

Полупроводниковые терагерцовые системы когерентного приема на эффекте “горячих электронов”

И. И. Еру

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

Статья поступила в редакцию 14 августа 2008 г.

Проведен анализ современных возможностей и перспектив создания полупроводниковых преобразователей частоты на основе эффекта “горячих электронов” для высокочувствительных приемных систем терагерцового диапазона.

Введение

В последнее время наблюдается интенсивное продвижение различного рода научных исследований и технических разработок в субмиллиметровый диапазон длин волн и далее, в область еще более коротких длин волн – в терагерцовый диапазон частот [1-4].

В этих исследованиях и разработках очень важным вопросом, в подавляющем большинстве случаев, является поиск решения проблемы регистрации (приема) предельно слабых сигналов. Иными словами, одной из главных задач является создание приемных систем с минимально возможным уровнем собственных шумов.

В настоящее время все разрабатываемые в рассматриваемом частотном интервале приемные системы можно разделить на две группы: системы когерентного приема [5] и системы некогерентного приема [6].

Главное отличие (и преимущество) метода когерентного приема от метода некогерентного приема, заключаются в том, что первый позволяет одновременно регистрировать не только амплитуду сигнала, принятого антенной, но и его фазу, а второй – только амплитуду (мощность). Наличие информации о фазе принятого сигнала в системах когерентного приема открывает возможности для использова-

ния специальных современных методов обработки его спектральных характеристик со сверхвысоким спектральным разрешением $v/\Delta v_{\min}$ до 10^{11} , где Δv_{\min} – минимальный разрешаемый данным спектрометром интервал частот между двумя соседними спектральными линиями, а v – средняя частота этих двух линий. Такая особенность систем когерентного приема и является основной причиной повышенного интереса ко всем исследованиям, направленным на решение проблемы создания маломощных систем когерентного приема для работы на максимально высоких частотах гига- и терагерцового диапазона. Что касается систем некогерентного приема, то они уже сегодня работают во всем интервале частот от СВЧ до оптического диапазона [6], но, к сожалению, не позволяют проводить спектральные исследования со столь же высоким спектральным разрешением, как у систем когерентного приема.

Основной особенностью систем когерентного приема на длинах волн короче 1 мм является то, что все они выполняются исключительно по гетеродинной схеме. Это обусловлено тем, что для этого диапазона длин волн совершенно отсутствуют какие-либо типы входных антенных усилителей, что полностью исключает реализацию линейных приемных систем прямого усиления. В приемных систе-

мах гетеродинного типа весь спектр сигнала, принятого антенной, переносится с помощью преобразователя частоты в область существенно более низких частот ($1 \div 10$ ТГц). Здесь он усиливается маломощными высокоэффективными транзисторными усилителями и уже после этого подвергается всей необходимой обработке и исследованиям.

Результаты практических разработок гетеродинных приемных систем свидетельствуют о том, что вклад шумов частотного преобразователя в полный уровень шумов при переходе из миллиметрового в субмиллиметровый диапазон начинает быстро нарастать. В терагерцовом диапазоне величина вклада шумов такого преобразователя составляет уже более половины полного уровня шумов. В связи с этим в терагерцовом диапазоне преобразователь частоты становится основным узлом всех гетеродинных приемных систем, определяющим чувствительность системы. В свою очередь, собственные шумы и потери преобразователя частоты определяются, в основном, нелинейным элементом.

В интервале частот $0.1 \div 1.0$ ТГц рекордно низким уровнем собственных шумов среди всех других систем когерентного приема обладают гетеродинные приемные системы с преобразователями частоты на основе СИС-элементов (туннельных соединений: сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник), выполняемые, как правило, из ниобия. Уровень собственных шумов приемных систем с ниобиевыми СИС-элементами на частотах до $0.6 \div 0.7$ ТГц менее чем на порядок превышает соответствующие значения их квантового предела. На более высоких частотах ($1.0 \div 1.3$ ТГц) уровень шумов начинает быстро нарастать, что обусловлено ростом высокочастотных потерь в самих СИС-элементах.

Однако на частотах выше $1.25 \div 1.35$ ТГц реализовать такие СИС-элементы и соответственно СИС-преобразователи и СИС-системы когерентного приема на основе обычных низкотемпературных сверхпроводников становится уже принципиально невозможным. Это обусловлено фундаментальными причинами, связанными с физикой туннельного эффекта в

СИС-структуре. Как показывает анализ [5, 7], туннельный эффект в такой структуре в принципе возможен лишь на частотах, для которых энергия кванта излучения ($h\nu$) не превышает ширины энергетической “щели” (2Δ), всегда возникающей в спектре квазичастичных возбуждений данного сверхпроводника при переходе его из нормального в сверхпроводящее состояние. Для ниобия эта частота порядка 1.4 ТГц. Среди всех низкотемпературных сверхпроводников величина этого параметра больше только у нитрида ниобия – около 2.4 ТГц. Но первые же эксперименты с СИС-элементами из нитрида ниобия показали, что даже на относительно низких частотах, порядка $0.3 \div 0.4$ ТГц, уровень шумов приемных СИС-систем на его основе уже существенно выше, чем в случае чистого ниобия. Это, как оказалось, обусловлено изначально существенно более высоким уровнем высокочастотных потерь в нитриде ниобия.

Исследования возможности повышения рабочих частот СИС-элементов и преобразователей частоты на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) ведутся уже достаточно давно [6-11]. Однако даже если такие СИС-приемники на основе ВТСП удастся реализовать, то, судя по значениям их критических температур и соответственно ширине энергетической “щели”, это позволит увеличить предельно достижимые рабочие частоты до $10 \div 12$ ТГц. Но и уровень шумов будет соответственно выше. Иными словами, создание СИС-приемников для терагерцового диапазона представляется маловероятным.

В связи с этим на частотах выше 1 ТГц в гетеродинных системах когерентного приема используются только преобразователи частоты на полупроводниковых диодных структурах с барьером Шоттки (ДБШ) [5].

Главной особенностью и преимуществом приемных систем с ДБШ-преобразователями частоты является то, что они не требуют для нормальной работы криогенного охлаждения. И кроме того, что очень существенно, у ДБШ-структур отсутствуют какие-либо принципиальные ограничения на повышение их рабочих частот. Однако уровень шумов ДБШ-приемников значительно выше, чем у СИС-прием-

ников, а требуемый уровень мощности гетеродина для них выше на 3–4 порядка. К тому же следует особо отметить, что технологические проблемы, возникающие при создании ДБШ для работы в терагерцовом диапазоне, с ростом рабочих частот становятся практически непреодолимыми на частотах выше 30 ТГц.

Последнее обусловлено тем, что ДБШ, как и СИС-элементы, имеют принципиально сложную структуру. У ДБШ – тонкий, субмикронной толщины, эпитаксиальный слой между анодом и высоколегированной подложкой, а у СИС-элементов – очень тонкий, порядка десятка ангстрем, слой изолятора между двумя сверхпроводниками. Вследствие этого основную часть эквивалентного импеданса устройств составляет емкостный реактанс, существенно шунтирующий их на частоте входного сигнала. Это обстоятельство обуславливает круто нарастающий с частотой уровень их потерь и шумов. Поэтому технология изготовления этих устройств предполагает сокращение их линейных размеров с ростом рабочей частоты. Но подобная миниатюризация имеет свой реальный предел. После достижения этого предела все параметры таких устройств будут быстро ухудшаться с ростом рабочей частоты из-за нарастающего негативного влияния емкостного шунтирования. По этой причине удалось создать опытные образцы ДБШ лишь для рабочих частот не выше 25 ÷ 30 ТГц. Здесь необходимо подчеркнуть следующее. Уровень собственных шумов всех приемных ДБШ-систем вообще, как уже отмечалось, существенно (более чем на порядок) выше, чем у приемных СИС-систем.

В связи с этими обстоятельствами и поиском решения проблемы создания малошумящих систем когерентного приема для терагерцового диапазона было обращено внимание на изучение возможностей использования для преобразования частоты нелинейных свойств полупроводников, обусловленных обнаруженным в них эффектом так называемых “горячих электронов” (см. ниже). Такие нелинейные элементы получили название “полупроводниковые НЕВ-элементы” (hot electron bolometer). В последнее время возрастает

интерес к сверхпроводниковым НЕВ-элементам (см. например, [12]).

Терагерцовые системы когерентного приема на основе полупроводниковых НЕВ-преобразователей частоты

Возможность возникновения эффекта “горячих электронов” в зоне проводимости полупроводника, подвергнутого воздействию внешнего высокочастотного электромагнитного излучения, впервые была обоснована и подробно проанализирована в работе [13]. Речь, вкратце, там шла о следующем.

При большой концентрации электронов в полупроводнике (при высокой степени его легирования) межэлектронные взаимодействия эффективно и с большой скоростью перераспределяют энергию между электронами в зоне проводимости. Поэтому для описания степени “нагрева” электронного “газа” во внешнем электромагнитном поле можно достаточно обоснованно пользоваться понятием его “электронной температуры” T_e . Условия применимости такого приближения определяются обычно путем сравнения скорости потери энергии быстрыми (“горячими”) электронами при межэлектронных столкновениях со скоростью потери энергии при столкновениях с фононами. Правомерно использовать понятие “электронная температура” по мере роста концентрации электронов в зоне проводимости полупроводника, уменьшения их тепловой скорости (т. е. при его охлаждении) и увеличения времени их рассеяния (релаксации) на колебаниях решетки. Последнее особенно велико в полупроводниках с малой эффективной массой фононов (например, InSb) и при глубоком охлаждении этих полупроводников до гелиевых температур. Кроме того, эффективность взаимодействия такого “электронного газа” с внешним излучением, а значит и эффект “горячих электронов” в полупроводнике существенно усиливаются при помещении его во внешнее постоянное магнитное поле в условиях электронного циклотронного резонанса, когда

$$\omega_n \tau_n \gg 1,$$

где ω_n – частота циклотронного резонанса, а τ_n – время свободного пробега электронов.

Температуру T_e электронов как функцию электрического поля E находят из условия баланса между энергией, передаваемой внешним полем электронам в зоне проводимости полупроводника и энергией, отдаваемой “нагретыми” электронами кристаллической решетке:

$$\sigma(T_e)E^2 = P(T_e),$$

где $\sigma(T_e)$ – проводимость полупроводника, а $P(T_e)$ – мощность, передаваемая “горячими” электронами кристаллической решетке в единице объема. При этом предполагается, что, несмотря на “нагрев” электронов электромагнитным полем и их взаимодействие с фононами, температура кристаллической решетки T_0 изменяется очень незначительно и остается практически неизменной.

Решив это уравнение, можно найти, в частности, форму вольтамперной характеристики данного полупроводникового элемента и определить степень ее нелинейности.

Из приведенного уравнения баланса энергии следует, что в оговоренных условиях ($T_0 \approx \text{const}$) квадратичный по полю ($\sim E^2$) относительный прирост проводимости полупроводника может быть описан выражением

$$\sigma = \sigma_0(1 + \beta E^2),$$

где

$$\beta(T_e) = \sigma^{-1} d\sigma/dE^2 = (d\sigma/dT_e)/(dP/dT_e).$$

Величина β определяет степень нелинейности вольтамперной характеристики полупроводникового НЕВ-элемента. При этом необходимо отметить, что наблюдающийся здесь своеобразный фотоэффект связан уже не с ростом концентрации электронов в зоне проводимости, как в случае обычного фотоэффекта, а с уве-

личением их подвижности. В связи с этим такой фотоэффект часто называют фотоэффектом 2-го рода.

И наконец, еще одним важным параметром в рассматриваемом механизме взаимодействия электрических полей с “электронным газом” в зоне проводимости полупроводника является, как уже отмечалось выше, время релаксации τ_e энергии электронов. Оно определяет инерционность такого типа фотопроводимости и определяется как

$$\tau_e = nc_e(T_e)/(dP/dT_e),$$

где n – концентрация электронов, а c_e – теплоемкость “электронного газа” в расчете на один электрон.

Найдя величины $P(T_e)$, $\sigma(T_e)$ и $c_e(T_e)$, можно вычислить все интересующие нас характеристики полупроводникового НЕВ-элемента и все особенности его поведения в электрическом поле. Кроме этого, появляется возможность определить его характерную фотопроводимость, обусловленную, как уже говорилось, ростом подвижности (а не концентрации!) электронов в зоне проводимости полупроводника, вызванным повышением температуры T_e “электронного газа” под влиянием внешнего электромагнитного излучения. Именно такой эффект воздействия излучения на проводимость полупроводника принято описывать как эффект “горячих электронов”. И именно он лежит в основе рассматриваемых нелинейных свойств полупроводникового НЕВ-элемента, используемого для преобразования частоты.

Главным отличием таких НЕВ-элементов от ДБШ и СИС-элементов является то, что они представляют собой элементы не слоистого, а объемного типа. И поэтому все они работают в режиме практически чисто резистивной нагрузки с ничтожно малой последовательной индуктивной реактивностью. Эта особенность всех НЕВ-элементов обуславливает необычайно слабую зависимость их параметров и линейных размеров от частоты. А это обстоятельство означает практически полное отсутствие каких-либо технологичес-

ких ограничений для использования таких НЕВ-преобразователей частоты в области все более высоких частот терагерцового диапазона.

Если говорить о параметрах преобразователя частоты на основе рассматриваемого нелинейного полупроводникового НЕВ-элемента, то дело обстоит следующим образом. В рассматриваемом диапазоне частот полупроводниковая НЕВ-структура не успевает реагировать на отдельный цикл высокочастотного излучения. Наоборот, предполагается, что полупроводниковый элемент имеет постоянную времени τ_e , существенно превышающую период входного сигнала. Как уже отмечалось выше, в такой структуре в качестве механизма, формирующего ее нелинейные свойства, используется “нагрев” электронов в зоне проводимости внешним электрическим полем, что и приводит к возрастанию подвижности электронов и соответствующему росту проводимости полупроводника. При этом возникает, хоть и очень незначительный, нагрев кристаллической решетки, в процесс оказывается вовлечена тепловая релаксация электронной системы полупроводника вследствие взаимодействия с кристаллической решеткой. Характерное значение времени этого процесса τ_e в монокристаллических полупроводниках составляет обычно не менее 10^{-7} с. Именно это обстоятельство не позволяет в миллиметровом и более коротковолновых диапазонах длин волн реагировать таким полупроводниковым структурам на каждый высокочастотный цикл внешнего излучения. Но оно же, к сожалению, ограничивает максимальные значения промежуточных частот (ПЧ) НЕВ-преобразователей частоты, использующих обычные монокристаллические полупроводниковые НЕВ-структуры, на уровне, не превышающем 1 МГц.

Анализ [14] параметров рассматриваемого полупроводникового НЕВ-преобразователя частоты позволил установить следующее. В самом общем случае потери преобразования полупроводникового НЕВ-преобразователя частоты, т. е. коэффициент передачи от входа СВЧ сигнала до выхода ПЧ сигнала, может быть определен с помощью следующего выражения:

$$L = \frac{2}{P_{\text{тс}} P_{\text{гет}}} \frac{R_0^2 (R_0 + R_{\text{пч}})^2}{C^2 4R_0 R_{\text{пч}}} \left(1 - \frac{CP_{\text{тс}}}{R_0} \frac{R_{\text{пч}} - R_0}{R_{\text{пч}} + R_0} \right) \times (1 + (\omega_{\text{пч}} \tau_e)^2).$$

Здесь $P_{\text{тс}}$ – мощность тока смещения, рассеиваемая в НЕВ-элементе; $P_{\text{гет}}$ – мощность гетеродина, рассеиваемая в НЕВ-элементе; R_0 – сопротивление НЕВ-элемента при полной рассеиваемой в нем мощности $P_0 = P_{\text{тс}} + P_{\text{гет}}$; $C = (dR/dP)_{P=P_0}$ – параметр, знак которого определяется знаком температурного коэффициента сопротивления НЕВ-элемента; $\omega_{\text{пч}}$ – угловая ПЧ; τ_e – постоянная времени НЕВ-элемента.

Анализ этого выражения позволяет выделить два особых случая.

1. Полное согласование преобразователя по ПЧ выходу, когда $R_0 = R_{\text{пч}}$, где $R_{\text{пч}}$ – эквивалентное сопротивление нагрузки преобразователя по ПЧ. В этом случае оптимальная мощность источника тока смещения оказывается равной

$$P_{\text{тс}} = P_{\text{гет}} = P_0/2,$$

и соответствующие потери преобразования

$$L_{\text{согл}} = 8(R_0/CP_0)^2 [1 + (\omega_{\text{пч}} \tau_e)^2].$$

Отсюда следует, что в пределе при $R_0/CP_0 \rightarrow 1$ и при $\omega_{\text{пч}} \tau_e \ll 1$ минимальные потери преобразования в этом случае составляют 9 дБ.

2. Оптимальная нагрузка преобразователя по ПЧ выходу, минимизирующая потери преобразования. Величина такой оптимальной нагрузки, как оказывается, равна

$$R_{\text{пч опт}} = R_0 [(1 + CP_0/R_0)/(1 - CP_0/R_0)]^{1/2}.$$

Что касается минимально возможных потерь преобразования, то они в рассматриваемом случае составляют

$$L_{\text{мин}} = 4(R_0/CP_0)^2 \left[1 + \left(1 - (CP_0/R_0)^2 \right)^{1/2} \right] \times \\ \times \left[1 + (\omega_{\text{пч}} \tau_e)^2 \right].$$

Детальный анализ этого выражения показывает, что фундаментальный предел минимума потерь преобразования НЕВ-преобразователя частоты составляет в данном случае 6 дБ.

Первым полупроводником, в котором экспериментально был обнаружен эффект “горячих электронов”, оказался, как и следовало ожидать, InSb n-типа, следующим стал GaAs. Тем самым впервые в полупроводниках был найден столь необычный, по сути дела, болометрический эффект. Однако, в отличие от того, что имеет место в обычном болометре, этот эффект никак не связан с нагревом кристаллической решетки, обладающей существенно более высокой теплоемкостью, чем “электронный газ”. Таким образом, были открыты возможности для создания новых высокочувствительных систем некогерентного приема – болометрических термоприемников НЕВ-типа с быстрым действием существенно более высоким, чем у обычных болометров с нагреваемой решеткой (у InSb и GaAs $\tau_e \approx 10^{-7}$ с) [15, 16].

Одновременно были созданы первые преобразователи частоты и гетеродинные приемные системы на их основе, использующие нелинейность вольтамперной характеристики полупроводникового НЕВ-элемента, обусловленную описанным выше изменением его проводимости вследствие эффекта “горячих электронов” [15-18]. Но в этих первых экспериментах была обнаружена и основная проблема полупроводниковых НЕВ-преобразователей частоты. Это, как отмечалось выше, относительно низкие значения их ПЧ и соответственно узость полос ПЧ приема.

Нелинейность вольтамперной характеристики НЕВ-элемента, дающая возможность осуществлять преобразование частот, обусловлена тем, что проводимость этого элемента является функцией подвижности электронов в зоне проводимости, т. е. функцией эффективной температуры нагрева “электронного газа” в нем. Поэтому максимальная скорость, с ко-

торой может изменяться сопротивление такого элемента, а следовательно и максимальная частота такого изменения определяются максимальной скоростью изменения температуры электронной системы при изменении внешнего поля. В условиях очень высокой скорости фотон-электронного взаимодействия эта максимальная частота оказывается ограниченной (сверху) лишь скоростью отдачи энергии “нагретого” “электронного газа” фононной системе, т. е. временем его тепловой релаксации τ_e . У InSb и GaAs, ставших основными материалами для изготовления первых полупроводниковых НЕВ-элементов, это время оказалось весьма большим – порядка 10^{-7} с. Обусловлено это тем, что в рассматриваемых полупроводниках в процессе тепловой релаксации нагретого внешним полем “электронного газа” возникает существенно замедляющий ее скорость хорошо известный в физике эффект так называемого “фононного узкого горла”. Впервые он был обнаружен в процессах спин-решеточной релаксации, происходящих в парамагнетиках, еще в 1941 г. [19]. В рассматриваемом случае полупроводниковых кристаллов InSb и GaAs этот эффект связан с повторной реabsорбцией уже остывающими электронами энергии фононов, нагретых взаимодействием с “горячими” электронами, что существенно снижает скорость остывания “электронного газа”.

С одной стороны, низкая скорость остывания нагретого “электронного газа” в InSb и GaAs облегчила его нагрев и обнаружение самого эффекта “горячих электронов” именно в этих полупроводниках. Но с другой, в режиме смешения на такой НЕВ-элемент действуют два сигнала: принимаемый и сигнал гетеродина с длинами волн, лежащими, обычно, в миллиметровом диапазоне, и более короткими. В этих условиях электронная система НЕВ-элемента (ее температура) будет успевать реагировать на изменение мощностей двух излучений лишь с доступной ей разностной их частотой, т. е. с ПЧ. И естественно поэтому максимальные значения ПЧ будут ограничены не скоростью нагрева “электронного газа” (она, как уже отмечалось, очень высока), а существенно меньшей скоростью его остывания, скоростью тепловой релаксации. А следовательно и ширина B полос ПЧ

приема гетеродинных приемных систем с такими полупроводниковыми НЕВ-преобразователями тоже оказывается всегда ограниченной:

$$B \leq 1/(2\pi\tau_e).$$

Действительно, результаты первых прямых экспериментов как в случае InSb, так и в случае GaAs показали, что ширина полос ПЧ приема таких гетеродинных приемных систем оказались порядка 1 МГц, что хорошо согласуется с приведенными выше значениями времен электрон-фононной релаксации в рассматриваемых полупроводниках. Но столь малые значения ширины полос ПЧ приема в подавляющем большинстве случаев являются совершенно недостаточными.

Из анализа этой ситуации нетрудно понять, что более высокие ПЧ и соответственно более широкие полосы ПЧ могут быть, вообще говоря, реализованы в рассматриваемых НЕВ-преобразователях частоты путем повышения их рабочих температур (до $60 \div 100$ К). Однако повышение рабочих температур будет неизбежно сопровождаться соответствующим ростом потерь преобразования и, главное, уровня шумов преобразователя частоты. Вследствие этого обстоятельства интерес к таким полупроводниковым НЕВ-преобразователям частоты на некоторое время заметно угас.

Но относительно недавно ситуация кардинально изменилась. Появилась серия публикаций [20-27], в которых впервые было высказано обоснованное мнение о том, что утверждение о неизбежной узости полос ПЧ всех полупроводниковых НЕВ-преобразователей частоты не является однозначным.

В этих работах впервые было обращено внимание на так называемые двумерные полупроводниковые гетероструктуры, их электронные подсистемы и особенности происходящих в них электрон-фононных взаимодействий. Информация, полученная при исследовании процессов в таких структурах, помогла значительно расширить возможности анализа и повысить уровень понимания всех действующих в них релаксационных механизмов. Она стала определяющей при разработке полупроводни-

ковых приборов на основе эффекта “горячих электронов” в полупроводниковых гетероструктурах и для их практического применения.

Результаты исследований в этой области показывают, что в таких “низкоразмерных” полупроводниках скорость энергетической релаксации существенно выше, чем в “объемных” материалах. Дело в том, что в двумерной гетероструктуре на границе ее раздела формируется квази-двумерный слой “электронного газа” (2DEG), толщиной порядка размера одного электрона [20, 21]. В этом слое при низких температурах подвижность электронов существенно возрастает. Это обусловлено тем, что электроны в таком слое оказываются пространственно отделенными от рассеивающих их центров кристаллической структуры – ионов. Но главное обстоятельство заключается в том, что в столь тонком электронном слое практически исключается возможность возникновения эффекта “фононного узкого горла”, существенно снижающего скорость релаксации энергии “горячих” электронов путем электрон-фононных взаимодействий в обычных “объемных” монокристаллических полупроводниках. Отсутствие “фононного узкого горла” обусловлено следующим. При столь малой толщине электронного слоя фонон, “нагретый” взаимодействием с “горячими” электронами, почти мгновенно покидает этот слой, что делает практически невозможной в этих условиях реабсорбцию “остывающими” электронами энергии таких фононов. По этой причине в такой структуре существенно повышается скорость электрон-фононной релаксации.

В частности, анализ процессов релаксации энергии электронов посредством механизма электрон-фононных взаимодействий в квазидвумерной полупроводниковой гетероструктуре AlGaAs/GaAs [25] и прямые измерения времени релаксации фотоотклика в ней на излучение миллиметрового диапазона [26] показали, что в интервале температур $3 \div 20$ К среднее значение времени такой релаксации составляет всего 0.5 нс. А это свидетельствует о том, что использование рассматриваемой квазидвумерной гетероструктуры открывает реальную возможность повысить не менее чем на три порядка значение ПЧ и соответственно шири-

ну полосы ПЧ приема НЕВ-преобразователя частоты.

Действительно первые пробные экспериментальные результаты, полученные в этом направлении [21], показали, что быстродействие болометрических детекторов на основе такой гетероструктуры оказалось почти на три порядка выше, чем в случае использования обычного GaAs. А первые прямые эксперименты [22] с НЕВ-преобразователями частоты на основе таких полупроводниковых гетероструктур полностью подтвердили справедливость этих утверждений. На частоте 94 ГГц с преобразователем частоты на НЕВ-элементе на основе гетероструктуры была получена ПЧ около 1.7 ГГц.

И наконец, совсем недавно была опубликована работа [27], в которой на частоте 1 ТГц при детальном исследовании характеристик смесителя миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов на основе одиночного гетероперехода AlGaAs/GaAs при рабочей температуре 77 К были получены следующие характеристики. Его потери преобразования составили 13 дБ, шумовая температура приемника не превышала 1900 К, ширина полосы ПЧ приема достигала 4 ГГц, а требуемая при этом мощность гетеродина для смесительного элемента площадью 1 мкм² не превышала 0.5 мкВт. Эти цифры свидетельствуют, в частности, о перспективности создания многоэлементных матричных систем многолучевого приема субмиллиметрового и даже более коротковолнового диапазона длин волн.

Информация об экспериментах с НЕВ-преобразователями частоты на таких гетероструктурах в терагерцовом диапазоне в печати пока еще отсутствует. Однако результаты экспериментов на таких гетероструктурах на частотах до 1 ТГц свидетельствуют о том, что и в терагерцовом диапазоне нет никаких оснований ожидать возникновения каких-либо проблем.

Конструктивно все полупроводниковые НЕВ-преобразователи частоты, опробованные, как уже было сказано, пока только на частотах не выше 1 ТГц, реализуются, как правило, на волноводной основе. В них собственно полупроводниковый НЕВ-элемент (прямоугольный полупроводниковый брусочек размерами

в несколько долей миллиметра) располагается внутри прямоугольного волновода основного сечения (или с пониженной высотой) с закорачивающим поршнем на одном конце для регулировки согласования этого элемента с полем волновода. Для получения постоянного магнитного поля, повышающего эффективность работы НЕВ-элемента в условиях электронного циклотронного резонанса, используют малогабаритные сверхпроводниковые электромагниты, работающие в режиме замкнутого тока с отключенным источником питания. В качестве антенных облучателей в таких НЕВ-преобразователях на этих частотах используются различного рода рупорные облучатели.

В целом результаты анализа всей совокупности экспериментальных данных, полученных к настоящему времени при разработке полупроводниковых НЕВ-преобразователей и гетеродинных систем когерентного приема на их основе, позволяют утверждать следующее. На частотах до 1 ТГц у приемных систем с такими НЕВ-преобразователями частоты при рабочей температуре $10 \div 20$ К и шумах усилителя ПЧ порядка 10 К (криогенно-охлаждаемые транзисторные усилители) двухполосная шумовая температура T_{DSB} не превышает $450 \div 500$ К при ширине полосы ПЧ не менее 1 ГГц. Иными словами, параметры полупроводниковых НЕВ-приемников на этих частотах очень незначительно отличаются от параметров СИС-приемников. У приемников на ДБШ на этих частотах шумы выше не менее чем на порядок. Все это свидетельствует о безусловной перспективности использования полупроводниковых НЕВ-преобразователей частоты и высокочувствительных гетеродинных систем когерентного приема на их основе в терагерцовом диапазоне частот.

Заключение

Проведенный анализ современного состояния вопроса о перспективах использования эффекта “горячих электронов” в полупроводниках для преобразования частот терагерцового диапазона позволяет сделать следующие выводы.

Главной отличительной чертой и преимуществом полупроводниковых НЕВ-преобразовате-

лей частоты является то, что они, в отличие от СИС- и ДБШ-преобразователей, не имеют никаких принципиальных и технологических ограничений на использование в области все более высоких рабочих частот. К тому же требуемая для их работы мощность гетеродина на 4–5 порядков ниже, чем у ДБШ-преобразователей, и до порядка ниже, даже чем у СИС-преобразователей. Это существенно облегчает решение проблемы источника гетеродинного излучения для таких приемных систем. Для рассмотренных полупроводниковых НЕВ-систем когерентного приема сегодня уже найдены реальные возможности расширения их полос ПЧ по меньшей мере до 1 ГГц, а возможно и более. И наконец, что касается уровня их шумов, то даже на частотах до 1 ТГц он уже более чем на порядок ниже шумов ДБШ-приемников. Все это обуславливает тот интерес, который проявляется сегодня к вопросам, связанным с дальнейшим совершенствованием полупроводниковых НЕВ-приемных систем для использования в области все более высоких частот терагерцового диапазона.

Литература

- Еру И. И. Терагерцная техника и технология: современное состояние, тенденции развития и перспективы практического применения // Успехи современной радиоэлектроники. – 1997. – №3. – С. 51-77.
- Siegel P. H. Terahertz Technology // IEEE Trans. – 2002. – Vol. MTT-50, No. 3. – P. 910-928.
- Sensing with terahertz radiation / Ed. by D. Mittleman. – Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag, 2003.
- Woolard D. L., Brown R. et al. Terahertz Frequency Sensing and Imaging: A Time of Reckoning Future Applications? // Proc. IEEE. – 2005. – Vol. 93, No. 10. – P. 1722-1743.
- Еру И. И. Малошумящие субмиллиметровые системы когерентного приема (современное состояние и тенденции развития) // Радиофизика и радиоастрономия. – 2006. – Т. 11, №1. – С. 73-87.
- Еру И. И. Высокочувствительные системы некогерентного приема инфракрасного диапазона // Радиофизика и радиоастрономия. – 2006. – Т. 11, №2. – С. 198-210.
- Кошелец В. П., Шитов С. В. и др. Интегральные сверхпроводниковые приемники субмиллиметровых волн // Изв. вузов. Радиофизика. – 2003. – Т. 46, №8-9. – С. 686-701.
- Qiang Huang et al. Ideal tunneling characteristics in $Ba_{1-x}K_xBiO_3$ point-contact junctions with Au and Nb tips // Appl. Phys. Lett. – 1990. – Vol. 57, No. 11. – P. 2356-2358.
- Hou C. J., Fink R. L. et al. Low-leakage thin-film superconductor-insulator-normal metal tunnel junctions on co-evaporated $Ba_{1-x}Rb_xBiO_3$ and rf-sputtered $Ba_{1-x}K_xBiO_3$ // Appl. Phys. Lett. – 1992. – Vol. 60, No. 3. – P. 1262-1264.
- Kussmaul S. A., Hellman E. S. et al. Superconductor-insulator-superconductor tunnelling in $Ba_{1-x}K_xBiO_3$ grain boundaries // Appl. Phys. Lett. – 1993. – Vol. 63, No. 3. – P. 1529-1532.
- Zasadsinski J., Chenet J. et al. High T_c superconductor tunnel junctions for photon detectors // Proc. SPIE. – 1994. – Vol. 2211. – P. 710-717.
- Гольцман Г. Н., Лудков Д. Н. и др. Сверхпроводниковые смесители на горячих электронах терагерцового диапазона и их применение в радиоастрономии // Изв. вузов. Радиофизика. – 2003. – Т. 46, №8-9. – С. 671-686.
- Коган М. К теории горячих электронов в полупроводниках. // ФТТ. – 1962. – Т. 4, №9. – С. 2474-2484.
- Arams F., Allen C. et al. Millimeter mixing and detection in bulk InSb // Proc. IEEE. – 1966. – Vol. 54, No. 4. – P. 612-622.
- Kinch M. A., Rolling B. W. Detection of millimeter wave and submillimeter wave radiation by free carrier absorption in a semiconductor // Br. J. Appl. Phys. – 1963. – Vol. 14, No. 5. – P. 672-676.
- Fetterman H., Tannenwald P. E. et al. Millimeter and far infrared mixing in GaAs // Proc. Symp. SMM Waves. PIB. – New-York. – 1970.
- Padman R., White G. J. et al. A dual-polarization InSb receiver for 461/492 GHz // Int. J. Infrared Millimeter Waves. – 1992. – Vol. 13, No. 10. – P. 1487-1514.
- Brown E. R., Keene J. et al. A heterodyne receiver for the submillimeter wavelength region based on cyclotron resonance in InSb at low temperature // Int. J. Infrared Millimeter Waves. – 1985. – Vol. 6, No. 11. – P. 1121-1138.
- Van Vleck J. H. Calculation of energy exchange between lattice oscillators // Phys. Rev. – 1941. – Vol. 59, No. 9. – P. 730-736.
- Htormer H. L., Dingle R. et al. Two-dimensional electron gas at a semiconductor-semiconductor interface // Solid State Commun. – 1979. – Vol. 29, No. 7. – P. 705-709.
- Sakaki H., Hirakawa K. et al. Effects of electron heating on two-dimensional magnetotransport in AlGaAs/GaAs heterostructures // Surf. Sci. – 1984. – Vol. 142, No. 3. – P. 306-313.
- Гольцман Г. Н., Смирнов К. В. Электрон-фононное взаимодействие в двумерном электронном

- газе полупроводниковых гетероструктур при низких температурах // Письма в ЖЭТФ. – 2001. – Т. 74, №9-10. – С. 532-538.
23. Smith S. M., Cronin M. J. et al. Millimeter and sub-millimeter detection using Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs heterostructures // Int. J. Infrared Millimeter Waves. – 1987. – Vol. 8, No. 8. – P. 793-802.
24. Jian-Xun Yang, Farid Agahi et al. Wide-Bandwidth Electron Bolometric Mixers : A 2DEG Prototipe and Potential for Low - Noise THz Receivers // IEEE Trans. – 1993. – Vol. MTT-41, No. 4. – P. 581-589.
25. Веревкин А. А., Птицина Н. Г. и др. Энергетическая релаксация электронов в 2D-канале AlGaAs/GaAs в квазипроводящих условиях при низких температурах // Письма в ЖЭТФ. – 1995. – Т. 61, №7-8. – С. 579-582.
26. Веревкин А. А., Птицина Н. Г. и др. Прямые измерения времени энергетической релаксации на гетерогранице AlGaAs/GaAs в диапазоне 4.2÷50 К // Письма в ЖЭТФ. – 1996. – Т. 64, №5-6. – С. 371-375.
27. Морозов Д. В., Смирнов К. В. и др. Миллиметровый /субмиллиметровый смеситель на основе разогрева двумерного электронного газа в гетероструктуре AlGaAs / GaAs с фононным каналом охлаждения // Физика и техника полупроводников. – 2005. – Т. 39, №9. – С. 1117-1121.

Напівпровідникові терагерцеві системи когерентного приймання на ефекті “горячих електронів”

I. I. Eru

Проаналізовано сучасні можливості та перспективи створення напівпровідникових перетворювачів частоти на основі ефекту “горячих електронів” для високочутливих приймальних систем терагерцевого діапазону.

Semi-Conductor Terahertz Systems of Coherent Reception on the Effect of “Hot-Electrons”

I. I. Eru

Current possibilities and perspectives for employment of the semiconductor hot-electron bolometer mixers in the high-sensitivity terahertz receivers are analyzed.