

К. ф.-м. н. С. В. ПЛАКСИН, Л. М. ПОГОРЕЛАЯ,  
к. ф.-м. н. И. И. СОКОЛОВСКИЙ, к. ф.-м. н. В. С. ЛУКАШ

Украина, г. Днепропетровск, Институт транспортных систем  
и технологий «Трансмаг»;  
Россия, г. Томск, НИИ полупроводниковых приборов  
E-mail: svp@westa-inter.com, votoropin@mail.tomsknet.ru

Дата поступления в редакцию  
11.04 2007 г.

Оппонент к. т. н. С. В. ТАРАСОВ  
(Ин-т "Трансмаг", г. Днепропетровск)

## ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ГЕНЕРАТОР МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА НА ЗАПРЕДЕЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ

*Оптимизация конструкций полупроводниковых генераторных диодов и колебательных контуров автогенераторов позволяет повысить эксплуатационные характеристики источников электромагнитного излучения миллиметрового диапазона длин волн.*

С повышением частоты генерации полупроводниковых генераторов приходится использовать отрезки волноводов (как элементов автоколебательных систем) со все более малой величиной поперечного сечения, что сопровождается снижением собственной добротности колебательного контура и, соответственно, снижением кратковременной стабильности частоты. Стабильность частоты увеличивают, как правило, тем, что в состав колебательной системы вводят дополнительно высокодобротный стабилизирующий резонатор, преимущественно в форме цилиндра.

Однако включение стабилизирующего резонатора приводит к усложнению конструкции автогенератора, увеличению потерь и снижению уровня выходной мощности. Кроме того, в миллиметровом диапазоне длин волн во избежание возбуждения опорного резонатора на паразитных модах колебаний внутренняя поверхность опорного цилиндрического резонатора должна быть снабжена ребрами, ориентированными вдоль образующей [1], что (с учетом высоких требований к качеству обработки элементов в миллиметровом диапазоне) не только усложняет и удорожает генераторный модуль, но и резко ограничивает возможности его реализации. Стабилитронные схемы построения автогенераторов обладают и тем существенным недостатком, что перестройка частоты обеспечивается синхронным изменением частоты опорного резонатора и частоты активного резонатора, содержащего генераторный диод (ЛПД, МЭП-диод). Это усложняет систему управления частотой генерации, к тому же перестроечная характеристика генератора имеет разрывы и гистерезис, что характерно для автоколебательных систем с несколькими резонансными контурами.

В [2] сделана попытка использовать специфические свойства запределных волноводов, именно — повысить собственную добротность колебательного контура за счет включения полупроводникового генераторного диода в отрезке волновода пониженно-

го сечения, частота отсечки которого близка к генерируемой частоте, а вывод генерируемой мощности осуществляется с помощью петли связи, установленной на узкой стенке волновода. Однако установка в волноводе с заниженными размерами широкой стенки генераторных диодов (корпуса которых уже оптимизированы как в отечественных, так и в зарубежных разработках) либо вообще невозможна (в коротковолновой части миллиметрового диапазона приходится прибегать к декорпусированию диодов), либо сопряжена с внесением в колебательную систему шунтирующих емкостей (образуемых торцом цилиндрического корпуса диода и узкими стенками волновода) и неизбежным при этом снижением добротности. При этом уровни второй, третьей и более высоких гармоник излучения не регламентированы, что снижает КПД генератора, понижает устойчивость автогенераторного режима, т. к. не предотвращена возможность возникновения резонансов на высших гармониках, присутствие которых в спектре выходного сигнала в ряде случаев (например, в медико-биологических применениях) является крайне нежелательным.

В настоящей статье рассмотрено техническое решение по созданию полупроводникового генератора, в котором в качестве активных элементов используются диоды с междолинным переносом электронов (МЭП-диоды), излучение которых характеризуется максимальным содержанием основной гармоники, для которой добротность колебательной системы увеличена за счет включения в нее значительной по модулю индуктивности в виде отрезка запределного волновода. Для второй гармоники, доля которой снижена до приемлемого уровня, организована согласованная нагрузка, а уровень третьей гармоники сведен к минимуму. Указанное распределение составляющих спектра излучения МЭП-диода достигается соответствующим выбором геометрических размеров активной полупроводниковой структуры и концентрации носителей заряда в материале структуры, определяющих форму импульсов тока через полупроводниковую структуру.

Конструкция генератора представлена на **рис. 1**. Генератор содержит отрезок *b* прямоугольного волновода полного сечения своего диапазона, полупроводниковый генераторный элемент *5* — МЭП-диод, запитываемый от источника питания (на рисунке не показан) через фильтр нижних частот *4*, установлен-

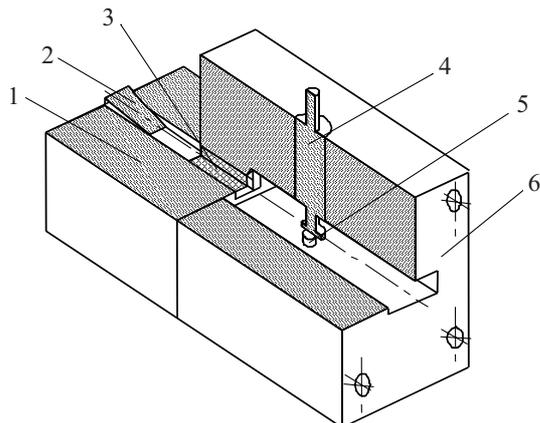


Рис. 1. Конструкция генератора

ный в центре широкой стенки волновода, отрезок волновода пониженного сечения *1*, содержащий вкладыш *3* из ферритового материала (пластинка) и балластную согласованную нагрузку *2*.

Отрезок *1* волновода пониженного сечения является прозрачным для второй гармоники и запредельным для основной гармоники, т. е. размер широкой стенки этого волновода должен быть не более  $\frac{\lambda_{\min}}{2\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$  и не менее  $\frac{\lambda_{\min}}{4\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$  минимальной длины вол-

ны генерируемых колебаний  $\lambda_{\min}$  на первой гармонике. Здесь  $\epsilon_r, \mu_r$  — относительная диэлектрическая и магнитная проницаемость материала ферритового вкладыша, соответственно.

Так как для диапазона длин волн от  $\lambda_{\min}$  до номинального значения отрезок *1* волновода является запредельным, то его входное сопротивление представляет собой большое по модулю реактивное сопротивление индуктивного характера [3, с. 106—111], и его величина

$$Z = \frac{i\eta}{m\sqrt{m^2\lambda_0^2/4a^2\mu_r\epsilon_r - 1}},$$

где  $\eta$  — характеристическое сопротивление линии;  
*m* — порядок волны (для основной волны *m*=1, для волн высшего порядка *m*=2, 3...);  
 $\lambda_0$  — длина волны в свободном пространстве;  
*a* — размер широкой стенки волновода.

Соответствующим подбором соотношений длины волны колебаний  $\lambda_0$  и размера широкой стенки волновода *a* это реактивное сопротивление может быть получено достаточно большим.

При подаче на диод номинального напряжения питания последний возбуждается на частоте резонансной системы, определяемой реактивными параметрами МЭП-диода, отрезка волноводной линии между МЭП-диодом и плоскостью сочленения волноводов *1* и *б*, величинами импеданса внешней нагрузки и отрезка волноводной линии пониженного сечения. Изменяя величину магнитной проницаемости материала ферритового вкладыша  $\mu_r$  внешним магнитным полем, удастся изменять величину реактивного сопротивления, вносимого в колебательную систему генератора, и тем самым изменять частоту электромагнитного излучения.

Параметры МЭП-диода — длина активной области и концентрация носителей заряда — выбраны из соображений получения максимального значения основной гармоники колебаний тока в диоде, минимального значения второй и третьей гармоник. Причем для второй гармоники отрезок волноводной линии пониженного сечения с расположенными в нем ферритовым вкладышем и балластной согласованной для этой гармоники нагрузкой является ловушкой. Все принятые меры позволяют получить на выходе генератора перестраиваемое по частоте высококогерентное излучение только на основной гармонике.

Выбор оптимальных значений параметров МЭП-диода осуществляется исходя из следующих соображений. Согласно [4], форма импульсов тока через МЭП-структуру с учетом времени формирования и аннигиляции (рассасывания) доменов сильного электрического поля, пролетного времени (величина которого определяется контролирующим влиянием высокочастотного напряжения, развившегося в резонаторе) описывается довольно сложной функциональной зависимостью. Однако для соизмеримых численных значений указанных характеристических времен импульсы тока могут быть аппроксимированы следующим выражением:

$$I(t) = \begin{cases} I_0 \cos \frac{2\pi}{T_{np}} t & \text{при } \tau_a < t < \tau_\phi; \\ I_0 \cos \frac{2\pi}{T_{np}} I_\phi & \text{при } \tau_\phi < t < T_{np} - \tau_a, \end{cases}$$

где  $T_{np}$  — период колебаний;  
 $\tau_a$  — время аннигиляции домена на аноде;  
 $\tau_\phi$  — время формирования домена.

Графическое представление указанной зависимости при сравнимых значениях  $\tau_a$  и  $\tau_\phi$  показано на рис. 2.

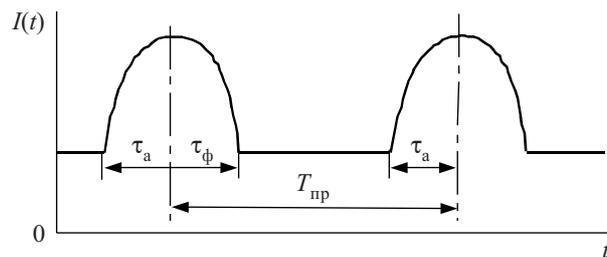


Рис. 2. Форма колебаний тока

Введем параметр  $\theta$  — угол отсечки, связывающий

указанные временные интервалы:  $\frac{2\pi}{T}(\tau_a + \tau_\phi) = 2\theta$ . Из

Фурье-анализа импульса тока, представленного на рис. 2 (Фурье-разложение функции, описывающей импульсы такой формы, дано в [5, с. 217—219]), следует, что первая гармоника тока  $I_1$  имеет плоский растянутый максимум, который начинается при  $\theta=90^\circ$ , значение второй гармоники  $I_2$  в интервале углов  $90 \dots 100^\circ$  составляет 50% от своего максимального значения, уровень третьей гармоники  $I_3$  минимальный, практически нулевого уровня (рис. 3).

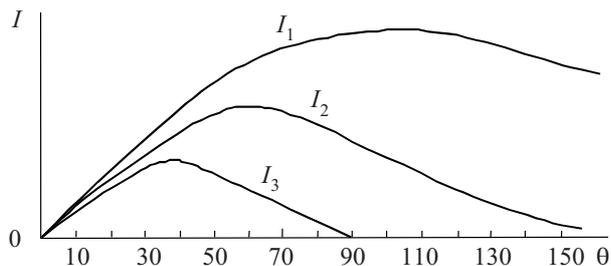


Рис. 3. Распределение составляющих импульса тока в зависимости от угла отсечки  $\theta$

Воспользуемся выражениями [6, с. 93—94] для  $\tau_a$  и  $\tau_\phi$  в случае, когда режим работы МЭП-диода близок к пролетному, т. е. когда период колебаний  $T=L/V_{др}$ , где  $L$  — длина активной области,  $V_{др}$  — дрейфовая скорость электронов, зависящая от частоты. Получим выражение, связывающее геометрические размеры активной структуры диода, кинетические параметры материала и характерные значения электрических полей в полупроводниковой структуре, проявляющей эффект доменной неустойчивости (эффект Ганна):

$$n_0 L = \left[ \frac{\pi}{\theta} \cdot \frac{16,5 V_{др}}{\mu_1(T)} \right]^2 \frac{\epsilon}{8\pi q (E_t - E_{r\min})},$$

где  $n_0$  — концентрация электронов;  
 $\mu_1(T)$  — подвижность электронов в слабом поле, зависящая от температуры  $T$ ;  
 $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость полупроводникового материала;  
 $q$  — заряд электрона;  
 $E_t$  — пороговая напряженность электрического поля;  
 $E_{r\min}$  — минимальная напряженность электрического поля вне домена.

Проведены расчеты зависимости  $n_0 L$  для арсенида галлия с учетом зависимостей  $V_{др}$  от частоты и подвижности электронов от температуры:

$$\mu_1(T) = \frac{1,8 \cdot 10^6}{T} \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Получены данные для значений  $n_0 L$ , при которых МЭП-диод отдает максимальную мощность в диапазоне частот 30...100 ГГц на основной частоте и на гармониках. В частности, при температуре активной структуры диода 400 К максимальные значения мощности излучения на первой гармонике, минимальные значения на третьей гармонике в диапазоне частот 60...80 ГГц реализуются при значениях  $n_0 L = (1,4...1,9) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , в то время как максимальное значение на второй гармонике достигается в структурах с  $n_0 L = (3,5...4) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ .

Лабораторные испытания генераторного модуля с использованием МЭП-диодов, оптимизированных по значению произведения концентрации носителей тока на длину активной области в диапазоне частот 53...54,2 ГГц (перестройка частоты осуществлялась намагничиванием ферритовой пластины, примыкающей к широкой стенке волновода, из материала 1СЧ-44) показали, что на выходе устройства присутствует практически только сигнал на основной частоте, и монохроматичность его достаточно высока: уровень частотно модулированных шумов не превышал -60 дБ/Гц на отстройках 5...7 кГц от несущей, что существенно ниже, чем для традиционных генераторов волноводно-штыревой конструкции [7, с. 58].

Приведенные расчетные значения, подтвержденные экспериментально, явились основой для промышленного производства диодов, работающих в диапазоне до 160 ГГц, а также для научно-исследовательских работ по разработке аппаратуры электромагнитной миллиметровой терапии.

\*\*\*

В целом проведенные исследования показали, что оптимизация конструкций полупроводниковых генераторных диодов на эффекте междолинного переноса электронов по критерию максимальной мощности на нужной гармонике с применением колебательных контуров, использующих специфические свойства волноведущих электродинамических систем, позволяет провести конструирование источников электромагнитного излучения миллиметрового диапазона с продуктивными эксплуатационными признаками.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Бугаев А. В. Экспериментальные исследования шумовых характеристик генератора-стабилитрона на кремниевых ЛПД миллиметрового диапазона волн // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ.— 1980.— Вып. 11.— С. 66—67.
2. Ivanek F., Shyam M., Raddi V. Investigation of waveguide-bellow-cutoff resonators for solid state active devices // Electron Letters.— 1969.— Vol. 5, N 10.— P. 214—216.
3. Саусворт Дж. Принципы и применение волноводной передачи.— М.: Сов. радио, 1955.
4. Костылев С. А., Гончаров В. В., Соколовский И. И., Челядин А. В. Полупроводники с объемной отрицательной проводимостью в СВЧ полях.— Киев: Наукова думка, 1987.
5. Гоноровский И. С., Демин Н. П. Радиотехнические цепи и сигналы.— М.: Радио и связь, 1994.
6. Шур М. Современные приборы на основе арсенида галлия.— М.: Мир, 1991.
7. Царапкин Д. П. Генераторы СВЧ на диодах Ганна.— М.: Радио и связь, 1982.