

УДК 621.373.5

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ СВОЙСТВА ГЕНЕРАТОРНЫХ МОДУЛЕЙ СВЧ

А.Я. БЕЛЬСКИЙ, А.В.ГУСИНСКИЙ, Е.Н. ЗАЦЕПИН

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 2 апреля 2018

Аннотация. Проводится анализ воздействия температуры на нестабильность частоты автогенератора, выполненного на основе металлического волновода. Оценивается изменение электрофизических свойств активного элемента и конструктивных элементов стабилизирующего резонатора. Даются рекомендации по улучшению температурной нестабильности частоты.

Ключевые слова: температурная нестабильность, частота генератора, способ улучшения.

Abstract. It's made an analysis of the temperature effect on the frequency instability of a generator made on the basis of a metal waveguide. In addition, the change in the electrophysical properties of the active element and the structural elements of the stabilizing resonator is estimated. Recommendations for improvement of the temperature instability of the frequency are given.

Keywords: frequency instability, frequency of a generator, way for improvement.

Doklady BGUIR. 2018, Vol. 118, No. 8, pp. 36-41
Temperature properties of microwave generator modules
A.Y. Belski, A.V. Gusinski, E.N. Zatsepin

Введение

Температурная нестабильность частоты является очень важным параметром генераторов. Стабилизации частоты СВЧ генераторов может осуществляться с помощью дисперсионных [1, 2], объемных и, в последние годы, диэлектрических резонаторов [3]. Достаточно простой и эффективный способ уменьшения кратковременной нестабильности частоты изложен в работе [1]. Однако в ряде случаев необходимо знать долговременную нестабильность частоты при работе генератора в широком диапазоне температур. Этот вопрос рассматривается в нижеприведенной работе.

Теоретический анализ. Для волноводного прямоугольного резонатора при температурном воздействии и изменении при этом размеров волновода изменение генерируемой частоты df можно оценить с помощью следующей формулы, используя выражение для длины волны в прямоугольном волноводе:

$$\lambda_{\text{в}} = \lambda_0 / [1 - (\omega_{\text{кр}} / \omega)^2]^{1/2}, \quad \lambda_0 = C / f. \quad (1)$$

$$df = -(S_a \cdot \Delta a + S_l \cdot \Delta l), \quad (2)$$

где

$$S_a = \frac{C}{2a^3(1/a^2 + 1/l^2)^{1/2}}, \quad (3)$$

$$S_l = \frac{C}{2l^3(1/a^2 + 1/l^2)^{1/2}}. \quad (4)$$

Таким образом, результирующее изменение частоты:

$$\Delta F = -\frac{C}{2\sqrt{1/a^2 + 1/l^2}}(\Delta a/a^3 + \Delta l/l^3). \quad (5)$$

Следует учитывать, что $a = f(T)$, $l = f(T)$. В этих формулах: Δa и Δl – изменение ширины и длины волновода соответственно; S_a – крутизна изменения частоты за счет изменения ширины; S_l – крутизна изменения частоты за счет изменения длины; C – скорость света; f – частота генерируемых колебаний; $\omega_{кр}$ – критическая частота волновода; T – температура.

Относительное влияние ширины и длины резонатора на температурную нестабильность частоты можно оценить, если сравнить S_a и S_l , при этом получим $S_a/S_l = l^3/a^3 \gg 1$, так как практически всегда выполняется условие $l > a$. Таким образом, видно, что изменение ширины значительно сильнее сказывается на температурной нестабильности частоты, чем изменение длины волноводного резонатора. На рис.1 приведено расчетное изменение частоты генератора на основе медного полуволнового прямоугольного волноводного резонатора в диапазоне температур 100 градусов.

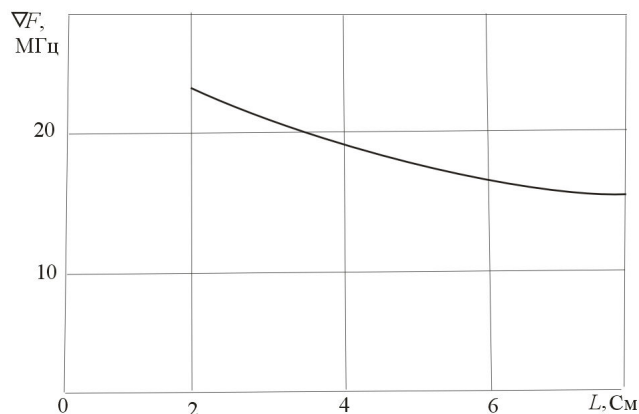


Рис. 1. Расчетное изменение частоты в зависимости от длины резонатора в диапазоне температур 100 градусов

Температурный уход частоты определяется не только свойствами резонатора, но и температурной зависимостью электрофизических параметров активного элемента (диода). В диапазоне СВЧ используется чаще всего арсенид галлия *n*-типа. Типичная зависимость удельной проводимости от температуры приведена на рис. 2 [4]. С ростом температуры увеличивается концентрация носителей, что приводит к росту удельной проводимости примерно пропорционально $T^{3/2}$, а при очень высокой концентрации уменьшается подвижность носителей заряда, и проводимость падает пропорционально $T^{-3/2}$. При очень высокой температуре происходит ионизация атомов собственного полупроводника, и удельная электропроводность резко увеличивается.

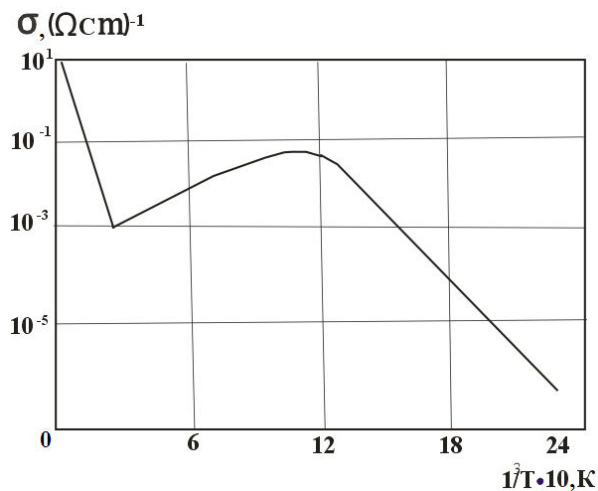


Рис. 2. Зависимость удельной проводимости полупроводника от температуры

Следует также учитывать, что с ростом концентрации при росте температуры падает подвижность носителей заряда, а это также влияет на частоту генерации. Примерная зависимость подвижности электронов и дырок от концентрации носителей заряда для арсенида галлия показана ниже (рис. 3) [5].

Видно, что увеличение концентрации носителей приводит к уменьшению подвижности примесных полупроводников как p , так и n -типа.

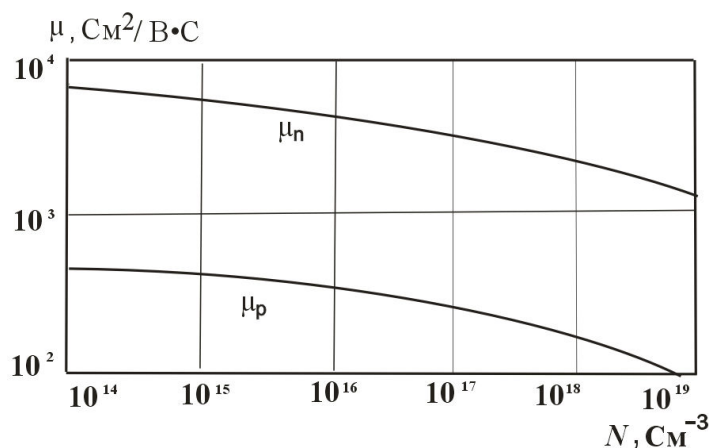


Рис. 3. Зависимость подвижности электронов и дырок от их концентрации

Как известно, удельная проводимость σ полупроводника определяется выражением

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p), \quad (6)$$

где μ – подвижность электронов и дырок соответственно, n и p – их концентрация. Таким образом, изменение температуры приводит к изменению импеданса активного элемента и, следовательно, к изменению частоты.

При определении температурных коэффициентов величины питающих напряжений или токов источника питания, а также коэффициент стоячей волны нагрузки в диапазоне температур считаются неизменными. В зависимости от вида частотных характеристик генератора могут быть предложены те или другие способы термокомпенсации.

На рис. 4 приведена экспериментально снятая зависимость частоты генератора на диоде Ганна от величины напряжения источника питания. Если не предъявляются жесткие требования к стабильности мощности, а только к стабильности частоты, что чаще всего необходимо, то температурный уход частоты можно обеспечить, установив, например, терморезистор в какой-то точке корпуса генератора и подсоединив его в определенный узел схемы стабилизатора источника питания.

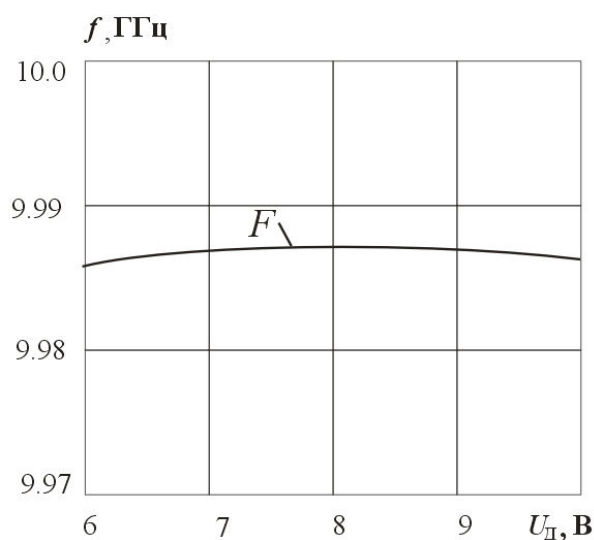


Рис. 4. Режимное изменение частоты генератора

Если стабилизатор источника питания выполнен по следующей схеме (рис. 5), то терморезистор с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления можно включить в нижнюю часть делителя регулятора выходного напряжения либо в верхнюю часть, в зависимости от того, где находится рабочая точка на оси U_d (рис. 4).

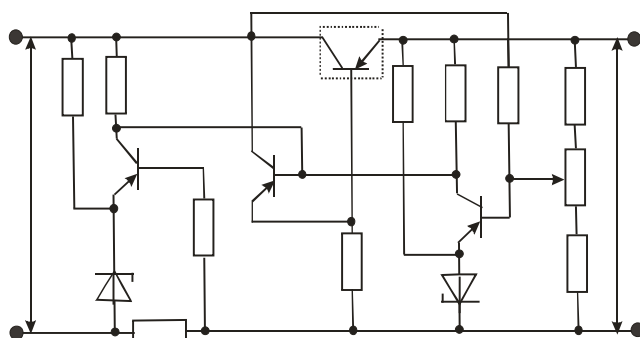


Рис. 5. Принципиальная схема стабилизатора источника питания

Еще одна возможность улучшения стабильности частоты – это синхронизация внешним высокостабильным сигналом. Как показали исследования [6], синхронизирующий сигнал может быть на 30...50 дБ меньше, чем синхронизируемый сигнал. В работе [7] синхронизирующий сигнал от кварцевого генератора вводился в цепь питания диода Ганна через высокочастотный трансформатор (рис. 6), что значительно улучшало кратковременную и долговременную стабильность частоты.

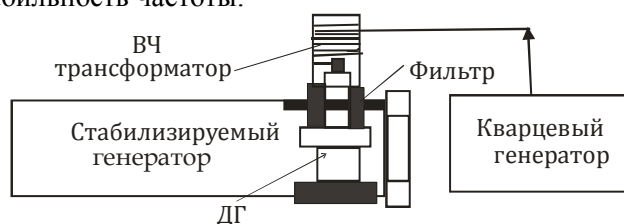


Рис. 6. Устройство, поясняющее кварцевую синхронизацию частоты

В волноводном генераторе (рис. 7) наиболее просто осуществить термокомпенсацию ухода частоты, выбирая соответствующим образом размеры перестроечного плунжера и тип материала, из которого он изготавливается. Поскольку длина собственно волновода L_B всегда больше длины перестроечного плунжера $L_{Пл}$, то для компенсации ухода частоты плунжер необходимо изготавливать из материала с большим температурным коэффициентом линейного расширения, чем волновод. Кроме того, необходимо этим же плунжером компенсировать уход частоты, обусловленный изменением ширины волновода.

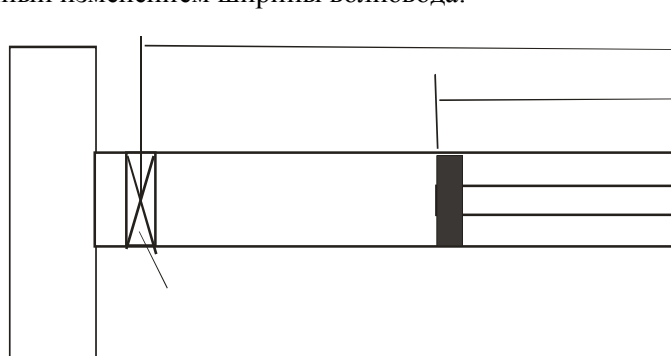


Рис. 7. Конструкция генератора с термокомпенсирующим поршнем

Таким образом, с ростом температуры увеличение длины волновода должно приводить к уменьшению частоты генератора, а увеличение длины плунжера – к ее увеличению, в результате осуществляется термокомпенсация. Поэтому можно записать $-\Delta F = df_{пл} = 0$, (7) где $df_{пл}$ – компенсация температурного ухода частоты за счет изменения длины плунжера.

При этом в расчетах используем выражение (3), считая $a = \text{const}$, а $df_{\text{пл}} = f(T)$. Поскольку $L_{\text{в}} > L_{\text{пл}}$, то ясно, что стержень плунжера должен быть изготовлен из материала с температурным коэффициентом линейного расширения большим, чем волновод. Такими материалами могут служить различного вида пластмассы, имеющие температурный коэффициент линейного расширения примерно на порядок больший, чем у металлов. Это позволяет значительно уменьшить длину стержня, на котором крепится короткозамыкатель. Экспериментальная зависимость температурного ухода частоты данной конструкции генератора на основе латунного волновода приведена на рис. 8.

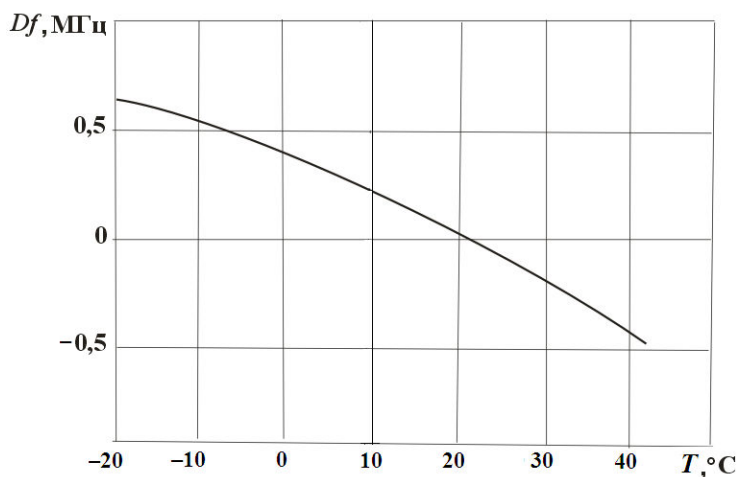


Рис. 8. Экспериментальная зависимость изменения частоты генератора с термокомпенсацией от температуры

Из графика (рис. 8) следует, что температурный уход частоты составил около 20–40 кГц на 1 °С, что примерно на порядок лучше, чем результаты, приведенные в работе [3]. Разница температур корпуса диода и корпуса волновода находилась в пределах 7–10 °С, что позволяет рассчитать тепловое сопротивление [8]:

$$R_{\text{T}} = (T_{\text{д}} - T_{\text{в}}) / P_{\text{потр}} = 10 / (8 \cdot 0,4) = 3,3 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт} . \quad (8)$$

Зная тепловое сопротивление, можно при конструировании, например, микрополосковых устройств, рассчитать необходимую площадь радиатора.

Заключение

Проведен анализ причин температурной нестабильности частоты СВЧ генераторов. Показано, что основными способами ее улучшения являются термокомпенсация с помощью источников питания, кварцевая синхронизация на гармониках, температурная компенсация за счет перестроечных элементов конструкции генератора. Оценивается величина теплового сопротивления корпус диода – радиатор.

Список литературы

1. Муравьев В.В., Савельев В.Я., Бельский А.Я. // Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника. 1974. № 8. С. 88–90.
2. Бельский А.Я., Дробот С.В., Зацепин Е.Н. Особенности расчета шумовых характеристик генераторов, стабилизированных дисперсионным резонатором // Изв. Нац. академии наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. 2011. № 3. С. 107–110.
3. Диэлектрические резонаторы / под ред. М.Е. Ильченко. М.: Радио и связь, 1989. 328 с.
4. Moschwizer A., Lunze K. Halbleiterelektronik. VEB VERLAG BERLIN, 1975. 559 p.
5. Шур. М. Современные приборы на основе арсенида галлия. М.: Мир, 1991. 632 с.
6. Бельский, А.Я., Дробот С.В., Зацепин Е.Н. Некоторые особенности характеристик внешней синхронизации твердотельных генераторов // Докл. БГУИР. 2013. № 7 (77). С. 19–24.
7. Новоженин В.М. Исследование флюктуаций частоты генератора Ганна // Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника. 1980. Т. XXXIII, № 10. С. 26–29.
8. Алфеев В.Н. Радиотехника низких температур. М.: Сов. радио, 1966. 368 с.

References

1. Murav'ev V.V., Savel'ev V.Ja., Bel'skij A.Ja. // *Izv. vuzov SSSR. Radioelektronika*. 1974. № 8. S. 88–90. (in Russ.)
2. Bel'skij A.Ja., Drobot S.V., Zacepin E.N. Osobennosti rascheta shumovyh harakteristik generatorov, stabilizirovannyh dispersionnym rezonatorom // *Izv. Nac. akademii nauk Belarusi. Ser. fiz.-tehn. nauk*. 2011. № 3. S. 107–110. (in Russ.)
3. *Dijelektricheskie rezonatory* / pod red. M.E. Il'chenko. M.: Radio i svjaz', 1989. 328 s. (in Russ.)
4. Moschwizer A., Lunze. K. Halbleiterelektronik. VEB VERLAG BERLIN, 1975. 559 p.
5. Shur. M. *Sovremennye pribory na osnove arsenida gallija*. M.: Mir, 1991. 632 s. (in Russ.)
6. Bel'skij, A.Ja., Drobot S.V., Zacepin E.N. Nekotorye osobennosti harakteristik vneshnej sinhronizacii tverdotel'nyh generatorov // *Dokl. BGUIR*. 2013. № 7 (77). S. 19–24. (in Russ.)
7. Novozhenin V.M. Issledovanie fluktuacij chastoty generatora Ganna // *Izv. vuzov SSSR. Radioelektronika*. 1980. T. XXXIII, № 10. S. 26–29. (in Russ.)
8. Alfeev V.N. *Radiotekhnika nizkih temperatur*. M.: Sov. radio, 1966. 368 s. (in Russ.)

Сведения об авторах

Бельский А.Я., к.т.н., доцент кафедры электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Гусинский А.В., к.т.н., доцент кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Зацепин Е.Н., к.т.н., доцент кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-84-42;
e-mail: avggus@mail.ru
Гусинский Александр Владимирович

Information about the authors

Belsky A.Y., PhD, associate professor of electronics department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Gusinski A.V., PhD, associate professor of information security department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Zatsepin E.N., PhD, associate professor of department of human engineering and ergonomics of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki, 6,
Belarusian state university
of informatics and radioelectronics
Tel. +375-17-293-84-42;
E-mail: avggus@mail.ru
Gusinski Alexander Vladimirovich