

01;05;09

Возможность извлечения информации о кристаллографической ориентации цилиндрических образцов по измерениям поверхностного импеданса на СВЧ частотах

© А.И. Спицын

Харьковский государственный технический университет радиозлектроники,
433053 Харьков, Украина

(Поступило в Редакцию 21 июня 2001 г.)

По измерениям добротностей или сдвигов частот поляризационных мод на H_1 -типе колебаний коаксиального резонатора, у которого внутренний цилиндр представляет исследуемый монокристаллический образец, показана возможность извлечения информации о кристаллографической ориентации цилиндрических монокристаллических образцов. Проведена оптимизация выбора мод H_1 коаксиального резонатора и его размеров на СВЧ частотах. Найдено, что измерения по определению кристаллографической ориентации одноосного кристаллографического образца на H_{121} -типе дают намного большую чувствительность, чем на модах E_1 .

Измерение среднего поверхностного импеданса $\bar{Z} = \bar{R} + i\bar{X}$ монокристаллических цилиндрических образцов на СВЧ частотах дает возможность получения информации о кристаллографической структуре образца с анизотропным поверхностным импедансом [1]. В [1] в предположении тензорной локальной связи между электрическим полем и плотностью тока выполнен расчет для среднего поверхностного импеданса и его компонент цилиндрических образцов. Расчет конкретизирован для мод E_0 и E_1 (например, для цилиндрического или коаксиального резонатора) с первым индексом, равным 0 и 1, в случае одноосного кристалла. Однако соответствующие результаты для H мод более приемлема для целей определения кристаллографической ориентации. В настоящей работе приводятся конкретные численные результаты в случае моды H_1 для коаксиального резонатора, у которого коаксиал представляет исследуемый образец.

Коэффициент a_2 разложения в ряд фурье-компоненты тензора Z_{xx} на цилиндрической поверхности одноосного кристалла по полярному углу φ , определяющий значение \bar{Z}_H для моды H_1 , равен [1]

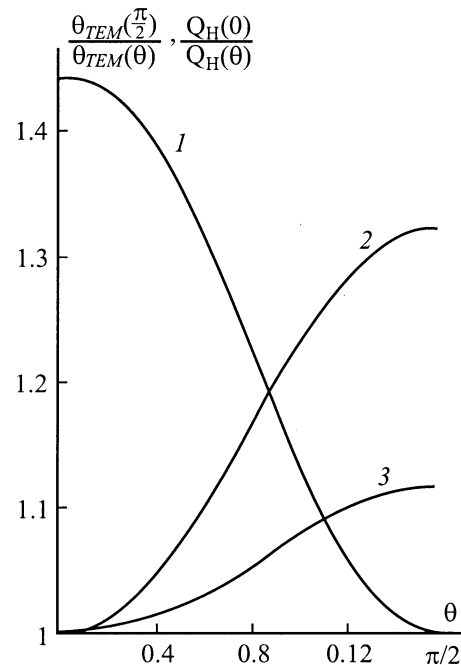
$$a_2 = \frac{1}{2}(Z_{01} - Z_{03}) \sin^2 \theta, \quad (1)$$

где Z_{03} , Z_{01} — значения поверхностных импедансов с удельными сопротивлениями, равными главным значениям тензора удельного сопротивления ρ_3 и ρ_1 по направлениям вдоль и перпендикулярно главной оси C одноосного кристалла; θ — угол между цилиндрической осью Z и осью C . Если для моды H_1 отношение a_2/\bar{Z}_H может составлять десятки процентов, то соответствующее отношение для моды E_1 составляет проценты.

При определении величины угла θ для данного образца можно измерить добротность TEM -моды или добротность какой-либо из мод E или H при нулевом индексе и по определяемому значению парциальной добротности цилиндрической поверхности определить угол θ . Для

этих целей более приемлема мода TEM или E_0 коаксиального резонатора. На рисунке кривая 1 представляет отношение $Z_{TEM}(\theta)/Z_{01}$ как функцию угла θ . Это отношение равно отношению парциальных добротностей цилиндрической поверхности образца $Q(\pi/2)/Q(\theta)$ или отношению сдвигов частот коаксиального резонатора относительно частоты резонатора с идеально проводящими стенками, обусловленных цилиндрической поверхностью $\Delta\omega(\theta)/\Delta\omega(\pi/2)$. Значение отношения $\gamma = Z_{01}/Z_{03}$ взято равным $1/\sqrt{2}$. При известном материале цилиндрического образца эта зависимость заранее известна.

Для определения направления оси C можно воспользоваться измерениями добротностей (или сдвигов частот) двух ортогональных поляризационных мод H_1 коаксиального резонатора. Из [1] следует, что средний



поверхностный импеданс цилиндрической поверхности в случае H -мод представляется

$$\bar{Z}_H = \alpha \bar{Z}_{zz} + \nu \bar{Z}_{xx} \quad (2)$$

и определяется как средней компонентой тенора поверхностного импеданса \bar{Z}_{zz} , так и \bar{Z}_{xx} . Так как максимальное отличие \bar{Z}_{zz} от \bar{Z}_{TEM} намного меньше отличия \bar{Z}_{xx} от \bar{Z}_0 , где \bar{Z}_0 — средний поверхностный импеданс цилиндра при измерении на H_0 -мод, то желательно, чтобы отношение $\alpha/\nu \ll 1$. Величина этого отношения для моды H_{1ml}

$$\frac{\alpha}{\nu} = \left(\frac{\pi l R_2}{h} \right)^2 \frac{1}{p^2 \mu_{1m}^4(p)}, \quad p = \frac{R_1}{R_2}, \quad (3)$$

где R_1, R_2 — внутренний и внешний радиусы коаксиального резонатора; μ_{1m} — m -й корень уравнения

$$J'_1(\mu_{1m})N'_1(p\mu_{1m}) - J'_1(p\mu_{1m})N'_1(\mu_{1m}) = 0,$$

J_1, N_1 — функции Бесселя и Неймана.

Чтобы величина α/ν была малой, необходимо взять индекс моды $l = 1$. Если выбрать размеры резонатора так, чтобы $\pi R_2/h \leq 1$, и выбрать моду с индексом $m = 2$ и положить $p = 1/2$, чему соответствует корень $\mu_{12} = 6.565$, то отношение α/ν в трехсантиметровом диапазоне будет $\sim 10^{-3}$. В этом случае членом $\alpha \bar{Z}_{zz}$ в соотношении (2) можно пренебречь и считать, что \bar{Z}_H в рассматриваемом случае определяется только \bar{Z}_{xx} .

Как показано, в работе [2] при отсутствии неоднородностей в коаксиальном резонаторе анизотропия является основным фактором, влияющим на ориентацию поляризационных мод, и результирующие поляризационные моды, как и в случае плоских образцов [3,4], будут ориентированы так, что одна из них будет иметь направление поляризации по проекции оси C на плоскость, перпендикулярную цилиндрической оси симметрии, а другая будет ориентирована перпендикулярно этой проекции. Следовательно, в этом случае определение направлений поляризации установившихся поляризационных мод дает возможность определить плоскость, где лежит ось C , и, таким образом, направление оси C одноосного цилиндрического кристалла определится до двух направлений в пространстве. На рисунке (кривые 2, 3) приведены зависимости отношений парциальных добротностей $Q(0)/Q_{1,2}(\theta)$ от угла θ двух поляризационных мод H_{121} при выбранном выше коаксиальном резонаторе и величине отношения $Z_{01}/Z_{03} = 1/\sqrt{2}$.

В коаксиальном резонаторе всегда присутствуют неоднородности (отверстия, штыри и др.), которые будут определять результирующие направления поляризационных мод совместно с анизотропией. Если ориентации поляризационных мод определяются в основном неоднородностями, то появляется дополнительно возможность изменения направлений поляризаций мод относительно монокристаллического образца, например с помощью поворота образца относительно оси z в присутствии неоднородностей. В этом случае отношение парциальных

добротностей поляризационных мод будет определяться [1,2]

$$\frac{Q(0)}{Q_{1,2}(\theta)} = \frac{\bar{Z}_0}{Z_{01}} \pm \frac{1}{2} \frac{a_2}{Z_{01}} \cos 2\varphi_0, \quad (4)$$

где φ_0 — угол между направлением поляризации одной из поляризационных мод и проекцией оси кристалла C ; отношение $Q(0)/Q_{1,2}(\theta)$ при $\varphi_0 = 0$ или $\pi/2$ для одной из поляризационных мод будет максимально, для другой — минимально.

Добиваясь поворотом цилиндрического образца относительно оси z максимального и минимального значения добротностей поляризационных мод по определению направлений их поляризаций, можно найти плоскость, где лежит ось C . Отметим, что значения величин добротностей Q_1 и Q_2 результирующих поляризационных мод могут быть также использованы для независимого определения угла θ .

Подобная процедура извлечения информации о кристаллографической ориентации цилиндрического образца применима и в общем случае трехосных кристаллов.

Список литературы

- [1] Спицын А.И. // ЖТФ. 1994. Т. 64. Вып. 11. С. 105–116.
- [2] Спицын А.И. Деп. ГНТБ Украины. № 653-Ук. 96. Харьков, 1996. С. 97.
- [3] Mende F.F., Spitsyn A.I., Skugarevski A.V., Maslova L.A. // Cryogenics. 1985. Vol. 25. N 2. P. 92–93.
- [4] Менде Ф.Ф., Спицын А.И., Дубров Н.Н. // ЖТФ. 1980. Т. 50. Вып. 8. С. 1609–1615.