



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.10.1>

УДК: 621.382.32;621.373

КВАЗИОПТИЧЕСКОЕ СЛОЖЕНИЕ МОЩНОСТИ И УПРАВЛЕНИЕ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ В МАТРИЦАХ МИКРОПОЛОСКОВЫХ АНТЕНН-ГЕНЕРАТОРОВ

В.Е. Любченко, С.А. Телегин

**ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал
141190, г. Фрязино, пл. Введенского, 1**

Статья поступила в редакцию 15 июля 2025 г.

Аннотация. Исследованы возможные способы сложения мощности и управления диаграммой направленности излучения матриц микрополосковых антенн-генераторов в СВЧ-диапазоне электромагнитных волн с целью использования их в качестве активных фазированных решеток (АФАР). Продемонстрировано сложение мощности в пространстве для активных антенн на диодах Ганна и полевых транзисторах, а также изучены условия синхронизации отдельных элементов в матрице антенн. Исследована возможность синхронизации генераторов и управления диаграммой направленности с применением полупрозрачного диэлектрического отражателя.

Ключевые слова: СВЧ, диаграмма направленности, логопериодическая антенна, полевой транзистор.

Финансирование: Работа выполнена в рамках госзадания № 075-00395-25-00 ИРЭ РАН им. В.А.Котельникова по теме FFWZ-2025-0002.

Автор для переписки: Телегин Сергей Александрович, telegins@bk.ru.

Введение

Полупроводниковые приборы составляют важную составляющую элементной базы современных радиосистем СВЧ и КВЧ диапазонов в качестве активных элементов приемных и передающих устройств. Их отличает высокая надежность, способность работать в широком диапазоне условий окружающей среды, возможность создания гибридных и монолитных интегральных схем и другие качества, важные для практики. Проблемой являются энергетические показатели, прежде всего выходная мощность генераторов, которая резко падает с увеличением рабочей частоты [1], и решение проблемы не представляется возможным иначе как путем сложения в пространстве мощностей нескольких источников излучения, в частности, генераторов, выполненных в виде антенно-связанных активных элементов, т.н. активных микрополосковых антенн. Этому способствует и тот факт, что с ростом рабочей частоты характерные размеры антенн уменьшаются, так что источник излучения может быть выполнен в виде многоэлементной матрицы антенно-связанных полупроводниковых диодов или транзисторов. Многоэлементная система источников излучения позволяет решать не только проблему обеспечения необходимого уровня выходной мощности, но и проблему формирования диаграммы направленности излучения, в том числе с возможностью электронного сканирования лучом. Такие структуры называются активными фазированными антенными решетками (АФАР) и успешно используются в системах радиосвязи и радиолокации [2].

Известны различные схемы построения устройств суммирования мощности источников излучения СВЧ и КВЧ диапазона, использующих полупроводниковые приборы в качестве активных элементов. Это могут быть многоканальные проводные цепи, содержащие устройства для генерации, усиления и управления фазой сигналов, или квазиоптические зеркальные или линзовые системы, которые позволяют управлять не отдельными лучами, а связанными группами лучей [3]. Для построения АФАР на основе микрополосковых антенн-генераторов миллиметрового диапазона волн

квазиоптические конструкции представляют особый интерес, поскольку позволяют уменьшить потери, связанные с наличием межсоединений.

1. Микрополосковая антенна-генератор

Идея создания источника излучения в виде активной антенны или антенны-генератора (АГ), в которой излучающая антенна непосредственно включается в схему генератора в качестве нагрузки, известна давно. По свидетельству литературных источников, такой генератор был создан в 1928 г. с использованием вакуумных электронных ламп, однако практического использования эта схема тогда не получила. В более близкие нам 60-е и последующие годы к идее активных антенн и антенных решеток вернулись, используя в качестве активных элементов полупроводниковые приборы, как двухэлектродные (диоды Ганна, лавинно-пролетные диоды, фотопроводящие структуры), так и транзисторы. В качестве излучателей используются различные типы микрополосковых антенн на диэлектрической подложке (диполь, галстук-бабочка, логопериодические, спиральные и др.). Для работы в широкой полосе частот, в многочастотном режиме, и в режиме с перестройкой частоты представляют особый интерес антенны логопериодического типа. Антенна представляет собой пластину из диэлектрика с металлическим покрытием специальной формы (Рис. 1). Тыльная сторона диэлектрика может быть также покрыта металлом или расположена вблизи металлического экрана.

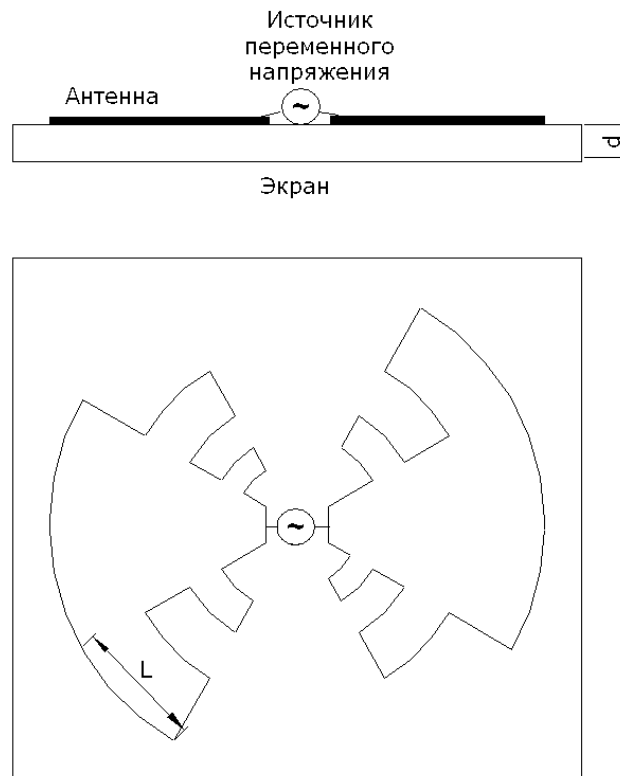


Рис. 1. Активная логопериодическая антенна:
 d – толщина подложки, L – длина зубца.

Конструкция пассивного излучателя в виде логопериодической антенны (ЛПА) была впервые предложена в 1957 г. [4]. Позднее разработкой данного типа антенн занялись ведущие мировые фирмы и были проведены специальные исследования в широком диапазоне частот. У большинства широкополосных антенн рабочая полоса частот, выраженная через отношение $f_{\max}/f_{\min}$ редко превышает 4:1, причем в этой полосе неизменно лишь входное сопротивление антенны, а диаграмма направленности излучения зависит от частоты. Как правило, с ростом частоты происходит сужение главного лепестка, но также увеличивается количество боковых лепестков. У логопериодических антенн данный эффект менее заметен, и диаграмма направленности практически не изменяется во всей рабочей области частот. Также данный тип антенн обладает достаточной добротностью за счет многорезонаторной структуры. Нижние частоты определяются только габаритными размерами антенны, а максимальная верхняя частота зависит от размеров и типа питающей системы,

а также точности изготовления антенны. Предел отношения частот в случае ЛПА увеличивается до 20:1 и более [5].

С целью повышения эффективности генерации толщину диэлектрической подложки часто выбирают равной четверти длины волны и обратную сторону покрывают металлом. В результате антенна представляет собой набор колебательных контуров с частотами, кратными $f_0\sqrt{2}$ (где f_0 – низшая резонансная частота антенны, определяемая наибольшим зубцом антенны) и обладает на этих частотах достаточно большой (> 100) добротностью [6].

Компьютерное моделирование и оценка высокочастотных параметров антенн различного типа в диапазоне частот от 7 до 20 ГГц подтверждают применимость ЛПА для работы в широкополосном и многочастотном режимах. Используемая методика позволила также рассчитать распределение интенсивности излучения по площади антенны. Высокочастотное поле сосредоточено в основном вблизи концов зубьев, что позволяет выбрать наиболее подходящие места для подключения источника постоянного напряжения [7].

2. Логопериодическая антенна с диодом Ганна

Диод Ганна удобен в качестве элемента активной антенны тем, что обладает свойствами автогенератора. Исследование генерации в ЛПА с диодом Ганна проведено в [8]. Использовались диоды в микрокорпусном ($0,3 \times 0,3$ мм) исполнении с малым рабочим током (~ 100 мА) для обеспечения устойчивого теплового режима при непрерывной генерации. Диоды имели динамическое сопротивление ~ 200 Ом, что обеспечивало хорошее согласование с антенной (расчетное сопротивление 188 Ом). Корпус ДГ припаивался непосредственно на одно из плеч антенны, а положительный электрод соединялся с другим плечом золотой фольгой (рис. 2).

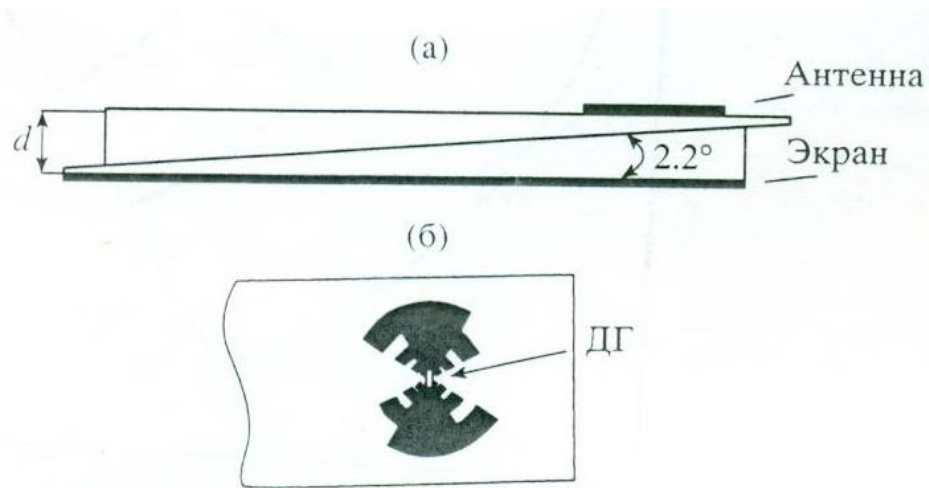


Рис. 2. ЛПА с диодом Ганна: а) в разрезе; б) вид сверху.

Диэлектрической подложкой служил поликор ($\epsilon \sim 10$), в виде притертых клиньев, что позволяло изменять эффективную толщину подложки. Измерения в диапазоне частот 25-60 ГГц показали, что излучаемая мощность АГ (до 5 мВт) близка к мощности, генерируемой таким же диодом в волноводном резонаторе. Наибольшая эффективность генерации, в том числе минимальная ширина диаграммы направленности, достигается при толщине диэлектрического слоя, близкой к четверти длины волны в диэлектрике. В этих условиях достигается и минимальная ширина спектра генерации (250 кГц), нестабильность частоты не превышает 5×10^{-5} . Частота генерации может перестраиваться при облучении АГ от внешнего источника при уровне мощности 0,1 % от мощности излучения АГ, полоса захвата составляла 10 МГц. При размещении двух АГ на общей диэлектрической подложке наблюдалась взаимная синхронизация при условии, что собственные частоты отличались менее, чем на 5 МГц.

Таким образом, логопериодическая антенна на диэлектрической подложке с металлическим экраном служит резонатором для диода Ганна и одновременно направленным излучателем, что, с учетом возможности автодинного приема сигналов, делает его привлекательным для использования в различных устройствах СВЧ и КВЧ диапазона. Недостатком АГ на диодах Ганна при использовании в качестве источника излучения является низкий к.п.д.

3. Логопериодическая антенна с полевым транзистором

Включение транзистора в микрополосковую антенну несколько сложнее, чем включение диода Ганна (рис. 3).

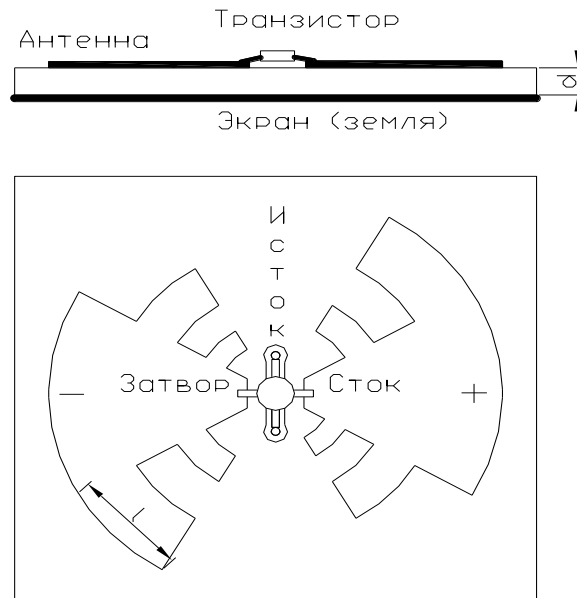


Рис. 3. Конструкция логопериодической антенны с транзистором:
а) в разрезе; б) вид сверху.

Размеры: d – толщина подложки, l – длина зубца.

Во-первых, для работы транзистора необходимы два источника постоянного напряжения, а во-вторых, антенна является не только нагрузкой автогенератора, но и осуществляет роль цепи обратной связи [9].

В качестве активных элементов успешно применяются транзисторы в корпусном исполнении. Постоянное напряжение на затвор и на сток подается непосредственно на плечи антенны, а общая точка (земля) присоединяется к истоку транзистора. Важную роль играют параметры транзистора и их зависимость от частоты. Прежде всего это касается коэффициента усиления (параметр S_{21}). Для устойчивой работы АГ он должен превышать 10 дБ, что не всегда выполняется (рис. 4).

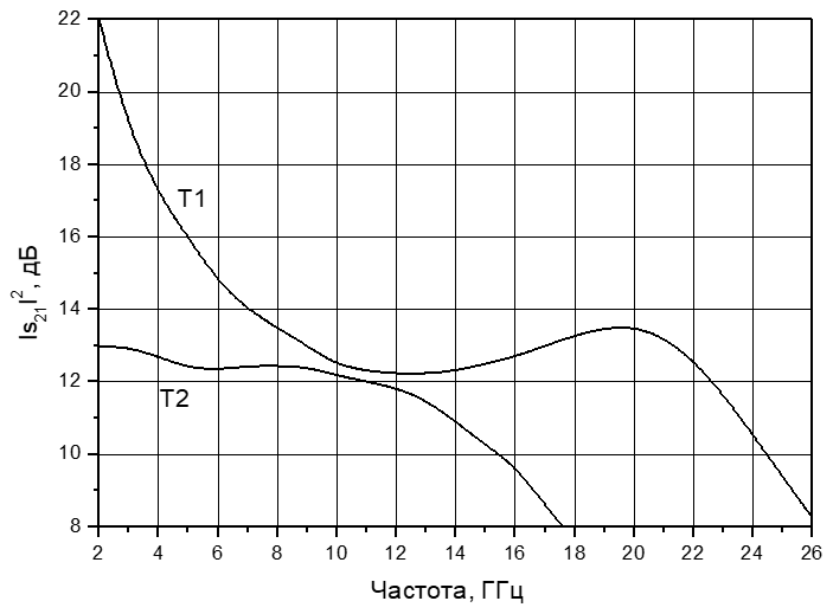


Рис. 4. Примеры частотной зависимости коэффициента усиления транзисторов. T1 – NE350184C, T2 – NE3210S01.

Как правило, нижняя частота генерации определяется длиной наибольшего зубца, которая примерно равна четверти длины волны в свободном пространстве. Толщина подложки, т.е. расстояние между антенной и отражающим экраном в процессах генерации играет очень важную роль. Максимальная мощность генерации может быть получена при толщине, равной четверти длины волны в диэлектрике (рис. 5).

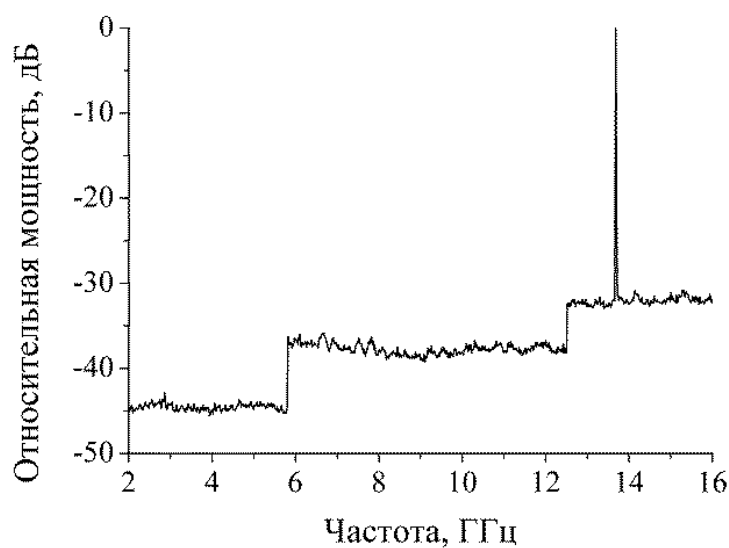


Рис. 5. Спектр одночастотной генерации. Ширина линии менее 1 МГц.

При толщине подложки, много меньшей четверти длины волны на частоте, соответствующей длине наибольшего зубца, а также при недостаточно большом коэффициенте усиления транзистора на этой частоте, могут возникнуть колебания на более низкой частоте, соответствующей радиусу плеча антенны. По-видимому, сказывается то, что на этой частоте транзистор имеет достаточный коэффициент усиления и логопериодическая антенна работает, как антенна типа диполь. Таким образом, важным условием генерации на заданной частоте является использование транзисторов с достаточно высоким коэффициентом усиления и толщины подложки, равной четверти длины волны в диэлектрике, что обеспечивает нахождение антенны в пучности электрического поля генерируемого излучения.

Условия генерации СВЧ колебаний в АГ на основе микрополосковой антенны логопериодического типа, интегрированной с полевым транзистором подробно исследованы [10] и позволяют использовать данную конструкцию в качестве базовой для создания на основе доступной элементной базы источников излучения в диапазоне частот 10-40 ГГц с выходной мощностью порядка 10 мВт и к.п.д. около 20 %. АГ на основе логопериодической антенны успешно интегрируются с диэлектрическими волноводами, в том числе с волноводами, встроенными в диэлектрическую подложку (SIW), и допускают использование различных видов модуляции генерируемых сигналов.

4. Проблемы построения АФАР с использованием микрополосковых антенн-генераторов

Как было указано выше, преимуществом микрополосковых антенн-генераторов является возможность формировать из них активные фазированные антенные решетки (АФАР) и осуществлять сложение мощностей многих АГ, а также управлять диаграммой направленности излучения. Однако реализация этих задач в квазиоптической конструкции связана с особенностями распространения электромагнитных волн и с взаимным влиянием АГ в процессе генерации излучения. Роль этих факторов исследована детально и представлена ниже.

4.1. Синхронизация антенн-генераторов

При использовании АГ в качестве элементов фазированных антенных решеток, в которых они расположены на одной общей диэлектрической подложке, возможны два способа синхронизации: 1) использование эффекта возбуждения антеннами поверхностных волн в диэлектрической подложке; 2) облучение антенны внешним электромагнитным полем. На рис. 6 показаны спектры излучения АГ, работающих независимо, а также результирующий спектр при одновременном включении всех четырех антенн.

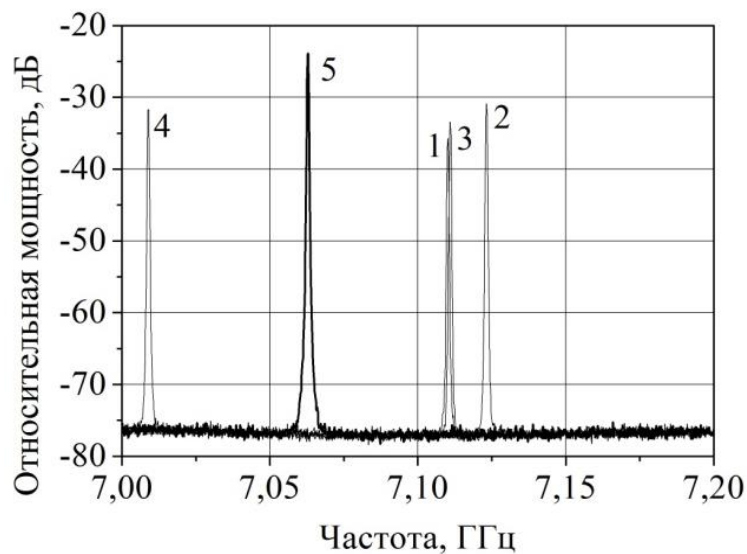


Рис. 6. Спектры излучения антенн, работающих независимо (1-4), и включенных одновременно (5).

Видно, что, несмотря на довольно большой разброс частот (~ 100 МГц), все они начинают совместно работать на одной частоте, не совпадающей, в общем случае, с собственными частотами АГ. Особенно эффективно взаимодействие двух близко расположенных антенн: их суммарная излучаемая мощность даже превышает сумму мощностей, генерируемых каждой АГ в отдельности. По-видимому, воздействие сигнала от соседнего АГ повышает эффективность работы транзистора в схеме АГ. Однако увеличение количества взаимодействующих источников излучения приводит к хаотизации фазовых соотношений и когерентного сложения мощностей не происходит. Когерентность колебаний может обеспечить единый источник синхросигнала [11].

4.2. Синхронизация одиночной антенны-генератора внешним сигналом

Под воздействием внешнего сигнала собственная частота АГ может значительно перестраиваться. При этом мощность, необходимая для синхронизации одной АГ, на порядок меньше генерируемой. Было обнаружено, что внешняя синхронизация одиночной АГ приводит к существенному изменению формы диаграммы направленности и генерируемой мощности (рис. 7), что, как и в случае взаимодействия АГ, расположенных на общей подложке, может быть обусловлено изменением режима работы транзисторов.

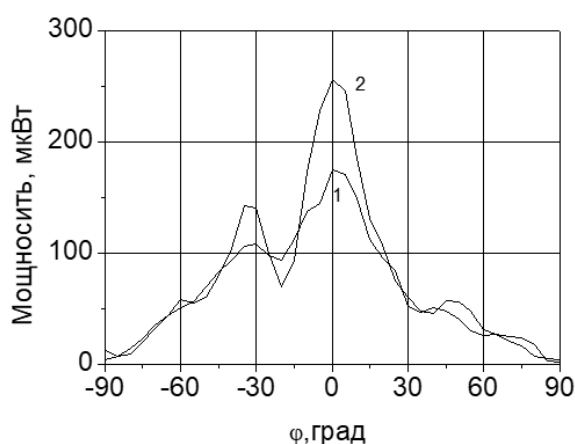


Рис. 7. Одиночная антенна-генератор без внешнего воздействия (1) и синхронизированная внешним полем (2).

4.3. Синхронизация матрицы АГ внешним полем

Исследовалась возможность синхронизации внешним полем как работающих совместно и уже взаимно синхронизированных антенн-генераторов, так и АГ, работающих автономно. При одинаковых напряжениях питания транзисторов собственные частоты АГ отличаются более чем на 50 МГц, и, как правило, они не синхронизируются взаимно. При уменьшении расстояния между соседними частотами до 50 МГц (путем регулировки питания) излучатели взаимно синхронизируются, как это описано выше.

В случае уже взаимно синхронизированных АГ, диапазон частот внешнего сигнала, в котором имеет место синхронизация на частоте внешнего сигнала (полоса внешней синхронизации) зависит от количества работающих

антенн-генераторов и плотности потока мощности электромагнитного поля, воздействующего на АГ (рис. 8). Из рисунка видно, что при увеличении количества одновременно работающих АГ полоса синхронизации внешним сигналом уменьшается. Полоса внешней синхронизации монотонно растет по мере увеличения плотности потока мощности электромагнитного поля, воздействующего на матрицу.

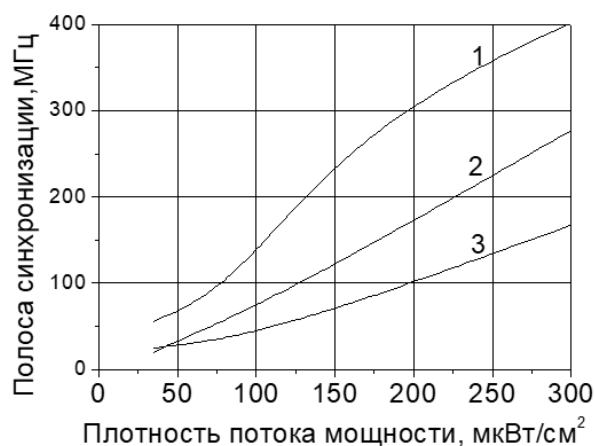


Рис. 8. Зависимость полосы внешней синхронизации для отдельно взятой АГ (1) и линейных (одномерных) матриц из двух (2) и трех (3) взаимно синхронизированных АГ от плотности потока мощности синхросигнала.

4.4. Возможности сложения мощностей и управления диаграммой направленности в многоэлементных матрицах микрополосковых антенн-генераторов.

Среди возможных конструкций квазиоптических многоэлементных источников электромагнитного излучения (АФАР), рассмотренных в [3], для использования микрополосковых АГ наиболее подходят линзовые и зеркальные системы, в которых излучение распространяется по нормали к плоскости антенны [12]. При этом проблемы сложения мощностей и сканирования лучом могут решаться по-разному, в зависимости от предназначения устройства. Если речь идет о двух-трех АГ, расположенных на общей подложке, то, как показано в [10], вполне достаточно использовать их взаимную синхронизацию. Если когерентность не требуется и излучение не взаимодействующих между собой АГ

представляет собой набор гауссовых пучков, оно может использоваться для передачи энергии или информации в режиме т.н. энергетического приема. В этом случае в качестве приемника используется болометр. Примером может служить формирование спектра шума [13]. Если же необходимо обеспечить когерентное сложение мощности нескольких источников, то для матрицы независимых АГ требуется источник синхросигнала.

В классических схемах АФАР для управления лучом используются фазовращатели, помещаемые между источником сигнала от единого генератора и отдельными излучающими элементами [2].

Возможность управления ДН в двумерных матрицах АГ была продемонстрирована авторами [14,15]. Меняя собственные частоты генераторов на диодах Ганна, авторы показали возможность управления ДН в пределах 25° для конструкции АГ 2×2 и 15° в случае матрицы 3×3 . Дополнительно для уменьшения нежелательного взаимодействия АГ путем излучения были использованы специальные терминирующие линии с резистивной нагрузкой.

Как показали наши исследования [10], диаграммой направленности матрицы антенн-генераторов также можно управлять, помещая полупрозрачное зеркало перед матрицей АГ. При размещении вблизи матрицы антенн полупрозрачного зеркала из поликора (рис. 9, 10), под воздействием отраженного от зеркала сигнала происходит изменение взаимной связи между одиночными АГ, что в определенной конфигурации приводит к их синхронизации и сложению мощностей в пространстве. При этом разброс собственных частот колебаний отдельных АГ может достигать 150 МГц, что в отсутствии зеркала возможно только при значительных мощностях внешней синхронизации.

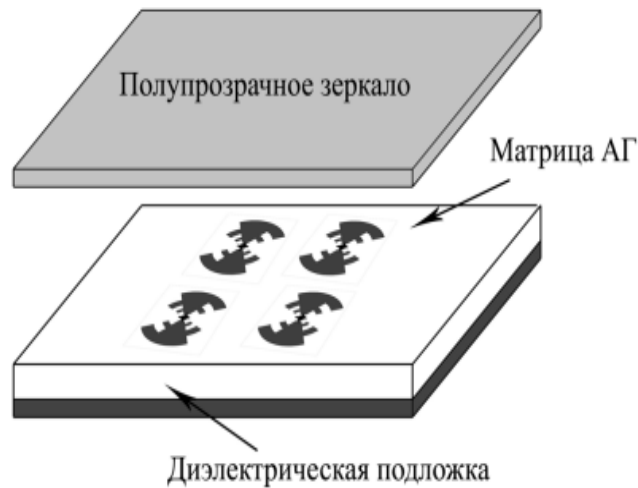


Рис. 9. Схема размещения матрицы АГ в открытом резонаторе с полупрозрачным зеркалом.

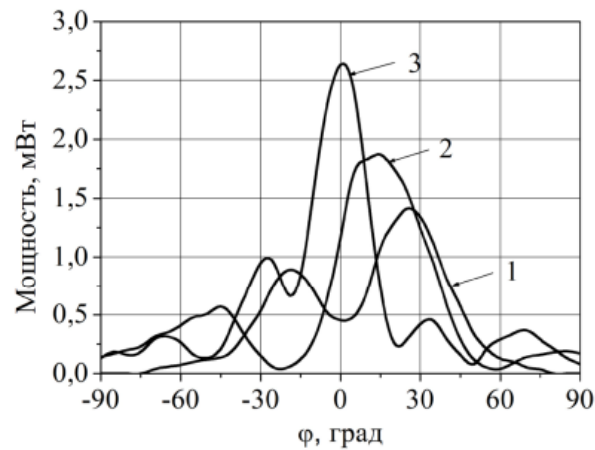


Рис. 10. Диаграммы направленности излучения матрицы АГ в условиях синхронизации и сложения мощностей: 1 – в отсутствие синхронизации; 2 – взаимная синхронизация; 3 – в присутствии зеркала.

Из рисунка 10 видно, что направление основного луча в присутствии полупрозрачного зеркала меняется в пределах $\sim 30^\circ$ по сравнению с несинхронизированной матрицей АГ, а также до 15° в случае начальной синхронизации АГ без зеркала. Таким образом, управляя коэффициентом взаимной связи между АГ также возможно изменять направление диаграммы направленности без использования передающих линий между элементами.

4.5. Микрополосковые антенны-генераторы для АФАР миллиметрового и субмиллиметрового диапазона волн

В отличие от диапазона СВЧ диапазон КВЧ (крайне высокие частоты), часто именуемый субтерагерцовым диапазоном, характеризуется интересом к использованию диэлектрических волноводов вместо полых металлических волноводов. Микрополосковые антенны, в том числе логопериодические, успешно интегрируются с диэлектрическими волноводами при использовании в качестве активных элементов двухэлектродных приборов, например, диодов Ганна или фотомиксеров. Последние особенно интересны в качестве источников излучения в диапазоне частот, близком к терагерцовому. Несмотря на сравнительно небольшую выходную мощность излучения, в пределах 10 мкВт, фотомиксеры успешно применяются в спектроскопии и медицинской диагностике [16].

Заключение

В результате исследований продемонстрированы возможности использования логопериодической микрополосковой антенны-генератора в качестве элемента матриц активных АГ. Показана эффективность генерации микроволнового излучения как двухэлектродными, так и трехэлектродными активными элементами, интегрированными с логопериодическим излучателем. В случае одновременного включения нескольких активных элементов на единой диэлектрической подложке наибольшая эффективность сложения мощностей достигается в условиях синхронизации внешним сигналом. Квазиоптическая конструкция с использованием полупрозрачного зеркала позволяет использовать для синхронизации АГ отраженный сигнал, который также изменяет диаграмму направленности излучения многоэлементных матриц. Изменяя расстояние зеркала до активных элементов, мы изменяем взаимную связь между генераторами, тем самым изменяя ДН. В результате продемонстрирована

возможность изменения направления основного луча ДН синхронизированной матрицы из 4-х АГ в пределах 15° .

Финансирование: Работа выполнена в рамках госзадания № 075-00395-25-00 ИРЭ РАН им. В.А.Котельникова по теме FFWZ-2025-0002.

Литература

1. Любченко В.Е. Фундаментальные ограничения и перспективы применения полупроводниковых приборов в радиосистемах миллиметрового диапазона волн. Радиотехника, 2002, № 2, с. 16-27.
2. Шишлов А.В., Денисенко В.В., Левитан Б.А., Топчиев С.А., Шитиков А.М. Активные фазированные антенные решетки – состояние и тенденции развития. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2023 №1 <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.1.5>
3. Michael P. DeLisio, Robert A. York. Quasi-Optical and Spatial Power Combining. IEEE Transactions on microwave theory and techniques, 2002, v. 50, no. 3, pp. 929-931.
4. R. H. DuHamel, D. E. Isbell, Broadband Logarithmically Periodic Antenna Structures, IRE Intern. Convention. Record, 1957, pp. 119-128.
5. Рамзей В. Частотно независимые антенны. – 1968.
6. Любченко В.Е., Юневич Е.О., Котов В.Д., Калинин В.И. Генерация СВЧ колебаний в логопериодической антенне, интегрированной с полевым транзистором. Изв. ВУЗов. Радиофизика, 2009, № 8, с.627-631.
7. Любченко В.Е., Телегин С.А., Юневич Е.О., Моделирование логопериодической печатной антенны методом пространственной матрицы передающих линий, Радиотехника, 2013, № 4, с. 82-86.
8. Любченко В.Е., Котов В.Д., Юневич Е.О. Активная микрополосковая антенна с диодом Ганна. Радиотехника и электроника, 2003, т.48, №10, с 1270-1272.
9. R.A. York, R.C. Compton. Quasi-Optical Power Combining Using Mutually Synchronized Oscillator Arrays. IEEE Trans. Theory Tech., 1991, v.39, NO.6, pp. 1000-1009.

10. Любченко В.Е., Юневич Е. О., Калинин В. И., Котов В. Д., Радченко Д. Е., Телегин С.А. Активные микрополосковые антенны и фазированные решетки на полевых транзисторах. РЭНСИТ: радиоэлектроника, наносистемы, информационные технологии. 2015. Т.7. №1. с. 3-14.
11. R.J. Pogorzelski, A. Georgiadis, Coupled-Oscillator Based Active-Array Antennas, NJ: John Wiley, 2012. – 380 p.
12. S.C. Ortiz, J.Hubert, L.Mirth, E. Schlecht, A. Mortazawi. A high-power Ka.band quazi-optical amplifier array. IEEE Transactions on MTT, vol. 50, pp. 487–494, Feb. 2002.
13. Любченко В.Е., Калинин В.И., Маречек С.В., Радченко Д.Е., Телегин С.А., Юневич Е.О. Управление спектром генерации в многоэлементных матрицах микрополосковых антенн-генераторов, работающих в режиме стохастизации колебаний. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2023. №1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.1.9>
14. Ispir, R., Nogi, S., Sanagi, M., & Fukui, K. Transmission line coupled active microstrip antennas for phased arrays. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 1996, vol. 2, pp. 931-934.
15. R. Ispir, S. Nogi, M. Sanagi, and K. Fukui, Transmission-Line Coupling of Active Microstrip Antennas for One- and Two-Dimensional Phased Arrays, IEICE Transactions on Electronics, 1997, vol. E80-C, no. 9, pp. 1211-1220.
16. Любченко В.Е., Любченко Д.В. Перспективные разработки в области терагерцовой рефлектометрии. Биомедицинская радиоэлектроника, 2018. №2, с. 4-8.

Для цитирования:

Любченко В.Е., Телегин С.А. Квазиоптическое сложение мощности и управление диаграммой направленности излучения в матрицах микрополосковых антенн-генераторов. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.10.1>