



УДК 621.396.96

В. В. Витько, А. В. Кондрашов, А. А. Никитин, П. Ю. Белявский, А. Б. Устинов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ"

Дж. Э. Батлер
Институт прикладной физики РАН

Измерительная ячейка для исследования СВЧ-свойств дельта-легированных алмазных образцов¹

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.

Дельта-легированный алмаз, симметричная полосковая линия

В настоящее время актуальна проблема измерения СВЧ-характеристик структур, созданных на основе искусственно выращенных алмазных пленок с легированным дельта-слоем [1]. Для определения качества алмазной структуры необходимо знать концентрацию носителей заряда и их подвижность. Неразрушающее исследование этих параметров на СВЧ может выполняться резонансными и волноводными методами. Широкую рабочую полосу частот демонстрируют методы на основе линий передач, не имеющих частоты отсечки [2]. Наиболее часто в качестве линии передач используется коаксиальный волновод [3], аналогом которого в тонкопленочном исполнении является симметричная микрополосковая линия.

В настоящей статье представлены разработка и моделирование измерительной ячейки на симметричной микрополосковой линии для исследования СВЧ-свойств дельта-легированных алмазных образцов.

Уровень потерь, вносимых образцом в волноводный тракт, определяется мнимыми частями его комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей. В [4] и [5] описан метод расчета указанных проницаемостей по результатам измерения мощностей прошедшей и отраженной волн. По этому методу комплексную диэлектрическую про-

ницаемость можно определить, зная S-параметры измеряемой структуры и ее геометрические размеры:

$$\varepsilon = \frac{i[c/(\omega L)] \ln(1/z)}{(1+\Gamma)/(1-\Gamma)},$$

где c – скорость света; ω – круговая частота; L – длина образца;

$$z = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma};$$
$$\Gamma = \frac{1 - (S_{21} + S_{11})(S_{21} - S_{11})}{(S_{11} + S_{21}) - (S_{21} - S_{11})} \pm \sqrt{\left[\frac{1 - (S_{21} + S_{11})(S_{21} - S_{11})}{(S_{11} + S_{21}) - (S_{21} - S_{11})} \right]^2 - 1} \quad (1)$$

– коэффициент отражения.

Знак второго слагаемого (1) выбирается так, чтобы модуль коэффициента отражения был меньше единицы. Дальнейшее нахождение комплексных магнитных и диэлектрических проницаемостей проводится в соответствии с алгоритмом Николсона–Росса [5].

В пространстве, содержащем свободные носители заряда, возникает ненулевой ток проводимости. В этом случае уравнение Максвелла имеет вид

¹ 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).

$$\text{rot } \mathbf{H} = i\omega \varepsilon_0 \left\{ \varepsilon' - i \left[\sigma / (\omega \varepsilon_0) \right] \right\} \mathbf{E} = i\omega \varepsilon_0 \varepsilon_k \mathbf{E},$$

где \mathbf{H} , \mathbf{E} – векторы напряженности магнитного и электрического полей соответственно; ε_0 – диэлектрическая постоянная; ε' – действительная часть диэлектрической проницаемости;

$$\varepsilon_k = \varepsilon' - i \left[\sigma / (\omega \varepsilon_0) \right] = \varepsilon' - i\varepsilon'' \quad (2)$$

– комплексная диэлектрическая проницаемость, причем $\varepsilon'' = \sigma / (\omega \varepsilon_0)$ – ее мнимая часть.

Из (2) получим проводимость дельта-легированного слоя алмазного образца: $\sigma = \omega \varepsilon_0 \varepsilon''$.

Измерение проводимости позволяет оценить уровень легирования дельта-слоя в экспериментальном алмазном образце. Известно [6], что подвижность электронов в алмазе может достигать $4500 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, а подвижность дырок – $3800 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Имея представление о подвижности носителей заряда, концентрацию носителей заряда, сосредоточенных в дельта-легированном слое, можно оценить на основе формулы $\sigma = en\mu$, где e – заряд электрона; n – концентрация носителей заряда; μ – подвижность носителей заряда.

В результате проведенной работы было выявлено, что измерительная ячейка для исследования характеристик экспериментальных алмазных образцов, содержащих дельта-слой, наиболее эффективно может быть реализована с помощью симметричной полосковой линии (рис. 1), которая 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 частот отсечки. Другой особенностью такого волновода является интенсивное проникновение по-



Рис. 1

ля электромагнитной волны в окружающий полосо-сок диэлектрик.

Диапазон рабочих частот симметричной полосковой линии определяется, в основном, ее геометрическими размерами, а именно шириной металлического полоска и расстоянием между металлическими экранами [7].

Численное моделирование S -параметров такой структуры показало возможность измерения свойств алмазных слоев. Моделирование проводилось при следующих условиях: металлические экраны параллельны плоскости алмазного образца и расположены на равном расстоянии от полоска; расстояние между металлическим экраном и полоском 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. 2. 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.

На рис. 3, а представлена зависимость частоты минимума передаточной характеристики (f_{\min}) от концентрации носителей заряда в дельта-легированном слое, а на рис. 3, б – зависимость коэффициента пропускания S_{21} на этой частоте от того же параметра.

Из рис. 3, а следует, что f_{\min} значительно изменяется в диапазоне концентраций носителей заряда $10^{20} \dots 10^{22} \text{ м}^{-3}$. При более высоких значениях концентрации носителей заряда более заметным становится изменение ослабления. Таким

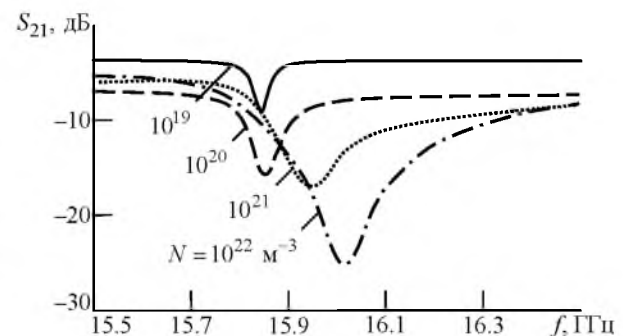


Рис. 2

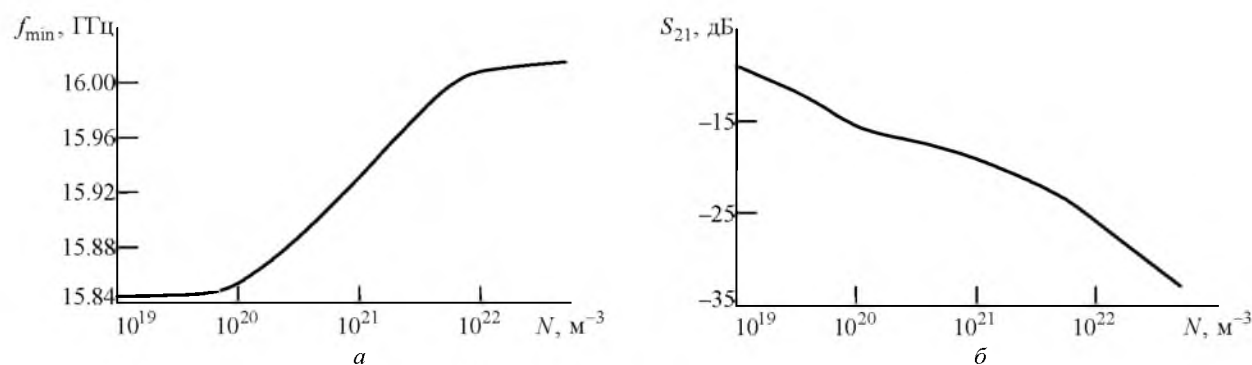


Рис. 3

образом, предложенный способ позволяет, измеряя СВЧ-характеристики образцов алмаза, 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

0.1...100 ГГц). В ходе представленной работы проведено моделирование измерительной ячейки. Установлено, что конструкция измерительной ячейки, построенной на симметричной полосковой линии передачи, не ограничивает геометрические размеры образца и обладает высокой чувствительностью к изменению его СВЧ-параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Diamond semiconductor technology for RF device applications / Y. Gurbuz, O. Esame, I. Tekin et al. // Solid-state electronics. 2005. Vol. 49, № 7. P. 1055–1070.
2. Blackham D. V., Pollard R. D. An improved technique for permittivity measurements using a coaxial probe // IEEE Trans. instrum. and meas. 1997. Vol. IM-46, № 5. P. 1093–1099.
3. Baker-Jarvis J. Transmission/reflection and short-circuit line permittivity measurements. Colorado: National institute of standards and technology, 1990. 151 p.
4. Domich P. D., Baker-Jarvis J., Geyer R. G. Optimization techniques for permittivity and permeability determination // J. res. nation. inst. stand. technol. 1991. Vol. 96, № 5. P. 565–575.
5. Nicolson A. M., Ross G. F. Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques // IEEE Trans. instrum. and meas. 1970. Vol. IM-19, № 4. P. 377–382.
6. High carrier mobility in single-crystal plasma-deposited diamond / J. Isberg, J. Hammersberg, E. Johansson et al. // Science. 2002. Vol. 297, № 5587. P. 1670–1672.
7. Cohn S. B. Optimum design of stepped transmission-line transformers // IRE Trans. 1995. Vol. 3, № 4. P. 16–21.

V. V. Vitko, A. V. Kondrashov, A. A. Nikitin, P. Yu. Belyavskiy, A. B. Ustinov
Saint Petersburg state electrotechnical university "LETI"

J. E. Butler
Institute of applied physics of the Russian academy of sciences

Measuring cell for microwave properties studying of delta-doped diamond samples

The method of measurement of microwave parameter of delta-doped diamond samples over a broad frequency range is offered. Nicholson-Ross's algorithm is the cornerstone of a method of measurement. The simulation of S-parameters of the measuring cell based on symmetric stripline is carried out.

Delta-doped diamond, symmetric strip line

Статья поступила в редакцию 27 мая 2015 г.