

## ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ГЕТЕРОДИН ДЛЯ РАДИОМЕТРА

*В. М. Богод, И. А. Ипатова*

Сообщается об испытаниях и опыте применения генератора на диоде Ганна в качестве гетеродина для супергетеродинного приемника. Описывается конструкция генератора диапазона 2—3 см с выходной мощностью около 40 мвт. Проведено сравнение влияния шумов гетеродина на шумовую температуру радиометра для гетеродина на диоде Ганна и ЛОВ.

The tests and use of a Gann diode generator as a heterodyne in a superheterodyne receiver are reported. The design of a generator for the 2—3-centimeter range, with power output about 40 mw, is described. A comparison is made of the influence of heterodyne noises on radiometer noise temperature for a heterodyne with a Gann diode and a back-wave valve.

Хотя к радиоастрономическим приемникам наземных радиотелескопов обычно не предъявляют серьезных требований по весу и объему аппаратуры, миниатюризация и упрощение ее имеет определенное значение в связи с необходимостью оснащения фокальной кабины радиотелескопа большим количеством приемных устройств, работающих одновременно на разных волнах. Такие комплексы аппаратуры необходимы для проведения комплексных измерений и увеличения информативности дорогостоящих инструментов [1]. Этим объясняется стремление разработать компактные, выполненные целиком на полупроводниковых элементах, радиометры. В настоящее время уже более или менее широко применяются транзисторные УПЧ, диодные УВЧ и модуляторы, полупроводниковые источники питания. Успехи в освоении диодов на эффекте Ганна позволили разработать и применить в качестве гетеродина в радиометре генератор Ганна и тем самым заменить традиционный на СВЧ клистрон полупроводниковым генератором, компактным и экономичным. В результате разработанные нами радиометры с приемником супергетеродинного типа на волнах 2.3 и 2.7 см выполнены целиком на полупроводниковых элементах, причем радиометр питается от источника с напряжением 10 в., включая гетеродин [2].

Механизм периодических колебаний тока в диодах Ганна объясняется прохождением вдоль образца из арсенида галлия области сильного поля (домена). Домен образуется в непосредственной близости от катода и, пройдя весь образец со скоростью, равной дрейфовой скорости носителей заряда (10 см/сек.), исчезает на аноде.

При периодическом исчезновении и зарождении доменов возникают скачки тока, что и приводит к возбуждению СВЧ-колебаний во внешней цепи. На рис. 1 показана вольт-амперная характеристика диода Ганна. Колебания возникают при некотором значении приложенного к диоду постоянного напряжения  $U_{пор}$ .

В области I (рис. 1) диод ведет себя, как омическое сопротивление порядка 4—10 ом. При напряжении, превышающем некоторое  $U_{пор}$ , в об-

разре возникает домен, вызывающий уменьшение тока во внешней цепи. Как правило, диод работает в резонаторе и при этом к нему прикладывается сумма двух напряжений  $U = U_{см} + U_{\sim}$ . Напряжение  $U_{\sim}$  меняется с частотой, определяемой параметрами резонатора. На рис. 1 показан принцип синхронизации частоты генерации диода собственной частотой резонатора. В области 1 поле недостаточно для генерации доменов. Здесь домены гаснут, не достигнув анода диода. В области 2 домены генерируются и возбуждают поле в резонаторе. Таким образом, моменты генерации доменов синхронизованы собственной частотой резонатора. Так

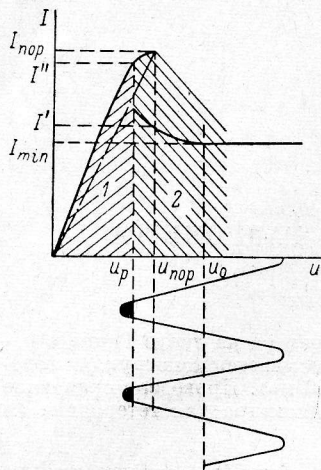


Рис. 1. К объяснению механизма СВЧ колебаний в диодах Ганна.

$U_с$  — напряжение смещения;  
 $U_р$  — напряжение рассасывания;  
 $U_{пор}$  — пороговое напряжение

который пропускает напряжение смещения постоянного тока, предотвращает утечку СВЧ-мощности через цепь подачи смещения и предохраняет ее от возбуждения. (рис 2).

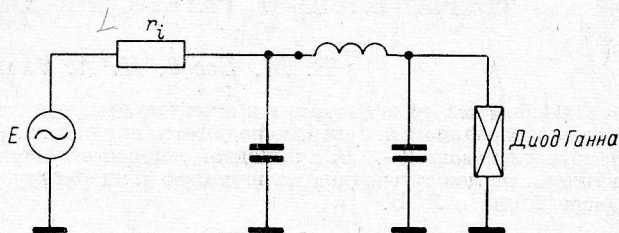


Рис. 2. Цепь смещения.

как отрицательное сопротивление диода простирается от постоянного тока до частот повторения доменов, то в цепи смещения используются П-образный фильтр низких частот,

### Конструкция генератора и ее расчет

Сконструированный генератор работает в диапазоне волновода  $23 \times 10$  с выходной мощностью порядка 40 мвт. Конструкция генератора представлена на рис 3. Диод Ганна (позиция 3) помещен в резонатор, выполненный на отрезке прямоугольного волновода. Связь с нагрузкой осуществляется посредством диафрагмы 1, подача постоянного смещения происходит через коаксиальный фильтр НЧ 2, который качеством исполнения определяет нагруженную добротность резонатора. Особое внимание уделено отводу тепла от анода диода. Для этого используется особая конструкция держателя диода с малым тепловым сопротивлением. Меняя диафрагму 1 и положение ее относительно диода, можно ступенями выбирать полосы генерации порядка 2-1.7 Мгц с максимальным КПД, в пределах которых плавное изменение частоты достигается перемещением короткозамыкающего поршня (КЗ) 4.

Схематически диод можно представить как параллельное соединение двух проводимостей, усредненных за период колебаний — отрицательной проводимости диода и емкостной проводимости, связанной с доменом сильного поля. Эквивалентная схема конструкции генератора представлена на рис. 4. Здесь  $l_1$  и  $l_2$  — расстояния от плоскости диода до диафрагмы и КЗ поршня,  $jB$  — реактивная проводимость диафрагмы,  $jB_{кз}$  — реактивная проводимость, созданная короткозамыкающим поршнем в плоскости диода,  $G_d$  — отрицательная проводимость диода Ганна,  $C_d$  — емкость диода.

Пересчитаем все активные и реактивные проводимости в плоскость диода  $A-A$ . В дальнейшем, обозначения с чертой сверху будут означать приведенные проводимости по проводимости нагрузки  $Y_0 = 1/Z_0$ , где  $Z_0$  — волновое сопротивление волновода. Окончательная эквивалентная схема генератора в плоскости диода показана на рис. 5.

Проводимость нагрузки и проводимость диафрагмы пересчитывается по формуле

$$\bar{Y} = \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \beta l_1}{[(1 - B \operatorname{tg} \beta l_1)^2 + \operatorname{tg}^2 \beta l_1]} - \frac{j\bar{B}(1 - \bar{B} \operatorname{tg} \beta l_1 + \operatorname{tg}^2 \beta l_1)}{[(1 - \bar{B} \operatorname{tg} \beta l_1)^2 + \operatorname{tg}^2 \beta l_1]} = \operatorname{Re}(\bar{Y}) + j \operatorname{Im}(\bar{Y}), \quad (1)$$

где  $\beta$  — постоянная распространения.

Проводимость, обусловленная трансформацией проводимости коротко замыкающего поршня в плоскость диода, определяется по формуле

$$\bar{B}_{\text{КЗ}} = j \operatorname{tg} \beta l_2. \quad (2)$$

Смещение диода по широкой стенке волновода трансформирует его параметры в плоскость  $A-A$  следующим образом:

$$\bar{G}_d^* = \bar{G}_d \sin^2 \frac{\pi}{a} ya; \quad \bar{B}_d = \frac{j\omega C_d}{y_0} \sin^2 \frac{\pi}{a} ya, \quad (3)$$

где  $G_d$  — отрицательная проводимость диода,  $C_d$  — емкость диода.

Положив в формуле (1)  $l_1 = \lambda/4$ , где  $\lambda$  — длина волны в волноводе, найдем, что активная и реактивная проводимости равны:

$$\operatorname{Re}(\bar{Y}) = (1 + \bar{B}^2)^{-1}; \quad \operatorname{Im}(\bar{Y}) = \frac{\bar{B}}{1 + \bar{B}^2}. \quad (4)$$

Для эффективного затягивания частоты генерации собственной частотой резонатора необходимо, чтобы нагруженная добротность резонатора была не менее 10 [1]:

$$Q_n = Q_p Q_d / (Q_p + Q_d) \geq 10, \quad (5)$$

где  $Q_p$  — собственная добротность резонатора с диафрагмой.

Добротность колебательной системы без диода  $Q_p$  можно получить, учитывая (4)

$$Q_p = \frac{\operatorname{Im}(\bar{Y})}{\operatorname{Re}(\bar{Y})} = \bar{B}. \quad (6)$$

Собственная же добротность резонатора  $Q_p$  не может быть меньше добротности диода Ганна, которая определяется формулой

$$Q_d = \omega C_d R_d, \quad (7)$$

где  $R_d = \xi R_0$ ;  $R_0$  — сопротивление диода в области I ВАХ;  $\xi$  — коэффициент пропорциональности, равный 15–30 [3, 4].

Для работы схемы в режиме генерации нужно соблюсти условия:

$$\operatorname{Re}(\bar{Y}) \geq \bar{G}_d^*. \quad (8)$$

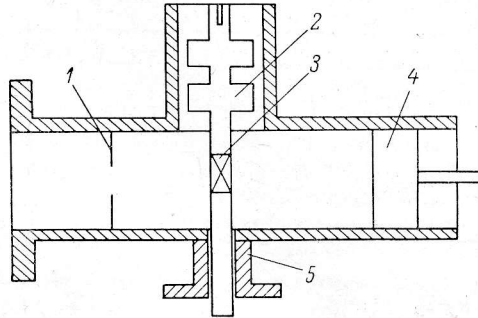


Рис. 3. Схематическая конструкция генератора Ганна.

1 — диафрагма; 2 — НЧ-фильтр; 3 — диод Ганна; 4 — КЗ поршень; 5 — держатель диода.



Подставив в уравнение (8) значения  $\text{Re}(\bar{y})$  из (4) и  $\bar{G}_d^*$  из (3), получим

$$(1 + \bar{B}^2)^{-1/2} \geq \sin \frac{\pi y_a}{a} \sqrt{\bar{G}_d^*}. \quad (9)$$

Выражение (9) при учете (5), (6) и (7) определяет смещение диода по широким стенкам волновода на расстояние  $y_a$ . Другое условие, необходимое

для существования генерации на данной частоте, есть равенство нулю реактивных проводимостей, приведенных в плоскость диода.

$$\text{Im}(\bar{Y}) + \bar{B}_d + B_{\text{КЗ}} = 0, \quad (10)$$

$$\bar{B}/(1 + \bar{B}^2) + (\omega C_d/y_0) \sin^2 \times \\ \times (\pi Y_a 1a) + \text{tg} \beta l_2 = 0. \quad (10a)$$

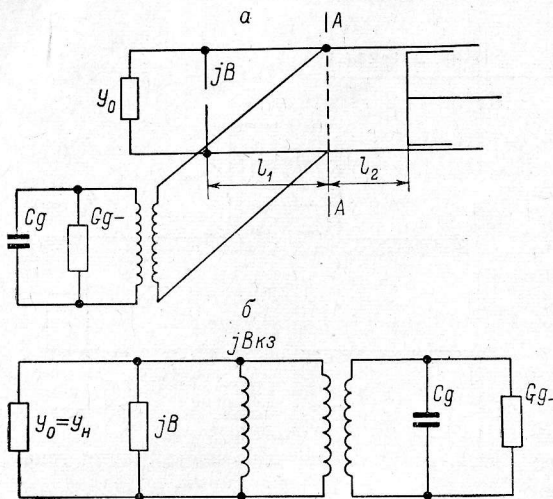


Рис. 4. Эквивалентная схема конструкции генератора.

лем допуска обеих проводимостей, приведенный расчет позволяет оценить основные размеры конструкции (рис. 3) и подбором величин настроечных элементов (диафрагма и КЗ поршень) получить требуемые параметры генератора.

Это уравнение дает возможность определить положение КЗ поршня. Приведенный расчет конструкции генератора является приближенным из-за приближенного представления эквивалентной схемы диода и держателя диода в виде параллельных активной и емкостной проводимостей. Однако, оперируя по-

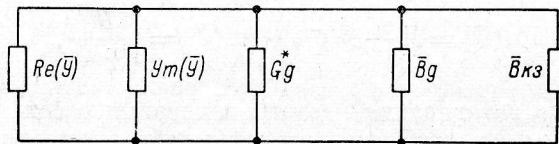


Рис. 5. Окончательная эквивалентная схема генератора.

### Шумовые качества гетеродина

Шумы генератора Ганна, по-видимому, в значительной мере определяются добротностью резонатора, и поэтому спектр шумов у него более широкий, чем у клистрона или ЛОВ, а кроме того, возможно существование генерации на других частотах помимо основной частоты. Чтобы уменьшить влияние шумов и подавить генерацию на гармониках и побочных частотах, в радиометре на выходе гетеродина целесообразно использовать узкополосный пропускающий фильтр и применить достаточно высокую промежуточную частоту (в нашем случае полоса частот УПЧ простирается от 100 до 350 МГц). При соблюдении этих условий шумовая температура радиометра с одноктактным смесителем на диоде Шоттки получается одинаковой при применении ЛОВ и генератора Ганна. Это было проверено нами в двух радиометрах:

$$\lambda = 2.3 \text{ см} \dots T_{\text{ш}} = 1500^\circ \text{K (ЛОВ и Ганн)}$$

$$\lambda = 2.7 \text{ см} \dots T_{\text{ш}} = 1950^\circ \text{K (ЛОВ и Ганн)}$$

При использовании двухтактного смесителя, в котором при идеальном балансе шумы гетеродина должны подавляться, шумовая температура радиометра на волне 2.3 см в случае гетеродина на диоде Ганна получается на 10% выше, чем при применении клистрона и ЛОВ в качестве гетеродина. Таким образом, гетеродины на основе генератора Ганна могут применяться в широкополосных супергетеродинных приемниках радиометров СВЧ без ухудшения шумовых характеристик.

### Выводы

Применение полупроводникового гетеродина позволяет существенно упростить питание радиометра (генератор Ганна требует напряжения 10 в., в то время как в случае клистрона требуются сотни вольт), уменьшить габариты и вес прибора и повысить надежность приемника. Все эти факторы позволяют создать сравнительно малогабаритный, простой и надежный комплекс радиометров для исследования спектров радиоисточников в диапазоне 1—30 см. Два упомянутых выше радиометра с гетеродином на диоде Ганна (2.3 и 2.7 см), являющиеся прототипами радиометров других диапазонов, смонтированы на Большом пулковском радиотелескопе и успешно эксплуатируются уже длительное время.

Авторы признательны Д. В. Королькову за ценные советы при выполнении данной работы и Л. Л. Люзе за оказанное содействие.

### Литература

1. Д. В. Корольков, Изв. ГАО, № 188, 152—167, 1972.
2. В. М. Богод, Д. В. Корольков, Изв. вузов, Радиофизика, т. 16, № 5, 694—694, 1973.
3. Дж. Коупленд, Новые методы полупроводниковой СВЧ-электроники, эффект Ганна и его применение. Изд-во «Мир», 236—248, 1968.
4. В. А. Романюк, «Радиотехника», 25, № 7, стр. 39—47, 1970.
5. I. F. White, IEEE Trans. MTT-6, 372—378, 1972.