

Экспериментальное исследование умножителей частоты на полупроводниковых сверхрешетках в терагерцовом диапазоне частот

© Д.Г. Павельев[¶], Ю.И. Кошуринов, А.С. Иванов, А.Н. Панин*, В.Л. Вакс*, В.И. Гавриленко*, А.В. Антонов*, В.М. Устинов⁺, А.Е. Жуков*

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

* Институт физики микроструктур Российской академии наук,
603950 Нижний Новгород, Россия

⁺ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

• Санкт-Петербургский академический университет — научно-образовательный центр нанотехнологий
Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 6 июня 2011 г. Принята к печати 15 июня 2011 г.)

Проведено экспериментальное исследование умножителя частоты на полупроводниковой квантовой сверхрешетке GaAs/AlAs. Измерялся спектр мощности гармоник выходного сигнала умножителя с частотой входного сигнала 140–160 ТГц. В исследовании использовались планарные диоды с малой активной областью размером 1–2 мкм². Для изготовления диодов применялись выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии структуры сильно легированных сверхрешеток с шириной мини-зоны 24 мэВ. Измерения проводились при помощи спектрометра с преобразованием Фурье „ВОМЕМ“ DA3.36, оснащенного приемником на основе охлаждаемого до температуры жидкого гелия болометра. По результатам измерений построены графики зависимости мощности гармоник от частоты в диапазоне 0.4 до 8.1 ТГц. Определено, что характер распределения СВЧ мощности по номерам гармоник близок к спектру последовательности знакопеременных импульсов, возникающих в цепи диода при превышении приложенного напряжения входного сигнала над пороговым напряжением диода. Рассчитанные по результатам измерений минимальное время установления фронта импульсов и длительность импульсов равны 123 и 667 фс.

1. Введение

В настоящее время интерес к диапазону частот 0.3–10 ТГц обусловлен новыми возможностями для исследований в области спектроскопии и радиоастрономии. С появлением криогенных сверхпроводящих электронных болометров появилась возможность создания приемников с предельными шумовыми характеристиками, близкими к квантовому пределу [1]. Для создания гетеродинов в таких приемниках в терагерцовом диапазоне частот предполагается использование умножителей частоты (УЧ) с полупроводниковыми диодами на сверхрешетках (СР). Показана возможность применения этих УЧ для целей спектроскопии высокого разрешения в указанном диапазоне частот [2]. УЧ 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 ТГц [4,5].

Цель настоящей работы заключалась в экспериментальном исследовании возможности работы УЧ на СР в диапазоне частот вплоть до 10 ТГц.

2. Эксперимент

Эксперимент заключался в непосредственном измерении спектра сигнала излучаемого УЧ на СР при его возбуждении сильным сигналом низкой частоты (140–160 ТГц). Для исследований были изготовлены планарные диоды на основе GaAs/AlAs-сверхрешетки с малой площадью активной области 1–2 мкм². Размеры самих диодов составляли 150 × 100 × 20 мкм [6].

Структуры СР выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии в установке Riber 32P на полуизолирующей подложке GaAs с ориентацией (100) и состояли из 18 периодов, что соответствует длине 112 нм. Каждый период включал 18 монослоев GaAs и 4 монослоя AlAs, что соответствует толщине 6.22 нм. Ширина первой мини-зоны СР составляла 24.4 мэВ. СР была однородно легирована донорной примесью с концентрацией 10¹⁸ см⁻³.

Типичная вольт-амперная характеристика (ВАХ) диода приведена на рис. 1. С ростом напряжения до порогового значения U_c ток нарастает до некоторого максимума, дальнейшее увеличение напряжения сопровождается быстрым уменьшением тока — область отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП), вызванным брегговскими отражениями электронов проводимости в мини-зоне. ВАХ диода отличается от рассчитанной по формуле, предложенной Эсаки и Цу [7], и имеет

[¶] E-mail: pavelev@rf.unn.ru

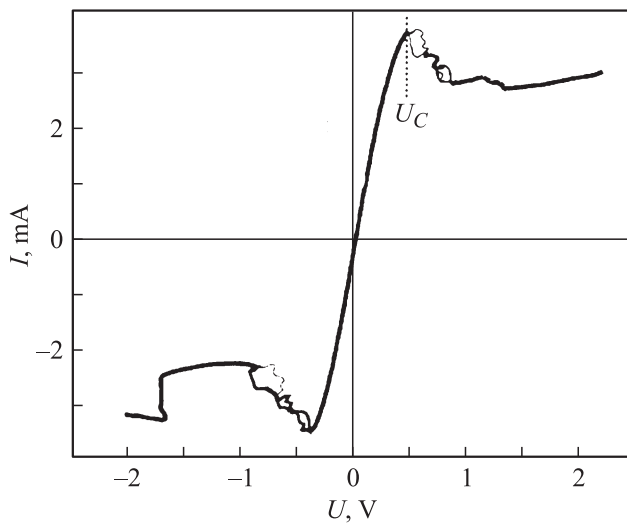


Рис. 1. Типичная зависимость тока диода от приложенного напряжения.

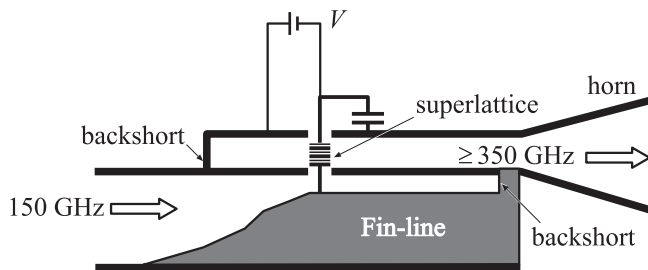


Рис. 2. Пример расположения планарного диода в волноводной камере.

сильно нелинейный характер в области отрицательной проводимости. Это обуславливает применение СР с такими параметрами легирования и ширины мини-зоны для использования в качестве нелинейного элемента в УЧ терагерцового диапазона частот [6]. Воздействие на СР с такой ВАХ гармоническим напряжением с амплитудой больше U_c вызывает формирование сложной формы тока через диод, которая помимо синусоидальной составляющей содержит также знакопеременные импульсы, длительность которых определяется превышением амплитуды приложенного напряжения частоты накачки над U_c .

Планарные диоды устанавливались в волноводную камеру, которая имеет входной волновод сечением 2.54×1.27 мм и выходной волновод с частотой отсечки > 350 ГГц с диагональным рупором. Пример расположения планарного диода в волноводной камере показан на рис. 2. Планарный диод, расположенный в выходном волноводе, возбуждается сигналом входной частоты F , равной 140–160 ГГц и мощностью 5–15 мВт. Для согласования в широком диапазоне частот во входном волноводе расположен трансформатор сопротивлений, выполненный на гребенчатом волноводе

(Fin-line) и согласующий поршень (backshort). В выходном волноводе установлен согласующий поршень на частоты 400–500 ГГц. Измерения спектра гармоник выходного сигнала УЧ проводились при помощи фурье-спектрометра (ФС) „ВОМЕМ“ DA3.36, с кремниевым болометром в качестве приемника, охлаждаемым до температуры жидкого гелия 4.2 К, работающим в диапазоне частот 0.12–20 ТГц, с NEP (noise equivalent power), равной $1.7 \cdot 10^{-13}$ Вт/Гц^{1/2}. При измерениях внутренний объем ФС откачивается до давления 10^{-3} атм. Это уменьшало влияние линий поглощения воды, присутствующей в воздухе, на результаты измерения. Источником входного сигнала УЧ служил синтезатор частоты диапазона 118–178 ГГц с пренебрежимо малыми интенсивностями собственных гармоник, измерявшимися предварительно на этой же установке, и их влияние на результаты измерений не учитывалось. Примеры спектрограмм гармоник излучения умножителя на СР с частотой входного сигнала 150 ГГц для различных частотных участков приведены на рис. 3–5. Одно измерение ФС состояло из 20 сканов с разрешением

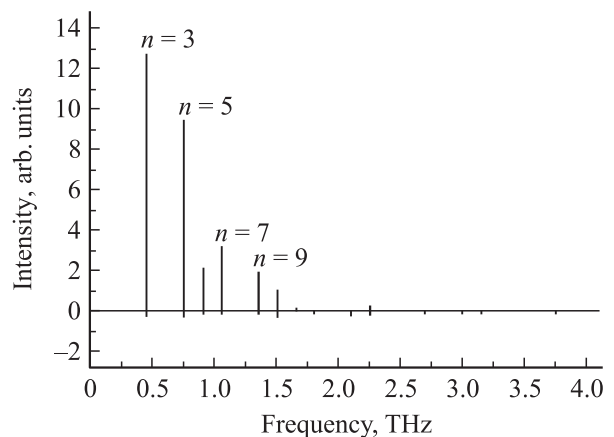


Рис. 3. Интенсивность гармоник умножителя в диапазоне частот от 0.4 до 4.1 ТГц. $F = 150$ ГГц, n — номер гармоники.

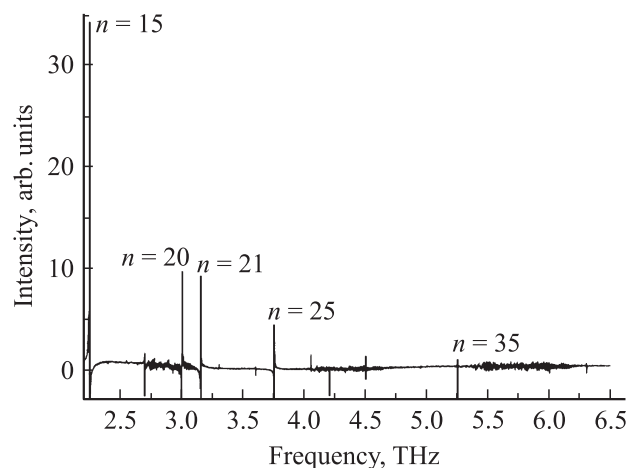


Рис. 4. Интенсивность гармоник умножителя в диапазоне частот от 2.2 до 6.5 ТГц. $F = 150$ ГГц, n — номер гармоники.

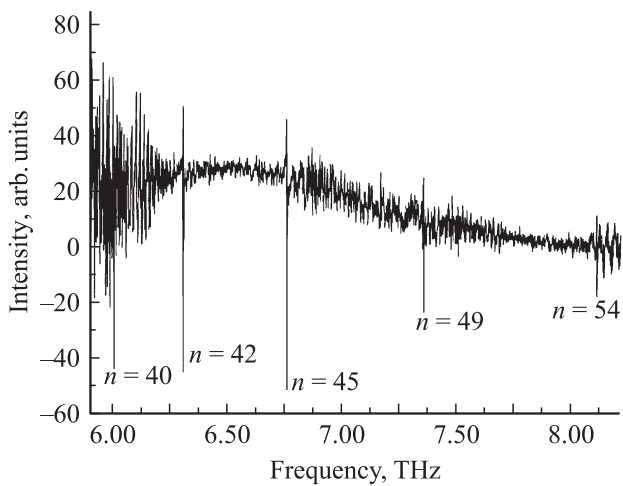


Рис. 5. Интенсивность гармоник умножителя в диапазоне частот от 5.9 до 8.2 ТГц, $F = 150$ ГГц, n — номер гармоники.

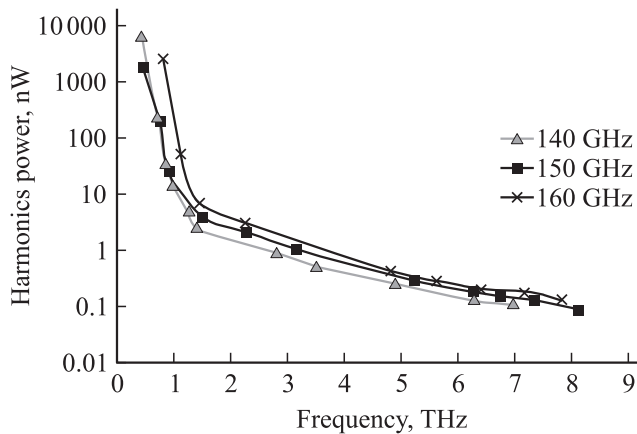


Рис. 6. Зависимости мощности гармоник от частоты излучения УЧ для трех различных F , ГГц: 140, 150, 160.

$\Delta = 0.01 \text{ см}^{-1}$. На рис. 3 показана спектрограмма выходного сигнала умножителя в диапазоне частот от 0.4 до 4.1 ТГц, на рис. 4 — от 2.2 до 6.5 ТГц, на рис. 5 — от 5.9 до 8.2 ТГц. На спектрограммах рис. 4 и 5 наблюдается отсутствие и асимметрия спектральных линий некоторых гармоник. Одной из причин этого являлось неколлимированное излучение этих гармоник из камеры умножителя. Широкий диапазон частот измерений делал невозможным юстировку измерительной установки так, чтобы излучение всех гармоник было строго параллельно оптической оси ФС. Недостаточно широкополосная юстировка измерительной установки приводит к фазовой ошибке измерений и асимметрии спектрограмм [8].

Интенсивности гармоник, приведенных на этих рисунках, соответствуют значениям шкалы на ФС ВОМЕМ DA3.36. Для удобства анализа эти значения были пересчитаны в абсолютные величины мощности. Для чего с помощью образцового сигнала с известной частотой 170 ГГц и мощностью, измеренной промышленным из-

мерителем Power Meter DPM-06 компании ELVA-1, был определен коэффициент между интенсивностью измеренного на ФС образцового сигнала и его уровня в единицах мощности. Так как чувствительность болометра в диапазоне частот, где проводились измерения, практически постоянна, то на этот коэффициент умножалась величина интенсивности всех гармоник, измеренных на ФС. Полученные значения интенсивностей гармоник были скорректированы с учетом амплитудно-частотной характеристики пленочного делителя мощности, установленного в ФС. Результаты измерений приведены на рис. 6 в виде графиков мощности гармоник для трех различных частот $F = 140, 150, 160$ ГГц.

Для построения графика на заданной частоте входного сигнала выбирались наибольшие значения мощности гармоник одного номера из ряда измерений. Величина подаваемой на вход умножителя мощности составляла 5–10 мВт. Для достижения режима насыщения УЧ (максимума мощности гармоники) для номеров 3–7 требовалась входная мощность на 1–2 дБ больше, чем для гармоник больших номеров. Мощность нечетных гармоник преобладает над мощностью четных только для номеров гармоник не выше 5–7. Для гармоник с более высокими номерами можно было подобрать такой уровень входного сигнала, при котором четная гармоника была интенсивней следующей, нечетной. Такое распределение интенсивностей между четными и нечетными гармониками получается из-за неабсолютной антисимметричности ВАХ диода. Наиболее высокочастотная гармоника $n = 54$ зарегистрирована на частоте 8.1 ТГц при входном сигнале с частотой 150 ГГц.

3. Обсуждение результатов

Графики зависимости мощности гармоник от частоты излучения, изображенные на рис. 6, обнаруживают две области. Первая область занимает частотный интервал до 1.5 ТГц. В ней сосредоточены гармоники с большой мощностью, имеющие номера до 10. График в этой области имеет обратную зависимость мощности от частоты с показателем степени -4 .

Вторая область гармоник с номерами гармоник более 10, простирающаяся до 8.1 ТГц, характеризуется степенной зависимостью мощности от частоты с показателем степени -2 .

Такое поведение кривых в области до 1.5 ТГц хорошо описывается огибающей гармоник спектра мощности периодической последовательности импульсов [9], форма которых близка к косинусоидальной:

$$P_n = \left[\frac{1}{\pi} \frac{\Delta l}{N} \frac{\cos \pi n \cdot F \tau_c}{1 - (2n \cdot F \tau_c)} \right]^2. \quad (1)$$

Во второй области, 1.5–1.8 ТГц, — описывается огибающей гармоник спектра мощности периодической после-

довательности прямоугольных импульсов [9]:

$$P_n = \left[\frac{\Delta I \sin \pi n \cdot F \tau_c}{N \pi n \cdot F \tau_c} \right]^2, \quad (2)$$

где P_n — мощность гармоники с номером n , ΔI — амплитуда токового импульса, N — скважность импульсов, n — номер гармоники ($n \neq 0$), τ_c , τ_r — длительности импульсов.

Причиной появления на графике рис. 6 двух областей с различными степенными зависимостями является различный уровень мощности входного сигнала на УЧ. В результате взаимодействия входного синусоидального напряжения с вольт-амперной характеристикой СР, имеющей участок с ОДП, формируются импульсы тока. Форма и длительность импульса зависят от напряжения входного сигнала. При напряжении входного сигнала, значительно превышающем пороговое напряжение U_c , происходит формирование косинусоидальных импульсов с длительностью τ_c . С уменьшением мощности входного сигнала в СР формируются короткие импульсы длительностью τ_r , форма которых приближается к прямоугольным импульсам. Из формул (1) и (2) видно, что мощности P_n периодически равняются нулю, когда числители этих формул равны нулю. Принимая частоту 1.5 ТГц в точке перегиба на графике рис. 6 за частоту первого нуля, можно рассчитать τ_c , n . Выбирая F равной 150 ГГц, по формулам (1) и (2) можно построить графики зависимости мощности гармоник от частоты. Таким образом, первое обращение в нуль происходит для номера гармоники, равного 10. Числитель формулы (1) обращается в нуль [9] в случае: $\pi n F \tau_c = \pi/2k$, где $k = 3, 5, 7, \dots$ целое число. Выбираем для первого нуля $k = 3$ и получаем $\tau_c = 1$ пс. Числитель формулы (2) обращается в нуль [9] в случае: $\pi n F \tau_r = \pi k$, где $k = 1, 2, 3, \dots$. Выбираем для первого нуля $k = 1$ и получаем $\tau_r = 667$ фс.

Необходимо учитывать, что осциллирующий характер огибающих спектра рис. 6 не выражен явно, так как в ходе измерений для каждой гармоники проводилась оптимизация мощности входного сигнала. Таким образом, полученные экспериментальные результаты совпадают с расчетными данными мощности периодических импульсных последовательностей.

4. Заключение

Экспериментальное исследование показало, что воздействие на СР гармонического напряжения с амплитудой больше напряжения порога вызывает образование коротких импульсов тока. Длительность импульсов определяется превышением амплитуды приложенного напряжения сигнала накачки над U_c . Большая часть мощности излучаемого сигнала множителем частоты содержится в первых десяти гармониках, которые занимают область частот 0.4–1.5 ТГц (частоты менее 0.4 ТГц фильтруются выходным волноводом, рис. 2). Меньшая

часть мощности сигнала содержится в гармониках с номерами более 10, которые занимают область спектра вплоть до 8 ТГц. При повышенном уровне мощности входного сигнала в УЧ формируется периодическая последовательность импульсов длительностью 1 пс. При меньшем уровне мощности (на 1–2 дБ) в УЧ формируется периодическая последовательность импульсов с более короткой длительностью 667 фс. Минимальное время установления фронтов импульсов вычисляется по наибольшей частоте измеренных гармоник. Частота гармоники с максимальным номером $n_{\max} = 54$ равна 8.1 ТГц. Поэтому минимальное время установления фронтов импульсов равно 123 фс, что совпадает по порядку величины с длительностью релаксации для сверхрешеток на GaAs/AlAs [10].

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 09-02-01350-а.

Список литературы

- [1] М.И. Финкель, С.Н. Масленников, Г.Н. Гольцман. Изв. вузов. Радиофизика, **48** (10–11), 964 (2005).
- [2] В.Л. Вакс, А.Н. Панин, С.А. Басов, А.В. Иллук, С.И. Приползин, Д.Г. Павельев, Ю.И. Кошуринов. Изв. вузов. Радиофизика, **52** (7), 569 (2009).
- [3] В.Л. Вакс, Ю.И. Кошуринов, Д.Г. Павельев, А.Н. Панин. Изв. вузов. Радиофизика, **48** (10–11), 933 (2005).
- [4] D.G. Paveliev, Yu.I. Koschurinov, V.M. Ustinov, A.E. Zhukov, F. Lewen, C. Endres, A.M. Baryshev, P. Khosropanah, Wen Zhang, K.F. Renk, B.I. Stahl, A. Semenov, H.-W. Huevers. 19th Int. Symp. Space Terahertz Technology (Groningen, The Netherlands, April 28-30, 2008) p. 319.
- [5] C.P. Endres, F. Lewen, T.F. Giesen, S. Schlemmer, D.G. Paveliev, Yu.I. Koschurinov, V.M. Ustinov, A.E. Zhukov. Rev. Sci. Instrum., **78**, 043 106 (2007).
- [6] Д.Г. Павельев, Н.В. Демарина, Ю.И. Кошуринов, А.П. Васильев, Е.С. Семенова, А.Е. Жуков, В.М. Устинов. ФТП, **38** (9), 1141 (2004).
- [7] L. Esaki, R. Tsu. IBM J. Res. Dev., **14**, 61 (1970).
- [8] Р.Дж. Белл. Введение в фурье-спектроскопию (М., Мир, 1975).
- [9] А.А. Харкевич. Спектры и анализ (М., ФМ, 1962).
- [10] B.I. Stalh, K.F. Renk, A. Rogl, T. Janzen, Yu.I. Koschurinov, D.G. Pavel'ev, V. Ustinov, A. Zhukov. Phys. Rev. Lett., **95**, 12 801 (2005).

Редактор Л.В. Беляков

Experimental study of frequency multipliers based on a semiconductor quantum superlattice GaAs/AlAs

D.G. Paveliev, Y.I. Koshurinov, A.S. Ivanov, A.N. Panin,
V.L. Vax*, V.I. Gavrilenko*, A.V. Antonov*,
V.M. Ustinov⁺, A.E. Zhukov[•]*

Lobachevskii University of Nizhny Novgorod,
603950 Nizhny Novgorod

* Institute for Physics of Microstructures,
Russian Academy of Sciences,
603950 Nizhny Novgorod

+ Ioffe Physical Technical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg

• St. Petersburg Academic University —
Nanotechnology Research and Education Center,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg

Abstract An experimental study of frequency multipliers based on a semiconductor quantum superlattice GaAs/AlAs is presented. Measured power spectrum of the harmonics of output signal frequency multiplier with the input of 140–160 GHz. The study used planar diodes with small active area size $1-2\ \mu\text{m}^2$. To fabricate the diodes used were grown by molecular beam epitaxy structure heavily doped superlattices with miniband width 24 meV. The measurements were performed using a Fourier transform spectrometer BOMEM DA3.36, equipped with a receiver based on cooled to liquid helium bolometer. The results of measurements plot the power of the harmonics of the frequency range 0.4 to 8.1 THz. Determined that the distribution of microwave power on the harmonic number is close to the sequence of alternating pulses arising in the diode circuit in excess of the applied voltage input above the threshold voltage of the diode. Computed from measurements of the minimum time setting of the pulse and pulse duration equal to 123 fs and 667 fs.