

В настоящей работе изучены структура и свойства системы ванадий — галлий — медь, так как по данным [1, 2] присутствие меди увеличивает скорость образования  $V_3Ga$ .

Приготовление диффузионных образцов проводилось в несколько этапов: 1) металлизация (ванадиевая проволока диаметром 0,42 мм движется через ванну с жидким галлием, в которой поддерживается температура 700°С, со скоростью 16,4 м/час); 2) нанесение электрохимическим путем медного покрытия различной толщины; 3) отжиг в стационарных условиях при температурах 600—800°С в течение четырех часов в вакууме с последующим охлаждением с печью.

Распределение элементов в диффузионной зоне определялось локальным рентгеновским методом по излучению трех элементов на микроанализаторе MS-46.

Сравнение результатов исследования медненных и немедненных ванадий-галлиевых образцов показало, что нанесение медного слоя перед диффузионным отжигом способствует образованию сверхпроводящей фазы  $V_3Ga$  при температурах более низких, чем при диффузии только между чистыми V и Ga, где впервые она появляется при температуре 750°С [3]. В медненных образцах  $\beta$ -фаза появляется при температуре 650°С. По-видимому, медь, в которой растворяется галлий из богатых галлием фаз, сдвигает систему по составу в область большего содержания ванадия. Однако чрезмерное увеличение толщины медного слоя ухудшает образование  $\beta$ -фазы. Оптимальная толщина медного покрытия 10—15 мк при температуре 700—800°С.

В присутствии меди образуется мелкодисперсная «двухфазная» область на границе  $\delta/\epsilon$ -фаз: причем ширина ее при всех режимах термообработки практически не зависит от толщины медного покрытия. Результаты рентгеновского сканирования позволяют предположить, что «двухфазная» область — это мелкодисперсное чередование  $\delta$ - и  $\epsilon$ -фаз, содержащих все три элемента. В закаленных образцах структура диффузионной зоны не меняется по сравнению с образцами, охлажденными с печью.

Галлий растворяется в медном слое (максимальная граничная растворимость 24 вес. % Ga). Предельная растворимость его обратно зависит от толщины медного покрытия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Tachikawa K., Tanaka Y. J. of Appl. Phys., Japan., 5, No. 9, 834, 1966.
2. Tachikawa K., Tanaka Y. J. of Appl. Phys., Japan., 6, No. 6, 782, 1967.
3. Ронами Г. Н., Кузнецова С. М., Кунаков Я. Н., Воробьева Н. С. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., № 6, 101, 1968.

Поступила в редакцию  
2.9 1970 г.

Кафедра  
физики твердого тела

УДК 621.373.423

М. С. ПОЛЯКОВА

### О ВЗАИМНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ДВУХ АВТОГЕНЕРАТОРОВ, СВЯЗАННЫХ ЧЕРЕЗ ПРОВОДИМОСТЬ

В работе [1] рассмотрены процессы синхронизации в цепочке из  $n$ -томсоновских генераторов, связанных друг с другом проводимостью. Рассмотрение проведено методом поэтапного укорочения Р. В. Хохлова [2] для случая слабых связей, а именно, для случая, когда коэффициент связи много меньше декремента затухания системы. При этом в цепочке автогенератора существует *единственная устойчивая* синхронная частота, квадрат которой равен среднему арифметическому от квадрата парциальных частот генератора, взятому с весами, пропорциональными их мощностям.

$$\omega^2 = \frac{\sum_{i=1}^n A_i^2 \omega_i^2}{\sum_{i=1}^n A_i^2} \quad (1)$$

Здесь  $\omega_i$  и  $A_i$  — частота и амплитуда  $i$ -того свободного генератора.

Естественно поэтому рассмотреть, хотя бы на примере двух автогенераторов, связанных через проводимость, зависимость синхронных частот от расстройки при лю-

бых коэффициентах связи. Взаимной синхронизации двух автогенераторов посвящено много как теоретических, так и экспериментальных работ. Однако два генератора, связанных через проводимость, рассматриваются либо при слабых связях [3], либо в случае равных мощностей [4]. С другой стороны, имеется значительное количество работ, посвященных задаче стабилизации частоты генератора затягиванием дополнительным контуром, в том числе рассматривается случай, когда контур автогенератора связан с дополнительным контуром через проводимость [5]. Для таких систем при сильных связях наблюдается явление затягивания частоты, причем области затягивания находятся далеко от точки синхронизма частот.

Рассмотрим два томсоновских генератора с мягким режимом самовозбуждения, причем колебательную характеристику генераторов аппроксимируем полиномом третьей степени. Полагая колебания в генераторах синусоидальными  $x_1 = a \cos(\omega t + \varphi)$ ,  $x_2 = b \cos(\omega t + \psi)$  и используя метод медленно меняющихся амплитуд, получим укороченные уравнения в виде

$$\begin{aligned} \dot{a} &= a \left( \delta_0 - \frac{\alpha}{2} - \frac{1}{4} \delta_2 a^2 \right) + \frac{\alpha}{2} b \cos \theta, \\ \dot{b} &= b \left( \gamma_0 - \frac{\alpha}{2} - \frac{1}{4} \gamma_2 b^2 \right) + \frac{\alpha}{2} a \cos \theta, \\ \dot{\varphi} &= \frac{\nu_1^2 - \omega^2}{2\omega} - \frac{\alpha}{2} \frac{b}{a} \sin \theta, \quad \theta = \varphi - \psi, \\ \dot{\psi} &= \frac{\nu_2^2 - \omega^2}{2\omega} + \frac{\alpha}{2} \frac{a}{b} \sin \theta. \end{aligned} \quad (2)$$

Из уравнений для стационарного режима можно найти уравнение для синхронных частот:

$$[\bar{\alpha}^2 + \eta(\eta - \xi)] [\bar{\gamma}_2(\eta - \xi)^2 - \bar{\delta}_2 \eta^2]^2 + 4\eta(\eta - \xi) [\bar{\delta}_0 \bar{\gamma}_2(\eta - \xi) + \bar{\gamma}_0 \bar{\delta}_2 \eta]^2 = 0, \quad (3)$$

являющееся полиномом шестого порядка относительно  $\eta$ . Здесь

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\omega^2 - \nu_2^2}{\omega^2}, \quad \xi = \frac{\nu_1^2 - \nu_2^2}{\omega^2}, \quad \bar{\alpha} = \frac{\alpha}{\omega}, \quad \bar{\gamma}_2 = \frac{\gamma_2}{\omega}, \quad \bar{\delta}_2 = \frac{\delta_2}{\omega}, \\ \bar{\delta}_0 &= \frac{\delta_0 - \frac{\alpha}{2}}{\omega}, \quad \bar{\gamma}_0 = \frac{\gamma_0 - \frac{\alpha}{2}}{\omega}. \end{aligned}$$

Для простоты предположим, что  $\bar{\gamma}_2 = \bar{\delta}_2$  и  $\bar{\gamma}_0 > \bar{\delta}_0$ . Качественно зависимость  $\eta$  от  $\xi$  не изменится, если  $\bar{\gamma}_2 \neq \bar{\delta}_2$ . На рис. 1, 2 представлены зависимости синхронных частот от расстройки между генераторами (две ветви) в случае разных коэффициентов связи как для генераторов, близких по мощности (рис. 1), так и для генераторов, существенно отличающихся по мощности (рис. 2). Графики приведены для случая  $\xi > 0$ . При  $\xi < 0$  кривые следует продолжить нечетным образом. Жирными линиями отмечены устойчивые, а тонкими неустойчивые участки частотных кривых. Расчет устойчивости проведен на ЦВМ. На рис. 1, б, в приведены зависимости квадратов стационарных амплитуд  $a^2$  и  $b^2$  генераторов и сдвига фаз между генераторами от расстройки между ними. Из рассмотрения полученных зависимостей можно сделать следующие выводы.

Все возможные синхронные частоты лежат между парциальными частотами автогенераторов  $0 < \eta < \xi$ .

Режим с частотой из интервала  $1/2 \xi < \eta < \xi$  (верхняя ветвь частотной кривой), соответствующий случаю, когда захватывающим является менее мощный генератор  $a^2 > b^2$ , всегда является неустойчивым.

В случае слабых связей, когда коэффициент связи много меньше декремента затухания системы, из четырех возможных в системе синхронных частот устойчивой является только одна (рис. 1, кривая 1), близкая к частоте, определяемой методом Р. В. Хохлова (формула (1) при  $n=2$ ).

В работе [1] при применении метода Р. В. Хохлова потеряны два неустойчивых решения, когда захватывающим является либо один, либо другой генератор. Так как в потерянном режиме амплитуда хотя бы одного из генераторов далека от амплитуды свободных колебаний  $a_0$  или  $b_0$ , применение метода поэтапного укорочения для анализа этих решений невозможно.

С увеличением коэффициента связи область расстроек, при которых существует четыре синхронные частоты, сдвигается вправо для  $\xi > 0$  (влево для  $\xi < 0$ ) (рис. 1, кривые 2, 3, рис. 2, кривые 1, 2), причем появляются области затягивания частоты, т. е. области, в которых существуют две устойчивые синхронные частоты (рис. 1, кривые 2, 3).

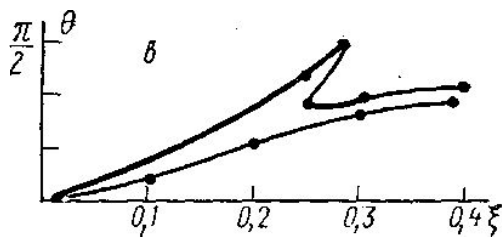
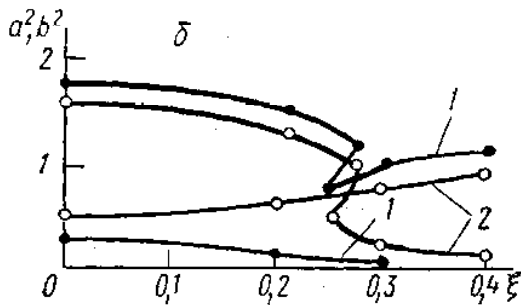
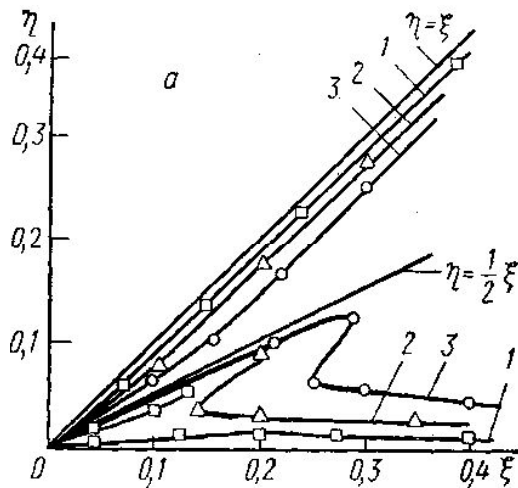


Рис. 1. а — зависимость синхронных частот  $\eta$  от расстройки  $\xi$  для различных коэффициентов связи  $\alpha$  в случае генераторов, близких по мощности (при  $\delta_0=0,10$ ,  $\gamma_0=0,12$ ): 1 —  $\alpha=0,07$ , 2 —  $\alpha=0,10$ , 3 —  $\alpha=0,14$ ; б — зависимость квадратов амплитуд от расстройки при  $\alpha=0,14$ ,  $\delta_0=0,10$ ,  $\gamma_0=0,12$ ; 1 —  $b^2$ , 2 —  $a^2$ ; в — зависимость разности фаз между генераторами от расстройки при  $\delta_0=0,10$ ,  $\gamma_0=0,12$ ,  $\alpha=0,14$

При сильной связи в системе возможны только две синхронные частоты, из которых лишь одна устойчива (рис. 2, кривая 3).

Амплитуда автоколебаний каждого генератора, а также их сумма максимальна в точке синхронизма частот и убывает к границе полосы синхронизации.

Автор благодарен Ю. М. Романовскому и И. И. Минаковой за полезные обсуждения и внимание к проделанной работе.

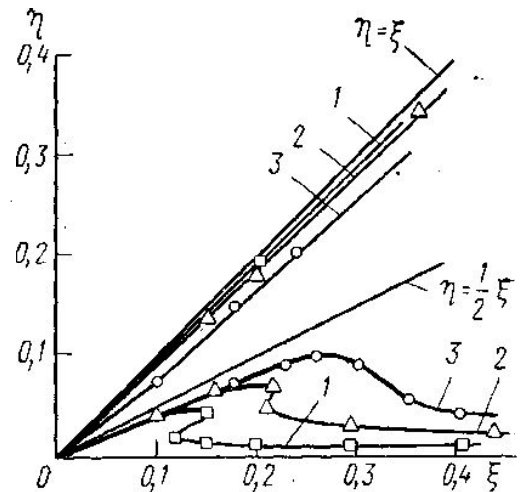


Рис. 2. Зависимость синхронных частот  $\eta$  от расстройки  $\xi$  для различных коэффициентов связи в случае генераторов, существенно отличающихся по мощности (при  $\delta_0=0,10$ ,  $\gamma_0=0,20$ ): 1 —  $\alpha=0,07$ , 2 —  $\alpha=0,10$ , 3 —  $\alpha=0,14$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Малафеев В. М., Полякова М. С., Романовский Ю. М. «Изв. высш. уч. завед.», радиофизика, 13, 6, 936, 1970.
2. Хохлов Р. В. ДАН СССР, 97, 3, 411, 1954.
3. Рапопорт Г. Н. «Радиотехника», 6, 4, 53, 1951.
4. Рубаник В. П. «Радиотехника и электроника», 7, 10, 1711, 1962.
5. Курдюмов О. А., Минакова И. И. «Радиотехника», 24, 6, 65, 1969.

Поступила в редакцию  
3.9 1970 г.

Кафедра  
общей физики для мехмата