

Изобретение относится к области полупроводниковых преобразователей частоты, а точнее к СВЧ-импульсным умножителям частоты сигналов большой мощности (единицы кВт и десятки-сотни Вт у входного и выходного сигналов соответственно), использующих полупроводниковые диоды.

Изобретение наиболее эффективно может быть использовано при построении импульсных передающих устройств в коротковолновой части сантиметрового и миллиметрового диапазона волн.

Известны СВЧ-умножители частоты на полупроводниковых диодах: так известные конструкции описаны в (Радиопередающие устройства на полупроводниковых приборах. Проектирование и расчет / Под ред. Р.А. Валитова и И.А. Попова. - М.: Сов. радио, 1973. - Гл.5. - С.261 - 324; СВЧ полупроводниковые приборы и их применение / Под ред. Г. Уотсона. - М.: Мир, 1972. - §8.4. - С.259 - 289; M.E. Hines, P.W. Stacker, F. Occhiuti, J.F. Cushman. Multi-Watt power generation at millimeter-wave frequencies using epitaxially - stacked varactor diodes", IEEE, MTT-3 International Microwave Symposium, digest vol.II, 1987, June 9 - 11, 1987, Bally's Grand Hotel, Las Vegas, Nevada, USA).

В диапазоне СВЧ известные конструкции построены с использованием входного и выходного волноводов прямоугольного поперечного сечения, размеры которого определены для частот f_1 , до умножения и частот f_2 - после умножения соответственно.

Входной и выходной волноводы связаны друг с другом обычно штырем связи, в разрыве которого между штырем и стенкой входного или выходного волноводов установлен варакторный диод. Известны также симметричные схемы, используемые для генерации четных гармоник, в которых применены 2 или 4 полупроводниковые диоды, идентичные режимы которых реализуются со сдвигом 180° (см. [2], 267, фиг.8.25). В качестве полупроводниковых диодов применяются варакторные диоды, а для увеличения мощности используют многопереходные варакторы, так называемые ISIS-диоды, либо идентичные, последовательно включенные структуры ЛПД (см. [3]).

С использованием известных конструкций СВЧ-умножителей частоты на полупроводниковых диодах достигнуты уровни мощности непрерывного выходного сигнала до 8 - 10Вт в односантиметровом диапазоне и 5Вт в шестимиллиметровом диапазоне. В то же время известные конструктивные решения не позволяют решить задачу увеличения уровня мощности в миллиметровом диапазоне волн. Причиной этому является практическая нереализуемость полупроводниковых структур со значительными величинами напряжения лавинного пробоя при удовлетворении требований эффективного теплосъема и обеспечением высокой критической частоты диода (P. Staecker. "Power-Frequency Multipliers" Microwave Journal, vol.31, №2, February, 1988, p.175 - 181).

Из известных технических решений, наиболее близким по технической сущности к заявляемому является мощный умножитель на многопереходном варакторном диоде ("High power epitaxially-stacked varactor diode multipliers

performance and applications of W-band", J.F. Cushman, F. Occhiuti, E.M. McDonagh, M.E. Nines, P.W. Staecker. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Dallas, Tex., May 8 - 10, 1990, vol.II, p.923 - 926).

Конструкция этого умножителя (удвоителя частоты) приведена на фиг.1. Конструкция включает в себя входной 1 и выходной 7 волноводы прямоугольного поперечного сечения, связанные друг с другом штырем связи 3, в разрыве которого, между его торцом и широкой стенкой выходного волновода, установлен полупроводниковый умножительный диод 5; к диоду подводится фиксированное напряжение смещения через штырь связи 3 и коаксиальный режекторно-резистивный фильтр 3 низких частот. Между входным 1 и выходным 7 волноводами установлен режекторный радиальный фильтр 12, пропускающий с минимальными потерями входной сигнал и отражающий сигнал с умноженной частотой. Принципиально данная конструкция охватывает широкий диапазон частот от 11,75 до 47ГГц и от 47ГГц до 94ГГц. В диапазоне 11,75 - 47ГГц (учетверенные частоты) используется каскадное включение двух удвоителей; в диапазоне 47 - 94ГГц, используется удвоитель частоты. В указанных удвоителях применены двухпереходные (в диапазоне 47 - 94ГГц) и трехпереходные (в диапазонах 11,75 - 123,5 и 23,5 - 47ГГц) варакторные диоды на арсениде галлия. Известные умножители использованы как в непрерывном, так и в импульсном режимах работы. Достигнутые при использовании известных умножителей уровни мощности составляют 260мВт в непрерывном и 850мВт в импульсном режиме на частоте 94ГГц. При этом в импульсном режиме длительность импульса составляет 2,5мкс, а скважность равна 20. Данные результаты превышают достигнутые в диапазоне 94ГГц при непосредственном генерировании в этой области частот. В то же время все известные умножители характеризуются уровнями выходной мощности, не превышающими 10Вт, что более чем на порядок ниже того уровня, который может быть достигнут при реализации предлагаемого технического решения. Данная особенность известных умножителей частоты является принципиальной, связанной с проблемами электрической прочности и теплосъема в режиме больших мощностей.

Предлагаемое изобретение направлено на усовершенствование СВЧ-умножителя частоты на полупроводниковых диодах в коротковолновой части сантиметрового и миллиметрового диапазонов волн путем нового выполнения СВЧ-цепи и определенной связи ее элементов, что обеспечивает существенное повышение уровней импульсной мощности СВЧ. Достижимый технический результат позволяет создать многодиапазонные импульсные передающие устройства при минимальных габаритах и стоимости конструкции.

Заявляемый технический результат достигается тем, что в мощном СВЧ-полупроводниковом умножителе частоты, содержащем входной и выходной волноводы прямоугольного поперечного сечения, связанные друг с другом штырем связи, в разрыве которого установлен полупроводниковый умножительный диод, режекторный фильтр, пропускающий входной и отражающий выходной сигнал, согласно

изобретения:

- штырь связи, проходящий через широкую стенку выходного волновода перпендикулярно к ней, является одновременно продолжением внутреннего проводника центрального плеча **T**-образной коаксиальной системы, два других симметричных плеча которой выполнены в виде неоднородных коаксиальных линий с коническими внутренними проводниками;

- между большими по диаметру торцами внутренних проводников неоднородных коаксиальных линий (с увеличивающимися диаметрами внутренних проводников) и короткозамыкающими торцевыми стенками наружных цилиндрических проводников коаксиальных линий установлены по **N** параллельно включенных умножительных диодов;

- **T**-образная коаксиальная система связана со входным волноводом при помощи цилиндрического штыря связи, являющегося продолжением центральных проводников симметричных плеч коаксиальной системы, проходящего через входной волновод перпендикулярно к его широким стенкам;

- во входном волноводе установлен режкторный фильтр, пропускающий частоты входного сигнала и отражающий рабочие частоты выходного сигнала.

Эти признаки позволяют достичь заявляемый технический результат, что поясняется следующим образом.

Установка умножительных диодов в двух симметричных плечах **T**-образной коаксиальной системы и осуществляемой в предлагаемой конструкции контрфазное возбуждение указанных симметричных коаксиальных плеч, реализует фактически увеличение основной частоты временной зависимости тока в центральном плече **T**-образной коаксиальной системы в два раза, что приводит к существованию в этом плече только четных гармоник тока и к увеличению уровня мощности в два раза на соответствующих частотах четных гармоник.

Установка умножительных диодов в области торцов симметричных плеч **T**-образной коаксиальной системы, где значительно снижена величина волнового сопротивления $W_{ок}$ в связи с увеличенным диаметром d_2 внутреннего проводника и приближением его к диаметру d_1 наружного цилиндрического проводника коаксиала, обеспечивает значительное уменьшение напряжения сигнала на умножительных диодах. Действительно, при уровне мощности P_1 входного сигнала в каждом симметричном плече **T**-образной коаксиальной системы, амплитуда СВЧ-напряжения

$$U_m = [120 \ln \frac{d_1}{d_2} \cdot P_1]^{1/2}; \quad (1)$$

в частности, при

$$\frac{d_1}{d_2} < 1,18 \quad W_{ок} \leq 10 \text{ ом и при } P_1 \leq 1000 \text{ Вт}$$

$$U_m < 140 \text{ В.}$$

Умножительные диоды, рассчитанные на работу с такими амплитудами СВЧ-сигнала, реализуется при построении многопереходных **ISIS** структур, с числом переходов **N** 2 - 4. Такие диоды удовлетворяют также требованиям

обеспечения нормального теплового режима при уровнях непрерывной мощности до 10Вт. В реализуемых конструкциях прототипа (фиг.1), предназначенных для получения выходного сигнала в 8 - мм диапазоне волн реально достижимая величина волнового сопротивления

$$W_{ок} \geq 100 \text{ м} \quad \text{и при этом амплитуда СВЧ-сигнала}$$

$$U_m > 400 \text{ В.}$$

Умножительные диоды должны при этом иметь напряжение лавинного пробоя $U_{л.п.} \geq 800 \text{ В}$. Также диоды, предназначенные для работы в миллиметровом и в коротковолновой части сантиметрового диапазона, невыполнимы [4].

Параллельное включение **N** полупроводниковых умножительных диодов в каждом из симметричных плеч **T**-образной коаксиальной системы уменьшает эквивалентное тепловое сопротивление и паразитное омическое сопротивление диодной системы, обеспечивает прохождение значительных токов через диоды при высоких уровнях входной мощности и в связи с этим способствует достижению высокой надежности умножителя частоты.

Число **N** включаемых диодов определяется требованием обеспечения необходимого теплосъема с диодов и требованием минимизации последовательно включенного в СВЧ-цепь паразитного омического сопротивления растекания. В режимах работы импульсного умножителя частоты с длительностью импульса $\tau_{и.}$ превышающего время поперечной тепловой

$$\tau_{пр} = \frac{D^2}{4\alpha}, \quad \text{где } \alpha - \text{коэффициент}$$

релаксации теплопроводности, увеличение числа **N** параллельно включенных диодов уменьшает тепловое сопротивление растекания в \sqrt{N} раз при неизменной полной площади **p-n** переходов

$$S_{pn\Sigma} = \sum_N S_{pni},$$

определяемой характеристиками умножения в конкретной электродинамической системе. В короткоимпульсном режиме работы применение параллельного включения диодов при $S_{pn\Sigma} = \text{const}$ не приводит к уменьшению теплового сопротивления. Однако в этом случае также, как и при всех других режимах существенным оказывается снижение эквивалентного паразитного омического сопротивления растекания $R_{s\Sigma}$. Действительно, анализ показывает, что паразитное омическое сопротивление системы параллельно включенных **N** диодов может быть определено выражением

$$R_{s\Sigma} = \frac{\rho_s h_s}{\delta_s \pi D_n \sqrt{N}} + \frac{R_m}{N} + \frac{\sqrt{2} \rho_s}{N 4\pi \delta_s} \times$$

$$\times \text{Real} \left[th \frac{h_s}{\rho_s} (1+j) \right],$$

где ρ_s - удельное сопротивление подложки полупроводниковой структуры;

h_s - толщина подложки;

D_1 - диаметр **p-n** перехода одной структуры;

$$\delta_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\lambda \tau \rho_s}{\mu}} \quad - \text{глубина скин-слоя в}$$

материале подложки;

R_m - паразитное (контактное) сопротивление

макета полупроводниковой структуры в корпусе и в электродинамической системе;

λ - длина волны;

c - скорость света;

μ_s - магнитная проницаемость материала подложки.

Можно видеть, что увеличение числа N параллельно включаемых умножительных диодов существенно уменьшает величину паразитного омического сопротивления $R_s \Sigma$, что увеличивает критическую частоту умножительного диода и, соответственно, увеличивает КПД умножения

$$\eta = e^{-\alpha f_{\text{вых.}} / f_{\text{кр.}}} \quad (3)$$

Связь T -образной коаксиальной системы со входным волноводом при помощи штыря связи, являющегося продолжением внутренних проводников симметричных плеч коаксиальной системы обеспечивает необходимое согласование волноводно-коаксиального сочленения и в связи с этим сводятся к минимуму энергетические потери из-за отражений в указанном сочленении.

Установка режекторного фильтра во входном волноводе устраняет энергетические потери умножителя частоты, вызванные переизлучением выходного сигнала (после умножения частоты) во входную цепь умножителя.

Таким образом, все отличительные признаки предлагаемой конструкции мощного СВЧ-полупроводникового умножителя частоты направлены на достижение заявляемого технического результата - существенное повышение уровней импульсной мощности СВЧ.

Заявляемое изобретение соответствует критерию "изобретательский уровень" в связи с тем, что все отличительные признаки устройства в совокупности не обнаружены в составе другого объекта.

На фиг.1 представлена конструкция известного умножителя частоты (прототипа); на фиг.2 - вариант предлагаемой конструкции, умножителя частоты с симметричной T -образной коаксиальной системой; на фиг.3 - схема включения полупроводниковых структур умножительных диодов в каждом симметричном плече T -образной коаксиальной системы; на фиг.4 - временные зависимости токов в плече А (фиг.4а), в плече Б (фиг.4б) и в штыре связи с выходным волноводом (фиг.4в). Мощный СВЧ-полупроводниковый умножитель частоты (изображенный на фиг.2) состоит из входного волновода 1 с прямоугольным поперечным сечением, связанного с симметричными плечами 2 T -образной коаксиальной системы при помощи цилиндрического штыря связи 3, являющегося продолжением внутренних проводников коаксиальных симметричных плеч 2. Внутренние проводники 4 указанных коаксиальных отрезков 2 выполнены коническими с возрастающими диаметрами по мере удаления от осевой плоскости входного волновода. В других вариантах предлагаемой конструкции возможно выполнение неоднородных коаксиальных линий с увеличивающимися диаметрами внутренних проводников на основе ступенчатых переходов, либо переходов с более сложными профилями. На торцевом конце проводников 4 установлены N умножительных диодов ($N = 1, 2, 3, 4, \dots$),

включенных параллельно между торцевыми плоскостями S_1 и плоскостями S_2 короткозамыкающих крышек 6. В качестве умножительных диодов в предлагаемой конструкции применены многопереходные варакторные диоды. В вариантах выполнения устройства возможно применение различных инструкций многопередающих варакторных диодов: **ISIS**-диоды [3], последовательно включенные двухпролетные структуры и т.п.

Выходной волновод 7 умножителя частоты возбуждается штырем связи 8, проходящим через его широкую стенку перпендикулярно к ней, а также через коаксиальный фильтр низких частот 9 и СВЧ-коаксиальную поглощающую нагрузку 10. Согласование выходного волновода с коаксиальной системой обеспечивает введением в конструкцию скользящего поршня 11 и также обеспечением изменения положения коаксиального фильтра 9 низких частот. Во входном волноводе 1 установлен режекторный фильтр гребенчатого типа 12, устраняющий излучение выходного сигнала (с умноженной частотой) во входные цепи умножителя частоты. При значительных коэффициентах умножения частоты может оказаться целесообразным применение фильтров другого типа, например, вафельных.

Схема включения диодов в СВЧ-цепь приведена на фиг.3. В каждую $I^{\text{ю}}$ ветвь включены последовательно 2 двухдрейфовых кремниевых умножительных диода, каждый со структурой p^+pnn^+ с диаметром p - n перехода D_1 , длиной пролета в p и n областях $l_p = l_n = 2 \mu\text{м}$ и с концентрациями примесей $N_n = N_p = 1 - 3 \cdot 10^{16}$.

Данная структура диода оптимизирована для умножения входного сигнала в 3 - х сантиметровом диапазоне волн и получения выходного сигнала в 8 - ми миллиметровом диапазоне волн.

В СВЧ-цепь, между внутренним и наружным проводниками симметричных плеч коаксиальной системы включенных параллельно N ветвей указанных последовательно соединенных диодов. Вся система последовательно включенных диодов может быть заменена эквивалентной цепочкой фиг.3б, состоящей из элементов R_{ss}, R_{ms}, R_s, C_s , где R_s характеризует эффективное омическое сопротивление области пространственного заряда в умножительном диоде и согласно (С.В. Burckhardt "Analysis of Varactor Frequency Multipliers for arbitrary Capacitance Variation and Drive Level". The bell system Technical Journal, April, 1965, №4, p.675 - 692, и [7] J.C. Irvin, C.B. Swan "A composite varactor for simultaneous High Power and High Efficiency Harmonic Generation" IEEE Transaction on Electron Dev. May, 1966, vol.ID-13, №5) определяется как

$$R_{ns} = \frac{1}{2} \frac{\rho_n l_n \cdot 2}{2 \cdot S_{ns}} \quad (2)$$

где ρ_n - удельное сопротивление материала в области пролета;

$l_n = l_p + l_n$ - эквивалентная протяженность пролета последовательной цепочки диодов;

S_n - эквивалентная площадь p - n перехода всей системы последовательно-параллельно

включенных диодов.

Величина $S_{n3} = \text{const}$ и определяется требованием к величине эквивалентной емкости C_3 системы диодов. Это означает, что при изменении N , необходимо изменять диаметр D_1 каждого диода обратно пропорционально \sqrt{N} и при этом площадь p - n переходов S_{p-nl} каждого диода $S_{p-nl} \sim \frac{1}{N}$.

В табл.1 приведены результаты расчетов параметров R_{n3} , R_{s3} , R_{m3} критической частоты диодной системы f_{kp} , определенные для различных фиксированных значений N и C_3 . Можно видеть, что при всех фиксированных значениях $C_3 = (0,1-1,0) \text{ пФ}$ увеличение N в пределах $N = 1-4$ существенно снижает эквивалентное омическое сопротивление диода $R_{\Sigma} = R_{s3} + R_{n3} + R_{m3}$ и повышает критическую частоту диодной системы.

Умножительные диоды в предлагаемой конструкции работают в режиме с отсечной, когда СВЧ напряжение заходит в область положительной ветви вольтамперной характеристики диода. В соответствии с [7] такой режим существенно увеличивает КПД устройства при использовании диодов с быстрым рассасыванием накопленного заряда неосновных носителей.

Устройство работает следующим образом.

Входной сигнал низкой (умножаемой) частоты поступает в волновод 1, а затем в согласованную с волноводами коаксиальную систему 2.

В результате прохождения входного сигнала через диодную систему в каждом плече возникают токи, содержащие значительные амплитуды гармонических составляющих. Конфигурации токов в плече А и в плече Б, а также в общем проводе 8 - стержень возбуждения выходного волновода 7 приведены на фиг.4. На фиг.4а и 4б представлены временные зависимости токов $i_A(t)$ и $i_B(t)$ в плечах А и Б, соответственно. На фиг.4в представлена временная зависимость тока в стержне 8 $i_{\Sigma}(t)$. Анализ показывает, что в суммарной цепи 8 присутствуют только четные гармоники тока и т.о. конструкция умножителя на фиг.2 может работать как удвоитель, учетверитель (и т.п.) частоты входного сигнала.

Стержень 8 обеспечивает возбуждение выходного волновода 7 размеры которого выбраны в соответствии с частотой выходного сигнала. Настройка связи на максимуме выходной мощности производится скользящим волноводным поршнем 11 и коаксиальным поршнем 9, являющиеся одновременно фильтром низких частот. При необходимости обеспечения требований к подавлению паразитных колебаний на высших гармониках в выходном волноводе, в выходную СВЧ-цепь устанавливается полосовой фильтр, рассчитанный на прохождение с минимальным затуханием колебаний рабочего диапазона частот и подавление частот вне рабочего диапазона. Фильтр низких частот 9 совместно с поглощающим коаксиальным сопротивлением 10 обеспечивает прохождение постоянной составляющей тока от источника напряжения смещения, отражает частоты

рабочего диапазона и подавляет паразитные излучения на высших гармонических составляющих.

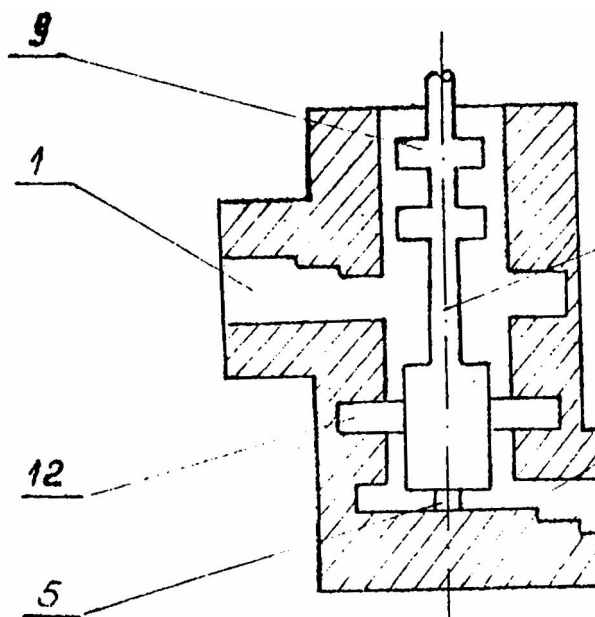
Режекторный фильтр 12, установленный во входном волноводе 1 отражает частоты выходного сигнала и пропускает входной сигнал. В вариантах выполнения для обеспечения согласования импедансов коаксиальной Т-образной системы, с включенными в нее диодными системами 5, нагруженной на выходной волновод 7 и коаксиальную нагрузку 10 применяется смещение Δ симметричных плеч коаксиальной системы относительно оси входного волновода. Изменение

такого смещения в пределах от $\Delta = \frac{a}{2}$ (ось проходит через плоскость боковой стенки волновода) до $\Delta = 0$ (ось проходит через центр широкой стенки волновода) позволяет изменять коэффициент связи между волноводом и коаксиальной линией в широком интервале и, благодаря этому, решать вопросы согласования при различных параметрах электродинамической системы и диодов (Горбачев А.К., Касаткин Л.В. Эквивалентная схема замещения высокочастотной цепи твердотельного стабилизированного сумматора мощности. Электроника СВЧ. - Сер.I. Вып.9. - 1989. - С.50 - 55).

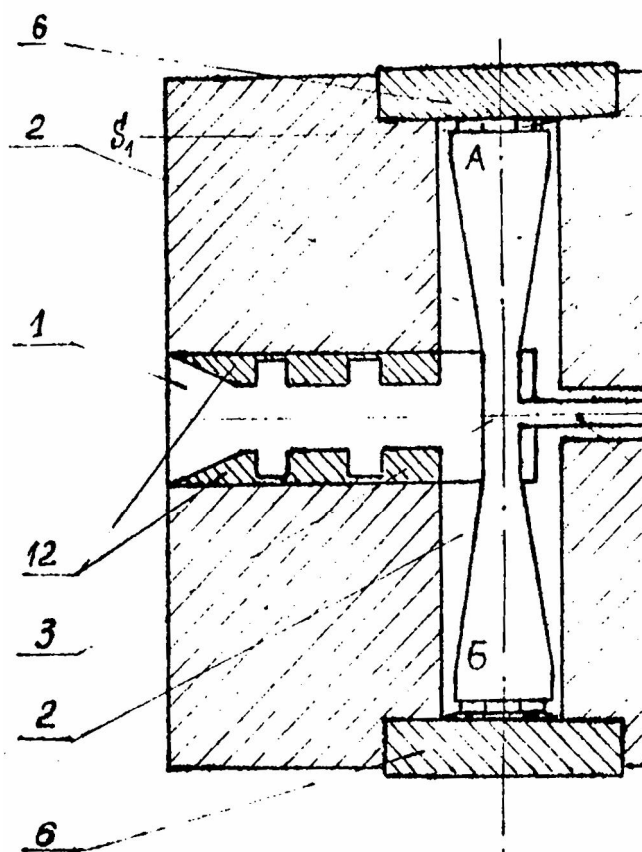
Как следует из приведенного анализа работы предлагаемой конструкции мощного СВЧ полупроводникового умножителя частоты вся совокупность отличительных признаков заявляемого технического решения обеспечивает достижение основного технического результата - увеличение импульсной мощности СВЧ умножителей частоты на полупроводниковых диодах в коротковолновой части сантиметрового и в миллиметровом диапазонах волн.

Таблица

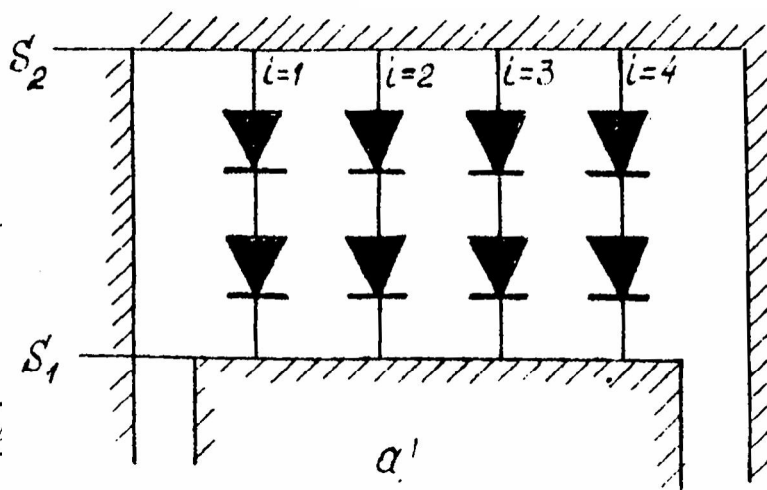
	C_9 (пкф)	1	0,8	0,6	0,4	0,2	0,15	0,1
N=1	D_1 (мкм)	480	429	372	303	215	186	152
	$R_{пз}$ (Ом)	0,09	0,11	0,15"	0,22	0,44	0,59	0,88
	$R_{сз}$ (Ом)	0,095	0,106	0,123	0,15	0,212	0,245	0,3
	$R_{мз}$ (Ом)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	$f_{кр.}$ (ГГц)	134	163	209	291	549	577	730
N=2	D_1 (мкм)	339	303	263	214	152	132	107
	$R_{сз}$ (Ом)	0,067	0,075	0,087	0,106	0,15	0,173	0,212
	$R_{мз}$ (Ом)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	$f_{кр}$ (ГГц)	241	288	359	480	730	842	1001
	D_1 (мкм)	277	248	214	175	124	107	88
N=3	$R_{сз}$ (Ом)	0,055	0,061	0,071	0,087	0,122	0,141	0,173
	$R_{мз}$ (Ом)	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
	$f_{кр}$ (ГГц)	335	398	482	622	894	1001	1154
	D_1 (мкм)	240	215	186	152	108	93	76
	$R_{сз}$ (Ом)	0,047	0,053	0,062	0,075	0,106	0,123	0,15
N=4	$R_{мз}$ (Ом)	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
	$f_{кр}$ (ГГц)	411	482	574	730	1000	1102	1244



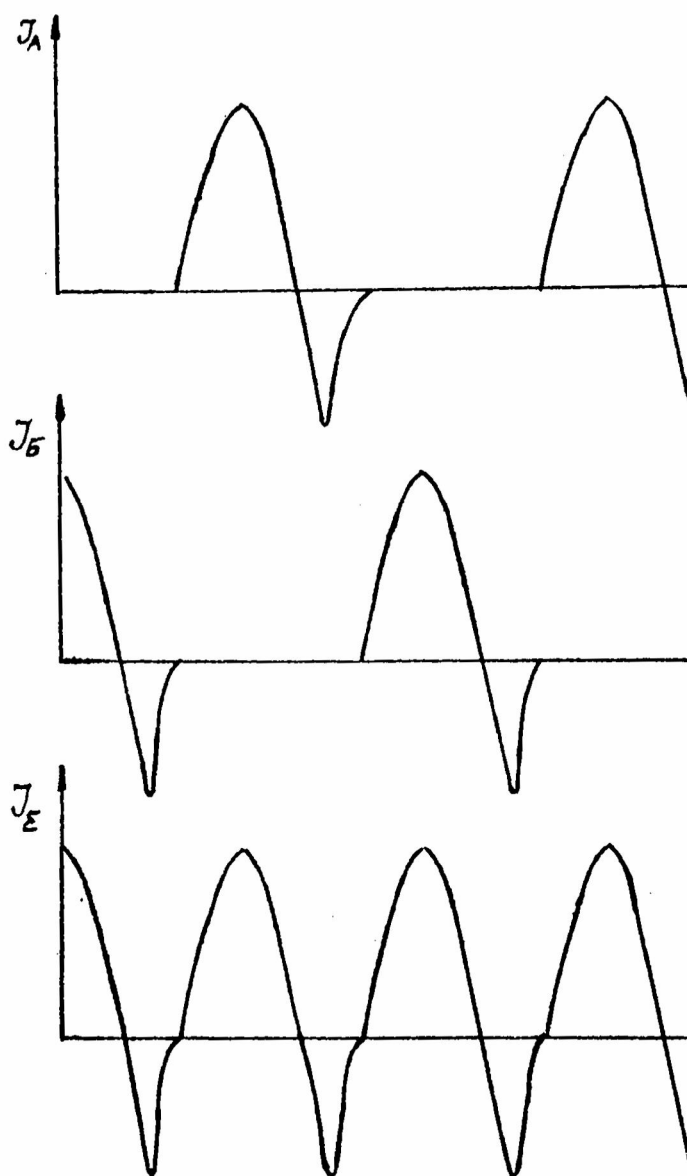
Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4