

УДК 621.382.2

**ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА
С КВАЗИОПТИЧЕСКИМИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ РЕЗОНАТОРАМИ**

А. Я. Кириченко, В. А. Солодовник, С. Н. Харьковский *)

Обобщен опыт разработки и создания новых типов твердотельных генераторов миллиметрового диапазона с квазиоптическими диэлектрическими резонаторами. Рассмотрены их физико-технические основы, приведены результаты экспериментальных исследований, намечены тенденции развития.

Развитие физики и техники миллиметровых и субмиллиметровых волн и расширение областей их применения во многих случаях требуют создания новых типов источников колебаний, учитывающих особенности этих диапазонов, используемую элементную базу и область применения. В настоящее время отсутствует приемлемая элементная база, физически и технически соответствующая этим диапазонам. В технике миллиметровых и субмиллиметровых волн широко применяется преобразование волн различными открытыми электродинамическими структурами — дифракционными решетками, открытыми волноводами и резонаторами и т. п. [1]. Определенные перспективы в этом направлении открывают исследования приборов, устройств и целых схем на диэлектрических волноводах (ДВ) и резонаторах (ДР) [2]. К их достоинствам относятся достаточная миниатюрность, возможность использования гибридно-интегральной технологии при их изготовлении и т. д. Ключевой проблемой использования такого рода устройств является создание генераторов, в которых активные полупроводниковые элементы эффективно сопрягаются с открытыми системами типа ДВ и ДР.

Известные генераторы миллиметрового диапазона на ДВ с активными элементами на диодах Ганна и ЛПД можно условно разбить на два класса. К первому относятся генераторы, в которых диоды имеют закрытую колебательную систему из металлических элементов на основе традиционных волноводных трактов, которые связываются с ДВ [3]. Однако такие устройства имеют ограниченную полосу частот, соответствующую полосе линий передач, требуют высокой точности изготовления при сложной конструкции. Более перспективны в коротковолновой части миллиметрового диапазона генераторы второго класса, в которых диоды непосредственно встраиваются в ДВ, при этом в ДВ обеспечивается распределенная обратная связь [4]. Конструкция этих генераторов во многом аналогична твердотельным лазерам, широко используемым в интегральной оптике. Однако в миллиметровом диапазоне они обладают малой мощностью выходного сигнала, низкой стабильностью частоты. Проблема заключается в том, что диоды Ганна и ЛПД являются элементами локального типа с низким импедансом, сравнимыми по размерам с длиной волны. Поэтому возникает необходимость выполнения противоречивых требований: обеспечения сильной связи их с ДВ (ДР) и с нагрузкой без существенного увеличения потерь энергии на излучение в свободное пространство в области их включения. Это определяет задачу разработки и использования новых типов генераторов, наиболее соответствующих особенностям миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов.

*) Институт радиофизики и электроники АН Украины, г. Харьков.

В данной работе рассматриваются новые типы твердотельных генераторов миллиметрового диапазона, в которых излучение в области включения диодов используется для связи с квазиоптическими диэлектрическими резонаторами (КДР). Для этого применяются брэгговские отражатели с осевой симметрией, элементы распределенной связи ДВ с призмными и дисковыми КДР, зеркальный полудисковый КДР.

1. Генераторно-излучающие модули с брэгговскими отражателями

Известно, что ДВ с периодической системой неоднородностей является антенной бегущей волны. Объединение ее с генератором позволяет создавать интегральные устройства в виде генераторно-излучающих модулей. Оптимальными в случае локального полупроводникового активного элемента в открытой излучающей структуре являются пе-

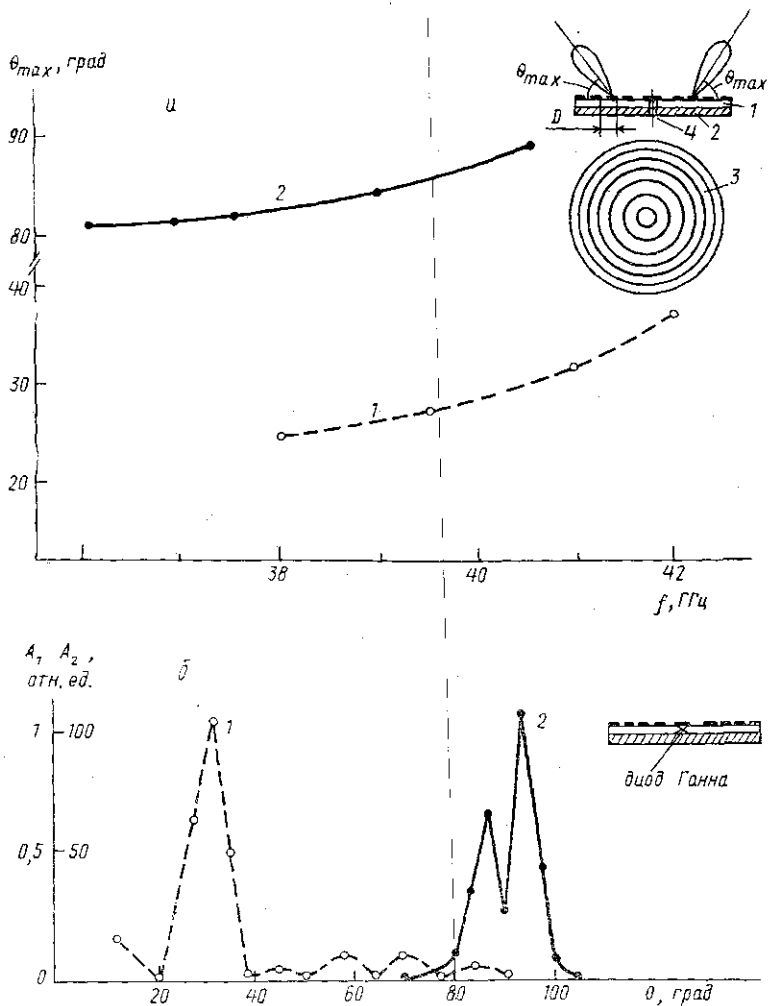


Рис. 1. Зависимости угла приема максимума излучения θ_{max} в дальней зоне от частоты f (а) и зависимости амплитуды A излучения в дальней зоне от угла θ размещения рупора при $f=40,5$ ГГц (б) для двух значений периодов D периодической системы неоднородностей. $D_1=3,5$ мм (1) и $D_2=5,5$ мм (2)

риодические системы с осевой симметрией. Одна из них используется в генераторно-излучающем модуле с квазиоптическим выводом энергии [5, 6]. Она выполнена в виде радиального плоского ДВ 1 (рис. 1, а, вставка) на металлическом основании 2 с периодической системой 3 на его поверхности в виде концентрических колец. Излучающие свойства таких систем из фольгированного фторопласта-4 исследовались в 8-мм диапазоне путем возбуждения их металлическим штырем 4, связанным с полым металлическим волноводом [7].

На рис. 1, а показаны зависимости угла θ_{\max} приема максимума излучения в дальней зоне от частоты возбуждения для двух периодов: $D_1=3,5$ мм (1) и $D_2=5,5$ мм (2). Исследованные таким образом системы использовались в генераторно-излучающем модуле с диодом Ганна (рис. 1, б, вставка). Собственный контур диода с элементами крепления и питания настраивался на частоту $f \approx 40,02$ ГГц. На рис. 1, б показаны зависимости амплитуды A излучения, принимаемого в дальней зоне, от угла θ размещения рупора относительно плоскости системы. Максимумы амплитуды излучения соответствуют направлениям, которые отвечают условиям дифракции на периодической системе. При этом амплитуда излучения системой с $D_2=5,5$ мм под углом $\theta \approx 95^\circ$ на два порядка больше, чем с $D_1=3,5$ мм под углом $\theta \approx 30^\circ$, что объясняется в первом случае не только фокусировкой излучения, снимаемого со всей системы, но также и увеличением мощности генерации самим диодом в высокочастотном поле более высокой напряженности в месте его расположения за счет распределенной обратной связи. Это позволяет использовать квазиоптический модуль [5, 6] для возбуждения квазиоптических волноводов с неоднородностями, вращающимися соединениями и т. д. Когда период системы равен половине длины волны в ней, обеспечиваются обратная связь с диодом и формирование выходного сигнала, излучаемого с кромки радиального ДВ в виде радиально расходящейся волны с аксиально-симметричной диаграммой направленности.

2. Генераторы с распределенной обратной связью в ДВ

В рассматриваемых генераторах активные полупроводниковые диоды размещаются в ДВ в области распределенной связи их с дисковым или призмным КДР. В отличие от чисто туннельной распределенной обратной связи в активном оптическом волноводе [8] формируется туннельно-дифракционная связь таким образом, чтобы использовать излучение из области включения диодов для связи с КДР.

Рассмотрим условия, при которых РОС в системе «ДВ с диодами — КДР» осуществляется двумя способами: 1) за счет нарушения эффекта полного внутреннего отражения, 2) за счет направленного излучения электромагнитной энергии из области включения диодов. Для этого в область распределенной связи ДВ с КДР введем периодическую систему неоднородностей с периодом D (рис. 2, а). Стрелками в КДР (дисковом или шестигранном призмном) показан ход лучей в случае резонансного колебания. Схема участка связи в увеличенном масштабе показана на рис. 2, б. Здесь θ , γ — углы, определяющие направления излучения волн вследствие нарушения полного внутреннего отражения и дифракции на периодической системе неоднородностей соответственно. Они даются известными выражениями:

$$\theta = \arccos \sqrt{\frac{\epsilon_w^*}{\epsilon_r}} \quad (1)$$

и для случая основной, (-1) -й пространственной гармоники,

$$\gamma = \arccos \left(\sqrt{\frac{\varepsilon_w^*}{\varepsilon_r^*} - \frac{\lambda}{D\sqrt{\varepsilon_r^*}}} \right), \quad (2)$$

где ε_w^* , ε_r^* — эффективные диэлектрические проницаемости ДВ и КДР, λ — длина волны в свободном пространстве.

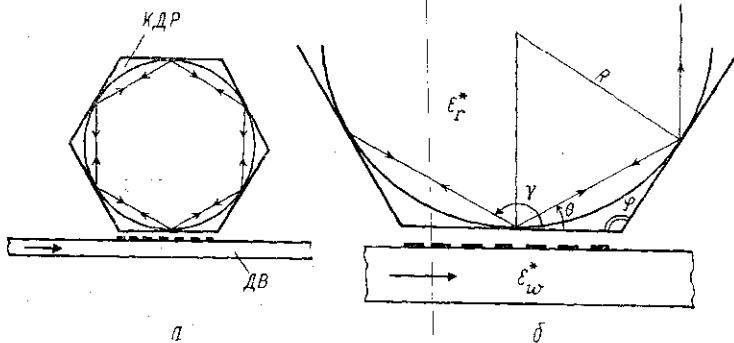


Рис. 2. Система «ДВ с периодической системой неоднородностей — КДР» и ход лучей, образующих резонансные колебания в КДР (а). Схема распределенной обратной связи в системе «ДВ с периодической системой неоднородностей — КДР» (б)

В работе [9] теоретически и экспериментально показано, что эти два канала излучения поверхностных волн ДВ в диэлектрическое полупространство могут существовать одновременно и независимо. Из геометрических построений рис. 2, б видно, что для резонансной распределенной связи ДВ и КДР необходима следующая связь угла излучения θ и угла φ между смежными гранями n -гранной призмы:

$$2\theta + \varphi = \pi,$$

$$\varphi = \pi(1 - 2/n). \quad (3)$$

Тогда из (1) — (3) можно найти условия для осуществления туннельно-дифракционной связи ДВ и призмного КДР:

$$\varepsilon_r^* = \varepsilon_w^* / \cos^2(\pi/n), \quad (4)$$

$$D = \lambda/2 \sqrt{\varepsilon_w^*}. \quad (5)$$

Выражение (4) в предельном случае связи поверхностной волны ДВ и волны типа волн «шепчущей галереи» дискового КДР сводится к условию фазового синхронизма этих волн:

$$\varepsilon_w^* \simeq \varepsilon_r^*. \quad (6)$$

В случае трехгранного призмного КДР, колебания в котором формируются за счет обратного отражения волн от двух металлизированных граней, выражение (4) приводится к виду

$$\varepsilon_r^* = \varepsilon_w^* / \sin^2(\varphi/2).$$

Разработка моделей и экспериментальные исследования генераторов на ДВ с КДР проводятся в 8-мм диапазоне волн. В генераторе

с дисковым КДР диод Ганна (рис. 3, вставка) размещается в отверстии ДВ, изготовленного из фторопласта-4 на металлическом основании [10]. Дисковый КДР диаметром 78 мм и высотой 7,2 мм связывается с ДВ посредством распределенной связи в месте расположения диода. Величина связи регулируется изменением расстояния δ между ДВ и дисковым КДР.

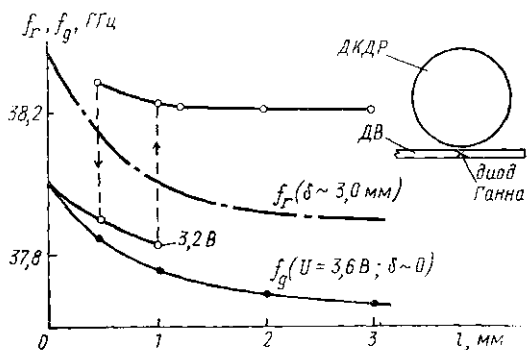


Рис. 3. Зависимости парциальной частоты f_r дискового КДР (ДКДР) и частоты f_g генерации диода от расстояния l для двух значений напряжения питания U

Реализованная система является многоконтурной. Резонансная частота низкодобротного парциального контура, образованного структурой и корпусом диода Ганна, элементами крепления и подводки питания, перестраивается путем изменения глубины погружения диода в ДВ и изменения напряжения питания. Вариация резонансных частот высокодобротных парциальных колебаний дискового КДР осуществляется перемещением металлического диска относительно плоскости его основания на расстояние l . На рис. 3 показана зависимость от l одной из парциальных частот f_r дискового КДР (штрих-пунктирная кривая) для EH -типа колебаний с азимутальным индексом $n=37$. Сплошными кривыми показаны изменения частоты генерации диода f_g при двух значениях напряжения питания: $U=3,2$ и $3,6$ В. При $\delta > 0$ генерация осуществляется на низкодобротном контуре. При $\delta \approx 0$ и приближении частоты этого контура к одной из парциальных частот дискового КДР происходит затягивание частоты генерации резонатором и осуществляется ее перестройка во всем диапазоне изменений резонансных частот дискового КДР. При уменьшении связи резонатора с диодом наблюдаются перескоки частоты генерации, определяющие гистерезисный характер кривой.

При захватывании частоты генерации дисковыми КДР увеличивается мощность выходного сигнала (она составляет $10 \div 15$ мВт), увеличивается стабильность колебаний (уменьшается крутизна электронной перестройки). Важными достоинствами такого генератора являются простота его изготовления и возможность использования при этом методов гибридно-интегральной технологии. Однако такая конструкция в слабой мере обеспечивает решение проблемы потерь энергии на излучение в области включения диода и ограничивает возможности суммирования мощностей нескольких диодов.

Более эффективны технические решения генераторов на ДВ с призмными КДР. Рассмотрим конструкцию и результаты исследования генератора с трехгранным призмным КДР [11]. Такой генератор содержит отрезок зеркального ДВ 1 (рис. 4, вставка) с периодической системой металлических полосок, КДР 2 в виде прямой трехгранной призмы с длиной граней не менее десяти длин волн, возбуждаемых в нем. Боковые грани металлизированы, причем на одной из них установлена металлическая пластина, которая может перемещаться парал-

лельно этой грани. Один или несколько диодов 3 располагаются в ДВ на металлическом основании под металлическими полосками.

Эксперимент проводился в 8-мм диапазоне длин волн с ДВ и КДР из фторопласта-4. Параметры выбирались на основе выражений (5) и (7). Экспериментальная проверка и уточнение необходимых углов излучения волн ДВ в диэлектрическое полупространство проводилась при его возбуждении через согласованный переход внешним генератором в режиме периодического изменения частоты. Таким же способом исследовались особенности возбуждения КДР, измерялась сетка резонансных частот парциальных колебаний и их перестройка.

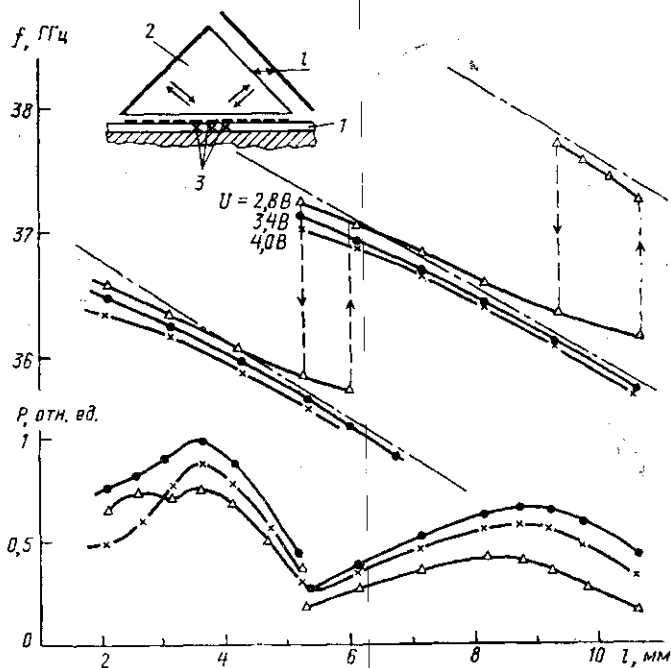


Рис. 4. Зависимости частоты f и мощности P генерации диода от расстояния l для трех значений напряжения питания U

На рис. 4 штрих-пунктирными линиями показаны зависимости трех парциальных частот системы КДР—ДВ от изменения l . Здесь же сплошными линиями приведены зависимости частоты f и мощности P генерации от расстояния l при различных напряжениях питания U диода ($U=2,8; 3,4$ и $4,0$ В). Зависимости мощности P от l показаны при движении металлической пластины в одну сторону — к грани. Видно, что внутри каждой зоны генерация контролируется определенным типом колебаний системы КДР—ДВ, что подтверждает и исследование полей в работающем генераторе. Перестройка частоты генерации внутри зон составляет 2—4% и ограничена сверху и снизу перепадами частоты в соседние зоны генерации, которые чаще всего имеют гистерезис частотной характеристики. Некоторое различие амплитудно-частотных характеристик в разных зонах генерации объясняется отличиями в добротности КДР. При этом нужно учитывать, что ограниченность поперечного размера металлической пластины, осуществ-

вляющей механическую перестройку частоты, приводит к росту дифракционных потерь при увеличении l .

При включении трех диодов синхронная генерация осуществлялась лишь при некоторых отдельных значениях l . Выходная мощность составляла $\sim 30\text{--}40$ мВт, стабильность $\sim 10^{-4}$.

3. Генераторы с диодами в зеркальном КДР

Ограниченная предельная мощность одиночных активных элементов миллиметрового диапазона (диодов Ганна, ЛПД) делает актуальной задачу эффективного суммирования их мощностей как для получения необходимых уровней мощности сигналов в интегральных устройствах на ДВ и ДР, так и для создания твердотельных генераторов средних уровней мощности в миллиметровом диапазоне. Эта задача может решаться с помощью зеркального КДР.

Зеркальный КДР содержит диэлектрический полудиск 1 (рис. 5, а, вставка) с металлическим плоским зеркалом 2. Его собственными колебаниями являются азимутальные колебания высшего порядка, образованные наложением падающих и отраженных от металлического зеркала волн типа волн «шепчущей галереи». Их поле локализовано в области цилиндрической границы диэлектрика и внешней среды, и на зеркалах участки, облучаемые волной, имеют размеры порядка длины волны в диэлектрике. В таком резонаторе отсутствует эффект вырождения азимутальных колебаний, присущий дисковым КДР, и, следовательно, отсутствует расщепление этих колебаний при введении в поле резонатора неоднородности, что существенно в случае локализованных активных элементов.

В генераторе с зеркальным КДР (рис. 5, а, вставка) диоды 3, 4 размещаются в прямоугольных каналах в зеркале, закороченных с одной стороны. При генерации колебаний в областях расположения каждого диода образуются одинаково распределенные поля, связанные друг с другом через колебания резонатора. При этом отсутствуют другие (паразитные) связи между диодами и осуществляется тепловая развязка между ними. Энергия выводится либо с помощью ДВ, связанного с полудиском, либо полым металлическим волноводом через щель связи в области расположения диода в зеркале.

Экспериментальные исследования проведены в диапазоне частот 37,0—43,0 ГГц. Диэлектрический полудиск выполнен из фторопласта-4. Серийные диоды Ганна размещаются в отверстиях таким образом, что в КДР возбуждаются колебания вида EH_{n11} . В исследуемом диапазоне частот азимутальный индекс $n=36, 37, \dots, 42$. Соответствующие резонансные частоты показаны на рис. 5, а штриховыми линиями.

Генерация автоколебаний получена отдельно на каждой резонансной частоте f_r резонатора в указанном диапазоне [12]. Зоны генерации лежат вблизи этих частот и ограничены с двух сторон перескоками частоты в соседние зоны при изменении импеданса Z парциального низкодобротного контура, образованного отверстием, элементами корпуса и структурой диода. На рис. 5, а эти зоны показаны сплошными линиями как зависимости частоты генерации f_g от импеданса Z , изменяющегося при вариациях напряжения питания диода и высоты его положения в канале. Вне обозначенных зон условия генерации (определяемые свойствами КДР) не выполняются. Таким образом, с помощью еоглашающих свойств низкодобротного парциального контура обеспечивается достаточно сильная связь диода с КДР.

На рис. 5, б приведены характеристики электронной перестройки одной из парциальных частот с центральным значением $f_g \approx 40,8$ ГГц и мощности генерации P . Для сравнения показаны энергетические и частотные характеристики волноводного генератора на основе парциаль-

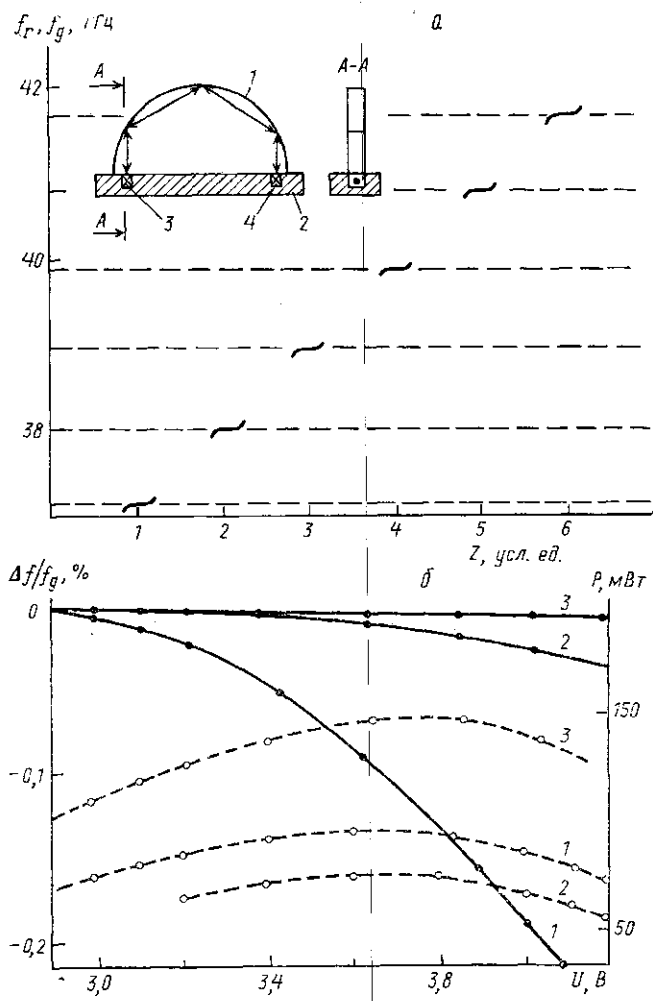


Рис. 5. Резонансные частоты f зеркального КДР и области генерации f_g диода при изменении импеданса Z парциального низкодобротного контура (а) и характеристики перестройки частоты генерации $\Delta f/f_g$ (светлые кружки) и мощности P (черные) при изменении напряжения питания U (б)

ного контура без КДР (кривые 1), одного диода (кривые 2) и двух диодов (кривые 3) в генераторе с КДР. При генерации колебаний одним диодом в зеркальном КДР стабильность частоты выше, чем в волноводной конструкции, что видно по крутизне электронной перестройки частоты. При этом особенности КДР как открытой системы не приводят к значительным потерям энергии на излучение в свободное пространство и мощность генерации диода больше, чем в известных генераторах на ДВ и ДР. В случае двух диодов наблюдается взаим-

ная синхронизация их колебаний и суммирование мощностей. Электронная перестройка частоты составляет величину порядка 1 МГц/В, стабильность частоты увеличивается более чем на порядок по сравнению с волноводным генератором.

Генератор с механической перестройкой частоты может быть создан на основе зеркального КДР в виде двух диэлектрических полудисков 1 и 2 с общим металлическим зеркалом 3 (рис. 6, вставка). При

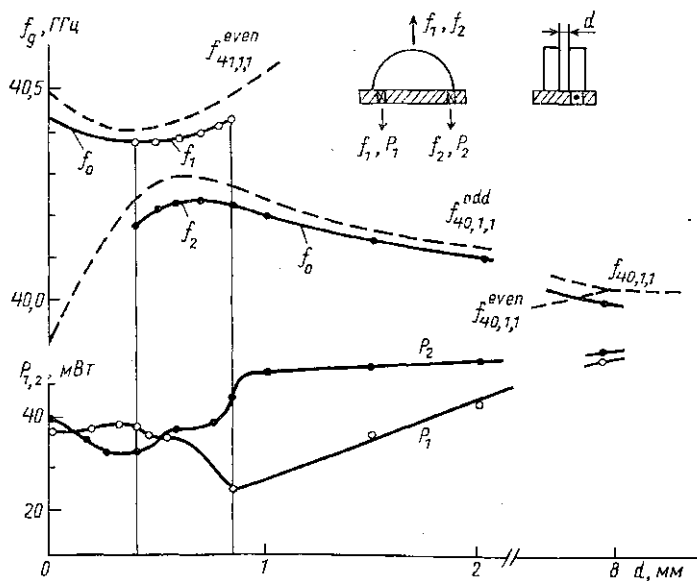


Рис. 6. Зависимости частоты f и мощности P двухдиодного генератора от расстояния между полудисками d

больших расстояниях d между полудисками частота генерации определяется основным колебанием, например EH_{n11} , одного полудиска. С приближением второго полудиска каждое n -е колебание «расщепляется» на два (четное и нечетное) колебания системы двух полудисков, резонансные частоты которых перестраиваются при изменении d . При определенном размещении диодов обеспечивается генерация на частоте четного или нечетного типа колебаний с перестройкой частоты в пределах нескольких процентов. Однако монотонный характер зависимостей частоты и мощности от расстояния d может нарушаться. Особенности проявляются в областях взаимодействия четных и нечетных колебаний с различным индексом. Здесь под действием второго колебания происходит снижение мощности генерации, появляются экстремумы и разрывы частотной характеристики.

В областях взаимодействия колебаний обнаружен интересный и важный для практических приложений режим одновременной генерации двух близких по частоте ($\Delta f/f_{1,2} \approx 0,1 \div 0,3\%$) колебаний одного уровня мощности [13]. Динамику его возникновения можно проследить по зависимостям перестройки частоты f и мощности P двухдиодного генератора от изменения расстояния d (см. рис. 6). При $d \geq 1,0$ мм наблюдается взаимная синхронизация колебаний и одночастотная генерация на частоте $f_0 = f_1 = f_2$, определяемой одной из азимутальных мод системы двух полудисков. При $d \approx 0,7$ мм в спектре сигнала появляется вторая частота и при $0,4 \text{ мм} < d < 0,7 \text{ мм}$ наблюдается двухчастотная

генерация: одним диодом генерируется колебание с частотой f_1 и мощностью P_1 , другим диодом — f_2 и P_2 . При этом f_1 и f_2 близки, а уровни мощностей P_1 и P_2 резко сближаются при переходе к двухчастотному режиму. Область двухчастотной генерации отделена от режимов взаимной синхронизации узкими участками неустойчивой генерации, где наблюдаются биения и гистерезис.

Полученные результаты объясняются связью между четными и нечетными модами, а также перестройкой структуры полей колебаний вблизи точки совпадения частот четных и нечетных мод [13]. Экспериментально установлено, что при совпадении частот четного и нечетного типов колебаний со смежными азимутальными индексами их взаимная связь проявляется в частотном и пространственном расщеплении полей. Диоды оказываются в пространственно разнесенных участках полей разных частот — f_1 и f_2 , что и определяет двухчастотную генерацию. Этот режим может расширить функциональные возможности генераторов с КДР.

Заключение

В работе рассмотрены физико-технические основы новых типов твердотельных генераторов миллиметрового диапазона с КДР. Их разработка направлена на освоение миллиметровых и субмиллиметровых диапазонов, повышение спектральных и энергетических характеристик генераторов на ДВ и ДР, расширение их функциональных возможностей путем целенаправленного поиска колебательных систем, оптимальных для указанных диапазонов и эффективно сопрягаемых с полупроводниковыми элементами. Предложены генераторы с аксиально-симметричными брегговскими отражателями, с туннельно-дифракционной распределенной обратной связью, с зеркальным КДР.

Рассмотренные варианты технических решений позволяют наметить основные тенденции развития твердотельных генераторов с КДР. Полученные энергетические и спектральные характеристики экспериментальных макетов генераторов показывают не только их работоспособность, но и конкурентоспособность с волноводными генераторами, использующими ДР. Особый интерес имеют генераторно-излучающие модули, двухчастотные генераторы, многофункциональные устройства. Суммирование мощностей диодов в зеркальном КДР перспективно для создания твердотельных генераторов повышенной мощности в коротковолновой части миллиметрового диапазона.

Конструкции рассмотренных генераторов позволяют использовать методы гибридно-интегральной технологии. Дальнейшее их развитие целесообразно проводить по пути разработки новых технических решений, оптимизации конструкций и параметров, освоения современных методов и материалов и т. п. с учетом конкретных применений.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шестоपालов В. П. Физические основы миллиметровой и субмиллиметровой техники. Киев, 1985. [2] Кошечая С. В., Кононов М. В., Котомчак А. Ю., Соловьев Д. Л., Трапезов В. А. // Изв. вузов, Радиоэлектроника. 1990. 33, № 10. С. 3. [3] Борисенко А. А., Мендрул Н. Г., Правда В. И. // Изв. вузов, Радиоэлектроника. 1988. 31, № 10. С. 11. [4] Itoh T. // Microwave J. 1982. 23, N 9. P. 113. [5] Барташевский Е. А., Борулько В. Ф., Иванов В. Е., Тимофеев С. В. А. с. 128553 СССР, МКИ НОЗВ 7/14. Оpubл. в БИ 1987, № 3. [6] Кириченко А. Я., Логвиненко А. И., Солодовник В. А., Харьковский С. Н. А. с. 1406706 СССР, МКИ НОЗВ 7/14. Оpubл. в БИ 1988, № 24. [7] Солодовник В. А., Харьковский С. Н. // Тез. докл. 1 Всесоюз.

науч.-техн. конф. «Устройства и методы прикладной электродинамики». М., 1988. С. 143. [8] Иогансен Л. В. // Письма в ЖТФ. 1986. 12, № 5. С. 308. [9] Кириченко А. Я., Цвык А. И. // Изв. вузов, Радиофизика. 1986. 29, № 1. С. 128. [10] Кириченко А. Я., Солодовник В. А., Харьковский С. Н. // Изв. вузов, Радиоэлектроника. 1987. 30, № 7. С. 74. [11] Кириченко А. Я., Солодовник В. А., Харьковский С. Н. // ЖТФ. 1988. 58, № 11. С. 2264. [12] Кириченко А. Я., Харьковский С. Н. // Изв. вузов, Радиоэлектроника. 1990. 33, № 10. С. 81. [13] Харьковский С. Н. // Письма в ЖТФ. 1990. 16, № 11. С. 90.

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1992. Т. 33, № 3

УДК 621.381

ПРИМЕНЕНИЕ УСТРОЙСТВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА В НАРОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Р. А. Амирян *)

Рассмотрено использование устройств миллиметрового диапазона на транспорте, в связи и в устройствах для радиометрического зондирования поверхности суши и океана. Обобщены основные технические характеристики разработанных устройств.

1. Введение

В настоящее время возможные области применения техники миллиметрового диапазона (30—300 ГГц) в народном хозяйстве очень обширны, полностью охватить их практически невозможно, поэтому в этом кратком обзоре затронуты лишь наиболее типичные применения устройств, которые, возможно, будут выпускаться серийно.

Одно из ранних применений техники миллиметрового диапазона было в радиоастрономии, но оно не рассматривается в данном обзоре. Также не будет рассматриваться использование устройств КВЧ-диапазона в медицине и биологии.

Мощный стимул к промышленному и гражданскому применению техники миллиметрового диапазона появился после того, как достижения полупроводниковой технологии привели к созданию лавинно-пролетных диодов, диодов Ганна, диодов с барьером Шоттки, варакторных и *pin*-диодов, способных работать во всем диапазоне КВЧ. При этом твердотельные генераторы с низковольтным питанием и малыми габаритами позволили резко улучшить потребление энергии и эксплуатационные свойства устройств в целом, именно их появление дало толчок к интенсивному использованию миллиметровых волн. Удешевлению устройств способствует освоение гибридно-интегральной и монокристаллической технологий, разработка высокочастотных транзисторов.

Общие достоинства миллиметрового диапазона:

- большее по сравнению с длинноволновым диапазоном СВЧ угловое разрешение при тех же апертурах антенн;
- существование в спектре характерных зон, связанных с особенностями затухания в атмосфере;
- максимальное собственное радиотепловое излучение ненагретых тел в этом диапазоне;
- наличие наибольших радиотепловых контрастов у металлических объектов;

*)НПО «Исток», г. Фрязино Московской области.