

УДК 537.86

Гайдай Ю.О., к.ф.-м.н., доц.,
Сидоренко В.С., к.ф.-м.н., с.н.с.,
Скрипка С.Л., к.ф.-м.н., м.н.с.,
Семенець Ю.Г.¹, інженер,
Сердега І.В., пров. інженер.

Ближньопольовий мікрохвильовий мікроскоп з активним зондом модуляційного типу

Запропоновано нову схему ближньопольового мікрохвильового мікроскопа в якій використовується цифровий НВЧ синтезатор і активний зонд модуляційного типу. Запропонований спосіб реєстрації малих відхилень діелектричної проникності об'єкту, що досліджується, забезпечує високу чутливість та точність вимірювальної системи. На основі теоретичних розрахунків та розроблених схем побудовано експериментальний макет ближньопольового мікрохвильового мікроскопа з активним зондом модуляційного типу.

Ключові слова: ближньопольовий НВЧ мікроскоп, активний зонд, модуляційний зонд, НВЧ синтезатор, варактор.

¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 03680, м. Київ, пр-т. Глушкова 4г, e-mail: semenetsyuriy1305@gmail.com

Gayday Yu.O., Ph.D., associate professor,
Sidorenko V.S., Ph.D., senior researcher,
Skrypka S.L., Ph.D., junior researcher,
Semenets Yu.G.¹, engineer.
Serdega I.V., lead engineer.

Near-field microwave microscope with active probe of modulation type

A new scheme of microwave near-field microscope that uses a digital synthesizer and an active probe of modulation type is proposed. The proposed registration method of the small permittivity deviations of examined objects provides high sensitivity and accuracy of the measuring system. On the base of theoretical calculations and developed schemes of probe an experimental model of near-field microwave microscope with active probe of modulation type has been designed.

Key Words: near-field microwave microscopy, modulation probe, microwave synthesizer, varactor.

¹ Taras Shevchenko National University of Kyiv, 03680, Kyiv, Glushkova st., 4g, e-mail: semenetsyuriy1305@gmail.com

Статтю представив д.ф.-м.н., проф. Скришевський В.А.

Вступ

Розвиток нанотехнологій та поява нанорозмірних пристроїв вимагають наявності відповідних приладів для контролю якості їх виробництва. Такі прилади повинні з високою роздільною здатністю і точністю в робочому діапазоні частот вимірювати такі параметри матеріалів і виробів як діелектрична проникність, тангенс кута діелектричних втрат, магнітна проникність, електропровідність тощо.

На мікророзмірному рівні, вимірювання діелектричних параметрів матеріалів та їх дефектоскопія у НВЧ діапазоні, задля контролю якості їх виготовлення, проводяться за допомогою методів ближньопольової мікрохвильової скануючої мікроскопії (МСМ).

Очевидно, що вирішення поставленої задачі потребує створення чутливих ближньопольових зондів з великою роздільною здатністю. Такі зонди повинні характеризуватись не тільки великою просторовою роздільною здатністю, але і здатністю розрізняти малі відхилення фундаментальних параметрів матеріалів.

Точність таких вимірювань обмежується стабільністю аналогових НВЧ генераторів. В існуючих конструкціях ближньопольових мікроскопів неможливе використання високостабільних цифрових НВЧ синтезаторів.

Відомі способи для вимірювань малих $\Delta\epsilon$ ґрунтуються на тому, що при зсуві резонансної частоти зонда під дією $\Delta\epsilon$ зразка, частоту НВЧ генератора перестроюють на величину зсуву. Прикладом, є мікроскоп розроблений Ксіангом

(X.D. Xiang) і Гао (С. Gao) [3]. Застосування такого мікроскопа можливе лише на частотах нижче 2-3 ГГц. Це обмеження пов'язане з тим, що в даній схемі фазовий обертач і фазовий детектор є елементами електроніки, а транзисторні фазові детектори ефективно працюють на частотах менших ніж 3 ГГц. Так, наприклад, фазовий детектор AD8302 [5] може працювати на частотах до 2,7 ГГц, а ФК2-29 вітчизняного виробництва до 1 ГГц. Таким чином, даний мікроскоп дає можливість отримати відносно точні дані щодо діелектричних параметрів речовини лише в області частот нижче ніж 2,7 ГГц. Окрім цього, недоліком є те, що точність транзисторного НВЧ фазового детектора недостатня для вимірювання малих неоднорідностей діелектричної проникності $\Delta\epsilon$.

Частково вирішити проблему розширення робочої частоти мікроскопа, вдалося в модуляційній схемі мікроскопа [4]. Головною особливістю і перевагою мікроскопа модуляційного типу над мікроскопом компенсаційного типу, виготовленим Ксіангом і Гао [3], є те, що компенсація відбувається на частоті модуляції 3кГц, а не на НВЧ. Відповідно, всі пристрої (крім резонатора та генератора) є звичайними пристроями електроніки, які працюють на частоті 3кГц, що знімає обмеження застосування даного мікроскопа по діапазону НВЧ. Проте ніяких принципових змін в систему вимірювань це не вносить. Для високої чутливості даного мікроскопа до малих змін $\Delta\epsilon$

необхідно, щоб в схемі Стейнхауера [4] використовувався високостабільний генератор, який можна було б перестроювати та модулювати по частоті, що є дуже складною і коштовною технічною проблемою.

Тому, нами була поставлена задача винайдення нових схем ближньопольової мікроскопії, в яких немає таких обмежень.

Опис способу та пристрою

Спільною рисою для всіх вище розглянутих мікрохвильових ближньопольових мікроскопів є наявність генератора, що перестроюється по частоті. Нестабільність аналогових генераторів вносить додаткові похибки в вимірювання малих зміщень максимуму резонансної характеристики схеми, що, в свою чергу, негативно впливає на точність вимірювань $\Delta\epsilon$. Неточність фіксації зміщення максимуму резонансної характеристики резонатора призводить, відповідно, до похибки у визначенні $\Delta\epsilon$.

З іншого боку, існують цифрові НВЧ генератори – синтезатори частоти на основі високочастотних, високостабільних кварцових резонаторів, які забезпечують належну стабільність. Але вони мають сітку фіксованих частот і не можуть плавно перестроюватись системою автоматичного регулювання відомого модуляційного способу [4].

Нами розроблено новий спосіб вимірювання малих неоднорідностей діелектричної проникності $\Delta\epsilon$ [1,2], який забезпечує

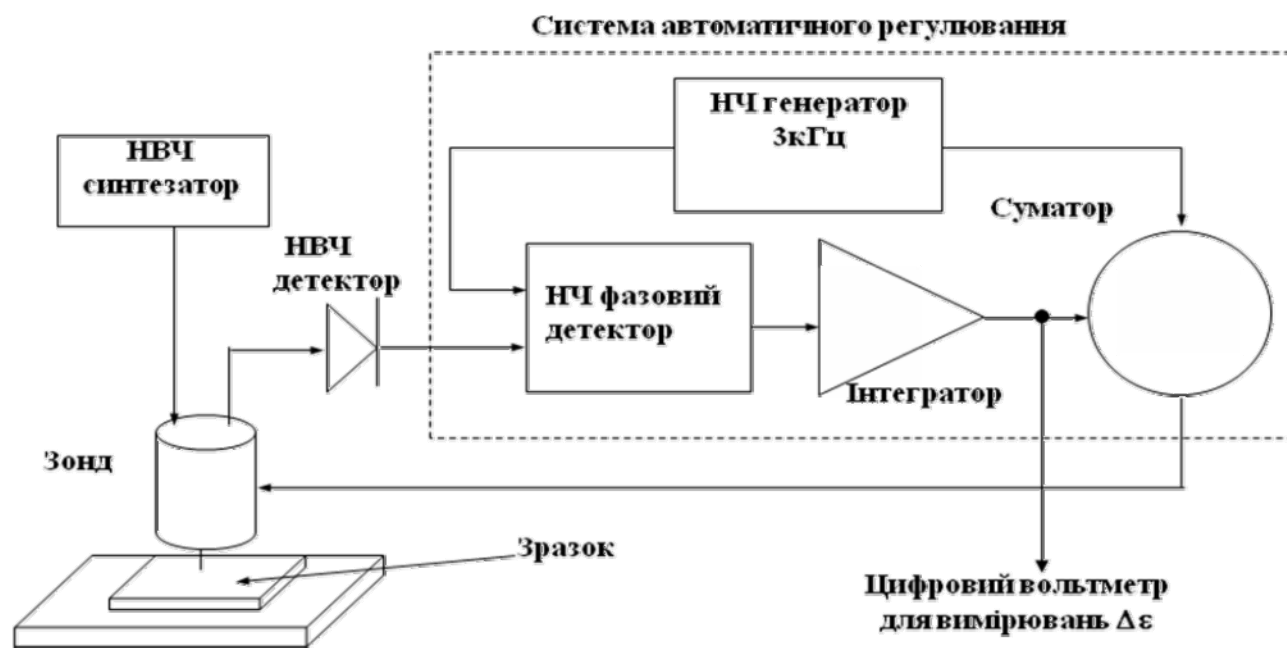


Рис. 1 Принципова схема ближньопольового мікрохвильового мікроскопа з активним зондом модуляційного типу

покращення точності вимірювань шляхом використання найбільш стабільних НВЧ генераторів – НВЧ синтезаторів із високостабільними фіксованими частотами і одночасно забезпечує апаратне спрощення та здешевлення ближньопольового мікрохвильового мікроскопа.

Принципова відмінність даного типу мікроскопа полягає в тому, що впродовж роботи схеми, генератор не змінює свою частоту, а лінійна і модуляційна (за гармонічним законом) зміна резонансної частоти резонатора відбувається за рахунок поміщеного в резонатор феритового зразка [1,2]. Тобто, ми змінюємо не частоту генератора, як в [3,4], а зсуваємо та модулюємо резонансну частоту зонда, повертаючи її на фіксовану частоту НВЧ синтезатора.

Схема працює наступним чином (рис.1). Сигнал з НВЧ синтезатора подається на резонатор, з нього на діодний детектор, далі вже НЧ сигнал підсилюється, після чого подається на НЧ фазовий детектор де порівнюється з опорним сигналом НЧ модуляції. Сигнал модуляції одночасно додається до постійної складової вихідного сигналу інтегратора та подається на систему керування зондом.

Сигнали зсуву та НЧ модуляції подаються на систему керування резонансною частотою зонда, таким чином він з пасивного некерованого стає активним керованим, а НВЧ генератор навпаки – з керованого стає некерованим з фіксованою частотою, що дозволяє застосувати високостабільні цифрові НВЧ синтезатори і покращити точність вимірювань малих $\Delta\varepsilon$.

Керування зондом, тобто модуляція та зсув його резонансної частоти може здійснюватись будь-яким способом – електричним (варікап, варактор), магнітним (ферит), чи механічним (п'єзоелемент, електромагніт). Це впливає тільки на технічну реалізацію того чи іншого варіанта пристрою, а сам спосіб залишається незмінним – для вимірювання малих неоднорідностей здійснюється зсув та НЧ модуляція резонансної частоти керованого зонда відносно фіксованої частоти НВЧ синтезатора.

Згідно з рис. 1 у вихідному стані, без зразка, система автоматичного регулювання подає з суматора на резонатор зонда НЧ сигнал модуляції від НЧ генератора. Таким чином, НВЧ резонансна частота зонда модулюється відносно фіксованої частоти НВЧ синтезатора, тому відбитий від резонатора зонда НВЧ сигнал стає модульованим, тобто у нього з'являється НЧ спектр модуляції з непарними та парними

гармоніками, які виділяються НВЧ детектором і подаються на вхід НЧ фазового детектора системи автоматичного регулювання. На другий вхід фазового детектора подається опорний

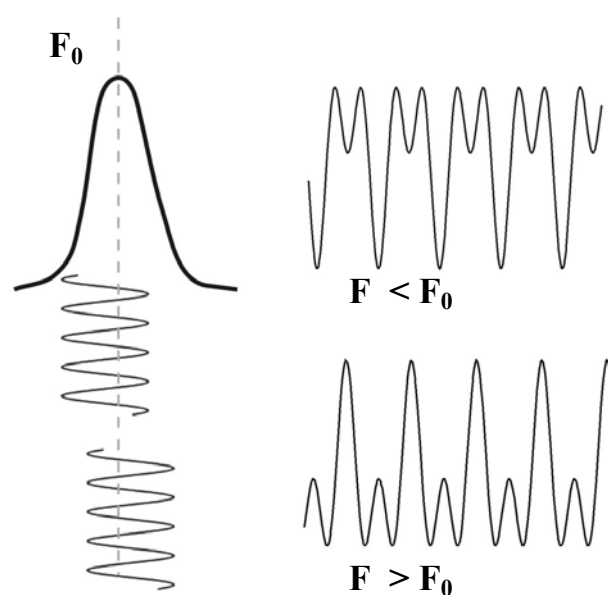


Рис. 2 Сигнал на виході фазового детектора при розстройці смуги частотної модуляції відносно резонансної частоти моди.

сигнал з НЧ генератора сигналу модуляції. Якщо НВЧ смуга модуляції зонда симетрична відносно фіксованої частоти НВЧ синтезатора, то непарні гармоніки на виході НВЧ детектора дорівнюють нулю і таким чином НЧ фазовий детектор видає в систему автоматичного регулювання нульовий сигнал похибки. Графіки роботи модуляційної системи показані на рис. 2.

При піднесенні зразка до голки зонда, центральна частота резонатора зонда разом зі смугою модуляції зміщується відносно фіксованої частоти НВЧ синтезатора, тобто смуга частотної модуляції зонда стає несиметричною відносно фіксованої частоти синтезатора, на виході НВЧ детектора з'являється перша гармоніка модуляційного сигналу НЧ, і тому в системі автоматичного регулювання після НЧ фазового детектора та інтегратора з'являється постійна складова напруги регулювання, величина якої пов'язана з величиною зсуву резонансної частоти зонда відносно фіксованої частоти НВЧ синтезатора, а таким чином і з величинами ε або $\Delta\varepsilon$ зразка, а знак залежить від знаку розстройки Δf резонатора зонда відносно фіксованої частоти НВЧ синтезатора. Постійна напруга регулювання додається до сигналу модуляції зонда і зміщує його резонансну частоту разом з полозою модуляції до

відновлення симетричного стану останньої відносно фіксованої частоти НВЧ синтезатора, коли перша гармоніка на виході НВЧ детектора знову дорівнюватиме нулю, тобто зникає постійна складова на виході фазового детектора і таким чином перестає змінюватись постійна напруга на виході інтегратора та суматора. Вимірюючи цифровим вольтметром постійну напругу інтегратора, яка необхідна для компенсації частотного зсуву резонатора зонда під дією $\Delta\epsilon$ зразка, можна з великою точністю фіксувати значення цих діелектричних величин. При кожній зміні $\Delta\epsilon$ в процесі сканування поверхні зразка буде змінюватись постійна напруга компенсації зсуву смуги модуляції зонда, та фіксуватись комп'ютером. Таким чином відбувається відслідковування найменших змін $\Delta\epsilon$.

Запропонована методика за рахунок керованого активного зонду модуляційного типу забезпечує збільшення точності реєстрації малих

неоднорідностей величини діелектричної проникності зразків $\Delta\epsilon$ та одночасно забезпечується апаратне спрощення і здешевлення ближньопольового мікрохвильового мікроскопа.

Експериментальний макет приладу

Для технічної реалізації зондуючої системи, було розроблено схему з активним модуляційним ближньопольовим зондом [1] та цифровим високостабільним синтезатором НВЧ сигналу. Блок-схема прототипу даного пристрою та його фотографія показані на рис.3 та рис.5 відповідно.

Зондуючу систему можна умовно поділити на три основні блоки:

- НВЧ система, що включає сам зонд, резонатор із системою перестройки по частоті, секцію збудження резонатору та детекторну секцію (рис. 4.).
- НЧ систему, що включає активні

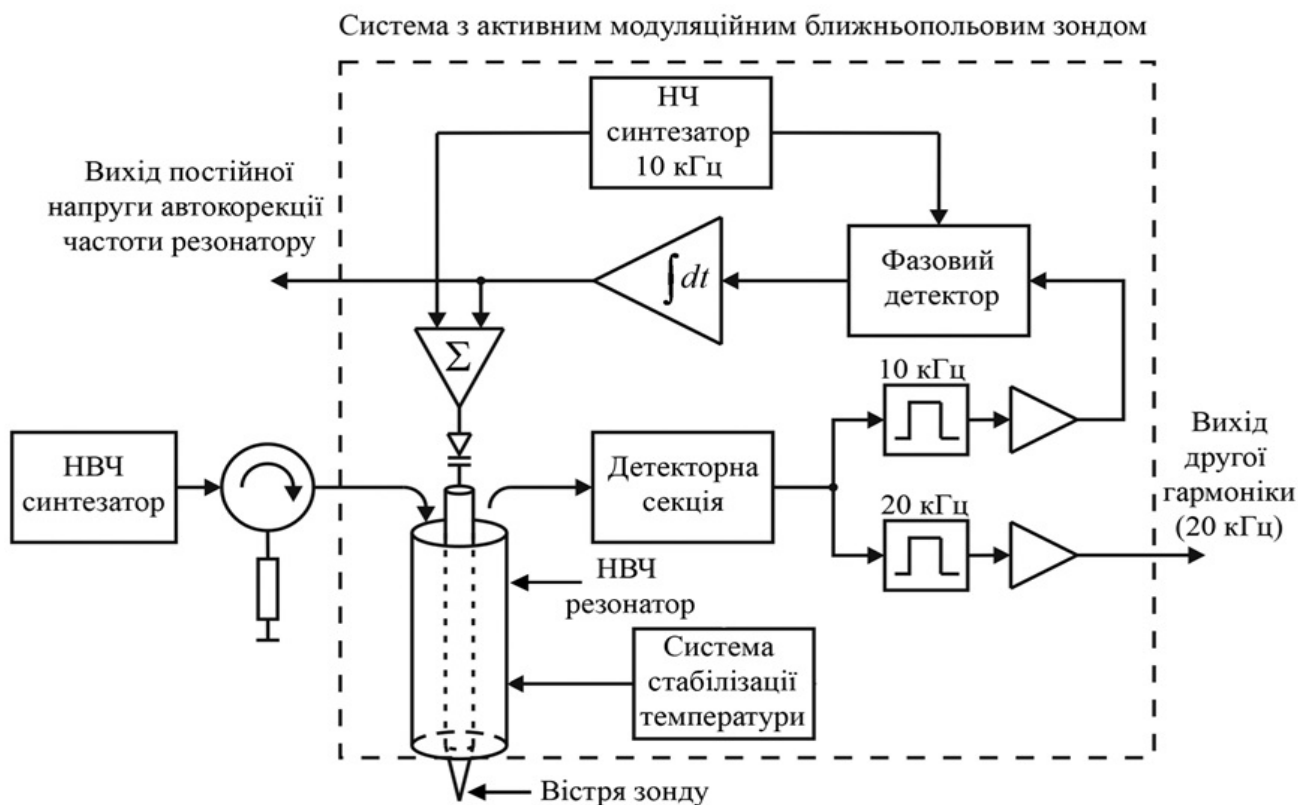


Рис. 3 Схема діючого експериментального макета ближньопольового мікрохвильового мікроскопа з активним зондом модуляційного типу.

зміщень резонансної частоти зонда, цифровий НВЧ синтезатор підвищує стабільність тракту, тобто зменшується похибка виміру малих величин $\Delta\epsilon$ і, таким чином, значно підвищується роздільна здатність вимірювання малих

фільтри, синтезатор НЧ сигналу та фазовий детектор.

- Систему стабілізації напруги живлення з інтегрованою у неї схемою стабілізації температури НВЧ резонатора.

Геометричні параметри резонатору обрано таким чином, щоб його резонансна частота потрапляла в діапазон 6-12 ГГц, оскільки саме в такому діапазоні існують смуги, що широко використовуються при створенні НВЧ радіоапаратури.

Далі сигнал відгалужується та потрапляє в детекторну секцію де виділяються його НЧ спектральні компоненти. Результуючий низькочастотний сигнал подається на подальшу обробку в НЧ систему автоматичного регулювання.

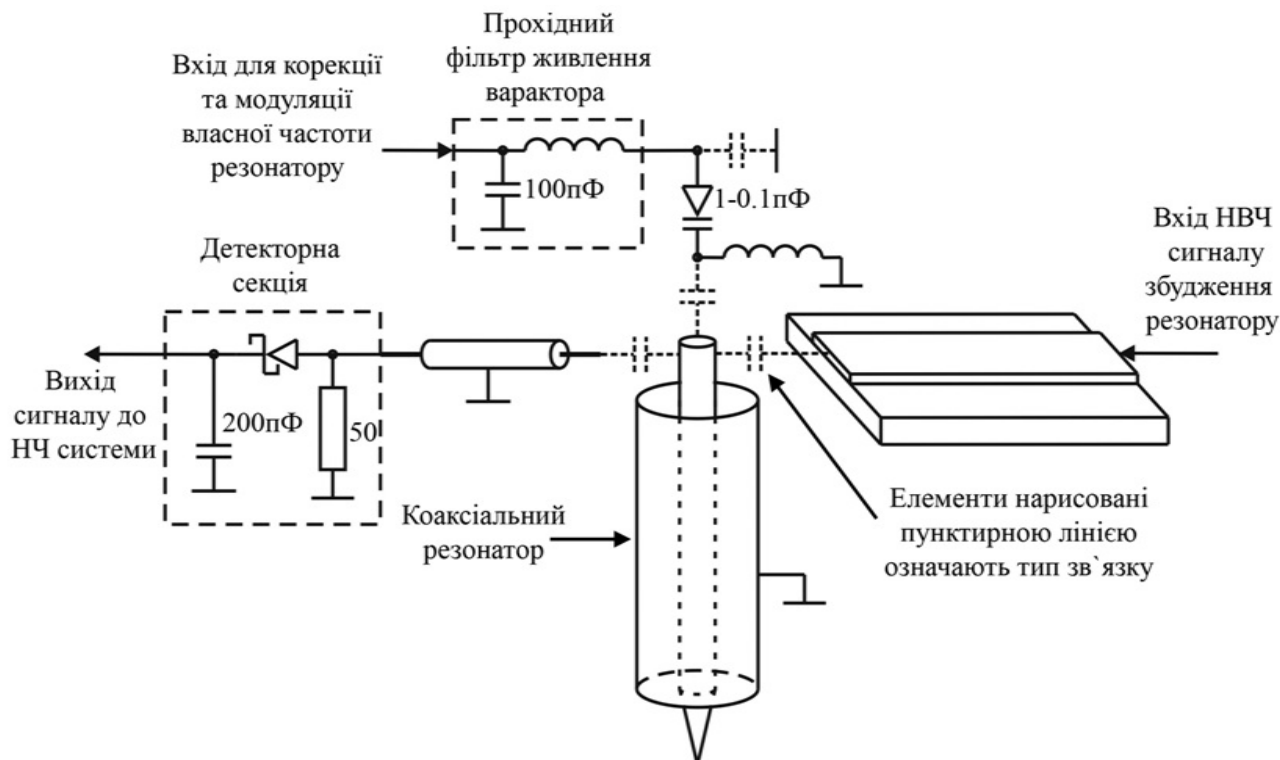


Рис. 4 Принципова схема НВЧ системи.

Збудження НВЧ системи здійснюється за допомогою фазо-стабілізованого НВЧ синтезатора через допоміжну мікросмушкову лінію (рис.4), що має слабкий ємнісний зв'язок з резонатором на одному з його кінців, тобто в області максимуму електричного поля. В тому ж самому місці встановлено НВЧ варактор. Керування варактором здійснюється через LC-фільтр реактивний опір якого було підбрано таким чином, щоб він був мінімальним в досліджуваному діапазоні частот.

Для усунення умови формування стоячих хвиль між синтезатором та резонатором встановлено феритовий невзаємний елемент.

Принцип роботи НВЧ системи полягає в наступному. За допомогою синтезатора в резонатор подається НВЧ сигнал та збуджується його перша мода ТЕМ. В свою чергу, на варактор подається змінна компонента НЧ сигналу частотою 10 кГц, що призводить до циклічного зсуву власної частоти резонатора відносно частоти синтезатора. Це, в свою чергу, призводить до виникнення амплітудної модуляції та відповідної зміни спектру НВЧ сигналу в

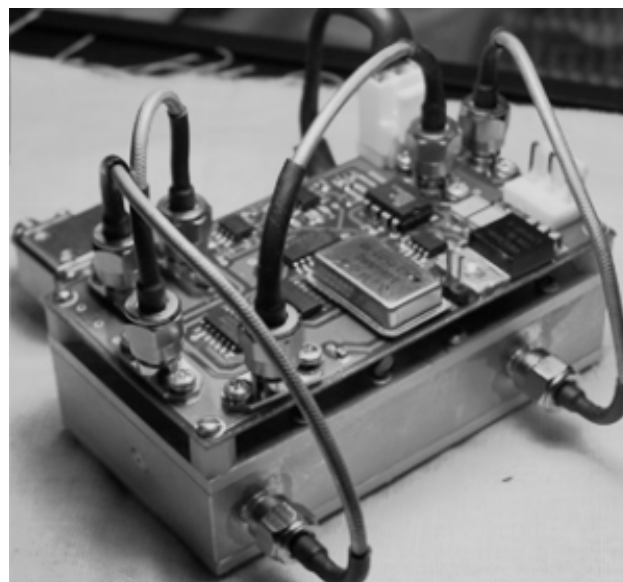


Рис. 5 Фотографія діючого експериментального макета ближньопольового мікрохвильового мікроскопа з активним зондом модуляційного типу.

Основний принцип роботи НЧ системи полягає в наступному. Як було зазначено в

попередньому розділі, спектральні компоненти з виходу детекторної секції подаються на вхід НЧ системи. Оскільки з усього спектру нас цікавлять лише перші дві гармоніки на частотах 10 кГц та 20 кГц, то в першому каскаді НЧ системи відбувається розділення, фільтрація та підсилення окремо кожної з них. Далі сигнал першої гармоніки подається на один з входів НЧ помножувача гармонічних сигналів AD633, який за рахунок послідовного з'єднання з пасивним фільтром низьких частот та інтегратором, утворює фазовий детектор. На другий вхід AD633 подається фазостабільний сигнал опорного НЧ синтезатора. Отримана на виході інтегратора постійна напруга за допомогою операційного підсилювача додається до змінної напруги НЧ синтезатора, та подається в НВЧ систему безпосередньо на варактор. Таким чином, одночасно здійснюється, як частотна корекція за рахунок постійної компоненти напруги, так і гармонічна модуляція – за рахунок змінної компоненти, власної частоти першої моди НВЧ резонатора.

Очевидно, що за такої схеми, зміна величини постійної амплітуди на варакторі та амплітуди другої гармоніки, буде залежати від зміни фундаментальних параметрів НВЧ резонатора тобто, частоти його першої моди та його добротності, які в свою чергу залежать від

параметрів матеріалу, що вноситься в область ближнього поля вістря зонду. Таким чином, вимірюючи зміну амплітуди постійної напруги на варакторі та зміну амплітуди другої гармоніки, можна визначити величину зміни комплексної діелектричної проникності $\Delta\epsilon$ досліджуваного зразка.

Висновки

Розроблені новий модуляційний метод ближньопольової мікрохвильової діагностики діелектричних матеріалів та схема ближньопольового мікроскопа. З'явилася можливість застосування замість дорогих стабільних аналогових генераторів порівняно дешеві і високостабільні цифрові НВЧ синтезатори, чим додатково підвищується роздільна здатність вимірювань малих значень неоднорідностей діелектричної проникності зразків. Теоретичні розрахунки та апробація експериментального макету, показали високу ефективність ближньопольового мікрохвильового мікроскопа з активним зондом модуляційного типу.

Робота виконана в рамках бюджетної теми №12БП052-01.

Список використаних джерел

1. *Sidorenko V.S.* Active probe of modulation type in microwave microscopy / V.S. Sidorenko, Yu.O. Gayday, P.D. Apalkovski, O.V. Sinkevich // Radiophysics and Electronics. Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. – 2011. – №15, – P. 53-56.
2. *Grygoruk V.I.* Near-field microscopy with active probe of modulation type / V.I. Grygoruk, V.S. Sidorenko, P.D. Apalkovsky // Proc. of the XII International young scientists' conference on applied physics, chapter Physics and Electronics of Semiconductors and Dielectrics. – Kyiv, Ukraine. – 23-26 may 2012. – P. 128-129.
3. Patent № US 6,532,806 B1 США, МПК7 G 01 B 7/34, H 01 J 37/20. Scanning evanescent electro-magnetic microscope / X.D. Xiang, C. Gao, P.G. Schultz, T. Wei; applicant and patentee The Regents of the University of California, Oakland, CA (US). — № 09/695,508; stated 23.10.2000; posted 18.03.2003.
4. Patent № US 6,376,836 B1 США, МПК7 H 01 J 3/14. Disentangling sample topography and physical properties in scanning near-field microwave microscopy / S.M. Anlage, B.J. Feenstra, D.E. Steinhauer; applicant and patentee University of Maryland, College Park, MD (US). — № 09/473,961; stated 29.12.1999; posted 23.04.2002.
5. <http://www.analog.com/ru/rfif-components/logampsdetectors/ad8302/products/product.html>

Надійшла до редколегії 13.11.2013