



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

DOI: <https://doi.org/10.15407/rej2018.04.067>

УДК 537.86+621.373.14

PACS: 84.30.Ng

О. И. Белоус, А. А. Кириленко, М. П. Натаров, С. П. Сиренко, А. И. Фисун, А. И. Шубный
Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
 12, ул. Акад. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
 E-mail: afis@ire.kharkov.ua

КВАЗИОПТИЧЕСКИЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Предмет и цель работы. Предметом исследования являются открытые резонансные системы, используемые в качестве колебательных контуров квазиоптических твердотельных генераторов, и собственно характеристики квазиоптических генераторов. Цель работы – обзор научных результатов по разработке и исследованию квазиоптических твердотельных генераторов в отделе твердотельной электроники от зарождения идеи до разработки реальных источников излучения с повышенными спектральными характеристиками.

Методы и методология работы. Проанализированы экспериментальные и теоретические методы исследования основных параметров: спектра, топологии полей открытых резонаторов с резонансными и нерезонансными неоднородностями. С этой целью использованы волноводная модель резонатора, метод декомпозиции и обобщенной матрицы рассеяния, а также экспериментальные методики измерения спектра, мощности, частоты.

Результат работы. Исследованы и разработаны квазиоптические твердотельные генераторы с уровнем частотного шума не хуже $-115...120$ дБ/Гц, мощностью генерации на первой гармонике – до $130...150$ мВт на частоте $40...50$ ГГц, на второй гармонике – до 10 мВт на частоте $60...90$ ГГц. Мощность генерации на частоте 150 ГГц – не менее 3 мВт. Долговременная нестабильность частоты составляет $3 \cdot 10^{-8}$ при активном термостатировании $\Delta T \sim 0,1$ °C.

Заключение. В работе проанализированы области применения твердотельных квазиоптических источников: гетеродины в приемных устройствах, рефрактометрия, диэлектрометрия и другие направления, где необходимы высокая стабильность и низкий уровень частотных шумов. Определены перспективные направления поиска новых физических явлений для создания нелинейных элементов в терагерцевом диапазоне частот. Ил. 41. Библиогр.: 68 назв.

Ключевые слова: квазиоптика, открытый резонатор, дифракционная решетка, декомпозиция, обобщенная матрица рассеяния, импеданс, нелинейный элемент, диод Ганна, лавинно-пролетный диод, квазиоптический твердотельный генератор, частотный шум, стабильность частоты, вторая гармоника.

Последние десятилетия ушедшего века и нынешнее время характеризуются повышенным интересом к электромагнитным (ЭМ) колебаниям миллиметрового (гигагерцевого) и субмиллиметрового (терагерцевого) диапазонов длин волн. Освоение этих диапазонов открывает перспективу расширения потенциала телекоммуникационных сетей, повышения точности в радиолокации и навигации, новые возможности в радиовидении. Другое применение источников гигагерцевого и терагерцевого диапазонов – использование их в качестве инструмента определения физических свойств твердого тела, полупроводников и плазмы, а также исследования биофизических свойств органических соединений и растворов, включая живые объекты. Развитие диэлектрометрии, рефрактометрии, интерферометрии потребовало создания источников ЭМ-излучения с адекватными перечисленным задачам спектральными и

энергетическими характеристиками. Эта ситуация стимулировала развитие нового научного направления – квазиоптики, области микроволновой электродинамики, охватывающей явления распространения, отражения, преломления и резонанса ЭМ-волн с учетом законов линейной оптики, а также дифракции и рефракции волн. В пятидесятые-шестидесятые годы прошлого столетия были сформулированы основные положения квазиоптики [1, 2] и предложены резонансные и волноведущие компоненты (резонаторы, полые лучеводы и линзовые системы [3, 4], элементы управления потоками энергии, направленные ответвители, делители луча [1]), а также методы анализа электродинамических свойств этих устройств [5, 6].

В предлагаемой статье авторы уделили внимание историческому развитию разделов квазиоптики, относящихся к анализу резонансных явлений и проблеме возбуждения

колебаний твердотельными нелинейными элементами – в основном, диодами Ганна и лавинно-пролетными диодами (ЛПД) – в открытых квазиоптических резонансных системах.

Чтобы проследить за закономерностями освоения гигагерцевого и терагерцевого диапазонов и исследованием квазиоптических твердотельных генераторов, обратимся к началу развития лазерной техники. Практически одновременно А. М. Прохоров, А. L. Schawlow и S. H. Townes [7] предложили использовать оптические интерферометры в лазерах в качестве колебательного контура. Развитие лазерной техники инициировало ряд исследований по определению структуры полей, дифракционных потерь, собственной добротности лазерных интерферометров [5, 8, 9]. Отметим, что резонансные системы (интерферометры) лазеров оптического, инфракрасного и даже субмиллиметрового (субмм) диапазонов характеризуются размерами $a, L \gg \lambda$, где a – апертура зеркал, L – расстояние между зеркалами и λ – длина волны генерации.

Продвижение в более коротковолновые диапазоны со стороны длинноволновых осуществлялось электровакуумными (в основном, лампами обратной волны (ЛОВ), ЛПД и клинотронами [10]), а также твердотельными (диодами Ганна или ЛПД) приборами волноводной конструкции. По мере приближения коротковолновой части миллиметрового (мм) диапазона к приборам с преобразованием энергии электронного пучка в энергию поверхностных волн предъявляются более жесткие требования, которые успешно преодолены в клинотронах [10]. Преобразование энергии электронов в объемные волны [11], т. е. дифракционное излучение, было положено в основу генерации ЭМ-волн в генераторах дифракционного излучения (ГДИ) [12] оротрона [13] и ледатрона [14]. В качестве колебательной системы в этих приборах использовались открытые резонаторы (ОР). Отметим, что ОР в приборах вакуумной электроники мм диапазона существенно отличаются от интерферометров Фабри–Перо для квантовых генераторов. Геометрические размеры ОР удовлетворяют условию

$a, L \approx 10...50\lambda$ *. В мм диапазоне утвердился термин «открытый резонатор» – в отличие от квантовой электроники, где используется название «интерферометр Фабри–Перо». Здесь уместно привести определение этого термина, данное Л. А. Вайнштейном [6]: «Будем называть открытыми такие системы, которые имеют достаточно добротные собственные колебания, причем колебания в этих системах сопровождаются излучением... Добротные колебания в открытых системах могут реализовываться благодаря одному из трех физических явлений: 1) отражению от краев резонатора; 2) образованию каустических поверхностей; 3) полному внутреннему отражению».

Поскольку активная лазерная среда в газовых и твердотельных лазерах является оптически однородной и заполняет практически всю резонансную систему, это упрощает геометрию зеркал интерферометра и облегчает создание моделей, что, в конечном счете, позволяет применять простые методы расчета характеристик интерферометра, например, метод итераций [5]. Моделирование электродинамических процессов в ОР с неоднородностями потребовало создания более сложных методов их анализа [6, 12].

Проследим теперь за развитием твердотельных источников мм диапазона – диодов Ганна и ЛПД, а также туннельных диодов [16]. До частот ≈ 90 ГГц волноводная конструкция и диоды Ганна в корпусном исполнении обеспечивают вполне приемлемые эксплуатационные характеристики. Лавинно-пролетные диоды имеют более высокий частотный предел [17], однако уровень частотных шумов ЛПД значительно превышает частотные шумы диодов Ганна. По этой причине для создания высокостабильных источников излучения в мм и субмм диапазонах с предельно низким уровнем частотных шумов необходимо использовать высокодобротные колебательные системы. Однако прямое применение принципов квазиоптики в данном случае затруднительно – необходимо решить проблему согласования низкоимпедансного нелинейного сосредоточенного элемента с распределенной системой, обладающей высоким волновым сопротивлением.

* В некоторых разработках ГДИ расстояние между зеркалами уменьшено до $L \approx 2...5\lambda$ [15].

Данный обзор не претендует на полноту (в нем практически отсутствуют публикации тезисов всесоюзных и международных конференций, а также публикации в малопопулярных ведомственных изданиях). Авторы выделили основные направления исследований и разработок квазиоптических твердотельных генераторов (КТГ), выполненных в отделе твердотельной электроники ИРЭ им. А. Я. Усикова НАН Украины за период с 1971 года и до настоящего времени, и коснулись их применения в научных исследованиях и разработке новых измерительных приборов и устройств.

1. Открытые резонансные системы с неоднородностями. Проблема согласования импедансов. Первые исследовательские работы подтвердили перспективность применения принципов квазиоптики в твердотельной электронике КВЧ-диапазона. Обозначились и проблемы, требующие решения в процессе создания КТГ в КВЧ-диапазоне. Более высокая добротность ОР по сравнению с объемными резонаторами открывала перспективу значительного улучшения спектра генерируемого излучения. Однако даже разреженный спектр в сравнении со спектром объемного резонатора оказался недостаточным для устойчивой работы генератора – требовались дополнительные меры по увеличению селективности ОР. Разрежение спектра ОР по поперечным индексам колебаний $(m, n)^*$ осуществляется подбором апертуры зеркал или изменением их формы, что эквивалентно изменению коэффициента отражения от края зеркала [6, 8]. Разрежение спектра по продольным (аксиальным) индексам q осуществляется за счет использования частотно-селективных зеркал (например, дифракционные решетки) [18] или внесения резонансных неоднородностей, что будет рассмотрено дальше.

Следующая, не менее важная проблема заключается в эффективном использовании энергии твердотельного нелинейного элемента. Представим ОР на частоте собственного резонанса как линейный пассивный четырехполюсник, имеющий вход и выход в виде однородных передающих линий, в цепи которого содержится нагрузка Z_H [19].

*Здесь и далее используется общепринятая индексация модового состава ОР – TEM_{mnq} [2, 5].

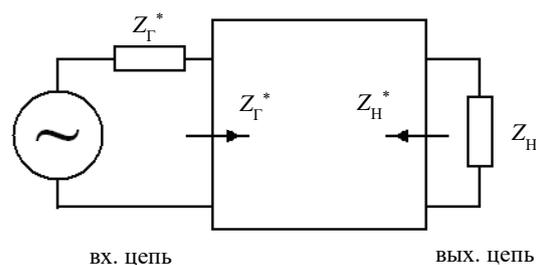


Рис. 1. Представление КТГ в качестве четырехполюсника

Элементы КТГ согласованы на максимум активной мощности, отдаваемой в нагрузку, если выполняются условия:

$$Z_{Г}^* = Z_{ВХ} \text{ и } Z_{ВЫХ} = Z_{Н}^*$$

Символом * отмечены комплексно-сопряженные величины.

Следует отметить, что такое представление КТГ является далеко не полным. Не учитываются омические и дифракционные потери, а также то, что часть энергии не поступает в нагрузку и расходуется на стабилизацию частоты и мощности, накапливаясь в ОР. Тем не менее, обращение к теории многополюсников является полезным, поскольку оно заставляет обратить внимание на проблему согласования сосредоточенного низкоомного нелинейного элемента с высокоомной распределенной структурой – открытой колебательной системой. Кроме селекции и согласования импедансов, необходимо решить также чисто технические проблемы крепления нелинейного элемента, подвода питания и теплоотвода, а также стабильности геометрических размеров ОР.

Таким образом, квазиоптическую резонансную систему следует характеризовать как ОР с неоднородностями. К ним следует отнести прозрачные и отражающие дифракционные решетки, канавки и ступени на зеркале, согласующие прямоугольные ячейки, элементы согласования, выполненные по планарной технологии, фильтры в цепях смещения, а также собственно нелинейные элементы – СВЧ-диоды или СВЧ-транзисторы.

2. Первые опыты. В 1977–1978 гг. в отделе твердотельной электроники были начаты исследования КТГ [20–23]. Инициаторы этих работ А. И. Бородин, Б. М. Булгаков и В. В. Смородин указывали на сложности выбора ОР в качестве колебательной системы КТГ [21]. В этих публикациях описаны устройства,

в которых полупроводниковый диод находится между двух брусьев дифракционной решетки, прозрачной для H -поляризованной волны и формирующей один дифракционный максимум в направлении оси ОР. Авторы предложили по аналогии с ГДИ [12] назвать предложенный генератор полупроводниковым генератором дифракционного излучения (ПГДИ) [20]. С таким определением согласиться трудно, поскольку в основу работы ГДИ положен эффект Парселла–Смита [12], а в твердотельных СВЧ-диодах колебательные процессы возбуждаются за счет междолинных переносов электронов, лавинных процессов или эффекта Шоттки.

Открытый резонатор генератора (рис. 2, а) образован плоским 2 и сферическим 5 зеркалами, а также дифракционной решеткой 3, расположенной между зеркалами. Высота брусьев h и период решетки l выбирались из условия прозрачности для H -поляризованной волны в интервале рабочих частот ($h \sim \lambda/2, l \sim \lambda/2$), λ – длина волны генерации. Между двух изолированных брусьев размещен полупроводниковый диод 4 – таким образом обеспечивалось питание диода и теплоотвод. Для вывода энергии служил стационарный волновод 1 сечением $7,2 \times 3,6$ мм, плавно переходящий в узкую щель на зеркале. На рис. 2, б приведены результаты измерения добротности ОР в зависимости от его длины L . Поскольку авторы работы не указали радиус кривизны сферического зеркала 5, не представляется возможным объяснить характер зависимости добротности Q от расстояния L между зеркалами.

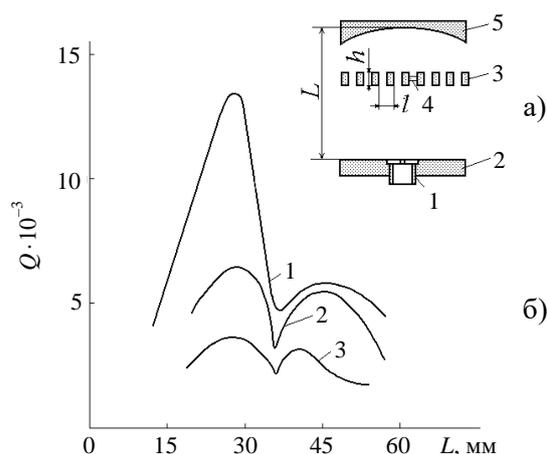


Рис. 2. Открытый резонатор генератора: а) схематическая конструкция; б) графики зависимости добротности ОР от расстояния между зеркалами (1 – резонатор без решетки, 2 – резонатор с решеткой, 3 – резонатор с решеткой и диодом)

На рис. 3 показаны зависимости генерируемой мощности и частоты от расстояния L . Генерация носит зонный характер. Исследования влияния положения дифракционной решетки относительно плоского зеркала показали, что зоны генерации чередуются через полуволну. Максимумы зон соответствуют положению диода вблизи пучности электрической компоненты поля, что соответствует положению ребер брусьев в узлах электрической компоненты стоячей волны в ОР.

В публикациях [22, 23] подтверждена возможность возбуждения электромагнитных колебаний мм диапазона в квазиоптических резонансных системах. Получены первые энергетические и спектральные характеристики и показано, что девиация частоты не превышает $3 \cdot 10^{-6}$ Гц/мин.

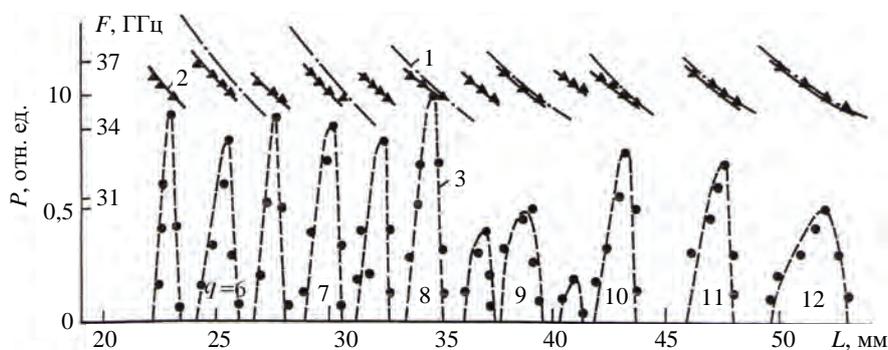


Рис. 3. Графики зависимости генерируемой мощности (1) и частоты (2) от расстояния между зеркалами. Расчетные зависимости частоты резонатора от расстояния между зеркалами (3)

В качестве твердотельных нелинейных элементов использовались диоды Ганна, изготовленные по технологии, описанной в [24]. Поскольку прозрачная дифракционная решетка вносит значительные потери в ОР (рис. 2), А. И. Бородин и В. В. Смородин предприняли попытку исследования КТГ с колебательной системой, в которой размещены два проводящих прямоугольных бруса [22] – часть прозрачной дифракционной решетки из работы [20].

Конструкция генератора схематически показана на рис. 4, а, где 1 – сферическое зеркало, 2 – система из двух изолированных брусьев, 3 – полупроводниковый диод, 4 – плоское зеркало, 5 – волновод. Бескорпусный диод 3 на цилиндрическом теплоотводе размещен на расстоянии b от одного из брусьев. Проводящие брусья размещались так, что диод находился в пучности электрической компоненты, а ребра – в узлах. На рис. 4, б показана добротность ОР без брусьев (кривая 1), добротность ОР с брусьями (кривая 2) без диода и с диодом (кривая 3). Для сравнения приведены добротность ОР с дифракционной решеткой (кривая 4) и добротность ОР с решеткой и диодом (кривая 5). Снижение добротности ОР при внесении брусьев вызвано рассеянием волн на неоднородности. Из рис. 4, б следует, что дифракционная решетка вносит меньшее возмущение в поле ОР, поскольку в результате коллективного эффекта на решетке формируется один дифракционный максимум, направленный вдоль оси ОР [25].

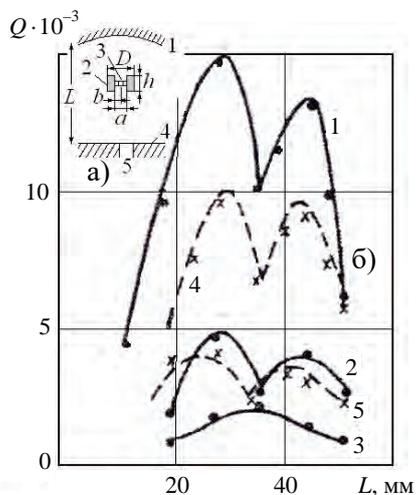


Рис. 4. Конструкция генератора (а) и зависимость добротности от расстояния между зеркалами (б)

В соответствии с этим, генерируемая мощность снижается (рис. 5, б). Здесь показаны мощность P и частота F в одной зоне генерации при среднем расстоянии между зеркалами $L \approx 47$ мм. Расстояние между брусьями также существенно влияет на выходную мощность P . При $a \ll \lambda$ незначительная часть поля взаимодействует с диодом, а при увеличении a , при котором размер апертуры D становится большим по сравнению с длиной волны, возникает излучение, не совпадающее с осью ОР, и дифракционные потери увеличиваются (рис. 6).

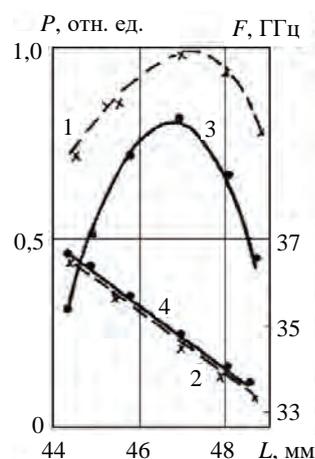


Рис. 5. Графики зависимости выходной мощности (кривые 1 и 3) и частоты (кривые 2 и 4) от длины резонатора. Кривые 1 и 2 – для генератора с решеткой; кривые 3 и 4 – для генератора без решетки

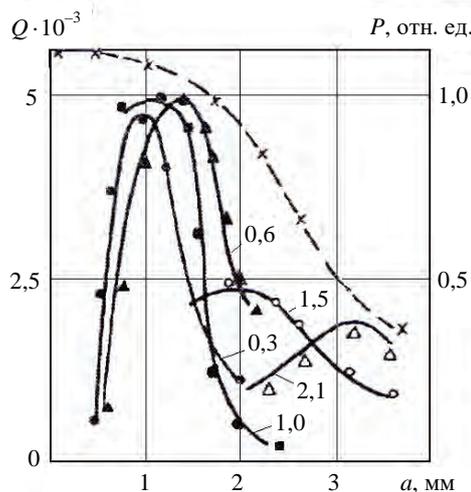


Рис. 6. Графики зависимости выходной мощности от расстояния a между брусьями

Следующей этапной работой А. И. Бородина, Б. М. Булгакова и В. В. Смородина бы-

ло исследование КТГ с ОР, в котором одно из зеркал – отражательная эшелеттная решетка [23]. Выбор ОР с эшелеттом авторы аргументируют тем, что дополнительная (по сравнению с обычным ОР с гладкими зеркалами) селекция типов колебаний достигается за счет угловой дисперсии эшелетта [18].

Схематическая конструкция генератора представлена на рис. 7, а. Открытый резонатор прибора образован сферическим зеркалом 1 и отражательной решеткой типа эшелетт 2, в ступенях которой крепится полупроводниковый диод 3. Эшелетт выполнен с периодом $d = 5,6$ мм, порядок спектра $h = -1$, угол блеска $\alpha = \pi/4$ [25]. СВЧ-энергия из генератора выводится в выходной волновод через щель связи 4. Перестройка генератора осуществляется изменением расстояния между зеркалами резонатора и поворотом решетки относительно его оси. На рис. 7, б показана зависимость добротности резонатора Q от угла поворота φ эшелетта относительно оси резонатора. Кривая 1 описывает собственную добротность резонатора, кривая 2 – нагруженную добротность резонатора с диодом при коэффициенте связи с нагрузкой $B \sim 1$.

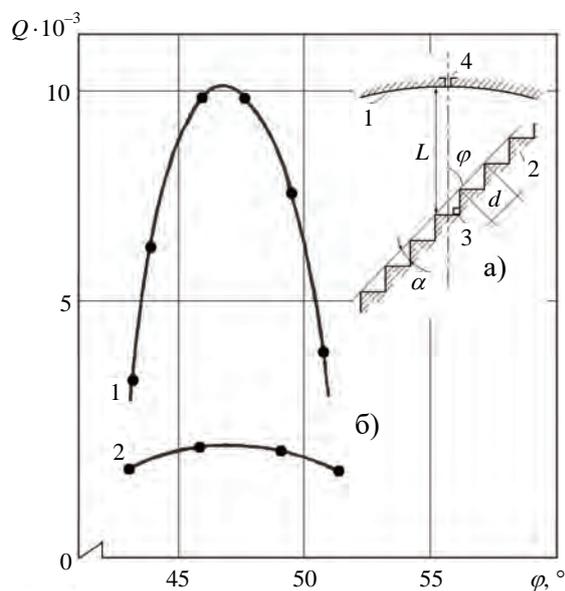


Рис. 7. Схема генератора (а) и графики зависимости добротности резонатора Q от угла поворота эшелетта относительно оси резонатора φ (б)

На рис. 8 приведены спектральные и энергетические характеристики КТГ в зависимости от длины резонатора (рис. 8, а) и угла поворота эшелетта (рис. 8, б). Перестройка КТГ по уровню нулевой мощности равна

примерно 5–6 ГГц, что в 1,5–2 раза больше по сравнению с КТГ, в котором применялся ОР с прозрачной решеткой; уровни выходной мощности примерно одинаковы [21, 23].

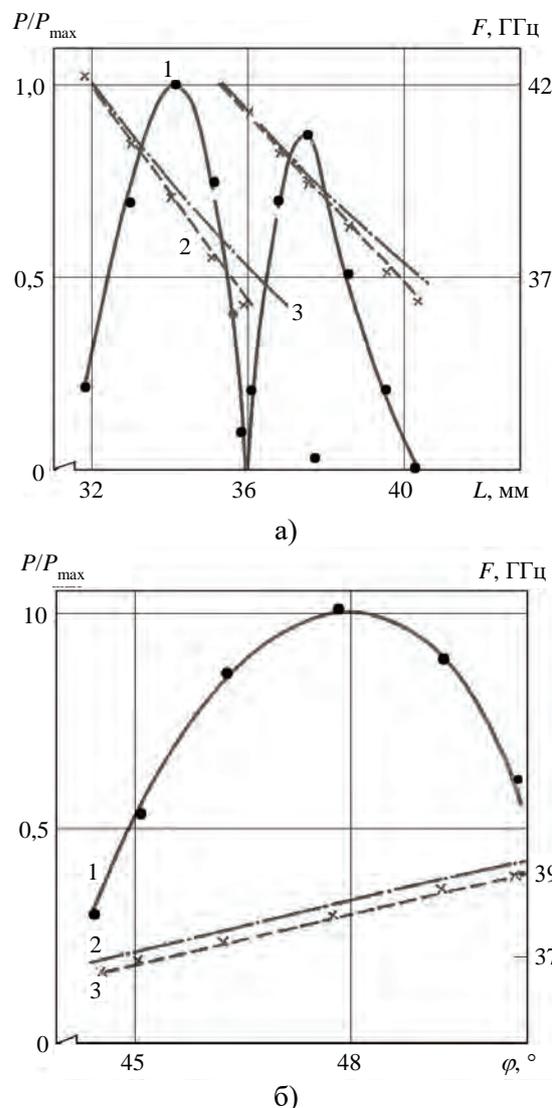


Рис. 8. Графики зависимости генерируемой мощности P (кривая 1) и частоты F (кривая 2): а) от расстояния L между зеркалами; б) от угла φ поворота эшелетта относительно оси резонатора. Кривая 3 соответствует расчетным значениям $F(L)$

В работах [21–23] использовались диоды Ганна 8-мм диапазона, изготовленные из эпитаксиального GaAs $n_k^+ - n - n_0^+ - n^+$ с эпитаксиально выращенным контактным слоем (1 мкм). Толщина буферного и рабочего слоев – 2...3 мкм. Концентрация электронов в подложке, контактном и буферном слоях составляла $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, в рабочем слое – $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ [24]. Как и ожидалось, примене-

ние ОР в качестве колебательного контура привело к улучшению спектральных характеристик – значительному уменьшению частотных шумов. Долговременная стабильность в первых работах не исследовалась. Не исследовалась и проблема перескока частоты в генераторах Ганна или ЛПД с квазиоптическим колебательным контуром; она была описана и изучена в [24]. Один из факторов, способствующий перескокам частоты, это малые частотные интервалы между соседними типами колебаний в объемных резонаторах. Несмотря на то, что ОР имеют более разреженный спектр, этот вопрос предстояло также исследовать.

Эти работы открыли перспективу для дальнейших исследований и продвижения в коротковолновую часть мм диапазона длин волн. Отметим, что в зарубежных научных изданиях и в журналах, издаваемых в СССР в это же время, появились публикации об аналогичных исследованиях. Обзор работ, посвященных исследованиям КТГ, был опубликован Б. А. Коцержинским и В. П. Тараненко [26]. В качестве примера подобных зарубежных публикаций можно привести работы К. Mizuno [27] и S. Nagano [28].

3. Теоретические и экспериментальные исследования ОР с неоднородностями. Первые результаты исследования КТГ в отделе твердотельной электроники, а также результаты других исследователей [26, 27] указали на перспективность этого направления. Вместе с тем, стало ясно, что детальное изучение электродинамических характеристик ОР, в которых размещены различного рода неоднородности, необходимо для успешного решения задачи создания КТГ с приемлемыми эксплуатационными характеристиками. В процессе первых исследований возникли новые задачи:

- предложить новые конфигурации ОР, адекватные улучшению спектральных и энергетических характеристик;
- разработать концепцию продвижения в более коротковолновую область;
- разработать и применить новые теоретические и экспериментальные методы анализа резонансных систем КТГ.

Был проведен ряд экспериментальных и теоретических исследований, в которых рассмотрены неоднородности, размещенные в

объеме ОР или на поверхности зеркал. Цель работы [29] – найти и исследовать конфигурации проводящих неоднородностей, слабо возмущающих поле ОР и позволяющих разместить диод Ганна или ЛПД, а также решить проблему подачи смещения на нелинейный элемент и отвода тепла. На рис. 9 показана конфигурация исследуемого полусферического ОР с одной или несколькими проводящими пластинами (показаны пунктиром), образующими дифракционную решетку.

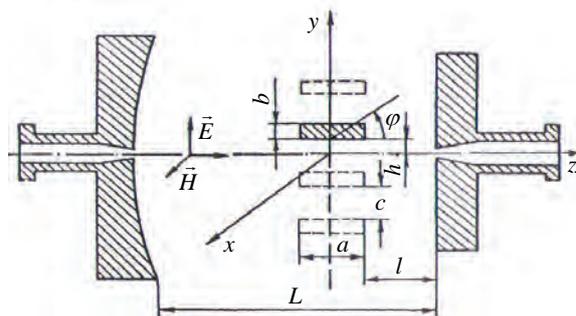


Рис. 9. Исследуемый ОР с неоднородностями в виде одного или нескольких брусьев

Установлено, что решетка при ширине брусьев $a = (n\lambda_{рез}/2 \pm \lambda_{рез}/16)$ мм относительно слабо возмущает ОР и уменьшает добротность Q не более, чем в 2 раза, основной TEM_{00q} -тип колебаний сохраняется.

Пластина или решетка минимально возмущает поле ОР при расположении вблизи плоского зеркала, поскольку фазовая поверхность TEM_{00q} -типа близка к плоской именно вблизи плоского зеркала и пластина или решетка максимально точно «вписывается» в стоячую волну. Таким образом, установлено, что в резонансном пространстве ОР можно располагать протяженные (выходящие за пределы каустики) проводящие неоднородности, необходимые для монтажа активных элементов, без существенного ухудшения резонансных свойств ОР (рис. 10).

Ряд исследовательских работ посвящены неоднородностями на зеркале [30–32]. В работе [30] рассмотрена задача возбуждения прямоугольной канавки на бесконечном проводящем экране нитью электрического тока, текущего в канавке, в поперечном направлении. Такая модель согласования генераторного или детекторного диода максимально

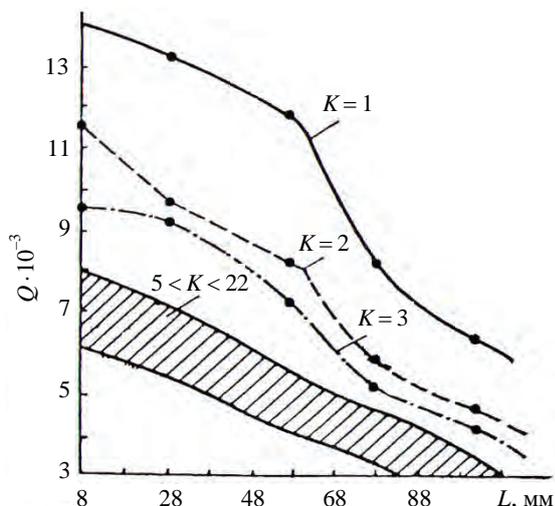


Рис. 10. Графики зависимости нагруженной добротности Q резонатора от количества вносимых брусков и расстояния L между зеркалами при фиксированном l

приближена к устройству, в котором диоды расположены на зеркале. Нить тока с плотностью

$$\vec{j} = \vec{e}_y \delta(r) e^{-i\omega t},$$

где \vec{e}_y – орт оси Oy , $r = \sqrt{x^2 + z^2}$, расположена вдоль оси y . Решение задачи представляет собою дисперсионное уравнение для квазисобственных волн канавки.

$$1 - i \frac{kb}{2\pi} \sqrt{1-h^2} \operatorname{tg} \left(\frac{ka}{2} \sqrt{1-h^2} \right) J(h) = 0.$$

На рис. 11, а показаны геометрические размеры прямоугольной канавки и распределение поля вдоль координатных осей. На рис. 11, б показаны функции нормированных постоянных распределения (сплошные линии) и затухания (пунктирные кривые). Возбуждение квазисобственных волн канавки приводит к сложной зависимости потерь ОР от длины канавки при оптимальных значениях ее ширины $b \leq \lambda_0/2$ и глубины $a/2 = n\lambda_0/2$. Локальная неоднородность в канавке приводит к возбуждению квазисобственной волны канавки.

На рис. 12, а показаны зависимости добротности Q (сплошные кривые) интенсивности U_k волны при наличии штыря диаметром $0,125\lambda_0$. Геометрия расположения штыря и диода показаны на рис. 12, б и в. Пунктиром показана интенсивность квазисоб-

венной волны в канавке. Штрихпунктирная линия – ток детектора.

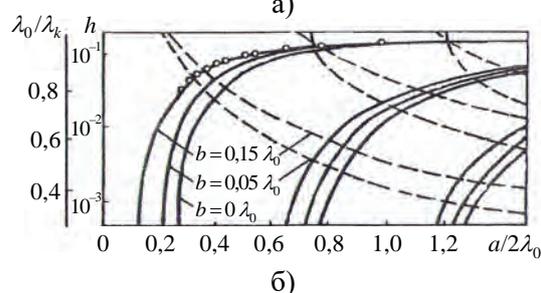
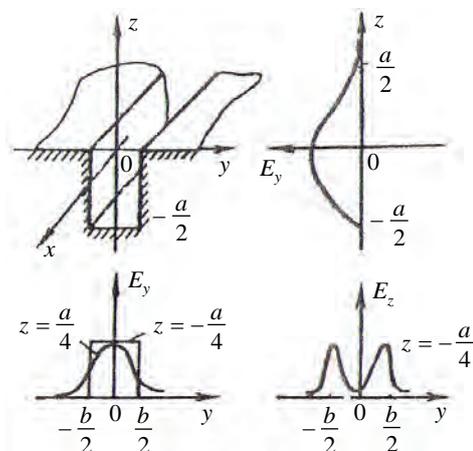


Рис. 11. Геометрия канавки (а), затухание и возбуждение волны в канавке (б)

В работе [32] продолжены исследования неоднородностей на ОР с целью определения их влияния на параметры ОР. На рис. 13 показан ОР, образованный двумя зеркалами, и типы исследуемых неоднородностей – прямоугольная канавка, ступенька на плоском зеркале и прямоугольный выступ.

Представляет интерес результат исследования коэффициента отражения от ОР TEM_{00q}^H -типа колебаний при движении прямоугольной металлической вставки. Канавка имеет размеры (см. рис. 13) $b = 0,15\lambda_0$ и $h = 0,5\lambda_0$. Распределение поля (рис. 14) измерялось методом возмущающего зонда [33]. Как следует из рис. 14, возбуждение квазисобственной волны в канавке приводит к сложной зависимости потерь в ОР от длины l ограниченной канавки на зеркале. Минимальная добротность наблюдается при $l = 0,5; 1,5; 2,5\lambda_k$, где λ_k – длина волны в канавке. В работах [30–33] показано, что внесение в ОР неоднородностей, имеющих ре-

зональные размеры, позволяет сохранить высокую добротность и наделяет ОР рядом новых качеств, в частности, позволяет раз-

местить локальные неоднородности (генерационные и детекторные диоды) в ОР для их взаимодействия с резонансным полем.

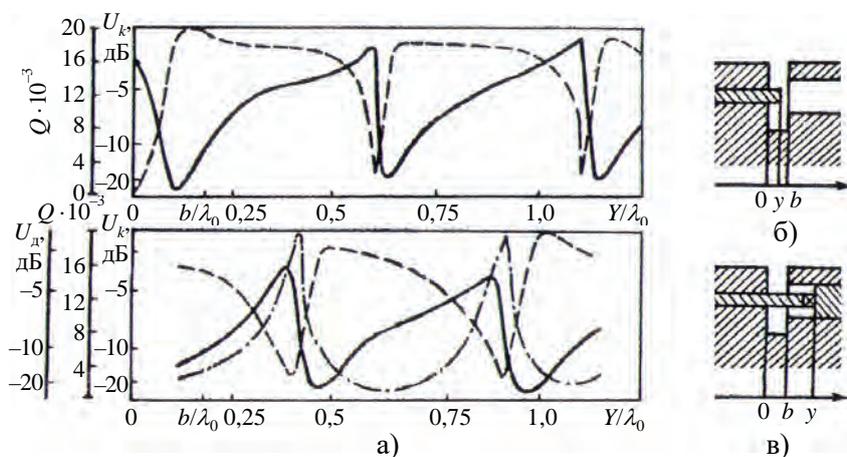


Рис. 12. Нормированные параметры ОР (а) и геометрия неоднородностей в виде штыря (б) и коаксиала с детектором (в)

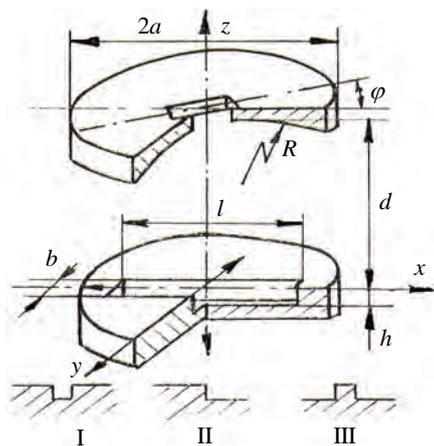


Рис. 13. Геометрия ОР с неоднородностями

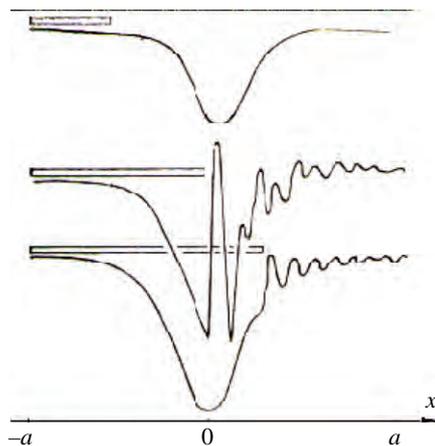


Рис. 14. Частичное заполнение прямоугольной канавки

В процессе исследования ОР с эшелеттом предложено так называемое уголково-эшелеттное зеркало, состоящее из двух эшелеттов, установленных под углом блеска относительно оси ОР [34]. Экспериментальное исследование спектра сферуголково-эшелеттного ОР (СУЭ ОР) и топологии полей дало результаты, которые не согласовывались с общепринятыми: спектр отличался от эквидистантного, характерного для ОР с гладкими зеркалами [5, 6], а топологию полей некоторых типов невозможно было классифицировать, пользуясь поперечными и продольными индексами [1, 35]. В этих обстоятельствах потребовался новый подход к анализу электродинамических свойств СУЭ ОР. В основу развития нового подхода к анализу

положены волноводная модель и метод конечной разности. Задача о поиске спектра собственных частот обобщена на случай решения неоднородной задачи возбуждения колебаний в СУЭ ОР внешним источником, поскольку такая модель максимально приближена к ряду важных для практики случаев. На рис. 15 показаны СУЭ ОР и его волноводная модель.

В модели СУЭ ОР сферическое зеркало аппроксимировано плоской стенкой волновода конечной длины, а эшелеттное зеркало моделируется набором ступеней высотой h_1 , соединенных отрезками регулярного волновода длиной h_2 . Возбуждается система волноводным тройником с высотой запитываю-

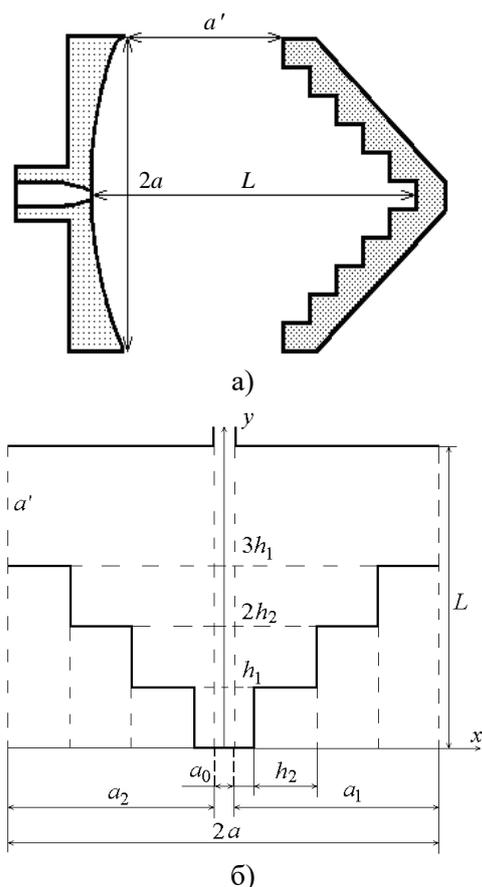


Рис. 15. Сферуголково-эшелеттный ОР (а) и его двумерная волноводная модель (б)

щего волновода a_0 . В процессе моделирования проводится декомпозиция сложного волноводного узла на элементарные (ступени в волноводе, тройник, открытые концы волновода) [36] и рассчитывается обобщенная матрица рассеяния [37]. Декомпозиция и

сборка модели из отдельных элементов и соответствующих им матриц рассеяния осуществляется в системе электродинамического моделирования [38]. Детально вычислительный алгоритм обобщенной S -матрицы описан в [39, 40]. Апробация разработанного метода проведена на двумерной модели открытого ленточного резонатора [41], электродинамические характеристики которого достаточно хорошо известны.

На рис. 16 приведен спектр вынужденных колебаний как набор сингулярных точек на АЧХ резонатора. Рассмотрены два случая возбуждения колебаний в СУЭ ОР: со стороны плоского и со стороны уголково-эшелеттного зеркал (верхняя и нижняя кривые соответственно). Оба графика весьма близки по характеру, за исключением области вблизи $k \approx 5,0$, где при возбуждении со стороны уголково-эшелеттного зеркала возникают так называемые, «эшелетт-эшелеттные» типы колебаний. Здесь k – безразмерная частота. В данной работе мы не будем останавливаться на анализе и классификации полного набора типов колебаний СУЭ ОР во всем интервале частот. Описание типов колебаний и трактовка механизмов формирования топологии приведены в [39, 40, 42]. Укажем только, что общепринятая классификация типов колебаний по вариациям в продольном и поперечных направлениях TEM_{mnq} здесь затруднительна, поскольку кроме автоколлимационного отражения в СУЭ ОР наблюдаются также другие механизмы возбуждения колебаний.

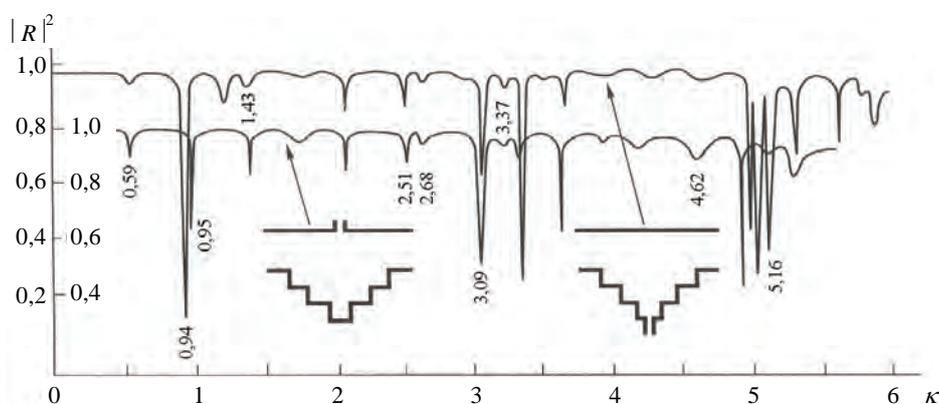


Рис. 16. Спектр вынужденных колебаний СУЭ ОР, возбуждаемого со стороны эшелеттного зеркала (верхняя кривая) и со стороны плоского зеркала (нижняя кривая)

Рис. 17, а является иллюстрацией автоколлимационного отражения, формирующего основной $H_{05}(TEM_{00\delta})$ -тип. Так называемый квазиосновной $H_{06}(TEM_{006})$ -тип формируется под влиянием отражений от нерегулярностей волновода (рис. 17, б).

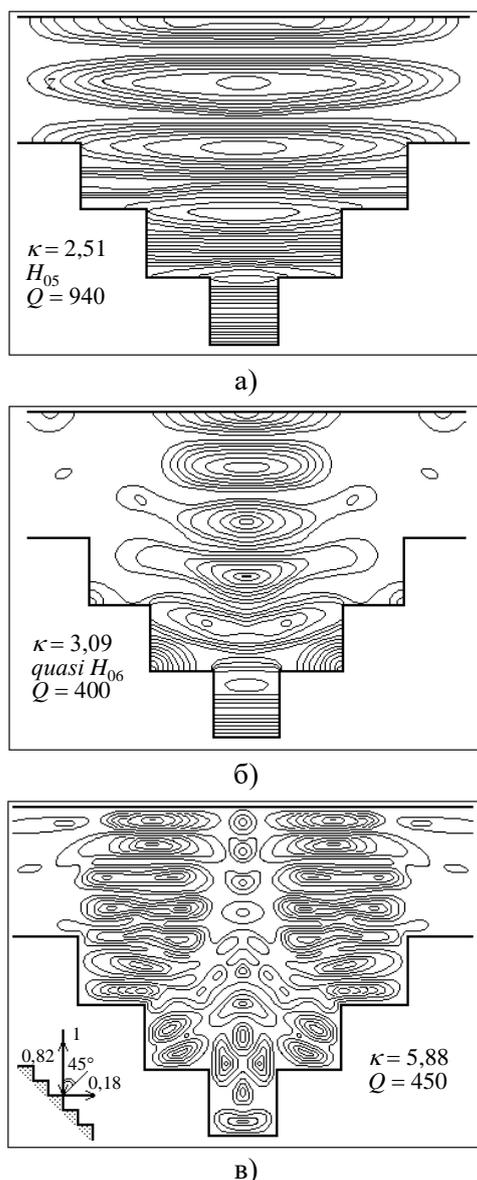


Рис. 17. Топология полей наиболее характерных типов колебаний СУЭ ОР: H -компонента основного типа (а); H -компонента квазиосновного типа (б); E -компонента связанного типа (в)

На рис. 17, в показан связанный тип колебаний, формируемый под влиянием отражения E -поляризованной волны (варианты на рис. 17, а и б наблюдаются при H -поляризации). В данном случае два парциальных колебания, формируемых сферическим (плос-

ким) зеркалом и каждым из эшелеттов в результате автоколлимационного отражения, синхронизируются между собой через частичное отражение волны в направлении, перпендикулярном оси СУЭ ОР [43]. Использование квазиосновного H_{06} -типа в качестве рабочего в КТГ имеет несколько преимуществ по сравнению с классическим TEM_{00q} . Поле квазиосновного H_{06} -типа сконцентрировано вблизи оси СУЭ ОР, что позволяет уменьшить апертуру зеркал без увеличения дифракционных потерь и, следовательно, без уменьшения добротности.

Отметим также, что кроме СУЭ ОР (рис. 15) методом декомпозиции могут быть проанализированы другие типы резонаторов с координатно совместимой ступенчатой деформацией зеркал. Двумерные модели этих резонаторов показаны на рис. 18.

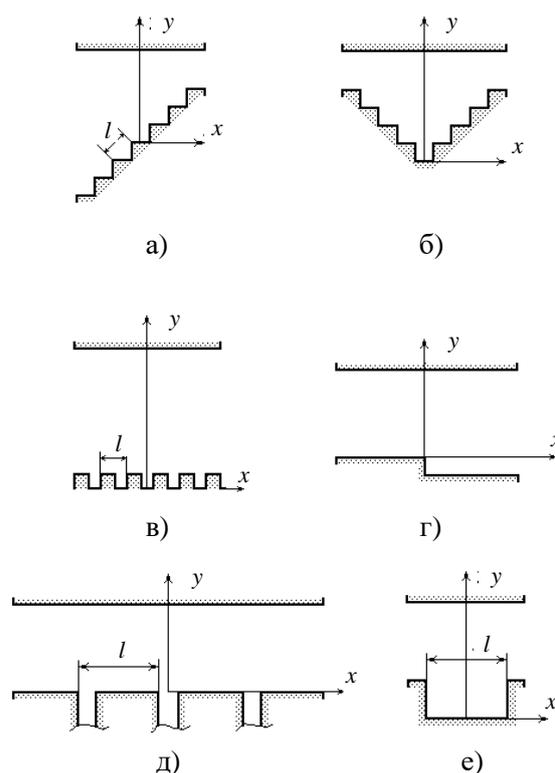


Рис. 18. Двумерные модели ОР со ступенчатой деформацией зеркал: а – в) период структуры $l \sim \lambda$; г – е) период структуры $l > \lambda$

Наряду с исследованиями СУЭ ОР, проведено моделирование ОР с гребенчатыми решетками, обладающими повышенной угловой дисперсией [25]. Решетка из прямоугольных гребней, установленная под углом

автоколлимационного отражения – элемент для одночастотного возбуждения ОР в широком интервале частот [44, 45].

Теоретические и экспериментальные исследования электродинамических свойств ОР с неоднородностями, обладающими частотной дисперсией, послужили базой для разработки колебательных систем КТГ. Были получены новые знания о резонансных свойствах ОР, выделенных в группу резонаторов с дополнительным ограничением резонансного пространства [46, 47], что позволяет синтезировать колебательные системы КТГ с заданными свойствами [48].

Повышение эффективности КТГ напрямую связано с уменьшением потерь в резонансных системах, эффективностью возбуж-

дения колебаний в ОР и выводом энергии в нагрузку без потерь на элементах согласования и связи. Исследование перечисленных явлений (процессов) и создание новых теоретических и экспериментальных подходов к излучению радиационных потерь – проблема весьма актуальная. В работах [49, 50] показано, что эффективность возбуждения ОР сосредоточенными элементами может достигать величины 0,9...0,95. Это означает, что радиационные потери элемента связи могут составлять 0,1...0,05 от мощности генераторного диода, проходящей через элемент связи. Это достигается при разных длинах резонатора (разных продольных индексах q), а также при разных угловых размерах противоположного зеркала (рис. 19).

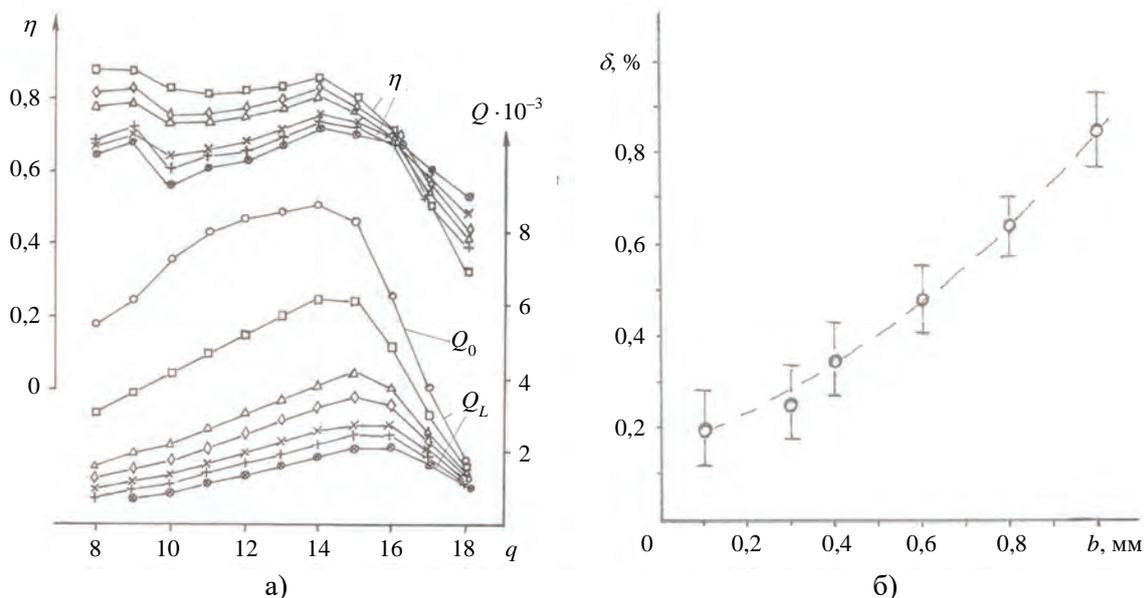


Рис. 19. Результаты измерения эффективности возбуждения (а) и потерь вследствие рассеяния (б) для серии щелевых элементов связи

Определена эффективность выведения энергии из ОР и рассчитана часть относительных потерь энергии ОР вследствие рассеяния на элементы связи

$$\delta = 2kl(1 - \eta_{out})(1/Q_L - 1/Q_0),$$

где l – длина ОР; η_{out} – эффективность выведения энергии через элемент связи резонатора; Q_L – нагруженная добротность; Q_0 – собственная добротность. Экспериментально показано, что эффективность вывода энергии слабо зависит от длины резонатора.

4. Высокостабильные генераторы с улучшенными спектральными характеристиками. Модель КТГ [51] по своим функциональным возможностям была наиболее приспособлена для исследования энергетических и спектральных характеристик КТГ в зависимости от различных конструктивных и энергетических параметров ОР. Конструкция с двухзеркальным полусферическим ОР представлена на рис. 20.

Узел крепления, согласования и отвода тепла от нелинейного элемента размещен в

прямоугольной канавке на зеркале 1. Согласование импедансов диода и резонансной системы осуществляется четвертьволновым отрезком коаксиальной линии ($y_d \approx \lambda_0/4$), центральный проводник которой пересекает канавку. Отрезок $y_{\text{п}}$ выполняет функцию компенсации рассеяния поля ОР на локальной неоднородности узла крепления диода. Предусмотрена регулировка размеров элементов резонатора в процессе подстройки на минимум рассогласований импедансов. Функции перестройки выполняют сферическое зеркало 2, фокусирующие линзы 4. Сферическое зеркало и приемный рупор можно повернуть на некоторый угол φ независимо друг от друга. Таким образом, геометрические размеры практически всех функциональных узлов можно изменять и тем самым влиять на электродинамические свойства ОР. С помощью показанного на рис. 20 квазиоптического генератора были исследованы условия согласования импеданса нелинейного элемента, зависимость выходной мощности от коэффициента связи с нагрузкой.

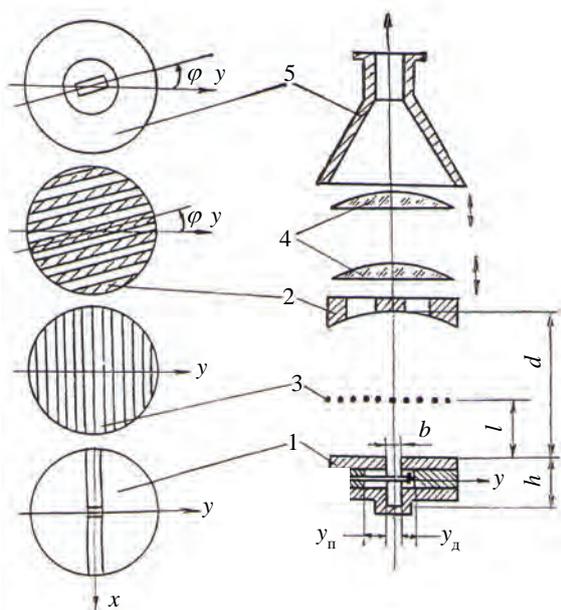


Рис. 20. Конструкция квазиоптического генератора [51]: 1 – плоское зеркало; 2 – сферическое зеркало, собранное из прямоугольных брусков; 3 – сетка-поляризатор; 4 – фокусирующие линзы; 5 – приемный рупор

В ходе выполнения этой экспериментальной работы были установлены соотношения между мощностью, подаваемой в нагрузку, и

электронной мощностью (рис. 21), т. е. условия получения максимальной выходной мощности, минимизации потерь на рассеяние и согласование диода Ганна с ОР через систему, состоящую из нескольких ступеней (отрезок коаксиальной линии, прямоугольная канавка на зеркале, дисковый резонансный элемент на диодном корпусе).

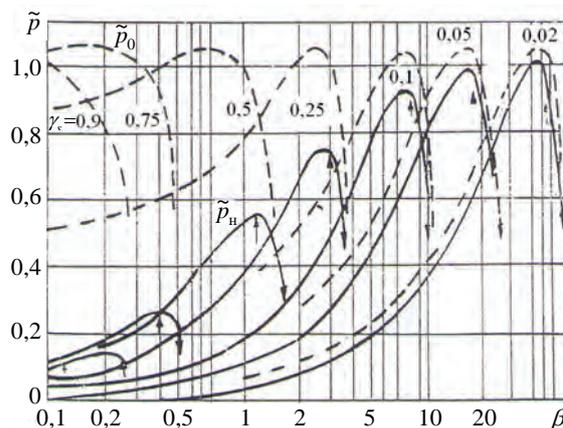


Рис. 21. Графики зависимости нормированной выходной (сплошные линии) и электронной (штриховые линии) мощностей от коэффициента связи β , рассчитанные по формулам для разных значений r_s при $a_1 = 0,5$; $a_2 = 2$. Стрелками на данном и последующих рисунках обозначены точки самовозбуждения (\uparrow) и «срыва» (\downarrow) колебаний, обусловленных жесткими импедансными характеристиками диода Ганна

В [51] выполнена оптимизация выходной мощности КТГ. Достигнута мощность, близкая к максимально возможной для используемого типа диодов (при оптимальной связи с нагрузкой КПД резонансной системы составил 77 % на фиксированной частоте). На основе результатов, полученных в [51], был разработан КТГ с увеличенным диапазоном перестройки, способный по своим характеристикам и эксплуатационным параметрам заменить ЛОВ в задачах широкополосной микроволновой спектроскопии.

На рис. 22 показан генератор с коаксиально-щелевым возбуждением и увеличенным диапазоном перестройки [52]. Он состоит из корпуса 1, покрытого внутри слоем поглотителя 2. Колебательная система состоит из двух зеркал. Зеркало 3 – сферическое со щелевым выводом энергии и переходом на стандартное сечение волновода с соединительным фланцем. Зеркало 4 – плоское с протяженной прямоугольной канавкой, вы-

ходящей на края зеркала. Глубина канавки h определяется положением короткозамыкающего поршня 5. Зеркало 4 и поршень 5 перемещаются с помощью механизма, состоящего из вкладыша 6, ползуна 7 и винта 8. На винте 8 нарезана резьба с различным шагом, что позволяет перестраивать одновременно длину резонатора 2 и глубину канавки h . Полупроводниковый диод 9 в корпусе включен в отрезок коаксиальной линии. Общая длина отрезка коаксиальной линии определяется положением короткозамыкающего поршня 10, зависящим от угла наклона и положения клина 12, по которому скользит хвостовик короткозамыкающего поршня. Так как диоды имеют некоторый разброс параметров, первоначальное положение клина, а значит, и длина коаксиала, подстраиваются при помощи винта. Напряжение питания на диод 9 подается через изолированный центральный стержень 11 коаксиального шлейфа, прижимаемый к диоду с помощью пружины.

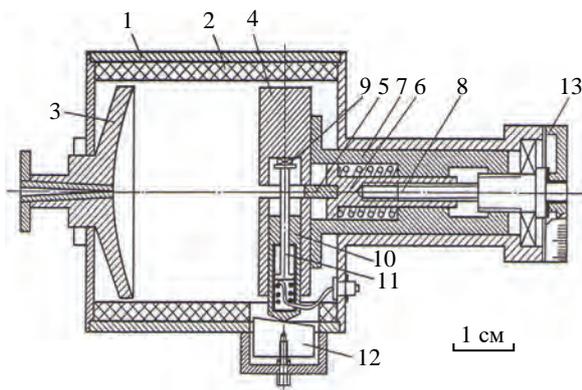


Рис. 22. Квазиоптический генератор с коаксиальным возбуждением

Закономерности механической перестройки всех элементов согласования исследовались в работах [51, 52], где имелась возможность независимой перестройки длины резонатора, глубины прямоугольной канавки и длины коаксиала. В широком диапазоне длин волн зависимости оптимальных по максимуму выходной мощности элементов подстройки изменялись по линейному закону. Это позволило применить простой механизм совместного перемещения в виде привода с помощью асинхронного двигателя с редуктором. На рис. 23 показаны характеристики перестройки генератора.

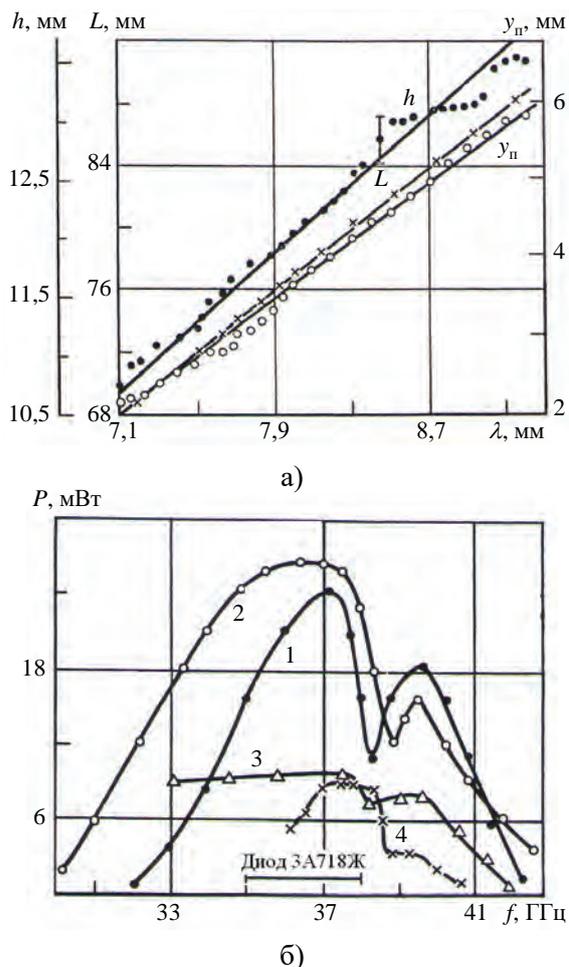


Рис. 23. Характеристики перестройки частоты (а) и мощности (б) генератора. 1 - $y_d = 1,5$ мм; 2 - 2,0; 3 - 2,5; 4 - 3,0; $H = 6,6$ мм

«Провал» на графике зависимости мощности от частоты (рис. 23, б) объясняется паразитным резонансом «шляпки» диода и может быть устранен изменением конструкции корпуса диода Ганна. Диапазон непрерывной перестройки частоты составляет десятки процентов и ограничен теперь другими факторами. Первый из них – глубина погружения y_d диода в боковую стенку канавки. Для оптимальной трансформации импедансов необходимо, чтобы $y_d \sim \lambda_{cp} / 4$, где λ_{cp} – средняя по диапазону перестройки длина волны. Другой фактор – расстояние H оси коаксиала от отражающей поверхности зеркала. Исследования показали, что коаксиальный согласователь должен быть расположен в максимуме электрического поля стоячей волны ОР, т. е. $H = (2n - 1)\lambda_{cp} / 4$, где $n = 1, 2, \dots$. Третий фактор – частотный диапазон существования

отрицательного сопротивления полупроводникового элемента. Отрезком прямой на графике указан паспортный частотный диапазон используемых в генераторе диодов (~ 3 ГГц). Видно, что в квазиоптическом генераторе с коаксиально-щелевым возбуждением при перестройке элементов согласования удается реализовать потенциальные возможности полупроводниковых элементов по ширине частотного возбуждения.

Модификацией генератора, показанного на рис. 22, является КТГ с радиально-волноводным возбуждением [53] с включением диода и вывода энергии по реактивно-отражающей схеме (рис. 24).

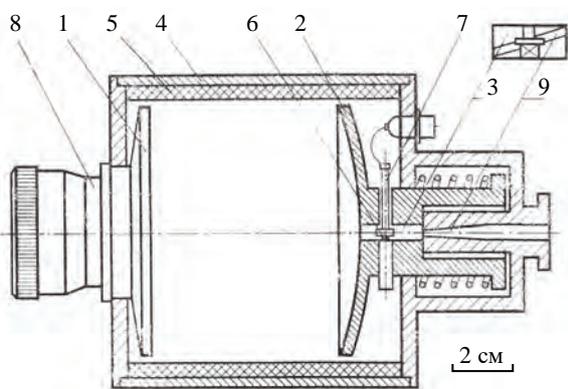


Рис. 24. Схема квазиоптического полупроводникового генератора с радиально-волноводным возбуждением

Назначение каждого элемента ОР и цепей согласования видны из рис. 24, связь с нагрузкой регулируется поворотом сужающегося волновода относительно прямоугольного канала сечением $(1,0 \times 0,2)\lambda$, где λ – средняя длина волны генерации.

На рис. 25 представлены результаты измерений зависимости нормированной добротности $\tilde{Q} = Q(\Gamma)/Q_0$, где Q_0 – нагруженная добротность ОР с гладкими зеркалами (по измерениям $Q_0 = 15 \cdot 10^3$ при $L \approx 10\lambda$). Только для узких отверстий колебательный процесс в модифицированном ОР существует во всей плоскости Γ . Увеличение поперечных размеров отверстия приводит к росту дифракционных потерь и полному подавлению колебаний в области четвертьволнового резонанса волновода с фланцем ($|\Gamma| = 1, \arg \Gamma \approx 5\lambda/16$).

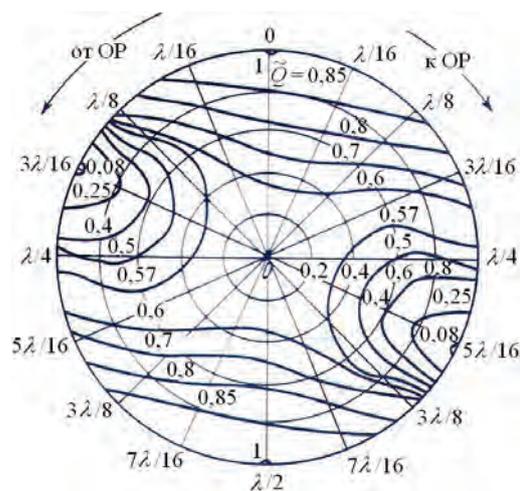


Рис. 25. Линии равных добротностей \tilde{Q} модифицированного ОР на плоскости коэффициента отражения Γ волноводного отверстия сечением $(0,65 \times 0,043)\lambda$. Полярный радиус составляет $|\Gamma|$, полярный угол – $\arg \Gamma$. Принято, что в плоскости зеркала $\arg \Gamma = 0$

Эквивалентная схема КТГ содержит общеизвестную модель диода в радиальной линии, помещенной в волновод, нагруженный трансформатором связи на одном конце и колебательным контуром – на другом. Специфика состоит в том, что собственные потери колебательного контура зависят от импеданса волновода в плоскости зеркала согласно зависимостям, аналогичным представленным на рис. 26. Из численных оценок следует (и это подтверждается измерениями), что

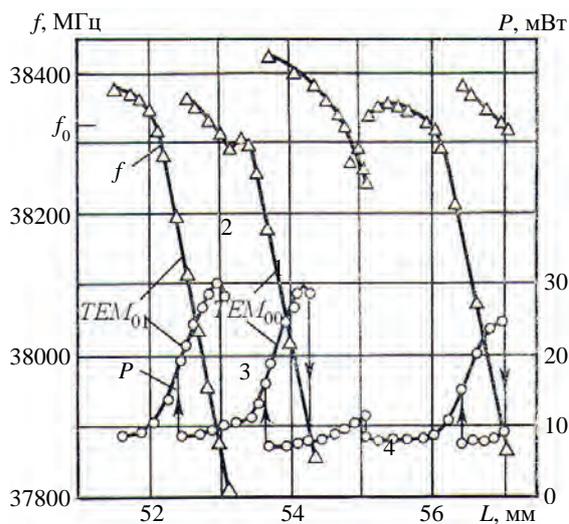


Рис. 26. Зоны генерации квазиоптического генератора с диодом Ганна

удовлетворительные характеристики генератора могут быть получены только в области $|\Gamma| \rightarrow 1$ и $\arg \Gamma \rightarrow 2\pi n, n = 1, 2$. Это, в частности, накладывает ограничения на глубину h волноводного отверстия и расстояния H от диода до конца волновода: в оптимальном случае $h \approx n\lambda_{\text{в}}/2$, $H \approx \lambda_{\text{в}}(2n-1)/4$, где $\lambda_{\text{в}}$ – длина волны в волноводе на частоте генерации.

На рис. 26 представлены результаты испытания КТГ с радиально-волноводным возбуждением на диоде Ганна в 8-мм диапазоне. В заключение отметим, что были изготовлены и успешно испытаны КТГ с радиально-волноводным возбуждением в диапазонах $\lambda = 4, \lambda = 6$ мм на диодах Ганна, а также на ЛПД в диапазоне $\lambda = 8$ мм.

Открытый резонатор с эшелетной отражательной решеткой в качестве одного из зеркал [23] был использован в полупроводниковом генераторе мм диапазона. Обладая частотной угловой дисперсией [18, 25], эшелетты используются в ОР для дополнительного прореживания спектра. Однако авторы работы [23] отмечают, что размещение диода на одном из зеркал связано с уменьшением добротности и дополнительными дифракционными потерями. Предложенные в [34, 42, 43] резонаторы со сфероугловым эшелетным зеркалом лишены недостатков ОР с плоским эшелетным зеркалом при использовании их в твердотельных генераторах. В разработках КТГ с СУЭ ОР предложены два варианта включения ОР: с реактивно-отражающим резонатором и резонатором «на проход» (рис. 27).

Последняя схема включения характеризуется меньшим КПД и большей чувствительностью к расстройке, поэтому в разработке источников с СУЭ ОР, в основном, использовалась схема с реактивно отражающим ОР. На рис. 28 схематически показаны КТГ с СУЭ ОР, построенные по двум схемам.

С использованием метода масштабного моделирования разработан ряд квазиоптических генераторов на диодах Ганна и ЛПД, работающих на фиксированных частотах от 8 до 2 мм [54, 55]. Эмпирическим путем и на основе анализа типов колебаний [42] установлено, что источники возбуждаются на квазиосновном или сопутствующем ему квазивысшем типах колебаний, для которых

высота ступеней эшелетта h не является резонансной. Соотношение рабочей длины волны $\lambda_{\text{р}}$ и высоты ступеней h для генератора с H -поляризованным возбуждением составляет

$$h(H) = 0,563\lambda_{\text{р}}.$$

Для E -поляризованного возбуждения это соотношение

$$h(E) = 0,484\lambda_{\text{р}}.$$

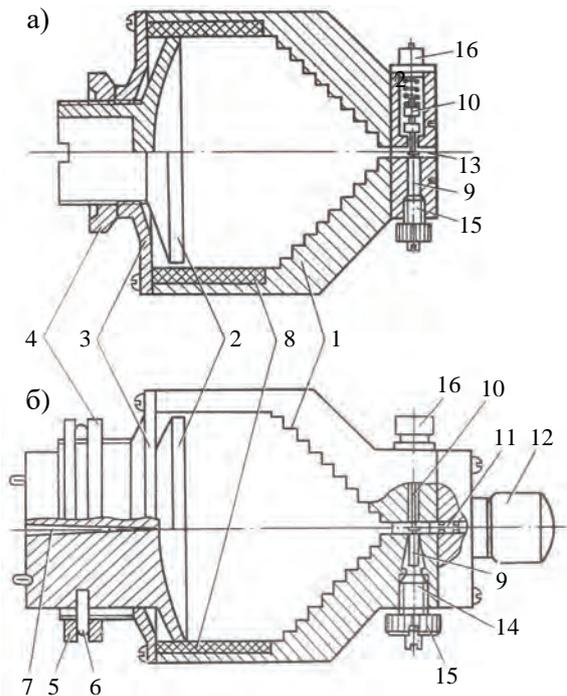


Рис. 27. Квазиоптические генераторы, работающие в режиме «на отражение» (а) и «на проход» (б). 1 – эшелетт-корпус; 2 – сферическое зеркало; 3 – крышка; 4 – контргайка; 5 – гайка; 6 – штифт; 7 – волновод; 8 – поглотитель; 9 – штифт ЛПД; 10 – штырь с ВЧ-фильтром; 11 – подвижный поршень; 12 – механизм подстройки; 13 – согласующая ячейка; 14 – цапга; 15 – гайка; 16 – разъем

Генераторы на ЛПД и диодах Ганна по конструкции отличаются только первичными цепями согласования. В основном использовалась схема с реактивно-отражающим резонатором [56]. Основные характеристики разработанных твердотельных генераторов приведены в работе [54].

Остановимся более подробно на характеристиках КТГ 8-мм диапазона с термостабилизированным корпусом [55]. На рис. 28 показан КТГ в защитном корпусе и с регулировкой температуры с помощью элементов Пельтье.

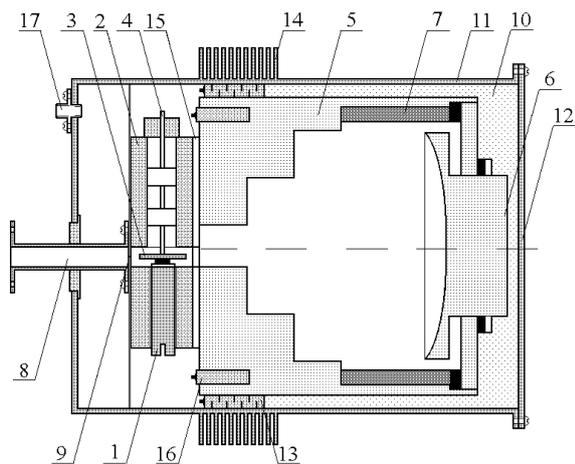


Рис. 28. Термостабилизированный квазиоптический твердотельный генератор 8-мм диапазона

Здесь показаны: 1 – диод на теплоотводящем резьбовом столбике, 2 – волноводная вставка сечением $7,2 \times 3,4$ мм, 3 – диск первичного резонансного контура, 4 – штырь питания с ВЧ-фильтром, 5 – эшелеттное зеркало, 6 – сферическое зеркало, 7 – поглотитель-имитатор открытого пространства, 8 – выходной волновод, 9 – прозрачная диафрагма, 10 – герметичная камера, 11 – защитный корпус, 12 – окна, 13 – элементы Пельтье, 14 – радиаторы, 15 – регулировочные прокладки, 16 – датчик температур, 17 – многостырьковый разъем. Измерение характеристик КТГ проведено с помощью стандартной измерительной аппаратуры: гетеродинного частотомера ЧЗ-66, измерителя мощности МЗ-53 и анализатора спектра С4-28. На рис. 29 показана зависимость частоты и выходной мощности генератора от длины резонатора.

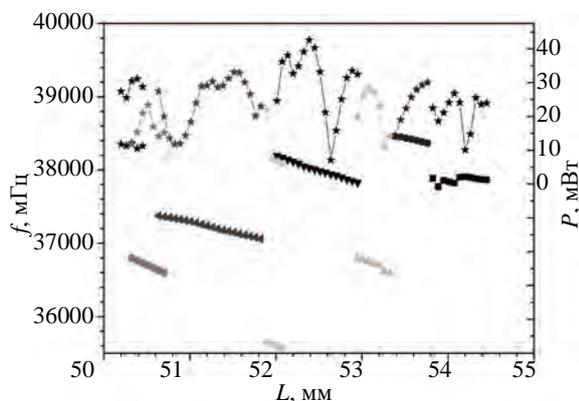


Рис. 29. Графики зависимости частоты и выходной мощности квазиоптического твердотельного генератора от расстояния между зеркалами СУЭ ОР

Генерация носит зонный характер. Наиболее выраженными являются зоны квазиосновного TEM_{0013} -типа, $L = 52,7...52,2$ мм, $\lambda \sim 7,8$ мм, и квазивысшего TEM_{1012} -типа, $L = 51,7...50,85$ мм, $\lambda \sim 8,6$ мм. Относительная перестройка в этих зонах составляет $0,5...0,6$ %.

Долговременная стабильность генерации зависит от стабильности геометрических размеров СУЭ ОР и согласующих цепей, а также герметичности всего узла в целом. Стабильность размеров всех элементов обеспечивается постоянством температуры; элементы Пельтье могут работать как в режиме охлаждения, так и нагревания СУЭ ОР. На рис. 30 показана зависимость частоты генерации от времени, измеренная с помощью гетеродинного частотомера ЧЗ-66.

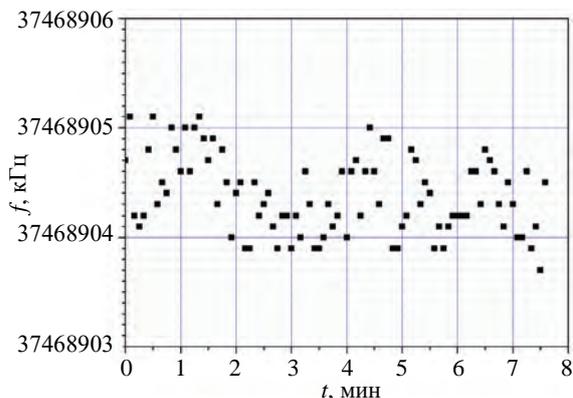
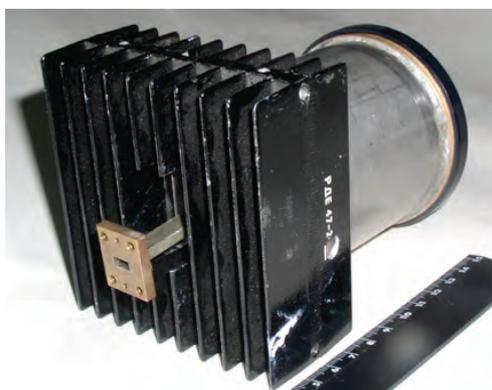


Рис. 30. Изменение частоты генерации в режиме температурной стабилизации

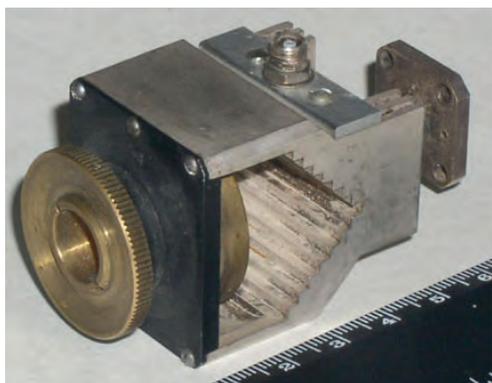
Основные характеристики генератора: частота генерации – $F_r = 37,408$ ГГц; кратковременная нестабильность частоты – $\Delta F / F_{(k)} = 0,5 \cdot 10^{-9}$; долговременная нестабильность частоты – $\Delta F / F_{(д)} \approx 3 \cdot 10^{-8}$ при активном термостатировании $\Delta T \sim 0,1$ °С; уровень частоты шумов – не более 105 дБ/Гц при расстройке на 20 кГц от несущей. Электронная перестройка – 8 МГц/В; генерируемая мощность – $P = 30$ мВт. Описанные здесь и приведенные в [54, 55] данные о характеристиках КТГ свидетельствуют о том, что эти генераторы обладают уникальными спектральными характеристиками и рассчитаны на работу на фиксированных частотах с воз-

возможностью подстройки частоты в пределах 0,5 % путем изменения питающего напряжения.

На рис. 31 показаны фотографии термостатированного 8-мм генератора на диоде Ганна GaAs и 3-мм генератора на диоде Ганна из InPh.



а)



б)

Рис. 31. Генераторы на диоде Ганна: а) 8-миллиметровый, GaAs; б) 3-миллиметровый, InPh

5. Специальные режимы генерации.

5.1. Двухчастотная генерация. В ряде приложений (диагностике плазмы, гетеродинных приемниках) необходимо применять генерацию нескольких частот одновременно, что предложено реализовать в многодиодных системах с общим ОР. В [57] приведены результаты исследования двухдиодного двухчастотного КТГ. На рис. 32 схематически показан двухзеркальный ОР с решеткой из прямоугольных брусьев [22], образованный двумя сферическими зеркалами 1 и 2 с радиусом кривизны $R_0 = 100$ мм. В генераторе использовалась решетка 3, между брусьями которой помещались диоды Ганна 4 и 5. Импедансы решетки и диодов согласовывались с помощью дисковых резонаторов 6 и 7.

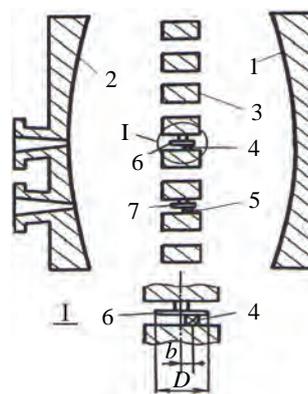


Рис. 32. Двухдиодный двухчастотный генератор

На рис. 33 приведены зависимости частоты, мощности и разностной частоты F двухдиодного генератора от длины резонатора. Перестройка частот f_{00q} и f_{02q} , а следовательно, и разностной частоты, может осуществляться подбором геометрии радиальных дисковых резонаторов.

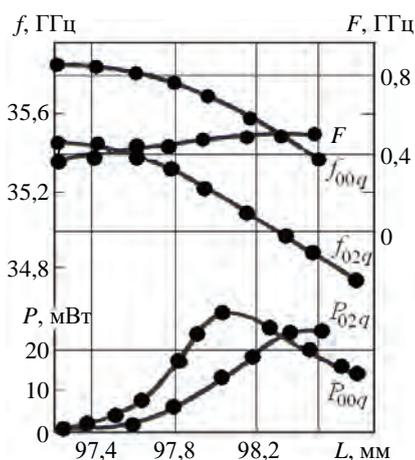


Рис. 33. Частотные и энергетические характеристики двухчастотного генератора (L – расстояние между зеркалами)

Представляется несложным создание трехзеркального ОР, если используется эшелет с прямоугольными ступенями. Если ширина ступени в обоих направлениях одинакова, то в пределах угловой дисперсии такой ОР, созданный из двух элементарных, будет возбуждаться на двух независимых близких частотах, резонансы которых могут пересекаться. Это свойство положено в основу работы двухчастотного генератора [58]. На рис. 34 приведена схема трехзеркального двухчастотного генератора.

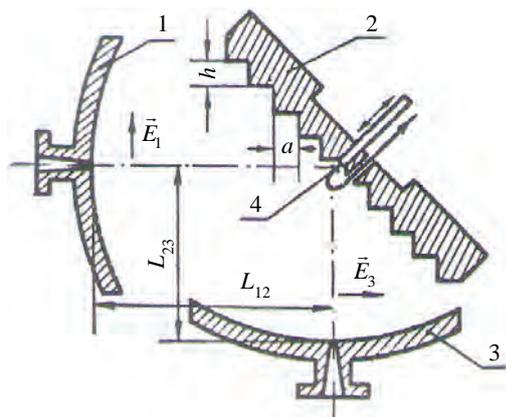


Рис. 34. Общая схема трехзеркального генератора

Диод на металлическом столбике расположен таким образом, чтобы петля, по которой подается смещение, служила своего рода антенной связи с полями двух парциальных резонаторов OP_{12} и OP_{23} . В процессе исследований было установлено, что в режиме двухчастотной асинхронной (независимой) генерации трехзеркальный эшелеттный ОР распадается на две независимые колебательные системы OP_{12} и OP_{23} . На рис. 35 показана типичная зависимость мощности на выходе зеркала 3 и частоты OP_{123} от длины резонаторов.

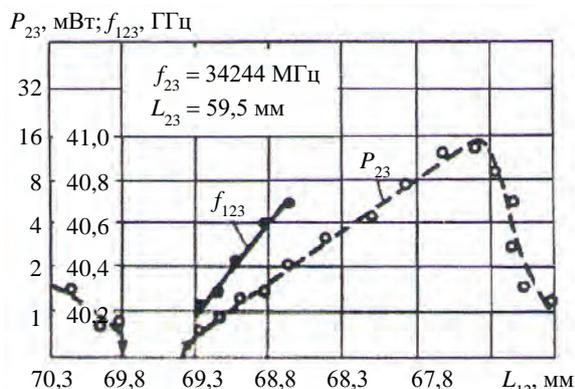


Рис. 35. Характеристики двухчастотного режима генерации

Отметим, что на генерацию диода Ганна в значительной мере влияет ориентация петли смещения.

5.2. Сложение мощностей диодов в квазиоптическом ОР. Уровень выходной мощности твердотельных нелинейных элементов в микроволновом диапазоне достигает нескольких сотен милливатт. В некоторых при-

кладных задачах достигнутых выходных мощностей твердотельных элементов недостаточно. В особенности этот недостаток ощущается при продвижении в коротковолновую часть мм диапазона и переходе в субмм диапазон, где мощности даже самых энергетически перспективных ЛПД в режиме *ИМРАТТ* едва достигают нескольких десятков милливатт. Один из перспективных путей повышения выходной мощности источников излучения – суммирование, т. е. размещение нескольких нелинейных элементов (в основном, диодов Ганна и ЛПД) в общей резонаторной объемной камере. Технически такая задача осуществима в 3-см диапазоне, где размеры прямоугольного волноводного резонатора и согласующих элементов технологичны. При переходе в мм и субмм диапазоны целесообразно использовать квазиоптические принципы построения сумматоров мощностей.

В 1986 г. была опубликована теоретическая работа (J. N. Mink, [59]), в которой предложено расположить решетку из нелинейных элементов (диодов, транзисторов) на одном из зеркал ОР. Такая идея повышения выходной мощности КТГ заманчива, но трудно реализуема, поскольку внесение неоднородностей в большое количество снижает добротность ОР. Диоды, расположенные вблизи оси ОР и на периферии зеркала, будут по-разному взаимодействовать с полем основного (или высшего) типа колебаний. В противоречие вступает основное свойство ОР – высокая добротность и нарушение структуры поля. Однако суммирование мощностей нескольких диодов в ОР вполне реализуемо. В работе [60] осуществлено суммирование мощностей трех диодов в 8-мм диапазоне длин волн. На рис. 36, а схематически показана конструкция генератора, а на рис. 36, б представлены энергетическая и частотная зависимости от длины резонатора.

Представляет интерес наблюдение авторами процесса синхронизации частот, а следовательно, и мощностей двух диодов, когда один из них D_1 находится в режиме генерации, напряжение на D_2 приближается к U_2 – пороговому, что соответствует перегибу на вольтамперной характеристике диода. На этом участке наблюдается неустойчивость частоты, возникают биения частот двух дио-

дов и спектр генерации рассыпается. По мере повышения напряжения на втором диоде взаимная синхронизация частот восстанавливается, наблюдается рост выходной мощности, при включении третьего диода происходит тот же процесс.

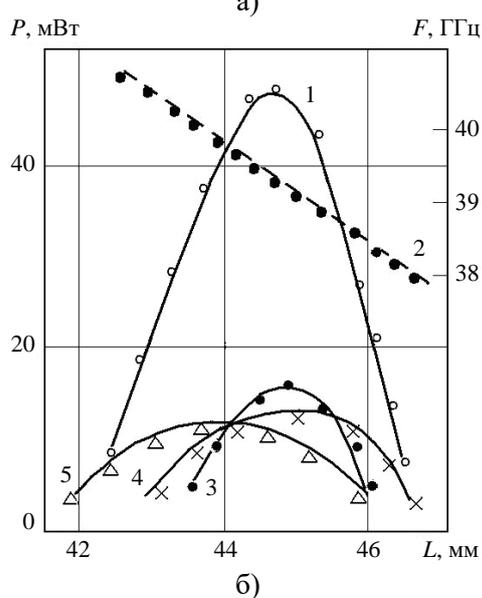
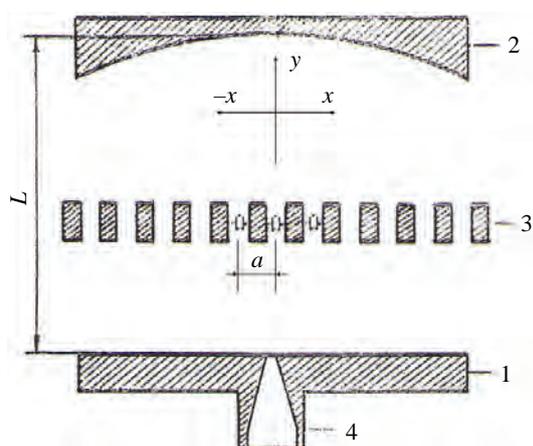


Рис. 36. Схема генератора (а): 1, 2 – плоское и сферическое зеркала резонатора; 3 – дифракционная решетка; 4 – окно вывода энергии. Графики зависимости мощности P и частоты F от расстояния L между зеркалами резонатора (б): кривая 1 – $P_{\Sigma}(L)$ для совместной работы трех диодов; кривая 2 – $F(L)$; кривые 3–5 – $P(L)$ для каждого из диодов соответственно

Это наблюдение авторов наводит на мысль о том, что в экспериментах по суммированию мощности одной из проблем является взаимная синхронизация колебательных процессов ансамбля нелинейных элементов. Проблема теплоотвода также требует нетрадиционных решений.

Исследование процесса возбуждения ОР системой (или одиночным) источниками электромагнитных колебаний – задача актуальная и направлена на суммирование мощностей нескольких полупроводниковых диодов. В работах [61, 62] исследована эффективность возбуждения колебаний в ОР одним и системой диполей, расположенных вблизи зеркала в пучности электрической компоненты электромагнитного поля. Авторами установлено, что амплитудные спектры ОР зависят от количества диполей в ансамбле и их положения относительно центра ОР. Например, подавление высших типов колебаний, возбуждаемых системой из девяти диполей, значительно эффективнее, чем одним. Еще один, не менее важный, результат касается эффективности возбуждения одним или системой источников, а также влияния несинфазности на эффективность возбуждения. Из графиков (рис. 37) следует, что с ростом добротности эффективность η возбуждения увеличивается, а система из девяти источников имеет большую эффективность по сравнению с одиночным нелинейным элементом.

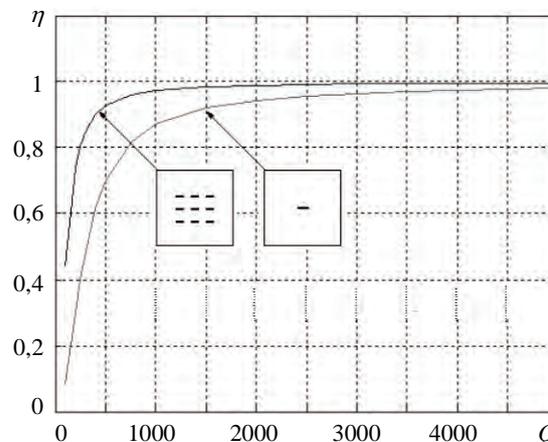


Рис. 37. Эффективность возбуждения основной моды ОР

На рис. 38 приведены зависимости эффективности возбуждения на основной моде η_{00} от сдвига фазы одного из источников по отношению к общей фазе остальных электрических диполей ($k_{1,2}$ – градиент уменьшения η_{00}).

Таким образом, увеличение общего числа синхронных источников уменьшает влияние одного отдельно взятого источника на энергетические характеристики системы. Полу-

ченный результат [62] может использоваться при разработке квазиоптических сумматоров мощности, в частности, при расчете геометрии оптимального расположения полупроводниковых элементов на зеркале.

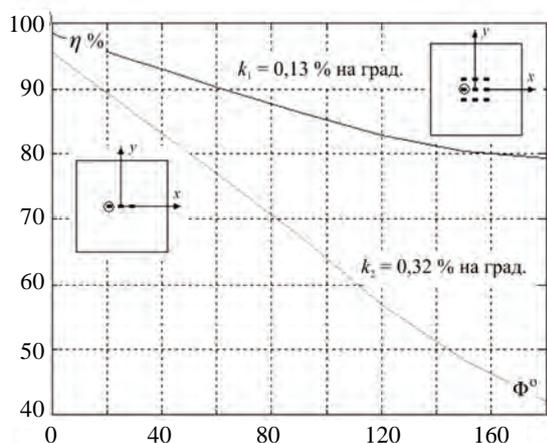


Рис. 38. Влияние расфазировки одного из источников на эффективность возбуждения

5.3. Квазиоптические твердотельные генераторы на второй гармонике. Затруднения освоения коротковолновой части мм и субмм диапазонов вызваны так называемым коротковолновым пределом нелинейных твердотельных элементов [17]. Один из путей преодоления этого препятствия – возбуждение в КТГ колебаний на высших гармониках. Пользуясь опытом разработки КТГ на диодах Ганна с согласующей прямоугольной ячейкой [53], авторы разработали и исследовали КТГ с выходом сигнала второй гармоники*. На рис. 39 представлены частотные и энергетические характеристики КТГ; схематический разрез по оси ОР и внешний вид сложного зеркала с режекторным фильтром показаны на рис. 40.

Используя эквивалентную схему резонатора Фабри–Перо, учитывающую особенности моделирования апертуры связи открытых систем, авторы [53] рассчитали зависимости добротности резонатора от амплитуды и фазы волны, отраженной от цепи согласования. Внесенные в ОР потери пренебрежимо малы, если коэффициент отражения $\Gamma \rightarrow \exp(i\pi n)$. Близким к этому критерию был способ согласования штырем диаметром $0,2\lambda$. Вноси-

мый уровень потерь за удвоенный проход уменьшился до $\delta_s \sim 0,1\%$, что существенно снизило уровень частотных шумов. В результате исследований разработан оптимизированный КТГ с выделением второй гармоники на частоте 60 ГГц с уровнем выходной мощности около 10 мВт и уровнем частотного шума не хуже -115 дБ/Гц.

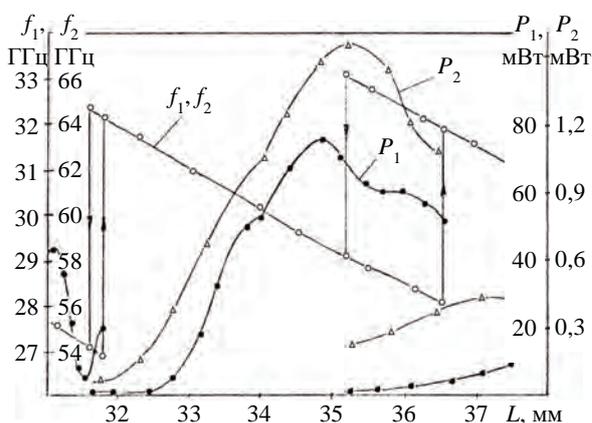


Рис. 39. Зона генерации КТГ

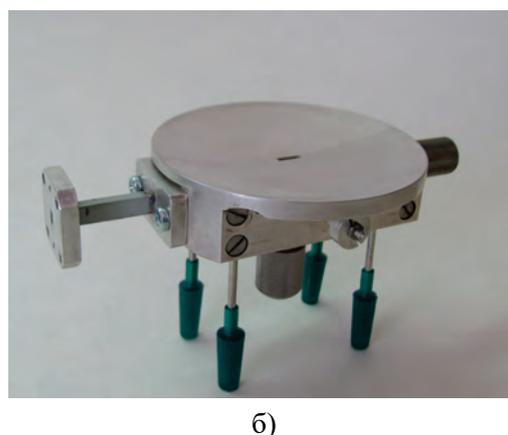
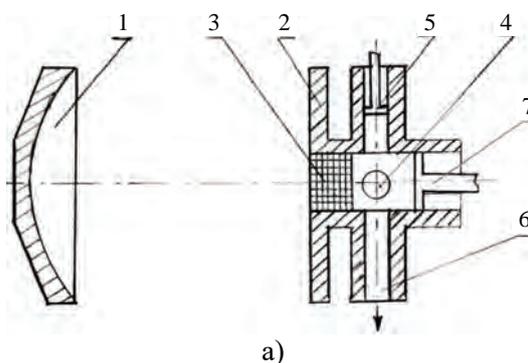


Рис. 40. Устройство (а) и внешний вид плоского зеркала (б) КТГ с выходом энергии на второй гармонике: 1 – сферическое зеркало; 2 – плоское зеркало; 3 – режекторный фильтр; 4 – генераторный диод; 5 – поршень 2-й гармоники; 6 – выход 2-й гармоники; 7 – поршень 1-й гармоники

* Сначала был разработан прототип с выводом энергии на 1-й и 2-й гармониках.

6. Применение КТГ в научных исследованиях и приборостроении. Ряд задач в разработке измерительной аппаратуры мм и субмм диапазонов требует применения источников ЭМ-энергии, обладающих низким уровнем частотных флуктуаций [30, 35]. Результаты исследований, приведенные в [22, 41, 48, 63] и других публикациях, послужили основой для создания ряда КТГ в диапазоне 30...150 ГГц, по своим эксплуатационным характеристикам пригодных для использования в устройствах и приборах различного назначения.

Как отмечалось во введении, в освоении коротковолновой части мм и субмм диапазонов для создания волноведущих и управляющих элементов, а также колебательных контуров для твердотельных генераторов предпочтительнее, а в некоторых случаях альтернативы квазиоптике просто не существует. Квазиоптические твердотельные генераторы на GaAs диоде Ганна в диапазоне частот 30...40 ГГц с выходной мощностью до 100 мВт, а также КТГ на ЛПД с выходной мощностью до 180 мВт и аналогичные генераторы в диапазоне 54...62 ГГц и 93...96 ГГц [54] были переданы в РИ НАН Украины для проведения научных исследований (2000 г.).

В Институт физики полупроводников СО РАН были переданы КТГ на GaAs диоде Ганна в диапазоне частот 33...42 ГГц и выходной мощностью до 90 мВт, а также КТГ на Si ЛПД с частотой генерации 50...60 ГГц и выходной мощностью до 130 мВт [54] (1999 г.).

Совместно с Институтом космических исследований РАН разработан КТГ на бескорпусном InP диоде Ганна на частоту генерации 80...86 ГГц, выходная мощность – не менее 10 мВт, достаточная для использования в качестве гетеродина в высокочувствительных радиометрических системах, а также КТГ на 150 ГГц с мощностью генерации около 5 мВт (1999 г.).

В рефрактометре, построенном по схеме автогенераторной измерительной системы [64], используется КТГ с радиально-волноводным возбуждением ОР [53]. Открытый резонатор системы заполняется газом, комплексную диэлектрическую проницаемость которого необходимо определить. При прохождении газа через ОР системы флуктуации диэлектрической проницаемости вызывают измене-

ние резонансной частоты ОР и частоты генерации КТГ. Оптимизация цепей согласования импедансов (рис. 24) минимизирует потери, вносимые в ОР, понижает уровень частотных шумов, повышая тем самым чувствительность устройства. Использование КТГ с выводом сигнала на второй гармонике позволяет повысить чувствительность автогенераторной измерительной системы в 2 раза. Генератор на второй гармонике имеет выходную мощность не менее 10 мВт на частоте 60 ГГц (вторая гармоника), уровень частотного шума – не хуже –115 дБ/Гц. По измерениям рефракционных качеств атмосферного воздуха получен ряд новых результатов (2016 г.). В диэлектрометре, предназначенном для измерения комплексной диэлектрической проницаемости биологических жидкостей, используется КТГ с увеличенным диапазоном перестройки [52]. Квазиоптический твердотельный генератор функционирует в режиме фиксированной частоты. Элементы механической перестройки частоты и согласования импедансов используются для выхода на рабочую частоту ($f = 39,9$ ГГц) с повышенной точностью. Одним из факторов повышения точности измерения КПД является низкий уровень частотных шумов КТГ. Погрешность измерения КПД крови $\pm 1,5$ % по амплитуде и фазе [65–67] (2011 г.).

7. Перспективные направления исследований. Генерирование ЭМ-колебаний в субмм (терагерцевом) диапазоне – одна из основных задач современной твердотельной электроники. В мм (гигагерцевом) диапазоне успешно используются GaAs диоды Ганна. В основе генерации ЭМ-колебаний лежит эффект междолинного переноса электронов; ЛПД с малым коэффициентом ударной ионизации электронов и дырок, диоды Шоттки в основном используются как детекторные; генерируемая мощность в режиме генерации сравнительно мала. При переходе в коротковолновую часть мм и субмм диапазонов возникает ряд принципиальных проблем: влияние ряда эффектов на волны объемного заряда, негативное влияние анодного контакта, разогрев электронного газа у катода [68]. Использование варизонных соединений частично решает проблему продвижения в коротковолновую часть путем повышения высокочастотного предела. Современные тенденции в

использовании нелинейных эффектов в твердом теле нацелены на поиск новых физических явлений и расширение частотных пределов.

Задача создания твердотельных источников в субмм диапазоне, кроме поиска новых нелинейных элементов, включает также проблему высокочастотного колебательного контура. Пользуясь принципами квазиоптики и методом масштабного моделирования, нетрудно создать СУЭ ОР со ступенями эшелетта $h \approx \lambda/2$, где $\lambda < 1$ мм, применяя уже существующие технологические приемы. Если в длинноволновой части применялись серийно выпускаемые для волноводных генераторов диоды Ганна или ЛПД в керамическом защитном корпусе, то при переходе в коротковолновую часть диапазона необходимо отказаться от традиционных технологий. Примером может послужить КТГ, показанный на рис. 41.

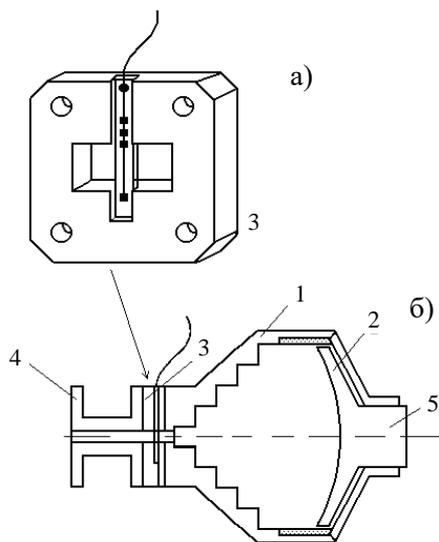


Рис. 41. КТГ на 115 ГГц: волноводная секция (а), монтаж InP диода Ганна и фильтра цепи питания на диэлектрической подложке и разрез КТГ по оси симметрии (б)

В нем использован бескорпусный InP диод Ганна, смонтированный на прозрачной диэлектрической подложке совместно с цепью подачи смещения и высокочастотным фильтром. На частоте 150 ГГц получена выходная мощность генерации не менее 3 мВт.*

Выводы. В процессе выполнения научных работ в отделе твердотельной электро-

ники были исследованы открытые резонансные системы, предложены новые типы твердотельных генераторов гигагерцевого и терагерцевого диапазонов:

– предложены новые конфигурации открытых резонаторов с координатными неоднородностями на зеркале (канавка, прямоугольное углубление, эшелетт и уголково-эшелеттное зеркало), а также внутри резонансного объема (прозрачные решетки из прямоугольных брусьев);

– сформулированы и апробированы методы теоретического анализа новых конструкций открытых резонаторов (принцип декомпозиции волновой модели открытого резонатора, метод обобщенной матрицы рассеяния). Проведены экспериментальные исследования открытых резонаторов с неоднородностями. Исследованы радиационные потери сосредоточенных элементов связи;

– разработаны и исследованы высокостабильные квазиоптические твердотельные генераторы в диапазоне длин волн 8...2 мм с уникально низким уровнем частотных шумов. На основе квазиоптических твердотельных генераторов разработаны и используются в научных исследованиях ряд устройств для рефрактометрии и диэлектрометрии в мм диапазоне. В коротковолновой части генераторы используются в качестве гетеродинов в приемных устройствах.

Библиографический список

1. *Квазиоптика*. Пер. с англ. и нем. под ред. Б. З. Каценеленбаума, В. В. Шевченко. Москва: Мир, 1966. 504 с.
2. Жаботинский М. Е., Шмаонова Т. А. *Лазеры*. Москва: Иностран. лит., 1963.
3. *Handbook of Microwave and Optical Components*. Vol. 1. *Microwave Passive and Antenna Components*. Kai Chang (ed.). New York: J. Wiley, 1989. 907 p.
4. Goubau G., Schwering F. On the Guided Propagation of Electromagnetic Wave Beams. *IRE Trans. Antennas Propag.* 1961. Vol. 9, N 3. P. 248–256.
5. Fox A. C., Li T. Resonant Modes in a Maser Interferometer. *Bell Syst. Techn. J.* 1961. Vol. 40, N 2. P. 453–488.
6. Вайнштейн Л. А. *Открытые резонаторы и открытые волноводы*. Москва: Сов. радио, 1966.
7. Schawlow A. L. Infrared and optical masers. In: *Quantum Electronics*. A Symposium, ed. C. Townes. New York: Columbia University Press, 1960. P. 553.
8. Kogelnik H., Li T. Laser Beams and Resonators. *Appl. Opt.* 1966. Vol. 5, N 10. P. 1550–1567.
9. Herriott D. R. Optical Properties of He-Ne Laser. *J. Opt. Soc. Am. A.* 1962. Vol. 52, N 1. P. 31–35.

*Генератор создан совместно с ИКИ РАН.

10. Левин Г. Я., Бородин А. И., Кириченко А. Я., Чурилова С. А., Усиков А. Я. *Клинотроны*. Под ред. А. Я. Усикова. Киев: Наукова думка, 1992. 200 с.
11. Шестопапов В. П. *Дифракционная электроника*. Харьков: Изд. ХГУ, 1976.
12. Smith S. J., Pursell E. M. Visible light from localized surface charges moving across grating. *Phys. Rev.* 1953. Vol. 92, N 4. P. 1069–1073.
13. А. с. № 195557 СССР, МПК H01J 23/20, H01J 25/00. *Электронный прибор для генерации и усиления колебаний мм и субмм диапазонов волн* / Ф. С. Русин, Г. Д. Богомолов. 1965. Бюл. № 10.
14. Mizuno K., Ono C. and Schibatu Y. A new electron tube with a Fabry-Perot resonator for generation in millimeter and submillimeter waves. *Proc. Symp. Submillimeter Waves*. New York: Politechnic Press, 1970. P. 115–134.
15. Miroshnichenko V. S. Competition and Cooperation of Modes in Small-Volume DRO with Periodic Structure of Coupled Grooved Waveguide. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2009. Vol. 68, N 3. P. 231–245.
16. Васильев Н. А., Лукаш В. С., Муравьев В. В., Шалатонин В. И. Состояние и основные проблемы разработки генераторов мм-диапазона на диодах Ганна. *Изв. вузов. Радиэлектроника*. 1985. Т. 28, № 10. С. 42–50.
17. Тагер А. С., Вальд-Перлов Б. М. *Лавинно-пролетные диоды и их применение в технике СВЧ*. Москва: Сов. радио, 1968. 480 с.
18. Косарев Е. Л. Разрежение спектра открытого резонатора с помощью эшелеттной решетки. *Письма в Журн. эксперим. и теорет. физики*. 1966. Т. 3, № 7. С. 295–298.
19. Фельдштейн А. Л., Ярвич Л.Р. *Синтез четырехполосников и восьмиполосников на СВЧ*. Москва: Связь, 1971. 388 с.
20. А. с. № 675579 СССР. МПК H03B 9/12. *Полупроводниковый генератор* / А. И. Бородин, Б. М. Булгаков, В. А. Матвеева, В. В. Смородин. 1979. Бюл. № 27.
21. Бородин А. И., Булгаков Б. М., Матвеева В. А., Родионов А. В., Смородин В. В., Шестопапов В. П. Полупроводниковый генератор миллиметрового диапазона с квазиоптической резонансной системой. *Письма в Журн. техн. физики*. 1979. № 5. С. 285–288.
22. Бородин А. И., Булгаков Б. М., Матвеева В. А., Родионов А. В., Смородин В. В., Шестопапов В. П. Полупроводниковый генератор с квазиоптической резонансной системой. *Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ*. 1979. Вып. 3. С. 13–19.
23. Бородин А. И., Булгаков Б. М., Смородин В.В. Полупроводниковый генератор с колебательной системой – открытым резонатором с отражательной дифракционной решеткой. *Письма в Журн. техн. физики*. 1980. № 19. С. 1189–1193.
24. Арндарь В. Н., Прохоров Э. Д. Перескоки частоты в генераторах Ганна. *Радиотехника и электроника*. 1973. Т. 18, № 6. С. 1320–1322.
25. Шестопапов В. П., Кириленко А. А., Масалов С. А., Сиренко Ю. К. *Резонансное рассеяние волн. Т. 1. Дифракционные решетки*. Киев: Наукова думка, 1986. 232 с.
26. Коцержинский Б.А., Мачусский Е.А., Першин Н.А., Тараненко В.П. Твердотельные генераторы с квазиоптическими резонансными системами. *Изв. вузов. Радиоэлектроника*. 1987. Т. 30, № 10. С. 13–23.
27. Mizuno K., Ajikata T., Hieda M., Nakayama M. Quasi-Optical Resonator for MM and Submm Wave Solid-State Sources. *Electron. Lett.* 1988. Vol. 24, N 13. P. 792–793.
28. Nagano S., Ohnaka S. A highly stabilized K_a-band Gunn oscillator. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 1972. Vol. 20, N 2. P. 174–176.
29. Булгаков Б. М., Скрасанов В. Н., Фисун А. И., Фурсов А. М. Исследование квазиоптического открытого резонатора с одной или несколькими проводящими пластинами между зеркалами. *Радиотехника: науч.-техн. сб. Нац. ун-т радиоэлектрон. Харьков, Украина, 1981. № 56. С. 21–29.*
30. Булгаков Б. М., Кочин В. Н., Скрасанов В. Н., Фисун А. И., Шубный А. И. Возбуждение длинной прямоугольной канавки в плоском зеркале полусферического открытого резонатора. *Физика и техника мм и субмм волн*. Киев: Наук. думка, 1983. С. 44–49.
31. Булгаков Б. М., Скрасанов В. Н., Фисун А. И., Шубный А. И. Селекция продольных низших типов колебаний открытого резонатора миллиметрового диапазона продольными резонансными неоднородностями. *Радиотехника и электроника*. 1984. Т. 29, № 5. С. 894–900.
32. Булгаков Б. М., Скрасанов В. Н., Фисун А. И. Исследование открытых резонаторов с прямоугольными неоднородностями на зеркале. *Изв. вузов. Радиофизика*. 1983. Т. 26, № 4. С. 447–454.
33. *Измерения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах*. Под ред. В. А. Валитова, Б. И. Макаренко. Москва: Радио и связь, 1984. 296 с.
34. А. с. № 1309870 СССР, МПК H03B 7/14, H03B 9/12. *Генератор СВЧ* / О. И. Белоус, Б. М. Булгаков, А. И. Фисун, А. М. Фурсов. 1989. Бюл. № 43.
35. *Техника субмиллиметровых волн*. Под ред. Р. А. Валитова. Москва: Сов. радио. 1969. 480 с.
36. Никольский В. В., Никольская Т. И. *Декомпозиционный подход к задачам электродинамики*. Москва: Наука, 1983. 304 с.
37. Митра Р., Ли С. *Аналитические методы теории волноводов*. Пер. с англ. под ред. Г. В. Воскресенского. Москва: Мир, 1974. 323 с.
38. Кириленко А. А., Ткаченко В. И. Системы электродинамического моделирования СВЧ-КВЧ устройств. *Изв. вузов. Радиоэлектроника*. 1996. Т. 39, № 9. С. 17–28.
39. Белоус О. И., Кириленко А. А., Фисун А. И. Квазиоптические резонансные системы в приборах твердотельной электроники мм и субмм диапазонов длин волн. *Радиофизика и электроника: сб. науч. тр. Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. Харьков, 2008. Т. 13, спец. вып. С. 376–390.*
40. Fisun A. I. Method for Analysis of Open Resonator with Step-like Deformation of Mirrors. *Electron. Lett.* 1998. Vol. 34, N 2. P. 192–193.
41. Belous O. I., Kirilenko A. A., Tkachenko V. I., Fisun A. I., Fursov A. M. Excitation of an open stripline resonator by a plane waveguide. *Radiophys. Quantum Electron.* 1994. Vol. 37, N 3. P. 181–189.

42. Фисун А. И., Ткаченко В. И., Белоус О. И., Кириленко А. А. Возбуждение колебаний в открытых резонаторах с эшелеттным и уголково-эшелеттным зеркалами. *Радиотехника и электроника*. 2000. Т. 45, № 5. С. 632–639.
43. Tkachenko V. I., Fisun A. I. Simulation of natural oscillations in a corner-echelette open resonator. *Telecommunications and Radio Engineering*. 1998. Vol. 52, N 2. P. 42–46.
44. Fisun A. I. Monofrequency excitation of open resonator with inclined comb grating. *Int. J. Infrared Millimeter Waves*. 1997. Vol. 18, N 7. P. 2353–2367.
45. Белоус О. И., Кириленко А. А., Фисун А. И. Спектры квазиоптического открытого резонатора с гребенчатой решеткой. *Изв. вузов. Радиоэлектроника*. 1998. Т. 41, № 4. С. 8–13.
46. Fisun A. I. Millimeter wave band open resonators with additive restriction of resonant space. *Int. J. Infrared Millimeter Waves*. 1997. Vol. 18, N 12. P. 2353–2367.
47. Фисун А. И. Высокодобротные резонансы в открытых резонаторах с частично ограниченной областью. *Докл. НАН Украины*. 1997. № 12. С. 97–102.
48. Fisun A. I. Constructive synthesis of dispersive oscillation systems of quasi-optical solid-state millimeter wave sources. *Electromagnetic Waves and Electronic Systems*. 1997. Vol. 2, N 5. P. 37–43.
49. Гламаздин В. В., Натаров М. П., Скрасанов В. Н., Шубный А. И. Радиационные потери сосредоточенных элементов связи открытых резонаторов. *Радиофизика и электроника*. 2011. Т. 2(16), № 3. С. 12–25.
50. Гламаздин В. В., Натаров М. П., Скрасанов В. Н., Шубный А. И. Эффективность возбуждения квазиоптического открытого резонатора из волновода. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2009. Т. 52, № 3. С. 231–249.
51. Булгаков Б. М., Скрасанов В. Н., Фисун А. И., Шубный А. И. Энергетические характеристики генератора с квазиоптическим резонатором на диоде Ганна. *Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ*. 1984. Вып. 3(363). С. 13–19.
52. Белоус О. И., Булгаков Б. М., Скрасанов В. Н., Фисун А. И., Шубный А. И. Квазиоптический генератор Ганна с увеличенным диапазоном перестройки. *Приборы и техн. эксперимента*. 1988. № 1. С. 125–127.
53. Булгаков Б. М., Скрасанов В. Н., Фисун А. И., Шубный А. И. Квазиоптический генератор с радиально-волноводным возбуждением. *Там же*. С. 114–116.
54. Архипов А. В., Белоус О. И., Булгаков Б. М., Фурсов А. М., Фисун А. И. Квазиоптические генераторы на диоде Ганна и ЛПД с открытым резонатором. *Приборы и техн. эксперимента*. 1991. № 1. С. 106–109.
55. Belous O. I., Sukhoruchko O. N., Fisun A. I. Power and Spectrum Performance of Quasi-Optical Solid-State MM-Wave Oscillator. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2006. Vol. 65, N 16. P. 1501–1523.
56. Выровой С. И., Гуменной С. Н., Цвирко Ю. А. Сравнение одноконтурных схем стабилизации генераторов на активных двуполосниках. *Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ*. 1976. № 3. С. 47–58.
57. Бородин А. И., Булгаков Б. М., Скрасанов В. Н., Натаров М. П., Шубный А. И. Двухчастотный двухдиодный квазиоптический генератор мм диапазона. *Изв. вузов. Радиоэлектроника*. 1991. Т. 34, № 3. С. 96–98.
58. Фурсов А. М., Булгаков Б. М., Фисун А. И. Двухчастотная осинхронная устойчивая генерация диода Ганна в открытой резонансной системе. *Изв. вузов. Радиоэлектроника*. 1983. Т. 26, № 10. С. 80–81.
59. Mink J. N. Quasi-Optical Power Combining of Solid-State Millimeter-Wave Sources. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*. 1986. Vol. 34, N 2. P. 273–279.
60. Бородин А. И., Булгаков Б. М., Смородин В. В. Сложение мощностей нескольких генераторных полупроводниковых диодов в квазиоптической резонаторной системе. *Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ*. 1980. № 3. С. 14–19.
61. Булгаков Б. М., Натаров М. П. Исследование эффективности возбуждения открытых резонансных систем. *Радиофизика и электроника: сб. науч. тр. Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины*. Харьков, 2003. Т. 8, № 2. С. 175–179.
62. Булгаков Б. М., Натаров М. П., Скрасанов В. Н. Характеристики возбуждения открытого резонатора системой электрических диполей. *Радиофизика и электроника: сб. науч. тр. Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины*. Харьков, 2006. Т. 11, № 3. С. 366–371.
63. Фисун А. И., Белоус О. И. Квазиоптические твердотельные источники излучения: принципы построения, тенденции развития и перспективы приложения. *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники*. 1999. № 4. С. 41–64.
64. Skresanov V. N., Glamazdin V. V., Fisun A. I., Shubnyi A. I. Active Quasi-Optical Refractometer in the extremely High Frequencies (EHF) Band. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2016. Vol. 75, N 1. P. 83–96.
65. *Пристрій для вимірювання діелектричної проникності біологічних рідин у КВЧ-діапазоні електромагнітного випромінювання*: пат. 109779, Україна: МПК G01N 33/483 / П. С. Красов, А. І. Фісун, К. А. Архипова. 12.10.2015. Бюл. № 19.
66. Arkhypova K., Krasov P., Fisun A., Nosatov A., Lychko V., Malakhov V. Microwave Dielectrometry as a Tool for the Characterization of Blood Cell Membrane Activity for in vitro Diagnostics. *Int. J. Microwave Wireless Technolog*. 2017. Vol. 9, N 8. P. 1569–1574.
67. Красов П. С., Белоус О. И., Волох Ф. А., Фисун А. И., Малахов В. А. *Эффекты миллиметровых волн в медицине: от теории до практики*. Харьков: Оригинал, 2018. 176 с.
68. Storozhenko I. P. Frequency Characteristics of Diodes with Interval Electron Transfer that Based on Variband and $\text{In}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ with Various Cathode Contacts. *J. Commun. Technol. Electron*. 2007. Vol. 52, N 10. P. 1158–1164.

REFERENCES

1. *Quasioptics* (1966). Translated and ed. from English and German by B. Z. Katsenelenbaum, V. V. Shevchenko. Moscow: Mir Publ. (in Russian).

2. Zhabotynsky, M. E., Shmaonova, T. A. (eds.), 1963. *Lasers*. Moscow: Inostr. Lit-ra Publ. (in Russian).
3. Kai Chang ed., 1989. *Handbook of Microwave and Optical Components. Vol. 1. Microwave Passive and Antenna Components*. New York: J. Wiley
4. Gonban, G., Schwering, F., 1961. On the Guided Propagation of Electromagnetic Wave Beams. *IRE Trans. Antennas Propag.*, **9**(3), pp. 248–256.
5. Fox, A. C., Li, T., 1961. Resonant Modes in a Maser Interferometer. *Bell Syst. Techn. J.*, **40**(2), pp. 453–488.
6. Weinstein, L.F., 1966. *Open Resonators and Open Waveguides*. Moscow: Sov. Radio Publ. (in Russian).
7. Schawlow, A. L., 1960. Infrared and optical masers. In: *Quantum Electronics*, A Symposium, ed. C. Townes, p. 553. New York: Columbia University Press.
8. Kogelnik, H., Li, T., 1966. Laser Beams and Resonators. *Appl. Opt.*, **5**(10), pp. 1550–1567.
9. Herriott, D. R., 1962. Optical Properties of He-Ne Laser. *J. Opt. Soc. Am. A.*, **52**(1), pp. 31–35.
10. Levin, G. Ya., Borodkin, A. I., Kirichenko, A. Ya., Churilova, S. A., Usikov, A. Ya. (ed.), 1992. *Klynotron*. Kiev: Naukova Dumka Publ. (in Russian).
11. Shestopalov, V. P., 1976. *Diffraction Electronics*. Kharkov: KhGU Publ. (in Russian).
12. Smith, S. J., Pursell, E. M., 1953. Visible light from localized surface charges moving across grating. *Phys. Rev.*, **92**(4), pp. 1069–1073.
13. Rusin, F. C., Bogomolov, G. D., 1965. *Electronic Device for Generation and Amplification of Oscillations*. USSR Authors' Certificate 195,557 (in Russian).
14. Mizuno, K., Ono, C., Schibatu, Y., 1970. A new electron tube with a Fabry-Perot resonator for generation in millimeter and submillimeter waves. In: Fox J., ed. 1970. *Proc. of the Symp. on Submillimeter Waves*. New York: Polytechnic Press, pp. 115–134.
15. Miroshnichenko, V. S., 2009. Competition and Cooperation of Modes in Small-Volume DRO with Periodic Structure of Coupled Grooved Waveguide. *Telecommunications and Radio Engineering*, **68**(3), pp. 231–245.
16. Vasilyev, N. A., Lukash, V. S., Muravyov, V. V., Shalatonin, V. I., 1985. State and Main Problems of MM Generator Development Based on Gunn Diodes. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Radioelektronika*, **28**(10), pp. 42–50 (in Russian).
17. Tager, A. S., Wald-Perlov, B. M., 1968. *Avalanche Diodes and their Application in Microwave Engineering*. Moscow: Sov. Radio Publ. (in Russian).
18. Kosarev, E. A., 1966. Spectrum Rarefaction of Open Resonator using Eshelette Grating. *Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, **3**(7), pp. 295–298 (in Russian).
19. Feldstain, A. L., Yarvitch, L. P., 1971. *Synthesis of Quadro- and Eght-Port for Microwave*. Moscow: Svyaz' Publ. (in Russian).
20. Borodkin, A. I., Bulgakov, B. M., Matveeva, V. A., Smorodin, V. V., 1979. *Generator*. USSR Authors' Certificate 675,579 (in Russian).
21. Borodkin, A. I., Bulgakov, B. M., Matveeva, V. A., Rodionov, A. B., Smorodin, V. V., 1979. Millimeter Waveband Semiconductor Generator with Quasioptical Resonance System. *Pis'ma Zh. Tekh. Fiz.*, **5**, pp. 285–288 (in Russian).
22. Borodkin, A. I., Bulgakov, B. M., Matveeva, V. A., Rodionov, A. V., Smorodin, V. V., Shestopalov, V. P., 1979. Semiconductor Generator with Quasi-Optical Resonance System. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. Elektronika SVCh*, **3**, pp. 13–19 (in Russian).
23. Borodkin, A. I., Bulgakov, B. M., Smorodin, V. V., 1980. Semiconductor Generator with Oscillating System – Open Resonator with Reflective Diffraction Grating. *Pisma Zh. Tekh. Fiz.*, **19**, pp. 1189–1193 (in Russian).
24. Arendar, V. N., Prokhorov, E. D., 1973. Frequency Jumping in Gunn Generator. *Radiotekhnika i elektronika*, **18**(6), pp. 1320–1322 (in Russian).
25. Shestopalov, V. P., Kirilenko, A. A., Masalov, S. A., Sirenko, Yu. K., 1986. *Resonant Wave Scattering. Vol. 1. Diffraction Gratings*. Kiev: Naukova Dumka Publ. (in Russian).
26. Kotserszhinskii, B. L., Matsusskii, E. A., Pershin, N. A., Taranenko, V. P., 1987. Solid-State Oscillator with Quasi-Optical Resonant Systems. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Radioelektronika*, **30**(10), pp. 13–23 (in Russian).
27. Mizuno, K., Ajikata, T., Hieda, M., Nakayama, M., 1988. Quasi-Optical Resonator for MM and Submm Wave Solid-State Sources. *Electron. Lett.*, **24**(13), pp. 792–793.
28. Nagano, S., Ohnaka, S., 1972. A highly stabilized K_a-band Gunn oscillator. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **20**(2), pp. 174–176.
29. Bulgakov, B. M., Skresanov, V. N., Fisun, A. I., Fursov, A. M., 1981. Study of Quasi-Optical Open resonator with One or Several Conductive Planes between Reflectors. In: *Radiotekhnika*. Kharkov: Kharkov Institute of Mining Machinery, Automation and Computer Engineering Publ., **56**, pp. 21–29 (in Russian).
30. Bulgakov, B. M., Kochin, V. N., Skresanov, V. N., Fisun, A. I., Shubnyi, A. I., 1983. Excitation of Long Rectangular Channel in Plane reflector of Semispherical Open Resonator. In: *Fizika i Tekhnika MM i SubMM Voln*. Kiev: Naukova Dumka Publ., pp. 44–49 (in Russian).
31. Bulgakov, B. M., Skresanov, V. N., Fisun, A. I., Shubnyi, A. I., 1984. Selection of Longitudinal Modes of Millimeter Wave Open Resonator with Longitudinal Resonance Heterogeneities. *Radiotekhnika i Elektronika*, **29**(5), pp. 894–900 (in Russian).
32. Bulgakov, B. M., Skresanov, V. N., Fisun, A. I., 1983. Study of Open Resonators with Rectangular Heterogeneities on Reflectors. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Radiofiz.*, **26**(4), pp. 447–454 (in Russian).
33. Valitov, R. A., Makarenko, B. I. eds., 1984. *Measurements at Millimeter and Submillimeter Waves*. Moscow: Radio i Svyaz' Publ. (in Russian).
34. Belous, O. I., Bulgakov, B. M., Fisun, A. I., Fursov, A. M. *Microwave generator*. USSR Authors' Certificate 1,309,870 (in Russian).
35. Valitov, R. A. ed., 1969. *Submillimeter Wave Technology*. Moscow: Sov. Radio Publ. (in Russian).
36. Nikolskii, V. V., Nokolskaya, T. I., 1983. *Decomposition Approach to Electrodynamical Problems*. Moscow: Nauka Publ. (in Russian).
37. Mittra, P., Li, S., 1974. *Analytical Methods in Waveguide Theory*. Translated and ed. from English by G. V. Voskresenskiy. Moscow: Mir Publ. (in Russian).
38. Kirilenko, A. A., Tkachenko, V. I., 1996. Systems of Electrodynamical Simulation of SHF-UNF Devices.

- Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Radioelektronika*, **39**(9), pp. 17–28 (in Russian).
39. Belous, O. I., Kirilenko, A. A., Fisun, A. I., 2008. Quasi-Optical resonant Systems in Solid-State Devices of MM and Submm Wavebands. In: V. M. Yakovenko, ed. 2008. *Radiofizika i elektronika*. Kharkov: IRE NAS of Ukraine Publ. **13**(spec.iss.), pp. 376–390 (in Russian).
 40. Fisun, A. I., 1998. Method for analysis of open resonator with Step-like deformation of mirrors. *Electron. Lett.*, **34**(2), pp. 192–193.
 41. Belous, O. I., Kirilenko, A. A., Tkachenko, V. I., Fisun, A. I., Fursov, A. M., 1994. Excitation of an open stripline resonator by a plane waveguide. *Radiophys. Quantum Electron.*, **37**(3), pp. 181–189.
 42. Fisun, A. I., Tkachenko, V. I., Belous, O. I., Kirilenko, A. A., 2000. Excitation of Oscillations in Open Resonators with Eshellette and Corner-Eshellette Mirrors. *Radiotekhnika i elektronika*, **45**(5), pp. 632–639 (in Russian).
 43. Tkachenko, V. I., Fisun, A. I., 1998. Simulation of natural oscillations in a corner-eshellette open resonator. *Telecommunications and Radio Engineering*, **52**(2), pp. 42–46.
 44. Fisun, A. I., 1997. Monofrequency excitation of open resonator with inclined comb grating. *Int. J. Infrared Millimeter Waves*, **18**(7), pp. 2353–2367.
 45. Belous, O. I., Kirilenko, A. A., Fisun, A. I., 1998. Quasi-monofrequency Spectra of Open Resonator with Comb Grating. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Radioelektronika*, **41**(4), pp. 8–13 (in Russian).
 46. Fisun, A. I., 1997. Millimeter wave band open resonators with additive restriction of resonant space. *Int. J. Infrared Millimeter Waves*, **18**(12), pp. 2353–2367.
 47. Fisun, A. I., 1997. High Merit Factor Resonances in Open Resonators with Partial Limited Region. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, **2**, pp. 97–102 (in Russian).
 48. Fisun, A. I., 1997. Constructive synthesis of dispersive oscillation systems of quasi-optical solid-state millimeter wave sources. *Electromagnetic Waves and Electronic Systems*, **2**(5), pp. 37–43.
 49. Glamazdin, V. V., Natarov, M. P., Skresanov, V. N., Shubnyi, A. I., 2011. Radiation Losses of Pointed Coupled Elements of Open Resonator. *Radiofiz. Elektron.*, **2**(16)(3), pp. 12–25 (in Russian).
 50. Glamazdin, V. V., Natarov, M. P., Skresanov, V. N., Shubnyi, A. I., 2009. Excitation Efficiency of Quasi-Optical Open Resonator from Waveguide. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Radiofiz.*, **52**(3), pp. 231–249 (in Russian).
 51. Bulgakov, B. M., Skresanov, V. N., Fisun, A. I., Shubnyi, A. I., 1984. Power Characteristics of Quasi-Optical Gunn Diode Oscillator. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. Elektronika SVCh*, **3**(363), pp. 13–19 (in Russian).
 52. Belous, O. I., Bulgakov, B. M., Skresanov, V. N., Fisun, A. I., Shubnyi, A. I., 1988. Quasi-Optical Generator with Radial-Waveguide Excitations. *Instrum. Exp. Tech.*, **1**, pp. 125–127 (in Russian).
 53. Bulgakov, B. M., Skresanov, V. N., Fisun, A. I., Shubnyi, A. I., 1987. Quasi-Optical Gunn Generator with Increased Tuning Band. *Ibid.*, pp. 114–116 (in Russian).
 54. Arkhipov, A. V., Belous, O. I., Bulgakov, B. M., Fisun, A. I., Fursov, A. M., 1991. Quasi-Optical Gunn- and IMPATT-Diode with Open Resonator. *Instrum. Exp. Tech.*, **3**, pp. 106–109 (in Russian).
 55. Belous, O. I., Sukhoruchko, O. N., Fisun, A. I., 2006. Power and Spectrum Performance of Quasi-Optical Solid-State MM-Wave Oscillator. *Telecommunications and Radio Engineering*, **65**(16), P. 1501–1523.
 56. Vyrovoyi, S. I., Gumennyi, S. N., Tsvirko, Yu. A., 1976. Comparison One-Contour Circuit of Stabilization of Oscillators Based on Active Two Poles. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. Elektronika SVCh*, **3**, pp. 47–58 (in Russian).
 57. Borodkin, A. I., Bulgakov, B. M., Skresanov, V. N., Natarov, M. P., Shubnyi, A. I., 1991. Two-Frequency Two-Diode Quasi-Optical MM-Wave Generator. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Radioelektronika*, **3**, pp. 96–98 (in Russian).
 58. Fursov, A. M., Bulgakov, B. M., Fisun A. I., 1983. Two-frequency asynchronized stable generation of the Gunn diode in open resonant system. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Radioelektronika*, **26**(10), pp. 80–81 (in Russian).
 59. Mink, J. N., 1986. Quasi-Optical Power Combining of Solid-State Millimeter-Wave Sources. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **34**(2), pp. 273–279.
 60. Borodkin, A. I., Bulgakov, B. M., Smorodin, V. V., 1980. Power Combining of Several Diodes in Quasi-Optical Resonant System. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. Elektronika SVCh*, **3**, pp. 14–19 (in Russian).
 61. Bulgakov, B. M., Natarov, M. P., 2003. Study of Excitation Efficiency of Open Resonant System. In: V. M. Yakovenko, ed. 2003. *Radiofizika i elektronika*. Kharkov: IRE NAS of Ukraine Publ. **8**(2), pp. 175–179 (in Russian).
 62. Bulgakov, B. M., Natarov, M. P., Skresanov, V. N., 2006. Excitation Characteristics of Open Resonator by Electrical Dipole System. In: V. M. Yakovenko, ed. 2006. *Radiofizika i elektronika*. Kharkov: IRE NAS of Ukraine Publ. **11**(3), pp. 366–371 (in Russian).
 63. Fisun, A. I., Belous, O. I., 1999. Quasi-Optical Solid-State Source of Radiation: Evolution Principles, Development, and Promising of Implementation. *Zarubezhnaya radioelektronika. Uspekhi sovremennoy radioelektroniki*, **4**, pp. 41–64 (in Russian).
 64. Skresanov, V. N., Glamazdin, V. V., Fisun, A. I., Shubnyi, A. I., 2016. Active Quasi-Optical Refractometer in the extremely High Frequencies (EHF) Band. *Telecommunications and Radio Engineering*, **75**(1), pp. 83–96.
 65. Krasov, P., Fisun, A., Arkhypova, K., 2015. *Microwave Device for Permittivity Measurement of Biological Liquids*. Ukraine Pat. 109779 (in Ukrainian).
 66. Arkhypova, K., Krasov, P., Fisun, A., Nosatov, A., Lychko, V., Malakhov, V., 2017. Microwave Dielectrometry as a Tool for the Characterization of Blood Cell Membrane Activity for in vitro Diagnostics. *Int. J. Microwave Wireless Technolog.*, **9**(8), pp. 1569–1574.
 67. Krasov, P. S., Belous, O. I., Volokh, A. I., Fisun, A. I., Malakhov, V. A., 2018. *Millimeter Wave Effects in Medicine: from Theory to Practice*. Kharkov: Original Publ. (in Russian).
 68. Storozhenko, I. P., 2007. Frequency Characteristics of Diodes with Interval Electron Transfer that Based on Variband $\text{In}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ with Various Cathode Con-

tacts. *J. Commun. Technol. Electron.*, **52**(10), pp. 1158–1164.

Рукопись поступила 29.10.2018.

O. I. Bilous, A. A. Kirilenko, M. P. Natarov,
S. P. Sirenko, A. I. Fisun, A. I. Shubny

QUASI-OPTICAL MILLIMETER WAVE SOLID-STATE OSCILLATORS

Subject and purpose. Open resonant systems as the oscillating circuits of the solid-state oscillators and characteristics of the quasi-optical oscillators themselves are the objects of the investigation. The aim of the work is to review the scientific results on the development and research of quasi-optical solid-state oscillators in the department of solid-state electronics from the inception of the idea to the development of real radiation sources with enhanced spectral characteristics.

Method and methodology. Experimental and theoretical methods for studying the main parameters including spectrum, field topology of open resonators with resonant and non-resonant inhomogeneities are analyzed. For this purpose, the waveguide model of the resonator, the decomposition method and the generalized scattering matrix method, as well as experimental methods for measuring the spectrum, power, frequency, are used.

Results. The results of the study and development of quasi-optical solid-state oscillators are: the level of frequency noise is no more than 115...120 dB/Hz; power of generation at the first harmonic is up to 130...150 mW at a frequency of 40-50 GHz; at the second harmonic – up to 10 mW at a frequency of 60...90 GHz; generation power is not less than 3 mW at a frequency of 150 GHz; long-term frequency instability is $3 \cdot 10^{-8}$ at active temperature control $\Delta T \sim 0,1$ °C.

Conclusion. The paper analyzes the areas of application of solid-state quasi-optical oscillators: heterodynes in receiving devices, refractometry, dielectrometry and other fields where high stability and low level of frequency noise are needed. The perspective directions of the search for new physical phenomena to create nonlinear elements in the terahertz frequency range are determined.

Key words: quasi-optics, open resonator, diffraction grating, decomposition, generalized scattering matrix, impedance, nonlinear component, the Gunn diode, IMPATT diode, quasi-optical solid-state oscillator, frequency noise, frequency stability, second harmonic.

O. I. Білоус, А. О. Кириленко, М. П. Натаров,
С. П. Сіренко, А. І. Фісун, О. І. Шубний

КВАЗІОПТИЧНІ ТВЕРДОТІЛЬНІ ГЕНЕРАТОРИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ

Предмет і мета роботи. Предметом дослідження є відкриті резонансні системи, що використовуються в якості коливальних контурів квазіоптичних твердотільних генераторів, і власне характеристики квазіоптичних генераторів. Мета роботи – огляд наукових результатів стосовно розробки і дослідження квазіоптичних твердотільних генераторів у відділі твердотільної електроніки від зародження ідеї до розробки реальних джерел випромінювання з підвищеними спектральними характеристиками.

Методи і методологія роботи. Проаналізовано експериментальні та теоретичні методи дослідження основних параметрів: спектра, топології полів відкритих резонаторів з резонансними і нерезонансними неоднорідностями. З цією метою використано хвилевідну модель резонатора, метод декомпозиції та узагальненої матриці розсіювання, а також експериментальні методи вимірювання спектра, потужності, частоти.

Результат роботи. Досліджено та розроблено квазіоптичні твердотільні генератори з рівнем частотного шуму не гірше $-115...120$ дБ/Гц, потужністю генерації на першій гармоніці – до $130...150$ мВт на частоті $40...50$ ГГц, на другій гармоніці – до 10 мВт на частоті $60...90$ ГГц. Потужність генерації на частоті 150 ГГц – не менше 3 мВт. Довготривала нестабільність частоти складає $3 \cdot 10^{-8}$ при активному термостату ванні $\Delta T \sim 0,1$ °C.

Висновок. У роботі проаналізовано області застосування твердотільних квазіоптичних джерел: гетеродини в приймальних пристроях, рефрактометрія, діелектрометрія та інші напрямки, де необхідні висока стабільність і низький рівень частотних шумів. Визначено перспективні напрямки пошуку нових фізичних явищ для створення нелінійних елементів у терагерцовому діапазоні частот.

Ключові слова: квазіоптика, відкритий резонатор, дифракційна решітка, декомпозиція, узагальнена матриця розсіювання, імпеданс, нелінійний елемент, діод Ганна, лавинно-пролітний діод, квазіоптичний твердотільний генератор, частотний шум, стабільність частоти, друга гармоніка.