

05;06;09

## Полупроводниковая сверхрешетка — твердотельный терагерцовый гетеродинный источник для электронно-разогревного NbN-смесителя

© И.В. Пентин,<sup>1</sup> А.В. Смирнов,<sup>1</sup> С.А. Рябчун,<sup>1</sup> Р.В. Ожегов,<sup>1</sup> Г.Н. Гольцман,<sup>1</sup> В.Л. Вакс,<sup>2</sup> С.И. Приползин,<sup>2</sup> Д.Г. Павельев,<sup>3</sup> Ю.И. Кошуринов,<sup>3</sup> А.С. Иванов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Московский педагогический государственный университет,  
119992 Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт физики микроструктур РАН,  
603950 Нижний Новгород, Россия

<sup>3</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
603950 Нижний Новгород, Россия  
email: PentinIvan@mail.ru

(Поступило в Редакцию 17 августа 2011 г.)

Представлены результаты исследования умножителя частот на основе полупроводниковой сверхрешетки (ППСР) и использования ее в качестве твердотельного генератора-гетеродина для накачки сверхпроводникового NbN-смесителя на горячих электронах (Hot Electron Bolometer (HEB) mixer) в терагерцовом диапазоне частот. Показана возможность повышения уровня выходной мощности ППСР путем ее охлаждения до температуры жидкого гелия (4.2 К), при которой работает NgN HEB-смеситель.

Терагерцовая область частот представляет собой довольно значительную часть спектра электромагнитного излучения и занимает промежуточное положение между микроволновой радиочастотной и инфракрасной областями. Вместе с тем освоение терагерцовой области началось сравнительно недавно по причине отсутствия как самих источников достаточно мощного терагерцового излучения, так и приемников, способных зарегистрировать излучение в данной области спектра.

Проблема создания эффективных широкополосных терагерцовых источников связана с тем, что в данном диапазоне плохо применимы хорошо разработанные методы генерации излучений соседних диапазонов. Так, со стороны коротковолновой области терагерцового диапазона при комнатной температуре не удастся достичь долговременной и устойчивой инверсной заселенности уровней, как это реализуется в оптических генераторах (лазерах). По этой причине, например, квантово-каскадные лазеры (PCLs) способны генерировать в терагерцовой области только лишь при охлаждении до температуры жидкого азота и ниже. Со стороны длинноволновой области верхний предел частоты излучения задается временем пролета электронов в приборе, как, например, в лампах обратной волны (BWOs). Данное требование приводит к необходимости применения в ограниченном объеме пространства весьма сильных электрических и магнитных полей для получения генерации на терагерцовых частотах.

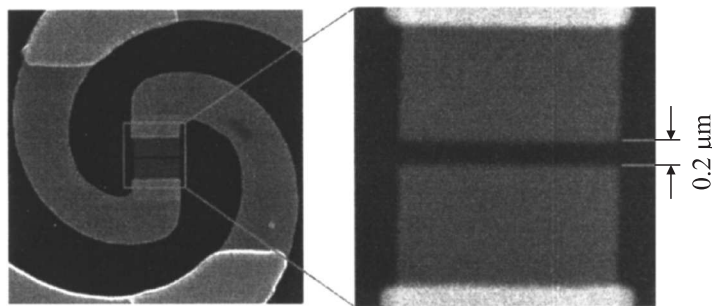
Более привлекательным является использование твердотельных гетеродинных источников излучения (лавинно-пролетных диодов, приборов с переносом заряда и приборов на основе квантовых ям) в силу их компактности, возможности адресной настройки рабочей частоты излучения в широком диапазоне, малой массы и мощности энергопотребления. Вместе с тем такие

электронные приборы имеют ряд ограничений, обусловленных главным образом повышением с ростом частоты роли паразитных параметров и приводящих к рассогласованию и резкому уменьшению выходной мощности.

Наиболее простой и хорошо известный путь генерации терагерцового излучения — умножение частоты от внешнего генератора с помощью гетеробарьерных варакторных умножителей — удвоителей, утроителей, их цепочек и матриц. На сегодняшний день в данном направлении достигнуты определенные успехи. Необходимо, однако, заметить, что уход в субмиллиметровый диапазон длин волн и ниже требует как высокой выходной мощности низкочастотного опорного генератора, так и высокой эффективности умножения.

Не менее интересным, а возможно, и перспективным представляется высокоэффективное умножение частоты с использованием наноструктурированной несвязанной сверхрешетки (ППСР) GaAs/AlAs и применением ее в качестве твердотельного генератора-гетеродина в терагерцовом диапазоне частот. Такая возможность обусловлена наличием на вольт-амперной характеристике (ВАХ) ППСР участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением, которое сохраняется до частот выше 1 THz [1].

Показана возможность применения ППСР для целей спектроскопии высокого разрешения в указанном диапазоне частот [2]. ППСР применяются как элементы систем фазовой стабилизации частоты [3], как гетеродины приемников на сверхпроводящих электронных болометрах и в качестве источника сигнала в спектроскопических системах на частотах вплоть до 3.2 THz [4,5]. Возможность работы ППСР в широком диапазоне температур 4.2–300 К показана в работе [6]. Отмечено, что при охлаждении умножителей частоты на ППСР высокой кратности от комнатной температуры до



**Рис. 1.** Изображение (слева) планарной спиральной антенны и смесителя, полученное со сканирующего электронного микроскопа. На вставке (справа) в зазоре между рукавами планарной антенны — изображение активной области смесителя.

температуры жидкого гелия их эффективность увеличивается на порядок.

В настоящей работе представлены результаты исследования выходной мощности излучения охлаждаемой до гелиевой температуры (4.2 К) полупроводниковой сверхрешетки и ее возможное использование как гетеродинного источника для сверхпроводникового терагерцового смесителя на эффекте электронного разогрева в тонкой сверхпроводниковой NbN-пленке (NbN-смеситель). В работе [7] было показано, что оптимальная поглощенная мощность волноводных и квазиоптических сверхпроводниковых NbN НЕВ-смесителей в субмиллиметровом диапазоне не превосходит 100–200 нВт.

Используемый нами смеситель создан группой авторов МПГУ на основе сверхпроводниковой пленки NbN [8]. Пленка NbN осаждалась путем магнетронного распыления на постоянном токе Nb мишени в среде азота на подложку из высокоомного кремния толщиной 0.38 мм. Чувствительная область квазиоптического смесителя была сформирована с помощью прямой электронно-лучевой фотолитографии и последующего плазмохимического травления пленки. Характерный размер чувствительной области смесителя — мостика из NbN-пленки, составил приблизительно 0.2 μm в длину и 2 μm в ширину при толщине пленки 3–4 nm (рис. 1, справа). Значение температуры сверхпроводящего перехода ( $T_c$ ) смесителя составило 9.5 К, плотность критического тока ( $j_c$ ) —  $6.5 \cdot 10^6$  А/см<sup>2</sup> при 4.2 К, а сопротивление в нормальном состоянии 95 Ω.

Для повышения эффективности согласования чувствительной области НЕВ-смесителя с излучением он интегрировал в широкополосную планарную логарифмическую спиральную антенну (рис. 1, слева), работающую до частоты 6 ТГц, которая помещалась во второй фокус эллиптической линзы (рис. 2). Эллиптическая линза выполнена из высокоомного кремния.

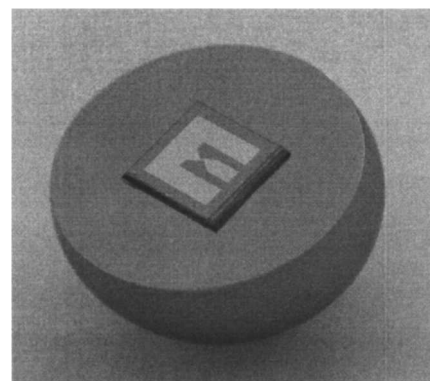
Нужно отметить, что эффект электронного разогрева в тонких разупорядоченных металлических пленках, какими являются тонкие пленки NbN, позволяет создавать на его основе смесители, работающие на частотах вплоть до оптического диапазона. На практике

же входная полоса НЕВ-приемника терагерцового диапазона ограничивается используемой антенной и оптикой входной части прибора.

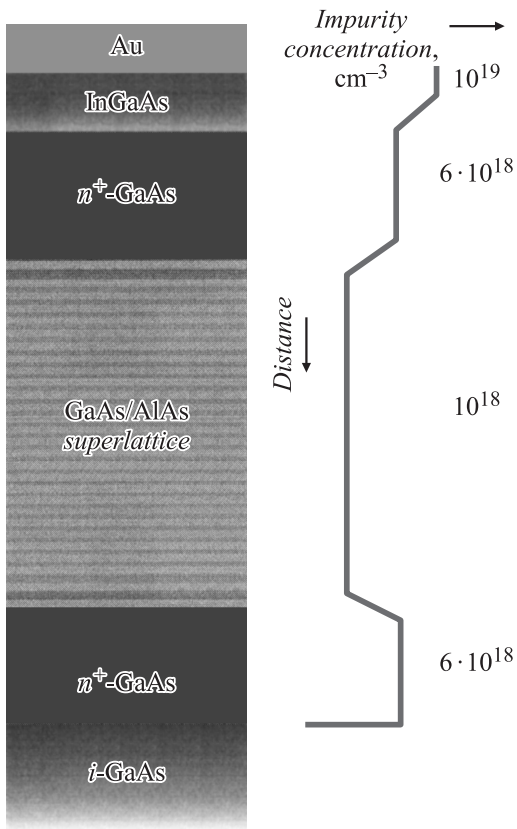
Используемая в эксперименте полупроводниковая сверхрешетка GaAs/AlAs представляла последовательность чередующихся слоев GaAs и AlAs толщиной 4 и 0.9 nm соответственно, однородно легированных Si с концентрацией  $2 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Методом молекулярной лучевой эпитаксии было сформировано несколько дополнительных буферных слоев с различной толщиной и уровнем легирования, что позволило избежать резких переходов внутри структуры. Схематическое расположение, а также уровень легирования основных слоев ППСР изображены на рис. 3.

Для исследования возможности накачки умножителем на основе ППСР сверхпроводникового NbN НЕВ-смесителя была собрана экспериментальная установка, основные элементы которой показаны на блок-схеме рис. 4.

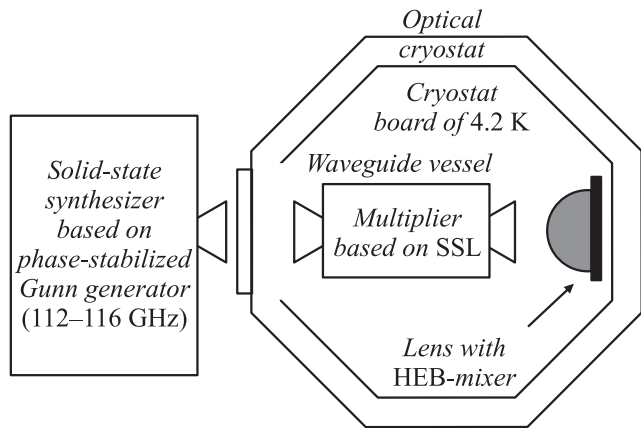
Исследования проводились в оптическом гелиевом криостате заливного типа с эффективной температурой на холодной плате 4.2 К. Линза со смесителем устанавливалась в держатель, который, в свою очередь, был термически связан с гелиевой ванной криостата. Сигнал со смесителя снимался с помощью копланарной линии и далее посредством коаксиально-копланарного перехода



**Рис. 2.** Фотография квазиоптического НЕВ-смесителя, помещенного в фокус эллиптической кремниевой линзы.



**Рис. 3.** Расположение и уровень концентрации слоев. Слой  $n^+$ -GaAs-Au играет роль омического контакта.



**Рис. 4.** Блок-схема экспериментальной установки.

и полужесткого коаксиального кабеля выводился наружу криостата. Смещение смесителя по постоянному току осуществлялось в режиме источника напряжения.

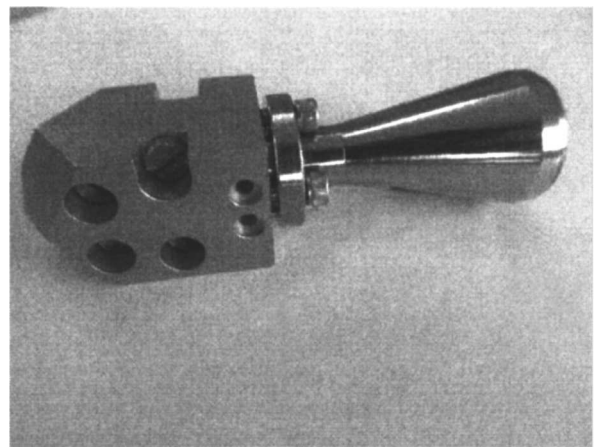
В рамках проводимого исследования была предложена и разработана волноводная камера, в которую и интегрирована ППСР (рис. 5). Волноводная камера оканчивалась широкополосными рупорными антеннами и специальным держателем жестко крепилась к

холодной плате криостата в непосредственной близости от держателя линзы смесителя. Оптическое окно криостата, ППСР и эллиптическая кремниевая линза с установленным на нее сверхпроводниковым NbN НЕВ-смесителем располагались на одной оптической оси. Расстояние от вершины линзы до излучающей рупорной антенны камеры ППСР составило около 15 мм. Такое расположение элементов обеспечило не только эффективное согласование излучения сверхрешетки с линзой смесителя, но и уменьшило возможные потери, обусловленные необходимостью использовать дополнительную оптику.

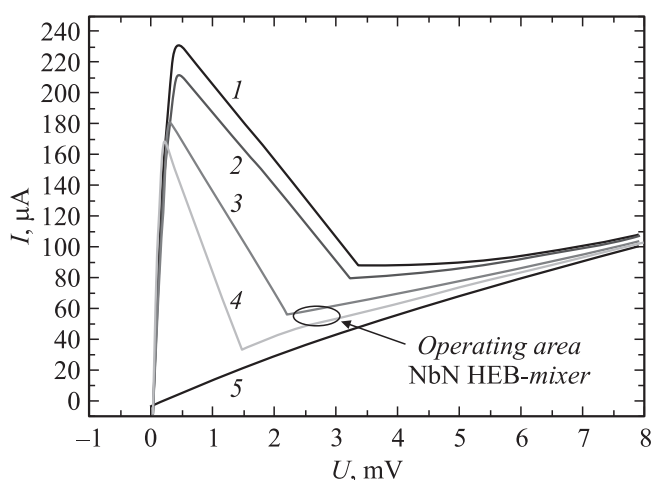
Накачка сверхрешетки осуществлялась через оптическое окно криостата внешним опорным синтезатором, в качестве которого выбран перестраиваемый фазостабилизированный генератор Ганна. Частота синтезатора могла перестраиваться в диапазоне 112–116 GHz с точностью не менее  $\pm 1$  MHz. Излучение от генератора Ганна мощностью 6 mW через ферритовый вентиль и рупорную антенну квазиоптически заводилось внутрь криостата и направлялось во входной рупор волноводной камеры сверхрешетки. Потери во входном окне криостата, выполненном из высокоплотного полиэтилена толщиной 2 мм, не превышали 0.5 dB в указанном диапазоне.

В рассматриваемой схеме источником терагерцового излучения для заправки НЕВ-смесителя являлись гармоники от умножителя частоты на ППСР [9], полученные путем пропорционального умножения частоты опорного синтезатора.

На рис. 6 приведено семейство ВАХ NbN НЕВ-смесителя под различным уровнем мощности излучения от ППСР при частоте опорного синтезатора  $f = 114.250$  GHz. Здесь кривая 1 — ВАХ в отсутствие мощности излучения от ППСР, кривая 5 — ВАХ под максимальной мощностью излучения, приходящей



**Рис. 5.** Фотография волноводной камеры с интегрированными в нее ППСР и рупорными антеннами. Справа на фотографии изображен входной рупор, предназначенный для накачки ППСР внешним генератором, слева — излучающий.



**Рис. 6.** ВАХ NbN НЕВ-смесителя под различным уровнем мощности излучения от ППСР. Кривые 3, 5 получены от ППСР при температуре 4.2 К. Кривая 2 — ППСР вне криостата (295 К).

от ППСР и поглощенной НЕВ-смесителем. Кривые 2 и 3 — промежуточные значения поглощаемой мощности. Здесь же отмечена оптимальная рабочая область NbN НЕВ-смесителя. Для сравнительного анализа на рис. 6 приведена кривая 2 — ВАХ-смесителя, закачанного ППСР, размещенной вне криостата при температуре 295 К. Из полученных ВАХ наглядно видно, что установка ППСР в непосредственной близости к линзе и ее охлаждение до температуры 4.2 К позволили добиться существенного повышения уровня мощности умножаемых гармоник, более чем достаточного для работы НЕВ-смесителя. Кроме того, оценка поглощенной мощности изотермическим методом по кривым 3 и 4 дает разницу между ними не менее чем в 6 dB. Это обстоятельство позволяет говорить о целесообразности проведения селективного отделения — фильтрации гармоник от ППСР, что легко реализуется путем использования соответствующих полосопропускающих терагерцовых фильтров.

Приложенный вариант построения гетеродинного приемника терагерцового диапазона на основе NbN НЕВ-смесителя, где в качестве твердотельного генератора гетеродина может быть применена охлаждаемая полупроводниковая сверхрешетка, открывает новые возможности в создании высокочувствительных инструментов высокого разрешения ( $\nu/\Delta\nu \geq 10^6$ ), направленных на решение задачи когерентной терагерцовой спектроскопии, локации, наблюдательной радиоастрономии, систем безопасности.

Поисковая научно-исследовательская работа поддержана грантами президента НШ-3265.2010.2 и Министерства образования и науки РФ.

## Список литературы

- [1] Павельев Д.Г., Демарина Н.В., Кошуринов Ю.И., Васильев А.П., Семенова Е.С., Жуков А.Е., Устинов В.М. // ФТП. 2004. Т. 38. Вып. 9. С. 1141–1146.
- [2] Вакс В.Л., Панин А.Н., Басов С.А., Илюк А.В., Приползин С.И., Павельев Д.Г., Кошуринов Ю.И. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52. № 7. С. 569–575.
- [3] Вакс В.Л., Кошуринов Ю.И., Павельев Д.Г., Панин А.Н. // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48. № 10–11. С. 933–938.
- [4] Paveliev D.G., Koschurinov Yu.I., Ustinov V.M., Zhukov A.E., Lewen F., Endres C., Baryshev A.M., Khosropanah P., Wen Zhang, Renk K.F., Stahl B.I., Semenov A., Huebbers H.W. // Proc. of the 19<sup>th</sup> Symposium on Space Terahertz Technology. Croningen, the Netherlands. 2008. С. 319–328.
- [5] Endres C.P., Lewen F., Giesen T.F., Schlemmer S., Paveliev D.G., Koschurinov Y.I., Ustinov V.M., Zhokov A.E. // Rev. Sci. Instrum. 2007. Vol. 78. P. 043 106.
- [6] Paveliev D., Koschurinov Yu., Demarina N., Ustinov V., Zhukov A., Maleev N., Vasilyev A., Baryshev A., Yagoubov P., Whiborn N. // Proc. of the 29<sup>th</sup> Int. Conference of Infrared and Millimeter Waves and 12<sup>th</sup> Int. Conf. on Terahertz Electronics. Karlsruhe, Germany. 2004. P. 279–280.
- [7] Рябчун С.А., Третьяков И.В., Пентин И.В., Каурова Н.С., Селезнев В.А., Воронов Б.М., Финкель М.И., Маленников С.Н., Гольцман Г.Н. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52. № 8. С. 641–648.
- [8] Tretyakov I., Ryabchun S., Finkel M., Maslennikova A., Kaurova N., Lobastova A., Voronov B., Gol'tsman G. // Appl. Phys. Lett. 2011. Vol. 98. P. 033 507.
- [9] Stahl B.I., Renk K.F., Rogl A., Janzen T., Koschurinov Yu.I., Paveliev D.G., Ustinov V., Zhukov A. // Phys. Rev. Lett. 2005. Vol. 95. P. 12 801-1–12 801-4.