

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.
ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твёрдого тела

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОДВИЖНОСТИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДОВ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ СРЕДСТВАМИ
БЛИЖНЕПОЛЕВОЙ СВЧ МИКРОСКОПИИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ
НАПРАВЛЕНИЯХ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 2 курса 201 группы по направлению 11.04.04 «Электроника и
наноэлектроника» факультета нано- и биомедицинских технологий
Акстановой Алины Ефимовны

Научный руководитель

доцент, к.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

А.Э. Постельга

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

Д.А. Усанов

инициалы, фамилия

Саратов, 2018

ВВЕДЕНИЕ

Многие традиционно используемые СВЧ-методы измерения параметров материалов и структур позволяют получить результат измерений, усредненный по размеру, сравнимому с длиной волны излучения. Пространственное разрешение при контроле изменения свойств материалов с использованием таких методов ограничивается несколькими миллиметрами.

Для измерения подвижности носителей заряда в полупроводниковых структурах применяются методы, основанные на использовании гальваномагнитных эффектов в полупроводниковых материалах [1 – 3]. Следует отметить, что такие измерения представляют собой трудоемкие и малопроизводительные операции.

Одним из наиболее распространенных методов измерения является метод СВЧ магнитосопротивления [4 – 7], в основу которого положен эффект изменения потерь, вносимых полупроводником в СВЧ электрическое поле в зависимости от величины приложенного внешнего постоянного магнитного поля.

Цель работы: показать возможность определения величины подвижности носителей заряда полупроводниковых материалов средствами двухзондовой ближнеполевой СВЧ микроскопии.

Реализация цели работы обеспечивалась решением следующих задач:

- критический анализ литературы, посвященной ближнеполевой СВЧ микроскопии, а также магниторезистивному эффекту (далее магнитосопротивлению) и методам измерения подвижности носителей заряда в полупроводниковых структурах;
- критический анализ литературы, посвященной измерению параметров полупроводников на СВЧ;
- экспериментальная реализация методики измерения величины подвижности носителей зарядов полупроводниковых материалов, средствами двухзондовой СВЧ микроскопии.

1 Бесконтактные методы измерения полупроводников на СВЧ

Контроль параметров полупроводников методом СВЧ имеет существенные преимущества перед зондовым, поскольку является бесконтактным и позволяет получить усредненные по объему параметры полупроводника.

Самые распространенные бесконтактные методы определения параметров полупроводников представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Бесконтактные методы определения параметров полупроводников

Методы	Недостатки
Волноводные методы измерения электрофизических параметров полупроводников	Для измерения параметров полупроводников волноводным методом необходим образец специальной формы для минимизации зазоров между образцом и волноводом и возможно измерить лишь усреднённые параметры;
Мостовые методы измерения параметров полупроводников	Необходимость в высококвалифицированном персонале, а также в сложной регистрирующей аппаратуре. При использовании данного метода может возникнуть неоднозначность полученных результатов, поэтому необходимо производить измерения двух образцов с двумя разными толщинами;
Резонаторные методы измерения параметров полупроводников	При измерении параметров полупроводниковых материалов резонаторными методами возникают погрешности, связанные с потерями электромагнитной энергии в стенках резонатора. Источником погрешности может быть зазор между образцом и стенками резонатора, что приводит к расстройке резонатора;
Измерение параметров материалов методом	Возникает требование к форме пластин, заключающееся в необходимости существования

волноводно- диэлектрического резонанса	прямолинейного участка на боковой грани образца, превышающего размер узкой стенки;
Ближнеполевая СВЧ- микроскопия	В отличие от однозондового метода двухзондовый обладает большей чувствительностью за счет наличия в измерительной головке двух диафрагм : емкостной и индуктивной.

2 Измерение подвижности носителей заряда в полупроводниковых структурах

Для измерения подвижности носителей заряда в полупроводниковых структурах применяются методы, основанные на использовании гальваномагнитных эффектов в полупроводниковых материалах [8 – 10].

В таблице 2 представлены методы определения подвижности носителей заряда в полупроводниковых материалах.

Таблица 2 - Методы определения подвижности носителей заряда в полупроводниковых материалах.

Методы	Описание
Измерение дрейфовой подвижности	Скорость дрейфа носителя заряда в электрическом поле, деленная на единицу напряженности поля $\mu = x/U\tau d; \mu = \frac{x}{U\tau d}$
Измерение подвижности по геометрическому магнитосопротивлению	На исследуемый образец наносятся омические контакты большой площади и через них в направлении x пропускается электрический ток I_x . В поперечном магнитном поле B_z в образце возникает холловский ток I_y . результирующий ток в образце будет направлен под некоторым холловским углом к току I_x , что приведет к

	изменению сопротивления образца в направлении x $\frac{\Delta R}{R_0} = (\mu_m * B_z)^2$;
Волноводный метод СВЧ магнитосопротивления	Подвижность свободных носителей заряда с постоянными затухания волны в волноводе при наличии внешнего магнитного поля и без него $\mu_n = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{a-a_m}{a_m}}$;
Резонаторный метод СВЧ магнитосопротивления	Измеряя добротности пустого и заполненного резонатора в присутствии и без внешнего постоянного магнитного поля, можно определить подвижность свободных носителей заряда в полупроводнике $\mu_n = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{\Delta Q/Q - \Delta Q^m/Q^m}{\Delta Q^m/Q^m}}$

3 Экспериментальная реализация методики измерения величины подвижности носителей заряда полупроводниковых материалов, средствами двухзондовой СВЧ микроскопии

Экспериментальные исследования проводились на установке, схема которой приведена на Рисунке 1. СВЧ излучение от генератора качающейся частоты направлялось через коаксиально-волноводный преобразователь в волновод, далее в низкоразмерный резонатор [11] измерительной головки 10 и через иглы-зонды на образец. Падающая волна 8 и отраженная волна 9 детектировались и попадали на вход панорамного измерителя коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) и ослабления Я2Р-67 2. Результаты измерений оцифровывались с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и поступали на компьютер 1 для обработки.

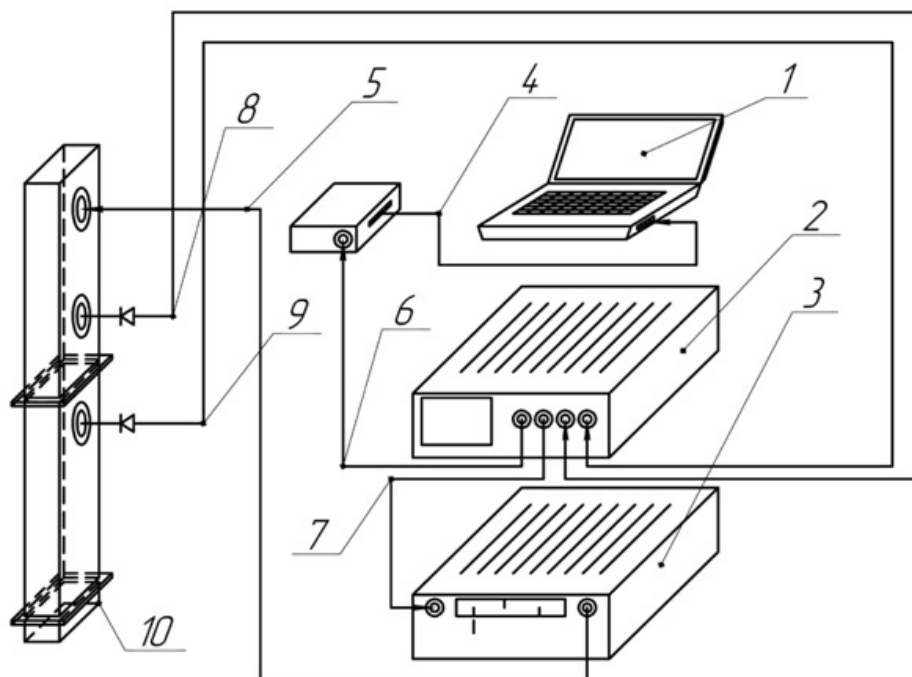


Рисунок 1 - Схематичное изображение измерительной установки.

1 – компьютер, 2 – панорамный измеритель КСВН и ослабления, 3 – генератор качающей частоты, 4 – цифровой сигнал, 5 – СВЧ сигнал, 6 – аналоговый сигнал, 7 – сигнал тактирования, 8 – падающая волна, 9 – отраженная волна, 10 – измерительная головка.

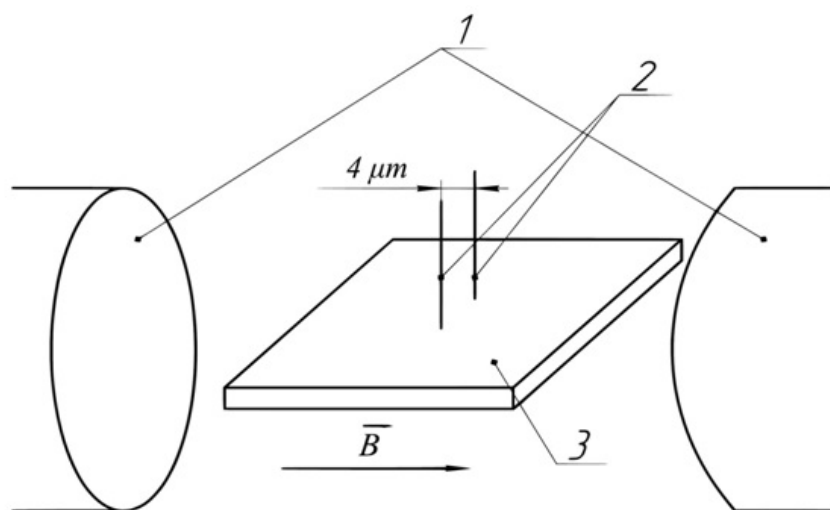


Рисунок 2 - Схематичное взаиморасположение игл измерительного зонда, исследуемого образца и полюсов электромагнита. 1 – полюса электромагнита, 2 – иглы-зонды, 3 – исследуемый образец.

Исследуемый образец арсенида галлия, с концентрацией носителей заряда $1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, измеренной методом плазменного резонанса, и подвижностью $4100 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, определенной по номограммам для

различных концентраций [12], имел геометрические размеры $12 \times 12 \times 1.25$ мм и закреплялся в непосредственной близости к сердечнику электромагнита таким образом, что бы магнитное поле было параллельно его широкой грани (рисунок 3). Учитывая малый размер зазора сердечника магнитное поле можно считать квазиоднородным.

К широкой грани исследуемого образца подводился зонд ближнеполевого СВЧ микроскопа, в котором в качестве измерительной резонансной головки использовался низкоразмерный волноводный резонатор типа «индуктивная диафрагма – емкостная диафрагма». При этом вектор напряженности электрического СВЧ поля между связанными с низкоразмерным резонатором близкорасположенными друг от друга на концах иглами-зондами был перпендикулярен вектору индукции магнитного поля. Расстояние между кончиками игл-зондов и образцом составляло 4 мкм (рис. 2).

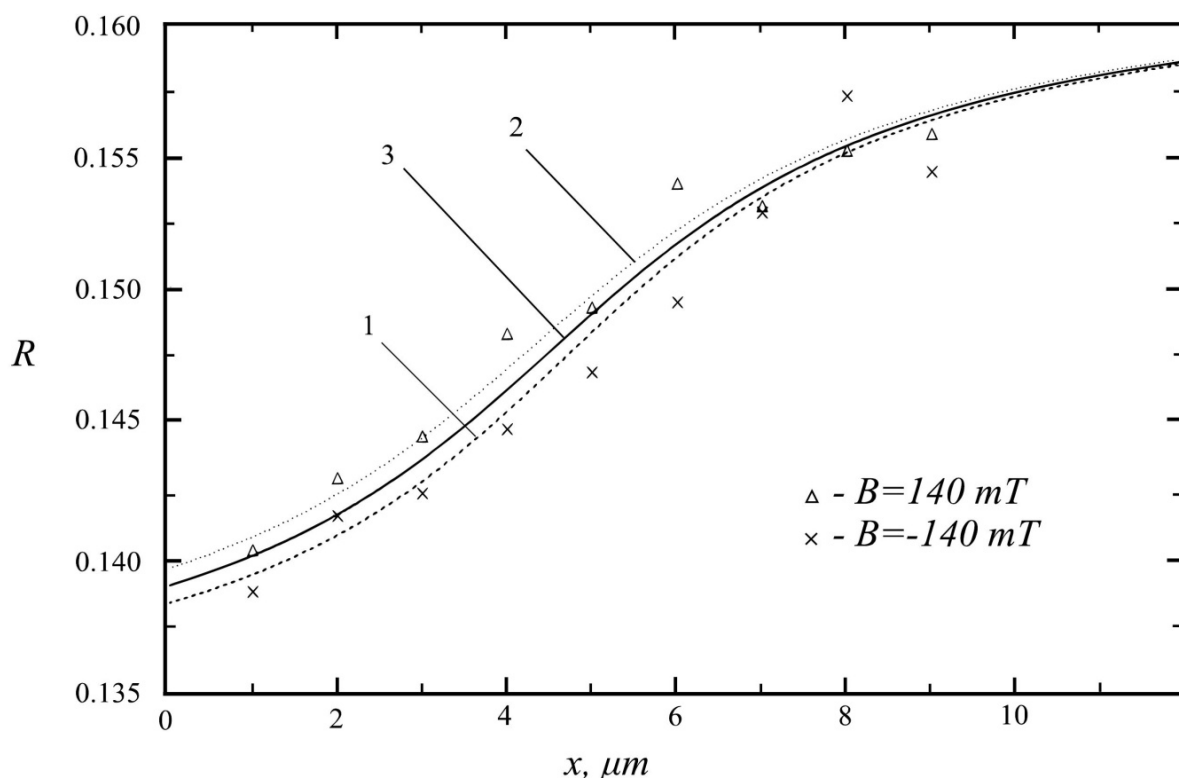


Рисунок 3 - Экспериментальная зависимость модуля коэффициента отражения R от расстояния зонд-образец x : 1 – $B = -140$ мТл, 2 – $B = 140$ мТл, 3 – калибровочная кривая.

Электромагнит калибровался с помощью линейного датчика Холла SS495A. Измерение модуля коэффициента отражения в полосе частот (8.23–8.29 ГГц) проводились с помощью измерителя КСВН и ослабления Я2Р-61 при различных значениях индукции магнитного поля, с последующей оцифровкой полученных результатов на персональной ЭВМ с помощью АЦП L-Card E14-140M. Индукция магнитного поля изменялась в пределах от -140 мТл до 140 мТл. Полученная зависимость модуля коэффициента отражения от индукции магнитного поля представлена на рисунке 4.

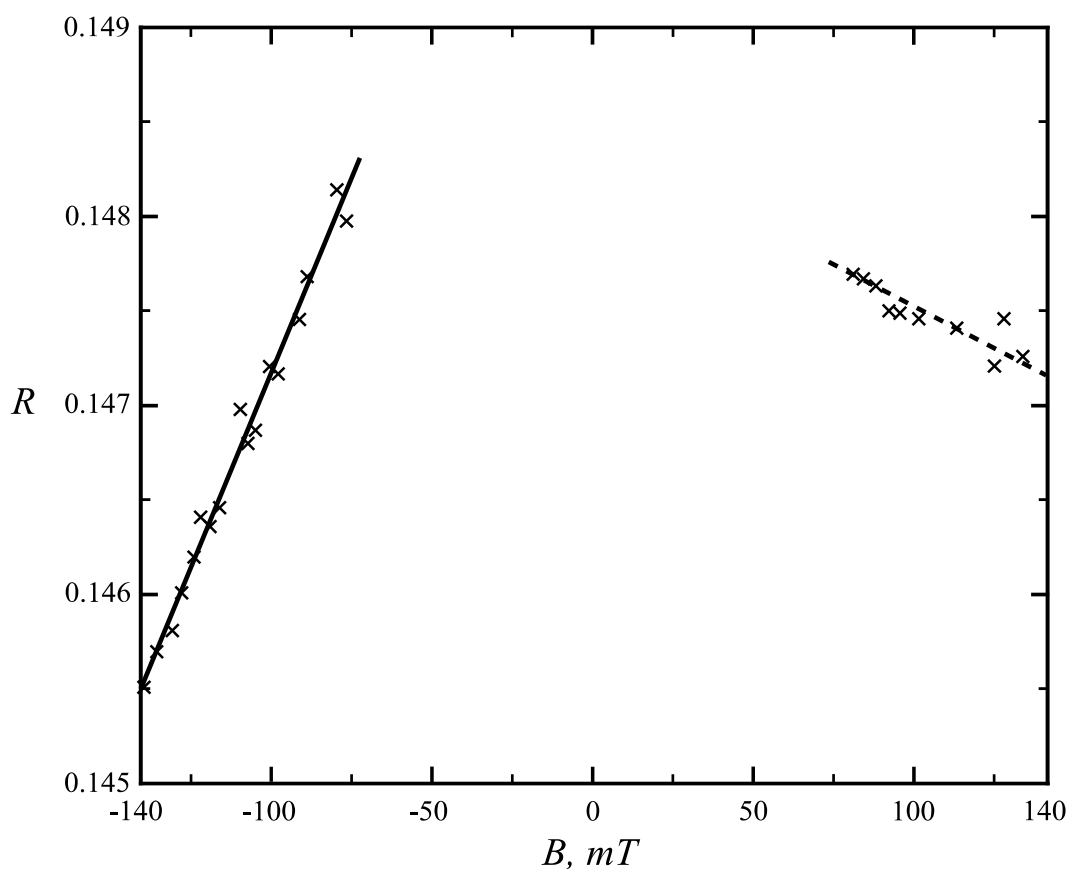


Рисунок 4 - Экспериментальная зависимость модуля коэффициента отражения R от индукции магнитного поля B : основное направление вектора индукции магнитного поля (пунктирная линия), противоположное направление вектора индукции магнитного поля (сплошная линия).

Для расчета искомой СВЧ подвижности носителей заряда в образце использовалось соотношение, применяемое в методах определения подвижности с использованием эффекта СВЧ магнитосопротивления [13-16]:

$$\mu = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{\alpha_0 - \alpha}{\alpha}}, \quad (1)$$

где μ – СВЧ подвижность носителей заряда, B – индукция магнитного поля, α_0 – показатель поглощения в материале без магнитного поля, α – показатель поглощения в материале при индукции магнитного поля равной B .

Для коэффициента прохождения по мощности T использовалось соотношение [17]:

$$T = \frac{(1 - R)^2 \exp(-\alpha x)}{1 - R^2 \exp(-\alpha x)}, \quad (2)$$

где x – глубина проникновения поля в полупроводнике, R – коэффициент отражения по мощности, полученный в результате измерений.

Из закона Бугера-Ламберта и закона сохранения энергии имеем:

$$\exp(-\alpha x) = 1 - R - T. \quad (3)$$

Решая систему уравнения (2) и (3) относительно α , находим значения показателя поглощения для случаев нулевой индукции магнитного поля α_0 , а также α для значения индукции B .

Подставив полученные значения α_0 , α в выражение (1), вычисляем СВЧ подвижность носителей заряда.

Измеренный коэффициент отражения для противоположных направлений приложенного внешнего магнитного поля оказываются различны, что может быть объяснено эффектом смещения СВЧ поля либо по направлению к зондам, либо в противоположном направлении [18,19]. Такое смещение можно считать физически эквивалентным уменьшению или увеличению зазора между зондами и поверхностью полупроводника. Эффект смещения поля в рассматриваемом случае объясняется возникновением холловской составляющей СВЧ поля в зондах, которая, в зависимости от направления магнитного поля, либо суммируется, либо вычитается из наводимого в зондах поля. Эта дополнительная составляющая должна быть одинакова по величине для противоположных направлений магнитного поля

и отличаться только знаком в случае линейной зависимости коэффициента отражения СВЧ излучения в области наблюдаемого резонанса от расстояния между концами зондов и измеряемой структурой. Экспериментальная зависимость модуля коэффициента отражения от расстояния между зондами и образцом представлена на рис. 2. Наблюдаемый на графике линейный участок зависимости R от x в области, соответствующей реальным значениям величины изменения зазора, связанным с эффектом смещения СВЧ поля, наблюдаемым в эксперименте по определению подвижности, позволяет использовать формулу среднего арифметического (4) для устранения погрешности, возникающей из-за эффекта смещения поля.

$$R = \frac{R_+ + R_-}{2}, \quad (4)$$

где R_+ , R_- - значения модуля коэффициента отражения для противоположных направлений внешнего магнитного поля.

Используя значение модуля коэффициента отражения, найденное с помощью выражения (4) для расстояния зонд-образец 4 мкм, на электронной вычислительной машине с помощью выражений (1-3) было получено значение подвижности носителей заряда $\mu = 4190 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Полученное значение СВЧ подвижности носителей заряда в арсениде галлия хорошо согласуется со справочными данными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведён критический анализ литературы о ближнеполевой СВЧ-микроскопии, её назначении и применении. Рассмотрены возможные конструкции СВЧ-микроскопа. Также изучены бесконтактные методы измерения параметров полупроводниковых структур на сверхвысоких частотах. К ним относятся:

- Волноводные методы измерения электрофизических параметров полупроводников;
- Мостовые методы измерения параметров полупроводников;
- Резонаторные методы измерения параметров полупроводников;
- Измерение параметров материалов методом волноводно-диэлектрического резонанса;

Проанализирована информация о магниторезистивном эффекте и метод СВЧ-магнитосопротивления, в котором подвижность свободных носителей заряда определяется по изменению в магнитном поле с индукцией B мощности, проходящей через волновод, содержащий полупроводниковую эпитаксиальную структуру. Изучены следующие методы СВЧ-магнитосопротивления, такие как:

- Измерение дрейфовой подвижности;
- Измерение подвижности по геометрическому магнитосопротивлению;
- Волноводный метод СВЧ магнитосопротивления;
- Резонаторный метод СВЧ магнитосопротивления.

Показана возможность измерения СВЧ подвижности носителей заряда с помощью сканирующего ближнеполевого СВЧ микроскопа и использованием эффекта СВЧ магнитосопротивления. Полученное в результате эксперимента значение СВЧ подвижности носителей заряда в образце арсениде галлия составило $\mu = 4190 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ковтонюк Н. Ф., Концевой Ю. А. Измерения параметров полупроводниковых материалов / Н. Ф. Ковтонюк, Ю. А. Концевой. - М.: Металлургия, 1970. - 429 С.
2. Методы определения основных параметров полупроводниковых материалов / Л. П. Павлов. - М.: Высшая школа, 1975. - 206 С.
3. Батавин В. В. Контроль параметров полупроводниковых материалов / В. В. Батавин. - М.: Сов. радио, 1976. - 102 С.
4. Jervis T. R., Jonson E. E. Geometrical magnetoresistance and Hall mobility in Gunn effect devices // Solid State Electronics. 1970. V. 13, № 2. P. 181 - 189.
5. Molnar B., Kennedy T. A. Evaluation of S and Se implanted GaAs by contactless mobility measurements // J. Electrochim. Soc. 1970. V. 125, № 8. P. 1318 - 1320.
6. Измерение подвижности носителей заряда методом СВЧ магнитосопротивления / В. С. Банников, Ю. Г. Качуровский, И. В. Петренко и др. // Электронная промышленность. 1982. № 9. С. 48 - 49.
7. Бесконтактные радиоволновые методы измерения электрофизических параметров полупроводниковых материалов / М. В. Детинко, Ю. В. Лисюк, Ю. В. Медведев, А. А. Скрыльников // Известия вузов. Физика. 1992. Т. 35, № 9. С. 45 - 63.
8. Ковтонюк, Н. Ф., Измерения параметров полупроводниковых материалов. / Н. Ф. Ковтонюк, Ю. А. Концевой. - М.: Металлургия, 1970. - 429 с.
9. Павлов, Л. П. Методы определения основных параметров полупроводниковых материалов. / Л. П. Павлов. - М.: Высшая школа, 1975. - 206 с.
10. Батавин, В. В. Контроль параметров полупроводниковых материалов / В. В. Батавин. - М.: Сов. радио, 1976. - 102 С.
11. Д.А. Усанов, С.С. Горбатов. Электрически управляемый низкоразмерный СВЧ-резонатор. Приборы и техника эксперимента, 2, 100 (2006).

12. M. Levinshtein, S. Rumyantsev, M. Shur. Handbook Series on Semiconductor Parameters. (Singapore- New Jersey-London-Hong Kong, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 1996), v. 1, p. 84.
13. W. Chaisantikulwat, M. Mouis, G. Ghibaudo, C. Gallon, C. Fenouillet-Beranger, D. K. Maude, T. Skotnicki, S. Cristoloveanu. Magnetoresistance technique for mobility extraction in short channel FDSOI transistors. [Solid-State Electronics](#), 50 (4), 637 (2006).
14. B. Molnar, T.A. Kenedy. Evaluation of S- and Se-implanted GaAs by contactless mobility measurement. J. Electrochem. Soc. Solid-State Science and Technology, 125 (8), 1318 (1978).
15. В.С. Банников, Ю.Г. Качуровский, И.В. Петренко. Измерение подвижности носителей заряда методом СВЧ-магнитосопротивления. Электронная промышленность, **9**, 48 (1982).
16. С.М. Безручко, В.Н. Подшивалов, А.И. Фисун. Прибор для бесконтактного определения подвижности носителей заряда в полупроводниковых структурах. Электронная промышленность, **3**, 66 (1986).
17. L.G. Parratt. Surface studies of solids by total reflection of x-rays. Physical Review, 95, 359 (1954).
18. H.E.M. Barlow, R. Koike. Microwave propagation in a waveguide containing a semiconductor to which is applied a steady transverse magnetic field. Proceedings of the IEEE, 110 (12), 2177 (1963).
19. Л.Н. Баранов, В.Б. Гаманюк, Д.А. Усанов. К вопросу о невзаимном распространении волн в волноводе, частично заполненном полупроводником. Радиотехника и электроника, 18 (11), 73 (1973).