

*Королёв С.А., Резник А.Н.
Институт физики микроструктур РАН*

Диагностика проводимости полупроводниковых материалов и структур с помощью СВЧ микроскопа

Разработан метод измерения проводимости полупроводниковых материалов и структур с помощью СВЧ микроскопа. Метод использует предложенную модель зонда микроскопа в виде монополярной или дипольной антенны, взаимодействующей с произвольной плоскостной структурой. Подгоночные параметры модели определяются из данных калибровочных измерений системы эталонных образцов. Возможности метода экспериментально изучены с использованием полоскового и коаксиального зондов микроскопа в частотном диапазоне 1 – 3 ГГц. Тестировались легированные плёнки GaN на подложке сапфира, а также транзисторные структуры с проводящим каналом на основе гетероперехода AlGaIn/GaN и квантовой ямы AlGaAs/GaAs/InGaAs/GaAs/AlGaAs. Для оценки точности полученные данные сопоставлялись с результатами измерений методом ван дер Пау. Разработанный метод был применён для исследования проводимости монокристаллических алмазных подложек и эпитаксиальных структур на основе полупроводникового алмаза.

Ключевые слова: СВЧ микроскоп, резонатор, антенна, диэлектрическая проницаемость, проводимость, плоскостная структура, тонкие пленки, полупроводниковый алмаз

СВЧ микроскопия интенсивно развивается на протяжении последних 20-30 лет [1,2]. Работа СВЧ микроскопа основана на использовании ближнего электромагнитного поля зонда с размером апертуры $D \ll \lambda$ (λ – длина волны излучения), что позволяет достигать субволнового пространственного разрешения $\sim D$. Важным преимуществом является то, что данный метод диагностики не требует создания контактов к образцу, позволяет проводить измерения без разрушения исследуемого объекта, используя маломощное неионизирующее излучение. Новый импульс исследованиям придало недавнее появление коммерческих приборов с разрешающей способностью в несколько десятков нанометров.

Получение количественной информации о характеристиках объекта с помощью СВЧ микроскопа представляет собой обратную задачу, которая к настоящему времени остаётся до конца не решённой. Основная сложность заключается в построении адекватной теории СВЧ микроскопа, требующей решения соответствующей электродинамической задачи с высокими требованиями к точности полученного решения. Из-за сложной геометрии зонда обычно делаются упрощающие модель предположения. В результате, предложено большое число аналитических моделей, основная часть которых, однако, позволяет описывать взаимодействие с достаточно простыми объемно однородными материалами, либо пленочными структурами. В работах [3,4] были предложены более общие модели, рассматривающие взаимодействие дипольной или монополярной антенн СВЧ микроскопа с произвольной плоскостной средой, каковой, как правило, являются полупроводниковые структуры. В данной работе выполнены измерения удельного сопротивления объёмных материалов и сопротивления проводящих слоёв многослойных полупроводниковых структур методом, разработанным в [4,5,6] на основе моделей [3,4]. Точность метода исследована в процессе тестирования полупроводниковых плёнок GaN, выращенных на подложке Al₂O₃, а также транзисторных структур с проводящим каналом на

гетеропереходе AlGaIn/GaN (T1) и в квантовой яме AlGaAs/GaAs/InGaAs/GaAs/AlGaAs (T2). При помощи СВЧ микроскопа исследованы монокристаллические подложки и эпитаксиальные структуры алмаза, которые активно изучаются в приложении к электронике и фотонике [7,8].

Конструктивно СВЧ микроскоп, как правило, представляет собой резонатор, часто выполняемый в виде полуволнового отрезка двухпроводной линии передачи. Чувствительным элементом резонатора служит антенна (зонд) малых волновых размеров. В данной работе мы использовали резонаторные зонды коаксиальной (КЗ) и полосковой (ПЗ) геометрии с резонансными частотами $f_0 = 1.3 - 1.4$ ГГц и $f_0 = 2.8$ ГГц соответственно. В случае КЗ, фотография и схема которого приведены на рис. 1, с образцом взаимодействует электрическое поле острия иглы, рассматриваемой нами, как монополярная антенна. Разрешающая способность определяется радиусом закругления острия и в нашем приборе составляет $\Delta \approx 70 - 80$ мкм. В случае ПЗ антенной служит торец зауженной полосковой линии резонатора, который представляет собой симметричный электрический диполь. Изготовленный нами ПЗ имеет разрешение $\Delta \approx 250$ мкм. СВЧ излучение вводится в резонатор через стандартный коаксиальный разъём. С помощью векторного анализатора цепей регистрируется резонансная характеристика микроскопа – частотный спектр комплексного коэффициента $S_{11}(f)$ матрицы рассеяния. С помощью элементов тонкой подстройки на резонансной частоте f_0 достигается безотражательный режим возбуждения резонатора, когда $|S_{11}(f=f_0)|^2 < -30$ дБ в отсутствие взаимодействия зонда с образцом. Управление положением зонда (подвод к образцу, сканирование) осуществляется с помощью прецизионной системы пьезо-подвижек с минимальным калиброванным шагом перемещения 0.3, 2.5 мкм ортогонально и в плоскости поверхности образца соответственно.

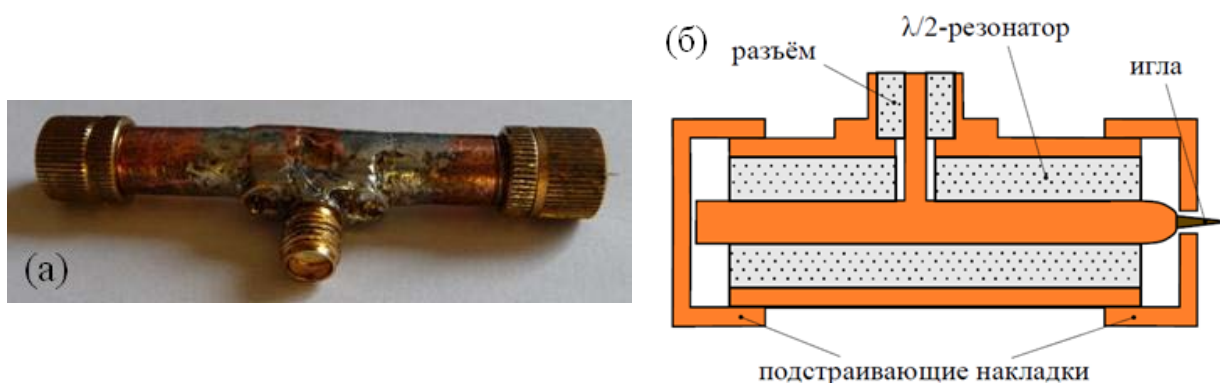


Рис. 1. (а) Фотография и (б) схема КЗ.

Сканирование производится на фиксированном расстоянии между зондом и образцом, которое для КЗ и ПЗ микроскопов выбрано $h = 0.3$ и 3 мкм, или в контактном режиме, когда $h = 0$. В ходе измерений в каждой точке образца регистрируются модуль и фаза коэффициента S_{11} в зависимости от частоты f . Взаимодействие зонда с образцом приводит к искажению резонансной кривой $|S_{11}(f)|^2$ – понижению резонансной частоты f_0 и падению добротности Q_0 . Измеряемые значения f_0 , Q_0 позволяют определить комплексный импеданс зонда Z_m , используемый для дальнейшего определения параметров образца.

Параметры образца находятся из решения обратной задачи путём минимизации функции невязки следующего общего вида:

$$F(d_1, \varepsilon_1, \dots, d_M, \varepsilon_M) = \sum_{j=1}^N \frac{|Z_c^j(d_1, \varepsilon_1, \dots, d_M, \varepsilon_M) - Z_m^j|^2}{|Z_m^j|^2}. \quad (1)$$

Рассматриваемый объект представляет собой структуру из M слоёв с толщинами d_i и комплексными диэлектрическими проницаемостями ε_i ($i = 1, \dots, M$). Набор экспериментальных значений импеданса Z_m^j ($j = 1, \dots, N$) получен с помощью N различных зондов. Z_c^j ($j = 1, \dots, N$) – результат расчета импеданса j -го зонда по теории [3,4] для образца с произвольными значениями параметров слоев d_i, ε_i . В случае зондирования многослойной структуры измерительная система может включать зонды с разным размером апертуры D и/или рабочей частотой f_0 . Искомым решением являются значения d_i, ε_i , при которых достигается минимум функции (1).

Рассматриваемые в данной работе образцы представляют собой либо материалы с подлежащей определению удельной проводимостью σ , либо многослойные полупроводниковые структуры, имеющие проводящий слой с неизвестными проводимостью σ и толщиной d . Комплексная диэлектрическая проницаемость материала определяется его статической проницаемостью ε_r и проводимостью σ по формуле $\varepsilon = \varepsilon_r - i\sigma/(2\pi\varepsilon_0 f)$, где ε_0 – электрическая постоянная вакуума. Наши исследования показали, что измерения в диапазоне частот 1 – 5 ГГц не позволяют отдельно определить параметры σ, d тонкой полупроводниковой пленки ($d < 10$ мкм). Измеримой характеристикой является слоевое сопротивление $R_{sh} = 1/(d\sigma)$. В такой ситуации для решения обратной задачи относительно проводимости материала σ или сопротивления слоя R_{sh} достаточно измерений одним зондом ($N = 1$) с фиксированной рабочей частотой f_0 .

Для успешной реализации разработанного метода модель СВЧ микроскопа должна применяться как самосогласованная, поскольку (как выяснилось) ее параметры зависят от электрических характеристик исследуемого образца и от расстояния зонд-образец. В этих условиях параметры модели являются подгоночными и определяются из предварительных калибровочных измерений на эталонных образцах. В данной работе используются два набора эталонов: объёмно однородные пластины и плёнки на диэлектрической подложке.

Разработанный метод был протестирован в исследованиях плёнок GaN на подложке сапфира, сопротивления которых по данным измерений методом ван дер Пау (ВДП) лежат в диапазоне $R_{sh}^{ВДП} = 0.02 - 14$ кОм/□. В качестве эталонов использовались объёмно однородные пластины кремния толщиной 0.5 – 0.7 мм и проводимостью $1.2 \times 10^{-4} - 53$ (Ом×см)⁻¹. В этом случае измерения ПЗ дают удовлетворительное согласие с данными ВДП в широком диапазоне значений R_{sh} . В интервале $R_{sh} = 0.07 - 14$ кОм/□ расхождение составляет 10 – 40%. При $R_{sh} < 0.05$ кОм/□ чувствительность СВЧ микроскопа падает, что приводит к снижению точности измерений. В измерениях КЗ расхождение с данными ВДП менее 30 – 40% наблюдается для $R_{sh} > 1$ кОм/□. При $R_{sh} < 1$ кОм/□ наблюдается систематическое (до 100% и более) превышение $R_{sh}^{КЗ}$ над $R_{sh}^{ВДП}$. При вышеуказанном способе калибровки существенное отличие в точности измерений R_{sh} низкоомных образцов может быть обусловлено разной структурой электромагнитного поля, а также различием размеров антенн КЗ и ПЗ микроскопов. Можно предположить, что использование эталонов с близкой к плёночным образцам структурой позволит повысить точность КЗ измерений. Подтверждением данной гипотезы являются выполненные исследования транзисторных гетероструктур.

На рис. 2 представлены линейные сканы фрагментов двухдюймовых транзисторных структур T1 и T2, показанные на вставке к рис. 2. Производились ПЗ и КЗ измерения профилей $R_{sh}(x)$. В КЗ сканировании профили получены с использованием двух систем калибровочных эталонов – указанных выше кремниевых пластин и пленочных структур GaN, тогда как в ПЗ измерениях использована только первая калибровочная система. Профили $R_{sh}(x)$, измеренные ПЗ, находятся в удовлетворительном согласии с измерениями

ВДП. Расхождение в среднем по всем точкам скана составляет менее 50%, что хорошо согласуется с вышеприведенными результатами исследования плёнок GaN. В КЗ измерениях использование плёночных эталонов позволило существенно повысить точность – расхождение с данными ВДП уменьшилось в среднем до 10%. Для сравнения, использование объёмно однородных эталонов даёт погрешность профилей, полученных КЗ, на уровне 50 – 100%.

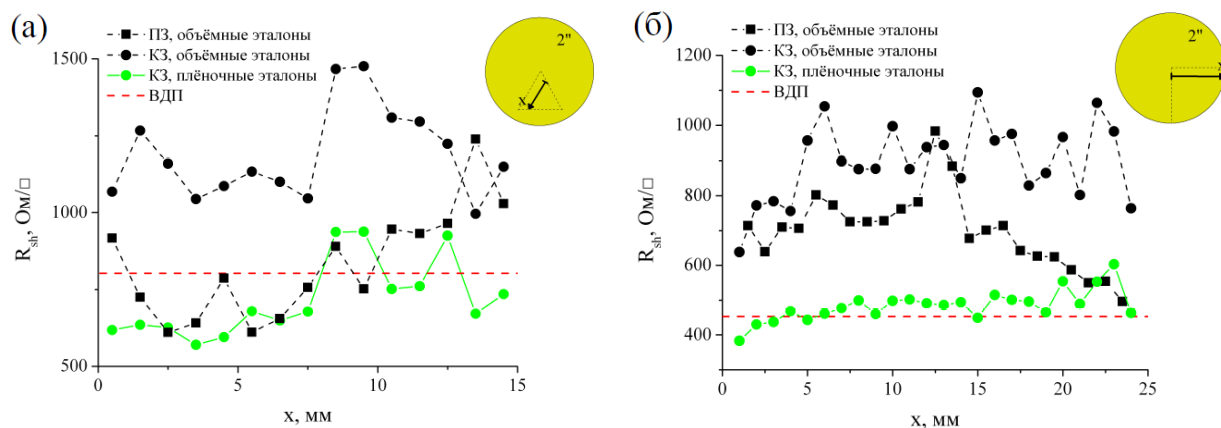


Рис. 1. Профили сканирования слоевого сопротивления R_{sh} транзисторных структур (а) T1 и (б) T2. Пунктирной линией показано значение R_{sh} , полученное ВДП. На вставках обозначено положение линий сканирования.

Наиболее отчетливо преимущества разработанного метода проявились в исследованиях монокристаллических алмазных подложек и эпитаксиальных алмазных структур [9,10]. В работе [9] с помощью СВЧ микроскопа было изучено сопротивление R_{sh} дельта-легированных бором эпитаксиальных слоёв алмаза, выращенных на монокристаллических алмазных подложках. Проводились измерения с помощью описанного выше КЗ микроскопа с частотой $f_0 = 1.3 - 1.4$ ГГц и разрешающей способностью $\Delta = 70 - 80$ мкм. Размеры поверхности образцов составляли 3×3 мм². Некоторые подложки имели дефект кристаллической структуры с латеральным размером 0.5 – 1 мм, над которым сопротивление эпитаксиального слоя R_{sh} повышалось более чем на порядок. По данным СВЧ сканирования было обнаружено, что некоторые подложки имеют неоднородное по поверхности распределение проводимости. При этом разработанный метод позволил измерить сопротивление эпитаксиального слоя даже в такой ситуации, когда проводящая подложка шунтирует эпитаксиальный слой. Достоверность данных СВЧ микроскопии подтверждена локальными четырёхзондовыми измерениями. В то же время, альтернативные методы, такие как ВДП и вторично ионная масс-спектрометрия (ВИМС), не позволили выявить неоднородность проводимости структур, установленную с помощью СВЧ микроскопа. Использование СВЧ микроскопии в комплексе с ВИМС и ВДП позволило определить концентрацию $N_p = 1.7 \times 10^{20}$ см⁻³ и подвижность $\mu = 15$ см²/(В×с) дырок в эпитаксиальной плёнке. Измеренные характеристики, по всей видимости, относятся к легированному дельта-слою алмаза.

В работе [10] была более детально исследована проводимость монокристаллических алмазных подложек. В качестве образцов использовались пластины того же производителя, что и в работе [9]. Были исследованы как подложки, которые не использовались для эпитаксии, так и подложки, которые претерпели несколько ростовых циклов в реакторе МРАСVD (microwave plasma assisted chemical vapor deposition) с последующими операциями шлифовки и полировки для удаления осаждённых алмазных слоёв. Подтверждено, что подложки являются неоднородно проводящими. Минимальное

значение $\rho = 1/\sigma$ на поверхности варьировало от образца к образцу в диапазоне 0.8 – 4.0 кОм×см, максимальное – 3.5 – >7 кОм×см. Характерный масштаб неоднородности проводимости, составляющий 2 – 4 мм, сопоставим с размером поверхности исследовавшихся кристаллов. Обнаружено, что при многократном использовании подложек для эпитаксии легированных алмазных структур по кромке образца возникает область повышенной проводимости.

Итак, в данной работе мы представляем метод количественной характеристики объёмных материалов и плёночных полупроводниковых структур по данным измерений СВЧ микроскопом. Метод апробирован в экспериментах с КЗ и ПЗ микроскопами, имевшими разрешение 70 – 250 мкм в диапазоне частот 1 – 3 ГГц. Процесс диагностики включает расчеты по предложенной в [3,4] теории микроскопа. Адекватное описание КЗ и ПЗ микроскопов дает модель монополюсной и дипольной антенн малых волновых размеров. Самосогласованное применение теории требует определения подгоночных параметров модели по данным калибровочных измерений на системе эталонных образцов. Точность метода исследована в процессе тестирования плёнок GaN на подложке сапфира и транзисторных структур на основе гетероперехода AlGaIn/GaN и квантовой ямы AlGaAs/GaAs/InGaAs/GaAs/AlGaAs. Показано, что разработанный метод позволяет оперативно получать карту сопротивления R_{sh} образца, содержащего встроенный в диэлектрическую матрицу проводящий слой. При этом достигается точность определения $R_{sh} \sim 10\%$. В выполненных исследованиях полупроводникового алмаза метод позволил получить информацию об электрофизических свойствах структур в условиях сильной латеральной неоднородности проводимости эпитаксиального слоя и подложки. СВЧ микроскопия имеет хорошие перспективы применений в технологии производства новых полупроводниковых материалов и структур, как инструмент бесконтактного неразрушающего картографирования электрических параметров с микронным пространственным разрешением.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-02-00914.

Библиографический список

1. A. Imtiaz, T. M. Wallis, P. Kabos, Near-Field Scanning Microwave Microscopy, IEEE Microwave Magazine, 2014, Vol. 15, P. 52 – 64.
2. S. M. Anlage, V. V. Talanov, A. R. Schwartz, Principles of near-field microwave microscopy in Scanning Probe Microscopy: Electrical and Electromechanical Phenomena at the Nanoscale, edited by S. Kalinin, A. Gruverman, New York: Springer, 2007, P. 215 – 253.
3. A. N. Reznik, Quasistatics and electrodynamics of near field microwave microscopy, Journal of Applied Physics, 2014, Vol. 115, P. 084501.
4. A. N. Reznik, S. A. Korolyov, Monopole antenna in quantitative near-field microwave microscopy of planar structures, Journal of Applied Physics, 2016, Vol. 119, P. 094504.
5. A. N. Reznik, E. V. Demidov, Quantitative determination of sheet resistance of semiconducting films by microwave near-field probing, Journal of Applied Physics, 2013, Vol. 113, P. 094501.
6. S. A. Korolyov, A. N. Reznik, Quantitative characterization of semiconductor structures with a scanning microwave microscope, Review of Scientific Instruments, 2018, Vol. 89, P. 023706.
7. C. J. H. Wort, R. S. Balmer, Diamond as an electronic material, Materials Today, 2008, Vol. 11, P. 22 – 28.
8. I. Aharonovich, A. D. Greentree, S. Prawer, Diamond photonics, Nature Photonics, 2011, Vol. 5, P. 397 – 405.
9. A. N. Reznik, S. A. Korolyov, M. N. Drozdov, Microwave microscopy of diamond semiconductor structures, Journal of Applied Physics, 2017, V. 121, P. 164503.
10. С. А. Королёв, А. Н. Резник, Е. А. Суругина, А. Н. Катруша, А. В. Колядин, В. И. Шашкин, Картирование проводимости монокристаллических алмазных подложек. Труды XXII Международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника», Том 2, Нижний Новгород: Издательство Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского, 2018, С. 660 – 661.