

Малозумящие субмиллиметровые системы когерентного приема (современное состояние и тенденции развития)

И. И. Еру

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: eru@rian.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 8 июля 2005 г.

Проведен анализ современного состояния и тенденций развития малозумящих систем когерентного приема, предназначенных для использования на длинах электромагнитных волн короче 1 мм. Рассмотрены основные особенности гетеродинных приемных систем на основе СИС-смесителей, полупроводниковых и сверхпроводниковых НЕВ-смесителей (смесителей болометрического типа на эффекте “горячих электронов”) и ДБШ-смесителей.

Введение

В последнее время наблюдается все возрастающий интерес к освоению принципиально нового (как по используемой элементной базе, так и по методам решения возникающих при этом задач) интервала длин электромагнитных волн, расположенного между СВЧ и оптическим диапазонами (от 1 мм до 1 мкм) [1].

Главной особенностью диапазона длин волн короче 1 мм является то, что здесь начинают быстро нарастать до неприемлемо высокого уровня потери в волноводных элементах. Особенно негативно это обстоятельство сказывается на шумовых параметрах малозумящих приемных систем. Кроме того, в этом диапазоне длин волн проявляются ограничения и чисто технологического характера. В то же время на этих длинах волн все еще непригодна для использования элементная база оптического диапазона. В рамках представлений геометрической оптики габариты таких электродинамических систем были бы недопустимо громоздкими.

Решением проблемы создания элементной базы для длин волн короче 1 мм является разработка принципиально новых квазиоптических приборов на основе оптики квазиограниченных гауссовых пучков излучения, распространяющихся в свободном пространстве и направляемых системой линз и зеркал [2].

В связи с проблемой регистрации предельно слабых электромагнитных сигналов одним из важнейших направлений, обеспечивающим продвижение научных исследований и технических разработок в область длин волн короче 1 мм, является создание для этого диапазона приемных систем с предельно низким уровнем собственных шумов.

В настоящее время все разрабатываемые приемные системы этого интервала длин волн можно разделить на две группы: системы когерентного приема, позволяющие регистрировать не только амплитуду, но и фазу принятого сигнала, и системы некогерентного приема, способные измерять только амплитуду сигнала.

Основной особенностью систем когерентного приема в рассматриваемом диа-

пазоне длин волн является то, что они строятся исключительно по гетеродинной схеме, поскольку для этих длин волн пока нет входных усилителей. При этом весь спектр сигнала, принятого антенной, переносится с помощью преобразователя частоты в область существенно более низких частот ($1 \div 10$ ГГц), где он усиливается высокоэффективными малошумящими транзисторными усилителями и затем подвергается соответствующей обработке.

Анализ показывает, что уже на частотах порядка 1 ТГц ($\lambda \cong 0.3$ мм) не менее 70 % собственных шумов такой гетеродинной приемной системы составляют шумы, связанные с потерями в преобразователе частоты и его шумами. С дальнейшим ростом частоты вклад этих шумов еще более возрастает. В связи с этим преобразователи частоты являются основным элементом систем когерентного приема. Все их параметры, в свою очередь, практически полностью определяются параметрами используемых в них нелинейных элементов.

В настоящее время для преобразования частоты в гетеродинных системах когерентного приема на частотах выше 100 ГГц используются следующие типы нелинейных элементов:

СИС-структуры – нелинейные элементы на основе туннельной структуры сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник;

ПГЭ-структуры – нелинейные элементы на основе полупроводника с высокочастотным разогревом в нем “газа свободных электронов”;

СГЭ-структуры – нелинейные элементы на основе сверхпроводниковой пленки с высокочастотным разогревом в ней “газа свободных электронов”;

ДБШ-структуры – нелинейные элементы на основе сформированного в полупроводнике потенциального барьера Шоттки.

Ниже будут рассмотрены основные особенности всех этих нелинейных элементов и достигнутый на сегодня уровень параметров гетеродинных систем когерентного приема на длинах волн короче 1 мм.

Системы когерентного приема

СИС-приемники

На низкочастотном крае рассматриваемого интервала частот ($100 \div 1000$ ГГц) “пальма первенства” по минимуму собственных шумов среди всех других систем когерентного приема принадлежит системам с преобразователями частоты на СИС-элементах. Такие элементы позволили к настоящему времени реализовать самые совершенные гетеродинные системы с рекордно низким уровнем собственных шумов, очень близким к квантовому пределу. На частотах примерно до 700 ГГц эквивалентная температура их шумов всего лишь в несколько раз превышает соответствующее значение квантового предела $h\nu/k$ (h – постоянная Планка, ν – частота, k – постоянная Больцмана). Эти частоты соответствуют “целевой” частоте ниобия (основного материала для изготовления СИС-элементов), определяемой шириной “энергетической щели” в его спектре квазичастичных возбуждений. Выше этих частот уровень шумов приемных СИС-систем на элементах из ниобия начинает заметно возрастать и на частотах $1.0 \div 1.3$ ТГц достигает значений порядка $10h\nu/k$, что, тем не менее, является еще очень высоким показателем чувствительности таких приемных систем. Некоторое падение чувствительности СИС-приемников на частотах выше значения “целевой” частоты обусловлено главным образом возрастанием потерь в настроенных и согласующих элементах, выполняемых из того же ниобия. Теоретически весь частотный диапазон работы СИС-элемента (диапазон частот, где имеет место туннельный эффект и связанные с ним нелинейные свойства такой структуры) ограничен сверху двойным значением “целевой” частоты (для ниобия – это около 1.4 ТГц) [3, 4].

Одной из возможностей уменьшения потерь в СИС-структуре с ростом ее рабочих частот является использование в ней настроенных и согласующих элементов из алюминия, в которых на рассматриваемых частотах потери заметно ниже, чем в элементах из ниобия. Предварительные

оценки свидетельствуют о том, что при этом возможно снижение уровня шумов СИС-приемников на частотах порядка 1 ТГц примерно в 2–3 раза.

Помимо этого варианта проблему улучшения рабочих характеристик СИС-приемников на частотах 1 ТГц и выше попытались решить путем изготовления СИС-элементов не из чистого ниобия, а из нитрида ниобия. У нитрида ниобия ширина “энергетической щели”, а значит и “щелевая” частота, почти вдвое больше (≈ 1.2 ТГц), чем у чистого ниобия. Однако первые же эксперименты на относительно низких частотах (350 ÷ 650 ГГц) показали, что даже на этих частотах шумовые характеристики СИС-приемников на элементах из нитрида ниобия на порядок хуже, чем из чистого ниобия [5]. Это обусловлено тем, что поверхностный импеданс и высокочастотные потери в нитриде ниобия, даже на частотах существенно ниже его “щелевой” частоты, заметно больше, чем у ниобия. В связи с этим вопрос о перспективах использования СИС-приемников в диапазоне частот 1 ТГц и выше остается пока открытым, хотя исследования в этом направлении сейчас ведутся [6]. Пока неясно также, могут ли быть использованы для этих целей высокотемпературные сверхпроводники.

Во всех СИС-структурах максимально высокая степень нелинейности их вольт-амперных характеристик наблюдается при напряжениях, при которых происходит их переход из “закрытого” состояния в “открытое” и обратно. Поэтому чем меньше интервал δV этих напряжений и чем больше ток через такую структуру, тем выше степень нелинейности ее вольт-амперной характеристики. Современная микроэлектронная технология позволяет создавать СИС-структуры с $\delta V < 10$ мкВ. Что касается увеличения тока, то для этого необходимо, чтобы толщина диэлектрика между сверхпроводниками была как можно меньше. Сегодня этот параметр уже не превышает $6 \div 10$ Å. Однако при столь малых толщинах диэлектрика очень существенной становится величина удельной емкости СИС-

структуры (не менее $50 \div 70$ фФ/мкм²). А это на частотах порядка 1 ТГц и выше ведет к заметному шунтированию ею нелинейной части импеданса структуры. В связи с этим к СИС-структурам, как правило, подключают специальные индуктивные двухпроводные микрополосковые шлейфы. Они обычно также выполняются из сверхпроводника интегрально на той же подложке, что и сам СИС-элемент, и частично компенсируют емкость.

Эту же проблему пытаются решать путем сокращения размеров СИС-структуры. Однако, как оказалось, существуют оптимальные величины емкости этой структуры и, соответственно, оптимальные ее размеры. Дело в том, что эта емкость образует закорачивающую цепь для всех частот выше частоты принимаемого сигнала, что особенно существенно на частотах гармоник гетеродина. Наличие емкости СИС-структуры существенно также для закорачивания токов в ней вследствие возможного возникновения эффекта Джозефсона. Особенно заметно это проявляется на частотах субмиллиметрового диапазона. Чаще всего с эффектом Джозефсона борются наложением на СИС-структуру постоянного магнитного поля. Кроме того, для устранения эффекта Джозефсона в СИС-преобразователе частоты было предложено заменить в его туннельной структуре один из сверхпроводников “нормальным” металлом [7]. Хотя вольт-амперная характеристика такой СИС-структуры обладает менее выраженной нелинейностью (что несколько снижает уровень чувствительности приемной системы), зато при этом полностью устраняется эффект Джозефсона. И наконец, есть еще один момент – при сокращении размеров СИС-структуры происходит соответствующее увеличение плотности квазичастичного тока, текущего через нее. А при плотностях тока выше $10 \div 15$ кА/см² начинает заметно снижаться степень нелинейности вольт-амперной характеристики СИС-элемента.

Существование оптимальных значений емкости СИС-элемента и его размеров при-

ходится учитывать при решении другой очень серьезной проблемы – проблемы согласования смесителя, на основе СИС-элемента по входу (со стороны СВЧ сигналов) и по выходу (на промежуточной частоте). Такой смеситель, как оказалось, обладает очень низким входным (≈ 10 Ом) и очень высоким выходным (≈ 1000 Ом) импедансами. В связи с этим в последнее время в таких смесителях все чаще применяют комбинированное последовательно-параллельное включение специальной цепочки из нескольких СИС-элементов [8]. В этой схеме СИС-элементы включаются при помощи специальных настроечных элементов, также выполненных из сверхпроводников, причем таким образом, что на входе СИС-элементы образуют последовательную цепочку, а на выходе они оказываются включенными параллельно. Это позволяет заметно увеличить входной и снизить выходной импедансы смесителя. И здесь также очень существенна оптимизация поперечных размеров СИС-элементов.

В целом анализ всех приведенных соображений и факторов позволяет утверждать, что в субмиллиметровом диапазоне оптимальные поперечные размеры СИС-элементов должны составлять по крайней мере $0.1 \div 0.5$ мкм.

И наконец, еще одно, последнее, замечание. Вся схема СИС-элемента вместе с настроечными и согласующими деталями выполняется интегрально на одной общей диэлектрической подложке. Для исключения возможности возникновения в этой подложке поверхностных мод и связанных с ними потерь необходимо, чтобы ее толщина не превышала 0.1λ . На частоте 1 ТГц это соответствует 30 мкм. Здесь реально используют пленочную мембрану из Si_3N_4 толщиной порядка 1 мкм [9, 10].

Помимо прекрасных шумовых характеристик СИС-преобразователи частоты обладают еще одним очень ценным качеством. Высокая степень нелинейности их вольт-амперной характеристики позволяет на 3–4 порядка снизить уровень мощности гетеро-

дина, необходимый для преобразователей на ДБШ. А это существенно облегчает проблему создания в субмиллиметровом диапазоне твердотельного гетеродина и систем дуплексирования (раздельного подвода к смесителю) входного сигнала и излучения гетеродина на входе СИС-смесителя (см. ниже). Кроме того, очень низкая мощность гетеродина практически устраняет необходимость режекции (чистки) его шумов в полосах приема. Однако при этом снижается и мощность насыщения всей приемной системы, что сужает ее динамический диапазон.

Что касается электродинамических систем для осуществления эффективной связи СИС-элемента с входным СВЧ излучением (сигнала и гетеродина), то для этого в рассматриваемом интервале длин волн сейчас используются в основном волноводные [10-20] и реже квазиоптические структуры [21-27] (см. ниже).

В целом достигнутый уровень эквивалентной температуры шумов в режиме двухполосного приема (в режиме DSB) когерентных систем с СИС-преобразователями частоты приведен на рис. 1.

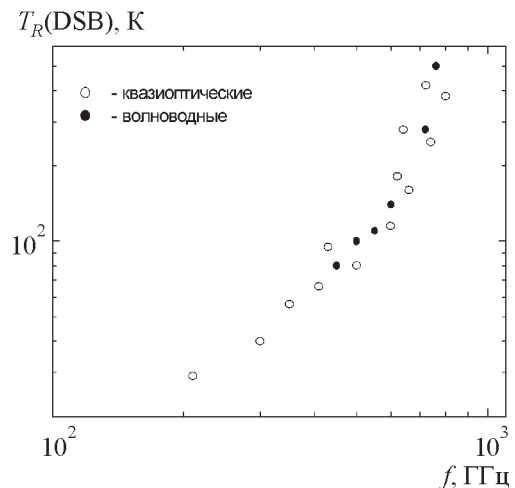


Рис. 1. Экспериментальная частотная зависимость эквивалентной температуры шумов СИС-приемников в двухполосном режиме приема

Приемники ПГЭ и СГЭ типа

Близкими к СИС-приемникам по своим шумовым параметрам, хотя и уступающими им в этом в 2–3 раза, являются гетеродинные системы когерентного приема со смесителями на нелинейных элементах болометрического типа, использующими эффект “горячих электронов” (НЕВ-смесители, hot electron bolometer). В этих смесителях для преобразования частоты используется нелинейность, обусловленная эффектом высокочастотного разогрева “газа свободных электронов” и связанной с этим резкой зависимостью проводимости такого элемента от температуры этого “газа”. Сегодня НЕВ-смесители реализуются на основе либо полупроводников (ПГЭ-элементы, чаще всего из InSb) [28-31], либо сверхпроводниковых пленок (СГЭ-элементы) [32-39]. Основным отличительным и перспективным качеством этих нелинейных элементов и преобразователей частоты на их основе, с точки зрения возможностей использования их на все более высоких частотах, является отсутствие у них для этого каких-либо принципиальных ограничений. Это обстоятельство очень выгодно отличает НЕВ-элементы от СИС-структур. Еще одним достоинством всех НЕВ-преобразователей частоты, как полупроводниковых, так и сверхпроводниковых, является то, что мощность гетеродина у них еще ниже (до порядка), чем у СИС-преобразователей [40]. Но это, конечно, еще более сужает динамический диапазон таких приемных систем.

Однако и тут есть свои проблемы. Дело в том, что высокая чувствительность НЕВ-приемных систем обусловлена высокой степенью нелинейности вольт-амперной характеристики НЕВ-элемента, которая тем выше, чем выше степень высокочастотного нагрева “электронного газа”. Поэтому для всех НЕВ-элементов характерна относительно низкая скорость тепловой релаксации разогретого “электронного газа”. Эта особенность НЕВ-элементов при работе в режиме преобразования частоты существенно ограничивает сверху диапазон их промежуточных частот (ПЧ).

В первых исследованиях у НЕВ-преобразователей частоты на ПГЭ-элементах

из InSb значения ПЧ не превышали 1 МГц, что было обусловлено низкой скоростью электрон-фоонных взаимодействий в InSb. В последующих экспериментах при переходе к более сложным полупроводниковым структурам – гетероструктурам – было обнаружено, что в них скорость электрон-фоонного взаимодействия существенно выше. Это позволило увеличить значения ПЧ НЕВ-преобразователей до 1 ГГц [41]. А оценки для так называемого “двумерного электронного газа” в сложных гетероструктурах дают основания ожидать повышения ПЧ даже до 10 ГГц [42].

У НЕВ-смесителей на СГЭ-элементах эта проблема решается иначе. Здесь для повышения скорости нагрева “газа свободных электронов” и тем самым для повышения ПЧ, используется передача энергии фотона непосредственно электрону, а не поглотителю, нагревающему затем уже сам сверхпроводник, как в обычных болометрических структурах. Кроме того, для повышения скорости остывания “нагретых” электронов при взаимодействии их с фононами используют сверхпроводники с сильной электрон-фоонной связью (например NbN) [43, 44]. И наконец, здесь обычно используют очень тонкую (десятки ангстрем) сверхпроводниковую пленку, из которой “нагретые” фононы быстро уходят в подложку еще до реабсорбции их “остывающими” электронами.

В последнее время удалось обнаружить некоторые другие возможности повышения ПЧ в смесителях СГЭ типа. В частности, как оказалось, в очень коротких (десятые доли микрона) сверхпроводниковых пленочных мостиках, расположенных между “нормальными берегами”, существенно повышается скорость тепловой релаксации разогретого “электронного газа” в сверхпроводнике за счет высокой скорости однонаправленной диффузии электронов из него в “нормальный” металл. Повышенная скорость такой диффузии обусловлена особенностями действующих здесь механизмов электрон-электронного и электрон-фоонного взаимодействий. Уже в первых экспериментах этот эффект позволил расширить полосу ПЧ СГЭ-преобразователей частоты до 6 ГГц.

Потенциальные возможности для расширения полосы ПЧ таких СГЭ-преобразователей частоты просматриваются и на пути замены в них ниобия на нитрид ниобия. В предварительных экспериментах удалось получить полосы ПЧ шириной до 3.5 ГГц, а в ближайшей перспективе ожидают достичь 15 ГГц. Аналогичные эксперименты начаты и с использованием тройного сплава ниобий-титан-нитрид ниобия.

Если говорить о реальных разработках НЕВ-приемных систем, то такие системы ПГЭ типа уже опробованы в субмиллиметровом диапазоне (рис. 2). Однако из-за относительной узкополосности они все еще не находят широкого практического применения. Что касается НЕВ приемных систем СГЭ типа, то здесь получены хорошие результаты на частотах до 2.5 ТГц (эквивалентная температура шумов СГЭ-приемника в DSB режиме на этих частотах лишь в 10 раз превышает квантовый предел) [45] и уже ведутся первые эксперименты на частоте 5 ТГц [46] (рис. 3).

В конструктивном отношении все НЕВ-преобразователи частоты устроены точно так же, как и СИС-преобразователи: либо в волноводном, либо в квазиоптическом исполнении.

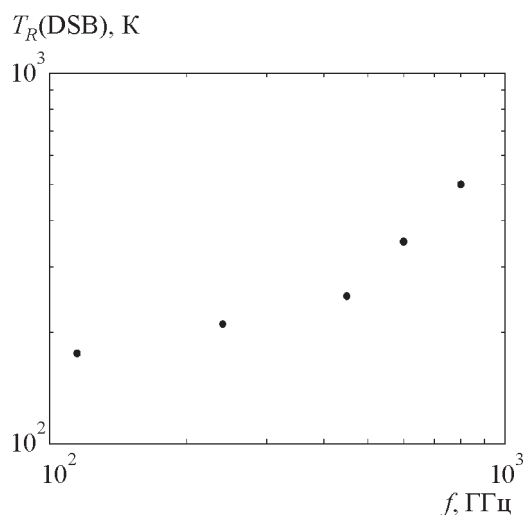


Рис. 2. Экспериментальная частотная зависимость эквивалентной температуры шумов полупроводниковых НЕВ-приемников (ПГЭ типа) в двухполосном режиме приема

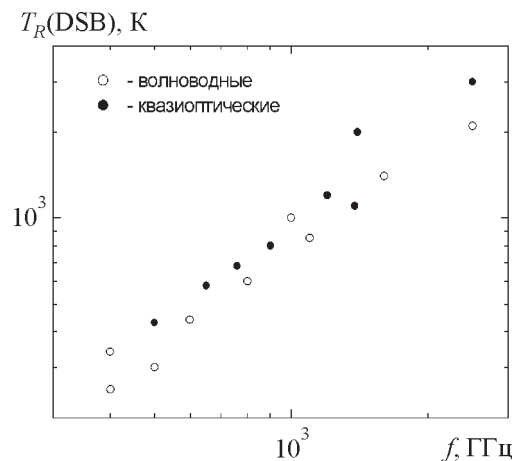


Рис. 3. Экспериментальная частотная зависимость эквивалентной температуры шумов сверхпроводниковых НЕВ-приемников (СГЭ типа) в двухполосном режиме приема

Чтобы закончить с рассмотрением особенностей всех СИС- и НЕВ-приемников, необходимо подчеркнуть, что все они работают при очень глубоком охлаждении (вплоть до 1 К и ниже). В этих условиях очень важным конструктивным элементом таких приемных систем является узел ввода принимаемого излучения внутрь криостата, от потерь в котором существенно зависит уровень собственных шумов всей приемной системы. На частотах 100 ÷ 300 ГГц для этих целей обычно используют сверхразмерные волноводы. На более высоких частотах переходят, как правило, на квазиоптические системы на основе гауссовых пучков, обеспечивающие суммарные потери сигнала не более чем 0.1 ÷ 0.3 дБ.

ДБШ-приемники

Главная особенность и достоинство этой группы систем когерентного приема по сравнению со всеми предыдущими заключается в том, что они не требуют криогенного охлаждения и не имеют никаких принципиальных ограничений на рабочие и промежуточные частоты. В то же время для решения многих практических задач чувствительность ДБШ-приемников вполне достаточна. Возможности повышения рабочих частот ДБШ-структур определяются только их дальнейшим совершенствова-

нием. Уже созданы опытные образцы ДБШ для работы на частотах до 30 ТГц.

Рассмотрим основные параметры ДБШ, определяющие степень их пригодности для использования на все более высоких частотах.

В субмиллиметровом диапазоне, в отличие от более длинноволнового, используются уже только бескорпусные структуры ДБШ сотового типа. Это позволяет минимизировать потери, связанные с паразитными элементами, реактивными и активными, всегда присутствующими в корпусных структурах.

Анализ показывает, что если на частотах около 100 ГГц уровень собственных шумов ДБШ-приемников порядка $20hv/k$, то в терагерцевом диапазоне он возрастает на порядок и достигает уже $200hv/k$. И главная причина этого заключается в росте потерь преобразования и шумов, обусловленном снижением качественных параметров самой структуры сотовых ДБШ. Поэтому возникает необходимость определенной технологической доработки такой структуры для оптимизации ее параметров.

Главными параметрами структуры сотового ДБШ, требующими особого внимания при использовании его на частотах терагерцевого диапазона (и выше), являются степень легирования эпитаксиального слоя, его толщина и диаметр элементарного диода сотовой структуры. Остановимся кратко на этих вопросах.

Степень легирования эпитаксиального слоя. Анализ связи шумов ДБШ со степенью легирования показывает следующее. С увеличением степени легирования возрастают дробовые шумы такой диодной структуры и снижаются тепловые, обусловленные конечной проводимостью эпитаксиального слоя. Но на частотах терагерцевого диапазона уже доминируют тепловые шумы. В связи с этим для снижения температуры шумов ДБШ необходимо иметь как можно более высокий уровень легирования эпитаксиального слоя – до 10^{18} см⁻³ и выше.

Здесь же возникает вопрос о значении верхней граничной частоты $f_{гр}$ рабочего диапазона ДБШ. Анализ показывает, что для его увеличения также необходимо повысить степень легирования эпитаксиаль-

ного слоя. Это ведет к росту его проводимости, снижению вносимого им последовательного диоду сопротивления и повышению значения граничной частоты ДБШ.

Еще одним аргументом в пользу увеличения степени легирования эпитаксиального слоя является то, что на частотах терагерцевого диапазона все большую роль начинает играть скин-эффект в полупроводнике. Это ведет к сокращению площади поперечного сечения протекающего через полупроводник высокочастотного тока. При этом возрастает эффективное значение включенного последовательно диоду сопротивления и возникает заметная эффективная последовательная индуктивность, что приводит к росту потерь преобразования и температуры шумов ДБШ-преобразователей на частотах терагерцевого диапазона. Повышение степени легирования эпитаксиального слоя должно ослабить влияние и этого эффекта.

И наконец, еще один, последний, довод в пользу повышения степени легирования эпитаксиального слоя сотовых ДБШ терагерцевого диапазона. В полупроводниках существует эффект плазменного резонанса, частоты которого при обычной степени легирования (10^{17} см⁻³) попадают как раз в терагерцевый диапазон. В условиях плазменного резонанса происходит резкое увеличение как реальной, так и мнимой частей импеданса полупроводника, что также ведет к росту потерь преобразования ДБШ-смесителей. Повышение степени легирования соответственно сдвигает частоты плазменного резонанса в область более высоких частот.

Диаметр элементарного диода. Уменьшение диаметра элементарного ДБШ в сотовой структуре ведет к уменьшению его емкости, повышению граничных значений его рабочей частоты и облегчает решение проблемы согласования его со входным сигналом. Но уменьшение диаметра одновременно приводит к увеличению последовательного сопротивления и появлению эффекта “сопротивления растекания”, что тормозит рост граничной частоты и увеличивает шумы диода. И все же уменьшение диаметра элементарного диода улучшает

в целом параметры ДБШ на все более высоких частотах. Поэтому наилучшие результаты уже на частотах порядка 1 ТГц получены на сотовых структурах с субмикронными размерами элементарного диода.

Толщина эпитаксиального слоя. С помощью специальных исследований удалось установить, что существует оптимальная толщина эпитаксиального слоя, равная (или чуть больше) толщине обедненного слоя при отсутствии напряжения смещения на диоде.

Учет всех особенностей полупроводниковых структур ДБШ сотового типа должен существенно облегчить решение проблемы использования их на все более высоких частотах. Современная электронная нанотехнология позволяет уже сегодня создавать ДБШ с размерами элементарного диода до $0.5 \div 0.25$ мкм и с граничными частотами до 30 ГГц [47-52]. А в ближайшей перспективе размеры элементарных диодов, по-видимому, будут сокращены до 0.1 мкм при соответствующем росте их граничных частот.

Наряду с ДБШ сотового типа в последнее время стали интенсивно развиваться технологии планарных ДБШ-структур [53-55]. В таких структурах на одной из сторон полупроводникового “чипа” методами микроэлектронной технологии формируются структура ДБШ и, по обе стороны от нее в непосредственной близости, две ее контактные площадки. Таким образом, в отличие от сотовых, в планарных ДБШ вообще отсутствует контактная игла, что существенно повышает их надежность.

Основной проблемой улучшения планарных ДБШ является снижение величины паразитной емкости, обусловленной очень близким взаимным расположением их контактных площадок. Эта проблема становится все более серьезной по мере роста рабочей частоты. В связи с этим преобразователи частоты на таких планарных ДБШ пока удалось реализовать только на частотах не выше 2.5 ТГц [56-59]. В то же время близость контактных площадок позволила обеспечить значительно более низкий уровень вклада резистивных и индуктивных

паразитных компонент в импеданс структуры, что существенно облегчает решение проблемы ее согласования с электродинамической системой смесителя.

Достигнутый уровень чувствительности ДБШ приемников демонстрирует рис. 4.

Теперь несколько слов об электродинамических системах всех рассмотренных преобразователей частоты. Как уже отмечалось, на частотах до 1 ТГц полупроводниковые и сверхпроводниковые преобразователи частоты обычно конструктивно выполняют на волноводной основе с тем или иным рупорным облучателем на входе. Сегодня уже удалось разработать такие волноводные конструкции даже для работы на частотах до 2.5 ТГц [56].

Интенсивно ведется также проработка интегральных конструкций для планарных ДБШ, особенно для СИС-элементов. В таких конструкциях на одной общей подложке методами микроэлектронной технологии формируются как сам нелинейный элемент, так и специальная микрополосковая антенна, облучаемая некоторой квазиоптической системой, а также согласующие и настраивающие элементы. В сверхпроводниковых смесителях сейчас пробуют сформировать на общей подложке специальный

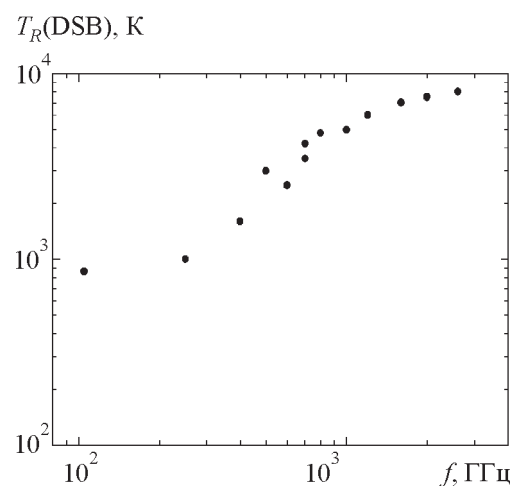


Рис. 4. Экспериментальная частотная зависимость эквивалентной температуры шумов ДБШ-приемников в двухполосном режиме приема

тип сверхпроводникового источника гетеродинного излучения (см. ниже). Интегральные конструкции смесителей и приемных систем на такой основе уже успешно испытаны на частотах до 2.5 ТГц.

Но на частотах выше 2 ÷ 3 ТГц ни один из упомянутых вариантов конструктивного оформления смесителя реализовать невозможно. Поэтому на этих частотах пока единственным вариантом электродинамической системы, позволяющим эффективно связать поле излучения с нелинейным элементом (сотовым ДБШ), является квазиоптический. Здесь специальная тонкая контактная игла к этому элементу образует миниатюрную линейную антенну, помещенную в вершину кубического уголкового отражателя. Он формирует ее диаграмму направленности и позволяет на частотах до 5 ТГц связать нелинейный элемент с полем излучения с эффективностью до 80 % [60-63].

И наконец, кратко остановимся на остальных узлах, общих для всех рассмотренных гетеродинных систем когерентного приема. Таковыми, помимо преобразователя частоты, являются антенный облучатель, гетеродин и диплексер.

В качестве антенных облучателей на самых низких частотах (примерно до 0.6 ÷ 1.0 ТГц) чаще всего используются облучатели рупорного типа: скалярные, двухмодовые, диагональные и гладкие конические рупоры. Двухмодовые рупоры относительно просты в изготовлении, и поэтому их удалось реализовать даже на частотах до 2.5 ТГц [64]. Однако такие облучатели очень узкополосные – $\frac{\Delta f}{f} < 4 \div 8 \%$ [65, 66]. Скалярные рупоры обладают хорошими параметрами, они широкополосные ($\Delta f/f$ до 40 ÷ 50 %), но очень сложны в изготовлении, особенно для высоких частот [67, 68]. Диагональные рупоры уступают по всем параметрам скалярным и достаточно сложны в изготовлении [69]. Гладкие конические, хотя и наиболее просты в изготовлении, но по уровню своих параметров уступают всем остальным [70].

В последнее время на частотах 1 ÷ 2 ТГц все чаще начинают применять различного рода микрополосковые антенные облучате-

ли планарного типа [71-73]. На частотах выше 1 ÷ 2 ТГц пока единственным достаточно эффективным антенным облучателем остается линейная антенна с уголковым кубическим отражателем.

Другим очень важным элементом любой гетеродинной приемной системы является источник гетеродинного излучения.

В самой низкочастотной части рассматриваемого интервала частот (0.1 ÷ 1.0 ТГц) источники гетеродинного излучения состоят, как правило, из задающего генератора (генератор Ганна) и варакторного умножителя частоты в волноводном исполнении. Описанные в литературе конструкции таких гетеродинов уже сегодня обеспечивают на выходе мощность до 4 ÷ 6 мВт на частотах до 0.3 ÷ 0.4 ТГц (при КПД 12 ÷ 14 %), до 0.7 ÷ 0.8 мВт на частотах до 0.5 ÷ 0.6 ТГц (при КПД 7 ÷ 9 %) и до 0.1 ÷ 0.2 мВт на частотах до 0.7 ÷ 0.8 ТГц (при КПД до 1 %) [74-77] (рис. 5).

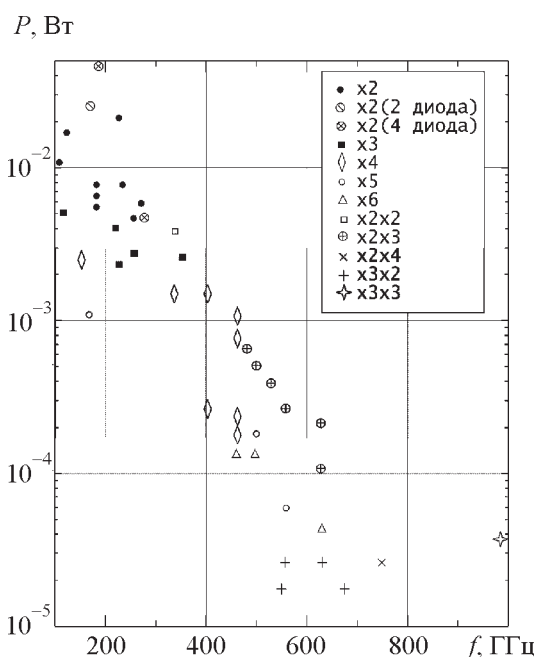


Рис. 5. Мощность твердотельных источников гетеродинного излучения на частотах выше 100 ГГц (x2 – удвоитель частоты, x3 – утроитель частоты и т. д.)

На частотах выше 1 ТГц технологические возможности реализации волноводных конструкций твердотельных гетеродинов уже практически исчерпаны. В связи с этим появились первые публикации о пробных проработках квазиоптических конструкций твердотельных гетеродинов [78, 79].

Универсальным гетеродином для всех таких приемных систем на частотах выше $0.6 \div 0.7$ ТГц является непрерывный газовый лазер на двуокиси углерода, “накачивающий” газовый лазер на молекулах, в спектре которых формируются инвертированные линии излучения в требуемом интервале частот. Сегодня весь интервал частот, по крайней мере от 0.6 до 10 ТГц, перекрывается линиями излучения с интервалами не более 0.02 ТГц. При мощности накачки в несколько ватт (на длинах волн $9 \div 10$ мкм) лазерные гетеродины обеспечивают на выходе до 10 мВт мощности [80-82].

Отметим два дополнительных достоинства всех лазерных гетеродинов. Во-первых, стабильность их частоты излучения достаточно высока – ширины лазерных линий излучения не превышают 100 кГц. Это позволяет в большинстве случаев обходиться без очень сложных систем частотной и фазовой автоподстройки. Во-вторых, центральные частоты лазерных линий гетеродинного излучения, известные обычно с очень высокой точностью (не ниже 10^{-9}), могут быть использованы в спектральных исследованиях в качестве реперов частоты.

Несколько слов о возможных ближайших перспективах в области создания новых источников гетеродинного излучения терагерцевого диапазона.

Сейчас продолжают настойчивые попытки повысить скважность импульсной генерации в полупроводниковых лазерах, работающих на эффекте “горячих дырок” в германии. Если это удастся сделать, то в перспективе можно ожидать создания на этой основе твердотельных гетеродинов с выходной мощностью порядка 1 мВт на частотах до 30 ТГц.

Недавно была выдвинута идея использовать для НЕВ-смесителей, работающих при

мощности гетеродина порядка 0.1 мВт, в качестве гетеродинного источника смешанное излучение (photomixing) двух твердотельных перестраиваемых лазеров на основе GaAs [83-85].

Еще одним новым направлением в области разработки гетеродинов является применение различных полупроводниковых лазеров оптического и инфракрасного диапазонов на структурах с так называемыми “квантовыми ямами”. Современный уровень технологии открывает реальные возможности создания таких гетеродинов с частотами от 4 до 28 ТГц. Уже начаты работы по созданию аналогичных устройств на структурах на основе SiGe. Другим типом полупроводникового терагерцевого гетеродина является полупроводниковый лазер на “резонансных состояниях”, реализуемых в Ge [86, 87]. Здесь инверсия населенностей состояний мелкого акцептора возникает благодаря их “расщеплению” внешним механическим давлением. Изменение этого давления используется и для перестройки таких источников излучения по частоте (сейчас уже более чем в 4 раза).

И еще одна современная идея, касающаяся СИС-приемников интегрального типа субмиллиметрового диапазона. Речь идет о попытках использования в них в качестве источника гетеродинного излучения направленного движения джозефсоновских вихрей в распределенном контакте Джозефсона (flux flow oscillator) [88]. Основная проблема здесь заключается в необходимости значительного сужения ширины генерируемого спектра излучения. К настоящему времени удалось реализовать полосы генерации шириной не более 0.02 ТГц на частотах $0.4 \div 0.5$ ТГц.

И наконец, о диплексерах. В ДБШ-приемниках субмиллиметрового диапазона в качестве диплексеров используются, как правило, квазиоптические структуры на основе двухлучевого интерферометра Майкельсона [89-92] или многолучевого интерферометра Фабри–Перо [93-94]. Эти же структуры обеспечивают достаточно глубокую режекцию шумов гетеродина. В приемных системах с СИС- и НЕВ-смесителями, где уровень мощности гетеродинного излучения

на 3–4 порядка ниже, чем в ДБШ-приемниках, проблему дуплексирования удается решать значительно проще [105]. Здесь применяют наклонное, 45-градусное полупрозрачное зеркало из очень тонкой ($20 \div 30$ мкм) диэлектрической пленки с малой диэлектрической проницаемостью (майлар). С его помощью в гауссов пучок, идущий от антенны, под прямым углом “вбрасывается” пучок излучения гетеродина. Потери на отражение сигнала на этом зеркале не превышают $0.1 \div 0.3$ дБ. В то же время даже столь низкого коэффициента отражения оказывается достаточно для подвода к таким смесителям необходимой мощности гетеродина. Режекции шумов гетеродина при столь низком уровне его мощности вообще не требуется.

Заключение

Проведенный выше анализ современного состояния малошумящих систем когерентного приема субмиллиметрового диапазона позволяет сделать следующее заключение. Сегодня на частотах $0.1 \div 1.0$ ТГц наиболее совершенными, по уровню их собственных шумов, несомненно являются гетеродинные приемные системы с СИС-преобразователями частоты. Уровень разработок в этой области сейчас таков, что позволяет создавать приемные системы с волноводными СИС-смесителями на ниобии, шумовая температура которых в режиме DSB всего лишь в $3 \div 4$ раза превышает свой квантовый предел на частоте 0.2 ТГц и в $8 \div 10$ раз – на частоте 0.7 ТГц. У таких же приемных систем, но в квазиоптическом исполнении смесителей эти шумы несколько выше – в $20 \div 30$ раз превышают соответствующий квантовый предел.

Что касается вопроса о перспективах использования СИС-приемников на частотах выше 1 ТГц, то он остается открытым и прорабатывается только на уровне оценок и отдельных лабораторных экспериментов.

Во второй группе систем когерентного приема, использующих полупроводниковые и сверхпроводниковые НЕВ-смесители, достигнутый на этих частотах уровень шу-

мов также очень низок, хотя все же несколько выше, чем у СИС-приемников. К настоящему времени приемные системы с полупроводниковыми ПГЭ-преобразователями частоты уже позволяют получать шумы системы в режиме DSB, в $10 \div 15$ раз превышающие квантовый предел на частотах до порядка 1 ТГц. Тем не менее их область применения остается очень ограниченной из-за нерешенной в полной мере проблемы существенного расширения их полос ПЧ. Что касается систем когерентного приема со сверхпроводниковыми СГЭ-смесителями НЕВ типа, то уровень их шумов в режиме DSB не превышает 3500 К на частоте 2.6 ТГц.

И наконец, о последней группе субмиллиметровых систем когерентного приема со смесителями на ДБШ. Сегодня даже на частотах до $2.0 \div 2.5$ ТГц с большим трудом, но все же удается реализовать ДБШ-преобразователи частоты на волноводной основе с сотовыми ДБШ. Уровень их шумов в режиме DSB изменяется от 300 К на частоте 0.3 ТГц до 8000 К на частоте 2.5 ТГц. Переход от сотовых ДБШ к планарным приводит к росту шумов в $2 \div 2.5$ раза.

В квазиоптическом исполнении ДБШ-приемники имеют шумы в режиме DSB на уровне от 1000 К на частоте 0.2 ТГц до 17000 К на частоте 2.6 ТГц.

В заключение отметим, что в настоящее время уже созданы и готовятся к опробованию в работе сотовые ДБШ, пригодные для использования на частотах до $25 \div 30$ ТГц.

Литература

1. Zmidars D., Rudd J. V. Opening the THz window // *Photon, Spectra*. – 2000. – No. 5. – P. 141-148.
2. Еру И. И. Терагерцная техника и технология: современное состояние, тенденции развития и перспективы практического применения // *Успехи зарубежной радиоэлектроники*. – 1997. – №3. – С. 51-77.
3. Stern J. A., Bumble B. et al. Fabrication and DC characterization of NbTiN based SIS mixers for use between 600 and 1200 GHz // *Proc. 9-th Int. Symp. Space Terahertz Techn.* – 1998. – P. 305-313.

4. Karpov A., Miller D et al. A three photon noise SIS heterodyne receiver at submillimeter wavelength // *IEEE Trans. Appl. Superconduct.* – 1999. – Vol. 9, No. 12. – P. 4456-4459.
5. Van de Stadt H., Mess J. et al. Submm heterodyne mixing using NbC/Nb SIS tunnel junctions // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* – 1996. – Vol. 17, No. 1. – P. 91-99.
6. De Longe G., Honningh C. J. et al.. Heterodyne mixers with Nb tunnel junction above the gap frequency // *Appl. Phys. Lett.* – 1994. – Vol. 64, No. 12. – P. 3039-3047.
7. Blundell R., Gundlach K. H. A quasioptical SIN mixer for 230 GHz frequency range // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* – 1987. – Vol. 8, No. 12. – P. 1573-1579.
8. Шитов С. В., Кошелец В. П. и др. Цепочки СИС-переходов с параллельным смещением для приемников миллиметровых волн // *Сверхпроводимость: физика, химия, техника.* – 1991. – Т. 4, №10. – С. 2023-2033.
9. Kooi J. W., Chan M. S. et al. The development of an 850 GHz waveguide receiver using tuned SIS junctions on 1 μm Si_3N_4 membranes // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* – 1995. – Vol. 16, No. 2. – P. 349-362.
10. Kooi J. W., Chan M. S. et al. 230 GHz and 492 GHz low noise SIS waveguide receivers employing tuned Nb/ AlO_x /Nb tunnel junctions // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* – 1995. – Vol. 16, No. 12. – P. 2049-2068.
11. Honningh C. J., De Longe G. et al. Performance of a two-junction array SIS mixer operating around 345 GHz // *IEEE Trans.* – 1993. – Vol. MTT-41, No. 4. – P. 616-623.
12. Kooi J. W., Chan M. et al. 230 and 492 GHz low-noise SIS waveguide receiver employing tuned Nb/ AlO /Nb tunnel junctions // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* – 1995. – Vol. 16, No. 12. – P. 2049-2068.
13. Salez M., Febver P. et al. An SIS waveguide heterodyne receiver for 600 GHz – 635 GHz // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* – 1994. – Vol. 15, No. 2. – P. 349-368.
14. Kooi J. W., Walker C. K. et al. A low-noise 665 GHz SIS quasi-particle waveguide receiver // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* – 1994. – Vol. 15, No. 3. – P. 477-492.
15. De Longe G., Honningh C. F. et al. Characterization of 680-760 GHz SIS waveguide mixer // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* – 1996. – Vol. 17, No. 1. – P. 61-77.
16. Schuster K. F., Harris P. J. et al. A 691 GHz SIS receiver for Radio Astronomy // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* – 1993. – Vol. 14, No. 10. – P. 1797-1804.
17. Kooi J. W., Pety J. et al. A 850 GHz waveguide receiver employing a niobium SIS junction fabricated on 1-mm Si_3N_4 membrane // *IEEE Trans.* – 1998. – Vol. MTT-46, No. 2. – P. 151-161.
18. Jackson B., Klapwijk T. The current status of low noise THz mixers based on SIS junctions // *Phys. C.* – 2002. – Vol. 372, No. 1. – P. 368-373.
19. Harris P. J., Schuster K.-F. et al. An SIS radiometer for radio astronomy from 600 to 95 GHz // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* – 1994. – Vol. 15, No. 9. – P. 1465-1480.
20. Walker C. K., Kooi J. W. et al. A low-noise 492 GHz SIS waveguide receiver // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* – 1992. – Vol. 13, No. 6. – P. 785-798.
21. Karpov A., Miller D. et al. A three photon noise SIS heterodyne receiver at submillimeter wavelength // *IEEE Trans. Appl. Superconduct.* – 1999. – Vol. 9, No. 6. – P. 4456-4459.
22. Lazareff B., Billon-Pierron D. et al. Design and characterization of 225-370 GHz DSB and 247-360 GHz SSB full high waveguide mixers // *J. Phys.* – 2002. – Vol. 12, No. PR3. – P. 161-164.
23. Kooi J. W., Stern J. A. et al. Low-loss NbTiN films for THz SIS mixer tuning circuit // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* – 1998. – Vol. 19, No. 2. – P. 373-383.
24. Kawamura J., Chen J. et al. Terahertz-frequency waveguide NbN hot-electron bolometer mixer // *Appl. Phys. Lett.* – 1999. – Vol. 75, No. 12. – P. 4013-4015.
25. Shitov S., Jackson B. et al. A low-noise double-dipole antenna SIS mixer at 1 THz // *Phys. C.* – 2002. – Vol. 372, No. 1. – P. 374-377.
26. Shitov S. V., Jackson B. D. et al. A low-noise double-dipole antenna SIS mixer at 1 THz // *Phys. C.* – 2002. – Vol. 372, No. 2. – P. 374-377.
27. Price M. C., Little L. T. et al. A compact 800-900 GHz heterodyne receiver for submillimeter astronomical spectroscopy // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* – 2003. – Vol. 24, No. 5. – P. 639-647.
28. Arams F., Allen C. et al. Millimeter mixing and detection in bulk InSb // *Proc. IEEE.* – 1966. – Vol. 54, No. 4. – P. 612-622.
29. Feldman M. J., Addario L. R. D. Saturation of the SIS direct detectors and SIS mixers // *IEEE Trans. Magn.* – 1987. – Vol. 23, No. 3. – P. 1254-1263.
30. Brown E. R., Keen S. et al. A heterodyne receiver for submm wavelengths region based on cyclotron resonance in InSb at low temperature // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.* – 1985. – Vol. 6, No. 11. – P. 1121-1138.
31. Padman R., Barker R. et al. A dual polarization InSb receiver for 461/492 GHz // *Int. J. Infrared*

- Millimeter Waves. – 1992. – Vol. 13, No. 10. – P. 1487-1514.
32. Еру И. И., Кащей В. А. и др. Вольт-амперные характеристики длинных сверхпроводящих пленок в поле сверхвысокой частоты // ФТТ. – 1974. – Т. 16, №10. – С. 3133-3135.
33. Еру И. И., Песковацкий С. А. Смещение сигналов СВЧ с усилением с помощью тонких и длинных сверхпроводников в резистивном состоянии // Радиофизика. – 1975. – Т. 18, №11. – С. 1713-1715.
34. Еру И. И., Песковацкий С. А. и др. Смещение сигналов сверхвысоких частот с коэффициентом преобразования больше единицы на длинной сверхпроводящей пленке // Радиотехника и электроника. – 1975. – Т. 20, №5. – С. 1112-1113.
35. Еру И. И., Песковацкий С. А. и др. Смещение сигналов сверхвысоких частот на сверхпроводящей пленке нитрида ниобия // Радиотехника и электроника. – 1980. – Т. 25, №9. – С. 2013-2014.
36. Гершензон Е. М., Гершензон М. Е. и др. Разогрев квазичастиц в сверхпроводящей пленке, находящейся в резистивном состоянии // Письма в ЖЭТФ. – 1981. – Т. 34, №5. – С. 281-284.
37. Gerschenzon E. M., Goltsman G. N. et al. Millimeter and submillimeter range mixer based on electronic heating of superconducting films // Sov. Phys. Superconduct. – 1990. – Vol. 3, No. 10. – P. 1582-1593.
38. Gerecht E., Musante C. F. et al. NbN hot electron bolometer mixer – a new technology for low-noise THz receiver in resistive state // IEEE Trans. – 1999. – Vol. MTT-47, No. 12. – P. 2519-2527.
39. Ekstroem H., Karasik B. S. et al. Conversion gain and noise of niobium superconducting hot-electron mixers // IEEE Trans. – 1995. – Vol. MTT-43, No. 4. – P. 938-947.
40. Gerecht E., Musante C. F. et al. New results for NbN photoncooled hot electron bolometric mixers above 1 THz // IEEE Trans. Appl. Superconduct. – 1999. – Vol. 9, No. 6. – P. 4217-4220.
41. Smith S. M., Cronin N. J. et al. Millimeter and submillimeter detectors using GaAlAs / GaAs heterostructures // Int. J. Infrared Millimeter Waves. – 1987. – Vol. 8, No. 8. – P. 793-802.
42. Yang J. X., Agahi F. et al. Wide-band width electron bolometric mixer: A 2 DEG prototype and potential for low-noise THz receivers // IEEE Trans. – 1993. – Vol. MTT-41, No. 4. – P. 581-589.
43. Ekstroem H., Kollberg E. et al. Gain and noise bandwidth of NbN hot-electron bolometer mixers: Conversion gain and noise of niobium superconducting hot-electron mixer // Appl. Phys. Lett. – 1997. – Vol. 70, No. 11. – P. 3296-3309.
44. Yngvesson K. S., Kolberg E. L. Optimum receiver-noise temperature for NbN HEB mixers // Proc. 10th Int. Symp. Space THz Technol. – 1999. – P. 556-582.
45. Karasik B. S., Gaidis M. C. et al. Low-noise in diffusion-cooled hot-electron mixer at 2.5 THz // Appl. Phys. Lett. – 1997. – Vol. 71, No. 9. – P. 1567-1569.
46. Semenov A. D., Huebers H. W. et al. Frequency dependent noise temperature of the lattice cooled hot-electron Terahertz mixer // Proc. 11-th Int. Space Terahertz Technol. Symp. – Ann Arbor, MI. – 2000. – P. 39-48.
47. Crowe T. W., Mattauch R. J. Analysis and optimization of millimeter and submillimeter waveguide mixer diodes // IEEE Trans. – 1987. – Vol. MTT-35, No. 2. – P. 159-168.
48. Crowe T. W. GaAs Schottky barrier mixer diodes for the frequency range 1-10 THz // Int. J. Infrared Millimeter Waves. – 1989. – Vol. 10, No. 7. – P. 765-778.
49. Peatman W. C. B., Crowe T. W. Design and fabrication of 0,5 micron GaAs Schottky barrier diodes for low-noise terahertz receiver applications // Int. J. Infrared Millimeter Waves. – 1990. – Vol. 11, No. 3. – P. 355-366.
50. Titz R. U., Roser H. P. et al. Investigation of GaAs Schottky barrier diodes in the THz range // Int. J. Infrared Millimeter Waves. – 1990. – Vol. 11, No. 7. – P. 809-820.
51. Crowe T. W., Mattauch R. J. et al. GaAs Schottky diodes for THz mixing application // Proc. IEEE. – 1992. – Vol. 80, No. 11. – P. 1827-1841.
52. Jelensky A., Grub A. et al. New approach to the design and the fabrication of THz Schottky barrier diode // IEEE Trans. – 1993. – Vol. MTT-41, No. 4. – P. 549-557.
53. Bishop W. L., Crowe T. W. et al. Planar Schottky barrier mixer diodes for space applications at submillimeter wavelengths // Microwave and Optical Technology Letters. – 1991. – Vol. 4, No. 1. – P. 44-55.
54. Bhaumik K., Gelmont B. et al. Series impedance of GaAs planar Schottky diodes operated to 500 GHz // IEEE Trans. – 1992. – Vol. MTT-40, No. 5. – P. 880-885.
55. Osvald J. S., Koch T. et al. Planar diode solid-state receiver for 557 GHz with state of the art performance // Microwave and Guide Wave Letters. – 1998. – Vol. 8, No. 6. – P. 232-234.
56. Siegel P. H., Smith R. P. et al. 2.5 THz GaAs monolithic membrane diode mixer // IEEE Trans. – 1999. – Vol. MTT-47, No. 5. – P. 596-604.
57. Gearhart S. S., Hesler J. L. et al. A wide-band 760 GHz planar integrated receiver // Microwave

- and Guide Wave Letters. – 1993. – Vol. 3, No. 7. – P. 205-207.
58. Hesler J. L., Hall W. R. et al. Fixed-tuned submillimeter wavelength waveguide mixer using planar Schottky-barrier diodes // IEEE Trans. – 1997. – Vol. MTT-45, No. 5. – P. 653-658.
59. Kormenyos B. K., Ostdevk P. H. et al. Planar wide-band 80-200 GHz subharmonic receiver // IEEE Trans. – 1993. – Vol. MTT-41, No. 10. – P. 1730-1741.
60. Harris A. I., Jaffe D. T. et al. The UCB/MPE Cassegrain submillimeter heterodyne spectrometer // Int. J. Infrared Millimeter Waves. – 1987. – Vol. 8, No. 8. – P. 857-884.
61. Harris A. I., Statzuki J. et al. Measured mixer noise temperature and conversion loss of a cryogenic Schottky diode mixer near 800 GHz // Int. J. Infrared Millimeter Waves. – 1989. – Vol. 10, No. 11. – P. 1371-1376.
62. Zmuidzinis J., Betz A. L. et al. A corner-reflection mount for far infrared wavelengths // Infrared Phys. – 1989. – Vol. 29, No. 1. – P. 119-132.
63. Betz A. L., Boreiko R. T. HgCdTe photoconductive mixer for 2-8 THz // Proc. 12-th Int. Space THz Technol. Conf. – San Diego, C. A. – 2001. – P. 92-101.
64. Pickett H. M., Hardy J. C. et al. Characterization of dual-mode horn for submillimeter wavelengths // IEEE Trans. – 1984. – Vol. MTT-32, No. 8. – P. 936-938.
65. Ediss G. A., Wang P. et al. Quasi-optical components for 230 and 460 GHz // IEE Proc. Pt. H, Microwaves, Antennas and Propagation. – 1985. – Vol. 132, No. 2. – P. 99-105.
66. Ediss G. A. Dual-mode horn at millimeter and submillimeter wavelengths // IEE Proc. Pt. H, Microwaves, Antennas and Propagation. – 1986. – Vol. 133, No. 1. – P. 18-24.
67. Thomas B. M. Design of corrugated conical horn // IEEE Trans. – 1978. – Vol. AP-26, No. 2. – P. 258-263.
68. Whyld R. J. Millimeter-wave Gaussian beam-mode optics and corrugated feed // IEE Proc. Pt. H, Microwaves, Antennas and Propagation. – 1984. – Vol. 131, No. 4. – P. 254-264.
69. Johansson J. E. The diagonal horn as sub-mm antenna // IEEE Trans. – 1984. – Vol. MTT-34, No. 5. – P. 795-800.
70. Ediss G. A. Pyramidal horn at 460 GHz // Electron. Lett. – 1984. – Vol. 20, No. 3. – P. 345-350.
71. Inggveson K. S. Near-millimeter imaging with integrated planar receptors: General requirements and constraints // In: Infrared and Millimeter Waves, Ed. by K. J. Button. – London: Academic Press, 1983. – Vol. 10, Ch. 2. – P. 91-110.
72. Rebeiz G. M. Millimeter wave and terahertz integrated circuit antennas // Proc. IEEE. – 1992. – Vol. 80, No. 11. – P. 1748-1761.
73. Don B., Sun Z. L. Ray tracing on extended hemispherical and elliptical silicon dielectric lenses // Int. J. Infrared Millimeter Waves. – 1995. – Vol. 16, No. 11. – P. 1993-2010.
74. Raisanen A. V. Frequency multipliers for millimeter and submillimeter wavelengths // Proc. IEEE. – 1992. – Vol. 80, No. 11. – P. 1842-1852.
75. Lauhi I. T., Raisanen A. V. et al. Colled Schottky varactor frequency multipliers at submillimeter wavelengths // IEEE Trans. – 1993. – Vol. MTT-41, No. 4. – P. 565-572.
76. Erickson N. High efficiency submillimeter frequency multipliers // Dig. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. – Dallas, Tex. – 1990. – Vol. 3. – P. 1301.
77. Raisanen A. V. Recent advances in the studies of frequency multipliers at millimeter and submillimeter wavelengths // Proc. 24-th Europ. Microwave Conf. – Cannes. – 1994. – Vol. 1. – P. 133-143.
78. Archer J. W. A novel quasi-optical frequency multiplier design for millimeter and submillimeter wavelengths // IEEE Trans. – 1984. – Vol. MTT-32, No. 4. – P. 421-433.
79. Lyons B. N., Lidholm V. S. et al. Experimental and theoretical analysis of a waveguide based quasi-optical multipliers // Int. J. Infrared Millimeter Waves. – 1992. – Vol. 13, No. 5. – P. 679-705.
80. Morruz G. I., Meraes J. C. S. Far infrared laser lines and assignments of CH₃OH: A review // Int. J. Infrared Millimeter Waves. – 1992. – Vol. 13, No. 9. – P. 1269-1313.
81. Raum R. Design of a 2,5 THz submillimeter wave laser with optical pump beam guiding // Int. J. Infrared Millimeter Waves. – 1995. – Vol. 16, No. 12. – P. 2147-2162.
82. Dansing R., Van der Wal P. et al. A compact submillimeter laser systems for airborne applications // Proc. Laser-95. – Munich. – 1995.
83. Brown E. R., Smith F. W. et al. Coherent millimeter-wave generation by heterodyne conversion in low-temperature-grown GaAs photoconductors // J. Appl. Phys. – 1993. – Vol. 73, No. 3. – P. 1480-1484.
84. Brown E. R. All solid-state photomixing THz transmitter // DARPA proposal to BAA 99-15. Univ. California at Los Angeles. – Los Angeles, CA. – Feb. 1999.
85. Brown E. R., McIntosh K. A. et al. Photomixing up to 3,8 THz in low-temperature-grown GaAs // Appl. Phys. Lett. – 1995. – Vol. 66, No. 3. – P. 285-287.

86. Алтухов И. В., Каган М. С. и др. Внутрицентричная инверсия как причина индуцированного излучения в сильно деформированном р-Ge и структуре SiGe/Si // Письма в ЖЭТФ. – 1994. – Т. 59, №7-8. – С. 476.
87. Каган М. С., Алтухов И. В. и др. Стимулированное излучение терагерцового диапазона из напряженного р-Ge // Радиотехника и электроника. – 2003. – Т. 48, №9. – С. 1137-1144.
88. Nagatasuma T., Enpuku K. et al. Flux-flow type Josephson oscillator for millimeter and submillimeter wave region // J. Appl. Phys. – 1984. – Vol. 54, No. 11. – P. 3302-3310.
89. Goldsmith P. P. A quasi-optical feed system for radioastronomical observations at millimeter wavelengths // BSTJ. – 1977. – Vol. 56, No. 8. – P. 1483-1454.
90. Lambert D. K., Richards P. L. Martin-Puplett interferometer: An analysis // Appl. Opt. – 1978. – Vol. 17, No. 8. – P. 1598-1608.
91. Erickson N. R. A directional filter diplexer using optical techniques for millimeter and submillimeter wavelengths // IEEE Trans. – 1977. – Vol. MTT-25, No. 5. – P. 865-873.
92. Burton C. H., Akimoto Y. A polarizing Michelson interferometer for the millimeter and submillimeter region // Infrared Phys. – 1980. – Vol. 20, No. 1. – P. 115-123.
93. Ulrich R., Renk K. F. et al. Tunable submillimeter interferometer of the Fabry-Perot type // IEEE Trans. – 1963. – Vol. MTT-11, No. 9. – P. 363-370.
94. Pickett H. M., Chin A. F. T. Folded Fabry-Perot quasi-optical ring resonator diplexer: Theory and experiments // IEEE Trans. – 1983. – Vol. MTT-31, No. 5. – P. 573-584.

Малошумливі субміліметрові системи когерентного приймання (сучасний стан та тенденції розвитку)

I. I. Єру

Проаналізовано сучасний стан та тенденції розвитку малошумливих систем когерентного приймання, призначених для використання на довжинах електромагнітних хвиль коротших 1 мм. Розглянуто головні особливості гетеродинних приймальних систем на основі НІН-змішувачів, напівпровідникових та надпровідникових НЕВ-змішувачів (змішувачів болометричного типу на ефекті “гарячих електронів”) та ДБШ-змішувачів.

Low-Noise Submillimeter Coherent Receiver Systems (State-of-the-Art and Development Trends)

I. I. Eru

The state-of-the-art and development trends for the low-noise coherent receiver systems for the e. m. wavelengths shorter than 1 mm are analyzed. The major peculiarities of coherent mixer reception systems, such as those employing SIS mixers, semiconducting and superconducting HEB mixers and Schottky mixers, are considered.