ЖУРНАЛ ФІЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
т. 1, No 1 (1996) с. 126–129

JOURNAL OF PHYSICAL STUDIES
v. 1, No 1 (1996) p. 126–129

АПАРАТУРА ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ҐАЛЬВАНОМАГНЕТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НАПІВПРОВІДНИКІВ В ІМПУЛЬСНИХ МАГНЕТНИХ ПОЛЯХ

В. Г. Савицький, П. Є. Сторчун
Інститут прикладної фізики Львівського державного університету імені Івана Франка
Україна, 290044, Львів, вул. Пушкіна, 49

(Отримано 19 березня 1996)

Наведений опис розробленої апаратури та методики дослідження польових залежностей ґальваномагнетних властивостей напівпровідників в імпульсних магнетних полях. Апаратурна частина складається з системи, що ґенерує імпульсне магнетне поле амплітудою до 20 Тл, та модуля реєстрації даних. Компенсація наводок, індукованих імпульсним магнетним полем, виконана ориґінальним способом за допомогою котушок зі змінним ефективним перерізом. Блок аналогових підсилювачів та інтеґратор, що є в складі модуля реєстрації даних, утворюють відповідно два вимірювальні канали. Напруги з виходів цих каналів комутуються аналоговим комутатором на вхід швидкодіючого АЦП у послідовності, заданій програмно. Результати перетворення АЦП (12 розрядів + розряд переповнення) та номер каналу (3 розряди) вводяться в ОЗП об'ємом 2048×16-ти розрядних слова та після завершення експерименту передаються в ЕОМ. Швидкодія АЦП дає змогу виконати 2048 вимірювань за 2.0–2.5 періода коливання індукції магнетного поля.

Ключові слова: ґальваномагнетні властивості, імпульсні магнетні поля, автоматизація.

PACS number(s): 72.20.My; 07.55.Db; 07.05.Hd

I. ВСТУП

Вимірювання ефекту Холла та електропровідності займають одне з головних місць у визначенні параметрів напівпровідникових матеріалів [1]. Польові залежності згаданих вище ефектів дають змогу визначити концентрації та рухливості декількох типів носіів заряду [2]. Імпульсна ґенерація магнетних полів з максимальним значенням магнетної індукції (B_{max}) в декілька десятків тесл технічно значно простіша [3] порівняно з отриманням таких самих постійних полів.

II. ҐЕНЕРАЦІЯ ІМПУЛЬСНОГО МАГНЕТНОГО ПОЛЯ

Ґенерація імпульсного магнетного поля (ІМП) відбувається за стандартною методикою [3, 4] — шляхом розряду попередньо зарядженої батареї конденсаторів (БК) (6×200 мкФ (ИС6–200)) через багатовитковий соленоїд із постійною по перерізу густиною струму [3]. Система заряджання БК дає змогу задавати струм зарядки, значення кінцевої напруги та її знак. Замикає БК на соленоїд механічний розрядник. Контакти останнього розмикаються тільки на час заряджання БК.

III. КОНСТРУКЦІЯ СОЛЕНОЇДА ТА СИСТЕМИ КОМПЕНСАЦІЇ НАВОДКИ

Поперечний переріз соленоїда показано на рис. 1. Основа, що складається з котушки 1 та фланців 2, 3, виконана з текстоліту. Обмотка 4 має шість шарів по 20 витків ізольованого мідного дроту діаметром 3 мм. Бандаж 5 виконано шовковим шнуром, просоченим епоксидною смолою. З метою запобігати руйнуванню в аксіальному напрямку фланці 2, 3 стягнуті чотирма болтами з немагнетної сталі (на рисунку не показані). Діаметр внутрішнього робочого отвору соленоїда становить 18 мм. Для виконання вимірювань при температурі рідкого азоту зверху в отвір вставлено скляний дьюар 6, що спирається на пінопластовий стакан 7.

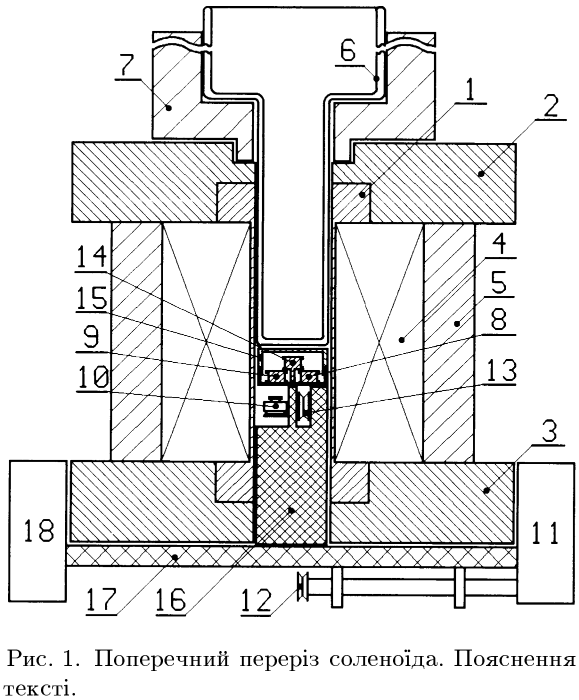

Рис. 1. Поперечний переріз соленоїда. Пояснення див. у тексті.

Запропонована оригінальна методика компенсації наводки, що індукується ІМП. Послідовно з джерелом корисного сигналу, який вимірюють, підмикають індуктивно зв'язані із соленоїдом компенсаційні котушки. Комбінована система компенсуючих котушок складається з двох ідентичних наборів (на рис. 1 показано тільки один) — зі сталим (8, 9) та змінним (10) ефективними перерізами. Ефективна площа котушки 10 змінюється шляхом її обертання навколо осі. Обертовий момент передається від редуктора 11 за допомогою гнучкого зв'язку через валики (12, 13). Котушки зі сталим ефективним перерізом (8, 9) та вимірювальні котушки (14) розташовані в стакані 15. Система компенсації наводки змонтована на тефлоновій основі 16. Редуктори 11, 18 розміщені на платформі 17, прикріпленій гвинтами до фланця 3.

IV. ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА

Функціональна схема розробленого нами модуля реєстрації даних показана на рис. 2. ЕРС Холла U_h або напругу провідності U_σ подають на вхід диференційного вимірювального повторювача A1 [5]. Якщо потрібно, напругу з виходу A1 можна підсилити у K_{u1} або $K_{u1} \cdot K_{u2}$ разів. K_{u1} може набувати цілі значення від 1 до 15, K_{u2} — 5, 10, 15. Амплітудно–частотні характеристики підсилювачів A1–A3 для коефіцієнтів підсилення 1, 2, 4, 8, 10, 15 (K_{u1}), 50, 100, 225 ($K_{u1} \cdot K_{u2}$) за даними виконаних нами вимірювань є сталими до частот $2 \cdot 10^5$ Гц.

Напруженість ІМП вимірювали індукційним методом. Напруга, що індукується змінним магнетним полем у вимірювальних котушках (поз. 14, рис. 1), подається на вхід аналогового інтеґратора A4. Напругу на виході останнього описують залежністю [5]

$$U(t) = -\frac{1}{R_i C_i} B(t) N S_0 \qquad (1)$$

$$= U_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right).$$

Сигнали з виходів інтеґратора A4 та одного з підсилювачів A1–A3 послідовно комутуються аналоговим комутатором D16 на вхід АЦП D17. Послідовність (32 слова по три розряди), елементами якої є номери каналів, що підлягають комутації на вхід АЦП, заноситься в ОЗП D9, D10 перед початком вимірювань та циклічно повторюється під час їх виконання.

АЦП D17 працює в режимі перетворення біполярного сигналу амплітудою до 2.5 В, тривалість вимірювального циклу становить 16 тактів. Результати перетворення АЦП (12 розрядів + розряд переповнення) та номер каналу (3 розряди) передаються в буферний ОЗП D14, D15. Адресу для останнього виробляє лічильник, складений на мікросхемах D4–D6. Перед початком роботи в лічильник заноситься потрібна кількість вимірювань. Із кожним виконаним вимірюванням це значення зменшується на одиницю. Вимірювання завершуються при обнуленні лічильника ($\leq$0(D6)$\rightarrow \overline{\text{E2}}$(D21)).

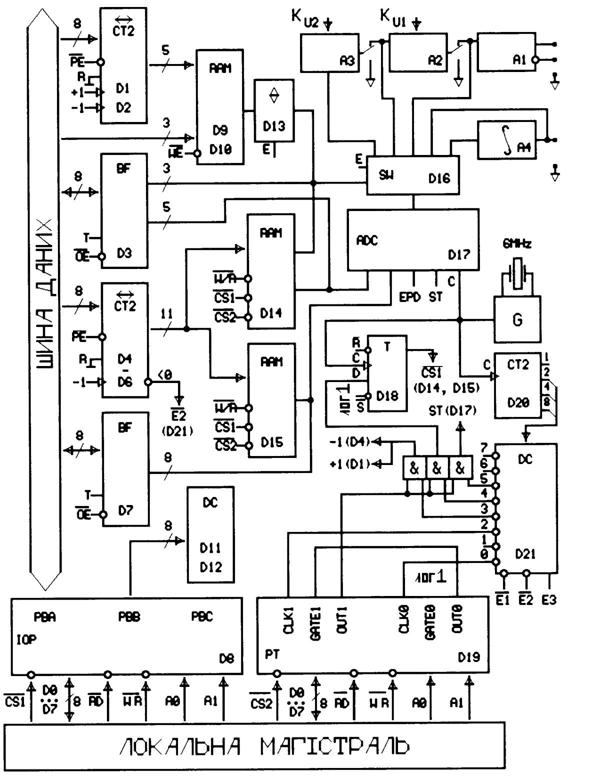

Рис. 2. Функціональна схема модуля реєстрації даних. D1, D2, D4–D6 — К555ИЕ7; D3, D7 — КР580ВА86; D11, D12, D21 — К555ИД7; D8 — КР580ВВ55А; D9, D10 — К155РУ2; D13 — К555ЛП8; D14, D15 — К537РУ8А; D16 — КР590КН6; D17 — К1108ПВ2; D18 — К555ТМ2; D19 — КР580ВИ53; D20 — К555ИЕ10; A1–A4 — К544УД2А.

Система синхронізації D18–D21 формує послідовності, що складаються з пачок імпульсів +1(D1), −1(D4), $\overline{\text{CS1}}$(D14, D15), ST(D17) (рис. 2), які керують роботою мікросхем D1, D4, D14 и D15, D17 відповідно. Період цієї послідовності залежить від значення величини, завантаженої в канал 0 програмованого таймера (PT) D19, а кількість імпульсів в цій послідовності дорівнює значенню величини, що завантажена в канал 1 PT. Часовий інтервал між початком односортних імпульсів у пачці є сталим і становить 16 тактів, тривалість імпульсів — 2 такти. Лічильник каналу 0 PT працює в режимі 2, а каналу 1 — в режимі 1 [6].

Інші сигнали керування елементами модуля реєстрації даних ґенеруються за допомогою портів PBB і PBC мікросхеми паралельного інтерфейсу (IOP) D8 та дешифраторів D11, D12. Запускають вимірювальну систему шляхом подачі високого логічного рівня на вхід E3 мікросхеми D21 синхронно з початком розряду БК на соленоїд.

Модуль реєстрації даних взаємодіє через контролер, що обслуговує локальну маґістраль, з автономною ЕОМ (типу Іскра 1030М). Ця організація аналогічна до тієї, яку застосовують у системі КАМАК [7]. Обмін інформацією між ЕОМ та контролером відбувається через стандартний паралельний інтерфейс ЕОМ [8]. Конструкція контролера та програмне забезпечення для роботи з ним наведені в [9]. Локальна магістраль складається із шини даних (8 розрядів D0..D7), шини керування ($\overline{\mathrm{RD}}$, $\overline{\mathrm{WR}}$) та адресної шини ($\overline{\mathrm{CSi}}$, A0, A1).

V. МЕТОДИКА ВИМІРЮВАНЬ ТА ОБРОБКИ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Описана вище вимірювальна система реєструє результати вимірювань у кількості, що є достатньою для наступної статистичної обробки. Загальна кількість вимірювань, результати яких можуть бути збережені в ОЗП (D14, D15, рис. 2), дорівнює 2048. Вона поділяється між двома вимірювальними каналами: протягом чотирьох вимірювань на вхід АЦП комутується напруга з виходу інтеґратора A4 (рис. 2), наступні 12 вимірювань — з виходу одного з підсилювачів A1–A3 і далі по циклу. Ця послідовність задається програмно. Швидкодія вимірювальної системи дає змогу виконати 2048 вимірювань за 2.0–2.5 періода коливання індукції магнетного поля ($T \sim$ 2.5 мсек). Найбільше вимірювань виконується при мінімальних швидкостях зміни індукції магнетного поля ($t = T/2 + nT$, $n = 0, 1, 2, \ldots$). З іншого боку, реєстрація результатів вимірювань протягом декількох періодів коливань індукції магнетного поля дає змогу набрати необхідний обсяг інформації при малих значеннях індукції магнетного поля.

Ефективний переріз S_0 (1), кількість витків N (вимірювальні котушки поз. 14, рис. 1), а також стала часу інтеґратора (A4, рис. 2) R_iC_i вибрані такими, що при B_{max} = 5, 10, 15, 20 Тл напруга з виходу інтеґратора A4 повністю заповнює діапазон перетворення АЦП D17. Коефіцієнт підсилення (A1–A3) та величина струму через зразок $I_{\text{зр}}$ також оптимізуються з метою забезпечення работи АЦП в режимі максимального розділення за амплітудою сигналу.

Компенсація паразитних ЕРС, індукованих імпульсним магнетним полем, виконується шляхом зміни ефективного перерізу компенсуючих котушок. Під час процедури струм через зразок не пропускається, а результати послідовних наближень фіксує запам'ятовуючий осцилограф С8–13.

У випадку вимірювань U_h і U_σ струм через зразок пропускається тільки під час ґенерації ІМП, що дає змогу зменшити резистивний нагрів зразка. Для отримання достатнього для наступної обробки обсягу інформації [10] вимірювання U_h виконують при двох протилежних за знаком та однакових за абсолютним значенням початкових напругах на БК.

Вимірювання напруг з виходу інтеґратора та з виходу одного з підсилювачів A1–A3 відбувається послідовно. Тому в наступних розрахунках використовують аналітичний вираз часової залежності індукції магнетного поля. Параметри U_0, T, τ в (1) визначають з умови мінімуму функції:

$$f(U_0, T, \tau) = \sum_{i=1}^{M} [U_i - U(t_i)]^2, \qquad (2)$$

де M — кількість вимірювань напруги з виходу інтеґратора, U_i — значення напруги на його виході, виміряне в момент t_i, $i = 1, \ldots, M$. Мінімізація (2) відбувається в два етапи. Після першого з них відкидаються так звані промахи вимірювань [11].

Результати вимірювань напруги з виходу одного з підсилювачів A1–A3 обробляють за таким алгоритмом:

Сортування результатів вимірювань у порядку зростання індукції магнетного поля.

Вибір масштабу по осі абсцис для наступного графічного зображення результатів (лінійний, логарифмічний, зворотний) та задання кількості точок (k).

Визначення інтервалу $[B_i - \Delta B_i,\ B_i + \Delta B_i]$, $i = 1, \ldots, k$. Якщо кількість вимірювань, виконаних у цьому інтервалі, більше двох (як для $B > 0$, так і для $B < 0$), то застосовують стандартну статистичну обробку [11].

Рис. 3. Польові залежності U_h (а) та U_σ (б) зразків #1, #2, #3, виміряні при 77 К; $I_{\text{зр}}$ = 4, 50, 20 mA (а) та 3, 15, 2 mA (б) відповідно. Для зразків #1 і #3 $U_h < 0$, для зразка #2 $U_h > 0$. Для кожної точки наведені значення похибок вимірювання.

VI. ПРИКЛАДИ ЗАСТОСУВАННЯ

На рис. 3 показані польові залежності U_h (рис. 3, а) і U_σ (рис. 3, б) для зразків $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x = 0.2$), виміряні при температурі 77 К. Вимірювання виконані на зразках прямокутної форми за шестизондовою схемою [10]. Зразки #2 ($4.90\times1.19\times0.40$ мм^3) та #3 ($3.89\times1.02\times0.40$ мм^3) термічно оброблені в вакуумі при 250^0C відповідно протягом 1 год та 10 с [12, 13], зразок #1 ($3.57\times1.27\times0.4$ мм^3) не обробляли. Відносна похибка при визначенні струму становила 2%.

Кількість експериментально отриманих значень U_i (див. вираз (2)), використаних під час визначення параметрів U_0, T, τ у залежності (1), не менше 400, а числове значення середнього відхилення $\sqrt{f(U_0,T,t)/M}$ не більше від 10 мВ. Значення індукції магнетного поля визначені з абсолютною похибкою не більшою 0.05 Тл.

Автори вдячні Janet Rohrbaugh (National Institute of Standards and Technology. Semiconductor Electronics Division. Gaithersburg. USA) за надіслані копії праць [1, 2] та робітнику високої кваліфікації Г. О. Печенкову за виконані з високою точністю вузли системи компенсації наводок.

Ця робота частково підтримана Міжнародною Соросівською програмою підтримки освіти в галузі точних наук (ISSEP), ґрант № PSU062104.

---

[1] D. G. Seiler, S. Mayo, J. R. Lowney, Semicond. Sci. Technol. **8**, 753 (1993).
[2] J. S. Kim, D. G. Seiler, W. F. Tseng, J. Appl. Phys. **73**, 8324 (1993).
[3] А. С. Лагутин, В. И. Ожогин, *Сильные импульсные магнитные поля в физическом эксперименте* (Энергоатомиздат, Москва, 1988).
[4] K. S. W. Champion, Proc. Phys. Soc. B **63**, 795 (1950).
[5] Л. Фолкенберри, *Применение операционных усилителей и линейных ИС* (Мир, Москва, 1985).
[6] С. Т. Хвощ, Н. Н. Варлинский, Е. А. Попов, *Микропроцессоры и микроЭВМ в системах автоматического управления: Справочник* (Машиностроение, Ленинград, 1987).
[7] Ю. Ф. Певчев, К. Т. Финогенов, *Автоматизация физического эксперимента* (Энергоатомиздат, Москва, 1986).
[8] Р. Джордейн, *Справочник программиста персональных компьютеров типа IBM PC, XT и AT* (Финансы и статистика, Москва, 1992).
[9] П. Е. Сторчун, Компьютеры + программы, № 6, 44 (1995).
[10] Е. В. Кучис, *Гальваномагнитные эффекты и методы их исследования* (Радио и связь, Москва, 1990).
[11] О. Н. Кассандрова, В. В. Лебедев, *Обработка результатов наблюдений* (Наука, Москва, 1970).
[12] В. Г. Савицкий, П. Е. Сторчун, Неорган. матер. **31**, 1333 (1995).
[13] V. G. Savitsky, P. E. Storchun, Proc. SPIE **2685**, 41 (1996).

EXPERIMENTAL EQUIPMENT AND PROCEDURE FOR THE INVESTIGATION OF SEMICONDUCTORS GALVANOMAGNETIC PROPERTIES IN PULSED MAGNETIC FIELDS

V. G. Savitsky, P. E. Storchun
Institute of Applied Physics at Ivan Franko Lviv State University
49 Pushkin Str., Lviv UA–290044, Ukraine

Experimental equipment and procedure for the investigation of semiconductors galvanomagnetic properties in pulsed magnetic fields are presented. The experimental equipment consists of the pulsed magnetic field generation system with the amplitude (B_{max}) up to $20T$ and a data–recording unit. The compensation of pickup noise–voltage induced by the pulsed magnetic field is originaly realized by compensating coils with the variable effective area. The analog amplifiers unit and the integrator that are a part of the data-recording unit form two measuring channels respectively. The output voltage from these channels are switched by the electronic analog commutator to the input of high-speed ADC in the program preset order. The results of analog–to–digital conversion (12 bits+one overflow bit) and channel number (3 bits) are then entered into RAM (2048×16bits) and respectively transmitted to the personal computer when the experiment is completed. The ADC high-speed performance allows for 2048 measurements during 2–2.5 periods of the magnetic field oscillation.