

**В.В. Витько^{1,2}, А.В. Кондрашов^{1,2}, А.А. Никитин^{1,2},
П.Ю. Белявский¹, А.Б. Устинов¹, Б.А. Калиникос¹,
Дж.Э. Батлер^{1,2}**

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»

²Институт прикладной физики РАН

Измерительная ячейка для исследования СВЧ свойств дельта-легированных алмазных образцов

Предложен метод измерения СВЧ параметров, дельта-легированных алмазных образцов в широком диапазоне частот. В основе метода измерения лежит алгоритм Николсона-Росса. Проведено моделирование S-параметров измерительной ячейки на основе симметричной полосковой линии передачи.

Ключевые слова: дельта-легированный алмаз, симметричная полосковая линия

В настоящее время актуальна проблема измерения СВЧ характеристик устройств, созданных на основе искусственно выращенных алмазных пленок, содержащих легированный дельта-слой. Важным с точки зрения оценки качества алмазной структуры является определение концентрации носителей заряда и их подвижности. Бесконтактно характеристики устройства, содержащего алмаз с дельта-легированным слоем, могут быть экспериментально измерены с помощью СВЧ волноведущей структуры. Измеряемый образец, расположенный в волноведущем тракте, создает скачок волнового сопротивления, что приводит к появлению стоячих волн.

Известно, что уровень вносимых образцом в волноведущий тракт потерь определяется мнимыми частями комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей образца. В работах [1] и [2] описан метод расчета комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей путем измерения мощностей прошедшей и отраженной волн. Благодаря описанному методу комплексную диэлектрическую проницаемость можно определить, зная S-параметры измеряемой структуры и ее геометрические размеры, по формуле:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{-(c/\omega L \ln(1/z))^2}{(1+\Gamma/1-\Gamma)^2}},$$

где L – длина образца, $z = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma}$, а Γ – коэффициент отражения, который определяется по формуле:

$$\Gamma = \frac{1 - (S_{21} + S_{11})(S_{21} - S_{11})}{(S_{11} + S_{21}) - (S_{21} - S_{11})} \pm \sqrt{\left(\frac{1 - (S_{21} + S_{11})(S_{21} - S_{11})}{(S_{11} + S_{21}) - (S_{21} - S_{11})}\right)^2 - 1}.$$

При этом знак перед корнем выбирается так, чтобы модуль коэффициента отражения был меньше единицы. Дальнейшее нахождение комплексных магнитных и диэлектрических проницаемостей проводится в соответствии с алгоритмом Николсона-Росса.

Известно, что в пространстве, содержащем свободные носители заряда, возникает ненулевой ток проводимости $\vec{j} = \sigma \vec{E}$. Тогда уравнение Максвелла может быть записано следующим образом:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = i\omega\epsilon_0(\epsilon' - i\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0})\vec{E} = i\omega\epsilon_0\epsilon_k\vec{E},$$

где $\epsilon_k = \epsilon' - i\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} = \epsilon' - i\epsilon''$ – комплексная диэлектрическая проницаемость, которая состоит из действительной ϵ' и мнимой ϵ'' частей.

Воспользовавшись простыми математическими преобразованиями над мнимой частью комплексной диэлектрической проницаемости, можно представить проводимость дельта-легированного слоя алмазного образца в следующем виде:

$$\sigma = \omega\epsilon_0\epsilon''.$$

Как было упомянуто выше, измерение проводимости позволяет оценить уровень легирования дельта-слоя в экспериментальном алмазном образце. Известно, что подвижность электронов в алмазе может достигать $4500 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, а подвижность дырок – $3800 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ [3]. Концентрация носителей заряда, сосредоточенных в дельта-легированном слое, может быть оценена, исходя из формулы:

$$\sigma = en\mu,$$

где e – заряд электрона, n – концентрация носителей заряда, а μ – подвижность носителей заряда.

В результате проведенной работы было показано, что приведенный метод неразрушающего измерения характеристик экспериментальных алмазных образцов, содержащих дельта-слой, наиболее эффективно может быть реализован с помощью симметричной полосковой линии. Симметричная полосковая линия состоит из тонкого металлического проводника прямоугольной формы – полоска, находящегося в диэлектрической среде между двумя заземленными металлическими пластинами. Полосковая линия обычно заполняется однородным диэлектриком, но возможно и частичное диэлектрическое заполнение разными диэлектриками. Низшей модой в такой линии является квази-ТЕМ волна, которая характеризуется отсутствием частоты отсечки. Другой особенностью такого волновода является интенсивное проникновение поля электромагнитной волны в окружающий полосок диэлектрик.

На рис. 2 представлено поперечное сечение измерительной линии на симметричной полосковой линии передачи. Диапазон рабочих частот симметричной полосковой линии определяется, в основном, ее геометрическими размерами, а именно шириной металлического полоска и расстоянием между металлическими экранами [4].

Численное моделирование S-параметров такой структуры показало возможность измерения свойств алмазных слоев с высокой точностью. Электродинамическая модель, используемая в моделировании, представлена на рис. 3.

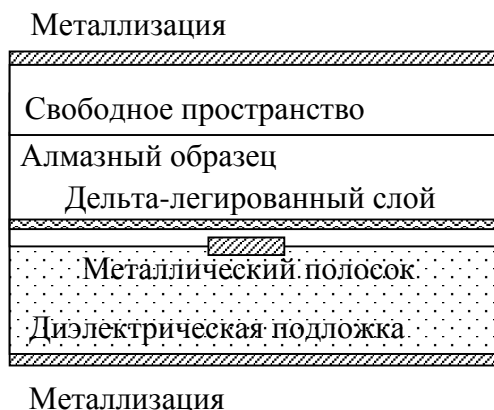


Рисунок 2. Поперечное сечение симметричной полосковой линии с включенным в нее алмазным образцом

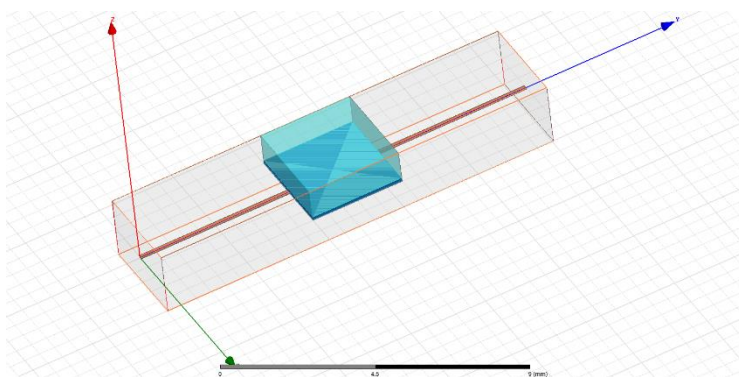


Рисунок 3. Модель измерительной ячейки, построенной на симметричной полосковой линии передачи

Тонкая оранжевая линия, совпадающая с осью Y – микрорезонатор. Голубой параллелепипед – образец алмаза с дельта-слоем (более яркая часть в основании образца). Металлизации на рисунке не показаны, но в расчете учитывались. Плоскости металлизации были параллельны плоскости XoY и были расположены на равном расстоянии от полоска. Расстояние равнялось толщине исследуемого образца алмаза. В ходе моделирования рассчитывались передаточные характеристики такой полосковой линии при изменении концентрации носителей заряда в дельта-легированном слое алмаза.

Полученные результаты моделирования передаточных характеристик показаны на рис. 4. Изменение концентрации носителей заряда в дельта-слое приводит к изменению частоты, соответствующей минимуму передаточной характеристики, а также соответствующему значению ослабления. Увеличение концентрации носителей заряда приводит к росту значения частоты минимума передаточной характеристики, а также к увеличению значения СВЧ потерь в исследуемом образце (рис. 4).

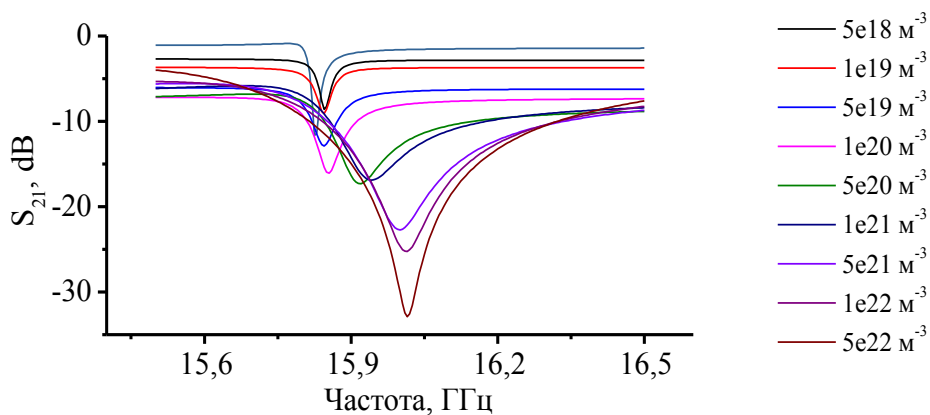


Рисунок 4. Численный расчет S -параметра измерительной ячейки на симметричной полосковой линии передачи при различных значениях концентрации носителей заряда в дельта-легированном слое

На рис. 5 представлены зависимости частоты минимума передаточной характеристики (а) и соответствующего ему значения коэффициента пропускания (б) от концентрации носителей заряда в дельта-легированном слое.

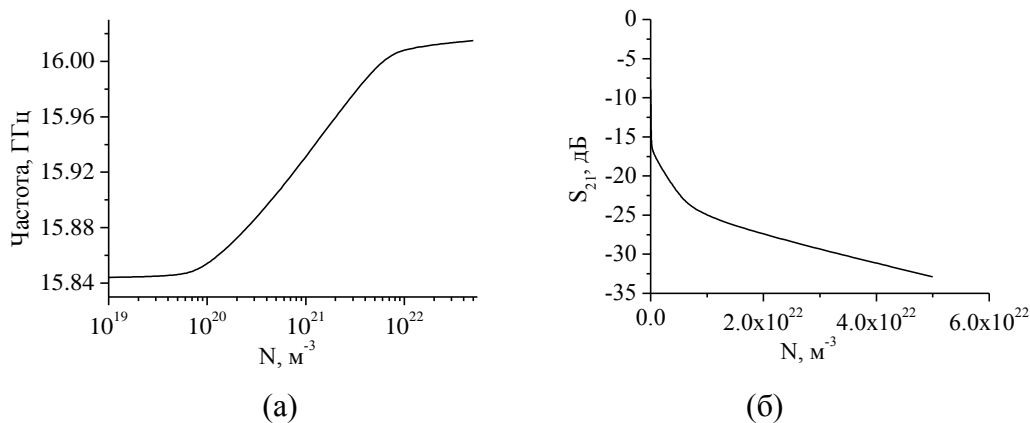


Рисунок 5. Зависимости частоты минимума передаточной характеристики (а) и соответствующего ему значения коэффициента пропускания (б) от концентрации носителей заряда в дельта-легированном слое

Из зависимости можно видеть, что частота минимума значительно изменяется в диапазоне концентраций носителей заряда от 10^{20} до 10^{22} м^{-3} . При более высоких значениях N более заметным становится изменение ослабления. Таким образом, предложенный способ позволяет, измеряя СВЧ характеристики образцов алмаза, с высокой точностью определять концентрацию носителей заряда в дельта-легированном слое.

В заключение отметим, что предлагаемый метод позволяет проводить измерения СВЧ параметров образцов дельта-легированного алмаза в широком диапазоне частот (практически в интервале $100 \text{ МГц} — 100 \text{ ГГц}$). В ходе данной работы было проведено численное моделирование измерительной ячейки. Было установлено, что конструкция измерительной ячейки, построенной на симметричной полосковой линии передачи, не ограничивает геометрические размеры образца и обладает высокой чувствительностью к изменению СВЧ параметров образца.

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке в рамках гранта Правительства Российской Федерации по Постановлению № 220 (Договор № 14.В25.31.0021 от 26 июня 2013 г) и гранта РФФИ (№14-02-00 496А).

Библиографический список

1. Paul D. Domich, Optimization Techniques for Permittivity and Permeability Determination / Domich Paul D., Baker-Jarvis James, and Geyer Richard G. // J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. – 1991. – Vol. 96. – p. 565.
2. A. M. Nicolson, Measurement of the Intrinsic Properties of Materials by Time-Domain Techniques / Nicolson A. M. and Ross G. F. // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1970. – Vol. Im-19. – №. 4. – pp. 377-382.
3. J. Isberg, High Carrier Mobility in Single-Crystal Plasma-Deposited Diamond / Isberg J., Hammersberg J., Johansson E., Wikstrom T., Twitchen D. J., Whitehead A. J., Coe S. E., and Scarsbrook G. A. // Science 297 (5587). – 2002.– pp. 1670–1672.
4. S. B.Cohn, Optimum design of Stepped Transmission-Line Transformers / Cohn S. B. // IRE Trans. – April 1995. – Vol. 3. – pp. 16-21.