

чено в [10], и обуславливает наблюдаемое аномальное смещение T_{\max} в область более низких температур. Расчетное значение энергии, характеризующей релаксацию заряда при $T \sim 300$ К, составляет ~ 0.3 эВ, что близко к приводимой в [11] величине высоты потенциального барьера на межзеренной границе при термополевом опустошении поверхностных состояний в ОЦК.

Таким образом, несмотря на простоту метода ТСТД, его использование применительно к ОЦК для варисторов позволяет не только определить физические характеристики материала (концентрацию свободных электронов в зернах, высоту потенциального барьера), но и оценить устойчивость приборов к длительной нагрузке постоянным током.

Список литературы

- [1] Квасков В. Б., Чернышева М. А. Электрофизические свойства и применение металлоксидных варисторов. М., 1982. 54 с.
- [2] Sato K., Takada Y. // J. Appl. Phys. 1982. Vol. 53. N 12. P. 8819—8826.
- [3] Hayashi M., Naba M., Hirano S. et al. // J. Appl. Phys. 1982. Vol. 53. N 8. P. 5754—5762.
- [4] Петухов А. П., Тесленко С. П., Румянцова И. А., Федотова О. И. // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. 1985. Т. 21. № 8. С. 1418—1422.
- [5] Binesii D., Bonnet J. P., Onillon M., Salmon R. // Rev. Int. Hautes Temper. Refract. Fr. 1986. Vol. 23. N 1. P. 1—9.
- [6] Stucki F., Brüesch P., Geuter F. // Surf. Sci. 1987. Vol. 189/190. P. 294—299.
- [7] Гороховатский Ю. А. // Изв. АН ЛатвССР. Сер. физ. и техн. наук. 1973. № 4. С. 23—28.
- [8] Philipp H. R., Levinson L. M. // J. Appl. Phys. 1976. Vol. 47. N 3. P. 1112—1116.
- [9] Levinson L. M., Philipp H. R. // J. Appl. Phys. 1976. Vol. 47. N 6. P. 3116—3123.
- [10] Гороховатский Ю. А. Основы термодеполяризационного анализа. М., 1981. 173 с.
- [11] Квасков В. Б. Полупроводниковые приборы с биполярной проводимостью. М., 1988. 127 с.

Поступило в Редакцию
26 октября 1988 г.

О ТРЕБОВАНИЯХ К СВЕРХПРОВОДЯЩИМ РЕЗОНАТОРАМ ДЛЯ ОТРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ИХ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

С. Н. Артеменко, В. Л. Каминский

Известно, что добротность сверхпроводящих резонаторов сильно зависит от качества обработки их рабочей поверхности, которое определяется уровнем технологии ее приготовления [1]. При этом для отработки технологии обычно используются цилиндрические резонаторы, работающие на H_{011} -виде колебаний, который не имеет ВЧ токов через стыки крышек резонатора с корпусом. Это позволяет изготавливать резонаторы из двух или трех деталей путем их простого механического соединения. При этом обычно считается, что форма резонаторов достаточно идеальна и их добротность определяется только качеством обработки рабочей поверхности.

Вместе с тем известно, что незначительные отклонения формы резонаторов от идеальной могут приводить к возникновению межвидовой связи и существенному ухудшению характеристик рабочего вида колебаний [2]. В разборных цилиндрических резонаторах это может произойти при возникновении связи между рабочим H_{011} -видом колебаний и другими колебаниями, добротность которых из-за механического контакта между отдельными деталями резонатора значительно ниже добротности H_{011} -вида колебаний. Особенно сильно это может проявиться в резонаторах из сверхпроводящих керамик, в которых проблема контакта представляется еще более серьезной, чем в резонаторах из традиционных сверхпроводников.

В известной литературе детальный анализ вопроса о влиянии искажений формы сверхпроводящих резонаторов (СПР) на добротность рабочего вида колебаний отсутствует.

В то же время очевидно, что пренебрежение этим вопросом может привести к неверным выводам об уровне технологии приготовления рабочей поверхности СПР. В связи с этим в предлагаемой работе выполнен расчет значений коэффициента межвидовой связи, возникающей в цилиндрических резонаторах с H_{011} -видом колебаний на наиболее распространенных отклонениях их формы от идеальной. На основе результатов расчета определены требования к СПР, выполнение которых позволяет исключить влияние межвидовой связи на характеристики рабочего вида колебаний.

Значения коэффициента межвидовой связи γ_{12} рассчитывались по известной формуле [2]

$$\gamma_{12} \approx -\frac{1}{V} \int_{\delta V} (H_1 H_2 - E_1 E_2) dV, \quad (1)$$

где V — объем резонатора; δV — объем деформированной его части, на которой происходит взаимодействие колебаний; H_1, H_2, E_1, E_2 — соответственно векторы магнитной и электрической компонент ВЧ поля взаимодействующих колебаний.

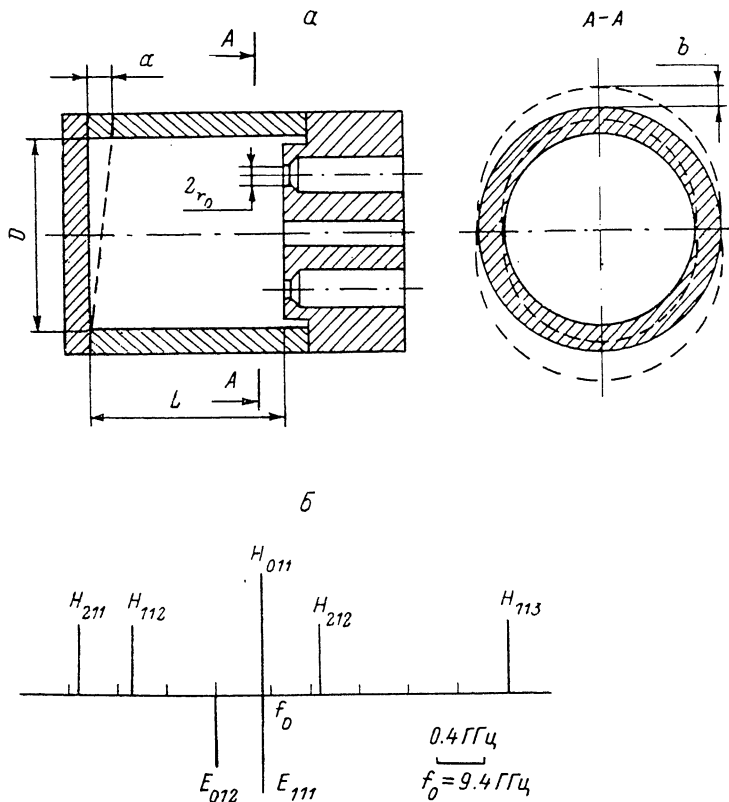


Рис. 1. Цилиндрический резонатор с возможными отклонениями формы резонатора от идеальной (а) и спектр его собственных частот в области частоты рабочего вида колебаний (б).

Для конкретности рассмотрен наиболее часто применяемый на практике резонатор с высотой L , равной диаметру D и равной 1.3λ , где λ — длина волны в свободном пространстве. Однако полученные в работе формулы позволяют легко рассчитывать значения γ_{12} для любых соотношений между L, D и λ .

Наиболее распространенными искажениями формы цилиндрического резонатора (рис. 1, а) являются отверстия связи с ВЧ трактами и вакуумопроводом, конусность или эллиптичность цилиндра, а также перекося крышек резонатора. Нетрудно установить, что в пределах ± 2 ГГц от рабочей частоты H_{011} -вида колебаний в резонаторе с указанными выше размерами находятся колебания вида $H_{112}, H_{113}, H_{211}, H_{212}, E_{012}$ и E_{111} , спектр которых показан на рис. 1, б. Используя формулу (1), можно показать, что связь между рабочим видом колебаний и колебаниями, отмеченными на рис. 1, б, вызывают только перекося крышек резонатора, эллиптичность цилиндра, а также отверстия связи с ВЧ трактами. При этом коэффициент межвидовой связи дается следующими выражениями:

$$\gamma_{H_{011}-E_{111}} \approx \frac{\lambda}{\sqrt{2}} \frac{a}{A_{01}\lambda_b L} [\epsilon], \quad (2)$$

$$\gamma_{H_{011}-H_{11n}} \approx \frac{n\lambda^2 A_{11}}{20\sqrt{2} \pi I_0(A_{01}) I_1(A_{11})(A_{11}^2 - 1)^{1/2} \lambda_b L} \frac{a}{L} \quad (3)$$

для связи на перекосе крышек резонатора,

$$\gamma_{H_{011}-H_{11n}} \approx \frac{32A_{01}A_{21}^2\lambda^2}{3\sqrt{2} \pi^3 (A_{21}^2 - 4)^{1/2} \lambda_b L} \frac{b}{L} \quad (4)$$

для связи на эллиптичности цилиндра,

$$\gamma_{H_{011}-H_{11n}} \approx \frac{n8\sqrt{2} A_{01}A_{21}^2 I_{1 \max} I_1 \left(\frac{A_{21}}{2}\right) \lambda^2}{3\pi^3 I_0(A_{01}) I_2(A_{21}) (A_{21}^2 - 4)^{1/2} D^2} \frac{r_0^3}{L^3} \quad (5)$$

для связи на двух отверстиях связи с ВЧ трактами, расположенных на серединах радиусов по одному диаметру. В выражениях (2)–(5) a , b — соответственно абсолютные значения величины перекоса крышек резонатора и отклонения радиуса цилиндра от его номинального

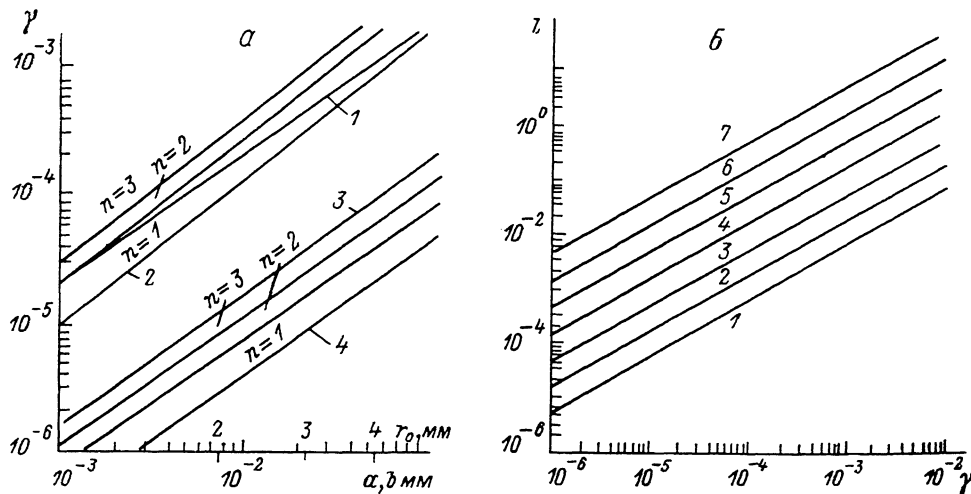


Рис. 2. Зависимости коэффициента межвидовой связи γ от степени неидеальности формы резонатора (а) и относительной расстройки l взаимодействующих колебаний, необходимой для устранения их взаимного влияния, от γ (б).

а: 1 — $\gamma_{H_{011}-H_{211}}$ на эллиптичности, 2 — $\gamma_{H_{011}-H_{21n}}$ на двух отверстиях связи, 3 — $\gamma_{H_{011}-E_{111}}$ на перекосе, 4 — $\gamma_{H_{011}-H_{11n}}$ на перекосе; б: 1 — $l = 10$, 2 — 10^2 , 3 — 10^3 , 4 — 10^4 , 5 — 10^5 , 6 — 10^6 , 7 — 10^7 .

значения; λ_b — длина волны в волноводе; $I_m(A_{mn})$ — функции Бесселя первого рода порядка m , где A_{mn} — корни их производных; r_0 — радиус отверстий связи.

На рис. 2, а приведены расчетные зависимости γ_{12} от a , b и r_0 для различных n , из которых следует, что реальные значения γ_{12} для рассматриваемого резонатора, изготовленного с достаточно жесткими допусками на отклонения его формы от идеальной, могут находиться в пределах 10^{-6} – 10^{-3} . При этом, например, для ниобиевых СПР, собранных из 2–3 деталей через индиевые прокладки, обычно $\gamma_{12}^2 \gg d_1 d_2$, где d_1 , d_2 — декременты затухания рабочего и взаимодействующего с ним видов колебаний. Поэтому, согласно классификации, принятой в теории связанных контуров [3], связь между этими колебаниями в СПР практически всегда сильная, следовательно, добротность рабочего вида колебаний в случае совпадения собственных частот взаимодействующих колебаний будет определяться добротностью «паразитного» вида колебаний. Как известно, единственным средством повышения добротности рабочего вида колебаний в этом случае является достаточно сильная взаимная расстройка собственных частот взаимодействующих колебаний.

Согласно [2], декременты затухания δ_{\pm} взаимодействующих колебаний как функции относительной расстройки l их собственных частот даются выражениями

$$\delta_{\pm} = \frac{d_1}{2} \left(1 \mp \frac{l}{\sqrt{\gamma_{12}^2 + l^2}} \right) + \frac{d_2}{2} \left(1 \pm \frac{l}{\sqrt{\gamma_{12}^2 + l^2}} \right). \quad (6)$$

Из (6) следует, что для уменьшения добротности рабочего вида колебаний не более чем на 10 % необходимо выполнение условия

$$|l| \geq 1.5\gamma_{12} \sqrt{k}, \quad (7)$$

где $k=d_1/d_2$ при $d_1 \gg d_2$ и $k=d_2/d_1$ при $d_1 \ll d_2$.

На основе соотношения (7) можно построить графики зависимости требуемой величины расстройки l как функции γ для различных k , которые приведены на рис. 2, б. Эти графики позволяют по заданным значениям γ и k определять допустимую в области собственной частоты рабочего вида колебаний плотность спектра, при которой взаимодействие рабочего колебания с соседними еще не сказывается на его добротности. Например, для ниобиевых СПР с $\gamma \approx 10^{-5} - 10^{-4}$ и $k \approx 10^3 - 10^4$ значение l должно быть не менее $5 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-2}$, т. е. абсолютная величина расстройки частот должна составлять $\sim (5 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-2}) f_0$, где f_0 — собственная частота рабочего вида колебаний.

Таким образом, полученные в работе соотношения и графики позволяют по заданным допускам на отклонения формы СПР от идеальной определять соответствующие значения коэффициента межвидовой связи и на их основе устанавливать допустимую в области собственной частоты рабочего вида колебаний плотность спектра, при которой межвидовая связь еще не сказывается на добротности рабочего вида колебаний.

В заключение авторы выражают благодарность Ю. Г. Юшкову за постоянный интерес и внимание к работе.

Список литературы

- [1] Диденко А. Н., Севрюкова Л. М., Ятис А. А. Сверхпроводящие ускоряющие СВЧ структуры. М.: Энергоиздат, 1981. 208 с.
- [2] Штейншлейгер В. Б. Явления взаимодействия волн в электромагнитных резонаторах. М.: Оборонгиз, 1955. 112 с.
- [3] Мандельштам Л. И. Лекции по колебаниям. Полн. собр. тр. М.: Изд-во АН СССР, 1950. Т. IV.

Научно-исследовательский
институт ядерной физики
при Томском политехническом институте
им. С. М. Кирова

Поступило в Редакцию
23 мая 1988 г.

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ ПЛАЗМООПТИЧЕСКИХ ЛИНЗ

В. А. Манеев

В работах, посвященных рассмотрению плазмооптических линз (ПОЛ) (или имеющих другое название, использующих эффект эквипотенциализации силовых линий магнитного поля в объеме линзы) [1-3], приводятся формулы, позволяющие оценить их фокусное расстояние F . Так, в [1]

$$F = \frac{UR}{2\Phi} \frac{1}{\Theta}, \quad (1)$$

где Φ — потенциал, поданный на линзу; U — ускоряющий потенциал частиц пучка; R — радиус магнитной катушки; Θ — геометрический фактор, имеющий величину порядка единицы.

В работах [2, 3] была сделана попытка раскрыть смысл геометрического фактора и уточнить выражение (1)

$$\frac{1}{\Theta} = \frac{2R}{L} \rightarrow [2], \quad (2a)$$

$$\frac{1}{\Theta} = \frac{2r_{\text{эл}}^2}{Rl} \rightarrow [3], \quad (2b)$$