критичних розмірів транзисторів в аналоговій частині підсилювача-формувача.

Було оптимізовано співвідношення між  $I_{op}$ , розмірами транзисторів  $M3$  і  $M4$ , розміри вихідних транзисторів  $M13$  і  $M14$ , що забезпечують перезаряд навантажувальної ємності величиною до 2 пФ, введено додатково інвер-

тор на транзисторах  $M10$  і  $M11$  для зниження ємнісного навантаження у вузлі стоків транзисторів  $M8$ ,  $M9$ , перезаряд якого найбільшою мірою визначає швидкодію підсилювача-формувача.

Функціонування схеми і отримані параметри підсилювача-формувача і всієї ВІС в цілому було перевірено шляхом моделювання на ЕОМ з використанням сучасного пакету *OrCAD v.16.6* фірми *Cadence*, із застосуванням моделей КМОН транзисторів *BSIM3v3* (Level 7) для розрахунків з використанням програми *PSpice*.

Моделювання виконували на частоті 20 МГц для запису і 10 МГц для зчитування. Воно підтвердило функціонування схеми з такою швидкістю.

Прилад МКЧД з використанням МКП і розробленої НВІС повинен забезпечувати прямий рахунок іонів. Коефіцієнт посилення МКП  $k_{МКП}$  в шевронній збірці двох пластин становить  $10^6$ . Тому необхідно забезпечити спрацьовування підсилювача-формувача і формування рахункового імпульсу при подаванні на електрод-датчик заряду  $\Delta Q_{vx}$  рівного:

$$\begin{aligned}\Delta Q_{vx} &= q_e \times k_{МКП} = -1,6 \times 10^{-19} \times 10^6 = \\ &= -1,6 \times 10^{-13} \text{ Кл},\end{aligned}$$

де  $q_e$  – заряд електрона.

Вхідна ємність розробленого підсилювача-формувача складає:

$$C_{vx} = 0,9 \text{ пФ}.$$

При цьому негативний перепад напруги на вході підсилювача-формувача відповідає значенню:

$$\Delta U_{vx} = \Delta Q_{vx} \cdot C_{vx} = -0,18 \text{ В}.$$

Проведені розрахунки показали, що при  $U_{op} = 2,5 \text{ В}$  зміна напруги на вході підсилювача-формувача складає від 2,274 В до 2,261 В та викликає зміну напруги на стоках транзисторів  $M6$ ,  $M7$  з 3,089 В до 2,671 В, на виході інвертора на транзисторах  $M8$ ,  $M9$  – з 0,727 В до 4,180 В, а на виході підсилювача-формувача  $OUT$  – з 0 В до 4,9 В, тобто розрахункова чут-

ливість є на порядок вищою за необхідну. Тому при роботі приладу МКЧД його чутливість обмежується тільки рівнем захищеності від завад при вимірах.

Таким чином, підсилювач-формувавч перетворює імпульс електронів, що надходить з виходу МКП на електрод-датчик, в рахунковий імпульс. При цьому він забезпечує посилення вхідного сигналу та формування рахункового імпульсу.

Отже, в ході роботи було створено п'ятикристальний координатно-чутливий детектор нового покоління. Це забезпечило розширення поля одночасного аналізу просторового розподілу іонних пучків довільного складу та, відповідно, діапазон елементів, які аналізуються одночасно.

Використання у вхідному підсилювачі-формувавчі схемотехнічного рішення, на яке одержано патент України № 117788 «Мікроелектронний координатно-чутливий детектор для спектрометрії», значно зменшило залежність чутливості детектора від розбіжностей конструктивних параметрів вхідних транзисторів диференційного каскаду підсилювача-формувавча, що особливо важливо при створенні багатокристальних детекторів, а також

забезпечило можливість оптимізації чутливості детектора при аналізі.

Таким чином, при розробці КЧД нового покоління досягнуто таких результатів:

- ✦ збільшення в 5 разів (до 50,0 мм) ділянки спектру іонів, які одночасно детектуються, що дозволяє в 5 разів скоротити час аналізу всього спектру елементів;
- ✦ забезпечення відтворюваності параметрів, перш за все чутливості і швидкодії, в різних каналах ВІС і різних ВІС;
- ✦ збільшено в 5 разів (до 1920) число каналів одночасного прийому і обробки інформації,
- ✦ збільшення розрядності лічильників до 16, що розширило обсяг прийнятої та оброблюваної інформації в 64 рази.
- ✦ підвищення швидкодії при запису інформації в 5 разів (до 15 МГц) для усунення пропусків вхідної інформації;
- ✦ збільшення швидкодії при зчитуванні до 10 МГц (в 2,5 рази), що важливо через збільшення обсягу інформації, що зчитується з лічильників, — в п'ятикристальному приладі КЧД є 1920 16-розрядних лічильників;
- ✦ поліпшення чутливості детектора за рахунок створення можливості її регулювання для конкретних умов експерименту.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Birkinshaw K. Detector Arrays in Spectroscopy. *International Reviews in Physical Chemistry*. 1996. No. 15. P. 13–40.
2. Сидоренко В.П., Вербицкий В.Г., Прокоф'єв Ю.В., Кизяк А.Ю., Николаенко Ю.Е. СБИС для микроелектронного координатно-чувствительного детектора приборов элементного анализа материалов. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2009. № 2. С. 25–29.
3. Сидоренко В.П., Вербицкий В.Г., Прокоф'єв Ю.В. Схемотехника СБИС для микроелектронного координатно-чувствительного детектора для элементного анализа материалов. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2012. № 4. С. 39–46.
4. Сидоренко В.П., Прокоф'єв Ю.В., Мурченко Д.С., Єременко В.М., Шелехов А.В. Координатно-чувствительный детектор заряженных частиц для спектроскопии. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2016. № 4–5. С. 53–60.
5. Борискин А.И., Єременко В.М., Мордик С.Н., Савин О.Р., Скрипченко А.Н., Сторишко В.Е., Хоменко С.Н. Исследование ионно-оптических характеристик лазерного масс-спектрометра с координатно-чувствительным микроелектронным детектором. *Журнал технической физики*. 2008. Т. 786, № 7. С. 111–117.
6. Кулов С.К. Физика и применение МКП. URL: <http://www.baspik.com> (дата звернення: 04.11.2018).
7. Сидоренко В.П., Жора В.Д., Радкевич А.И., Грунянская В.П., Прокоф'єв Ю.В., Таякін Ю.В., Вирозуб Т.М. Особенности конструкции и технологии сборки микроелектронных координатно-чувствительных детекторов. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2018. № 1. С. 20–27.

8. Патент України № 94103. Борискін О.І., Вербицький В.Г., Забродіна О.І., Єременко В.М., Ніколаєнко Ю.Є., Прокоф'єв Ю.В. ... Шелехов А.В. Мікроелектронний координатно-чутливий детектор маспектрометра.

9. Сидоренко В.П., Радкевич А.І., Прокоф'єв Ю.В., Таякін Ю.В., Вироzub Т.М. СБИС для мікроелектронного координатно-чутливого детектора нового покоління з розширеним полем аналізу для мас-спектрометрії. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*. 2018. № 1. С. 13–20.

10. Патент України № 117788. Єременко В.М., Мурченко Д.С., Прокоф'єв Ю.В., Радкевич О.І., Сидоренко В.П., Скрипченко О.М. ... Шелехов А.В. Мікроелектронний координатно-чутливий детектор для спектроскопії.

**Стаття надійшла до редакції 04.12.18**

**Статтю прорецензовано 28.02.19**

**Статтю підписано до друку 01.03.19**

#### REFERENCES

1. Birkinshaw, K. (1996). Detector Arrays in Spectroscopy. *International Reviews in Physical Chemistry*, 15, 13–40.
2. Sidorenko, V. P., Verbitskiy, V. G., Prokofiev, Yu. V., Kyziak, A. Yu., Nikolayenko, Yu. E. (2009). VLSI for microelectronic coordinate-sensitive detector of the devices for element analysis of substance. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2, 25–29 [in Russian].
3. Sidorenko, V. P., Verbitskiy, V. G., Prokofiev, Yu. V. (2012). Circuit design of VLSI for microelectronic coordinate-sensitive detector for material element analysis. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 4, 39–46 [in Russian].
4. Sidorenko, V. P., Prokofiev, Yu. V., Murchenko, D. S., Eremenko, V. M., Shelekhov, A. V. (2016). Coordinate-sensitive charge particle detector for spectroscopy. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 4–5, 53–60 [in Russian].
5. Boriskin, A. I., Eremenko, V. M., Mordik, S. N., Savin, O. R., Skripchenko, A. N., Storizhko, V. E., Khomenko, S. N. (2008). Ion-optical characteristics of a laser mass spectrometer with a coordinate-sensitive microelectronic detector. *Technical Physics*, 78(7), 111–117 [in Russian].
6. Kulov, S. K. Physics and application MCP. URL: <http://www.baspik.com> (Last accessed: 04.11.2018).
7. Sidorenko, V. P., Zhora, V. D., Radkevich, O. I., Grunyanska, V. P., Prokofiev, Yu. V., Tayakin, Yu. V., Virozub, T. M. (2018). Assembly technology and design features of microelectronic coordinate-sensitive detector. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 1, 20–27 [in Russian].
8. Patent of Ukraine № 94103. Boriskin A. I., Verbitskiy V. G., Zabrodina O. I., Eremenko V. M., Nikolayenko Yu. E., Prokofiev Yu. V. ... Shelekhov A. V. Microelectronic coordinate-sensitive detector of the mass spectrometer [in Ukrainian].
9. Sidorenko, V. P., Radkevich, O. I., Prokofiev, Yu. V., Tayakin, Yu. V., Virozub, T. M. (2018). VLSY for a new generation microelectronic coordinate-sensitive detector of analysis for use in mass spectrometry. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 1, 13–20 [in Russian].
10. Patent of Ukraine № 117788. Eremenko V. M., Murchenko D. S., Prokofiev Yu. V., Radkevich O. I., Sidorenko V. P., Skripchenko A. N. ... Shelekhov A. V. Microelectronic coordinate-sensitive detector for spectrometry [in Ukrainian].

**Received 04.12.18**

**Revised 28.02.19**

**Accepted 01.03.19**



*Sidorenko, V.P., Radkevich, O.I., Prokofiev, Yu.V.,  
Tayakin, Yu.V., and Eremenko, V.M.*

Research Institute of Microdevices,  
R&D Complex Institute for Single Crystals  
of the NAS of Ukraine,  
3, Pivnichno-Siretska St., Kyiv, 04136, Ukraine,  
+380 44 434 7277, info@imd.org.ua

INNOVATIVE DEVELOPMENT  
OF COORDINATE-SENSITIVE  
DETECTOR OF FOCUSED ION BEAMS  
FOR SPECTROSCOPY

**Introduction.** The urgent task for modern analytical apparatus designed for quantitative analysis of multi-elemental composition of substances is to create multichannel coordinate-sensitive detectors (CSD) of charged particles for spectroscopy, which operate in real time.

**Problem Statement.** The Institute of Microdevices (IMD) of the NAS of Ukraine has developed a large integrated circuit (LIC) for CSD based on which using microchannel plates (MCP), experimental samples of CSD devices have been designed and manufactured. The studies carried out at the Institute of Applied Physics (IAP) of the NAS of Ukraine have shown high characteristics of the device, in particular, its high sensitivity. The feasibility of further research has been confirmed.

**Purpose.** To create a new generation of multichannel CSD devices with expanded field of analysis and improved technical characteristics.

**Materials and Methods.** The developed CSD device uses the F4772-01 MCP of *Hamamatsu*, Japan. The LIC is manufactured using the CMOS technology with design standards of 1  $\mu\text{m}$ , *n*-type pockets, 384 electrode sensors, and 218603 transistors on a 9.8  $\times$  8.9 mm crystal. The microcircuit is made in a discrete wafer form, on flexible carriers of aluminum-polyimide type (modification 2).

**Results.** The development of a new generation 5-crystal CSD device has enabled expanding the field of simultaneous analysis of the spatial distribution of ion beams of arbitrary composition and, accordingly, the range of elements analyzed simultaneously, as well as increasing the speed of analyzing and reading data 5 and 2.5 times, respectively.

**Conclusions.** The use of the circuitry solution protected by the Patent of Ukraine № 117788 has significantly reduced the dependence of detector sensitivity on the differences in the design parameters of the amplifier-driver transistors, which has made it possible to create a new generation 5-crystal CSD device and to expand the range of elements analyzed simultaneously. Using the advanced CMOS technology for the manufacture of LIC crystals, optimization of circuit design and topological solutions have enabled obtaining high technical characteristics of the CSD device.

*Keywords:* coordinate-sensitive detector, mass spectrometry, and large integrated circuit CMOS technology.

*В.П. Сидоренко, А.І. Радкевич, Ю.В. Прокоф'єв,  
Ю.В. Таякін, В.М. Єременко.*

Государственное предприятие «Научно-исследовательский  
институт микроприборов»,  
Научно-технологический комплекс «Институт монокристалов»  
Национальной академии наук України,  
ул. Северно-Сырецкая, 3, Киев, 04136, Украина,  
+380 44 434 7277, info@imd.org.ua

ИННОВАЦИОННАЯ РАЗРАБОТКА  
КООРДИНАТНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО  
ДЕТЕКТОРА СФОКУСИРОВАННЫХ ИОННЫХ  
ПУЧКОВ ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ

**Введение.** Актуальной задачей для современной аналитической аппаратуры, предназначенной для количественного анализа многоэлементных по составу веществ, является создание многоканальных координатно-чувствительных детекторов (КЧД) заряженных частиц для спектроскопии, работающих в реальном масштабе времени.

**Проблематика.** В Институте микроприборов (ИМП) НАНУ была разработана большая интегральная схема (БИС) для КЧД, на базе которой и с использованием микроканальных пластин (МКП) были спроектированы и

изготовлены экспериментальные образцы приборов КЧД. Выполненные в Институте прикладной физики (ИПФ) НАНУ исследования показали высокие характеристики прибора, в частности его высокую чувствительность. Была подтверждена целесообразность дальнейшего проведения работ.

**Цель.** Создание многоканальных приборов КЧД нового поколения с расширенным полем анализа и улучшенными техническими характеристиками.

**Материалы и методы.** В ИМП НАНУ, в соответствии с «Программой научного приборостроения НАН Украины», выполнена научная работа, в результате которой была разработана новая специализированная БИС на основе использования современной технологии комплементарных структур металл-оксид-полупроводник (КМОП), проведена оптимизация схемотехнических и топологических решений, и на ее основе разработан пятикристальный прибор КЧД.

**Результаты.** Разработка пятикристального прибора КЧД нового поколения обеспечила расширение поля одновременного анализа пространственного распределения ионных пучков произвольного состава и, соответственно, диапазон элементов, которые анализируются одновременно, позволила повысить быстродействие при анализе и при считывании информации в 5 и 2,5 раза соответственно.

**Выводы.** Использование схемотехнического решения, которое защищено патентом Украины № 117788, значительно уменьшило зависимость чувствительности детектора от расхождения конструктивных параметров транзисторов усилителя-формирователя, что позволило создать пятикристальный прибор КЧД нового поколения и обеспечило расширение диапазона элементов, которые одновременно анализируются. Использование для изготовления кристаллов БИС современной КМОП-технологии, оптимизация схемотехнических и топологических решений позволили получить высокие технические характеристики прибора КЧД.

*Ключевые слова:* координатно-чувствительный детектор, масс-спектрометрия, большая интегральная схема, КМОП-технология.