

# Полоса и потери преобразования полупроводникового смесителя с фононным каналом охлаждения двумерных электронов

© Е.Л. Шангина<sup>†</sup>, К.В. Смирнов<sup>+</sup>, Д.В. Морозов<sup>+</sup>, В.В. Ковалюк<sup>+</sup>,  
Г.Н. Гольцман<sup>+</sup>, А.А. Веревкин<sup>\*,\*</sup>, А.И. Торопов<sup>‡</sup>

<sup>+</sup> Московский педагогический государственный университет,  
119991 Москва, Россия

<sup>\*</sup> Университет Ратгерс,  
08854 Нью Джерси, США

<sup>‡</sup> Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук,  
630090 Новосибирск, Россия

(Получена 8 апреля 2010 г. Принята к печати 26 апреля 2010 г.)

Методом субмиллиметровой спектроскопии с высоким временным разрешением измерены температурная и концентрационная зависимости полосы преобразования смесителей терагерцового диапазона AlGaAs/GaAs на разогреве двумерных электронов с фононным каналом их охлаждения. Полоса преобразования на уровне 3 дБ ( $f_{3\text{дБ}}$ ) при 4.2 К при изменении концентрации  $n_s$  варьируется в пределах 150–250 МГц в соответствии со степенным законом  $f_{3\text{дБ}} \propto n_s^{-0.5}$ , что соответствует доминирующему механизму рассеяния на пьезоэлектрических фононах. Минимальное значение коэффициента потерь преобразования полупроводникового смесителя достигается в структурах с высокой подвижностью носителей  $\mu > 3 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  при 4.2 К.

## 1. Введение

Гетеродинные смесители субмиллиметрового диапазона успешно используются в таких радиоастрономических и атмосферных проектах, как HERSHEL, SOFIA, TELIS [1]. На частотах  $< 1.4$  ТГц наибольшей чувствительностью обладают смесители на основе переходов сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник (СИС-смесители), в области более высоких частот используются смесители на эффекте электронного разогрева в тонких сверхпроводниковых пленках [2]. Однако все вышеперечисленные приемные устройства требуют глубокого охлаждения до температурного уровня жидкого гелия. В данной работе мы рассматриваем приемные устройства, лишенные этого недостатка.

В качестве альтернативы смесителям на горячих электронах в сверхпроводниках предложены гетеродинные смесители с фононным каналом охлаждения двумерных электронов на основе одиночных гетеропереходов AlGaAs/GaAs [3]. Полоса преобразования таких смесителей определяется при гелиевых (азотных) температурах релаксацией носителей на акустических (оптических) фононах. Как показано в [4], эти смесители характеризуются достаточно низкими мощностью гетеродина и коэффициентом потерь преобразования при относительно широкой полосе преобразования. Для типичной структуры, изготовленной на основе гетероперехода с концентрацией двумерных электронов  $n_s = 3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  и подвижностью  $\mu = 2.3 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  при температуре  $T = 77 \text{ К}$ , эти параметры составляют 0.2 мкВт, 13 дБ и 4 ГГц соответственно.

Цель настоящей работы заключается в экспериментальном исследовании полосы преобразования и потерь преобразования смесителей с фононным каналом охлаждения двумерных электронов на основе полу-

проводниковых гетероструктур AlGaAs/GaAs. Измерены зависимости полосы преобразования от температуры и концентрации носителей в диапазонах температур, соответствующих рассеянию на акустических фононах различных ветвей и оптических фононах. Определены условия, при которых достигается минимальное значение потерь преобразования смесителя.

## 2. Образцы и методика эксперимента

Нами выполнены измерения ширины полосы преобразования на уровне 3 дБ ( $f_{3\text{дБ}}$ ) смесителей AlGaAs/GaAs с двумерными электронами. Измерения проводились в диапазоне температур  $T = 1.5\text{--}77 \text{ К}$  на структурах с двумерным электронным газом с различными подвижностью,  $\mu = (0.33\text{--}7.5) \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ , и концентрацией,  $n_s = (1.6\text{--}6.6) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . Параметры исследованных образцов представлены в таблице.

Омические контакты к образцам изготавливались методом последовательного резистивного или электронно-пучкового распыления Au, Ge и Ni с последующим отжигом в атмосфере инертного газа при 400°C. Исследовались также образцы, омические контакты к которым формировались методом термического вжигания In.

Параметры исследованных структур при  $T = 4.2 \text{ К}$

№ образца	$n_s, 10^{11} \text{ см}^{-2}$	$\mu, 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	$f_{3\text{дБ}}, \text{ МГц}$
1	1.6	1.3	240
2	2.0	5.0	245
3	3.9	1.2	180
4	4.2	7.5	175
5	4.7	0.55	160
6	5.5	2.8	150
7	6.6	0.33	145

<sup>†</sup> E-mail: shangina@rplab.ru

Для согласования с миллиметровым и субмиллиметровым излучением смесители сопрягались с планарной спиральной антенной, оптимизированной в приемной полосе 100–600 ГГц. Полученная при помощи сканирующего электронного микроскопа фотография смесителя и интегрированной с ним антенны представлена на рис. 1.

Полоса преобразования смесителей AlGaAs/GaAs с одиночным гетеропереходом исследовалась методом миллиметровой/субмиллиметровой спектроскопии с временным разрешением до  $10^{-10}$  с [4] в диапазоне 129.2–139.2 ГГц с использованием сигналов двух генераторов, смещенных по частоте на варьируемую величину  $\Delta f$ . Поглощение субмиллиметрового излучения двумерными носителями вызывает разогрев электронного газа и, как следствие, изменение его сопротивления в условиях приложения постоянного смещения. Сигнал, измеряемый на частоте  $\Delta f$ , соответствующий изменению фотопроводимости, усиливался охлаждаемым широкополосным усилителем с коэффициентом усиления  $\sim 50$  дБ и затем регистрировался анализатором спектра.

Полоса преобразования смесителя ( $f_{3\text{dB}}$ ) определялась из частотной зависимости величины сигнала смесителя  $P$  (при фиксированной мощности как сигнального источника, так и гетеродинного) как функции разностной частоты  $\Delta f$ :

$$P(\Delta f) = \frac{P(\Delta f = 0)}{1 + (2\pi\Delta f\tau_e)^2}, \quad P(f_{3\text{dB}}) = \frac{P(\Delta f = 0)}{2}, \quad (1)$$

где  $\tau_e$  — время энергетической релаксации электронов.

### 3. Экспериментальные результаты и обсуждение

#### 3.1. Полоса преобразования смесителей

Для всех образцов из таблицы были измерены зависимости полосы преобразования от мощности энергетических потерь в расчете на один электрон,  $P_e$  (данные представлены на рис. 2). Установлено, что для всех исследованных образцов полоса преобразования  $f_{3\text{dB}}$  не зависит от  $P_e$ , если последняя не превышает  $10^{-15}$  Вт/электрон при  $T = 4.2$  К. Такие условия измерений могут быть охарактеризованы как квазиравновесные. Для всех образцов из таблицы в квазиравновесных условиях измерены зависимости ширины полосы преобразования смесителей  $f_{3\text{dB}}$  от температуры  $T$  и концентрации двумерных носителей  $n_s$  в диапазонах  $T = 1.5\text{--}77$  К,  $n_s = (1.6\text{--}6.6) \cdot 10^{11}$  см $^{-2}$ . Данные, полученные при  $T = 4.2$  К, представлены в таблице.

Полоса преобразования структур с двумерным электронным газом при  $T = 4.2$  К варьируется в пределах  $f_{3\text{dB}} = 150\text{--}250$  МГц. Установлено, что полоса преобразования не зависит от подвижности электронов и определяется только их концентрацией. С увеличением концентрации двумерных электронов  $n_s$  полоса преобразования уменьшается, при этом экспериментальная зависимость соответствует степенному закону  $f_{3\text{dB}} \propto n_s^{-0.5}$  в диапазоне  $n_s = (2.0\text{--}6.6) \cdot 10^{11}$  см $^{-2}$  [5].

Полоса преобразования смесителя определяется временем энергетической релаксации электронов на фононах:  $f_{3\text{dB}} = 1/2\pi\tau_e$ . В области гелиевых температур ( $T = 4.2$  К) двумерные электроны как рассеиваются на деформационном потенциале акустических фононов, так и испытывают пьезоэлектрическое взаимодействие. Для обоих типов рассеяния теория [6,7] предсказывает степенную зависимость  $f_{3\text{dB}} \propto n_s^{-0.5}$ . Определить доминирующий механизм рассеяния можно по исследованию зависимости времени энергетической релаксации от мощности энергетических потерь на один электрон [8].

Как показали исследования, для всех образцов зависимость ширины полосы преобразования от мощности энергетических потерь на один электрон  $P_e$  аппроксимируется одной и той же функцией  $f_{3\text{dB}} = a + bP_e^{1/3}$ . Следовательно, зависимость мощности энергетических

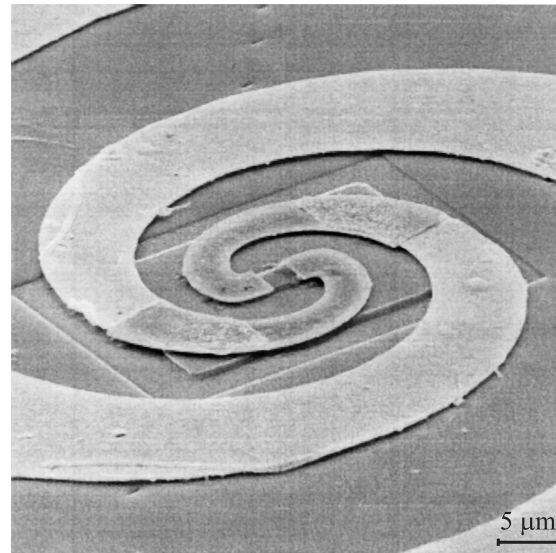


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение центральной части смесителя, интегрированного со спиральной антенной.

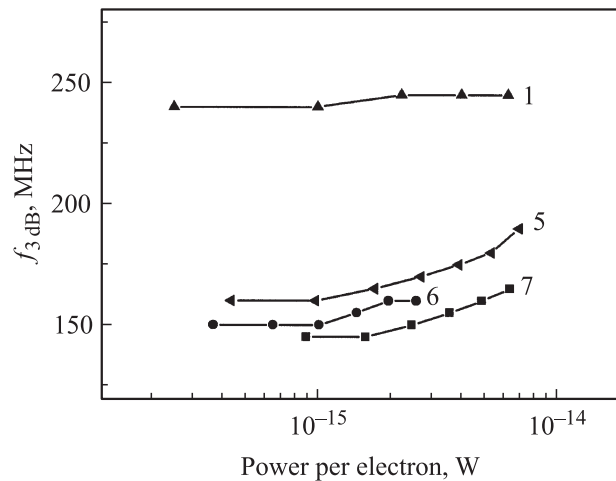


Рис. 2. Зависимость ширины полосы преобразования  $f_{3\text{dB}}$  от мощности энергетических потерь в расчете на один электрон  $P_e$  при  $T = 4.2$  К для структур 1, 5, 6, 7 (см. таблицу).

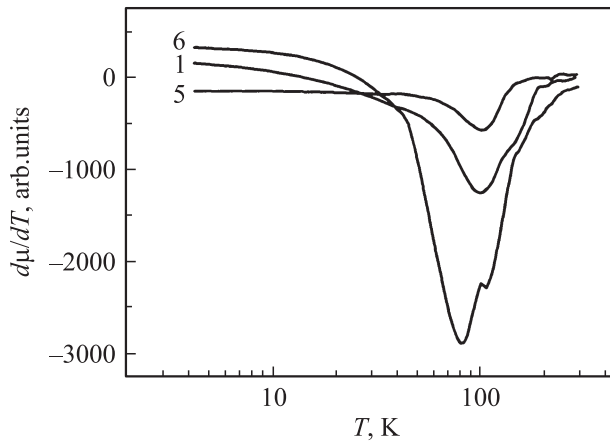


Рис. 3. Температурные зависимости крутизны подвижности  $d\mu/dT$  для структур 1, 5, 6 (см. таблицу).

потерь от электронной температуры  $T_e$  имеет вид  $P_e = \alpha T_e^3 + \beta T_e^2 + c$ . Первое слагаемое соответствует рассеянию на пьезоэлектрической ветви акустических фононов, второе — уходу тепла через контакты. Таким образом, при  $T = 4.2$  К в наших структурах доминирует пьезоэлектрическое рассеяние.

### 3.2. Потери преобразования смесителей

При оптимальном согласовании с трактом промежуточной частоты потери преобразования смесителей определяются главным образом крутизной температурной зависимости сопротивления (или, более строго, импеданса) последних. С учетом постоянной концентрации двумерных электронов в структурах AlGaAs/GaAs в области исследованных температур потери преобразования определяются лишь температурной зависимостью подвижности носителей. Смесителям с большей подвижностью двумерного электронного газа соответствует также большие величины производной  $d\mu/dT$  (рис. 3). Структуры, изготовленные на основе высокопроводящих двумерных слоев, должны иметь более низкие потери преобразования.

## 4. Заключение

Методом субмиллиметровой спектроскопии с высоким временным разрешением выполнены измерения полосы преобразования AlGaAs/GaAs смесителей терагерцового диапазона с доминирующим фононным каналом охлаждения двумерных электронов в диапазоне концентраций двумерных электронов  $n_s = (1.6-6.6) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  в температурном интервале  $T = 1.5-77$  К. Установлено, что ширина полосы преобразования при  $T = 4.2$  К при изменении концентрации варьируется в пределах  $f_{3\text{dB}} = 150-250$  МГц в соответствии со степенным законом  $f_{3\text{dB}} \propto n_s^{-0.5}$ . Доминирующим механизмом неупругого рассеяния в таких структурах, определяющим полосу преобразования смесителей терагерцового

диапазона, является релаксация на пьезоэлектрических фононах. Минимальное значение коэффициента потерь преобразования полупроводниковых смесителей должно достигаться в структурах, характеризующихся высокой подвижностью носителей ( $\mu > 3 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  при гелиевых температурах и выше).

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках Госконтракта 02.740.11.0228 с Федеральным агентством по науке и инновациям, а также гранта 2.1.1/4240 Министерства образования и науки РФ.

## Список литературы

- [1] <http://telis.af.op.dlr.de/>; <http://astro.estec.esa.nl/SA-general/Projects/Herschel/>; <http://sofia.arc.nasa.gov/>
- [2] H.-W. Hubers. IEEE J. Select. Topics Quant. Electron., **14**, 378 (2008).
- [3] Mark Lee, L.N. Pfeiffer, K.W. West, K.W. Baldwin. Appl. Phys. Lett., **78**, 2888 (2001).
- [4] Д.В. Морозов, К.В. Смирнов, А.В. Смирнов, В.А. Ляхов, Г.Н. Гольцман. ФТП, **39**, 1117 (2005).
- [5] Е.Л. Шангина, К.В. Смирнов, Д.В. Морозов, В.В. Ковалюк, Г.Н. Гольцман, А.А. Веревкин, А.И. Торопов. Изв. РАН. Сер. физ., **74**, 110 (2010).
- [6] В. Карпус. ФТП, **20**, 12 (1986).
- [7] В. Карпус. ФТП, **22**, 439 (1988).
- [8] N.J. Appleyard, J.T. Nicholls, M.Y. Simmons, W.R. Tribe, M. Pepper. Phys. Rev. Lett., **81**, 3491 (1998).

Редактор Л.В. Шаронова

## Frequency bandwidth and conversion loss of semiconductor heterodyne receiver with phonon cooling of two-dimensional electrons

E.L. Shangina<sup>+</sup>, K.V. Smirnov<sup>+</sup>, D.V. Morozov<sup>+</sup>, V.V. Kovalyuk<sup>+</sup>, G.N. Gol'tsman<sup>+</sup>, A.A. Verevkin<sup>\*,†</sup>, A.I. Toropov<sup>‡</sup>

<sup>+</sup> Moscow State Pedagogical University, 119991 Moscow, Russia

<sup>\*</sup> Rutgers University, 08854 NJ, USA

<sup>‡</sup> Institute of Semiconductor Physics, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, 630090 Novosibirsk, Russia

**Abstract** The temperature and concentration dependences of the frequency bandwidth of terahertz heterodyne AlGaAs/GaAs detectors based on hot electron phenomena with phonon cooling of two-dimensional electrons is measured using submillimeter spectroscopy with high time resolution. At temperature  $T = 4.2$  K, the frequency bandwidth at the level 3dB  $f_{3\text{dB}}$  is varied from 150 to 250 MHz depending on electron concentration  $n_s$  following to the power law  $f_{3\text{dB}} \propto n_s^{-0.5}$  due to dominant contribution of piezoelectric phonon scattering. The minimal value of the semiconductor heterodyne detector conversion loss is reached in the structures with high carrier mobility  $\mu > 3 \cdot 10^5 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  at 4.2 K temperature.