

Миллиметровый/субмиллиметровый смеситель на основе разогрева двумерного электронного газа в гетероструктуре AlGaAs/GaAs с фоновым каналом охлаждения

© Д.В. Морозов, К.В. Смирнов, А.В. Смирнов[¶], В.А. Ляхов, Г.Н. Гольцман

Московский педагогический государственный университет,
119992 Москва, Россия

(Получена 27 сентября 2004 г. Принята к печати 14 октября 2004 г.)

Представлены экспериментальные результаты исследования основных характеристик смесителя миллиметрового/субмиллиметрового диапазонов на эффекте разогрева двумерного электронного газа гетероструктур AlGaAs/GaAs с фоновым каналом охлаждения носителей. Полоса преобразования смесителя составила 4 ГГц, внутренние потери преобразования 13 дБ, оптимальная мощность гетеродина 0.5 мкВт (для смесителя площадью 1 мкм²). Показана возможность создания приемника миллиметрового/субмиллиметрового излучения с шумовой температурой 1900 К на базе AlGaAs/GaAs-смесителя, а также перспективность его использования в матричных приемных элементах.

1. Введение

Наиболее перспективными приемниками излучения диапазона 0.5–6.0 ТГц являются гетеродинные детекторы. В настоящее время они используются при осуществлении таких проектов, как HERSHEL, SOFIA, TELIS [1] и др., направленных на создание радиотелескопов и спектрометров субмиллиметрового диапазона наземного, баллонного и космического базирования. Вместе с тем область возможного использования приемников терагерцового излучения намного шире — в медицине, пожарной охране, системах навигации, охранных системах и т.д. Расширению рынка гетеродинных детекторов препятствует прежде всего необходимость реализации сложных специальных условий для их работы. Так, имеющие рекордное значение шумовой температуры смесители на основе перехода сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС-смесители) [2] и смесители на основе эффекта электронного разогрева в тонкой пленке сверхпроводника (НЕВ-смесители) [3] нуждаются в охлаждении до температур ~ 4.2 К и ниже, что значительно усложняет работу с ними. Шумовая температура широко известных смесителей на основе диодов Шоттки, работающих даже при комнатной температуре, значительно возрастает на частотах более 1 ТГц [4]. Кроме того, смесители на диоде Шоттки требуют значительной (~ 1 мВт) мощности гетеродинного источника, что делает невозможным создание на их основе матричных приемных элементов, несомненно, значительно расширяющих область использования смесителей миллиметрового и субмиллиметрового (ММ–СММ) диапазонов.

Новый тип смесителя ММ–СММ диапазона на эффекте разогрева двумерного электронного газа в полупроводниковых гетероструктурах AlGaAs/GaAs был предложен в [5,6]. Механизм работы субмиллиметрового AlGaAs/GaAs-смесителя основан на разогреве

электронной подсистемы гетероструктуры при поглощении электромагнитного излучения. Разогрев приводит к изменению подвижности и сопротивления образца и, как следствие, возникновению сигнала фотопроводимости P_{if} на промежуточной частоте Δf (*intermediate frequency*, ПЧ) — разностной частоте излучения от гетеродинного источника и исследуемого объекта. Полоса ПЧ смесителя определяется временем релаксации температуры неравновесных („горячих“) электронов. В случае фонованого канала охлаждения, при температуре решетки 77 К, эта релаксация происходит путем передачи избыточной энергии оптическим фононам решетки. Если длина образца l удовлетворяет соотношению $l < \pi \sqrt{D\tau_{e-ph}}$, где D — коэффициент диффузии, τ_{e-ph} — время электрон-фононного взаимодействия, то создаются условия диффузионного выхода неравновесных носителей в контакты. В условиях нашего эксперимента исследовалась скорость электрон-фононного взаимодействия. Основываясь на результатах исследования электрон-фононного взаимодействия в AlGaAs/GaAs-гетероструктурах [7,8], авторы [5,6] показали, что полоса преобразования AlGaAs/GaAs-смесителя, работающего при температуре $T = 77$ К, составит ~ 3 ГГц при фотонном канале охлаждения горячих электронов. Авторы [9] продемонстрировали смеситель на AlGaAs/GaAs-гетероструктурах с баллистическим охлаждением носителей, имеющий полосу преобразования сигнала до ~ 40 ГГц. Теоретическая оценка шумовой температуры приемника на основе AlGaAs/GaAs-смесителя дала значения $T_n \approx 1500$ –2000 К на частоте гетеродина 1 ТГц [8], сравнимые с лучшими характеристиками сверхпроводниковых смесителей. Оценка такого параметра, как оптимальная мощность гетеродина для AlGaAs/GaAs-смесителя, проведенная авторами [8], позволила найти значение $P_{get} \approx 1$ мкВт при субмикронных размерах смесителя, что дает возможным создание смесителей матричных приемных секций на основе AlGaAs/GaAs.

[¶] E-mail: cleivy@mail.ru

Цель настоящей работы состояла в экспериментальном исследовании основных параметров смесителя на основе разогрета двумерного электронного газа в гетероструктуре AlGaAs/GaAs с фоновым каналом охлаждения носителей: потерь преобразования, полосы преобразования, оптимальной мощности гетеродина источника.

2. Исследуемые структуры

Структуры были изготовлены на основе одиночного гетероперехода $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Молярная доля Al в соединении $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ составила $x = 0.28-0.3$. Схематическое изображение структуры представлено на рис. 1. Для улучшения омического контакта к двумерному электронному газу был использован сильно легированный слой GaAs (концентрация легирующей примеси $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) толщиной 50 нм. Структуры были изготовлены по стандартной технологии с последовательным использованием методов: жидкостного химического травления меза-структуры, „взрывной“ фотолитографии при формировании контактной металлизации, термического напыления сплава AuGe с последующим отжигом при температуре 400°C в атмосфере инертного газа, удаления верхнего шунтирующего слоя GaAs. Типичные контактные сопротивления структур составили 10^{-3} Ом/см^2 . Подвижность μ и поверхностная концентрация электронов n_s были найдены из измерений осцилляций Шубникова–де-Гааза и пересчитаны для температуры $T = 77 \text{ К}$. Полученные значения μ и n_s , а также длина l и ширина структуры W представлены в таблице.

Структура	$\mu_{77\text{К}}, \text{ см}^2/\text{Вс}$	$n_{s,77\text{К}}, \text{ см}^{-2}$	$l, \text{ мкм}$	$W, \text{ мкм}$
15	$2.4 \cdot 10^4$	$2.5 \cdot 10^{11}$	35	100
5	$1.1 \cdot 10^5$	$3.5 \cdot 10^{11}$	190	60
1	$2.3 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^{11}$	1600	300
760	$7.7 \cdot 10^4$	$7.5 \cdot 10^{11}$	1000	500

3. Полоса преобразования AlGaAs/GaAs-смесителя

Экспериментальная установка для измерения полосы преобразования смесителя изображена на рис. 2. Излучение сигнального генератора с частотой 129.2 ГГц и гетеродина, частота которого изменялась в диапазоне 129.2–139.2 ГГц, подводилось к смесителю по квазиоптическому тракту, содержащему делитель луча. Мощность гетеродина на $\sim 7 \text{ дБ}$ превышала мощность сигнального генератора. Постоянный ток смещения подавался на смеситель посредством охлаждаемого широкополосного адаптера смещения. Сигнал ПЧ снимался

при помощи отрезка полужесткой коаксиальной линии и подавался на неохлаждаемые широкополосные усилители диапазона 0.1–10 ГГц с коэффициентом усиления $\sim 50 \text{ дБ}$. Усиленный сигнал регистрировался термисторным измерителем мощности.

Полоса ПЧ смесителя определялась из частотной зависимости величины сигнала смесителя P_{if} (при фиксированной мощности как сигнального источника, так и гетеродина) и в соответствии с [10]: $P_{if}(f)/P_{if}(0) = 1/(1 + (f/f_{3\text{дБ}})^2)$, где $f_{3\text{дБ}}$ — частота, на которой сигнал уменьшается в 2 раза. На рис. 3 приведена измеренная нами при $T = 77 \text{ К}$ частотная зависимость P_{if} для смесителя AlGaAs/GaAs (структура 5) с концентрацией двумер-

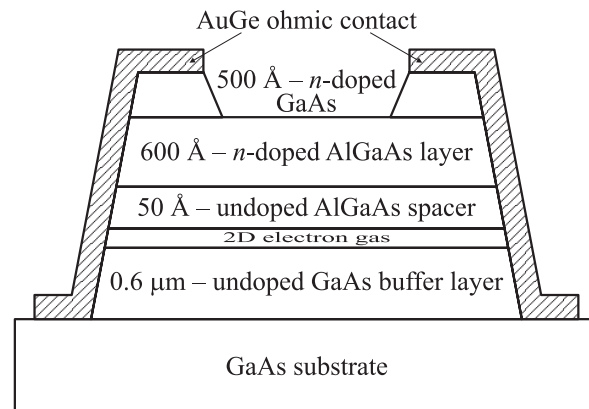


Рис. 1. Схематическое изображение исследуемой гетероструктуры AlGaAs/GaAs.

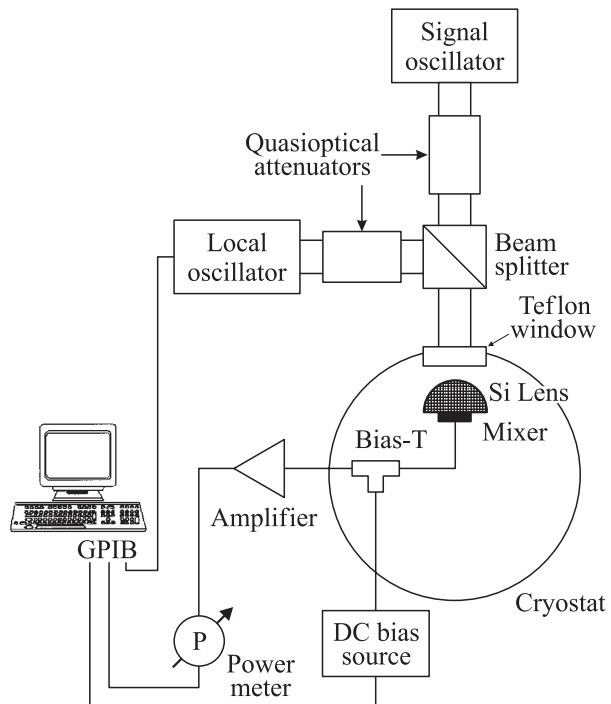


Рис. 2. Установка для измерения полосы преобразования AlGaAs/GaAs.

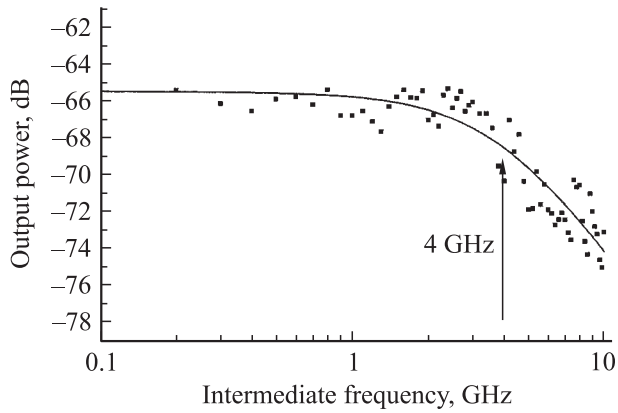


Рис. 3. Зависимость мощности выходного сигнала от промежуточной частоты для структуры 6 (по отношению к 1 мВт).

ных электронов $n_s = 3.5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ и подвижностью $\mu = 1.1 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Полоса промежуточных частот составила ~ 4 ГГц, соответствующее время электрон-фононного взаимодействия $\tau_{e-ph} = 0.04 \text{ нс}$.

4. Потери преобразования AlGaAs/GaAs-смесителя

Коэффициент потерь преобразования смесителя $L = 10 \lg(P_{in}/P_{if})$, где P_{in} — поглощенная мощность сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения, был найден нами с использованием метода изотерм [10], предполагающего эквивалентность разогрева двумерных электронов СВЧ излучением и постоянным током смещения. В этом случае и при условии полного согласования смесителя с трактом ПЧ $L = 10 \cdot \lg(8(R_{op}/KP_0)^2)$, где R_{op} — сопротивление образца в рабочей точке (*operating point*), P_0 — полная мощность, поглощаемая смесителем в рабочей точке, $K = (dR/dP)_{P=P_0}$ [10]. В оптимальной рабочей точке смесителя, согласно [10], $0.5 \cdot P_0 = P_{get} = P_{bi}$, где P_{get} и P_{bi} — поглощенные смесителем мощности гетеродина и постоянного тока смещения соответственно. Параметры R_{op} , P_0 , K находились из вольт-амперных характеристик смесителей.

Полученная нами зависимость коэффициента потерь преобразования AlGaAs/GaAs-смесителя при $T = 77 \text{ К}$ для структуры 1 ($\mu = 2.3 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$) и структуры 760 ($\mu = 7.7 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$) от поглощенной смесителем мощности, приходящейся на один электрон, представлена на рис. 4. Из графика видно, что лучшее значение коэффициента потерь преобразования для обеих структур реализуется в области большой поглощенной мощности или области сильного электронного разогрева. Минимальное значение потерь преобразования $L = 13 \text{ дБ}$ соответствует смесителю с большей подвижностью двумерного электронного газа. Представленная зависимость также свидетельствует, что одинаковое значение коэффициента потерь преобразования реализуется

для смесителей с различной подвижностью при разной степени разогрева двумерного электронного газа; в случае смесителя с низкой подвижностью требуется значительно большая поглощенная мощность.

Отметим, что при выборе рабочей точки смесителя, определяемой необходимостью согласования сопротивления структуры с сопротивлением тракта промежуточной частоты и постоянством мощности гетеродинного источника, потери преобразования зависят только от коэффициента K . Последний в свою очередь, с учетом постоянства концентрации двумерных электронов в области исследуемых электронных температур, определяется температурной зависимостью подвижности носителей. В области температур $\sim 77 \text{ К}$ релаксация импульса горячих электронов в гетероструктуре AlGaAs/GaAs возможна либо из-за рассеяния на остаточных примесях в GaAs, либо на полярных оптических фононах. Это демонстрируют полученные нами зависимости μ от температуры T в интервале 4.2–200 К для структур 1, 5 и 15 (рис. 5). На рисунке также представлена теоретическая расчетная зависимость $\mu(T)$ [11] для гетероструктуры AlGaAs/GaAs в случае рассеяния двумерных электронов на оптических фононах. Приведенные на рис. 5 зависимости показывают, что переход к доминированию оптического рассеяния для структур AlGaAs/GaAs с большей подвижностью двумерного электронного газа происходит при более низких температурах, чем для структур с меньшей подвижностью. Следовательно, для выхода на максимально возможное значение $d\mu/dT$ (и минимальное L), определяемое оптическим рассеянием, образцам с высоким μ потребуется меньшая мощность гетеродинного источника P_{get} . Этим полностью подтверждаются представленные выше зависимости для образцов с разными значениями подвижности двумерных электронов.

Оценки шумовой температуры приемника на основе AlGaAs/GaAs-смесителя были проведены на основе най-

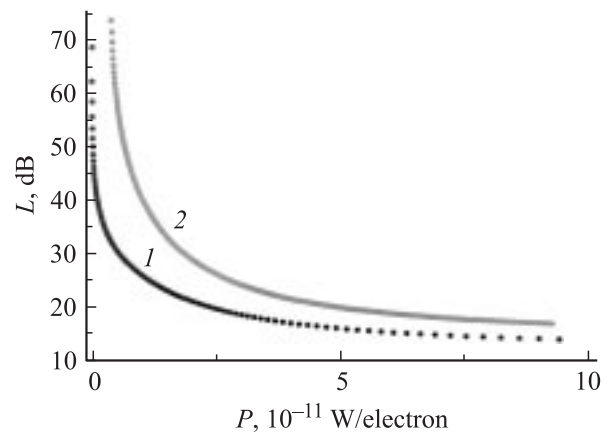


Рис. 4. Коэффициент потерь преобразования структур 1 и 760 при $T = 77 \text{ К}$ в зависимости от полной поглощенной мощности, приходящейся на электрон. Номер структуры и значения подвижности, $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$: 1 — 1, $\mu = 2.3 \cdot 10^5$, 2 — 760, $\mu = 7.7 \cdot 10^4$.

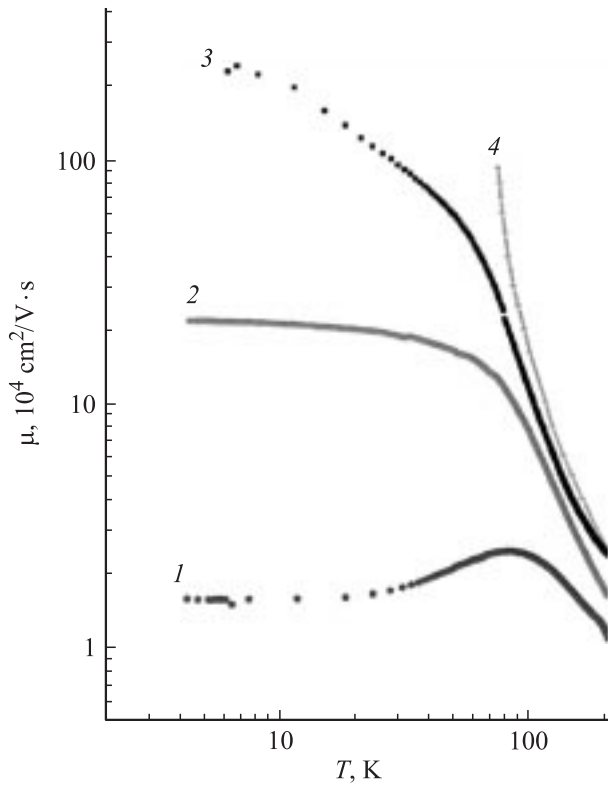


Рис. 5. Температурная зависимость подвижности для исследуемых структур 1, 5, 15: 1 — 15, 2 — 5, 3 — 1, 4 — расчет.

денного коэффициента потерь преобразования. Двухполосная шумовая температура приемника получается из стандартного выражения [12]:

$$T_n = L_{sing}/2(T_{out} + T_{if}), \quad (1)$$

где L_{sing} — полные потери однополосного смесителя, T_{if} — шумовая температура усилителя ПЧ, T_{out} — шумовая температура на выходе смесителя. Согласно [12], T_{out} имеет два основных вклада: шум температурных флуктуаций T_{fl} и шум Джонсона T_J . Как показано в [13], шум температурных флуктуаций в смесителе на основе AlGaAs/GaAs-гетероструктуры $T_{fl} \approx 70$ К, а T_J в первом приближении равняется электронной температуре (в нашем случае ~ 100 К). Следовательно, $T_{out} \approx 170$ К. Обычная величина для $T_{if} \approx 20$ К при $T = 77$ К. Полные потери смесителя будут складываться из потерь преобразования чувствительного элемента (найденное нами $L \approx 13$ дБ) и потерь по высокочастотному тракту и тракту промежуточной частоты, составляющих ~ 7 дБ в современных приемниках на частотах ~ 1 ТГц [14]. Полученная с использованием соотношения (1) шумовая температура AlGaAs/GaAs-смесителя составляет ~ 1900 К. Данная величина говорит о перспективности дальнейших работ по исследованию одной из основных характеристик смесителя — шумовой температуры и о возможности дальнейшего улучшения уже имеющихся результатов.

5. Оптимальная мощность гетеродина для AlGaAs/GaAs-смесителя

При оценке оптимальной мощности гетеродина, необходимой для работы смесителя на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs, найденные коэффициенты потерь преобразования для структур с различными значениями подвижности двумерного электронного газа удобно представить в виде зависимости от активной площади смесителя. На рис. 6 представлена зависимость L от полной поглощенной мощности, приходящейся на $1 \mu\text{м}^2$ для структур 1 и 760. Она показывает, что для структуры 1 с меньшей концентрацией и большей подвижностью двумерного электронного газа величина коэффициента потерь преобразования выходит практически на постоянное значение 13 дБ при поглощенной мощности более $0.2 \mu\text{Вт}/\mu\text{м}^2$. Для структуры 760 выход зависимости $L(P_0)$ на постоянное значение значительно смещен в область существенно больших поглощенных мощностей. С учетом измерений оптических потерь в приемнике субмиллиметрового диапазона на основе гетеродинного смесителя [14], необходимая мощность гетеродинного источника для AlGaAs/GaAs-смесителя площадью $1 \mu\text{м}^2$ составит $\sim 0.5 \mu\text{Вт}$. При создании структур субмикронных планарных размеров с использованием AlGaAs/GaAs-гетероперехода с большей подвижностью и меньшей концентрацией двумерных электронов указанное значение оптимальной поглощенной мощности может быть дополнительно понижено. Это делает перспективным создание субмиллиметровых многоэлементных матричных приемных систем на основе AlGaAs/GaAs-смесителей.

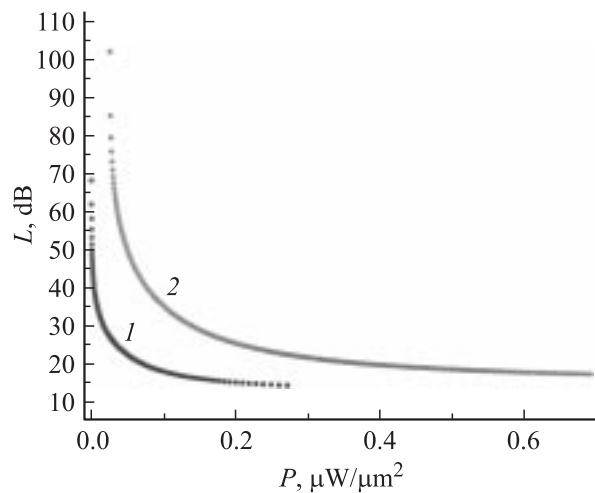


Рис. 6. Зависимость коэффициента потерь преобразования AlGaAs/GaAs-смесителя при $T = 77$ К для структур 1 и 760 от полной поглощенной мощности, приходящейся на $1 \mu\text{м}^2$. Номер структуры и значения подвижности, $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$: 1 — 1, $\mu = 2.3 \cdot 10^5$, 2 — 760, $\mu = 7.7 \cdot 10^4$.

6. Заключение

Найденные основные характеристики смесителя миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов на основе одиночного гетероперехода AlGaAs/GaAs с $\mu = 2.3 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, $n_s = 3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ при $T = 77 \text{ К}$ составили: коэффициент потерь преобразования $L \approx 13 \text{ дБ}$, полоса преобразования смесителя $f_{3 \text{ дБ}} \approx 4 \text{ ГГц}$, оптимальная поглощенная мощность гетеродина, приходящаяся на 1 мкм^2 составила $P_{\text{get}} = 0.2 \text{ мВт}$. Для улучшения характеристик смесителя необходимо использование гетеропереходов с более высокой подвижностью и меньшей концентрацией двумерного электронного газа. При указанных параметрах AlGaAs/GaAs-смесителя основные характеристики приемника миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, работающего при температуре $T = 77 \text{ К}$, составят: шумовая температура приемника $T_n \approx 1900 \text{ К}$, полоса преобразования приемника $f_{3 \text{ дБ}} = 4 \text{ ГГц}$, оптимальная мощность гетеродинного источника для смесителя размером 1 мкм^2 $P_{\text{get}} = 0.5 \text{ мВт}$, что делает перспективным создание многоэлементных матричных приемных секций и их использование в установках субмиллиметрового тепловидения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 01-02-17058, 02-02-08087), Министерства промышленности и науки (проект № 2362.2003.02).

Список литературы

- [1] TELIS home page: <http://telis.af.op.dlr.de/>; HERSCHEL home page: <http://astro.estec.esa.nl/SA-general/Projects/Herschel/>; SOFIA home page: <http://sofia.arc.nasa.gov/>
- [2] A. Karpov, J. Blondel, M. Voss, K. Gundlach. IEEE Trans. Appl. Supercond., **9**, 4456 (1999).
- [3] A. Semenov, G.N. Goltsman, R. Sobolewski. Lab. Laser Energetics Rev., **87**, 134 (2002).
- [4] T.W. Crowe, R.J. Mattauch, H.P. Raser, W.L. Bishop, W.C.B. Peatman, X. Liu. Proc. IEEE, **80**, 1827 (1992).
- [5] J.X. Yang, F. Agahi, K.S. Yngvesson, D. Dai, C.H. Musante, W. Grammer, K.M. Lau. IEEE Trans. Microwave Theory Techniques, **MTT-41**, 581 (1993).
- [6] J.X. Yang, C.F. Musante, K.S. Yngvesson. Appl. Phys. Lett., **65**, 1983 (1995).
- [7] Г.Н. Гольцман, К.В. Смирнов. Письма ЖЭТФ, **74**, 532 (2001).
- [8] K.S. Yngvesson. Appl. Phys. Lett., **76**, 777 (2000).
- [9] M. Lee, L.N. Pfeffer, K.W. West. Appl. Phys. Lett., **81**, 7 (2002).
- [10] F. Arams, C. Allen, B. Peyton, E. Sard. Proc. IEEE, **54**, 612 (1966).
- [11] K. Hirakawa, H. Sakaki. Appl. Phys. Lett., **49**, 889 (1986).
- [12] E. Gerecht, C.F. Musante, H. Jian, Y. Zhuang, K.S. Yngvesson, J. Dickinson, T. Goyette, J. Waldman, P. Yagoubov, G. Col'tsman, B. Voronov, E. Gershenzon. Proc. 10th Int. Symp. on Space THz Technology (Univ. Virginia, Charlottesville, 1999) p. 200.

- [13] Е.М. Гершензон, Г.Н. Гольцман, И.Г. Гогидзе, Ю.П. Гусев, А.И. Елантьев, Б.С. Карасик, А.Д. Семенов. Сверхпроводимость: физика, химия, технология, **3**, 1711 (1990).
- [14] A.D. Semenov, H.-W. Hubers, J. Shubert, G.N. Goltsman. J. Appl. Phys., **88**, 12 (2000).

Редактор Л.В. Беляков

Millimeter/submillimeter phonon-cooled hot electron bolometer mixer based on two-dimensional electron gas in AlGaAs/GaAs heterostructure

D.V. Morozov, K.V. Smirnov, A.V. Smirnov, V.A. Lyakhov, G.N. Goltsman

Moscow State Pedagogical University,
119992 Moscow, Russia

Abstract Presented are recent experimental data obtained for a millimeter/submillimeter mixer based on the hot-electron effect in the 2D-electron gas in AlGaAs/GaAs heterostructure with a phonon scattering cooling mechanism. Obtained have been: the gain bandwidth of the mixer $\sim 4 \text{ GHz}$, the internal conversion losses $\sim 13 \text{ dB}$, and optimum local oscillator power $\sim 0.5 \text{ mW}$ (for the mixer area of $1 \text{ }\mu\text{m}^2$). The probability of developing a millimeter/submillimeter receiver with the noise temperature $T_n = 1900 \text{ K}$ based on a AlGaAs/GaAs-mixer and a mixer array has been demonstrated.